

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 114 (1988)
Heft: 25

Artikel: Fusion thermonucléaire contrôlée: le point sur la recherche
Autor: Paris, Pierre Jean
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-76858>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Fusion thermonucléaire contrôlée

Le point sur la recherche

Au cours de ces cinq dernières années, trois grandes installations expérimentales du type tokamak ont été mises en exploitation : le JET en Europe, le TFTR aux Etats-Unis et le JT60 au Japon. Après une période d'ajustement, les maladies d'enfance étant soignées, ces expériences ont produit des résultats et des performances qui méritent qu'on s'y arrête. Les objectifs atteints sont prometteurs, même si les problèmes rencontrés n'ont pas tous trouvé de solution. Les caractéristiques des plasmas confinés dans ces machines – densité, température et temps de confinement – ont été considérablement améliorées.

Nous renvoyons nos lecteurs aux numéros 6/83 et 7/83 d'Ingénieurs et architectes suisses, dans lesquels ils trouveront une introduction à la fusion thermonucléaire et une description de JET (Joint European Torus).

Il s'agit dans ce domaine d'une recherche de longue haleine, qui passe par de grands moments d'espoir et de réussite, mais aussi par de grandes

PAR PIERRE JEAN PARIS,
LAUSANNE

périodes de doute. Les problèmes rencontrés ne se résolvent pas vite, et il faut quelquefois plusieurs années – souvent liées d'ailleurs à la construction de nouvelles installations expérimentales – pour les comprendre définitivement et leur apporter une solution. Ces problèmes-là résolus, il se trouve que de nouvelles embûches apparaissent. On ne comprend pas encore très bien le milieu dans lequel on tente de démontrer la faisabilité scientifique de la fusion thermonucléaire contrôlée en laboratoire. Ce milieu, c'est ce qu'on appelle le « plasma », état ultime de la matière à très haute température où les atomes sont dissociés en ions et électrons.

En laboratoire, on tente de reproduire le processus physique proche de celui qui fait briller les étoiles. A la fin de cette décennie, ou au début de la suivante, nous aurons pu reproduire, dans ces machines sophistiquées qu'on appelle « tokamaks » (de l'acronyme russe signifiant « courant dans une chambre magnétique torique »), les conditions nécessaires à la nucléosynthèse des atomes légers (annexe I) de manière énergétiquement viable. C'est-à-dire qu'un grand nombre de réactions de fusion devraient avoir lieu pour que l'énergie libérée compense dans un premier temps l'énergie investie pour créer le processus. C'est en gros le critère de Lawson (annexe II). La « carotte » : une énergie sans problème de combustible ; les isotopes de l'hydrogène, utilisés comme réactants, existent en quantité abondante sur la planète. En cas de réussite du projet, ils permettraient de produire sans problème 100 milliards de fois l'énergie totale consommée dans le monde en 1986, ce qui est évidemment plus

simple à dire qu'à réaliser. En effet : c'est en janvier 1957 que le physicien britannique John D. Lawson avait formulé les conditions rigoureuses de viabilité énergétique d'un réacteur thermonucléaire.

Rétrospective : un peu d'histoire

Au départ, au début des années cinquante, trois pays avaient entrepris des recherches civiles et militaires pour produire le plus vite possible de l'énergie atomique à partir de la fusion des isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium. Côté militaire, on sait ce qui s'est passé : les Etats-Unis ont réalisé la bombe H en 1951, l'Union soviétique en 1953 et la Grande-Bretagne en 1957. Mais côté civil, c'est-à-dire côté fusion thermonucléaire contrôlée, après l'enthousiasme de la première moitié des années cinquante où l'on pensait faire vite, l'élan s'est brisé devant les difficultés rencontrées.

Le programme tokamak (fig. A)¹ démarra en 1955, sous la direction de M. A. Leontovich et L. A. Artsimovich, à l'Institut Kurchatov de Moscou. Le TMP, qui était en quelque sorte le progéniteur (l'ancêtre) du tokamak actuel, avait déjà des dimensions appréciables ($R = 0,8$ m ; $a = 0,13$ m et $B_T = 1,5$ T). Par rapport aux autres expériences, il démontrait surtout la possibilité de maintenir dans un état quasi stationnaire une décharge dans un fort champ magnétique. Mais les décharges contenaient une fraction appréciable d'impuretés issues des parois de l'enceinte, en conséquence la température du plasma était peu élevée : $\sim 100\,000^\circ\text{C}$. C'est d'ailleurs ce défaut qui fit que ce système de confinement ne fut pas accepté plus tôt par les chercheurs.

Des prestations hors du commun

Au cours de la 3^e conférence internationale qui avait lieu à Novosibirsk en 1968, les Soviétiques annoncèrent les résultats obtenus dans le tokamak T-3 de l'Institut Kurchatov. Le plasma y avait été confiné pendant un temps

beaucoup plus long qu'un « temps critique » sur lequel on butait jusqu'alors. D'autre part, les électrons avaient atteint une température de $10\,000\,000^\circ\text{C}$ et les ions de $3\,000\,000^\circ\text{C}$, cela pendant quelques millièmes de seconde. La communauté scientifique se montra quelque peu sceptique, car la méthode de mesure utilisée pour déterminer la température des électrons était passablement ambiguë. Artsimovich invita alors une équipe de chercheurs britanniques du laboratoire de Culham à venir en Union soviétique avec leur équipement, qui passait pour être le plus performant dans la mesure de la température électronique. La technique employée – la diffusion Thomson – montra l'année suivante que les résultats étaient meilleurs que ceux publiés par les Soviétiques. Cette collaboration anglo-soviétique donne la preuve de la complémentarité internationale des recherches dans le domaine civil. Mais elle met aussi en évidence l'apparition de la haute technologie dans le domaine, ainsi que d'une nouvelle technique sophistiquée : le diagnostic du plasma. Les résultats annoncèrent le déclin des « expériences éclairs ». Il ne restait alors dans la fusion par confinement magnétique, hormis les tokamaks, que les « stellerators » et les machines à « miroirs magnétiques », qui avaient aussi leurs qualités, notamment dans le domaine de la stabilité. En 1968 aussi, les premières expériences utilisant le laser comme moyen de produire des plasmas thermonucléaires furent entreprises.

Adoption du tokamak

Immédiatement après la vérification des bonnes performances de T-3, des programmes de construction de tokamaks se multiplièrent. A Princeton, on convertit le stellerator C en un tokamak appelé ST ; au laboratoire d'Oak Ridge (Etats-Unis), ORMAK fut construit ; TFR (fig. C), à Fontenay-aux-Roses (France) ; CLEO, à Culham (Grande-Bretagne) ; Pulsator, à Garching (Allemagne) et JFT II, à Jaeri – Tokai Mura – (Japon). Le Japon s'était lancé dans la course en 1958 après la Conférence de Genève. Durant les années qui suivirent, les progrès allaient être remarquables ; l'une après l'autre, les expériences dépassaient les performances de T-3.

En 1971, dans le nouveau tokamak de Kurchatov, T-4, des électrons atteignaient $20\,000\,000^\circ\text{C}$ et les ions $600\,000^\circ\text{C}$, cela pendant plus de 10 millièmes de seconde. Les résultats obtenus sur ST à Princeton étaient identiques. Toujours à Kurchatov, T-6, cons-

¹ Les figures indiquées par des lettres se trouvent en hors-texte au centre de ce numéro.

truit avec un « tore dodu », c'est-à-dire en petit rapport d'aspect (R/a), abordait déjà le problème de la stabilité idéale en adoptant une coque; c'est aussi dans cette installation que fut étudiée en détail l'*instabilité de disruption*: la décharge devient tellement instable que le plasma se libère de sa cage magnétique et va violemment heurter le tore. Cette instabilité violente peut même endommager les parois de l'enceinte. Une analyse systématique de la viabilité du plasma (courant-densité) a été entreprise en 1976-1979 à Culham par J. Hugill.

Une autre étude, aboutissant empiriquement à une loi d'échelle, avait été effectuée par Murakami à Oak Ridge en 1976.

Mais c'est en 1974 que de nouvelles tentatives furent amorcées. Dans un tokamak, le courant fournissant l'énergie de chauffage des particules n'est pas suffisant lorsque celles-ci ont atteint une certaine température (20 à 30 millions de degrés Celsius). Car une des propriétés particulières du plasma réside dans le fait que, à haute température, il devient excellent conducteur électrique (20 fois meilleur que le cuivre à température ambiante) et le chauffage par effet Joule perd de son efficacité. C'est ce qui faisait qu'à partir d'un certain courant, la température électronique sur TFR ne dépassait pas 25 000 000 °C, ce qui se vérifiait aussi sur ST. On avait alors cru que le plasma était « pollué » par des impuretés issues des parois de l'enceinte et que celles-ci atteignaient le centre de la décharge, refroidissant les électrons. Des essais furent effectués sur ST, TFR et ORMAK sans pouvoir démontrer une concentration significativement élevée au centre de la décharge.

Le chauffage auxiliaire

Il fallait donc trouver d'autres méthodes pour chauffer. Un nouveau type d'expériences débuta alors: chercher le meilleur moyen de chauffer jusqu'aux cent millions de degrés Celsius nécessaires! Trois schémas différents (fig. B) de chauffage auxiliaire – en plus du chauffage associé au courant – sont utilisés avec des taux de réussites divers.

- Le premier consiste à *injecter dans le plasma des particules neutres très énergétiques*, qui chauffent celui-ci par collisions. Pourquoi neutres? Parce qu'il faut pénétrer dans le champ magnétique qui confine le plasma. Des particules électriquement chargées seraient défléchies et ne parviendraient pas jusqu'au centre du plasma.
- Le deuxième utilise la propriété qu'ont les *ondes électromagnétiques*, à travers diverses résonances, de se coupler au plasma. L'énergie

contenue dans les ondes est absorbée par les particules du plasma. Un peu comme dans un four à micro-ondes où les aliments sont chauffés par l'énergie que l'onde dépose en eux. Suivant le type de fréquence utilisée, cette méthode porte différents noms. Au Centre de recherches en physique des plasmas de l'EPFL (CRPP), la recherche sur le tokamak TCA a porté sur le chauffage du plasma par l'absorption d'énergie déposée par les ondes dites d'Alfvén. (L'efficacité du chauffage par cette méthode s'est montrée compétitive par rapport aux autres méthodes utilisant des ondes différentes.)

Enfin le dernier schéma fait intervenir des propriétés thermodynamiques: la *compression adiabatique*. En comprimant le plasma dans un volume plus restreint, on augmente à la fois sa densité et sa température. Par analogie, si l'on obture l'embout d'une pompe à vélo et qu'on actionne le mécanisme, on comprimera l'air contenu dans la partie hermétique et on produira de la chaleur. C'est ce qu'a démontré, en 1974, le tokamak ATC à Princeton: la densité passait de 10^{19} m^{-3} à 10^{20} m^{-3} et la température des ions de 1 000 000 °C à 6 000 000 °C. Ce procédé, qui fait intervenir trop d'énergie magnétique – coûteuse –, avait été momentanément abandonné en Occident; l'Union soviétique en revanche maintenait un programme avec cette méthode (TUMAN 2A). Un regain d'intérêt s'est aujourd'hui manifesté aux Etats-Unis, où on l'utilise sur TFTR (fig. 1).

Nous nous arrêterons sur le développement des deux premières méthodes, car ce sont ces chauffages complémentaires qui marqueront les progrès obtenus au cours de cette dernière décennie.

Injecteurs de neutres

Les expériences portant sur l'injection de neutres ont débuté aux Etats-Unis sur le tokamak ORMAK (Oak Ridge). Elles ont été rapidement suivies par des travaux sur CLEO (Grande-Bretagne), TFR (France) et ATC. En 1974, l'équipe d'Oak Ridge mettait en évidence une augmentation de la *température ionique* du plasma (avec 400 kW de puissance du faisceau de neutres, la température passait de 2 000 000 °C à 6 000 000 °C). L'influence de l'injection de neutres sur le temps de confinement de l'énergie ne pouvait alors pas être détectée, la puissance utilisée étant faible.

Malheureusement, on se rendra compte plus tard que, quel que soit le chauffage auxiliaire utilisé, le temps de confinement de l'énergie contenue dans le plasma se détériore. C'est pourtant grâce à cette méthode que les plus hautes températures seront obtenues dans les tokamaks. Le développement des injecteurs de particules neutres est toujours d'actualité. Au début des années septante, on disposait de faisceaux dont l'énergie était de l'ordre de 10 keV pendant un temps très bref: $\sim 0,5$ s (puissance maximale: ~ 100 kW), alors qu'aujourd'hui on produit des faisceaux dont l'énergie est supérieure à 150 keV pendant une période de l'ordre de 30 s et la puissance maximale des *injecteurs* multi-

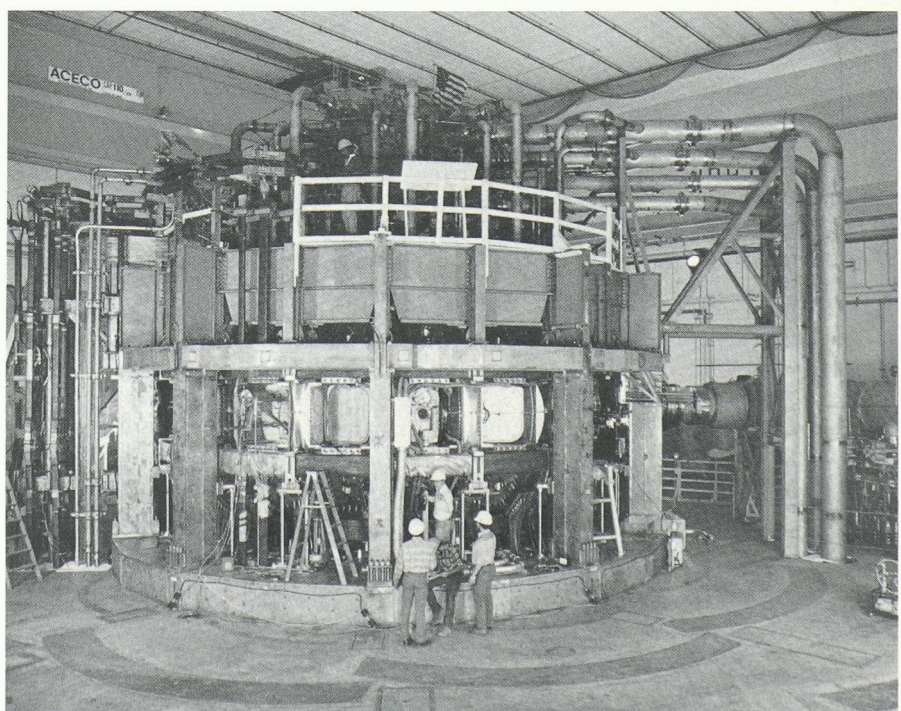


Fig. 1. – TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), au Princeton Plasma Physics Laboratory aux Etats-Unis: une des trois grandes installations expérimentales.

ples voisine de 10 MW. Pour qu'un faisceau de neutres pénètre bien dans le plasma de fusion, il faut que l'énergie soit élevée (100 à 200 keV); à ce niveau, l'efficacité (liée à la neutralisation des ions) de l'injecteur de neutres décroît rapidement lorsqu'on part d'un faisceau initial d'ions positifs neutralisés, elle serait supérieure si l'on avait à neutraliser un faisceau d'ions négatifs. Les spécialistes de ce domaine consacrent leurs efforts au développement de tels injecteurs.

Les ondes électromagnétiques : chauffage et génération de courant

L'utilisation d'ondes électromagnétiques appropriées au chauffage spécifique des différentes particules contenues dans le plasma a été entreprise dans les années soixante en Union soviétique et aux Etats-Unis sur les tokamaks, les stellarators et les machines à miroirs. La compréhension des mécanismes de chauffage et de pénétration des ondes dans le plasma fournit encore, malgré tout, des sujets actuels de recherche. Une étude expérimentale systématique a montré récemment que pratiquement toutes les ondes (ion cyclotron, électron cyclotron, hybride inférieure, ondes d'Alfvén, etc.) possèdent des qualités quant au chauffage des particules du plasma. Cependant, l'application est souvent accompagnée d'une augmentation d'impuretés. On note aussi une dégradation dans le temps de confinement de l'énergie.

Dans les années septante et huitante, les *ondes cyclotroniques ioniques* ont été employées sur une large échelle (TFR, ST, PLT, Alcator C, Uragan 3, T-10, FT2M) et les performances obtenues ont contribué à ce qu'elles ont été choisies sur les expériences JET (fig. 2) et JT60 (fig. D).

L'onde hybride inférieure, choisie initialement pour chauffer le plasma, est maintenant mise en œuvre pour *générer du courant non inductif* dans le plasma. La première expérience de ce type a été réalisée en 1980 sur Versator au Massachusetts Institute of Technology (MIT, Etats-Unis). Elle fut suivie, en 1982, d'une autre démonstration, toujours au MIT, sur Alcator C : avec 1 MW de puissance, une onde à 4,6 GHz avait pu générer un courant de 230 kA dans le plasma. La même année, sur PLT (fig. E) à Princeton, un courant de 450 kA était engendré dans le plasma à l'aide de la même méthode; à Grenoble également, les essais étaient concluants sur Petula. La méthode se généralisa. Actuellement, le record est détenu par JT60 qui, en 1986, a généré plus de 1 MA avec 2 MW de puissance. Un inconvénient de cette méthode réside dans le fait que l'efficacité décroît lorsque la densité augmente, et au-delà d'une densité criti-

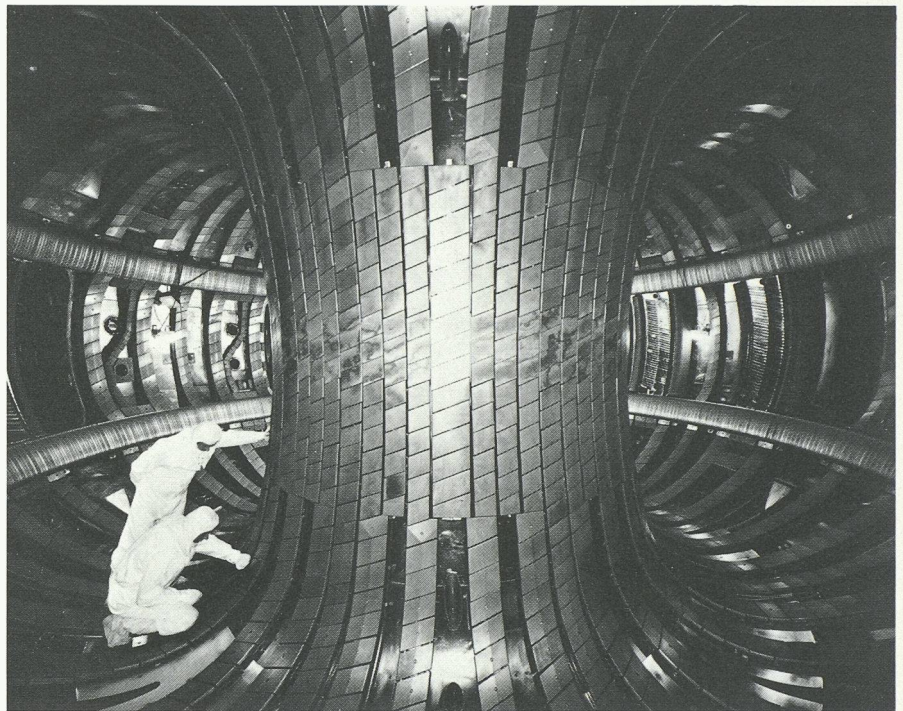


Fig. 2. – JET (Joint European Torus): l'expérience européenne située près d'Oxford en Grande-Bretagne. L'intérieur du tore est protégé par des tuiles de carbone; on distingue les limiteurs en ceinture et trois antennes pour le chauffage HF par ondes cyclotroniques ioniques.

que, ça ne marche plus. On pense aussi pouvoir exploiter la génération de courant non inductif par l'emploi d'*ondes cyclotroniques électroniques* à très haute fréquence (>100 GHz), mais jusqu'à présent, il n'y a pas eu de démonstration expérimentale claire. Ces ondes peuvent être utilisées aussi pour chauffer efficacement les électrons du plasma. Le couplage des ondes au plasma est excellent et a permis, en 1984, de presque tripler la température électronique dans le tokamak T-10 (de 1,4 keV à 3,8 keV avec seulement 0,9 MW). Il semble aussi que la méthode perturbe moins le plasma que les autres. Cette technique peut être également employée dans le contrôle du profil de la température des électrons, ce qui aurait pour effet d'influencer la distribution de courant et la stabilité du plasma. Actuellement, il faut développer les tubes de puissance à ces hautes fréquences – les gyrotrons – pour pouvoir employer cette méthode sur les grands tokamaks. C'est le cas à Lausanne (CRPP-EPFL) où un projet important de développement d'un gyrotron de 120 GHz et de 200 kW est en phase d'expérimentation (annexe IV). Ce projet, réalisé en collaboration avec l'industrie suisse (BBC), participe à l'effort européen pour disposer rapidement de telles sources à hyperfréquences.

Progrès dans le $n_0\tau_E$

Parmi les progrès remarquables accomplis au cours de ces dernières années, citons notamment les records du $n_0\tau_E$ réalisés sur Alcator A

et Alcator C (MIT, Etats-Unis). En 1975 et en 1978, Alcator A avait obtenu respectivement $n_0\tau_E = 1 \cdot 10^{18} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ et $n_0\tau_E = 3 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$. En 1983, Alcator C avait même dépassé le critère du breakeven $n_0\tau_E = 8 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$. Ce dernier résultat avait été atteint grâce à la recharge de « combustible » dans le plasma par une technique développée à Oak Ridge : l'injection de glaçons d'hydrogène. Cependant, si le temps de confinement τ_E et la densité n_0 augmentaient, les températures ioniques et électroniques chutaient brutalement, puis recouvraient leur niveau en 15 à 40 millisecondes; la température des ions dépassant même la valeur avant injection.

La recharge du combustible pendant la décharge

Les *injecteurs de glaçons d'hydrogène* ou de deutérium ont été employés pour la première fois en 1977 sur ORMAK à Oak Ridge pour approvisionner en combustible un plasma existant. L'utilisation d'un tel procédé pour augmenter la densité du plasma ou le recharger en hydrogène avait été proposée en 1954 par L. Spitzer. Jusqu'alors, on y pourvoyait en injectant des « bouffées » de gaz à l'aide de vannes piézoélectriques rapides. Cette technique avait un désavantage, celui d'alimenter le plasma par le bord et de refroidir la périphérie, modifiant ainsi le profil de température et de densité. Les glaçons fortement accélérés ont une grande vitesse à l'entrée du tore, ce qui leur permet d'atteindre le centre du plasma – où l'on désire conserver

temps de confinement de l'énergie τ_E a atteint le maximum de 0,8 s (record mondial absolu aussi). Les valeurs des températures ioniques et électrons étant alors de 3 keV² et de 4 keV pour une densité moyenne de $4 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3}$. Grâce au chauffage additionnel, les températures ont pu être améliorées. Pour le chauffage haute fréquence (HF) – ondes cyclotroniques ioniques –, trois antennes ont été installées depuis le début de 1986. Les fréquences utilisées, de 25 à 50 MHz, permettent de chauffer le plasma de deutérium à travers les fréquences de résonance des particules minoritaires H^+ et He^{3++} ajoutées en faible proportion ($\sim 10\%$) au plasma. Ainsi, avec une puissance couplée de 7 MW, la température maximale des électrons au centre de la décharge était de 7,5 keV. La seconde méthode utilisée, comme chauffage additionnel, est l'injection de particules neutres énergétiques. Un injecteur à sources multiples a été rendu opérationnel au début de 1986, il a permis d'injecter jusqu'à 6 MW d'atomes H^0 à 80 keV ou encore 9 MW d'atomes D^0 à 80 keV. Avec cette méthode, la température maximale atteignable dans le plasma dépend de la densité du plasma. Dans des densités moyennes à hautes du plasma, les ions ont été chauffés jusqu'à 6,5 keV et les électrons jusqu'à 4,8 keV (avec 5,5 MW de faisceaux neutres). Dans des décharges à basse densité, des températures ioniques extrêmes jusqu'à 14 keV ont été atteintes. Ces résultats rejoignent presque ceux obtenus sur TFTR (Princeton) en été 1986. Des décharges, en juillet 1986, avaient produit des températures ioniques de 20 keV dans des plasmas de basse densité, le $n\tau_E$ était de $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$. Ces expériences ont été réalisées avec des faisceaux de deutérium atomique, et le plasma était très ténu, ce qui a abouti à « produire » ce plasma de 20 keV grâce aux ions décélérés issus du faisceau seul. Avec ces températures, et en ayant utilisé des décharges D-T (deutérium-tritium), la puissance issue du plasma aurait été égale au quart de la puissance fournie. Dans d'autres conditions, TFTR avait atteint au début de 1986 un record dans $n\tau_E$ relatif au breakeven; des décharges où les ions avaient 1,2 keV avaient démontré un $n\tau_E \approx 1,5 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$, ce qui dépassait le seuil du critère de Lawson (fig. 4). Quelques éléments nous permettent de penser qu'un autocourant créé par le plasma lui-même (dû éventuellement à des particules rapides piégées dans des orbites très particulières) aurait été généré. Prévu par la théorie, cela permettrait d'économiser sur le transformateur ohmique. Enfin, deux derniers résultats qui pourraient avoir des conséquences positives sur les recherches futures ont

été acquis sur l'expérience JT60 en 1986. D'une part, un courant de $\sim 1,7 \text{ MA}$ a été généré par des méthodes non inductives, utilisant la *fréquence hybride inférieure* (2 GHz–2 MW); d'autre part, l'utilisation d'un *limiteur magnétique* (divertor) a permis de réduire la puissance rayonnée par le plasma d'un facteur 10, signe que les impuretés produites à la périphérie du plasma pénètrent moins dans celui-ci et que, en plus, elles sont en grande partie éliminées par cet écorceur magnétique.

Le point courant 1988

Au début de 1987, des arrêts dus à l'installation de nouvelles sources de chauffage complémentaire avaient été prévus sur les deux grandes expériences, ce qui a quelque peu ralenti les campagnes expérimentales.

TFTR a notamment reçu de nouveaux injecteurs de neutres dont la puissance produite a été de l'ordre de 25 MW pendant 2 s (faisceaux de D^0 à 120 keV). Ceux-ci ont été développés au Lawrence Berkeley Laboratory. En outre, 4 MW de chauffage ICRH ont été installés.

Mentionnons que, sur TFTR, les expériences utilisant 4 injecteurs de neutres ont été maintenues. C'est ainsi que des limites de fonctionnement, dans le cas des «super-tirs» (basse densité, haute puissance des particules neutres), ont été établies: on peut maintenir les «super-tirs», à courant de plasma constant, jusqu'à une certaine puissance des injections de particules neutres. Ainsi, des températures $T_i = 30 \text{ keV}$ ont pu être obtenues.

Sur JET, on a procédé à l'installation d'un second injecteur permettant d'augmenter la puissance installée à 20 MW (pour D^0 à 80 keV). En 1988, la puissance RF a été progressivement augmentée à un total de 32 MW pendant 20 s.

Le courant de plasma a été augmenté à 7 MA dans le courant de l'été 1988 (dans une décharge avec limiteur). On envisage de plus d'accéder à un courant de 4 MA avec un écorceur magnétique (points X: diverteur magnétique singulier ou double). Il a enfin été planifié de générer du courant par onde hybride inférieure, comme dans JT60. Tout cela afin d'obtenir un produit $n_i T_i \tau_E$ significatif pour réaliser la puissance de manière intéressante. La meilleure valeur atteinte par JET est jusqu'à présent de $n_i T_i \tau_E \approx 3 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$, qui doit être comparée à $7 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ pour obtenir une fraction importante de chauffage dû aux particules α (hélium) (condition de breakeven). Cette valeur peut encore être comparée à $3 \cdot 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ qui devrait permettre à JET d'atteindre l'auto-entre-

tien par les particules α du plasma thermonucléaire sans apport d'énergie externe (condition d'ignition).

De hautes températures ont aussi été obtenues sur JT60, avec 20 MW d'injection de neutres, la température des ions a été de 11 keV (dans des décharges avec limiteurs) et de 6 keV (avec diverteur magnétique).

De grands travaux sont prévus sur JT60, notamment le changement de la chambre à vide: l'écorceur magnétique latéral n'était pas disposé convenablement (en haut ou en bas de la chambre à vide semble être la position idéale). En même temps, il est prévu d'augmenter le courant du plasma à 7 MA (décharge avec limiteur) et 6 MA (diverteur magnétique), ce qui repoussera à 1990 la reprise des activités expérimentales.

Enfin quelques résultats donnent à penser que nous aurons bientôt des explications en ce qui concerne les modes de bon confinement du plasma et de moindre dégradation du temps de confinement. En effet, on a montré l'existence, sur JFT2M, de modes h avec des décharges utilisant des limiteurs placés dans la zone de fort champ magnétique – configuration dont les résultats sont comparables avec des décharges produites, sur la même expérience, avec un diverteur magnétique singulier. Sur ASDEX et Doublet III D, des expériences récentes ont fait état de conservation du temps de confinement (τ_E) en mode de fonctionnement h , alors que la puissance totale investie (ohmique et injection de neutres) était de plusieurs mégawatts.

Perspectives

En fonction des résultats qu'obtiendront JET et TFTR, une étape cruciale se jouera vers 1991-1992 dans l'utilisation des décharges constituées d'un mélange de deutérium et de tritium. Il n'en sera pas de même pour JT60, où cette phase de démonstration n'est pas envisagée (fig. H).

D'ores et déjà, des projets nouveaux sont en cours d'élaboration: CIT aux Etats-Unis, NET en Europe, FER au Japon. Ces expériences devront supporter des plasmas thermonucléaires de longue durée (1 à plusieurs dizaines de minutes) sans pour autant concevoir la récupération d'énergie comme prioritaire. Il sera alors possible de déterminer les sujets nouveaux de recherches tant physiques que technologiques.

² 1 keV $\approx 11\,000\,000^\circ\text{C}$.

³ On représente fréquemment le produit $n_i T_i \tau_E$ à la place du produit $n_i \tau_E$, car il est plus explicite pour le contenu énergétique de la formulation du critère de Lawson.

Lors des rencontres au sommet, les grands pays industrialisés ont souligné que l'effort de coopération internationale serait renforcé et que des programmes mondiaux – tel, dans le passé, celui d'INTOR – devraient être relancés. Conséquence directe de cette politique, les négociations récentes (octobre 1987) entre la Communauté européenne, le Japon, l'Union soviétique et les Etats-Unis ont abouti à la création du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Le site qui devrait abriter les 40 physiciens du programme a été choisi pour être proche de l'équipe européenne en charge du programme NET à Garching (près de Munich en République fédérale allemande).

Ce programme porte sur le développement, pour la fin de 1990, d'un projet de réacteur thermonucléaire expérimental, dans le but de pourvoir les quatre protagonistes d'un projet réalisable soit dans leur propre programme, soit dans un programme plus vaste de collaboration internationale.

Entre-temps, des projets employant des aimants supraconducteurs comme Tore Supra à Cadarache en France (fig. 5) et T-15 (Kurchatov, Union soviétique) verront le jour et apporteront un nouvel éclairage à la construction des tokamaks, en abordant une partie technologique importante. Tore Supra a été mis en route au début d'avril 1988, les aimants supraconducteurs en NbTi seront refroidis à l'hélium superfluide à 1,8°K sous pression atmosphérique, selon une conception toute nouvelle. Quant à T-15, sa mise en route est prévue pour la fin de 1988 ou le début de 1989; les retards sont dus en outre à la fabrication des bobinages supraconducteurs en Nb₃Sn.

Il se peut que, avec le développement rapide dans la technologie des supraconducteurs à des températures plus élevées, les machines dites à bas β (rapport de l'énergie contenue dans le plasma sur l'énergie magnétique) deviennent communément acceptées. Encore faut-il rester très prudent car, entre la fabrication des échantillons supraconducteurs et la réalisation de grands bobinages, il reste un gigantesque pas à franchir.

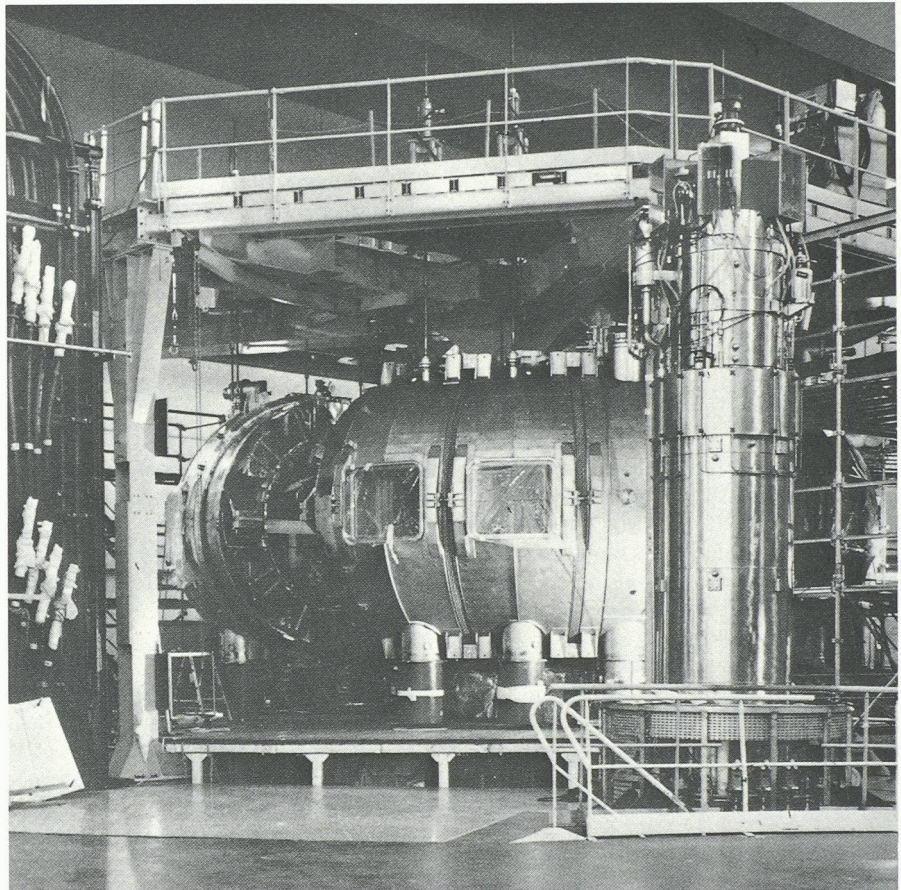
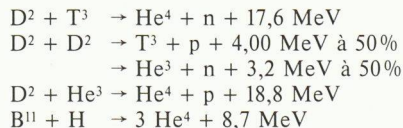


Fig. 5. – Tore Supra, installé à Cadarache en France. Cette installation a été mise en route au début d'avril 1988. C'est le plus grand tokamak à enroulements supraconducteurs.

Annexe I

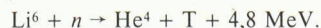
Les réactions principales de fusion



Le tritium est un élément radioactif dont le temps de décroissance caractéristique (demi-vie) est de 12,3 ans. C'est un émetteur β , qui permet aussi d'obtenir l'isotope He³,



Ce sont des réactions de fission du lithium qui permettent d'obtenir le tritium. L'isotope Li⁶ donne lieu à une réaction exothermique qui, en cas de régénération du tritium dans le «manteau du réacteur», permettrait d'augmenter l'énergie récupérée,



L'isotope Li⁷, quant à lui, donne lieu à une réaction endothermique dont le neutron secondaire produit augmente le rapport de régénération du tritium, son énergie étant suffisante,



Il existe 7,4% de Li⁶ contenu dans le lithium naturel. Si une fraction supérieure de Li⁶ était nécessaire, l'enrichissement est relativement peu coûteux.

Si la réaction D-T semble manifestement être la plus réalisable actuellement, les réactions suivantes sont envisageables, quoiqu'elles nécessitent des conditions de température plus élevées:

- D-D, dont les réserves de combustible sont plus grandes;
- D-He³, où le He³ inexistant à l'état naturel peut être produit par la désintégration du tritium, ou par la réaction D-D;
- H-B¹¹, qui ne produit pas de neutrons.

Annexe II

Libération de l'énergie de fusion:

Breakeven, critère de Lawson et condition d'ignition

Les sections efficaces de réactions font apparaître une probabilité maximale lorsque les noyaux sont à températures très élevées. L'agitation thermique des atomes est alors telle que ceux-ci éclatent et forment un mélange d'ions et électrons, c'est-à-dire un plasma dont une des propriétés est de réagir aux champs électriques et magnétiques. Cette caractéristique est utilisée dans la réalisation de la fusion magnétique (lente).

Il n'est évidemment pas possible de maintenir un plasma à une température de 100 millions de degrés en contact avec une paroi matérielle, il faut le contenir et l'isoler thermiquement: c'est le problème de l'isolation ou encore du confinement de l'énergie. La qualité de cette isolation peut être comparée, par analogie, à celle d'une bouteille thermos: plus longtemps le liquide contenu dans cette bouteille restera à sa température initiale, meilleure sera l'efficacité de l'isolation. De plus, les particules devant être maintenues à ces hautes

Adresse de l'auteur:

Pierre Jean Paris
Ing. physicien DPE/SIA
Centre de recherches en physique
des plasmas
EPFL
21, av. des Bains
1007 Lausanne

Bibliographie

- TAMM, I. E.: «Travaux de 1951», *Plasma physics and the problem of controlled thermonuclear reactions*, vol. I, pp. 1-20, éd. M. A. Leontovich, Pergamon Press, 1961.
- SAKHAROV, A. D.: «Travaux de 1951», *Plasma physics and the problem of controlled thermonuclear reactions*, vol. I, pp. 21-34, éd. M. A. Leontovich, Pergamon Press, 1961.
- GROSS, R.: *Fusion energy*, John Wiley, 1984.
- MIYAMOTO, K.: *Plasma physics for nuclear fusion*, M.I.T. Press, 1980.
- «25th Anniversary of nuclear fusion», *Nuclear Fusion*, vol. 25, 9, 1985.
- Fusion technology*, 14^e Conférence SOFT, publié par la Commission des communautés européennes, Pergamon Press, 1986.
- Plasma Physics and Nuclear Fusion Research*, 11^e conférence internationale IAEA, éd. IAEA, 1986.
- Plasma Physics and Controlled Fusion*, 14^e Conférence EPS, éd. F. Engelmann, Institute of Physics and Pergamon Press, 1987.

températures, il faut compenser les pertes énergétiques dues aux rayonnements ou à la convection.

De façon simple, pour un plasma ne contenant que les combustibles deutérium et tritium (sans tenir compte des impuretés), on peut résumer les conditions viables de l'énergie de fusion sous trois formes. L'objectif initial le plus évident est que l'énergie produite par les réactions de fusion soit au moins égale à celle investie. Cette formulation aboutit à la première relation de *breakeven*: pour cela il faut que $n_0 \tau_E \geq 7 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ pour un mélange D-T (50%-50%) à une température de 100 000 000 °C. Une deuxième relation, connue sous l'appellation *critère de Lawson*, tient compte des conditions d'opération d'un réacteur à fusion (fig. 6). John D. Lawson fut le premier à reconnaître l'importance du confinement énergétique du plasma - traduit dans la valeur $n_0 \tau_E$. Il a envisagé, pour le maintien d'un mélange D-T à 100 000 000 °C, de récupérer une partie de l'énergie issue des réactions de fusion, de la convertir ($\eta \approx 0,33$) et finalement de la restituer au plasma pour compenser toutes les pertes, notamment celles dues au rayonnement de freinage des particules à haute énergie. La relation est alors plus difficile à réaliser que la première, il faut que $n_0 \tau_E \geq 1,4 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$.

Enfin, il existe une troisième condition encore plus sévère pour qu'un plasma thermonucléaire continue de «brûler» sans apport d'énergie extérieure: la condition d'*ignition* (ou auto-entretien). Elle sous-entend que l'énergie des particules α (hélium) issues des réactions de fusion compense toutes les fuites d'énergie et contribue au maintien des conditions de réaction de fusion. Ce critère est plus difficile à satisfaire: $n_0 \tau_E > 2 \cdot 10^{20}$ particules (à 100 millions de degrés) par $\text{m}^3 \cdot \text{s}$.

Ces critères doivent être reconsidérés dans le cas d'un plasma contenant des impuretés; l'émission de raies de freinage devenant alors très élevée (même plus que le rayonnement de freinage et de recombinaison), le seuil énergétique viable des réactions est repoussé. Et même, si les impuretés représentent une fraction allant de 0,1 à 2% selon les atomes du plasma, ce seuil ne serait pas atteint.

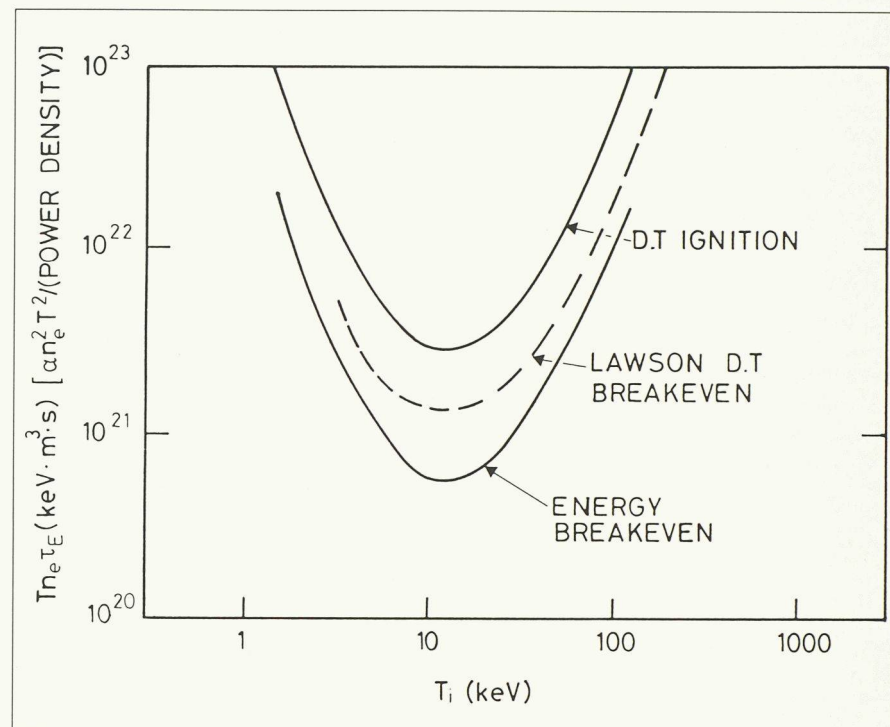


Fig. 6. - Le critère de Lawson: les trois «barrières» à franchir.

Annexe III

Un nouveau tokamak en Suisse: TCV, le tokamak à configuration variable

Le Centre de recherches en physique des plasmas (CRPP) est devenu expert, au cours de ces dernières années, dans le fonctionnement et l'utilisation des tokamaks en tant qu'installations de recherche vouées au domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée. Le tokamak TCA (fig. G), construit pour étudier le chauffage auxiliaire (par ondes d'Alfvén) à celui produit par le courant circulant dans la décharge torique (effet Joule), avait été rendu opérationnel en 1980. Les résultats obtenus ont été comparables à ceux des autres méthodes de chauffage HF. Mentionnons qu'il est nécessaire d'utiliser une méthode complémentaire au chauffage ohmique pour porter les particules du plasma aux cent millions de degrés Celsius nécessaires pour que des réactions de fusion aient lieu en grand nombre. La raison en est que le plasma à haute température devient bon conducteur électrique et l'effet Joule perd alors toute son efficacité.

En outre, le groupe théorique du CRPP s'est spécialisé entre autres dans l'étude des problèmes de la stabilité et de l'équilibre du plasma d'un tokamak. Il a trouvé, en introduisant dans ses codes numériques les caractéristiques et les résultats de diverses installations mondiales, une loi d'échelle semi-empirique qui permet d'exprimer la pression maximale d'un plasma pouvant être confiné dans une configuration tokamak.

Fort de ces expériences et des études entreprises ces dernières années concernant les

projets INTOR et NET, prévus dans l'étape post-JET, le CRPP a décidé de s'attaquer à un certain nombre de problèmes importants qui entrent dans ses compétences et qui devront être résolus avant qu'un projet crédible de réacteur (type tokamak) puisse être construit.

Avec la production du champ magnétique d'un tokamak, tel qu'on le réalise actuellement, la limite de pression du plasma est trop basse pour assurer que ce genre d'installations puisse servir de modèle à un réacteur viable. Dans l'état actuel de nos connaissances, deux chemins devraient permettre d'augmenter cette limite de pression: soit trouver un moyen pour atteindre la deuxième région de stabilité dont l'existence est annoncée par les théoriciens mais qui n'est pas encore trouvée expérimentalement, soit augmenter le courant maximal de la décharge.

D'après les lois d'échelles empiriques connues, cette augmentation de courant est possible en allongeant la section du plasma selon l'axe du tore; c'est la voie choisie dans le projet du tokamak à configuration variable TCV.

Le TCV (fig. 7) tel qu'il apparaît aujourd'hui est un tokamak avec une chambre de décharge toroïdale de section rectangulaire, dont le rayon moyen est de 87 cm, la largeur de 56 cm et la hauteur de 154 cm. Cette chambre est entourée par une bobine démontable composée de 16 sections de 6 spires chacune et qui produit un champ magnétique toroïdal de 1,5 Tesla sur le rayon moyen du tore. 16 bobines peuvent être alimentées séparément et réparties sur les faces externes et internes de la chambre de décharge servant à créer des champs magnétiques qui définissent la forme du plasma et le maintiennent en équilibre. Une grande variété de forme de section du plasma peut être produite et maintenue dans la chambre de décharge avec cet ensemble de bobines. Les formes vont de celle d'un hippodrome (race track) à celles d'un D ou de haricots, ou même à des formes plus exotiques comme le S, le doublet

ou le triplet avec ou sans diverteur. L'élongation de toutes ces formes peut être variée continûment à partir du cercle, jusqu'à ce qu'elles occupent toute la chambre de décharge.

L'expérimentation sur les plasmas de grande élongation nous fera sans doute découvrir une physique beaucoup plus riche que ne l'annonce l'extrapolation brutale des lois d'échelles connues.

Annexe IV

Développement d'une source d'ondes électromagnétiques à très haute fréquence: le gyrotron

Parmi les méthodes de chauffage du plasma, l'absorption d'énergie par les électrons d'une onde électromagnétique à la fréquence cyclotronique électronique apparaît actuellement comme l'une des méthodes les plus efficaces. Si, par le passé, cette méthode de chauffage n'a pas été explorée d'une manière approfondie, c'est essentiellement par manque de source à la bonne fréquence (60 à 150 GHz) et par manque de puissance (200 kW à plusieurs mégawatts). C'est pourquoi les principaux pays et organismes engagés dans le programme de fusion thermonucléaire ont décidé qu'un effort important devrait être fait dans le développement de ces nouvelles sources appelées les «gyrotrons». Dans un oscillateur micro-onde de type traditionnel, la fréquence de l'onde est déterminée par les dimensions du résonateur. De nombreux problèmes techniques surgissent lorsque les fréquences augmentent, les longueurs d'onde devenant petites. Les résonateurs sont alors de faibles dimensions. Aussi est-il exclu, pour des raisons de pertes ohmiques dans les parois, d'atteindre de hautes densités d'énergie dans le résonateur et, par conséquent, d'obtenir de hautes puissances de sortie.

La situation est différente dans un gyrotron, où la fréquence de l'onde ne dépend pas des dimensions du résonateur, mais de l'intensité du champ magnétique qui guide le faisceau d'électrons relativistes dont l'énergie sera convertie en ondes électromagnétiques. Le résonateur peut être alors de plus grande taille et on peut obtenir des puissances de sortie élevées. On trouve sur le marché des gyrotrons à 70 GHz avec une puissance continue de 200 kW, mais les machines à fusion requièrent des fréquences de 120 à 150 GHz avec des puissances de l'ordre du mégawatt. Pour cela, de nombreux développements tant physiques que technologiques sont nécessaires – le meilleur résultat actuel a été obtenu par le Naval Research Laboratory (Etats-Unis) à la fréquence de 110 GHz, avec une puissance de 80 kW pendant 1 μ s.

Intégré dans le programme de l'Euratom, le CRPP, en collaboration avec le Laboratoire d'électromagnétique et d'acoustique de l'EPFL (LEMA) et la division des tubes électroniques EKR de la société ABB (Baden), a entrepris le développement d'un gyrotron de haute fréquence (120-150 GHz, $\lambda = 2,5$ mm), utilisant un concept analogue à celui d'un laser (fig. 8). Dans cette approche, l'interaction entre le faisceau d'électrons relativistes et l'onde électromagnétique, interaction au cours de laquelle

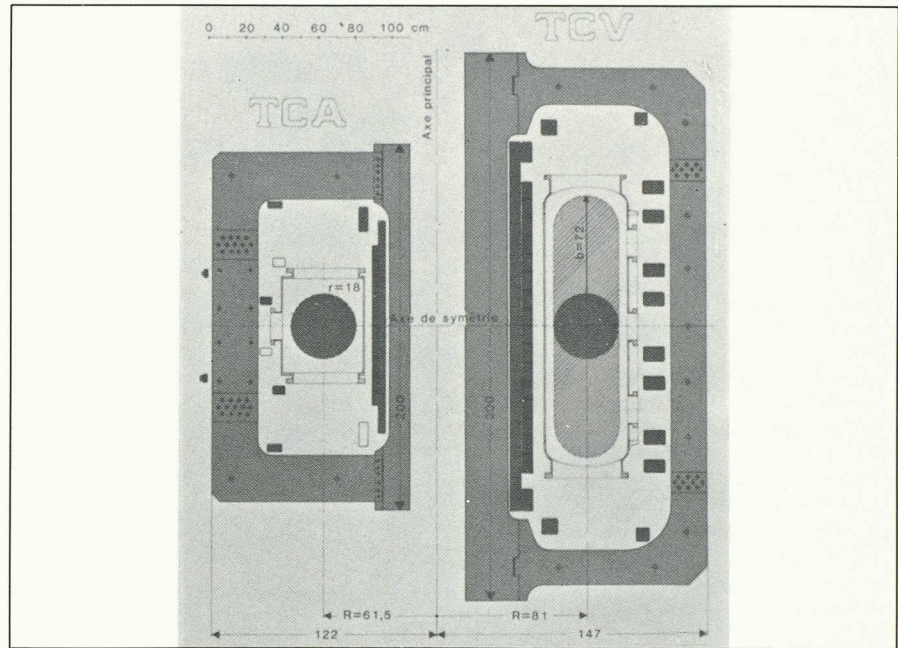


Fig. 7. – Comparaison du TCV (tokamak à configuration variable) avec le TCA. Caractéristique principale du nouveau projet TCV: sa capacité à changer la forme et les dimensions de la section du plasma.

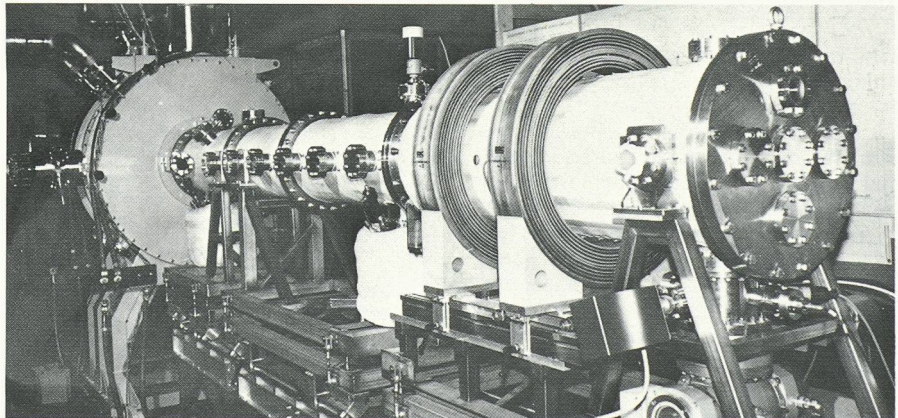


Fig. 8. – Vue générale de l'installation d'étude du gyrotron de 120 GHz installé au Centre de recherches en physique des plasmas.

l'énergie de faisceau d'électrons est délivrée à l'onde, a lieu dans un résonateur quasi optique formé de deux miroirs. Cette approche offre des avantages certains à haute fréquence où les longueurs d'ondes deviennent de plus en plus courtes et où les concepts utilisés en optique sont valables, d'où l'appellation de «quasi optique». De façon schématisée, le gyrotron se compose de trois éléments principaux: un canon à électrons relativistes, un résonateur quasi optique et les bobines supraconductrices générant le champ magnétique. Le canon à électrons produit un faisceau annulaire de très petites dimensions (diamètre 4 mm, épaisseur de l'anneau $\sim 0,2$ mm); l'énergie transportée par le faisceau est de 700 kW. L'intensité de champ magnétique est d'environ 50 kGauss et le profil de celui-ci est bien déterminé. Le faisceau d'électrons est ainsi bien guidé jusqu'au résonateur, formé de deux miroirs, où il cède une fraction (jusqu'à 40%) de son énergie à l'onde électromagnétique. Ensuite le faisceau est défléchi sur des parois refroidies à l'extrémité de l'enceinte.

En 1985 et 1986, un important effort théorique et expérimental a été fait dans le domaine des résonateurs quasi optiques. Les pertes par diffraction et le couplage de

l'énergie hors du résonateur ont été étudiés par simulation numérique et les résultats confrontés à l'expérience. Le bon accord théorie-expérience a permis de déterminer les paramètres des divers résonateurs qui seront installés dans le gyrotron. Comme dans tout système résonant qui ne fonctionne pas au mode fondamental, le problème de la compétition des modes est crucial dans un gyrotron. Un système de miroirs pour des résonateurs quasi optiques permet une sélection en fréquence. Des simulations numériques, où l'évolution et la compétition entre les divers modes sont suivies dans le temps, ont permis de vérifier qu'un seul mode est excité dans un résonateur muni de tels miroirs. La réalisation du projet de développement du gyrotron quasi optique nécessite une infrastructure importante ainsi qu'une installation expérimentale de grandes dimensions. Un stand d'essai, qui permettra de tester diverses configurations du résonateur et ainsi d'approfondir les connaissances physiques du système, est en cours d'installation sur le site d'Ecublens. Des installations annexes sont nécessaires, notamment une alimentation régulée (1 MW à 10 kV) et une importante unité cryogénique de liquéfaction avec une infrastructure de distribution de fluides.

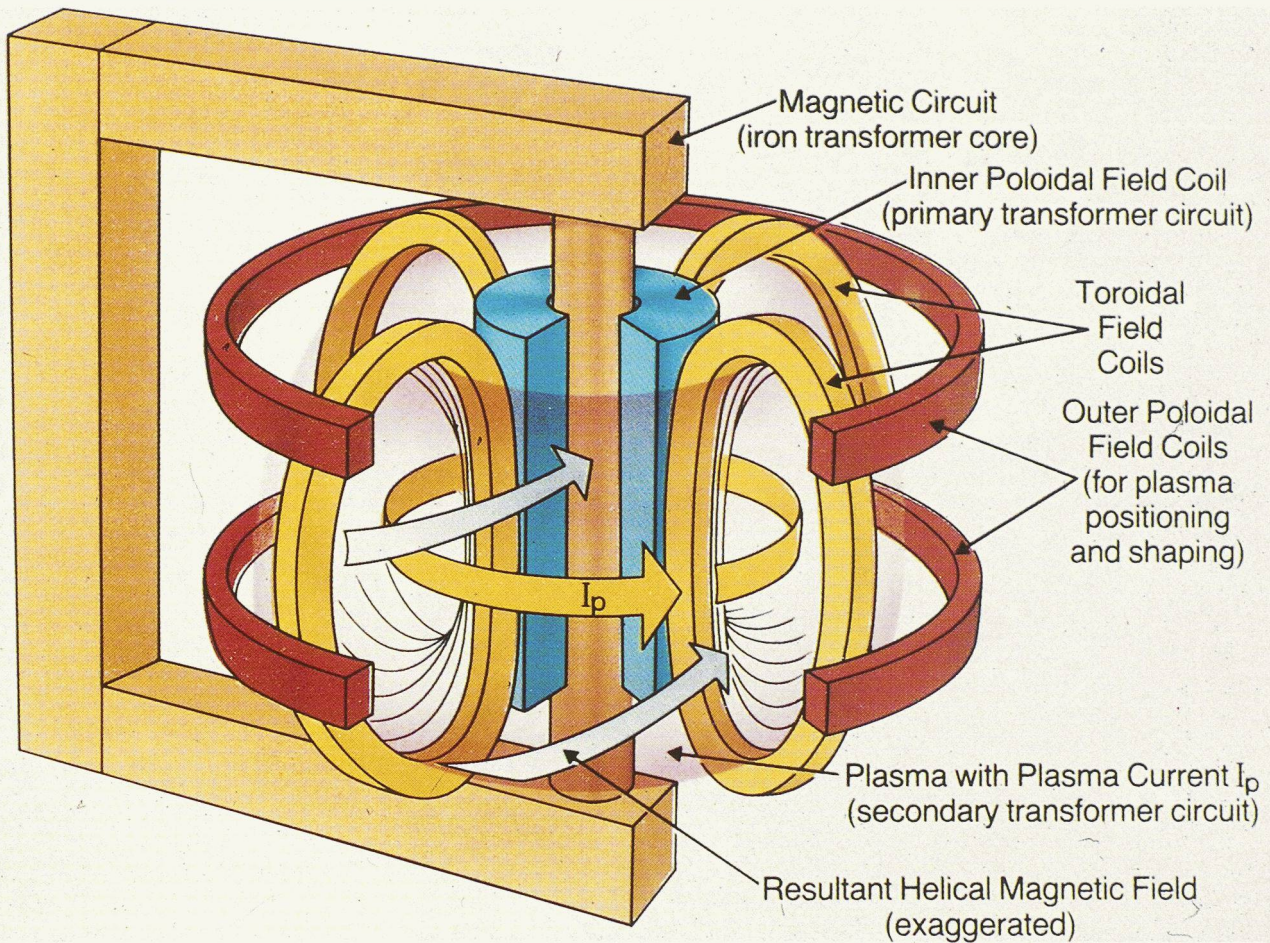


Fig. A. - Schéma de fonctionnement du tokamak.

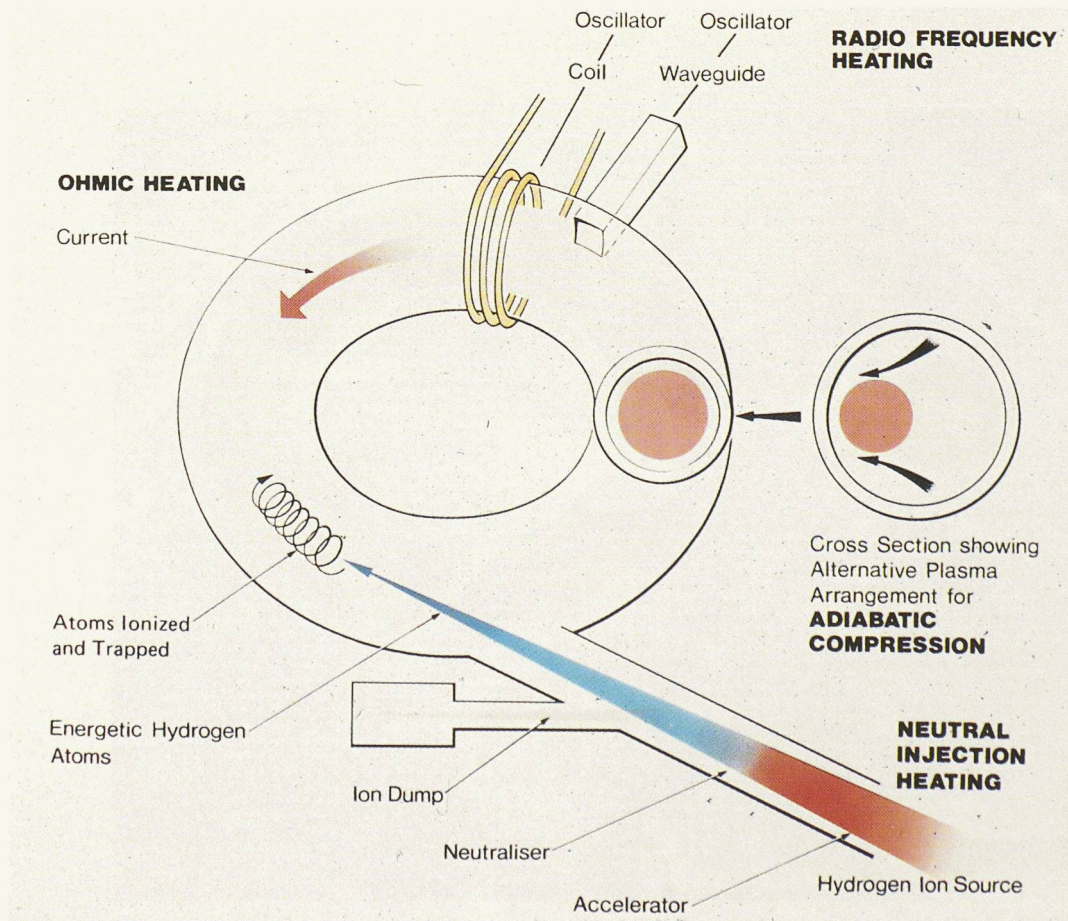
 I_p = courant du plasma R = grand rayon du tore B_T = champ magnétique torique a = petit rayon du tore

Fig. B. - Représentation schématique des méthodes de chauffage du plasma.

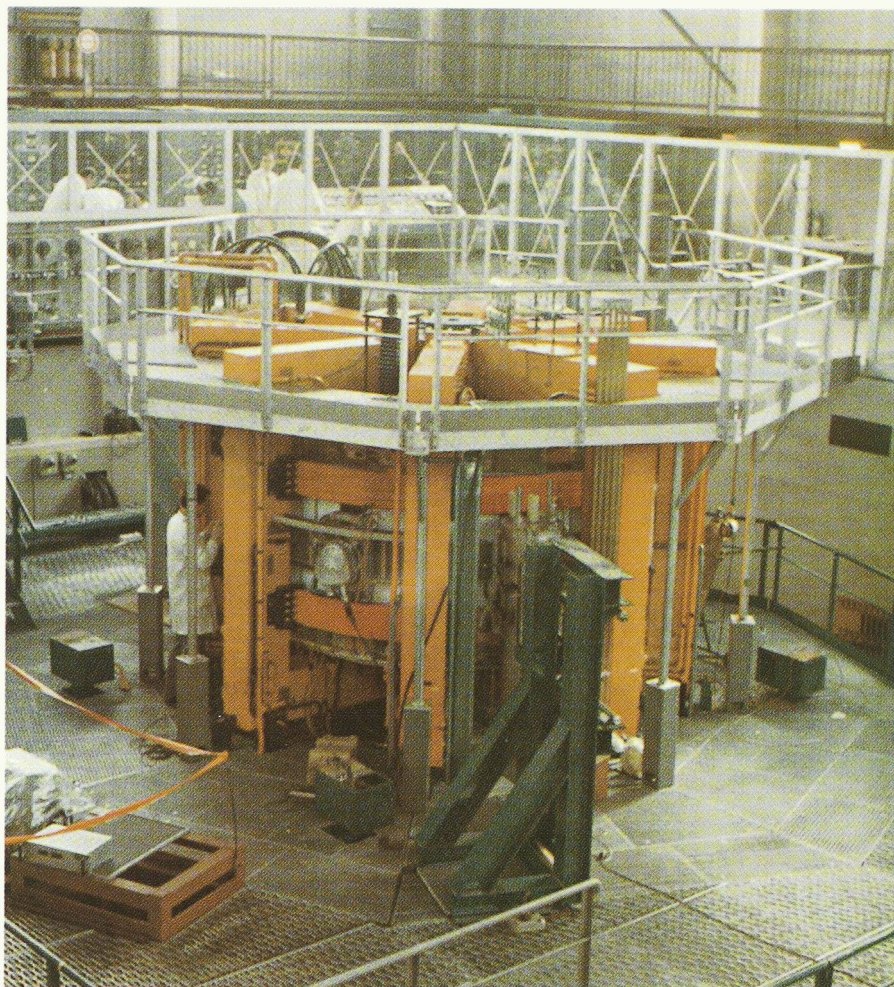


Fig. C. – TFR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses), en France: une étape importante dans les performances des tokamaks.

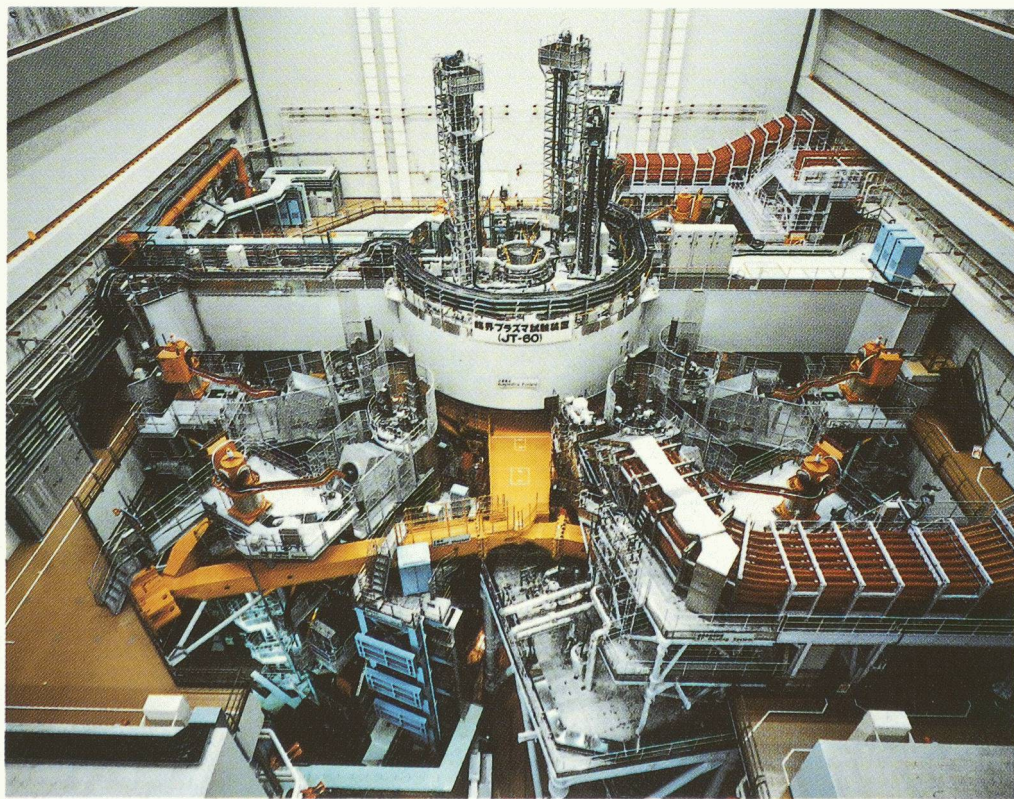


Fig. D. – JT60 (Japanese Tokamak), à Tokai-Mura: ensemble très compact, cette expérience a montré la génération d'un grand courant par onde à haute fréquence.

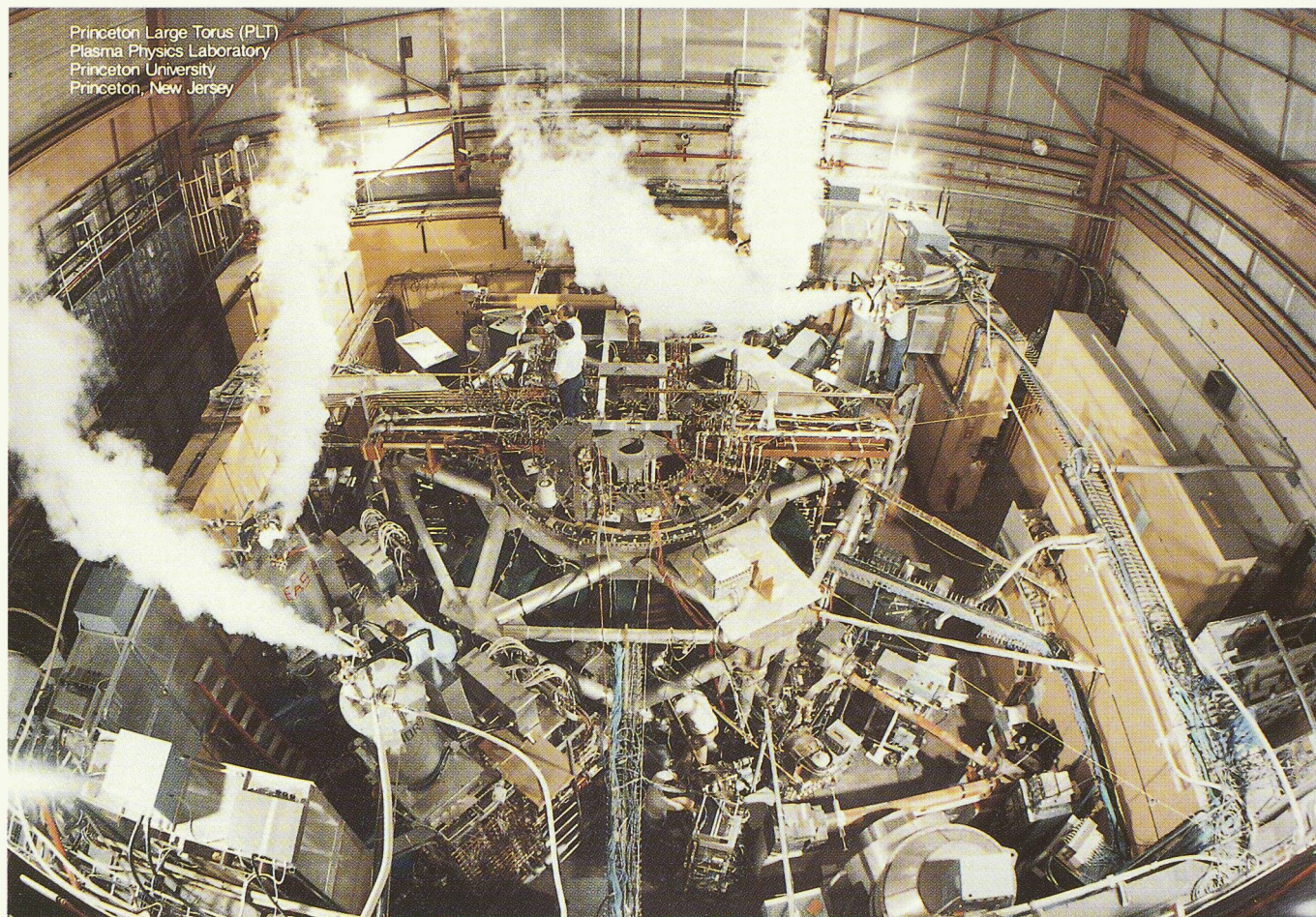


Fig. E. – PLT (Princeton Large Tokamak) : une autre grande étape expérimentale de la fusion.

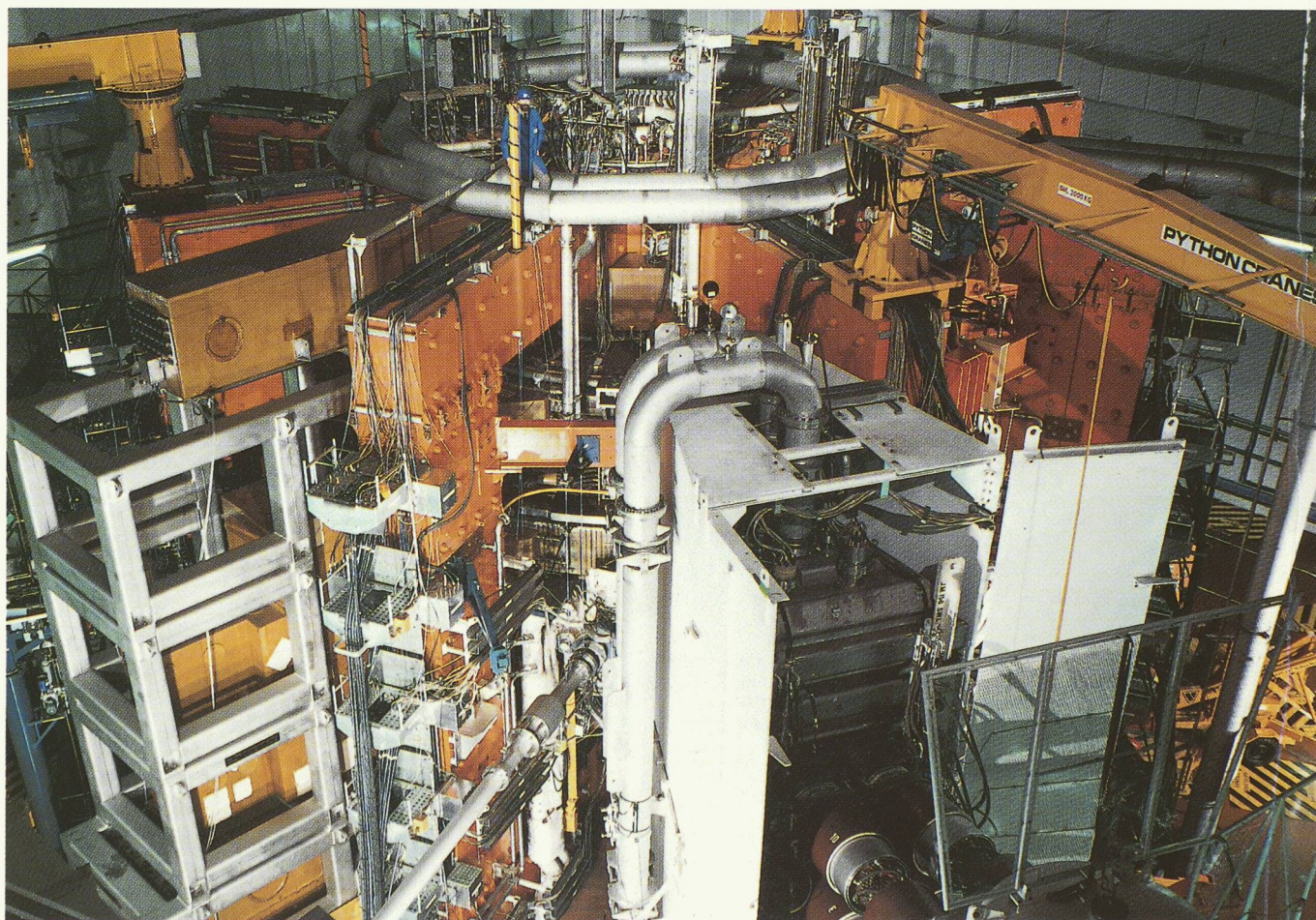


Fig. F. – JET: vue générale avec, au premier plan, un injecteur de neutres.

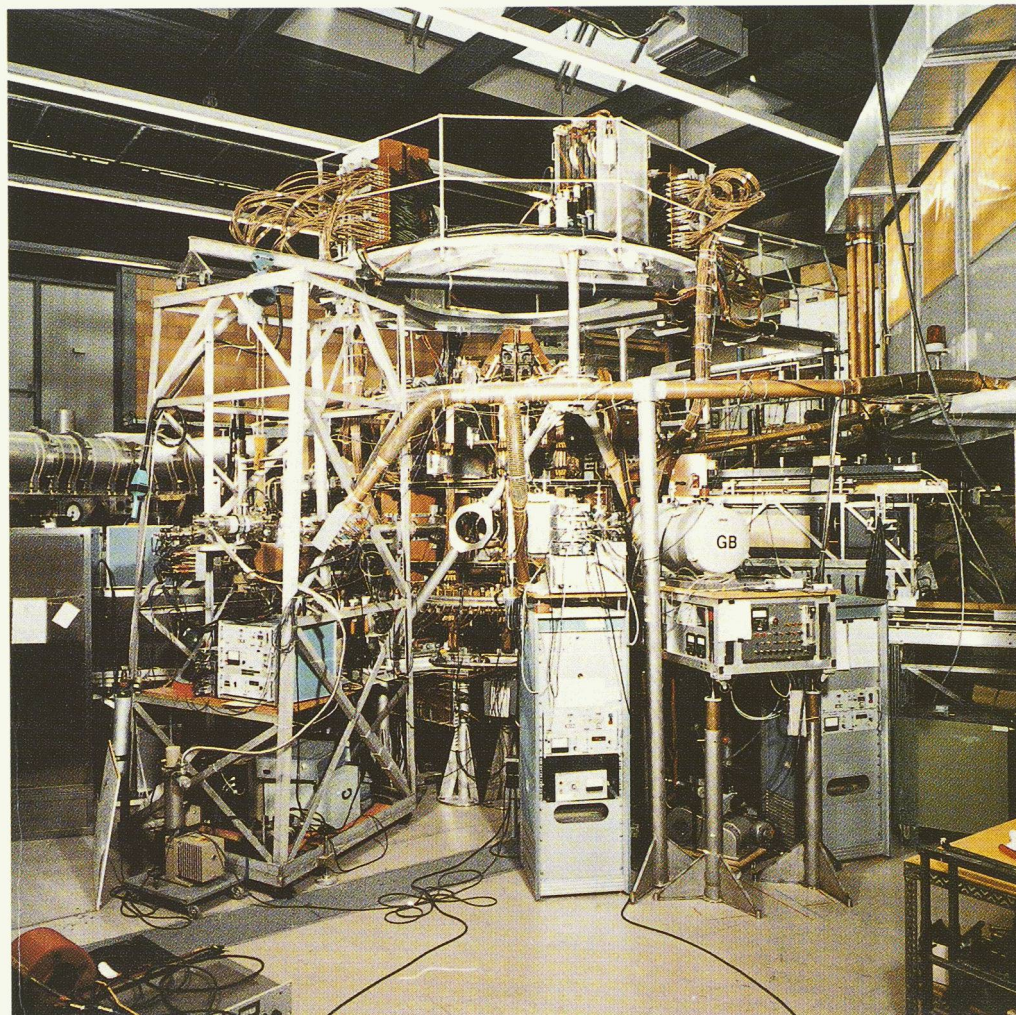
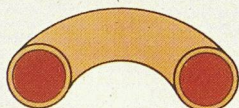


Fig. G. – Le tokamak TCA (tokamak pour l'étude du chauffage par ondes d'Alfvén), installé au Centre de recherches en physique des plasmas de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. ◀

Fig. H. – Comparaison des paramètres des trois plus grandes expériences. ▼

THE THREE LARGE TOKAMAKS IN THE WORLD

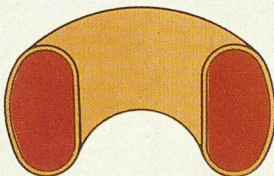
TFTR USA



Minor Radius 0.85m
Major Radius 2.48m
Toroidal Magnetic Field 5.0 T
Plasma Current 3.0 MA
Pulse Length 2 s.
Additional Heating Power 27 MW (total)

D-T Operation Capability
1st Plasma Dec 1982

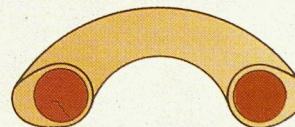
JET EUROPE



Minor Radius 1.25m (Horz)
2.1m (Vert)
Major Radius 2.96m
Toroidal Magnetic Field 3.5 T
Plasma Current 5.0 MA
Pulse Length 20 s
Additional Heating Power 44 MW (total)
[25 MW high grade]

D-T Operation Capability
1st Plasma June 1983

JT-60 JAPAN



Minor Radius 0.95m
Major Radius 3.0m
Toroidal Magnetic Field 4.5 T
Plasma Current 2.7 MA
Pulse Length 5-10 s
Additional Heating Power 54 MW (total)
[30 MW high grade]

Magnetic Limiter Configuration
1st Plasma April 1985