

LRP 352/88

December 1988

**FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE :
LES RECHERCHES EN FUSION MAGNETIQUE**

**Halles expérimentales et télémanipulation
Concept d'un réacteur, son impact sur l'environnement**

P.J. Paris

**FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE : LES RECHERCHES EN
FUSION MAGNETIQUE**

**HALLES EXPERIMENTALES ET TELEMANIPULATION
CONCEPT D'UN REACTEUR, SON IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT**

Pierre J. Paris

**Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
21, Av. des Bains, 1007 Lausanne, Switzerland**

Ce texte a servi de base aux articles soumis pour publication au "Bulletin" de
l'Union des Centrales Suisses d'Electricité et au journal "l'Impartial"

PREAMBULE

De l'Antiquité et du plasma

Depuis l'Antiquité les hommes ont eu l'ambition de recréer ce que la nature, ou les dieux, leur avaient légué. Dans la mythologie grecque, Prométhée, qui après avoir bafoué Zeus en lui offrant la graisse et les os d'un boeuf qu'il avait partagé entre les hommes et les dieux, récidiva en dérobant le feu des dieux pour le distribuer aux hommes. Depuis lors, l'homme banni de la table céleste ne cessa de rivaliser avec l'Olympe en cherchant avec quelque réussite à prouver son existence à travers de grandes réalisations ... Restons objectif ..., il a aussi su se montrer égal dans la colère au courroux démonstratif des dieux. L'"effet Pandora" laissa des traces.

Dans l'Antiquité riche en affrontements homme - dieu, Empédocle (490 - 424 av. J.-C.) suggéra que la matière était constituée de quatre états bien distincts : la terre, l'eau, le vent et le feu. Cette théorie, reprise bien après par Aristote (383 - 322 av. J.-C.), rencontra des contradicteurs, notamment dans la personne de Leucippe (V^{ème} - IV^{ème} s. av. J.-C.) et son disciple Démocrite (460 - 370 av. J.-C.) qui dans sa "Grande Cosmologie" estimait que la matière était composée de tous petits éléments identiques entre eux et indivisibles (insécables = racine même du mot atome) : les atomes. Le temps leur a en grande partie donné raison car pour briser les atomes (les nucléons) comme on le fait actuellement dans les grands accélérateurs il faut utiliser des énergies considérables. Au fur et à mesure que l'énergie des accélérateurs croît, on pourra peut-être découvrir de nouveaux éléments élargissant ainsi les bases de la pyramide des particules élémentaires qui de près ou de loin (mais toujours dans les milliardièmes de secondes après le Big Bang) auront appartenu à l'explosion originelle. Grâce à ces accélérateurs, "bistouris" de la matière, en plein développement nous nous accorderons à penser comme Nietzsche "Ceux-là seuls qui détiennent les clefs de l'avenir sont à même de déchiffrer les mystères du passé".

On connaît l'existence d'une centaine d'atomes stables qu'on représente familièrement par un noyau (contenant protons et neutrons), plus ou moins gros, autour duquel gravitent des électrons à très grande vitesse.

Il n'empêche qu'Empédocle et Aristote avaient aussi vu juste, mais à un autre niveau de la "pyramide" de la complexité. On parle aujourd'hui des quatre états fondamentaux de la matière : le solide, le liquide, le gaz et le plasma. Ces

états sont définis suivants des conditions thermodynamiques caractérisées par la température et la pression. L'état plasma constitue l'état ultime de la matière lorsqu'on élève sa température à densité constante. Si on chauffe un gaz, l'énergie cinétique des molécules croît avec la température et les chocs entre les molécules ont pour conséquence de dissocier celles-ci en atomes. Par définition la température est une mesure de l'agitation constante et désordonnée des molécules ou des atomes, plus généralement des particules constituant le milieu analysé. Dans nos appartements les molécules d'azote et d'oxygène de l'air ambiant se déplacent à des vitesses de 300 à 400 m/s. Cette vitesse croît comme la racine de la température.

Mais continuons à chauffer notre gaz ... Lorsque la température atteint une dizaine de milliers de degrés, les chocs deviennent de plus en plus violents et les énergies sont telles que les électrons sont éjectés de leur orbite de giration qu'ils accomplissent autour des noyaux. Le mélange, en fonction de la densité des particules chargées, a des propriétés différentes de celle des gaz, notamment des propriétés électriques et électromagnétiques. On dira de ce mélange d'ions et d'électrons que c'est un plasma. Dans les flammes à très haute température il apparaît en faible proportion du gaz ionisé, les Anciens avaient donc raison de dire que le feu représentait un 4ème état de la matière. "Si un mystère nous dépasse, feignons d'en être les auteurs." (Jean Cocteau)

On rencontre le plasma dans les étoiles, dans certaines couches de l'atmosphère telles que la magnétosphère et l'ionosphère (qui permet les communications radio - ondes courtes - à longues distances), dans l'espace interplanétaire et interstellaire. Plus près de nous, il y a du plasma dans les tubes fluorescents (les tubes néons), dans les arcs électriques et les éclairs atmosphériques, dans les aurores boréales ...

Les plasmas entrent de plus en plus dans des procédés de fabrication industrielle! Soudure par plasma, fabrication de composants électroniques tels que semi-conducteurs, cellules solaires, ..., revêtement de vitrage filtrant, revêtement de matériaux métalliques pour renforcer leurs qualités ...

Mais si l'étude de ces divers plasmas est capitale pour la compréhension des phénomènes naturels et des applications industrielles, l'effort scientifique est en grande partie investi dans la recherche d'une énergie qui devrait nous satisfaire à long terme : la fusion thermonucléaire contrôlée.

I Introduction

Les derniers résultats obtenus sur les installations de recherches en fusion thermonucléaire contrôlée laissent prévoir dans un proche avenir la démonstration du breakeven (l'énergie issue des réactions de fusion égale alors celle investie dans le plasma). Une grande étape a été franchie au cours de ces cinq dernières années notamment avec la mise en exploitation des grands tokamaks tels que JET (Communauté Européenne), TFTR (USA), JT 60 (Japon), DIII Big Dee (USA). Les performances obtenues, lorsqu'on se place dans le diagramme de bilan des réactions, méritent qu'on s'attarde quelque peu sur la technologie de fusion dite intra-cavité, celle du plasma. Même si les problèmes rencontrés dans l'étude des plasmas thermonucléaires n'ont pas tous trouvé de solution, les caractéristiques des plasmas confinés dans ces machines, densité, température et temps de confinement énergétique, ont été considérablement améliorés.

L'étude des lois d'échelle des paramètres du plasma et des installations devrait aboutir à la conception de nouvelles installations - voire même à la réalisation d'un projet mondial, si le programme ITER se concrétise - dans lesquelles non seulement le critère de Lawson serait atteint mais aussi l'ignition (auto-entretien des réactions de fusion par les noyaux d'hélium issus eux-mêmes des réactions de fusion antécédentes, sans aucune contribution des méthodes de chauffage additionnel).

Il faut rendre justice aux autres installations de recherches qui tout en étant plus modestes dans leurs dimensions et dans leurs performances ont pu répondre à un certain nombre de problèmes plus spécifiques tels que : l'étude de l'efficacité des méthodes de chauffage additionnel du plasma des tokamaks, l'étude de l'interaction plasma-paroi, la découverte de mode reproductif de haut confinement énergétique du plasma, la recharge en combustible par jets de gaz et par injection à haute vitesse de glaçons d'hydrogène et de deutérium, la génération de courant de manière non inductive à l'aide d'ondes dont la résonance avec les particules du plasma entraîne la formation d'un courant ... autant de thèmes qui devraient faciliter la compréhension des mécanismes ayant lieu dans les plasmas.

L'autre volet de la technologie de fusion, celle dite extra-cavité, qui touche plus directement les autres constituants d'un réacteur, a fait l'objet d'études importantes, à travers divers projets conceptuels de réacteurs, notamment aux

Etats-Unis et en Grande-Bretagne au cours de ces quinze dernières années.

Depuis 1983 la Communauté Européenne a renforcé, avec l'avènement du programme NET, cet aspect de la recherche technologique et technique, domaine qui jusqu'alors en Europe était très ponctuel, souvent réservés à certains laboratoires nationaux dans lesquels étaient effectués des travaux liés à la fission nucléaire.

Due à cette nouvelle impulsion, des entreprises du secteur privé sont venues soutenir l'effort public, elles participent ainsi au développement de technologies recouvrant des domaines aussi vastes et dispersés que les bobinages supraconducteurs, la cryogénie, les générateurs hyperfréquences pour le chauffage auxiliaire du plasma, les injecteurs de glaçons de deutérium, la télémanipulation dans l'enceinte du plasma et autour du réacteur, la régénération et la manipulation du tritium, l'extraction hors de l'enceinte des réactions des "cendres refroidies" et des impuretés, la récupération de la chaleur, l'étude de matériaux à faible activation entrant dans la composition de la structure du réacteur, la sécurité et l'impact sur l'environnement.... Des retombées technologiques et économiques importantes peuvent être attendues à moyen et à long terme.

II Energie de fusion et bilan des réactions

A l'inverse de la fission nucléaire qui utilise la scission des éléments lourds tels que l'uranium 235, la fusion emploie des réactions de synthèse des éléments légers. Dans les deux cas la libération d'énergie est due au défaut de masse existant entre produits initiaux des réactions et produits finaux. Les sous-produits emportants avec eux des énergies cinétiques récupérables par le fluide caloporteur dans le cas de la fission, par un manteau de couche fertile pour la régénération du tritium complété par un fluide caloporteur dans le cas de la fusion. Egalement dans les deux cas ce sont des "cendres" des réactions qui maintiendront les réactions futures. Alors que les neutrons issus de la fission assurent la réaction en chaîne, le confinement des noyaux chauds d'hélium devrait maintenir l'ignition des réactions de fusion D-T. Comme nous le constatons, il existe certaines analogies entre ces deux processus, mais la ressemblance s'arrête là.

Les réactions nucléaires de synthèse sont extrêmement rares aux températures ordinaires, pour atteindre des seuils de rentabilité énergétique il

faut que les noyaux soient chauffés à des températures supérieures à 100 millions de degrés Kelvin. D'autre part, un nombre suffisant de ces particules doit entretenir ces réactions.

Dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent à des températures plus basses, de l'ordre de 10 millions °K (au centre du soleil 15 millions °K), mais à des pressions considérables (au centre du soleil, 10^{11} atmosphères; la densité est de l'ordre de 10^{32} particules/m³). Ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise, le confinement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation.

Il existe deux types principaux de réactions : la chaîne proton-proton (p-p) et le cycle CNO. Le temps moyen qu'attend un proton pour subir une réaction est d'environ 7 milliards d'années, il est d'une seconde pour le deutérium et de 150'000 ans pour l'hélium 3. Ces trois constituants appartiennent à la chaîne p-p, la plus probable dans le processus énergétique du soleil. C'est la lenteur de tels processus qui permet aux réacteurs stellaires de "brûler" pendant des milliards d'années. Il n'est guère possible de reproduire sur terre ces réactions extrêmement lentes et dont nous ne pouvons satisfaire toutes les contraintes physiques. Cependant celles mettant en jeu les isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, semblent être accessibles, c'est ce que nous montre la figure 1.

Les réactions principales de fusion sont indiquées dans le Tableau 1, ci-dessous :

		seuil de réaction Température en keV	gain max. par fusion
$D^2 + T^3 \rightarrow$	$He^4 (3.52 \text{ MeV}) + n (14.06 \text{ MeV})$	10	1800
$D^2 + D^2 \rightarrow$	$T^3 (1.01 \text{ MeV}) + p (3.03 \text{ MeV}) \text{ à } 50 \%$	50	80
$D^2 + D^2 \rightarrow$	$He^3 (0.92 \text{ MeV}) + n (2.45 \text{ MeV}) \text{ à } 50 \%$	50	70
$D^2 + He^3 \rightarrow$	$He^4 (3.67 \text{ MeV}) + p (14.67 \text{ MeV})$	100	180
$B^{11} + H \rightarrow$	$3 He^4 (8.67 \text{ MeV})$	300	30

La nucléosynthèse deutérium-tritium libère 94000 kwh par gramme de combustible, comparativement dix millions de fois plus qu'un gramme de pétrole. Le deutérium existe en grande quantité dans l'eau (0.034 g/litre) bien

répartie sur le globe (10^{13} tonnes). Le tritium, n'existant pas à l'état naturel, est produit à partir du lithium dont les réserves contenues dans l'écorce terrestre et dans les océans sont estimées à 10^8 tonnes. Ces caractéristiques à elles seules expliquent le grand intérêt d'une telle source d'énergie.

De manière simplifiée, pour un plasma ne contenant que les combustibles deutérium et tritium (sans prendre en compte les impuretés), nous pouvons résumer les conditions de viabilité de l'énergie de fusion sous trois formes. Le premier objectif à atteindre est évidemment la condition de breakeven, pour laquelle l'énergie produite par les réactions de fusion est égale à celle investie dans le plasma, il faut, dans le cas d'un plasma D-T à 100 millions de degrés, que le produit $n \cdot \tau_E > 7 \cdot 10^{19} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ soit validé (n étant la densité de particules par m^3 et τ_E , le temps de confinement énergétique).

Une deuxième relation, connue sous le nom de critère de Lawson, tient compte du rendement d'un réacteur. L'énergie captée sous forme thermique est convertie ($\eta = 0.33$) en énergie électrique et restituée au plasma pour compenser les pertes dues notamment au rayonnement de freinage des particules (bremstralhung). Cette condition, qui prend déjà en compte les systèmes de conversion énergétique, est formulée de la façon suivante :

$$n \tau_E > 1.4 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} .$$

La condition d'ignition est encore plus sévère que les deux précédentes. Pour qu'un plasma thermonucléaire continue de "brûler" sans apport d'énergie extérieure, sous-entendu que les l'énergie des particules alphas (hélium) compense toutes les fuites d'énergie et maintient les conditions de réaction, s'exprime ainsi $n \tau_E > 2 \cdot 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$, toujours pour un mélange D-T à 100 millions de degrés.

Ces trois formulations sont représentées dans la figure 2. Ces critères doivent être considérés pour des plasmas sans impuretés métalliques ou gazeuses. Dans le cas où les impuretés atteignent 0.1 à 2 %, selon les atomes contenus dans le plasma, les rayonnements de freinage et de recombinaison deviennent alors si importants que le seuil viable des réactions est fortement repoussé.

III Le point sur les recherches en fusion magnétique

Afin de produire ces conditions deux filières principales ont été envisagées : la voie "fusion inertielle" et la voie "fusion magnétique". La méthode "inertielle" consiste à créer un plasma très dense pendant un bref instant ($T=10^8$ K, $n=10^{30}$ à $10^{32}m^{-3}$, $\tau_E=10^{-9}$ à 10^{-11} s). Une cible solide contenant du deutérium et du tritium est alors irradiée par des faisceaux de particules énergétiques (ions, électrons, photons...). Les faisceaux d'ions lourds et de lumière laser (notamment rayons X) portent les espoirs de cette recherche, il ne faut cependant pas perdre de vue qu'actuellement on se heurte au mauvais rendement des lasers et des sources de particules. D'autre part ces domaines, liés à la recherche militaire, sont nationaux et "classifiés". Nous discuterons donc des résultats obtenus dans la fusion lente ou magnétique.

Parmi toutes les configurations magnétiques, le tokamak est l'installation qui a reçu le plus d'attention au cours de ces 15 dernières années, conséquence directe des bons résultats obtenus sur ce type d'appareillage. Le tokamak (de l'acronyme russe signifiant "courant dans une chambre magnétique torique") est un système torique qui fonctionne sur le principe d'un transformateur (illustré figure 3). Un courant circulant dans les enroulements primaires engendre un champ électrique qui induit un courant secondaire dans l'anneau de plasma. On superpose à ce courant un fort champ magnétique torique pour assurer la stabilité MHD (magnétohydrodynamique) du plasma, des champs magnétiques verticaux aident à la stabilité horizontale et verticale du plasma. Le programme soviétique démarra en 1955 sous la direction de M.A. Leontovich et L.A. Artsimovich, avec des contributions importantes de I.E. Tamm et A. Sakharov (celui dont on parle beaucoup ces jours-ci) qui ont conçu le premier réacteur basé sur le tokamak . Il a fallu attendre la conférence internationale de Novosibirsk en 1968 pour que ce type de machine soit adopté par la communauté scientifique, dès lors nous avons assisté à la construction de divers tokamaks dans le monde, les stellarators (autres machines toriques sans induction de courant dans le plasma) et les machines à miroirs magnétiques leur ont peu à peu cédé la place.

Le courant circulant dans l'anneau de plasma ne peut fournir assez d'énergie, par effet Joule, aux particules constituant le plasma, car celui-ci devient un excellent conducteur électrique au delà de 30 millions de degrés (20 fois meilleur que le cuivre à température ambiante). Des systèmes de chauffage auxiliaire doivent donc être adjoints aux expériences :

- injection de particules très énergétiques (faisceaux d'hydrogène et de deutérium),
- couplage d'ondes dont l'énergie est absorbée par les particules du plasma,
- compression adiabatique, en comprimant le volume la densité et la température augmentent.

Depuis les quelques 100'000 °K, obtenus dans ces installations au début des années 60, aux plus de 150'000'000 °K atteints ces deux dernières années, les appareillages ont pris de l'ampleur et sont devenus très sophistiqués, preuve en est la complexité et les dimensions de JET, TFTR et JT 60. Les principaux tokamaks en exploitation ou en projet sont listés dans le Tableau 2.

La découverte en 1982 de deux régimes de fonctionnement des tokamaks non prévus par la théorie a eu une incidence capitale sur le design des expériences qui ont suivi. Il a été démontré sur le tokamak ASDEX (R.F.A.) qu'en utilisant un écorceur magnétique, même en présence de chauffage additionnel, la qualité d'isolation thermique restait bonne. Or il était apparu auparavant que, quelle que soit la méthode de chauffage auxiliaire, le temps de confinement se dégradait de manière draconienne. Actuellement il semble que l'enclenchement de décharges de haute qualité soit assurée sur tous les tokamaks à diaphragme magnétique.

Le développement, entrepris depuis 1977, permettant d'approvisionner le plasma en combustible par des injections de glaçons d'hydrogène ou de deutérium, a aussi contribué au maintien de bonnes qualités des décharges. La technique de l'alimentation par des "bouffées" de gaz avait le désavantage de modifier le profil de densité et de température sur la périphérie du plasma. Des glaçons de deutérium solide de 2.6 à 6 mm de diamètre atteignant des vitesses de 2700 m.s⁻¹ sont injectés dans JET où l'on souhaiterait des vitesses encore plus grandes pour atteindre le centre de la décharge avant que l'ablation du glaçon ne soit complète.

Du point de vue des méthodes de chauffage additionnel ce sont les techniques utilisant l'injection de faisceaux de neutres (faisceaux de D⁰ à 120 keV sur TFTR et de 80 keV sur JET) et l'onde cyclotronique ionique (32 MW à 25-55MHz pendant 20 secondes sur JET) qui ont pour le moment montré les meilleurs résultats (photos 1 et 2 de JET). De grands espoirs sont placés dans l'utilisation de l'onde cyclotronique électronique déjà utilisée sur des tokamaks à

bas champ magnétique pour le chauffage et le contrôle du profil de température, pour cela des développements de tubes de très haute puissance à hyperfréquences (au-delà de 100 GHz) sont en cours. C'est le cas au Centre de Recherches en Physique des Plasmas, qui, en collaboration avec ABB, participe dans le cadre de L'Euratom à l'étude d'un gyrotron à 115 GHz (photo 3).

Un autre aspect qui devra avoir son importance dans la création et le maintien de la décharge pendant de longues impulsions, est la génération du courant par des méthodes non-inductives (l'utilisation de l'effet transformateur ne sera plus possible pour des plasma dont la durée sera de l'ordre de quelques centaines de secondes). Plusieurs expériences ont démontré la possibilité de générer le courant dans le plasma par l'onde hybride inférieure, le résultat le plus significatif, 2 MA, a été obtenu sur JT 60 (Japon). Cependant cette méthode se heurte à une limite de densité au-delà de laquelle l'efficacité du processus décroît rapidement, aussi pense-t-on à l'emploi de l'onde cyclotronique électronique, mais cette méthode doit encore faire ses preuves.

Les performances les plus substantielles ont été obtenues sur JET et TFTR au cours de ces dernières années, ainsi que le reflète la figure 4. Citons surtout le meilleur paramètre de fusion $n T_i \tau_E = 3.10^{20} \text{ keV m}^{-3} \text{ s}$ de TFTR et le meilleur temps de confinement $\tau_E = 1.2 \text{ s}$ de JET. L'expérience européenne détient globalement les meilleurs résultats, surtout avec l'annonce cet été d'un courant de plasma de 7 MA.

IV Activation des enceintes de JET et de TFTR

En fonction des résultats qui seront obtenus sur les tokamaks JET et TFTR, des décharges contenant du deutérium et du tritium seront produites dans ces deux appareillages, vers la fin de leur exploitation en 1992. Ces expériences devront permettre d'étudier le confinement des particules d'hélium issues des réactions de fusion et en même temps de déterminer pour la première fois le bilan énergétique en terme de plasma D-T. Mais elles auront pour conséquence une activation importante de la structure des tokamaks due au flux de neutrons à 14.06 MeV. Des moyens de robotique et de télémanipulation ont été mis en place à cet effet, il ne sera plus permis aux techniciens de travailler dans l'enceinte ni dans la halle expérimentale (photo 4 et figure 5 de JET). La halle du tokamak JET est conçue de manière totalement étanche aux radiations émises par la structure expérimentale, sur TFTR c'est un système modulaire formant un "igloo" qui sert d'écran.

Actuellement les décharges D-D ont déjà produit des neutrons de 2.5 MeV qui ont activé les parois des enceintes de JET et de TFTR, sans toutefois perturber de manière significative le travail in-situ.

Sur TFTR, par exemple, lorsque la campagne d'exploitation est au plus fort, $1.5 \cdot 10^{17}$ neutrons peuvent être produits en un jour, ce qui résulte en un niveau de radiation induite dans l'enceinte contenant le plasma de 600 millirem par heure immédiatement après les impulsions de plasma avec injection de neutres énergétiques (supershots). Il semble que cette dose est produite par l'interaction des neutrons avec le manganèse contenu la paroi en acier inoxydable. La demi-vie de cet élément est de 2.5 heures, ce qui n'affecte donc pas trop la maintenance de l'appareillage.

V Construction de la halle expérimentale de JET

En fonction des résultats qui seront obtenus dans un futur proche sur les tokamaks JET et TFTR, des décharges contenant du deutérium et du tritium seront produites dans ces deux appareillages, vers la fin de leur exploitation en 1992. Ces expériences devront permettre d'étudier le confinement des particules d'hélium issues des réactions de fusion et en même temps de déterminer pour la première fois le bilan énergétique en terme de plasma D-T.

Mais elles auront pour conséquence une activation importante de la structure des tokamaks due au flux de neutrons énergétiques issus des réactions D-T. Malgré certaines précautions, les matériaux utilisés pour leurs constructions ne répondent pas au critère de faible activation. Des travaux parallèles sont entrepris de manière à répondre à cet impératif. La démonstration technologique en est à ses prémises.

Des moyens de robotique et de télémanipulation ont donc été développés à cet effet, il ne sera plus permis aux techniciens de travailler dans l'enceinte ni dans la halle expérimentale, l'accès à celle-ci sera restrictive. La halle du tokamak JET est conçue de manière totalement étanche aux radiations émises par la structure expérimentale.

Les halles expérimentales forment un ensemble de 83000 tonnes qui reposent sur des fondations constituées par un radier en béton de 3 m d'épaisseur construit en deux couches de manière à compenser le tassement

différentiel. Un cloisonnement étanche construit en un matériau souple non durcissant isole ce radier de la nappe phréatique. A une hauteur de 6 m au-dessus de cette dalle est construite la halle du tore, les parois de 2,8m de béton lourd renforcé à l'intérieur par du bore constituent l'écran de radiation. Le toit en béton postcontraint de 2,4 m d'épaisseur est construit de façon modulaire pour permettre le démontage ultérieur. Le plancher et le toit sont traités par un plâtre boré. La halle expérimentale est isolée du hall d'assemblage par une cellule intermédiaire formant un sas où de grosses portes et des poutres amovibles sont installées de part et d'autre, permettant le passage d'un pont-grue de 150 tonnes, de larges composants ou de véhicules lourds. Tout contribuera à assurer la sécurité du personnel sur le site expérimental hors de cette halle, lors de la phase deutérium-tritium. Les travaux de maintenance seront alors effectués par les outils robotisés conçus spécialement à cet effet.

VI Télémanipulation et robotique dans les installations de recherches

La complexité du tokamak JET présente des sérieux problèmes d'accès et de visibilité pour la télémanipulation, c'est pourquoi des systèmes assistés par ordinateur ont été développés pour le positionnement des manipulateurs. A la base de la conception des outillages commandés à distance: remplacer les éléments défectueux plutôt que de réparer, d'où la réalisation modulaire de l'ensemble des composants de la machine. Il a fallu s'assurer durant la conception du tokamak de l'accès futur des manipulateurs, mais aussi développer certains éléments des connections mécaniques, électriques...pour être opérables par les outils de préhension, de positionnement, de manoeuvre ou de fixation. Les servomanipulateurs sont testés préalablement sur des maquettes, permettant de vérifier la forme d'apprentissage "enseigner-et-répéter" de ces robots ainsi que les modélisations graphiques qui sont utilisées dans la conception assisté par ordinateur. Des impératifs, issus du milieu dans lequel se situera l'intervention (chambre à vide, liquide de refroidissement, matériel électrique, ...) conditionnent également l'emploi de certains matériaux dans la fabrication des manipulateurs.

Pour les opérations à l'intérieur de la chambre à vide une poutre articulée (en cinq segments) pénètre à travers une porte horizontale et peut effectuer un demi-tour dans le tore, atteignant l'autre accès diamétralement opposé (photo 5). Avec cet appareil une charge d'une tonne peut être transportée sur un quart de la circonférence, une charge de 350 kg sur une demi-circonférence. Cette poutre articulée a été largement utilisée pour mettre en place des antennes de couplage

des ondes de chauffage additionnel du plasma et des limiteurs du plasma. Une section de ce "bras de géant" est conçue avec un receptacle d'outils dont se sert le manipulateur en fonction des opérations. Des charriots de découpe et de soudure (TIG) (photo 6) formant des outils compacts et partiellement indépendants pourraient être mis en place par la poutre articulée. Ceux-ci circuleront sur le joint de soudure sans autre guide complémentaire, les épaulements à découper ou à souder seront maintenus par les roues de déplacement des charriots.

La poutre est contrôlée par microprocesseurs depuis une console portative ou depuis la salle de contrôle exclusivement dédiée à la télémanipulation. L'utilisateur définit les déplacements, les vitesses de même que l'ajustage des positions à l'aide d'un "joystick" et de commandes par clavier d'ordinateur. Il existe également un modèle graphique permettant la navigation, en temps réel, de la poutre dans son environnement (photo 7).

Un bras télescopique sera monté sur le pont roulant de 150 tonnes. Il bénéficiera des prestations et de la sensibilité de mise en place (0,2 mm verticalement et 1 mm horizontalement) dont dispose la grue. Ce système, équipé d'une caméra, aura pour tâche la gestion des composants à l'extérieur de la structure.

Divers véhicules de transport téléguidés se déplaçant au sol disposent d'outils de montage pour remplacer ou additionner des éléments tels que les pompes à vide, les vannes,... Ils complètent le bras télescopique dans certaines opérations. Un véhicule sur chenilles (photo 8) se déplace à hauteur d'homme et est équipé d'outils de préhension et de fixation ainsi que d'une caméra.

Parmi les servomanipulateurs, les MASCOT, pouvant équiper le bras télescopique, sont destinés à des opérations de haute précision. Ceux-ci sont conçus avec deux bras pour l'unité "maître" (photo 9) et deux bras pour l'unité "esclave" (photo 10) dont la cinématique est similaire. Les mouvements effectués sur l'unité maître sont reproduits par l'unité esclave qui renvoient les forces exercées par le manipulateur de façon à donner la sensibilité à l'opérateur qui adaptera les enchaînements. Ces servomanipulateurs recevront également les outils décrits précédemment.

Des caméras complètent la panoplie de ces systèmes, notamment pour des inspections de routine dans l'enceinte à vide, de manière à connaître les

dommages causés par le plasma sur les antennes, les limiteurs et les tuiles en graphite protégeant la paroi de l'érosion.

VII Perspectives à court et moyen termes

Des projets employant des aimants supraconducteurs apporteront un nouvel éclairage à la construction des futures installations en abordant une partie technologique importante. Tore Supra (France) a été mis en marche en avril dernier, les aimants supraconducteurs en NbTi sont refroidis à l'hélium superfluide à 1.8 °K sous pression atmosphérique selon une nouvelle conception. Les thèmes abordés, autres que les bobinages supraconducteurs, porteront sur des plasmas fortement chauffés et sur la génération de courant par ondes. Le tokamak soviétique T15, de dimension proche de celle de Tore Supra, comporte des bobinages supraconducteurs en Nb₃Sn. Il devrait être mis en exploitation en 1989.

Des nouveaux projets sont en cours de conception parmi lesquels CIT aux USA, NET en Europe, FER au Japon. Ces expériences devront supporter des plasmas thermonucléaires de longue durée. Elles auront pour objectifs, l'étude des réactions de fusion en présence de manteaux modulaires de surgénération du tritium, l'étude des matériaux qui entreront dans la composition de la première paroi du réacteur, l'effet dû au flux thermique issu du plasma et notamment dû aux disruptions et à l'arrêt des décharges. Il n'est actuellement pas prévu de récupérer l'énergie et de la convertir.

Il sera possible alors de déterminer plus précisément la nature des problèmes tant physiques que technologiques qu'il faudra résoudre avant d'extrapoler les paramètres d'un prototype de réacteur.

Il y a un an, les négociations entre la Communauté européenne, le Japon, l'URSS et les USA ont abouti à la création du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Les rencontres au sommet entre les pays industrialisés, ainsi que les rencontres Gorbachev - Reagan, avaient relancé l'idée de la coopération à l'échelle mondiale qui a pris le relais du programme INTOR. C'est chose faite, une équipe internationale a été formée. Ses travaux ont commencé au printemps dernier à Garching (RFA) où se trouve également l'équipe européenne de NET. Le but de ce programme est de mettre en commun les connaissances acquises par les quatre partenaires pour aboutir à un projet conceptuel de réacteur expérimental, réalisable soit dans leur propre

programme soit dans un programme plus vaste de collaboration internationale.

VIII Conception d'un réacteur à fusion

Pour cerner le design conceptuel d'un réacteur et les problèmes inhérents nous nous baserons en grande partie sur les travaux réalisés, à la demande de l'Euratom, en 1986 par un groupe d'experts (1). Un grand nombre d'études de réacteurs, basés sur le tokamak, ont été réalisées depuis le début des années 70, elles ont surtout permis de faire le pont sur étapes à franchir pour rendre viable techniquement, économiquement et écologiquement l'utilisation de la fusion comme source d'énergie. Le tableau 3 (réf.1) donne un aperçu de ces projets en indiquant la puissance électrique et les coûts hypothétiques. La figure 6 montre, à titre d'exemple, une coupe du projet NUWMAK (pris dans réf 2), illustrant bien les différentes régions qui entourent le plasma et qui constituent les zones où la surgénération du tritium aura lieu (blanket), ainsi que celles utilisées pour la protection (shield) des bobinages supraconducteurs (VF coils et TF coils). Cette protection a encore pour but d'isoler la partie soumise aux flux de neutrons la halle du réacteur. Dans ce projet, la structure de la première paroi est constituée par un alliage de titane-aluminium-vanadium (Ti6Al4V) qui offre une bonne tenue au flux neutronique qui a été défini ici de 4.3 MW/m^2 , le manteau serait un eutectique lithium -plomb ($\text{Li}^{62}\text{Pb}^{38}$) pour ralentir et surgénérer le tritium, enfin le liquide réfrigérant de l'eau bouillante. Les bobines supraconductrices en niobium-titane (NbTi), refroidies par de l'hélium superfluide à $1.8 \text{ }^\circ\text{K}$, produiraient un champ magnétique de 6 Teslas au centre du plasma. Il existe d'autres scénarios de réacteurs qui évolue en fonction des connaissances.

Les études portent notamment sur le design des couches fertiles (blankets) et montrent diverses options possibles parmi lesquelles on retiendra :

- le lithium liquide stagnant dans une structure en alliage de molybdène (TZM) refroidie par un sel de lithium-beryllium-fluor (FLIBE),
- le lithium sous forme d'oxyde (Li_2O),
- un eutectique liquide autoréfrigérant au lithium-plomb,
- le lithium sous forme de céramique à base de silicate ($\text{Li}_4\text{SiO}_4, \text{Li}_2\text{SiO}_3, \dots$) ou d'aluminate (LiAlO_2, \dots) réfrigéré par de l'hélium.

Des expériences ont montré qu'il était possible de récupérer du tritium de ces couches fertiles. Dans le cas de l'eutectique liquide LiPb le tritium a été

extrait à l'aide de getters au Ti ou de gaz inertes en ébullition.

En ce qui concerne les matériaux de la première enceinte des essais de résistance à la fatigue et à la traction après irradiation ont été réalisés notamment sur des aciers austénitiques et martensitiques ainsi que sur des aciers austénitiques au manganèse-chrome et sur des alliages de vanadium. Ce sont ces derniers qui pourraient être choisis pour des applications à long terme. Après examen d'un grand nombre de matériaux de protection de la première paroi (tournée vers le plasma) on retient actuellement le graphite, des carbures de silicium (SiC) et des composés de graphite-carbure de silicium.

Des expériences portant sur la solubilité, la diffusibilité et la perméabilité du tritium dans les métaux doivent faire l'objet d'études intensives. A ce propos les intérêts sont multiples puisqu'ils intéressent aussi bien les matériaux du manteau et de la première paroi mais aussi les écrans biologiques directs du réacteur ainsi que les containers de stockage.

Une partie de l'étude effectuée par l'Euratom révèle, après une étude exhaustive des scénarios, l'aspect de gain énergétique qui pourrait exister entre les différents types de centrales (Tableau 4, réf. 1). Ainsi une comparaison (Tableau 5) entre une centrale à fusion et une centrale à fission, en termes d'énergie investie et d'énergie produite sur une période de 30 ans, a fait l'objet d'une étude montrant un facteur 2 en faveur de la fusion. Une autre étude (Tableau 6) peut-être plus hypothétique, donne une estimation pour le siècle prochain, des coûts de production d'électricité, pour des grandes installations. La fourchette des coûts dépend des origines des études et des technologies impliquées dans les divers processus de fabrication des éléments entrant dans la composition des centrales.

IX Impact des réacteurs sur l'environnement

Un réacteur produisant de l'énergie (figure 7) doit satisfaire à un certain nombre de critères pour qu'il soit socialement accepté :

- l'approvisionnement doit être garanti par des combustibles existants en quantité abondante et bien répartis sur le globe,
- la propreté chimique, absence d'émission de dioxyde de carbone, SO₂, NO_x ou de substances toxiques,
- un impact radiologique faible sur l'environnement par rapport au fond naturel de rayonnement,

- la résistance aux accidents et aux catastrophes,
- la fiabilité technique,
- l'acceptabilité économique.

L'énergie de fusion, basée sur les réactions D-T, répond en partie à ces critères, il est possible de dégager un grand nombre de choix dans le design pour approcher de ceux-ci. Des progrès sont réalisés et l'on s'efforce de rechercher des solutions viables pour l'environnement, la sécurité et l'économie.

Une centrale de 1000 MWe consommerait 300 kg de lithium et 90 kg de deutérium par an. A titre de comparaison ceci équivaldrait à brûler 2'000'000 de tonnes de pétrole ou 3'600'000 de tonnes de charbon. Avec l'abondance des réserves dont la planète dispose, l'utilisation de la fusion D-T et D-D pourrait devenir une des principales sources d'énergie à long terme.

Les combustibles primaires (Li,D) et le sous-produit de réaction He ne sont pas radioactifs. Le tritium est radioactif, est produit dans la centrale et devrait y rester. Seule une première quantité, nécessaire à la première charge du réacteur, doit être transportée.

La période radioactive du tritium est de 12.3 ans et sa désintégration s'accompagne de rayonnements bêta (électrons). Il est présent en très petite quantité dans la haute atmosphère (l'inventaire naturel est de 7 à 14 kg produits par l'interaction des rayons cosmiques et l'azote). Le tritium gazeux s'oxyde à l'air et dans le sol pour former de l'eau tritiée et sous cette forme il est plus facilement absorbée par les tissus humains. L'eau tritiée ne se concentre pas dans l'organisme, il n'y a pas d'organe critique. L'échange de l'eau est relativement important, conduisant à une période biologique moyenne de 10 jours. L'énergie émise au cours de sa désintégration est déposée in situ. Sa radiotoxicité est faible, étant donné sa répartition dans l'organisme, sa faible énergie et sa courte période biologique. Aucun indice ne permet de déclarer que le tritium se concentre dans la chaîne alimentaire.

Avec un taux de surgénération de 1.02 à 1.6 la quantité de tritium conservée dans l'inventaire d'une centrale sera très réduite (2 à 3 kg), répartie dans différents buildings. Ceci aura pour effet qu'une quantité maximale de 200 g de tritium sous forme, la plus dangereuse, d'eau tritiée (HTO) pourrait s'échapper du toit du réacteur. Dans des conditions climatiques adverses ceci aurait pour conséquence qu'une dose maximum de 6 à 8 rems pourrait être déposée dans un

rayon de 1 km de la centrale.

Dans le cas des opérations de routine les effluents atmosphériques relâchés par une centrale seraient de l'ordre de 20'000 Ci (T) par an (60% HTO, 40% gaz). Ce qui équivaut à dire que, collectivement, pour 2000 centrales à fusion, le public ne serait pas soumis à une dose plus grande que 0.04 % du fond naturel. Le taux de production d'autres effluents est négligeable.

Comme nous l'avons constaté les recherches technologiques portant sur la première paroi et sur le manteau de surgénération du tritium (dans le cas d'un réacteur D-T) sont ou peuvent être liées à des problèmes qui ont des incidences sur la sécurité et l'environnement au sein de la halle contenant le réacteur et les circuits annexes. L'utilisation de matériaux tels que le vanadium ou ses alliages avec le titane, d'alliage niobium-zirconium ou des alliages d'aluminium devraient représenter une solution viable pour la première paroi (dans l'état actuel). En général la capacité industrielle existe pour produire ces alliages. La décroissance de la radioactivité après l'arrêt du réacteur est relativement rapide (figure 8, réf 2) et elles permettraient une réutilisation des matériaux à faible activation après un stockage approprié sur le site même de la centrale (pour un alliage de VTi avec 0.1% d'impuretés de Nb-Zr, l'activité serait au niveau de la roche naturelle après 30 ans).

La fusion produira des déchets qui ne sont pas associés à la réaction nucléaire: il n'y a pas production d'éléments radioactifs de type alpha tels que les actinides à longue vie produits dans la fission. Les déchets dont l'activité est élevée proviennent essentiellement de la structure.

Les circuits annexes comme ceux du pompage, de l'évacuation des "cendres" des réactions , du circuit réfrigérant sont reliés à la présence du tritium. Les normes en vigueur limiteraient les de tritium sous forme d'eau à 0.2 g/jour pour 1000 MWe. Des systèmes suffisamment étanches au fuite de tritium peuvent être conçus en incorporant des barrières anti-diffusion tels que des revêtements de céramique, du cuivre, des getters de titane...

Du point de vue de la sécurité passive, signalons qu'il n'y a pas d'excursion nucléaire au sens d' un réacteur à fission, quelle que soit la panne ou l'incident dans le réacteur à fusion, elle ne peut en aucune circonstance déboucher sur un emballement nucléaire. La quantité de combustible dans le réacteur est faible , elle est juste suffisante pour un fonctionnement de quelques dizaines de

secondes. L'interruption de l'écoulement du combustible ou un défaut du système de confinement se traduirait par un arrêt des réactions. De plus la chaleur résiduelle est faible (la densité de puissance dans un réacteur à fusion pourrait être de 0.4 MWth/m^3 comparée à 15 MWth /m^3 dans un réacteur à fission). La structure de la première paroi subirait 2% de la puissance de fonctionnement, ce qui permettrait d'éviter la fusion de la paroi.

L'immobilité de la plupart des inventaires radioactifs confinés dans des matériaux de structure non volatils, alliée au choix judicieux de ceux-ci contribue encore à la sécurité passive dans un réacteur à fusion.

X Conclusion

Les progrès récents réalisés dans la recherche en fusion thermonucléaire laissent entrevoir que le calendrier prévu par les scientifiques pour la démonstration de la faisabilité scientifique sera tenu et qu'au cours de la prochaine décennie le breakeven sera atteint. Il faudra attendre pourtant la génération des futures expériences pour voir la réalisation de l'ignition. Ces projets sont actuellement à l'étude. Ils devraient en même temps apporter une contribution, avec les recherches technologiques menées en parallèle, à la conception d'un réacteur.

Les réacteurs à fusion seront bien différents des réacteurs nucléaires à fission que nous connaissons, et les déchets des centrales seront aussi de nature différente. Cependant s'il est encore trop tôt pour définir un design précis d'un réacteur à fusion, nous pouvons au mieux, à partir d'un concept de machine torique comme celui du tokamak, envisager de résoudre séquentiellement les problèmes auxquels nous sommes confrontés. Comme nous venons de le voir, ce seront là les objectifs des futures installations expérimentales où l'ignition sera possible et que les flux de neutrons rapides seront importants pour permettre l'étude des matériaux à faible activation qui seront employés dans la structure du réacteur. Mais c'est aussi une tâche à laquelle participent, dès maintenant, de nombreux laboratoires en Europe et dans le monde. Evidemment les travaux sont ponctuels et les incidences mutuelles ne peuvent être déterminées souvent que par une approche simulée par des codes numériques.

Remerciements : L'auteur remercie vivement le professeur F. Troyon pour de nombreuses discussions fructueuses. Il remercie également M. John Maple, chef des relations publiques de JET et son équipe, pour toutes les informations et

photographies qui lui ont été fournies. Seules les photos 3 et 11 du CRPP ont été réalisées par A. Gorgerat (CRPP). Le travail a été réalisé de le cadre de l'association Suisse - Euratom.

XI Références

Les chapitres traitant de la robotique et de l'activation de la chambre à vide de JET ont été inspirés par des publications de JET, notamment :

- A.C. Rolfe : Remote maintenance of the JET tokamak, JET-P(86)03
 - T. Raimondi : Design and operation of the remote maintenance system in JET, JET-P(87)02
 - P.D.F. Jones et T. Raimondi : Large transporters for teleoperation on JET, JET-P(87)41
 - D.N. Jarvis, G. Sadler, A. Avery et k.A. Verschumer : Activation of the JET vacuum vessel ..., JET-P(88)05
 - Présentation de JET, EUR 8306 EN (EUR-JET-R11), Edité par ECSC/EEL/ Euratom, Luxembourg 1982
- 1- Environmental impact and economic prospects of nuclear fusion EURFU BRU/XII-828/86
 - 2- R.W. Conn "Magnetic fusion reactors" dans le volume 2 de " Fusion" édité par E. Teller. Academic Press 1981.
 - 3- Rapport Annuel de JET Joint Undertaking 1987

ANNEXE I :

**LA PARTICIPATION SUISSE A LA RECHERCHE EUROPEENNE
EN FUSION THERMONUCLEAIRE**

La Confédération Helvétique est associée, depuis 1979, au programme européen de recherche en fusion thermonucléaire. La participation de la Suisse au budget de l'EURATOM s'élève à environ 3,5 % du budget de celui-ci. Une grande partie du budget global est investi dans l'exploitation du JET, une autre est redistribuée vers les centres associés. C'est ainsi que l'EURATOM contribue aux travaux des divers instituts suisses impliqués dans la recherche en fusion en finançant 25 à 45 % de leurs dépenses.

L'exécution de la fraction suisse de ce programme est principalement effectuée au Centre de Recherches en Physique des Plasmas de l'EPFL. Cet institut a été le pilier central de la création de l'association. Le CRPP s'occupe de l'étude de physique fondamentale du plasma, des méthodes de chauffage du plasma, des diagnostics et des études de stabilité du plasma. Divers aspects de la technologie entourant les expériences sont également abordés.

L'Institut Paul Scherrer (PSI) s'intéresse à l'étude des matériaux et des supraconducteurs qui entrent dans la construction des installations de recherches, il participe activement à des travaux du NET.

Grâce à l'association de la Suisse à l'EURATOM, notre industrie collabore à la construction de plusieurs expériences européennes et au développement de nouveaux appareillages. Elle s'est montrée compétente et compétitive dans les domaines de haute technologie en participant à la construction de JET; le montant des mandats octroyés aux entreprises suisses est de l'ordre de 6% du total des allocations (décembre 1987).

ANNEXE II :

LE PROGRAMME TCA

(photo 11)

La Décision a été prise en 1977 de construire une machine torique du type tokamak au Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP - EPFL). Ce tokamak - le TCA - a été conçu, dessiné et réalisé dans le laboratoire, avec des contributions de l'Institut Suisse de Recherches Nucléaires (SIN), à Villingen et l'Institut Fédéral de Recherches en Matière de Réacteurs (EIR), à Würenlingen, actuellement regroupés dans l'Institut Paul Scherrer (PSI) à Würenlingen. Le montage a débuté en avril 1979 et le premier plasma a été produit en juillet 1980.

Cet appareillage expérimental pour l'étude des confinements toroidaux a été dédié principalement à la recherche des méthodes de chauffage du plasma par absorption de l'énergie déposée dans celui-ci par les ondes d'Alfvén (2 - 6 MHz). Il sert également à des études générales en physique des tokamaks, à l'étude des plasmas périphériques et de l'interaction plasma-paroi, de même que de banc d'essais pour des diagnostics nouveaux.

Notamment un laser à infrarouge lointain a été développé dans le laboratoire pour mesurer la température ionique dans le plasma du tokamak TCA. Pour cette mesure, la radiation diffusée est si faible qu'un laser de grande puissance est nécessaire. Le laser CO₂ émettant une radiation dans l'infrarouge déclenche un laser à eau lourde émettant une radiation à 0.385mm dans l'infrarouge lointain. Le laser CO₂ fournit 1000MW et le laser D₂O environ 2MW. Des mesures performantes ont été réalisées cette année indiquant des températures ioniques cohérentes avec d'autres diagnostics.

Les recherches actuelles portent également sur l'étude des fluctuations de densité, l'injection de glaçons d'hydrogène et de deutérium (pour la recharge en gaz neutre pendant la décharge) et enfin sur les procédés de boronisation de l'intérieur de l'enceinte du TCA, ce qui a pour but la diminution des impuretés, à haut Z, créées notamment par l'interaction plasma-paroi. Il est prévu également d'utiliser, sur TCA, un gyrotron, développé en collaboration avec l'industrie (ABB) pour des études de préionisation du plasma.

Les paramètres du TCA sont les suivants :

grand rayon du plasma	$R = 60.5 \text{ cm}$
petit rayon du plasma	$a = 17 \text{ cm}$
champ toroidal	$B_T = 0.8 - 1.5 \text{ Tesla}$ (40'000 fois le champ magnétique terrestre)
densité électronique	$n_e = 10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (500'000 fois moins dense que l'air)
température électronique	$T_e = 0.5 - 1 \text{ keV}$ (de 6 à 12 millions de degré)
courant plasma	$I_p = 20 - 170 \text{ kA}$
temps de confinement de l'énergie	$t_E = 1 - 4 \text{ ms}$
fréquence de chauffage Alfvén	$f_A = 2 - 6 \text{ MHz}$
puissance du générateur AFCO	$P = 1 \text{ MW}$

Tableau 2

TOKAMAK	PAYS	R₀(m)	a(m)	B_T(T)	I(MA)
JET	CEE	2.96	1.25x2.10	3.50	7
TORE SUPRA	France	2.38	0.85	4.50	1.70
ASDEX up Grade	RFA	1.65	0.5x0.8	4	4
TEXTOR	RFA	1.75	0.50	2	0.50
FTU	Italie	0.92	0.31	8	1.60
DITE	G.-B.	1.17	0.27	3.5	0.35
Compass	G.-B.	0.55	0.22x0.38	1.75	0.3
TCA	Suisse	0.60	0.18	1.50	0.135
TCV	Suisse	0.87	0.24x0.72	1.43	1.20
LT-4	Australie	0.50	0.14	3	0.06
TORTUS	Australie	0.44	0.12	1.50	0.07
Tokamak de Varenes	Canada	0.84	0.27	1.50	0.22
JT 60	Japon	3.03	0.95	4.50	2.70
JFT2M	Japon	1.30	0.3x0.5	1.60	0.50
TFTR	U.S.A.	2.48	0.85	5.20	2.50
PBX	U.S.A.	1.43-1.55	0.3-0.45	1.40	0.56
DIID	U.S.A.	1.67	0.67x1.40	2.20	5
VERSATOR	U.S.A.	0.40	0.13	1.50	0.025
TEXT	U.S.A.	0.53	0.15	1	0.40
MACROTOR	U.S.A.	0.90	0.40	0.30	0.10
TUMAN 3	URSS	0.55	0.23	0.50	0.10
T-10	URSS	1.50	0.39	5	0.65
T-15	URSS	2.43	0.70	3.50	1.40

Tableau 3

Réacteurs conceptuels D-T du type tokamak

Année de publication	Année d'évaluation du coût	MW _e net	Nom du Projet	Coût spécifique en capital direct (\$/kW _e) estimé l'année de l'évaluation
1974	1974	2030	PPPL (Princeton/USA)	433
1975	1974	1474	UWMAK I (Univ. Wisconsin/USA)	723
1975	1975	1709	UWMAK II (Univ. Wisconsin/USA)	706
1976	1975	1985	UWMAK III (Univ. Wisconsin/USA)	1154
1976	1976	2500	Culham I (UKEA-Culham/G.-B.)	750
1979	1978	660	NUWMAK (Univ. Wisconsin/USA)	1279
1980	1977	1200	Culham II B (UKEA-Culham/G.-B.)	1442
1980	1980	1200	Starfire (Argonne National Lab./USA)	1439

Tableau 4

Gains d'énergie pour diverses centrales électriques

	EG ₁	EG ₂	EG ₃
Centrale à charbon	5 - 7	6 - 9	53 - 93
Centrale à fission PWR (U enrichit par diffusion)	3 - 5	7 - 5	15
Centrale à fission PWR (U enrichit par centrifugation)	10	13	80
Centrale à fusion	5	7	64

EG₁ : énergie électrique produite/énergie thermique équivalente investie
 EG₂ : énergie électrique produite/énergie totale investie
 EG₃ : énergie électrique produite/énergie électrique investie

Tableau 5

Energie investie et énergie produite sur 30 ans

		Fusion	Fission
Construction de la centrale	(MWh _{th} /MW _e) ⁺	4082	2160
Construction des installations pour la production des combustibles	(MWh _{th} /MW _e) ⁺	16	789
Combustible pour la première mise en marche	(MWh _{th} /MW _e) ⁺	3	399*
Combustible pour la durée du réacteur	(MWh _{th} /MW _e) ⁺	87	5554*
Energie totale investie	(MWh _{th} /MW _e) ⁺	4188	8902
Energie produite	(MWh _{th} /MW _e) ⁺	6.3x10 ⁵	6.3x10 ⁵
Gain d'énergie		150	70

* En assumant un enrichissement d'un minerai à 0.2% d'uranium

+ MWh_{th} signifie toujours énergie thermique ou équivalente, et MW_e puissance électrique produite

Tableau 6

Estimation pour le milieu du 21ème siècle des coûts de la production d'électricité pour des grandes installations (~centimes d'ECU/kWh)

Fusion : 2.45 + 8.64

Fission : 1.9 + 5.3

Charbon : 3.44 + 8.2

Solaire Photovoltaïque : 5.4 + 16.4

LEGENDES DES FIGURES

- Figure 1 Sections efficaces des réactions de fusion
- Figure 2 Comparaison de divers seuils de rentabilité de la fusion D-T (Réf. 2)
- Figure 3 Schéma de principe d'un tokamak
- Figure 4 Performances comparées des installations expérimentales du type tokamak, dans le diagramme du bilan énergétique (Réf. 3)
- Figure 5 Schéma montrant les diverses installations de robotiques et de télémanipulation installées autour de JET (Dia. JET)
- Figure 6 Section de NUWMAK montrant le plasma, le manteau fertile, la protection contre les rayonnements, les systèmes magnétiques et le système de chauffage additionnel RF (Réf. 2)
- Figure 7 Schéma de principe d'un réacteur à fusion (Réf. EURATOM)
- Figure 8 Décroissance de la radioactivité dans la structure d'un réacteur à fusion en fonction du temps après arrêt, ayant opéré 2,5 années avec un flux de neutrons sur la première paroi de 1MW/m^2 .
TZM est un alliage de molybdène (TiZrMo)
LMFBR est un réacteur à neutrons rapides du type Phenix.
(Réf. 2)

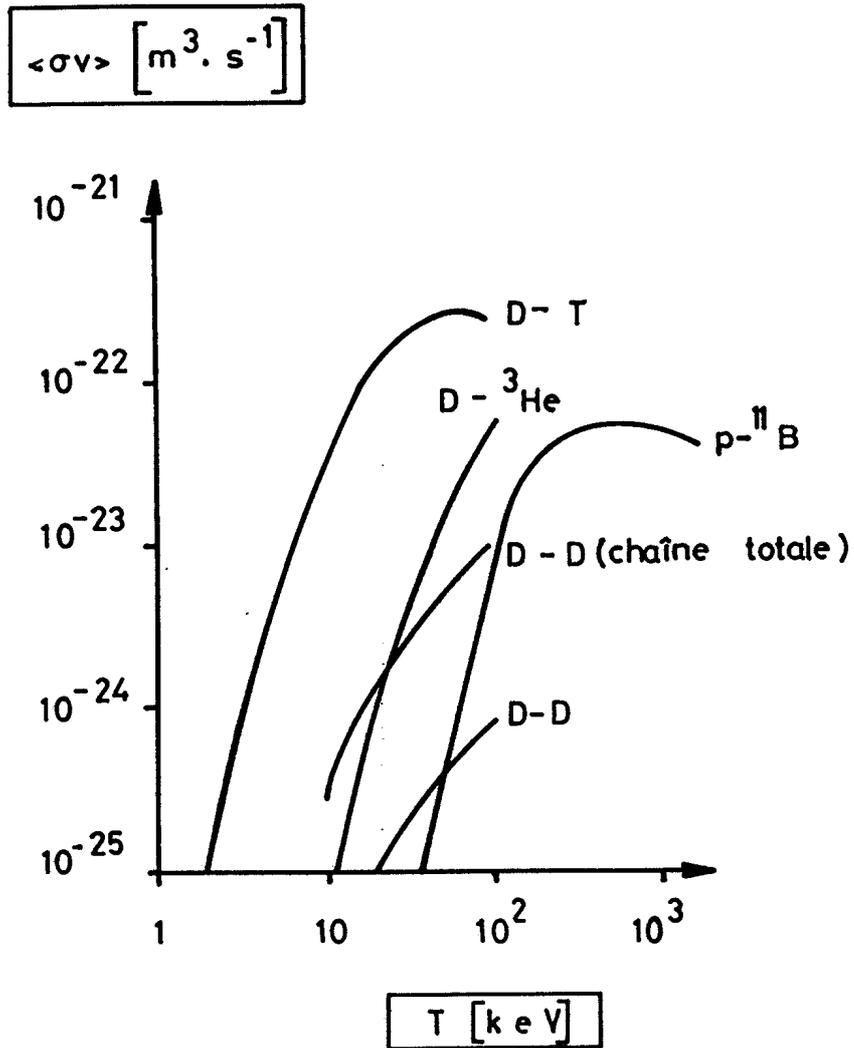


Fig. 1 : Sections efficaces des réactions de fusion

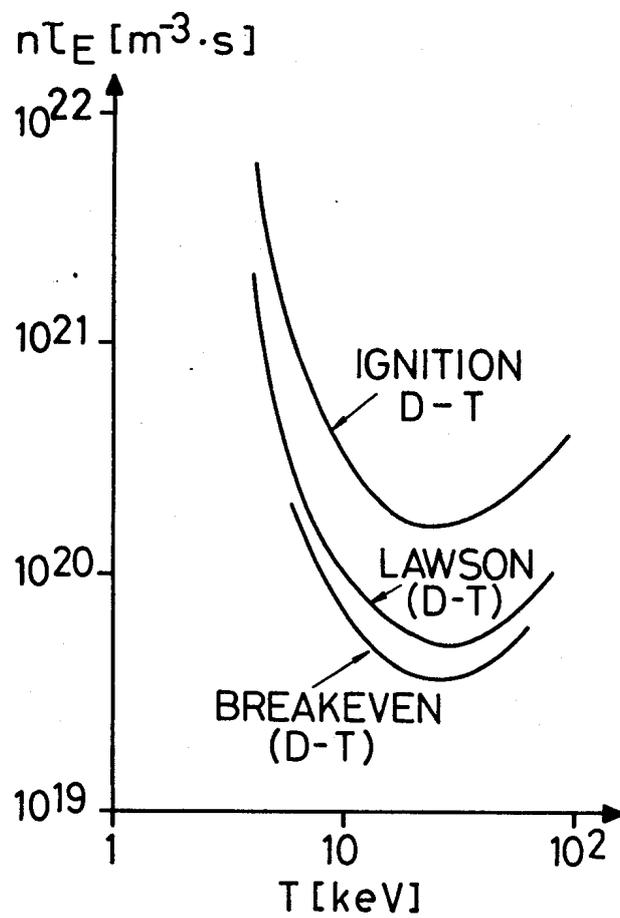


Fig. 2 : Comparaison de divers seuils de rentabilité de la fusion D-T

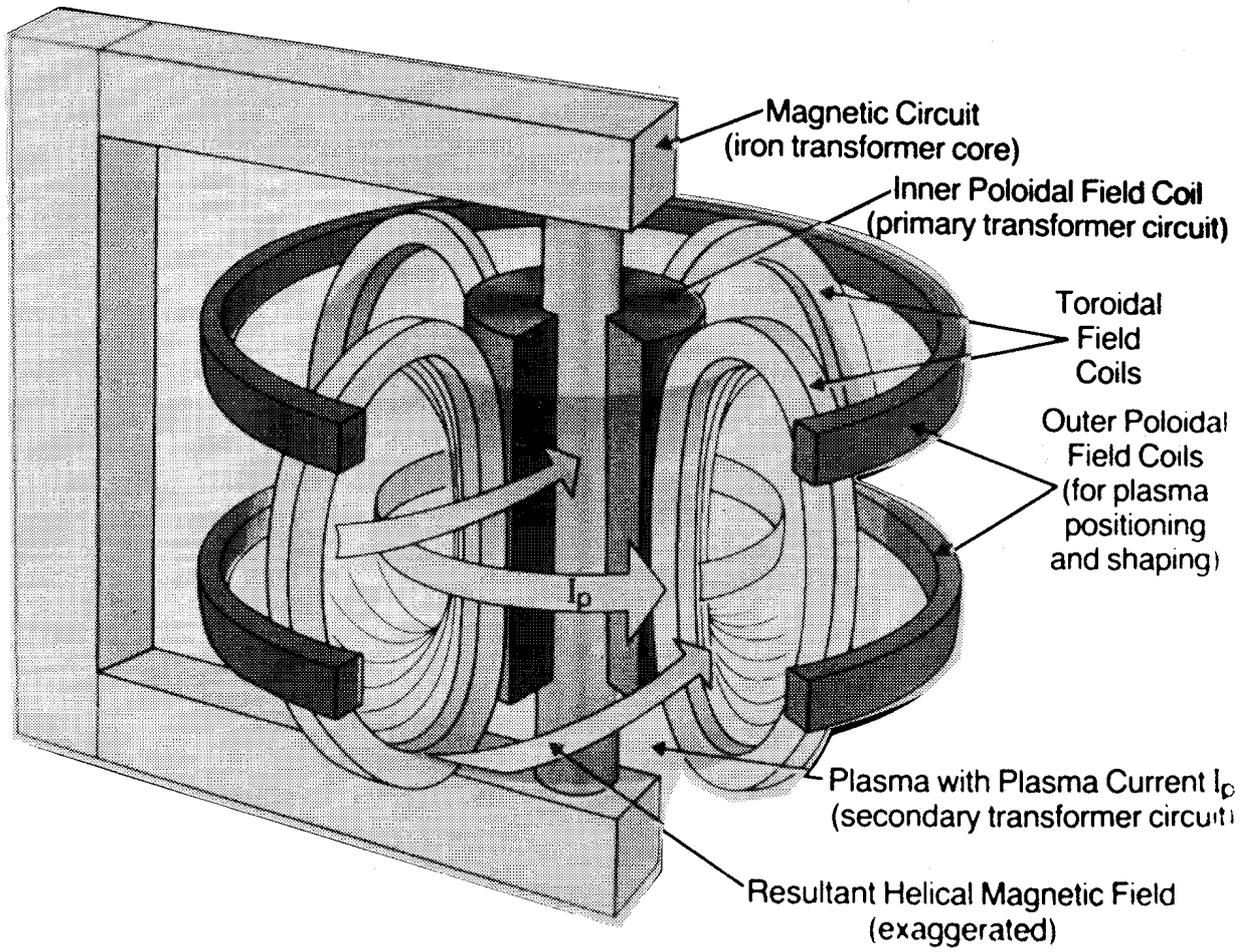


Fig. 3 : Schéma de principe d'un tokamak

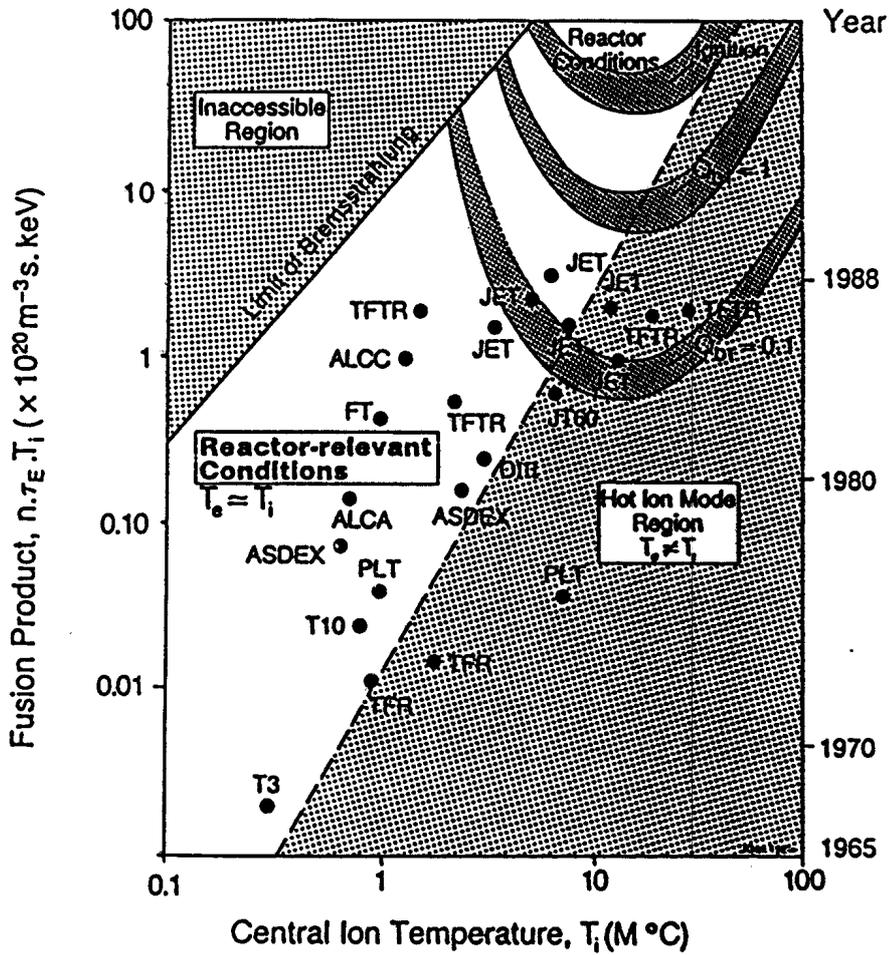
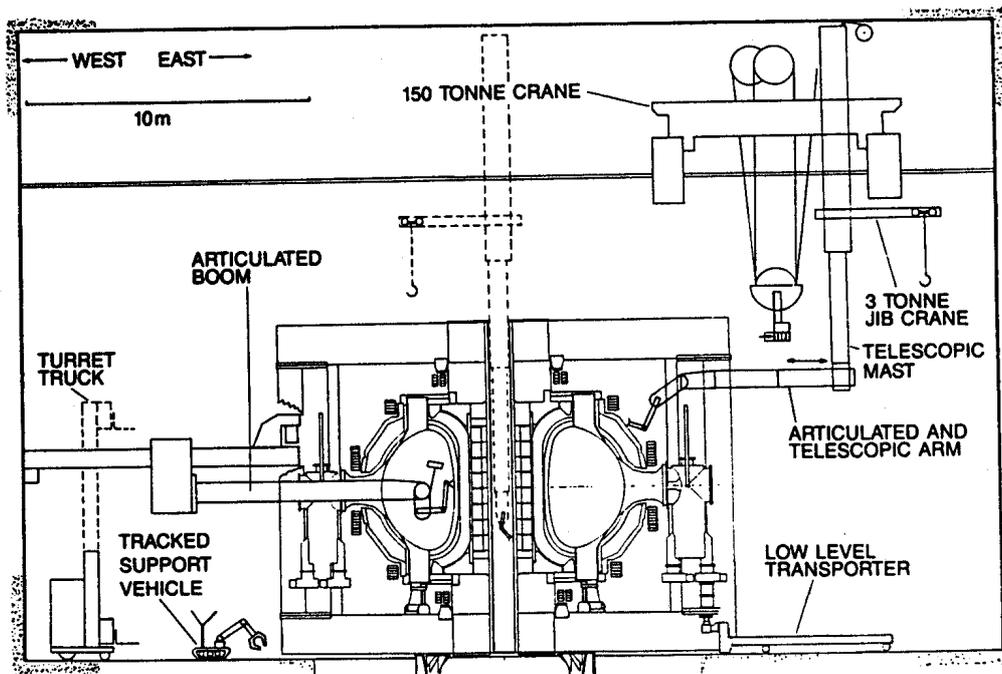


Fig. 4 : Performances comparées des installations expérimentales du type tokamak, dans le diagramme du bilan énergétique.
 (Réf. : P.H. Rebut et P.P. Lallia "JET results and the prospects for Fusion", 15th Symposium on fusion technology, Utrecht, The Netherlands, 19 - 23.9.88)



REMOTE HANDLING EQUIPMENT - OVERALL PATTERN

Fig. 5 : Schéma montrant les diverses installations de robotiques et de télémanipulations installées autour de JET

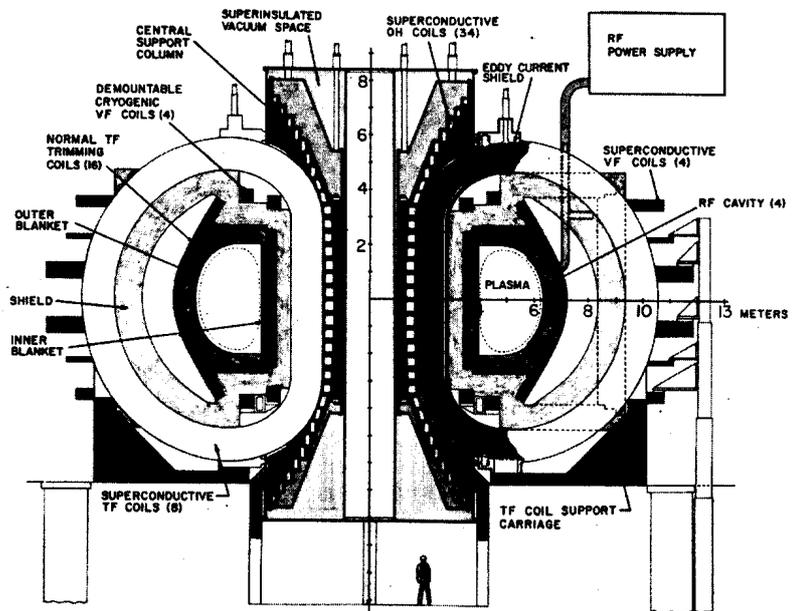


Fig. 6 : Section de NUVMAK montrant le plasma, le manteau fertile, la protection contre les rayonnements, les systèmes magnétiques et le système de chauffage additionnel RF

Schéma de principe d'un réacteur de fusion

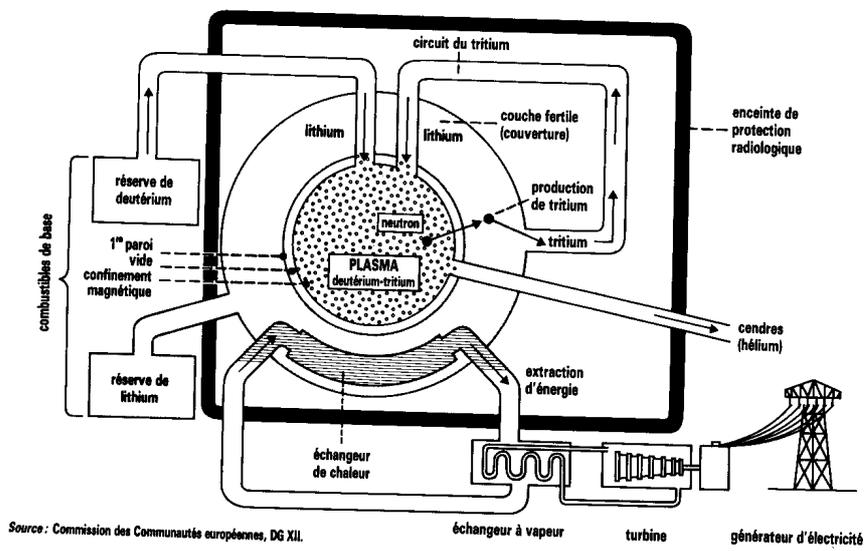


Fig. 7 : Schéma de principe d'un réacteur à fusion
(RÉF. EURATOM)

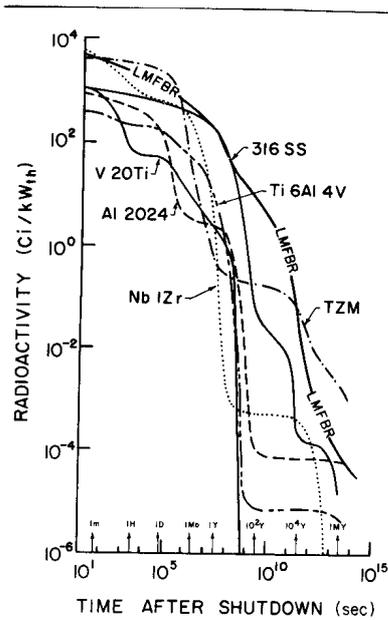


Fig. 8 : Décroissance de la radioactivité dans la structure d'un réacteur à fusion en fonction du temps après arrêt, ayant opéré 2,5 années avec un flux de neutrons sur la première paroi de 1MW/m^2 . TZM est un alliage de molybdène (TiZrMo). LMFBR est un réacteur à neutrons rapides du type Phenix.

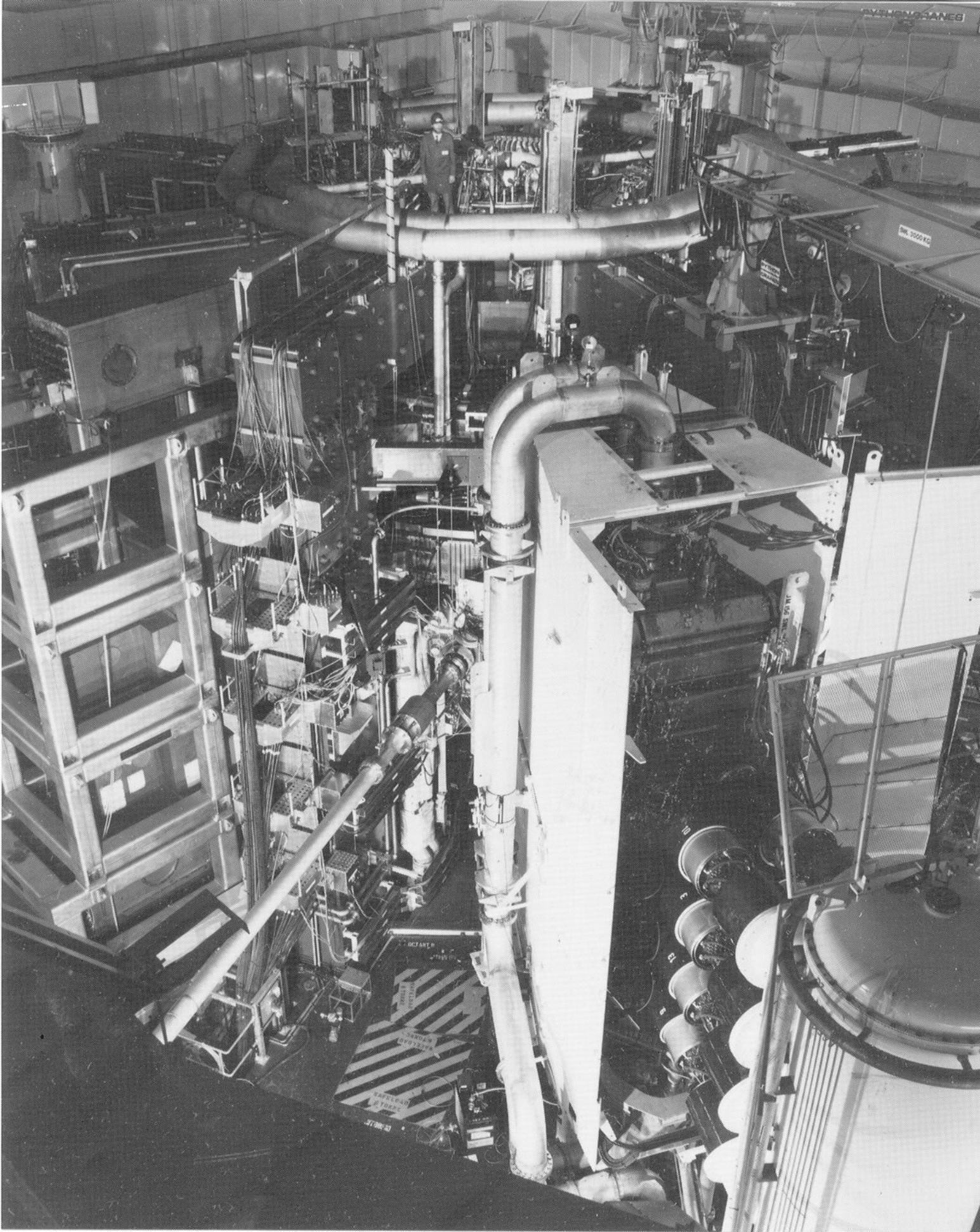


Photo 1 : Vue générale de JET avec au premier plan un injecteur de faisceaux neutres

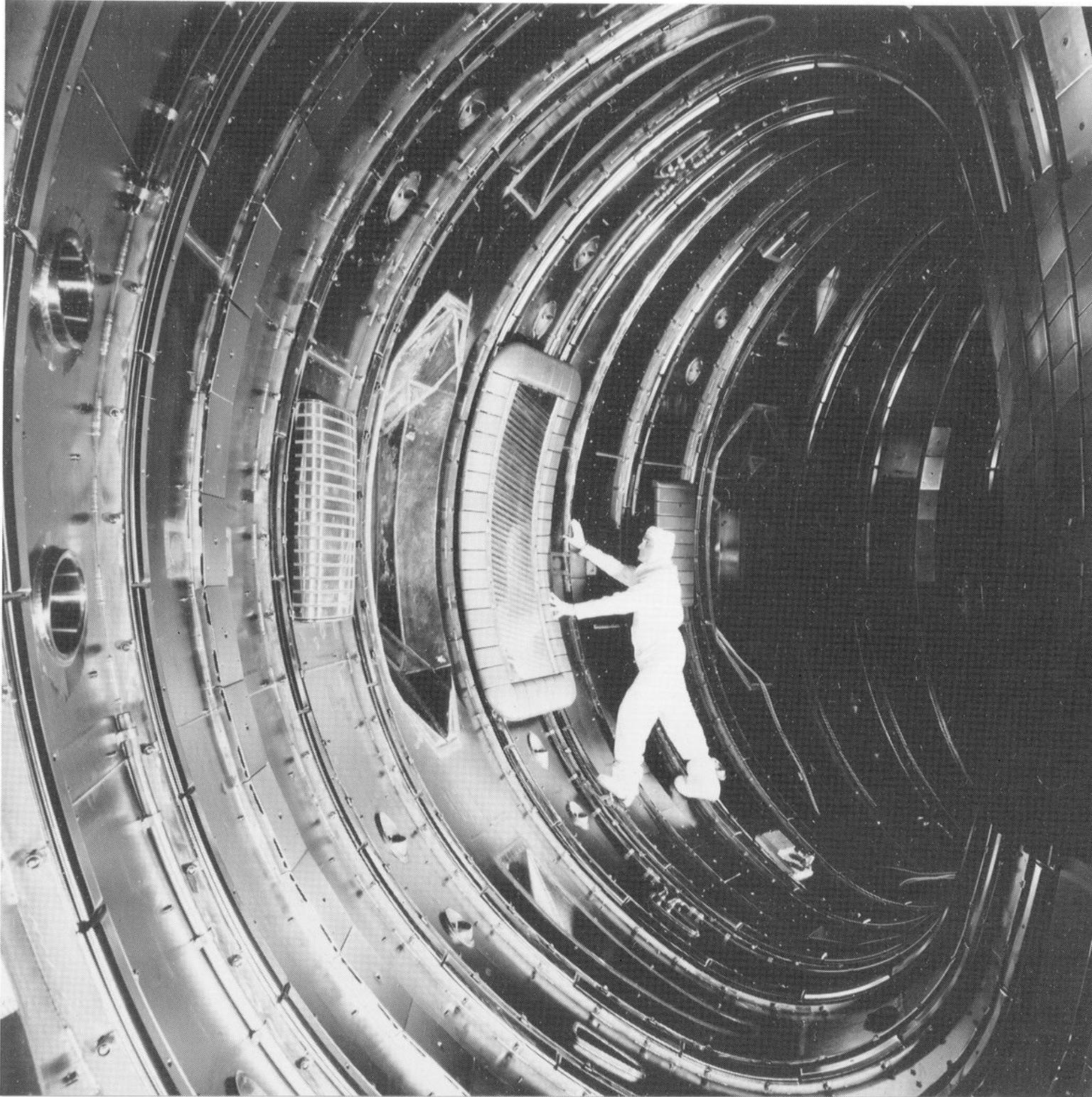


Photo 2 : Vue intérieure de JET, un ingénieur y inspecte une antenne de couplage des ondes cyclotroniques ioniques au plasma

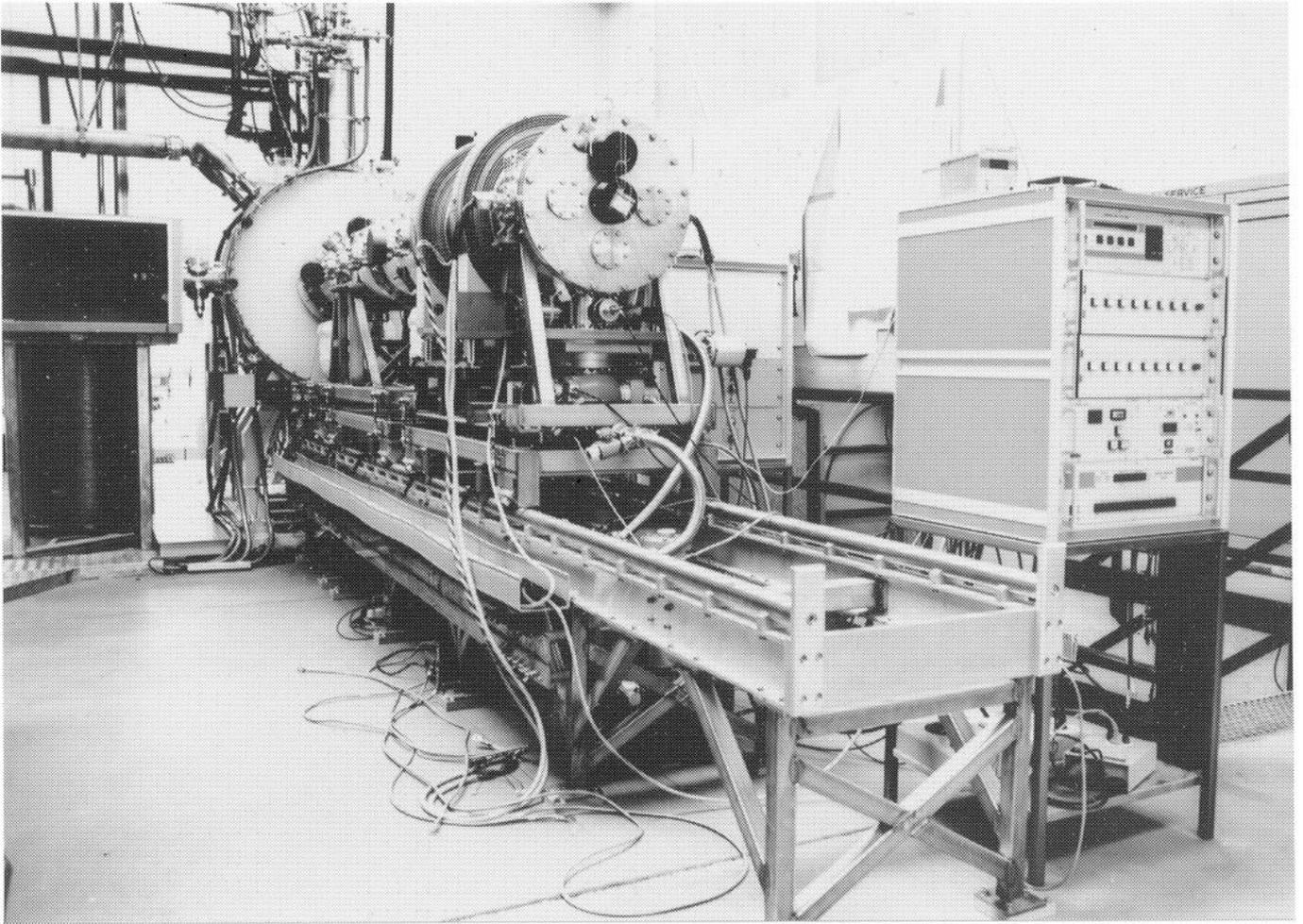


Photo 3 : Vue de l'installation d'essai du Gyrotron de 115 GHz dans une halle du Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

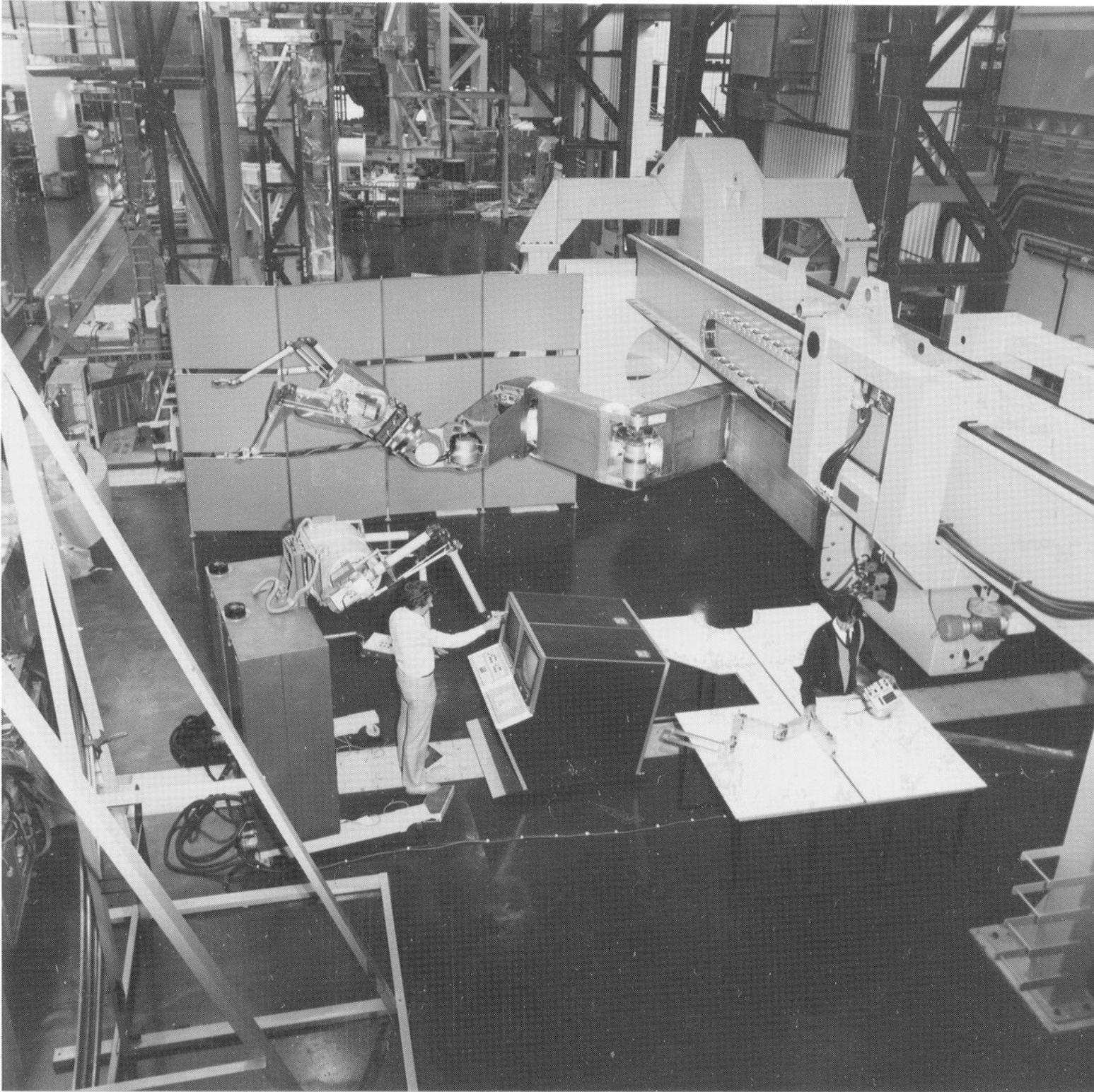


Photo 4 : Test du bras articulé permettant de travailler à l'intérieur du tore de JET

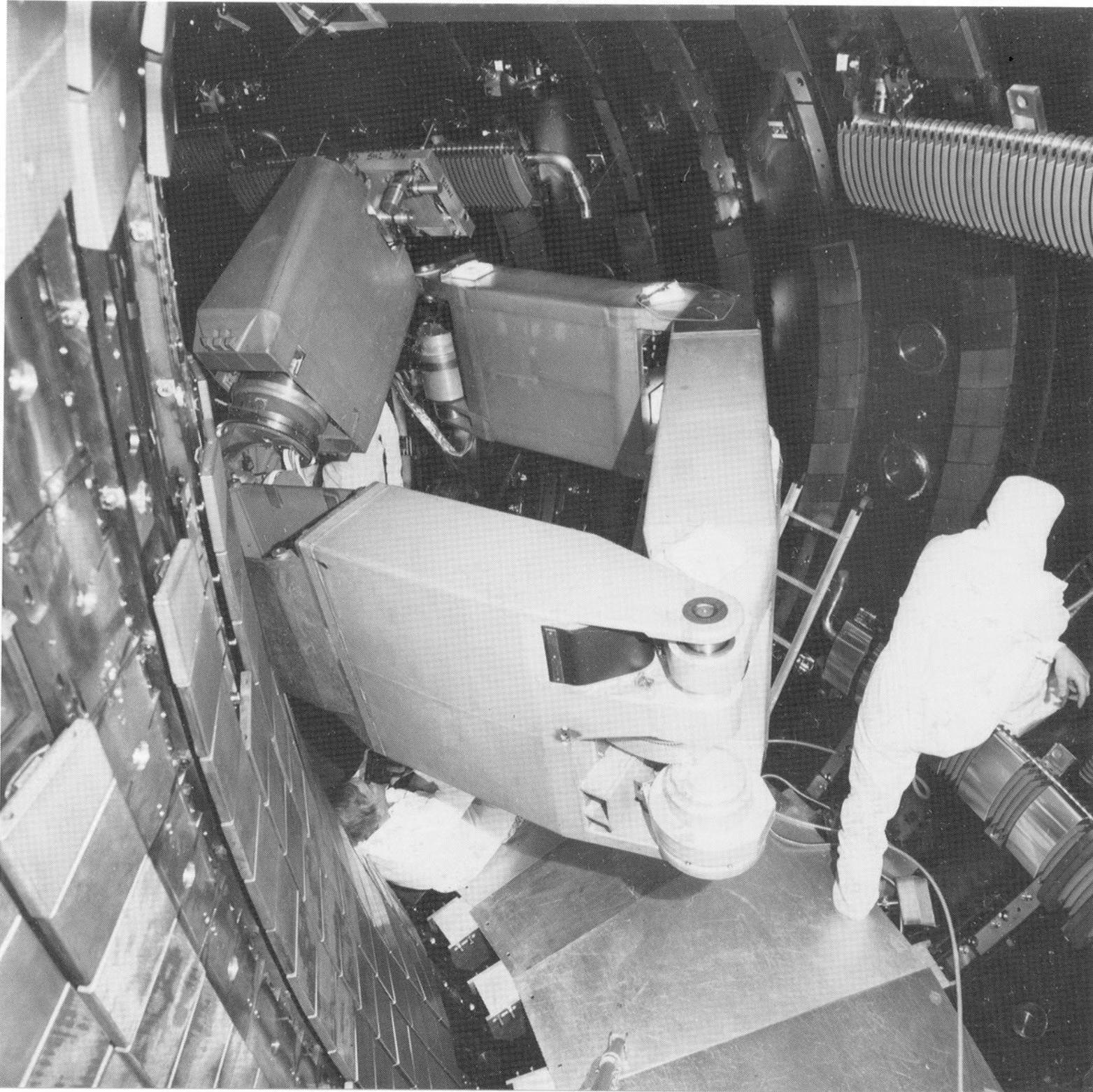


Photo 5 : La poutre articulée effectuant des travaux d'installation des limiteurs dans l'enceinte torique de JET

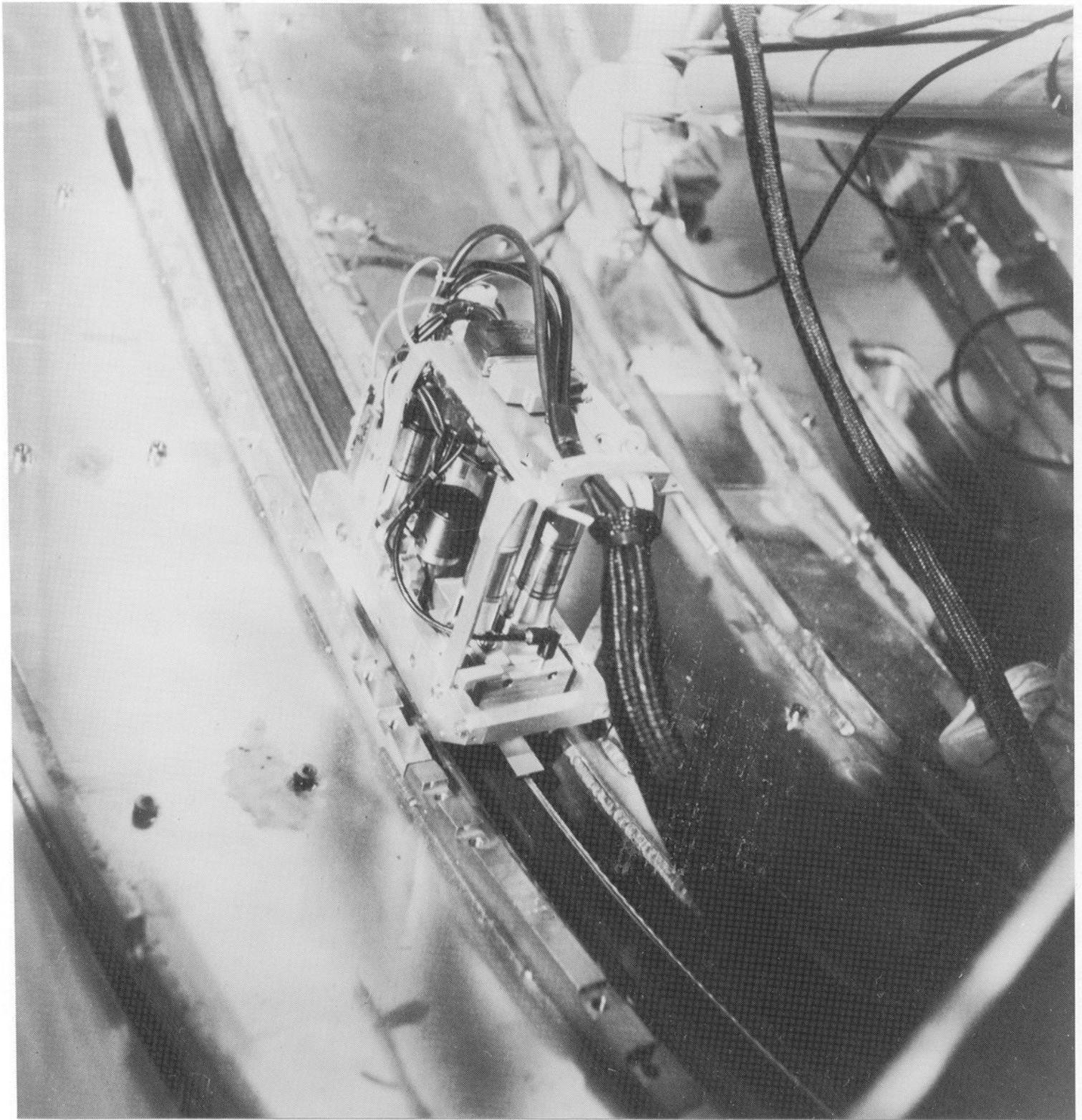
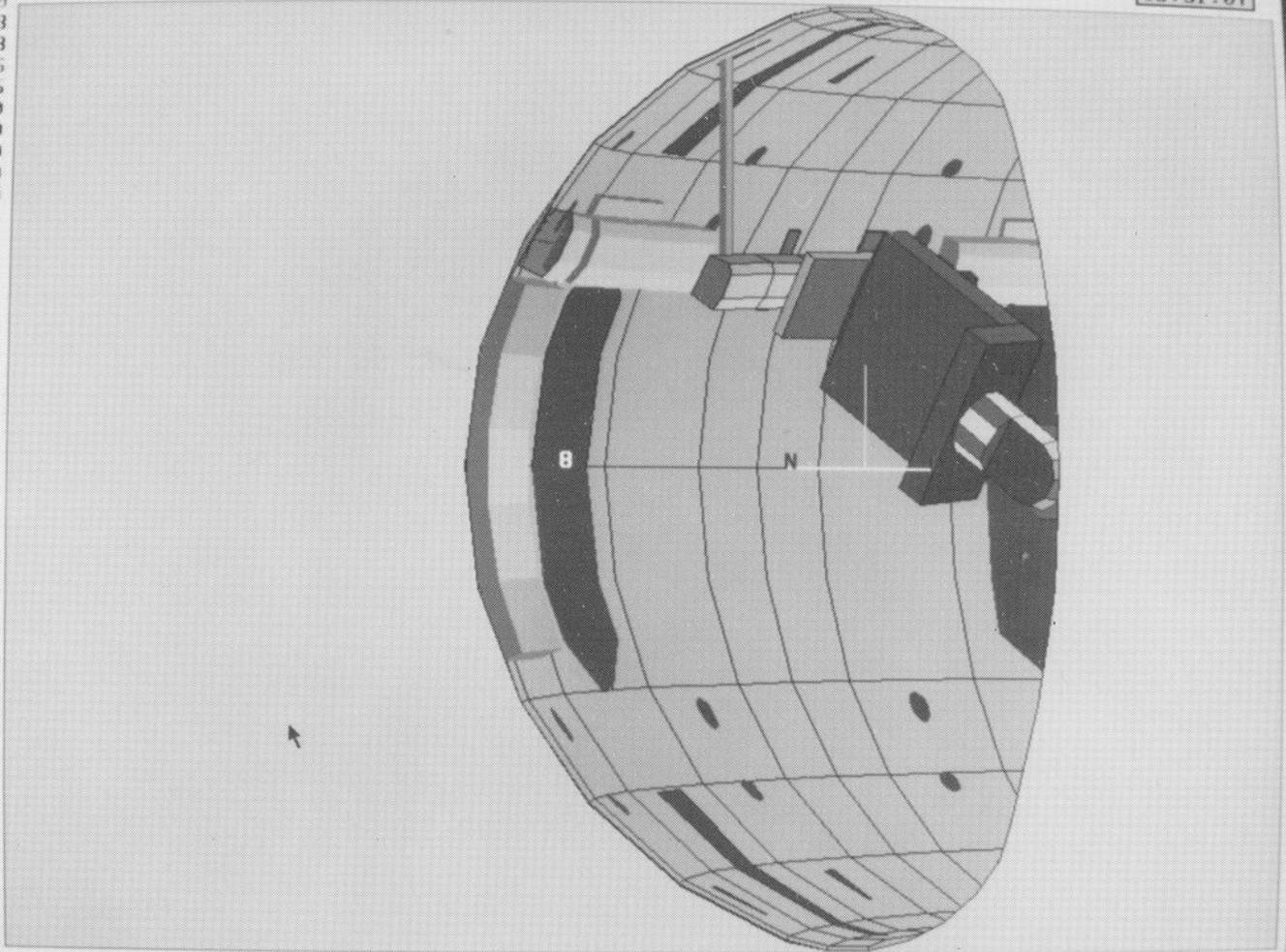


Photo 6 : Chariot de soudure TIG se déplaçant sur le guide de soudage

A_0 : 7328.0
A_1 : 33.60
A_2 : -96.03
A_3 : -1.78
A30 : 78.56
A_4 : -77.35
A_5 : -32.60
A_6 : -5.60
G_1 : -5.70
G_2 : 0.00
BL1 : 0.00

09:31:01

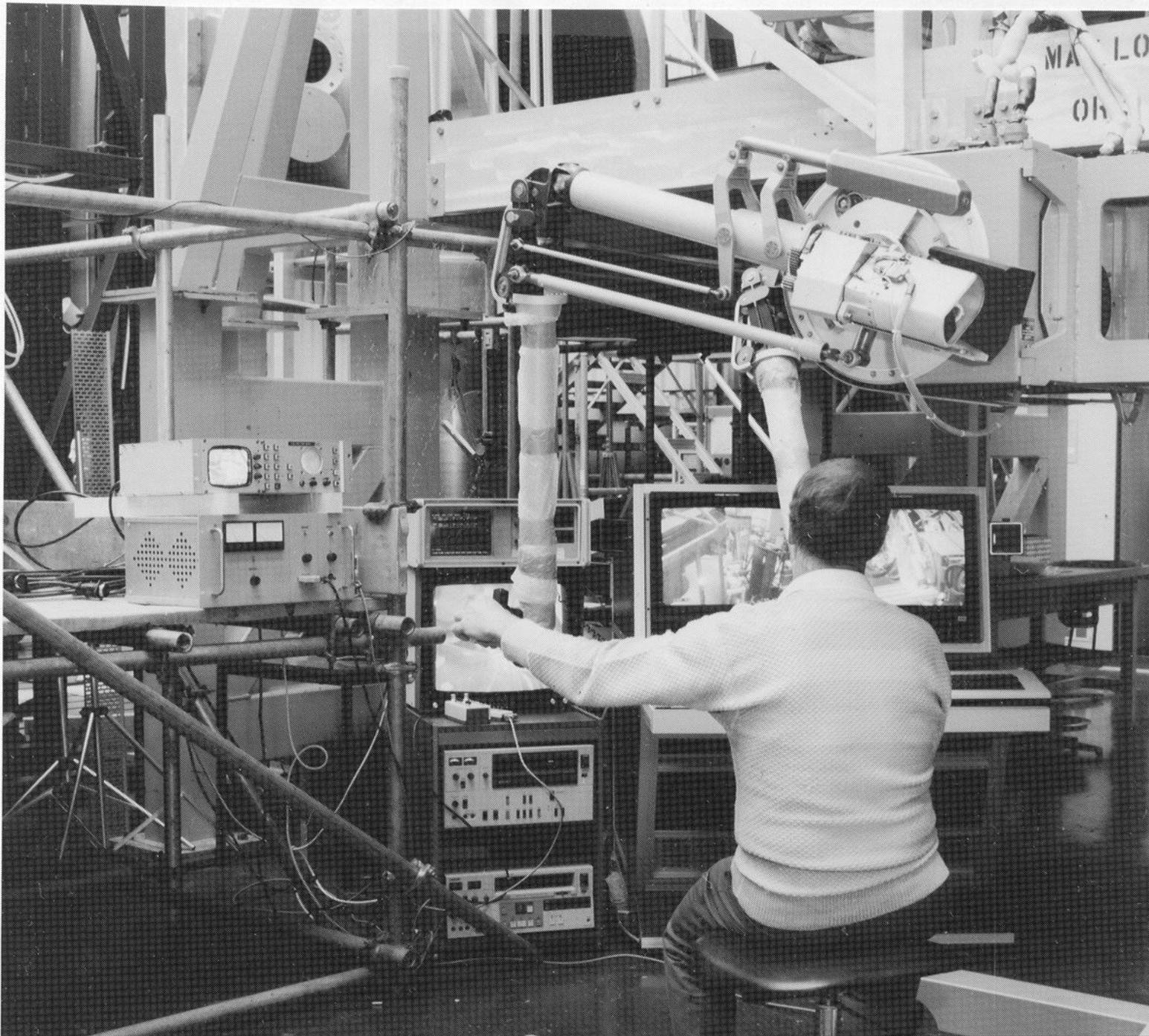


26903.0	1944.3	4213.0	n :	1500.0	E, N :	1418.9	-3233.5
0.0	0.0	29995.0	e :	0.0	r, phi :	3531.1	293.7
-13729.9	2915.4	34150.0	R :	0.0	step :		

Photo 7 : Représentation en modélisation graphique du déplacement de la poutre articulée positionnant le limiteur dans le tore. Cette représentation permet la navigation de l'ensemble manipulateur.



Photo 8 : Véhicule sur chenilles, commandé à distance et doté d'une caméra, permettant le transport et différentes activités à hauteur d'homme.



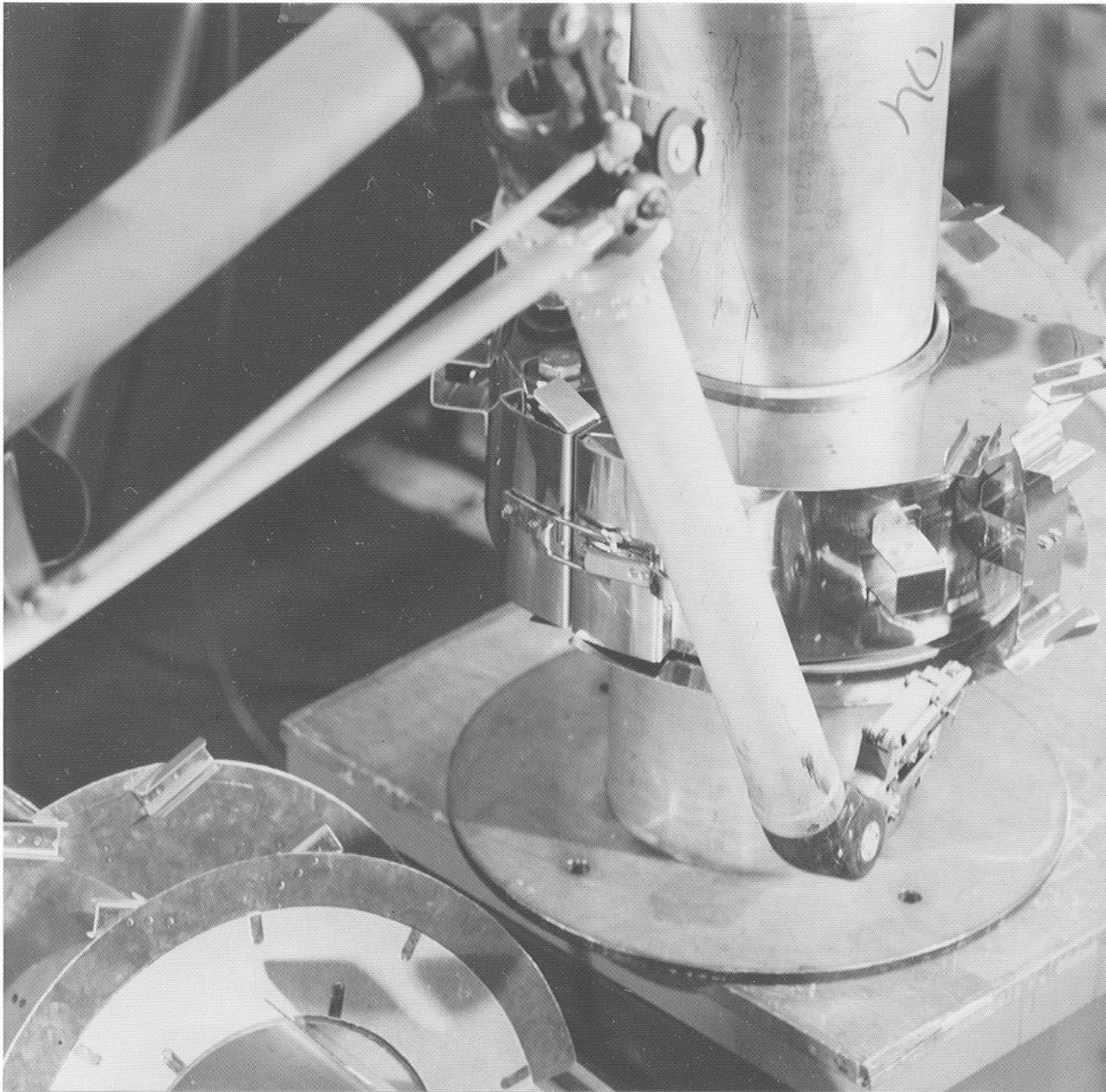


Photo 10 : Gros plan sur les outils de préhension du servomanipulateur fixant des pièces mécaniques.

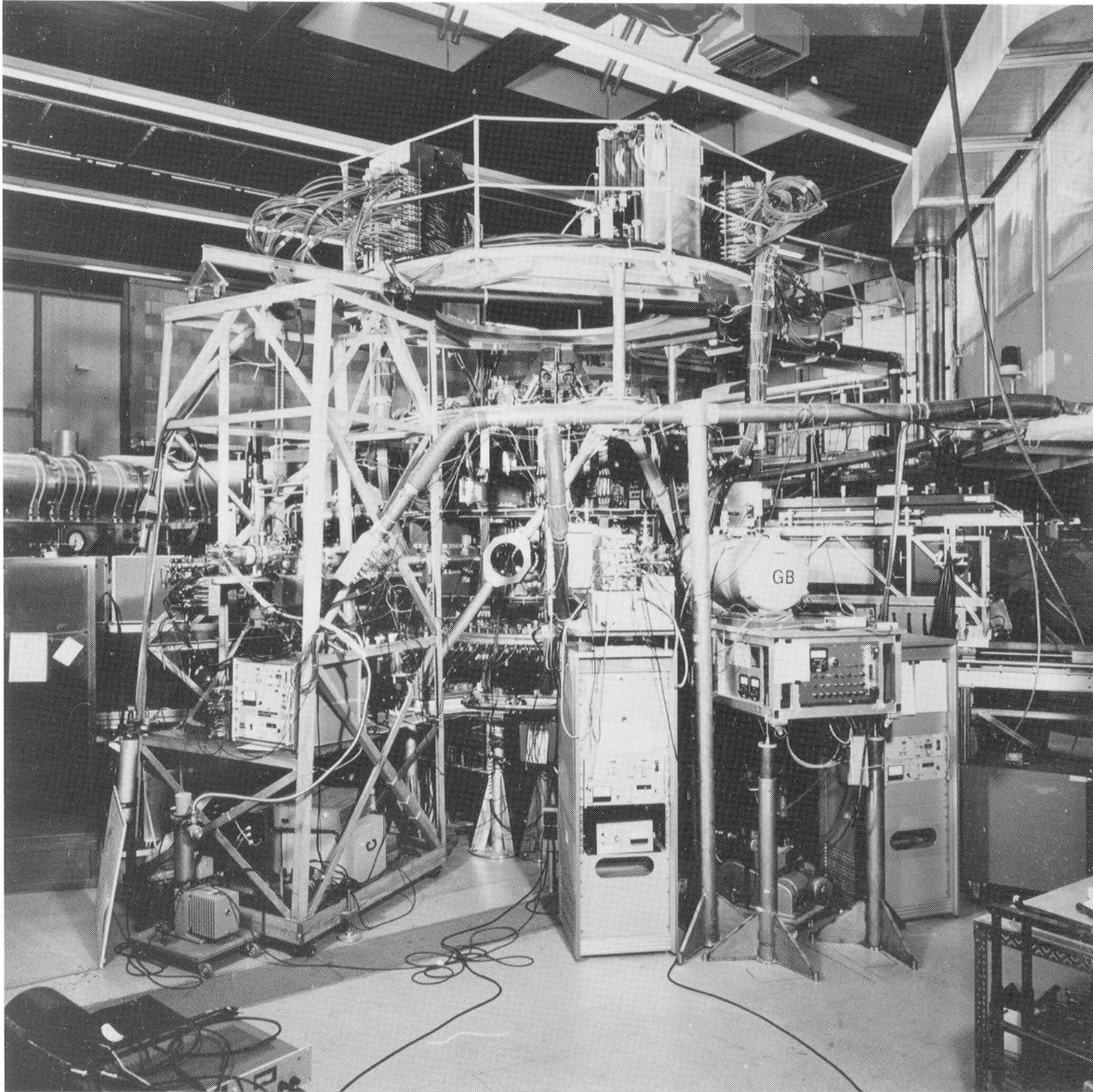


Photo 11 : Vue Générale du TCA