

AVRIL 1982

LRP 202/82

PHYSIQUE DES PLASMAS  
ET FUSION THERMONUCLEAIRE  
AU CRPP

Brochure spécialement éditée pour les "Portes ouvertes" 1982

Rédaction : W. Simm, P.J. Paris - avril 1982

Maquette : F. Bariatti

## Table des Matières

	page
1. QU'EST-CE QUE LE PLASMA ?	1
2. LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE	6
- L'exemple du Soleil	6
- Le principe de la fusion	8
- Les problèmes	10
- Les voies possibles	11
- Etat des recherches	13
3. LES ACTIVITES DE RECHERCHE DU LABORATOIRE	15
4. LES PROJETS DE RECHERCHE	18
- Le tokamak TCA	18
- Les diagnostics	24
Interféromètre 2 mm	25
Emission cyclotronique électronique	26
Analyse de particules neutres	27
Diagnostic X-mous	28
Bolomètre	28
Interaction plasma-paroi	28
Boucles et sondes magnétiques	29
- Les lasers	30
Diffusion Thomson	30
Interféromètre à 8 canaux	31
Diffusion dans l'infrarouge lointain	32
- Les plasmas à basse densité	34
Nessie	35
Grande Chambre	36
LMP (Linear Magnetized Plasma)	38
Diagnostic par faisceau d'ions	40
- Les travaux théoriques	43
5. REMERCIEMENTS	45

## 1. QU'EST-CE QUE LE PLASMA ?

A l'état solide, liquide ou gazeux, la matière est constituée d'atomes formés d'un noyau autour duquel gravitent des électrons ( $e^-$ ). Le noyau est composé de protons ( $p^+$ ) et de neutrons ( $n$ ), le nombre des protons étant égal à celui des électrons.

Voici quelques exemples d'atomes:

- hydrogène (H) : 1  $p^+$ , 1  $e^-$
- deutérium (D) ou hydrogène lourd : 1  $p^+$ , 1  $n$ , 1  $e^-$
- tritium (T) ou hydrogène superlourd : 1  $p^+$ , 2  $n$ , 1  $e^-$
- uranium ( $U_{235}$ ) : 92  $p^+$ , 143  $n$ , 92  $e^-$

La température d'un corps mesure le degré d'agitation désordonnée des molécules ou des atomes qui le composent. Si l'on chauffe une substance solide, les particules qui la constituent vont donc s'agiter de plus en plus: la substance en question passe à l'état liquide, puis gazeux.

A mesure que la température augmente, les molécules du gaz vont progressivement se briser et former un mélange d'atomes libres: le gaz moléculaire devient gaz d'atomes libres. A des températures plus élevées encore, l'agitation thermique des atomes est tellement grande

que de violentes collisions se produisent. Les atomes éclatent alors et forment un mélange de noyaux et d'électrons appelé PLASMA.

Fig. 2

C'est la charge électrique des particules qui le composent qui confère au plasma ses propriétés extraordinaires. En effet, les propriétés physiques d'un milieu sont déterminées par la nature des interactions entre les éléments qui le constituent.

Dans un gaz neutre, les particules n'interagissent que par collision. Dans un plasma par contre, les mouvements des particules chargées sont influencés par les champs magnétiques et électriques. Ces champs sont créés soit par des sources externes (des bobinages magnétiques par exemple), soit par des mouvements collectifs générés par les particules du plasma.

Le plasma, appelé également quatrième état de la matière, constitue 99 % de l'Univers. 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 à longue distance), 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, ainsi que dans certaines flammes.

Plasma naturel: La Nébuleuse Trifide dans le Sagittaire (Kitt Peak Observatory, courtoisie: Observatoire de Genève à Sauvergnny)

Plasma naturel: aurore boréale (Kitt Peak Observatory, courtoisie: Observatoire de Genève à Sauvergnny)

Plasma naturel: un éclair dans le ciel du Tessin (courtoisie: Commission d'étude de l'ASE et de l'UCS des questions relatives à la haute tension, Zürich)

Plasma artificiel: soudure préventive - torche plasma pour projection thermique (courtoisie: Castolin + Eutectic, St.-Sulpice (VD))

Plasma de laboratoire: décharge dans l'Argon

Plasma de laboratoire: plasma d'hydrogène dans le tokamak TCA  
(vu à travers une fenêtre d'accès)

## 2. LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

### L'exemple du soleil

Le soleil est une énorme boule de plasma dont les mouvements turbulents se manifestent par les taches solaires, les éruptions de matière ou protubérances, et les tempêtes magnétiques.

Eruption solaire du 2.7.1957, hauteur environ 360'000 km (Hale Observatory, courtoisie: Observatoire de Genève à Sauvergnny)



Tache et tourbillon à la surface du soleil (Hansen Planetarium, Salt Lake City, courtoisie: Observatoire de Genève à Sauvergnny)

Au centre, la température du plasma est de l'ordre de 15 millions de degrés. Le soleil est un immense réacteur thermonucléaire qui dégage une énorme quantité d'énergie: au total quelques  $3.8 \cdot 10^{23}$  kW, soit 6.3 kW par  $\text{cm}^2$  de sa surface. Cette énergie est rayonnée dans l'espace et nous en collectons une infime partie sur Terre: environ un milliardième, soit  $1.16 \cdot 10^{14}$  kW au total, ou  $0.13 \text{ W/cm}^2$ .

### Le principe de la fusion

Il existe deux types de réactions nucléaires susceptibles d'être utilisées comme sources d'énergie, les réactions de fission et les réactions de fusion. Dans les réactions de fission, des noyaux lourds tels que l'uranium éclatent en produisant des noyaux plus légers et des neutrons, libérant ainsi de l'énergie. C'est selon ce principe que fonctionnent les centrales nucléaires actuelles.

La fusion, quant à elle, emploie des noyaux légers qui, en s'amalgamant, produisent des atomes plus lourds et de l'énergie.

Fig. 3

Les réactions de fusion les plus faciles à réaliser mettent en jeu des éléments légers tels que le deutérium (D ou hydrogène lourd), le tritium (T ou hydrogène superlourd) et l'hélium ( $\text{He}_3$ ).

Tableau I: Les principales réactions de fusion

Le deutérium est un élément universellement présent dans l'eau, à raison de 34 g/m<sup>3</sup>. La quantité contenue dans un litre a un rendement énergétique équivalent à 300 litres de pétrole. Le tritium, par contre, n'existe pas à l'état naturel, mais peut être produit à partir du lithium dans les réactions suivantes:



Tableau II: réactions produisant du tritium

Pour que la réaction de fusion deutérium-tritium (D-T) ait lieu avec une probabilité appréciable, une température des noyaux de l'ordre de 100 millions de degrés est requise, alors qu'il faudrait 400 millions de degrés pour la réaction deutérium-deutérium (D-D).

### Les problèmes

Il n'est évidemment pas possible de maintenir un plasma ayant une telle température en contact avec une paroi matérielle. L'un des problèmes fondamentaux de la fusion est donc de contenir et d'isoler thermiquement le plasma: c'est le problème du confinement. Non seulement les particules doivent être confinées, mais également l'énergie contenue dans le plasma.

Il faut, d'autre part, porter le plasma à ces très hautes températures pour compenser les pertes thermiques de celui-ci et pour qu'aient lieu les réactions de fusion: c'est le problème du chauffage.

Pour que le bilan énergétique des réactions de fusion soit positif, il faut que le produit de la densité ( $n$ ) du plasma par le temps de confinement ( $\tau$ ) de l'énergie satisfasse le critère de Lawson:

$$n\tau > 0.7 \cdot 10^{14} \text{ [cm}^{-3}\cdot\text{sec]}$$

pour un mélange (D-T) à 100 millions de degré

A titre indicatif, dans l'air, la densité  $n = 10^{19} \text{ [cm}^{-3}\text{]}$ , donc  $10^{19}$  particules par centimètre cube.

Finalement, l'ignition du plasma, c'est-à-dire l'auto-entretien des réactions de fusion, nécessite des paramètres encore plus sévères.

### Les voies possibles

Pour atteindre les paramètres de la fusion thermonucléaire contrôlée, deux voies principales sont actuellement étudiées.

La première - la fusion rapide ou inertielle - consiste à créer un plasma extrêmement dense pendant un temps très court. Pour cela, des faisceaux lasers ou des jets de particules de très grande énergie sont dirigés sur une sphère de deutérium-tritium solide, d'un diamètre de l'ordre de quelques dixièmes à quelques millimètres. Cette sphère ou cible, implose tout d'abord en atteignant des conditions extrêmes de densité et de température, puis explose: en fait, il se produit une micro-explosion thermonucléaire.

C'est sur la seconde voie - la fusion lente ou magnétique - que se concentre actuellement la plus grande partie de l'effort de recherche international. Cette méthode consiste à confiner les particules dans un volume limité pendant un temps relativement long. On utilise pour cela le fait que le plasma est composé de particules chargées. Dans un champ magnétique, les trajectoires de celles-ci s'enroulent autour des lignes de champ: elles sont confinées.

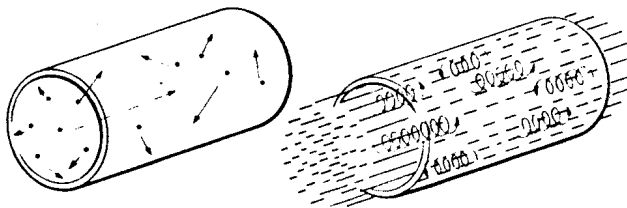


Fig. 4 - à gauche, charges en absence de champ magnétique  
à droite, charges dans un champ magnétique

On distingue essentiellement deux types de machines à confinement magnétique. Lorsque les lignes de champ ne sont pas refermées sur elle-mêmes dans la machine, on parle de "configuration magnétique ouverte": ce sont par exemple les machines à miroirs, les théta-pinches, les z-pinches. Un des inconvénients majeurs de ces installations est la fuite des particules du plasma par les extrémités de la machine.

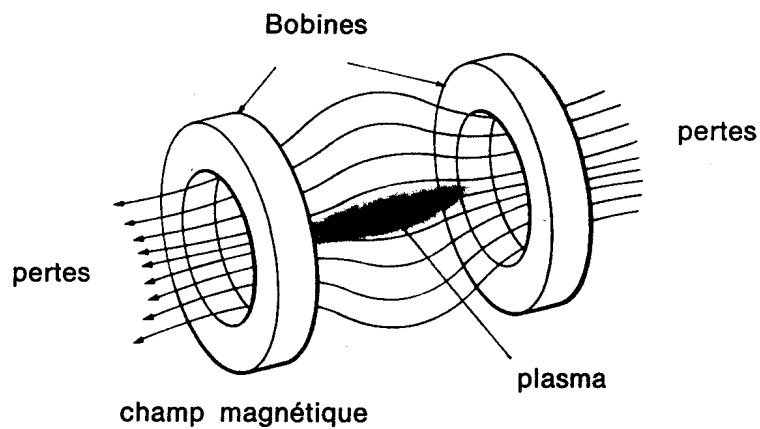


Fig. 5 - configuration ouverte: machine à miroirs magnétiques

Si par contre, les lignes de champ magnétique se referment sur elle-mêmes, formant ainsi un tore, les particules se retrouvent prisonnières: on parle de "configuration magnétique fermée". Parmi les divers concepts de machines de ce genre, ce sont les tokamaks (du russe Toroïdal Kamera Magnetik) qui ont donné à ce jour les meilleurs résultats.

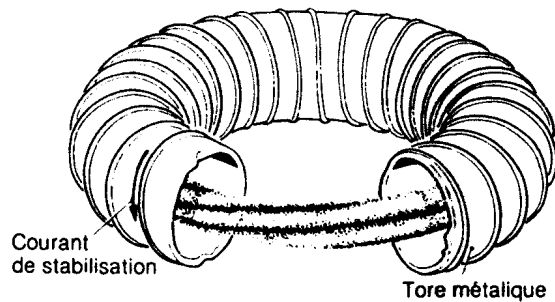


Fig. 6 - principe du confinement magnétique toroïdal

### Etat des recherches

Le développement d'un réacteur à fusion passe par trois stades importants:

- La réalisation d'un bilan énergétique positif, de préférence avec une réaction de fusion auto-entretenu (ignition): c'est la faisabilité scientifique.
- La démonstration d'une durée de vie et d'une fiabilité technique suffisante du réacteur: c'est la faisabilité technologique.
- L'acceptabilité économique et politique du réacteur à fusion comme moyen de production de l'énergie: c'est la faisabilité économique.

Actuellement, la recherche sur la fusion est encore dans la première phase: de nombreux problèmes physiques tels que les pertes par rayonnement, la stabilisation et le chauffage du plasma doivent être résolus. En parallèle à ces travaux, le développement de la technologie des réacteurs à fusion a récemment démarré. Un certain

nombre d'études conceptuelles de réacteurs à fusion nucléaire ont même déjà été effectuées. Voici le schéma de principe des différents cycles dans un tel réacteur:

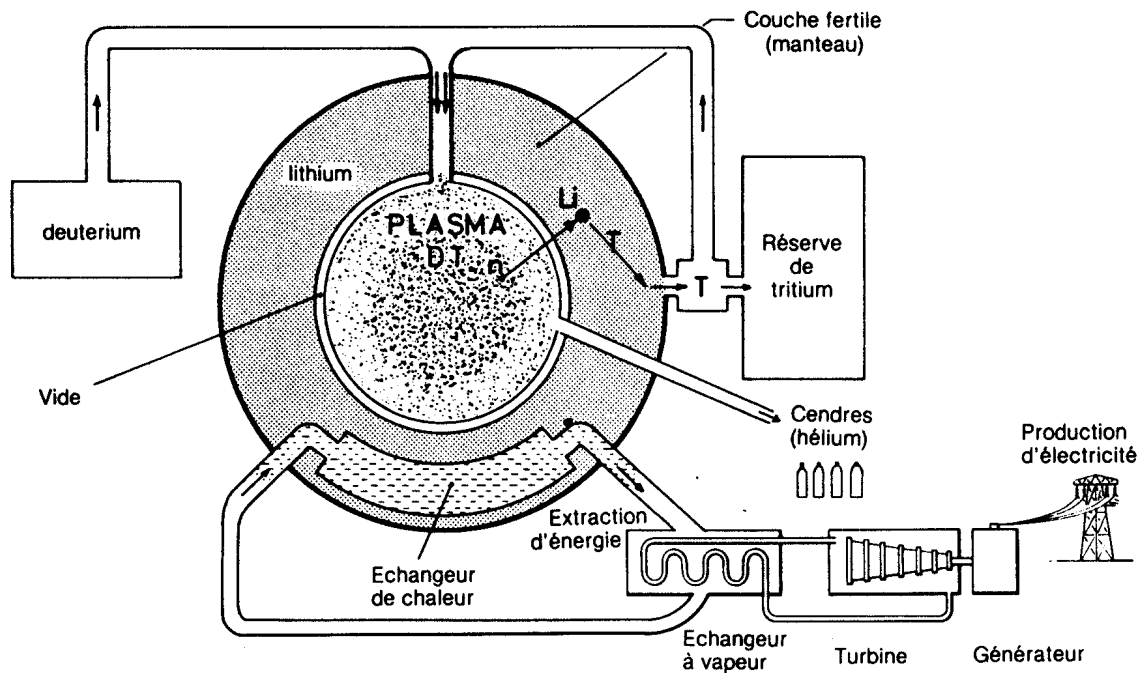


Fig. 7 - schéma de principe des différents cycles dans un réacteur à fusion nucléaire.



### 3. LES ACTIVITES DE RECHERCHE DU LABORATOIRE

Au cours de la conférence de Genève de 1958 portant sur les applications pacifiques de l'énergie nucléaire, les grands pays ont révélé l'existence d'importants programmes nationaux destinés à mettre en oeuvre l'utilisation de l'énergie thermonucléaire.

Notre pays étant dépourvu d'un tel programme, le Fond National de la Recherche Scientifique (FN) décida alors en 1961 de créer un centre national indépendant de recherche en physique des plasmas. Sa mission consistait à promouvoir la présence suisse dans ce domaine, à contribuer à l'avancement des connaissances en physique des plasmas et à développer des techniques pour la recherche en fusion contrôlée.

En 1973, ce centre - le Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) - est rattaché à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) sous forme d'une Unité hors Département (UHD). En 1979, le parlement helvétique ratifie un accord de coopération entre la Suisse et l'EURATOM concernant la fusion thermonucléaire contrôlée. Il s'ensuit une intensification des recherches, le CRPP devenant alors le centre de gravité de l'association Suisse-EURATOM.

Les projets de recherche actuels du CRPP recouvrent quatre grands domaines:

- Le CRPP a construit un tokamak sur le site de l'EPFL à Ecublens. Les objectifs principaux de cette machine sont le développement d'une nouvelle méthode de chauffage du plasma, ainsi que l'étude des problèmes du confinement magnétique. Ce projet est financé par le

Fonds National (FN), l'EURATOM et l'EPFL; il a reçu une contribution du Fond National de la Recherche pour l'Energie (NEFF).

- L'étude des paramètres du plasma nécessite un constant développement de nouvelles techniques de diagnostic. La mise au point de tels systèmes utilisant des lasers fait l'objet du deuxième volet des recherches au CRPP.
- La physique de base des plasmas est étudiée dans diverses installations expérimentales. En effet, la compréhension de phénomènes tels que les turbulences, les interactions entre un plasma et des ondes ou les processus non-linéaires est d'une grande importance.
- Enfin, toute recherche ne saurait être complète sans des études théoriques approfondies. Dans ce domaine, divers projets de calcul numérique font l'objet d'accords scientifiques avec des laboratoires étrangers.

A travers l'EURATOM, le CRPP collabore de plus au programme mondial de recherche en fusion contrôlée: plusieurs physiciens du laboratoire effectuent des études théoriques dans le cadre du projet international INTOR (Ignited Toroidal Reactor), initié par l'IAEA (International Atomic Energy Agency) à Vienne.



Le tokamak TCA  
(Vue générale)

#### 4. LES PROJETS DE RECHERCHE

##### Le tokamak TCA

Parmi les différentes voies actuellement envisagées pour faire de la fusion, la configuration magnétique fermée du type TOKAMAK est celle qui permettra vraisemblablement de démontrer la faisabilité scientifique. C'est pourquoi la décision a été prise en 1977 de construire une telle machine au CRPP. Ce tokamak - le TCA - a été conçu, dessiné et réalisé dans le laboratoire, avec des contributions du SIN (Institut Suisse de Recherches Nucléaires, à Villigen) et de l'EIR (Institut Fédéral de Recherche en Matière de Réacteurs, à Würenlingen). Le montage à Ecublens a débuté en avril 1979 et le premier plasma a été produit en juillet 1980.

Il existe actuellement une trentaine de tokamaks dans le monde. D'une part, il y a les grandes machines en construction comme le projet européen JET (sous l'égide de l'Euratom) en Grand-Bretagne, TFTR aux Etats-Unis, T-15 en URSS ou JT-60 au Japon, dans lesquelles tous les paramètres du plasma seront poussés jusqu'aux limites des critères de faisabilité scientifique de la fusion contrôlée. D'autre part, il y a les machines de petite et moyenne taille - comme par exemple TCA - dont les objectifs sont l'étude des problèmes spécifiques à ce type de configuration. Sans prétendre atteindre simultanément tous les paramètres de fusion, ces expériences contribuent de façon déterminante à la conception et à la réalisation des grands projets. Le fonctionnement d'un tokamak peut être décrit d'une façon assez simple.

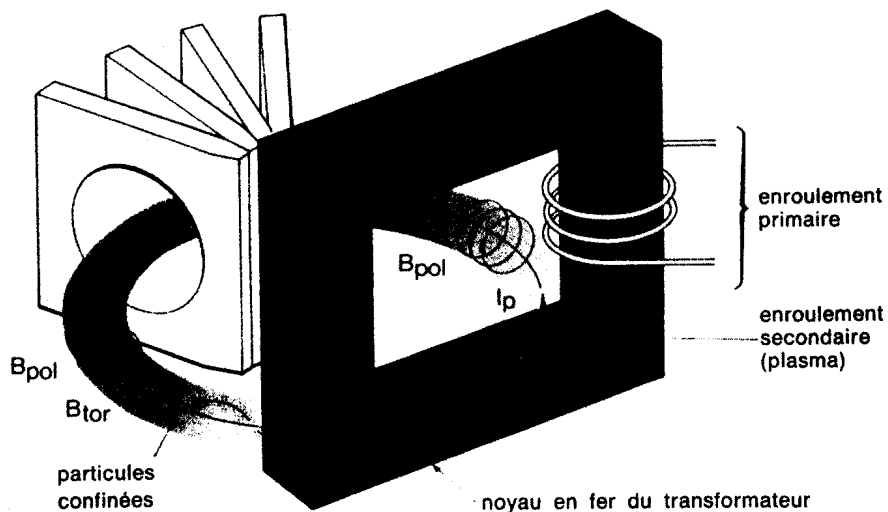


Fig. 8 - schéma de principe d'un tokamak

Comme toutes les configurations fermées, le tokamak a un champ magnétique toroïdal  $B_{tor}$  produit par des bobines enroulées autour de l'enceinte contenant le plasma. Le courant électrique  $I_p$  circulant dans ce plasma engendre un champ magnétique poloidal  $B_{pol}$ . Pour créer ce courant, le tokamak est construit de façon à ce que le plasma forme l'enroulement secondaire d'un transformateur. Ce sont les champs toroïdal ( $B_{tor}$ ), poloidal ( $B_{pol}$ ), et le champ vertical ( $B_v$ ) imposé extérieurement qui assurent le confinement des particules du plasma.

Le courant  $I_p$  chauffe le plasma par effet résistif, selon le même principe que les filaments d'un appareil électrique. Cette méthode de chauffage, appelée chauffage ohmique, permet de porter le plasma à des températures comprises entre 5 et 15 millions de degrés.

Or, au moins 100 millions de degrés sont nécessaires pour amorcer les réactions de fusion. Il est donc impératif de développer des méthodes de chauffage additionnel.

Un des procédés utilisables consiste à comprimer progressivement le plasma par des forces magnétiques supplémentaires. C'est la compression adiabatique (i.e. sans échange de chaleur avec l'extérieur), une méthode dont l'efficacité est limitée par des paramètres techniques.

Un autre procédé consiste à injecter des particules neutres de très hautes énergies dans le plasma. C'est le chauffage par injection de neutres, utilisé sur de nombreux tokamaks malgré son coût élevé et son rendement assez médiocre.

Le chauffage haute fréquence quant à lui, consiste à déposer dans le plasma l'énergie d'ondes électromagnétiques (100 kHz - 200 GHz). A des fréquences de l'ordre de 1-5 MHz, ces ondes sont appelées ondes d'Alfvén; elles ont la propriété d'interagir avec une couche du plasma. En effet, cette couche se met à vibrer à la même fréquence que l'onde et absorbe l'énergie de celle-ci: c'est ce que l'on appelle l'absorption résonnante. C'est cette méthode de chauffage du plasma qui est étudiée au CRPP et qui a donné son nom au tokamak TCA (Tokamak Chauffage d'Alfvén).

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 toroïdal	$B_T = 0.8-1.5 \text{ Tesla}$ (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	$I_p = 20-135 \text{ kA}$
temps de confinement de l'énergie	$\tau_E = 1-4 \text{ ms}$
fréquence de chauffage Alfvén	$f_A = 2.5-6 \text{ MHz}$

Une expérience sur le tokamak, communément appelée "choc" ou "décharge", dure normalement environ  $1/10^6$  de seconde. En effet, divers phénomènes limitent la durée de vie du plasma.

- Un "choc tokamak" nécessite une grande puissance électrique pour créer le champ et entretenir le courant. Comme il n'est pas possible de tirer toute cette énergie du réseau électrique, elle doit être emmagasinée préalablement dans des bancs de condensateurs. Ce sont ces contraintes technologiques, comme par exemple la capacité de stockage de ces bancs ou l'échauffement des conducteurs, qui limitent la durée de l'expérience.
- De plus, des phénomènes physiques encore mal compris peuvent mettre une fin rapide (disruption) à l'existence du plasma.

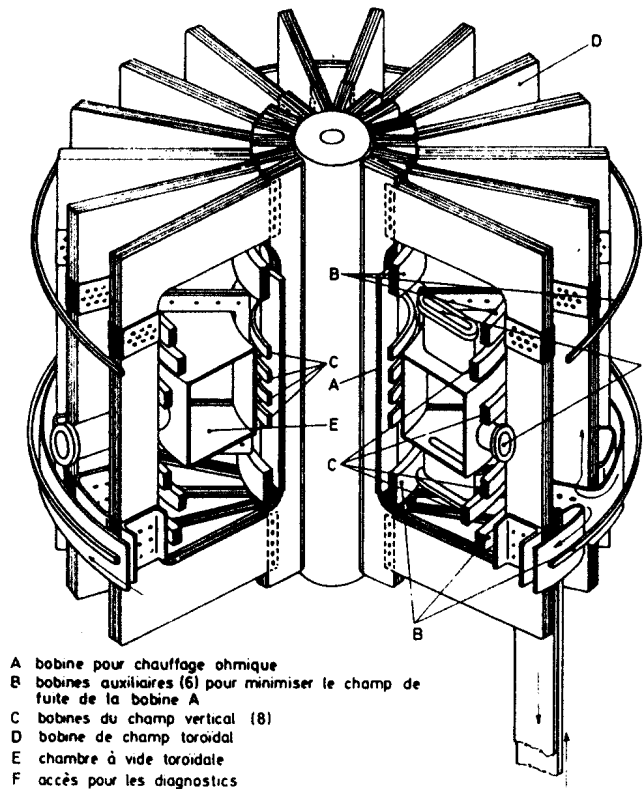


Fig. 9 - vue éclatée du tokamak

Un plasma est établi de la façon suivante dans le tokamak:

- Dans une première phase, le champ magnétique toroïdal est établi à l'aide des 18 bobines en cuivre (D). Le courant nécessaire - 66'000 Ampères lorsque le champ est maximum (1.5 Tesla) - est fourni par deux transformateurs branchés en série sur le réseau électrique 50'000 Volts. La puissance maximale ainsi développée est de 12 MW (12 millions de Watts) pendant environ 2 secondes.
- Le plasma est ensuite créé par une décharge électrique dans le gaz d'hydrogène ou de deutérium, contenu dans l'enceinte toroïdale en acier inox (E). C'est la décharge initiale de préionisation.
- Le chauffage ohmique du plasma est assuré par le courant  $I_p$  qu'induisent les bobines (A) et (B); la source d'énergie utilisée pour cela est un banc de condensateurs de 720 kJ (720'000 Joules).



- Pour maintenir le plasma au centre de l'enceinte à vide, un champ magnétique vertical rétroagissant constamment sur la position du plasma est produit par les 8 bobines (C).

L'excitation des ondes d'Alfvén, utilisées pour les études de chauffage du plasma, est assurée par 8 groupes de 3 antennes montées à l'intérieur du tore. Ces antennes sont alimentées par un générateur délivrant une puissance de 800 kW (800'000 Watts) pendant 0.03 sec (3/100e sec).

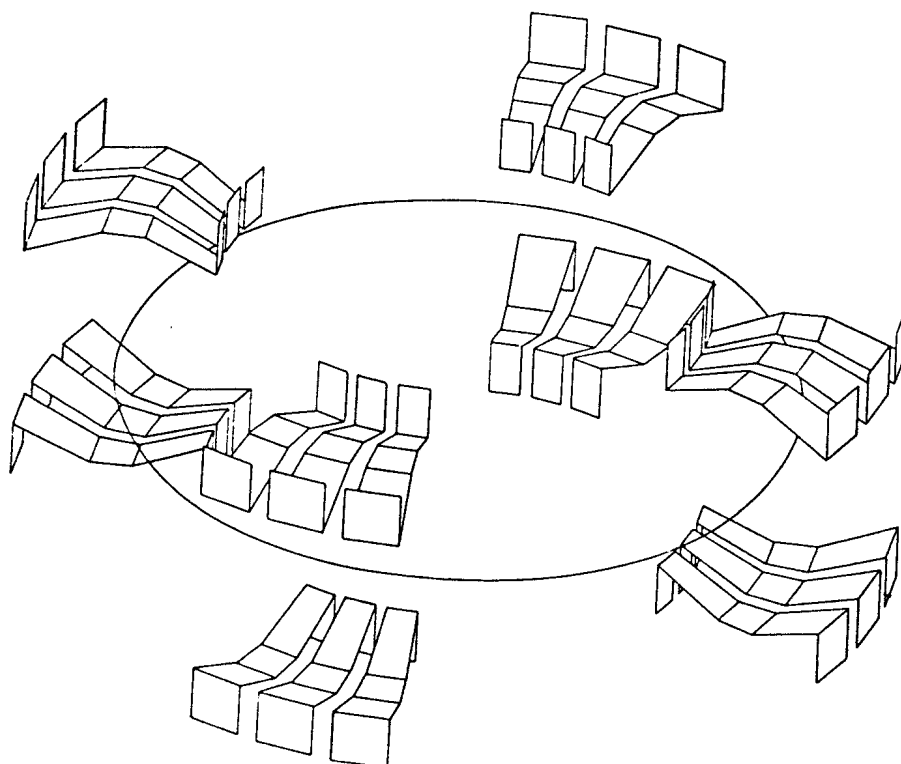
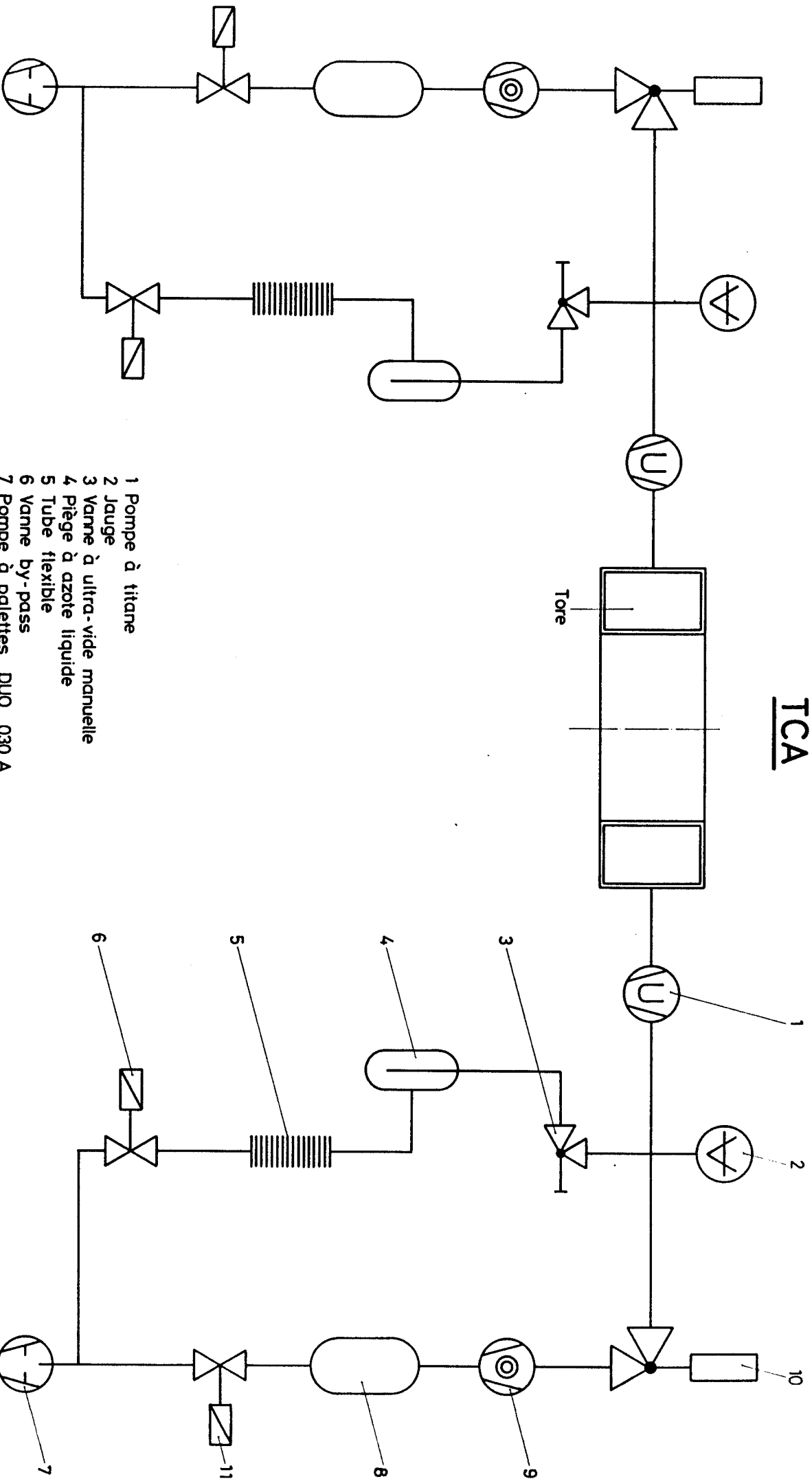


Fig. 10 - représentation en perspective des 8 groupes d'antennes

De nombreux accès (F) sont disposés sur le tore. Ils permettent d'apporter des modifications techniques à l'intérieur de la chambre à vide, de pomper l'enceinte, ainsi que d'effectuer les mesures de certains paramètres du plasma.

# Groupes de pompage

## TCA



- 1 Pompe à titane
- 2 Jauge
- 3 Vanne à ultra-vide manuelle
- 4 Piège à azote liquide
- 5 Tube flexible
- 6 Vanne by-pass
- 7 Pompe à palettes DUO 030 A
- 8 Réservoir préliminaire
- 9 Pompe turbo-moléculaire
- 10 Vanne principale à commande hydraulique
- 11 Vanne préliminaire vide

## Les diagnostics

Afin d'étudier le plasma et son comportement, il est évidemment nécessaire de connaître des paramètres tels que position, température, densité, composition, fluctuations électriques et magnétiques, radiations émises. Dans ce but, tout un éventail de diagnostics a été installé sur le tokamak TCA.

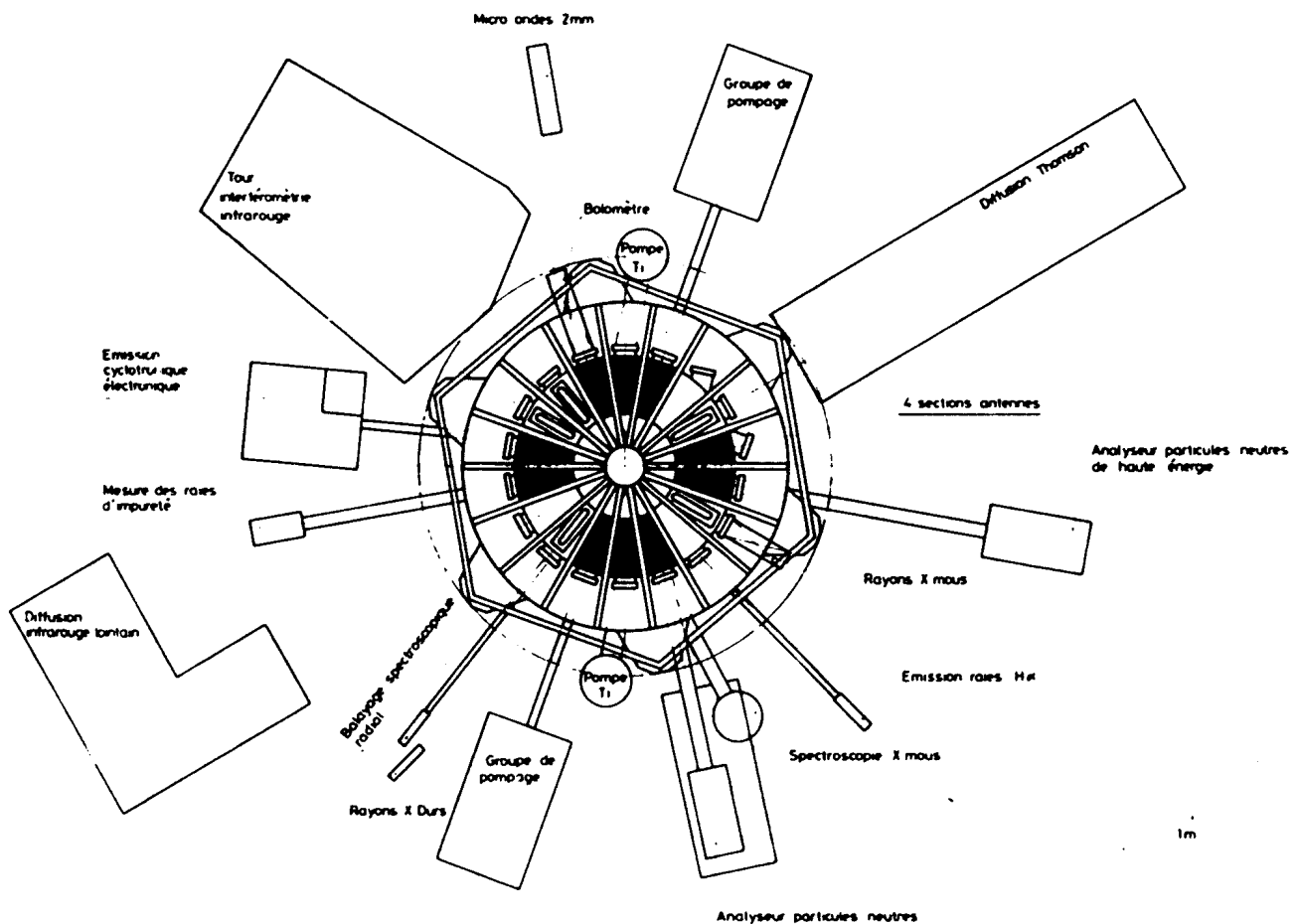


Fig. 11 - distribution des diagnostics autour du tokamak TCA

Voici une description de quelques unes de ces méthodes:

Interféromètre 2 mm

Ce système consiste en deux faisceaux micro-ondes (fréquence = 140 GHz, longueur d'onde = 2 mm), l'un traversant le plasma, l'autre l'évitant et servant de référence. Le déphasage entre ces deux faisceaux est relié à la densité électronique le long du trajet dans le plasma.

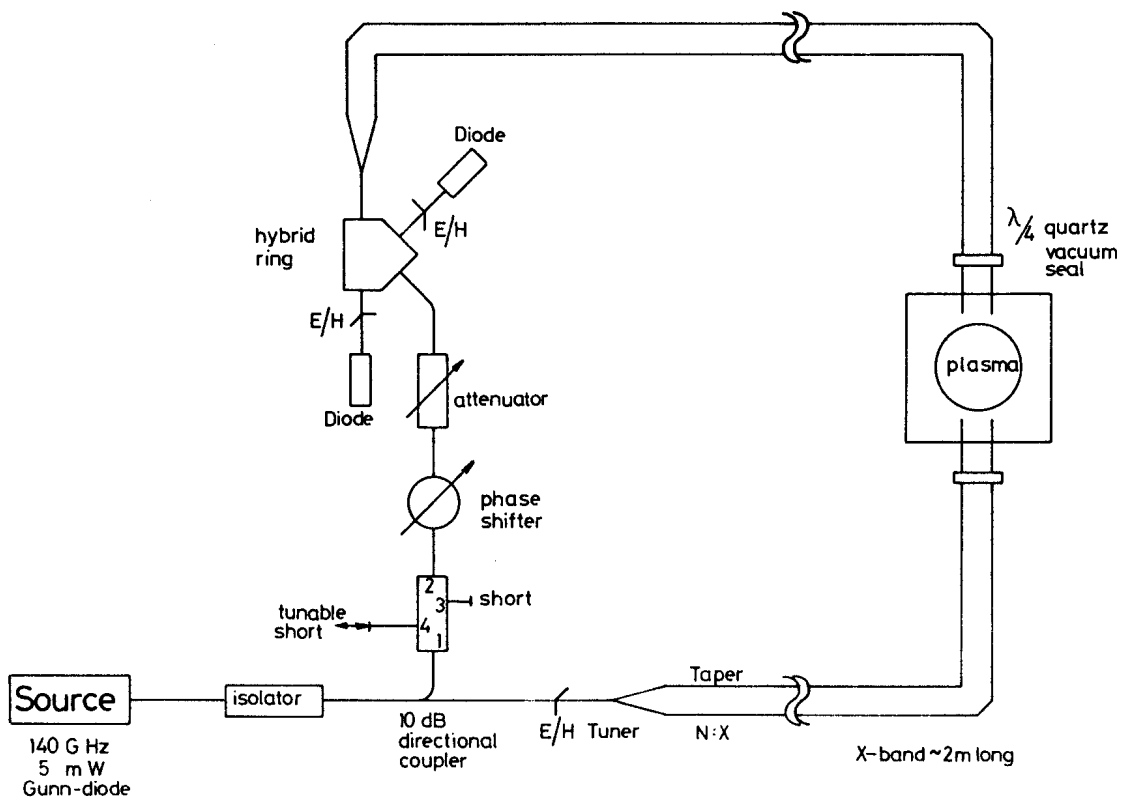


Fig. 12 - le système interférométrique 2 mm

### Emission cyclotronique électronique

Les électrons confinés magnétiquement tournent autour des lignes de champ. Ils sont par conséquent accélérés et émettent une radiation appelée "émission cyclotronique électronique (ECE)", qui se produit à des fréquences de l'ordre de 20 à 400 GHz. Sous certaines conditions, l'intensité ECE en fonction de la fréquence est reliée à la température électronique en fonction du rayon. Ce diagnostic fournit donc des profils radiaux de la température des électrons du plasma. Il utilise pour cela un interféromètre Michelson et un détecteur indium-antimoine (InSb) refroidi à la température de l'hélium liquide ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

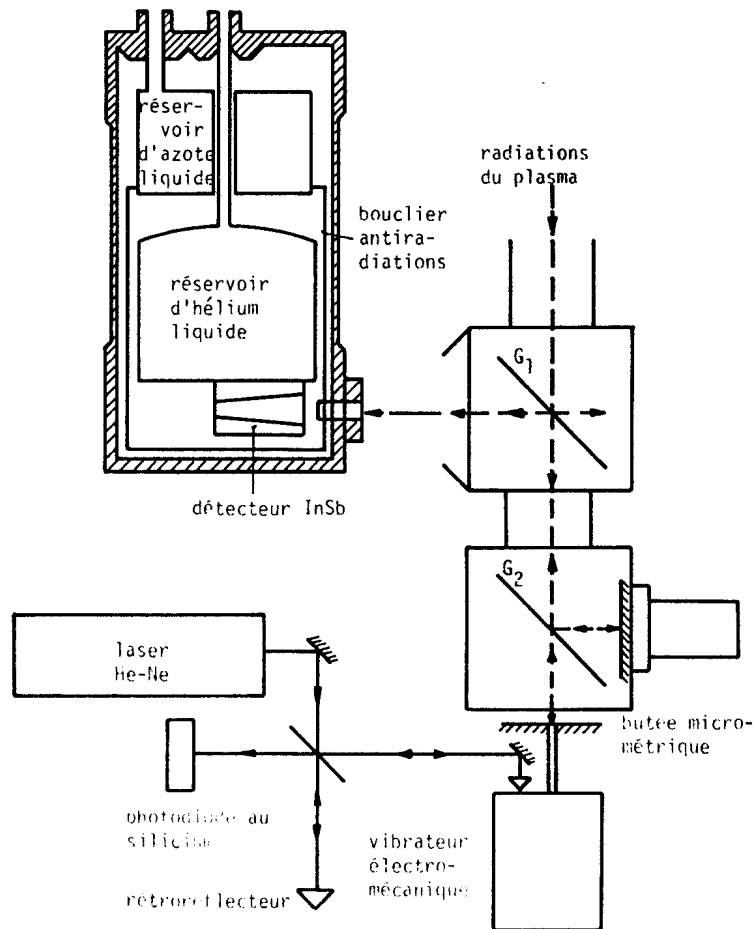


Fig. 13 - schéma de principe de la mesure de l'émission cyclotronique électronique.

### Analyse de particules neutres

Dans cet appareil, acheté à l'Institut Ioffe de Léninegrad, les particules neutres qui s'échappent du plasma sont d'abord ionisées, puis déviées par un champ électrique. Selon leur énergie, l'angle de déflexion est plus ou moins grand et les particules arrivent sur l'un des 5 détecteurs (multiplicateurs d'électrons). L'analyseur de particules neutres (NPA), permet de mesurer la distribution d'énergie, donc la température des ions du plasma.

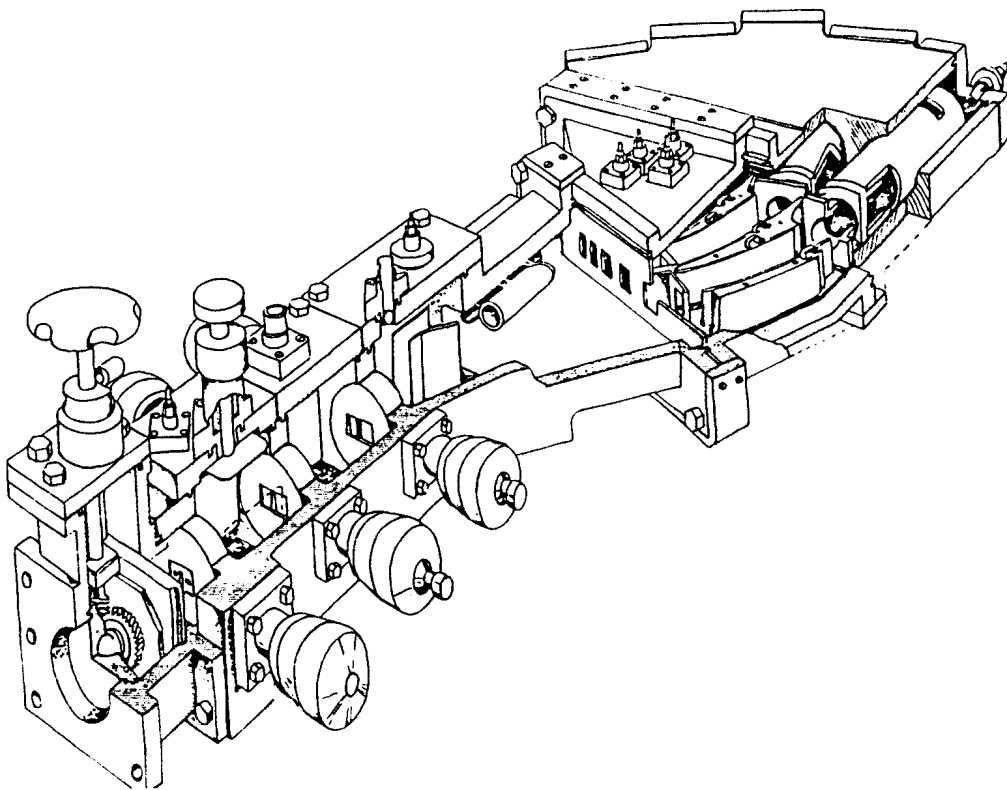


Fig. 14 - vue artistique de l'analyseur de particules neutres

### Diagnosics X-mous

La mesure des flux de rayons-X de basse énergie, dits rayons X-mous, émis par le plasma est d'un grand intérêt. Pour cela, des diodes réceptrices en silicium sont disposées en diverses configurations derrière des épaisseurs variables de béryllium (25 à 300  $\mu\text{m}$ ). A l'aide des signaux mesurés, il est alors possible de calculer la température électronique, ainsi que d'étudier divers phénomènes liés à la stabilité du plasma.

### Bolomètre

Ce diagnostic a été installé sur le tokamak TCA dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut de Physique de l'Université de Fribourg. Il consiste principalement en un détecteur au germanium qui mesure la radiation du plasma et permet ainsi d'évaluer son bilan énergétique.

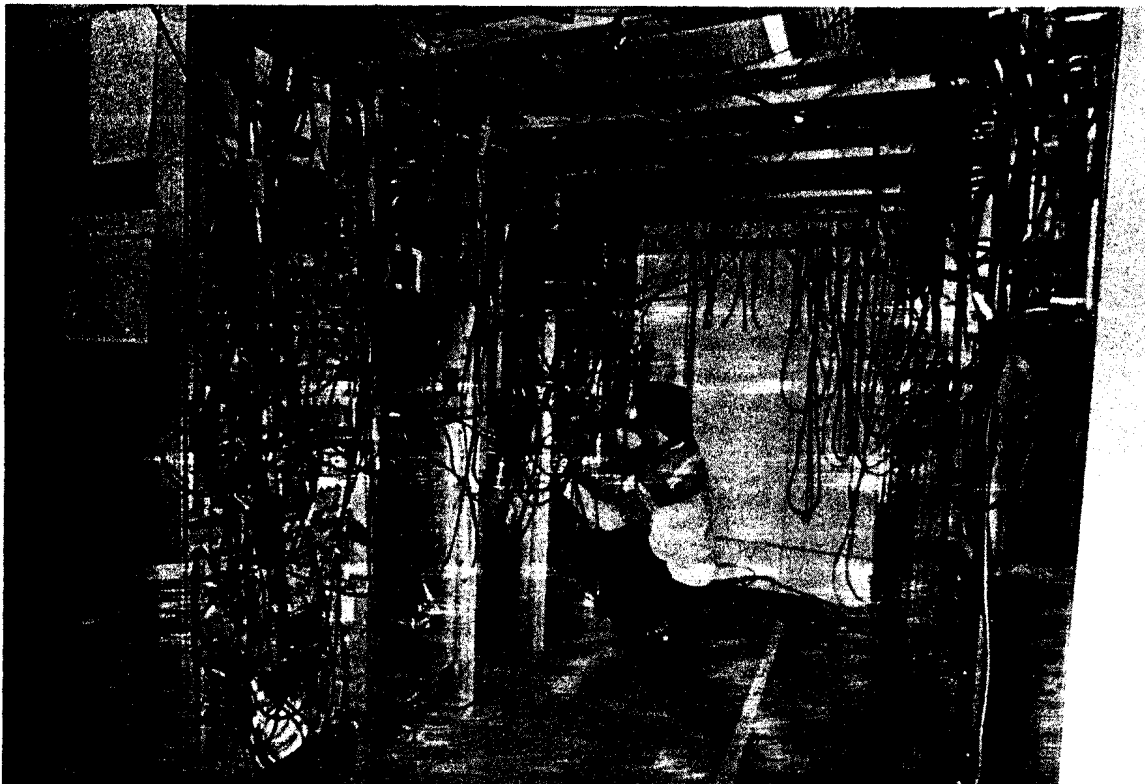
### Interaction plasma-paroi

Dans le cadre d'une autre collaboration, l'Institut de Chimie Inorganique de l'Université de Zurich exploite une expérience sur les interactions entre le plasma et les parois de l'enceinte à vide. Des couches d'atomes, principalement du fer, du carbone et de l'oxygène, s'évaporent des parois et viennent "polluer" le plasma. Ces "impuretés" modifient les caractéristiques du plasma et augmentent généralement les pertes thermiques.

### Boucles et sondes magnétiques

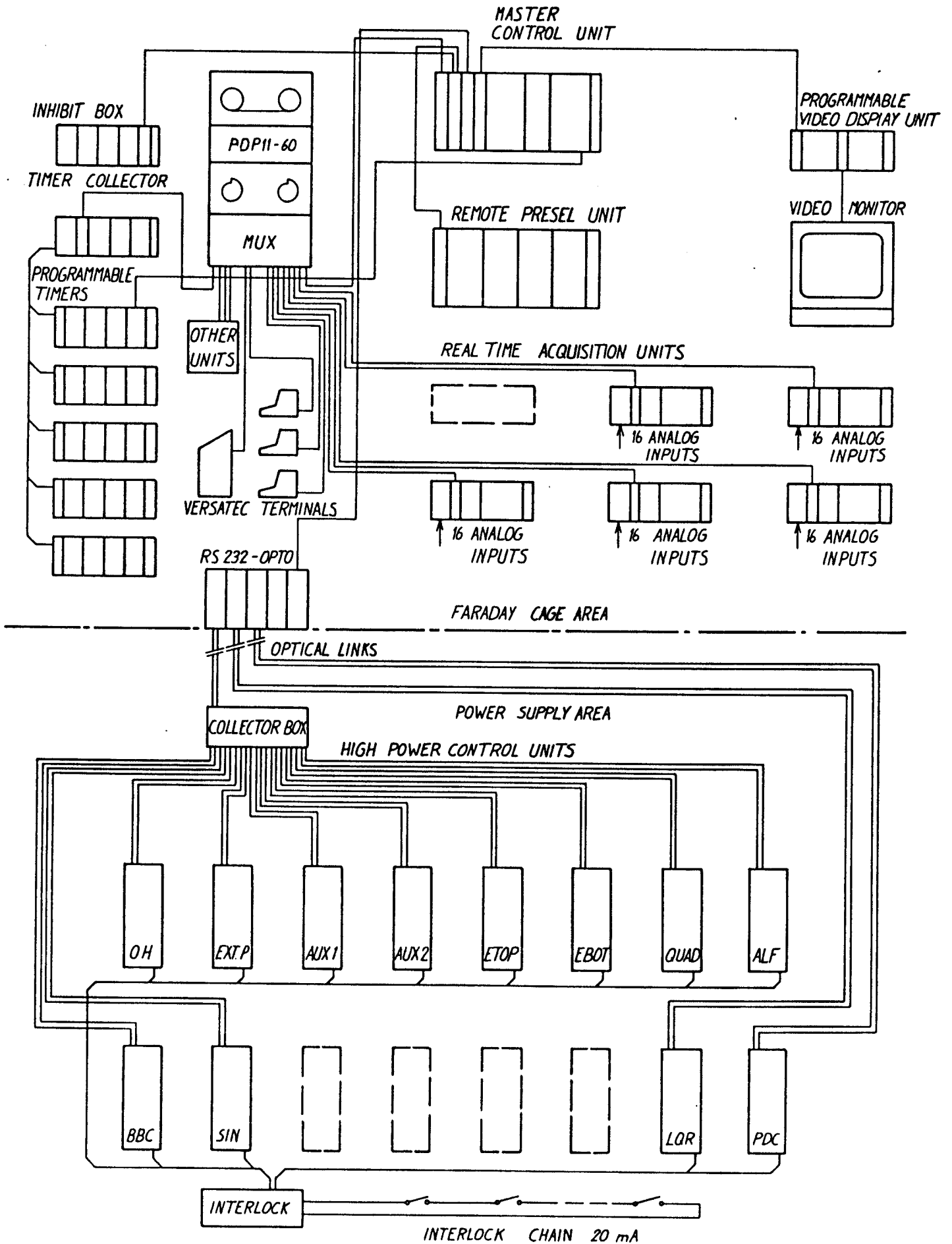
Diverses configurations de boucles et de sondes magnétiques sont installées sur le tokamak. Elles permettent de mesurer un certain nombre de paramètres très importants, entre autre la position du plasma, le courant  $I_p$ , les fluctuations du champ magnétique.

Les résultats de toutes ces mesures, y compris celles des diagnostics optiques décrits plus loin, sont d'abord transmis dans la salle de contrôle, puis enregistrés sur un ordinateur. En fait, la durée d'un "choc tokamak" typique n'étant que d'environ un  $1/10^e$  de seconde, tout le déroulement de l'expérience, ainsi que l'acquisition des données se font automatiquement. Le système qui gère toutes ces opérations est composé d'un ensemble de "timers", de microprocesseurs et de mémoires tampons. Le traitement des données est effectué sur un ordinateur PDP 11-60.



Vue de la salle de contrôle





SCHEMA SYNOPTIQUE DE L'ACQUISITION ET DU CONTROLE SUR TCA

## Les lasers

Certains diagnostics du plasma font appel à l'utilisation de lasers, ce qui a amené le CRPP à entreprendre d'intensives recherches dans ce domaine. Voici une description de trois projets principaux.

### Diffusion Thomson

Dans ce système, un faisceau de lumière rouge émis par un laser à rubis est focalisé dans le plasma. La lumière diffusée à  $90^\circ$  par les électrons est récoltée, puis passe dans un spectromètre avant d'être détectée par 10 photomultiplicateurs. Le spectre d'intensité ainsi mesuré permet de déterminer la température électronique au point de focalisation. Un système de soufflets et de rails permet de déplacer ce point de mesure à travers le plasma.

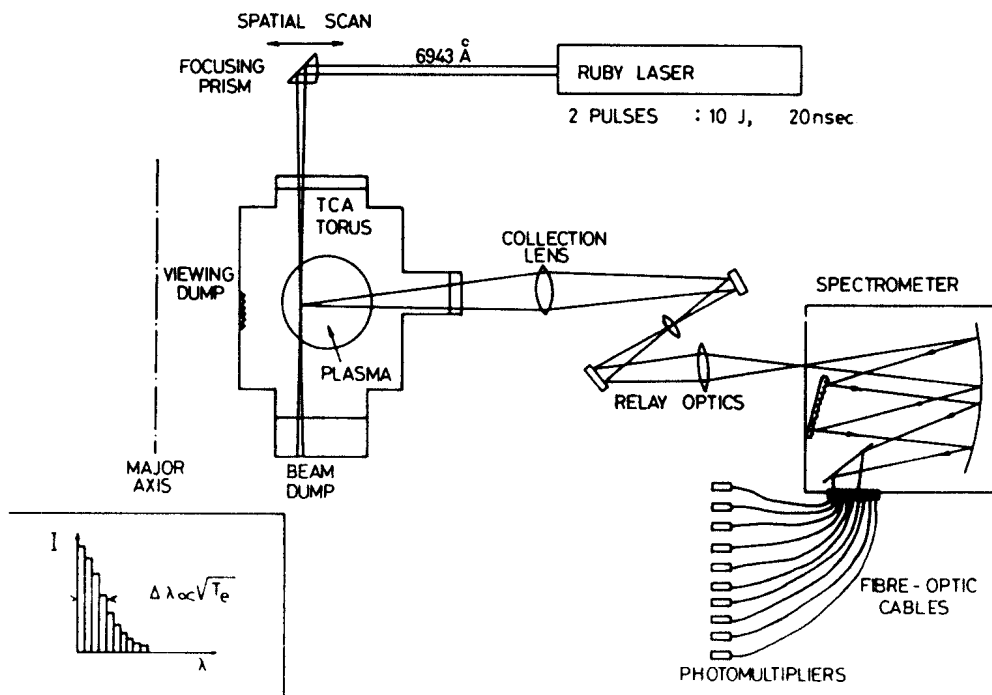


Fig. 15 - schéma de principe de la diffusion Thomson

### Interféromètre à 8 canaux

Ce système a été conçu pour mesurer le profil radial de la densité du plasma. Pour cela, le faisceau émis dans l'infrarouge lointain ( $447 \mu\text{m}$ ) par un laser à iodure de méthylène ( $\text{CH}_3\text{I}$ ), lui-même pompé par un laser  $\text{CO}_2$ , est divisé en neuf. Huit faisceaux traversent en divers endroits le plasma, alors que le neuvième sert de référence. Ce sont les déphasages entre les différents faisceaux qui permettent d'établir le profil de densité du plasma.

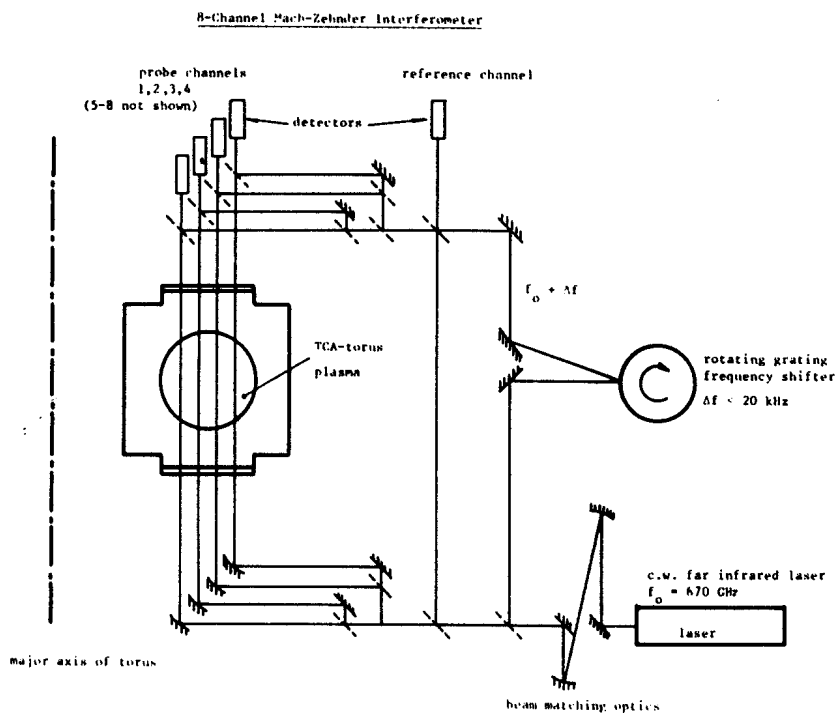


Fig. 16 - schéma de principe de l'interféromètre

### Diffusion dans l'infrarouge lointain

Il est possible de mesurer la température ionique d'une façon semblable à celle utilisant la diffusion Thomson pour mesurer la température électronique. Ce nouveau diagnostic, dont le développement fait l'objet d'un contrat avec JET (Joint European Torus, EURATOM), nécessite l'emploi d'un laser qui émet dans l'infrarouge lointain. Le système consiste en un laser à  $D_2O$ , pompé par une chaîne de lasers à  $CO_2$  dont l'amplificateur principal est excité par un faisceau d'électrons de 300'000 Volts. La difficulté principale dans le développement réside dans l'obtention d'une puissance suffisante (plus de 1 MW). Ce diagnostic sera ultérieurement installé sur le TCA, afin de vérifier sa valeur opérationnelle.

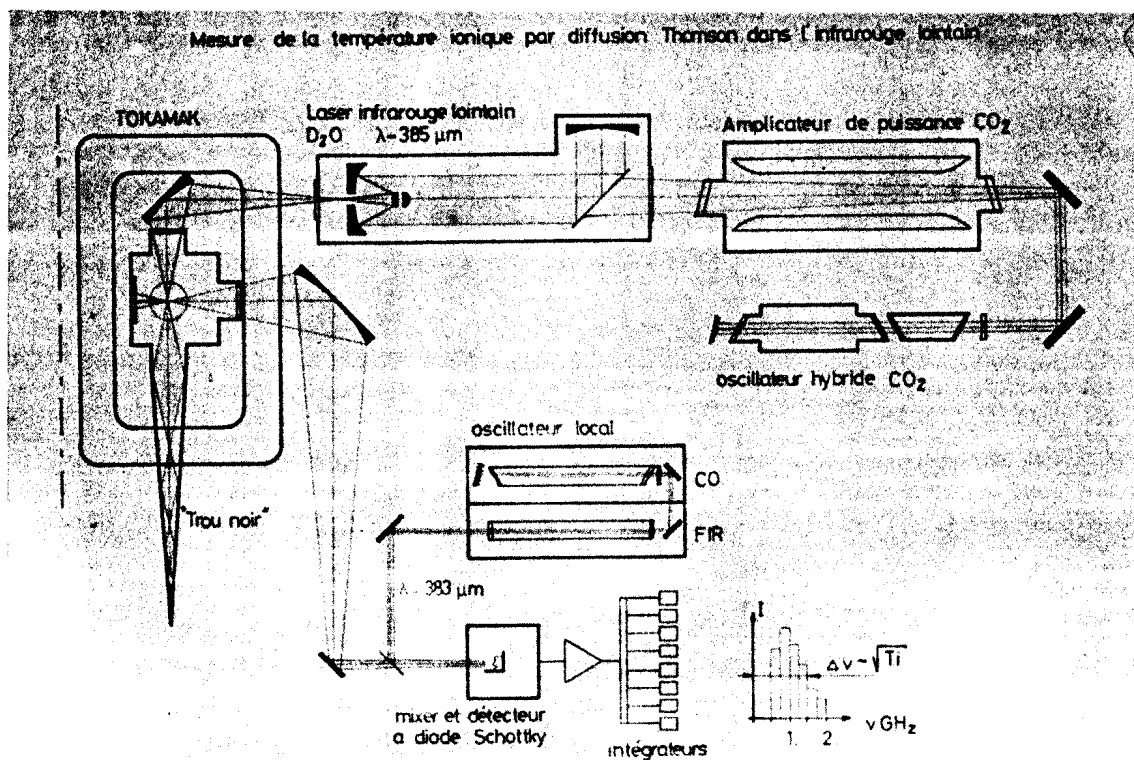
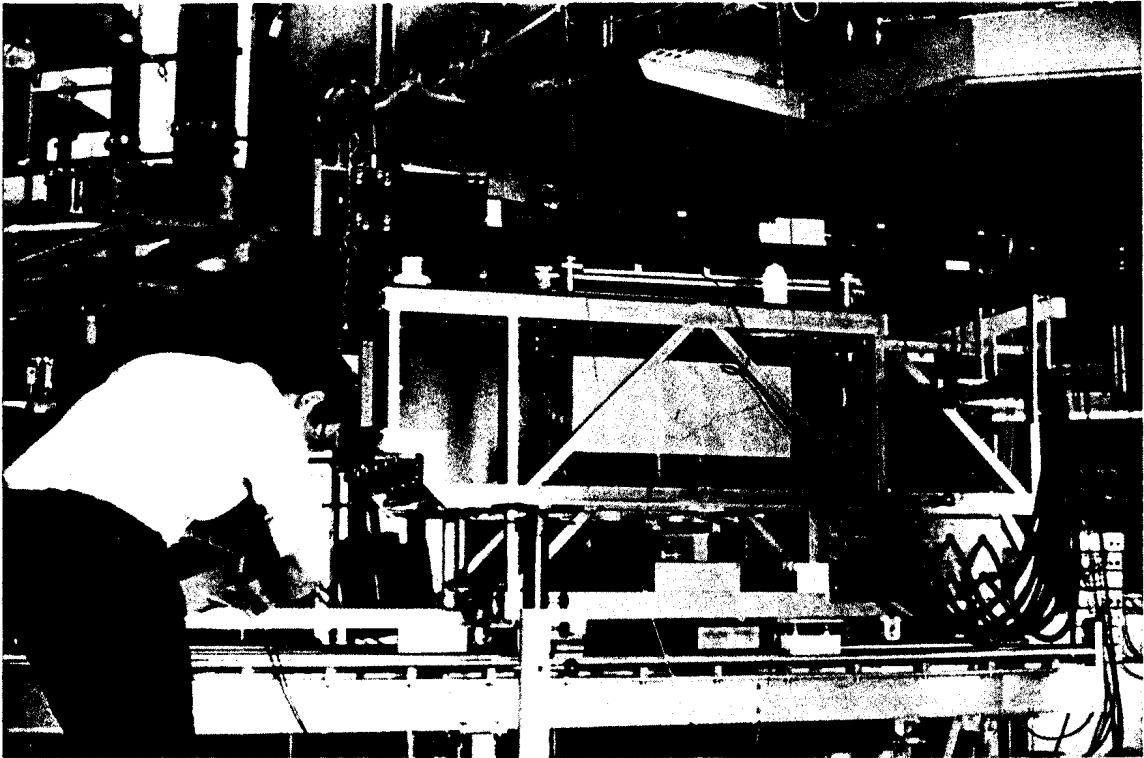


Fig. 17 - schéma de la chaîne de mesure de la diffusion IR lointain



Installation Diffusion Thomson sur TCA



Vue du laboratoire du laser IR lointain

Même si la visite lors des "portes ouvertes 1982" ne concerne que le tokamak, il nous semble nécessaire de mentionner brièvement les autres travaux de recherche effectués dans le laboratoire:

### Les plasmas à basse densité

Diverses autres études expérimentales sont effectuées dans le bâtiment principal du CRPP, à l'Avenue des Bains (Parc des Cèdres). Ces expériences ont pour but l'étude de certains phénomènes liés aux instabilités, aux turbulences et à la présence d'ondes de grandes amplitudes dans le plasma.

Dans un gaz ordinaire, composé de particules neutres, deux types d'ondes peuvent se propager: les ondes sonores et les ondes électromagnétiques. les lois qui régissent ces propagations sont simples et bien connues.

Il en va autrement lorsqu'il s'agit d'un gaz de particules chargées: en effet, la théorie des ondes dans un plasma est très compliquée. En fait, il faut alors tenir compte de phénomènes tels que les échanges d'énergie entre ondes et particules, ou le transport par celles-ci d'informations sur le plasma. Cette dernière propriété permet d'ailleurs de mesurer certains paramètres du plasma.

Les expériences présentées ci-après permettent de créer un grand éventail de phénomènes macroscopiques et microscopiques dans des plasmas de laboratoire. Les recherches effectuées tentent de vérifier des théories et de découvrir des phénomènes nouveaux. Elles mettent à profit le fait que dans bien des cas, les plasmas de laboratoire sont une bonne modélisation des plasmas naturels.

Nessie

Il a été observé que l'application d'un courant à un plasma faiblement magnétisé crée une turbulence. En fait, il se produit des profils anormaux de potentiel électrique le long de la décharge. Ces profils ont une similitude avec les phénomènes des doubles couches (double layer) qui ont lieu dans l'ionosphère et dont la présence n'a pas encore été expliquée de façon satisfaisante. Ils pourraient être à l'origine des électrons énergétiques qui causent des perturbations dans la magnétosphère (aurores boréales).

Deux machines cylindriques de 3 m de long et de 25 cm de diamètre sont utilisées pour ces expériences: Nessie I (en métal) et Nessie II (en pyrex). Les turbulences décrites plus haut excitent plusieurs types d'ondes: citons les ondes acoustiques ioniques et les ondes plasma électroniques. La nature de ces ondes est déterminée par une méthode de mesure par corrélation. Un autre diagnostic est utilisé sur Nessie II, c'est la diffusion d'une onde électromagnétique par un spectre d'ondes turbulentes.

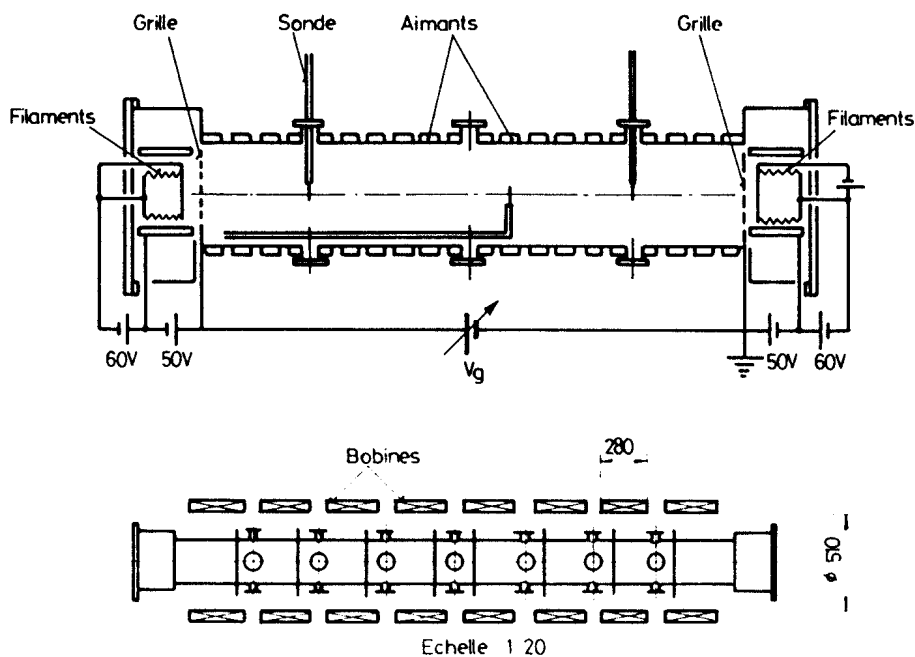


Fig. 18 - schéma de la machine Nessie

## Grande Chambre

La grande chambre est effectivement une expérience aux dimensions importantes: 3m de longueur et 2 m de diamètre. De cette façon, la grandeur du plasma est supérieure à la longueur d'onde des ondes électromagnétiques à la fréquence plasma. Le plasma y est créé à l'aide de 224 filaments chauffés électriquement. Les électrons ainsi produits sont accélérés et ionisent par collisions les atomes neutres du gaz dans la chambre. Une variation spatiale de la densité - ce que l'on appelle un gradient de densité - est obtenue en variant le courant d'émission des quatre groupes de filaments.

L'expérience en cours essaie de simuler les phénomènes d'émission électromagnétique qui ont lieu dans les plasmas solaires ou interplanétaires. Le soleil projette des particules énergétiques dans l'espace, particulièrement lors d'une éruption: c'est le vent solaire. L'interaction entre ces particules et le plasma solaire ou interplanétaire excite une turbulence. Celle-ci, appelée turbulence de Langmuir forte, est à l'origine d'émissions électromagnétiques.

Il est possible de simuler ce phénomène en laboratoire. Mais il faut pour cela que les paramètres du plasma et du faisceau d'électrons soient proportionnels à ceux existant dans l'espace: il faut respecter un facteur d'échelle.

Dans la grande boîte, une source à électrons a été installée, permettant ainsi d'injecter un faisceau d'électrons énergétiques de vitesse contrôlée. Ce faisceau interagit avec le plasma contenu dans la chambre à vide. Des ondes électromagnétiques sont alors émises, notamment à la fréquence double de la fréquence électronique du plasma. Elles sont détectées à l'aide d'un récepteur micro-ondes équipé d'une antenne à cornet. Les résultats expérimentaux obtenus sont consistants avec les prédictions théoriques.



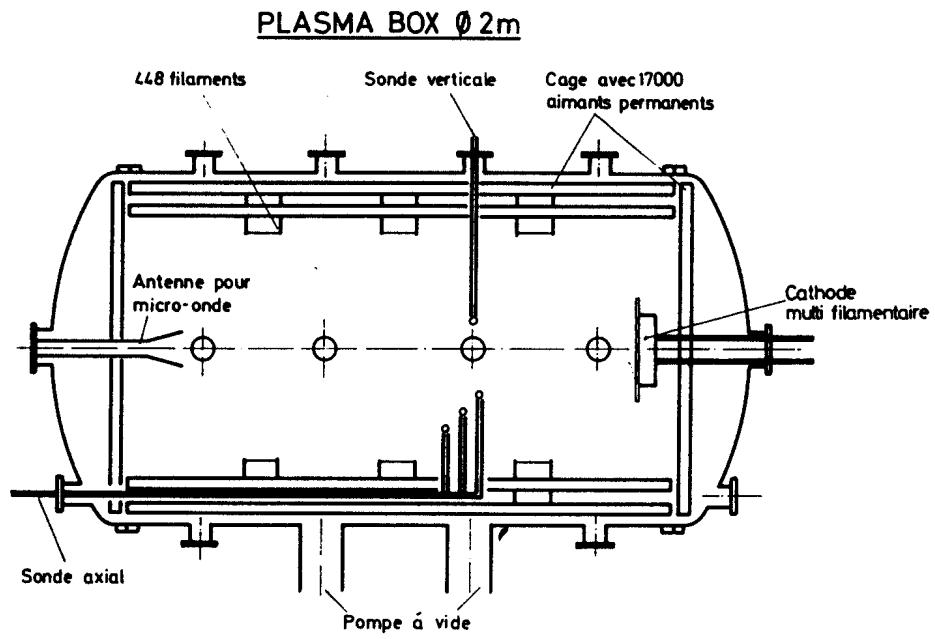
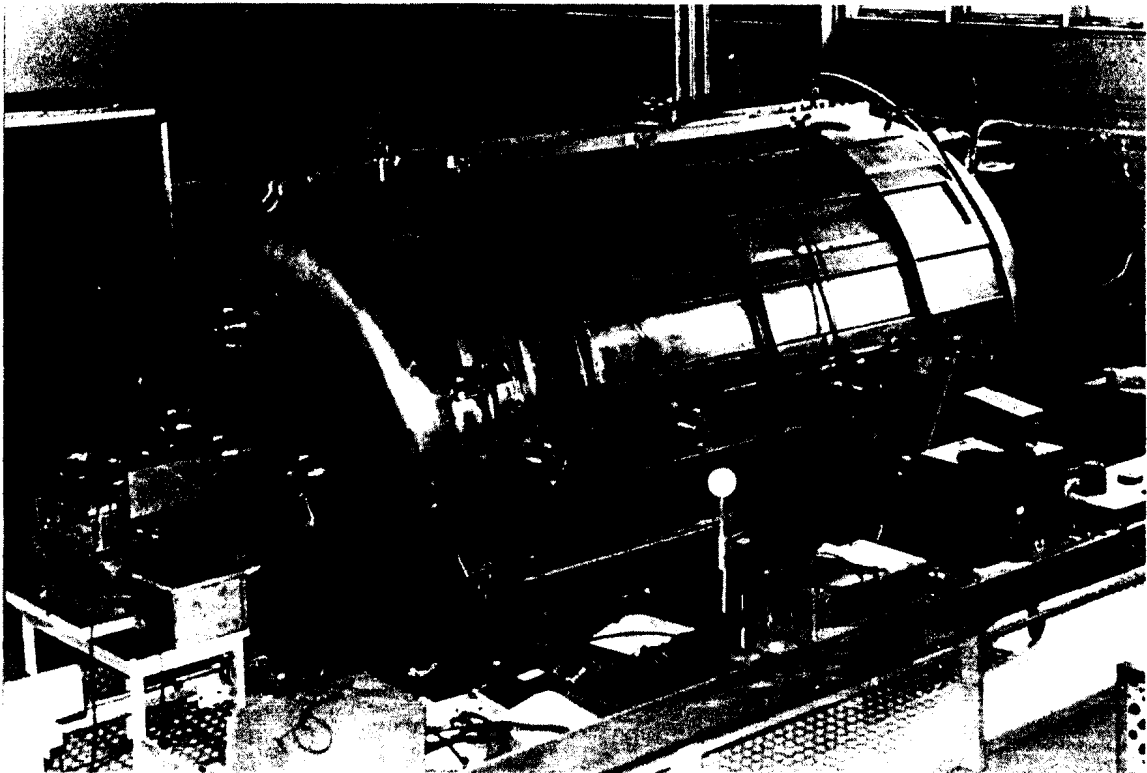


Fig. 19 - schéma de la Grande Boîte



Grande Boîte

LMP (Linear Magnetized Plasma)

Cette machine droite dispose d'un champ magnétique homogène de 3'000 Gauss créé par 44 bobines. Le plasma est confiné radialement, mais il est perdu lorsqu'il atteint les extrémités de la machine.

La première expérience est destinée à l'étude de l'effet pondéromoteur sur les particules d'un plasma. La force pondéromotrice, mieux connue sous la désignation de "pression de radiation", est semblable à celle qu'exerce la lumière sur les objets. Dans l'environnement naturel, la pression de radiation lumineuse est bien trop faible pour être perçue. Dans une expérience de physique des plasmas, il est possible de créer des conditions dans lesquelles la force pondéromotrice devient appréciable au point d'influencer le mouvement des particules chargées.

Dans un plasma magnétisé, la force pondéromotrice due à une onde proche de la fréquence cyclotronique ionique présente des caractères intéressants: son sens dépend de la différence entre la fréquence de l'onde appliquée et la fréquence cyclotronique ionique (qui dépend, elle, de la masse de la particule et du champ magnétique). On peut ainsi, par un choix judicieux de l'onde, modifier les trajectoires de deux particules de masses différentes. Dans l'expérience LMP, nous tenterons de démontrer cet effet en séparant spatialement deux isotopes du néon.

On peut également utiliser cette force pour créer une "barrière" applicable aux extrémités d'une machine à miroir et empêchant la fuite des ions.

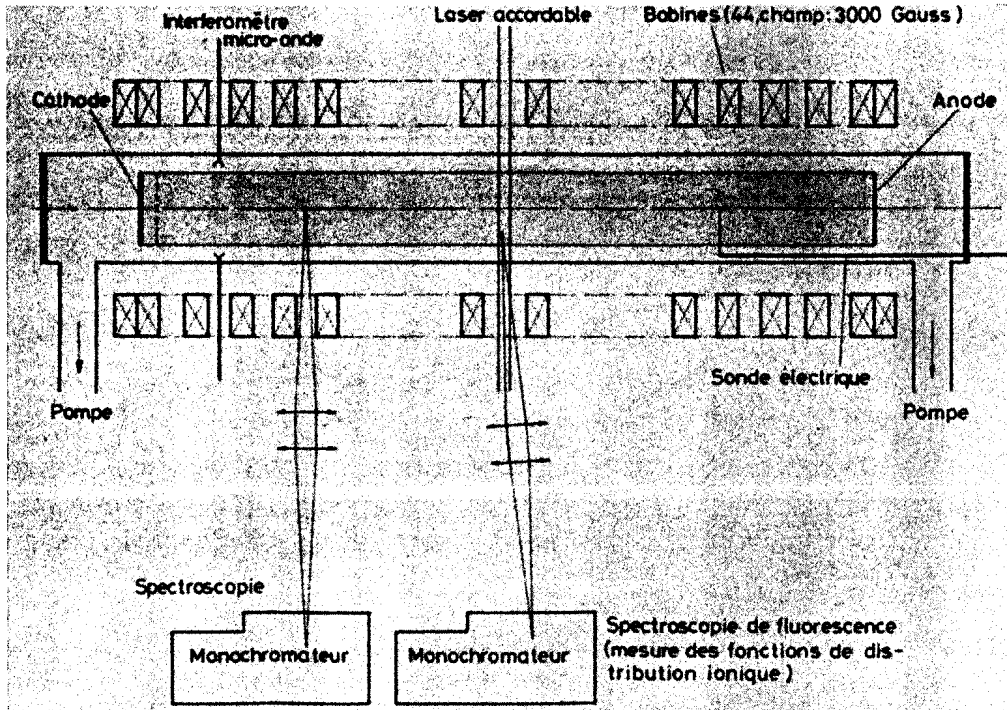
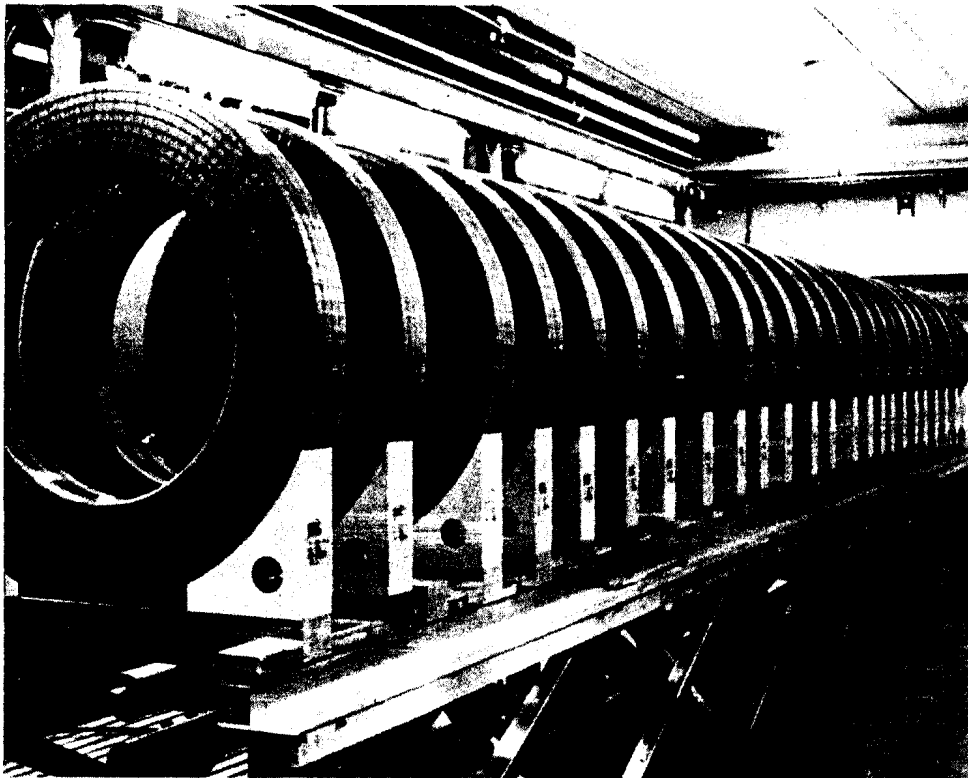


Fig. 20 - schéma de principe du LMP



LMP (en cours de montage)

### Diagnostic par faisceau d'ions

La connaissance de la structure du champ magnétique dans un plasma est de première importance. Il n'est malheureusement pas possible de mesurer ce champ par les moyens usuels. L'emploi d'un faisceau d'ions pourrait résoudre ce problème. Le faisceau est envoyé à travers le plasma magnétisé et, par collision avec les électrons, des ions secondaires sont produits ( $A^+ + e^- \rightarrow A^{++} + e^-$ ). L'analyse de la vitesse des ions secondaires sortant du plasma donne une mesure directe des composantes intéressantes du potentiel magnétique.

Le détecteur nécessaire à cette mesure a été construit et étudié sur banc d'essai. Les résultats obtenus montrent que la mesure est possible pour autant que le courant d'ions secondaires soit suffisant. Le système de diagnostic a donc été installé sur une machine à plasma (arc à cathode creuse) et les essais sont en cours. Cette méthode permet également la mesure du potentiel électrique et des fluctuations de densité.

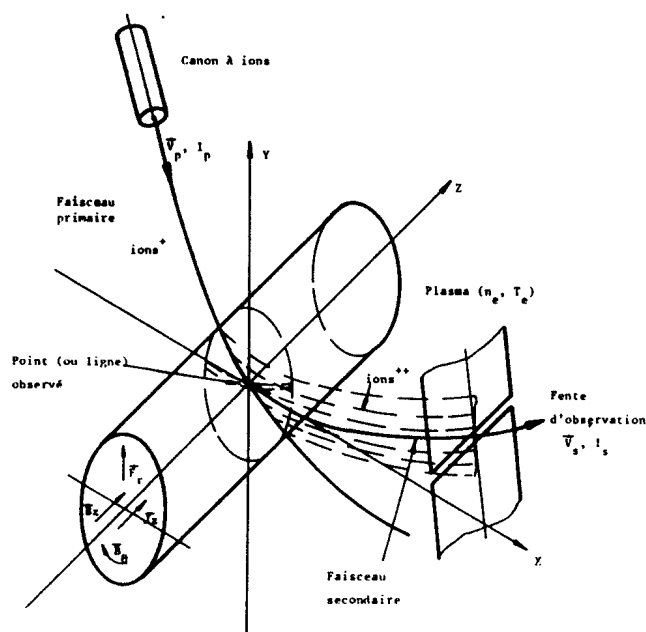
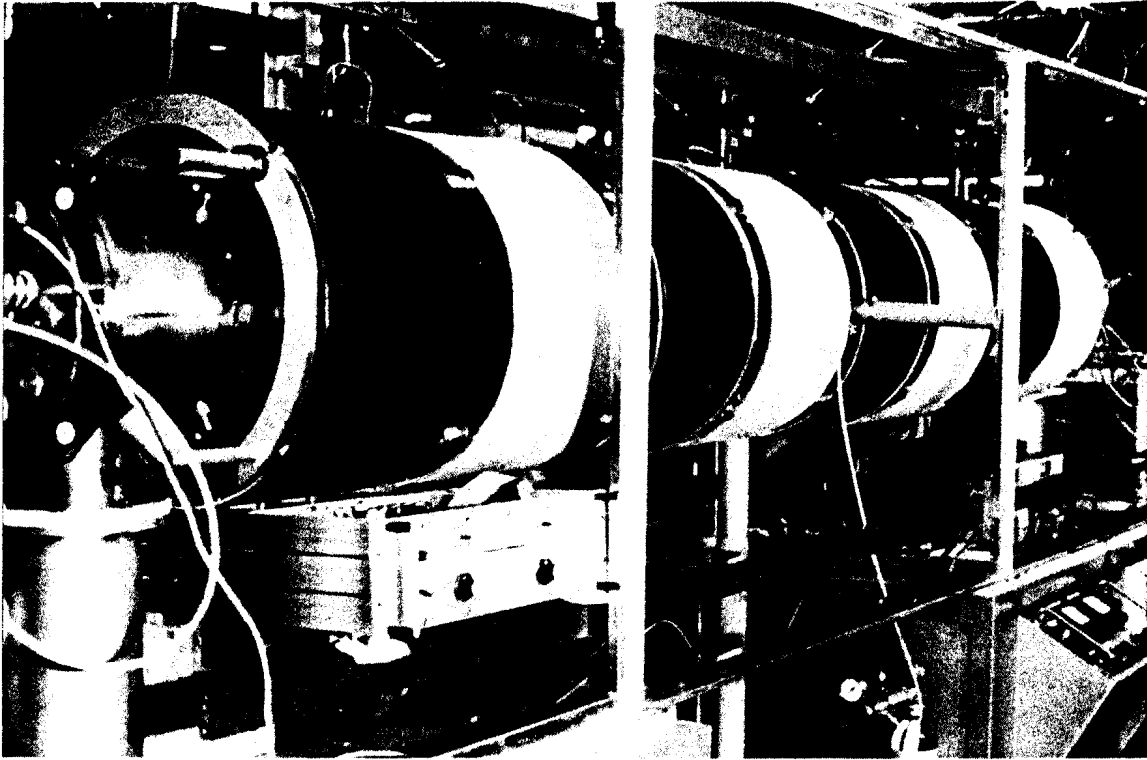


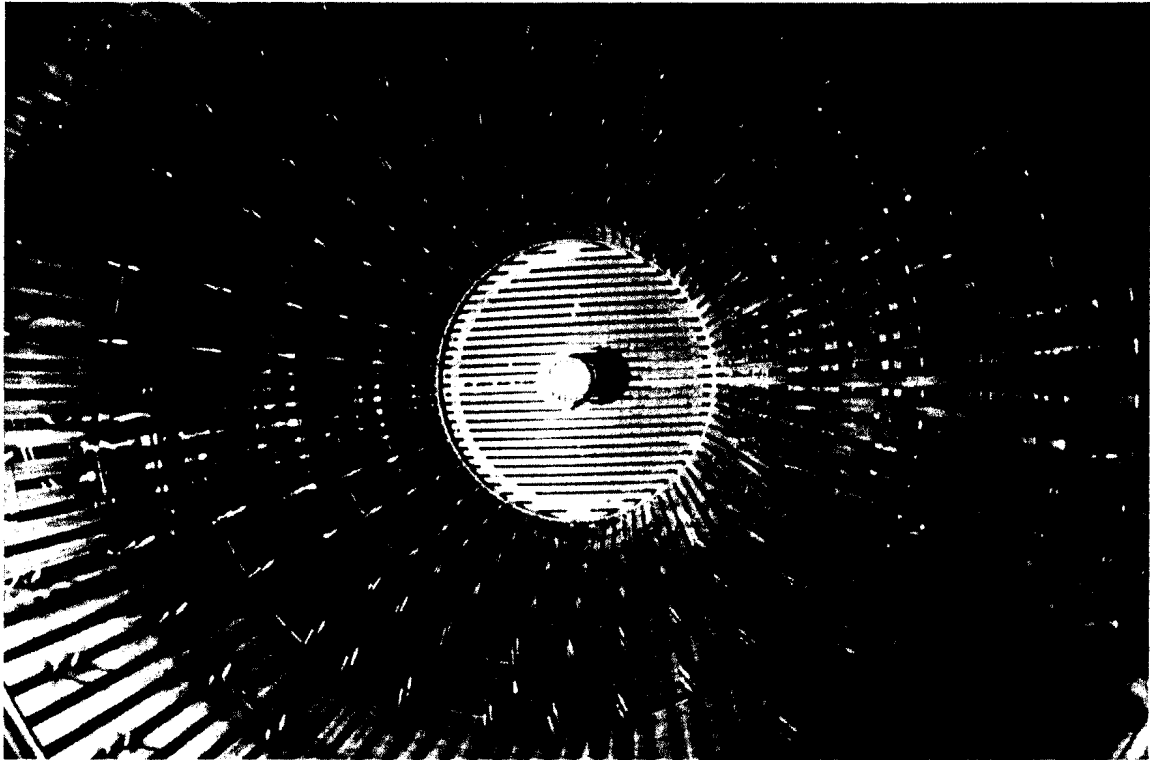
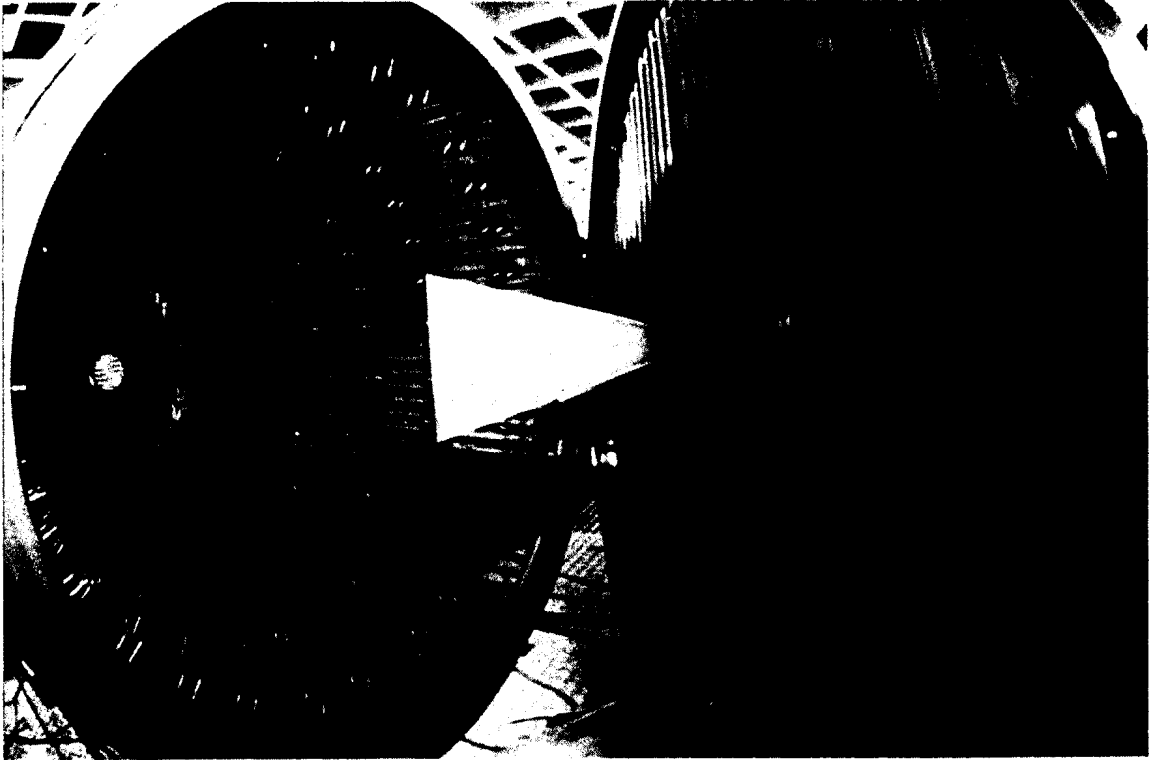
Fig. 21 - schéma de principe du diagnostic par faisceau d'ions



Nessie I



Plasma magnétisé pour l'étude du diagnostic par faisceau d'ions



Vues de l'intérieur de la grande boîte

## Les travaux théoriques

La physique théorique tente d'expliciter la réalité sous forme mathématique, de manière à pouvoir simuler et prédire le comportement d'un système physique quelconque. Les travaux théoriques du CRPP sont consacrés essentiellement à l'étude de l'état plasma; ils se concentrent sur la description des plasmas confinés magnétiquement, sur la physique du chauffage et sur les turbulences microscopiques qui existent à des degrés divers dans tous les plasmas.

Un système physique dans lequel tous les éléments sont au repos est dit en équilibre. Il existe deux états d'équilibre: l'équilibre stable et l'équilibre instable.

L'état stable peut être illustré par une boule au fond d'un creux. Si le système est perturbé par un léger déplacement, il se mettra en mouvement, mais retournera dans sa position d'équilibre.

Dans le cas instable, illustré par l'exemple d'une boule au sommet d'une bosse, la plus petite perturbation éloignera définitivement le système de sa position d'équilibre. Un tel état n'existe donc qu'un temps très court.

L'obtention de configurations magnétiques dans lesquelles le plasma est en équilibre stable est le premier problème qui doit être résolu pour atteindre un temps de confinement compatible avec le critère de Lawson:  $n\tau > 10^{14}$  [cm<sup>-3</sup> · sec]. Des modèles théoriques suffisamment simples pour être solubles numériquement et décrivant les

instabilités rapides du plasma, ont été développés et sont exploités au CRPP. Les codes de calcul par ordinateur qui en résultent (ERATO, HERA, etc.), permettent entre autres d'étudier les configurations toriques comme les tokamaks ou les plasmas en forme d'hélice (stellarator droit). Ces codes sont actuellement utilisés pour déterminer les limites de fonctionnement des grands tokamaks en construction comme JET ou en planification comme INTOR (projet de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique, à Vienne). Des configurations nouvelles sont également examinées, afin de chercher à optimiser les performances des machines pour la fusion contrôlée.

Les modèles décrits ci-dessus permettent également de prévoir le comportement du plasma en présence de chauffage par absorption résonnante d'ondes d'Alfvén, tel qu'il est réalisé sur le TCA. On attend beaucoup de la confrontation théorie-expérience: des concordances remarquables ont déjà pu être obtenues à basse puissance de chauffage, alors que les résultats à haute puissance sont attendus pour le courant de 1982.

D'autre part, des travaux analytiques et numériques relatifs au comportement du plasma à l'échelle macroscopique sont effectués au CRPP. Ils concernent les effets d'ondes électromagnétiques de grande amplitude (effet pondéromoteur) et les turbulences engendrées par un courant ou par des ondes. La génération de courant par des ondes (le "current drive"), est d'ailleurs un problème très actuel qui est étudié avec les outils analytiques et numériques développés au CRPP.



## 5. REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur le Professeur F. Troyon et Monsieur le Docteur M.Q. Tran pour leur lecture du texte et leurs commentaires, ainsi que tous les collaborateurs du CRPP qui ont contribué par leurs photos à l'illustration de ce rapport. Nous remercions également l'EURATOM, pour les figures et dessins tirés des rapports EUR 6269FR ("Le programme européen de fusion nucléaire contrôlée") et EUR 5462f ("Vers l'énergie de fusion: le programme européen").