

NOVEMBER 1982

LRP 217/82

JET : BREAKEVEN DANS LA FUSION THERMONUCLEAIRE ?

P.J. PARIS and W. SIMM

Ce texte est à la base de publications dans les revues suivantes:

- Ingénieurs et architectes suisses (en collaboration avec F. Troyon)
- Schweizer Ingenieur und Architekt (en collaboration avec R. Gruber)
- Rivista tecnica (en collaboration avec A. Lietti, A. Succi)

Maquette : F. Bariatti

Dessins : P. Gorgerat

JET: BREAKEVEN DANS LA FUSION THERMONUCLEAIRE ?

Les recherches en matière énergétique deviennent fondamentales, que ce soit dans le domaine des énergies renouvelables ou dans celui des énergies dont les combustibles, existant en grande quantité, permettent une utilisation quasi illimitée. La fusion thermonucléaire, répondant à cette deuxième catégorie, présente de sérieux avantages en ce qui concerne les combustibles employés: elle ouvre la porte à l'indépendance énergétique. Il reste cependant des problèmes importants à résoudre, c'est pourquoi l'installation de recherche expérimentale JET (Jet European Torus) est construite en Grande-Bretagne sous l'égide de l'EURATOM, une organisation dont la Suisse est membre associé. Cette machine devrait permettre de démontrer la faisabilité scientifique de la fusion, et sera suivie par d'autres générations d'installations qui aborderont la faisabilité technologique et économique.

LA FUSION

En 1980, la consommation énergétique mondiale a été de $308 \cdot 10^{18}$ Joules, soit l'équivalent de 7 milliards de tonnes de pétrole, et soit encore 4 fois la consommation de l'année 1950. 85 % de cette énergie sont consommés dans les pays industrialisés, dont 35% aux Etats-Unis et 25% en Union Soviétique. Selon les prévisions, la demande énergétique mondiale augmentera d'un facteur 2,5 entre 1980 et 2000, en particulier à cause du développement industriel et économique des pays du tiers monde. (Fig. 1).

Les ressources énergétiques

En fait, quelles sont les exigences pour une méthode de production d'énergie ?

Elle devrait être bon marché, peu polluante, aussi indépendante que possible des conditions climatiques (soleil, vent, précipitations, etc.), et devrait également utiliser une source d'énergie si ce n'est renouvelable, du moins présente en abondance sur notre Terre, ainsi que géopolitiquement bien répartie.

Globalement, il est possible de distinguer deux formes d'énergie. L'avantage des énergies non-renouvelables à base de combustibles fossiles (pétrole, charbon) ou fissiles (uranium, thorium) réside dans le fait que sur le plan strictement technique, les unités de production d'énergie peuvent être construites à proximité des utilisateurs. Cependant, elles sont peu écologiques et de plus, les réserves mondiales de combustibles sont limitées. Au rythme d'exploitation actuel, les réserves de pétrole sont ainsi estimées à 50 ans (150 ans avec les schistes bitumeux, les sables asphaltiques et les forages en mer), celles de charbon à 400 ans. Quant aux réserves connues de matières fissiles, elles sont évaluées à 400 ans pour les centrales nucléaires classiques (LWR, PWR, etc.) et à 4000 ans pour les centrales de type surrégénérateur.

Les énergies renouvelables (hydroélectrique, marémotrice, solaire, éolienne, etc.) ont les avantages d'être peu polluantes et relativement bon marché à long terme. Cependant, leur utilisation est limitée par des facteurs climatiques et le nombre des sites exploitables. En Suisse par exemple, environ 90% des sites hydroélectriques sont déjà équipés pour la production d'énergie.

Il est donc indispensable de découvrir et de développer de nouvelles sources d'énergie. Dans ce sens, la maîtrise de la fusion thermonucléaire est peut-être le plus grand pari énergétique du XXe siècle. En effet, les réactions de fusion utilisent des combustibles existant en grande quantité sur notre planète - pour les plus accessibles d'entre elles, des isotopes de l'hydrogène tels que le deutérium (D) et le tritium (T), obtenu à partir du lithium (Li).

La fusion : combustibles et réactions

Le deutérium est un élément présent dans l'eau, à raison de 0.034 g. par litre; son rendement énergétique par gramme équivaut à celui de 10'000 litres de pétrole. Il est produit par centrifugation et par électrolyse, et son prix de revient actuel est de l'ordre de 1000 \$/Kg. Les réserves de deutérium contenues dans les mers et les océans

sont évaluées au total à $5 \cdot 10^{13}$ tonnes, une quantité qui permettrait de produire 10^{11} fois l'énergie consommée dans le monde en 1981.

Le tritium n'existe pas à l'état naturel, il doit donc être produit artificiellement à partir du lithium. Les réserves mondiales de lithium contenues dans l'écorce terrestre sont actuellement estimées à 10^8 tonnes (prix de revient environ 50 \$/kg.), ce qui permettrait d'exploiter la réaction de fusion D-T pendant plusieurs millénaires. On estime d'autre part aujourd'hui que les 10^{11} tonnes de lithium présentes dans l'eau de mer pourront être extraites de façon rentable, en profitant entre autre des usines de désalinisation.

Quant à l'hélium 3 (He_3), il n'existe pas dans la nature, mais peut être fabriqué par désintégration du tritium ou dans la réaction de fusion deutérium-deutérium (D-D) dans laquelle il est partiellement utilisé.

Les réactions de fusion thermonucléaire les plus intéressantes pour la production d'énergie sont indiquées sur la Fig. 2.

La plus grande partie de l'énergie dégagée par ces réactions est transportée par les neutrons, pour être ensuite transformée en chaleur et entraîner un système classique de turbines à vapeur.

Contrôler ces réactions qui ont lieu naturellement dans le soleil et les étoiles, maîtriser cette énergie pratiquement inépuisable, voilà le but que poursuivent depuis plus de 20 ans les nations industrialisées. Dans le cadre de ces recherches en fusion thermonucléaire contrôlée, l'expérience européenne JET (Joint European Torus) est appelée à jouer un rôle de première importance. Son but est en effet de produire des conditions proches de celles d'un réacteur à fusion, et par là même, d'essayer de démontrer la faisabilité scientifique de cette nouvelle méthode de production d'énergie.

L'énergie nucléaire de fission et de fusion

Un atome est composé d'un ou plusieurs électrons (e^-) gravitant autour d'un noyau qui contient des neutrons (n) et des protons (p^+). Ces protons ayant tous la même charge positive, ils se repoussent sous l'effet de forces dites coulombiennes. La cohésion du noyau est cependant assurée par d'intenses forces dites nucléaires, qui, contrairement aux forces électriques, n'agissent qu'à très courte distance.

La masse d'un noyau atomique n'est pas rigoureusement égale à la somme des masses des protons et des neutrons qui le constituent. Selon l'équation d'Einstein $E = \Delta m \cdot c^2$, ce défaut de masse correspond à l'apparition d'une énergie de liaison dans le noyau, énergie différente selon le type d'atome. Et c'est grâce à cette propriété qu'il existe deux possibilités de libérer l'énergie nucléaire: par la fission d'atomes lourds et par la fusion d'atomes légers. (Fig. 3).

L'énergie de fission peut s'expliquer schématiquement de la façon suivante. Lorsqu'un noyau atomique contient trop de particules, il devient instable et se fractionne en un temps variant selon sa composition : un exemple typique d'un tel processus est l'éclatement de noyaux lourds tels que l'uranium. Lorsqu'il capture un neutron, l'uranium $^{235}_{92}\text{P}^+$, ^{143}n éclate spontanément en produisant des noyaux plus légers, des neutrons et de l'énergie emportée sous forme cinétique par les produits de fission. Les neutrons issus de cette réaction peuvent à leur tour induire d'autres fissions : c'est la réaction en chaîne caractéristique des réacteurs nucléaires actuels. (Fig. 4).

La fusion (Fig. 5), au contraire, est produite par la réaction de noyaux légers qui, sous certaines conditions, s'amalgament en produisant des atomes plus lourds et de l'énergie. Afin de surmonter la répulsion coulombienne qui, à cause de la charge positive des noyaux, s'oppose aux collisions et donc à la fusion de ceux-ci, des températures très élevées sont requises. En fait, le taux de réaction

de fusion est proportionnel à $\langle \sigma v \rangle$, la moyenne du produit de la section efficace de réaction et de la vitesse des noyaux.

Libération de l'énergie de fusion

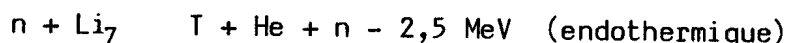
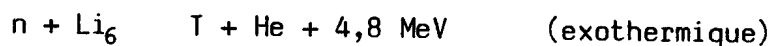
Dans le soleil et dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent à des températures de l'ordre de quelques millions de degrés et à des pressions extrêmement élevées. Dans les expériences réalisées sur Terre par contre, de telles pressions ne sont pas atteignables et le maximum de $\langle \sigma v \rangle$ est obtenu à des températures d'environ 100 à 200 millions de degrés (pour la réaction D-T). (Fig. 6).

L'agitation thermique des atomes à ces températures est telle, qu'ils éclatent et forment un mélange de noyaux et d'électrons: le PLASMA. Dans cet état, la matière est ionisée et acquiert des propriétés particulières, notamment de réagir aux champs électriques et magnétiques.

La réaction de fusion techniquement la plus accessible est:



Dans son bilan énergétique, il faudra de plus tenir compte de la production de tritium régénéré à travers les réactions suivantes:



D'autres types de réactions comme D-D (réserves de combustible plus abondantes) ou $p^+ - B_{11}$ (pas de neutrons) sont envisageables. Elles nécessitent cependant des conditions de fonctionnement beaucoup plus sévères (température) et ne pourraient donc être utilisées que dans une phase ultérieure du développement des réacteurs à fusion.

Le paramètre servant à formuler ces conditions de fonctionnement est le produit de la densité (n) du plasma par le temps (τ) de confinement de l'énergie. (τ) caractérise la qualité de l'isolation du plasma par rapport au milieu ambiant ou, comme on dit généralement, la qualité du confinement. En d'autres termes il est la mesure du temps de refroidissement du mélange de particules laissé à lui-même, sans aucun apport d'énergie.

Pour que le bilan énergétique des réactions de fusion soit positif, il faut que le produit $n\tau$ satisfasse le critère de Lawson:

$$n \cdot \tau > 0,7 \cdot 10^{14} \text{ [cm}^{-3} \cdot \text{sec]}$$

pour un mélange D-T à 100 millions de degrés.

A titre indicatif la densité n dans l'air vaut 10^{19} particules par centimètre cube (10^{19} cm^{-3}).

Quant à l'ignition du plasma, c'est-à-dire l'auto-entretien des réactions de fusion, elle nécessite des paramètres encore plus sévères ($n\tau > 0,2 \cdot 10^{15} \text{ [cm}^{-3} \cdot \text{sec]}$, à 100 millions de degrés): l'énergie perdue par le système doit être au moins compensée par l'énergie de fusion qui reste et qui est due aux particules α (He_4) dans le cas de la réaction D-T. (Fig. 7).

Les problèmes à résoudre

Schématiquement, les deux problèmes fondamentaux qui doivent être résolus pour pouvoir créer un plasma de fusion sont les suivants. Comme il n'est évidemment pas possible de maintenir un plasma ayant une telle température en contact avec une paroi matérielle, il faut le contenir et l'isoler thermiquement: c'est le problème du confinement particulaire et énergétique. De plus, pour faire fusionner les atomes du plasma, il faut le porter à de très hautes températures et l'y maintenir en compensant les pertes thermiques: c'est le problème du chauffage.

a) Le confinement

Dans le soleil et les étoiles, ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise pour porter la matière du centre aux températures de fusion (Photo 1). Le confinement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation. Ces solutions ne sont évidemment pas applicables aux expériences à échelle réduite réalisées sur Terre. En conséquence, d'autres forces de confinement que la gravitation devront être utilisées.

Une première méthode - la fusion rapide ou inertielle - consisterait à créer un plasma extrêmement dense pendant un temps très court (typiquement : $T = 10^8$ K, $n = 10^{26}$ cm⁻³, $\tau = 10^{-10}$ sec). A cette fin, une cible en matériau fusible, d'un diamètre de quelques dixièmes à quelques millimètres, est irradiée par des faisceaux de lumière laser ou des jets de particules à très haute énergie. La cible implode tout d'abord en fusionnant, puis explose sous forme d'une micro-explosion thermonucléaire. La recherche dans ce domaine est actuellement limitée par le mauvais rendement des lasers disponibles. (Figs. 8 et 9).

La seconde méthode - la fusion lente ou magnétique - consisterait à confiner magnétiquement pendant un temps relativement long un plasma ténu, mais très chaud (typiquement : $T = 10^8$ K, $n = 10^{14}$ cm⁻³, $\tau = 1$ sec.) En effet, dans un champ magnétique, les particules chargées du plasma suivent des trajectoires hélicoïdales autour des lignes de champ et sont ainsi confinées. Un des obstacles à surmonter dans cette méthode est l'apparition de nombreuses instabilités dans le plasma. Celles-ci provoquent des pertes d'énergie inacceptables et vont parfois même jusqu'à détruire le confinement du plasma (disruption). C'est pourquoi d'importantes recherches ont été consacrées ces dernières années à l'étude de ces phénomènes.

Il existe essentiellement deux types de machines à confinement magnétique. Lorsque les lignes de champ sont droites, on parle de "configuration ouverte": ce sont par exemple les pinches et les machines à miroir. Un des inconvénients majeurs de ces installations

est la fuite de l'énergie et des particules du plasma aux extrémités du volume confiné. Par contre lorsque les lignes de champ sont refermées sur elles-mêmes en formant un tore, on parle de "configuration fermée" (Fig. 10). Parmi les divers concepts de ce genre, ce sont les tokamaks (du russe Toroidal Kamera Magnetik) qui ont donné à ce jour les meilleurs résultats. Il existe cependant d'autres configurations toriques tels que les stellarators, les tores compacts, etc., sur lesquels se poursuivent des travaux expérimentaux à moindre échelle.

b) Le chauffage

Quant au chauffage du plasma, de nombreuses méthodes ont été développées (Fig. 11). La première d'entre elles consiste à induire un courant électrique dans le plasma, en profitant des excellentes qualités conductrices de celui-ci (500 fois meilleur que l'argent à 10^8 K). La dissipation ohmique produite permet d'atteindre des températures de 5 à 15 millions de degrés, limite au-delà de laquelle la méthode perd son efficacité; la résistivité du plasma décroissant lorsque sa température augmente.

La compression adiabatique - c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur - réalisée par l'application de forces magnétiques supplémentaires, est un autre procédé de chauffage, malheureusement limité par des paramètres techniques.

Une méthode qui a rencontré un succès expérimental considérable consiste à injecter des particules neutres de très haute énergie dans le plasma. Des systèmes d'injecteurs de faisceaux d'hydrogène neutre (40 kV, 6MW) ont déjà été utilisés, alors que l'on construit actuellement pour JET une installation d'une puissance de quelques MW, opérant à 120-160 kV et utilisant du deutérium. Cette méthode souffre malheureusement d'une efficacité trop faible et d'un prix trop élevé, c'est pourquoi la production de particules neutres à partir de faisceaux primaires d'ions négatifs est à l'étude.

Un autre procédé consiste à coupler au plasma, à travers diverses résonances, l'énergie d'ondes électromagnétiques. Connu sous le terme général de "chauffage haute fréquence", cette méthode porte différents

noms selon la fréquence utilisée : TTMP (~ 50 kHz), ICRH (~ 50 MHz), LHR (~ 1.5 GHz), ECRH (~ 30 GHz et plus, domaine dans lequel il n'existe pas encore de générateurs puissants). Des évidences de chauffage ont été vérifiées à toutes ces fréquences, allant du kW au MW. L'étude d'un nouveau procédé de chauffage h.f. - l'absorption résonnante par ondes d'Alfvén (1-5 MHz) - est d'ailleurs l'objectif du tokamak suisse TCA, sis au Centre de Recherches en Physique des Plasmas, à l'EPFL. (Photo 2).

La voie tokamak

Comme toutes les configurations fermées, le tokamak a un champ magnétique torique B_{tor} , produit par une série de bobines disposées autour de l'enceinte contenant le plasma. De plus, le tokamak est construit de façon à ce que le plasma forme le secondaire d'un transformateur: un courant électrique I_p est ainsi induit, qui à son tour engendre un champ magnétique polaire B_{pol} . Le plasma ayant tendance à se déplacer vers les régions de moindre énergie magnétique, c'est-à-dire vers l'extérieur du tore, il est nécessaire de la stabiliser à l'aide d'un champ magnétique vertical B_v . La superposition de ces trois champs, ainsi que le courant I_p créent des surfaces magnétiques ayant la topologie de tores emboîtés, évitant ainsi que les lignes de force ne se ferment individuellement et les particules du plasma sont ainsi confinées. (Fig. 12).

Pendant ces vingt dernières années, des progrès considérables ont été réalisés avec des systèmes du type tokamak. Les paramètres extrêmes atteints à ce jour sont $n\tau = 4 \cdot 10^{13}$ [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$] avec une température des particules $T = 1$ keV ($1\text{eV} = 11'600$ °C), et respectivement $T = 6$ keV pour $n\tau = 4 \cdot 10^{11}$ [$\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}$]. Pour atteindre les paramètres de la fusion thermonucléaire, il faudra donc encore augmenter simultanément la température d'un facteur 3 et le produit $n\tau$ d'un facteur 20, et ce dans la même installation expérimentale.

La trentaine de tokamaks de petite et de moyenne taille existant dans le monde ont pour objectif l'étude des problèmes spécifiques à ce type de configuration, contribuant en celà de façon déterminante à la conception et à la réalisation des grands projets (Fig. 13). Ceux-ci

sont actuellement au nombre de quatre en construction: le projet européen JET (Joint European Torus) sous l'égide de l'Euratom en Grande-Bretagne, TFTR (Test Fusion Tokamak Reactor) aux Etats-Unis, T-15 en URSS et JT-60 au Japon. Alors que dans JET et TFTR les paramètres du plasma seront poussés jusqu'aux limites des critères de faisabilité scientifique de la fusion contrôlée, les machines soviétique et japonaise se distinguent par l'utilisation respectivement de bobines magnétiques supraconductrices et de diverteurs.

Mais même si les scientifiques espèrent réussir le "breakeven" dans la fusion thermonucléaire, le réacteur commercial n'est certainement pas pour le XXe siècle : en effet, il faudra bien encore une trentaine d'années pour résoudre les immenses problèmes théoriques scientifiques et techniques de la fusion. Le programme de recherche européen prévoit de construire vers 1990 une installation post-JET, appelée NET (Next European Torus) et dont le but principal sera l'étude de la faisabilité technologique de la fusion. Cette machine représente une étape nécessaire à la définition et à la construction vers l'an 2'000 d'un prototype de réacteur (DEMO). En addition au programme JET, l'EURATOM poursuit avec les centres de recherches associés des études intensives sur des installations de petite et moyenne taille, dont la flexibilité permet d'aborder des problèmes spécifiques (méthodes de chauffage, configuration magnétique, etc.).

JET (Joint European Torus)

Objectifs de JET

Dans la voie de la fusion magnétique, les tokamaks sont les installations de recherche qui, jusqu'à ce jour, ont permis d'obtenir les résultats les plus intéressants. Même si ce genre de machine ne représente pas la filière incontestée pour un réacteur, il semble néanmoins probable que le premier plasma thermonucléaire sera obtenu dans un tokamak.

L'objectif de l'expérience européenne JET est de créer et d'étudier un plasma dont les caractéristiques seront proches de celles qui existeront dans un réacteur à fusion thermonucléaire contrôlée. Les performances de JET peuvent être évaluées en extrapolant, dans les limites d'incertitude, les connaissances actuelles des mécanismes de pertes d'énergie et d'instabilités du plasma. (Fig. 4).

Ces extrapolations se basent sur des lois empiriques, appelées lois d'échelle, qui font apparaître des dépendances entre certains paramètres des tokamaks. Ainsi, pour un plasma torique à faible taux d'impuretés et chauffé ohmiquement, le temps de confinement de l'énergie pour une densité donnée est proportionnel au carré du petit rayon du plasma.

La nécessité de construire des grands tokamaks est donc largement justifiée: la conception et la réalisation de JET bénéficient d'ailleurs abondamment des résultats des expériences précédentes. L'étude des domaines suivants est d'une importance fondamentale pour la progression vers la maîtrise de l'énergie de fusion:

- les propriétés de confinement du plasma lorsque les paramètres sont proches de ceux d'un réacteur ($n > 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $T_i \sim 10 \text{ keV}$, $\tau > 1 \text{ sec}$).
- les interactions entre le plasma et les parois du tore, une des causes importantes des pertes d'énergie par radiations

- le chauffage additionnel qui devraient porter le plasma aux très hautes températures requises pour la fusion
- le comportement des particules α énergétiques, issues des réactions de fusion deutérium-tritium et pouvant contribuer au maintien de la température du plasma.

Paramètres principaux

La conception de JET a été basée autant que possible sur des techniques bien établies de l'ingénierie moderne, en vouant une attention particulière au rapport qualité-prix du projet. (Fig. 15).

- le paramètre principal est le courant plasma, qui non seulement chauffe les particules, mais contribue également au champ magnétique polaire. Des études expérimentales et théoriques ayant confirmé que T et n augmentent avec le courant, celui-ci a été choisi supérieur à 3 MA dans la phase initiale, avec une possibilité d'augmentation dans le futur.
- la stabilité du plasma s'est avérée dépendre entre autres du rapport d'aspect du tokamak, c'est-à-dire du rapport entre son grand et son petit rayon. La conception financièrement la plus appropriée pour JET a été de construire un tore "dodu" ayant un rapport d'aspect de 2.4 et un grand rayon d'environ 3 mètres.
- pour des raisons de résistance mécanique à la fatigue, les bobines du champ magnétique torique ont été construites en forme de D. De plus, cette configuration permet d'étudier des plasmas à section non-circulaire, supposés être économiquement avantageux pour un réacteur.

Appareillage

Un tokamak tel que JET est composé essentiellement d'une chambre à vide torique qui contient le plasma, de bobines pour les champs magnétiques torique, polaire et vertical, d'un transformateur qui

induit le courant dans le plasma, ainsi que de différentes alimentations en puissance (Fig. 16). De plus, diverses installations contribuent au chauffage additionnel du plasma, alors que les diagnostics, ainsi que le système de contrôle et d'acquisition des données, fournissent les informations nécessaires sur le plasma.

- la chambre à vide (Fig. 17), fabriquée en inconel (acier inoxydable-nickel) est composée de 8 parties indépendantes ou "octants" (Photo 3), constitués d'une série de sections rigides jointes par des soufflets flexibles. Cette structure a été conçue pour résister aux forces dues à la pression atmosphérique et aux champs magnétiques, pouvant s'élever jusqu'à 30 tonnes sur chacune des 32 sections du tore. De plus, afin de minimiser le dégagement d'impuretés, les parois intérieures de la chambre à vide doivent être extrêmement propres (une pression de base de 10^{-10} torr a été spécifiée, en utilisant des pompes turbomoléculaires et des pompes cryogéniques à hélium liquide). A cette fin, le tore a été conçu pour être étuvable à 300-500° C. D'un point de vue électrique, la résistance de la chambre à vide est grande par rapport à celle du plasma, afin d'éviter que le courant ne circule en majorité dans le tore métallique. A l'intérieur de la chambre à vide sont disposés une série d'écrans qui protègent les soufflets d'un contact avec le plasma. De plus, des éléments dépalçables appelés "limiteurs" et construits en métal, en céramique ou en graphite (selon les expériences), permettent de fixer la position du bord du plasma.

- le champ magnétique torique est produit par 32 bobines en forme de D (photo 4). Ces bobines, qui peuvent créer un champ de 3 Tesla pendant environ 20 secondes, sont fabriquées en cuivre, refroidies à l'eau et intégrées dans une structure mécanique qui supporte les forces dues à l'interaction des champs polaire et torique (Fig. 18, Photo 5). Les 12 bobines circulaires du champ magnétique polaire, montées à l'extérieur des bobines toriques, ont deux fonctions principales. D'une part, elles servent d'enroulement primaire au transformateur dont le plasma est le secondaire. D'autre part, étant connectées en parallèle de façon à simuler une coque en cuivre, elles contribuent au contrôle de la position du plasma.

- l'efficacité de couplage du transformateur est améliorée par l'adjonction d'un noyau en fer à 8 branches. Cette structure, dont le poids total est de 2800 tonnes, réduit également significativement le champ magnétique à l'extérieur de l'installation, ce qui est très important pour les diagnostics et l'injection de neutres.
- l'alimentation électrique de JET est assurée par deux lignes à haute tension, l'une de 132 kV pour les besoins en puissance continue, l'autre de 400 kV (600 MVA) pour les besoins pulsés. L'énergie nécessaire à l'établissement et au maintien d'un plasma dans le tokamak est d'environ 10 gigajoules (250 MW pendant ~ 40 sec). Une partie de cette énergie est tirée directement du réseau électrique, l'autre partie étant fournie par deux générateurs à volant ("flywheel generators", 400 MW/2600 MJ par pulse chacun).
- deux méthodes de chauffage additionnel du plasma sont prévues pour JET, d'une puissance totale de 60 MW. Le chauffage par ondes électromagnétiques utilise la fréquence cyclotronique ionique (ICRH, env. 25 à 55 MHz). Le chauffage par injection de particules neutres est composé de quatre installations accélérant les noyaux d'hydrogène jusqu'à 80 kV/60 A et ceux de deutérium jusqu'à 160 kV/30 A.
- afin d'étudier les propriétés d'un plasma chaud, il est nécessaire de disposer d'une gamme très étendue de méthodes de mesure. Ces méthodes - ou "diagnostics" - peuvent se diviser en deux groupes. Les diagnostics passifs comprennent l'analyse des rayonnements et des particules émises par le plasma, ainsi que l'étude des variations des champs électriques et magnétiques. Dans les diagnostics actifs par contre, sont inclus l'étude de faisceaux laser diffusés ou déphasés par le plasma, ainsi que l'analyse de faisceaux de particules injectés dans celui-ci.
- l'énorme quantité d'informations qui doit être traitée lors des expériences sur JET (1 méga-mot/pulse) a nécessité le développement et l'installation d'un système automatique de contrôle et d'acquisition des données, appelé CODAS. Il est basé sur un réseau

de mini-ordinateurs qui contrôlent les séquences d'opération de l'appareillage et enregistrent les résultats des mesures. Après chaque pulse, ces données subissent un traitement numérique et sont visualisées.

- étant donné qu'il est prévu de travailler en régime D-T dès 1988 et afin de protéger personnes et environnement contre le rayonnement X et le flux neutronique qui seront produits lors des décharges, JET est construit dans un bâtiment ayant des parois en béton de 2.8 m. d'épaisseur. Lorsque la structure de JET sera activée par les neutrons de fusion de la réaction D-T, la conception modulaire de la machine et le recours aux techniques de télémanipulation permettront d'effectuer la maintenance et les modifications nécessaires.

La construction de JET

La phase de construction a officiellement débuté en 1977 avec la création du "JET Joint Undertaking". Erigé sur le site du laboratoire de Culham (UKAEA) en Grande-Bretagne, ce projet coûtera dans sa forme initiale environ 287.5 MECU (millions d'unités de compte européennes), soit environ 550 millions de francs suisses (valeur 1981) (Photo 6). Ces dépenses se répartissent comme suit :

machine JET	16%
alimentations	17 %
chauffage additionnel	10 %
diagnostics, contrôle et acquisition des données	10 %
personnel	19 %
services	9 %
immeubles	17 %
réserve	2 %

80 % de cette somme sont versés par l'EURATOM, 10 % par le pays hôte (le Grande-Bretagne) et les 10 % restants par les partenaires associés au programme européen de recherche en fusion contrôlée.

Au 1er janvier 1982, environ 260 personnes, dont 130 ingénieurs et physiciens, travaillaient sur JET. Ce nombre, qui ne tient pas compte des contractants qui collaborent au projet, est appelé à augmenter jusqu'à environ 320 personnes d'ici le début de la phase d'exploitation.

La réalisation d'un projet aussi important que JET ne saurait se faire sans la collaboration de l'industrie, pour laquelle le développement et la construction de certains éléments ont d'ailleurs été de véritables défis technologiques. Dans ce cadre, l'industrie suisse a pu démontrer sa compétitivité en fournissant entre autres des bobines de champ magnétique, une partie du système de haut vide, des composants électroniques et électromécaniques. C'est ainsi qu'au 1.1.1982, 5.47 % du montant total des commandes de JET ont été attribuées à des entreprises helvétiques, alors que la contribution suisse à JET représente 3,4 % du coût de l'ensemble du projet. (Photos 7 et 8).

Etat de JET et programme expérimental

Alors que les travaux de génie civil sont quasiment terminés, les différents éléments de la machine arrivent au fur et à mesure sur le site, pour y être testés, conditionnés, puis assemblés. C'est ainsi que les 8 octants ont déjà été livrés, et que leur insertion entre les branches du transformateur pourra bientôt débiter. La photo 9, prise fin juin 1982, donne un bon reflet des dimensions de la machine et de l'état d'avancement des travaux.

La version actuelle du programme de JET se présente de la façon suivante :

- 1975 plans de JET proposés et acceptés
- 1977 choix du site, création du "JET Joint Undertaking" et début des travaux.

- 1983 en juillet, premier plasma, début du programme expérimental
PHASE I : études d'un plasma d'hydrogène
- 1985 PHASE II : amélioration des performances de la machine (courant plasma, champ magnétique, chauffage additionnel, etc.)
- 1988 PHASE III : début des expériences de fusion en utilisant le tritium, si les conditions scientifiques et techniques le permettent.
- 1990 arrêt de l'expérience.

Le but final du projet JET est d'atteindre le "breakeven" et peut être d'approcher les conditions d'autoentretien des réactions de fusion thermonucléaire contrôlée. Cela nécessitera une extension des performances de la machine pour la phase II, ainsi que des équipements supplémentaires pour la phase III (systèmes de télémanipulation, traitement du tritium, etc.). Incluant les coûts d'opération, le budget 1982-1986 de JET est d'un montant de 298 MECU.

La recherche mondiale en fusion

Le projet JET représente actuellement 20 % de l'effort de recherche européen en fusion thermonucléaire contrôlée : il est ainsi un complément logique aux programmes nationaux d'étude des tokamaks. Sur le plan mondial, des projets de même importance que JET sont développés dans les autres pays industrialisés (Fig. 19) : toutes ces machines ont suffisamment de similarités et de différences pour se compléter les unes les autres.

REMERCIEMENTS

Pour la deuxième partie de cet article, les auteurs remercient le JET-Joint Undertaking pour les détails empruntés dans les diverses publications de cette organisation. Ils remercient également le Professeur F. Troyon pour ses commentaires et ses discussions fructueuses, ainsi que les Drs. A. Gibson et B. Green, de JET, pour les communications privées et les photographies.

Progression de la consommation d'énergie et accroissement de la population mondiale

Zone	Part dans la consommation mondiale			Part dans la population mondiale		
	1950	1974	2000	1950	1974	2000
Pays Occidentaux	75%	61%	45%	24%	21%	16%
Pays de l'Est	18%	23%	25%	11%	9%	7%
Tiers-Monde	7%	16%	30%	65%	70%	77%
Monde	100%	100%	100%	Pop. totale(en 10 ⁶ hab.)		
Consommation mondiale (en 10 ¹⁸ Joules)	75.08	243.81	807.21	2483	3871	6403
				Consommation en J/hab.		
				3·10 ¹⁰	6·10 ¹⁰	12,6·10 ¹⁰

Pays occidentaux = Amérique du Nord, Europe Occidentale, Japon, Afrique du Sud, Océanie, etc.

Pays de l'Est = URSS, Europe de l'Est

Tiers-Monde = Chine, Afrique, Asie, Amérique du Sud, etc.

FIG. 1 : TABLEAU 1

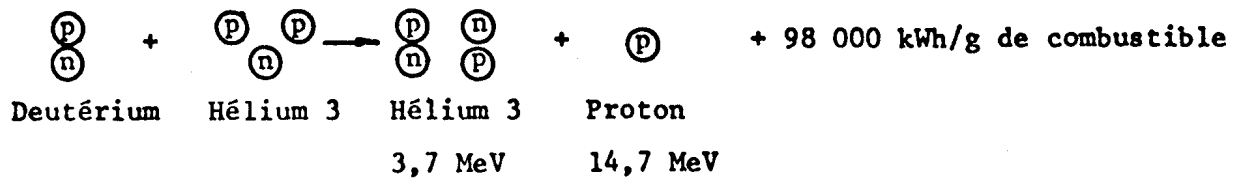
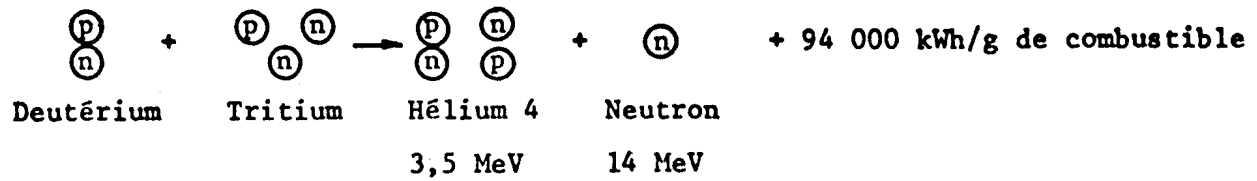
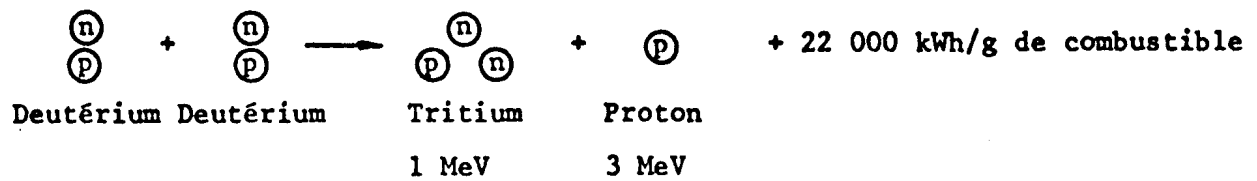
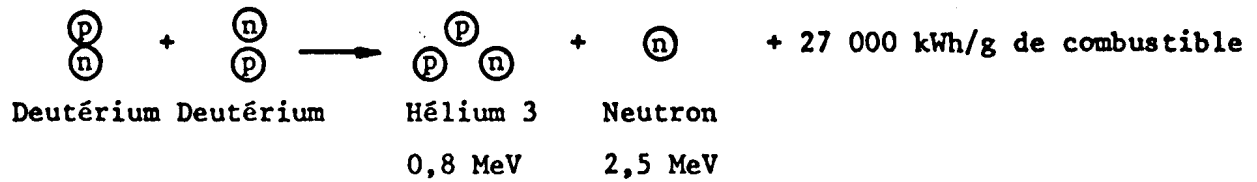


FIG. 2 : LES PRINCIPALES REACTIONS DE FUSION

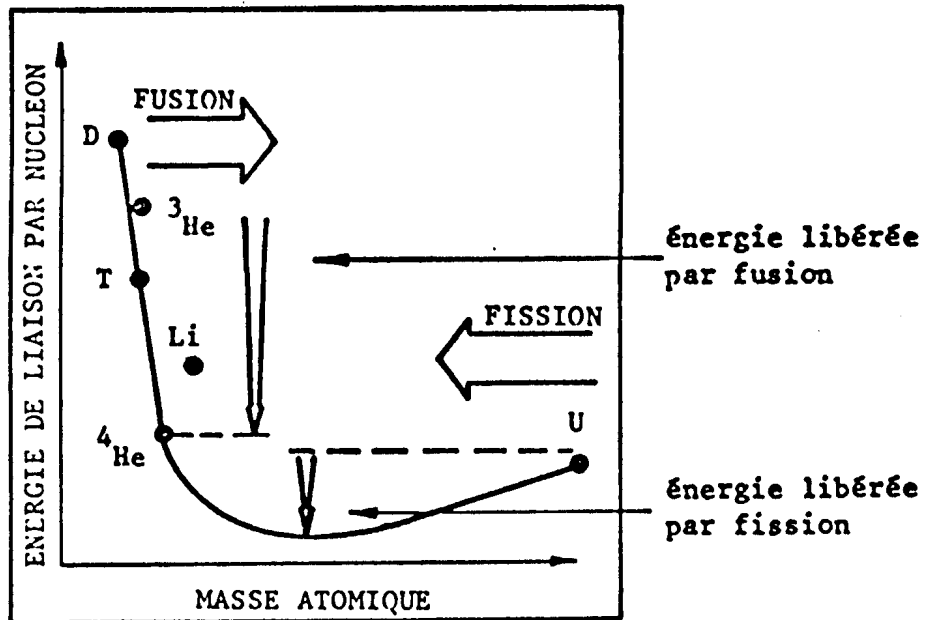


FIG. 3 : ILLUSTRATION DE L'ENERGIE LIBEREE PAR LES REACTIONS NUCLEAIRES

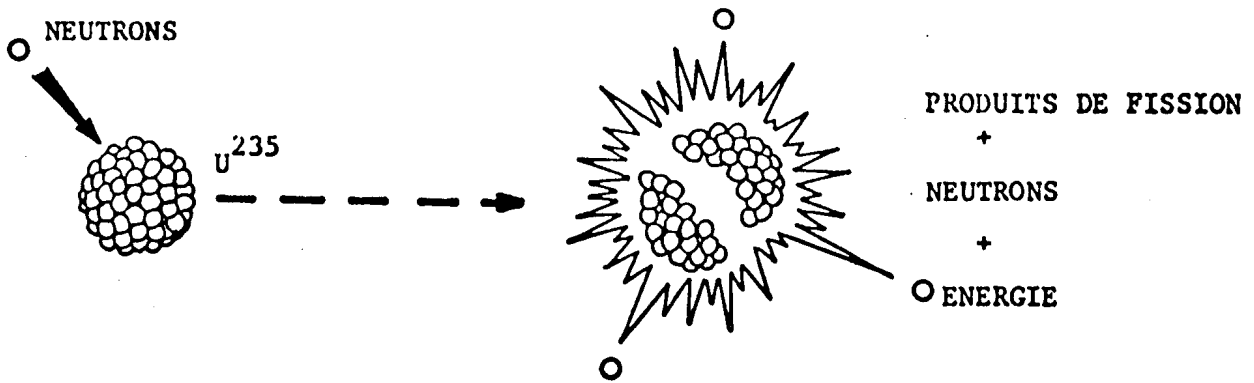


FIG. 4 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA FISSION

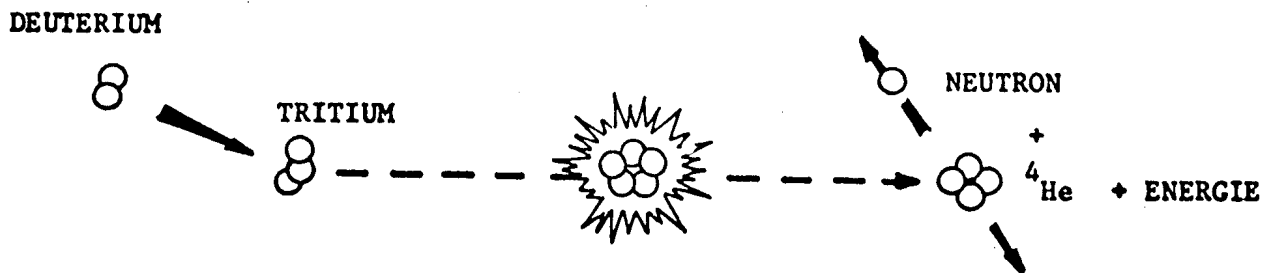


FIG. 5 : SCHEMA DE PRINCIPE DE LA FUSION

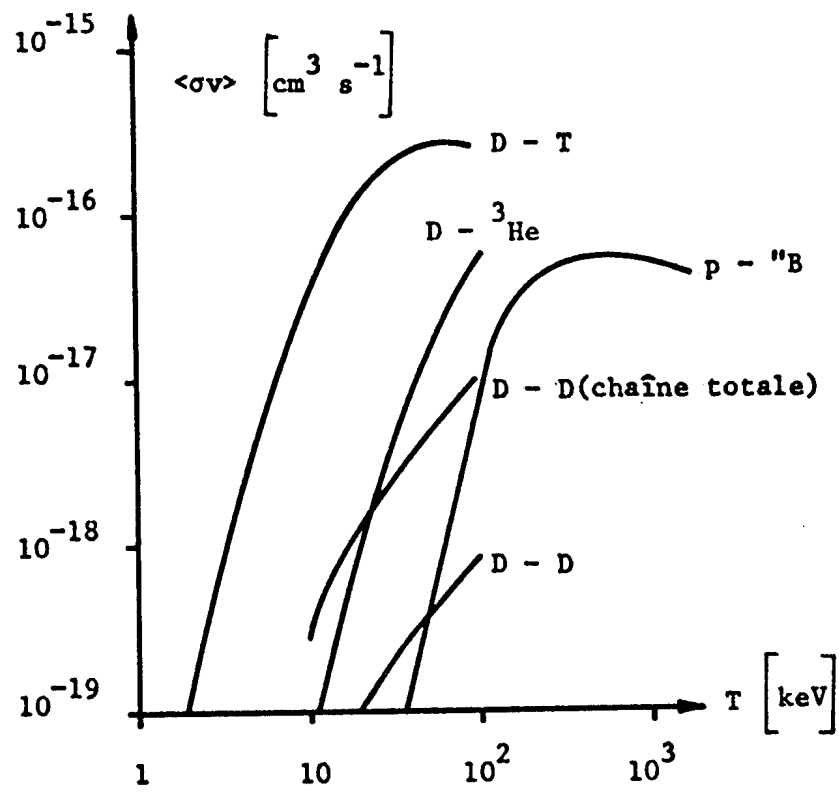


FIG. 6 : SECTIONS EFFICACES DES REACTIONS DE FUSION EN
FONCTION DE LA TEMPERATURE DES PARTICULES DU MELANGE

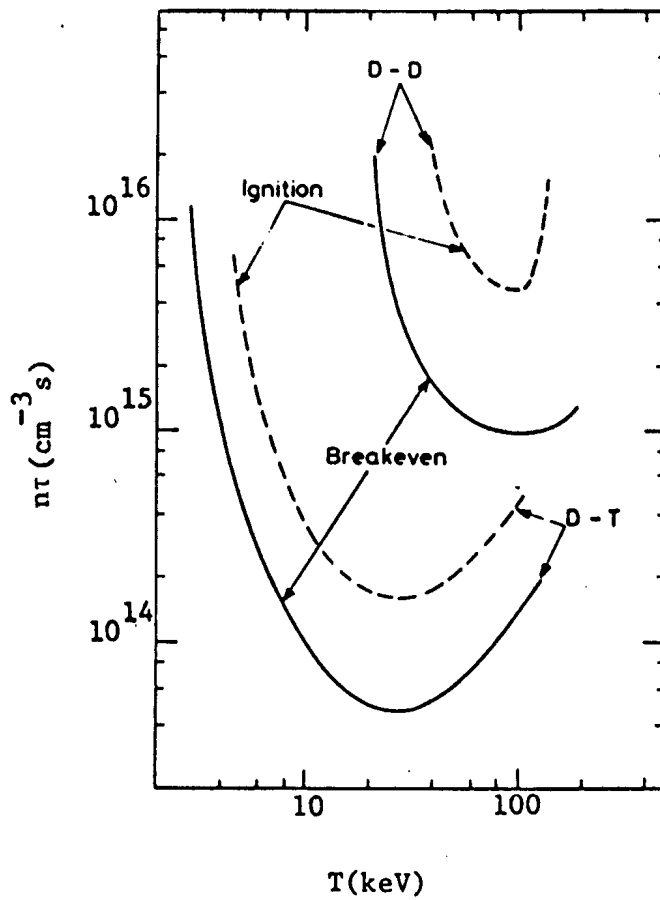


FIG. 7 : CRITERE DE LAWSON : POUR QUE LE PLASMA ENERGETIQUE
 DES REACTIONS DE FUSION SOIT POSITIF IL FAUT QUE LE
 REGIME DE TRAVAIL SE SITUE AU-DESSUS DES COURBES DE
 BREAKEVEN OU D'IGNITION - SUIVANT L'ETAT D'AUTOEN-
 TRETEN DES REACTIONS (L'AUTOENTRETIEN CORRESPOND A
 L'IGNITION).

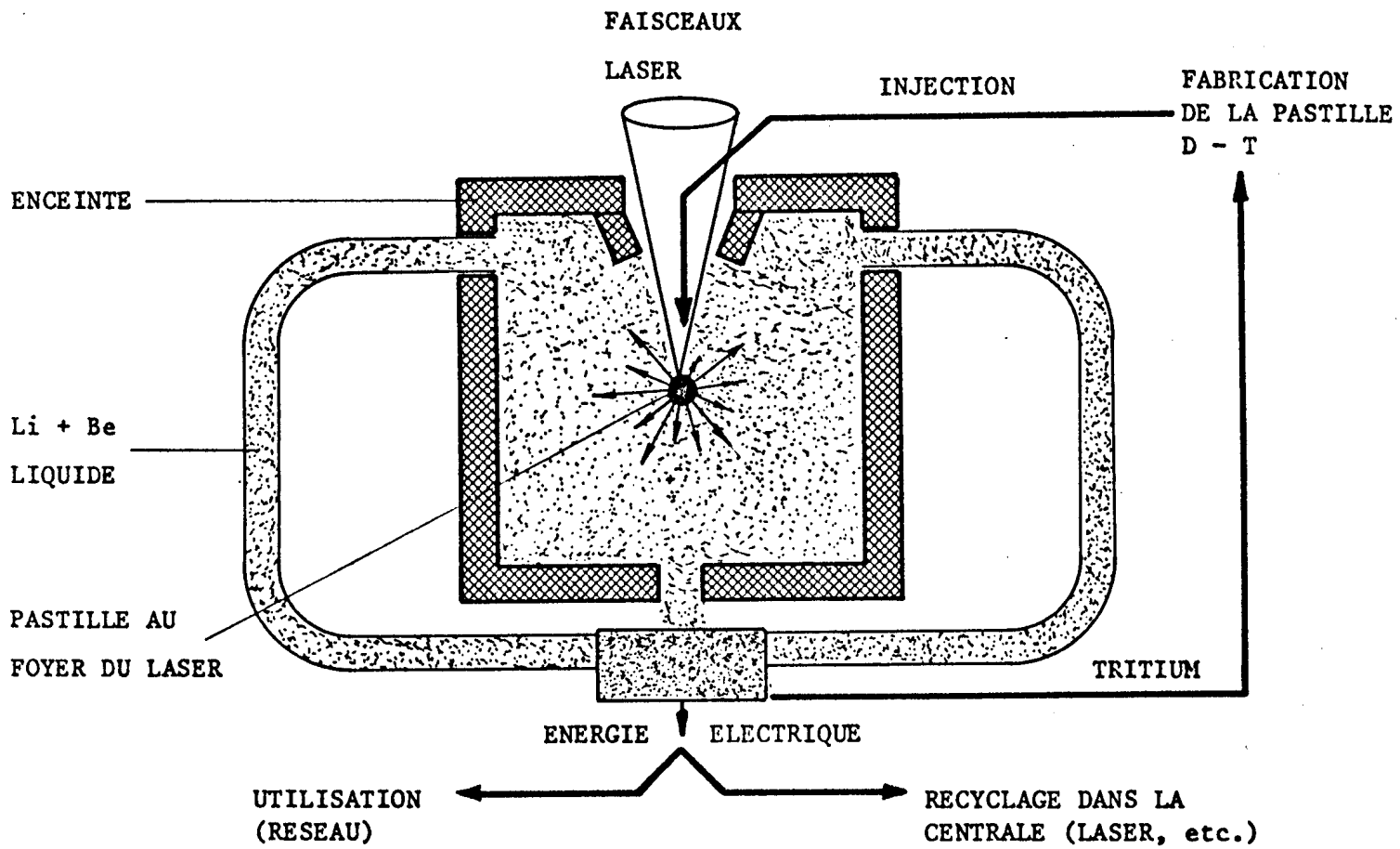


FIG. 8 : PRINCIPE DE LA FUSION LASER

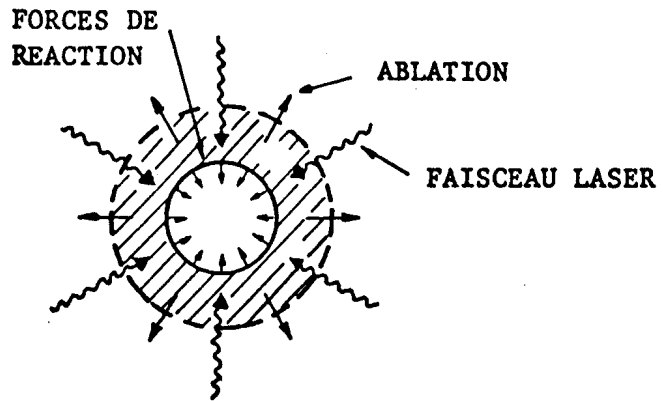
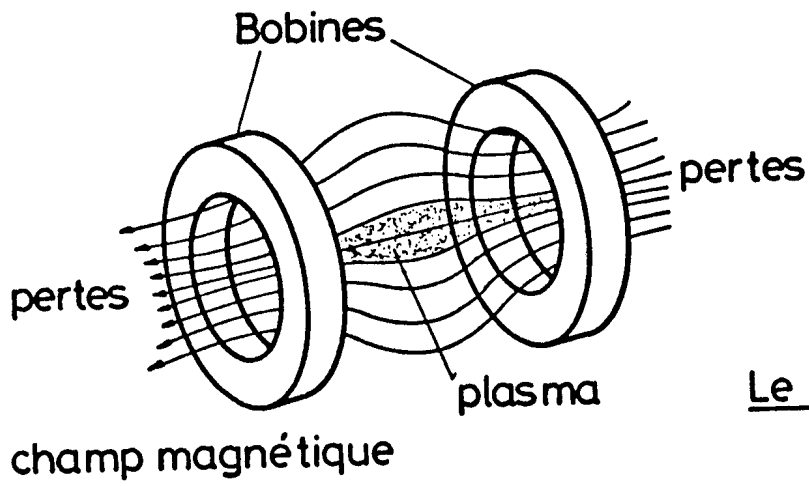
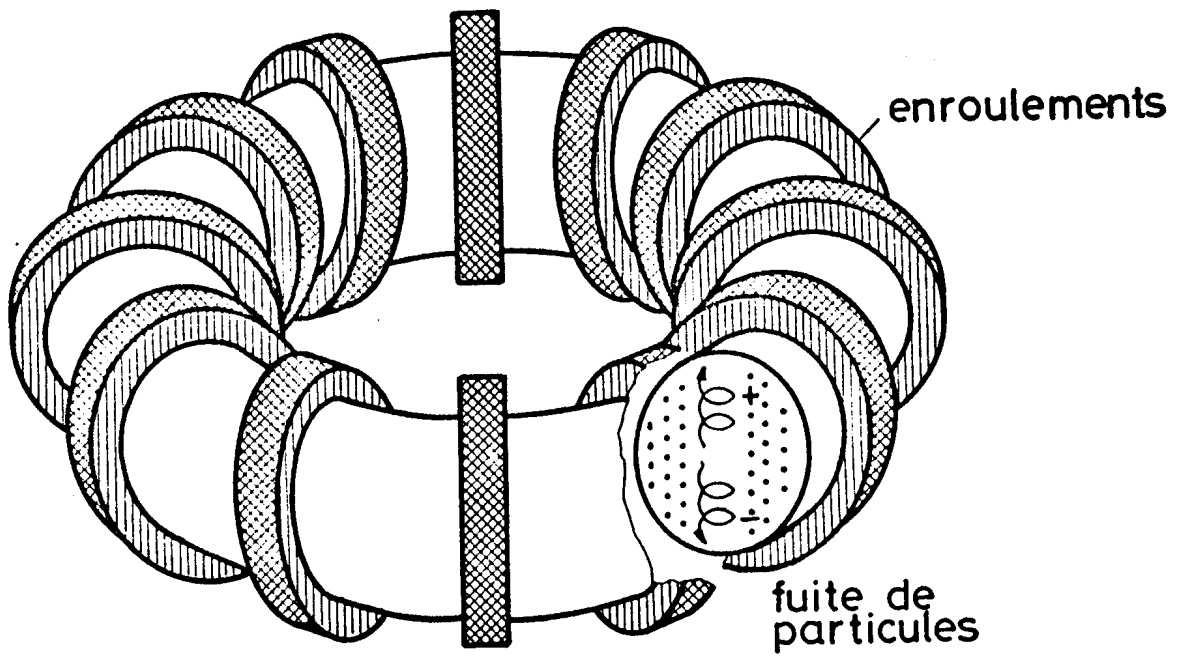


FIG. 9 : SCHEMA D'IRRADIATION D'UNE CIBLE
PAR FAISCEAU LASER: COMPRESSION,
PUIS EXPLOSION



Le miroir magnétique



Le tore magnétique

FIG. 10 : MACHINES A CONFINEMENT MAGNETIQUE

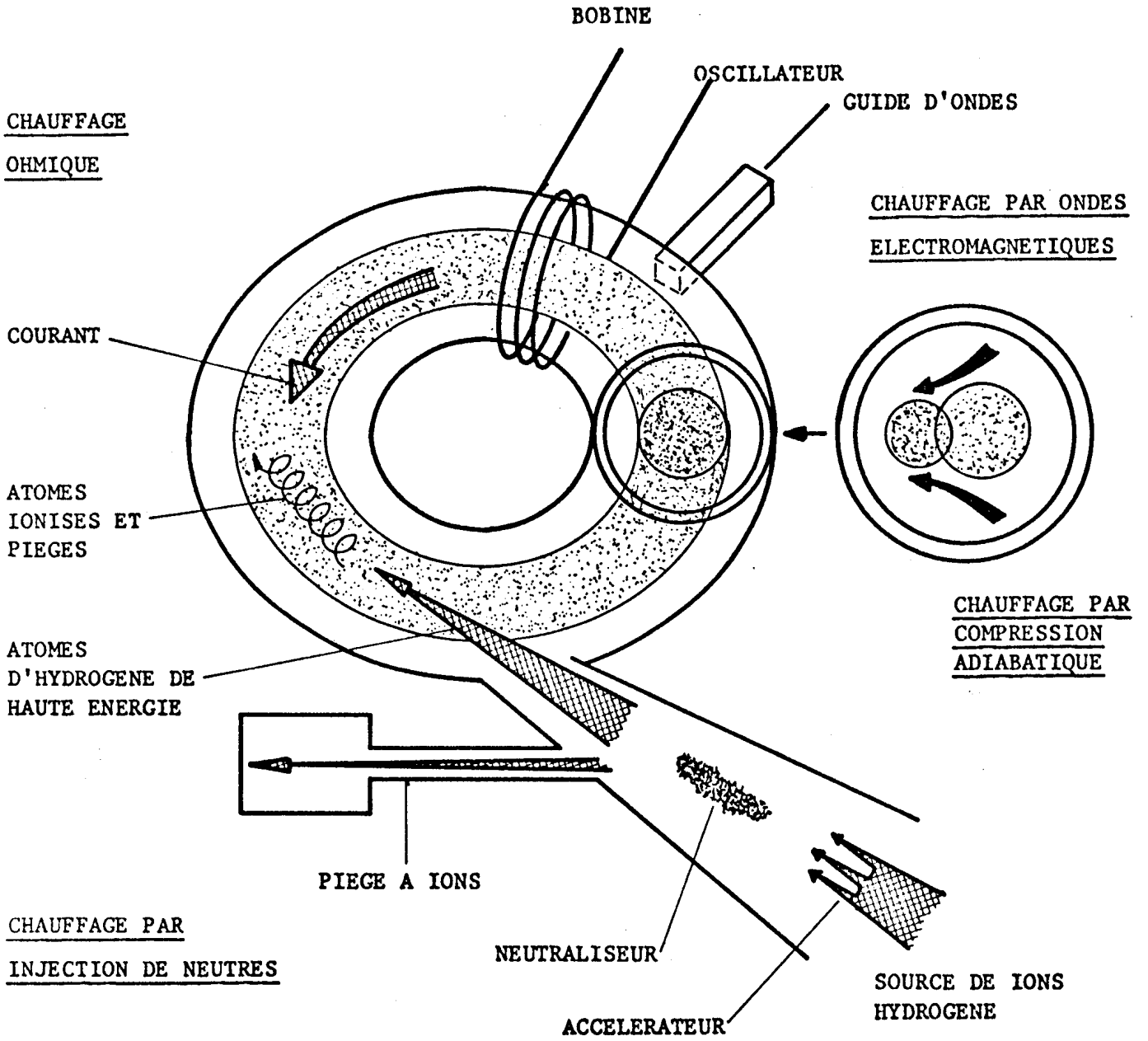


FIG. 11 : ILLUSTRATION DES METHODES DE CHAUFFAGE

BOBINES DU CHAMP
MAGNETIQUE TORIQUE

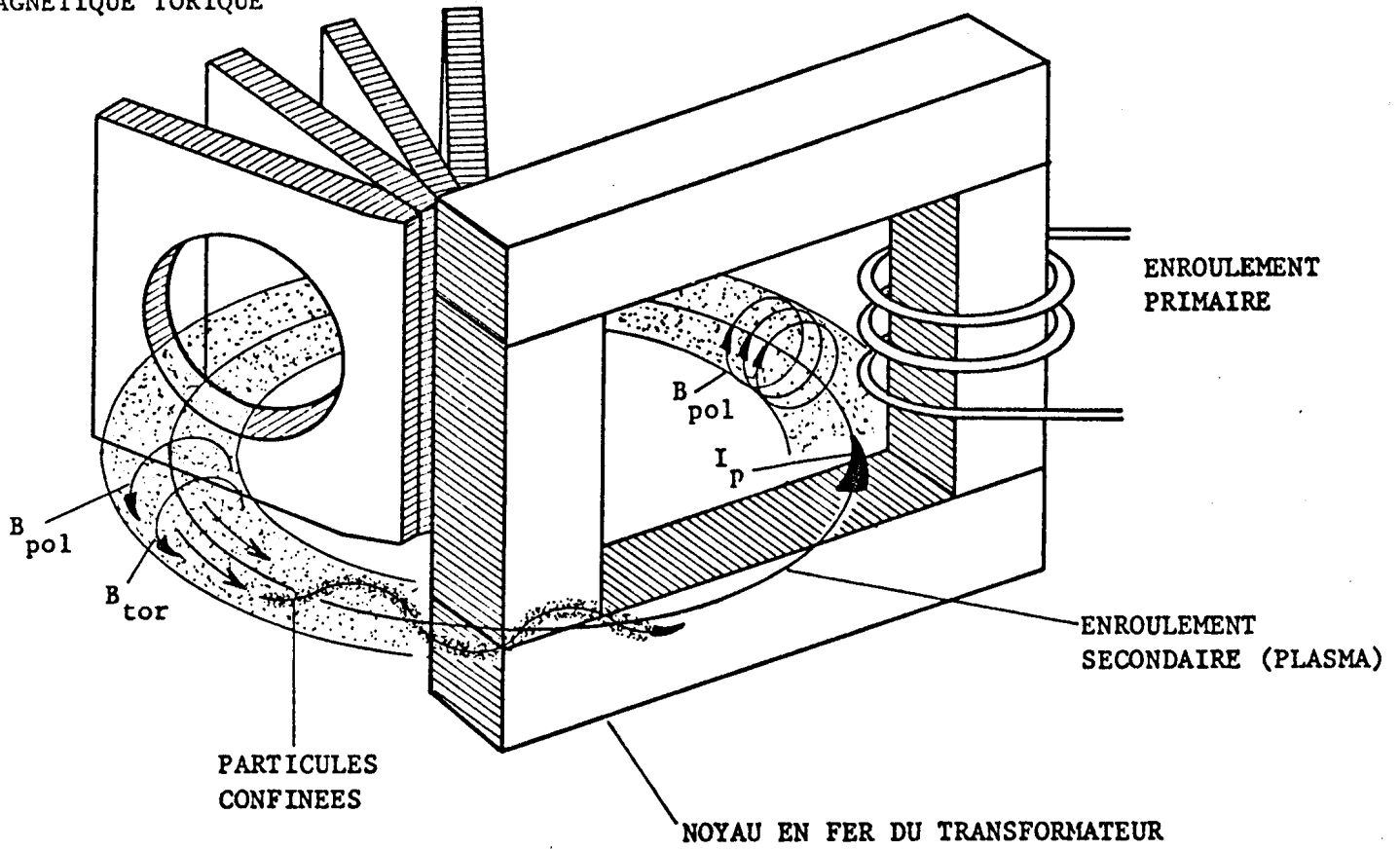


FIG. 12 : SCHEMA DE PRINCIPE DU TOKAMAK

MACHINES	a (cm) (a x b)	R (cm)	I_{max} (kA)	B_{max} (T)
TFR 600 (F)	25	98	500	6.0
DITE (GB)	25	115	280	2.8
FT (I)	21	83	600	10.0
JFT-2 (Japon)	25	90	140	1.8
JIPP I-II (Japon)	25	90	160	2.0
ASDEX (RFA)	40	152	500	3.0
TEXTOR (RFA)	50	175	480	2.0
TCA (CH)	18	61	135	1.5
T-4 (URSS)	17	100	180	3.5
T-10 (URSS)	36	150	560	4.5
ALCATOR (USA)	10	54	200	7.5
DOUBLET III (USA)	40x150	140	800	2.6
ISX (USA)	26	92	175	1.5
PDX (USA)	47	145	500	2.4
PLT (USA)	42	130	600	5.0

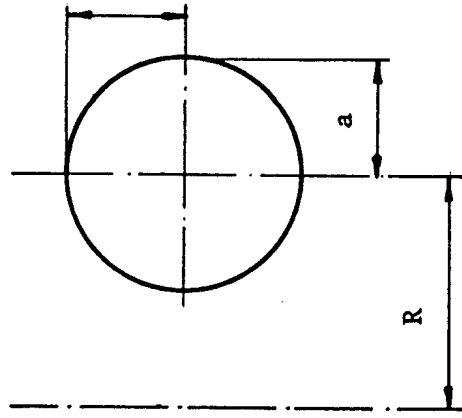


FIG. 13 : TABLEAU 2 - LES PRINCIPAUX TOKAMAKS EN OPERATION

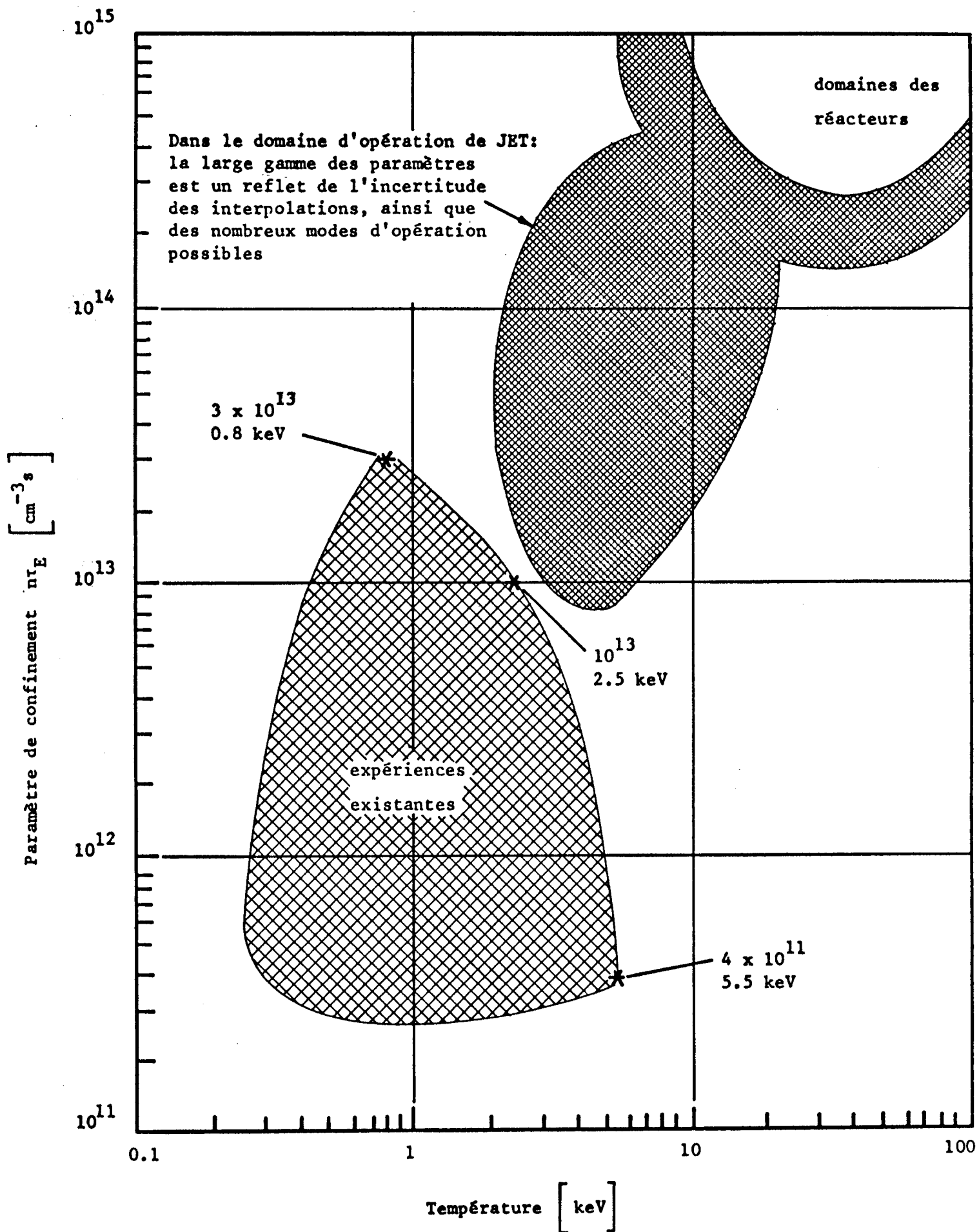


FIG. 14 : PERFORMANCE POSSIBLE DE JET

Paramètres principaux de JET

<p>petit rayon du plasma (a x b) grand rayon du plasma (R_0) rapport d'aspect (R_0/a) élongation du plasma (b/a) durée de la décharge poids de la chambre à vide poids des bobines du champ torique poids du noyau du transformateur</p>	<p>1.25 m x 2.10 m 2.96 m 2.37 1.68 20 s 108 t 384 t 2567 t</p>													
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>1ère phase</th> <th>2ème phase</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>250 MW</td> <td>380 MW</td> </tr> <tr> <td>2.77 T</td> <td>3.45 T</td> </tr> <tr> <td>2.6 MA</td> <td>3.2 MA</td> </tr> <tr> <td>3.8 MA</td> <td>4.8 MA</td> </tr> <tr> <td>25 Vs</td> <td>34 Vs</td> </tr> <tr> <td>10 MW</td> <td>25 MW</td> </tr> </tbody> </table>	1ère phase	2ème phase	250 MW	380 MW	2.77 T	3.45 T	2.6 MA	3.2 MA	3.8 MA	4.8 MA	25 Vs	34 Vs	10 MW
1ère phase	2ème phase													
250 MW	380 MW													
2.77 T	3.45 T													
2.6 MA	3.2 MA													
3.8 MA	4.8 MA													
25 Vs	34 Vs													
10 MW	25 MW													
<p>puissance dissipée dans les bobines de B_{tor} champ magnétique au centre courant plasma : forme circulaire forme en D volts-seconde disponibles pour induire le courant plasma chauffage additionnel</p>														

FIG. 15 : TABLEAU 3

THE JET APPARATUS

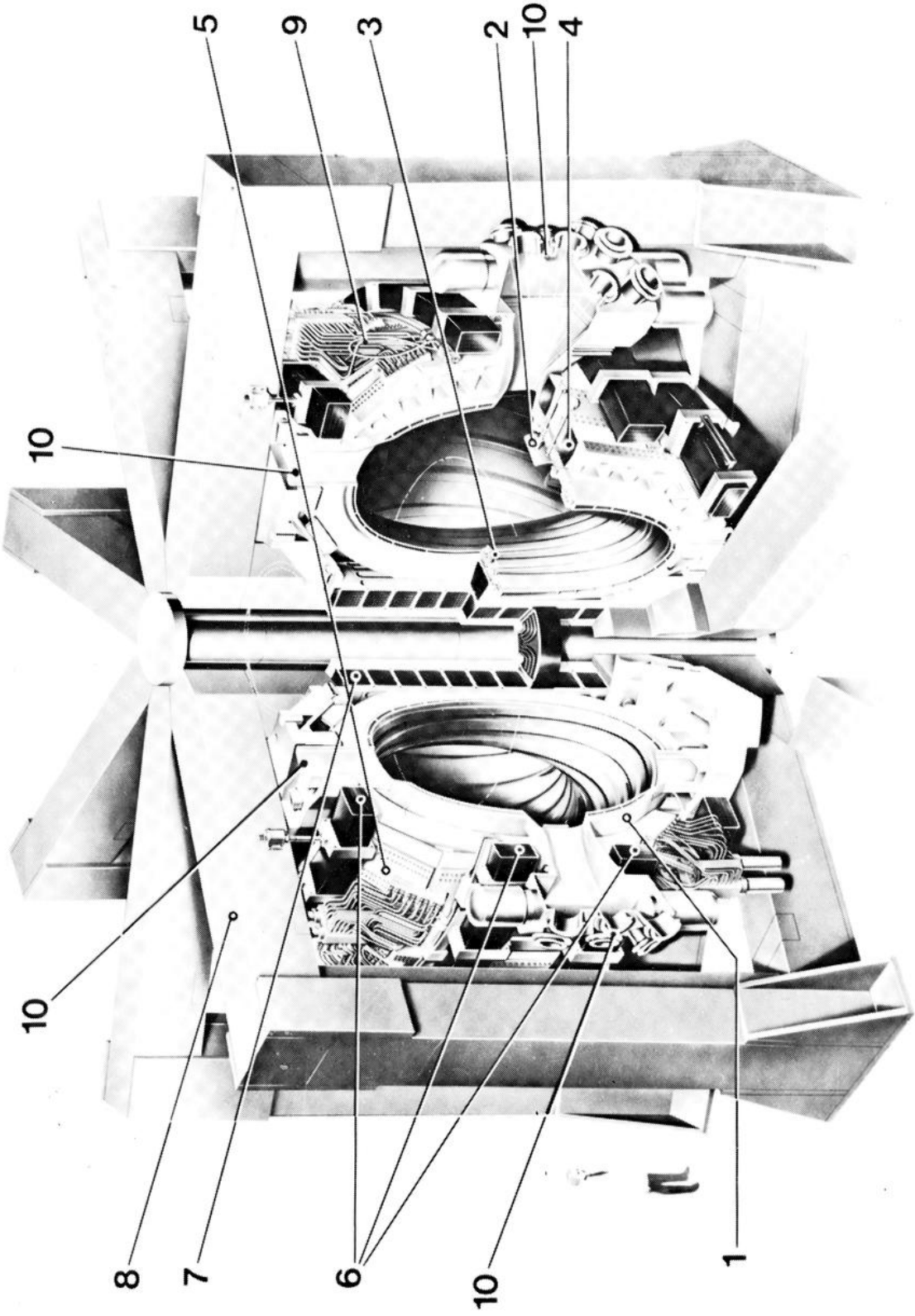


FIG. 16

Légende de la Figure 16

- 1) Chambre à vide (double paroi)
- 2) Limiteurs métalliques définissant le bord du plasma
- 3) Ecrans polaires empêchant le contact du plasma et du tore
- 4) Bobine en forme de D du champ magnétique torique
- 5) structure mécanique
- 6) Bobines externes du champ magnétique polaire
- 7) Bobines internes du champ magnétique polaire (permettent également d'induire le courant dans le plasma)
- 8) Noyau et branches en fer du transformateur
- 9) Raccords d'eau et connections électriques pour les bobines du champ magnétique torique
- 10) Accès radiaux et verticaux à la chambre à vide

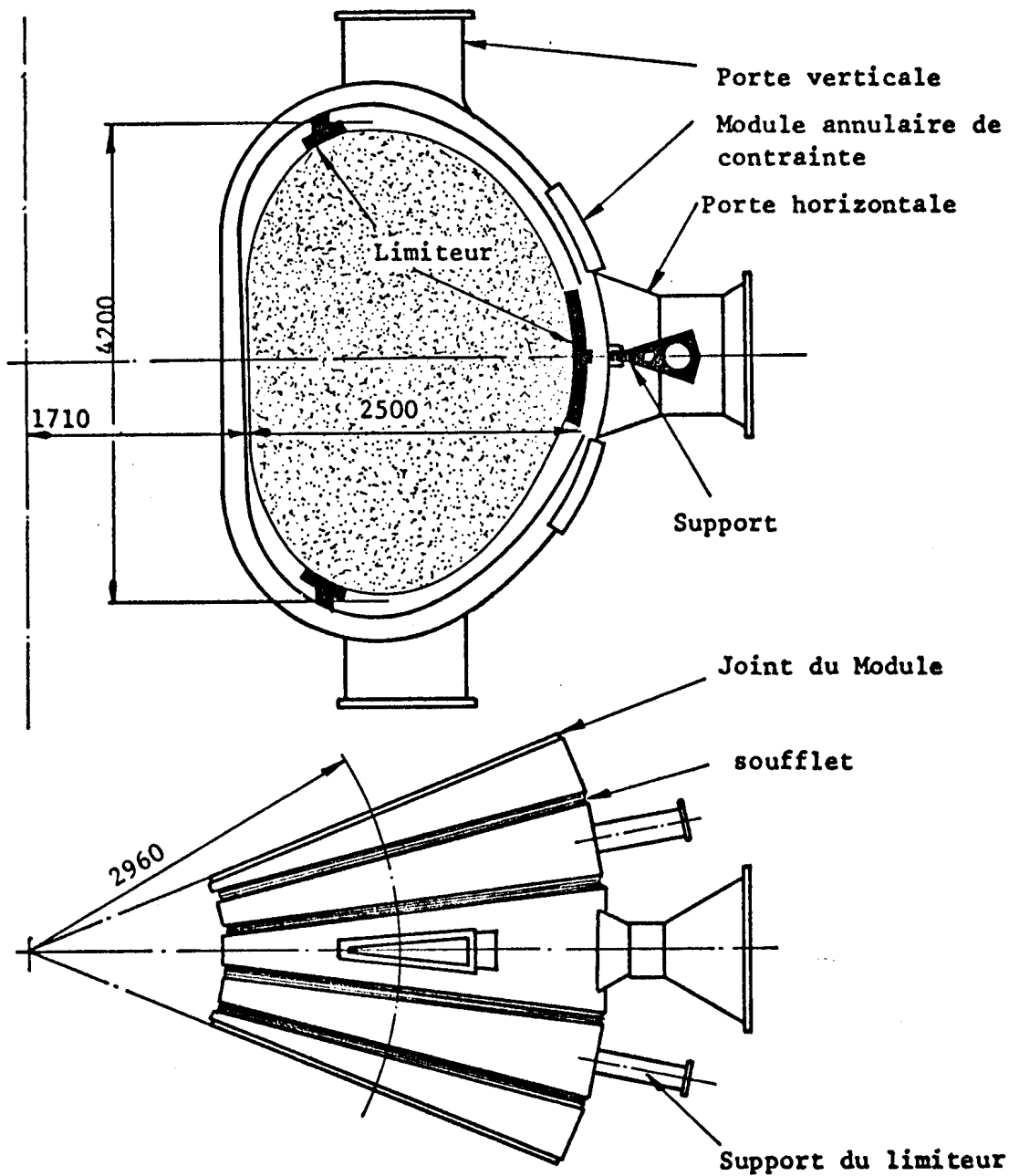
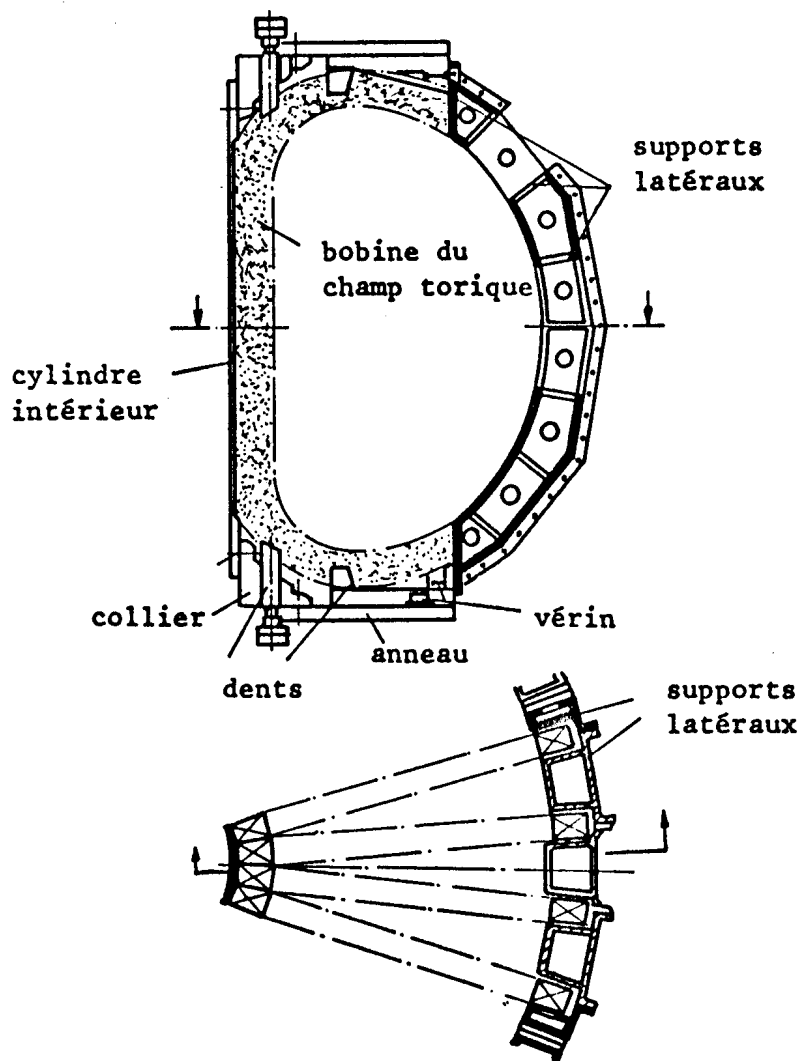


FIG. 17 : SCHEMA D'UN OCTANT



**FIG. 18 : POSITION DES SUPPORTS DES BOBINES TORIQUES
ET BARRES ANTISTRESS**

Les grands tokamaks dans le monde

Nom	Pays	I_p (MA)	R_0 (m)	a (m) (a x b)	B_T (T)
JET	Europe	2.6(4.8)	2.96	1.25x2.10	2.77 (3.45)
JT-60	Japon	3	3	1	5.0
TFTR	USA	2.5	2.48	0.85	5.2
D-III	USA	2.5	1.4	0.45x1.50	2.6
T-15	URSS	1.4	0.75	0.7	3.5(supra- conducteur)

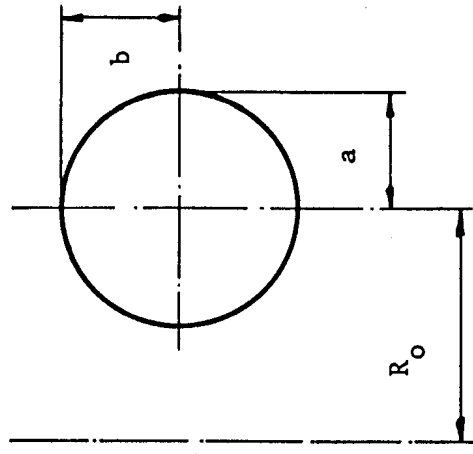


FIG. 19 : TABLEAU 4

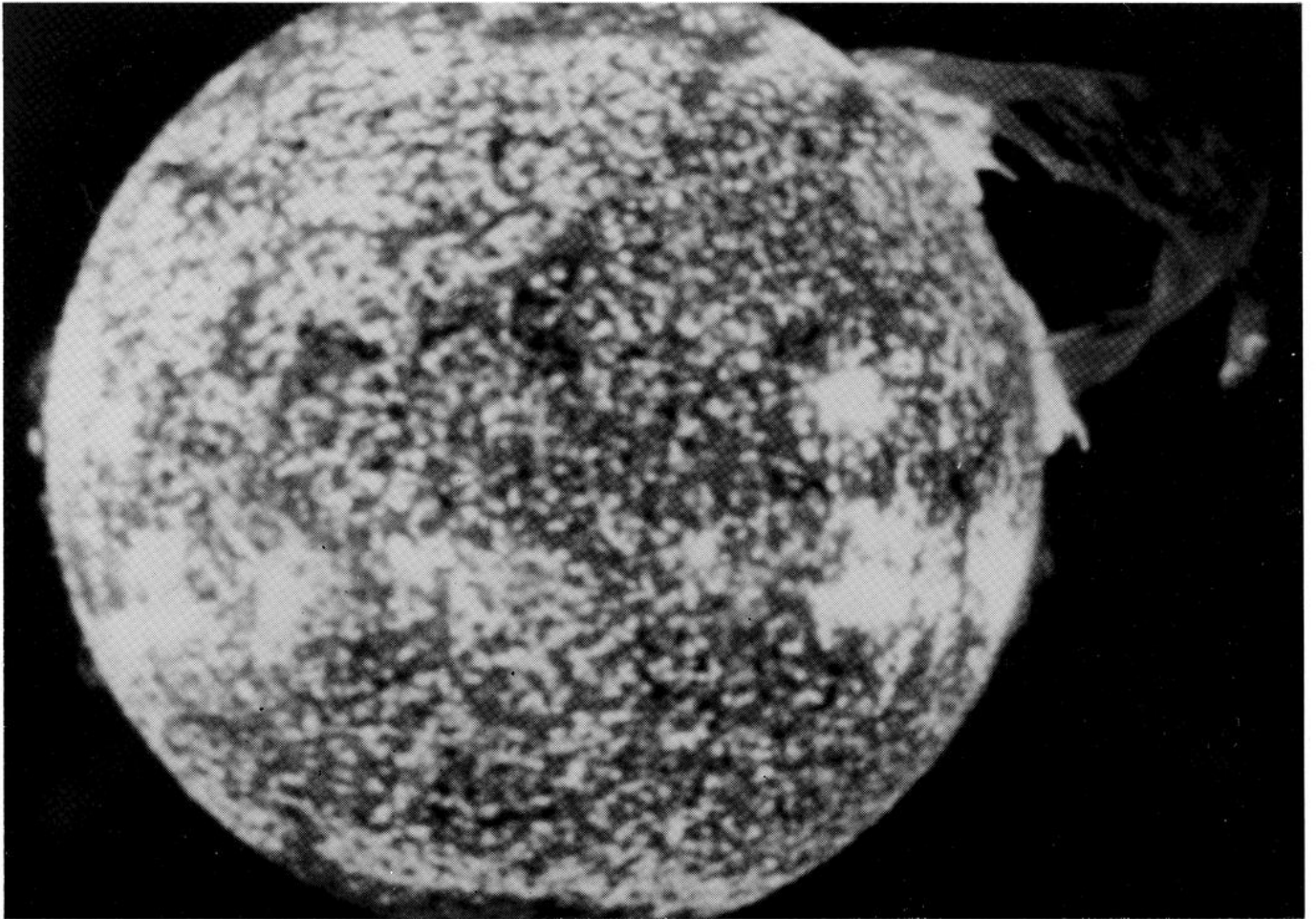


PHOTO 1

SOLEIL ET ERUPTION SOLAIRE (COURTOISIE OBSERVATOIRE DE SAUVERNY)
UN REACTEUR A FUSION ET UN PLASMA TURBULENT.

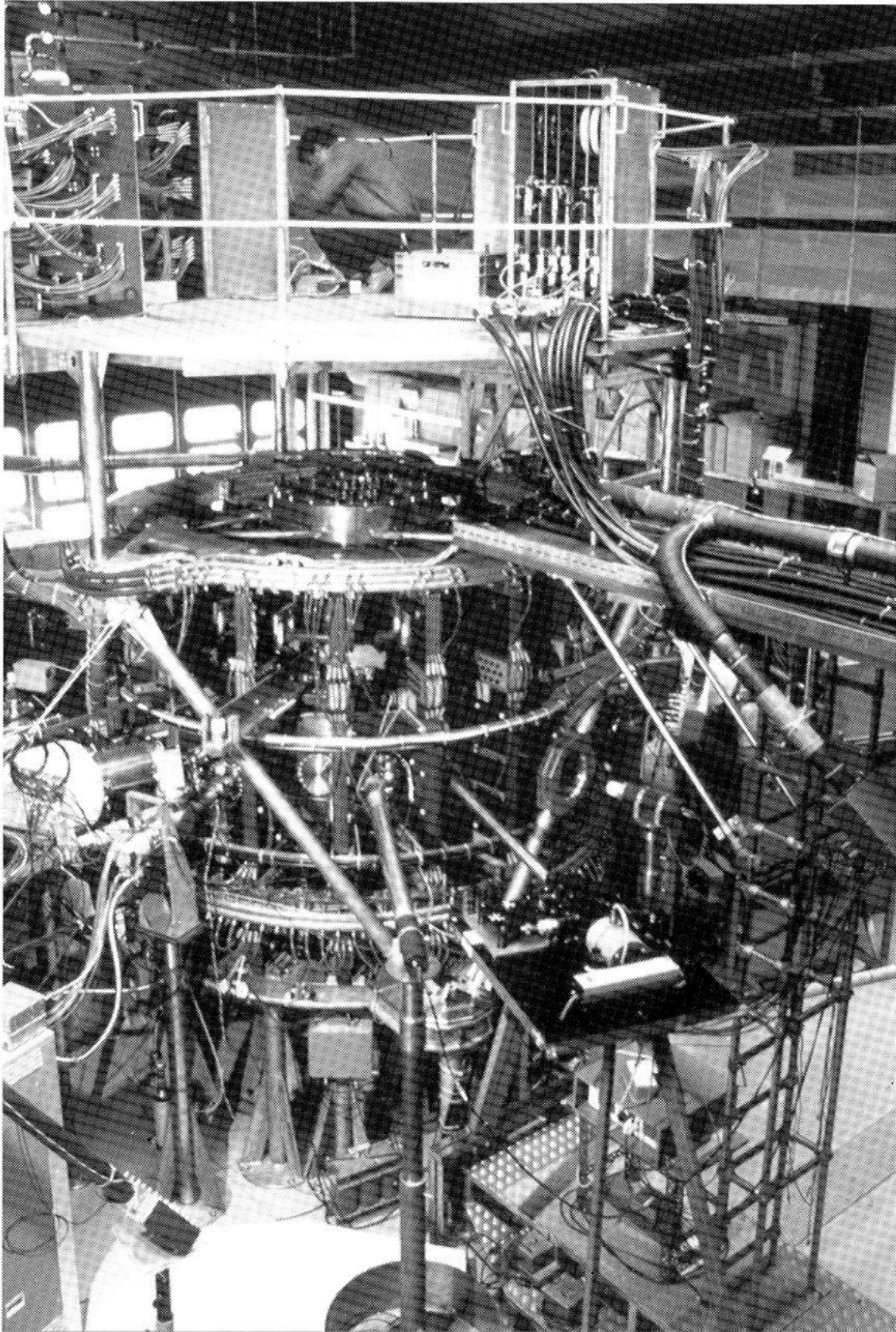


PHOTO 2

LE TOKAMAK TCA (TOKAMAK POUR L'ETUDE DU CHAUFFAGE DU PLASMA PAR
ABSORPTION D'ENERGIE DEPOSEE PAR DES ONDES DITES D'ALFVEN) -
CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DES PLASMAS, EPFL.

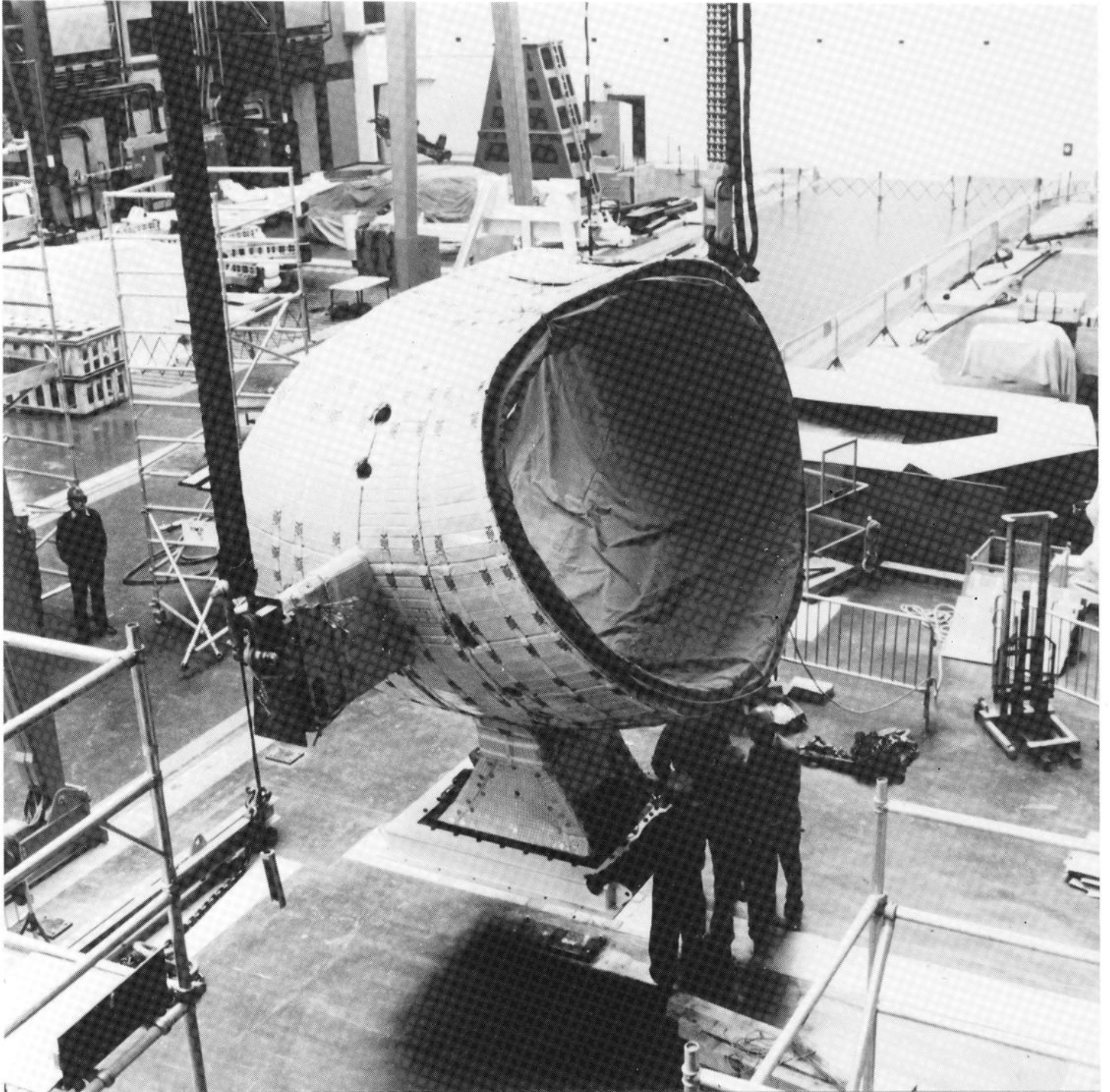


PHOTO 3 : VUE D'UN OCTANT AVEC SES PORTES
D'ACCES (PHOTO JET)

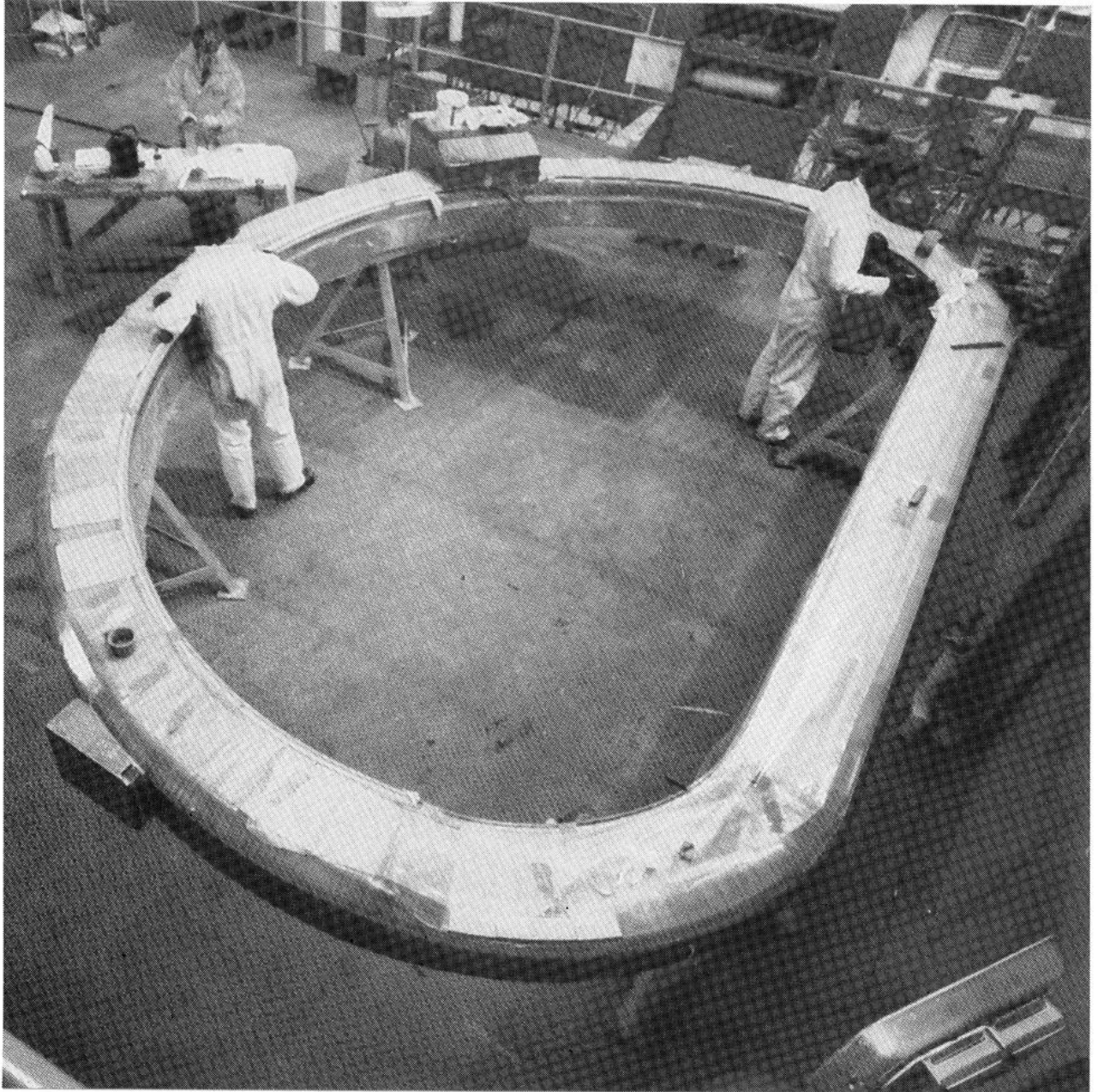


PHOTO 4 : BOBINE EN D, DU CHAMP MAGNETIQUE TORIQUE
(PHOTO JET)

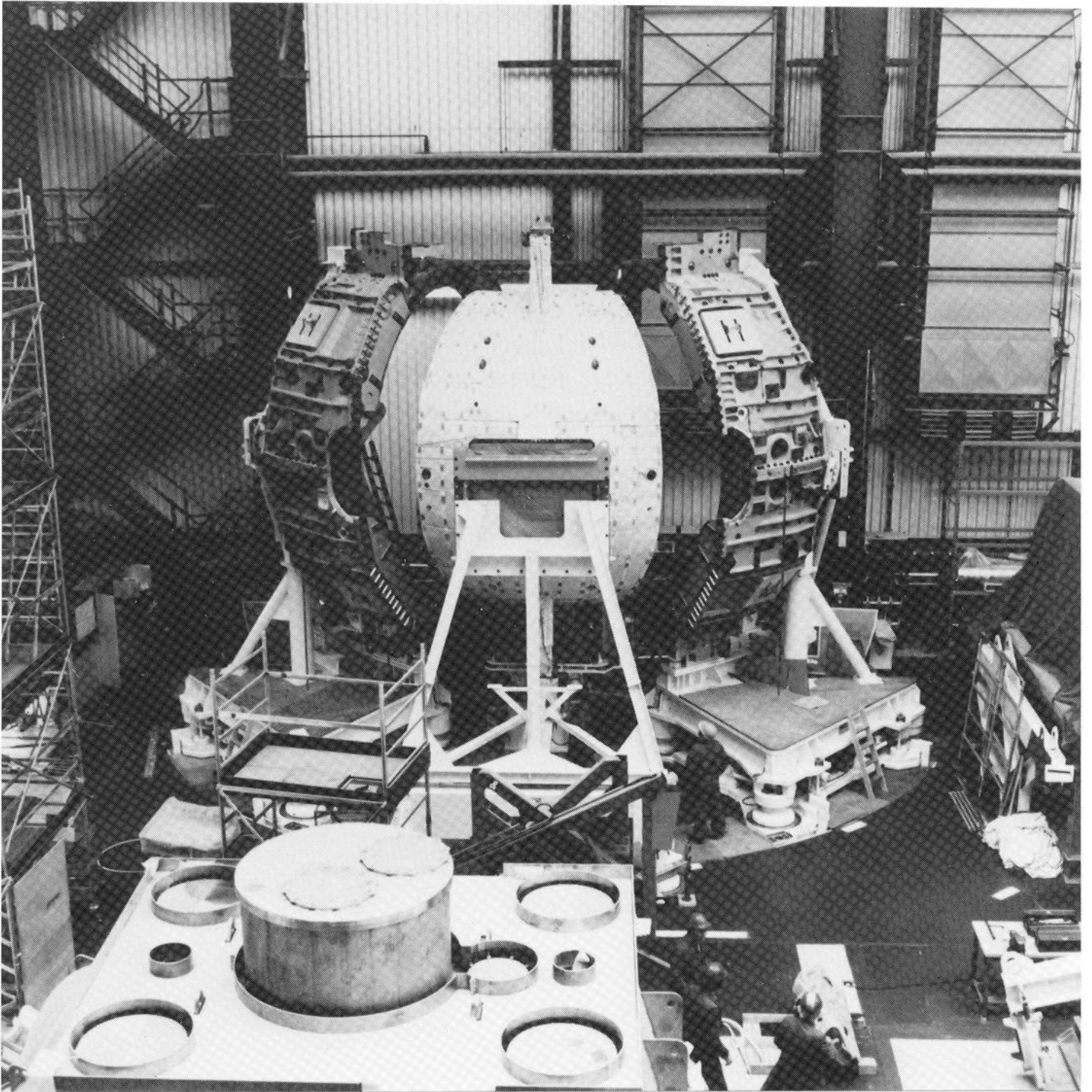


PHOTO 5 : "IMBRIQUAGE" D'UN OCTANT DANS L'ARMATURE CONTENANT
LES BOBINES TORIQUES (PHOTO JET)

PHOTO 6 :
JET IMPLANTATION
DES BLDINGS
(PHOTO JET)



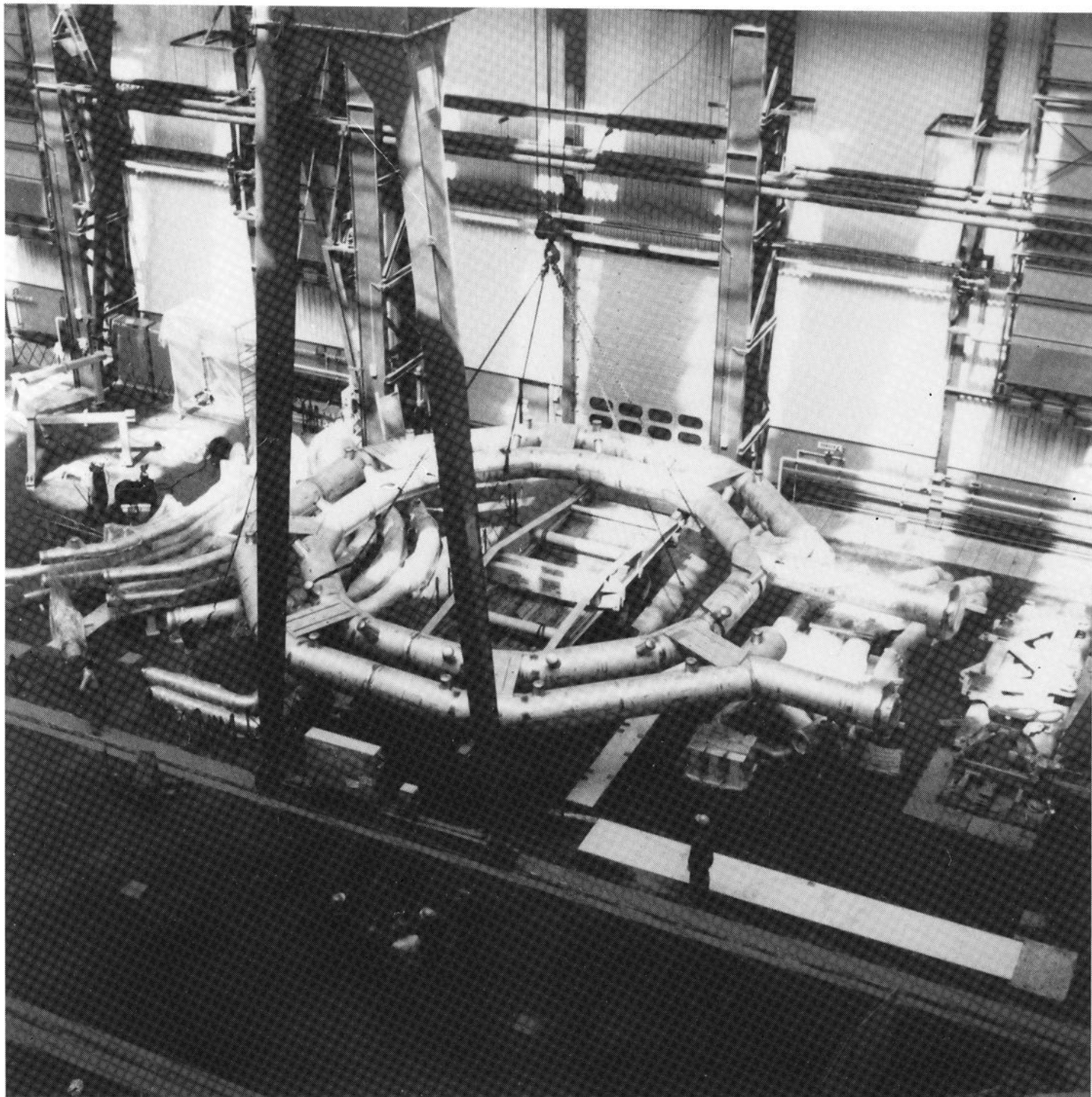
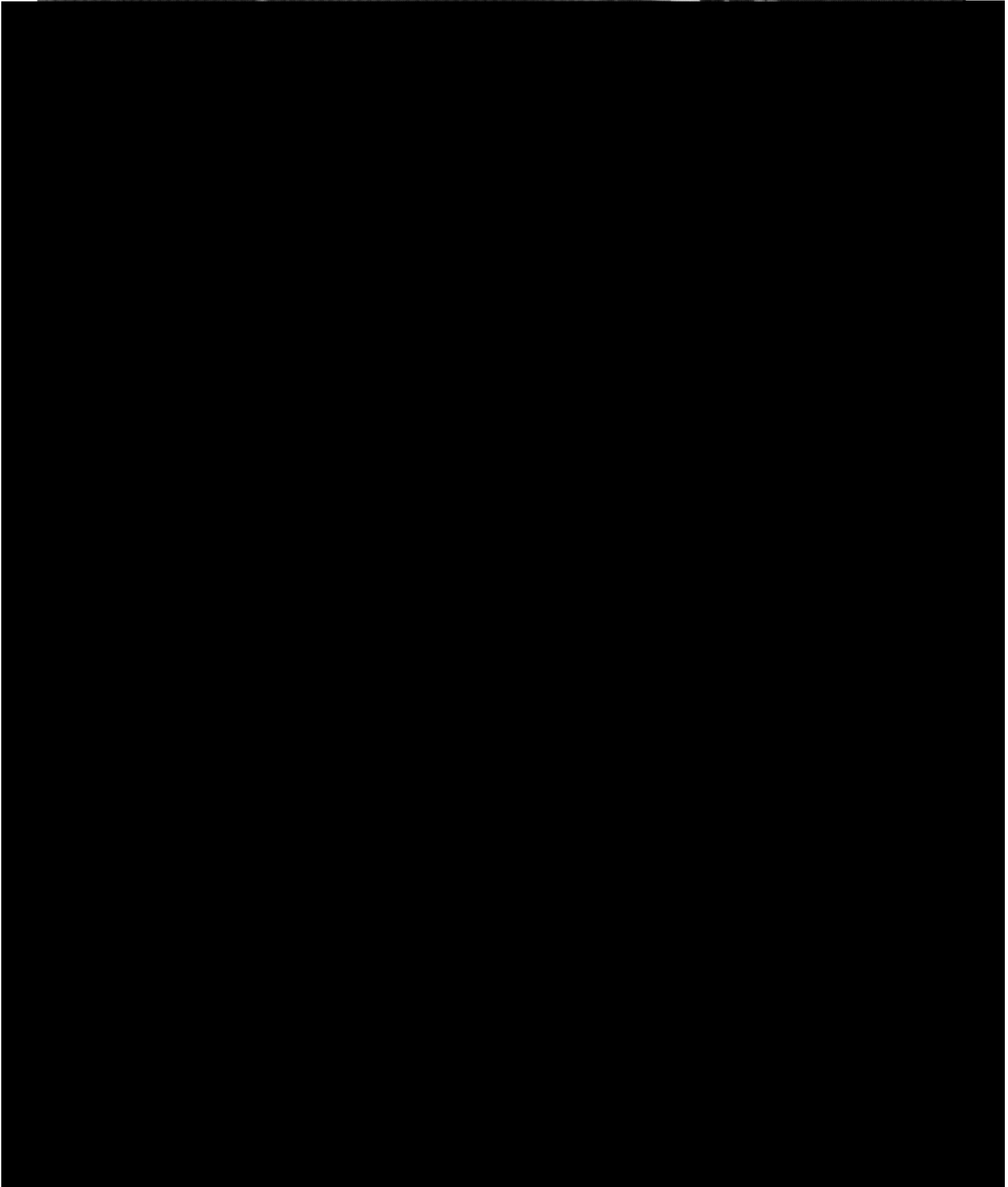


PHOTO 7 : INSTALLATION TEST DES TUBULURES DE
POMPAGE (ASS-Schlieren) SUR LE TORE
(PHOTO JET)



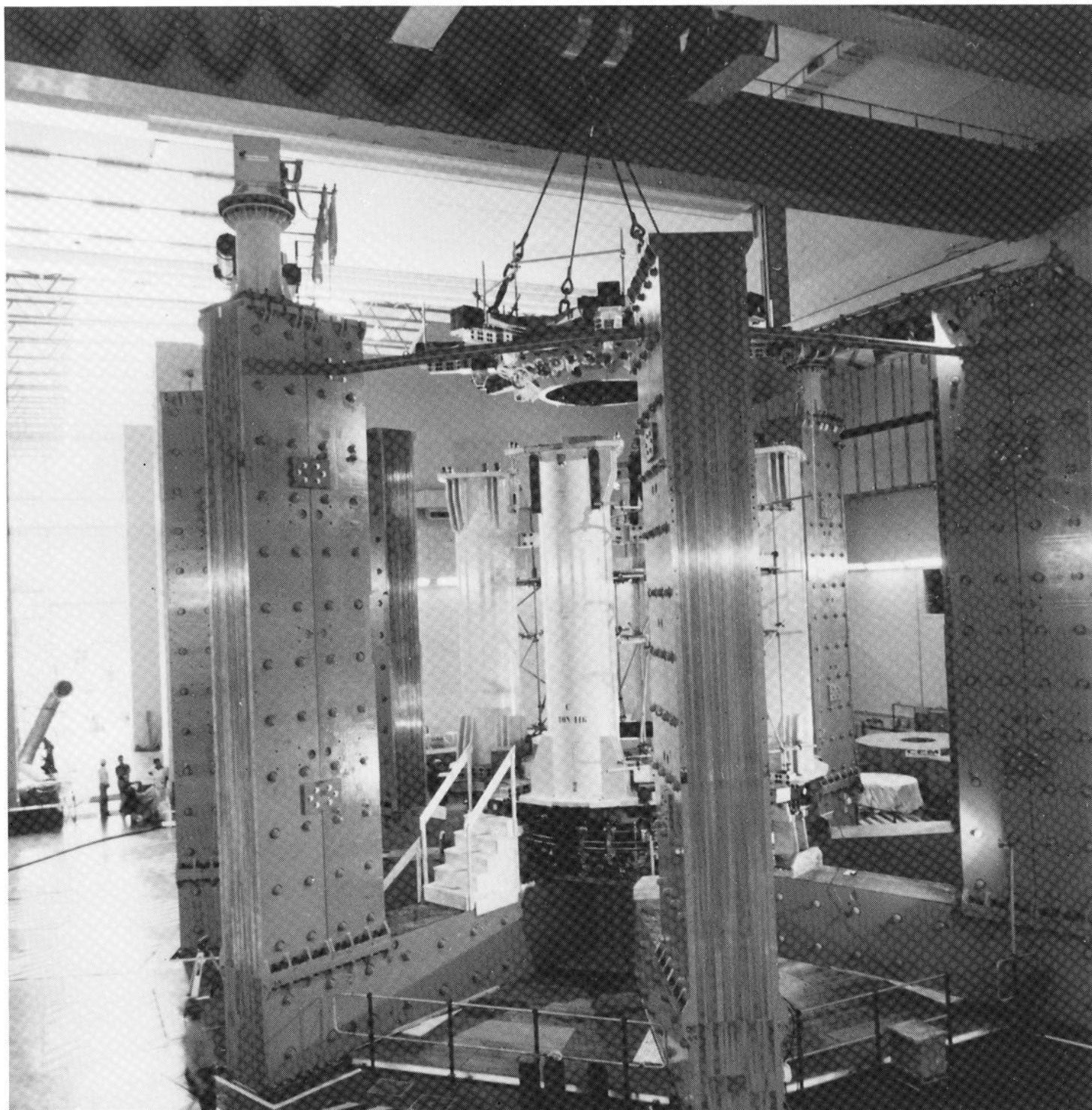


PHOTO 9 : ETAT DE MONTAGE EN JUILLET 82,
NOYAUX DE FER (PHOTO JET)