

AVRIL 1978

LRP 138/78

LA FUSION THERMONUCLEAIRE
ET
LES ACTIVITES DU CRPP

Brochure spécialement éditée pour les "portes ouvertes" 1978

Rédaction : P.J. Paris / avril 1978

Maquette : B. Schwab

Photographies : A. Gorgerat

<u>TABLE DES MATIERES</u>	page
1. INTRODUCTION*	2
1.1 La fusion thermonucléaire	2
1.2 Le plasma	3
1.3 Le réacteur à fusion thermonucléaire	4
2. LES ACTIVITES DU CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DES PLASMAS (CRPP)	6
2.1 La mission du CRPP	6
2.2 Les basses densités	8
- La Grande boîte à plasma	8
- Plasma Wave	9
- Machine DP (Double Plasma)	10
- Nessie	11
- Mirox	12
2.3 Laser	16
2.4 Le Groupe théorique	20
2.4.1 Magnétohydrodynamique (MHD)	20
2.4.2 Le confinement toroïdal	22
2.5 Les hautes densités	23
- Screw Pinch : chauffage par ondes d'Alfvén	23
- Chauffage à haute fréquence	25
- Belt Pinch	26
2.6 Le grand projet du CRPP : le TCA	30
- Construction d'un tokamak	30
- Choix des paramètres de la machine	31
- Diagnostics	33
2.7 Les services	34
3. APPENDICES	36
3.1 Appendice 1 : Le problème de l'énergie en Suisse	36
3.2 Appendice 2 : Vers un réacteur à fusion Projet européen : JET	39

*Cette partie est développée dans LRP 139/78, "Vers la fusion thermonucléaire contrôlée", CRPP (1978)

1. INTRODUCTION

1.1 La fusion thermonucléaire

Nouvelle source d'énergie, réalité et nécessité de demain

Qu'attendons-nous aujourd'hui d'une source d'énergie ? Qu'elle soit inépuisable, que le combustible abondant soit bon marché, qu'elle soit non-polluante, sans risques, qu'elle préserve notre éco-système; le réacteur à fusion thermonucléaire rassemble ces qualités.

- Le premier atout d'un tel réacteur est l'absence du problème d'approvisionnement en combustible. Le deutérium utilisé dans la fusion est universellement présent dans de l'eau ayant un certain degré de salinité; on peut aussi supposer que les réserves en lithium (autre combustible nécessaire à la production de tritium) ne font guère défaut. La fusion permettra donc de bénéficier d'une grande indépendance dans le domaine énergétique. Le deutérium contenu dans un litre d'eau contient une énergie équivalente à 300 litres d'essence.

- Le second avantage est l'absence de production de matières radioactives. A la différence de la fission, la fusion ne laisse pas de "cendres", hormis du tritium qui est immédiatement réinjecté dans le réacteur, car le combustible secondaire est nécessaire à son fonctionnement. En principe, rien ne devrait donc sortir d'une centrale atomique de fusion. Un problème cependant, la fusion libère des neutrons bien plus énergétiques que ceux de la fission, mais on espère pouvoir sélectionner des matériaux tels, que les risques d'activation soient minimisés.

- Enfin, un énorme avantage, cette technique ne présente aucun risque d'explosion, on peut donc imaginer que ces garanties de sécurité faciliteront la construction de centrales près des grands centres urbains.

- Avantage économique aussi, il n'est pas exclu que vers la fin du siècle, le prix du kilowatt nucléaire de fusion soit inférieur à celui de ses concurrents.

Mais quelles technologies devons-nous étudier pour réaliser un tel réacteur ? Et qu'est-ce qu'un plasma ?

1.2 Le plasma

Un morceau de soleil

Quatrième état de la matière et sans aucun doute le plus abondant - 99% de l'univers se trouve à l'état plasma - le terme "plasma" désigne un ensemble de particules neutres et de particules chargées (électrons et ions); c'est la charge électrique de ces particules qui confère au plasma ses propriétés extraordinaires. En effet, les propriétés physiques d'un milieu sont déterminées par la nature des interactions entre les particules le constituant. Alors que dans un gaz neutre les corrélations entre les mouvements de diverses particules sont données seulement par les collisions, les mouvements des particules chargés d'un plasma sont couplés par les champs électriques et magnétiques qui, à leur tour, sont le résultat des courants et des charges induits par l'agitation même de ces particules.

On rencontre l'état plasma dans les étoiles, dans certaines atmosphères de planètes - la haute atmosphère terrestre, l'ionosphère qui permet ainsi la communication radio, la magnétosphère -, dans l'espace inter-

planétaire et interstellaire. D'une façon plus proche de nous, nous trouvons le plasma dans les tubes fluorescents, les arcs électriques, les éclairs atmosphériques et aussi dans les flammes.

Le soleil lui-même est une énorme boule de plasma dont les mouvements se manifestent dans les taches solaires, les éruptions de matière et les tempêtes magnétiques. Il est constitué à 98% d'atomes légers (70% d'hydrogène, 28% d'hélium) et pour le reste de noyaux lourds. La température intérieure du soleil est de l'ordre de 10 millions de degrés permettant ainsi la fusion des noyaux d'atomes légers. Le soleil se comporte comme un immense réacteur thermonucléaire libérant de l'énergie rayonnée ensuite dans l'espace et dont on reçoit une infime partie sur la terre.

En quelque sorte les recherches actuelles en fusion thermonucléaire essaient de reproduire sur terre ce processus d'une façon contrôlée. Les recherches poursuivies sur le plasma relèvent donc de plusieurs domaines : l'astrophysique, la recherche spatiale, la physique du solide et surtout l'étude d'une nouvelle forme d'énergie : la fusion thermonucléaire.

1.3 Le réacteur à fusion thermonucléaire

Un morceau de soleil... en bouteille

A la différence de la fission, qui utilise des atomes très lourds comme l'Uranium, se situant au sommet de l'échelle atomique, la fusion recourt à des atomes très légers, de la famille de l'hydrogène, notamment : le deutérium (hydrogène lourd H_1^2) et le tritium (hydrogène superlourd, H_1^3 , produit à partir du lithium ou du béryllium). Les atomes brûlent entre eux en dégageant de l'énergie de la même façon que le charbon se consume avec de l'oxygène, quoique ce ne sont pas

les électrons périphériques qui participent à cette combustion mais les noyaux (protons). Il se dégage de cette réaction des quantités d'énergie considérable de l'ordre de millions d'électrons-volts (1 électron volt \approx 11 500 degrés).

Le problème fondamental est de faire "se coller" ces noyaux, qui d'ordinaire se repoussent. Ceci requiert la mise en oeuvre d'énergie particulièrement grande, donc de températures élevées (environ 100 millions de degrés). A ces températures, uniquement l'état plasma existe. Cette caractéristique nous oblige à envisager des récipients où le plasma n'aurait aucun contact avec les parois, d'où l'utilisation de champs magnétiques importants (jusqu'à 50 kGauss, à titre indicatif le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 0.5 Gauss). Les forces magnétiques permettent de suspendre le plasma dans une enceinte à vide pendant le temps nécessaire à l'obtention de la fusion, car la solution du problème dépend de deux paramètres : la densité de la matière utilisée et son temps de confinement (critère de Lawson, $n\tau > 10^{14}$ particules/cm³ seconde). Si l'on parle de basse densité 100'000 milliards de noyaux par cm³ (soit 100'000 fois moins que l'air normal) le temps de confinement requis serait de l'ordre de la seconde, le plasma étant chauffé à 100 millions de degrés pendant ce temps. Actuellement, les meilleures "machines" à fusion utilisant le confinement magnétique - les tokamaks - ne permettent pas encore d'atteindre ces paramètres, les meilleurs résultats auxquels nous sommes parvenus sont de l'ordre de 10 millions de degrés pour un temps de confinement \sim 2 centièmes de secondes.

Pour arriver au but souhaité et dont nous sommes encore très éloignés, un grand nombre de problèmes doivent être résolus; notamment ceux des pertes par rayonnements, ceux de la conversion (obtenir un meilleur rendement), ceux du contrôle des impuretés, ceux de la stabilisation du plasma, ceux du chauffage du plasma.

De nombreux problèmes doivent être résolus dans les décennies à venir, aussi sans avoir encore d'énormes machines à fusion, le CRPP poursuit ses recherches dans plusieurs directions. Il ne serait pas vain de citer quelques-unes de ses recherches sur lesquelles nous reviendrons plus en détail :

- le confinement du plasma
- le chauffage auxiliaire; particulièrement par absorption des ondes d'Alfvèn
- l'étude de l'équilibre et de la stabilité du plasma
- les diagnostics nécessaires à la mesure des paramètres du plasma
- la physique fondamentale : l'interaction onde - plasma, les instabilités, la turbulence, l'interaction faisceau de particules-plasma.

Le CRPP maintient des relations avec de nombreux laboratoires étrangers et le succès du code numérique de stabilité MHD (magnétohydrodynamique) mis au point par le groupe théorique n'est pas étranger à la bonne renommée de l'institut.

D'autre part dans le meilleur des cas, le contrat d'association entre la Suisse et l'Euratom (organe des Communautés européennes en matière d'énergie), en ce qui concerne la fusion, pourrait entrer en vigueur au début de l'année prochaine. La construction du projet TCA - TCV, tokamak permettant l'étude du chauffage par ondes d'Alfvèn et de la géométrie de la section du plasma (configuration variable), permettrait de contribuer d'entrée à un secteur important et encore peu développé du programme communautaire.

2.2 Les basses densités

La Grande boîte à plasma, \varnothing 2m, longueur 3m

L'interaction onde électromagnétique (EM) - plasma présente un grand intérêt pour le chauffage et l'obtention d'un plasma thermonucléaire. Certaines de ces interactions peuvent être étudiées dans un plasma modèle, continu, sans champ magnétique. Les dimensions du plasma doivent alors être plus grandes que la longueur d'onde des ondes EM pour des fréquences égales ou supérieures à la fréquence de plasma. Une boîte à plasma satisfaisant ces contraintes a été construite et mise en service en 1976. Le plasma (2m de diamètre et 3m de longueur) y est créé par ionisation collisionnelle d'un gaz noble (Argon) et confiné par 13'000 aimants permanents. En opérant la machine à une pression d'Ar de $4 \cdot 10^{-3}$ Torr et avec un courant de décharge de 200 A la densité du plasma atteint $2,65 \cdot 10^{11} \text{cm}^{-3}$ avec une température électronique de 1,6 eV.

Des instabilités ont été excitées dans la grande boîte à plasma en injectant des micro-ondes dans un plasma présentant un gradient de densité. Des instabilités ont été observées aussi bien dans la couche de réflexion que dans la couche critique. Ces deux régions interagissent par diffusion et modification des profils de densité, ce qui entraîne des modifications importantes des seuils et des niveaux de saturation. Cette expérience a des applications dans le domaine de la fusion laser dans laquelle beaucoup de modèles prédisent un chauffage et une absorption résonnante dans la couche critique de la cible. Nous avons cependant observé que les instabilités survenant dans la couche de réflexion, qui apparaît devant la couche critique, peuvent modifier l'énergie absorbée dans la couche critique. Les phénomènes mis en évidence peuvent avoir des conséquences importantes sur la quantité d'énergie effectivement nécessaire pour réaliser la fusion laser.

Un travail théorique a montré qu'en croisant deux faisceaux d'onde EM de grande intensité et dont la différence des fréquences $\omega_1 - \omega_2$ est égale à la fréquence de plasma ω_{pe} on peut exciter des ondes de plasma : les photons du faisceau à haute fréquence ω_1 se désintègrent en plasmons de fréquence ω_{pe} et photons de fréquence ω_2 , ce qui amène une diminution de la puissance du premier faisceau. Un montage utilisant deux faisceaux de micro-ondes de fréquence $\omega_1 = 8,6$ GHz et $\omega_2 = 5,2$ GHz permettra, nous l'espérons, de confirmer la théorie et de prévoir son application sur les "machines à fusion".

Plasma Wave

L'instabilité ionique acoustique reçoit beaucoup d'attention à cause de son importance dans le chauffage ohmique des plasmas de fusion. Si l'état linéaire de l'instabilité est théoriquement bien compris, il existe encore des ambiguïtés dans la compréhension du mécanisme de saturation non linéaire. Une étude de cette instabilité ionique acoustique créée par le passage d'un courant dans un plasma a été faite à l'aide d'un nouveau montage expérimental. Un magneto plasma calme d'Argon est produit par une décharge à haute fréquence. Le courant électronique est établi, indépendamment de la source de plasma, entre une anode et une cathode chaude. Les paramètres du plasma ainsi obtenu sont les suivants : $10^{10} < n_e < 10^{11}$; $T_e = 2.2$ eV; $T_e/T_i = 15$; $B = 400$ Gauss. La pression du gaz neutre est de $2 \cdot 10^{-3}$ Torr. Ce montage présente des avantages sur les expériences précédentes qui ont été effectuées pour la plupart dans la colonne positive d'un plasma non magnétisé : les paramètres du plasma sont déterminés par la décharge à haute fréquence pour une certaine gamme de courant. Ceci permet d'étudier la croissance de l'instabilité à partir d'un faible niveau de fluctuations. Grâce au confinement magnétique de la colonne, le libre parcours moyen (calculé pour les collisions électrons-neutre), nécessaire à l'établissement d'un champ électrique est petit comparé à la distance

entre les électrodes. Pour la même raison, l'effet des parois est négligeable, ce qui permet d'utiliser une théorie uni-dimensionnelle pour l'analyse des résultats. L'amortissement de l'instabilité dû aux collisions ion-neutre enfin est aussi considérablement réduit. Ceci a permis de déterminer des caractéristiques de l'instabilité à partir de la propagation de "test-waves" ioniques acoustiques de basse fréquence.

Le spectre de la turbulence a été mesuré à l'aide d'un cross-corrélateur et d'ondes de test : mesure du taux d'amortissement des ondes ioniques acoustiques. Il s'est révélé que le spectre observé appartient à la relation de dispersion des ondes acoustiques et qu'à priori la saturation de l'instabilité est due au piégeage des électrons. De manière à détecter les ondes ioniques acoustiques de test, un interféromètre micro-onde (30 GHz) à fils de Lecher a été installé afin d'accroître la résolution spatiale (1,5mm) de l'interféromètre à cornets. Cet interféromètre a également été utilisé pour la détection des modes électrostatiques du plasma (modes Trivelpiece-Gould). Les résultats expérimentaux et numériques sont comparables. L'expérience est en cours de modification en une structure DP de façon à étudier l'interaction d'un faisceau d'ions avec un plasma magnétisé.

Machine DP (Double Plasma)

La turbulence ionique acoustique joue un rôle très important dans le chauffage des ions et dans l'étude de phénomènes non linéaires comme la résistivité anormale. Les recherches expérimentales faites jusqu'à ce jour n'ont cependant pas permis de comprendre complètement les mécanismes régissant de tels effets.

La mesure d'une résistivité anormale en présence de l'instabilité ionique acoustique engendrée par le passage d'un courant dans un grand volume de plasma a permis de mettre en évidence une valeur 10 à 30 fois

supérieure à celle de la résistivité classique. Toujours en relation avec le problème du chauffage du plasma, l'étude de l'interaction d'un faisceau d'ions avec le plasma a été entreprise dans une machine DP. Dans le cas de la théorie linéaire trois modes sont prévus : le mode ionique-acoustique et les deux modes de faisceau (lent et rapide), valable seulement si $T_e \gg T_i$. Près de l'émetteur, on observe l'interférence de ces trois modes alors que seuls subsistent les battements entre les deux modes de faisceau à plus grande distance. La relation de dispersion et les taux d'amortissements sont déterminés expérimentalement, ils sont en accord avec les résultats numériques. Un des travaux en cours consiste à étudier l'instabilité de "decay".

NESSIE

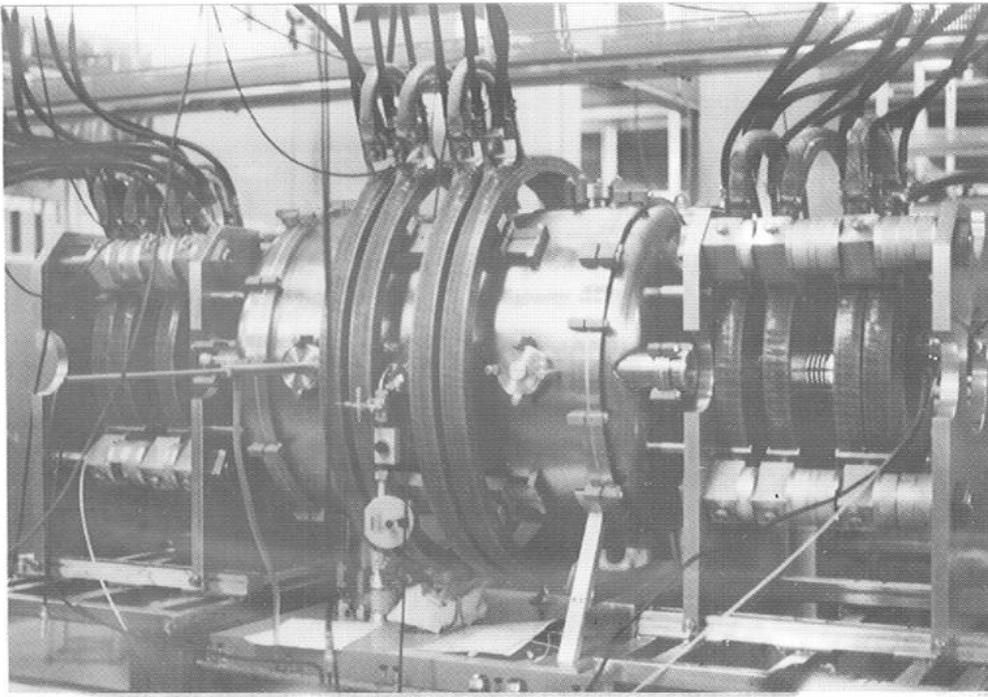
Le but de cette expérience de basse densité est d'étudier la turbulence ionique acoustique créée par le passage d'un courant dans le plasma. L'expérience est réalisée dans une configuration du type "boîte à plasma", deux cathodes chaudes terminent chaque extrémité du tube permettant de tirer un courant. Dans ce cas, la turbulence est créée par le déplacement de la fonction de distribution des électrons par rapport à celle des ions. De façon à conserver l'uniformité du champ électrique dans tout le plasma, un courant de 3 kA (max.) circule le long du tube. Une tentative d'amélioration du confinement magnétique a été entreprise en utilisant 8 bobines ($I_{\max} = 40A$, $B = 80$ Gauss) réparties uniformément le long du tube. L'étude de la turbulence ionique acoustique nécessite la mesure de la température ionique, du spectre en ν et k de l'instabilité et les fonctions de distribution des particules, afin de comparer les résultats expérimentaux et théoriques récents. Les mesures préliminaires ont permis d'évaluer la température électronique ($T_e \sim 1$ à 2 eV) ainsi que les profils axial et radial de densité électronique ($N_e \sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$).

MIROX

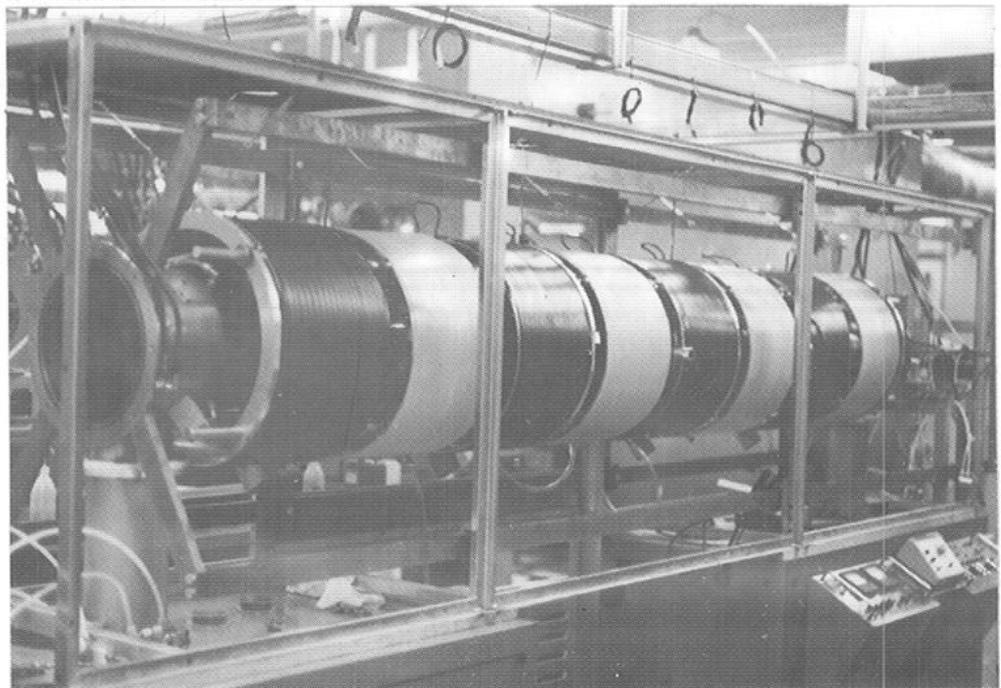
Cette machine, permettant la production d'un plasma magnétisé de grand volume, est la nouvelle acquisition du groupe "basses densités". Mirox est devenue opérationnelle en janvier 1978. La source de plasma est constituée de deux structures d'ondes lentes basées sur l'absorption non résonante de l'énergie. L'ignition du plasma se fait cependant lorsque la fréquence appliquée aux bobines est proche de la fréquence gyromagnétique des électrons ($\nu_{ce} = eB/2\pi m$), ensuite on peut varier considérablement le champ magnétique B_z des sources et modifier ainsi le rapport miroir de la machine.

En utilisant un générateur HF de 30 Watts de puissance nous avons obtenu un plasma stationnaire dont la densité est de l'ordre de $3 \cdot 10^9 e1 \text{ cm}^{-3}$ et la température électronique $T_e \sim 3,5 \text{ eV}$. Nous devons poursuivre les mesures portant sur les paramètres de la machine en utilisant des générateurs HF de grande puissance (Magnétron; $\nu = 2,45 \text{ GHz}$, $P_s = 6 \text{ KWatt}$). Les expériences de physique des plasmas planifiées sur Mirox sont les suivantes :

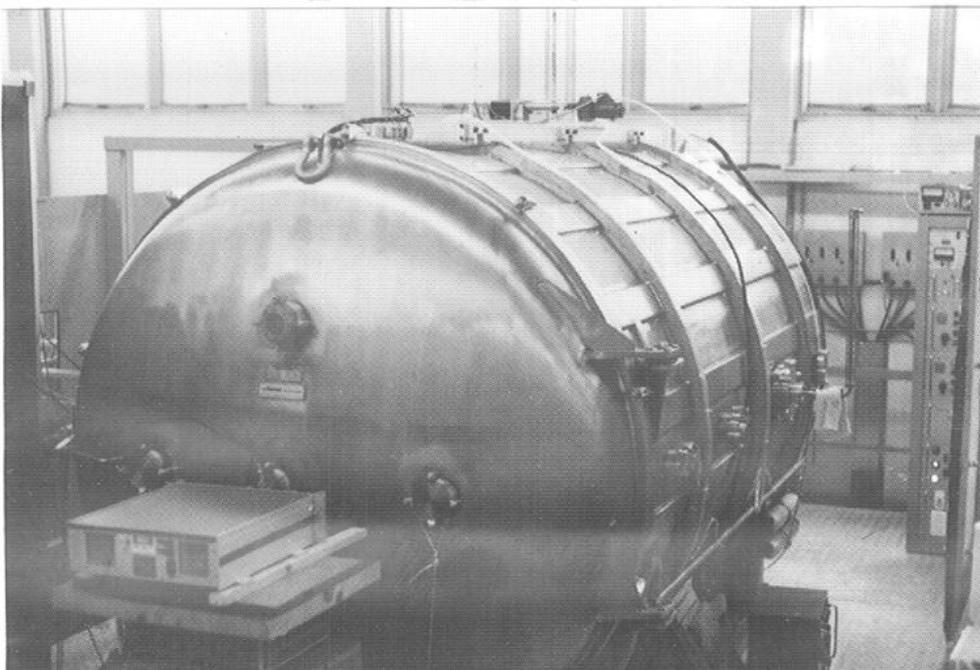
- mesure de la densité du plasma par la méthode des faisceaux EM croisés (voir Grande chambre $\emptyset 2\text{m}$, longueur 3m),
- étude des instabilités paramétriques générées par une onde à la fréquence hybride inférieure,
- étude du chauffage cyclotronique ionique
- étude de l'amortissement des ondes acoustiques pour différents rapports T_e/T_i .



Mirox

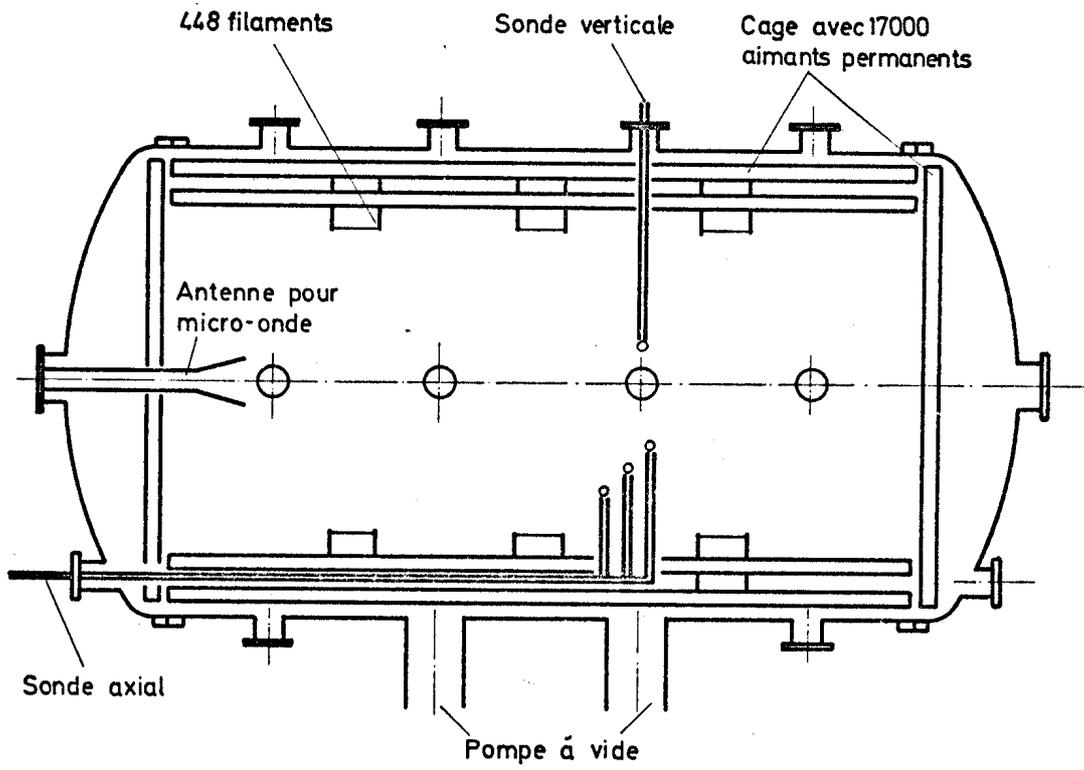


Nessie
(en cours de
montage)

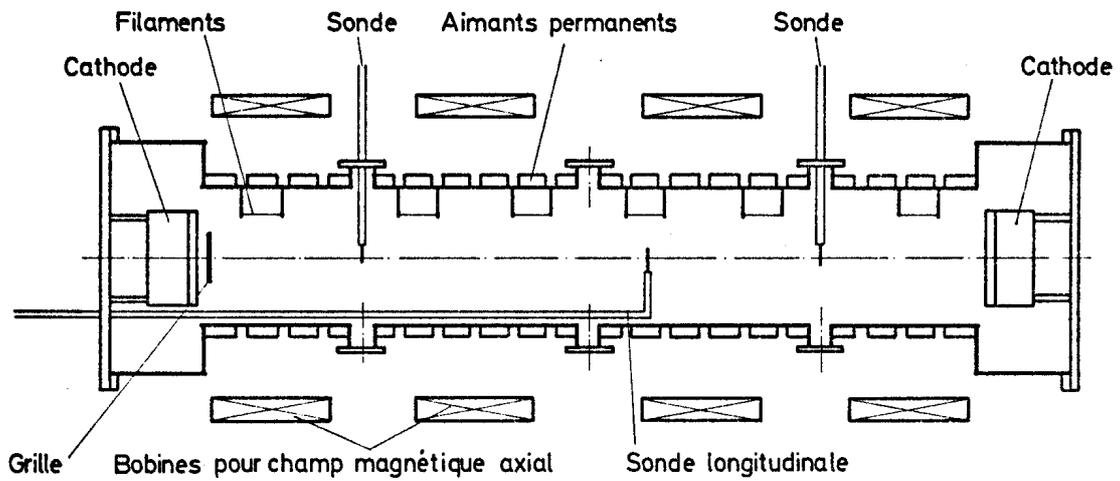


Grande Boîte
à plasma (Ø 2m)

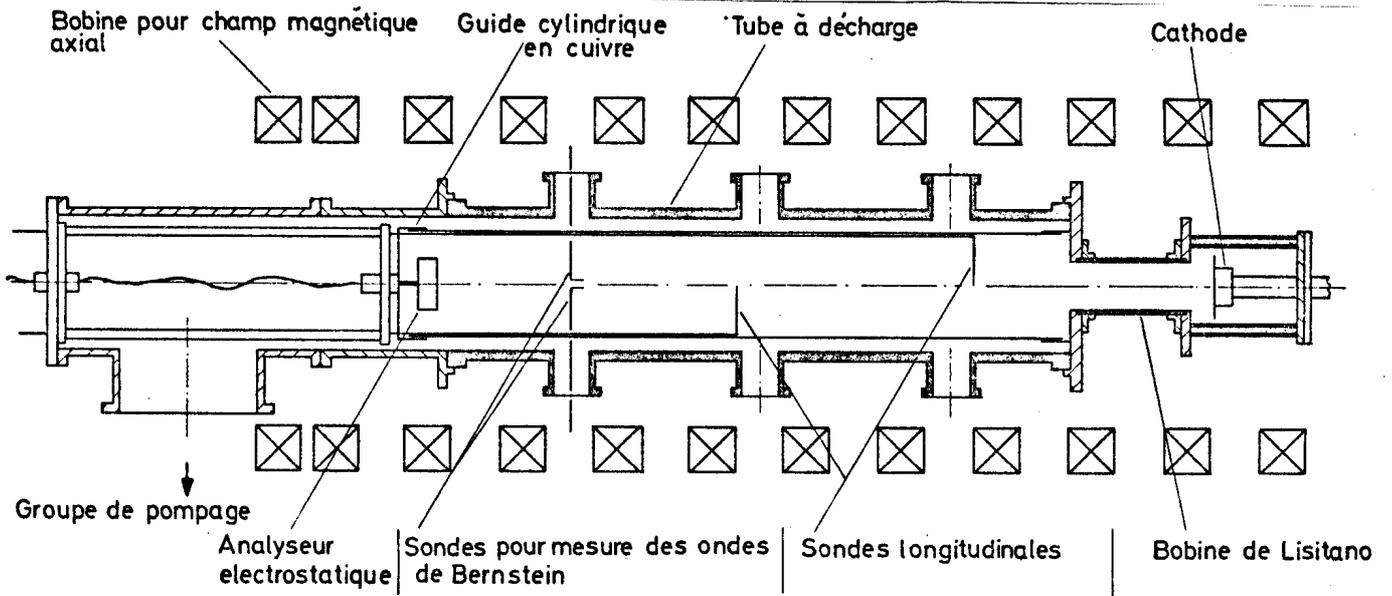
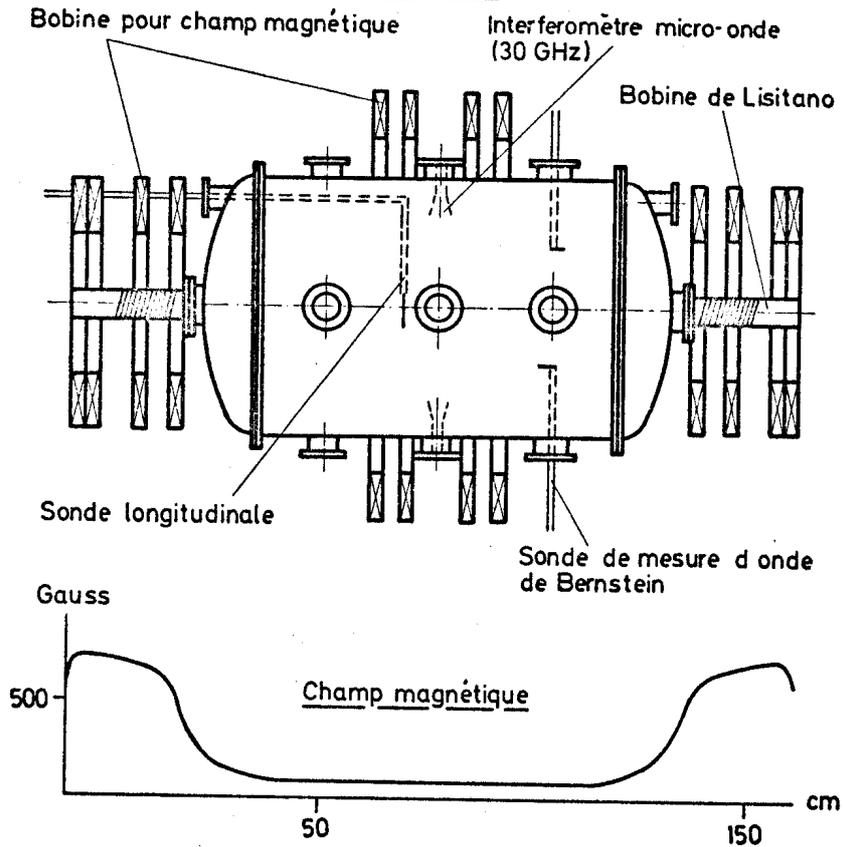
PLASMA BOX Ø 2m



NESSIE



MIROX



PLASMA WAVE

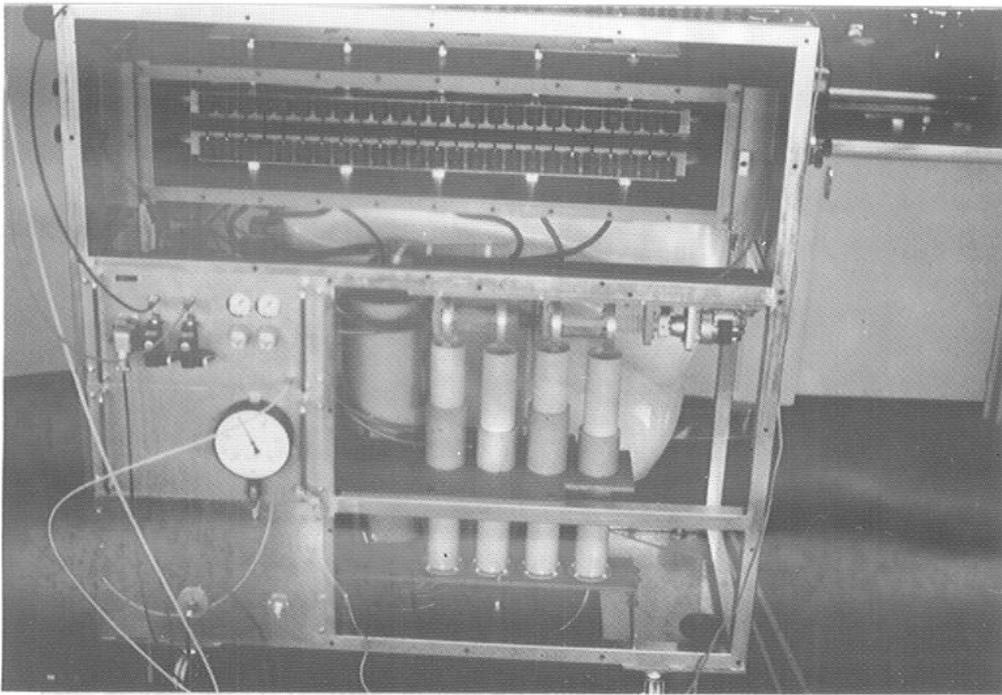
2.3 Laser

L'un des pas principaux qui doit mener à la réalisation d'un laser à rayonnement infrarouge lointain (50 à 500 μm) avec lequel on se propose de mesurer la température ionique d'un plasma de tokamak, est maintenant presque achevé. Il s'agit d'un système de laser CO_2 de grande puissance qui doit pomper optiquement le milieu actif du laser infrarouge. Il se compose de 5 modules d'un volume actif de 100x5x5 cm^3 excité par une décharge électrique transverse. Chacun de ces modules est capable de délivrer des impulsions de 500 MW durant 50 μsec à la pression atmosphérique. Une bonne reproductibilité ainsi qu'une grande homogénéité du faisceau est obtenue grâce à l'emploi d'électrodes profilées pour obtenir un champ électrique constant et d'une préionisation sous forme d'arcs latéraux. L'un des modules sert d'oscillateur pilote.

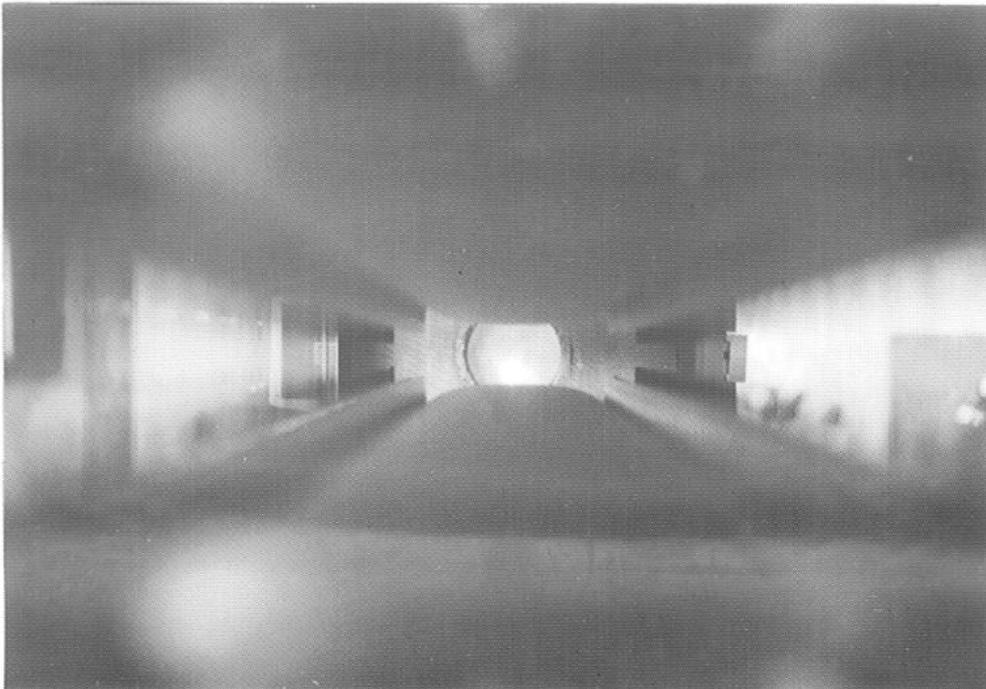
Ce module comprend une cavité hautement stabilisée en température, un réseau de diffraction afin de sélectionner une ligne de transition de la molécule CO_2 , et une étalon Fabry-Pérot permettant d'une part la sélection d'un mode longitudinal unique et d'autre part l'adaptation précise sur la bande de fréquence de la transition choisie. Un tel contrôle est nécessaire car de la radiation proprement choisie dans le CO_2 dépend la longueur d'onde émise dans le laser infra-rouge lointain (D_2O ou CH_3F).

FIR* Laser		Pompe Laser CO_2	
		ligne	λ
D_2O) 66 μm	P(32)	9.66 μ
) 114 μm	R(12)	9.32 μ
) 385 μm	R(22)	9.26 μ
CH_3F	emission 496 μm	P(20)	9.55 μ

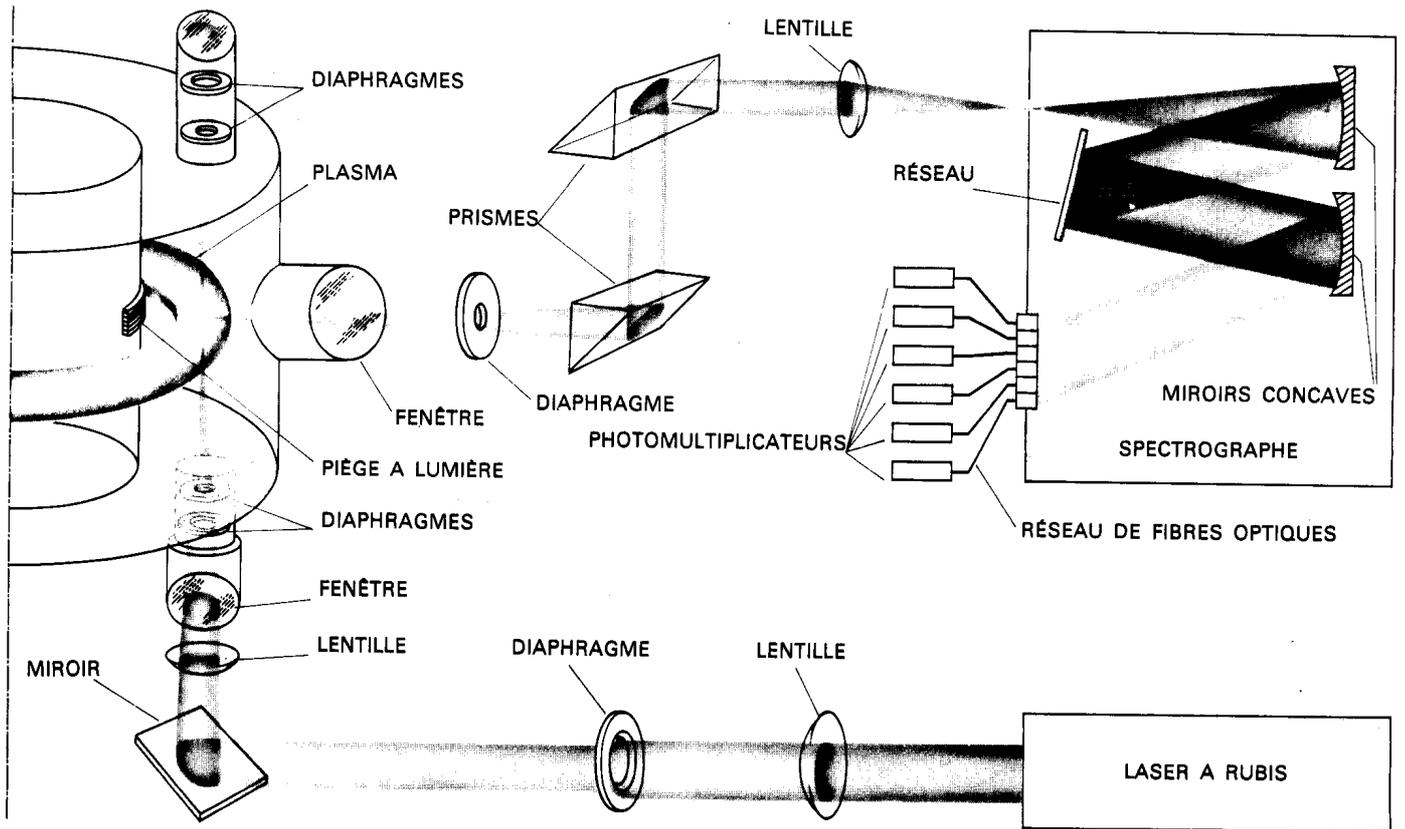
*FIR = Far Infra-Red (infrarouge lointain)



Module du laser CO₂

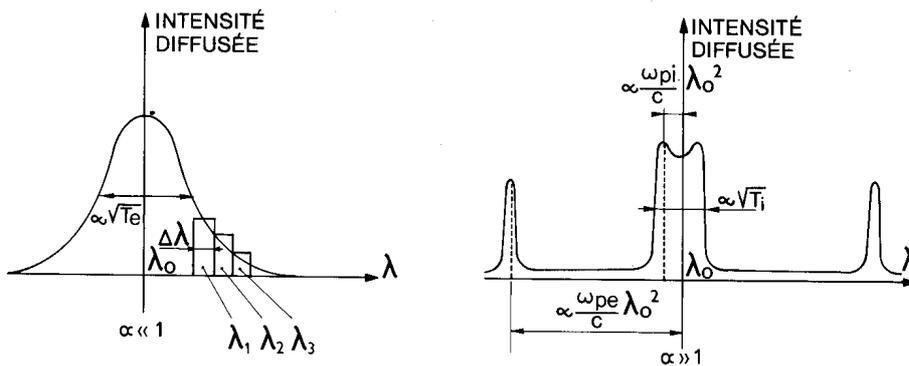


Electrodes du laser CO₂



11. VUE GÉNÉRALE D'UN DISPOSITIF PRATIQUE de mesure du spectre de lumière diffusée par un plasma. On utilise ici un monochromateur à réseau pour séparer le spectre en longueur d'onde.

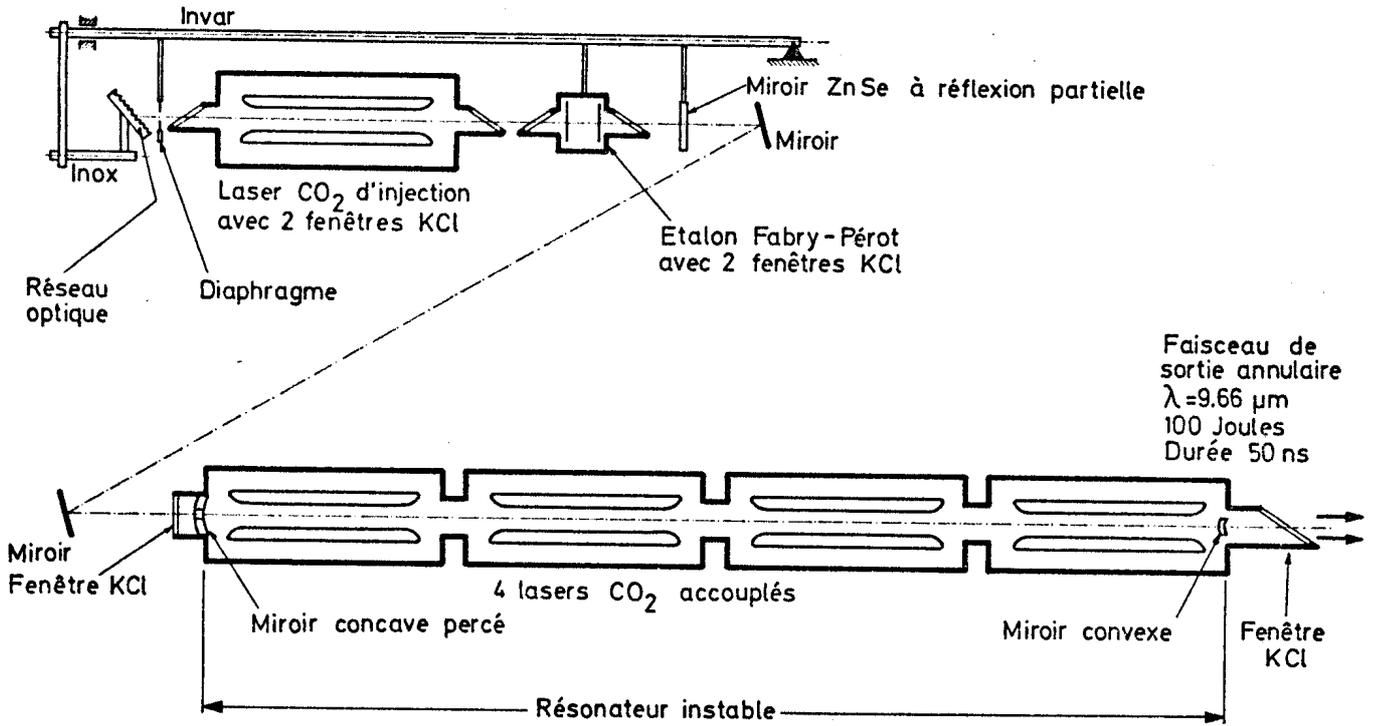
Apparaissent ici les différents diaphragmes et pièges de lumière pour éviter la lumière parasite qui masquerait la très faible intensité de la lumière diffusée recueillie sur le photomultiplicateur.



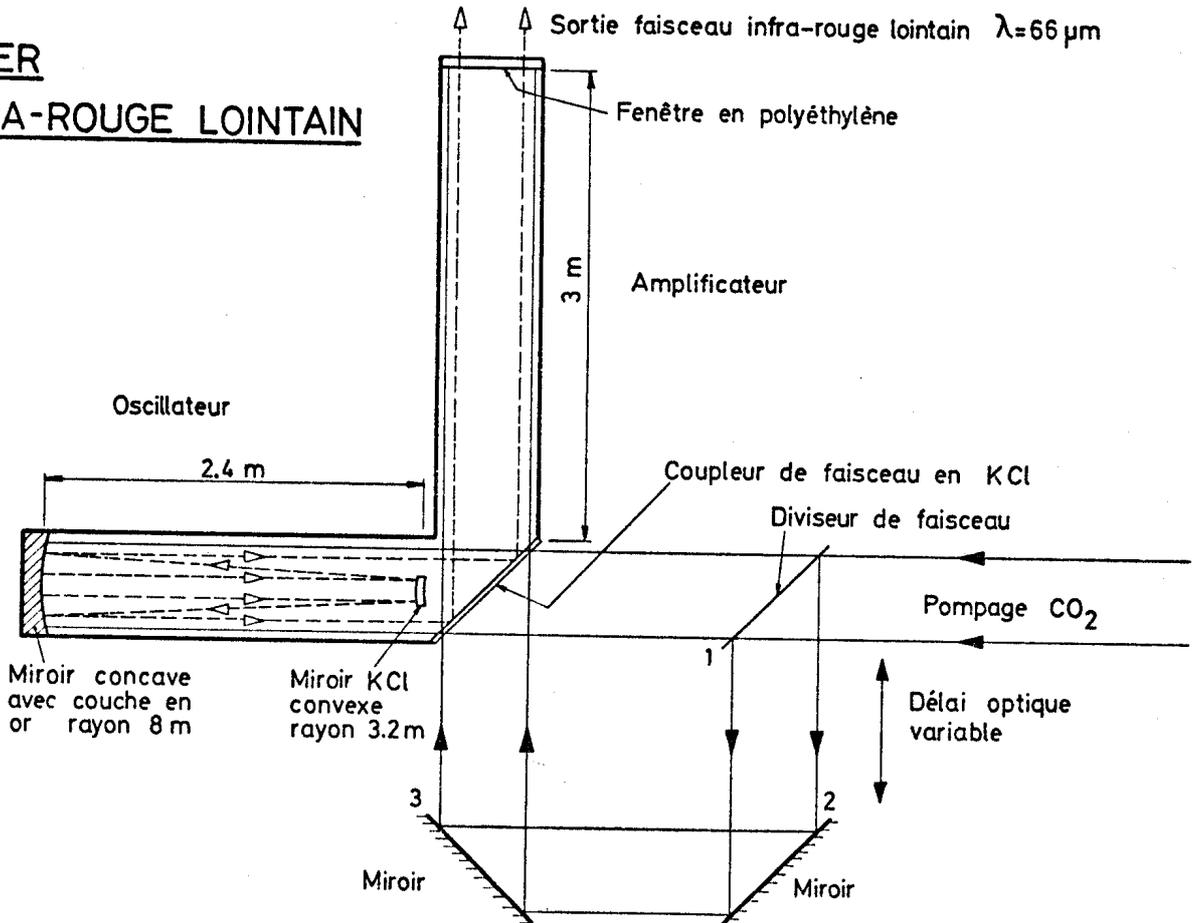
7. LE SPECTRE DE LA LUMIÈRE DIFFUSÉE PAR UN PLASMA dépend de la valeur d'un paramètre $\alpha = 1/k_r \lambda_D$ qui est fonction de l'angle d'observation θ , de la longueur d'onde de la lumière incidente λ_0 et des caractéristiques du plasma étudié. Pour $\alpha < 1$ (à gauche), c'est-à-dire pour les longueurs d'onde de fluctuation inférieures à la longueur de Debye λ_D , les électrons diffusent la lumière indépendamment les uns des autres. Comme les électrons sont animés de vitesses fonctions de la température, il apparaît un spectre de longueur d'onde en cloche. La largeur à mi-hauteur de ce spectre, fonction de la température du plasma, est mesurée en centrant successivement un filtre interférentiel de bande passante $\Delta\lambda$ autour des longueurs d'onde $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ et en mesurant l'intensité lumineuse transmise. Pour $\alpha > 1$ (à droite), la diffusion de la lumière est une diffusion collective. Les pics correspondent à des ondes de plasma électroniques (de fréquence ω_{pe}) et ioniques (de fréquence ω_{pi}). Cette diffusion collective permet de détecter les turbulences, c'est-à-dire la présence d'ondes excitées à un niveau plus élevé que le niveau atteint dans un plasma à l'équilibre thermique.

*tirées de D. Evans, P.D. Morgan, "Pour la Science", No. 3, p. 59-72 (janv.1978)

Système de pompage pour le laser infra-rouge lointain



LASER INFRA-ROUGE LOINTAIN



Les quatre autres modules forment une configuration oscillateur asservi - amplificateur dont la fréquence est imposée par l'oscillateur pilote.

De façon à mesurer la température ionique du plasma par diffusion Thomson d'une radiation "infrarouge lointain" il faut que la puissance de sortie du laser FIR soit de l'ordre de 5 MWatt; pour cela la puissance de sortie du laser CO₂ - pompe doit être égale à environ 3 - 5 GWatt (~150 Joules); ceci en tenant compte du rendement du laser FIR et de la longueur d'onde FIR plus grande que la longueur d'onde de la pompe.

$$\frac{E_{\text{sortie}}}{E_{\text{entrée}}} \propto \frac{\lambda_{\text{pompe}}}{\lambda_{\text{FIR}}} \times C$$

C est le facteur de conversion.

2.4 Le Groupe théorique

2.4.1 Magnétohydrodynamique

Le groupe théorique a terminé la mise au point d'un code numérique bi-dimensionnel "ERATO" calculant la stabilité MHD des plasmas toroïdaux de section quelconque. Les résultats donnés par ce code ont été comparés avec ceux d'un code "PEST" visant les mêmes objectifs et développé parallèlement, mais avec d'autres méthodes, par le Plasma Physics Laboratory de Princeton (N.J., USA). Cette comparaison a donné lieu à une publication commune. Ce type de programme est très important pour tous les laboratoires construisant des tokamaks, car il permet de prévoir leur comportement MHD au stade du projet déjà. Plusieurs laboratoires étrangers ont, pour cette raison, manifesté leur désir de pouvoir utiliser ce code, ce qui donne lieu à autant de collaborations:

Plasma Physics Laboratory	Princeton	} USA
General Atomic	San Diego	
National Research Laboratory	Oak Ridge	
JAERI	Japon	
Culham Laboratory	Grande Bretagne	
Max-Planck-Institut	Garching, R.F.A.	

Le domaine d'application du code ERATO porte notamment sur :

- l'étude paramétrique de la stabilité d'une série d'équilibre FCT (flux conserved tokamaks) qui simule l'évolution d'un quasi-équilibre lorsqu'on applique un chauffage auxiliaire puissant (injection de neutres). Les résultats montrent l'existence d'un $\langle \beta \rangle$ maximum au-delà duquel l'équilibre est violemment instable. Sans paroi conductrice cette valeur est de l'ordre de 2%; avec une coque conductrice le $\langle \beta \rangle$ atteint 5%.
- l'optimisation du $\langle \beta \rangle$ en fonction du profil du courant et de la forme du plasma dans un tokamak de petit rapport d'aspect. On trouve que la valeur maximum du β est une fonction croissante et linéaire de l'élongation dans le domaine étudié, mais qui semble se saturer lorsqu'on fait croître le beta poloïdal au dessus de 1. Ces résultats obtenus avec une classe particulière d'équilibres suggèrent que l'élongation du plasma est un moyen plus efficace d'accroître le $\langle \beta \rangle$ que le chauffage auxiliaire. Une autre classe d'équilibres, correspondant aux paramètres de JET (Joint European Torus,) fournis par Culham Laboratory (UK), est actuellement examinée.
- La stabilisation des modes axisymétriques ($n=0$) d'un plasma allongé par une coque à une distance raisonnable (moitié du rayon du plasma). Le résultat signifie qu'en pratique, un système d'asservissement lent couplé à une coque suffit à stabiliser tous les modes axisymétriques d'un plasma allongé.

- le spectre continu MHD. Nous avons dérivé une équation différentielle ordinaire valable sur chaque surface magnétique dont les valeurs propres donnent les fréquences correspondant aux modes du spectre continu qui résonnent sur cette surface. La connaissance de ces modes permet de calculer l'antenne optimale du système de chauffage d'Alfvén proposé sur notre tokamak TCA. L'analyse des résultats du code ERATO montre que lorsqu'on chauffe rapidement un plasma, les premiers modes instables sont des "balloonings". Un critère nécessaire de stabilité a été dérivé analytiquement en ne tenant compte que de ces modes.

2.4.2 Le confinement inertiel

L'activité dans ce domaine a été axée sur deux projets de longue durée: le développement de codes en turbulence faible et la recherche d'une théorie de turbulence forte.

En turbulence faible : le problème de la turbulence ionique-acoustique a été abordé dans plusieurs situations unidimensionnelles. L'influence des collisions, de l'émission spontanée d'ondes et de l'interaction non-résonante entre particules et ondes a été étudiée. La prochaine étape sera d'une part la turbulence ionique-acoustique en deux dimensions et de l'autre l'interaction entre les électrons "run-away" et la turbulence électronique dans un tokamak.

D'autre part dans un plasma, l'excitation d'ondes non-linéaires cohérentes se fait souvent par la condensation d'énergie ondulatoire turbulente dans l'espace des vecteurs d'ondes. C'est-à-dire que la coexistence d'ondes non-linéaires cohérentes et d'ondes aléatoires est le cas usuel dans un plasma. Nous cherchons à formuler une théorie consistante de ce phénomène d'interaction.

Il a été démontré que les solitons couplés sont des entités très fragiles et inaptés à servir de base pour une théorie de la turbulence forte. Il ne survivent ni dans une collision avec un de ses parents, ni dans une collision avec un soliton ionique-acoustique ou avec une onde ionique-acoustique à grande longueur d'onde. Ce fait s'explique par leur contenu faible en plasmons. Les plasmons n'ont pas assez de force pour contre-balancer les effets destructifs de la dispersion et de la nonlinéarité des ions. En relation directe avec la compréhension des résultats de l'expérience de la grande boîte à plasma, il a été étudié numériquement en variant le profil de densité, l'angle d'incidence et l'amortissement d'une onde électromagnétique à incidence oblique dans un plasma inhomogène. Cette onde peut exciter une onde de Langmuir par effet tunnel à la surface critique ($v_{em} = v_{pe}$). L'onde de Langmuir résultante est en résonance avec l'onde incidente.

2.5 Les hautes densités

Screw Pinch : Chauffage par ondes d'Alfvèn

Le concept de l'absorption résonante d'ondes d'Alfvèn torsionnelles utilisé comme moyen de chauffage d'un plasma est appliqué à un screw pinch à haut β (plasma confiné par un champ magnétique hélicoïdal de 15 kGauss). La colonne de plasma (1,4 cm de diamètre), contenue dans un tube de quartz (140cm de longueur, 5 cm de diamètre), est soumise à une force oscillante transversale. Cette force est engendrée par le champ magnétique d'une paire de conducteurs hélicoïdaux enroulés sur le tube et parcourus par un courant alternatif dont la fréquence est de l'ordre du mégahertz. Si l'on s'imagine la colonne de plasma subdivisée en un grand nombre de couches concentriques de densités différentes, des ondes MHD, dites d'Alfvèn, peuvent se propager le long des couches avec une vitesse dépendant de la densité. Comme la longueur d'onde est fixée par la structure magnétique, chaque couche possédera

une fréquence propre, et l'ensemble formera un milieu offrant un spectre continu. Si la fréquence d'excitation est proche de la fréquence propre d'une couche particulière, cette dernière entre en résonance et l'amplitude de son mouvement se trouve fortement amplifiée. Plus l'éloignement de la surface singulière est petit, plus le mouvement de l'onde est amplifié. Il existe donc une région plus ou moins large où le courant électrique associé à l'onde d'Alfvén est considérable. Il en résulte un chauffage localisé à l'intérieur du plasma.

Les résultats ont répondu aux prévisions. L'augmentation de la température présente effectivement l'allure d'une courbe de résonance. Le maximum est situé aux alentours de 1 MHz. La largeur de la courbe de résonance ainsi que sa hauteur sont conformes aux résultats théoriques. La température de la colonne de plasma passe de 48 à 60 eV en présence du chauffage. Si l'on tient compte de l'augmentation des pertes par rayonnement et par conduction axiale, on calcule un rendement de 50%. Ces résultats ont amené le laboratoire à l'application de cette méthode de chauffage sur le tokamak TCA pour les raisons suivantes :

- L'application pratique au screw pinch a prouvé le bon rendement de la méthode grâce au couplage efficace entre antenne et plasma.
- Les sources puissantes de haute fréquence sont d'un domaine technique conventionnel.
- Par le choix de la fréquence, et par sa modulation, un domaine étendu du plasma peut être chauffé.

L'appareil constitue aussi un bon instrument de diagnostic, permettant d'explorer les régions dites d'activité MHD, et d'élucider certaines instabilités.

Chauffage à haute fréquence

Cette expérience a pour but d'étudier l'interaction d'un plasma dense ($n_e \sim 10^{13}$ à 10^{14} e.l.cm⁻³), magnétisé, avec une décharge linéaire de haute fréquence et de grande puissance (3MHz; 50 kA; 250 MW).

Le tube à décharge, de 15 cm de diamètre et 114 cm de longueur, est équipé d'électrodes cylindriques à chaque extrémité et est situé dans une bobine produisant un champ magnétique axial (0,1 à 1 Tesla). Les expériences ont été effectuées avec de l'hydrogène à une pression de remplissage comprise entre 1 et 100 mTorr. La préionisation est réalisée par une décharge $E \times B$ au moyen d'une impulsion HF (6 MHz) appliquée à deux électrodes auxiliaires. La décharge principale consiste en impulsion à 3 MHz d'intensité 1 à 50 kA pendant 5 à 15 μ s.*

Cette interaction à forte puissance présente de nombreux aspects concernant le chauffage, le couplage des ondes et les caractéristiques dynamiques du plasma. Le courant HF, à cause de l'effet de peau, est localisé à la surface de la colonne de plasma et donne lieu à un gradient de la pression magnétique dans la couche limite. Le chauffage est donc plus efficace sur la couche extérieure du plasma. Il est intéressant de constater la pénétration du champ B_z due à la résonance magnétosonique. On a mis en évidence, pour la première fois, un couplage quadratique entre les ondes magnétosoniques et le courant.

D'autre part une étude portant sur les limiteurs a montré que leur utilité dépend de l'intensité de la décharge. L'effort maintenant est axé vers le développement d'un diagnostic de diffusion au moyen d'un laser CO₂, afin de permettre une meilleure connaissance de l'état du plasma.

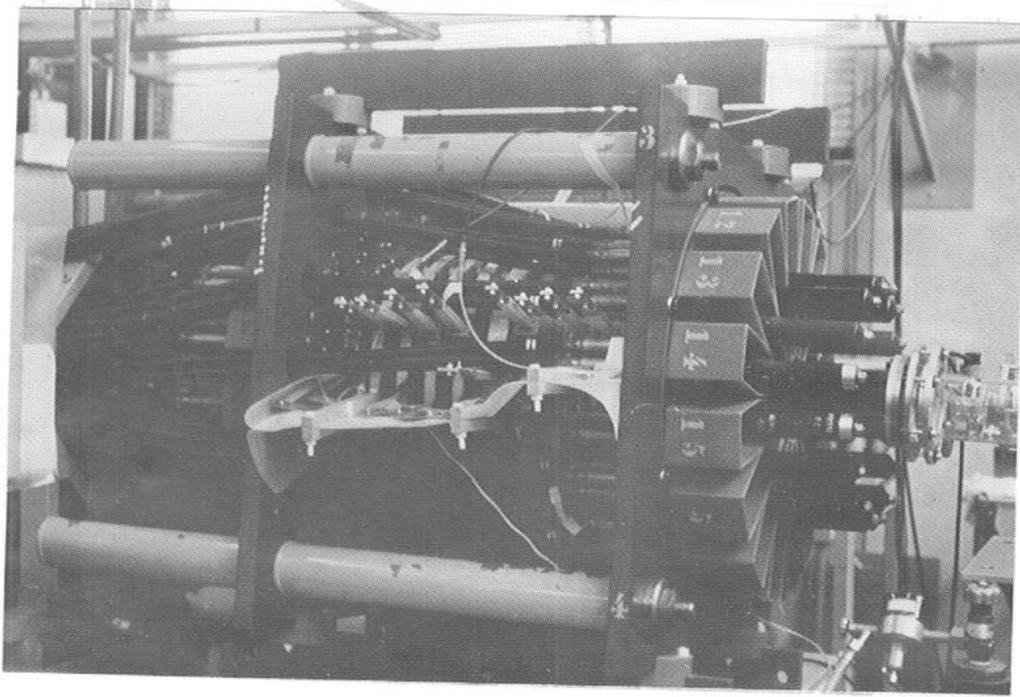
*Pour atteindre de grandes puissances, des générateurs à ligne ont été développés (400 - 700 MWatts pendant 5 à 15 μ sec à la fréquence de 2,7 MHz). D'autre part, un oscillateur de 8 MWatts à 6 MHz (50 fois l'émetteur de Sottens) a été mis au point au laboratoire.

Belt Pinch

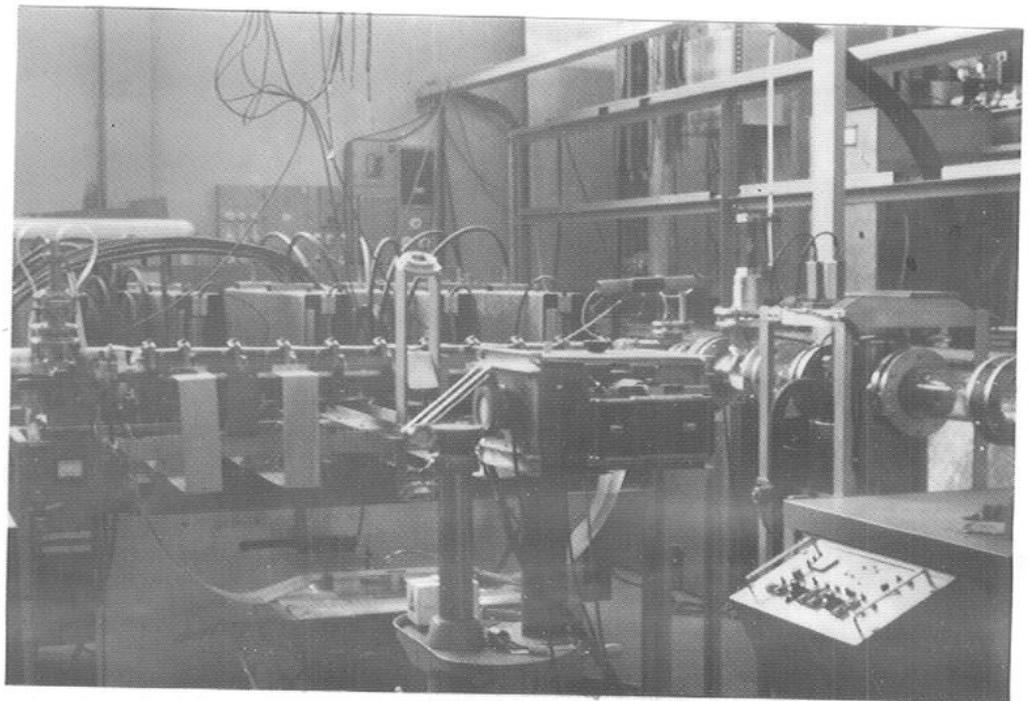
Les machines à confinement magnétique toroïdal, de section non-circulaire, permettent l'induction de courants longitudinaux beaucoup plus intenses que celles de section circulaire.

Le but actuel du Belt Pinch du CRPP est l'étude de la stabilité des sections très allongées. La durée du confinement a été limitée jusqu'ici par l'apparition d'une instabilité axiale (déplacement global du plasma vers l'une des extrémités de la section). Pour une pression de remplissage de 20 mTorr, la température est de l'ordre de 20 eV, et le $n\tau \sim 2 \cdot 10^{11}$ ($n_e \sim 10^{16} \text{el cm}^{-3}$, $\tau \sim 20 \mu\text{s}$).

Une mesure bidimensionnelle de la configuration magnétique poloïdale a été entreprise. Il n'était pas évident à priori, avec une section aussi allongée ($b/a \approx 30$) que la configuration soit bien uniaxe, ce qui a été vérifié. Par ailleurs, la cause de la transition entre la phase stable et la phase instable subséquente restait mystérieuse. Les mesures magnétiques ont montré que, si les paramètres du plasma mesurés précédemment dans le plan médian de la machine restent pratiquement constants pendant la phase stable, la configuration magnétique se modifie considérablement dans le même temps, le facteur de sécurité q passant de 8 à 3 au bord et de 4 à 2 au centre du plasma. Ce phénomène pourrait expliquer à lui seul l'apparition de l'instabilité axiale, mais le résultat le plus important est la mise en évidence d'un champ radial qui s'étend jusqu'aux parois et qui croît dans le temps, mettant fin au confinement des extrémités du plasma, avant l'apparition de l'instabilité. L'adjonction de couches conductrices directement sur le tube de décharge à l'intérieur et à l'extérieur du tore a été réalisée dernièrement et devrait d'une part annuler la composante radiale du champ aux parois et d'autre part avoir un effet stabilisant sur le déplacement axial observé jusqu'ici.



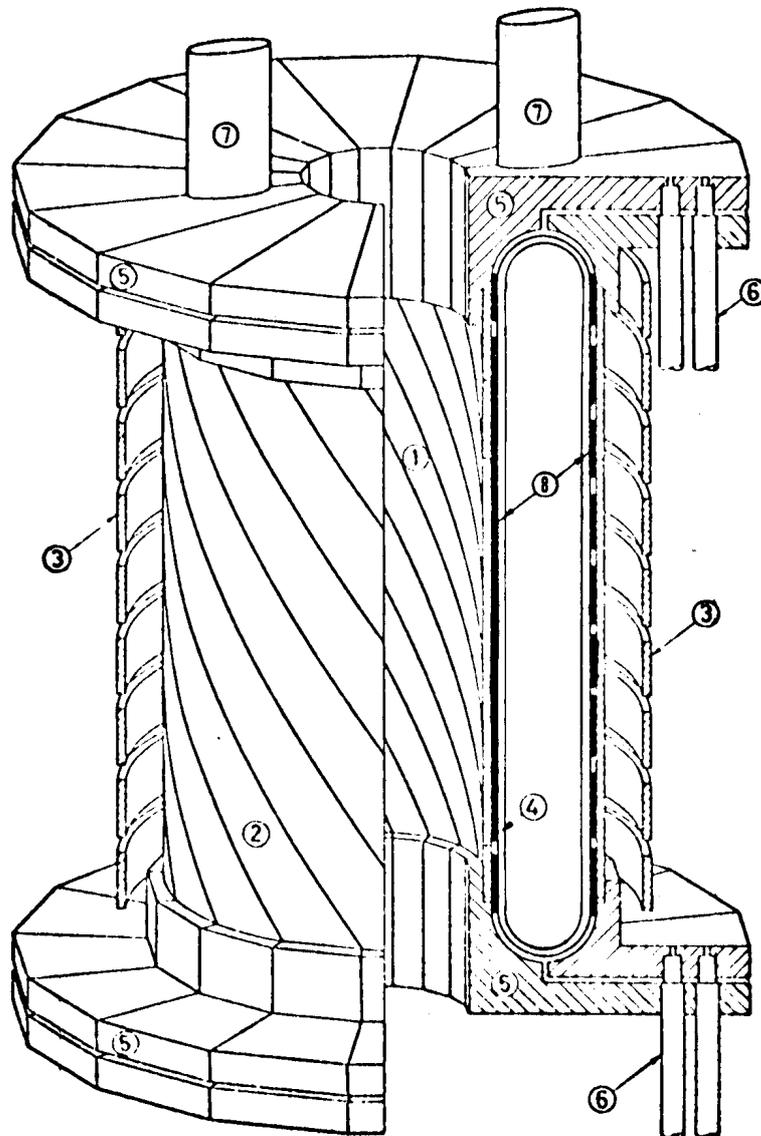
Belt Pinch



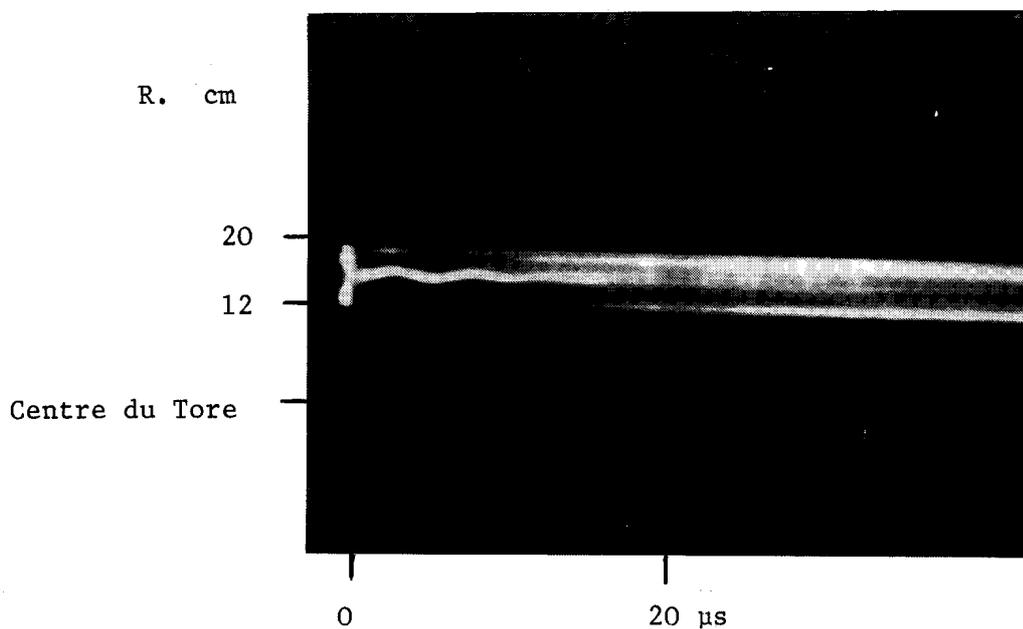
Screw Pinch



Chauffage HF

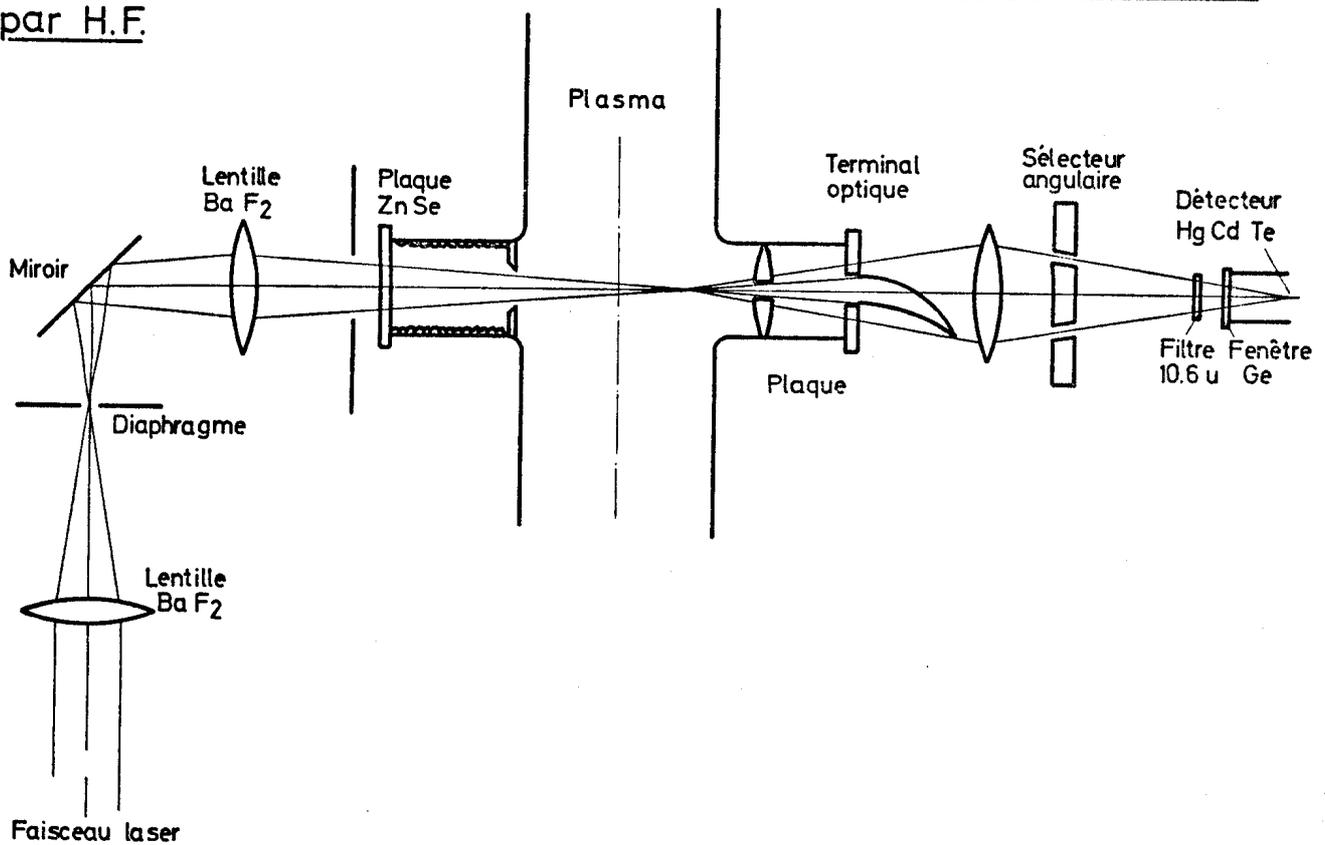


- | | | | |
|---|-------------------------------|---|-----------------------|
| 1 | Bobine hélicoïdale intérieure | 5 | Pièces de connexion |
| 2 | Bobine hélicoïdale extérieure | 6 | Câbles d'alimentation |
| 3 | Anneaux d'équilibre | 7 | Ouverture de pompage |
| 4 | Réceptient de pyrex | 8 | Coque conductrice |

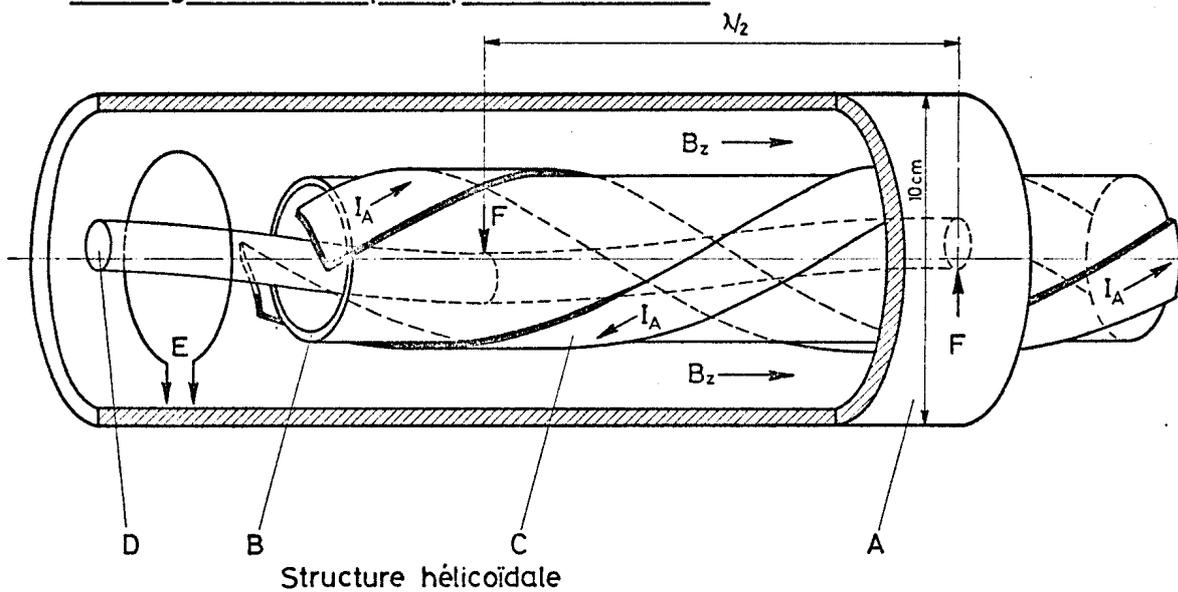


Photographie de la décharge montrant l'apparition de la lumière aux parois dès 20 μ s

Système optique de diffusion laser CO₂ pour l'étude du plasma chauffé par H.F.



Chauffage d'un screw pinch par ondes d'Alfvén



- A Bobine théta créant le champ magnétique principal B_z
- B Tube de quartz contenant le plasma de deutérium
- C Enroulement hélicoïdal parcouru par un courant

- D Colonne de plasma comprimé par le champ B_z
- E Sonde diamagnétique mesurant la chaleur contenue dans le plasma
- F Force agissant sur le plasma, occasionnée par le courant I_A de 10'000 Ampères

Des sondes magnétiques placées directement sur le tube de décharge dans deux sections poloïdales et une section toroïdale permettront de suivre en détail l'évolution du champ poloïdal aux parois et d'en tirer la distribution du courant toroïdal dans le plasma. Les sondes placées dans la section toroïdale permettront de tester la symétrie de révolution du pinch et de détecter d'éventuels modes $n \neq 0$.

2.6 Le grand projet du CRPP : le TCA (Tokamak Chauffage Alfvèn)*

Construction d'un tokamak pour la démonstration de l'efficacité du chauffage par dissipation d'ondes d'Alfvèn

Comme nous l'avons vu précédemment, un chauffage d'appoint du plasma est indispensable pour atteindre l'ignition dans un réacteur basé sur le principe du tokamak. De nombreuses méthodes ont déjà été proposées et testées. Il s'agit maintenant d'appliquer les résultats obtenus sur le screw pinch** à un tokamak et démontrer les possibilités de la méthode dans ce cas.

Les objectifs du projet sont :

- 1) Construire un tokamak de coût réduit, mais dont les caractéristiques sont suffisantes pour la démonstration.
- 2) Exciter des ondes d'Alfvèn dans le plasma de ce tokamak, rechercher le mode optimum pour le chauffage et la structure d'antenne correspondante.
- 3) Etudier les mécanismes d'absorption des ondes d'Alfvèn de grande amplitude, leur effet sur la stabilité du plasma et sur les mécanismes de transport de l'énergie par les électrons.

* T.C.A. Project, CRPP septembre 1977

** A. Pochelon, R. Keller, "Alfvèn Wave Heating Experiment of a High Beta Plasma", HPA 50, 172, (1977)

Pour déterminer les paramètres du chauffage sur le TCA on s'est servi d'un calcul approximatif, valable pour le tokamak à grand rapport d'aspect. Ces calculs ont montré que le type de déplacement le plus favorable résulte d'une onde stationnaire $m=1$, $n=\pm 2$, excitée par des bobines produisant des forces verticales.

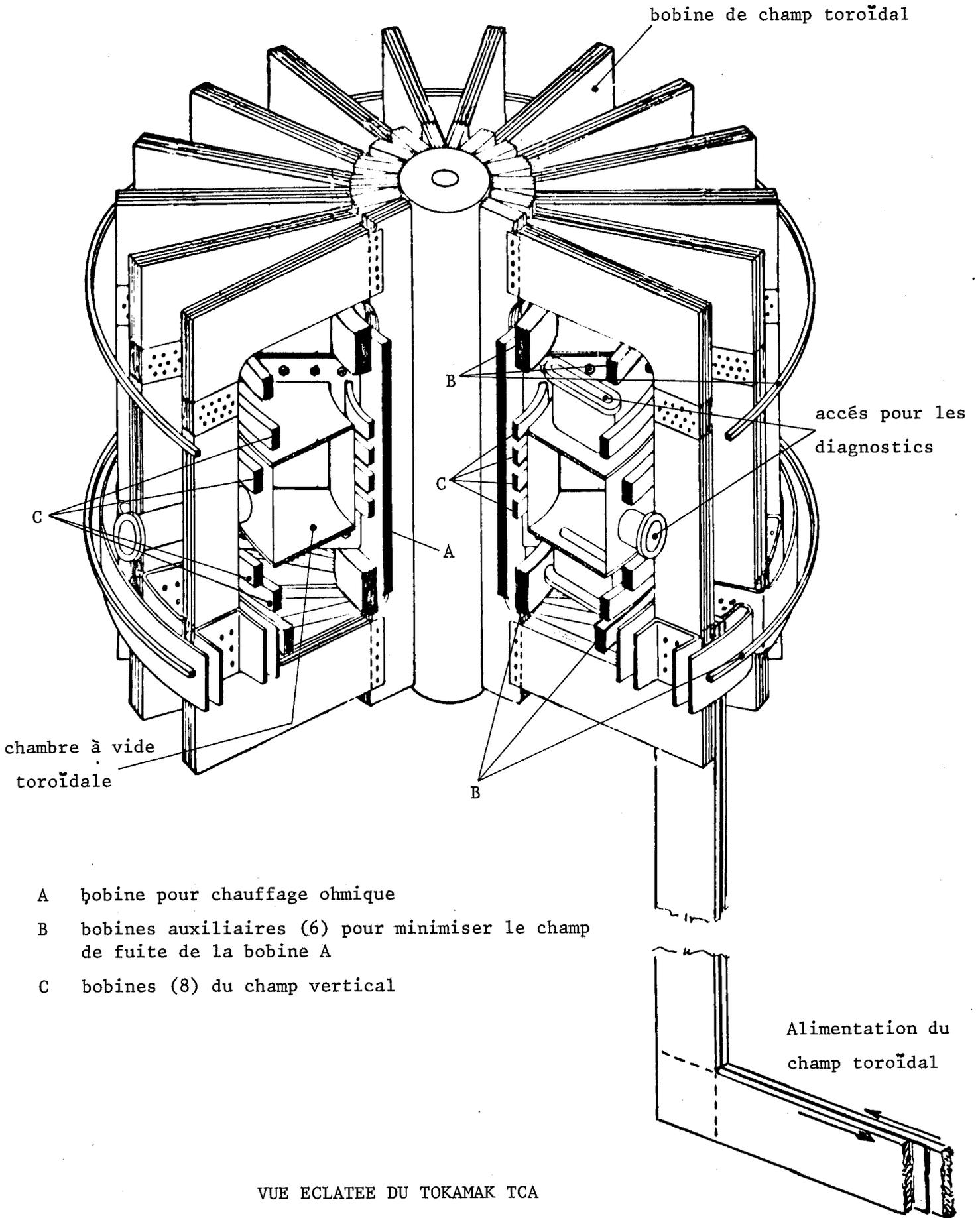
La puissance du générateur haute fréquence qui alimente les conducteurs doit être supérieure à la puissance de chauffage ohmique. Nous proposons une puissance 10 fois supérieure à la puissance ohmique de façon à pouvoir mesurer un effet de chauffage dans un domaine éloigné de l'optimum. La puissance ohmique est de 3V fois 90 kA, ce qui fait 0,27 MW. La puissance sera donc de 2,7 MW. Les autres paramètres importants sont

fréquence 3 MHz pour $\bar{n}_i = 1,3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ de Deuterium	
puissance réactive	6 MVA
courant par plaque	2 KA pointe
tension par plaque	750 V pointe

Le couplage entre le générateur et le plasma est excellent. Vu la faible tension, le problème du claquage du côté chambre à vide est mineur. Les pertes ohmiques dans les conducteurs sont négligeables. L'amplitude du mouvement de la surface du plasma est inférieure à 0,5mm.

Choix des paramètres de la machine

La démonstration des potentialités du chauffage par ondes d'Alfvén est possible avec un tokamak de section circulaire avec un champ magnétique relativement faible. On installera donc dans la bobine de champ toroïdal une enceinte à vide suffisante pour la formation d'un plasma circulaire et on fixera le champ à la valeur minimum compatible avec les caractéristiques du plasma que l'on désire obtenir. La caractéristique la plus importante pour le plasma est sa température électronique maximum qui doit être de l'ordre de 500 eV pour permettre l'application des



VUE ECLATEE DU TOKAMAK TCA

diagnostics par rayons X. En tenant compte de ces exigences et en utilisant au mieux le volume à disposition à l'intérieur de la bobine du champ toroïdal on obtient les paramètres suivants :

Grand rayon du plasma	R = 60 cm
Petit rayon du plasma	a = 19 cm
Rapport d'aspect	R/a = 3,16
Champ magnétique toroïdal	B = 7,5 kG
Puissance ohmique dans la bobine du champ	W = 2 MW
Courant dans le plasma (q = 3)	I _p = 59 kA
Température électronique maximum	T _{e,max} ≈ 500 eV
Temps de confinement de l'énergie	τ _e ≈ 2 msec
Durée de vie du plasma	t = 40 msec

Diagnostics

Un ensemble de diagnostics est prévu pour mesurer les paramètres du tokamak et du plasma. Les mesures correspondant à chaque décharge seront digitalisées, traitées et enregistrées sur bande magnétique par un système d'acquisition de donnée comprenant un miniordinateur PDP11 ayant lui-même des microprocesseurs comme périphériques.

Les diagnostics prévus sont :

- 1) Toutes les grandeurs électriques importantes diagnostiquant la bonne marche du tokamak seront mesurées et enregistrées à chaque décharge.
- 2) Le flux des rayons X émis par le plasma sera mesuré pour suivre les fluctuations de la densité et surtout de la température électronique ainsi que le développement des instabilités MHD.
- 3) Les profils de densité électronique seront mesurés à l'aide d'un interféromètre utilisant un laser à fluorure de méthyl ($\lambda = 496\mu\text{m}$) continu.

- 4) La température électronique sera suivie par diffusion Thomson de la lumière d'un laser à rubis pulsé.
- 5) Une expérience originale sera montée pour mesurer la température ionique et les fluctuations dans le plasma par diffusion Thomson à petit angle de la lumière d'un laser pulsé à D₂O ($\lambda = 66\mu\text{m}$).
- 6) La forme de la décharge et son interaction avec les limiteurs sera suivie à l'aide d'une caméra électronique.
- 7) Développement d'un faisceau d'ions et d'un détecteur pour mesurer le β_{pol} , facteur important dans les tokamaks.

2.7 Les services

Pour terminer ce chapitre, il n'est pas vain de dire quelques mots concernant les divers organes techniques et technologiques du CRPP.

Technique du vide - Soufflage

Pour étudier le plasma, nous ne pouvons nous dispenser d'enceinte à vide où celui-ci sera suspendu par des forces magnétiques; aussi un important service du vide a-t-il sa place dans l'institut. Les bâtis de pompage et les enceintes où sera créé le plasma doivent être testés, car nous devons nous garantir de trop d'impuretés. Le laboratoire de soufflage est outillé pour les travaux de soudure, tournage, meulage, sciage et cuisson de pièces en verre, pyrex ou quartz, ainsi que pour la métallisation sous vide, le brasage par haute fréquence et la confection de diverses sondes miniatures. Actuellement le service du vide met au point la vanne à ultra-vide qui servira sur le tokamak TCA.

Atelier de mécanique - Bureau d'études

La plus grande partie des machines et expériences construites au CRPP est réalisée dans l'atelier mécanique par des mécaniciens qualifiés et progressivement formés aux techniques particulières de la physique du plasma. Les alliages d'aluminium, l'acier, l'inox, une grande diversité d'isolants sont travaillés sur un important parc de machines répondant au besoin d'usinage de pièces uniques et souvent complexes. La serrurerie est équipée entre autre, pour la soudure de l'acier au chalumeau et de l'inox sous atmosphère réductrice d'argon. C'est là que sont réalisés les carcasses et bâtis d'expériences.

La plupart de nos expériences requièrent une étude approfondie due à la complexité de leurs réalisations et de leurs fonctions - magnétisme, chaleur, vide, robustesse ... - Le bureau de construction a donc la charge de ces études.

Atelier d'électrotechnique

De nombreux équipements électroniques, électriques ... (alimentation haute fréquence, oscillateur de fréquence, commande des bâtis de pompage, électronique rapide impulsionnelle, télécommande de sondes, etc.) ont été mis au point par l'atelier d'électrotechnique du CRPP.

La quantité d'informations issues des expériences sous forme analogique ou déjà digitalisée oblige à un prétraitement par microprocesseurs et miniordinateur. Il faut aussi stocker les informations sur disques ou sur bandes avant de les traiter numériquement par ordinateur. Ce travail d'acquisition des données est très complexe, surtout dans le cas des machines aussi compliquées que le tokamak. Le développement de ces techniques d'acquisition de données se fait donc en partie au CRPP.

3. APPENDICES

3.1 Appendice I

Le problème de l'énergie en Suisse

La Suisse dépend fortement (à 84%) de l'étranger pour son approvisionnement énergétique (pétrole, gaz, charbon, uranium); les trois quarts (76,6%) sont constitués par le pétrole. En ce qui concerne l'électricité, 21% proviennent du nucléaire (Beznau I et II, Mühleberg); la Suisse est tantôt exportateur, tantôt importateur suivant les semestres d'été ou d'hiver; dans l'ensemble elle exporte plus.*

La production d'électricité (1976)

- 74% par les quelque 500 centrales hydro-électriques.
- 21% par les trois centrales nucléaires de Beznau I et II (près de Baden) et de Mühleberg (près de Berne)
- 5% par les centrales thermiques à mazout (Chavalon et quelques autres, de puissance réduite).

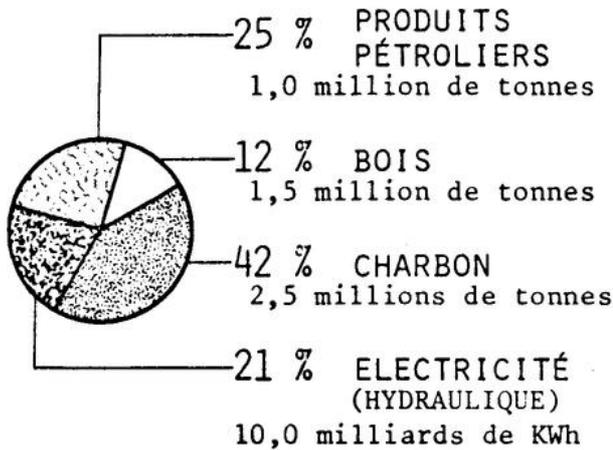
La diversification des agents énergétiques est mise en évidence dans le tableau ci-après. On remarque aussi que dans l'évolution du choix du combustible, le pétrole a remplacé le bois et le charbon.

*Communication privée de M. M. Zangger, électricité de l'Ouest-Suisse (E.OS)

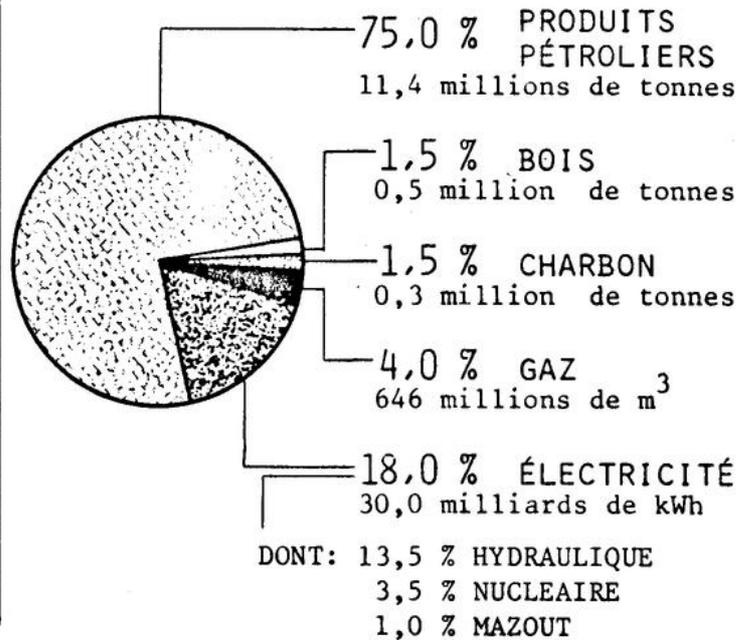
APPROVISIONNEMENT DE LA SUISSE EN ENERGIE FINALE

(ordre de grandeurs)

1950 : 42'000 téralcalories



1976 : 146'000 téralcalories



Les répartitions de la consommation par sources et par secteurs pour 1970 et l'estimation pour l'an 2000 sont représentés dans les deux tableaux suivants.

Répartition de la consommation par sources et par secteurs, en %

Suisse 1970

(Réf.*)

	Industrie	Commerce + Résidence	Transport	Total
Charbon	1,35	2,75	0	4,1
Huiles	19,8	35,5	22,4	77,7
Gaz	0	1,2	0	1,2
Hydraulique } Nucléaire }	7,35	8,35	1,3	17
Total	28,5	48,8	23,7	100,0
Consommation Electricité	7,77	8,77	1,36	17,9

Répartition de la consommation par sources et par secteurs, en %

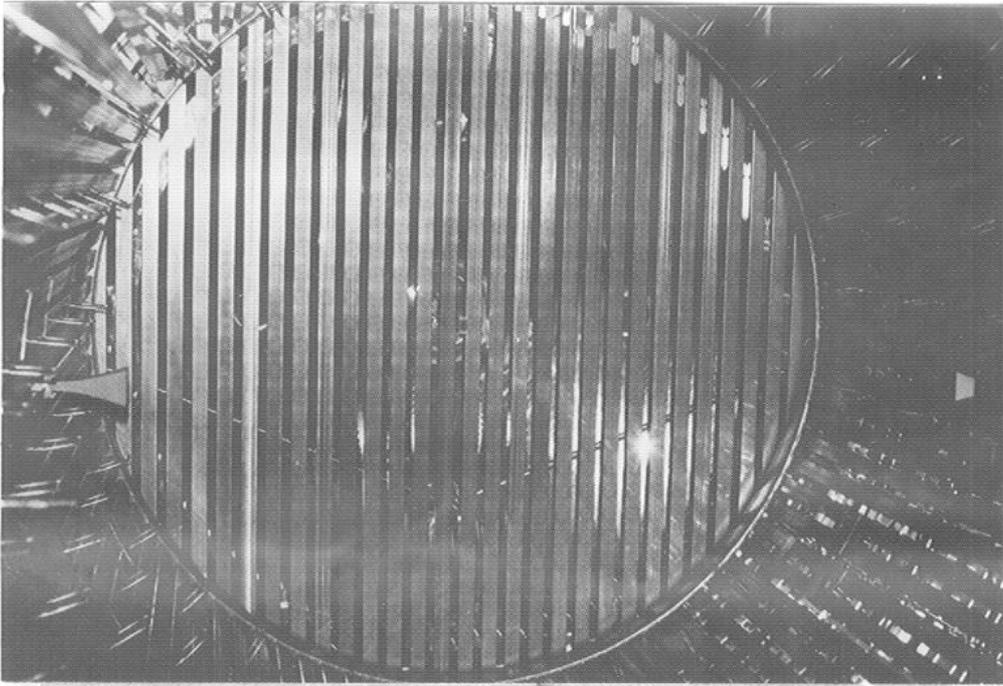
Suisse 2000

(Réf. *)

	Industrie	Commerce + Résidence	Transport	Total
Charbon	0,15	0	0	0,15
Huiles	15,15	34,55	21	70,7
Gaz	3,75	6	0	9,75
Hydraulique } Nucléaire }	7,65	10,55	1,2	19,4
Total	26,7	51,1	22,2	100,0
Consommation Electricité	7,9	10,85	1,25	20,0

Si pour l'électricité la Suisse ne dépend pratiquement pas du pétrole, elle en dépend pour le reste de son approvisionnement énergétique. Il est donc urgent de recourir à une énergie de remplacement à long terme. Il faut aussi prévoir le stockage de cette énergie, transportable, voire même utilisable par les moteurs par exemple - on pense actuellement à l'hydrogène - .

* Référence : M. Roux, LRP 63/73 (CRPP), juillet 1973



Intérieur de la Grande boîte à plasma



Plasma d'Argon dans Mirox

POUR EN SAVOIR PLUS

C. Etiévant, "L'énergie thermonucléaire". Que sais-je, No. 1017

"Vers l'énergie de fusion : le programme européen". Glossaire
publié par l'Euratom, EUR 5462F

"Vers la fusion thermonucléaire contrôlée". P.J. Paris, LRP 139/78,
avril 1978, CRPP Lausanne

C. Jablon, "La fusion nucléaire par laser". La Recherche No. 83,
novembre 1977

M.-J. Lubin et A.P. Fraas, "Fusion by Laser". Scientific American,
No. 224, juin 1971

J. Tuck, "L'énergie de fusion". La Recherche No. 27, octobre 1972

T.P. Poffé, "Les tokamaks". La Recherche No. 65, mars 1976

F. Hofmann, "Die Kernfusion : eine neue Energiequelle ?", CRPP Lausanne,
septembre 1977

F. Troyon, "L'impact écologique de la fusion". CRPP Lausanne, mars 1977

D. Evans et P.D. Morgan, "Diffusion de la lumière par un plasma".
Pour la Science, No. 3, janvier 1978

A. Pochelon, R. Keller, "Alfvén Wave Heating Experiment of a High Beta
Plasma". Helvetica Physica Acta 50, 1972 (1977)

T.C.A. Project, CRPP, septembre 1977