

AVRIL 1985

LRP 262/85

ACTIVITES DU CENTRE DE RECHERCHES
EN PHYSIQUE DES PLASMAS

Brochure spécialement éditée pour les portes ouvertes de mai 1985

Rédaction : P.J. Paris, W. Simm

Maquette : C. Fiore

TABLE DES MATIERES

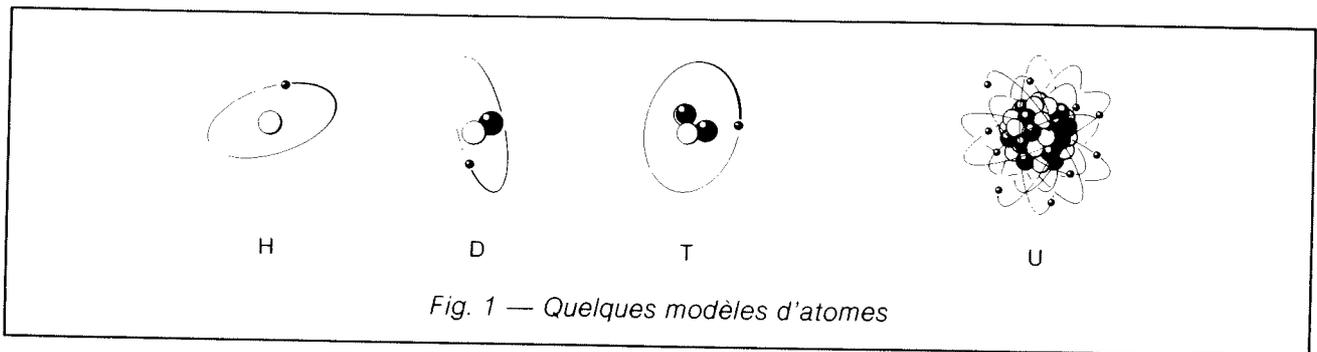
	<u>Pages</u>
1. QU'EST-CE QUE LE PLASMA ?	1
2. LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE	6
2.1 L'exemple du soleil	6
2.2 Le principe de la fusion	7
2.3 Les problèmes	9
2.4 Les voies possibles	12
2.5 L'état des recherches en fusion magnétique	14
3. LES ACTIVITES DE RECHERCHES DU LABORATOIRE	17
4. LES PROJETS DE RECHERCHES SUR LE SITE DU PARC DES CEDRES	19
4.1 Les lasers : "thermomètre pour plasma"	19
4.2 Les lasers : "indicateur de densité"	26
4.3 Plasmas à basse densité	28
4.3.1 LMP (Linear Magnetized Plasma)	28
4.3.2 La Grande Chambre	42
4.4 Développement d'une source d'ondes électromagnétiques à très haute fréquence : les gyrotrons	48
4.5 Les travaux théoriques	53
4.5.1 Equilibre et stabilité	54
4.5.2 Chauffage et transport	58
5. PROJETS DE RECHERCHES SUR LE SITE DE L'EPFL A ECUBLENS	61
5.1 Le tokamak TCA, historique et objectif	62
5.2 Fonctionnement d'un tokamak	63
5.3 Description du TCA	64
5.4 Les diagnostics	67
5.4.1 Interféromètre 2mm	67
5.4.2 Analyse des particules neutres	68
5.4.3 Diagnostics X-mous	69
5.4.4 Emission cyclotronique électronique	70
5.4.5 Multibolomètre	71
5.4.6 Interaction plasma-paroi	71
5.4.7 Diffusion Thomson (lumière visible)	71
5.4.8 Diffusion Thomson (infrarouge lointain)	72
5.4.9 Système de contraste de phase	73
5.4.10 Interféromètre à 8 canaux	73
5.4.11 Boucles et sondes magnétiques	74
5.4.12 Acquisition et traitements des données	74
6. PERSPECTIVES	75
7. REMERCIEMENTS	78
8. ANNEXES	79
Annexe 1 : L'Euratom	79
Annexe 2 : Participation de la Suisse dans l'Euratom	80
Annexe 3 : JET	81

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:

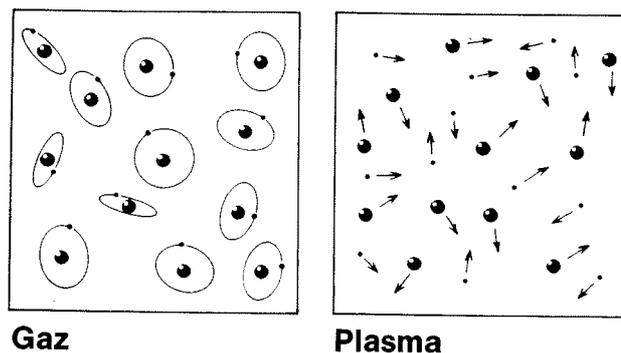
- hydrogène (H) : 1 p^+ , 1 e^-
- deutérium (D) ou hydrogène lourd : 1 p^+ , 1 n , 1 e^-
- tritium (T) ou hydrogène superlourd : 1 p^+ , 2 n , 1 e^-
- uranium (U_{235}) : 92 p^+ , 143 n , 92 e^-



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.

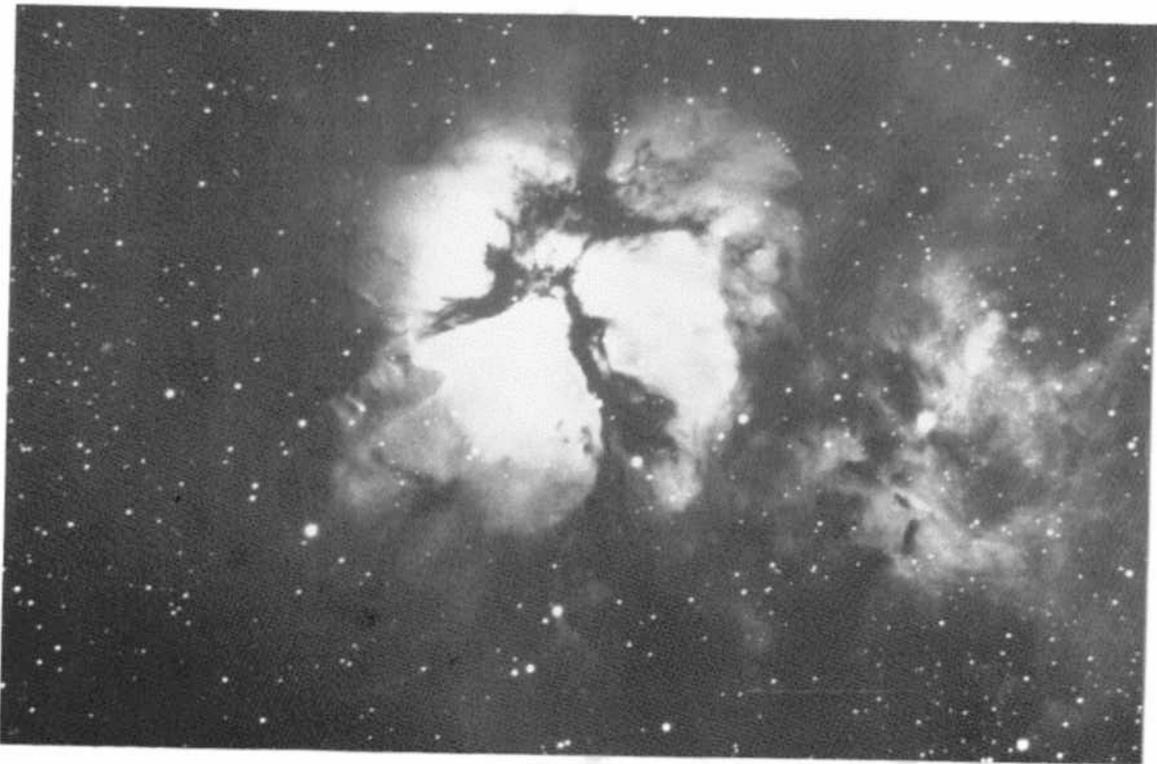
Fig. 2



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.

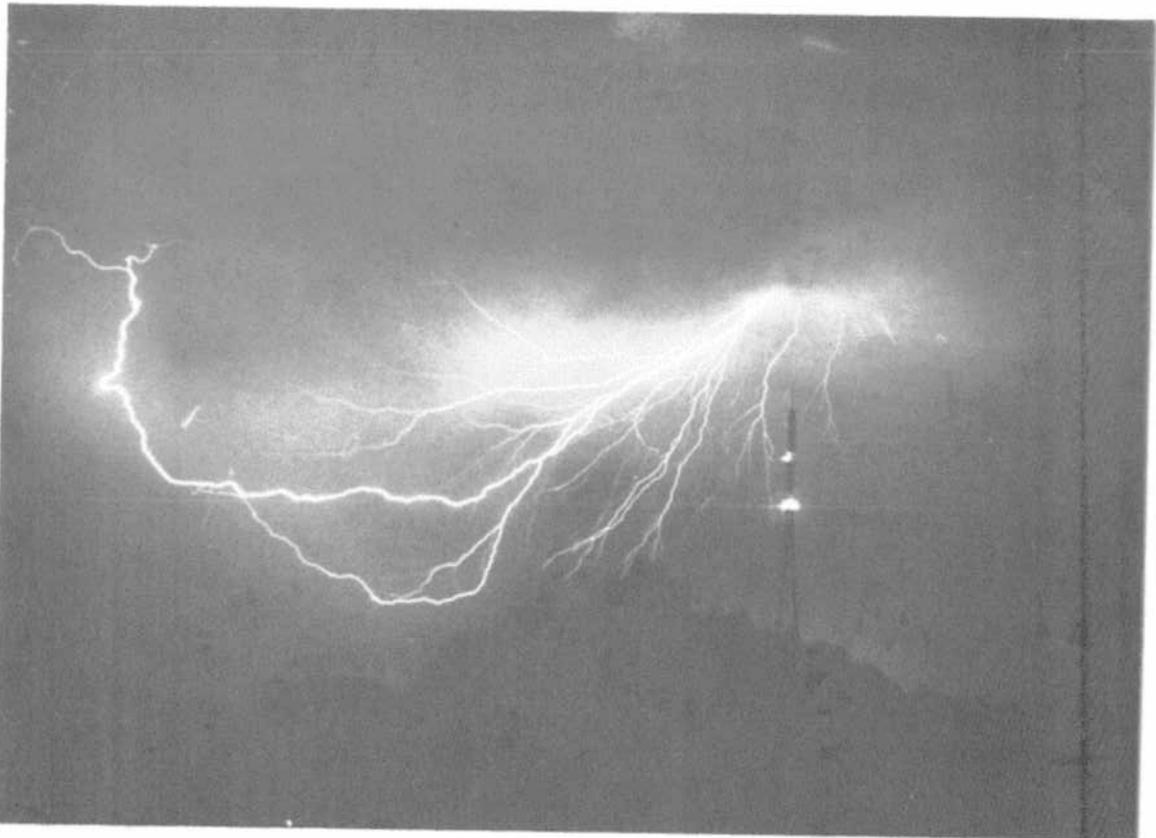
Le plasma, appelé également quatrième état de la matière, constitue 99 % de l'Univers. On rencontre le plasma dans les étoiles, dans certaines couches de l'atmosphère telles que la magnétosphère et l'ionosphère (qui permet les communications radio à longue distance), dans l'espace interplanétaire et 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.



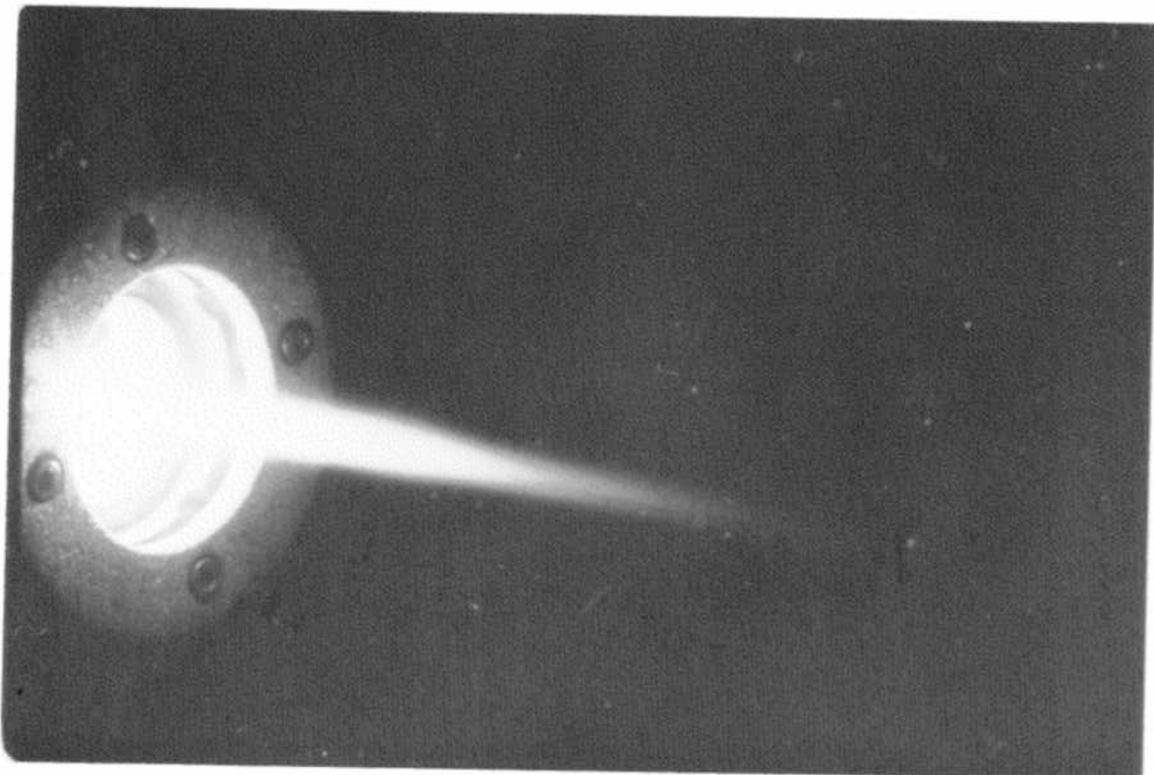
Plasma naturel: La Nébuleuse Trifide dans le Sagittaire (Kitt Peak Observatory)



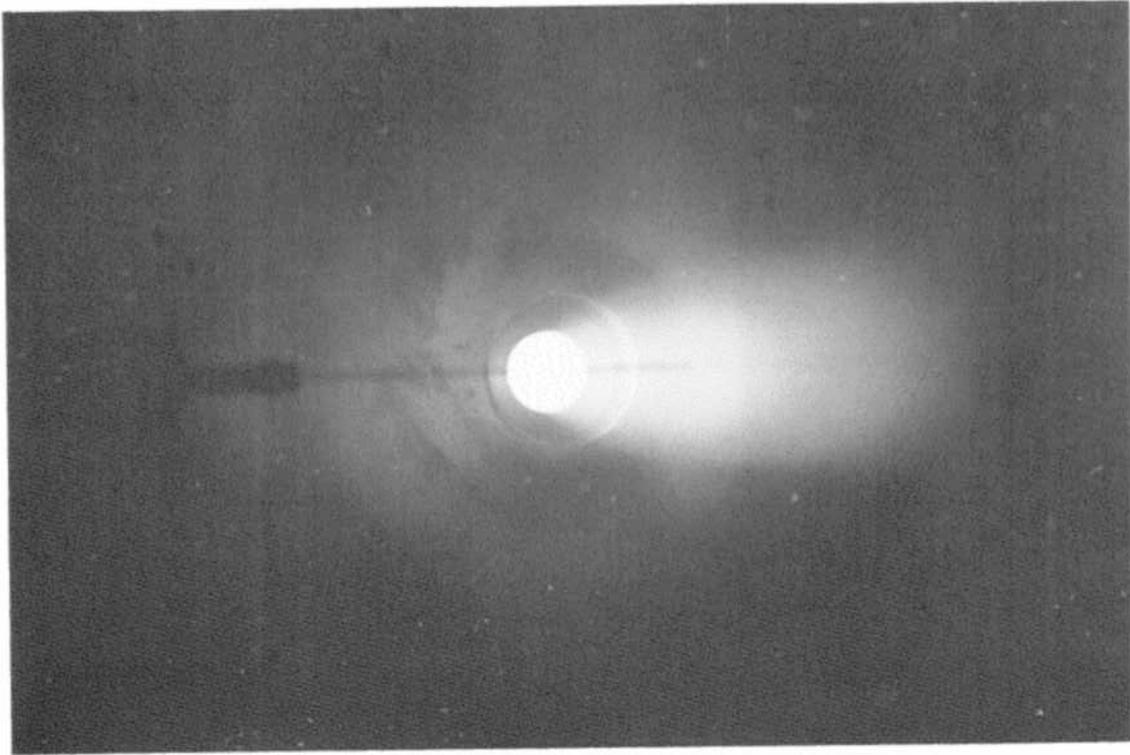
Plasma naturel: aurore boréale (Kitt Peak Observatory)



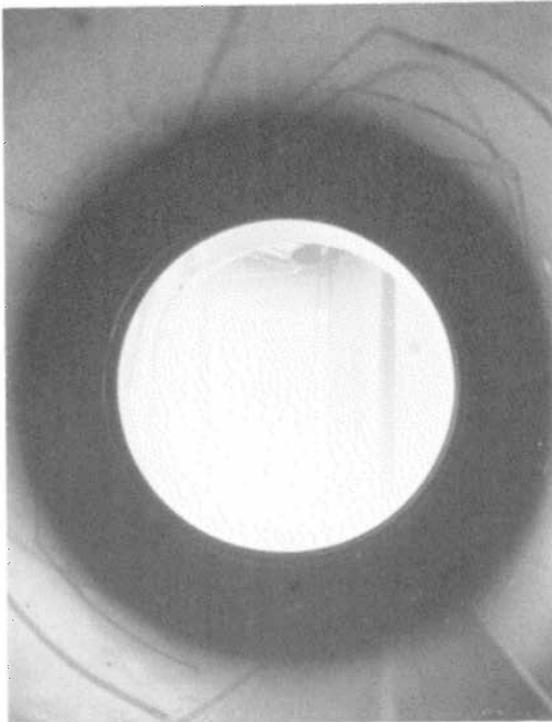
Plasma naturel: un éclair dans le ciel du Tessin (courtoisie: Commission d'étude de l'ASE et de l'UCS des questions relatives à la haute tension, Zürich)



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



Plasma de laboratoire: décharge dans l'Argon

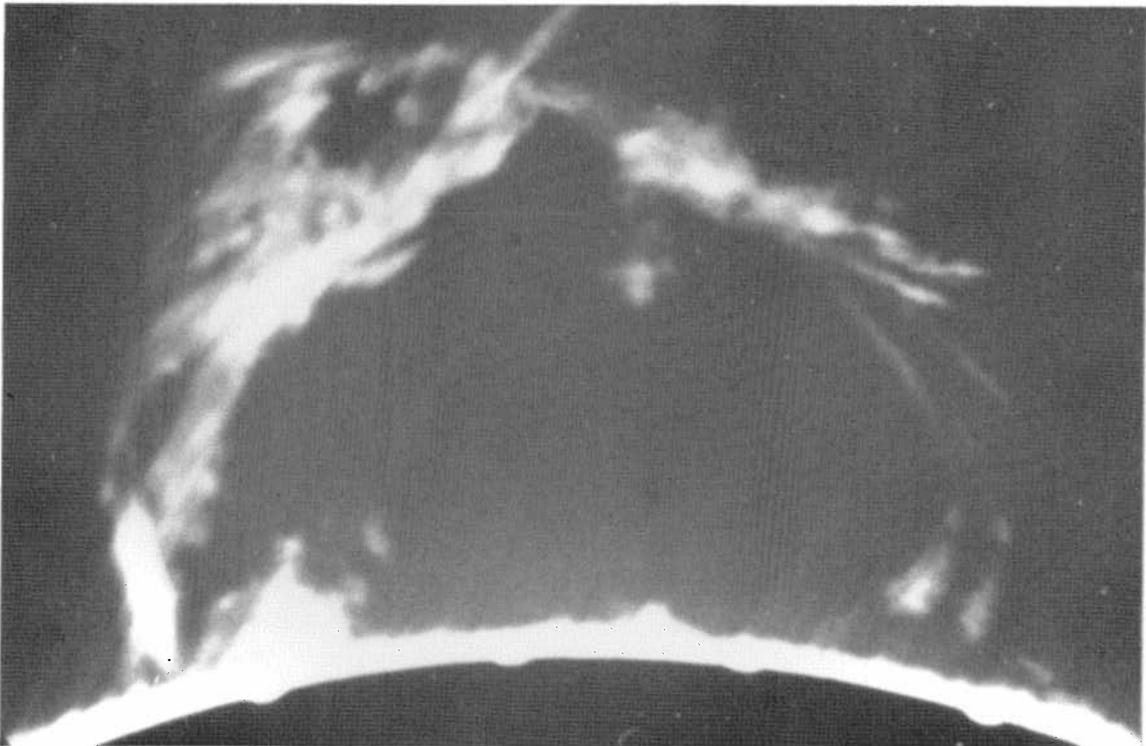


Plasma de laboratoire: plasma d'hydrogène dans le tokamak TCA
(vu à travers une fenêtre d'accès)

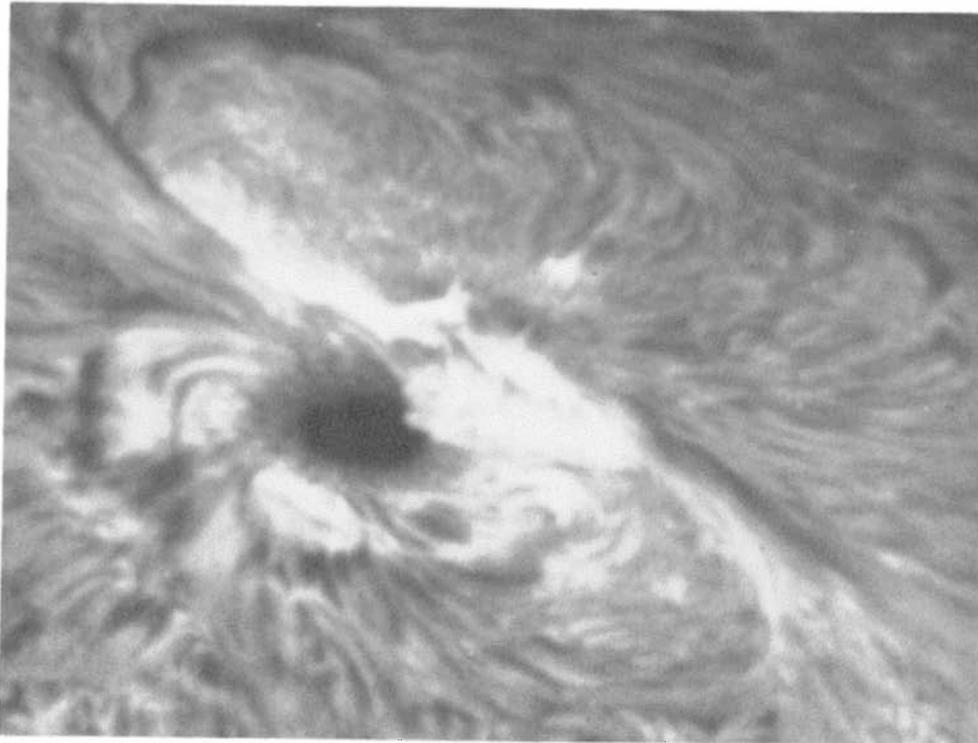
2. LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

2.1 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)



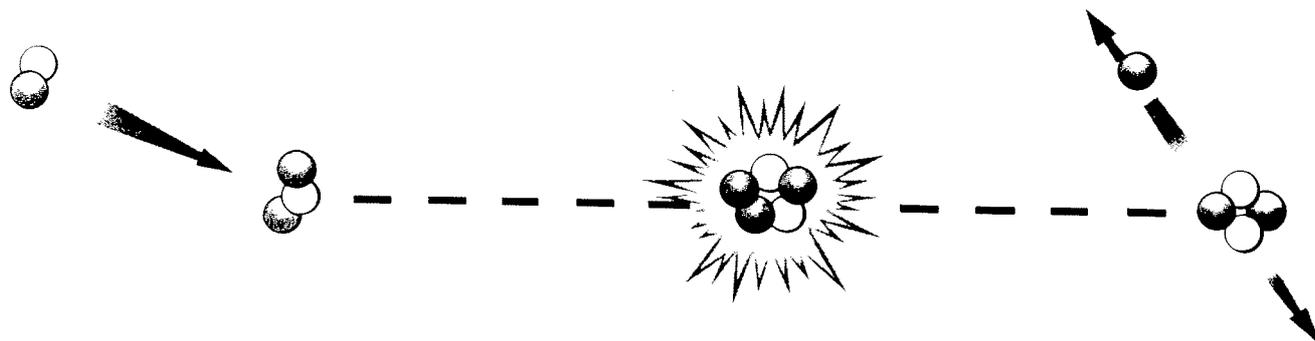
Tache et tourbillon à la surface du soleil (Hansen Planetarium, Salt Lake City).

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 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 W/cm^2 .

2.2 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.



Fusion du deutérium et du tritium produisant de l'hélium et un neutron, accompagnée d'un dégagement d'énergie. Cette énergie est en grande partie liée au neutron et peut être transformée en chaleur lorsque celui-ci frappe l'enveloppe du réacteur. Des systèmes classiques peuvent transformer la chaleur en électricité.

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 (He₃).

$\begin{matrix} \text{p} \\ \text{n} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{n} \\ \text{p} \end{matrix}$	\longrightarrow	$\begin{matrix} \text{p} \\ \text{p} \text{ n} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{n} \end{matrix}$	+ 27 000 kWh/g de combustible
Deutérium		Deutérium		Hélium 3		Neutron	
$\begin{matrix} \text{n} \\ \text{p} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{n} \\ \text{p} \end{matrix}$	\longrightarrow	$\begin{matrix} \text{n} \\ \text{p} \text{ n} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{p} \end{matrix}$	+ 22 000 kWh/g de combustible
Deutérium		Deutérium		Tritium		Proton	
$\begin{matrix} \text{p} \\ \text{n} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{p} \text{ n} \\ \text{n} \end{matrix}$	\longrightarrow	$\begin{matrix} \text{p} \text{ n} \\ \text{n} \text{ p} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{n} \end{matrix}$	+ 94 000 kWh/g de combustible
Deutérium		Tritium		Hélium 4		Neutron	
$\begin{matrix} \text{p} \\ \text{n} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{p} \text{ p} \\ \text{n} \end{matrix}$	\longrightarrow	$\begin{matrix} \text{p} \text{ n} \\ \text{n} \text{ p} \end{matrix}$	+	$\begin{matrix} \text{p} \end{matrix}$	+ 98 000 kWh/g de combustible
Deutérium		Hélium 3		Hélium 3		Proton	

Tableau I: Les principales réactions de fusion

Le deutérium est un élément universellement présent dans l'eau, à raison de 34 g/m³. 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:

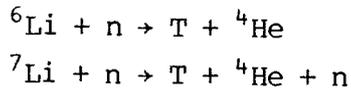


Tableau II: réactions produisant du tritium

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).

2.3 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 (τ) 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.

Bilan d'énergie

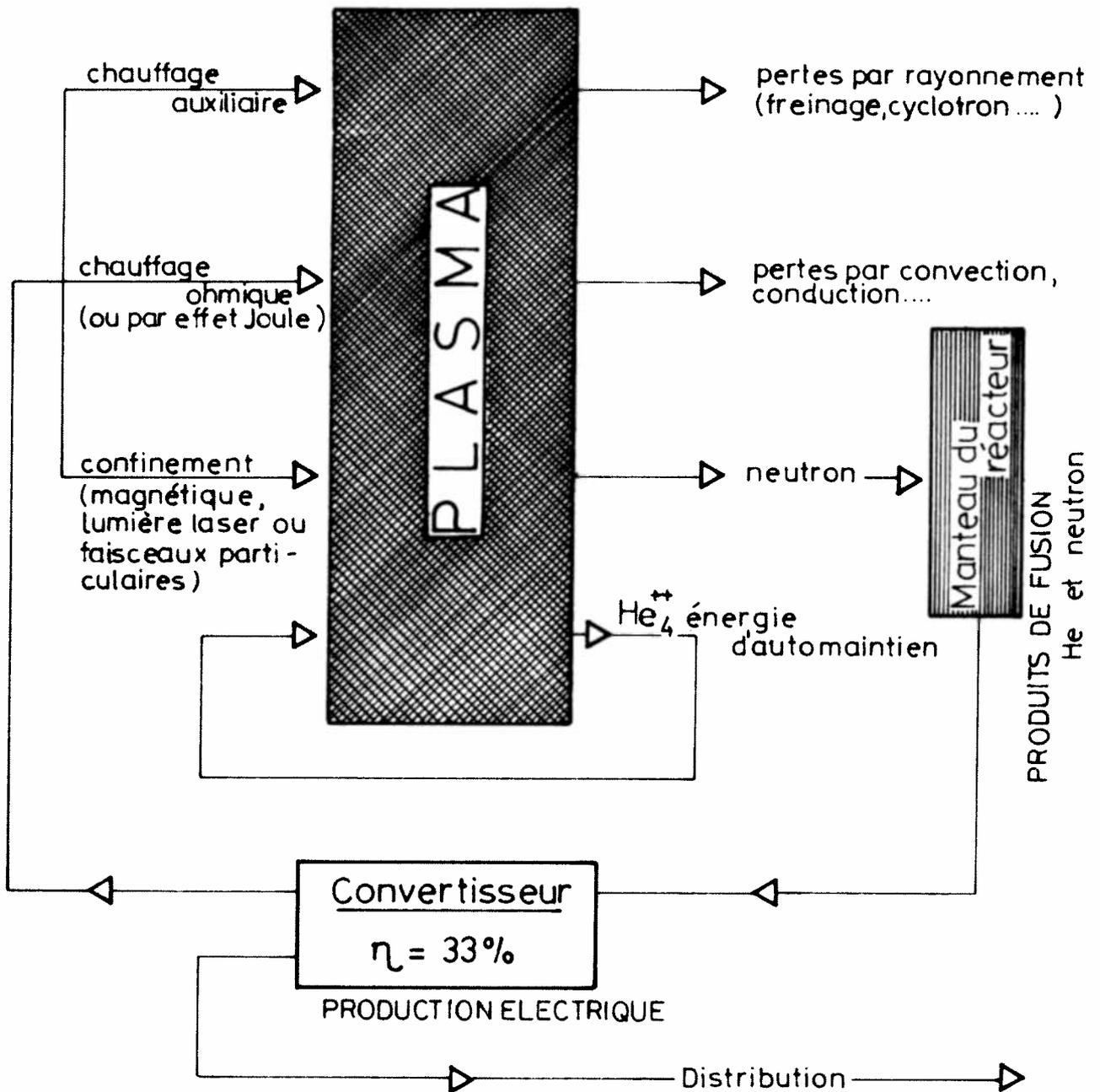


Fig. 4 Description de l'élaboration schématique du bilan d'énergie.

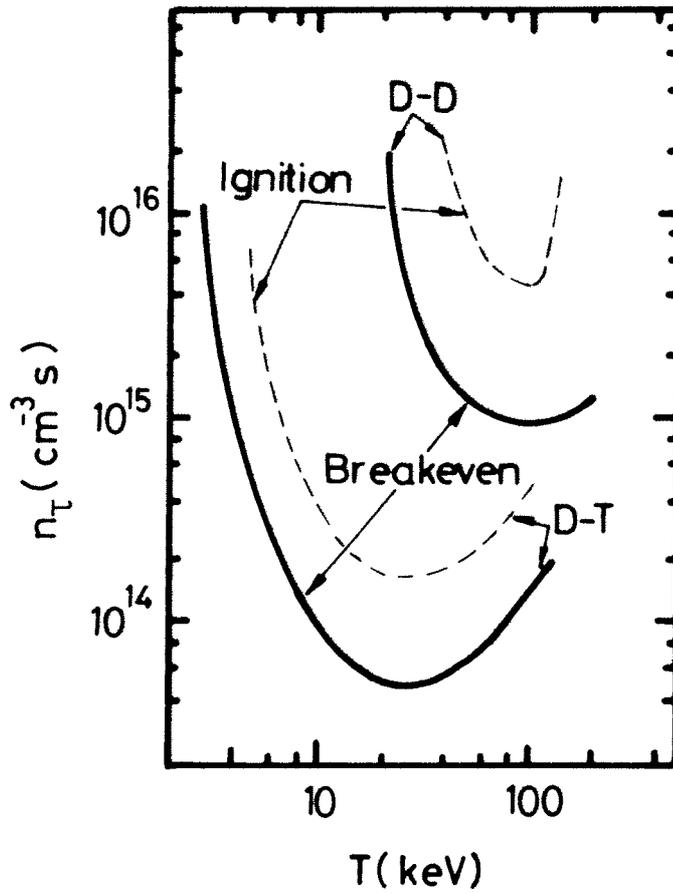


Fig. 5 Critère de Lawson - fonction de la température des mélanges D-T et D-D -(breakeven = limite minimale du critère de Lawson et ignition = réactions thermonucléaires auto-entretenues)

2.4 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, impluse 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.

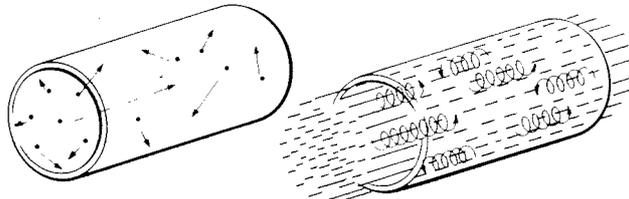


Fig. 6 - à gauche, charges en absence de champ magnétique
à droite, charges dans un champ magnétique

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.

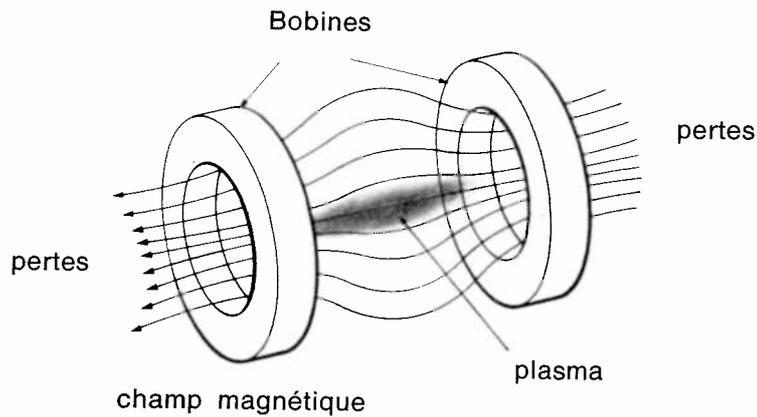


Fig. 7 - configuration ouverte: machine à miroirs magnétiques

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 Toroidalnaja Kamera Magnitnaja Katuska) qui ont donné à ce jour les meilleurs résultats.

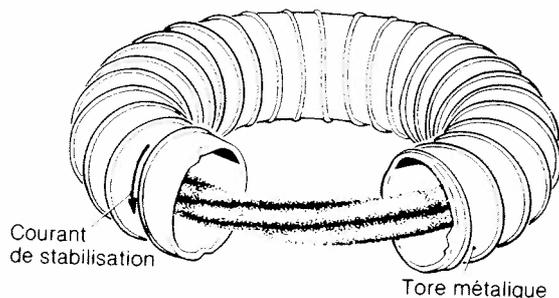


Fig. 8 - principe du confinement magnétique toroïdal

2.5 L'état des recherches en fusion magnétique

Mais alors que dans la fusion inertielle l'apport d'énergie est fourni par les faisceaux eux-mêmes, dans la fusion "tokamak" le problème est plus complexe.

Dans un premier temps, c'est le courant induit dans le plasma qui, par dissipation ohmique, permet d'atteindre des températures de l'ordre de 15'000'000 °C. Au-delà de cette limite, la méthode perd de son efficacité : la résistivité du plasma décroît lorsque sa température augmente. Deux méthodes principales de chauffage supplémentaire sont alors utilisées :

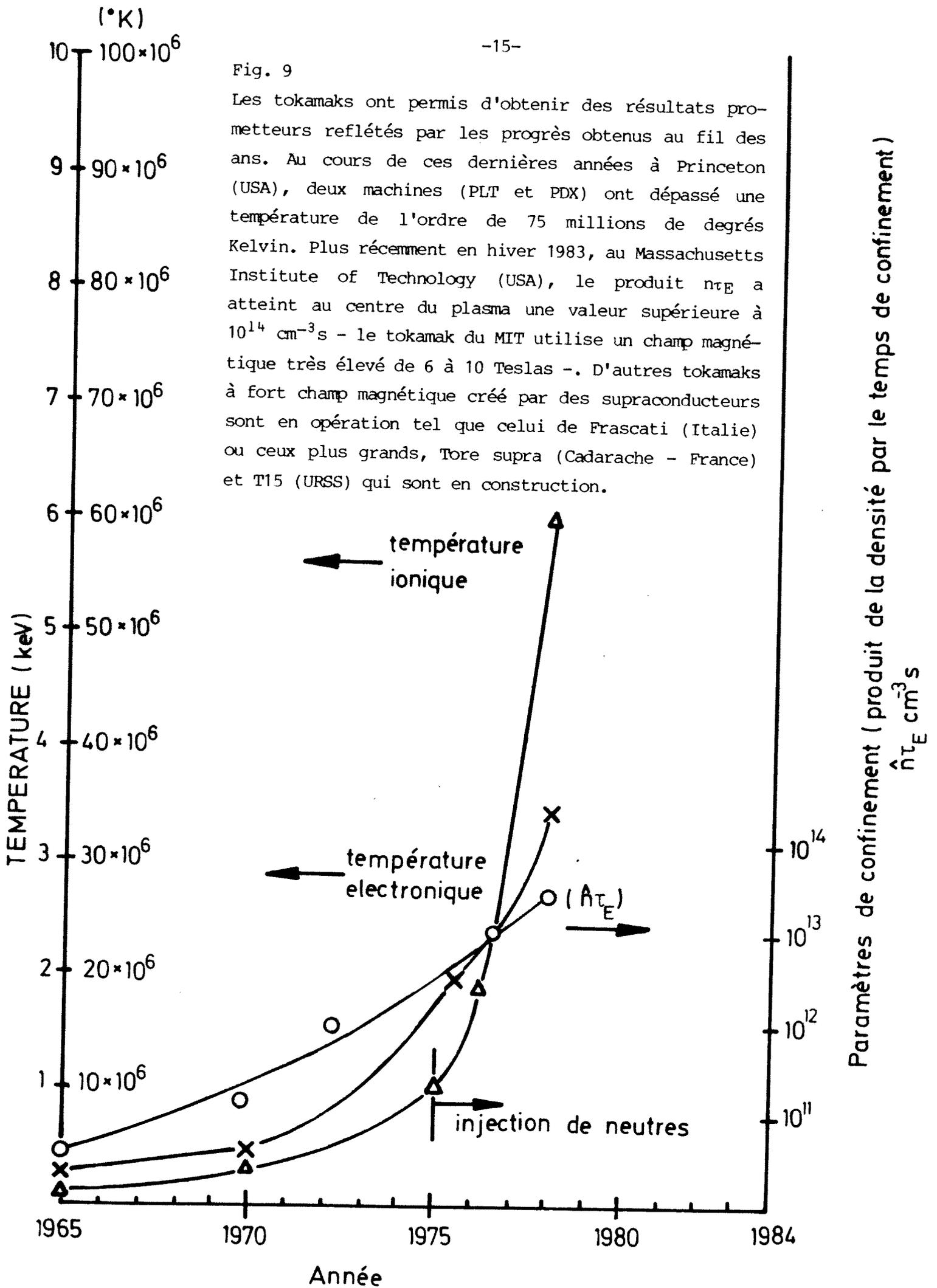
- la première consiste à injecter dans le plasma des particules neutres très énergétiques qui chauffent le plasma par collision.
- la seconde utilise la propriété qu'ont les ondes électromagnétiques, à travers diverses résonances, de se coupler au plasma. L'énergie contenue dans les ondes est absorbée par les particules du plasma. Suivant le type de fréquence utilisée, cette méthode porte des noms différents.

Même si le tokamak ne représente pas la filière incontestée pour un réacteur, il semble néanmoins probable que la démonstration scientifique soit prouvée sur cet appareillage complexe de recherche (Fig. 9).

L'importance de l'enjeu et les coûts inhérents à cette recherche ont stimulé la coopération scientifique. Les pays de la Communauté Economique Européenne ont fondé la Commission à l'Energie Atomique (Euratom) à laquelle la Suède et la Suisse ont souscrit au programme de fusion nucléaire (voir Annexe 1). Dans le cadre de cette collaboration, deux laboratoires suisses contribuent intensivement aux recherches (voir Annexe 2). Le programme européen est principalement concentré sur la fusion magnétique et plus particulièrement sur le tokamak. JET est le plus grand tokamak au monde dont l'objectif est d'approcher les conditions de bilan positif (voir Annexe 3).

Fig. 9

Les tokamaks ont permis d'obtenir des résultats prometteurs reflétés par les progrès obtenus au fil des ans. Au cours de ces dernières années à Princeton (USA), deux machines (PLT et PDX) ont dépassé une température de l'ordre de 75 millions de degrés Kelvin. Plus récemment en hiver 1983, au Massachusetts Institute of Technology (USA), le produit $n\tau_E$ a atteint au centre du plasma une valeur supérieure à $10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ - le tokamak du MIT utilise un champ magnétique très élevé de 6 à 10 Teslas -. D'autres tokamaks à fort champ magnétique créé par des supraconducteurs sont en opération tel que celui de Frascati (Italie) ou ceux plus grands, Tore supra (Cadarache - France) et T15 (URSS) qui sont en construction.



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 :

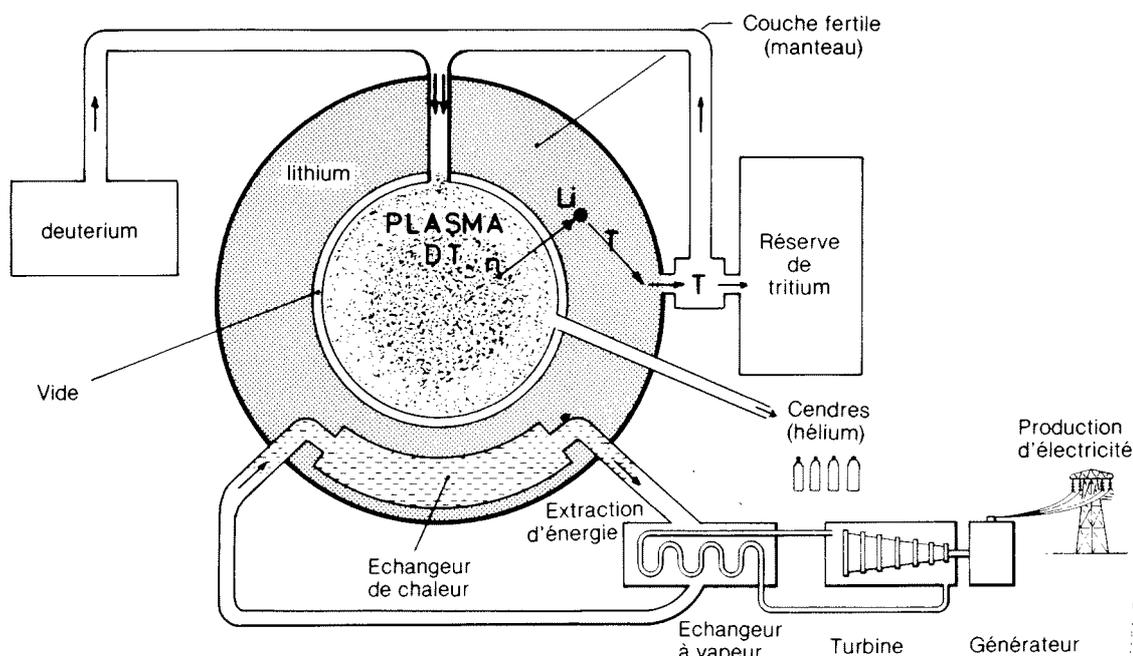


Fig. 10 - schéma de principe des différents cycles dans un réacteur à fusion nucléaire.

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, 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 cinq 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 aussi 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 installa-

tions expérimentales. 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.

- 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 et de collaboration intense avec des laboratoires étrangers.
- Enfin, parmi les méthodes qui permettent de chauffer le plasma, il en existe une qui nécessite le développement de nouveaux tubes à hyperfréquences. Le processus de chauffage est basé sur la résonance entre ondes et électrons. Les particules chauffées sont dans ce cas les électrons qui par collision avec les ions cèdent une partie de leur énergie. Ce nouveau tube hyperfréquences fait l'objet d'une collaboration entre divers instituts et entreprises privées. Le CRPP est le maître d'oeuvre de ce contrat.

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.

Par ailleurs, le CRPP a signé en 1984 un accord avec l'organisation JET (Joint European Torus, Abingdon, GB) au terme duquel le CRPP participe à l'exploitation expérimentale de ce grand tokamak européen. Il délègue ainsi régulièrement des physiciens sur place pour collaborer directement avec les membres de cette organisation.

Parmi ses autres préoccupations, le CRPP a une mission d'enseignement, des cours sont donnés en 3e et 4e année d'étude de physique. Des travaux pratiques de 4e année et des diplômes de fin d'études, ainsi que des doctorats, peuvent y être préparés. Former des physiciens du plasma revêt une importance primordiale pour le futur de cette nouvelle branche de la physique qui utilise des capacités transdisciplinaires pouvant peser dans la technologie de demain.

4. LES PROJETS DE RECHERCHES SUR LE SITE DU PARC DES CEDRES ...

4.1 Les lasers : "thermomètre pour plasma"

Diffusion Thomson dans l'infrarouge lointain (IRL).

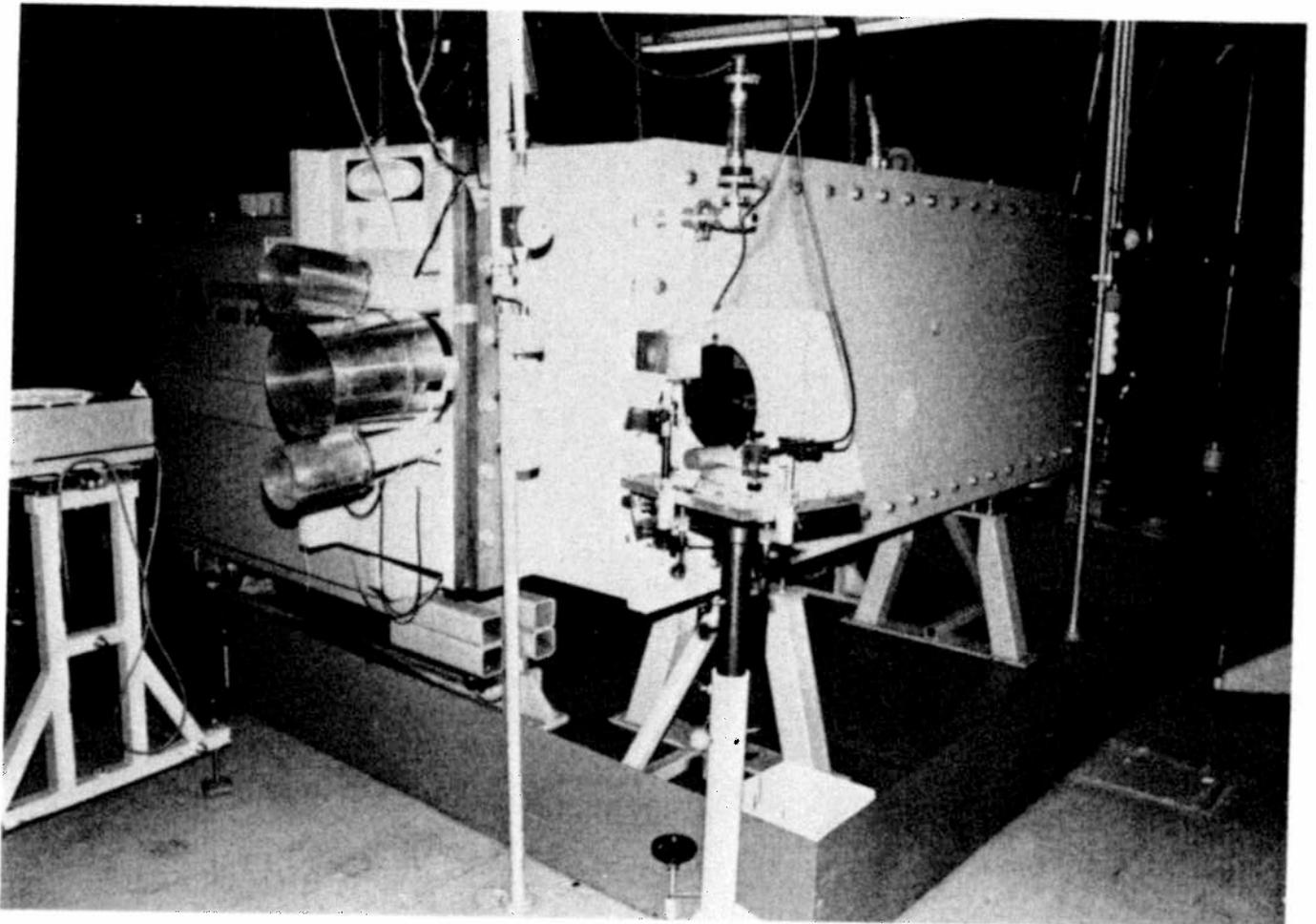
Le but du projet est de développer une méthode diagnostique capable de mesurer la température des ions dans un grand tokamak. Le principe devrait être testé sur le tokamak du CRPP (TCA). Les expériences précédentes ont montré d'une façon préliminaire la faisabilité de cette mesure mais en utilisant un laser dont les impulsions étaient trop courtes pour une détermination plus précise de la température ionique. Le développement d'un laser plus puissant et dont la durée et l'énergie des impulsions sont adéquates, devrait aboutir à la démonstration de cette méthode.

La faisabilité d'un tel diagnostic repose sur la fiabilité des performances d'une série de sous-systèmes très complexes : un laser IRL très puissant, un oscillateur local qui est en fait un laser continu IRL "pompe" optiquement, un système de détection à hétérodyne multicanaux, un système de transport du faisceau et des cellules absorbantes à gaz utilisées comme filtres à bandes spectrales étroites.

Le principe d'une telle méthode de diagnostic repose sur la particularité suivante : une très faible fraction de l'intensité d'un faisceau laser incident sur le plasma est diffusé par les particules dans une direction prédéterminée. La détection se fait par des détecteurs à semi-conducteurs ultrasensibles. La fréquence de la radiation diffusée est légèrement modifiée par rapport à celle du faisceau incident. Une analyse spectrale permet de tirer des informations sur l'état du plasma et notamment sur la température. La longueur d'onde du laser utilisé doit être choisie en fonction des paramètres du plasma et pour la mesure de la température ionique, celle-ci se situe dans la région de quelques dixièmes de millimètre.

Le laser développé au CRPP fournit des impulsions d'une micro-seconde avec une puissance dépassant 2 MW (mégawatt=1'000'000 watts).

Il utilise, comme gaz, l'eau lourde (D_2O) qui émet une radiation à la longueur d'onde de 0,385 μm . Il consiste uniquement en un résonateur optique placé dans un tube rempli de D_2O à basse pression ($\sim 1/100$ de la pression atmosphérique). Pour exciter ce laser, il faut utiliser un autre faisceau laser de longueur d'onde plus courte, ici c'est un laser à gaz carbonique (CO_2) très puissant (800 MW) qui déclenche le premier. Il est de très grande puissance car l'efficacité de conversion du laser D_2O est faible.



Amplificateur CO_2

Le laser CO_2 est formé d'un oscillateur et d'un amplificateur à triple passage. Des décharges électriques lui fournissent l'énergie, un faisceau d'électrons de 300'000 volts permet l'excitation de l'amplificateur.

Laser amplificateur CO₂ avec préionisation

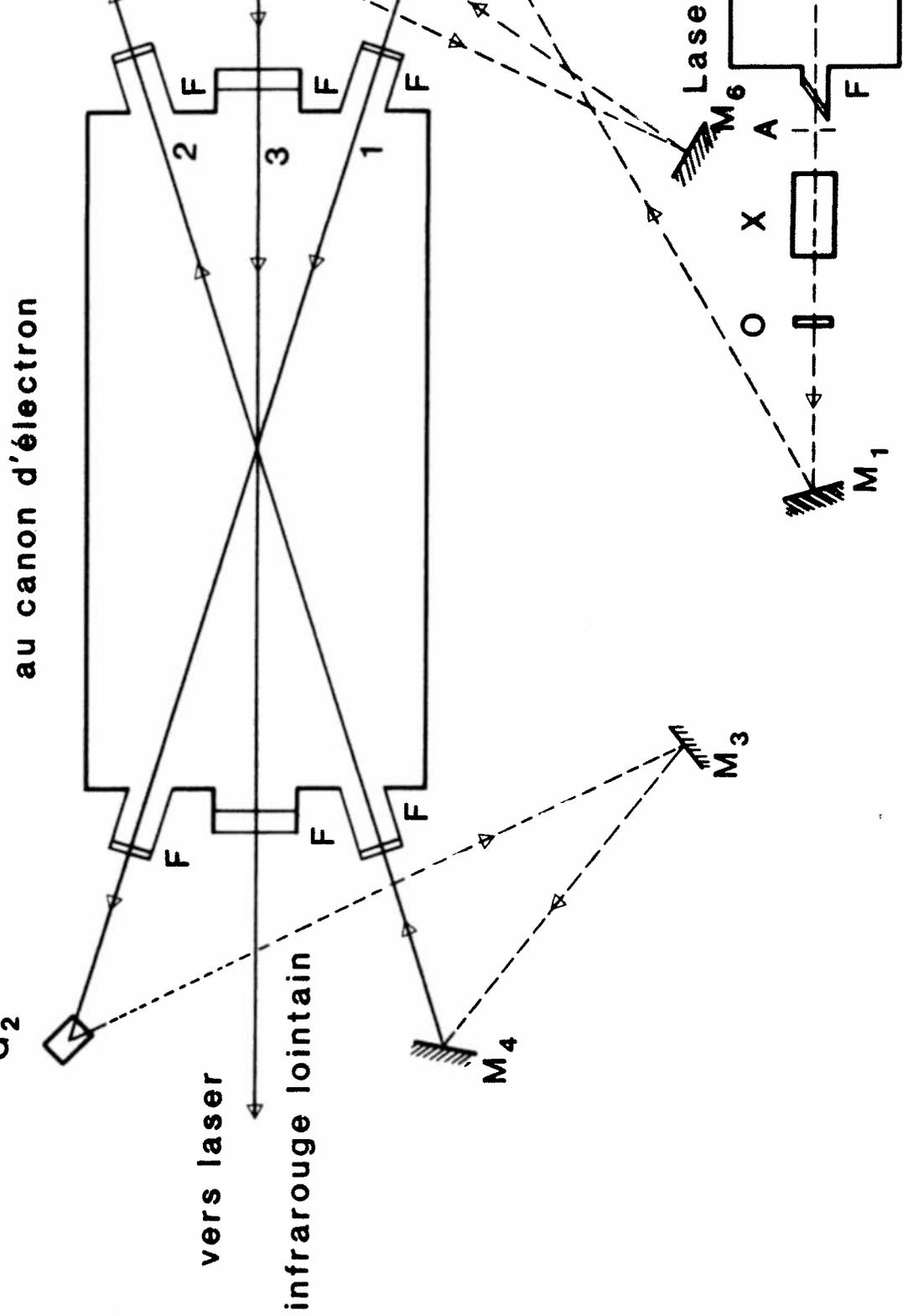


Fig.11

SECTION VERTICALE DU LASER CO₂ AVEC PREIONISATION A CANON D'ELECTRONS

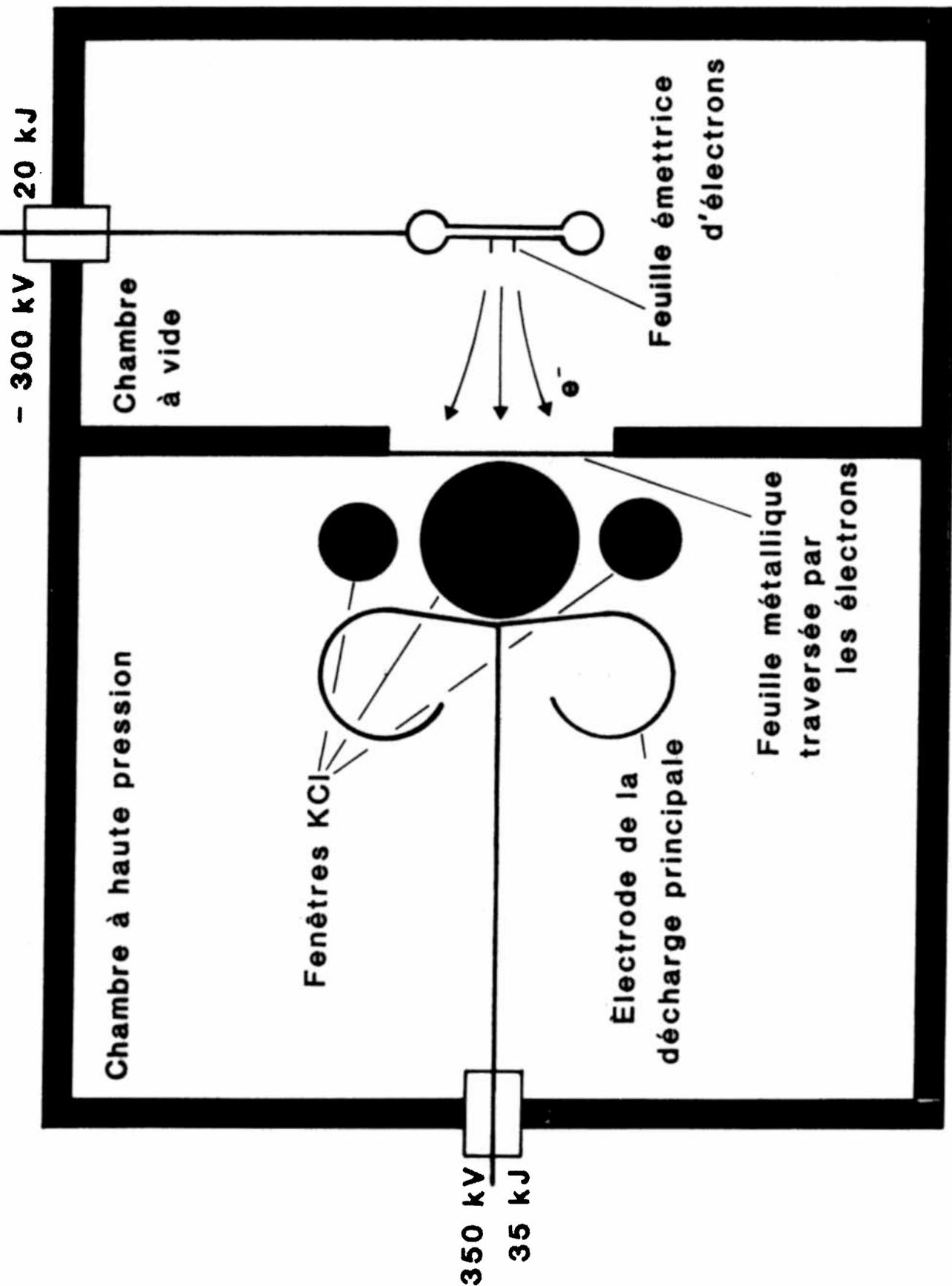
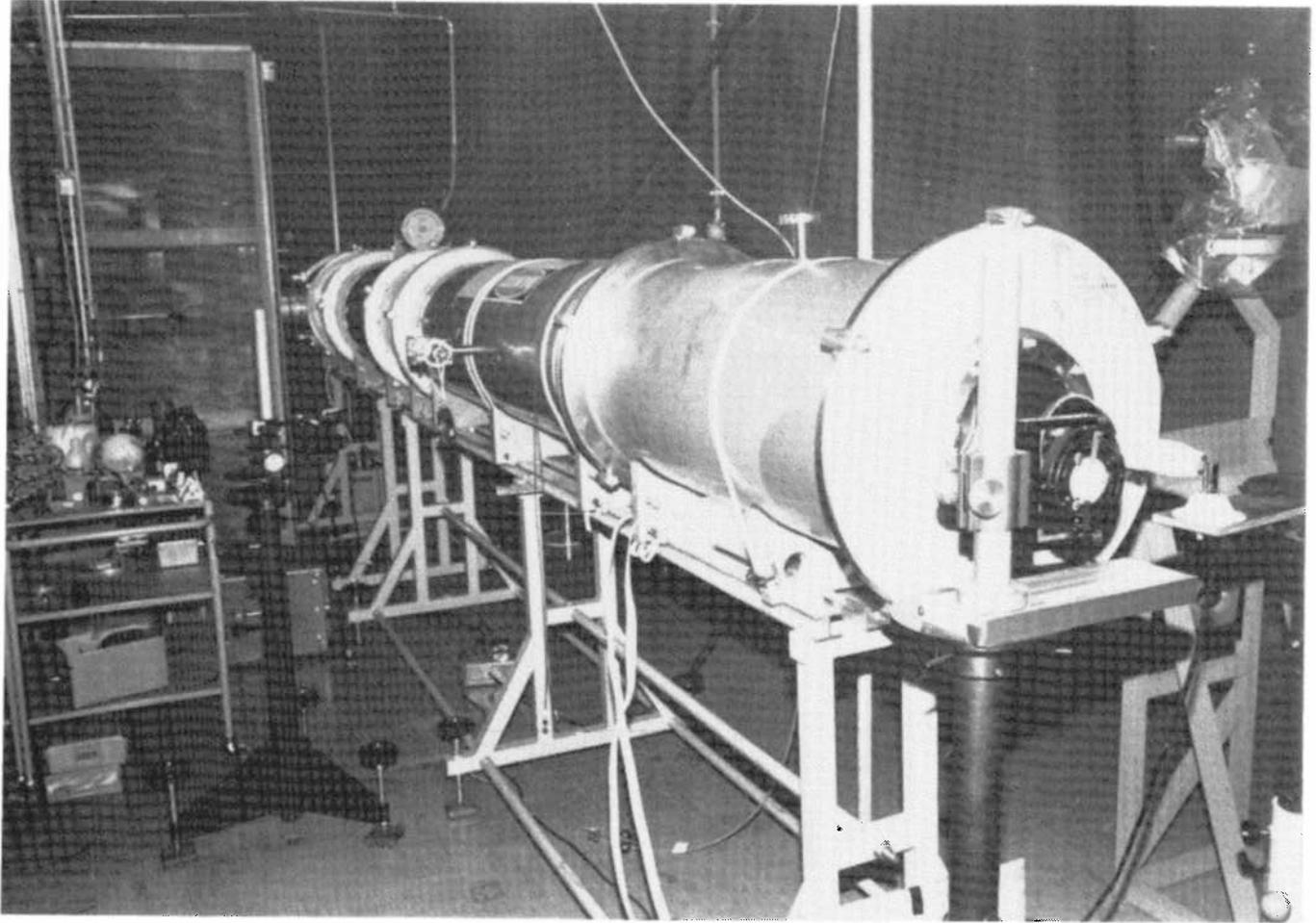
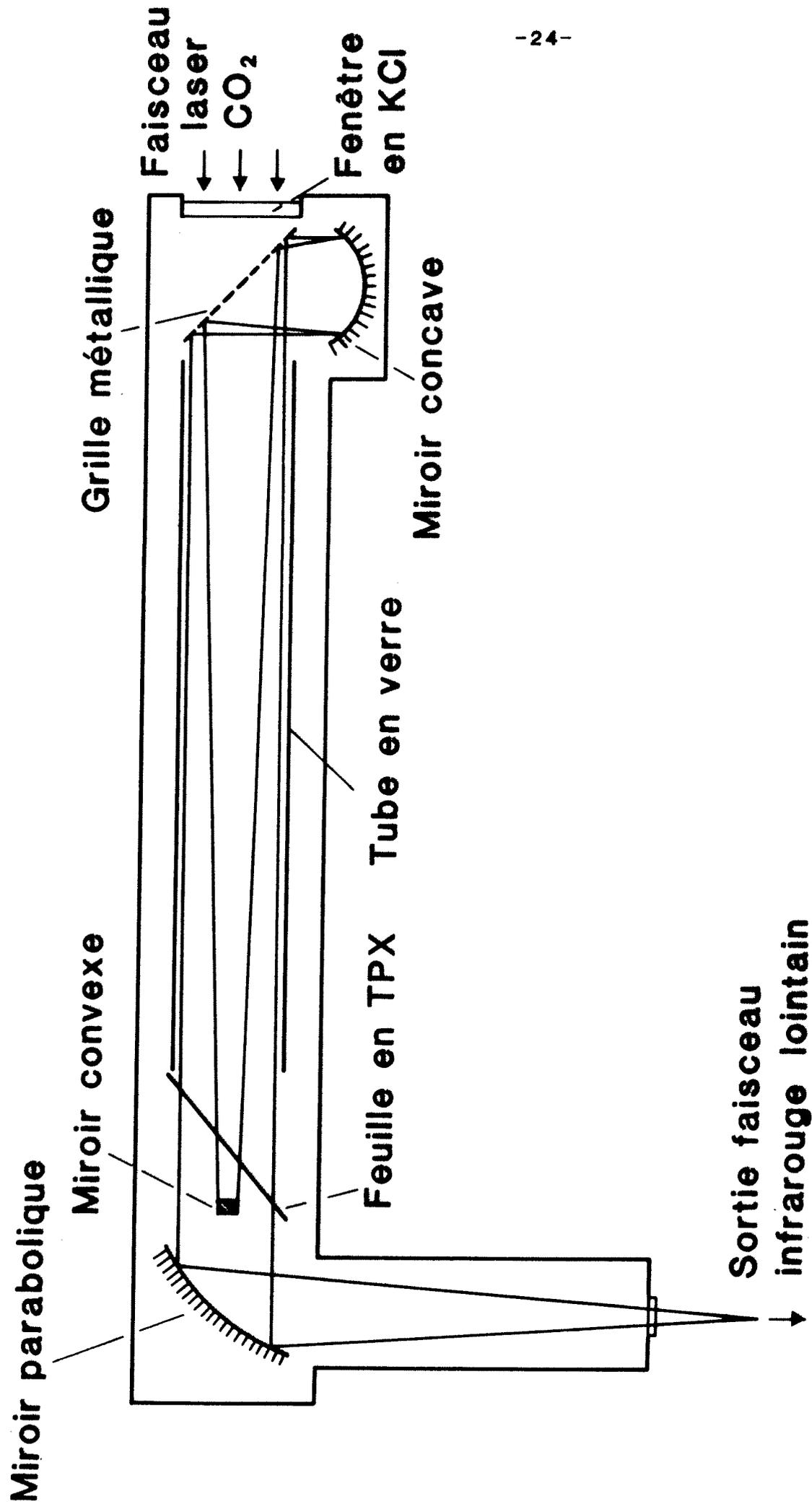


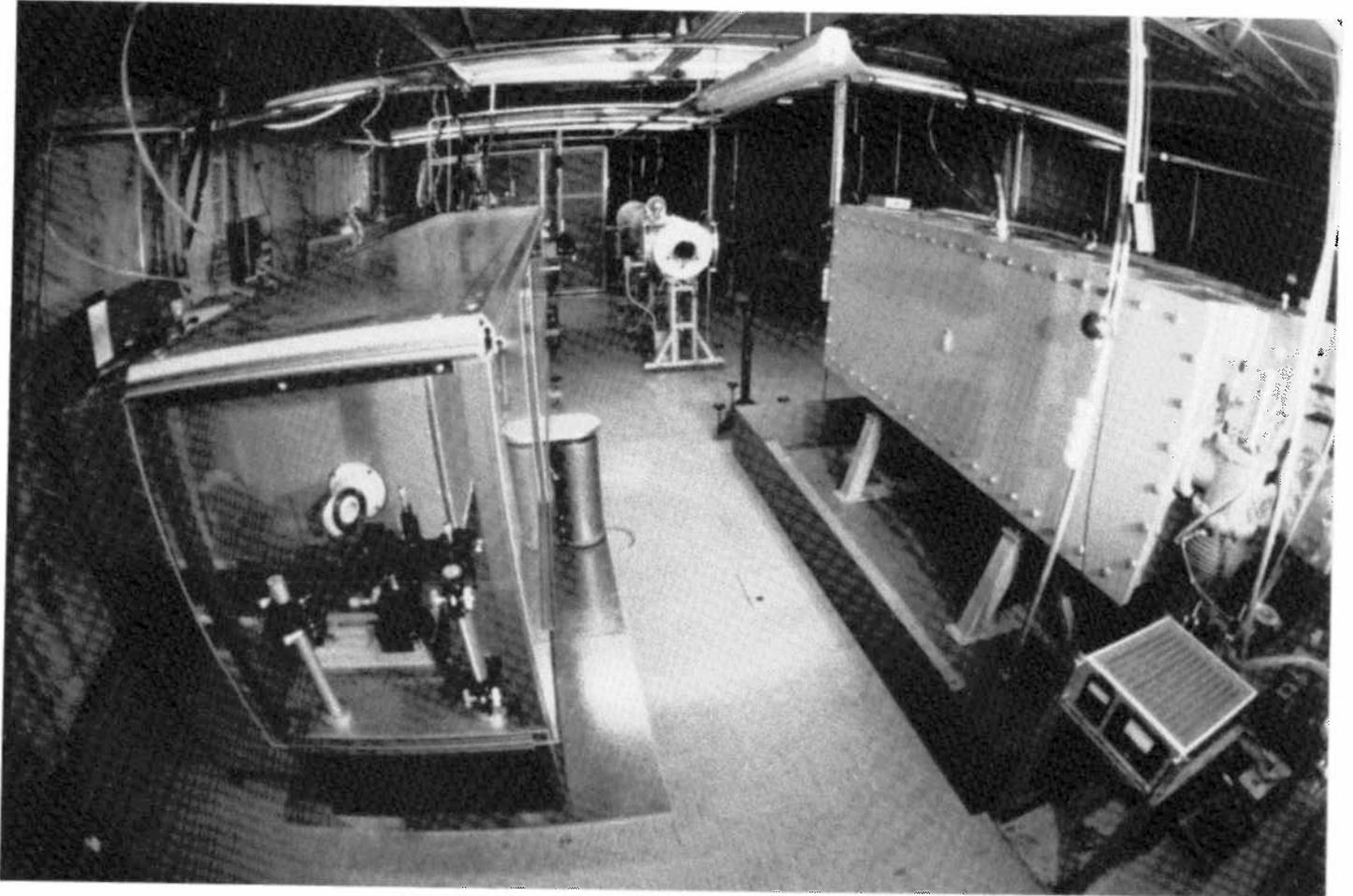
Fig.12



Laser infrarouge lointain :
le résonateur optique à gaz D₂O

LASER D₂O





Vue générale de l'installation laser infrarouge lointain

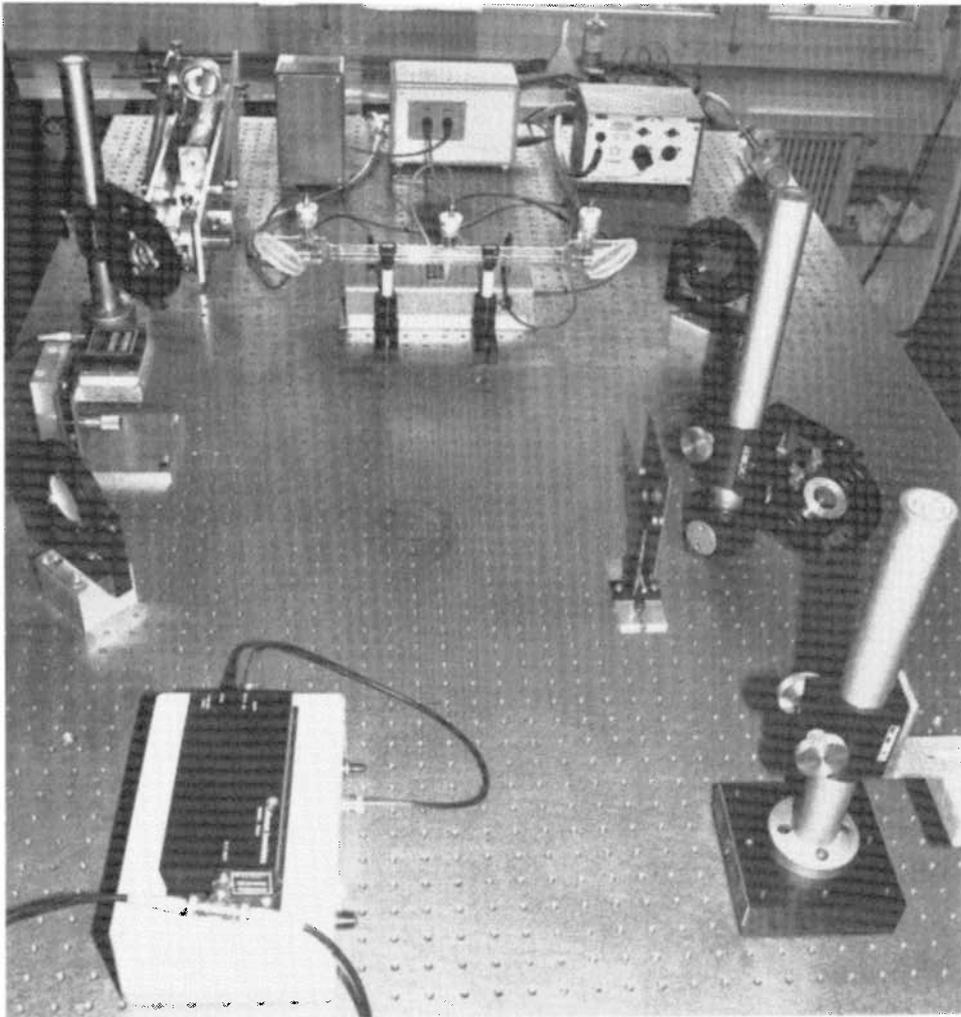
à gauche : l'oscillateur du laser CO_2

à droite : l'amplificateur du laser CO_2

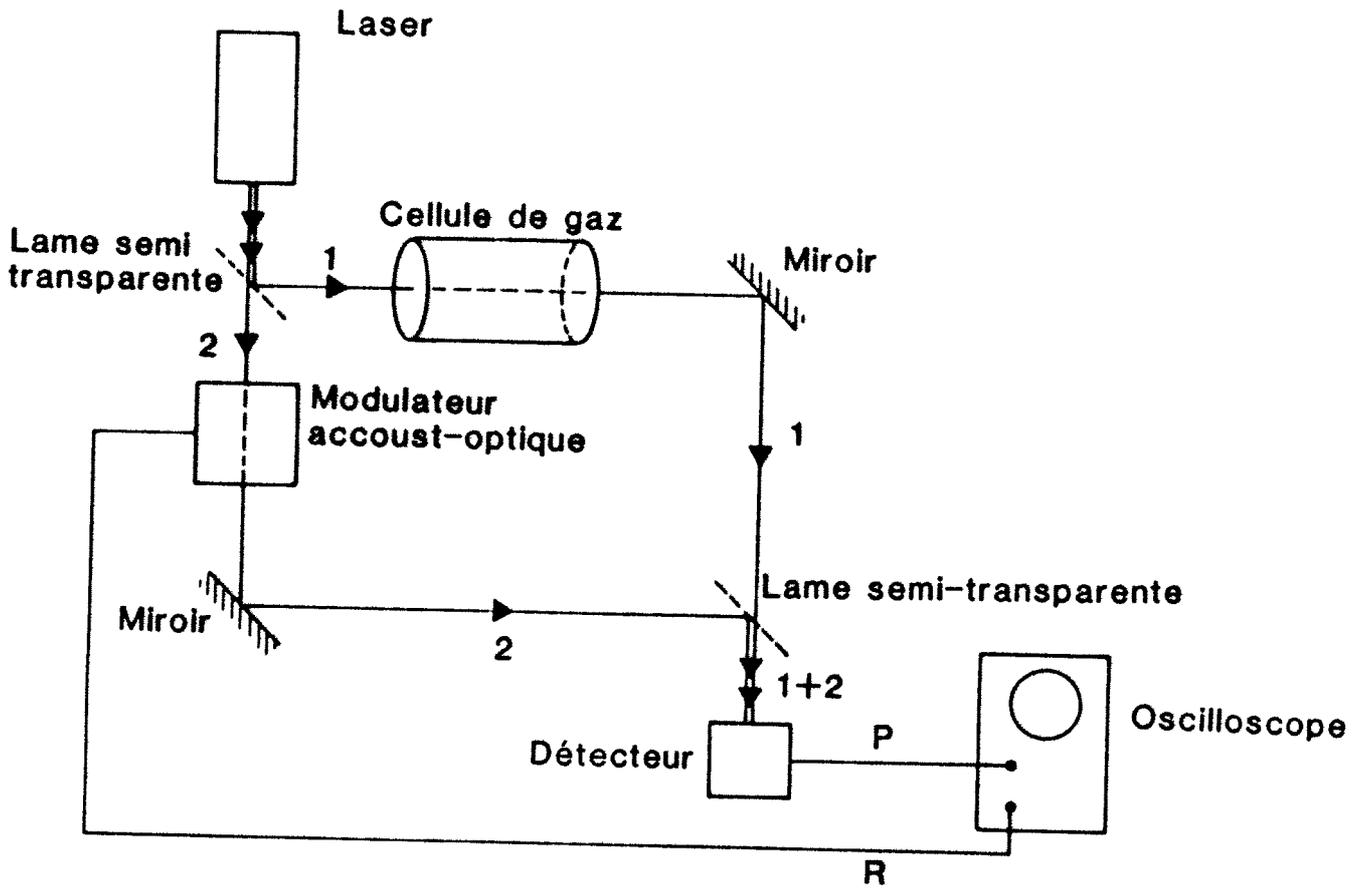
au centre au fond : le laser D_2O

4.2 Les lasers : indicateur de densité

Une autre méthode de diagnostic utilisant le laser est exposée au public. Le principe repose sur l'interférométrie : la lumière d'un faisceau laser est divisée en deux, une branche empruntant le trajet traversant le plasma, l'autre le contournant. Ces deux trajets sont d'égale distance, puis les deux faisceaux sont à nouveau mélangés. Cependant, le plasma a modifié la longueur apparente du chemin parcouru par l'une des branches, et c'est la différence des chemins parcourus qui permet d'en déduire la densité du plasma. Un exemple typique d'une telle réalisation utilisant même plusieurs canaux de mesure est utilisé sur le tokamak TCA (voir § 5.4.10).



Vue d'ensemble de l'expérience "mesure de densité par laser"
présentée aux portes ouvertes "85"



Mesure de la phase

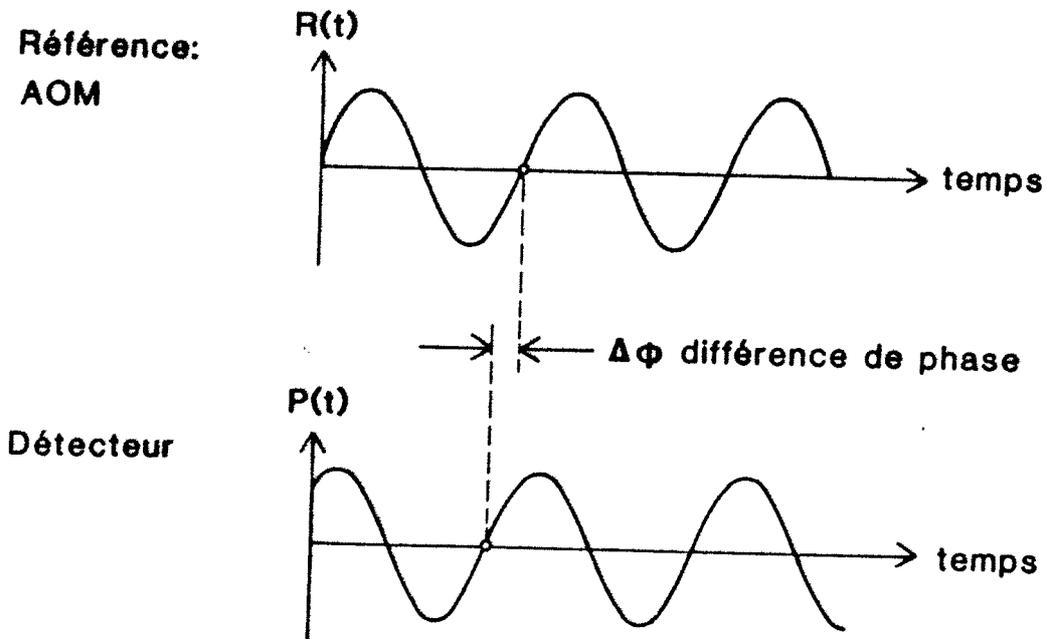


Schéma de principe de l'expérience d'interferométrie laser

Fig.14

4.3 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 des 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.

4.3.1 LMP (Linear Magnetized Plasma)

Cette machine linéaire dispose d'un champ magnétique homogène de 3'000 Gauss ⁽¹⁾ créé par 44 bobines. L'homogénéité du champ magnétique est inférieure à 0,3% sur une longueur de près de 5 m. Dans sa configuration actuelle le plasma est produit par une décharge dans un gaz noble (hélium, néon ou argon).

⁽¹⁾ A titre de comparaison, le champ magnétique terrestre est de 0,5 Gauss

Le plasma est confiné radialement par les forces magnétiques, mais il est perdu aux extrémités de la machine. Le diamètre du plasma est de l'ordre de 5 cm. Il est maintenu à distance des parois, centré dans la chambre à vide. La densité du plasma est de l'ordre de 10^{10} à 10^{11} particules par cm^3 ⁽¹⁾, les températures des particules étant respectivement 5 à 10 eV pour les électrons de 0,1 à 0,3 eV pour les ions ⁽²⁾.

La source à plasma consiste en une cathode chaude de 5 cm de diamètre, d'une grille accélératrice (ou un tube accélérateur) et une anode qui termine la décharge gazeuse. Les électrons sont émis par la cathode, et par collision ionisent le gaz. On assiste ainsi à ce qu'on appelle une thermalisation de ces électrons primaires. Le taux d'ionisation dans le LMP est de 0,1 à 5%, ce qui signifie qu'une très grande partie du gaz ne subit pas de collision ionisante. Cependant, il faudra tenir compte de ces collisions lorsque l'on désirera étudier le comportement de certaines ondes.

Cette installation expérimentale permet l'étude de phénomènes physiques dans un plasma magnétisé. Les caractéristiques uniques (longueur du plasma, homogénéité du champ magnétique, température des électrons et des ions, densité du plasma) ainsi que les diagnostics qui lui sont rattachés, ont incité diverses collaborations avec des universités américaines. La proposition est de réaliser un programme conjoint sur les phénomènes non linéaires d'interaction entre ondes et particules. Une des retombées de la collaboration sera notamment la possibilité d'opérer la machine avec un plasma de métaux alcalins (potassium ou barium) dont les possibilités permettent d'élargir l'éventail des expériences, plus spécifiquement d'augmenter la capacité de diagnostics.

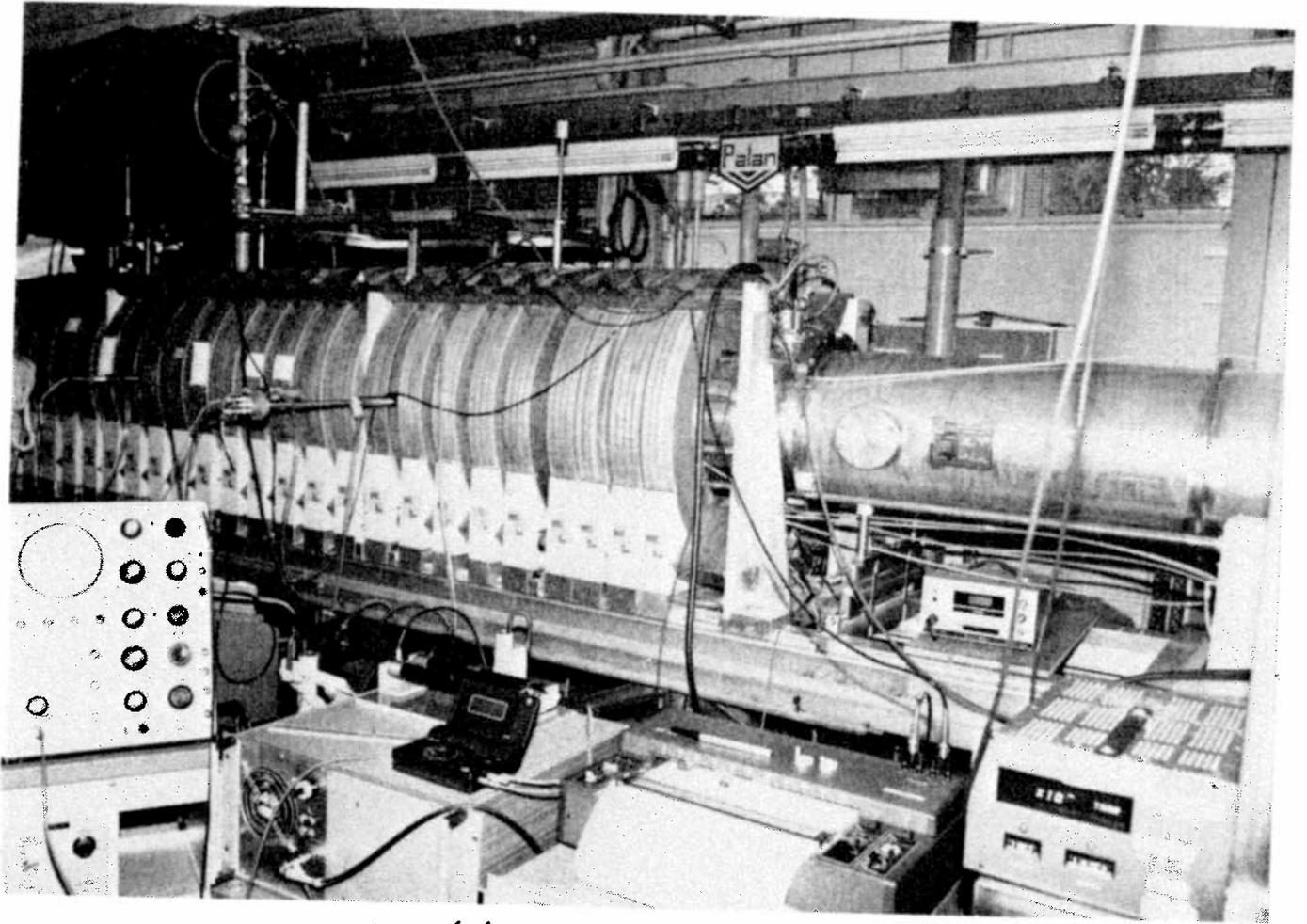
Les expériences en cours sont de deux natures. Une première étude porte sur la possibilité de générer des ondes de grande amplitude aux

⁽¹⁾ Dans l'air nous environnant, la densité des particules est de 10^{19} par cm^3 . Ce qui prouve bien que les expériences se font dans un vide relatif.

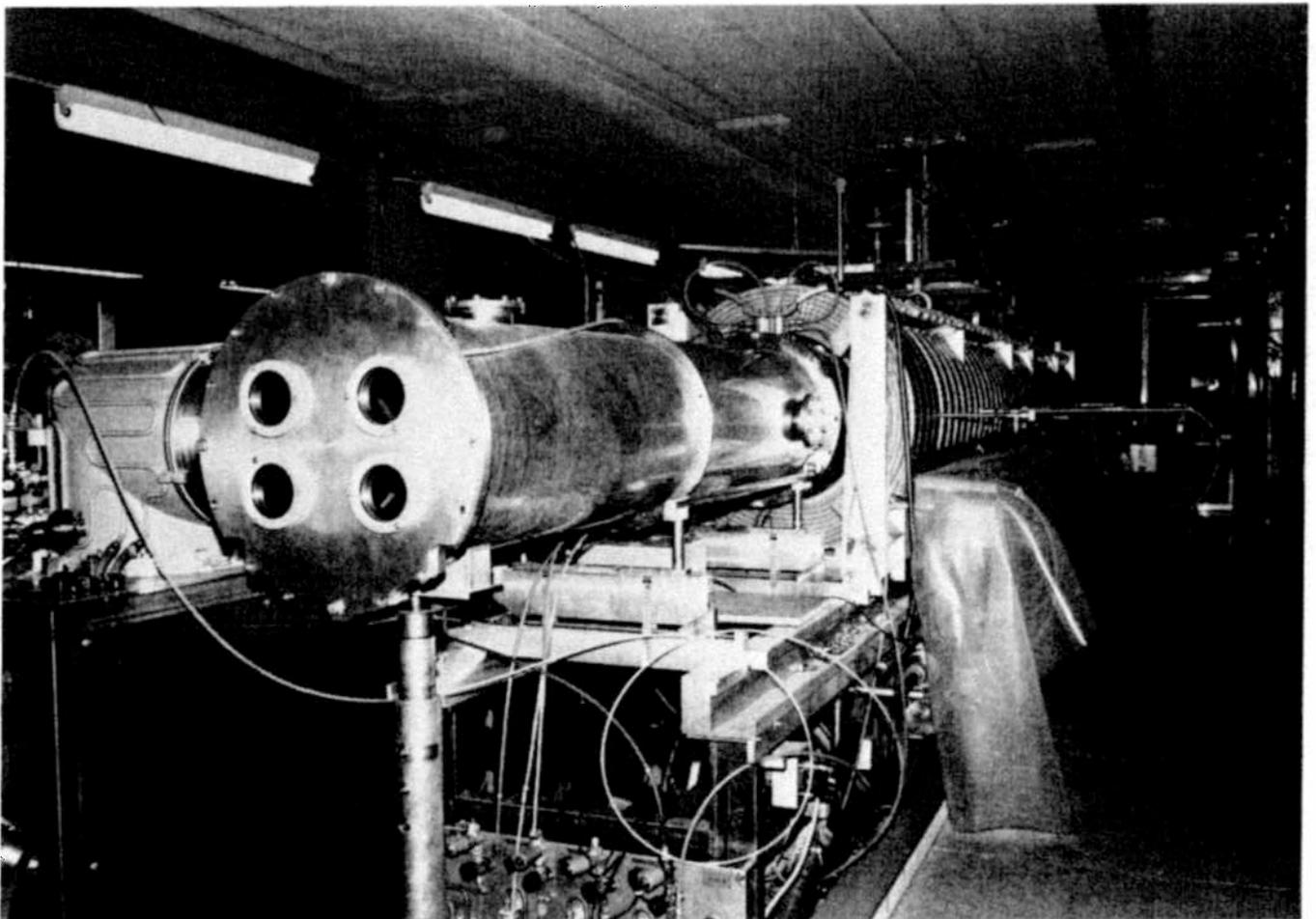
⁽²⁾ eV (électron-volt) est une unité d'énergie facile pour le physicien, en terme de température $1 \text{ eV} = 11'600 \text{ }^\circ\text{K}$.

fréquences proches de la fréquence cyclotronique ionique. Ceci dans le but d'étudier les interactions non linéaires entre ondes et ions du plasma. Les problèmes rencontrés sont dûs à la difficulté de couplage entre l'antenne et le plasma, au sens génération d'une onde électromagnétique de grande amplitude dans le plasma. Diverses structures d'antennes ont été testées afin de déterminer le meilleur couplage. Une fois cette étape franchie, nous étudierons le physique du chauffage par de telles ondes. Un des processus est le chauffage par stochasticité intrinsèque, où à travers des processus purement cohérents (sans faire intervenir des phénomènes aléatoires), on parvient à obtenir la thermalisation de l'énergie transférée aux particules.

La deuxième étude est axée sur le développement d'un diagnostic optique permettant l'obtention de la température des ions, de la densité globale et de la concentration isotopique d'un plasma. La méthode utilisée fait appel à un laser accordable qui excite une transition entre deux états des ions du plasma. L'observation de la fluorescence induite lorsque l'on change la longueur d'onde du laser nous permet de déterminer la température ionique (par élargissement Doppler) et la densité du plasma (à partir de l'intensité du signal). L'originalité de l'expérience en cours porte sur une modification de cette méthode; au lieu d'utiliser seulement la lumière incidente du laser, on utilise aussi la lumière réfléchiée par un miroir. Ainsi l'ion est soumis aux deux parcours antiparallèles de la lumière (l'absorption est appelée deux photons). Ceci permet une résolution suffisante pour distinguer les pics de fluorescence très rapprochés. L'expérience actuelle porte sur cette méthode en vue de mesurer les densités des deux isotopes d'un plasma de néon. Les résultats obtenus jusqu'alors sont positifs et extrêmement encourageants.



Vue générale de l'expérience LMP



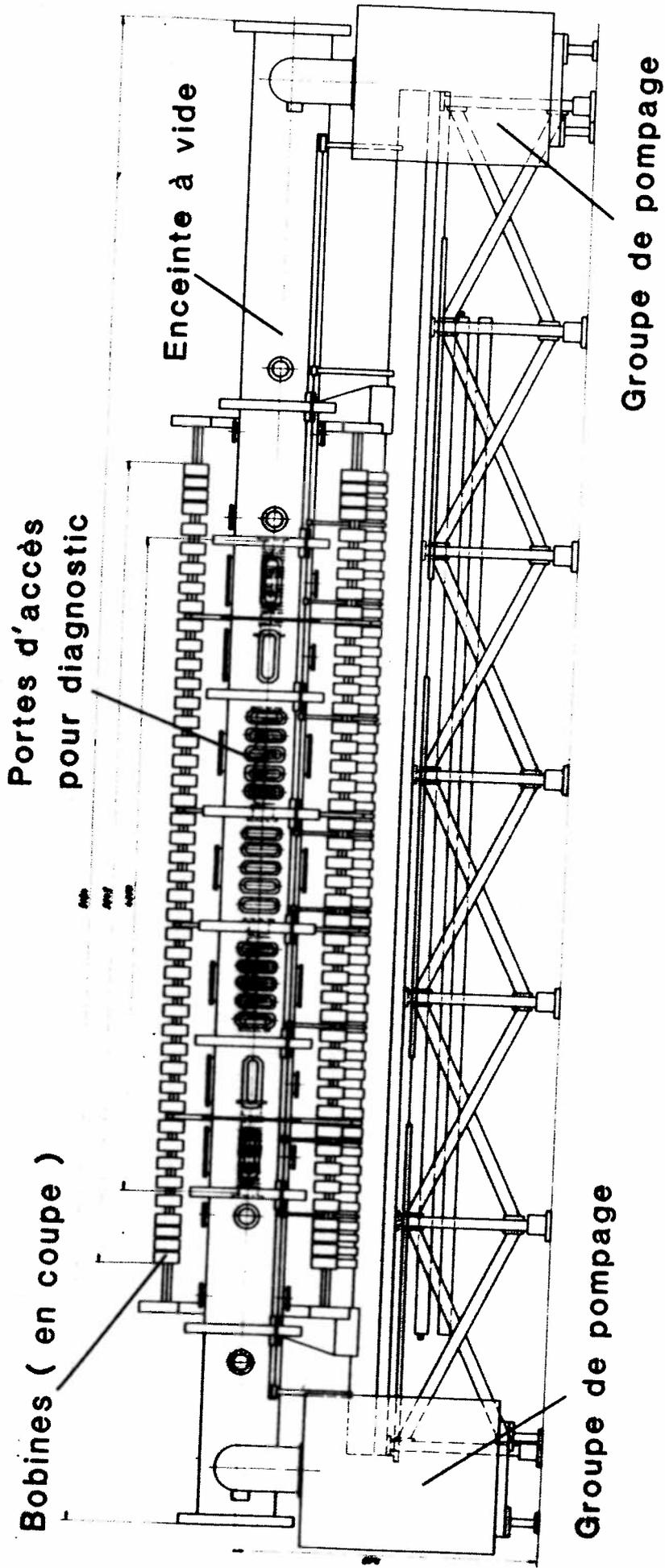


Schéma général de LMP

Fig. 16

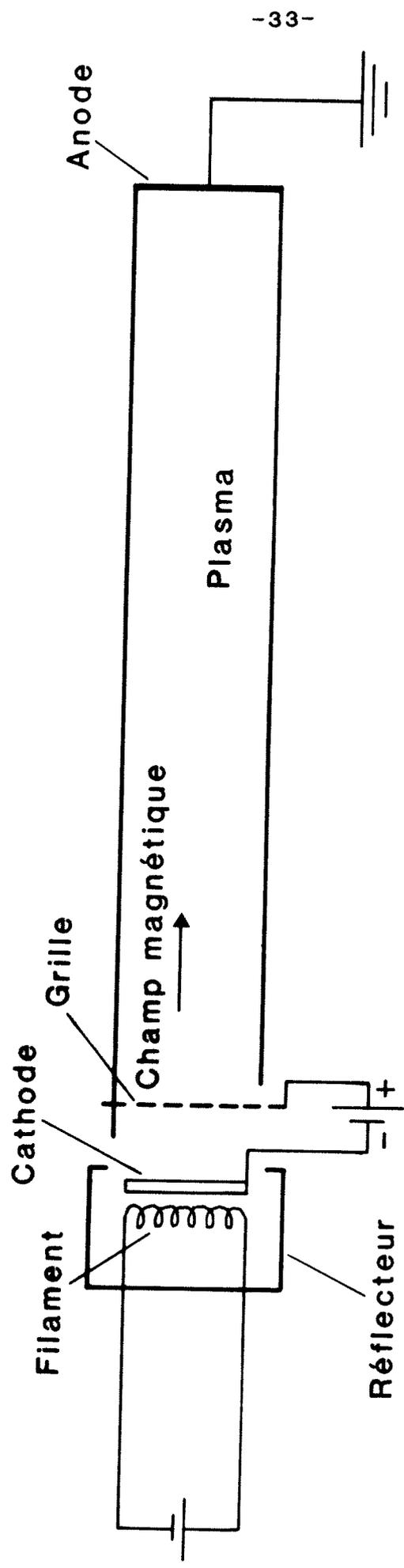
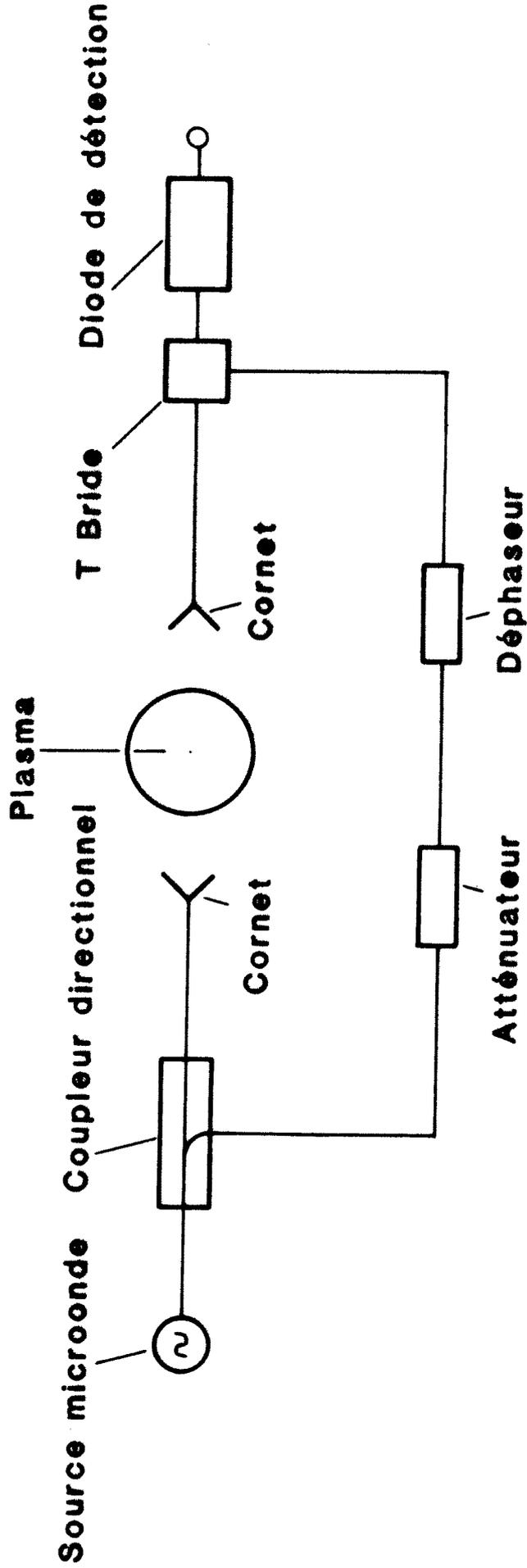
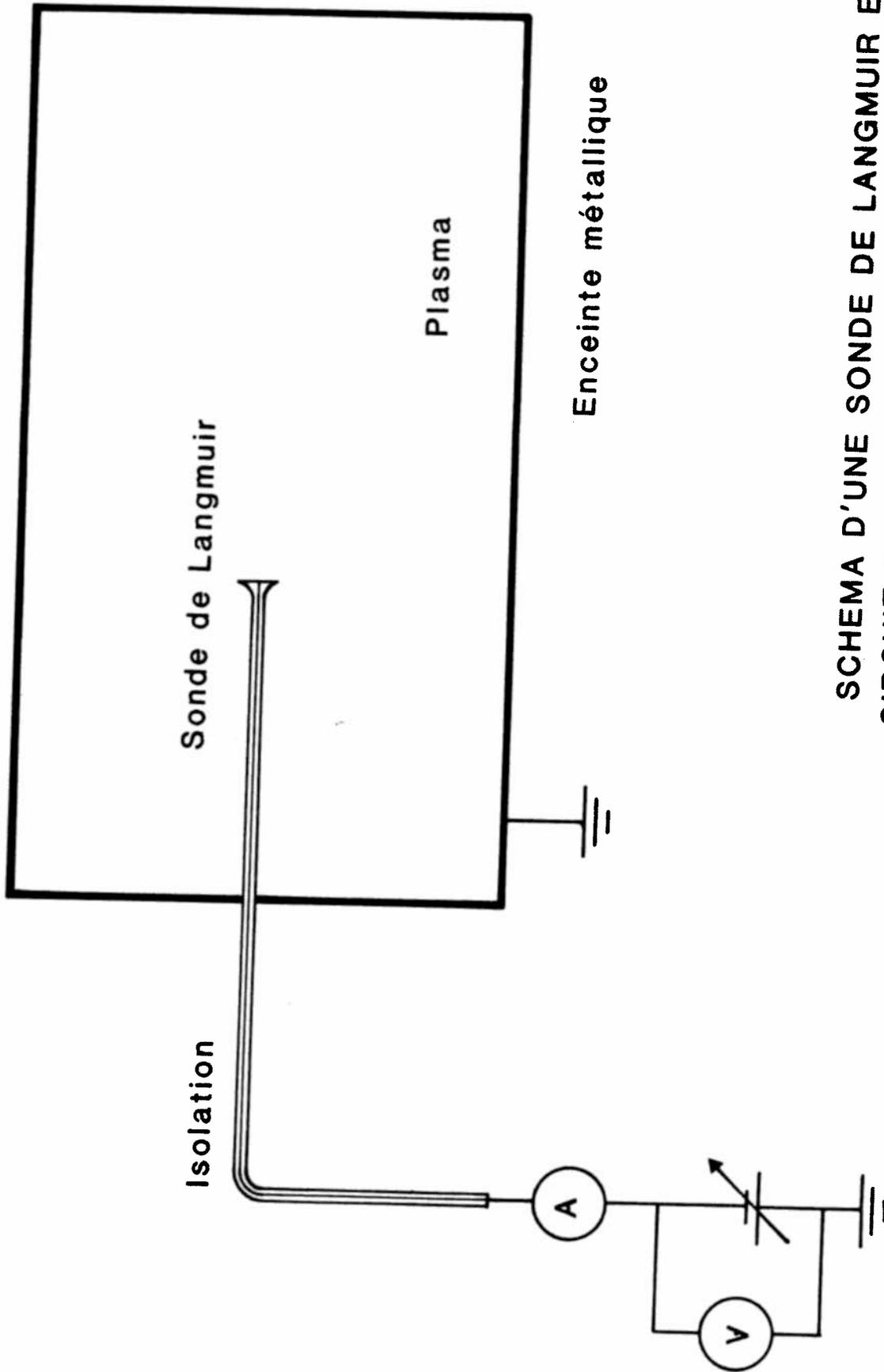


Schéma expérimental, production du plasma

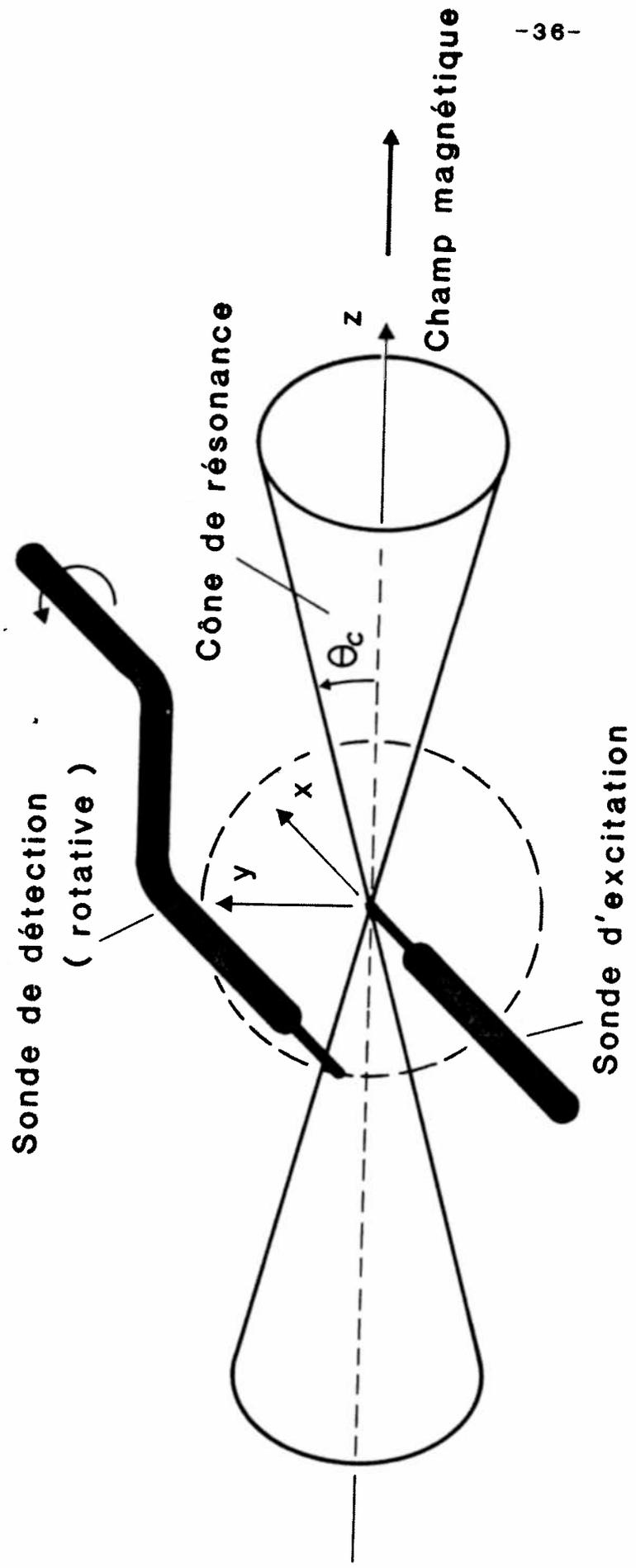


Mesure de la densité par interféromètre micro-onde

Fig.17



SCHEMA D'UNE SONDE DE LANGMUIR ET DU
CIRCUIT ELECTRONIQUE UTILISE POUR MESURER
LA CARACTERISTIQUE $I = I(V)$



DESSIN SCHEMATIQUE DU CONE

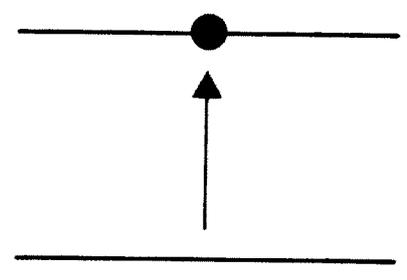
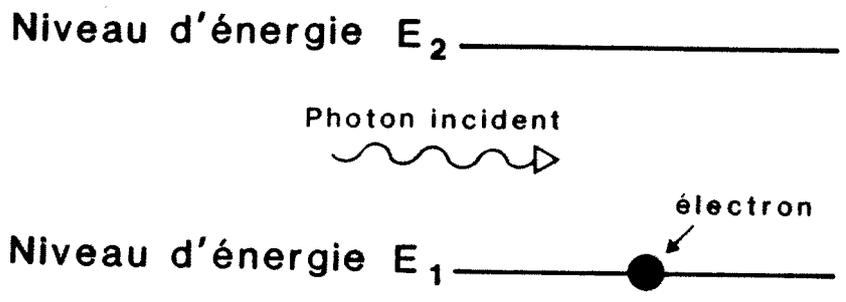
Fig.19

Un photon = " Grain de lumière "

Absorption

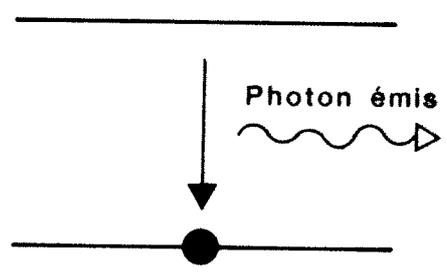
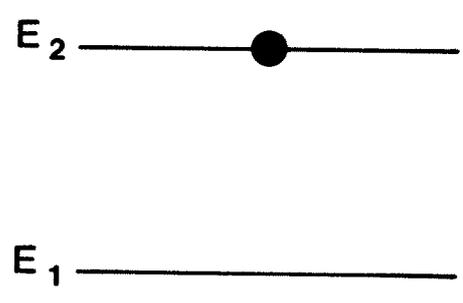
Avant

Après



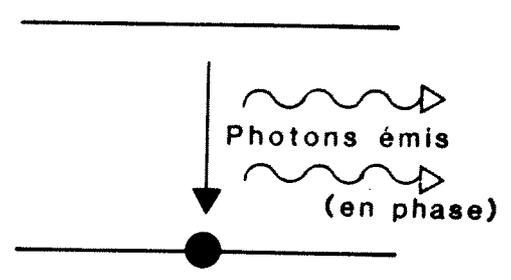
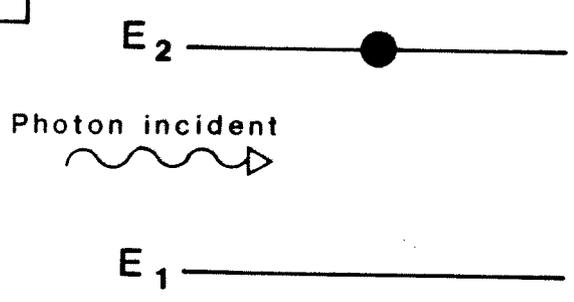
Le système a absorbé un photon et un électron est monté à un niveau d'énergie supérieur.

Emission spontanée



L'électron est retombé spontanément sur le niveau d'énergie inférieur et le système a émis un photon.

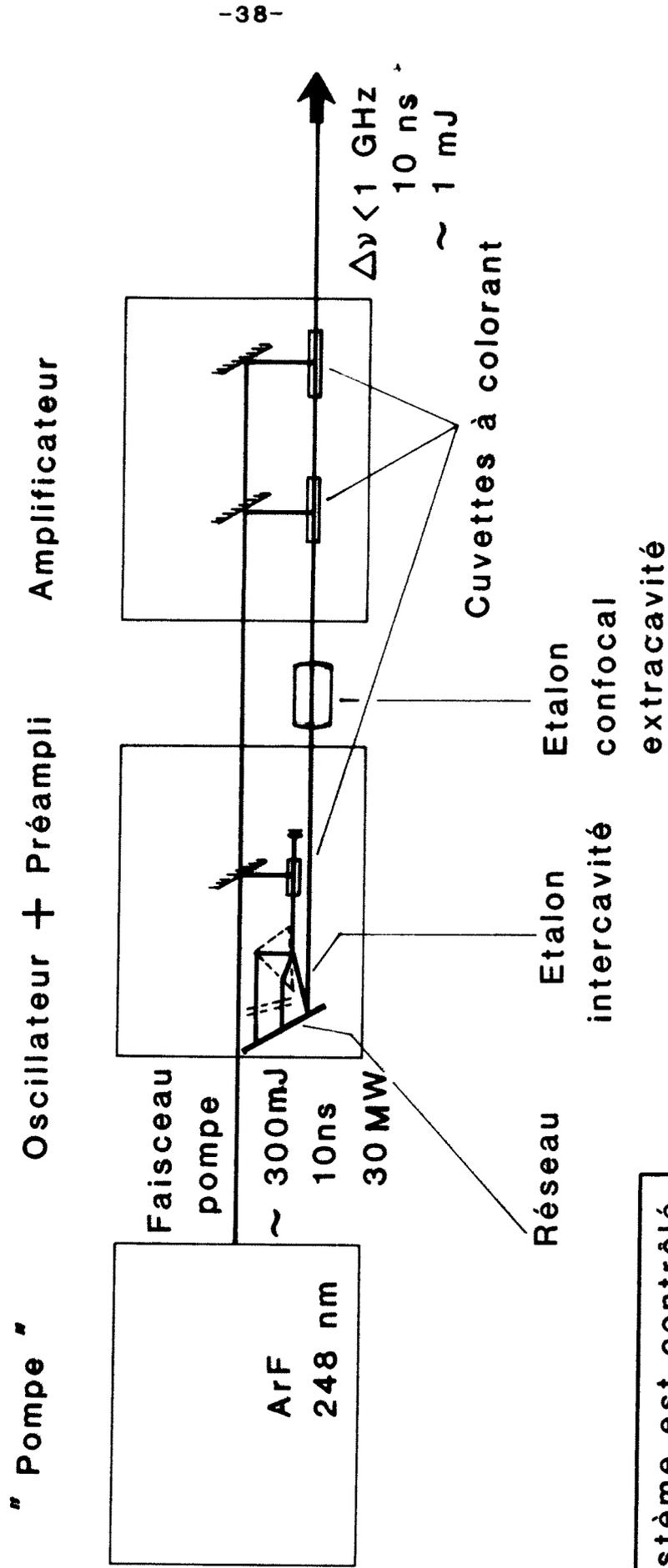
Emission stimulée



Lors du passage d'un photon, l'électron retombe sur le niveau d'énergie inférieur, le système émet un photon.

Fig.20

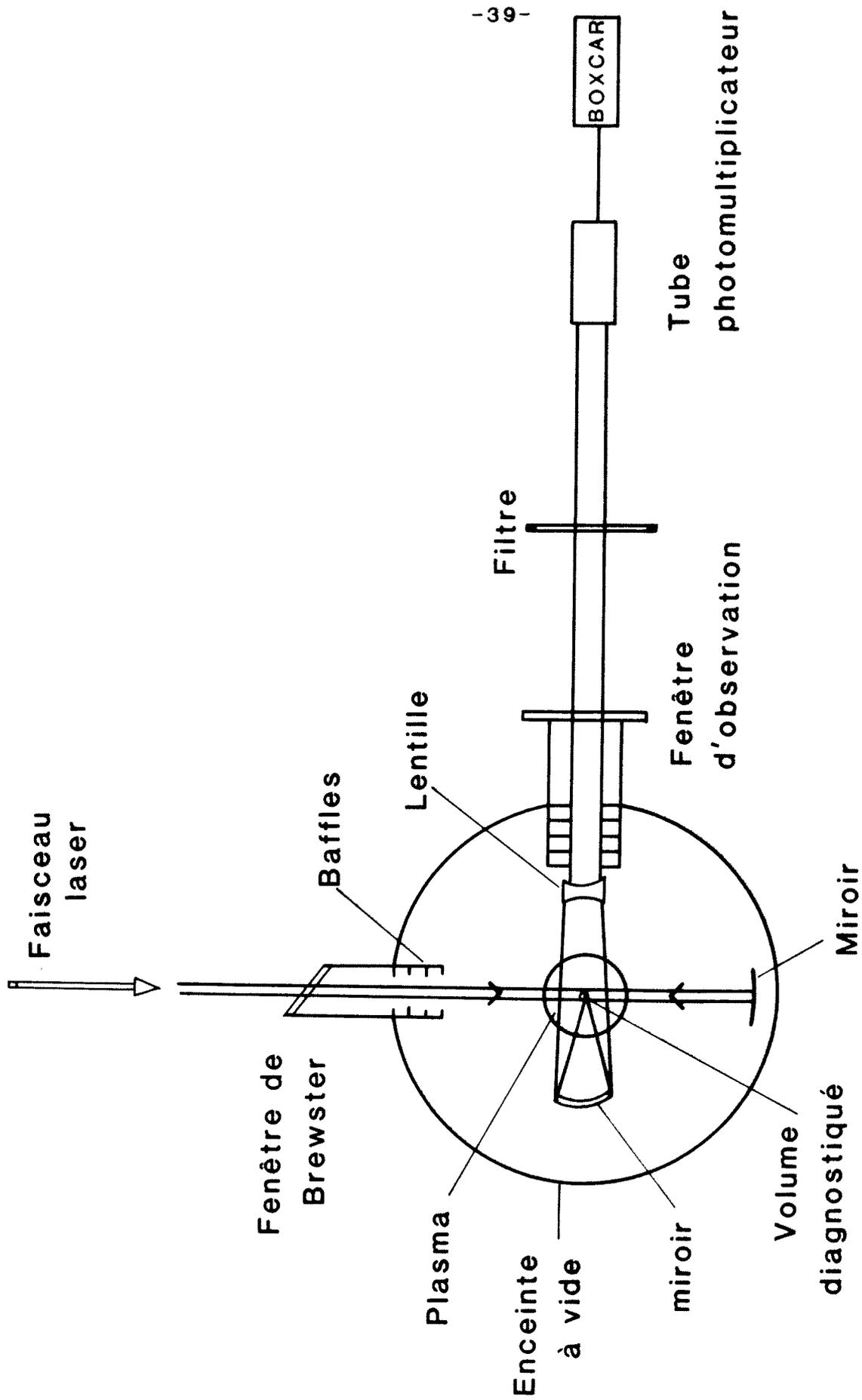
SCHEMA DE PRINCIPE DU LASER



Le système est contrôlé par un computer

Colorant
BMT 312 - 343 nm

Fig.21



COUPE TRANSVERSALE SCHEMATIQUE

Fig.22

Principe de la spectroscopie 1 photon

Pour la transition étudiée, les différents niveaux énergétiques des ions de néon ont l'allure suivante.

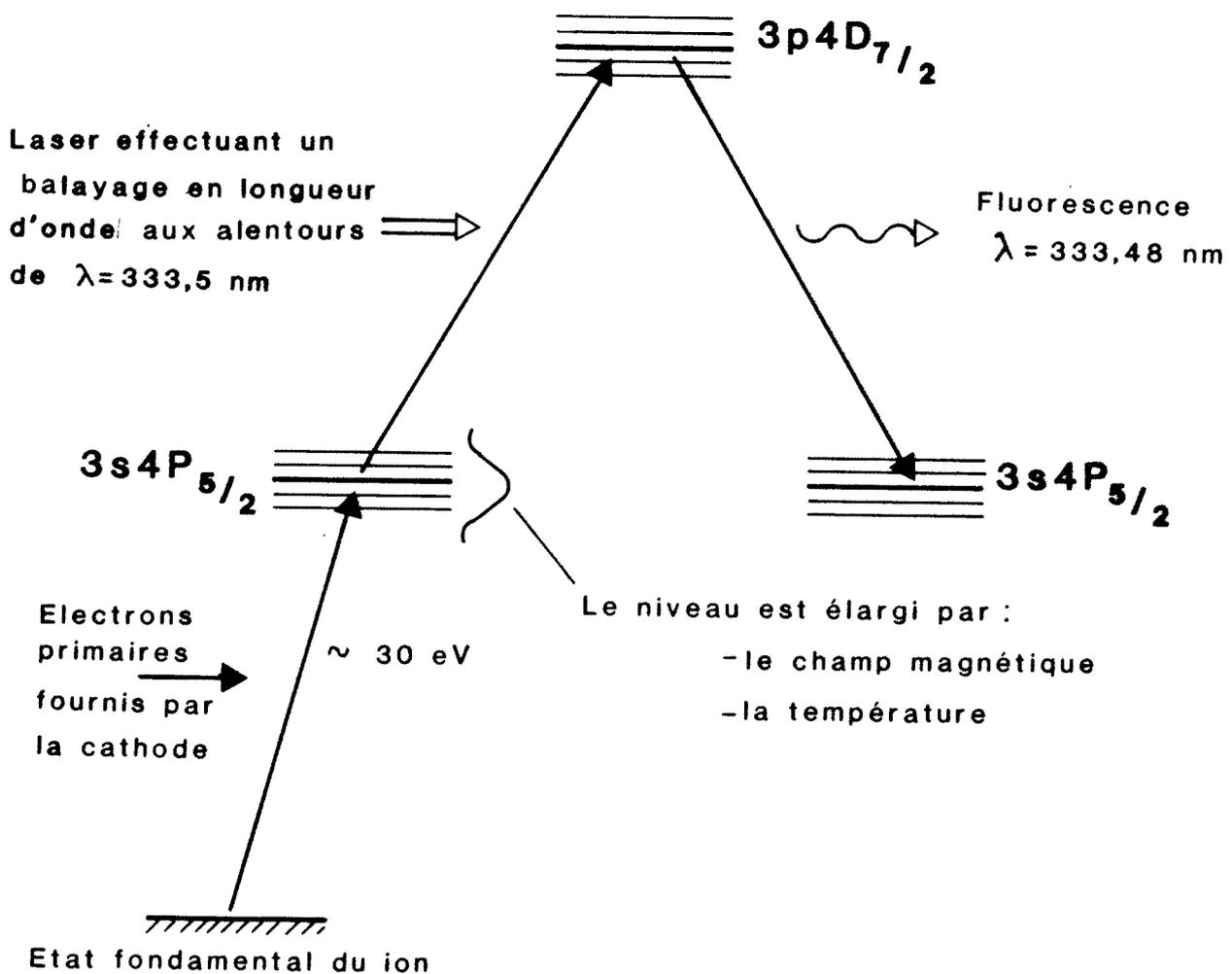
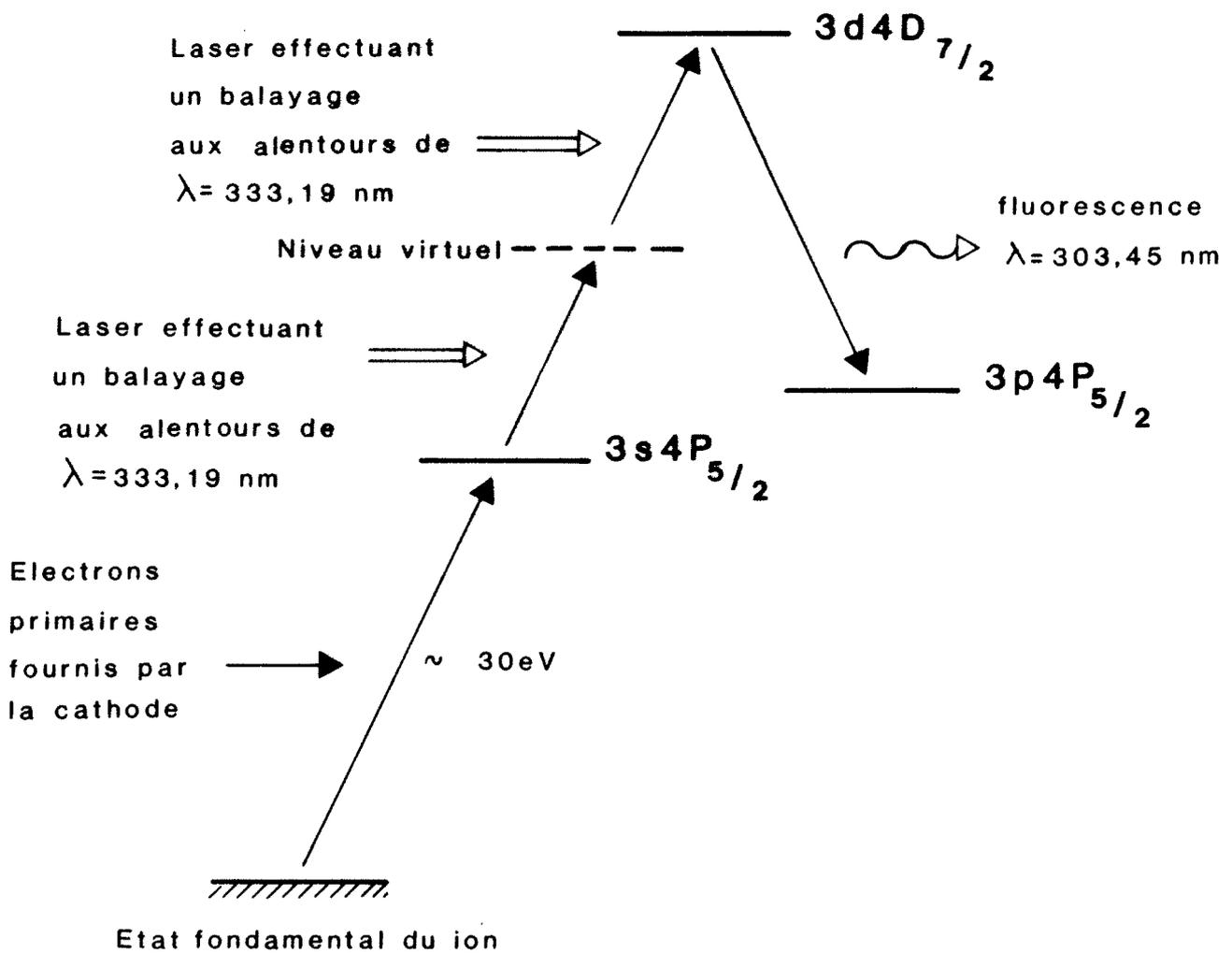


Fig.23

Principe de la spectroscopie 2 photons

Avantage : On s'affranchit de l'effet Doppler qui élargit les raies observées.

But visé : Avoir une résolution suffisante pour " voir " les isotopes du néon



Causes pouvant encore élargir le signal observé :

- Largeur naturelle de la ligne
- Largeur spectrale du laser

Fig.24

4.4.2 Grande Chambre.

La grande chambre est effectivement une expérience aux dimensions importantes : 3 m 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 - peut être obtenue en variant le courant d'émission des quatre groupes de filaments.

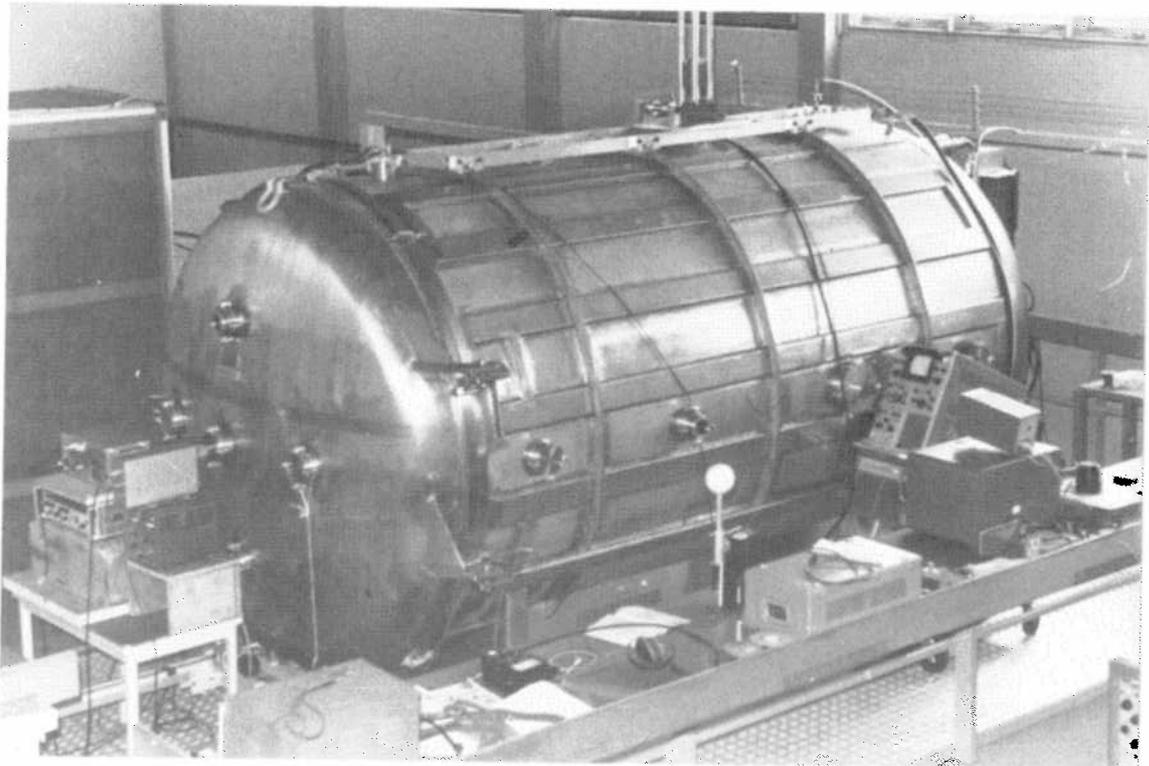
L'expérience en cours simule les phénomènes d'émission électromagnétique qui ont lieu dans les plasmas solaires ou interplanétaires. Le soleil projette continuellement des particules énergétiques dans l'espace, c'est le vent solaire. Mais particulièrement lors d'une éruption, des bouffées de particules très énergétiques sont émises. 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", notamment en ce qui concerne les ondes électromagnétiques émises lors de telles interactions. Il faut en effet que plusieurs longueurs d'ondes soient contenues dans l'enceinte à plasma.

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 électronique du plasma (f_{pe}) et à plusieurs autres fréquences ($3/2 f_{pe}$, $2 f_{pe}$), le spectre étant très large. Elles sont détectées à l'aide d'un récepteur microonde équipé d'une antenne à cornet ainsi qu'à l'aide de petites antennes bobinées et isolées électrostatiquement du plasma permettant la détection locale.

Les ondes électrostatiques sont détectées par des sondes dites de Langmuir. Les résultats expérimentaux obtenus sont en partie consistants avec les prédictions théoriques, mais bien des résultats restent à analyser.

Nous avons pour cela entrepris le développement et l'installation de nouveaux diagnostics qui devront permettre la mesure de la fonction de distribution des particules rapides (faisceaux d'électrons, formation d'électrons secondaires rapides) et de déterminer les conditions de thermalisation du faisceau. Trois diagnostics complémentaires essentiels viennent d'être incorporés à l'expérience : une bobine (Rogowski) permettant la mesure du courant du faisceau, un analyseur axial de vitesse des électrons, mobile sur une hémisphère facilitant la détection des composantes des vitesses, un "endoscope optique" qui devrait étendre les possibilités de détection de la lumière supplémentaire émise du plasma et d'en connaître les origines (liées à l'injection du faisceau de particules ou encore à la création de particules rapides).



Vue générale de l'expérience Grande Chambre.

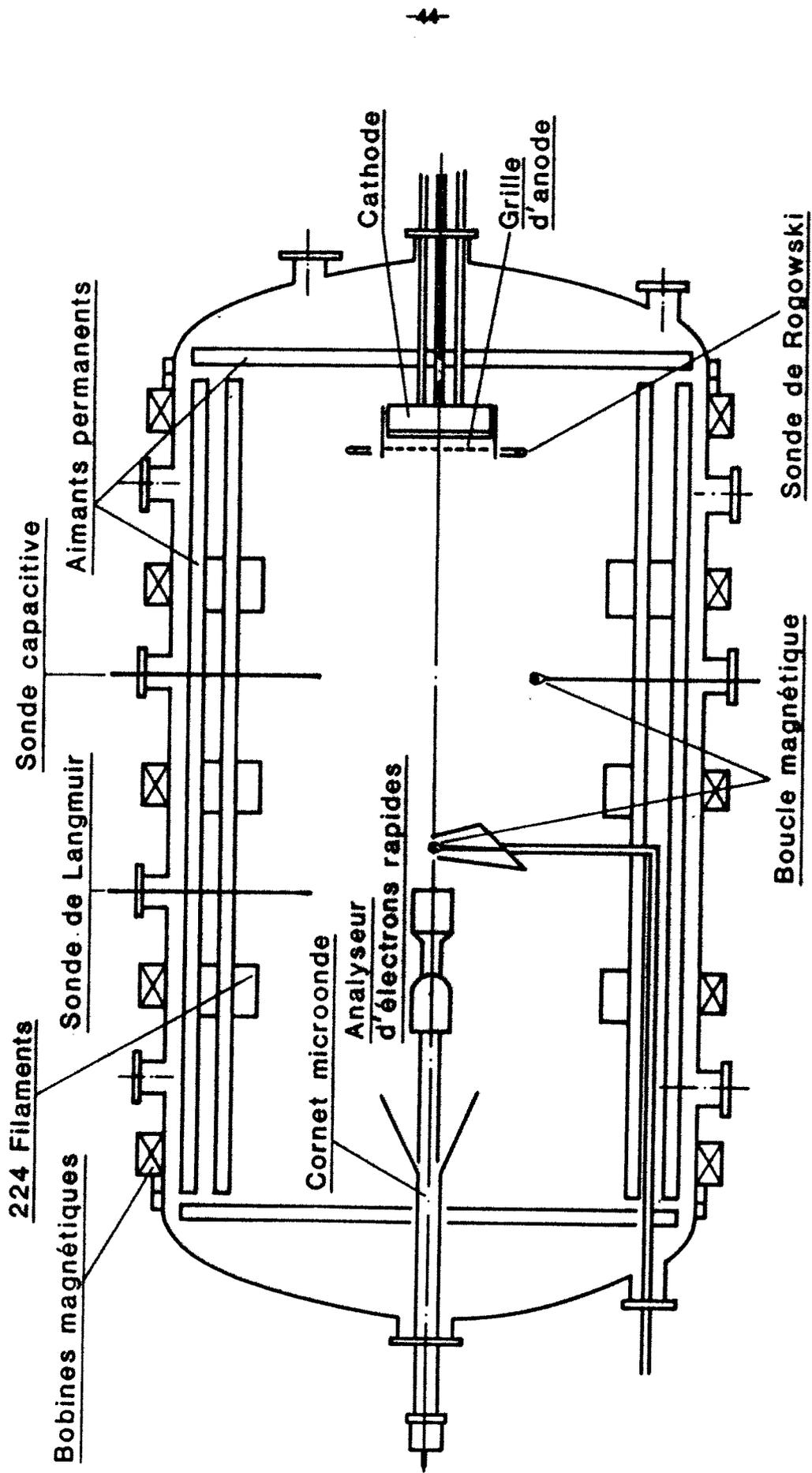
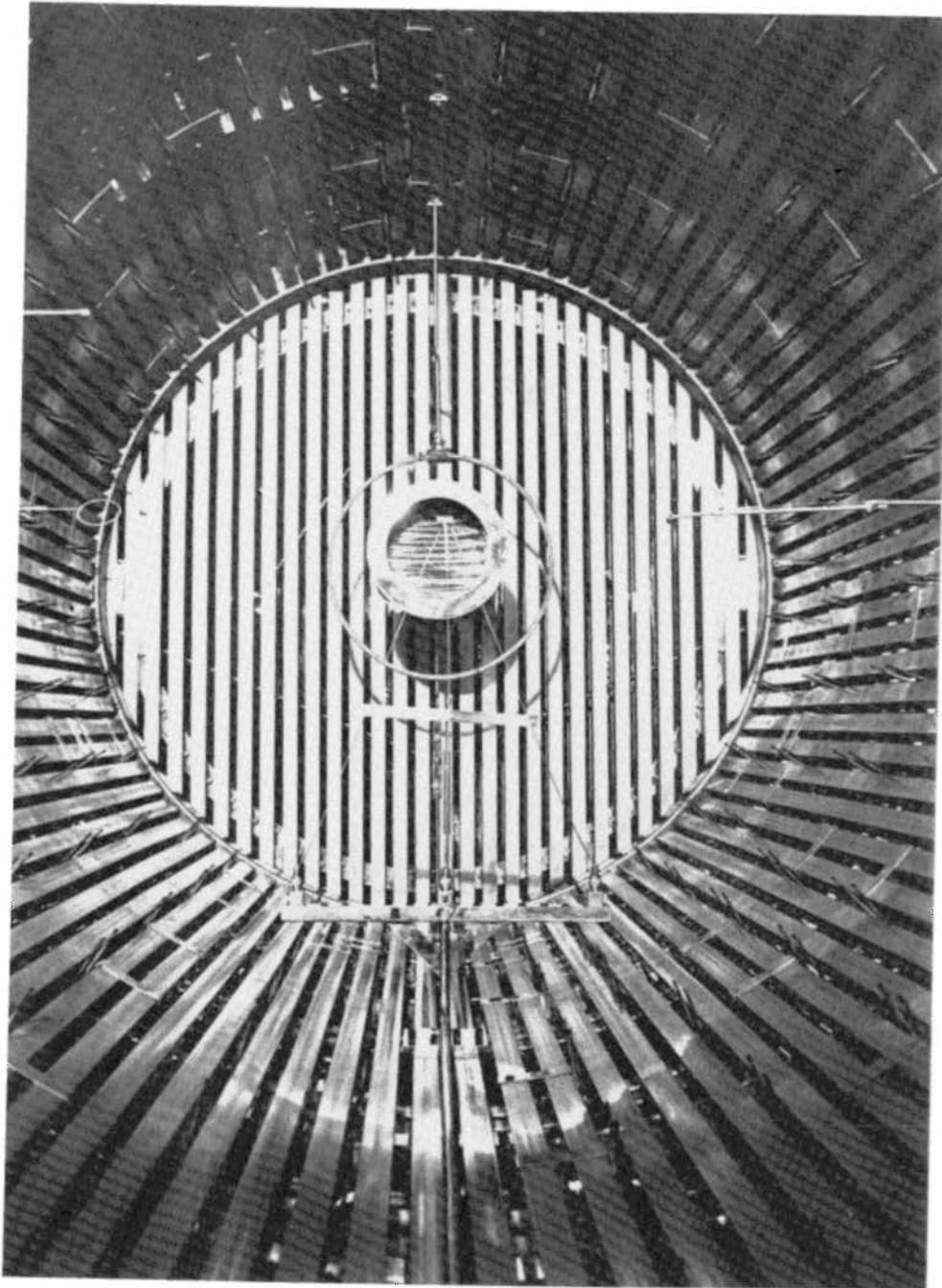


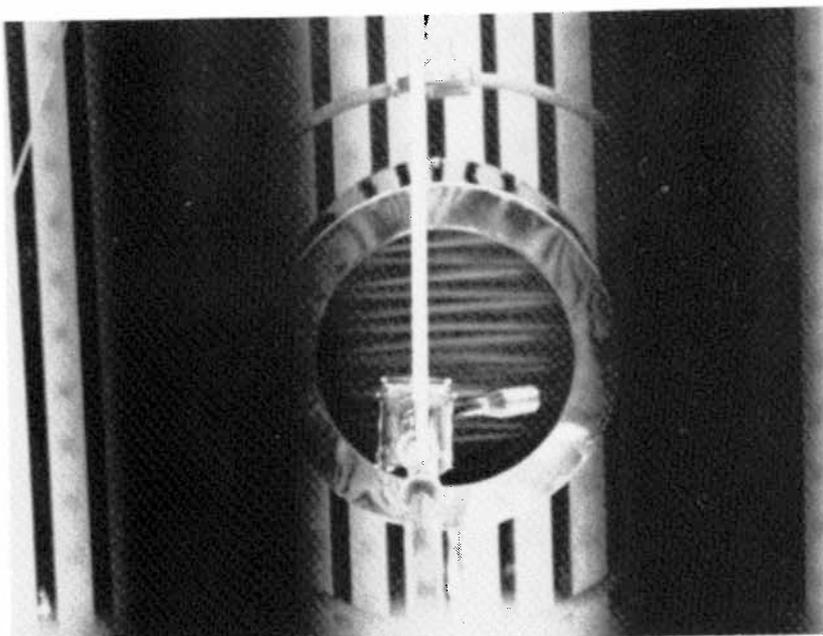
Schéma de la grande chambre



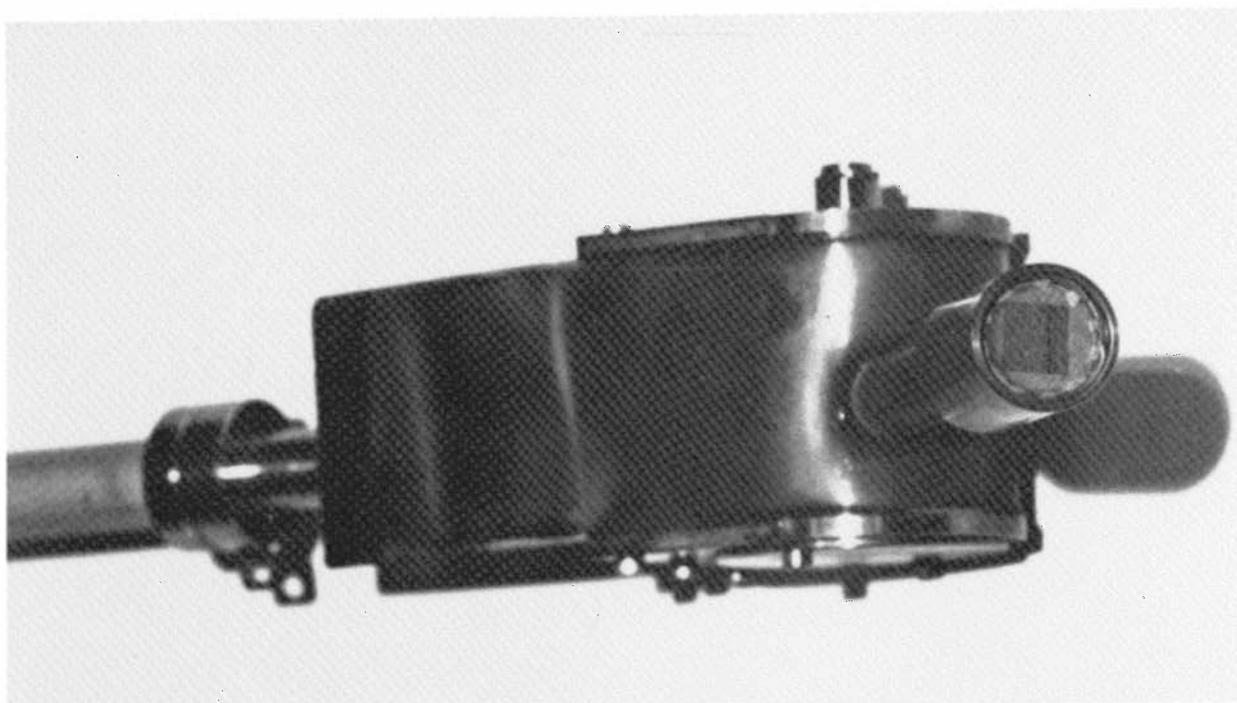
Intérieur de la grande chambre.

On distingue :

- les barres contenant les aimants permanents tapissant la paroi interne
- au centre, la cathode produisant le faisceau d'électrons
- autour, la bobine Rogowski permettant la mesure du courant du faisceau
- sonde (à 3 branches) longitudinale
- analyseur radial (à droite)

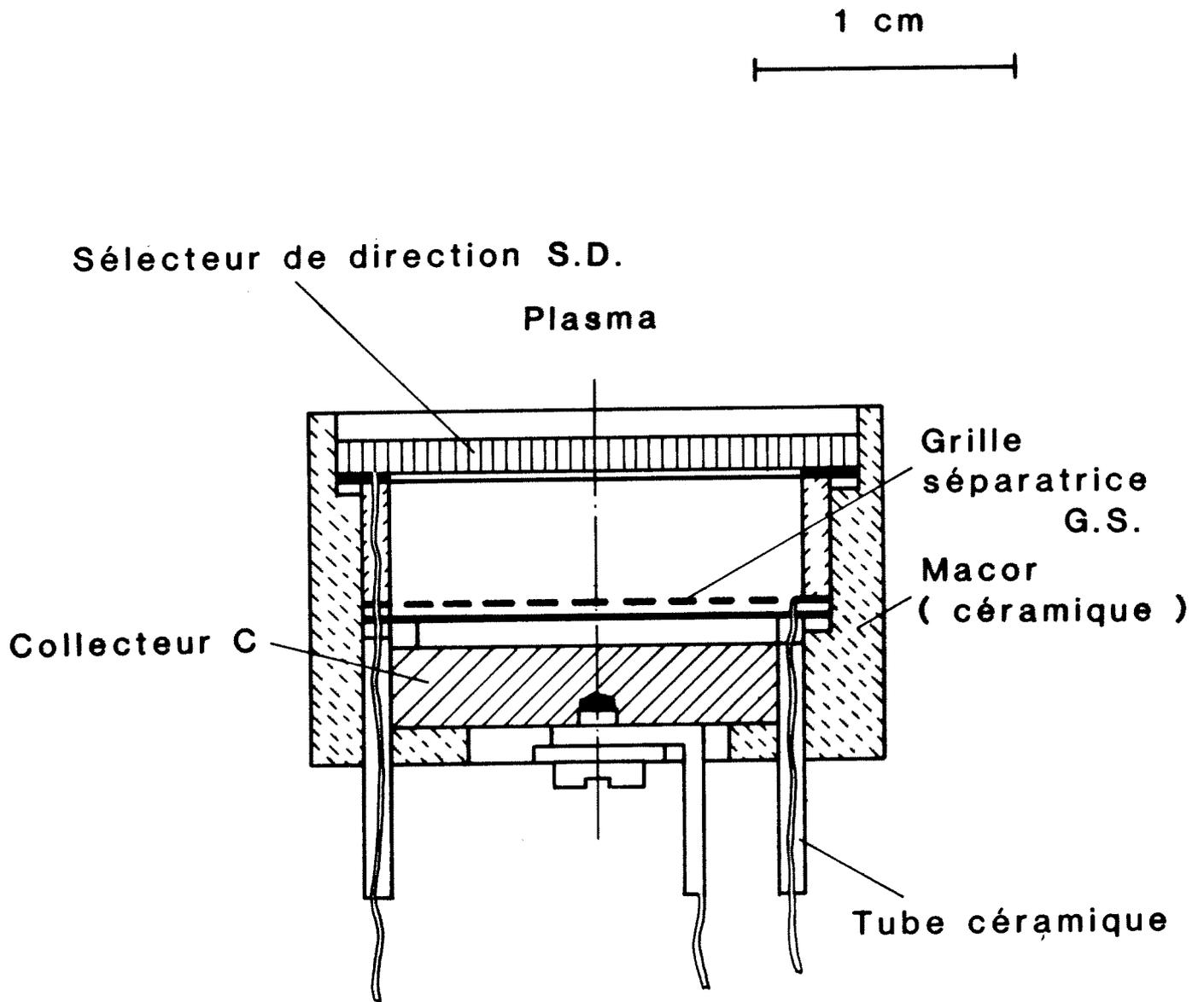


Analyseur multidirectionnel à déplacement axial
installé face à la cathode (orientation 60°)



Analyseur multidirectionnel sur sa tourelle
(face avant en graphite avec ~ 300 trous de $0,1$ mm de diamètre
permettant la sélection des vitesses)

ANALYSEUR D'ELECTRONS RAPIDES



Distance entre	C et G.S.	1 mm
	G.S. et S.D.	5 mm

Fig.26

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

Parmi les méthodes de chauffage du plasma, l'absorption d'énergie par les électrons d'une onde électromagnétique à la fréquence cyclotronique électronique apparaît être actuellement comme l'une des méthodes les plus efficaces. Si par le passé, cette méthode de chauffage n'a pas été explorée d'une manière approfondie, c'est essentiellement par manque de source à la bonne fréquence (60 à 150 GHz) et par manque de puissance (200 kW à plusieurs mégawatts). C'est pourquoi les principaux pays et organismes engagés dans le programme de fusion thermonucléaire ont décidé qu'un effort important devrait être fait dans le développement de ces nouvelles sources appelées les gyrotrons.

Dans un oscillateur microonde de type conventionnel, la fréquence de l'onde est déterminée par les dimensions du résonateur. De nombreux problèmes technologiques surgissent lorsque les fréquences augmentent, les longueurs d'onde devenant petites. Les résonateurs sont alors de faible dimension. Aussi est-il exclu, pour des raisons de pertes ohmiques dans les parois, d'atteindre de haute densité d'énergie dans le résonateur et par conséquent, d'obtenir de haute puissance de sortie.

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

Intégré dans le programme de l'Euratom, le CRPP, en collaboration avec le Laboratoire d'Electromagnétique et d'Acoustique de l'EPFL et la division des tubes électroniques EKR de la firme Brown Boveri & Cie

(Baden), a entrepris le développement d'un gyrotron de haute fréquence (120 : 150 GHz) utilisant un concept analogue à celui d'un laser. Dans cette approche, l'interaction entre le faisceau d'électrons relativistes et l'onde électromagnétique, interaction au cours de laquelle l'énergie de faisceau d'électrons est délivrée à l'onde, a lieu dans un résonateur quasi-optique formé de deux miroirs. Cette approche offre des avantages certains à haute fréquence où les longueurs d'ondes deviennent de plus en plus courtes et où les concepts utilisés en optique sont valables, d'où l'appellation de quasi-optique.

De façon schématique, le gyrotron se compose de trois éléments principaux : un canon à électrons relativistes, un résonateur quasi-optique et les bobines supraconductrices générant le champ magnétique. Le canon à électrons produit un faisceau annulaire de très petite dimension (diamètre 4 mm, épaisseur de l'anneau $\sim 0,2$ mm); l'énergie transportée par le faisceau est de 700 kW. L'intensité de champ magnétique est d'environ 50 kGauss et le profil de celui-ci est bien déterminé (Fig. 27). Le faisceau d'électrons est ainsi bien guidé jusqu'au résonateur, formé de deux miroirs, où il cède une fraction (jusqu'à 40%) de son énergie à l'onde électromagnétique.

La réalisation du projet de développement du gyrotron quasi-optique nécessite une infrastructure importante ainsi qu'une installation expérimentale de grande dimension. Un stand d'essai, qui permettra de tester diverses configurations du résonateur et ainsi d'approfondir les connaissances physiques du système, est en cours d'installation sur le site d'Ecublens. Des installations annexes sont nécessaires notamment une alimentation régulée (1MW à 100 kV) et une importante unité cryogénique.

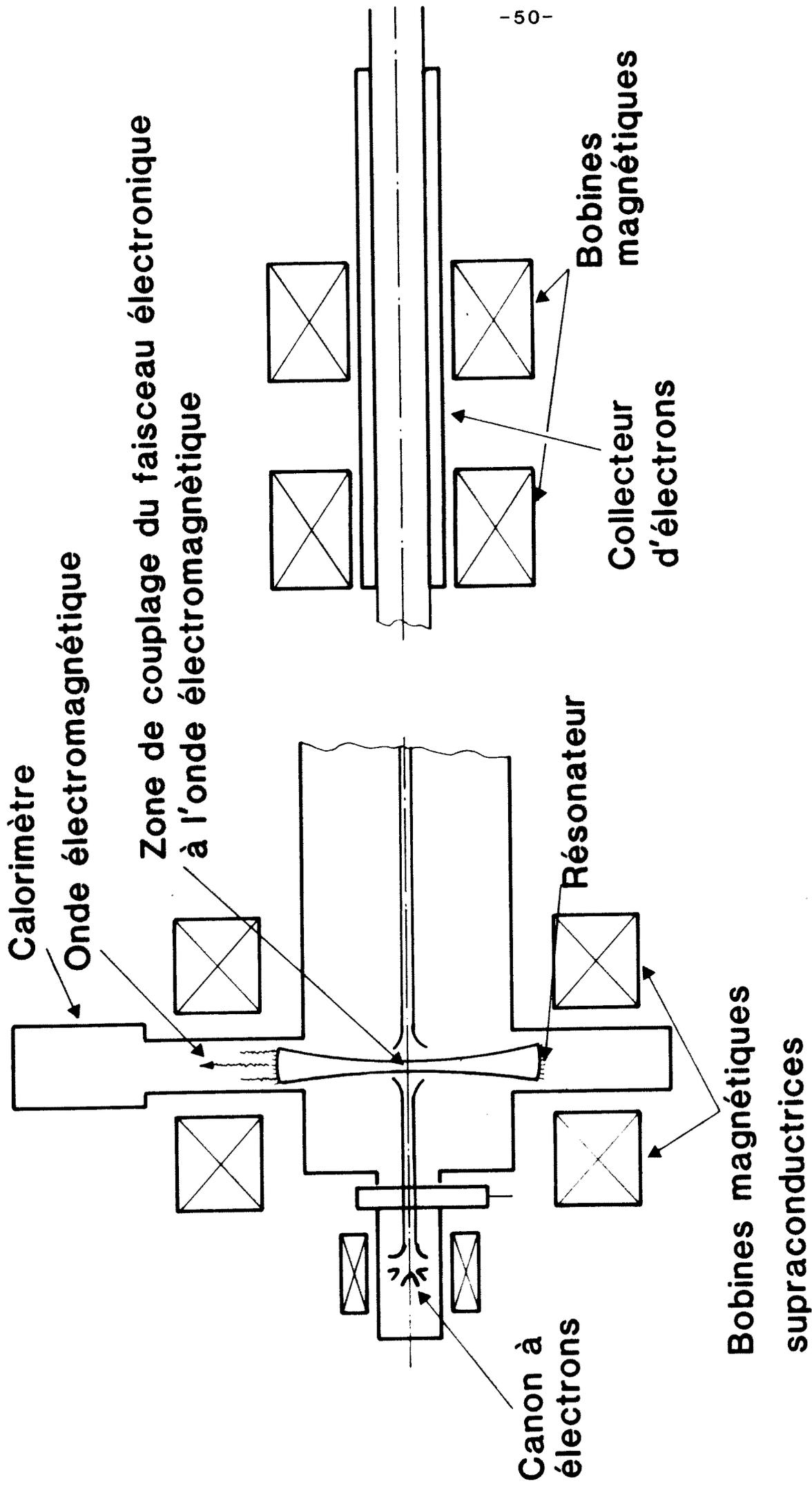
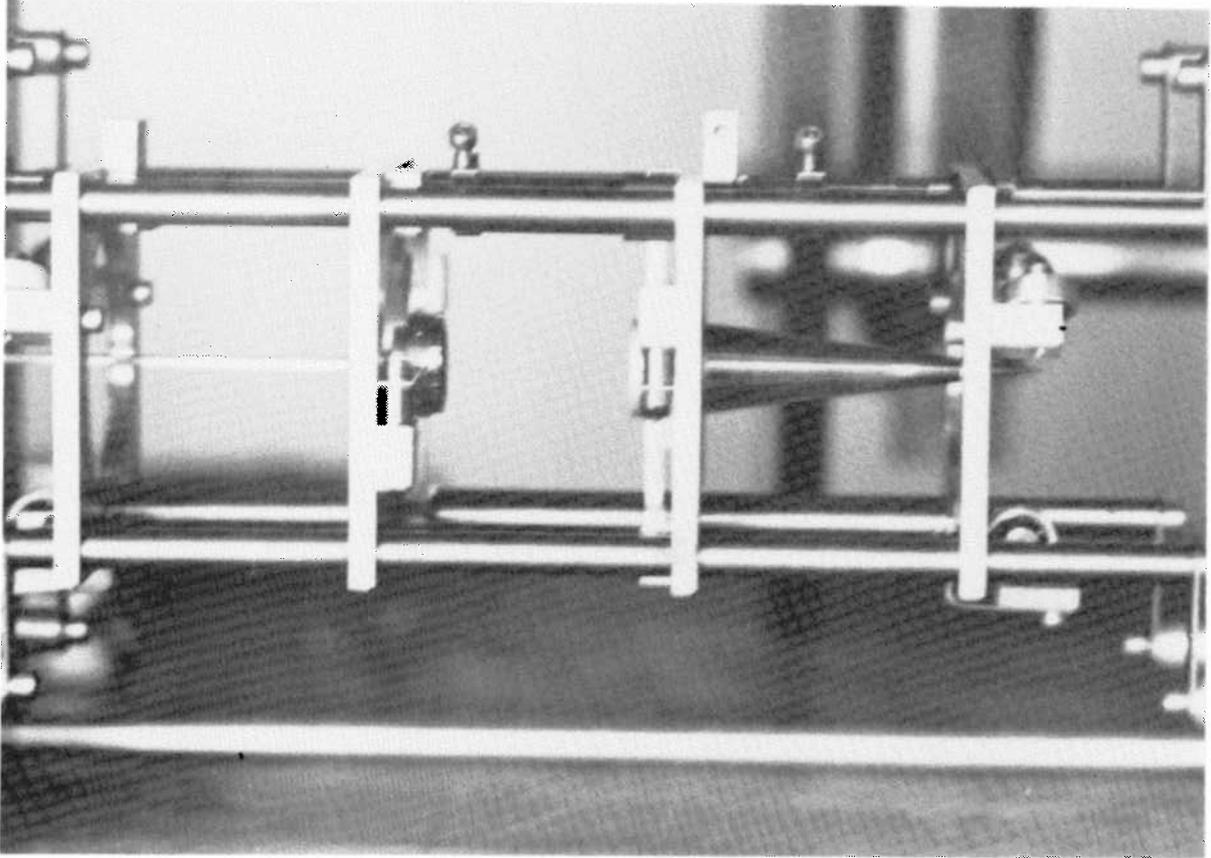
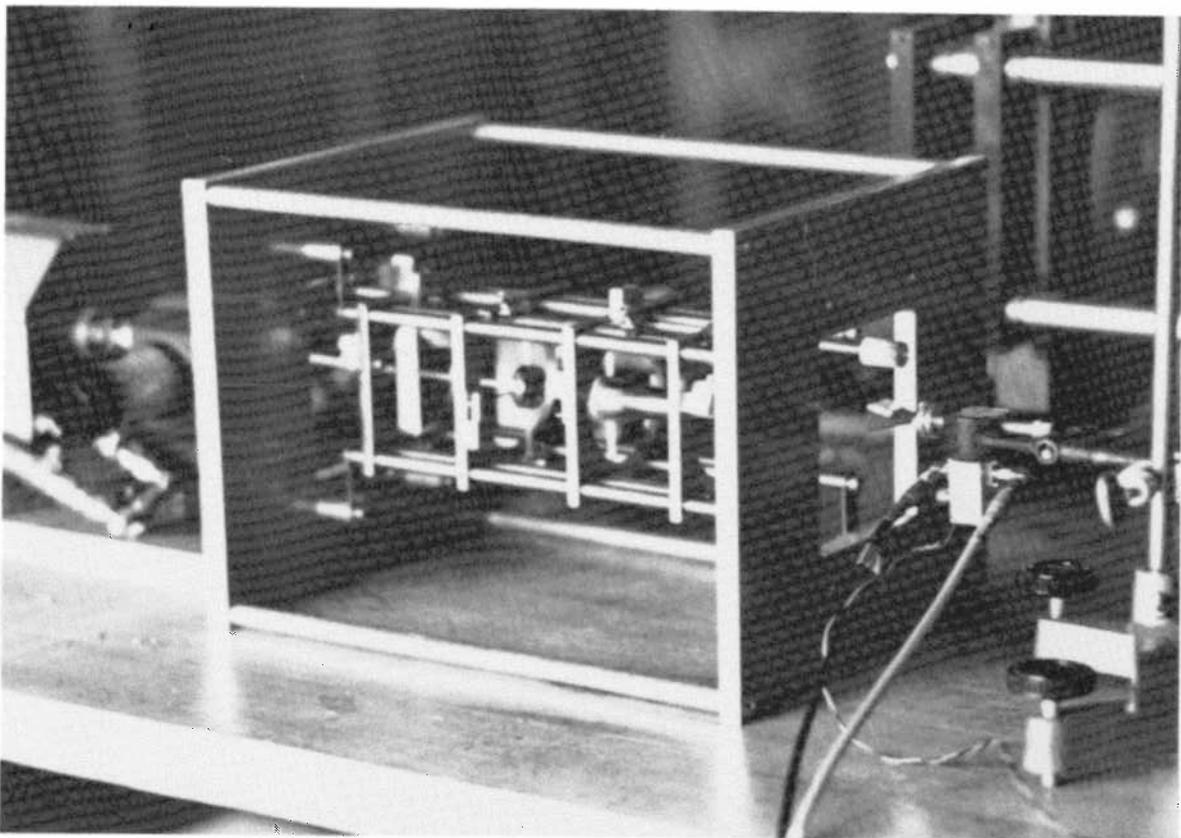


Schéma de principe du Gyrotron quasi-optique



Essai sur table de la cavité quasi-optique à 120 GHz.





Construction de la halle gyrotron - laser infrarouge lointain
18 avril 1985 - Mise en place du transformateur nécessaire à
l'alimentation électrique du gyrotron quasi-optique

4.5 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. La physique des plasmas ne coupe pas à cette approche, bien au contraire.

Les travaux du CRPP sont bien sûr essentiellement consacrés à l'étude de l'état plasma. Ils se concentrent sur la description des plasmas confinés magnétiquement, sur leur équilibre et leur stabilité, sur la physique de chauffage - thème de recherches expérimentales du TCA -, et sur les turbulences microscopiques qui existent à des degrés divers dans tous les plasmas. Des efforts particuliers s'organisent donc autour du développement des modèles mathématiques (numériques) qui permettront de comprendre et visualiser avant de concevoir et construire.

Avant d'entreprendre des projets de construction d'expériences nouvelles souvent très complexes, la communauté scientifique européenne et même mondiale envisage toutes les possibilités d'optimisation des paramètres des installations. Et c'est d'abord vers la physique qu'elle se tourne, car c'est là que les accords doivent être trouvés entre les expériences précédentes et les prédictions théoriques - tout en tenant compte des limites des lois trouvées par l'expérimentation numérique -. Le CRPP a déjà une longue expérience dans ce domaine et ses travaux sont particulièrement bien appréciés, tant au niveau des études de stabilité du plasma et des limites de pression qu'on peut autoriser dans celui-ci, qu'au niveau des études du chauffage et du couplage des ondes à hautes fréquences au plasma.

Quatre domaines seront présentés lors de ces "Portes Ouvertes 1985" : l'étude de la stabilité et celle de l'équilibre du plasma d'une part, puis l'étude du chauffage par hautes fréquences et le transport de l'énergie d'autre part.

4.5.1 Équilibre et stabilité.

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.

On peut illustrer ces deux états d'équilibre par le schéma suivant :

La boule au fond du creux représente l'état stable. Si le système est perturbé par un léger déplacement, la boule se mettra en mouvement mais retournera à sa position initiale d'équilibre. Par contre, une petite perturbation, exercée sur une boule au sommet d'une bosse, éloignera définitivement le système de sa position d'équilibre initial. C'est le système en équilibre instable qui ne peut exister que pendant un très court moment.

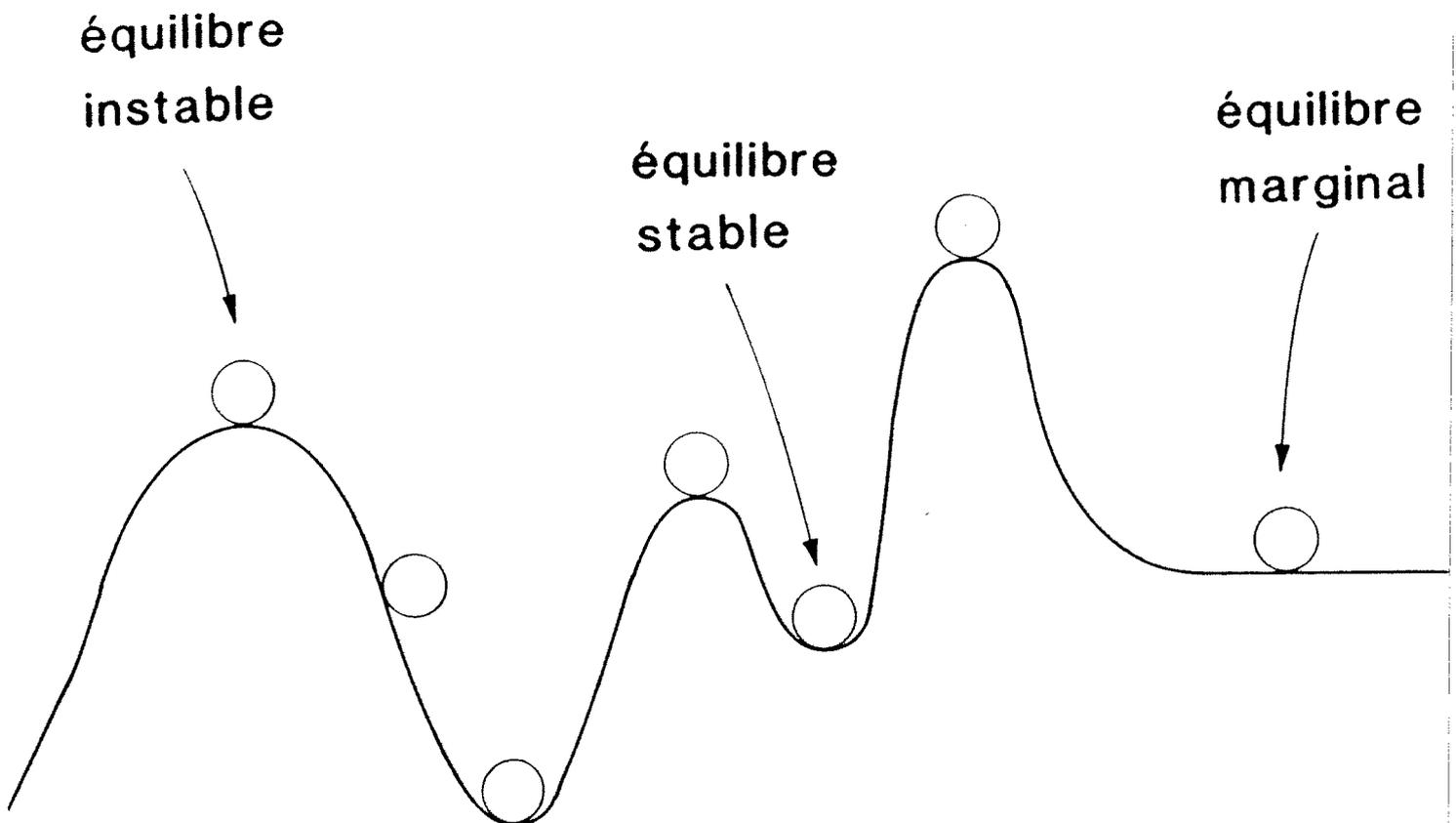
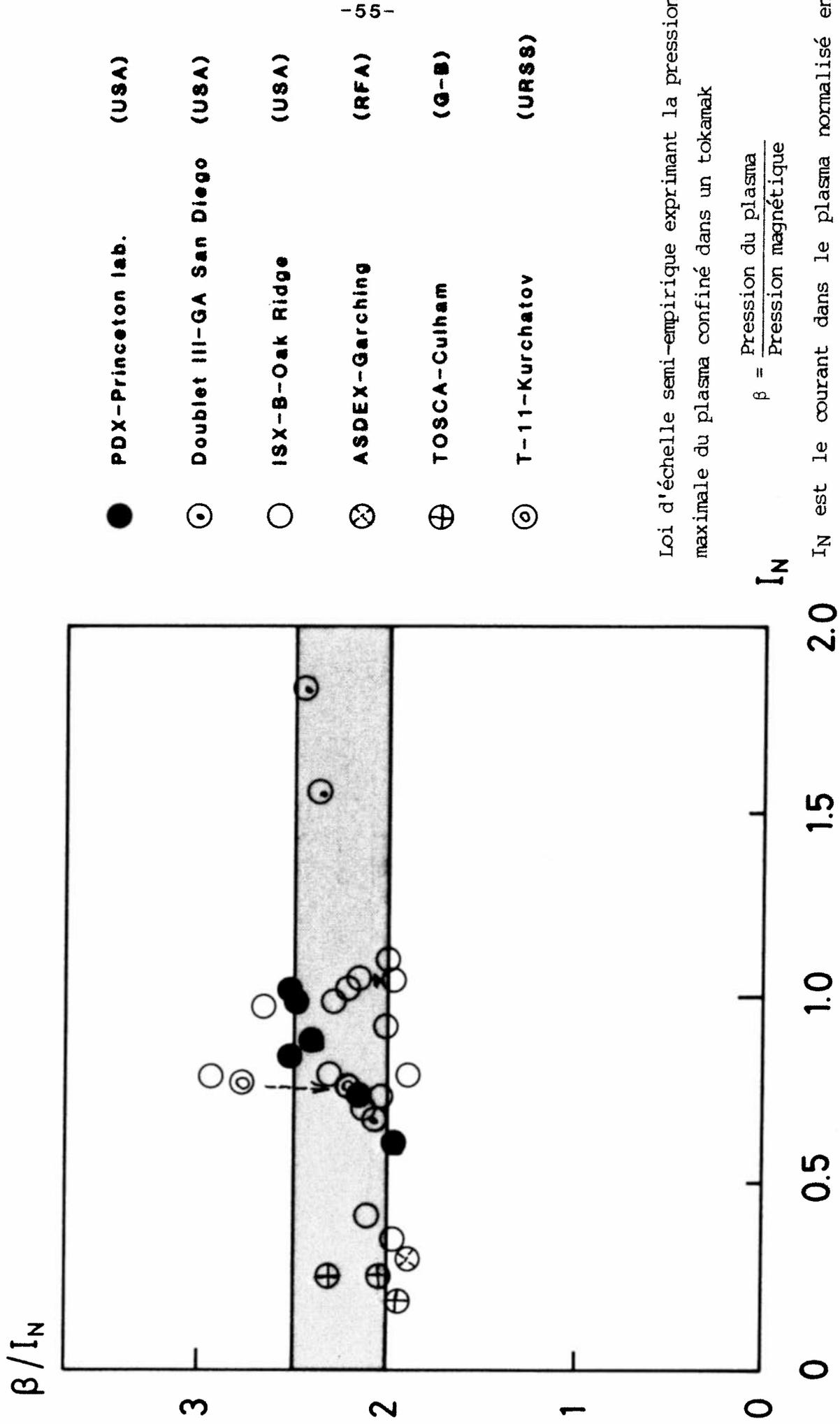


Fig.29



Loi d'échelle semi-empirique exprimant la pression maximale du plasma confiné dans un tokamak

$$\beta = \frac{\text{Pression du plasma}}{\text{Pression magnétique}}$$

I_N est le courant dans le plasma normalisé en fonction de a (petit rayon du plasma) et de B champ magnétique

$$I_N = \frac{\mu_0 I}{aB}$$

Fig.30

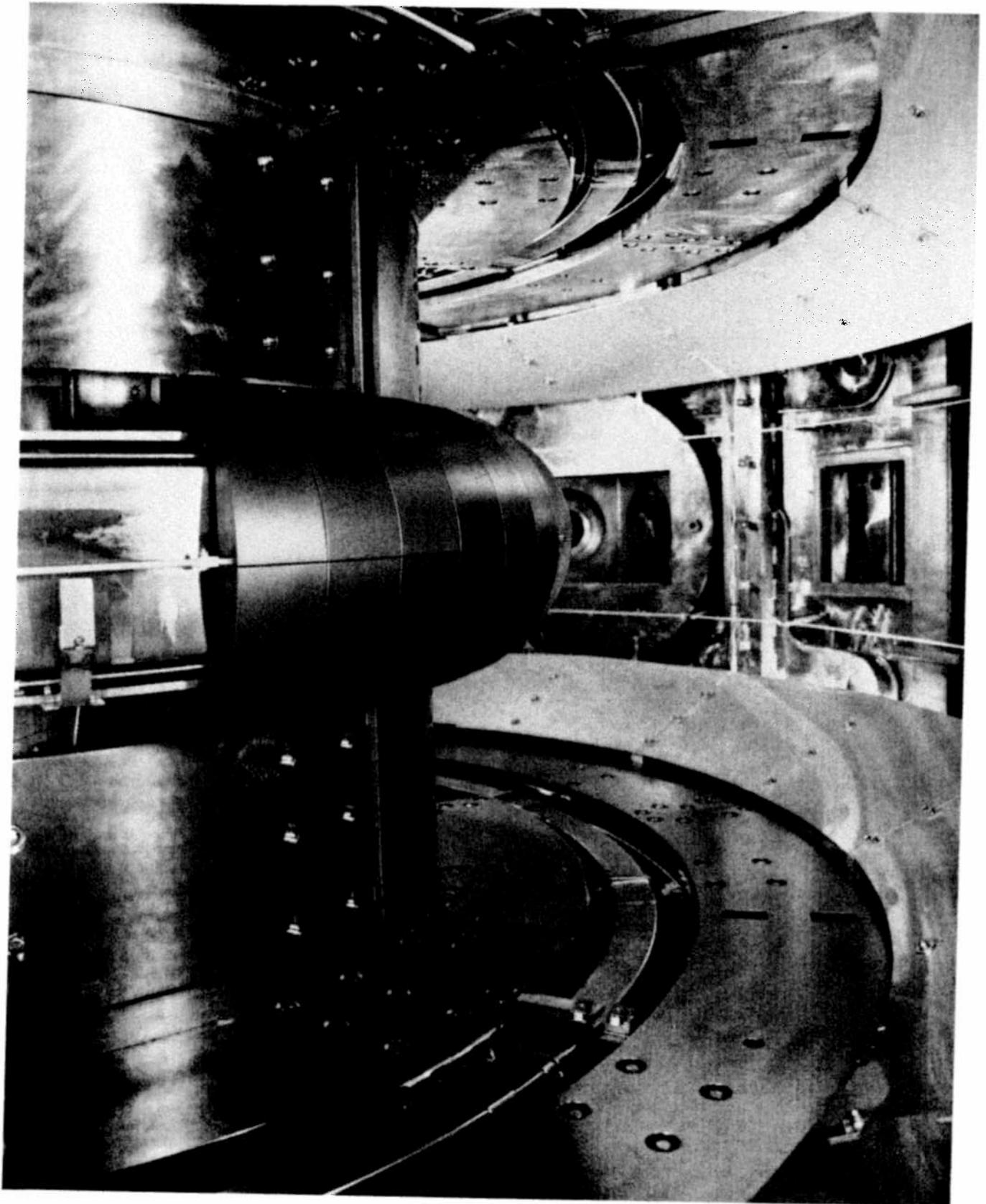
En partant de ces définitions, on peut bien vite imaginer qu'un plasma, placé dans un champ magnétique dont la topologie est quelques fois bien compliquée, peut être facilement perturbé et tout comme la boule au sommet de la bosse perdre l'équilibre. L'obtention de configurations magnétiques dans lesquelles le plasma est en équilibre stable est un des premiers problèmes à résoudre pour approcher des paramètres de la fusion des noyaux (10^{14} particules à $100'000'000$ °C maintenus ensemble pendant une seconde au minimum).

Le laboratoire s'est donc lancé depuis plusieurs années dans l'expérimentation numérique portant sur l'équilibre et la stabilité du plasma. Et une loi d'échelle utilisant trois paramètres globaux (champ magnétique, courant et petit rayon du plasma) a pu être dégagée, permettant d'exprimer la pression maximale d'un plasma pouvant être confiné dans une configuration tokamak. Cette loi est maintenant bien acceptée par la collectivité scientifique (Fig. 30).

Comment alors améliorer les conditions d'équilibre et de stabilité d'un plasma dans une configuration magnétique du type tokamak ?

Le travail de l'expérimentation numérique doit permettre de guider et aider l'interprétation expérimentale, ceci à partir des concepts simples et généraux. En concentrant les efforts sur l'éventail de ces configurations toriques, on constate qu'il y a deux possibilités principales.

- Allonger la section du plasma, pour augmenter le courant du plasma, et par conséquent, si la loi d'échelle reste consistante, augmenter pression limite du plasma. C'est d'ailleurs là un thème expérimental qui fait l'objet d'un futur projet au CRPP - le tokamak TCV, voir perspectives -.
- Déformer fortement la section du plasma en une forme de "haricot". Cette configuration a pour propriété majeure la stabilisation de certains modes à courtes longueurs d'ondes. Une expérience de ce type est en cours à Princeton, USA.



Experience PBX (Princeton USA).

Vue intérieure de la chambre à vide avec la bobine
de pression permettant de former la section "haricot".

Photo Princeton University (PPL)

4.5.2 Chauffage et transport.

Dans ce chapitre, trois thèmes principaux sont abordés : chauffage par ondes à hautes fréquences, génération de courant par ondes HF et théorie générale de la turbulence faible.

Comme nous l'avons vu, un domaine important dans la fusion thermonucléaire est le chauffage du plasma. Il faut porter les particules à une température de $100'000'000$ °C, et le chauffage dit ohmique ou encore résistif ne suffit pas. Il faut alors appliquer ce qu'on appelle des chauffages additionnels :

- en injectant de l'énergie dans le plasma sous forme de particules énergétiques : c'est le chauffage par injection de neutres. Ces particules rapides par collisions avec les ions du plasma libèrent de l'énergie et la transmettent aux noyaux.
- chauffage par haute fréquence. Un peu comme dans un four à micro-ondes où l'on chauffe les aliments, on installe dans une machine à plasma des antennes permettant de rayonner de l'énergie électromagnétique à haute fréquence. L'expérimentation numérique intervient dans cette étude, car à l'aide de modèle, on peut faire varier une grande quantité de paramètres, ce qui permet de dégager les facteurs importants de l'efficacité de couplage des ondes au plasma. Notamment par un choix judicieux des fréquences et des modes qu'on veut exciter - voire dans la construction et l'orientation des antennes -.

L'étude du chauffage HF a porté sur deux domaines de fréquence : l'onde d'Alfvén - étude directement liée à l'expérience TCA -, et l'onde cyclotronique ionique - utilisée pour le chauffage sur JET et qui fait l'objet d'un contrat d'étude avec JET -. Divers codes numériques uni-dimensionnels et bi-dimensionnels ont été développés et adaptés. Ils ont mis en évidence plusieurs voies possibles pour augmenter le couplage de l'antenne et améliorer le profil de la puissance déposée dans le plasma.

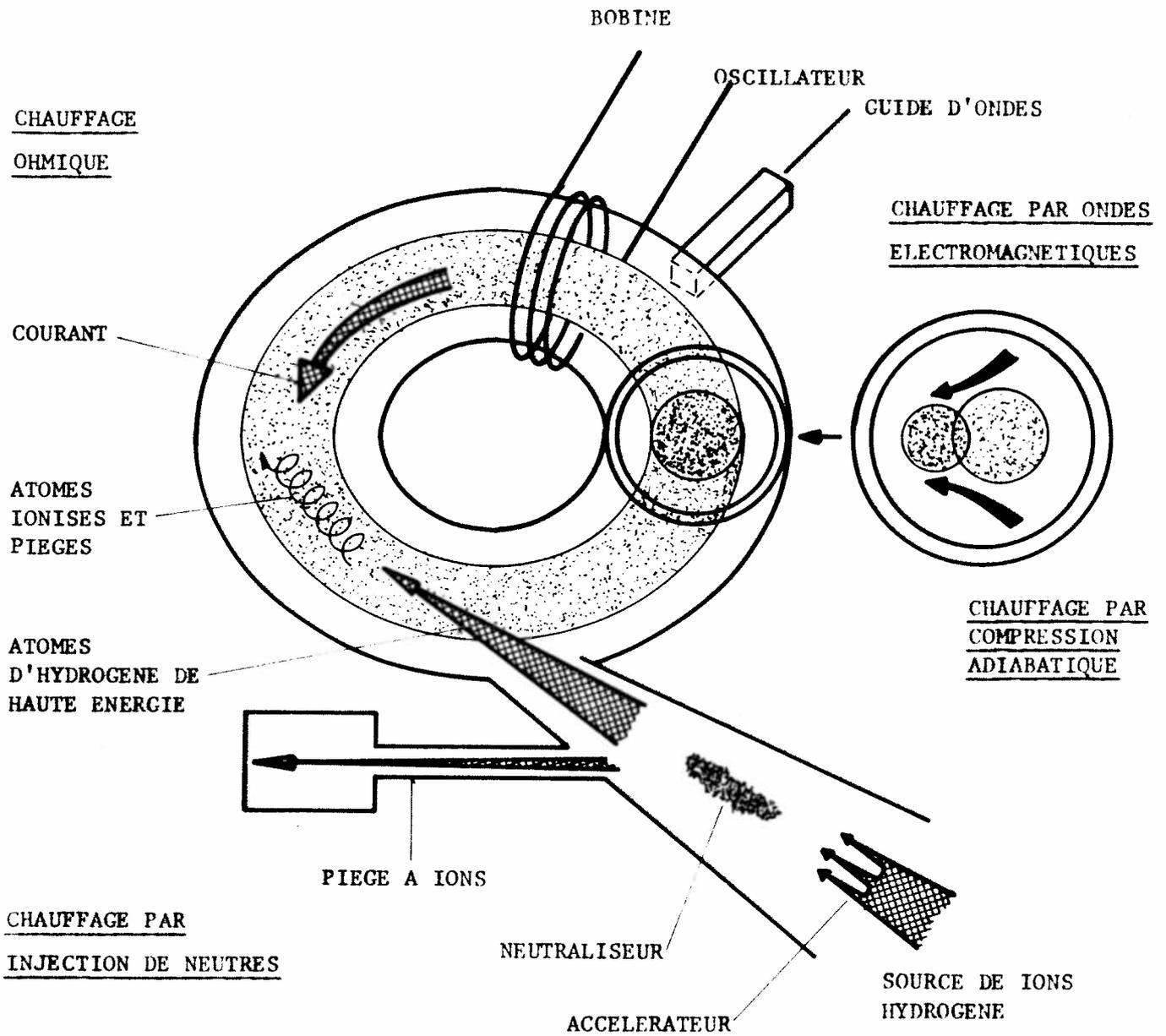
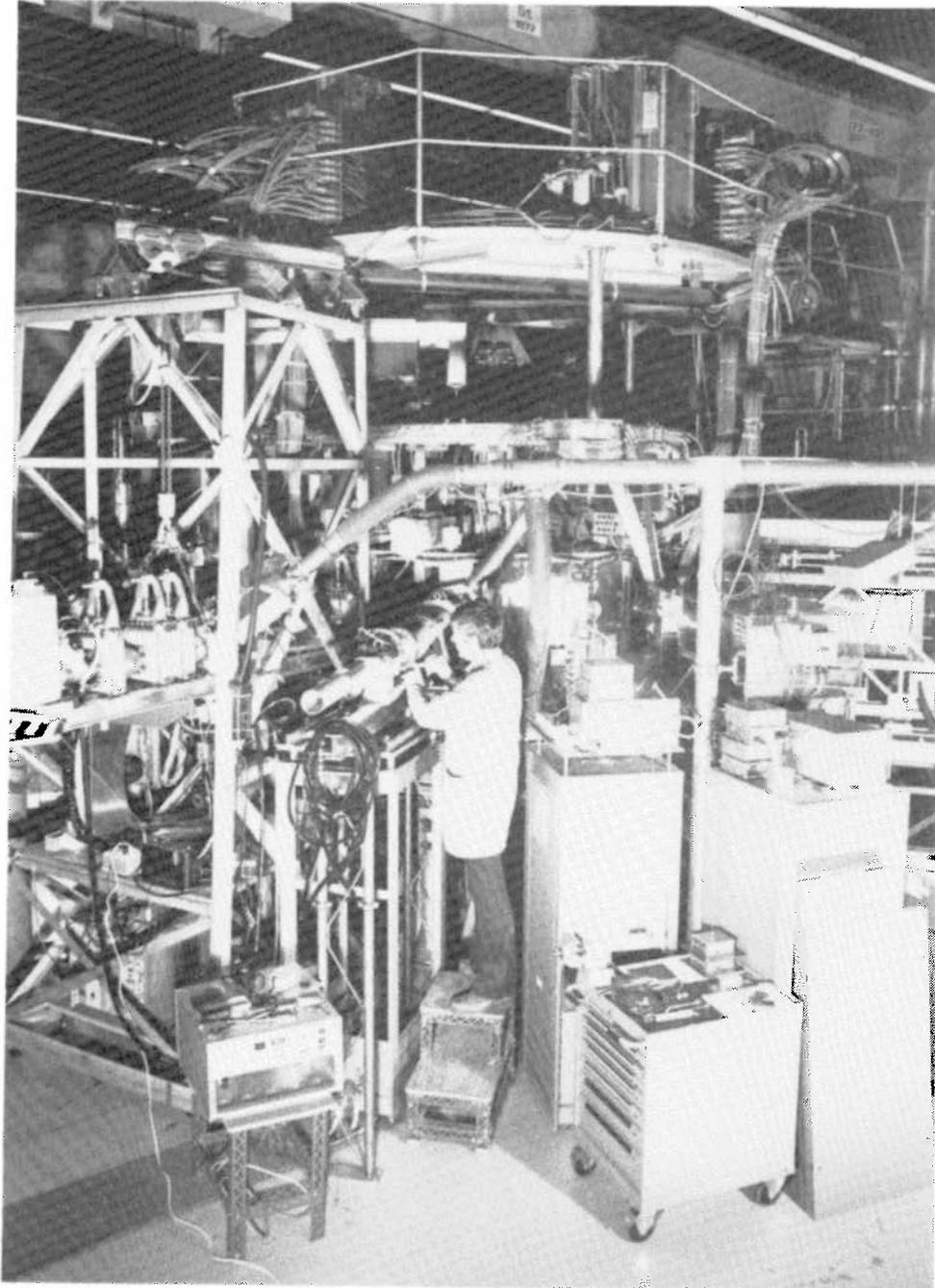


Schéma de principe des différents chauffages.

Fig.31

Les ondes peuvent être non seulement utilisées pour chauffer les particules mais aussi pour générer du courant circulant à travers le plasma permettant ainsi l'obtention de décharges de longue durée. Les divers générateurs utilisés dans la production du plasma ne permettent pas de longues impulsions de courant. Dans ce but, une étude portant sur le mécanisme physique de génération de courant par l'onde hybride inférieure a été poursuivie, ce qui devrait aboutir à une meilleure compréhension des résultats expérimentaux.

Enfin, une étude théorique a été consacrée à la turbulence faible appliquée à un plasma inhomogène immergé dans un champ magnétique. Une généralisation des équations de transport de la quantité de mouvement, parallèle au champ magnétique, fournie par les ondes pour chaque composante tensorielle du plasma, a pu être mise en relief.



Vue générale du Tokamak TCA.

Même si les "Portes Ouvertes 1985" ne concernent que l'activité du Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP) à l'avenue des Bains, il nous semble opportun de mentionner les travaux de recherche effectués autour du "Tokamak TCA", installé sur le site de la nouvelle EPFL à Ecublens.

Cette séparation géographique des deux sites expérimentaux du CRPP ne va d'ailleurs pas sans problème, principalement au niveau des liaisons de service et de travail. La situation devrait se normaliser vers 1990, quand le CRPP sera à nouveau réuni sur le site de l'EPFL à Ecublens.

5. PROJETS DE RECHERCHE DU CRPP A ECUBLENS

5.1 Le tokamak TCA, historique et objectif

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 déjà en service comme le projet européen JET (sous l'égide de l'Euratom) en Grand-Bretagne ou TFTR aux Etats-Unis, et celles en construction comme 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.

5.2 Fonctionnement d'un tokamak

Le fonctionnement d'un tokamak peut être décrit d'une façon assez simple.

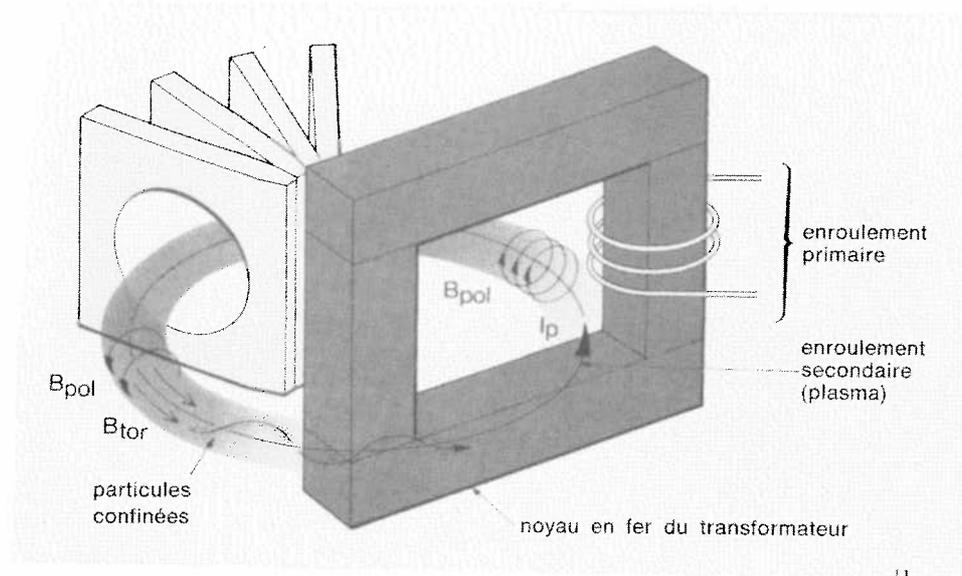


Fig. 32 - schéma de principe d'un tokamak

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 poloïdal 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}), poloïdal (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 com-

pression 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 à Chauffage d'Alfvén).

5.3 Description du TCA

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	$I_p = 20-170 \text{ kA}$
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 15/100^e 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 une fin rapide à l'existence du plasma (disruption).

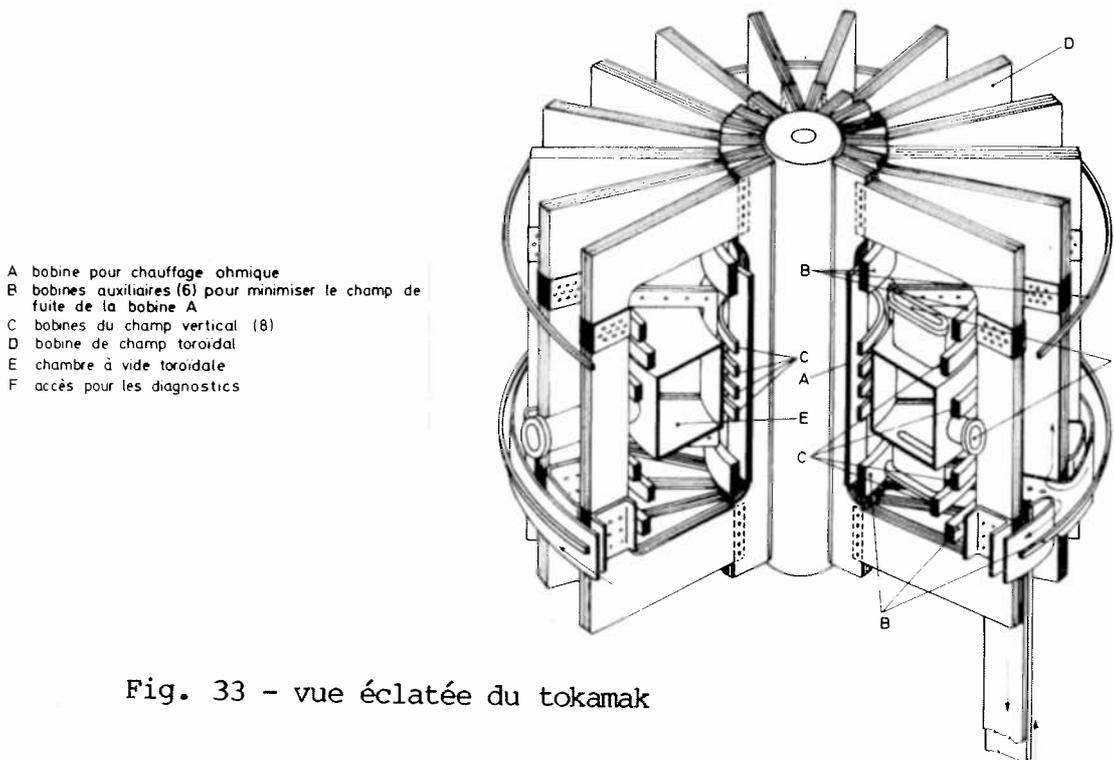


Fig. 33 - vue éclatée du tokamak

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 1 MJ (1 million de 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 400 kW (400'000 Watts) au plasma pendant 30 à 50 ms ($3/10_e$ à $5/10_e$ de seconde).

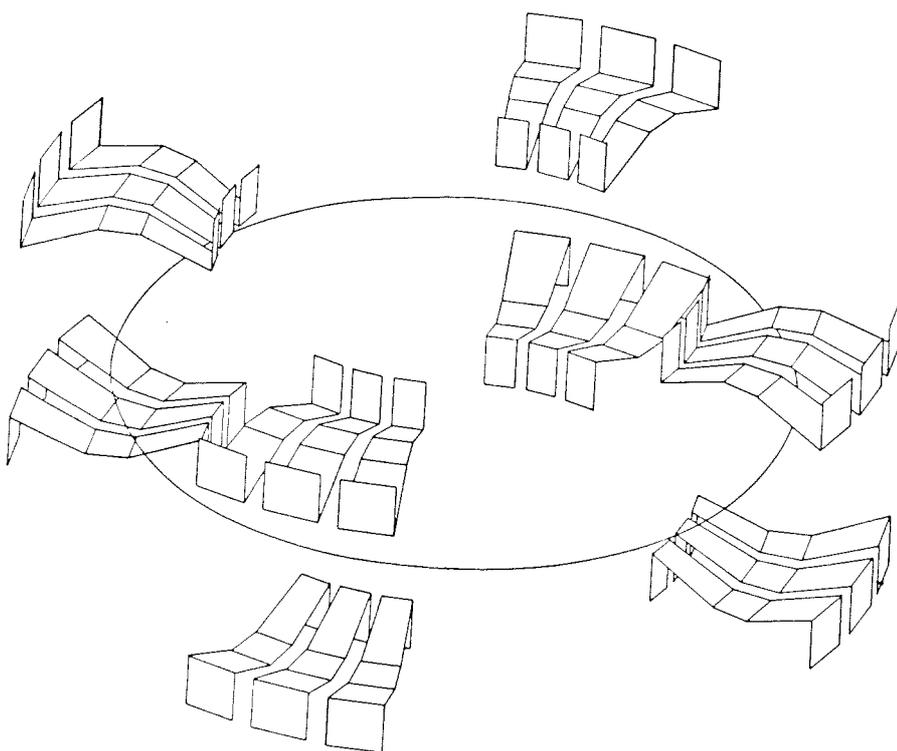


Fig. 34 - représentation en perspective des 8 groupes d'antennes

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'installer les systèmes de mesures - ou "diagnostics" - des paramètres du plasma.

5.4 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, etc. Dans ce but, tout un éventail de diagnostics a été installé sur le tokamak TCA.

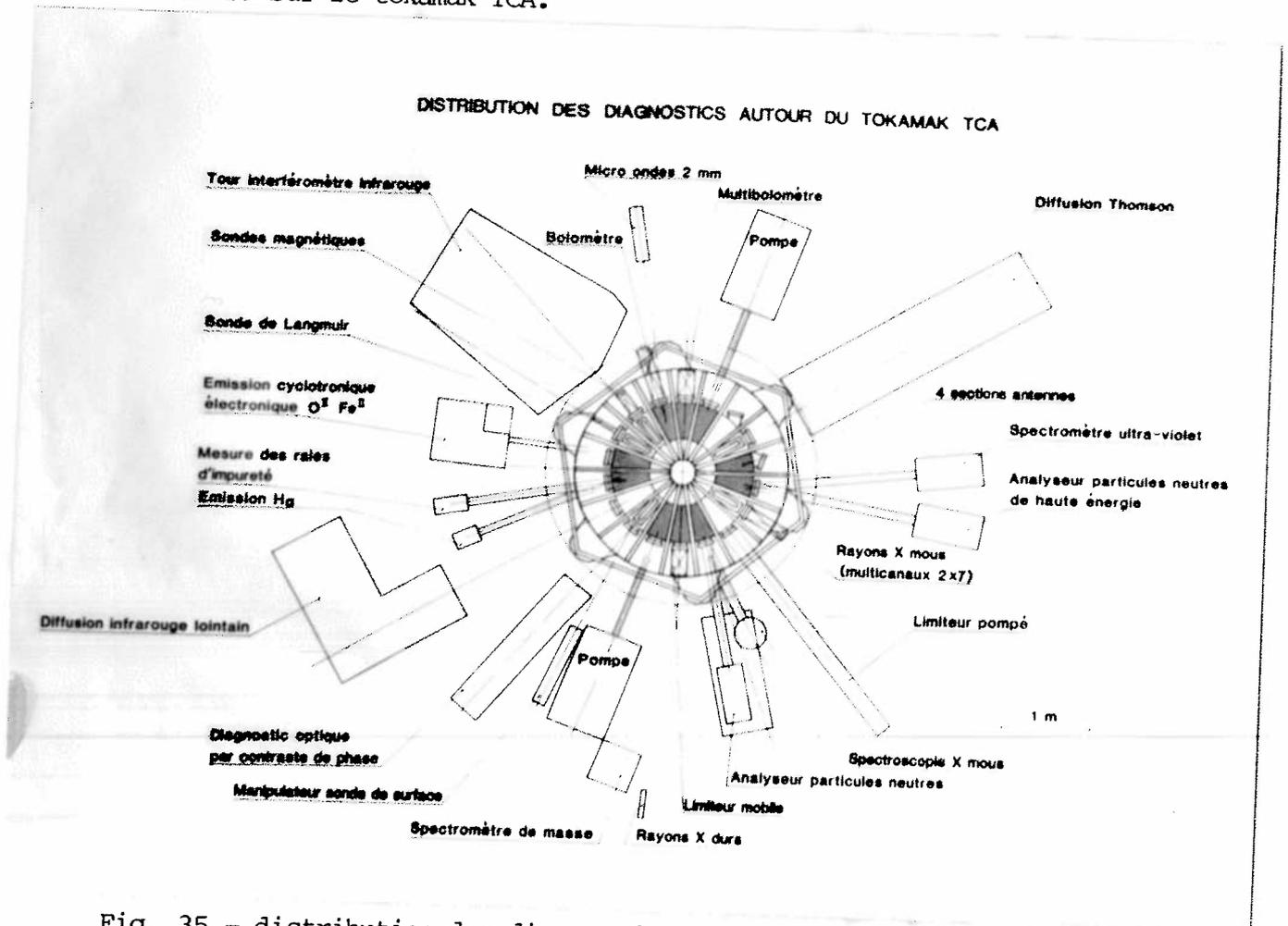


Fig. 35 - distribution des diagnostics autour du tokamak TCA

Voici une description de quelques unes de ces méthodes:

5.4.1 Interféromètre 2 mm

Ce système consiste en deux faisceaux de 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.

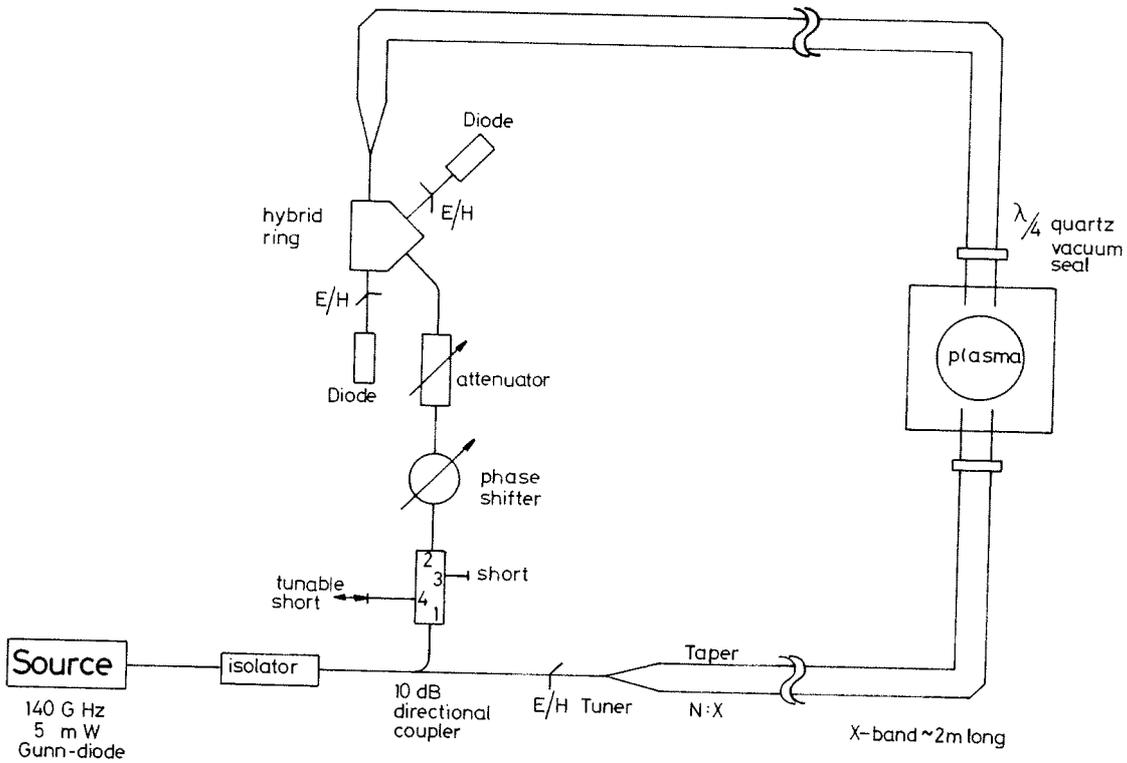


Fig. 36 - le système interférométrique 2 mm

5.4.2 Analyse de particules neutres

Dans cet appareil, acheté à l'Institut Ioffe de Leningrad, 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.

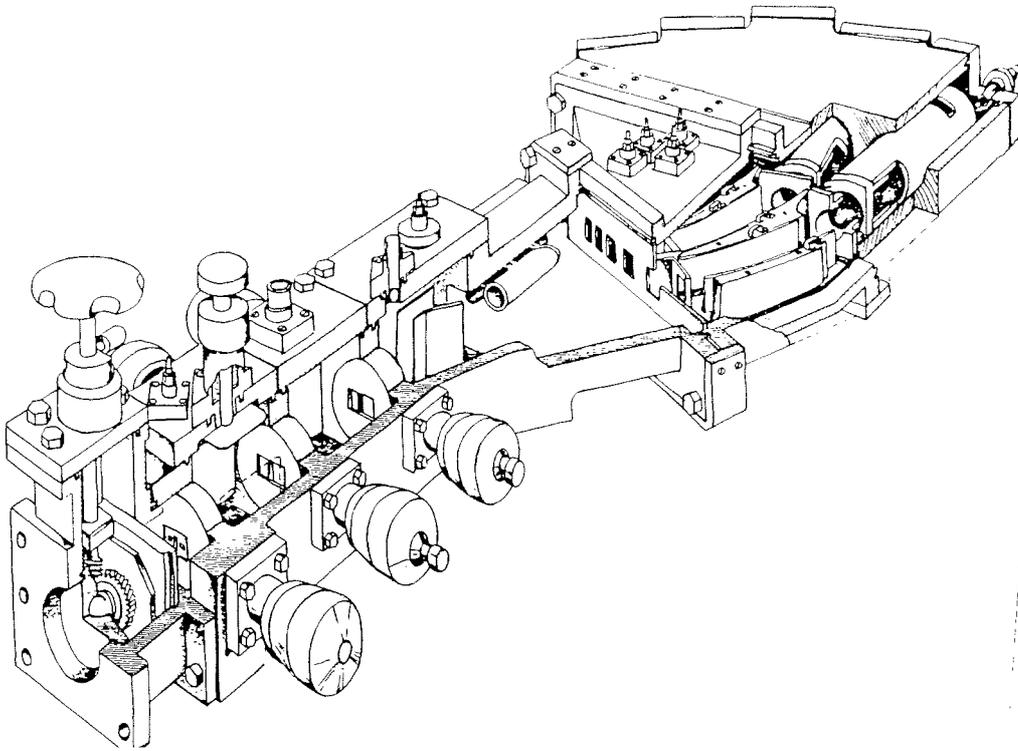


Fig. 37 - vue artistique de l'analyseur de particules neutres

5.4.3 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 μm). 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.

5.4.4 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 °C). Cependant, le domaine d'utilisation est restreint, la densité du plasma étant suffisamment importante, une partie de l'émission cyclotronique électronique se trouve être absorbée, ne permettant pas la mesure exacte du profil radial des températures.

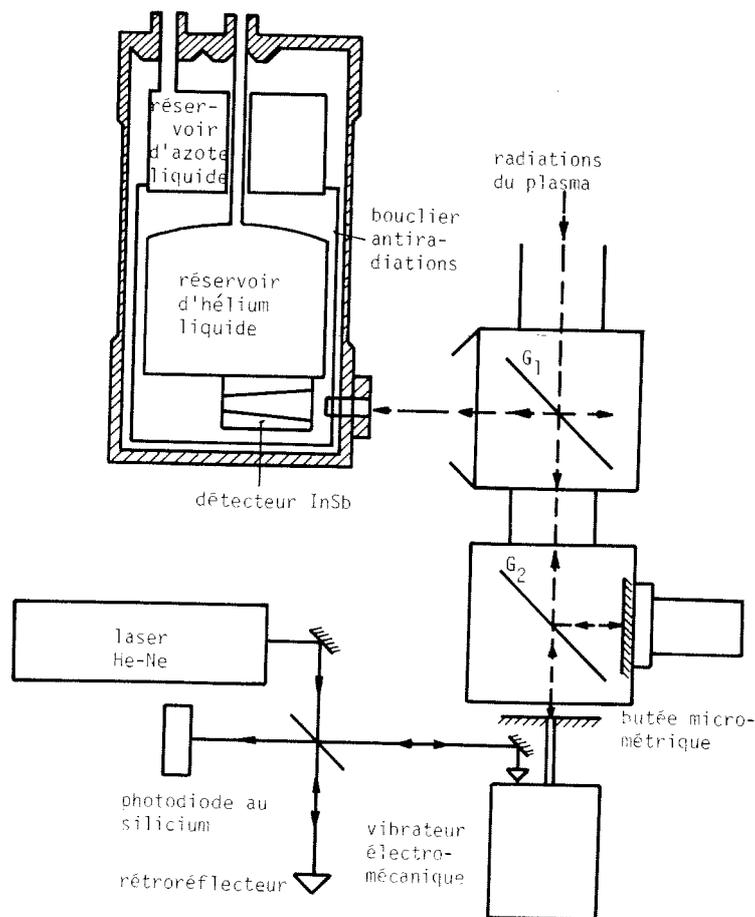


Fig. 38 - schéma de principe de la mesure de l'émission cyclotronique électronique.

5.4.5 Multi-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 s'agit d'un ensemble de 16 détecteurs au germanium qui permettent de déterminer le profil radial du rayonnement émis par le plasma. En termes de bilan énergétique, il s'agit de minimiser ce rayonnement, synonyme de pertes d'énergie.

5.4.6 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.

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 ces systèmes de mesure.

5.4.7 Diffusion Thomson (lumière visible).

Dans ce système, un faisceau de lumière rouge émis par un laser à rubis est focalisé dans le plasma. La lumière diffusée à 90° 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.

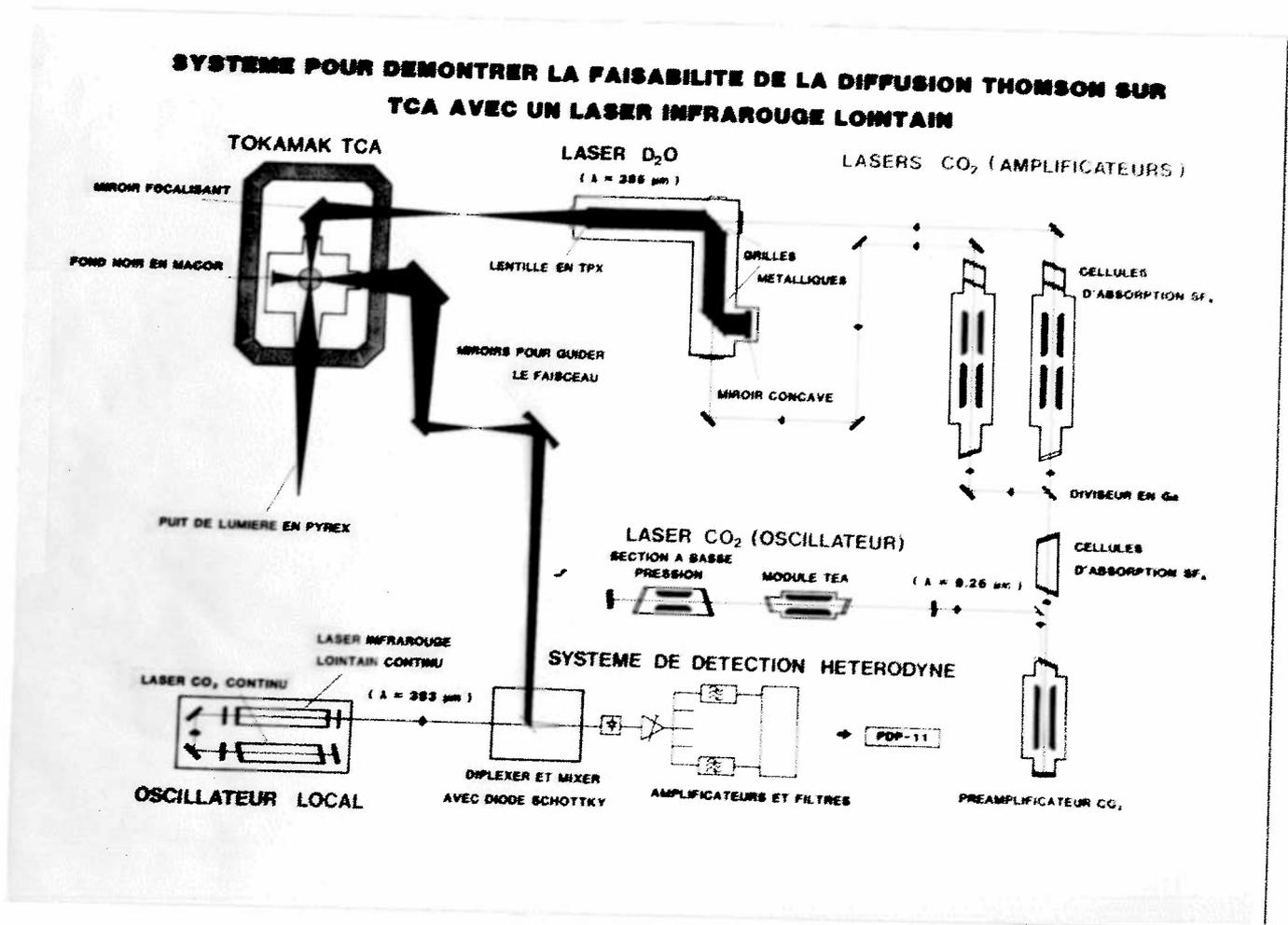


Fig. 39 - schéma de principe de la diffusion Thomson

5.4.8 Diffusion Thomson (infra-rouge lointain).

Selon un principe semblable, le CRPP a développé un laser D₂O (à eau lourde), émettant dans l'infra-rouge à 385μ et destiné à mesurer localement la température ionique du plasma. Ce laser, pompé lui-même par un laser CO₂, a une puissance de 150 kW (150 mJ/1 μsec), ce qui en fait un des plus performants de ce genre au monde. Cette énorme puissance est nécessaire, car le plasma ne diffuse que la cent mille milliardième partie du faisceau laser, et qu'il faut évidemment que les détecteurs puissent encore mesurer un signal. L'installation actuellement au TCA a pu mesurer des photons diffusés et par là, prouver la faisabilité de l'expérience. Un laser 10 fois plus puissant actuellement développé au CRPP, sera installé prochainement sur le tokamak et devrait permettre de réellement mesurer la température des ions du plasma.

5.4.9 Système de contraste de phase.

Basé sur le principe du contraste de phase utilisé en microscopie, ce diagnostic s'apparente à un interféromètre. Il permet de mesurer les variations relatives ou fluctuations de la densité du plasma, causées par exemple par de la turbulence ou des ondes. A cette fin, il utilise un laser CO₂ continu, d'une longueur d'onde de 10.6 μ (infrarouge) et d'une puissance de 8 W. Ce diagnostic prometteur a été installé sur le tokamak fin mars 1985 et devrait fournir incessamment ses premiers résultats.

5.4.10 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 μm) par un laser à iodure de méthylène (CH₃I), lui-même pompé par un laser CO₂, 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 et la référence qui permettent d'établir le profil de densité du plasma.

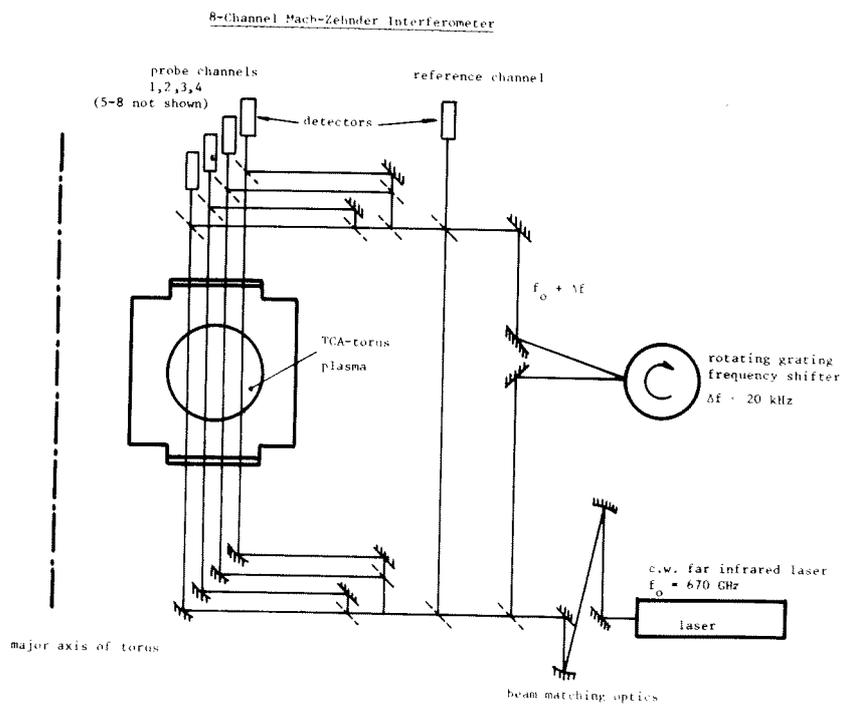


Fig. 40 - schéma de principe de l'interféromètre

5.4.11 Boucles et sondes magnétiques.

Diverses configurations de boucles et de sondes magnétiques sont installées sur le tokamak. Elles permettent de mesurer certains paramètres très importants, tels que la position du plasma, le courant I_p , les fluctuations du champ magnétique.

5.4.12 Acquisitions et traitement des données.

La durée d'un "choc tokamak" typique n'étant que d'environ 0,1 à 0,2 seconde, tout son déroulement est géré par un ensemble d'horloges (des "timers") et de déclencheurs temporisés. Les résultats de mesures des différents diagnostics sont automatiquement enregistrés dans des mémoires-tampons contrôlées par microprocesseur. Après le choc, ces mémoires sont lues par un ordinateur PDP 11-60, qui stocke les informations sur disque magnétique. Les physiciens peuvent alors, à l'aide de programmes existants ou écrits par eux-mêmes, lire, analyser et traiter ces données.

6. PERSPECTIVES

En ce qui concerne les expériences sur le tokamak TCA, la prochaine étape portera surtout sur l'augmentation de la puissance de chauffage additionnel. Un nouveau générateur haute fréquence de chauffage d'Alfvén doit être mis en service dès l'été 1985 grâce auquel nous attendons des résultats décisifs portant sur l'augmentation des températures (actuellement +30%), ainsi que sur les modes d'excitation des ondes et les problèmes liés aux impuretés. Par ailleurs, le fait d'augmenter la puissance RF injectée devrait confirmer ou infirmer la découverte, en 84 sur TCA, de soudaines transitions dans le comportement du plasma. Celles-ci apparaissent lorsque la densité du plasma varie, ce qui correspond à un déplacement de la couche de résonance avec l'onde.

Le générateur délivre des impulsions 4 fois plus longues (120 msec) et une puissance 3 fois plus élevée (1,2 MW) que le générateur actuel. Sa fréquence programmable doit permettre de maintenir des conditions d'excitation constantes au cours de l'impulsion haute fréquence malgré la dérive de la densité du plasma constatée pendant le chauffage. Une meilleure maîtrise des paramètres de l'impulsion haute fréquence doit également permettre l'étude des discontinuités observées dans les caractéristiques du plasma, dont on attend des résultats intéressants.

L'expérience de détermination de la température ionique du plasma par diffusion Thomson de la lumière d'un laser infrarouge lointain va aussi entrer dans une phase décisive. D'une part, l'expérience préliminaire réalisée sur TCA a permis d'obtenir des premières mesures indicatives de la lumière diffusée en superposant les résultats de plusieurs tirs. D'autre part, le grand laser a permis d'atteindre un record de puissance en délivrant 2 MW pendant 1 μ sec. L'installation à Ecublens de ce laser pourra débuter dès que la halle face à celle du tokamak TCA sera à disposition. Le début des expériences ne doit pas être attendu avant 1986.

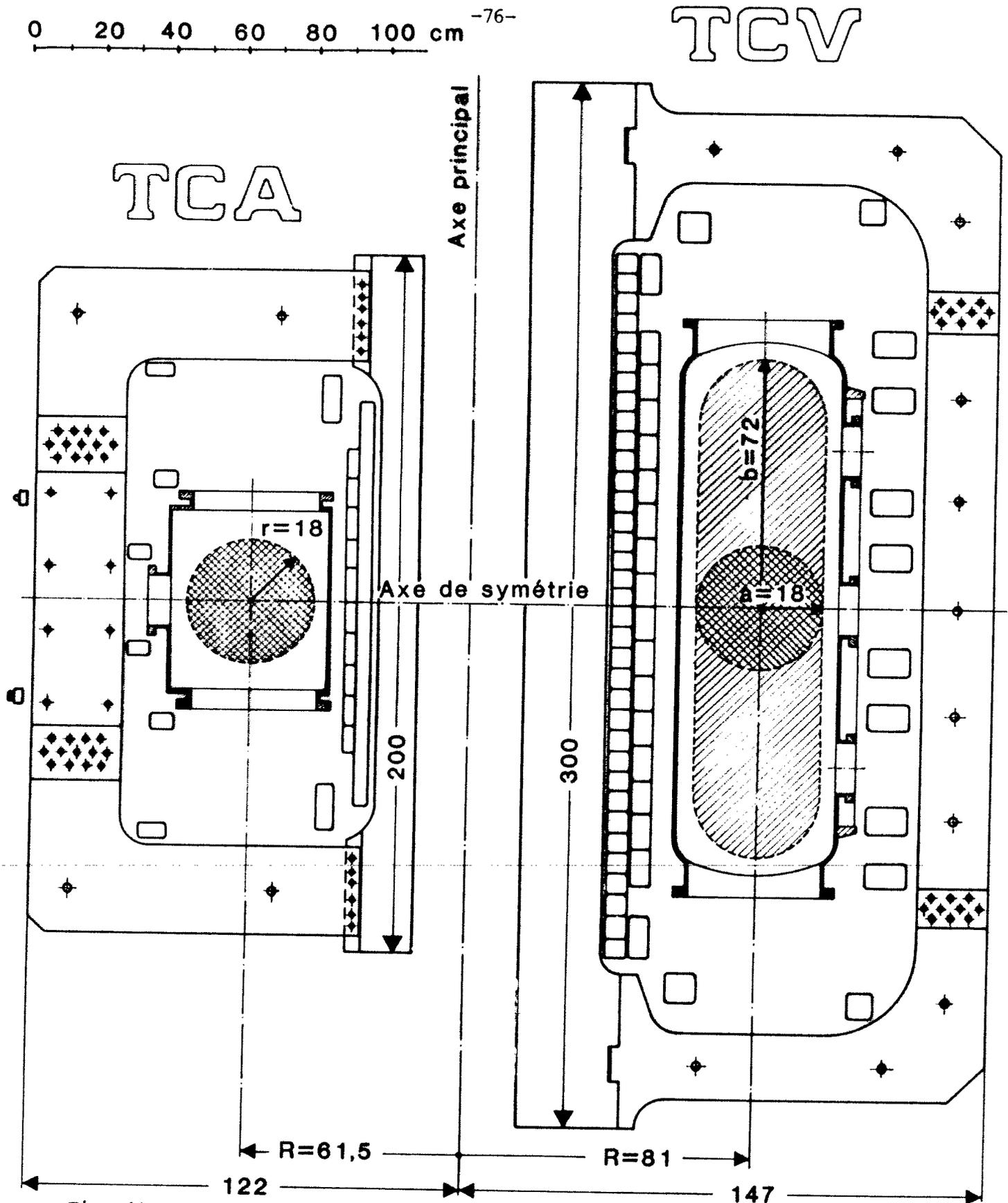


Fig. 41 - comparaison de la section du tokamak TCA avec celle du projet TCV.

Dans TCA la section est circulaire, alors que dans le projet TCV la section allongée peut être conçue avec une élongation de 4 ($a=18$ cm, $b=72$ cm).

Dans le domaine du gyrotron, 1984 a également été une année de préparation. Les différents éléments du banc d'essais : canon à électrons, bobines supraconductrices, système cryogénique et modulateur haute tension seront livrés et installés dans la halle en construction au milieu de l'année. On espère que les premières essais pourront être entrepris à fin 1985. Parallèlement, les chercheurs conduisent des études théoriques dans le but d'optimiser le système en construction et pour tester des idées nouvelles.

L'année 1985 sera importante pour le CRPP, le projet de tokamak TCV subira son examen devant les comités d'experts Euratom afin d'obtenir l'appui financier de celui-ci. Les comités formés des concurrents européens jugeront si le projet satisfait à un besoin programmatique dans le plan général européen et si ses objectifs scientifiques sont raisonnables. Le projet a déjà passé l'examen du Comité de Gestion. Il jouit donc du support des autorités d'Euratom. En parallèle avec cette analyse, le design sera poursuivi pour arriver à la fin de l'année à un projet détaillé qui sera alors examiné du point de vue de la réalisation technique en 1986 par d'autres comités d'experts. L'entrée en service de ce nouvel appareil pourra alors être prévue à fin 1988.

La caractéristique essentielle de ce tokamak est sa section fortement non-circulaire, contrôlable et variable (Tokamak à Configuration Variable). Son objectif est d'examiner si l'accroissement d'un ordre de grandeur de la pression du plasma par rapport au tokamak circulaire, que prédit l'extrapolation directe de la loi empirique vérifiée sur des tokamaks circulaires et faiblement allongés, est effectivement atteignable par un grand allongement de la section du plasma (élongation maximale de 4, voir Fig. 41). Un gain même bien inférieur constituerait déjà un succès important pour l'avenir du tokamak.

La collaboration avec les équipes de chercheurs des universités américaines de Colorado à Boulder et de Californie à Irvine dans le domaine de la physique fondamentale des plasmas prendra de l'ampleur au cours de l'année 1985.

Le projet JET entrera en 1985 dans la phase des premiers essais de chauffage additionnel du plasma. A la fin de l'année, on comptera 9 MW de chauffage installés, répartis en parts égales entre l'injection de faisceaux de particules neutres et par excitation à la fréquence cyclotronique ionique. Les chercheurs du CRPP détachés à JET attendent ces événements avec impatience car ils sont directement impliqués. Certaines des tâches définies dans le contrat avec JET touchent en effet la mesure des champs d'onde dans le domaine des fréquences cyclotroniques ioniques et l'étude du plasma de bord en présence de champ d'onde haute fréquence de grande amplitude.

7. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les personnes ayant collaboré à la rédaction de cette brochure et tout particulièrement MM. K. Appert, A. Heym, M.R. Siegrist, M.Q. Tran, F. Troyon et F. Yasseen. Ils expriment aussi leur gratitude à MM. P. Gorgerat, K. Hruska, J.-C. Magnin et S. Walt pour les dessins et à M. A. Gorgerat pour les photographies concernant le laboratoire.

Annexe 1

L'EURATOM

Créée en 1957 pour contribuer au développement des usages pacifiques de l'énergie atomique, la Communauté Européenne de l'Energie Atomique, ou Euratom, a pour buts essentiels la coordination et la stimulation des recherches, l'échange et la mise en commun des connaissances acquises, l'élaboration de règles homogènes de protection sanitaire, la fixation d'objectifs généraux devant déterminer l'orientation de la nouvelle industrie et enfin la création d'installations communes pour certains projets importants ou intéressant plusieurs pays.

Des états non membres du Marché Commun Européen peuvent adhérer à des projets spécifiques sans devoir participer à la totalité des programmes Euratom. C'est en tant qu'"Etat tiers associé" que la Suisse a conclu en 1979 un contrat de coopération avec Euratom en matière de fusion thermonucléaire, devenant ainsi après la Suède, le deuxième Etat associé. Il existe actuellement onze associations qui sont définies par le tableau ci-joint.

La structure du programme européen est "parlementaire" et "fédéraliste". L'exécutif est la Commission de Bruxelles qui, en principe, a le pouvoir de décision. Une hiérarchie de comités consultatifs permanents et ad-hoc, formés de représentants et d'experts de tous les pays membres et associés et dans lesquels la Suisse jouit de tous les droits, rapportent à un Comité supérieur, appelé CCPF (Comité Consultatif Programme Fusion). Ce comité a "de facto" le pouvoir de décision pour l'exécution des projets importants du programme général. Il joue le rôle d'un parlement. La Suisse jouit dans ce comité des mêmes droits que les pays de la CEE.

Le "programme fusion" d'Euratom comprend deux éléments, d'une part, le programme commun de base (fortement lié au développement de la filière tokamak), réalisé de manière décentralisée dans le cadre d'associations de caractère bilatéral entre les pays participants et l'Euratom et, d'autre part, le projet JET.

Le projet JET est contrôlé par une structure parallèle autonome dans laquelle le Conseil de JET est l'analogue du CCPF, et là encore, la Suisse jouit de l'égalité complète même lors du vote des budgets à soumettre au Conseil des ministres.

Annexe 2

LA PARTICIPATION SUISSE

La participation de la Suisse au budget de l'Euratom s'élève environ à 3,5 % de celui-ci. Une grande partie du budget global de l'Euratom a été investi dans la construction et 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 de recherches est effectuée principalement à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, au Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP). Une participation à ce programme est réalisée à l'Institut Suisse de Recherches Nucléaires (SIN) situé à Villingen et à l'Institut Fédéral des Réacteurs (EIR à Würenlingen). Grâce à l'association de la Suisse au programme Euratom, notre industrie participe à la construction de plusieurs grandes expériences européennes et au développement de nouveaux appareillages. Elle s'est montrée compétente et compétitive dans les domaines de haute technologie ayant participé ainsi à la construction du JET. Des mandats de l'ordre de 32 millions de francs suisses ont été ainsi obtenus par les entreprises suisses (décembre 1983).

Annexe 3

JET

I. JET, projet européen.

Inauguré au printemps 1984, l'entreprise communautaire européenne "Joint Undertaking" est installée à Culham près d'Oxford (GB). Cette institution régit en fait le projet européen JET. Le programme de JET est coordonné par la Communauté Européenne de l'Energie Atomique (Euratom), programme auquel ont souscrits la Suède et la Suisse, en tant qu'états associés. C'est le plus gros investissement que l'Europe a engagé dans une seule expérience pour la recherche d'une énergie de substitution au pétrole, charbon ou uranium pour la production d'électricité.

Le coût total de sa construction a été de l'ordre de 650 millions de francs suisses, c'est à dire proche de ce qui avait été planifié au cours de sa conception. Les fonds proviennent à 80 % du budget de la Communauté Européenne, à 11 % de la Grande Bretagne (pays hôte de l'installation) et pour le reste des contributions directes des pays membres du marché commun et des pays associés. La Suisse participe globalement - toute participation comprise - à environ 3,5 %.

L'exploitation scientifique et technique de JET est effectuée par une équipe européenne composée d'environ 500 personnes dont 1/3 de scientifiques. Tout comme les grands projets spatiaux européens, la machine a été réalisée de façon modulaire permettant ainsi la fabrication des divers éléments par des entreprises européennes dont les expertises techniques et technologiques se complètent. Par ailleurs, cette conception facilite le montage et les opérations d'intégration des composants construits à 99 % dans les 12 états membres et associés. Le "design" en soi est déjà une grande réussite d'ingénierie. Les entreprises suisses se sont montrées compétentes et compétitives, elles ont obtenu environ 5 % des adjudications du marché concernant la construction.

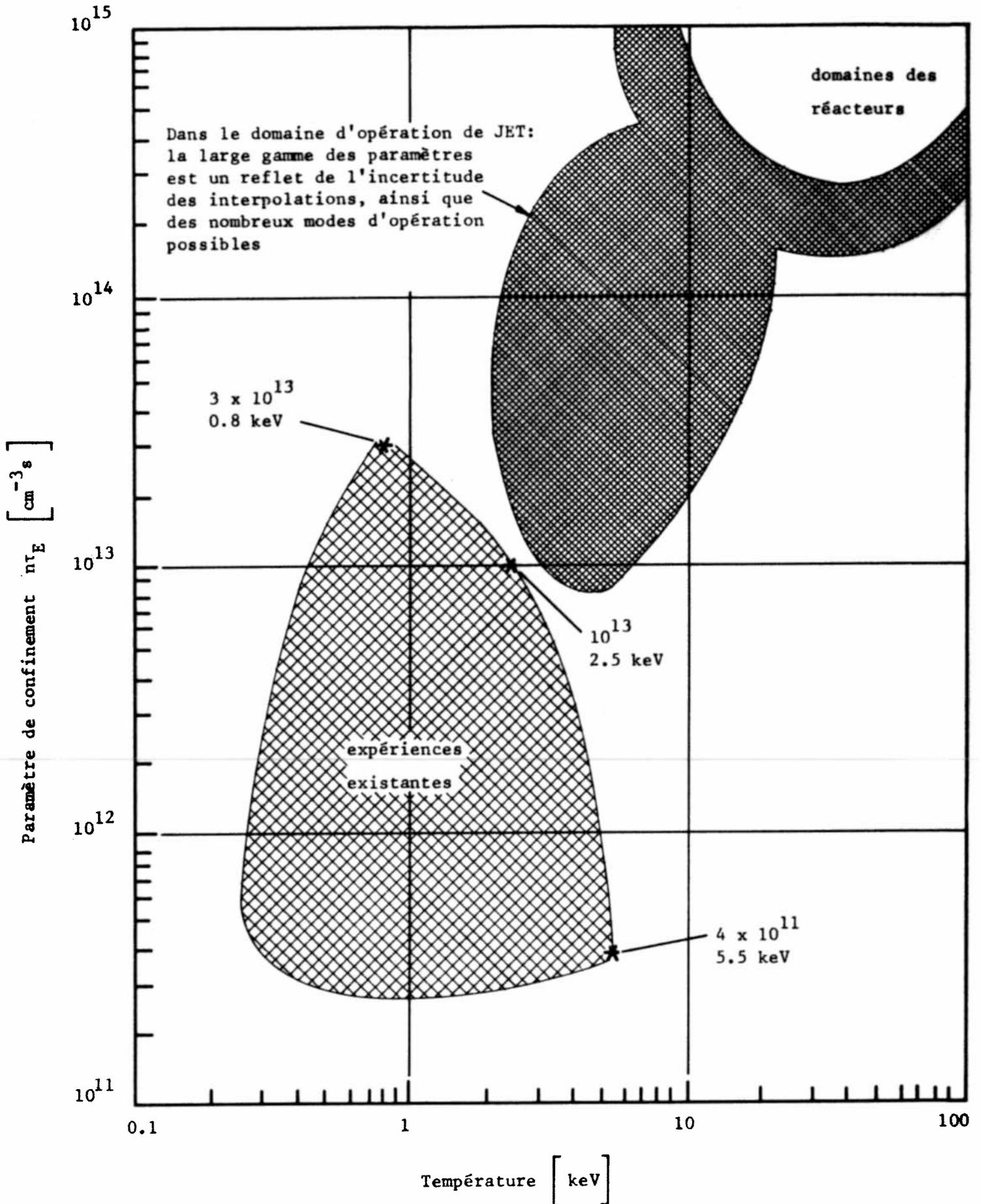


Fig.42

II. Objectifs et paramètres principaux de JET.

Dans la voie de la fusion "magnétique", JET représente l'expérience qui devrait se rapprocher sinon atteindre des critères de faisabilité scientifique; c'est à dire démontrer le bilan positif des réactions de fusion en laboratoire. Le plasma obtenu devra être soumis à des conditions physiques proches de celles existantes dans un réacteur. JET ne sera néanmoins qu'une expérience de physique, rien n'a été mis en oeuvre pour récupérer l'énergie issue des réactions probables. Les performances de JET ont été extrapolées à partir des résultats obtenus sur d'autres tokamaks, elles ont été projetées, dans les limites d'incertitudes, à partir des connaissances actuelles des mécanismes de transport, d'équilibre et de confinement, régissant le comportement du plasma et les pertes d'énergie à travers divers processus.

Ainsi, on a constaté que le temps de confinement de l'énergie était lié au carré du rayon du plasma. Au milieu des années 70, la nécessité de construire des grands tokamaks était alors largement acceptée : tous les grands projets qui voient le jour aujourd'hui ont été planifiés il y a dix ans. Ces lois d'échelles empiriques devront encore être vérifiées avant de définir tous les paramètres d'un prototype de réacteur, par ailleurs d'autres étapes restent encore à être franchies. Il faut tout d'abord progresser dans la compréhension de la physique des plasmas thermonucléaires et pour cela étudier notamment les phénomènes suivants :

- les propriétés de confinement et de stabilité du plasma lorsque les paramètres sont proches de ceux d'un réacteur.
- les interactions entre le plasma et les parois du tore, une des causes importantes des pertes d'énergie par radiations. Les impuretés métalliques arrachées aux parois viennent polluer et refroidir le plasma.
- le chauffage additionnel qui devrait porter le plasma aux très hautes températures requises pour la fusion, le chauffage ohmique ne suffisant pas.

- le comportement des particules d'hélium énergétiques, issues des réactions de fusion deutérium-tritium et pouvant contribuer au maintien de la température du plasma si leur énergie est bien confinée.

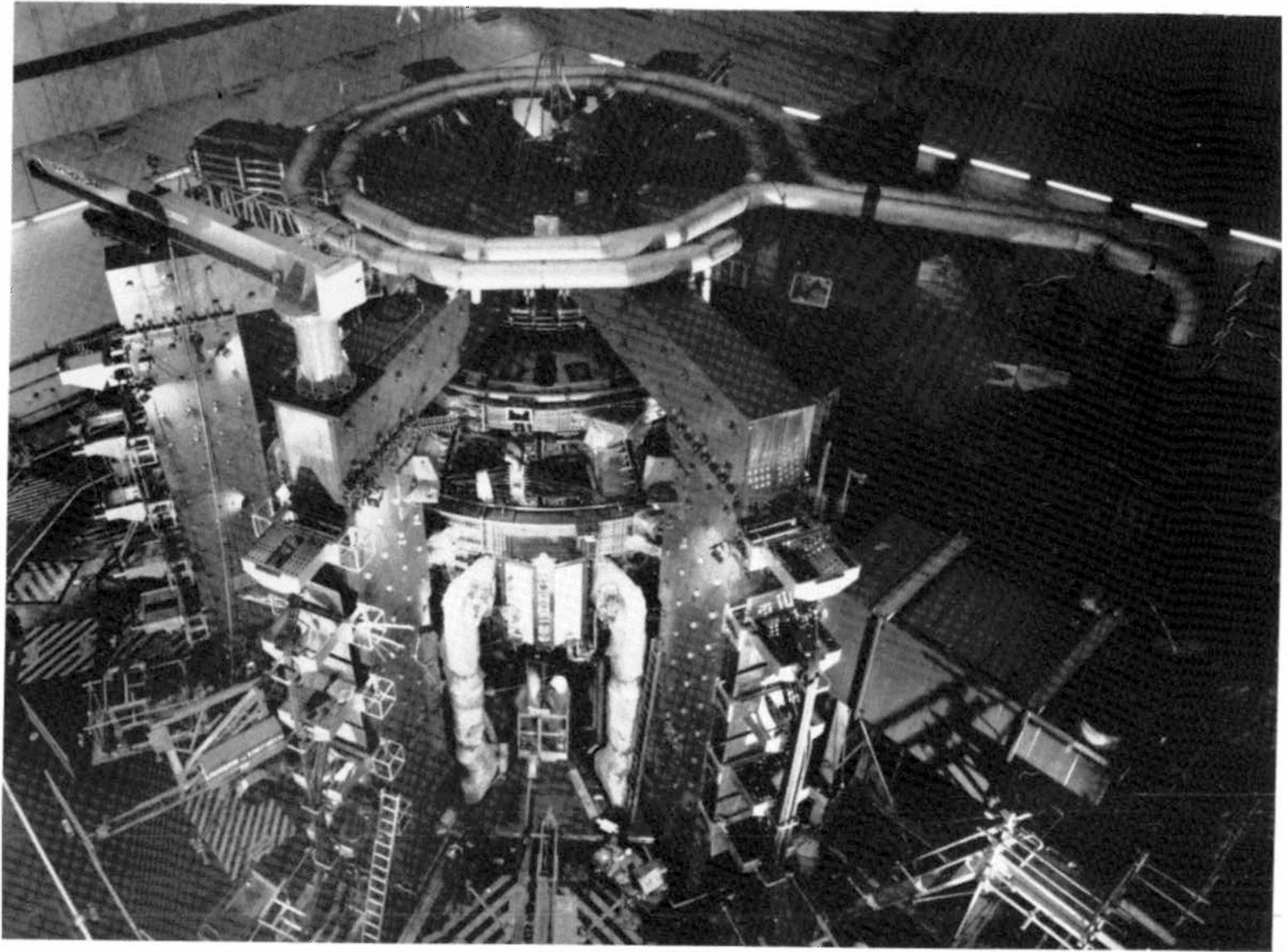
C'est pour toutes ces raisons que JET reste nécessairement une expérience pour l'étude du plasma, même si elle aboutit à la démonstration du critère de Lawson. L'expérience post-JET abordera en outre les thèmes technologiques et complètera JET, car il subsistera encore des problèmes physiques qui apparaîtront au cours de cette décennie.

JET est prévu, dans sa phase améliorée (section en D du plasma), pour qu'un courant de 4,8 MA y circule pendant une durée de décharge de 10 secondes chaque 10 minutes. La forme en D du plasma permet d'améliorer de façon notable les capacités de confinement d'un champ magnétique donné, ceci représente un atout majeur dans la conception de JET.

Démarée en juin 83, l'expérience a progressé de façon satisfaisante selon la planification prévue. En été 84, des courants de l'ordre de 3'700'000 (3,7 millions) ampères ont traversé un mélange de gaz d'hydrogène et de deutérium produisant ainsi un plasma à haute température dépassant 40'000'000 (40 millions) de degrés. La valeur maximale du temps de confinement énergétique (une mesure de la qualité de l'isolement magnétique) obtenue de 0,6 seconde, représente aussi un record bien qu'il faille le tripler pour un réacteur à fusion, la densité et la température nécessitent aussi un tel facteur multiplicatif. Ces résultats prometteurs ont été obtenus avec une puissance utile dans le plasma de 3 Mégawatts seulement (3'000'000 de watts), celle-ci étant investie dans le chauffage ohmique du plasma.

III. Description de l'installation.

D'une façon grossière JET peut être décrit comme un assemblage de différents composants énormes : une chambre à vide torique contenant le plasma, elle-même intégrée dans des bobines engendrant les divers champs magnétiques - torique, polaire et vertical -, un transformateur qui induit le courant dans le gaz d'hydrogène injecté dans la chambre à chaque impulsion et enfin diverses alimentations électriques. D'au-



Vue générale du Tokamak JET.

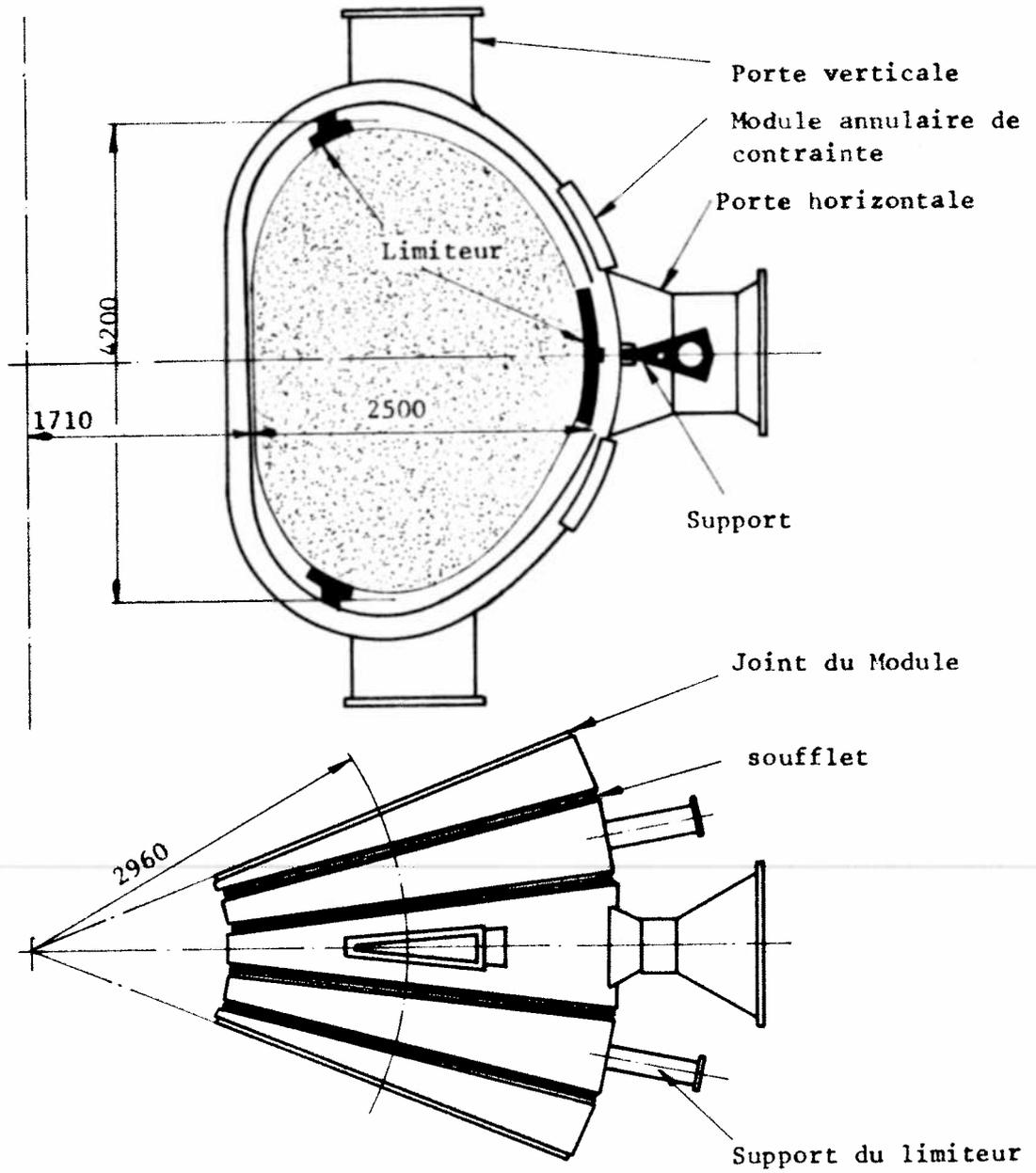


Schéma d'un module (octant) de l'enceinte à vide torique de JET.

Fig.43

tres systèmes complexes entourent le tokamak proprement dit : des installations utiles au chauffage additionnel, des appareils de diagnostic permettant de connaître les paramètres liés aux performances de l'expérience, des appareillages de contrôle et d'acquisition des données.

La chambre à vide, en inconel (alliage d'acier inoxydable et de nickel, aussi appelé Nicrofer), est constituée de 8 parties indépendantes ou octants, chacune d'entre-elles formée de parties rigides jointes à des soufflets flexibles de manière à conserver une résistivité électrique adéquate, le courant induit devant circuler dans le plasma et non dans la chambre métallique. Ces octants s'imbriquent les uns aux autres comme des tranches d'orange : la structure contenant les bobines venant les recouvrir, comme la peau d'une même orange. Un vide poussé est effectué dans la chambre avant d'y injecter le gaz d'hydrogène ou de deutérium; pour conserver le maximum de propreté, la chambre peut être étuvée à 500 °C pour accélérer le dégazage des parois. Les impuretés issues de l'enceinte et des diverses parties contenues dans le tore accélèrent la dégradation du confinement et de la température du plasma, en venant polluer le plasma d'hydrogène ou de deutérium.

A l'intérieur de la chambre sont disposés une série d'écrans qui protègent les soufflets d'un contact éventuel avec le plasma. De plus, des éléments déplaçables - les limiteurs - sont insérés dans la chambre aux endroits opportuns, ils permettent de fixer la position du plasma et sont réalisés, selon les expériences, en métal, graphite ou céramique. Ces limiteurs constituent un thème de recherches, largement investi à travers le monde, car ils sont une source d'impuretés supplémentaires, le plasma arrachant des particules à leur surface. Il existe des systèmes permettant "d'épurer" la surface du plasma de ces impuretés gênantes, ce sont les diverteurs. Ceux-ci, utilisés sur certains tokamaks ont permis d'étudier un comportement du plasma différent de celui dans une configuration ordinaire, mais ils n'ont pas été installés sur le JET car ils étaient à l'étude lors de la conception de JET.

Le champ magnétique torique est produit par 32 bobines en forme de D. C'est la première fois que des bobines ainsi fabriquées ont été

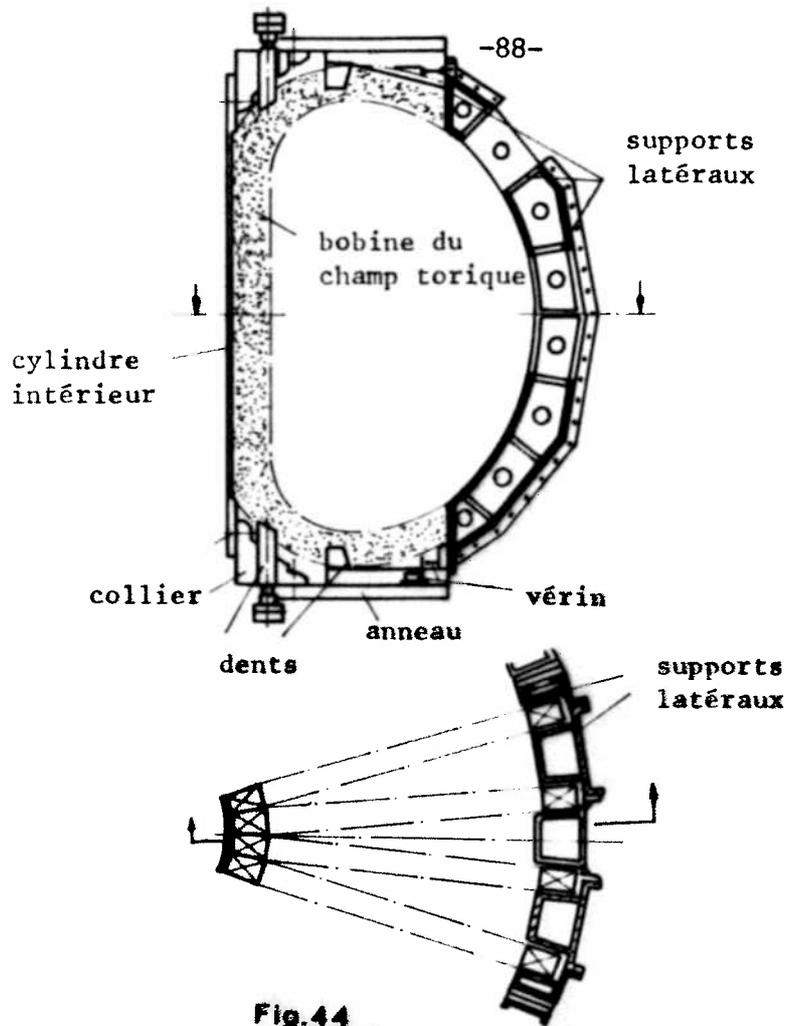
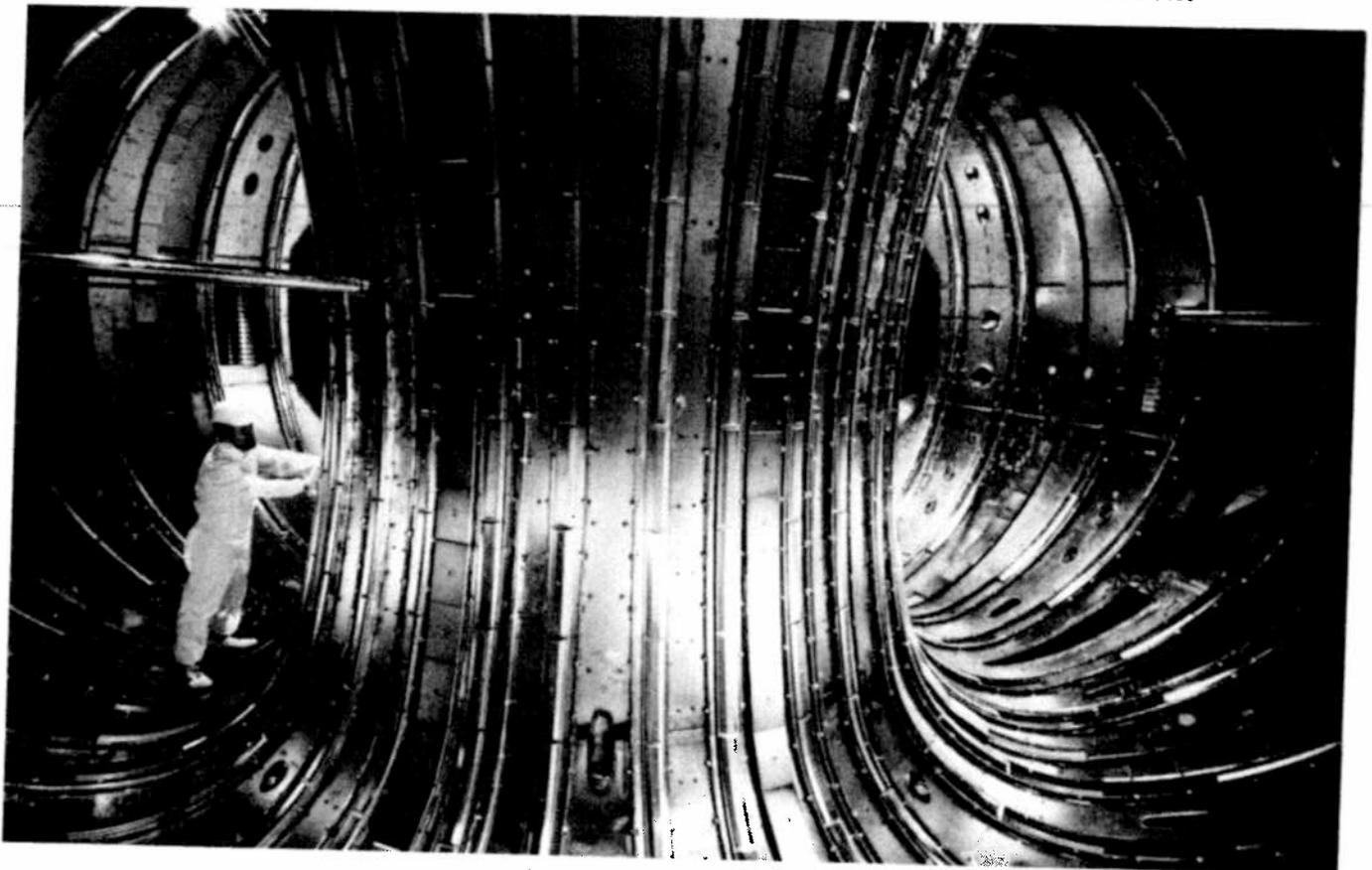


Fig.44

Intégration des bobines toriques dans l'armature de soutien.



Vue intérieure de la chambre à vide.

dessinées - une telle forme a été aussi employée pour les enroulements magnétiques du tokamak ASDEX en RFA, mais le "design" original en revient à JET -. Ces bobines en cuivre, refroidies à l'eau, peuvent créer un champ supérieur à 3,5 tesla (35'000 Gauss) pendant 10 secondes. Elles sont intégrées dans une structure mécanique, déjà mentionnée, qui supporte les forces dues à l'interaction des champs polaire et torique. Dans ces bobines, les champs sont pulsés et ce sont toutes les 10 minutes des forces de 2'000 tonnes qui s'exercent sur ces bobines, les pressant vers le centre.

Le champ magnétique polaire est créé par 12 bobines qui ont aussi d'autres fonctions, d'une part elles servent d'enroulement primaire au transformateur dont le plasma constitue le secondaire et d'autre part, elles contribuent au contrôle de la position du plasma. L'efficacité de couplage du transformateur est renforcée par l'adjonction d'un noyau de fer à 8 branches, comme dans les transformateurs utilisés couramment dans le réseau électrique. Cette structure réduit aussi le champ magnétique à l'extérieur du tore, ce qui est un avantage pour l'injection de particules neutres utilisées dans le chauffage additionnel.

L'alimentation électrique utilise deux lignes à haute tension. La puissance pulsée est assurée par un réseau à 400 kV transformé à 30 kV. Les besoins annexes, moteurs, pompes, compresseurs, sont assurés par un réseau à 132 kV redistribué sur le site par des lignes à 11 kV et 415 Volts. Les bobines créant les champs magnétiques torique et polaire sont alimentées par deux générateurs à volants - machines tournantes - de 2'600 Megajoules chacun.

Deux méthodes de chauffage additionnel qui s'intégreront progressivement sur la machine - injection de particules neutres énergétiques et irradiation par ondes électromagnétiques - ont été adoptées en raison des performances obtenues sur d'autres tokamaks. L'injection de neutres sur le tokamak PLT à Princeton a permis d'obtenir des températures de 75 millions de degrés (record actuel), le chauffage par onde électromagnétique a démontré une bonne efficacité (50 % de l'énergie contenue dans l'onde peut être absorbée par le plasma).

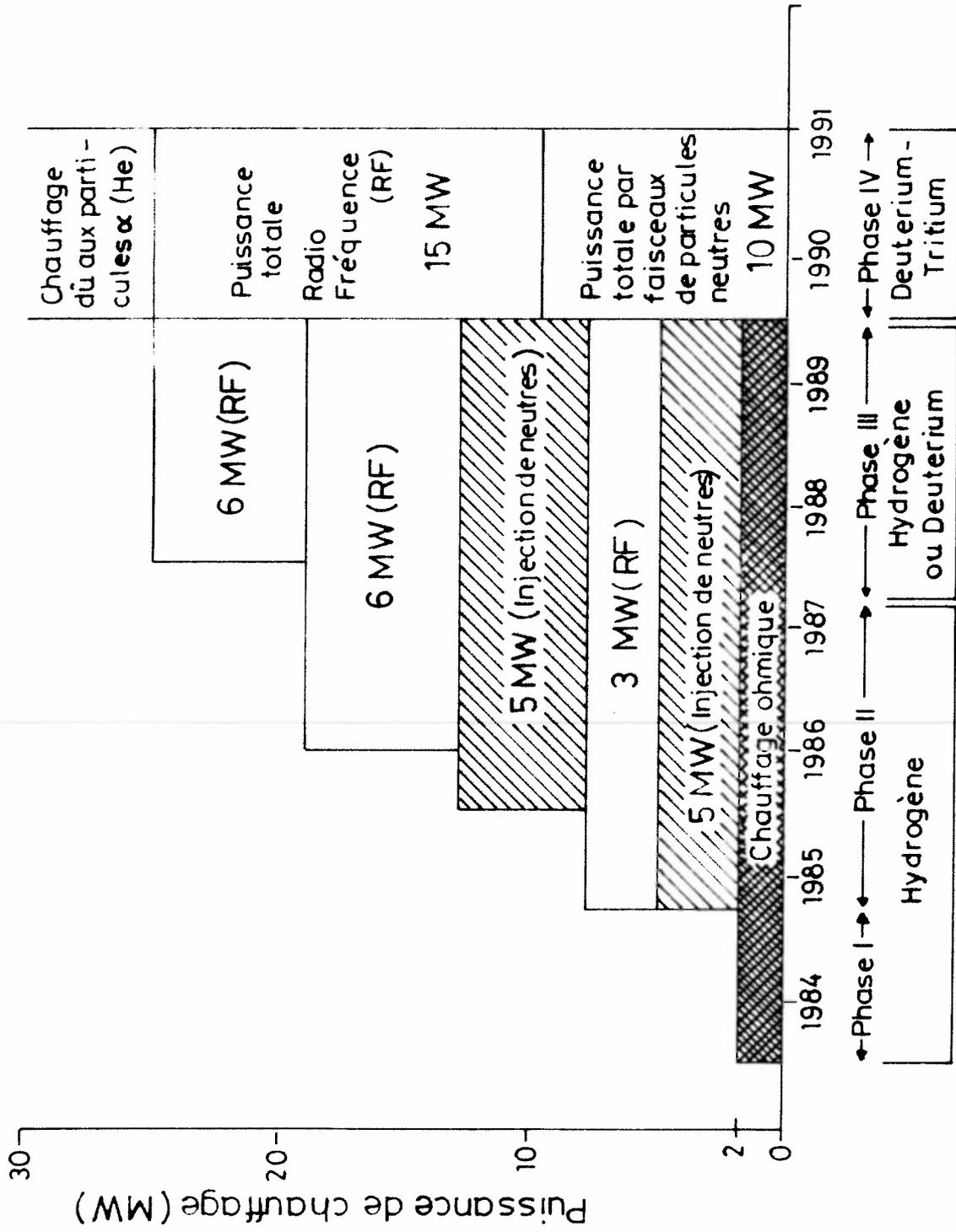


Fig.45

Diverses méthodes de diagnostics ont été proposées afin de vérifier les paramètres physiques du plasma. Certains sont du type passif et mesurent les rayonnements et les particules émis par le plasma, ou encore la position du plasma et les champs magnétiques. D'autres, du type actif, sont basés sur l'analyse des faisceaux électromagnétiques diffusés ou déphasés par le plasma. En général, ces diagnostics sont mis au point dans les laboratoires associés à l'Euratom et seront intégrés progressivement sur JET.

L'opération de la machine nécessite la gestion de 10'000 signaux digitaux et 1'500 signaux analogiques. Le contrôle et la commande de l'expérience sont assurés par un réseau de mini-ordinateurs. Les résultats des mesures sont également enregistrés et prétraités.

D'autre part, le fonctionnement au régime D-T ayant été prévu en fin d'exploitation expérimentale, JET a été construit dans un bâtiment muni de parois de béton de 2,8 m d'épaisseur afin de protéger les personnes et l'environnement du flux neutronique émis lors de ces décharges. La conception modulaire de la machine et le recours aux techniques de robotique et de télémanipulation permettront alors la maintenance et les modifications nécessaires. Pendant cette période à haut degré d'activation due aux neutrons rapides issus de la réaction D-T, 10'000 tirs de 10 à 15 secondes pourraient être programmés. Mais comme nous l'avons mentionné précédemment, ces essais ne s'effectueront que dans le cas de résultats positifs approchant de la limite du bilan d'énergie positif, où les particules d'hélium issues des réactions D-T participeront de façon certaine à l'auto-entretien de la réaction de fusion.

IV. JET comparé aux autres programmes.

JET est le plus grand des principaux tokamaks dans le monde : d'autres expériences du même type se trouvent aux Etats-Unis et au Japon. Aux Etats-Unis, le tokamak TFTR, à Princeton, a été mis en service en décembre 1982 et a atteint un courant de décharge de 1,5 million d'ampères, il est actuellement en cours d'aménagement (installa-

tion d'une injection de glaçons d'hydrogène** et d'un nouvel injecteur de neutres énergétiques), ce qui devrait lui permettre d'augmenter ses performances. Le tokamak japonais JT 60 devrait devenir opérationnel cette année, il sera opéré seulement en régime hydrogène et sa caractéristique importante est l'implantation d'un diverteur qui privilégiera le contrôle des impuretés. En URSS, un tokamak, le TI5, avec des enroulements supraconducteurs, est en cours de construction et devrait être mis en service en 1985, sa taille sera plus petite que celle de JET. En France, un tokamak du même type - Tore Supra - est aussi au stade de la construction; il devrait permettre aussi de rassembler les deux groupes de recherches en fusion - Fontenay-aux-Roses et Grenoble - sur le même site à Cadarache. Un autre tokamak, le Doublet III de la General Atomic à San Diego (USA), est en cours de transformation, une chambre à vide torique plus grande est actuellement installée et devra permettre l'obtention de courant de plasma plus élevé. Ses performances vers l'ignition devront s'améliorer.

D'autres voies sont aussi explorées, notamment aux Etats-Unis où le miroir magnétique (MFTF-B), machine linéaire utilisant des aimants supraconducteurs à chaque extrémité pour empêcher les particules de fuir, devrait être opérationnel en 1987. Enfin aux Etats-Unis, encore les laboratoires de Lawrence Livermore et de Los Alamos ont des programmes intenses de recherches en fusion par laser, alors que celui de Sandia poursuit des études sur la fusion par particules énergétiques (ions lourds).

** Alcator C (MIT, USA) et TFR (Fontenay-aux-Roses, France) ont utilisé des injecteurs de "glaçons" d'hydrogène et de deutérium afin de recharger en combustible le coeur du plasma obtenant ainsi des décharges dont le profil de densité est piqué au centre, $n_e(0) > 2 \cdot 10^{15}$. On distingue une amélioration du temps de confinement et l'obtention d'un $n\tau \sim 6 : 8 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ font d'Alcator C une des meilleures machines à performance.

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

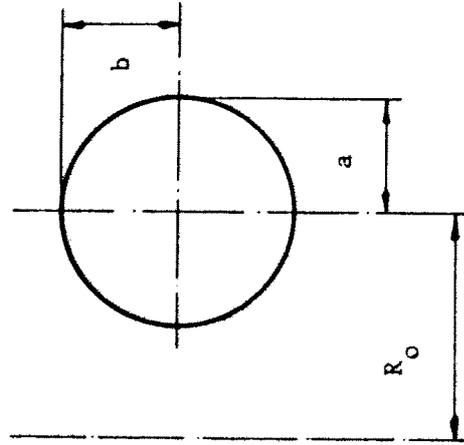


Fig.46

V. Conclusion.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, JET est encore une expérience de physique, elle devra être complétée par une expérience de technologie nécessaire à l'étude des matériaux à utiliser notamment dans la paroi de l'enceinte, la régénération du tritium dans le manteau de lithium en utilisant les neutrons de fusion. Les objectifs de cette expérience devront être définis dans la deuxième partie de cette décennie, grâce aux résultats acquis sur JET, mais aussi grâce aux travaux essentiels des associations. D'autres problèmes importants subsisteront encore et l'expérience post-JET aura bien des thèmes à affronter. Ceci devrait aboutir à la construction d'un réacteur de démonstration (DEMO). Un réacteur commercial pourrait ainsi être envisagé au siècle prochain dans le 2ème quart de siècle.

(Texte de P.J. Paris et F. Yasseen, publié dans Helios 3/84).