

PRESENTATION DU  
CENTRE DE RECHERCHES EN PHYSIQUE DES PLASMAS

Août 1971

LAUSANNE

Ce fascicule décrit très brièvement ce que c'est qu'un plasma, son intérêt scientifique et pratique, la mission du CRPP et son travail actuel.

Lausanne, le 10 août 1971

*E. S. Weibel*

E.S. WEIBEL, directeur

T a b l e   d e s   M a t i è r e s

I	Le Plasma
II	La Fusion Thermonucléaire
III	Le Problème du Confinement d'un Plasma
IV	La Mission du CRPP
V	L'Enseignement et la Recherche
VI	Méthode de Recherche
VII	Développement et Budgets
VIII	Expériences Principales
IX	Théorie
X	Instrumentation
XI	Technologie

## I LE PLASMA

=====

La plus grande partie de la matière de l'univers se trouve dans un quatrième état qui est ni liquide, ni solide, ni gazeux et qui s'établit dans des conditions extrêmes<sup>1</sup>. Lorsque la température est très élevée ou la densité très petite, la matière devient un plasma. Dans cet état, les atomes et molécules sont fragmentés et ont cessé d'exister. Les débris qui restent sont les ions et les électrons, tous deux porteurs de charges électriques. C'est la charge électrique de ces particules qui donne au plasma ses propriétés extraordinaires.

Notre planète est une sorte d'îlot froid et dense qui permet l'existence des trois états, solide, liquide et gazeux qui nous sont familiers. Dès que l'on s'éloigne de la surface de la terre de quelques 100 km, le règne du plasma commence. D'abord on rencontre l'ionosphère dont l'importance dans les communications par radio est bien connue. Plus loin, on trouve les ceintures de Van Allen qui constituent la magnétosphère de la terre et qui sont des zones de plasmas piégés dans le champ magnétique terrestre.

A des distances plus grandes encore, le vent solaire domine la scène. Il n'est rien d'autre que du plasma éjecté par le soleil entraînant avec lui son champ magnétique. L'interaction de ce vent solaire avec la magnétosphère est à l'origine des effets spectaculaires de l'aurore boréale. Le soleil lui-même est une immense boule de plasma dont les mouvements se manifestent dans les taches solaires, les éruptions de matière et les tempêtes magnétiques pour ne citer que les phénomènes les plus connus. A l'intérieur du soleil la température atteint jusqu'à 10 millions de degrés. C'est là où des réactions de fusion nucléaire libèrent l'énergie rayonnée ensuite dans l'espace.

---

1) Conditions données par l'équation de Saha.

L'intérêt scientifique des plasmas est évident. La connaissance de notre univers ne sera pas complète sans la connaissance des plasmas.

## II LA FUSION THERMONUCLEAIRE =====

La fusion de deux noyaux légers peut former un noyau lourd et libérer de l'énergie. Dans le soleil un cycle complexe de réactions de fusion et de fission<sup>2</sup> conduit à une synthèse d'hélium à partir de l'hydrogène. Dans l'explosion d'une bombe H, du deutérium, du tritium et du lithium fusionnent.

Ce qui caractérise ces réactions c'est la température élevée nécessaire à leur entretien. On parle donc de réactions thermonucléaires. Dans le deutérium, le feu thermonucléaire s'allume lorsque la température atteint 100 millions de degrés. A de telles températures, le deutérium (et toute autre substance) est complètement dissocié en noyaux et électrons: c'est un plasma.

L'idée d'exploiter cette source d'énergie à des fins industrielles est séduisante. En comparaison avec le réacteur nucléaire classique, le réacteur à fusion futur promet des avantages énormes: 1) Le combustible - le deutérium et le lithium - est abondant et bon marché. Le deutérium contenu dans un litre d'eau ordinaire contient une énergie équivalente à 300 litres d'essence. Pratiquement le combustible est donc inépuisable. 2) Un réacteur à fusion ne présenterait aucun danger d'explosion, même lors d'une défaillance totale des moyens de contrôle. 3) Les déchets de combustion ne sont pas radioactifs, ce qui évitera de stocker des quantités croissantes de matériaux dangereux. Ces bénéfiques potentiels sont si grands que tous les

---

2) Cycle de Bethe - Weizsäcker

pays industrialisés consacrent depuis 15 ans des sommes considérables dans les recherches visant à maîtriser les réactions thermonucléaires. Voici un tableau qui indique - pour quelques pays - les budgets annuels approximatifs et le nombre de chercheurs engagés dans ces recherches :

	Millions de Fr.	Personnel scientifique
U S A	144	600
U R S S (estimé)	300	1'200
G B	35	255
C E E Euratom plus budgets nationaux	38 } 114 }	600
Pays-Bas (dépenses courantes Euratom compris , sans investissements capitaux) }	5.4	30
Suisse	1.9	15

Ces sommes sont toutefois inférieures d'un ordre de grandeur aux dépenses destinées aux recherches en physique des hautes énergies.

Aujourd'hui (1971), la physique des plasmas est la seule branche de la physique qui continue à se développer aux Etats-Unis.

Maîtriser les réactions thermonucléaires veut donc dire maîtriser le plasma. Mais le plasma est un état qui est infiniment plus complexe que l'état gazeux ou solide. C'est ainsi qu'un but essentiellement pratique nécessite des recherches fondamentales concernant un nouvel état de la matière.

### III LE PROBLEME DU CONFINEMENT D'UN PLASMA =====

La physique des plasmas intéresse donc à la fois une science très pure (l'astrophysique) et des recherches dont le but final est utilitaire (la fusion). Les relations étroites des physiciens des deux disciplines ont d'ailleurs été mutuellement profitables.

Pour étudier le plasma dans le laboratoire, il faut d'abord le créer. Un plasma ne peut être en contact avec une enceinte solide: aucun matériau ne résiste aux températures au-dessus de quelques milliers de degrés. Les seules forces qui sont capables de confiner (contenir) un plasma sont les forces magnétiques. L'étude des systèmes de confinement d'un plasma est donc au centre de toutes les recherches visant la fusion, à l'exception des tentatives d'allumer des mini-bombes par rayons laser. Le confinement d'un plasma est également le souci principal de l'expérimentateur qui aimerait tout simplement étudier le plasma.

Les difficultés à surmonter sont dues à la nature même du plasma. On sait qu'en équilibre absolu<sup>1</sup>, le confinement est impossible. Il devient possible pendant une durée plus ou moins longue si l'on exploite des mouvements microscopiques<sup>2</sup> dont le plasma est capable. La variété de mouvements microscopiques possibles est immense (infiniment plus grande que la variété de mouvements accessibles à un gaz). Ces mouvements sont aujourd'hui encore

---

1) Le terme consacré en physique est "équilibre thermodynamique".

2) La description du mouvement d'un plasma est donnée par les fonctions de distribution  $f_i(x,v,t)$  qui obéissent à l'équation de Vlasov. Les écarts de  $f_i$  par rapport à la maxwellienne sont essentiels au confinement. Par contre, dans un gaz  $f$  est toujours très proche d'une distribution maxwellienne si bien que le mouvement peut être décrit par la densité  $n(x,t)$ , la vitesse  $u(x,t)$  et la température  $T(x,t)$ , obéissant aux équations de Navier-Stokes qui sont bien plus simples.

difficilement contrôlables; ils dépendent de la forme géométrique des lignes de la force magnétique et de ses variations dans le temps. Les mouvements microscopiques déterminent les propriétés globales du plasma. L'étude du plasma est donc en grande partie l'étude des systèmes de confinement.

#### IV LA MISSION DU CRPP =====

La physique des plasmas est une discipline déjà très ramifiée. Dû à sa taille modeste, le CRPP était contraint à faire un choix entre différentes directions. D'entente avec le Fonds National Suisse, les recherches ont été orientées vers la fusion. Cette orientation donne une certaine urgence et actualité au travail; elle stimule les chercheurs par la compétition. Pourtant, cette orientation n'enlève rien au caractère fondamental des recherches. Car - et il faut y insister - les bases scientifiques et techniques qui permettraient de réaliser la fusion contrôlée n'existent pas encore.

On peut donc formuler la mission actuelle du CRPP de la façon suivante, très générale

- 1) Contribuer à l'avancement de la physique des plasmas
- 2) Développer des techniques utiles à la réalisation de la fusion thermonucléaire.

La direction des travaux, impliquée par 2), peut être motivée ainsi: bien que la fusion contrôlée soit encore un but spéculatif, son importance potentielle est trop grande pour que la Suisse reste à l'écart. Avec une dépense annuelle qui - sur le plan national - est négligeable,



la Suisse peut maintenir une équipe compétente qui sera capable d'encadrer rapidement un effort plus grand si et quand les recherches aboutissent, ici ou ailleurs.

En pratique le CRPP étudie sous 2) les systèmes de confinement à  $\beta$  élevé<sup>1</sup>, particulièrement les méthodes de la stabilisation dynamique et le chauffage du plasma par haute fréquence. La stabilisation dynamique est un principe qui eut son origine au CRPP et qui a été repris depuis par d'autres laboratoires. La démonstration a été faite que ce principe est valable<sup>2</sup>. Son application supprime les mouvements macroscopiques instables<sup>3</sup>. Cependant, des difficultés subsistent qui empêchent le confinement à longue durée: elles sont dues d'une part au développement d'une microturbulence dans le plasma, d'autre part à l'insuffisance des générateurs qui produisent les champs alternatifs.

---

1)  $\beta$  = rapport de l'énergie du plasma à l'énergie magnétique.

2) Wolf G.H., Dynamic Stabilization of the Interchange Instability of a liquid-gas interface, Phys.Rev.Letters 24, 444 (1970)

Wolf G.H., The Dynamic Stabilization of the Rayleigh-Taylor Instability and the Corresponding Dynamic Equilibrium, Z.Physik 227, 291 (196)

Wolf G.H., Dynamic Control of Hydrodynamic Instabilities, AIP Conf.Proc. No 1, p. 293 (1970)

Philips J.A., Forman P.R., Haberstich A., Karr H., Dynamic Stabilization of the Z-pinch, AIP Conf.Proc. No 1, p. 274 (1970)

Ancker-Johnson B., Dynamic Stabilization of Helical and Sausage Modes in Electron-hole Plasmas, AIP Conf.Proc. No 1, p. 305 (1970)

Nishida Y., Tanibayashi M., Ishii K., Suppression of Drift Instability by R.F. Electric Field, AIP Conf.Proc. No 1, p. 255 (1970)

---

2) Suite:

Decker J.F., Levine A.M., Dynamic Stabilization of a Two Stream Ion Instability, AIP Conf.Proc. No 1, p. 260 (1970)

Nakamura Y., Kojima S., Suppression of Longitudinal Electron Oscillation by beam modulation, AIP Conf.Proc.No 1, p. 264 (1970)

Becker G., Gruber O., Herold H., Dynamic Stabilization Experiment on a linear Screw-Pinch, AIP Conf.Proc. No 1, p. 286 (1970)

Bodin H.A., Butt E.P., Mc Cartan J., Wolf G.H., Dynamic Stabilization of an  $m=1$  Instability, Third European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics (Wolters-Nordhoff Publishing, Groningen, Netherlands) p. 76 (1969)

Orlinski D.V., Osovets S.M., Sinitsyn V.I., Dynamic Stabilization of a plasma column, Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna) Vol. II, p. 313 (1965)

Becker G., Gruber O., Harold H., Dynamic Stabilization of a Screw-Pinch, Plasma Phys. and Controlled Nuclear Fusion, IAEA Conference, Madison CN-28 (1971).

3) D'autres méthodes de stabilisation existent. La plupart d'entre elles sont seulement applicables à des plasmas à faible  $\beta$ . A  $\beta$  élevé, il faut noter la configuration Grad - Weitzner (Conf. Madison CN-28/J 6,7 (1971)) qui paraît être stable.

V L'ENSEIGNEMENT ET LA RECHERCHE  
=====

A l'heure actuelle, le CRPP contribue un seul cours au programme de l'EPFL. C'est un cours d'introduction à la physique des plasmas qui a suscité beaucoup d'intérêt parmi les étudiants. Il paraît souhaitable d'augmenter, dans l'avenir, la participation du CRPP à l'enseignement pour les raisons suivantes, qui sont assez évidentes.

Le CRPP a besoin d'une relève. Les jeunes physiciens suisses que nous avons engagés dans le passé n'ont pas de formation en physique des plasmas. Ils sont obligés de la parfaire parallèlement à leur activité d'assistants ce qui est inefficace.

Le CRPP possède des spécialistes dans des disciplines qui intéressent d'autres domaines que la physique des plasmas (Electronique de haute puissance, Analyse numérique, Mécanique statistique). Leurs connaissances devraient être disséminées par des cours.

L'enseignement profite au chercheur puisqu'il l'oblige à revoir son domaine sous un angle plus large.

C'est dans ce sens qu'un programme d'enseignement a été proposé au début de 1971 par le CRPP à l'EPFL: il est évident que la réalisation de ces cours nécessiterait une certaine augmentation des effectifs.

Proposition de Cours de Base

5ème Semestre

=====

Introduction:

Equation de Saha  
Théorie de Debye équation d'état  
Conductivité  
Méthodes de production en laboratoire

Réactions thermonucléaires:

Section efficace, vitesse de réaction  
Réactions thermonucléaires dans les étoiles  
Conditions de la fusion contrôlée  
Confinement par champs magnétiques  
Types de machines expérimentales

Modèles fluides:

Equations de mouvement MHD  
Equilibres  
Ondes

6ème Semestre

=====

Mouvement d'une particule dans le champ électromagnétique  
Approximation du centre de guidage et du centre d'oscillation  
Constantes de mouvement exactes et adiabatiques  
Collisions  
L'équation de Boltzmann  
Théorie simple des coefficients de transports  
Equations hydrodynamiques à 2 fluides  
Stabilité  
Ondes  
Ondes de choc

Ces cours seraient donnés chaque année.

Proposition de Cours Avancés

1. Méthodes de mesures
  - Mesures de paramètres macroscopiques
  - Sondes Langmuir
  - Sondes magnétiques
  - Sonde de pression
  - Interférométrie
  - Holographie
  - Photographie
  - Mesures de paramètres microscopiques par diffusion Thomson
  - Fonctions de distribution
  - Spectre de turbulence
  
2. Equations cinétiques
  - Fokker-Planck
  - Corrélations
  - Théorie des Coefficients de transport
  - Rayonnement de freinage
  - Rayonnement cyclotronique
  - Diffusion de la lumière
  
3. Le plasma sans collisions
  - L'équation de Vlasov
  - Méthodes de solution
  - Solutions stationnaires
  - Ondes
  - Amortissement et croissance spontanée
  
4. Micro-Turbulence
  - Théories quasi-linéaires
  - Equation de Boltzmann des quasi-particules
  - Evaluation des éléments de la matrice des interactions
  - Solutions stationnaires approchées
  - Résistance anormale
  - Diffusion anormale

Ces cours formeraient un cycle de 2 ans, pour les étudiants de 7ème et 8ème semestre et les post-diplômés.

VI METHODE DE RECHERCHE  
=====

Les recherches en physique de plasmas sont d'un type nouveau. Dans un sens, il s'agit d'une recherche appliquée puisqu'il y a motivation pratique. Mais en réalité, les connaissances de base sont encore à établir si bien que l'on est obligé de faire de la recherche fondamentale.

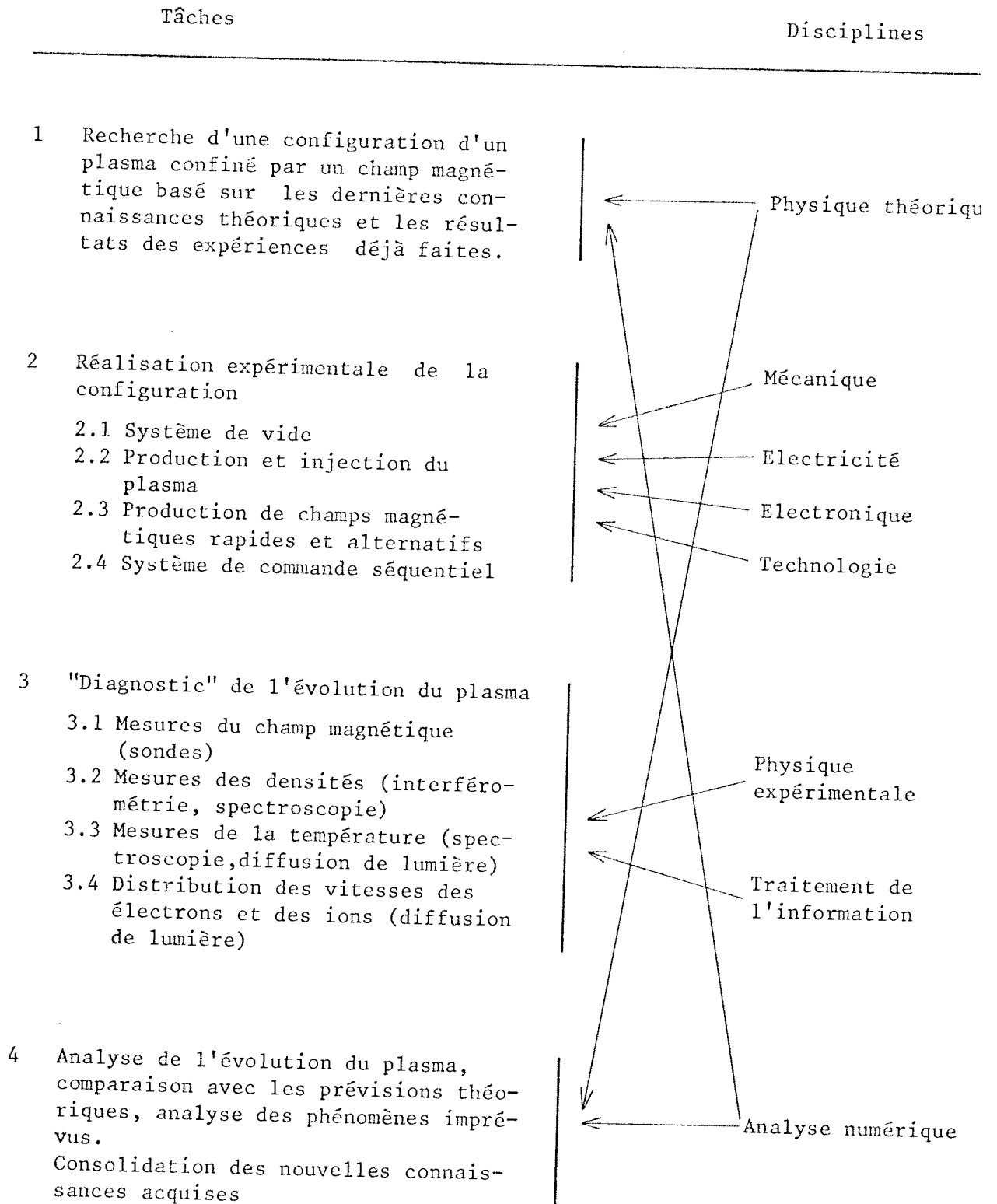
En physique des hautes énergies, un même accélérateur produit un faisceau de particules énergétiques qui peuvent être utilisées dans d'innombrables expériences. En physique des plasmas, on ne peut pas produire par une même machine "du plasma" que l'on étudie ensuite. La façon de produire et de confiner le plasma détermine ses propriétés. Il est donc souvent nécessaire de modifier ou de reconstruire complètement l'appareil produisant le plasma afin de modifier les propriétés du plasma que l'on étudie.

Les appareillages produisant les plasmas sont grands (des dizaines de tonnes) et très complexes. Afin de les réaliser, des moyens techniques considérables sont nécessaires. Dans l'effort total, la part de l'ingénieur est très importante.

Le tableau "Opération des recherches" divise en 4 phases, d'une façon très schématique, les activités du CRPP. On constate tout de suite qu'il s'agit d'un travail multi-disciplinaire. Evidemment en réalité le travail ne peut être divisé aussi nettement que le schéma pourrait le faire croire. Il n'est jamais possible de réaliser exactement une configuration idéale préconisée par la théorie. Des compromis sont nécessaires et doivent être élaborés entre le théoricien et l'ingénieur (phase 1 et 2). Chaque moyen de mesure (phase 3) fait partie intégrante de l'appareillage produisant le plasma et doit être prévu lors de sa construction (phase 2). Finalement, les mesures ne peuvent être analysées (phase 4) sans l'appui de l'expéri-

mentateur qui les a faites. Aussi le choix des mesures à faire se base sur des considérations théoriques. Ce tableau montre un cycle dans le sens que les résultats obtenus lors de l'analyse (phase 4) seront en général utilisés dans la conception de nouvelles expériences. Un cycle peut durer de trois à quatre ans dont une grande partie est - malheureusement - occupée par la construction de l'appareillage. A présent, le CRPP possède deux installations expérimentales produisant des plasmas: le Pinch à champ tournant (Exp. III) et le Theta Pinch incurvé (CTP I). Les expériences principales sont brièvement décrites au paragraphe VIII.

Opérations de Recherches





VII DEVELOPPEMENT ET BUDGETS  
=====

Le CRPP fut créé en 1961 par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique. Depuis et jusqu'à présent, il a été financé entièrement par cette fondation. De 1961 à 1968, le CRPP occupait des locaux provisoires d'une superficie de 700 m<sup>2</sup>, à l'avenue Ruchonnet 2 à Lausanne. En 1964, les chambres fédérales votèrent un crédit spécial pour la construction d'un bâtiment propre au CRPP et le Canton de Vaud lui offrit un droit de superficie sur une parcelle appartenant à l'époque à l'EPUL et sis à l'avenue des Bains 21. Le bâtiment fut terminé en mars 1968. Avec une surface de 2'400 m<sup>2</sup>, il permet une augmentation du personnel qui devra plafonner avec un effectif d'environ 60 employés.

Il est curieux de noter que le CRPP n'a pas de statut qui ferait de lui une personne juridique. Du point de vue légal, il est une entreprise privée.

Les deux graphiques (Fig. 1 et Fig. 2) montrent l'évolution du personnel et des budgets annuels. En considérant ces chiffres, on doit tenir compte du fait que le CRPP ne peut s'appuyer sur une organisation mère pour obtenir des services (ateliers spécialisés, comptabilité, personnel, entretien et nettoyage). Tous ces services existent à l'intérieur du CRPP. Par contre, les frais de calcul par ordinateur sont à présent supportés par le Centre de Calcul Electronique de l'EPFL. Ils s'élèvent, pour l'exercice courant, à environ Fr. 200'000.-. Si l'on ajoute cette somme au budget prévu pour 1974, on arrive à un total de Fr. 2,6 millions. Cette somme est à comparer avec la prévision initiale d'un plafond de 2 millions faite par le Fonds National en 1961, en tenant compte de l'inflation.

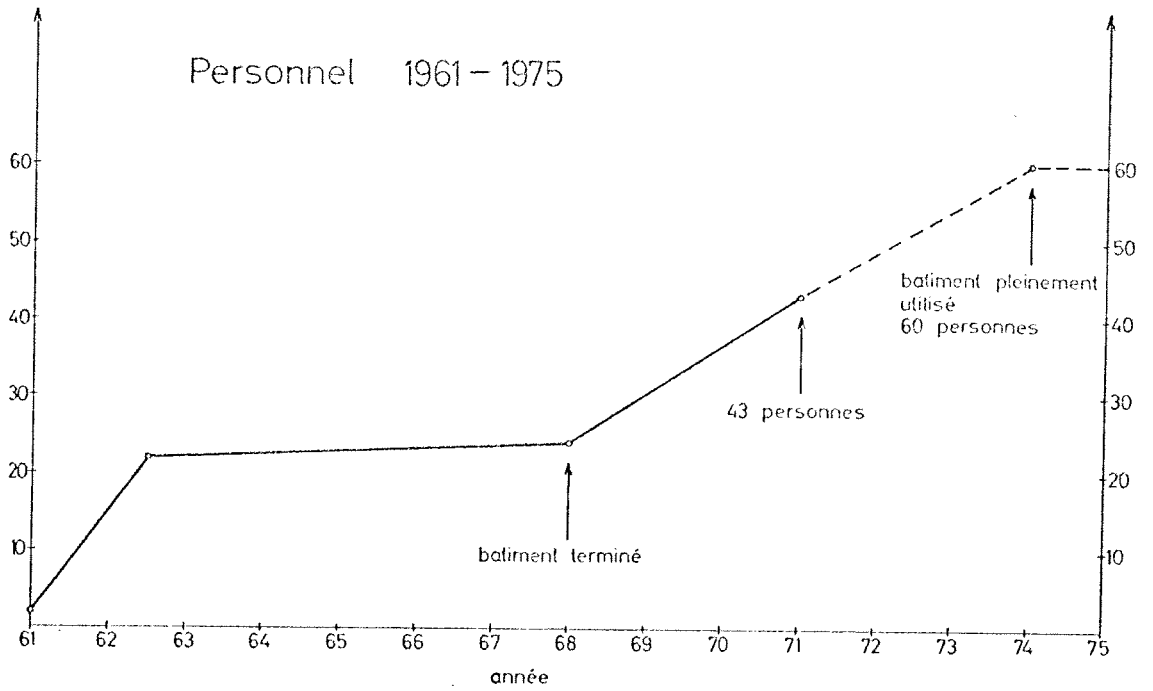


Figure 1

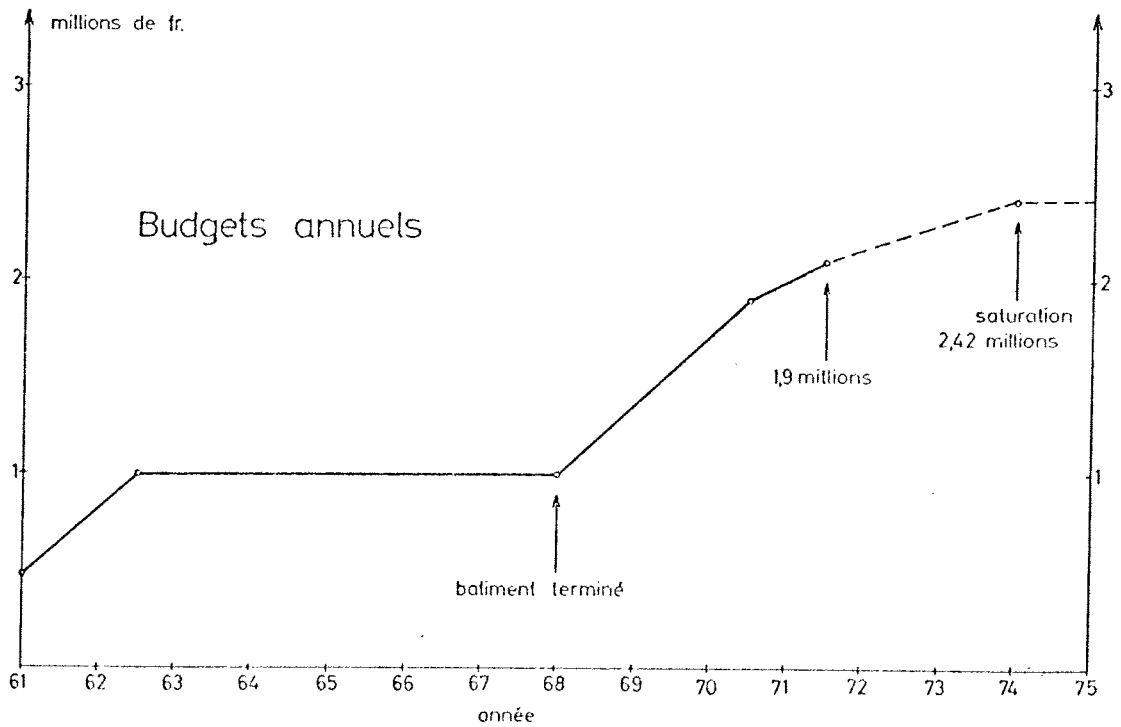


Figure 2

Personnel	1971
Directeur	1
Vice-Directeur	-
Senior Advisor	1
Chefs de groupe	4
Drs en Physique	6
Diplômés	3
Assistants	4
Techniciens	4
Aides Technique	4
Ouvriers	11
Chef d'Atelier	1
Secrétariat-Réception	2
Réfectoire	2
Etudiants à temps partiel, en moyenne	1
	<hr/>
	43

VIII EXPERIENCES PRINCIPALES  
=====

Pinch à champ tournant (Exp. III)

Cette expérience est la version la plus récente d'une série de machines destinées à étudier le problème du confinement d'une colonne de plasma par un champ magnétique tournant. En tout point de la surface de la colonne de plasma, le vecteur champ magnétique tourne à une vitesse constante dans le plan tangent (Fig. 3a). Cette rotation est produite en

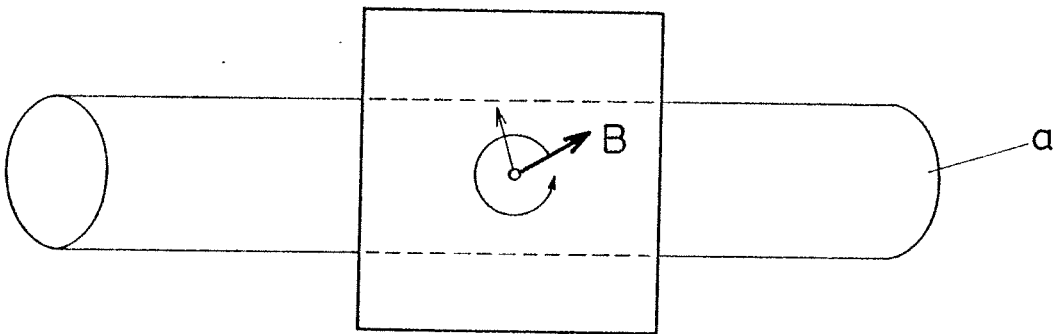


Fig. 3a Pinch à champ tournant: a) plasma cylindrique, B champ magnétique. Dans chaque point de la surface du plasma le champ magnétique tourne à une vitesse de 2.6 mega Hertz.

superposant 2 champs magnétiques oscillants déphasés, l'un produit par un courant axial entre deux électrodes annulaires situées aux extrémités de la colonne de plasma, l'autre par une bobine enroulée autour de la colonne de plasma. A un instant donné, les lignes de la force magnétique (Fig. 3b) forment des hélices qui entourent la colonne de plasma. Un

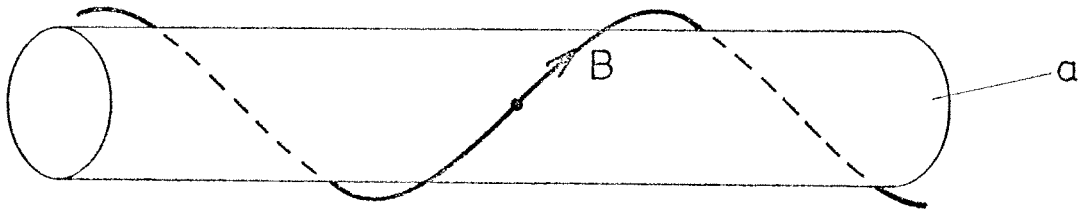


Fig. 3b Une ligne de la force magnétique à un instant donné.

instant plus tard, cette hélice aura un pas différent (Fig. 3c). Elle

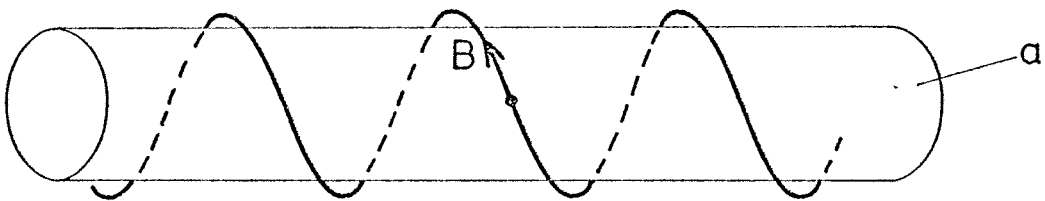


Fig. 3c Une ligne magnétique 80 nanosecondes plus tard.

s'enroule et se déroule donc périodiquement à une fréquence de quelques Mega-hertz. Les propriétés de cette configuration sont: chauffage rapide

du plasma,  $\beta$  très élevé et stabilité du confinement.

L'expérience précédente (Exp. II) avait été conçue pour étudier la phase de formation de la colonne de plasma. Elle nous a révélé un chauffage du plasma d'un ordre de grandeur supérieur à celui calculé en utilisant les valeurs de la résistance électrique normale. Cette résistance anormale semble être due à une micro-turbulence qui s'établit dans la couche limite.

L'Exp. III est une version élargie de l'Exp. II qui devra nous permettre d'étudier les origines de la résistance anormale. Elle utilise le dernier générateur à lignes décrit plus loin, capable de délivrer 500'000 kW à une fréquence de 2.6 Mega-hertz pendant 12 périodes. La colonne de plasma aura un diamètre de 15 cm et une longueur de 80 cm, le champ tournant atteindra une amplitude de 1.6 kgauss, ce qui donne une pression magnétique d'un dixième d'atmosphère.

#### Theta Pinch Incurvé (CTP)

Le theta pinch est une des configurations de confinement les plus simples et il est stable. Cependant, il confine le plasma seulement en deux directions; en direction de l'axe le plasma peut fuir le champ (Fig. 4). Un

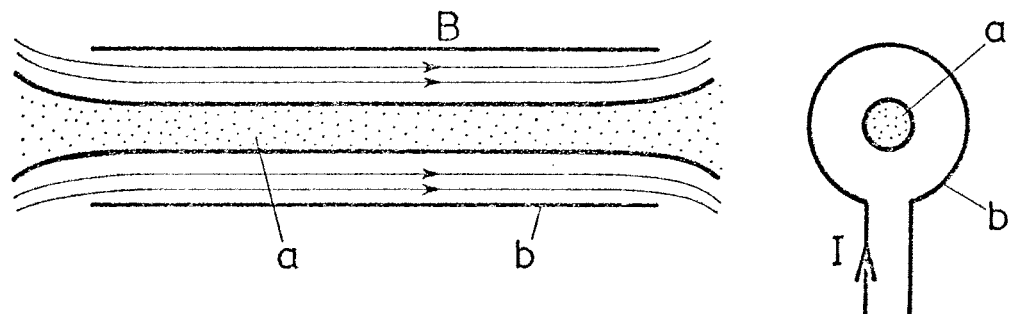


Fig. 4 Theta pinch: a) plasma, b) surface conductrice, B champ magnétique, I courant.

theta pinch toroïdal (Fig. 5) éviterait ces fuites, cependant cette confi-

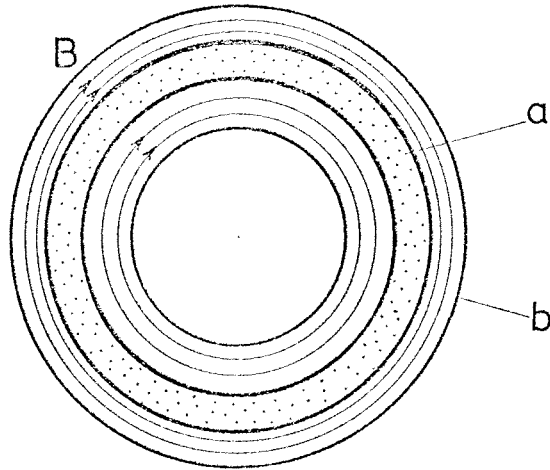


Fig. 5 Theta pinch toroïdal: a) plasma, b) surface conductrice, B champ magnétique.

guration n'est même pas en équilibre. Selon nos conceptions, l'adjonction d'un champ azimuthal oscillatoire doit permettre d'obtenir à la fois l'équilibre et la stabilité.

Afin de vérifier cette théorie, nous avons construit une machine qui reproduit la configuration désirée, mais - pour des raisons d'économie - seulement dans un secteur de tore (Fig. 6). Les extrémités sont donc toujours ouvertes. Les dimensions de l'appareil sont: longueur du tube 70 cm, rayon de courbure 187 cm, rayon du tube de décharge 25 cm, champ longitudinal 20 kgauss, courant de stabilisation 6 kA à 400 kHz. Les mesures photographiques faites jusqu'ici ont confirmé la théorie: le plasma reste confiné et stable pendant la durée de l'impulsion, soit 6  $\mu$ sec. Des mesures plus fines doivent encore être faites afin de déterminer les propriétés du plasma et les limites de stabilité.

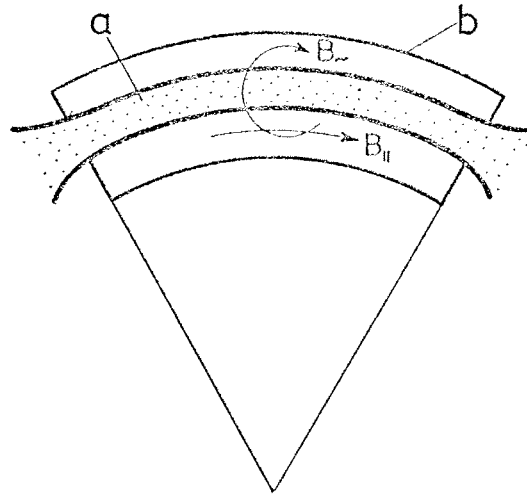


Fig. 6 Secteur d'un theta pinch toroïdal stabilisé: a) plasma, b) surface conductrice.  $B_{\parallel}$  champ toroïdal de confinement,  $B_{\sim}$  champ poloïdal de stabilisation.



IX T H E O R I E  
=====

Stabilisation dynamique

Le développement de la théorie de la stabilisation dynamique a constitué l'effort principal depuis la création du CRPP.

Pour illustrer le principe de la stabilisation dynamique, nous citons une expérience réalisée à l'Institut Max Planck de Garching (G.H. Wolf).

Normalement un liquide dans un verre retourné ne reste pas collé au fond du verre, bien que la pression atmosphérique soit suffisante pour soutenir le liquide. Il y a équilibre, mais cet équilibre est instable. Mais si le verre est agité verticalement à une vitesse et fréquence appropriées, le liquide se maintient au fond du verre: l'équilibre est stabilisé dynamiquement (Fig. 7).

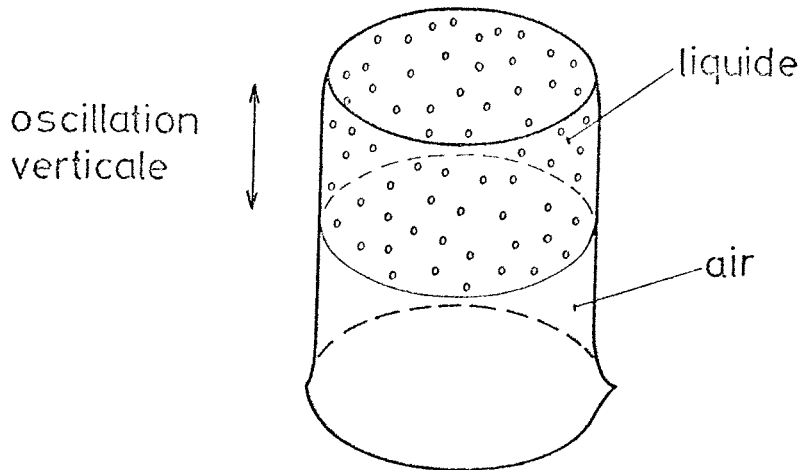


Fig. 7 Stabilisation dynamique d'un fluide dans un verre renversé.

C'est la démonstration la plus spectaculaire et la plus nette de l'applicabilité de la stabilisation dynamique à un système ayant un nombre infini de degrés de liberté.

Les méthodes théoriques très générales développées au CRPP ont été appliquées à cette expérience. L'accord qualitatif et quantitatif est parfait.

En généralisant, on groupe sous le nom de stabilisation dynamique les méthodes de stabilisation d'un équilibre qui font osciller un des paramètres du système. Dans le système décrit c'est l'accélération (la "pesanteur") qui oscille; dans nos systèmes de stabilisation dynamique du plasma, c'est la direction du champ magnétique qui varie.

La théorie est aujourd'hui complète dans le sens qu'elle donne d'une part des critères de stabilité approximatifs, mais facilement applicables, d'autre part des méthodes numériques pour la détermination des limites exactes de stabilité.

Ces limites ont été calculées - avec l'appui massif de l'ordinateur - pour les configurations étudiées au CRPP. Dans ce domaine, le CRPP est incontestablement à l'avant-garde.

#### Programmes de calcul de modèles fluides

L'importance et la complexité de la phase initiale de formation de la colonne de plasma dans un pinch à champ magnétique tournant a nécessité le développement d'un code unidimensionnel de résolution numérique d'un modèle à plusieurs fluides du plasma. Ce programme tient compte de tous les termes de transport (viscosité, conductibilité thermique, résistivité électrique, friction entre les composants) de manière réaliste pour permettre ainsi une

comparaison quantitative avec l'expérience. C'est ce code qui a servi à l'analyse des résultats de l'Exp. II et servira à l'interprétation des résultats de l'Exp. III.

Dans un  $\theta$ -pinch incurvé, l'évolution de la décharge ne peut plus être suivie par un code unidimensionnel. Nous développons un code à 2 dimensions, limité à des décharges à grand rayon de courbure (par rapport au rayon de la colonne). Pour des raisons de capacité de l'ordinateur actuel de l'EPFL, nous devons nous restreindre à un modèle à un fluide. Ce code n'est pas encore opérationnel.

#### Turbulence et simulation numérique

Les coefficients de transport à introduire dans les équations du modèle fluide du plasma peuvent être calculés pour un plasma tranquille. Cependant, les expériences montrent que très souvent le plasma est dans un état turbulent et que les coefficients de transport diffèrent, parfois de plusieurs ordres de grandeurs, des valeurs ainsi obtenues. Le calcul de ces coefficients pour un plasma turbulent est un problème insoluble en général, car ils dépendent de la configuration magnétique choisie. Les résultats dans ce domaine sont encore fragmentaires. La simulation numérique s'est déjà révélée un outil important, permettant d'identifier quelques-uns des mécanismes en jeu. La présence d'un nouvel ordinateur puissant à l'EPFL nous permettra de participer à ce travail. Ces calculs, en conjonction avec les mesures par diffusion de lumière, devraient permettre d'analyser l'état turbulent de nos plasmas.

## X INSTRUMENTATION

=====

Les grands progrès réalisés en physique des plasmas dans la dernière décennie n'auraient pas été possibles sans le développement de méthodes de mesures de plus en plus fines.

Il y a dix ans, la plupart des mesures faites concernaient des propriétés globales des plasmas. L'avènement du laser et les progrès spectaculaires en optique qui l'ont suivi permettent aujourd'hui d'obtenir des renseignements sur l'état microscopique du plasma.

Le développement des moyens de mesure est une des activités indispensables de tout laboratoire en physique des plasmas. Les instruments décrits ici ont été construits et perfectionnés au CRPP.

### Sondes

Le principe d'une sonde magnétique est extrêmement simple. Une petite bobine est placée dans le champ magnétique (Fig. 8). Chaque variation

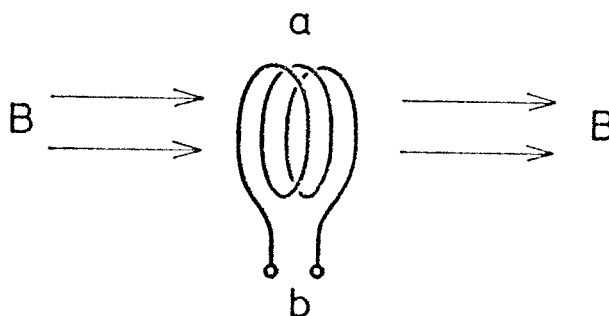


Fig. 8 Sonde magnétique: B champ magnétique, a) bobine, b) bornes.

du champ induit une tension électrique aux bornes de la bobine. Cette tension donne une mesure du champ.

En pratique de nombreuses difficultés doivent être surmontées afin de réduire les dimensions, augmenter la sensibilité et minimiser les distorsions. Des sondes multiples de quelques millimètres de diamètre et une bande de fréquence de 10 kHz à 30 MHz ont été réalisées.

### Fabry-Perot Multicanal

Le Fabry-Perot est un instrument optique (monochromateur) permettant une analyse spectrale extrêmement fine de la lumière. La lumière est séparée spatialement en canaux distincts qui peuvent correspondre chacun à une variation de longueur d'onde de quelques centièmes d'Angström; la mesure de l'intensité lumineuse dans chaque canal donne le profil de la raie spectrale.

La grande luminosité du Fabry-Perot autorise des mesures sur des raies de faible intensité. La réponse temporelle du système (importante pour des mesures sur des plasmas transitoires) est d'environ cinquante nanosecondes. Enfin et surtout, grâce à la remarquable stabilité de l'appareil développé à cette fin, il est possible d'effectuer des mesures échelonnées dans le temps sans étalonnage intermédiaire fastidieux.

Afin de mesurer le spectre, on envoie la lumière émise par le plasma dans l'entrée (a) de l'appareil (Fig. 9). Elle est présélectionnée dans un monochromateur (b), puis passe à travers un interféromètre Fabry-Perot (c) dont la dispersion angulaire dépend de la longueur d'onde. Après avoir traversé l'interféromètre, la lumière correspondant à une raie spectrale est répartie en douze canaux adjacents. La lumière correspondant à chaque canal (ou intervalle de fréquence) est réfléchié par un système de miroirs annulaires

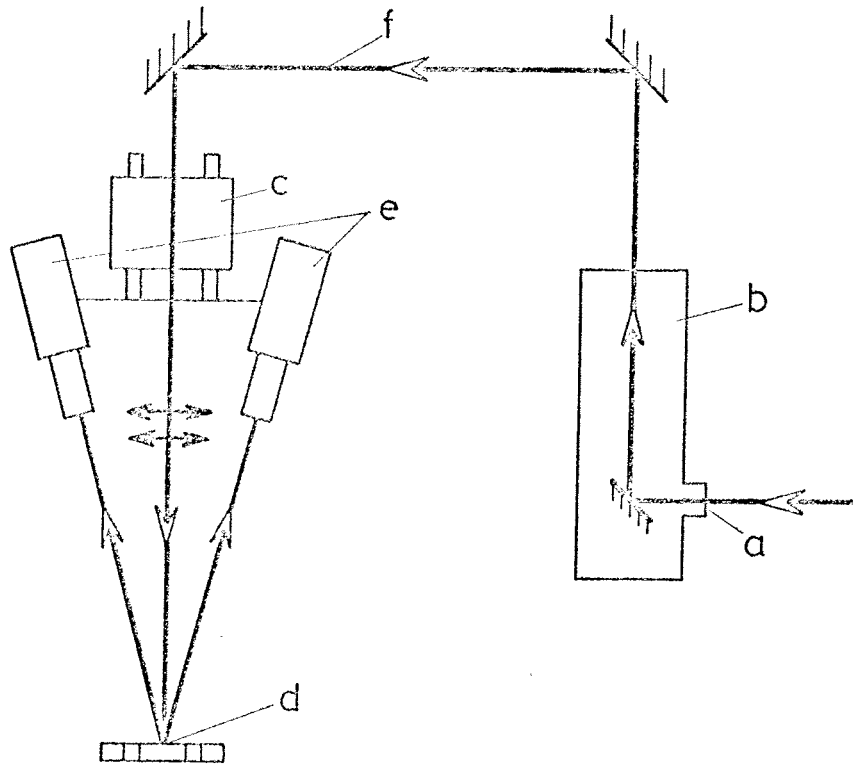


Fig. 9 Fabry-Perot multicanal: a) entrée, b) monochromateur, c) Fabry-Perot, d) miroirs annulaires inclinés, e) photomultiplicateur.

(D) dans un photomultiplicateur. La mesure des douze intensités lumineuses permet après analyse numérique de reconstituer le profil de la raie spectrale.

Cet appareil a été initialement construit en vue de mesurer la température des ions dans le plasma; les raies d'émission lumineuse des ions dans le plasma ont une largeur déterminée par l'effet Doppler: plus la vitesse des ions émetteurs est grande, plus la fréquence de la lumière diffère de la

fréquence porteuse correspondant à l'émission de la lumière par des ions au repos. Le spectre de la raie est une retranscription en fréquence de la distribution des vitesses ioniques; ainsi, à une température  $100.000^{\circ}$  correspond une largeur typique de raie d'un Angström.

Cet instrument sera également utilisé pour l'analyse du spectre diffusé de la lumière laser dans la région dite "de diffusion collective". Cette analyse de la lumière diffusée devrait permettre de mesurer la température ionique du plasma avec une meilleure résolution spatiale que dans l'étude du spectre de raies. La finesse de la raie laser et du Fabry-Perot (qui a été transformée pour des mesures dans le rouge) rendra possible la détection et l'identification des turbulences dans le plasma qui diffusent la lumière suivant un spectre caractéristique.

#### Interféromètre Mach-Zehnder

L'interférométrie utilise le fait que la vitesse de propagation (de la phase) d'une onde lumineuse est plus grande dans un plasma que dans l'air. La différence des vitesses est d'autant plus grande que la densité électronique du plasma est élevée. L'interféromètre (Fig. 10) divise d'abord

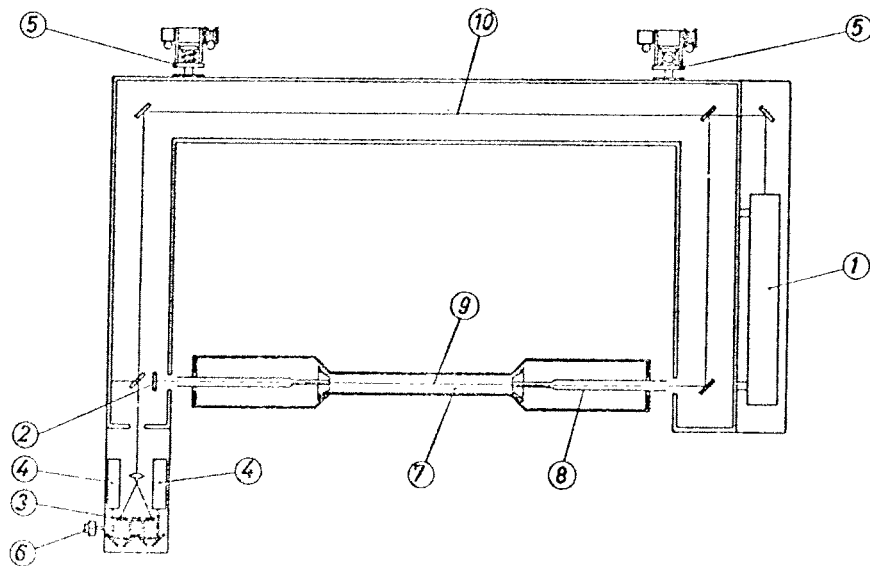


Fig. 10 Interféromètre: 1) laser, 9) faisceau passant par le plasma, 10) faisceau de référence.

un faisceau issu d'un laser (1) en deux faisceaux dont l'un (9) passe à travers le plasma; l'autre - le faisceau de référence (10) - se propage dans l'air. Les deux faisceaux sont ensuite réunis après avoir traversé la même distance. Mais la différence de la vitesse de propagation se traduit par un déphasage entre les deux faisceaux qui entraîne des modulations de l'intensité du faisceau recombinaé. En mesurant cette intensité, on déduit la densité électronique du plasma.

Le rayon lumineux de l'interféromètre Mach-Zehnder du laboratoire est créé par un laser He-Ne sélectionné suivant trois critères: longueur d'onde émise unique, puissance suffisante et grande cohérence spatiale pour que la phase du faisceau lumineux ne soit pas perdue le long d'une distance égale au parcours du rayon laser dans le plasma. Des précautions originales ont été prises pour l'introduction du faisceau laser dans le plasma, pour une sensibilité de mesure indépendante du déphasage et pour le dépouillement automatique des interférogrammes de mesure. Par cette méthode un déphasage de quelques degrés peut être détecté, ce qui correspond à une densité électronique minimale mesurable de  $10^{14}$  électrons par  $\text{cm}^2$  pour un parcours de un mètre dans le plasma.

#### Diffusion Thomson

La méthode de diagnostic offrant le plus de promesses pour la mesure des différents paramètres du plasma exploite la diffusion d'un faisceau de lumière par le plasma. C'est aussi la plus difficile.

Sous l'influence du champ électrique associé à l'onde lumineuse des électrons du plasma sont animés d'un mouvement alternatif rapide. Comme toute charge électrique accélérée émet un rayonnement électromagnétique, les électrons du plasma réémettent une partie de la lumière incidente (diffusion Thomson). L'intensité de la lumière diffusée étant proportionnelle à la



densité des électrons, la mesure de cette intensité donne la densité électronique.

La difficulté de la mesure provient de la faible intensité de la lumière diffusée, 1'000'000'000'000 fois plus petite que la lumière incidente. Il fut ainsi quasi impossible d'obtenir un niveau lumineux mesurable avant l'avènement des lasers de haute puissance. De plus, le laser donne un faisceau de lumière mince et monochromatique, c'est-à-dire de fréquence et de longueur d'onde bien déterminées; comme la lumière diffusée par les électrons est élargie par effet Doppler, la largeur de la raie de diffusion sera d'autant plus large que la vitesse thermique des électrons est plus importante. La diffusion Thomson permet ainsi de déterminer deux parmi les plus indispensables paramètres du plasma, la densité et la température électronique. Puisque le faisceau est mince, la résolution spatiale est excellente; de l'ordre du millimètre. La perturbation apportée au plasma est négligeable. La mesure de la lumière diffusée par un plasma reste néanmoins une des plus difficiles et délicates.

Dans ce but, la construction d'un laser déclenché de haute puissance est en voie d'achèvement. Ce laser est capable de délivrer plusieurs centaines de megawatts en quelques dizaines de nanosecondes (Fig. 11 , a,b,c) .

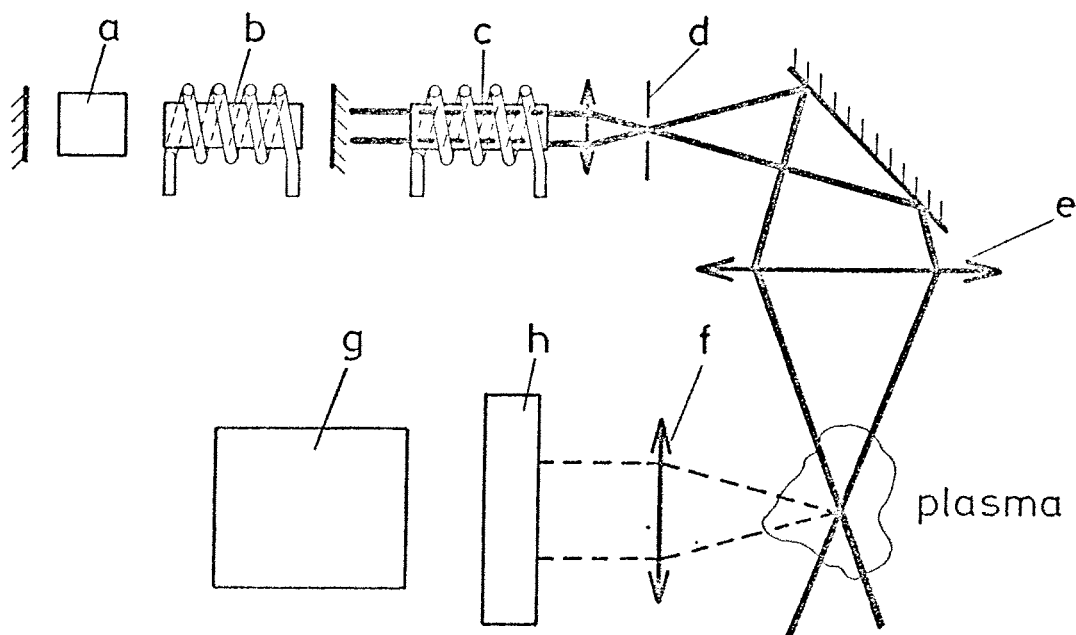


Fig. 11 Diffusion Thomson: a) cellule de Pockels, b) laser oscillant, c) laser amplifiant, d) fente, e),f) lentilles, g) photomultiplicateur, h) filtres interférentiels.

La lumière du laser est focalisée dans le plasma à travers un système optique . La lumière diffusée est collectée (f) à angle droit du faisceau incident et le spectre est analysé par un filtre interférentiel (h) pour déterminer l'élargissement de la raie spectrale due à la température électronique. Enfin, un photomultiplicateur ultra sensible retranscrit l'énergie lumineuse en signal électrique.

XI TECHNOLOGIE  
=====

La génération des champs magnétiques nécessaires au confinement du plasma se fait par décharge de bancs de condensateurs chargés à haute tension . L'enclenchement rapide de ces sources d'énergie sur le plasma, délivrant des centaines de milliers d'ampères, pose des problèmes encore imparfaitement résolus.

L'utilisation de champs magnétiques de haute fréquence, qui constitue l'originalité de notre approche au problème du confinement et de la stabilisation du plasma, a exigé le développement préalable de générateurs adéquats capables de délivrer des centaines de milliers de kilowatts à des fréquences de l'ordre de 1 MHz.

L'impulsion fournie par ces générateurs est actuellement limitée en durée; nous examinons la possibilité d'utiliser le principe du magnétron pour obtenir des durées d'impulsion plus longues.

Eclateurs

La Fig. 12 montre le schéma des éclateurs utilisés dans les générateurs à lignes décrits plus loin.

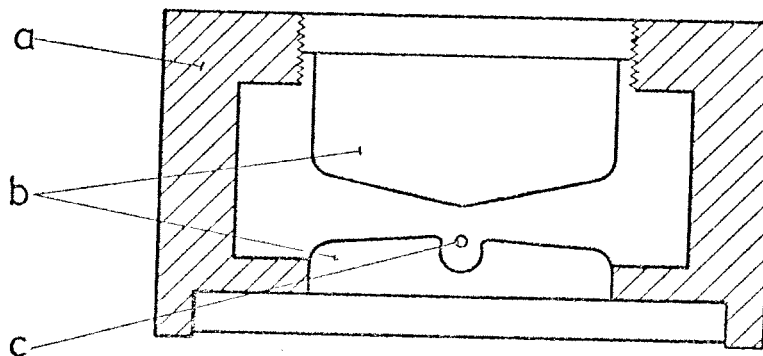


Fig. 12 Eclateur: a) corps, b) électrodes, c) trigger.

Les 2 conducteurs A et B sont à une distance suffisante pour qu'il n'y ait pas éclatement du gaz lorsque la tension est appliquée. On utilise un mélange d'hydrogène et azote à une pression variant de 1 à 5 atm. A l'instant désiré, une pointe de tension est appliquée à la troisième électrode T, appelée trigger, qui produit le démarrage d'un arc entre les 2 électrodes A et B. Ses performances sont: Tension entre 20'000 et 60'000 Volts, courant 10'000 Ampères, plage de fonctionnement: 1/3 de la tension, précision d'enclenchement  $\pm 15$  nanosecondes<sup>1</sup>.

Des efforts sont faits pour accroître la plage de fonctionnement et améliorer encore la précision du déclenchement. Des éclateurs à structure plus compliquée sont à l'étude (4 électrodes).

#### Générateurs à lignes

La création d'impulsions de courant haute-fréquence à une fréquence de l'ordre du mégacycle et à des puissances de l'ordre de centaines de milliers de kilowatts est impossible par les moyens conventionnels. Les générateurs à lignes développés entièrement dans ce laboratoire peuvent délivrer ces puissances à un coût relativement modeste.

Plusieurs variantes de ces générateurs, basées sur des principes voisins, ont été réalisées. La dernière version est la plus puissante. Elle délivre présentement sur une charge résistive 500 MW pendant 12 périodes à 2.6 MHz.

Le principe en est le suivant: une ligne discrète LC (Fig. 13) est divisée en 2 parties: une ligne active et une ligne d'attente. Dans la ligne active, les sections sont séparées entre elles par des éclateurs du type déjà décrit plus haut. La ligne d'attente et les éléments de la ligne active sont char-

---

1) 1 nanoseconde = 1/1000 000 000 secondes.

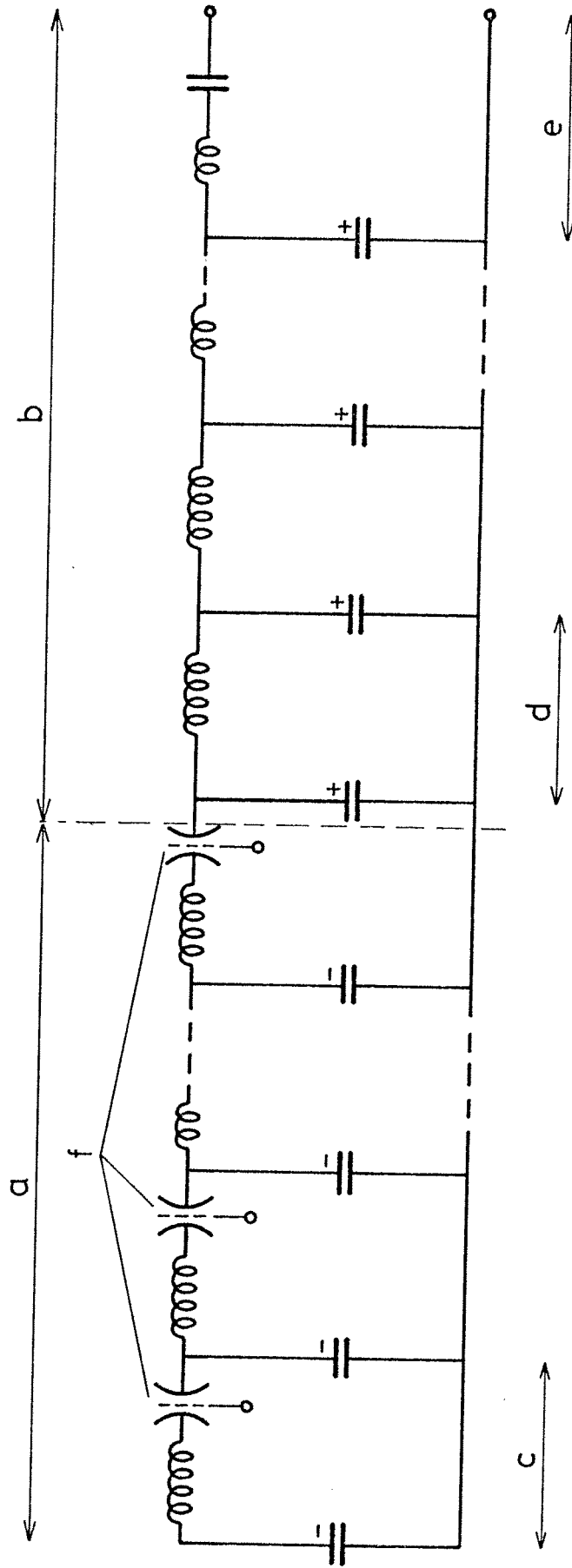


Fig. 13 Générateur à ligne: a) ligne active, b) ligne d'attente, c), d) sections actives et d'attente, e) terminaison, f) éclateurs.

gés à des tensions opposées. En enclenchant les éclateurs successivement, suivant un programme prédéterminé par le calcul, une onde est produite et se propage le long de la ligne. La ligne d'attente joue le rôle de ligne de retard et empêche que des réflexions éventuelles sur la charge ne viennent perturber le programme d'enclenchement des éclateurs.

C'est grâce à ces générateurs que le laboratoire a pu entreprendre des expériences qui sont encore uniques au monde.

Ces générateurs font encore l'objet de développements dans le sens d'une augmentation de la fiabilité et de la durée d'impulsion.

#### Magnétron basse-fréquence

La recherche de systèmes permettant de délivrer une grande puissance haute-fréquence pendant plusieurs centaines de microsecondes nous a conduit à ré-examiner la configuration du "split-anode magnétron". La Fig. 14 montre la configuration de base.

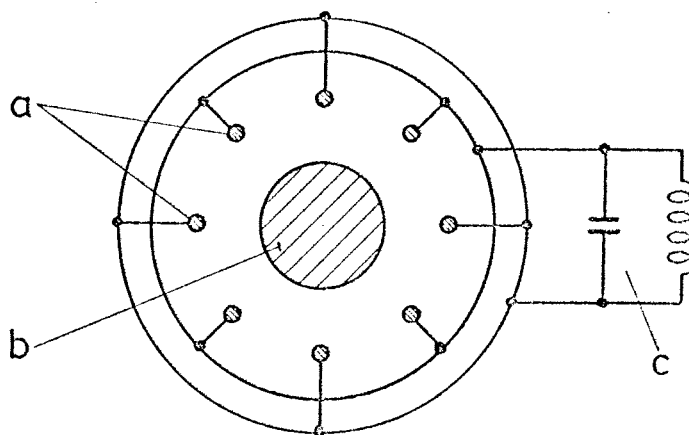


Fig. 14 Magnétron: a) anodes, b) cathode, c) circuit oscillant.

Le système est placé dans un champ magnétique uniforme parallèle à l'axe. Les ondes sont divisées en 2 groupes. Le principe de fonctionnement est le suivant: les électrons sortant de la cathode sont accélérés par le groupe d'anodes à la plus haute tension et sont déviés par le champ magnétique de façon à terminer leur course sur l'autre groupe d'anodes. Il en résulte une caractéristique courant-tension à pente négative, qui peut exciter des oscillations. La géométrie et les champs électriques et magnétron ont été optimisés par le calcul des trajectoires électroniques. Un premier prototype a été construit pour une tension anodique moyenne de 20 kV et dont la cathode est capable de fournir 600 Ampères, soit  $10 \text{ A/cm}^2$ . Ce premier prototype oscille à présent sur une fréquence parasite. Le problème majeur à résoudre est la suppression des modes d'oscillations indésirables.

LISTE DES RAPPORTS DU CRPP

=====

LRP	1/62	E.S. Weibel	High power R.F. pulse generator
LRP	1/63	R. Keller	Systèmes oscillants peu amortis, commutés avec un éclateur de faibles pertes
LRP	2/63	R. Keller	Une sonde pour haute tension, en connexion avec un circuit intégrateur transistorisé, à très large bande
LRP	3/63	E.S. Weibel	Heating and confinement of a plasma by alternating magnetic fields
LRP	4/63	M. Geiger et A. Lietti	Etude sur modèle et plan pour un oscillateur HF de 20 MW pour la stabilisation du Theta-pinch
LRP	5/63	J.P. Perotti	Banc de condensateurs pour Theta-pinch
LRP	6/63	A. Heym	Principe d'un générateur HF à ligne et étude d'un éclateur déclenché par déformation du champ
LRP	7/63	F. Troyon	Un programme de calcul d'ondes de choc convergentes dans un cylindre de gaz
LRP	8/63	M. Roux	Projet d'interféromètre micro-onde par transmission à propagation optique
LRP	9/63	A. Heym	Timing de l'expérience du Theta-pinch
LRP	10/63	F. Troyon	Stabilité d'une colonne de plasma. Modèle des particules libres
LRP	11/63	F. Troyon	Sur la stabilité d'un système linéaire passif dont un élément change périodiquement
LRP	12/64	F. Troyon	Stabilité d'une couche de plasma confinée par un champ tournant. Modèle acoustique
LRP	13/64	A. Lietti et M. Geiger	Oscillateur HF de 8 MW pour la physique des plasmas
Avril	1964	J. Durand	Mesures par spectroscopie et expérience "Sablier"
Mai	1964	A. Heym	Expériences préliminaires sur $\Theta$ -pinch



Mai 1964	M. Roux	Réalisation et mesure de l'interféromètre micro-onde à propagation optique et application à la décharge Cusp présentée à l'Exposition Nationale
Mai 1964	F. Troyon	The stability of a plasma confined by RF fields
LRP 14/64	R. Keller	Impulsions HF de 10 mégawatts sur impédance réelle, avec modulation de fréquence et d'amplitude
Juillet 1964	A. Berney	Mesures par spectroscopie de la décharge du $\theta$ -pinch "continu"
Décembre 1964	M. Roux	Méthode Schlieren appliquée à l'étude d'un plasma
LRP 15/65	R. Keller	Mesure du vecteur de propagation à l'intérieur d'un plasma confiné et chauffé par un champ de haute fréquence
LRP 16/65	J. Durand	Mesure des probabilités de transition de quelques éléments ionisés: Construction de l'expérience
LRP 17/65	F. Troyon et R. Keller	Profils de température dans une décharge haute fréquence
Mars 1965	A. Lietti	Impulsions HF de grande puissance
Avril 1965	A. Berney	Détermination de profils de raie à l'aide de photomultiplicateurs
Avril 1965	M. Roux	Transmission d'ondes millimétriques à travers la géométrie d'un $\theta$ -pinch
Avril 1965	A. Heym	Adaptation d'un générateur HF à ligne sur un plasma et mesure de la résistance du plasma
Avril 1965	I.R. Jones	Measurements on a magnetic well produced by two out-of-phase magnetic field configurations
INT. 1/65	M. Roux	Direction du rayonnement d'un plasma dans l'infrarouge lointain
INT. 2/65	J. Durand	Description et mode d'emploi du contrôleur de rayonnement
INT. 3/65	A. Berney	Mesures spectroscopiques appliquées aux plasmas

LRP 18/65	E.S. Weibel	The anomalous skin effect in a plasma
LRP 19/65	A. Heym et E.S. Weibel	Etude d'une décharge haute fréquence axiale
LRP 20/66	I.R. Jones	Beryllium pressure bar having a submicrosecond risetime
INT. 4/66	E.S. Weibel	Accurate Measurement of Large Currents
LRP 21/66	I.R. Jones	Pressure bar and photographic measurements on a high frequency theta-discharge
LRP 22/66	E.S. Weibel et R. Keller	On the design of a rotating field pinched discharge
LRP 23/66	R. Keller	Température ionique dans un confinement HF mesurée avec un sélecteur électrostatique
LRP 24/66	J. Durand	Etude de la précision des mesures en spectroscopie photographique
INT. 5/66	A. Lietti	Générateurs HF à ligne
INT. 6/66	A. Berney	Projet de construction d'un analyseur du profil des raies spectrales ou interférométrie Fabry-Pérot multicanal
LRP 25/66	F. Troyon	Stability of a dense plasma confined by a rotating magnetic field
LRP 26/66	A. Lietti	Champ magnétique tournant à haute fréquence
INT. 7/66	E.S. Weibel	Forschungsziele des Laboratoriums für Plasmaphysik in Lausanne
INT. 8/66	R. Keller	Conditions de préionisation, calcul schématisé
LRP 27/66	E.S. Weibel	Confinement d'un plasma par champ tournant - La stabilité du système générateur-plasma
INT. 9/66	M. Roux	Aide-mémoire concernant le filtrage du réseau
INT. 10/66	E.S. Weibel	L'équation de Vlasov dans la théorie spéciale de relativité
INT. 11/66	M. Roux	Transport phenomena in a completely ionized two-temperature plasma

LRP 28/66	J. Durand	Amplificateur d'impulsions à caractéristique logarithmique
LRP 29/66	J. Durand	Mesure des probabilités de transition de quelques raies de C II et C III
LRP 30/67	A. Berney	Analyseur de raies spectrales utilisant un interféromètre de Fabry-Pérot multi-canal
LRP 31/67	I.R. Jones, A. Lietti et J.M. Peiry	A Rotating Magnetic field pinch
LRP 32/67	H. Ripper	Mesure de la pression par un système à thermocouple compensé et à amplificateur découpeur, alimenté par batteries
INT. 12/67	E.S. Weibel	Transfer of radiation described by a Boltzmann equation
LRP 33/67	A. Heym	Mesures de densité électronique dans une décharge axiale de préionisation à l'aide d'un interféromètre amélioré
LRP 34/67	J.P. Perotti	Oscilloscope à 12 voies verticales
LRP 35/67	I.R. Jones, J.M. Peiry et D. Cocq	Appareil de mesure des propriétés d'un champ magnétique tournant
LRP 36/67	A. Heym	Mesures de la densité électronique dans une striction à champ tournant à haute fréquence
LRP 37/68	A. Lietti	Lumped Element Line Generators to produce pulsed sinusoidal oscillations in the Gigawatt range
LRP 38/68	J.M. Peiry	Mesure du Gradient de densité électronique par la méthode Schlieren dans un plasma confiné par champ tournant HF
LRP 39/68	A. Berney	Observations spectroscopiques des impuretés dans un plasma pulsé et mesures de températures ioniques
INT. 13/68	H. Falser	Remarks on Fokker-Planck Equation in the Landau-Form
INT. 14/69	A. Lietti	Mesures de Résistance de surface dans une expérience de striction par champ tournant de 3 MHz

LRP 40/70	A. Berney	Mesures de températures ioniques dans une striction à champ magnétique tournant
LRP 41/70	F. Troyon	
LRP 42/70	F. Troyon	Study of short Wavelength Instabilities in the confinement of a collision dominated plasma by a rotating magnetic field
LRP 43/70	A. Berney, A. Heym, F. Hofmann et I.R. Jones	Experimental Investigation of the 90 MW Rotating Field Pinch
LRP 44/70	E.S. Weibel et A. Lietti	Numerical Computation to Design a Rotating Field Pinch Experiment
LRP 45/70	F. Troyon et R. Gruber	Theory of the Dynamic Stabilization of the Rayleigh-Taylor Instability
LRP 46/71	F. Hofmann	Generalized One Dimensional Magnetohydrodynamic Computer Code for Partially Ionized Hydrogen or Helium Plasmas
INT. 15/71	E.S. Weibel	Opération symétrique du magnétron à basse fréquence
15.1.1971	E.S. Weibel	RAPPORT ANNUEL 1970
INT. 16/71	R. Gruber et F. Hofmann	Programme MHDPLT pour le traceur du CCE
INT. 17/71	M. Roux	Caractéristiques des Thyratrons 5727 (2D 21)
INT. 18/71	M. Roux	Caractéristiques des Eclateurs (type CRPP)
INT. 19/71	P. Oettinger	Review of Diagnostic Techniques Applicable to CRPP Plasmas
INT. 20/71	F. Hofmann	On the Design of a Rotating Magnetic Field Pinch Experiment

LISTE DES PUBLICATIONS DU CRPP

=====

- E.S. Weibel                    Dynamic Stabilization of a Plasma Column, *Phys. Fluids*  
3, 399 (1960)
- E.S. Weibel                    High Power rf Pulse Generator  
*Rev. Sci. Instr.*, Vol. 35, No 2, 173-175, Feb. 1964
- R. Keller                      Wideband High Voltage Probe  
*Rev. Sci. Instr.*, Vol. 35, No 8, 1057-1060, Aug. 1964
- R. Keller                      Haute fréquence de grande puissance obtenue au moyen  
d'un générateur à ligne  
*Helvetica Phys. Acta* 1965, Vol. 38, Fasc. 3, p. 328-336
- R. Keller et  
I.R. Jones                    Confinement d'un plasma par un système poliédrique à  
courant alternatif  
*Zeit. für Naturforschung*, Band 21a, Heft 7, 1966
- I.R. Jones                    Beryllium Pressure Bar Having Submicrosecond Risetim  
*Rev. Sci. Instr.*, Vol. 37, No 8, 1059-1061, Aug. 1966
- E.S. Weibel                    Anomalous Skin Effect in a Plasma  
*Phys. of Fluids*, Vol. 10, No 4, April 1967 (p. 741-748)
- I.R. Jones                    On the Use of the Pressure Bar Gauge in Plasma  
Physics Research  
*Helvetica Phys. Acta*, Vol. 40 (1967) p. 325-327
- I.R. Jones, A. Lietti  
and J.M. Peiry                A Rotating Magnetic Field Pinch  
*Plasma Phys.*, Vol. 10, pp. 213-228, Aug. 1967
- E.S. Weibel and  
R. Keller                    On the Design of a Rotating Field Pinched Discharge  
*Plasma Phys.*, Vol. 9, pp. 401-414, 1967
- A. Berney                    Températures ioniques et atomiques d'un plasma déter-  
minées par l'élargissement Doppler des raies spectra-  
les  
*Journal de Math. et de Phys. Appl. (ZAMP)*, Vol. 18,  
Fasc. 4 (1967) p. 588-590
- E.S. Weibel                    L'Equation de Vlasov dans la Théorie Spéciale de la  
Relativité  
*Plasma Physics*, Vol. 9, p. 665-670, 1967
- A. Heym                      Etude d'une décharge axiale à Haute Fréquence  
*Plasma Physics*, Vol. 10, p. 229-234, 1968
- F. Troyon                    Stability of a Dense Plasma Confined by a Rotating  
Magnetic Field  
*Phys. of Fluids*, Vol. 10, No 12, p. 2660-2674, Dec. 1967

- F. Troyon  
Instabilities in a Traveling Periodic Bumpy Theta Pinch  
Phys.Rev.Letters, Vol.19, No 26,p.1463-1465,Dec. 1970
- A. Lietti  
Radio Frequency Pulse Generators to Produce a 1.8 kG Rotating Field in a Plasma  
Rev.Sci.Instr., Vol. 39, No 6, p. 900-903, June 1968
- A. Heym  
Mesure de Densité Electronique à l'Aide d'un Interféromètre Amélioré  
Plasma Physics, Vol. 10, p. 1069-1075, 1968
- I.R. Jones, J.M. Peiry and D. Cocq  
Simultaneous, Local Measurement of Two Magnetic Field Components and the Sum of their Squares  
Rev.Sci.Instr., Vol. 40, No 1, 133-139, Jan. 1969
- A. Lietti  
Lumped Element Line Generators to Produce Pulsed Sinusoidal Oscillations of Very Large Power  
Rev.Sci.Instr., Vol. 40, No 3, 473-482, March 1969
- E.S. Weibel  
Dimensionally Correct Transformations between Different Systems of Units  
Am.Jnal of Phys., Vol. 36, No 12, 1130-1133, Dec.1968
- R. Keller, J.Ortelli and M. Peter  
Volume and Shape Magnetostriction of Alloys of Pd-Rh and Pd-Ag AT 4.2°K  
Physics Letters, Vol. 31A, Nb 7, April 1970
- E.S. Weibel  
Ion Cyclotron Instability  
Phys.of Fluids, Vol. 13, No 12, p.3003-3006, Dec.1970
- E.S. Weibel  
Reply to: Comment on: "Dimensionally Correct Transformations Between Different System of Units"  
Am.Jnal of Phys., Vol. 39/1, 119, Jan. 1971
- A. Berney  
Stable and Well Adjustable Fabry-Perot Interferometer  
App. Opt., Vol. 10, No 2, p. 443, Feb. 1971
- A. Berney  
Mesures de Températures ioniques dans un plasma de brève durée à l'aide d'un interféromètre de Fabry-Perot multicanal  
Helvetica Phys.Acta, Vol.44, Fasc.2, p. 213-237, 1971
- F. Troyon  
Dynamic Stabilization of High-Beta Plasmas,  
Symposium on Feedback and Dynamic Control of Plasmas  
Princeton 18-19 juin 1970 / American Inst.Phys.  
Conference, Proc. No 1 - p. 231 - 1970

- F. Troyon and  
R. Gruber  
"Theory of the Dynamic Stabilization of the Rayleigh  
Taylor Instability"  
Phys. Fluids (à paraître)
- F. Troyon  
Study of Short Wavelength Instabilities in the Con-  
finement of a Collision Dominated Plasma by a Rota-  
ting Magnetic Field  
Plasma Physics (à paraître)
- A. Berney, A. Heym,  
F. Hofmann and  
I.R. Jones  
Experimental Investigation of the 90 MW Rotating  
Magnetic Field Pinch  
Plasma Physics (à paraître)
- P. Boulanger  
Création d'Ondes dans un Plasma à Gradient de Densité  
(à paraître dans le "Journal de Physique")
- F. Troyon and  
R. Gruber  
Theorie der dynamischen Stabilisation der Rayleigh-  
Taylor Instabilität - Bâle 1970  
(à paraître dans "ZAMP").