

**PROCEEDINGS
OF THE INFORMATION DAY
FUSION & INDUSTRY**

Brussels, October 13-14, 1975

First European Meeting

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES
Directorate-General XII - Fusion Programme
Brussels (Belgium)

LEGAL NOTICE

This document was prepared under the sponsorship of the Commission of the European Communities.

Neither the Commission of the European Communities, its contractors nor any person acting on their behalf:

make any warranty or representation, express or implied, with respect to the accuracy, completeness, or usefulness of the information contained in this document, or that the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this document may not infringe privately owned rights; or

assume any liability with respect to the use of, or for damages resulting from the use of any information, apparatus, method or process disclosed in this document.

**PROCEEDINGS
OF THE INFORMATION DAY
FUSION & INDUSTRY**

Brussels, October 13-14, 1975

First European Meeting

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES
Directorate-General XII - Fusion Programme
Brussels (Belgium)

ABSTRACT

Proceedings of the Information Day-Fusion & Industry meeting held in Brussels on 13 and 14 October 1975. This was the first gathering at European level of representatives from European Industry, the Jet Design Team and the researchers working on controlled fusion in the various national laboratories associated with Euratom

INFORMATION DAY-FUSION & INDUSTRY

Brussels, 13-14 October 1975

C O N T E N T S

PREFACE

1. 13 October 1975
- 1.1. Opening speech : The Industries of the European Community Member Countries interested in the Community Fusion Project - G. SCHUSTER, Director-general for Research, Science and Education (CEC-DG XII - Brussels)
- 1.2. Le Programme Fusion - D. PALUMBO, Directeur du Programme Fusion (CEC-DG XII - Brussels)
- 1.3. La voie Tokamak et le JET - F. PREVOT (CEN-CEA-FaR), Chef de Service du Confinement au Centre d'Etudes Nucléaires à Fontenay-aux-Roses (France)

General discussion

2. 14 October 1975

- 2.1. Le Projet JET - P.H. REBUT, (CEA) Chef de Projet
 JET Design Team - Culham Laboratory
 Abingdon - UK
 But, description générale de l'appareil et performances de base. Organisation de l'équipe de design de JET. Contrats d'études et procédure d'appels d'offre. Problèmes budgétaires et programmation.
- 2.2. The JET Vacuum Chamber - D. ECKHARTT (IPP)
 JET Design Team - Culham Laboratory
 Abingdon - UK
 Including : vessel, activation, pumping system
- 2.3. The JET Magnet - M. HUGUET (CEA)
 JET Design Team - Culham Laboratory
 Abingdon - UK
 Including : toroidal field coils, mechanical structure, remote handling
- 2.4. The JET Poloidal System - D. SMART (UKAEA)
 JET Design Team - Culham Laboratory
 Abingdon - UK
 Including : poloidal field coils, iron core and power supplies
- 2.5. The JET main power supplies - E. BERTOLINI (CNEN)
 JET Design Team - Culham Laboratory
 Abingdon - UK
 Including : static, rotating and additional heating supplies

General discussion

2.6. Appendix

- 2.6.1. Le problème du chauffage des plasmas toroïdaux - E. CANOBBIO (Association EUR-CEA)
 CEN-CEA-Gren-Département de Physique du Plasma et de la Fusion Contrôlée-Grenoble (France)

REFERENCES

- 2.7. Updated information
- 2.8. Participants and their representatives
- 2.9. Alphabetic list of Participants
- 2.10. Subject index

PREFACE

This publication contains the proceedings of the Information Day-Fusion & Industry meeting held in Brussels on 13 and 14 October 1975, which was the first gathering at European level of representatives from European Industry, the Jet Design team and the researchers working on controlled fusion in the various national laboratories associated with Euratom.

On this occasion, the European Fusion Programme's central item, the project for constructing JET, a large Tokamak plasma physics device, was presented.

It is indeed most important that industrial circles should now be associated in the development of controlled fusion since, in the long run, on conclusion of the research period, industry will be responsible for building the operational fusion reactors, and will, meanwhile, have to supply the various components and apparatus required for experimental purposes.

These proceedings are also a tribute to the late Dr. Chas. Lafleur, who did his utmost to ensure the success of this meeting.

Information Day
FUSION & INDUSTRY

1st Day

1.1 G. SCHUSTER - Director-general of Research, Science and Education (CEC-DG XII - Brussels)
OPENING SPEECH : The Industries of the European Community Member Countries interested in the Community Fusion Project

I have been asked by Commissioner BRUNNER to convey to all of you his special greetings. Commissioner BRUNNER is responsible within the framework of the Commission for this present field of Research and Development. And I would also like to extend a special welcome to the representatives of UNICE who are with us today and, of course, to the observers from the Permanent Representations of the Member Countries here in Brussels. Thank you all for coming to this meeting.

I do not wish to make a long speech now but merely want to give you some ideas on the purpose of this meeting, on what we are aiming at.

Now, what is the present situation? It is the following.

The fusion project is a large-scale, long-term research programme which has mainly been carried out in governmental research laboratories and universities and in which industry has played a certain supporting role in providing tools for this research. The next phase of the programme, the five-year period from 1976 to 1980, which includes the JET - Joint European Torus - experiment and other large-scale experimental devices, will require much stronger involvement of industry. After this period, let's say in the next 15 or 20 years, industry will eventually take the leading role in exploiting the results of our European (R & D) Programme. I think that in this context, in the present situation, the aim of this meeting between representatives of the fusion programme and representatives of industry is to become mutually acquainted and to start a dialogue. A dialogue on the best strategy to adopt in order to involve industry in the project at the right time and, what is most important, in adequate time.

Collaboration in the field of thermonuclear fusion has been very successful in the European Community. Indeed, the situation to my mind is unique. For 15 years there has been active cooperation, resulting in the coordination of all work on fusion carried out in the various places in the Member Countries of the European Community.

Now, in approaching the phase during which industry will and must become increasingly involved, it is of crucial importance both to find and to pave the way for maintaining the unity of the EEC programme and to avoid falling back into national separatism, if I may say so. This will only weaken the progress and endanger the success of this programme. I think there is no need to dwell on this point. This is a very momentous point in time: involvement of industry in the right way without breaking the unity of action in this unique field of European cooperation. And it is for this reason that we are trying to face the problems of fusion at this early stage. Some of you might think it is too early, but our estimation and our assessment is that the time is now ripe for beginning this dialogue and for the preparation of effective European cooperation in due course. And now you may wish to ask, "what can be done?". I am not able to give you an answer to this question, but I can tell you that in the United States some links already exist between industry and most of the ERDA laboratories involved in the fusion programme.

We have to find an answer that fits our particular situation, a European answer. Some of my friends and other people are thinking along the lines of creating a sort of European fusion consortium, perhaps one or two, I do not know. I would not like to take a definite stand on this point; I would not like to advance any proposal, but I would like to give the direction in which we have to think now. In this sense, I would like to ask you, all of you, to contribute to finding an appropriate solution, to think about this and to discuss it with your colleagues after this meeting. I would be very grateful if some of you would write to me giving your ideas on this subject, which is most important for continuing the dialogue.

Gentlemen, the idea and the purpose behind this meeting is that this distinguished forum may contribute to the improvement of relationships and the integration of industry in the European thermonuclear fusion programme. And now, gentlemen, we will have the speech by Mr PALUMBO, the Director of the fusion programme and, you have the agenda I think, after that a speech by Mr PREVOT. I would like to add that there is time for discussion after each of the speeches.

1.2 D. PALUMBO - Directeur du Programme Fusion - Commission des Communautés européennes - Direction générale XII

LE PROGRAMME FUSION DE LA COMMUNAUTE EUROPEENNE

En 1974 les pays de la Communauté Européenne ont consommé 10 millions de $\text{GWh}_{\text{therm.}}$ d'énergie primaire ; environ un quart de ces 10 millions ont été utilisés pour produire 1 million de $\text{GWh}_{\text{electr.}}$ d'énergie électrique.

(TABLEAU I)

Ceci a été obtenu en brûlant 1 milliard de tonnes équivalents de charbon (tec), en fait en majorité du pétrole en très grande partie acheté à

TABLEAU I

■ ENERGIE TOTALE CONSOMMEE DANS LA CE EN 1973	$1,3 \times 10^9 \text{tec}^* = 10^7 \text{GWh}_{\text{therm.}}$	
■ ENERGIE ELECTRIQUE CONSOMMEE DANS LA CE EN 1973		10 $\text{GW}_{\text{electr.}}$
■ IMPORTATION D'ENERGIE DANS LA CE EN 1973	$0,82 \times 10^9 \text{tec}$	AU COUT DE 50 milliards DE UC
■ L'ENERGIE TOTALE DE $10^7 \text{GW}_{\text{therm}}$ EST EQUIVALENTE A 500t DE LITHIUM DONT LE COUT EST DE 10 millions DE UC		

*) 1 tec = tonne équivalente de charbon ($\hat{=} 8,36 \times 10^6 \text{ kWh}$)

l'extérieur et pour cela on a payé 50 milliards d'Unités de compte (UC). Si la Fusion était possible, pour obtenir le même résultat on aurait pu brûler 500 t de lithium, probablement produit et disponible en Europe, et ceci aurait coûté environ 10 millions de UC.

Or sur la base des progrès des dernières années, ce rêve du contrôle de la fusion thermonucléaire apparaît maintenant moins incertain que dans le passé. Telles sont les données du problème.

La réaction nucléaire qui pourrait fournir cette énergie est (Fig. 1.) : Le neutron de la première réaction pourrait, en agissant sur le lithium

(${}^7\text{Li}$) produire de l'hélium et du tritium plus un neutron qui à son tour peut agir sur le (${}^6\text{Li}$) produisant encore un autre tritium.

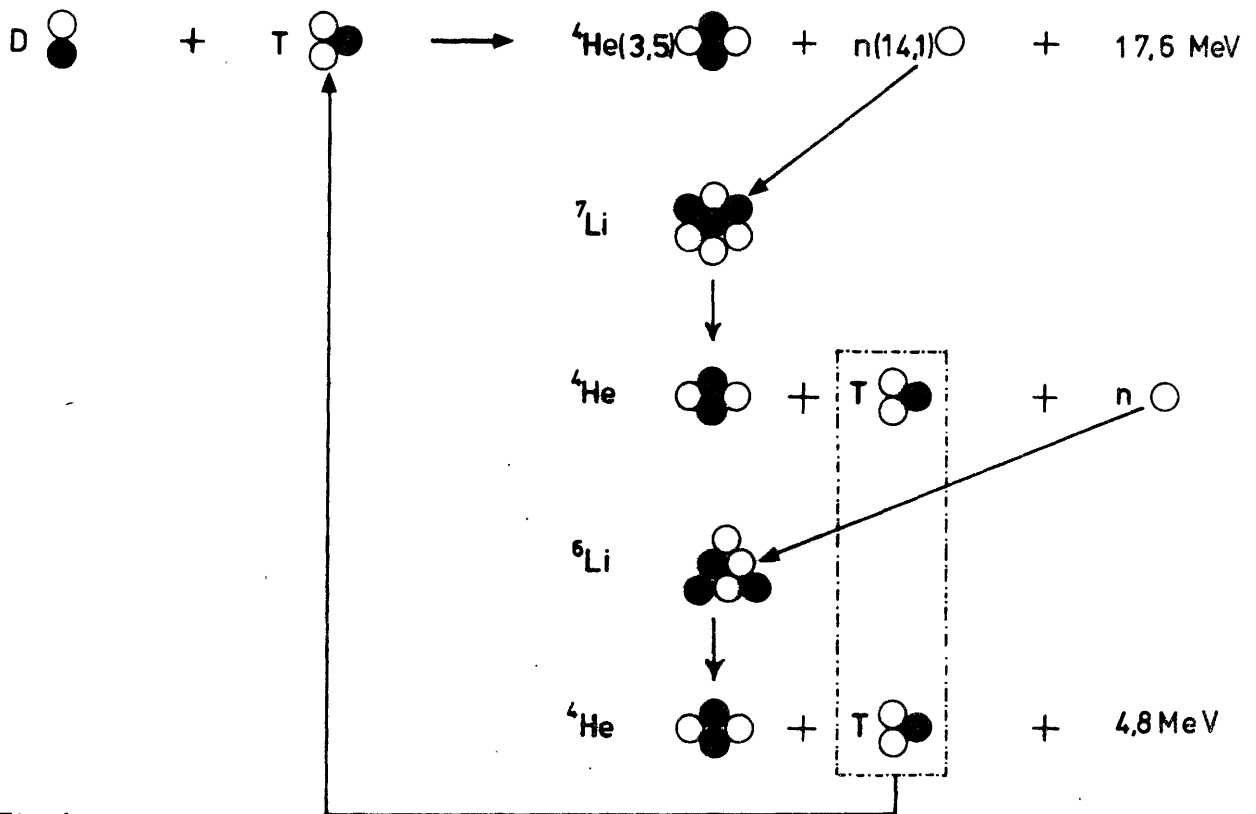


Fig.1

Donc, la réaction est telle que le combustible tritium est régénéré par la réaction elle-même et en fait on peut produire plus de tritium qu'on en brûle (effet de surrégénération).

Le temps de dédoublement peut être, en principe, réduit à quelques mois, voire quelques semaines. Au cas où cette surrégénération rapide du tritium ne serait pas nécessaire, on pourrait utiliser une partie du flux neutronique pour produire d'autres matériaux.

Donc, les combustibles essentiels sont le deutérium, qui est très abondant, pratiquement illimité et le tritium qu'on peut obtenir à partir du lithium qui lui-même est diffus, et dont le stockage ne présente pas de problèmes. Un réacteur à fusion (Fig. 2.) serait ainsi essentiellement un "brûleur nucléaire" à l'intérieur duquel se trouve le mélange de deutérium et de tritium sous forme de plasma.

Cette chambre de combustion est entouré par un "manteau", c'est-à-dire par

une couche fertile de lithium, ou contenant du lithium, où se dépose l'énergie des neutrons de 14 MeV qui s'échappent du brûleur, et où est

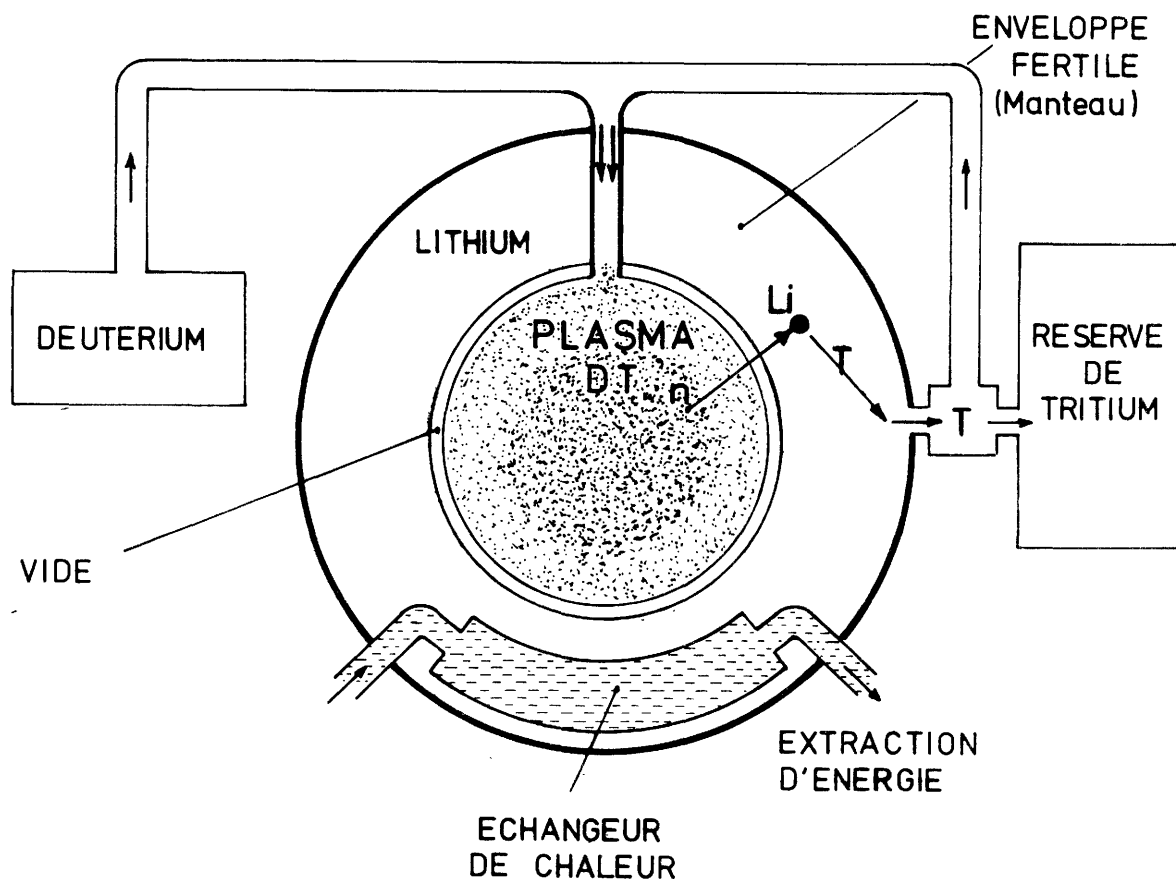


Fig.2

produit le tritium par la réaction du neutron avec le lithium.

Cette énergie est transmise à des échangeurs de chaleur pour sa conversion en énergie mécanique ou électrique.

La difficulté inhérente à l'exploitation industrielle de la Fusion réside dans le fait que la température de combustion de la réaction $D + T$ s'élève pratiquement à 100-200 millions de degrés K.

Le problème est donc de chauffer le combustible à ces températures énormes et de le maintenir en condition de brûler, c'est-à-dire confiné dans un volume limité, pour une certaine durée.

En fait, considérons 1 cm^3 de combustible et soit n la densité, c'est-à-dire la quantité d'atomes contenue dans ce cm^3 . Pour chauffer ce centimètre

cube de combustible à l'énorme température mentionnée, il faut fournir de l'énergie, en général de l'énergie électrique, et évidemment l'énergie requise E_{inp} sera proportionnelle à la quantité d'atomes contenus, donc :

$$E_{inp} \propto n \quad (1)$$

Une fois que le combustible est chauffé et brûle, comme il s'agit de réactions binaires, la quantité de réactions par cm^3 et par seconde est proportionnelle au carré de la densité. Donc, si on est en mesure de garder les conditions de combustion pendant un temps t , l'énergie produite est :

$$E_{out} \propto n^2 t \quad (2)$$

Or, si on compare l'énergie qu'il faut fournir (proportionnelle à n), et l'énergie qu'on peut obtenir (proportionnelle à $n^2 t$), on voit que nt doit dépasser certaines limites. Tous comptes faits, dans le cas le plus favorable, il s'avère que ce produit nt , pour avoir un bilan d'énergie en égalité, doit être plus grand que $10^{14} cm^{-3}s$. Donc :

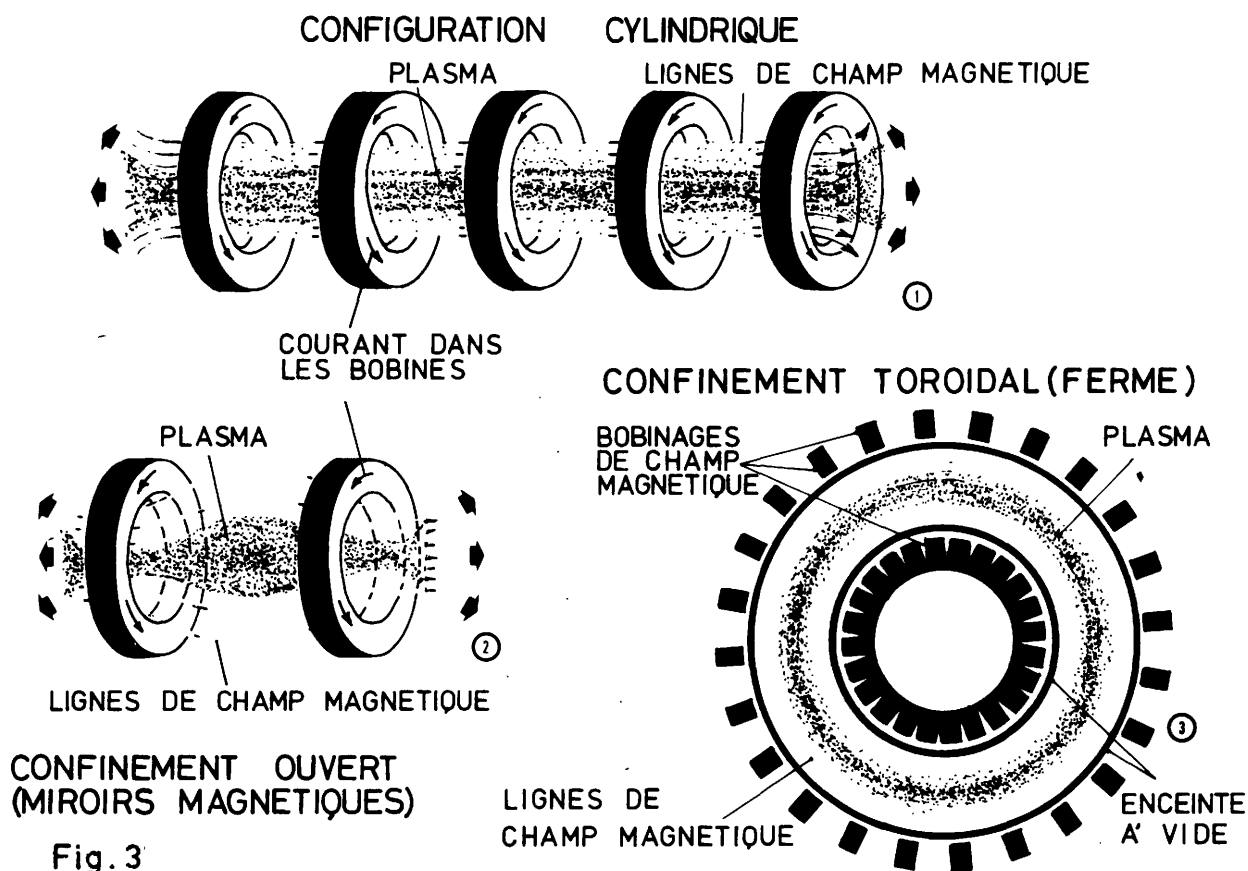
$$L_{gr} \equiv nt > 10^{14} cm^{-3}s \quad (3)$$

Ceci s'appelle le "Critère de Lawson".

Ce critère nous montre que si on peut travailler à des densités très élevées on peut se contenter de temps très courts, parce-que c'est le produit qui compte. Par exemple, à des densités très élevées, soit environ 100 ou 1000 fois celle de l'hydrogène solide, ce qu'on espère atteindre dans la fusion par Laser, les temps requis seraient très courts, de l'ordre d'une nano-seconde et l'inertie de la matière, sans autre forme de confinement, suffirait à assurer ce temps de combustion.

Mais, si on utilise des combustibles de densité plus basse, ce qui semble plus simple, alors il faut des temps considérablement plus longs, par exemple avec les Tokamaks on espère avoir des densités n justement de l'ordre de 10^{14} particules par cm^3 et donc il faut des temps t d'une seconde environ pour que le produit nt soit plus grand que 10^{14} . La plus grande partie de l'activité mondiale, et pratiquement toute celle d'EURATOM est dirigée vers la recherche de solutions à densité relativement basse, donc, je me bornerai à ce que je viens de dire sur la fusion par Laser. Pour obtenir des temps de confinement de la seconde et à de telles températures, se pose la question du "récipient". Le recours à toute paroi maté-

rielle étant exclu, on se base sur le fait qu'à ces températures les atomes sont totalement ionisés, et donc sensibles aux forces électromagnétiques (on appelle "plasma" un tel état de la matière), et on peut avoir recours aux champs magnétiques en construisant des "bouteilles magnétiques". La forme la plus simple est constituée par un solénoïde cylindrique (Fig. 3.1.) qui



produit un champ dont les lignes de force sont pratiquement axiales. Or, il s'avère que le confinement est très bon dans les directions perpendiculaires au champ, les particules diffusant en effet assez lentement à travers les lignes de force, mais il est pratiquement nul dans la direction longitudinale. En fait, dans le cas considéré le plasma s'échapperait librement dans le sens axial et comme les vitesses des ions aux températures requises sont de l'ordre de 1000 km/s, il faudrait pour obtenir un temps suffisant, de l'ordre de 1 seconde, un solénoïde de 100 à 1000 km de long, ce qui pour plusieurs raisons semble impraticable.

Alors, on a employé deux façons pour résoudre le problème :

- la première est de resserrer les lignes de force aux extrémités (Fig.3.2), de ne pas avoir des lignes pratiquement parallèles mais des lignes qui se

resserrent aux deux bouts. On appelle ceci la configuration à "miroirs magnétiques", elle assure un confinement longitudinal au moins partiel, mais il semble douteux que le confinement axial puisse être suffisant. - la deuxième consiste à replier ce long cylindre sur lui-même en le faisant devenir un tore, un anneau (Fig.3.3). Ainsi les bouts sont supprimés de même que leurs effets néfastes (configuration toroïdale).

Or, il s'avère malheureusement que, si on se limite à plier ce cylindre en forme de tore, les lignes de force deviennent des cercles et on peut démontrer théoriquement et expérimentalement qu'un champ aussi simple n'est pas capable de confiner un plasma. Pour faire ça, il faut que le champ magnétique, en plus de la composante le long du tore, possède une composante que nous appelons polôïdale de façon que les lignes de force soient des hélices qui s'enroulent, en général sans fin, autour de l'anneau de plasma. En fait, chaque ligne engendre une surface annulaire, appelée "surface magnétique" ; chaque surface est aussi une surface où la pression du plasma a une valeur constante. Evidemment, cette pression décroît du centre vers la périphérie où, pour éviter le contact avec la paroi du dispositif, elle doit être nulle.

On peut parvenir à obtenir un champ hélicoïdal, qui s'enroule autour du tore, de deux façons : la première, qui apparaît la plus évidente, est de faire circuler dans l'anneau de plasma qui est un excellent conducteur, en principe meilleur que le cuivre, un courant électrique produisant un champ magnétique qui s'ajoute au champ produit par les enroulements extérieurs : c'est le principe du Tokamak et, plus en général, le principe de ce que nous appelons les "pinches toroïdaux", (Fig. 4).

Une deuxième idée, plus subtile et peut-être moins évidente est celle de tâcher de produire la totalité du champ magnétique par des bobinages extérieurs hélicoïdaux, c'est le principe du Stellarator.

Dans la figure 5, on peut voir deux séries de bobinages : les plus foncées sont les bobines qui produisent le champ le long du tore, et les plus claires qui se trouvent à l'intérieur, donnent la bonne courbure aux lignes de force. Dans le cas du pinch toroïdal, le courant lui-même provoque, comme dans tous les cas où un courant circule dans un conducteur, le chauffage du plasma. Toutefois, on peut prévoir qu'en général cet effet est insuffisant à l'obtention des températures requises, donc il faut pour le Tokamak et à plus forte raison pour le Stellarator, avoir recours à des procédés auxiliaires de chauffage.

Ceux-ci peuvent être basés sur la compression du plasma par un accroissement

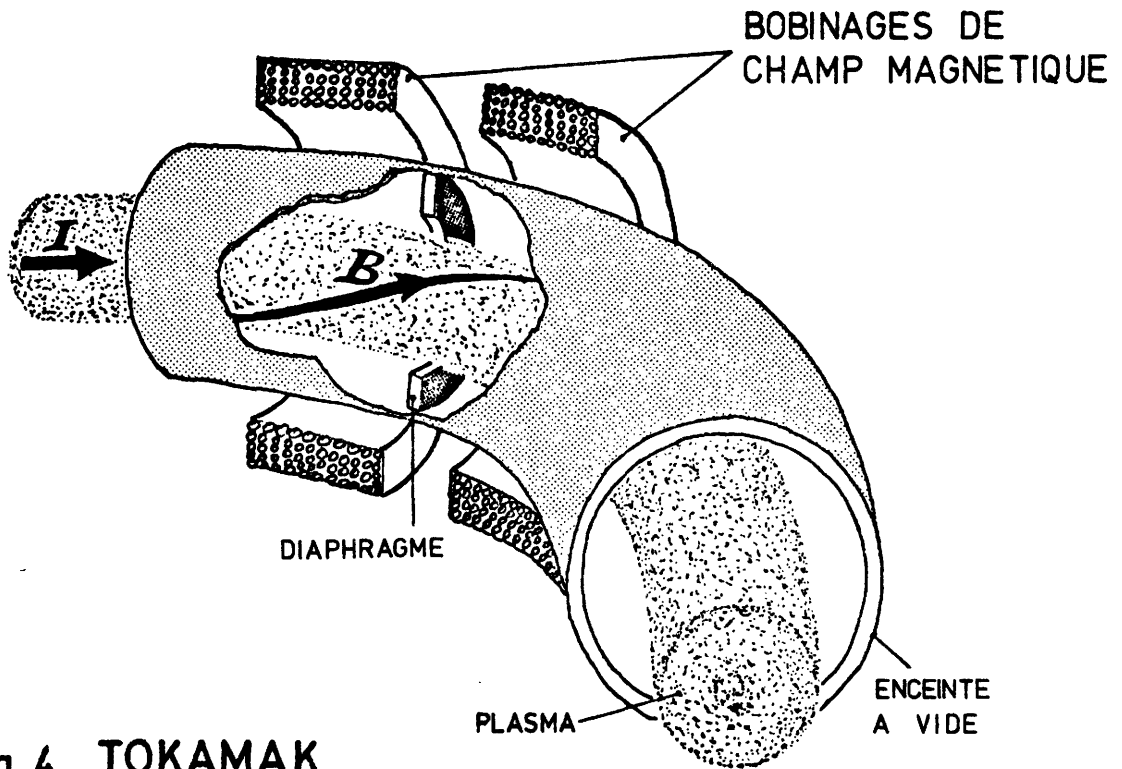


Fig.4 TOKAMAK

BOBINAGE
DU CHAMP TOROIDAL

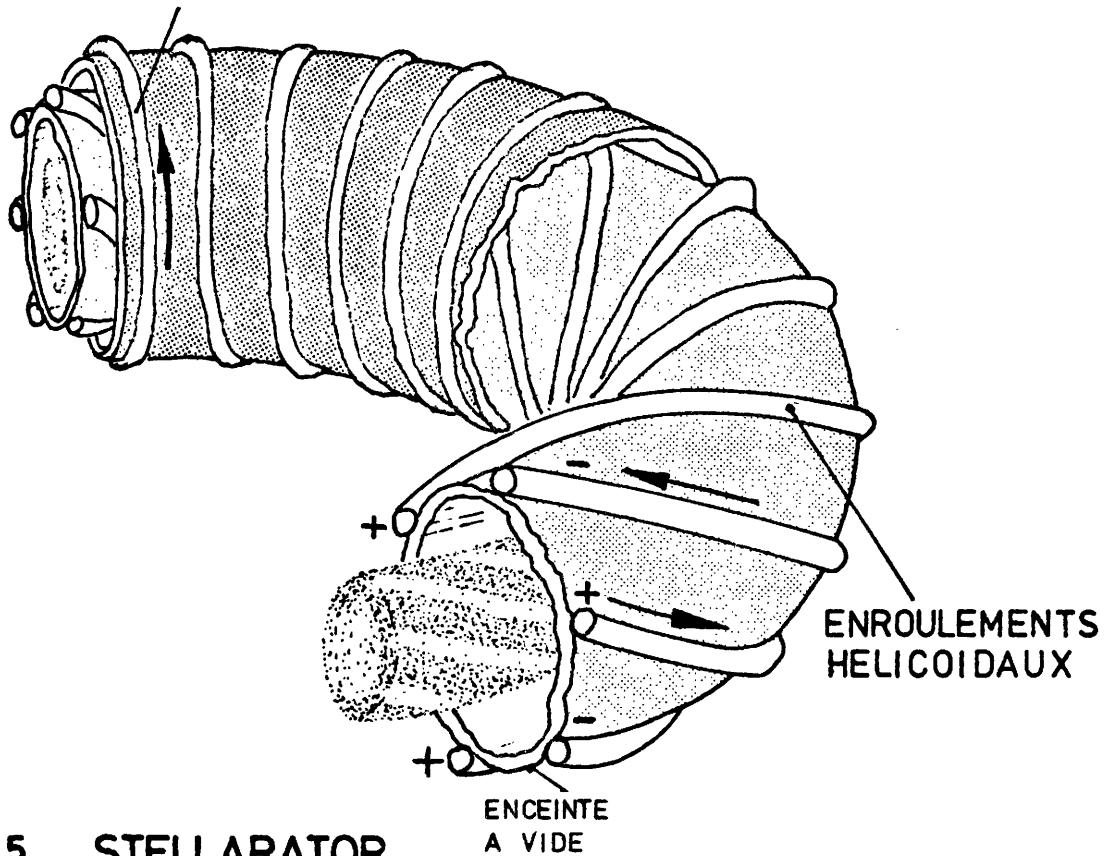


Fig.5 STELLARATOR

rapide du champ magnétique - procédé analogue à celui utilisé dans les moteurs Diesel -, par ondes électromagnétiques de haute fréquence, procédé bien connu dans la pratique industrielle, ou par injection de particules d'énergie élevée ou par d'autres moyens. Tous ces systèmes de chauffage sont en cours d'étude.

Je voudrais maintenant venir à un troisième aspect du confinement magnétique : le premier étant la durée du confinement et la forme appropriée du champ pour garantir cette durée, le deuxième la nécessité de chauffer le plasma. Le troisième est ce que nous appelons le béta. Dans un champ magnétique d'intensité donnée, on peut contenir un plasma de pression limitée. Or, le rapport β entre la pression du plasma, et donc la densité du plasma qu'on peut confiner, et la pression magnétique, c'est-à-dire le carré du champ magnétique :

$$\beta = \frac{n k T}{B^2} \quad (4)$$

est limité, il ne peut dépasser un seuil critique défini pour chaque configuration, et apparaît comme le "facteur de qualité" du schéma de confinement. Ce rapport est pratiquement la valeur économique du système de confinement. En fait, la densité de puissance nucléaire, c'est-à-dire la quantité de réactions qu'on produit par unité de volume est proportionnelle au carré de la densité et donc au carré de la pression. Comme le champ magnétique ne peut pas dépasser, pour des raisons mécaniques et économiques, certaines valeurs, il faut qu'on en tire le maximum de profit : en confinant un plasma de pression suffisamment élevée. Par exemple, avec un champ magnétique de 50 kgauss (5 teslas), si on avait un béta de 2 % seulement, on pourrait confiner un plasma d'environ 5×10^{13} particules par cm^3 et l'énergie ainsi produite serait de $0,5 \text{ watt/cm}^3$. Donc, une combustion limitée. Si on pouvait, dans les mêmes conditions, élever le béta à 10 % (plutôt que 2 %) on pourrait avoir une densité de combustible de $2,5 \cdot 10^{14}$ particules par cm^3 et une densité d'énergie produite de 12 watt/cm^3 , ce qui serait déjà beaucoup mieux. Et comme le coût du brûleur nucléaire ne serait que faiblement affecté par la valeur béta, l'avantage économique d'avoir un béta élevé serait considérable.

Résumons. Il y a trois problèmes que les physiciens doivent résoudre ou sont en train de résoudre :

- le premier, c'est d'assurer un temps de confinement du plasma et donc de

son énergie thermique tel que le produit: densité \times durée de confinement, dépasse 10^{14} - on peut dire que dans les expériences actuelles de la filière Tokamak, le temps de confinement que nous pouvons obtenir est encore 100 fois plus bas que celui qui est requis. Mais comme il est vraisemblablement limité par des phénomènes de diffusion du plasma à travers le champ magnétique, ce temps devrait augmenter avec la taille de l'appareil et même avec le carré de celle-ci. Donc on peut espérer, même si on n'a pas la certitude de ce succès parce que d'autres phénomènes peuvent se manifester, que sur des appareils ayant une taille 10 fois plus grande que ceux de la génération présente, on puisse parvenir à des temps de confinement satisfaisants. Ceci nous montre la nécessité d'aller vers des appareils plus grands et plus coûteux, tel que JET, par exemple.

- le deuxième problème est le chauffage. Pour le moment, avec les Tokamaks on arrive à 30 millions de degrés, et l'objectif c'est d'arriver à 150, par exemple.
- le troisième, c'est d'améliorer le béta, c'est-à-dire, pour un champ donné, la densité de plasma qu'on peut confiner. Pour le moment, béta dans les expériences Tokamak, par exemple, n'atteint pas 1 %. Or béta est en principe indépendant de la taille des machines, ainsi des expériences dans cette direction peuvent se faire à moindres frais. Plusieurs idées existent : soit une optimisation géométrique des Tokamaks et Stellarators conventionnels, soit l'expérimentation de configurations magnétiques qui sont apparentées à ces deux configurations mais qui ont des particularités telles, qu'elles peuvent être réalisées à travers un fonctionnement pulsé : il s'agit de ce qu'on appelle les "configurations toroïdales à béta élevé" ou "configurations fermées à béta élevé". Dans certains cas, des résultats partiels aussi bien théoriques qu'expérimentaux autorisent un certain optimisme.

Le problème physique supposé résolu (il ne l'est pas encore), il reste sur la voie des réacteurs de nombreux obstacles de caractère technique. La Fig. 6 montre une coupe d'un réacteur tel qu'on peut se l'imaginer.

Au centre, il y a le plasma qui n'est pas indiqué sur la figure et dont nous avons parlé. Pour le moment, il fait l'objet des études des physiciens.

Si on va maintenant du centre vers la périphérie on rencontre une première paroi métallique, indispensable, qui doit séparer le plasma du monde extérieur. Cette première paroi constitue la première préoccupation des ingénieurs qui se sont penchés sur la technologie du réacteur à fusion. En fait,

COUPE D'UN TYPE DE REACTEUR A FUSION (PROJET CONCEPTUEL)

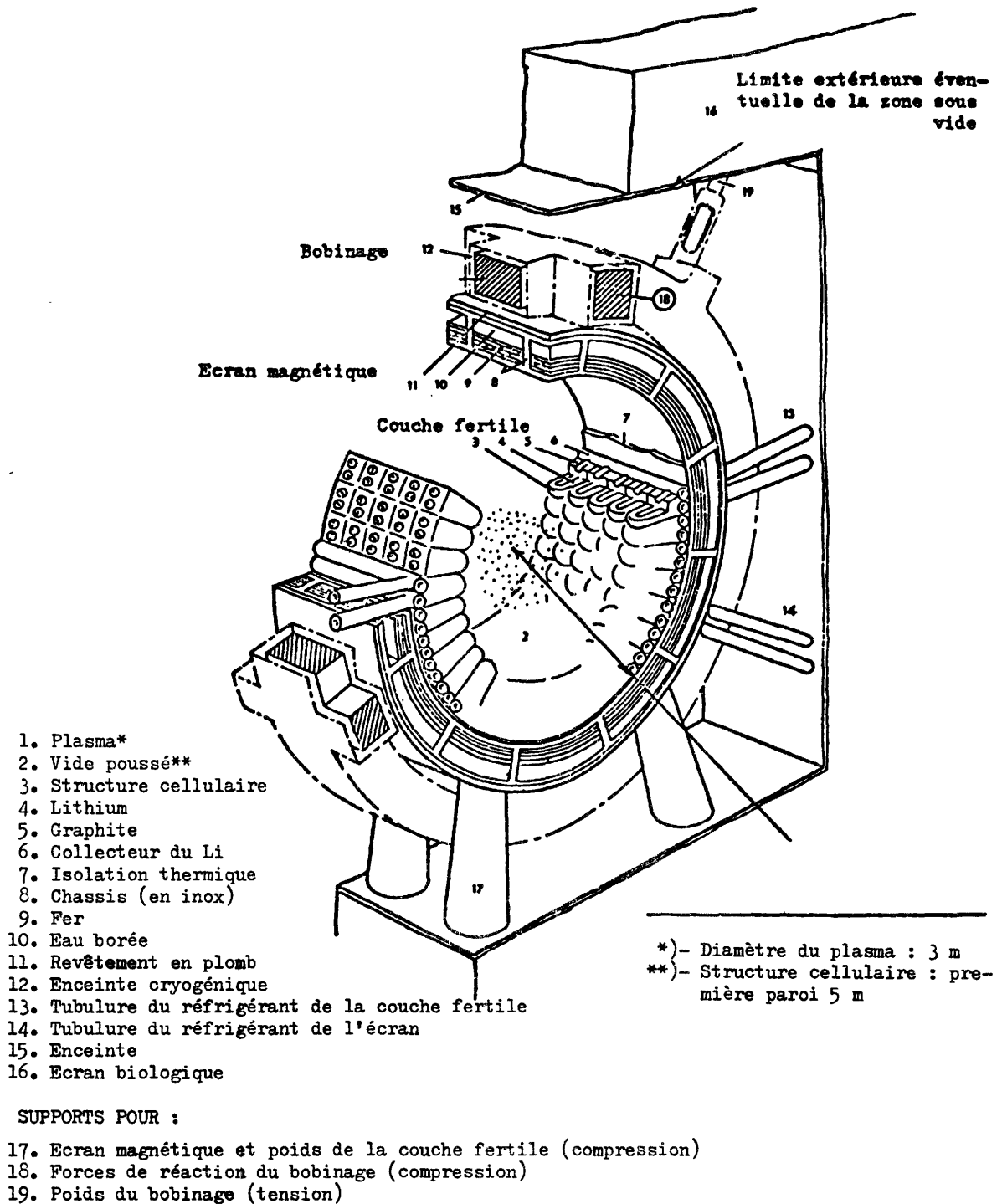


Fig.6

elle doit travailler dans des conditions extrêmement sévères. Elle subit le bombardement des radiations émises par le plasma et des particules qui, par diffusion ou par d'autres mécanismes, s'échappent du plasma ; elle est traversée par un flux important de neutrons et notamment par les neutrons de 14 MeV produits par la réaction D-T ; à travers des fenêtres qu'on doit pratiquer dans cette paroi, les cendres de la combustion, essentiellement de l'hélium et des atomes qui diffusent, doivent être évacués, et ensuite du combustible frais doit être injecté. Cette paroi finalement doit être compatible avec la couche fertile de lithium ou contenant du lithium - qui est grosso modo dans les régions (3) à (6) de la Fig. 6.

Cette couche de lithium est elle-même essentielle pour deux raisons :

- premièrement, parce que les neutrons y déposent leur énergie. Elle constitue ainsi la source de chaleur utilisable et elle doit travailler à une température suffisamment élevée (disons de 500 à 1000° C) de façon à assurer la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et ensuite électrique avec un bon rendement.
- deuxièmement, elle doit régénérer le tritium. L'épaisseur de cette couche de lithium doit être de l'ordre d'un mètre. Après la couche de lithium, il faut un écran destiné à absorber les neutrons résiduels et le rayonnement gamma produit dans la couche fertile. Finalement, il doit y avoir des bobines ((12) et (18) dans la Fig. 6) qui, pour des raisons économiques, devront probablement être supraconductrices et, dans ce cas, seront entourées par leur cryostat. Tout ceci sans parler des contrôles, du chauffage auxiliaire, etc.

Il s'agit d'une foule de problèmes technologiques extrêmement ardues dont l'analyse vient à peine de commencer. Ainsi, un réacteur à fusion doit être nécessairement grand et on pense qu'on pourra difficilement faire des unités économiques inférieures à quelques GW_{électr.}, il sera donc très complexe et très coûteux. Face à ces difficultés, il y a des avantages potentiels également énormes :

- le combustible est abondant et répandu ; son coût est pratiquement nul ; le seul combustible qu'il faut vraiment approvisionner c'est le lithium et on peut le stocker en quantités pratiquement illimitées.
- les réactions ne produisent essentiellement pas de produits radioactifs comme c'est le cas de la fission.
- il y a certainement le problème de la manipulation du tritium, dont quelques kilogrammes sont à tout moment présents dans le réacteur. Il y aura

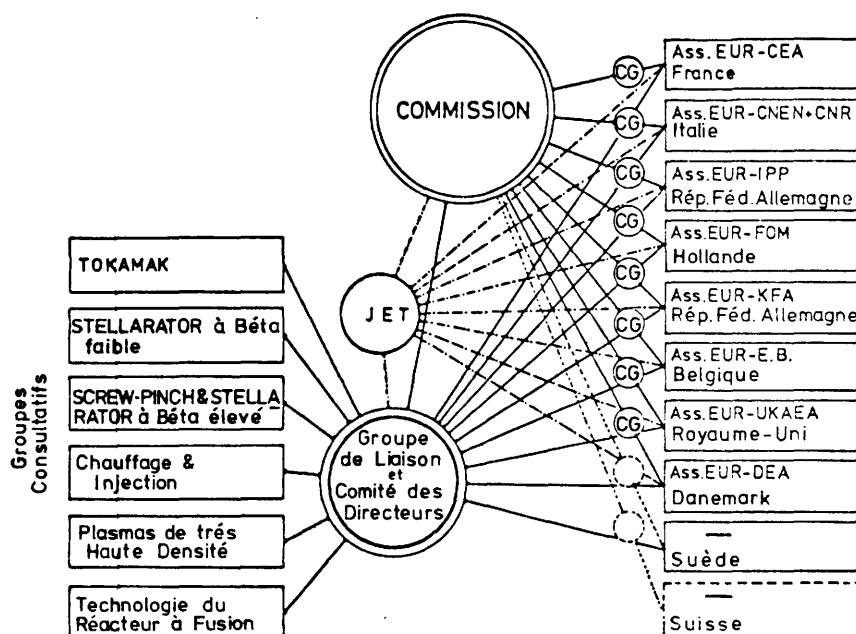
aussi un problème dû à l'activation des matériaux de structure de la part de neutrons. Cependant, toutes ces manipulations peuvent se faire en circuit fermé : aucun recyclage chimique ou métallurgique n'est requis hors de la centrale éventuelle et de plus, en général, il n'y a aucune nécessité de transporter des matériaux activés entre des lieux géographiquement différents.

- Finalement, les risques et les inconvénients écologiques d'un réacteur à fusion seraient beaucoup plus modestes que ceux de la fission.

La complexité des problèmes scientifiques et techniques qui requièrent d'énormes efforts et de longs délais, d'une part, l'ampleur des avantages potentiels, d'autre part, ont poussé nos pays à unir leurs efforts, ainsi que M. SCHUSTER vient de le dire.

Un concours heureux de circonstances a permis à EURATOM de jouer en cela un rôle efficace : La Fusion figurait en 1958 dans le programme initial de la CEEA ; à ce moment, comme il est apparu évident lors de la conférence de Genève de la même année, une activité importante existait déjà aux États-Unis, au Royaume-Uni et en Union Soviétique. Dans les six pays qui à ce moment-là constituaient la Communauté Européenne, l'activité était à peine à ses débuts. Dans ces conditions, la Commission, plutôt que de créer son propre laboratoire au CCR, a préféré établir des "Contrats d'Association" avec les organisations nationales qui étaient actives dans ce secteur dans les deux buts : 1°) de promouvoir l'action, 2°) de la coordonner.

TABLEAU II



Cette politique a été poursuivie jusqu'à l'entrée de la Grande-Bretagne, du Danemark et de l'Irlande dans la Communauté. Voici (TABLEAU II) la liste des Associations et la situation telle qu'elle se présente aujourd'hui.

Il y a une Association avec le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) en France avec des laboratoires à Fontenay-aux-Roses et à Grenoble. Une Association en Italie avec le CNEN et le CNR, laboratoire principal Frascati et deux laboratoires encore à Padoue et Milan.

Une Association avec le Max-Planck-Institut für Plasmaphysik avec son laboratoire à Garching près de Munich en Allemagne. Une Association avec la FOM en Hollande avec son laboratoire principal à Jutphaas près d'Utrecht.

Une Association avec la Kernforschungsanlage en Allemagne avec son laboratoire à Jülich. Une Association avec l'Etat belge concernant deux laboratoires à Bruxelles : l'Université Libre et l'Ecole Royale Militaire.

Ensuite se sont ajoutées l'Association avec l'UKAEA en Angleterre - avec son laboratoire de Culham - et l'Association avec le Danemark à Risø. Toutes ces Associations sont gérées, en commun, par la Commission et l'Institution associée, et par un "Comité de Gestion" (CG), que vous voyez le long de chaque ligne. Cette gestion bilatérale a principalement un caractère administratif. En plus, toutes les Associations et la Commission ont constitué un "Groupe de Liaison" et un "Comité des Directeurs" (qui figurent dans le même cercle) :

- le premier, constitué en 1963, est chargé principalement de la préparation en commun des programmes et composé d'une trentaine de dirigeants scientifiques des Associations et de la Commission, qui se réunissent 3 à 4 fois par an, et en particulier décident des grosses expériences à lancer pour lesquelles les 45 % de la contribution de la Commission sont octroyés.
- le second, constitué en 1968, est composé par les Directeurs des 8 Laboratoires associés et celui du Programme de la Commission, qui se réunissent tous les deux mois. Ce Comité est particulièrement chargé de l'exécution des programmes et de l'échange de personnel, financé par la Commission, entre les Associations.

Ces deux organes sont assistés par des "Groupes Consultatifs" agissant sur les différents secteurs du programme (Tokamak, Stellarator, etc.) et par des Comités de coordination là où des actions sont menées en collaboration directe entre plusieurs laboratoires.

Ce système a fonctionné avec une certaine efficacité et je voudrais rappeler deux faits qui me semblent en confirmer le bon fonctionnement :

- 1° Les problèmes de la construction d'une grosse machine européenne se sont posés, il a été possible de parvenir à un accord complet sur le but et les dimensions d'une telle entreprise, qui maintenant a pris le nom de JET. Dans un délai très bref, il a été possible de rassembler un groupe international, auprès duquel les membres associés ont détaché des physiciens et des ingénieurs parmi les meilleurs de leurs "staff". Cette équipe a rapidement acquis une grande cohésion et elle a produit, dans les délais prévus, un projet qui est reconnu comme le plus mûr parmi les projets similaires à l'échelle mondiale.
- 2° Un pays tiers, la Suède va, à sa demande, se joindre à notre programme. Elle sait que sa contribution financière au programme commun dépassera ce que la Commission paiera "en support" aux Laboratoires suédois, mais elle reconnaît que les avantages offerts par l'appartenance à un tel programme en valent la peine. Je pense que d'autres pays suivront cet exemple.

Je voudrais maintenant passer en revue - très rapidement - le contenu technique de notre programme actuel qui se termine cette année, ainsi que celui du prochain programme (nous avons des programmes de 5 ans, dont l'actuel couvre la période 1971-1975).

Le programme en cours, qui est le 3ème programme quinquennal Fusion a été caractérisé par une concentration de l'effort sur la ligne Tokamak et plus en général sur les configurations fermées.

Les autres orateurs vous parleront plus en détail des Tokamaks, je me borne à mentionner ici que le meilleur Tokamak à l'échelle mondiale actuellement en fonctionnement est celui de l'Association EUR-CEA à Fontenay-aux-Roses.

Dans la ligne Stellarator, la construction à Garching du W-VII, qui sera le plus important dispositif de ce type au monde, est en cours d'achèvement.

Le Stellarator CLEO est en fonction à Culham, en Grande-Bretagne.

Plusieurs machines toroïdales, de taille moyenne ou petite, visant le confinement à bêta élevé sont en fonctionnement à Culham, Garching, Jülich et Jutphaas.

Le chauffage par haute fréquence a été particulièrement confié au Laboratoire de l'Association EUR-CEA de Grenoble* qui, dans ce but, a construit deux machines : un Tokamak et un Stellarator, ce dernier en collaboration avec le

*) Voir les différents problèmes du chauffage des plasmas toroïdaux dans l'annexe à la fin du livre.

Laboratoire de l'Association EUR-IPP à Garching et celui de l'Association EUR-Ecole Royale Militaire à Bruxelles. Le développement, plus particulièrement en vue des besoins futurs du JET, du chauffage par injection des particules rapides, fait l'objet d'une activité concertée entre Culham et Fontenay-aux-Roses.

Des plasmas de haute densité, qu'on appelle "Plasma Focus", susceptibles de devenir une source importante de neutrons - qui pourront être utiles pour l'étude des matériaux pour un réacteur à Fusion - sont étudiés à Frascati, en collaboration avec Jülich et Culham. L'effort sur les aspects technologiques de la Fusion a été modeste. La seule action notable est le commencement d'un programme commun pour le développement des bobines supraconductrices. La dépense totale du dernier plan quinquennal, qui se termine actuellement, exprimée en monnaie d'aujourd'hui, a été d'environ 400 millions d'Unités de compte. Donc, environ 500 millions de dollars.

Dans le prochain plan quinquennal (1976-1980), déjà approuvé par la Commission et en ce moment en discussion au Parlement Européen et au Conseil de la C.E., nous proposons une plus grande concentration sur la ligne Tokamak qui prendra plus de 50 % du total. L'objectif majeur sera JET, appuyé par des expériences satellites déjà en construction ou en projet.

L'objectif de cette tranche quinquennale du programme, en ce qui concerne les Tokamaks, c'est de pouvoir nous placer à un point où on puisse déjà préparer l'étape suivante, qui devrait être un vrai "brûleur de tritium", un vrai brûleur nucléaire : non pas économique, non pas encore un réacteur mais qui brûle vraiment du tritium. Ceci pour la ligne Tokamak.

Dans la ligne Stellarator, l'activité sera concentrée dans un seul laboratoire, celui de Garching en Allemagne.

La ligne "Haut Béta" sera la responsabilité principale du Laboratoire de Culham en Grande-Bretagne, où un projet relativement important est en préparation avec peut-être d'autres expériences à Garching et à Jutphaas. Le développement du chauffage sera vigoureusement poursuivi.

Pour le moment notre activité restera, au début, relativement faible dans le domaine de la Fusion par Laser et de la technologie des réacteurs. Ces deux sujets seront réexaminés à l'occasion de la mise à jour du programme, prévue dans deux ans.

TABLEAU III

PROGRAMME PLURIANNUEL PROPOSE POUR LA PERIODE 1976-1980

	MUC*	PARTICIPATION DE LA COMMISSION	
		%	MUC
DEPENSES TOTALES DES ASSOCIATIONS	335	25	84
NOUVEAUX INVESTISSEMENTS	130	45	58
JET	135	80	108
AUTRES DEPENSES	15	100	15
	615		265

*) 1 MUC \approx 1,2 millions de dollars USA

1975

Le coût du programme (TABLEAU III) s'élève à 615 MUC, y compris 135 MUC pour JET et 130 MUC pour d'autres investissements. De ceux-ci, 265 MUC sont à charge de la Commission, comprenant 25 % de participation aux dépenses générales des Associations, 45 % de participation aux investissements et 80 % du coût de JET. Le reste est représenté par les salaires et frais généraux etc. Il y aura environ 200 MUC qui seront destinés à des commandes industrielles. A titre d'exemple, il faut rappeler que pour la même période, les Etats Unis estiment devoir dépenser environ 2.5 milliards de dollars, c'est-à-dire entre 2 et 3 fois plus que nous ; et l'effort russe, mesuré en scientifiques - le mesurer en argent n'a pas beaucoup de sens - semble être, à présent, trois fois le nôtre.

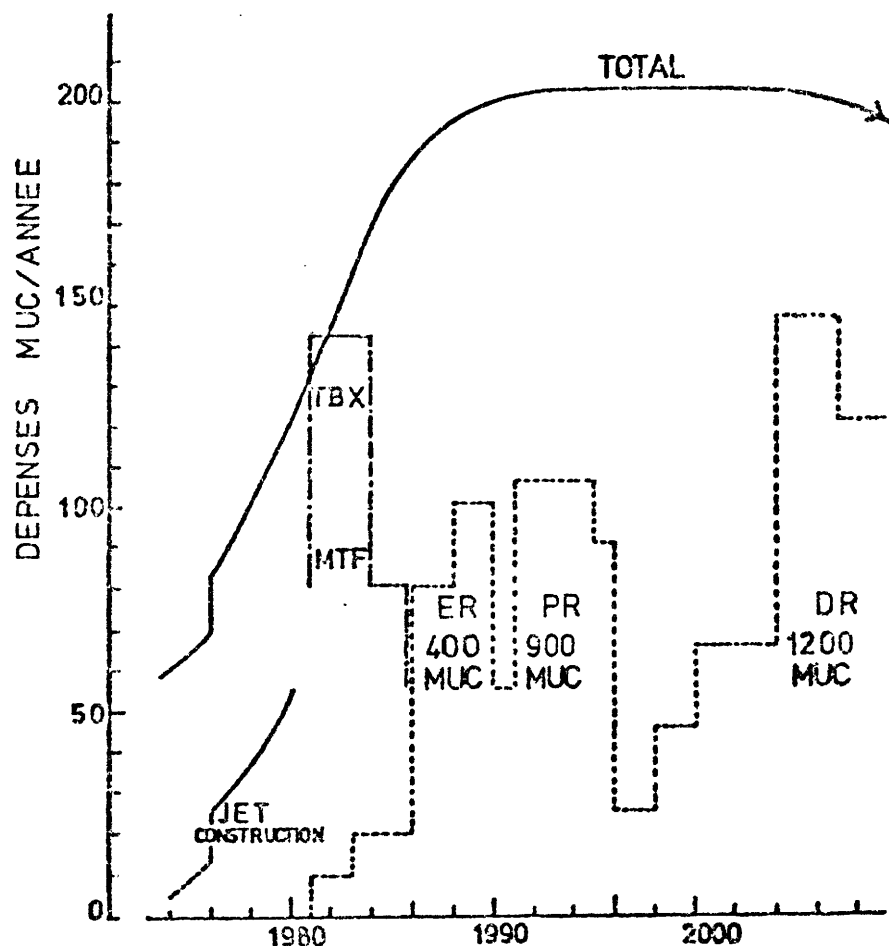
Si on veut jeter maintenant un regard rapide sur le rôle que la Fusion peut avoir dans l'avenir, on constate qu'à première vue elle a un retard d'une trentaine d'années par rapport à la fission. Cependant, celle-ci a eu un début explosif au sens propre et figuré, mais les développements strictement industriels ont pris quelque temps. Le retard de la Fusion, qui a fait sa carrière militaire avec autant de rapidité et un résultat peut-être même plus brillant /3/, est moins important si on se reporte à l'accession à la maturité industrielle de la fission.

En effet, les délais de développement technologique de la Fusion peuvent être réduits par rapport à ceux de la fission en profitant de l'expérience de cette dernière et notamment si nous accordons le plus tôt possible l'attention nécessaire aux problèmes technologiques et en particulier aux problèmes des matériaux.

On peut s'attendre à ce qu'une réponse aux problèmes physiques puisse être donnée dans un intervalle de 5 à 10 ans, et entretemps il y aura un flux continu d'informations. En escomptant une réponse positive, on peut prévoir la construction d'un "brûleur de tritium" et peut-être d'une "source de neutrons", nécessaire à l'essai des matériaux, dans les 10 ans qui viennent

TABLEAU IV

COÛT TOTAL DU PROGRAMME



TBX = Expérience de combustion de tritium

MTF = Dispositif d'essai de matériaux

ER = Réacteur expérimental

PR = Prototype de réacteur

DR = Réacteur de démonstration

1975

(TABLEAU IV) : on peut espérer arriver à un prototype de réacteur entre les années 1990 et 2000, c'est-à-dire un peu avant l'année 2000. Ce prototype devrait être suivi par un vrai réacteur commercialisable avant l'année 2010. S'il le faut et s'il s'avère possible, ce programme pourrait être accéléré : en fait le programme américain est un peu plus rapide. Ils espèrent arriver à un vrai réacteur avant la fin du siècle.

D'autre part, si la réponse aux problèmes physiques est positive, il faudra de toute façon réorienter et élargir le programme pour y inclure le développement technologique, même si cela comporte des risques et des frais supplémentaires.

Au fur et à mesure que la situation physique s'éclaircit, ce risque apparaîtra de plus en plus acceptable surtout en vue de l'ampleur de l'enjeu qui peut être mesurée par la simple constatation de la situation actuelle dans la fission. Après plusieurs années où la fission a été pratiquement ignorée, maintenant il y a en construction des dizaines de GW^{électr.} et ceci fait un marché de milliards de dollars par an. Un inconvénient qu'il faudrait éviter, en Europe, est la "guerre des filières" qui s'est produite dans la fission. Nous pensons qu'un instrument politique, pour éviter une telle guerre, est représenté par la Décision du Conseil de la C.E. de considérer chaque tranche quinquennale du Programme Fusion comme un élément de collaboration à long terme destiné à aboutir à la réalisation en commun de prototypes, en vue de leur industrialisation et de leur commercialisation. Donc, il y a une intention politique manifeste de continuer la collaboration entre tous les pays de la Communauté jusqu'à la construction du prototype en commun.

Venons-en, en conclusion, à l'objet immédiat de cette réunion.

L'Industrie représente le bénéficiaire final de cette collaboration à long terme dans une entreprise qui, au début, est purement scientifique et qui deviendra progressivement technologique et finalement industrielle. Donc, l'Industrie représente, en même temps, le bénéficiaire final et un des moyens essentiels pour réaliser ces buts. Son rôle doit évoluer entre celui d'un simple fournisseur sur commande de pièces d'équipement à celui de maître d'oeuvre final.

Le premier rôle est évidemment commun à toutes les entreprises de recherche telle, par exemple, que la construction d'un grand accélérateur. Le second, c'est-à-dire, celui de devenir maître d'oeuvre, est plus spécifique à une activité à but industriel et économique tel que le Programme Fusion. Nous

espérons que cette dernière considération aura une influence positive sur le premier rôle et cela dans un intérêt commun. Nous sommes, en effet, conscients de demander parfois des objets et des performances inhabituels et, par conséquent, nous avons besoin d'un répondant de votre part. D'un autre côté, nous pensons que le travail que nous vous demandons vous sera utile pour acquérir le "know-how" et l'expérience générale nécessaires pour accéder au rôle de maître d'oeuvre qui devra être le vôtre.

L'expérience que nous avons acquise jusqu'à présent n'est pas homogène. Elle varie de pays à pays et, parfois même, d'entreprise à entreprise. Il y a eu des cas où, à l'occasion de la construction de certains dispositifs complexes dans quelques-uns de nos laboratoires, une véritable collaboration active de la part des industries s'est établie. Mais il y a aussi des cas où il a été même difficile de placer des commandes et on a dû s'adresser pour la construction des composantes à l'extérieur de la Communauté.

Quant à l'initiative de l'Industrie dans le domaine de la recherche sur la Fusion, elle a été très modeste et certainement inférieure à celle qui s'est manifestée aux Etats Unis où l'Industrie a mis en place des Laboratoires de Fusion assez importants et dans certains cas elle a fait cela totalement ou partiellement à ses propres frais.

Nous devons constater que, à l'occasion du lancement du JET, du travail de "design", /1/,/2/, et du travail préparatoire qu'on a fait pour la construction de JET, les liens avec les Industries se sont resserrés et nous avons le sentiment que des rapports nettement plus actifs se sont maintenant établis avec l'Industrie et nous espérons qu'ainsi JET marque un tournant et que cette situation s'améliorera toujours plus à l'avenir.

SCHUSTER

Mr. PALUMBO, thank you very much for your introductory speech. Gentlemen, before going on, we should now have a certain time for discussion and to put questions to Mr. PALUMBO. Before doing so and opening the discussion, I would just like to make one remark so as to avoid any misunderstanding. As regards the costing of the new programme, the new five-year programme, Mr. PALUMBO gave the figure of 615 million units of account, which is just a proposal. This has been put forward by the Commission of the European Communities here in Brussels to the Council of Ministers. The decision has still to be taken by the Council of Ministers. No money has, as yet, been allocated nor has any amount been agreed on. The Commission's proposal is all that exists so far. We shall have to wait for the outcome of the Council meeting which may take place in November or December. This is the real situation and I emphasize the point just to avoid your going away from Brussels thinking : "now we have the 615 million in our pocket". That is not true. Now, who wants to have the floor ; who wants to put a question ? First question, for clarification after this discussion, if you so desire, on what has been said so far.

SCHURINK

Mr. PALUMBO has said that he wants support from industry. What, according to the Community, will be given in the way of support and how many millions will come from industry, and how will this compare with what is being done in the United States ? How many million dollars, not European units of account, does the European Community want to come from industry ? And what is the comparison with the figures for the United States ?

SCHUSTER

May I repeat this once again ? What is the number of units of account (millions) in the total envelope of 615 ?

SCHURINK

No . In addition, what do you want as a premium ? What have you put on the table ?

SCHUSTER

A good question. A further question, please, to give Mr. PALUMBO some time to think of the right figures.

KÖHLER

Ein wesentlicher Grund, warum man ein Fusionsprogramm von einer grossen Grössenordnung finanzieren sollte, ist, dass man einen diversitären Energierohstoff zur Verfügung haben würde, nämlich zunächst Lithium und Deuterium und dann später Deuterium.(?)

Die Frage ist, ob es überhaupt in der Europäischen Gemeinschaft schon Untersuchungen gegeben hat über abbauwürdige Lithiumvorkommen grossen Ausmasses. Es ist klar, dass auf Grund der Verteilung des Lithiums in der Erdkruste viel vorhanden sein muss, aber gibt es abbauwürdige Vorkommen? Das sollte man untersuchen, um zu beweisen, dass das ein echt diversitärer heimischer Energierohstoff sein könnte.

Und dann hätte ich noch eine weitere Frage, wie gross sind in demselben Fünfjahreszeitraum für den Sie die beantragten Budgetmittel angegeben haben, die dazukommenden nationalen Mittel? Das ist doch nicht alles, das, was Sie genaant haben. *)

SCHUSTER

Now to the first question, gentlemen. I would like to say, and I apologize for putting it bluntly, that the time is not ripe for a precise answer to this first question.

This is the first meeting with industry, and what is meant by industry coming in? Industry coming in means on the one hand, going more and

*) KÖHLER

A more essential reason for supporting a large fusion programme is the diversified raw materials required for producing energy : at first lithium and deuterium, and later deuterium only. (?)

My question is whether there is any research in the European Community on large mineable lithium deposits. While it is obvious that there is enough in the earth's crust the problem may concern exploitable deposits.

more into design, into structure and into supplying and supporting components. This is one thing. In doing this I hope that you are not gaining too much profit. And just on a five-plus basis or something, which would be a maximum. That means doing your best to come into the business, even if there are certain losses at the end.

And the other thing is : is industry prepared to pay, for example, for a permanent structure which will follow the fusion process ? The cost would not be very high, not a very large amount.

And the third thing is : if we are going towards bigger plant, is industry to participate in and put money into this plant ?

These are the three phases, you know. First of all supplying components. It is up to you to do your best to quote a fair price for the success of the project. Number two, a permanent small first structure - the Joint European Torus (JET). Third step, participation in large plant. And I am not prepared to quote any figures today. I think PALUMBO will feel the same way.

Now, Mr. KOHLER's question.

First of all, are there any indigenous lithium deposits ? My answer is twofold : Number one, to my knowledge, but I am not an expert in geology, there are some big deposits in Italy. Mr. CESONI could expand on this. Number two, lithium is extensively distributed throughout the world and there is no danger of a big monopoly situation.

And, as to your question concerning the proportion of national funds to Community funds, I must say quite clearly, and I hope you will not be disappointed, that these 615 million units of account represent the total funds, national and Community. Out of this, you will have about 215 from the Community budget, and the rest will come from the various Governments - i.e., 215 is the Community share, and the other funds are to be provided by the Governments for the various Institutes : Fontenay-

←
*) One should first have proof of this to defend the statement concerning a really diversified energy raw material.

I have one other question : "How large are the national funds to accompany the budget amounts asked for in the 5-year period in question. The figure you quoted does not give the total".

(Translated by our co-ordinator)

aux-Roses, which is the CEA; the U.K. Authority, Culham Laboratory; the Max-Planck Gesellschaft and so on. 615 is the total and we have to compare 615 with the American total. And this is generally much larger than European spending. Does this answer your question ?

VAN TOL

In his opening speech, Dr. SCHUSTER spoke of one, two or maybe three consortia and international consortia that would preferably be set up out of these. And now, my question which is rather important. Does the Community intend to exert an influence on the setting up of two or three consortia ? Is this Community policy ? Or is it just a matter of waiting to see what happens ?

SCHUSTER

With this question I have the opportunity once again to stress that I am not speaking in terms of a proposal from the Commission concerning consortia. I have just indicated ideas which are floating around, but I have not even said that they are my ideas nor that I am speaking on behalf of the Commission, or that there is any philosophy or fixed approach. The only thing which I would like to put across to you as a message is that we have to establish a European solution, that is to avoid any multiplicity of national industrial firms tackling the fusion project and going their own way. But please, gentlemen, I mentioned ideas which I have got in discussion, but this is not the Commission speaking today. The Commission will not at this stage be influenced. We are trying to get ideas, we are trying to get proposals, and in another discussion or in further or continued discussions, we might obtain an initial concept or philosophy which we would like to recommend to you. But so far nothing like this exists. This is just the first "brainstorming", but there is no real fixed approach.

LISSE

When will a decision be made concerning the JET-Site ?

SCHUSTER

Now, here is the big question. I can see the smiles on the faces of the experts here. Well, you know, what the situation relating to the siting of JET is. There is a number of candidates, about 6 who have applied to have this site. My guess would be, but this is only a guess, there will be a decision before the end of the year. It is not yet 100 % certain but my guess now is before the end of this year, or if things go badly, perhaps in January or February 1976 or something like that. I would now like you, Mr. PREVOT, to begin your speech.

1.3 F. PREVOT - Association EURATOM-CEA sur la Fusion
Fontenay-aux-Roses
LA VOIE TOKAMAK ET LE JET

Le Tokamak est l'une des nombreuses configurations proposées pour réaliser le confinement magnétique des plasmas. Historiquement, il a commencé en Union Soviétique, pratiquement au début des recherches sur la fusion contrôlée à la fin des années 50; mais c'est seulement vers la fin des années 60, avec les résultats des appareils TM-3 et T-3 de l'Institut Kurchatov à Moscou, que la communauté scientifique internationale a reconnu l'importance et les possibilités de cette configuration. Depuis 1970, on a construit et exploité des Tokamaks dans tous les pays qui s'intéressent à la fusion contrôlée et le succès de ces expériences permet aujourd'hui de lancer des programmes encore plus ambitieux dans cette voie, programmes dont le JET est en Europe la pièce maîtresse. Dans cet exposé, je vais essayer de répondre successivement à trois questions : Qu'est-ce qu'un Tokamak ? Quelle est la situation aujourd'hui ? Que peut-on dire pour le futur ?

1. QU'EST-CE QU'UN TOKAMAK ?

On peut définir un Tokamak comme une configuration toroïdale axisymétrique à faible pression cinétique ou, comme disent les physiciens du plasma dans leur jargon, à β faible*. Pour expliquer ce que ces mots veulent dire, je crois que le mieux est de regarder les organes principaux et leur fonction dans un Tokamak représenté sur la figure 1.

Le plasma formé d'ions et d'électrons a la forme d'un anneau parcouru par un courant électrique fermé sur lui-même. Ce courant est obtenu sans électrodes par induction, c'est-à-dire que le plasma est le secondaire en court-circuit d'un transformateur dont l'inducteur ou circuit primaire est constitué par des bobinages. Dans certains cas, un circuit magnétique en fer est utilisé pour améliorer le couplage entre le primaire et le secondaire du transformateur. Pour des raisons de stabilité du plasma, il est nécessaire d'ajouter un fort champ magnétique toroïdal dans le plasma. Ce champ est obtenu par un jeu de bobinages en forme de solénoïde torique entourant le plasma. Enfin, un 3ème champ magnétique de composante verticale (c'est-à-dire parallèle à

* voir définition de β au paragraphe 2.4

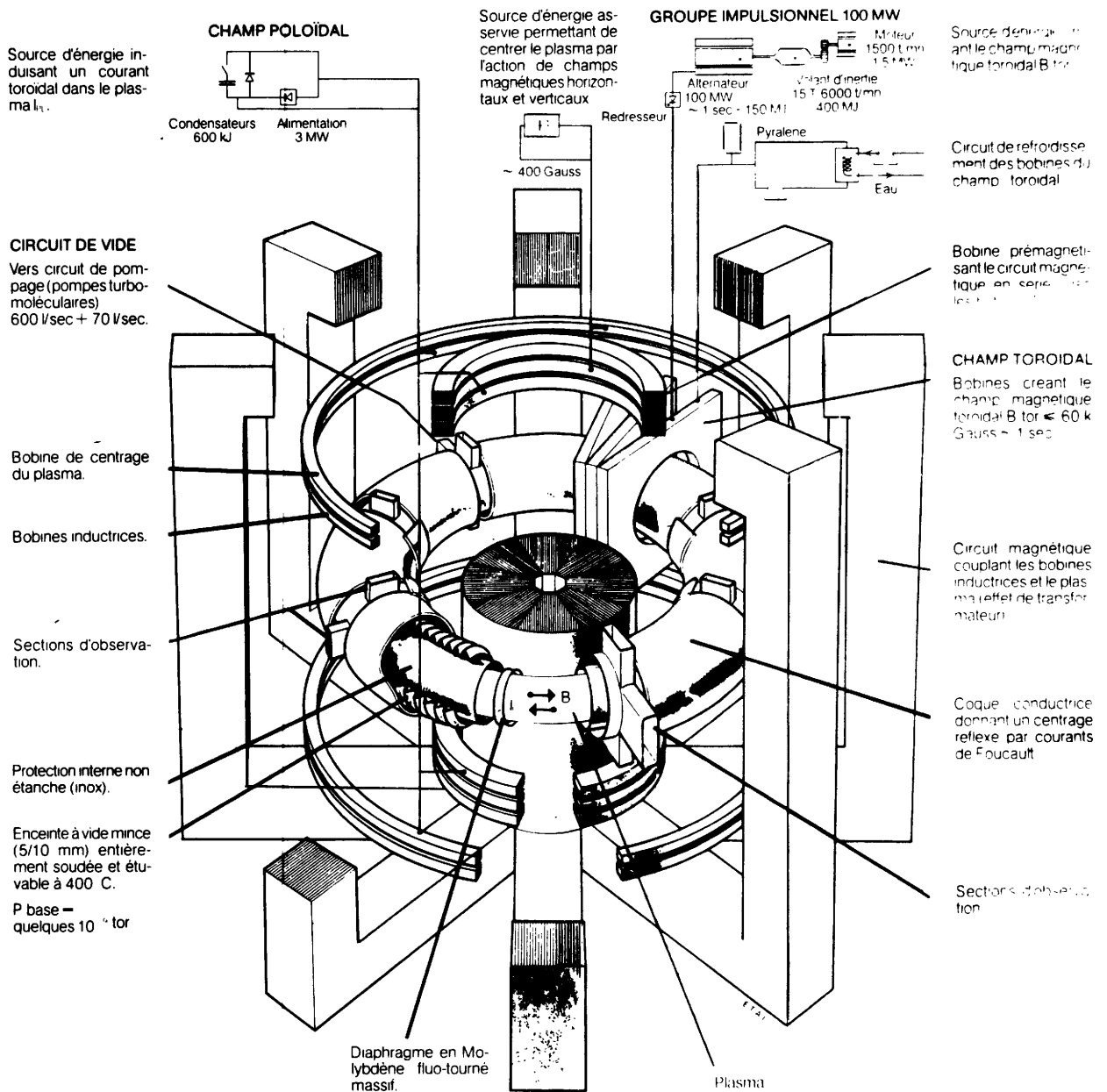


Figure 1 - Schéma de principe d'un Tokamak

l'axe de la machine) est nécessaire pour l'équilibre d'ensemble de l'anneau du plasma. Ce dernier champ est souvent créé par les mêmes bobines que le

primaire du transformateur ou par des bobines similaires. La superposition des 3 composantes toroïdales, verticales et poloïdales (champ du courant) crée dans le plasma et à l'extérieur un réseau de lignes magnétiques hélicoïdales dont un

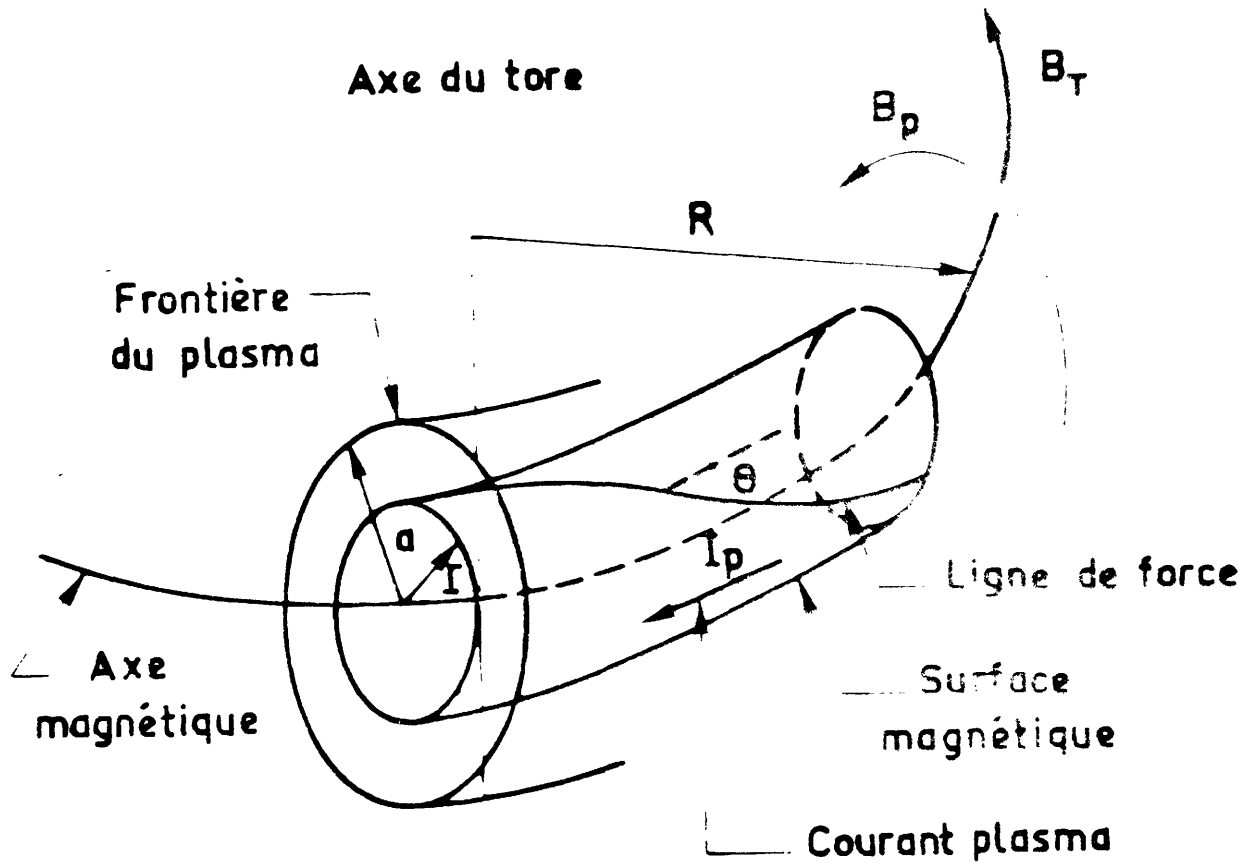


Figure 2 - Géométrie des lignes magnétiques dans un Tokamak

exemple est montré à la figure 2. Bien entendu, des sources d'énergie convenables alimentent tous les circuits décrits. Quelquefois, une coque conductrice proche du plasma sert de stabilisateur passif. Le plasma est à l'intérieur d'une chambre à vide qui le protège de l'air et des impuretés. Des fenêtres dans cette

chambre permettent l'accès au plasma pour les mesures ou pour des opérations comme le chauffage additionnel. La construction de cette chambre pose des problèmes souvent très difficiles que l'on verra par la suite. On voit donc que le Tokamak est pour l'essentiel, dans l'état actuel des choses, une machine électrique. La compréhension détaillée des phénomènes physiques dans un Tokamak pose des problèmes compliqués qu'il ne peut être question de décrire ici. Cependant, et heureusement, les choses sont très simples dans les grandes lignes. On utilise un paramètre $q = \frac{r B_{\text{tor}}}{R B_{\text{pol}}}$ appelé facteur de sécurité qui a une signification géométrique très simple. (r est le petit rayon, R le grand rayon du tore). q mesure le pas des lignes magnétiques hélicoïdales; pour $q = 1$, le pas vaut 1 longueur de tore, autrement dit, la ligne magnétique se referme sur elle-même au bout d'un tour du tore; pour $q = 2$ au bout de 2 tours, etc. La physique interdit d'avoir $q \leq 1$ en tout point du plasma à cause des problèmes de stabilité. Le courant dans le plasma vaut $I_p = \frac{a^2 B_{\text{tor}}}{2 R q}$ (a rayon du plasma). Les évaluations théoriques du temps de confinement comportent aujourd'hui encore une large incertitude mais avec les diverses hypothèses que l'on peut faire, on trouve que le produit $n \tau$ augmente toujours avec I :

$$n \tau \propto I_p^m$$

(τ temps de confinement de l'énergie, n densité du plasma).

Le courant dans le plasma ne joue pas seulement un rôle dans le confinement. Il permet d'apporter de l'énergie au plasma par les pertes joules et donc de la chauffer. En effet, le plasma est un bon conducteur de l'électricité mais sa résistance n'est pas nulle à cause des collisions entre les particules du plasma. L'énergie contenue dans le plasma est proportionnelle au carré du courant dans le plasma

$$n k T \propto I_p^2$$

On voit donc tout l'intérêt d'augmenter le courant dans le plasma. Cette valeur du courant élevé au carré constitue un véritable facteur de mérite pour le Tokamak. Avec les limitations physiques sur la valeur de q , et les limitations technologiques sur l'intensité du champ magnétique, la seule méthode possible pour augmenter I est d'agir sur la taille de la machine.

2. LA SITUATION ACTUELLE DES TOKAMAKS.

On peut voir sur le TABLEAU I les appareils qui sont entrés en service depuis 1970 et qui fournissent donc l'essentiel de nos connaissances actuelles. La

TOKAMAKS MIS EN SERVICE DEPUIS 1970

			R cm	a cm	B _T kGauss	I _p kA		
T 4	Inst. Kurchatov	URSS	100	17	50	200	{ Coque intérieure à la chambre à vide - Chauffage par injection de neutre Pas de coque, équilibre asservi Section non circulaire en forme de D Compression adiabatique	
{ T 6	Inst. Kurchatov	URSS	70	25	15	100		
T 11	Inst. Kurchatov	URSS	60	14	15	30		
{ T 8	Inst. Kurchatov	URSS	36	7 horizontal	15	50		
T 9	Inst. Kurchatov	URSS	36	28 vertical	15	50		
Tuman 2	Léningrad	URSS	40	10 → 5	3 → 30	10	Compression adiabatique	
S.T.	Princeton	USA	109	14	50	180	Arrêté en 1974 Compression adiabatique { Valeurs nominales du champ et du courant non encore atteintes en 1975 Section non circulaire Chauffage turbulent	
A.T.C.	Princeton	USA	90	36	17 → 11	20 → 50		110 → 250
ORMAK	Oak Ridge	USA	80	23	25	180		
ALCATOR	Cambridge	USA	54	12	120	400		
Doublet II	San Diego	USA	59	12 horizontal	10	300		
TTT	Austin	USA	60	40 vertical	35	90		
PULSATOR	Garching	Allem.	70	11	28	100	Arrêté en 1974 Chauffage H.F.	
Cléo Tok.	Culham	G.B.	90	18	20	150		
T.F.R.	Fontenay-aux-Roses	France	98	20	60	400		
Pétula	Grenoble	France	72	16	15	80		
JFT 2	Tokai-Mura	Japon	90	25	10	180	Divertor	
JFT 2a	Tokai-Mura	Japon	60	10	10	30		

R : Grand rayon du tore (cm)
 a : Petit rayon du plasma (cm)

B_T : Champ toroidal sur l'axe
 I_p : Courant plasma (kA)

TABLEAU I

répartition géographique de ce travail se partage essentiellement entre l'Union Soviétique, les USA, l'Europe, et pour une moindre part, le Japon. Pour donner une idée des résultats, je prendrai d'abord pour exemple la machine TFR qui a donné jusqu'à présent (fin 1975) les meilleurs résultats d'ensemble.

La figure 3 montre une vue d'ensemble de cet appareil. La figure 4 présente

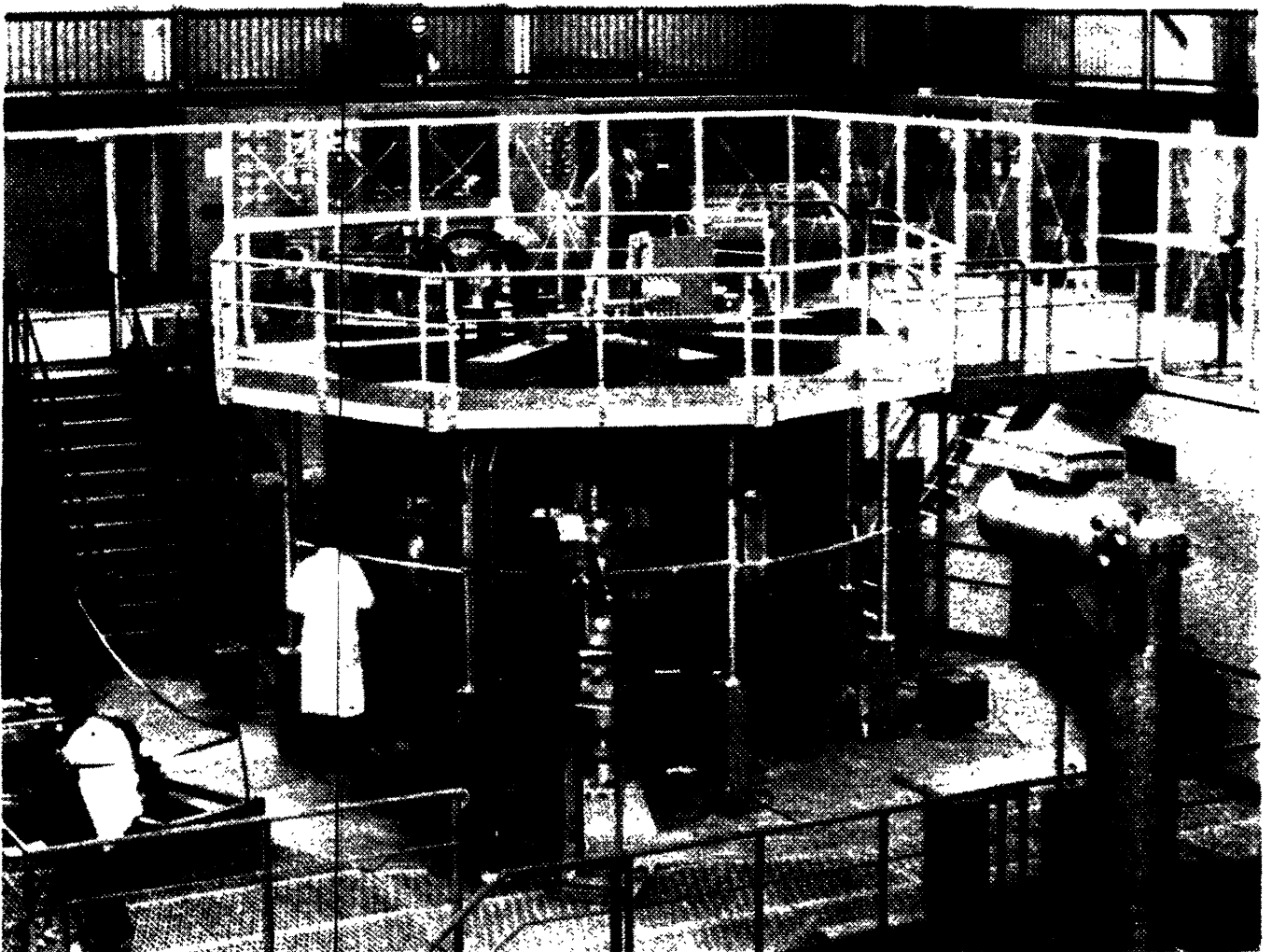


Figure 3 - Vue d'ensemble du Tokamak de Fontenay-aux-Roses TFR

T.F.R. 300 KA 50 KG H₂

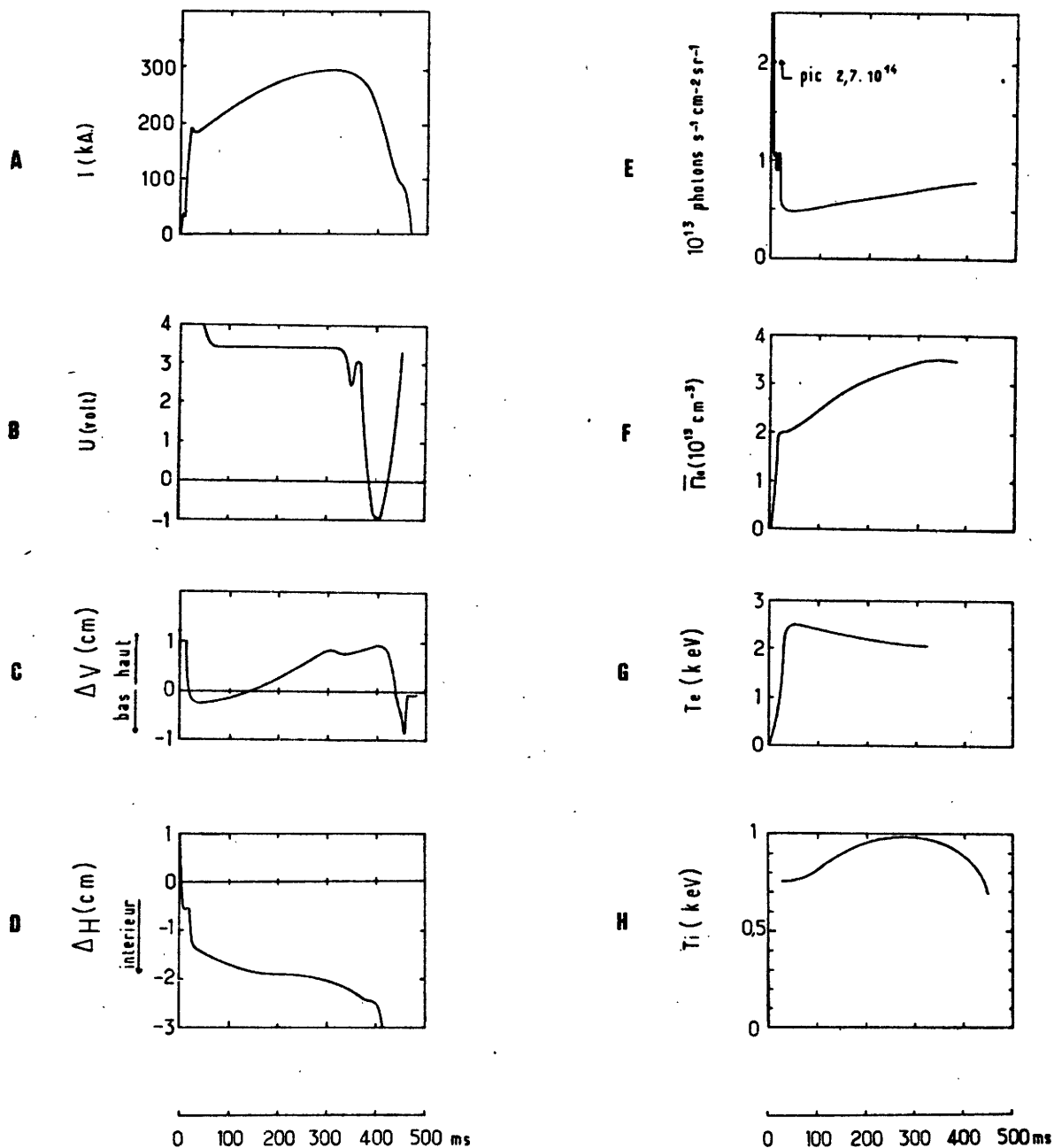


Figure 4

- Evolution des paramètres du plasma en fonction du temps pendant une décharge dans TFR

- . A : courant plasma
- . B : tension par tour
- . C : déplacement vertical
- . D : déplacement horizontal
- . E : rayonnement de l'hydrogène
- . F : densité du plasma
- . G : température des électrons
- . H : température des ions

l'évolution d'un certain nombre de paramètres de la décharge au cours du temps. On peut remarquer le caractère quasi stationnaire de la plupart des grandeurs mesurées ainsi que la longue durée de la décharge. La température des électrons augmente d'abord avec le courant circulant dans le plasma (Fig. 5)

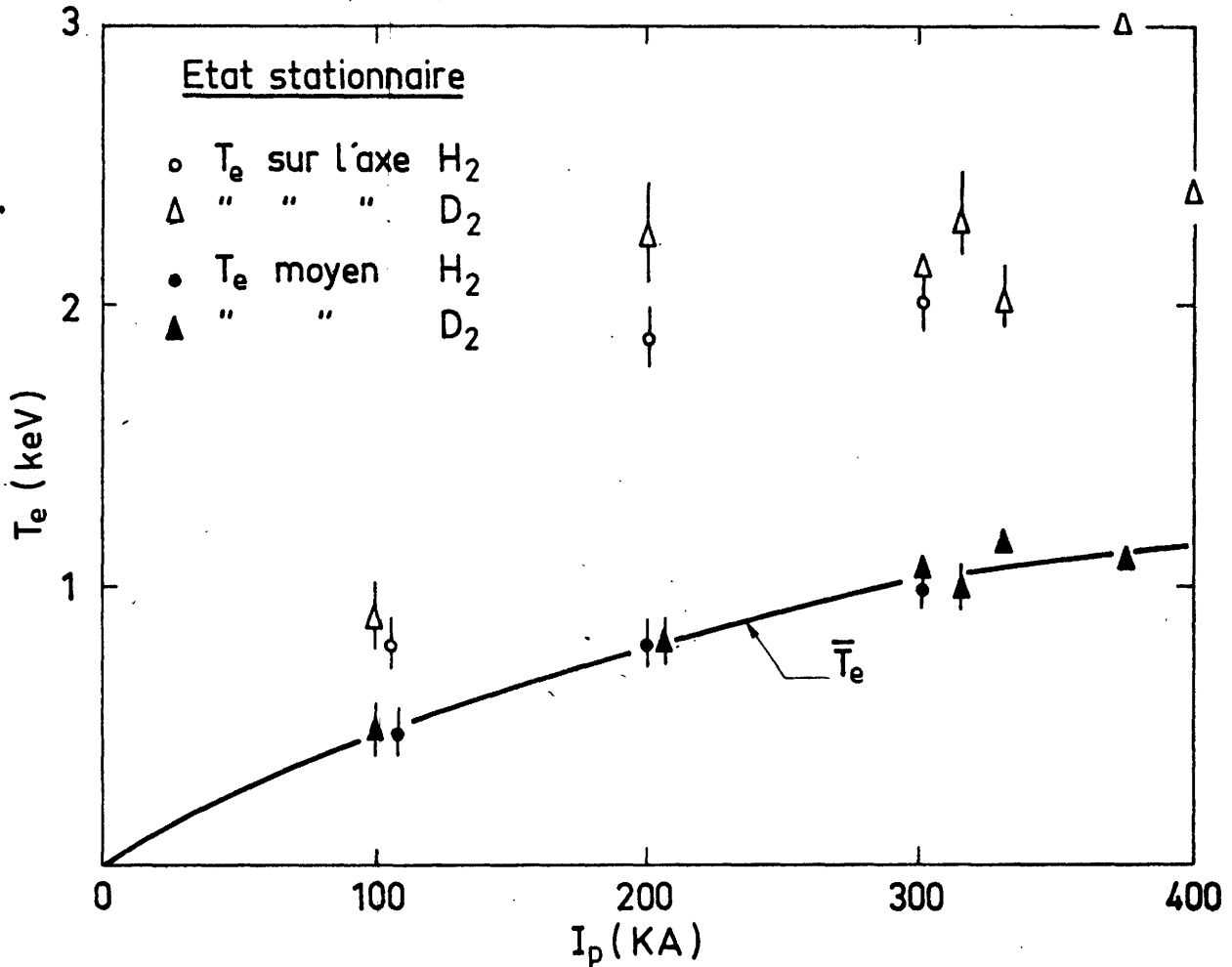


Figure 5 - Température des électrons en fonction du courant plasma dans TFR

mais présente ensuite une saturation qui dénote des pertes importantes. La température des ions augmente régulièrement avec le courant (Fig. 6) et atteint 1 keV en régime de chauffage ohmique pur. (1 keV \simeq 11,6 millions de degrés K). Le contenu en énergie du plasma augmente bien comme prévu selon le carré du courant (Fig. 7). Le temps de confinement de l'énergie, par

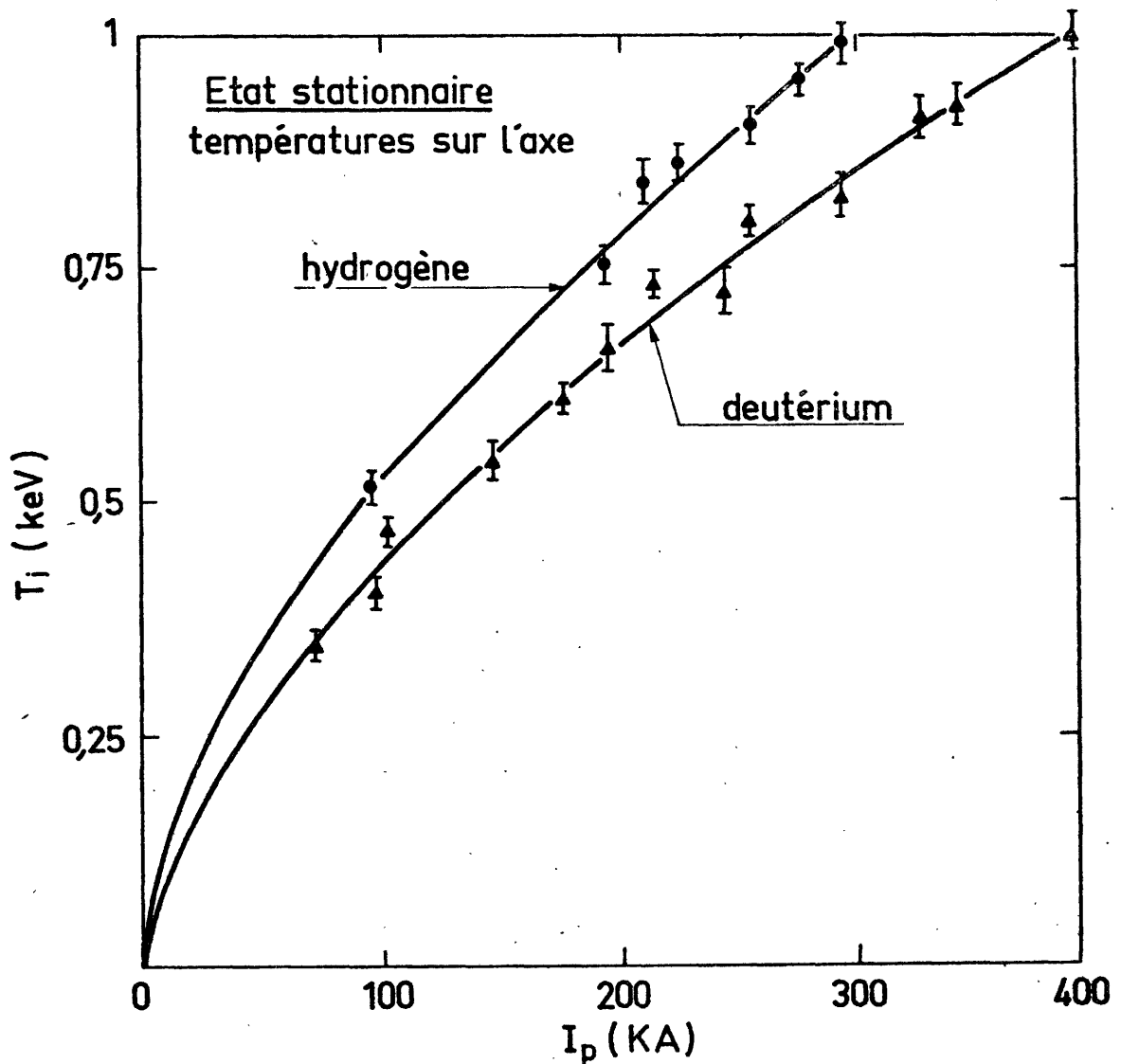


Figure 6 - Température des ions en fonction du courant plasma dans TFR

contre, se sature et atteint environ 20 ms (Fig. 8). Avec une densité de plasma qui peut dépasser 10^{14} électrons par cm^3 , le produit $n\tau$ arrive au mieux à $2,5 \cdot 10^{12}$ s/ cm^3 . Des progrès d'environ un facteur 40 sur τ et un facteur 10 sur T_i sont encore nécessaires pour arriver à un réacteur.

Ces résultats marquent des progrès notables et très encourageants mais il subsiste encore de nombreux problèmes. L'interprétation de ces résultats en termes de processus physiques a beaucoup progressé mais est encore loin d'être complète. La difficulté du problème provient de ce que de très nombreux phé-

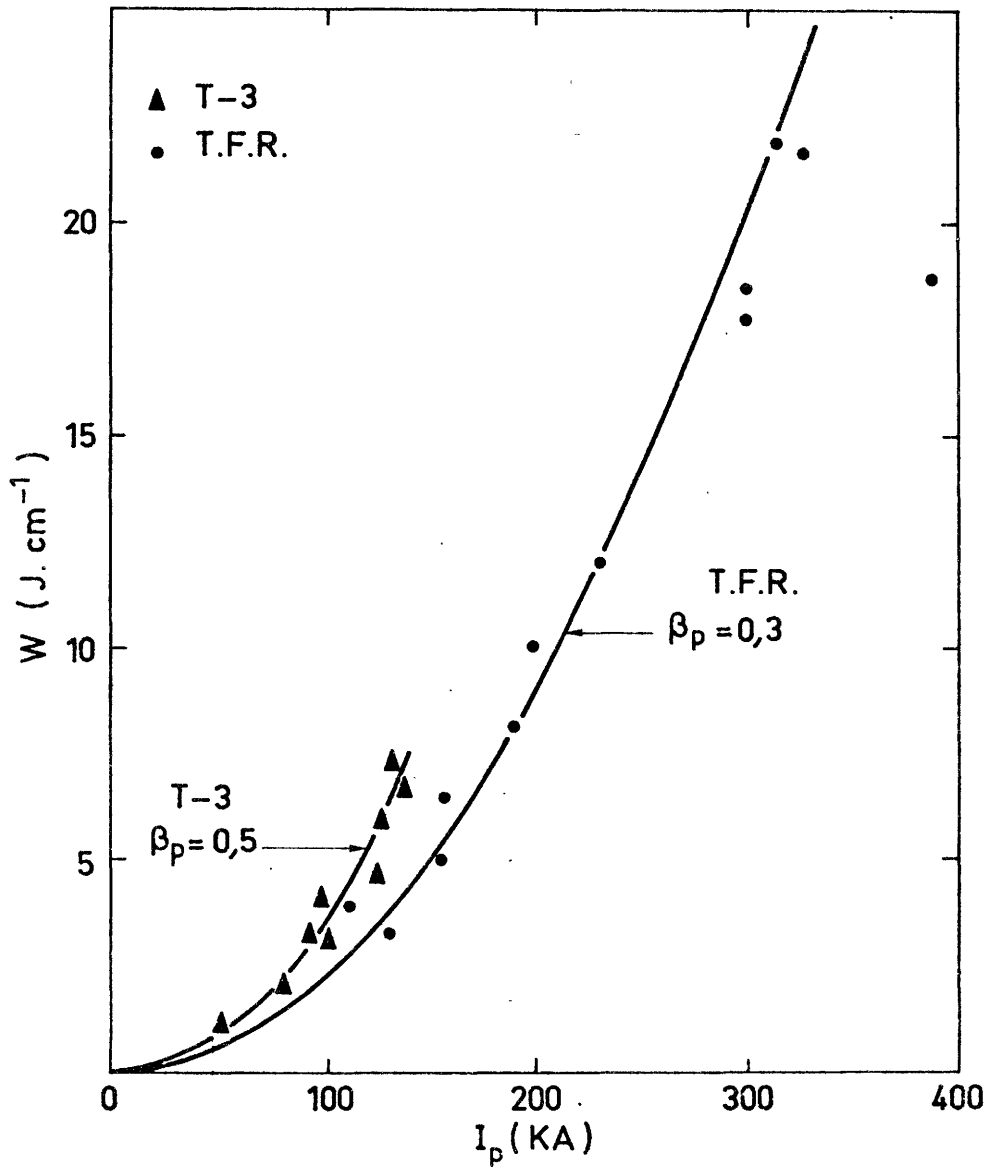


Figure 7

- Densité d'énergie cinétique du plasma en fonction du courant plasma dans TFR et dans T3

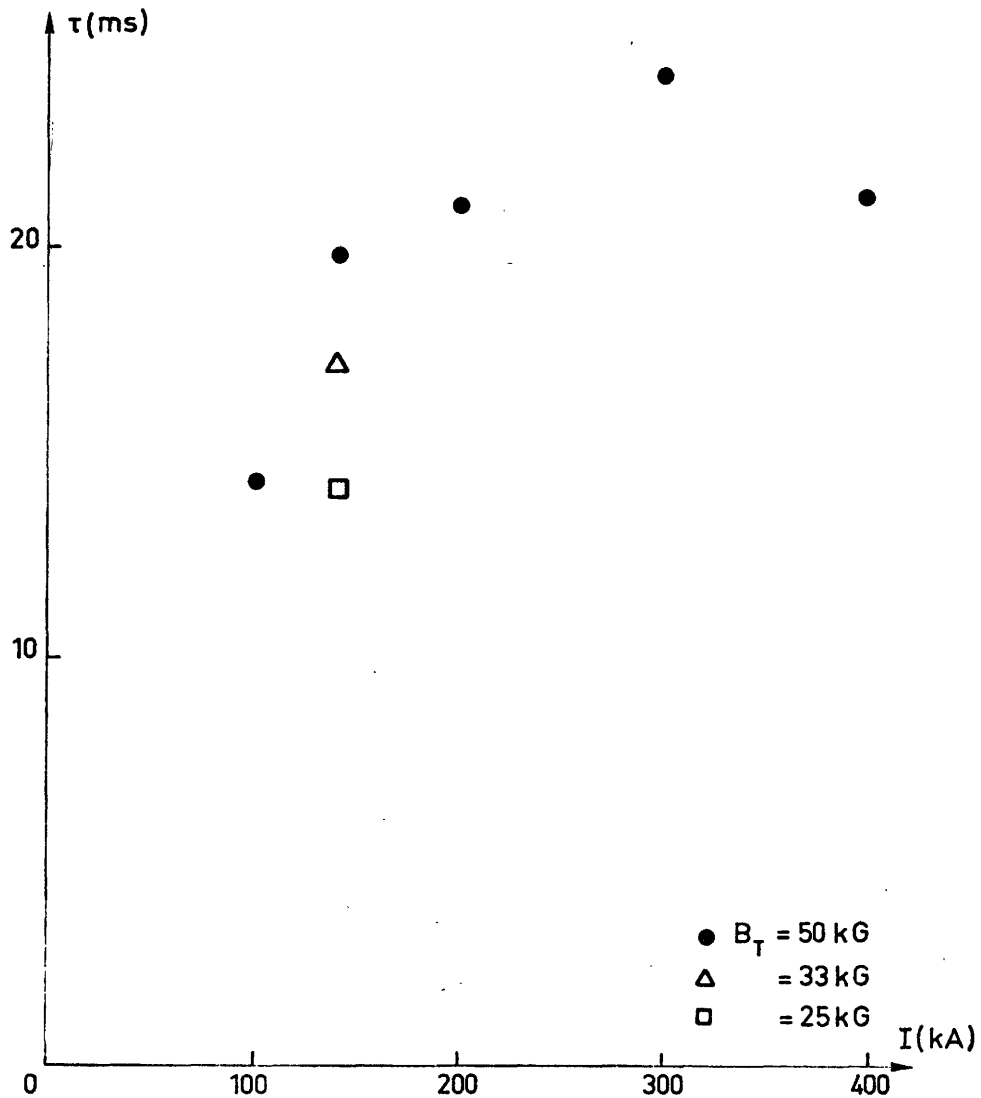


Figure 8 - Temps de confinement de l'énergie en fonction du courant plasma dans TFR

phénomènes physiques existent simultanément dans les plasmas confinés et qu'ils ont des répercussions les uns sur les autres. On peut cependant classer les phénomènes anormaux qui limitent le temps de confinement de l'énergie dans les machines actuelles en deux catégories : les instabilités et les impuretés. Les autres grands problèmes des Tokamaks sont l'augmentation des températures par le chauffage et la recherche de variantes plus favorables que la configuration classique.

2.1. PROBLEMES DE STABILITE.

Les instabilités réduisent le temps de confinement de l'énergie par rapport aux valeurs normales par des mécanismes d'accélération des fuites de particules ainsi que d'augmentation de la conductibilité thermique du plasma. La stabilité macroscopique du plasma est obtenue pour les valeurs du facteur de sécurité q supérieures à 1. Des modes MHD faiblement instables ont été observés sur le bord du plasma pour $q = 2 - 3$. La stabilité du mode superficiel $q = 2$ par un faible champ hélicoïdal appliqué a été démontrée sur PULSATOR à Garching. On a observé sur ST, puis sur TFR, des modes instables correspondant à une couche $q = 1$ à l'intérieur du plasma. Cette instabilité, d'ailleurs prévue par la théorie, est une explication probable de la limitation du temps de confinement pour les courants élevés sur TFR. Cependant, d'autres types d'instabilité sont possibles simultanément ou non, par exemple, les instabilités d'onde de dérive ou les instabilités dissipatives d'électrons piégés.

2.2. LES IMPURETES

La présence d'impuretés de nombre atomique élevé dans le plasma augmente les fuites d'énergie par rayonnement.

Si les atomes sont complètement dépouillés de leurs électrons périphériques, le rayonnement continu de freinage des électrons augmente comme Z^2 . Cette situation peut être le cas pour les impuretés de masse moyenne telles que C, N, O avec les températures atteintes actuellement. On estime à environ 1 % la proportion de ces atomes tolérable dans un réacteur. La situation est beaucoup plus catastrophique avec les impuretés de masse lourde Fe, Ni, Mo, W qui ne peuvent pas être complètement ionisées. Il s'ajoute alors le rayonnement de transition des états excités qui dépasse le bremsstrahlung d'un ordre de grandeur. On estime à 0,1 % environ la proportion de ces atomes lourds tolérable dans un réacteur.

L'origine des impuretés réside dans l'émission naturelle et surtout l'émission induite des parois sous l'action du bombardement de particules et de rayonnement provenant du plasma. L'effet devrait croître avec le temps car un plasma mal confiné et pollué rayonne plus qu'un plasma propre et bien confiné et que, de plus, la théorie prévoit la possibilité d'accumulation des impuretés au coeur du plasma.

En pratique, les expériences Tokamak montrent des valeurs de Z_{efficace} définie comme :

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\sum n_i Z_i^2}{\sum n_i Z_i} \quad (5)$$

allant jusqu'à 10 environ. $Z_{\text{eff}} = 2$ à 5 sont des valeurs typiques pour TFR*. Des impuretés moyennes et lourdes sont présentes simultanément. On ne possède pas encore une analyse détaillée du comportement des différents atomes dans le plasma, ni de la cause principale de leur origine. C'est l'objet de nombreuses et difficiles études actuelles. Il est cependant encourageant de constater que sur TFR, on atteint un état stationnaire des impuretés sans accumulation et que les impuretés lourdes semblent surtout concentrées dans une zone périphérique du plasma. Il n'en reste pas moins que leur rayonnement constitue la perte principale d'énergie de cette zone périphérique.

Une autre conséquence des impuretés est d'augmenter le taux de collision des particules ce qui a empêché jusqu'à présent d'entrer dans le régime faiblement collisionnel pour lequel la théorie prévoit un régime de diffusion plus favorable. L'amélioration de la pureté du plasma est certainement l'un des problèmes clé de la fusion par confinement. Une voie possible réside peut-être dans l'optimisation technologique de la chambre à vide associée à la connaissance détaillée des mécanismes d'émission et de comportement des impuretés. L'autre voie proposée est le "Divertor". Il s'agit d'une modification de la configuration magnétique qui permet à la surface magnétique limite du plasma de faire une excursion à l'extérieur où sont canalisées les particules chargées loin de la paroi en vue directe du plasma.

Bien qu'une petite machine, JFT-2a, ait fonctionné récemment au Japon selon ce principe, il s'agit surtout d'un problème pour l'avenir avec l'expérience DITE en Grande-Bretagne, mais surtout PDX à Princeton (USA) et ASDEX (Allemagne Fédérale) (Fig. 9).

* Des expériences très récentes, publiées depuis la date de cet exposé, sur l'appareil américain Alcator ont montré des régimes à haute densité et un Z_{eff} très proche de 1.

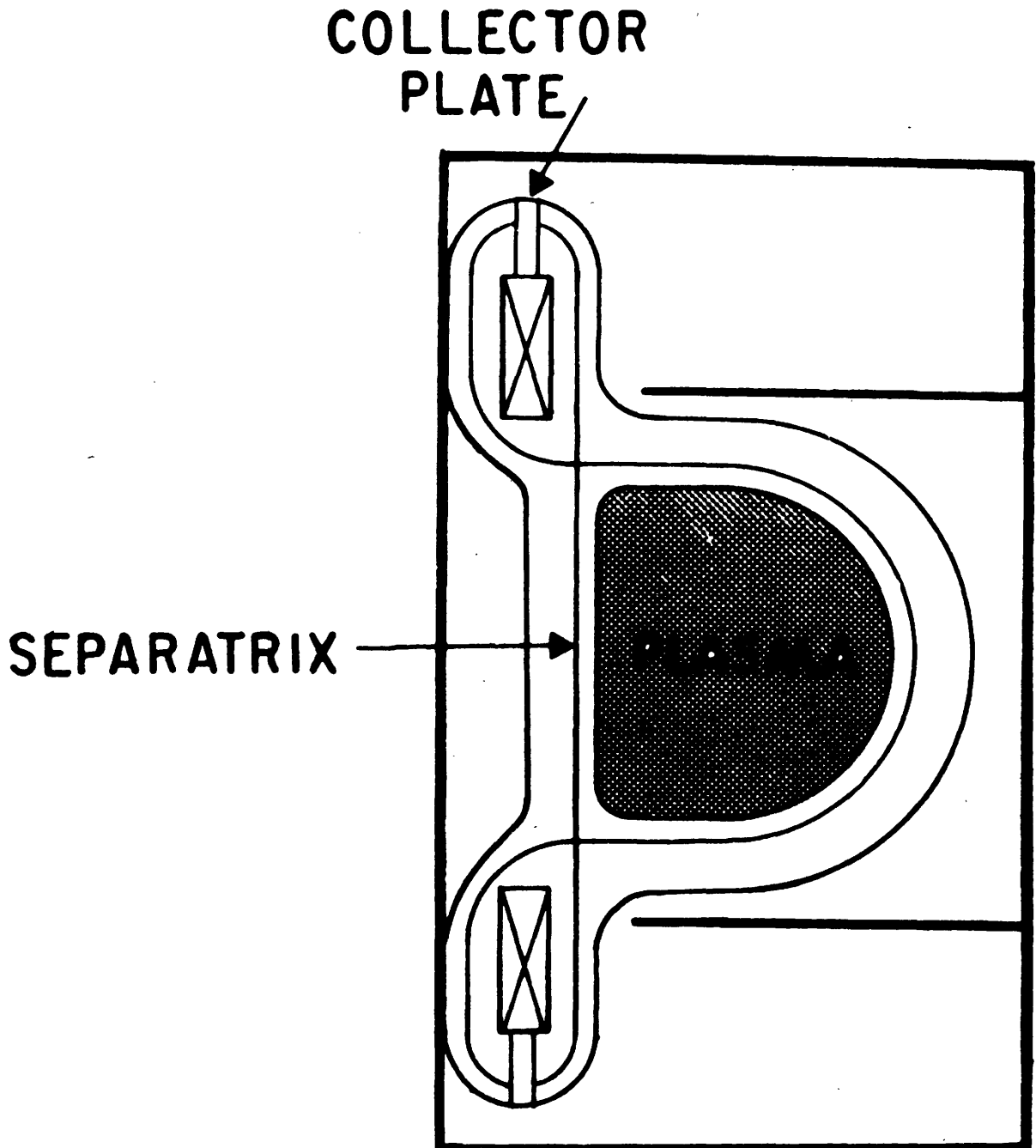


Figure 9 - Schéma de principe d'un divertor axisymétrique -
Section des surfaces magnétiques dans un plan
méridien du Tokamak

2.3. CHAUFFAGE.

Le chauffage ohmique seul ne permettrait pas dans un Tokamak d'atteindre les températures nécessaires à un réacteur (Fig. 10). Son efficacité est en effet liée à la résistivité du plasma qui décroît quand la température augmente par suite de la diminution de la section efficace de collision coulombienne.

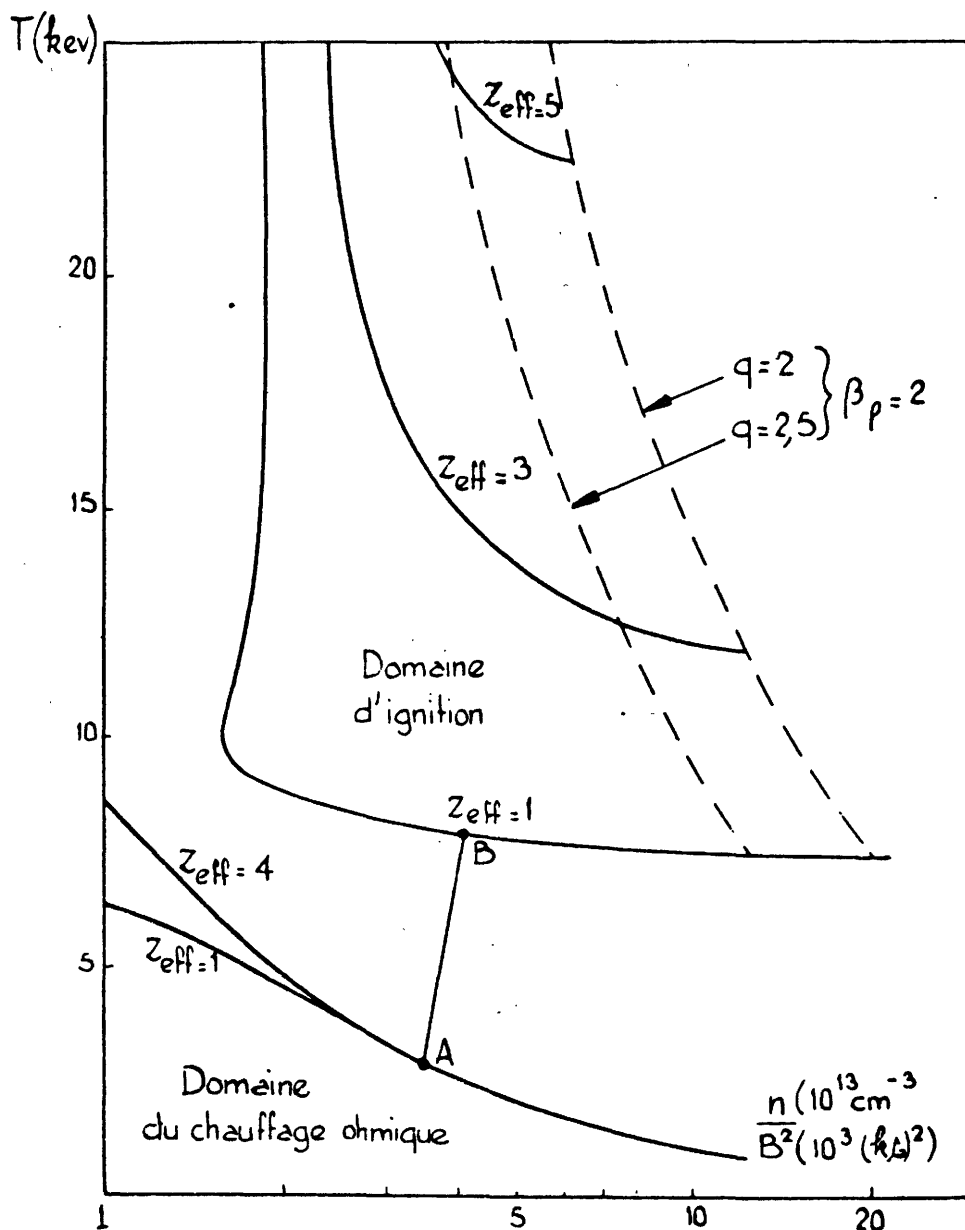


Figure 10 - Domaine du chauffage ohmique et domaine d'ignition d'un réacteur Tokamak. Un chauffage supplémentaire du plasma est nécessaire pour passer du premier domaine au second, par exemple de A à B.

Il faut donc envisager un chauffage additionnel et de nombreuses méthodes ont été proposées. La compression adiabatique du plasma a été essayée avec succès dans les expériences Tuman II à Leningrad (URSS) et ATC à Princeton (USA). (Fig. 11). Dans le premier cas, la compression du plasma est réalisée par augmentation dans le temps du champ magnétique et dans le second cas, par déplacement du plasma dans le gradient du champ toroïdal constant. On a obtenu ainsi sur ATC des augmentations de température électronique et ionique d'un facteur 2 à 3 conformes aux prévisions. Cependant, cette méthode est

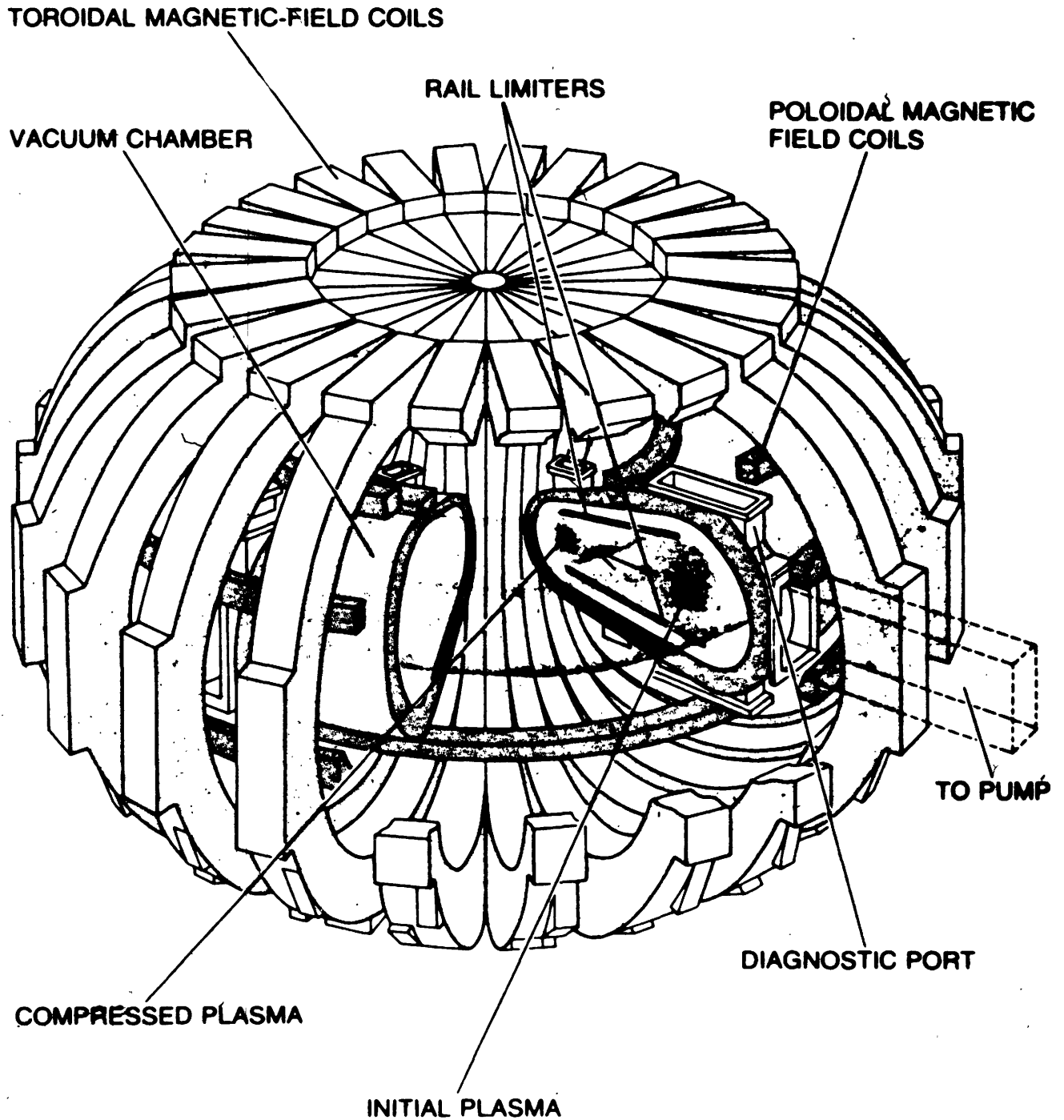


Figure 11

- Schéma du Tokamak ATC (Princeton, USA) qui a fait la démonstration du chauffage par compression adiabatique en déplaçant le plasma radialement vers l'intérieur.

coûteuse en énergie et l'on a proposé toute une série d'autres méthodes dont l'exploration est seulement commencée.

L'injection d'atomes rapides consiste à accélérer d'abord un intense faisceau d'ions et à neutraliser ces ions. Le faisceau neutre peut ainsi pénétrer le champ magnétique. Les atomes sont ré-ionisés au sein du plasma où ils dégradent ensuite leur énergie par collisions dans le plasma. Ce schéma a été rendu possible en pratique depuis quelques années par les progrès importants sur les sources d'ions à extraction à grande surface et trous multiples. Les performances actuelles des faisceaux de neutres sont de l'ordre de la centaine de kW par source. Ce chauffage a été essayé avec succès sur plusieurs Tokamaks: Cleo-Tokamak à Culham (GB), ATC à Princeton (USA), Ormak à Oak Ridge (USA) et plus récemment TFR en France. Dans ces expériences; on a pu obtenir des augmentations de température ionique de plusieurs centaines d'eV, proportionnelles à la puissance injectée. Ces résultats sont très encourageants et presque tous les projets actuels donnent un rôle très important à l'injection de neutres à condition que l'on sache augmenter encore beaucoup l'intensité et l'énergie des faisceaux. Pour un réacteur, on estime qu'il faudra des dizaines de MW.

Les autres méthodes proposées pour le chauffage utilisent des champs oscillants. Quatre domaines principaux de fréquences sont envisagés. A basse fréquence (~ 100 kHz), le pompage magnétique (PM), qui a lui-même plusieurs variantes, utilise comme phénomène de base une compression adiabatique répétée périodiquement. Le PM a été essayé sans succès sur d'autres configurations. L'expérience Pétula à Grenoble (France) a été construite spécialement pour l'étudier dans un Tokamak. Au voisinage de la fréquence cyclotronique des ions ω_{ci} (10 à 100 MHz), une onde électromagnétique peut pénétrer le plasma et être absorbée préférentiellement par les ions. Proposé et essayé depuis longtemps dans d'autres types de configuration, le chauffage cyclotronique n'a été appliqué aux Tokamaks que très récemment (T-10 et TM-1 - Ch en Union Soviétique, ST à Princeton, USA). La preuve d'un transfert notable d'énergie a été faite mais les phénomènes sont compliqués et nécessitent encore des études approfondies avant d'en tirer des conclusions. Dans l'avenir proche, cette méthode sera reprise sur TFR en France et T-4 en Union Soviétique. A la fréquence cyclotronique des électrons ω_{ce} (~ 10 GHz), les électrons sont chauffés sélectivement par le champ électromagnétique ainsi que cela a été montré sur l'expérience TM-3 à l'Institut Kurchatov (URSS). A des fréquences intermédiaires entre ω_{ci} et ω_{ce} , il existe des domaines

(fréquence plasma ionique, fréquence hybride inférieure) dans lesquels le plasma est susceptible d'absorber l'énergie d'une onde. Ces méthodes font l'objet d'essais sur plusieurs expériences actuelles et ont obtenu un succès récent sur ATC (USA). Signalons aussi l'existence d'un programme de chauffage turbulent sur l'expérience TTT à Austin (USA).

Si les études de chauffage ne sont pas encore très avancées, c'est qu'il était nécessaire auparavant de mieux connaître les lois du confinement et de disposer de machines de performances suffisantes. La situation actuelle permet des efforts importants dans le domaine du chauffage. Le nombre élevé des possibilités et les résultats préliminaires encourageants autorisent la confiance en l'avenir.

2.4. SECTIONS NON CIRCULAIRES ET RAPPORT β .

Une inquiétude pour l'avenir du Tokamak en tant que réacteur est la limitation du rapport

$$\beta = \frac{\text{pression cinétique du plasma}}{\text{pression magnétique}} = \frac{nk(T_e + T_i)}{B^2 / 8\pi}$$

Ce nombre caractérise l'efficacité d'utilisation du champ magnétique qui représente un investissement coûteux. Dans un Tokamak classique, β_p , c'est-à-dire β rapporté au champ poloïdal, est inférieur au rapport d'aspect R/a d'après la théorie de l'équilibre et β_T toroïdal a^2/R^2q^2 fois plus petit. Cette limite théorique n'a même jamais été atteinte et en pratique, jusqu'à présent, β_p est le plus souvent compris entre 0,5 et 1 et β_T inférieur à 1 % ou même 1 ‰. Une section non circulaire du plasma permet une amélioration importante du β_T . Pour satisfaire en outre les conditions de stabilité, on est conduit à donner à la section une forme de haricot vertical ou de D allongé. C'est ce qui est réalisé dans les expériences Doublet II à San Diego (USA) et T-9 à Moscou (URSS). L'expérience Doublet II a pu dépasser 2 % pour la valeur du β_T . (Fig. 12).

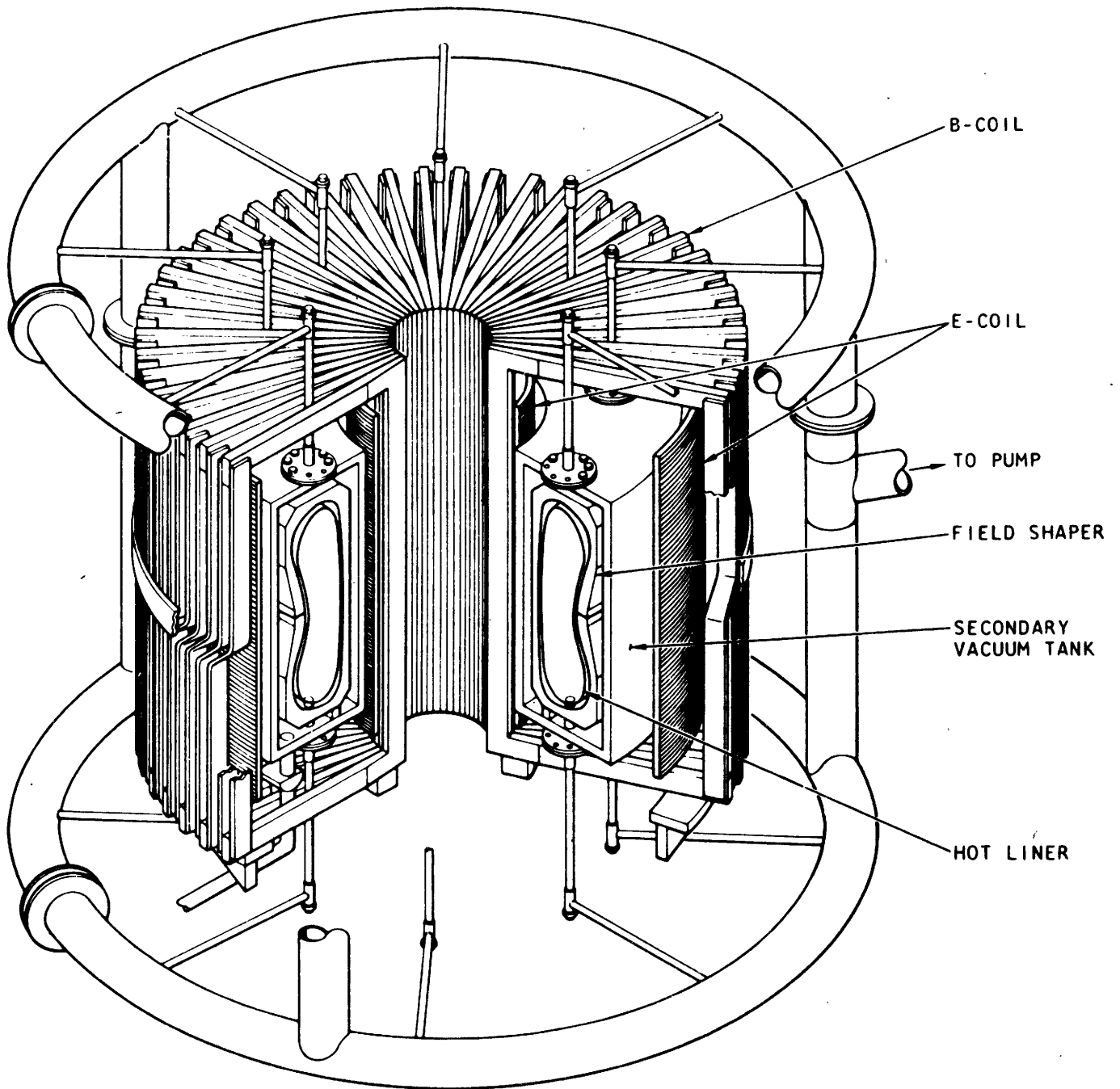


Figure 12

- Schéma du Tokamak Doublet (San Diego, USA). La section étirée verticalement du plasma permet l'augmentation du facteur β .

TOKAMAKS EN CONSTRUCTION OU EN PROJET EN 1975

			R cm	a cm	B _T kGauss	I _p kA	
T 10	Inst. Kurchatov	URSS	150	37	50	1000	Achèvement en 1975
T 7	Inst. Kurchatov	URSS	110	35	30	600	Supraconducteur
TM 4	Inst. Kurchatov	URSS	40	8	45	40	Paroi de vide chaude - Projet
Tuman 3	Léningrad	URSS	55	25	10 30	230	Compression adiabatique - Projet
TF 1	Léningrad	URSS	62	15	10	25	Chauffage H.F. - Projet
T 20		URSS	500	200	35	6000	Avant-projet
P.L.T.	Princeton	USA	130	45	45	1400	Achèvement en 1975
P.D.X.	Princeton	USA	140	42	25	500	Divertor - Achèvement en 1977
Doublet III	San Diego	USA	140	45 horizont. 150 vertical.	26	5000	Section non circulaire-Achèvement en 1978
TFTR	Princeton	USA	250		85	52	1000
TF	Frascati	Italie	82	22	100	1200	Achèvement en 1976
DITE	Culham	GB	112	23	30	280	Divertor - Achèvement en 1975
ASDEX	Garching	Allem.	154	40	30	520	Divertor
TFR 2		France	170	80	30	1700	Avant-projet
JET		Europe	296	125 horizont. 210 vertical.	28	2600	Avant-projet
JT 60		Japon	300		100	50	3300

R : Grand rayon du tore (cm)
a : Petit rayon du plasma (cm)

B_T : Champ toroidal sur l'axe (Kgauss)
I_p : Courant plasma

TABLEAU II

3. L'AVENIR DES TOKAMAKS

Le programme des 5 prochaines années sera la continuation naturelle de la situation présente (TABLEAU II). Pour continuer à progresser, il est clair qu'il faut des appareils plus puissants. Le paramètre simple qui résume le mieux la capacité d'une machine est , comme on a vu, le courant dans le plasma. La façon la plus directe d'augmenter ce courant est d'augmenter les dimensions géométriques des machines. Toutes choses égales par ailleurs, le temps de confinement devrait augmenter comme le carré du petit rayon du plasma. Mais, la température augmentant, on devrait atteindre un nouveau régime de diffusion lié à une diminution de la fréquence de collision. Deux appareils classiques : PLT (USA) et T-10 (URSS), de performances très similaires voisines de 1 MA, devraient entrer en service à la fin de 1975. Vers le milieu de 1976, on verra en Italie un appareil qui, avec des dimensions plus modestes, devrait obtenir le même courant mais en travaillant à champ magnétique très élevé. Cette approche intéressante mais techniquement difficile est la continuation de Alcator (MIT).

Les études sur le chauffage, les impuretés et l'amélioration de β se développeront sur ces appareils classiques et aussi sur un certain nombre d'appareils très spécialisés. Il faut mentionner surtout les grands appareils PDX et ASDEX pour leur Divertor ainsi que le grand appareil à section non circulaire Doublet III.

Les études de technologie des réacteurs commenceront à faire leur apparition dans deux domaines : la première paroi en vue directe du plasma et l'emploi des supraconducteurs pour créer la configuration magnétique (T-7 à Moscou). L'étape suivante est déjà en préparation. En URSS, aux USA, en Europe et au Japon, on prépare les plans de grandes machines qui pourraient entrer en service vers 1980 et viser la démonstration de faisabilité d'un réacteur du type Tokamak. Pour cela, il faut un courant de plasma de plusieurs méga-ampères et des dispositifs de chauffage capables de délivrer des puissances comprises entre 10 et 100 MW. Les études actuelles montrent que cette entreprise est techniquement et scientifiquement possible. La figure 13 montre l'aspect général du projet européen JET. Cet appareil sera décrit dans les exposés suivants.

En conclusion, les résultats actuels et le programme proposé permettent d'espérer avec confiance la démonstration de la faisabilité scientifique de la fusion thermonucléaire contrôlée dans la voie Tokamak avant 10 ans.

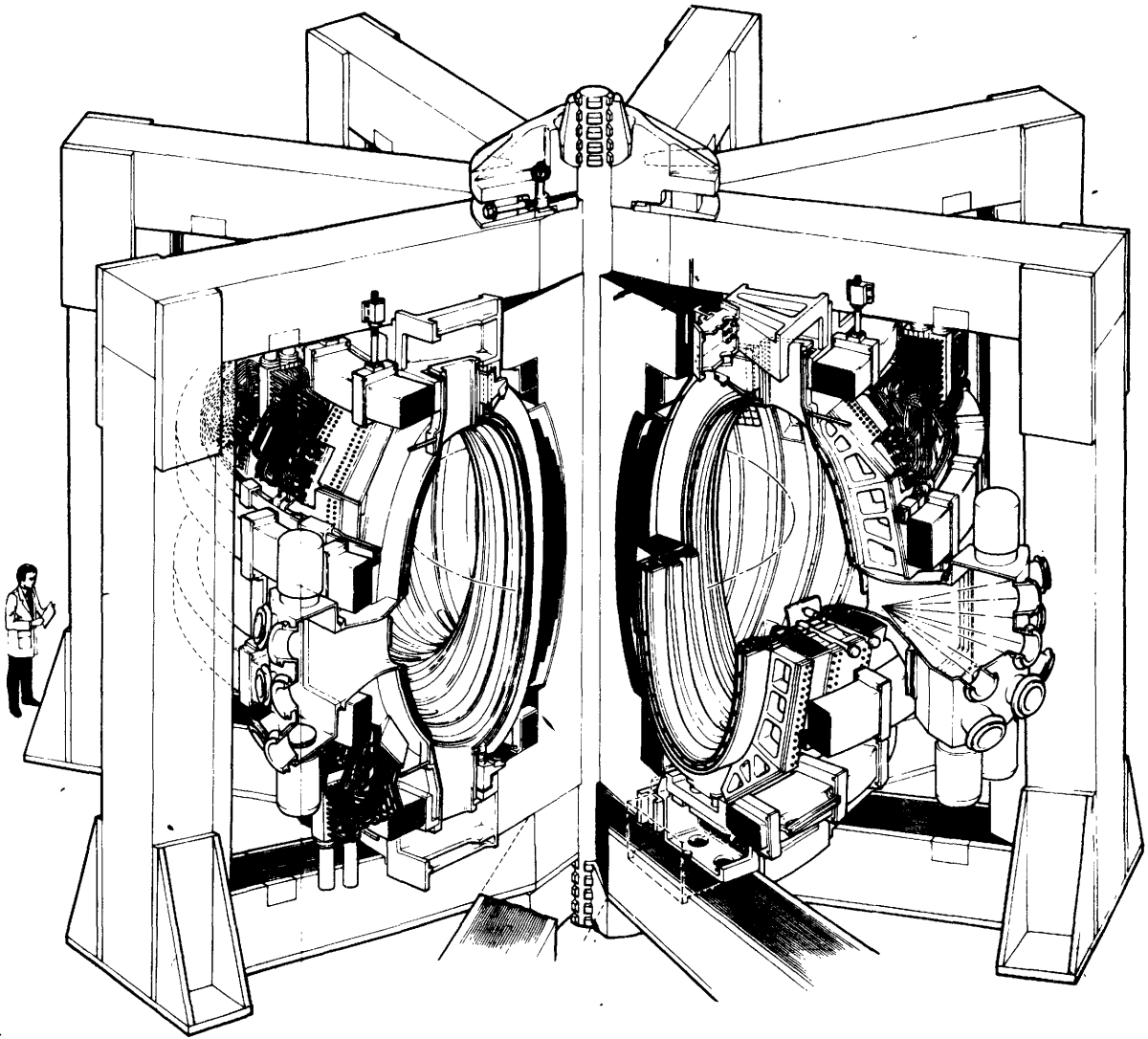


Figure 13 - Schéma du JET (Joint European Torus)

SCHUSTER

Now, gentlemen, it is up to you to come into the picture and put your questions. Don't hesitate to ask what you want, or even hesitate to criticize if you would like to do so. Free speech now, that is to be the atmosphere of the meeting ; the technicians and engineers are here. So it is up to you.

PRINS

My question is the following. We have heard a lot about plasma physics so far, and there seem to be very many problems. But I think a lot of the people gathered here are from industry and are greatly interested in knowing what the engineering problems are. I myself have some trouble in translating plasma physics problems into engineering problems. Maybe this is asking too much in one short question, but I think this is one of the things I would like to know. Is there a possibility of forming categories of different problems, of getting larger vessels or more compact systems ? What kind of problems do you have because you want us to make and deliver components for your experiments and I don't think you have asked us to supply you with the soft-ware up till now ?

PREVOT

Oui, je crois qu'il n'est pas vraiment possible de répondre à cette question. Je pense que les choses seront plus claires pour vous demain. Après les exposés sur le JET, on vous parlera, de façon détaillée des problèmes de construction et des problèmes de technologie un par un en les définissant.

Les exposés qui ont eu lieu jusqu'à présent aujourd'hui n'avaient pour but que de vous donner une introduction générale ; et peut-être est-ce dû à mon exposé : il m'apparaît difficile de vous répondre tout de suite mais je comprends bien votre souci.

PRINS

We will wait till tomorrow then.

SCHUSTER

There is some hope for you tomorrow. However, if we look at the agenda, I would like to point certain things out. This is on the vessel, this is on activation, this is on the pumping system, and I think we are going into hardware questions now, mechanical structure, remote handling, while you have also the poloidal field coil, the iron core parts supplies and so on.

I hope you will have numerous demonstrations of engineering interest tomorrow morning. But this is one of the questions that greatly interests me : Will you go away with the feeling that all this is too much plasma physics, and that we are purely theoretical people, that there is nothing for us hardware people ? This is just what I would like to learn at this meeting.

NOM NON INDIQUE

Tout à l'heure on a parlé de compression du plasma dans une partie du tore où le champ était plus fort. Comment se fait cette propulsion du plasma vers les zones où le champ est plus fort ? D'ailleurs, de façon plus générale, cette propulsion n'exige-t-elle pas des champs pulsés ? Donc, avec une fourniture d'énergie très rapide.

PREVOT

Il y a deux façons de faire la compression : soit avec un champ pulsé, le plasma peut rester stationnaire dans l'espace, et on pulse la valeur du champ, ce qui nécessite une grosse dépense d'énergie. Mais la façon astucieuse et élégante que je vous avais montré sur l'expérience ATC, consiste à avoir le champ fixe dans le temps. Seulement le champ n'est pas homogène dans l'espace. Comme c'est le champ d'un solénoïde sa valeur décroît quand le rayon croît. Sa valeur est exactement en $1/r$. On peut contrôler la position du cordon de plasma dans ce champ, par la valeur de la composante du champ vertical, dont je vous ai parlé au début. Le champ vertical, couplé avec le courant qui circule dans le plasma donne une force perpendiculaire aux deux, donc une force radiale. Il suffit d'augmenter, légèrement enfin, mais suffisamment ce champ, d'un ordre de grandeur plus faible que le champ principal pour pousser le plasma vers l'intérieur, grâce à la "force de Laplace".

VAN TOL

If I have correctly understood your speech, you said that for radio frequency heating, there are two main regions of resonance, one for electrons and the other for ions, and you also stated that besides these two regions there is a so-called hybrid region of other frequencies that have quite a wide range. Now, my question is : Have the experiments, so far conducted, been concentrated on domains of this wide frequency region or not ? In other words, are they dispersed around this wide region or rather concentrated in some specific parts, say micro-waves, for example ?

PREVOT

Je vois plusieurs aspects dans votre question. D'abord, je crois qu'il faut qu'il soit clair que toutes les fréquences ne sont pas également possibles. Il y a des fréquences privilégiées pour le plasma, elles sont assez nombreuses, je n'ai indiqué, sans entrer dans les détails, que quatre grands domaines mais dans chacun de ces domaines encore, il faut choisir la variété qui semble le mieux convenir et construire l'appareillage. En fait, pour la deuxième partie de votre question : les études de chauffage par haute fréquence, dans l'ensemble, ne sont pas très avancées. Elles ont été menées jusqu'à présent à petite échelle, avec des moyens relativement faibles, et elles ont été très dispersées sans un grand effort systématique. Je pense que cela tient à des raisons purement historiques, c'est-à-dire que le moment n'était pas venu de le faire parce-que les problèmes de chauffage ne sont devenus aigus que récemment, il y avait des choses qui avaient la priorité avant, tel que l'étude du confinement dans le régime de chauffage ohmique, et maintenant je crois qu'on peut dire que l'on va assister à un très gros effort très systématique sur les problèmes du chauffage, mais jusqu'à présent, ce sont des efforts dispersés et faibles.

KÖHLER

Da JET keine supraleitenden Magnete benutzen wird, und deshalb morgen sicherlich - wenn JET im Detail vorgestellt wird - auch nicht über supraleitende Magnete gesprochen wird, hätte ich gerne von Ihnen gewusst, wie Sie sich die Entwicklung von supraleitenden Magneten vorstellen im

Rahmen dieses nächsten Fünfjahresplans. Und wann Sie an ein Gross-experiment mit supraleitenden Magneten denken ? *)

PALUMBO

I think our aim for several years should be to produce a medium-sized completely superconducted torus or a large-sized single coil which would have the dimensions considered necessary for a real reactor. Now, in order to study the "scaling laws" concerning the technological difficulties of building a very large superconducting coil, or try to face this difficulty arising from the topology of the torus, we need a large magnetic field, in a very large volume and in a very complicated geometry because this torus is very difficult to manage. In this sense we can perhaps try to build, let me say, a medium-sized torus much smaller than a real reactor but totally toroidal and totally superconducting. We are still studying this programme, which officially started this year with the cooperation of the three main laboratories working in this field in Europe, namely KARLSRUHE, the RUTHERFORD Laboratory near Harwell, and SACLAY in France, with the collaboration of the Italian Laboratory in Frascati and the Dutch Laboratory in Petten. This is how we are preparing the programme. We do not know exactly in which direction we will go, but we are certainly doing something, something is moving in this area.

I should like to remind you that a coil or two superconducting coils, perhaps, were produced for WENDELSTEIN VII, which is the Garching "stellarator". And there are also one or two coils being built at present and I think tested successfully by industry.

*) KÖHLER

As JET uses normal and not superconducting coils, I shall have no chance to put my question tomorrow when details of JET are presented. How do you envisage developing superconducting magnets in this next five-year plan, and when do you expect to carry out a large experiment using superconducting coils ?

(Translated by our co-ordinator)

SCHUSTER

I would like to follow up what Mr. PALUMBO has said. The Director of the European Fusion Programme is asking whether we foresee large-sized single coils or whether we would like to have medium-sized tori. But now, who is going to produce them? Who is going to develop them? There are certain research laboratories, KARLSRUHE, RUTHERFORD, and SACLAY, for example, where some work is being done, but the real work has to be done by industry. This is my personal belief. And this is my question to you here. What are the possibilities of such an essential programme as this, where superconducting development is going on? My firm belief is that this cannot be done by the laboratories now; finally industry will have to enter the field.

THIBAUT

Sur ce point qui vient d'être soulevé, je voudrais faire une remarque qui est très simple. Dans les firmes privées, il est quelquefois difficile de lancer des programmes de recherche d'un jour à l'autre, c'est-à-dire très rapidement; il y a un temps de réponse de l'industrie finalement aux programmes de recherche qui ne sont pas directement ses propres programmes.

Alors, je pense que dans les mois qui viennent ou dans les années qui viennent, il faudra peut-être des relations plus étroites entre les responsables du projet dans les laboratoires concernés qui sont les vôtres et les industriels de manière que les temps de réponse soient finalement courts parce qu'il ne s'agit pas de lancer simplement un appel d'offre pour les différents industriels s'il n'y a même pas les équipes prêtes à répondre. Alors, quand pensez-vous qu'il pourra y avoir une coordination pratique entre le programme JET, par exemple, et les différents industriels qui peuvent être concernés par ce programme?

REBUT

Je vais répondre à cette question en tant que responsable du projet JET, du moins dans sa phase de design. Je crois qu'il y avait deux aspects: il y a un premier aspect qui concerne la disponibilité d'équipes, relativement pour l'immédiat pour le projet JET, et un deuxième aspect qui est la disponibilité d'équipes pour des recherches à plus long terme.

En ce qui concerne le projet JET, comme vous avez peut-être pu le remarquer, il n'y a pas de supraconducteur dans le projet lui-même. Nos seules sources, ou besoins en termes de froid, de manière générale, sont pour le pompage et parce que nous pensons utiliser des systèmes de cryopompes pour le pompage du tore.

La façon de travailler générale de l'équipe JET lorsque de tels problèmes se posent, est de faire appel le plus possible aux connaissances qui peuvent exister à l'extérieur des laboratoires de fusion.

En ce qui concerne la fusion, nous faisons appel aux laboratoires de fusion mais en ce qui concerne toutes les techniques, que l'on pense trouver dans l'industrie, nous essayons de faire appel à l'industrie et ça par l'intermédiaire de contrats d'études qui sont parfois demandés avec un temps de réponse rapide, c'est vrai, mais nous devons aussi tenir un planning et définir un contrat d'étude sur un sujet donné demande déjà de savoir ce que l'on veut, et savoir ce que l'on veut n'est pas toujours le plus facile, c'est-à-dire d'avoir déjà fait le tour d'une partie des problèmes avant que l'on puisse efficacement demander une aide précise à l'industrie.

En ce qui concerne la partie pompage, ou cryopompage, je crois qu'il y a un certain nombre d'appels d'offres en cours sur cette question.

SCHUSTER

Gentlemen, as Mr. REBUT has now come into the discussion, I take this opportunity to introduce the JET Design Team : Mr. REBUT, who is really the leader of the Culham Design Team, Mr. SMART, Mr. BERTOLINI, Mr. POFPE, Mr. ECKHARTT, Mr. HUGUET and Mr. GIBSON.

PALUMBO

Je crois que la question posée par l'orateur tout à l'heure était un peu plus générale que la supraconductivité ou le froid etc... Je pense que vous pensiez à une façon d'établir des rapports qui soient permanents entre l'industrie et le programme fusion dans tous ses aspects. Or, comme je l'ai dit, très brièvement, à la fin de mon exposé, dans le cas JET ces rapports se sont considérablement améliorés.

Et je crois qu'on peut commencer par des informations périodiques que nous pourrions fournir à l'industrie sur, non seulement les besoins immédiats, mais l'évolution de ces besoins; évidemment ceci comportera des incerti-

tudes, ainsi que Mr. REBUT vient de le dire, mais certainement, je crois que dans notre esprit la réunion d'aujourd'hui s'est vraiment faite pour mettre en marche un tel mécanisme. Peut-être demain quelqu'un de l'équipe JET expliquera quel est le mécanisme dans telle action avec l'industrie. Pour le moment, peut-être puis-je vous le dire en deux minutes. Pour chaque grande catégorie d'action, par exemple électromécanique, pompage, vide, "power supply" etc..., on demande à chaque directeur de laboratoires nationaux d'envoyer au JET Team une liste des industries de leur pays qui pourraient aider, qui pourraient procéder à des études et à des exécutions de commandes. Et c'est sur la base de ces listes (il y a en général plusieurs dizaines de firmes dans chaque papier) que pourront s'établir les contacts. Je pense qu'il serait bon de votre part de nous donner des suggestions à ce sujet ; vraiment c'est un des buts de cette réunion.

NO NAME

I think that if you want to have an instrument so as to work with some kind of cooperation, I would like to refer to a list that we received through the JUTPHAAS Laboratory in Holland, where quite a lot of problems are dealt with as main areas of work. As a Dutch company has stated, we have an interest in certain items and we have had some response but now there is complete silence. Perhaps the silence will be broken at this meeting.

I would like to insist on having an inventory of technical questions, split up into the different engineering fields as they are here, and not put so generally, as was done in the first Research paper of January 1974. Then I think the "instrument" for putting forward quotations is sometimes already in a fairly low stage. I think industry is interested in putting forward some kind of advice so as to avoid double work and, in this way, they are contributing results, any results, to the laboratory. I think it should be more directive, a cooperation in an advisory capacity or a working-together rather than just putting forward quotations and, in the end, to hear "I'm sorry, it's finished", without having had the opportunity to exchange ideas or to have a brain-storming meeting. I think this would be very helpful and would possibly induce the institutions to carry out work in cases where they finally find that industry is unable to fulfil their wishes. And perhaps something could be worked out in this respect in the various engineering fields ; some kind of board which

should, of course, be international, since we do not want to have nationalities too highly emphasized. Is there anything? Some kind of philosophy?

REBUT

Je vais essayer de répondre, en ce qui concerne le JET, sur la façon de travailler que nous avons eue jusqu'à présent. Ayant reçu de la part des laboratoires nationaux une liste d'industries intéressées ou susceptibles de fournir leurs compétences sur un sujet donné, parmi les sujet nous les avons d'abord traités en fonction de l'urgence qu'ils avaient pour nous, compte tenu des plannings et essentiellement l'effort apporté initialement sur les problèmes électrotechniques - vous avez vu que ces appareils sont essentiellement des appareils électrotechniques - et les problèmes d'électrotechnique : tenue des bobines, source d'énergie, je dirai, étaient parmi les premiers traités. Ceux qui ont été traités en parallèle aussi, étaient les problèmes liés à la chambre à vide, matériaux spéciaux, problèmes de soudure, etc... Dans tous ces domaines, je crois que nous avons largement fait appel à l'ensemble des connaissances qui existaient : connaissances dans des laboratoires d'Etat, obligatoirement les laboratoires de recherche de la fusion et connaissances dans l'industrie privée. D'une manière générale sur chacun de ces problèmes nous sommes obligés aussi de respecter certaines règles c'est-à-dire de faire des appels d'offres même pour le contrat d'étude - nous fonctionnons dans un contexte international et il y a une certaine lourdeur à appliquer ces règles, vous devez en convenir - mais nous avons passé des contrats d'études à l'industrie privée et en général plusieurs contrats de façon à avoir des opinions diverses sur un même sujet. En général de deux à trois contrats sur le même sujet réparti, je dirai, essentiellement en fonction de la technicité des firmes qui avaient bien voulu répondre à notre demande d'étude. Une fois que les études sont faites, ce qui nous permet de dégrossir le projet, de dégrossir les solutions qui pourront être techniquement construites par l'industrie, enfin je dirai diverses variantes ou autres, nous faisons un résumé de ces contrats et nous dégageons, je pense, la solution qui sera retenue. Cette solution est ensuite proposée pour être réellement construite sous forme d'appels d'offres qui sont, de fait, plus larges évidemment, et qui s'adressent à un ensemble de firmes plus grand que les firmes qui ont fait

les études préalables. Il est certain que dans le cas où une industrie n'a pas fait l'étude et reçoit cet appel d'offres qui contient le résultat, je dirais malgré tout, la conclusion de ces études préalablement faites, cela lui semble peut-être un petit peu brutal et un petit peu difficile de répondre assez rapidement.

Je ne vois malheureusement pas tellement d'autres méthodes de faire.

SCHUSTER

I wish to add this comment, and quote a figure. If JET is approved, there will be 135 million units of account, of which I guess we will have about 80 million units of account for industrial components. This is therefore a \$ 100 million project and will give you an idea of the relationship between Industry and JET. This is the real dimension. Just now JET is in the design phase.

BATTAGLINI

Une question très simple. Vous avez parlé, Monsieur PALUMBO, d'appels d'offres et parmi les thèmes qui seront traités demain matin je vois : "Study Contract and call for tenders procedures", je voudrais savoir ces appels d'offres, mécaniquement en terme de procédure, comment sont-ils lancés ? C'est-à-dire est-ce qu'on prévoit une publicité, une réclame sur les Journaux Officiels ou bien à l'intérieur des listes qui vous sont fournies par les directeurs nationaux ? Merci.

PALUMBO

Mr. REBUT pourra peut-être répondre à cette question. Je peux répondre également : à l'intérieur des listes, actuellement.

KÖHLER

Ich glaube, es wäre notwendig, einen Weg zu schaffen in dem die Industrie an der Formulierung der Programme, die zur Erreichung bestimmter Ziele zur Energieerzeugung durch Kernfusion erstellt werden sollen, beteiligt wird. Ich glaube, dass es für die Industrie sicherlich nicht so interessant ist, für bestimmte Einzelprojekte bestimmte Arbeiten zu übernehmen,

die doch vom Umfang her relativ gering sind - und dann keinen Einfluss darauf zu haben, wie die ganze weitere Entwicklung des Projekts aussieht. Wenn nicht z.B. die Zahl wiederhole, die Sie, Herr SCHUSTER, gerade erwähnt hatten, 100 MRE an JET Aufträgen für die Industrie, dann muss man das z.B. einem einzigen grossen Druckwasserreaktor gegenüberstellen, der in der Grössenordnung von etwa 5 mal so viel liegt. Mit der Reaktorindustrie verglichen, die hier einmal involviert werden soll, handelt es sich also um einen ziemlich kleinen Auftrag, für den man auch kaum Anschlussaufträge sehen kann. Das ist sicherlich die Problematik, wenn man versucht, die Industrie hier hinein zu bringen. Ich glaube, es wäre leichter, die Industrie zu motivieren, wenn die Industrie auch einen gewissen Einfluss nehmen könnte auf die Programmentwicklung, d.h. auf die Formulierung von Programmen ; und da hätte ich gerne von Ihnen gehört, ob Sie bestimmte Vorstellungen haben, wie man z.B. die Industrie z.B. in die Programmformulierung hineinbringen könnte, und auch z.B. dann in der Weiterverfolgung durch direkte Zusammenarbeit oder Abstellung von Mitarbeitern in die Nationallaboratorien, die das Programm durchführen, wie man so etwas in die Wege leiten könnte. *)

*) KÖHLER

I think it is necessary to find a way for industrial participation in the formulation of programme steps and programmes for reaching specific milestones on the way to energy production by nuclear fusion.

I believe that it is less interesting for industry to complete special orders for special projects, which are still modest in size, while not having any influence on the further development of the programme.

To repeat the figure given by you, Mr. SCHUSTER, 100 MUC on JET orders for industry, you should compare this with a single large pressurized water reactor, which has a figure roughly 5 times higher. Compared with the reactor industry which would be involved once, it concerns thus a relatively small order - and what is more, one can hardly see repeat orders. This certainly is the problem in trying to involve industry. I think it would be easier to motivate industry if it could influence programme development i.e. the formulation of programmes. Here I should like to know whether you have any definite concepts on how to involve industry in the formulation of programmes and in further development e.g. by direct collaboration with the national laboratories, who conduct the programme, for instance by seconding men or otherwise. (Translated by our co-ordinator)

SCHUSTER

I think these are fundamental questions now. First of all, how is the Commission going to draw up our R & D programmes in general? Is the Commission already trying and asking industry for advice? Is the Commission able to exert a certain influence or to obtain certain advice from industry? Another question is: What about this \$ 100 million (about 80 million units of account) for parts; is there nothing for heavy steel, for reactors, or the nuclear industry? I think I would like to deal with these two questions separately. And I would like to tell you something on how the Commission expects to prepare the research proposals. I would like to take, as an example, the non-nuclear energy programme. It was decided by the Council of Ministers some months ago. The Council approved a Community programme, using Community money from the Community budget in five sub-areas: energy conservation, solar energy, geo-solar energy, hydrogen, as a new energy reactor cohere, and systems modelling, amounting to 60 million units of account for a 4-year period. This is in line with the general theme; the idea is to develop alternative energy sources within the Community, which is implying that there might be difficulties with the so-called "plutonium society", in living with the nuclear breeder, and the power station, in a situation where fusion has not been achieved so far. But fusion is on its way. At all events, the Commission wishes to make all efforts to reach possible alternative solutions. This is just for information. How did the Commission develop this programme? In the very beginning, a year or a year and a half ago, we started by inviting (or the Commission did) all experts - that might be exaggerated - but experts from industry, the universities, research centres, public centres, to 4- or 5-day open workshops or seminars. These were held successfully at the International Institute for the Management of Technology (IIMT) in Milan. Proposals were made and drawn up. Now the next part of the procedure was that the Commission would contact the experts before going to the governments who had, finally, to agree on the financial aspects. The second phase of contacting the representatives of the various Member Governments was done in different Committees. One of the Committees was CREST, the Scientific and Technical Research Committee which is composed of officials from the Member Countries. After having obtained the technical expertise and the administrative and scientific policy blessing of the various governments, the problem then was the Council of Ministers. However, the Council of Ministers has

approved now. What we are doing now is to establish Steering Committees and the governments are responsible for appointing members to the Steering Committees. This is quite a tricky thing because the Commission would like to have experts on these Steering Committees, people from industry, research centres, from universities. These Steering Committees are, to a certain extent, the link between the customer and the people involved from the industrial field. The complicated machinery of the European Communities comes into play here, and I do not think that we can escape from this machinery.

But now to answer your question on the fusion field. In this field, fusion did, in fact, start in the fundamental research field of plasma physics. Mr. PALUMBO told you that as regards the structure, there are the different types of association (by association I mean contracts between the Commission and the laboratory, for example, the CEA, France, the United Kingdom Energy Authority, the German Max-Planck Gesellschaft, etc.). These are the contracts. And the Steering Committee for fusion works like the famous "Groupe de Liaison". I must emphasize that, in the Liaison Group, you have a great many scientists, eminent scientists, and a lot of people from the laboratories. But now, in addition, you have industrial people, and if we are to begin a second phase now, we have to reconsider these structures. For this reason the present discussion is of great interest for me. Another possibility would be - I am speaking now only of possibilities, so please don't say that "SCHUSTER has told us what we are going to do .." - to have special committees for special topics, for instance, superconducting magnets, etc., to bring together expertise from industry which can advise the project director or the committees. But I think there is a need for some development in this field, which is the reason for this meeting. Although this machinery is complicated it is very important for the second point made by Mr. KÖHLER. What about the 80 million units of account? Our machine started with one billion. This is really hardware, pressure vessel components, etc. Gentlemen, I think everybody is agreed that this is the way to bring industry into probably one of the most important technological developments of the future. I think this is one phase where industry even has to pay for the famous "entrance ticket", and must not be only interested in getting funds of, for example, 5 or 10 million units of account, but must be really interested in paying for the entrance ticket. I add that this may not be the right time to start discussion on this subject, but I would like to see whether there is any agreement.

PALUMBO

Je crois qu'il y a deux problèmes qui doivent être abordés dans deux plans, dans deux dimensions différentes.

Un problème c'est l'industrie comme fournisseur d'appareillages qui nous serviront demain ou après-demain : c'est le cas du JET.

Là le colloque est relativement facile, enfin, on sait ce qu'on veut, plus ou moins ; il y a quand même le problème de vouloir des choses faisables et non seulement de savoir ce qu'on veut, mais je crois que là, dans une entreprise comme JET, ainsi que M. REBUT l'a dit, on a tâché d'être vraiment réaliste, en demandant à l'industrie presque avant de commencer ou tout au début.

Le second ordre de problème, c'est : où va-t-on ? C'est-à-dire, non seulement quelle est la machine qu'on veut construire demain, mais où mènent les développements qui peuvent certainement, et qui intéresseront de plus en plus l'industrie dans dix ans, par exemple.

Là c'est plus difficile, mais quand même c'est plus intéressant pour l'industrie parce qu'on va vers des objets, des développements qui vont s'éloigner de plus en plus de la physique académique pour aller vers les applications. Donc, il y a deux ordres de problèmes qui se mélangent évidemment, qui ont beaucoup de doubles emplois "d'overlappings", mais qui ont quand même un caractère différent. Or, il y a deux façons d'aborder l'un et l'autre, si vous voulez : l'un c'est, par exemple, d'établir des contacts permanents, très officiels, éventuellement en comité mixte industriels-physiciens qui se réuniraient périodiquement. L'autre c'est l'intérêt, et ceci devrait résulter de notre intérêt - qui est certain -, notre intérêt en cela, d'avoir des contacts avec l'industrie, d'avoir plus que des contacts, d'avoir des relations très suivies avec l'industrie, est absolument certain. Mais il faudrait aussi que l'industrie soit intéressée à l'affaire.

Moi, je peux citer un tout petit exemple, très modeste : dans le programme quinquennal qui s'achève maintenant, qui finira le 31 décembre, nous avons dit que des représentants de l'industrie dans les laboratoires auraient été les bienvenus. Et les laboratoires se sont obligés à accepter des représentants de l'industrie indépendamment de leur nationalité ; c'est-à-dire, par exemple, si un ingénieur français veut travailler à GARCHING ou à CULHAM en Allemagne ou en Angleterre, le laboratoire allemand ou anglais associé à EURATOM ne peut pas refuser de le recevoir. Sauf pour des raisons précises, mais en principe il ne peut pas.

Eh bien, j'ai fait de modestes, peut-être trop timides sondages auprès de certains experts et ils m'ont dit que difficilement l'industrie aurait payé le salaire à un ingénieur pour un an, pour deux ans, pour trois ans pour le détacher dans un laboratoire fusion juste pour acquérir un certain "know-how", un certain "feeling" sur la fusion. Or, je dois dire qu'aux Etats-Unis cela se fait ; disons, le plus grand laboratoire fusion des Etats-Unis a des ingénieurs mis à sa disposition par de très grandes industries qui travaillent régulièrement. Comme je l'ai dit brièvement à la fin de mon intervention, il y a, aux Etats-Unis, des laboratoires - au moins deux laboratoires fusion, assez grands - qui ont été créés par l'industrie, et maintenant au moins un des deux est presque totalement financé par le Gouvernement. Mais l'autre à ma connaissance ne l'est pas encore. Il est toujours financé par l'industrie. Donc disons, nous pouvons y mettre beaucoup de bonne volonté et nous avons l'intention de le faire fermement. Mais il faudrait aussi avoir une réaction favorable, une réaction positive.

Merci. Je m'excuse. Peut-être n'était-ce pas très clair, un peu confus, ce que j'ai dit, mais j'espère que vous avez compris.

ERTAUD

M. PALUMBO, je comprends très bien ce que vous venez de dire. Mais ce qui m'étonne, c'est que du côté de la fusion, puisque je représente le Groupement pour les Activités Atomiques Avancées, en France, une des sociétés d'engineering, nous étions tout prêts à envoyer des gens et nous avons fait ça pour la fission, très largement, j'ai envoyé des ingénieurs en Angleterre pour la haute température, que j'ai payés. J'en ai envoyé d'autres en Belgique, que j'ai aussi payés. J'ai des relations constantes avec tous les gens de la Communauté du côté de la fission, tout le monde sait ça, n'est-ce pas ? Je dois dire que du côté de la fusion nous n'avons pas été encouragés à envoyer des gens : on ne l'a même pas su. Il y a quelque chose qui ne va pas ; c'est qu'une société d'engineering général comme la nôtre qui peut apporter, sans doute, un concours assez précieux parce que, non pas que nous soyons des spécialistes de la fusion, mais nous avons beaucoup de physiciens, des spécialistes du neutron, des spécialistes des calculs de structure ou des vibrations ou des états de surface, eh bien, nous avons été tenus jusqu'à aujourd'hui, et je me réjouis de cette réunion, complètement à l'écart de tout ce qui s'est

passé du côté fusion, je dois dire aussi bien du côté européen que du côté du CEA.

PALUMBO

Je vous remercie pour vos informations. Je vous disais que j'étais peut-être trop timide. Mais j'ai fait deux ou trois sondages, et j'étais tellement découragé que je n'ai pas poursuivi. Nous disons : ça c'est un droit que la Commission a demandé à tous les laboratoires associés au financement desquels elle participe à raison d'environ 30 %, comme j'ai oublié de le dire tout à l'heure, c'est le droit que toute l'industrie européenne indépendamment de la nationalité, puisse envoyer des ingénieurs y travailler - pour des visites, ça on peut toujours s'organiser - mais pour y travailler systématiquement. Mais je regrette qu'il y ait eu un manque de communication et peut-être un manque de décision ou de persévérance de ma part.

Mais nous disons maintenant vous le savez tous, et moi je serais très content si des candidatures se posent.

APPLETON

I am very keen on research ; I have spent all my life in it ; but industry too has its problems. On the question of secondment, I myself was seconded to the CULHAM Laboratory about 14 years ago and there were many other engineers at CULHAM at that time also seconded from industry. And I think a lot of money was spent by industry in those early days. But of course industry has lost a great deal of money in the fission programme and I think that industry at the present time is having a difficult period. My opinion is that the fusion programme will find a great deal of help from industry and I have been very pleased to hear some of the practical suggestions that have been put forward by Dr. SCHUSTER in the way of working parties, and the passing of information. And I think this is absolutely essential to get industry properly moving. But I think that industry at this moment does not have money to fund fusion.

SCHUSTER

I am somewhat surprised that there have not been many questions on this very important field of fusion research. You heard Mr. PALUMBO's intro-

ductory speech on the fusion programme, essentially a speech on confinement. And what Mr. PREVOT told you really relates to the Tokamak line. Nothing has been said on laser fusion and no-one from your side has asked any questions on this subject. One could ask what the European Community intends to do in the field of laser fusion. Now, what are your ideas in this field? Can I assume that you are, at least, aware of the big United States fusion programme which is about 50 % confinement and 50 % laser fusion. To give you full information as regards the Communities, I would, at least, like to say that the Commission is being very careful in tackling or handling this part of the programme. The reason for this is that the laser fusion programme is still strictly linked with military secrets. This means that, if you are developing laser fusion, you must have the famous "hydrogen pellet" and adapt your laser beam to the target to produce implosion, as is done in the hydrogen bomb. This is so far a very tricky problem, and the Commission is now watching this scene very carefully, and is not trying to develop intensive programmes in this field. However, there are two programmes under way in the European Community. The first, which is French, is in Limeil; it is linked to the country's defence programme. The other is being carried out by the British Science Research Council together with the U.K. Energy Authority to study programmes at Harwell on high density power lasers. Following a period of negotiation and a period of discussion, it was seen that there were not sufficient funds to carry out the project and thus the U.K. Authority came to us. This is my information today. This explains why the Science Research Council can now fund a high power laser which is to be built at Harwell. Thus you have the scene as regards laser fusion in Europe.

It is just the opposite in the United States, where tremendous efforts are being made in the field of laser fusion and I can tell you that I am very well aware of the position there. Please understand why the Commission and the Community are very careful in taking any major steps, but are however watching developments and are prepared to discuss further ideas on this subject. This is one point which I would like to emphasize. Another point is that there now is some discussion or dialogue within the Community and, as usual, there is strong support for and strong opposition to laser fusion technology, in the sense of whether or not big programmes for developing special knowledge concerning large power stations should now be started. Perhaps Mr. PALUMBO could, if you are interested, tell us more about this sector. I must add that our present attitude in this

field is to start slowly, to be careful and prudent, and not to make big strides because we have to face the present economic crisis and we cannot keep on asking for more and more funds. This explains the Commission's cautious approach.

I wish to introduce Mr. CESONI, President of our European Scientific and Technical Research Committee.

CESONI

Io sono grato al dottor SCHUSTER per avere completato il quadro della fusione menzionando l'importante settore della fusione a mezzo laser. Il dottor SCHUSTER ha anche sottolineato i motivi per i quali questo settore non ha formato oggetto di una precisa e approfondita discussione oggi.

Ma se mi è consentite a titolo personale di fare una breve osservazione, vorrei dire quanto segue : oggi siamo qui tutti come industriali, ed io stesso rappresento un gruppo industriale : la FIAT, e abbiamo constatato che il programma della fusione, come è portato avanti dalla Commissione è un programma senz'altro importante che ha la caratteristica di essere squisitamente comunitario perchè probabilmente uno solo dei paesi della Comunità non avrebbe l'incentivo a portare avanti un programma così ambizioso, così difficile, così costoso, ma d'altra parte non vorrei che i singoli rappresentanti dell'industrie rientrando alle loro case ripor-

*) CESONI

I am very grateful to Dr. SCHUSTER for completing the fusion picture by his description of the very important laser fusion sector. Dr. SCHUSTER has stressed the reasons for which this sector has not been a subject for precise and full discussion today.

I would now like to make some purely personal remarks. We are all here today as industrialists, and I myself represent the large industrial Group, FIAT. We have seen that the fusion programme, as it is being conducted by the Commission, is a really vast programme with a real Community character. It is obvious that one single community country could not possibly carry out such an ambitious, difficult and expensive programme. However, I would not like the individual representative of each industry just to return to his country with the following impression : "Well, after

tassero queste impressioni : "Bene, tutto sommato è un programma interessante, ma che si dimostrerà forse interessante dal punto di vista della commesse industriali fra un certo numero di anni, abbastanza lungo".

Penso che probabilmente questo è quello che tutti potranno riportare ai loro superiori all'interno della loro industria. Se questo è vero, ed è certamente vero, vorrei sottolineare d'altra parte, sempre a titolo personale, l'impressione che sarebbe importante, e non vorrei in questo momento sovrappormi agli amici rappresentanti della Commissione, qui presenti, in particolare al dottor SCHUSTER, sarebbe particolarmente importante, forse, che il rappresentante industriale qui presente riportasse anche quanto segue : "Il programma della fusione comunitario ed in particolare il JET meritano tutto il supporto". E dicesse questo in modo tale che se interpellato da qualche funzionario del suo governo questo suoni un appoggio dell'industria, un pieno appoggio dell'industria al programma comunitario della fusione.

Termino, sottolineando ancora, "repetita iuvant", il mio parere personale. Tutti abbiamo l'impressione che le commesse importanti verranno, ma verranno tra un certo numero di anni però, spero, che tutti abbiamo anche l'impressione che è importante persuadere i nostri singoli governi a dare tutto il loro pieno appoggio al programma comunitario e in particolare al JET proprio perché l'Europa ha bisogno di aprire questa strada.

←
*) all, it is a very good programme which may, over a fairly long period, be interesting from the viewpoint of industrial orders". I think that this will most likely be the report made by everyone to his superiors in his industry. If this is true, and I think it certainly is, I would like to stress personally that it would also be important for the industrial representatives present today - and here I do not wish my words to be a mere duplication of what has been said by my friends of the Commission, in particular Dr. SCHUSTER, - to include in their reports : "the Community fusion programme, especially JET, deserves our complete support". And if they are questioned by Government Officials concerning the matter, they will answer that full support should be given to the Community fusion programme.

I shall close, emphasizing once more "repetita iuvant", my personal opinion. Everybody has the impression that large orders will be placed, but over a certain number of years, and I hope that everyone will leave with the impression that it is important to persuade our individual Governments

Tutti loro sono al corrente degli argomenti della controversia nucleare contro alcuni aspetti del reattore a fissione e quindi tutti loro si renderanno conto che una strada che ecologicamente non è inquinante come è quella della fusione, merita tutto l'appoggio dell'industria e dei governi. *)

Grazie.

SCHUSTER

Are there any further comments or further questions ? If not, Gentlemen, I would like to say that we shall go into the details of the JET project tomorrow morning, when we shall discuss the questions of technicalities and engineering.

Thank you - today's meeting is now closed.

*) to give their full support to the Community programme and, in particular, to JET, because Europe needs to open up this new way.

Everyone is aware of the arguments in the nuclear controversy concerning certain aspects of the fission reactor and everyone will realize that the ecological and non-polluting method of fusion deserves full support from all industries and Governments.

(Translated by our co-ordinator)

Information Day
FUSION & INDUSTRY

2nd Day

Mr. PALUMBO was in the chair on the second day of the Fusion & Industry meeting.

PALUMBO

Dr. REBUT will speak first on the "JET Project" followed by Dr. ECKHARTT, on the "Vacuum Chamber Problems", Dr. HUGUET on the "JET Magnet", Dr. SMART, on the "JET Poloidal System" and finally Dr. BERTOLINI on the "JET Main Power Supplies".

A general discussion will then follow.

2.1 P.H. REBUT - Chef de Projet - JET Design Team
 Culham Laboratory
 LE PROJET JET

La présentation que je vais faire sera essentiellement basée sur le rapport R-7 que vous avez, en principe, en face de vous./1/
 Plusieurs des figures et tableaux qui seront présentés seront dans ce rapport et j'indiquerai la page correspondante du rapport.
 La session de ce matin est principalement ou presque uniquement consacrée au JET, le Joint European Torus. JET sont les initiales de ces mots.
 Je veux vous présenter plusieurs aspects du projet, essentiellement un aspect général et les présentations qui suivront vous décriront les parties ou des éléments plus techniques de l'appareil.
 Pour commencer, je vais rapidement revenir sur les buts de l'appareil.

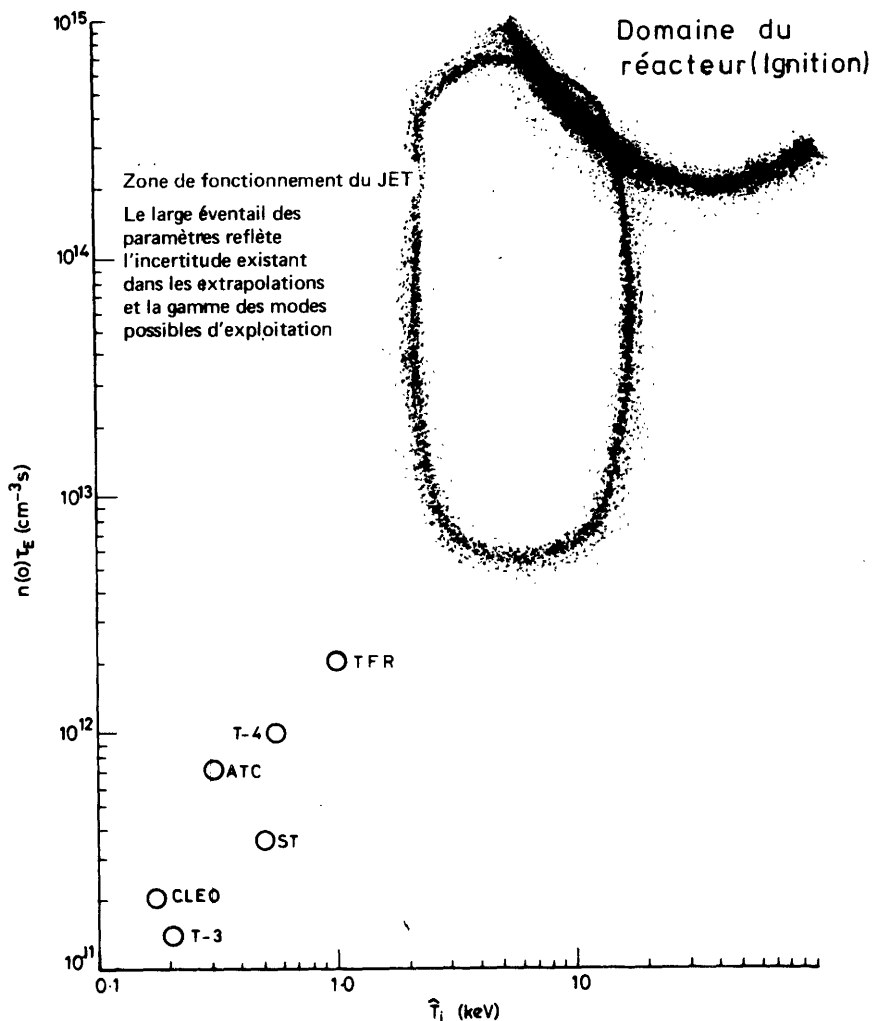


Fig.1 Données des performances possibles pour le JET

Les buts de l'appareil, tout d'abord, sont schématisés sur la Fig. 1. Sur cette figure vous voyez un domaine en haut, qui est le "domaine du réacteur." Comme on l'a expliqué hier, ce domaine correspond à des températures ioniques supérieures à 10 KeV, pour le plasma, c'est-à-dire supérieures à 100 millions de degrés et à un produit $n\tau_E$ supérieur à 10^{14} , τ_E étant le temps de confinement de l'énergie, c'est-à-dire le temps (directement relié aux pertes du plasma) que met l'énergie thermique contenue dans le plasma pour fuir et atteindre la paroi, n est la densité par cm^3 d'ions dans le plasma. Pour atteindre le régime du réacteur il faut donc que ce temps de confinement (on se référera au produit $n\tau_E$, maintenant) soit

$$n\tau_E > 10^{14} \text{ cm}^3 \cdot \text{s} \quad (\text{Critère de Lawson}) \quad (1)$$

et en principe si l'on veut avoir l'ignition c'est-à-dire un système dans lequel les réactions de fusion chauffent le plasma, ou entretiennent la température du plasma, il faut plutôt une valeur supérieure à 3 ou 5 x 10^{14} , ce qui est indiqué si vous voulez, par la courbe limitant le domaine du réacteur. Les expériences actuelles ont atteint une température, ou plutôt ont dépassé une température de 1 KeV pour les ions, principalement avec TFR et de 2 x 10^{12} comme produit $n\tau_E$. Les expériences qui vont démarrer maintenant ou l'année prochaine aux Etats-Unis, à Frascati et en URSS doivent se situer dans la zone intermédiaire, c'est-à-dire atteindre des valeurs du produit $n\tau_E$ entre 10^{12} et 10^{13} et des températures ioniques de l'ordre de 2 ou 3 KeV.

Le JET représente sans doute le dernier pas avant ce qu'on appelle dans notre jargon un "D-T burner", c'est-à-dire avant un appareil qui marche dans le régime "reactor domain" dans lequel on obtiendrait l'ignition. (L'ignition étant définie comme le maintien de la température du plasma par les réactions de fusion elles-mêmes). Vous voyez que le domaine dans lequel peut fonctionner le JET est relativement très large. Et ceci est principalement lié à l'incertitude qui existe sur les "lois d'échelle" à l'heure actuelle. Il s'agit d'une extrapolation, comme vous voyez, un ordre de grandeur sur les températures approximativement, et disons un ordre de grandeur et demi sur les temps de confinement.

Cette extrapolation est difficile pour deux raisons : d'abord c'est un pas relativement grand, deuxièmement la théorie prédit que l'on doit rentrer dans un nouveau domaine et il n'est pas sûr que les lois d'extrapolation actuelles soient valables pour ce nouveau domaine. Je dirais, il est même

sûr qu'elles ne seront pas valables. Donc, ces deux phénomènes conjugués vous donnent une relativement grande plage d'incertitude sur le domaine de fonctionnement du JET.

Malgré tout le but essentiel de cet appareil est justement d'établir quelles sont ces lois d'échelle de façon à pouvoir, dans la phase suivante, définir la taille d'un réacteur de fusion.

Quelques chiffres : un des points essentiels qui définit la taille d'un Tokamak est le courant I_p qui circule dans le plasma et ce courant en fait

$$n \tau_E \propto I_p^2 \quad (2)$$

est directement relié au confinement (2), le produit $n \tau_E$ est en pratique proportionnel au carré du courant qui circule dans le plasma ; ce sont les lois que nous espérons et ceci est simplement lié au fait que l'énergie est produite dans le volume du plasma et les pertes ont lieu, essentiellement lorsqu'il ne s'agit pas d'impuretés par la surface du plasma. Donc, si on a un processus de diffusion, le produit $n \tau_E$ doit être à peu près proportionnel au carré des dimensions. A condition, toutefois, qu'il n'y ait pas de nouvelles lois, de nouveaux phénomènes qui interviennent dans ce système. Le courant qui circule dans le plasma peut donc être considéré en première approximation comme un paramètre définissant la taille d'un tokamak.

Premièrement cela signifie pour ces genres d'appareils fermés, que lorsqu'on augmente la taille on est toujours en droit d'espérer une augmentation du confinement et deuxièmement lorsqu'on fait le bilan entre ces pertes et l'énergie produite à l'intérieur on aboutit à une sorte de taille critique de l'appareil en dessous de laquelle il n'est pas possible de faire un réacteur. Cette taille critique peut à l'heure actuelle, en termes de courant dans le plasma, se situer entre 8 et 20 méga-ampères, suivant les hypothèses plus ou moins pessimistes que l'on prend comme lois d'extrapolation. 8 à 20 méga-ampères, je dirais, lorsqu'on sait que la taille linéaire de l'appareil est proportionnelle au courant, ça fait sur le volume de l'appareil et sur la puissance un assez gros facteur. Ça fait le cube, disons, de ce rapport-là (il y a plus d'un rapport 2). Vous voyez qu'à l'heure actuelle il y a plus d'un ordre de grandeur pour ne pas dire 2 ordres de grandeur, sur la taille minimum d'un appareil ou sur sa puissance minimale plus exactement.

Cela signifie qu'un appareil de la classe tokamak ou de toute autre machine fermée d'ailleurs, ne peut fournir une énergie électrique inférieure à

quelques gigawatts électriques. La conséquence immédiate de cela c'est que mener de telles études (nécessitant des prototypes qui du point de vue industriel seront des échecs, tout au moins en tant qu'appareils) est extrêmement coûteux et excessivement long. Le résultat le plus immédiat de tout cela est qu'il n'est pas question de se lancer dans la fusion à l'échelle nationale - c'est pourquoi ce projet est commun aux pays membres de l'EURATOM - et peut-être dans l'avenir faudra-t-il adopter une certaine coopération à l'échelle mondiale. Je dois dire que cette coopération existe en partie déjà ne serait-ce que par le fait que le projet russe T-20 qui est le plus gros appareil en étude à l'heure actuelle est prévu comme un "D-T burner", c'est-à-dire comme l'étape d'après JET mais ce projet ne viendrait que 4 ou 5 ans après l'expérience JET ou l'expérience similaire américaine. Donc déjà à l'échelle mondiale, il y a une certaine répartition des tâches. J'en viens maintenant très rapidement aux buts annexes, aux buts plus physiques si vous voulez, de cet appareil. Ce but très général de définir quelle est la taille d'un réacteur et quels sont les problèmes posés par le réacteur peuvent se décomposer en sous-objectifs, et si le premier problème à résoudre est le problème des lois d'échelle, le deuxième est le problème des impuretés qui engendrent des pertes qui ne sont plus des pertes de confinement mais de volume. Les impuretés contaminent le plasma : elles viennent de la première paroi qui voit le plasma ; cette paroi reçoit des afflux de chaleur, de rayonnement, de neutrons. Elle se détériore et une partie des éléments de la paroi tend à diffuser vers le plasma. J'ai dit que le problème des impuretés était un effet de volume (le rayonnement est émis par le volume de plasma) mais dans le taux d'impuretés on revient malgré tout à un certain effet de surface dans la mesure où ces impuretés viennent de la surface du plasma. Tous les problèmes qui vont être liés à la définition du premier mur ou de la première surface matérielle qui regarde le plasma sont cruciaux. Ils sont difficiles à deux points de vue : du point de vue plasma par ce que je viens d'indiquer, du point de vue matériau proprement dit parce qu'il faut que cette paroi tienne des hautes températures, des vides ultra-poussés, soient capables de résister à un bombardement de neutrons d'énergie de 14 MeV, à des bombardements d'électrons, d'ions divers sans se dégrader trop rapidement, sans perdre leurs caractéristiques mécaniques ou leurs caractéristiques de vide. Ce problème de la première paroi, je crois, sera réellement un des problèmes les plus difficiles à résoudre sur le réacteur. En fait les premiers calculs, les premières estimations, indiquent qu'il faudra, sans doute assez fréquemment changer cette première paroi dans un réacteur de fusion.

Changer une première paroi, activée par des neutrons énergétiques de 14 MeV, et située à l'intérieur d'une enceinte à vide dans un système torique représente une opération très complexe. Ceux qui n'ont jamais travaillé dans les tores ne peuvent se rendre compte des réelles difficultés d'un tore mais je crois qu'honnêtement on peut dire qu'un système torique est à peu près un ordre de grandeur plus difficile que le même système développé linéairement.

Avant de vous donner la liste des paramètres du JET je voudrais faire quelques remarques à partir des choix qui ont présidé à la définition des diverses parties de l'appareil. La formule (3) relie les ampères-tours

$$I_c = q \left(\frac{R_0}{a} \right)^2 I_p \quad (3)$$

totaux I_c qui circulent dans le bobinage toroïdal (I_c est le courant dans les "coils" si on prend le terme anglais) à q , le facteur de sécurité qui est un élément de stabilité (il est difficile que q soit inférieur à 3). R/a est le "rapport d'aspect" de l'appareil, R le grand rayon du tore, a le petit rayon du tore (si vous voulez a le petit rayon du plasma et R le

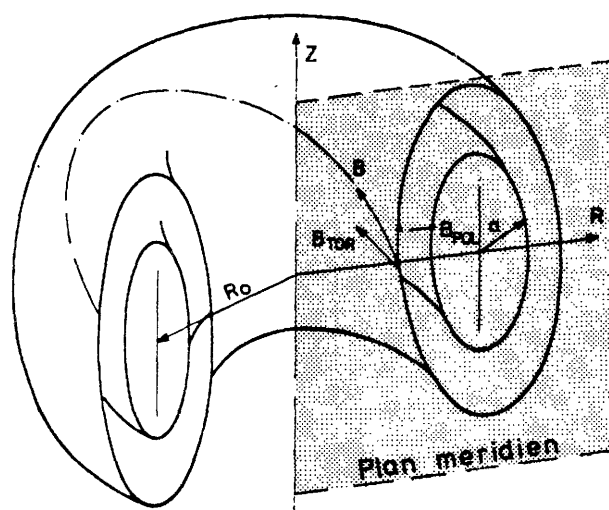


Fig.2 Géométrie d'une configuration axisymétrique

grand rayon du plasma) et I_p le courant qui circule dans le plasma. Or on a déjà vu que I_p est une "figure de mérite" de l'appareil en terme fusion. Il est certain que le coût de l'appareil est relié au courant total, I_c (aux ampères-tours totaux) qui circule dans le bobinage toroïdal (ça vous donne la masse de cuivre, ça vous donne la section du cuivre, la puissance

températures de l'ordre de 5 keV
que le domaine du réacteur commence à 10 keV. Si on met un mélange deutérium-tritium dans un tel appareil, déjà à ces températures on commence à brûler thermonucléairement une partie non négligeable du combustible que l'on a mis dans l'appareil. Sur cet appareil devraient donc déjà commencer les études liées à la production des neutrons et des "particules α " lors des réactions de fusion. On voudrait tester sur cet appareil le problème du confinement de ces particules de haute énergie et la façon dont elles transmettent leur énergie au plasma pour maintenir sa température.

Ces études font partie du programme JET, mais signifient que déjà sur le JET on aura, assez rapidement, des problèmes d'activation importants.

Pour vous donner tout de suite une idée, les puissances libérées par les réactions de fusion sur le JET devraient se situer entre 10 et 100 mégawatts suivant qu'on est pessimiste ou optimiste. Et ceci pendant plusieurs secondes à chaque décharge. N'oubliez pas que ces 10 à 100 mégawatts sont essentiellement produits par des neutrons de 14 MeV, c'est-à-dire qui peuvent créer pas mal d'activations dans les matériaux de structure qui se trouvent autour et dans l'appareil, dans les isolements des bobines etc...

En fait, l'appareil ne sera pas construit pour fonctionner toute sa vie dans ces conditions, mais simplement construit pour, en fin de période expérimentale, pouvoir étudier pendant un certain nombre de décharges des problèmes de physique, c'est-à-dire confinement de particules α , et chauffage du plasma par les particules α .

J'ai oublié de dire que pour arriver déjà à une température de 5 keV le chauffage ohmique sera insuffisant et il est nécessaire de prévoir sur cet appareil un chauffage auxiliaire. Ce chauffage auxiliaire sera fait dans une première phase par un système d'injection de neutres ou ultérieurement des méthodes HF (Haute Fréquence).

Rapidement je vais maintenant rentrer un peu plus dans les problèmes techniques du JET lui-même et vous dire quelle a été la philosophie générale qui a présidé au choix de telles solutions techniques plutôt que telles autres. L'appareil lui-même est déjà une expérience complexe et compliquée et nous avons cherché dès le début à faire en sorte que chacun des éléments soit aussi simple et aussi conventionnel que possible. Ensuite étant donné les incertitudes grandes d'un point de vue physique, dues à la non-connaissance des lois d'extrapolation, nous avons cherché à donner une grande souplesse à l'appareil dans son emploi et si possible dans ses modifications (c'est-à-dire facilité de montage, facilité de démontage). Il faut ajouter à cela des contraintes supplémentaires qui viennent du fait que l'appareil doit travailler en condition active au moins à la fin de sa carrière et que l'on doit envisager un certain nombre de réparations télécommandées dans ces conditions. On voit que la simplicité du montage et du démontage des éléments est une des conditions essentielles à respecter. D'une manière générale une grande "fiabilité" des éléments, de chacun des éléments, est aussi un des points tout à fait importants. Tout cela conduit donc à n'utiliser dans la mesure du possible que des techniques "bien connues" c'est-à-dire déjà éprouvées pour la conception et la fabrication de chacun des éléments. Nous avons en outre essayé de faire en sorte que l'on puisse faire des petites séries autant que possible pour

la plupart des éléments : plutôt que d'avoir une grosse pièce unique pour un élément de l'appareil, chacun des éléments sera constitué, même si ça semble une grosse pièce à la fin, de segments identiques qui peuvent être fabriqués en série de façon à pouvoir faire un prototype et tester dans la mesure du possible ce prototype (je dis bien dans la mesure du possible parce que la plupart du temps il est à peu près impossible de simuler les efforts et la fatigue auxquels seront soumis ces prototypes).

TABLEAU I

Principaux paramètres du JET

Petit rayon du plasma (horizontal)	a	1,25 m	
Petit rayon du plasma (vertical)	b	2,10 m	
Grand rayon du plasma	R_o	2,96 m	
Rapport d'aspect du plasma	R_o/a	2,37	
Elongation du plasma	b/a	1,68	
Durée du plateau de courant		20 s	
Poids de l'enceinte à vide		80 t	
Poids de l'ensemble des enroulements du champ toroïdal		380 t	
Poids du noyau de fer		1.500 t	
		Exploitation en régime de base	Exploitation en régime élargi*
Puissance du bobinage du champ toroidal (pic pour une montée de 13 s)		245 MW	380 MW
Champ magnétique total au centre du plasma		27,7 kG	34,5 kG
Courant du plasma:			
– plasma circulaire		2,6 MA	3,1 MA
– plasma en forme de D		3,9 MA	4,8 MA
Volts-secondes disponibles pour maintenir le courant du plasma		25 Vs	34 Vs
Puissance de chauffage additionnel		4–10 MW	~25 MW

*Des fonds supplémentaires seront nécessaires pour les performances élargies. Le schéma relatif à cette extension est discuté à la section 13 du rapport R/7.

Je vais maintenant vous donner les principaux paramètres de l'appareil qui se trouvent sur le TABLEAU I. Sur les principaux paramètres du JET, que peut-on citer ? On peut citer le grand rayon du tore qui est environ 3 mètres et le fait que la section du plasma est elliptique ce qui permet

d'un point de vue physique des plasmas un certain nombre de gains sur les performances de l'appareil ; c'est pour ça que vous avez les deux premières dimensions qui se rapportent aux demi-axes de l'ellipse grosso modo a et b qui sont respectivement 1,25 m et 2,10 m. Vous avez les poids des différentes parties de l'appareil qui sont grossièrement indiqués sur ce tableau. La puissance nécessaire pour alimenter le bobinage toroïdal dans le cas des performances maximales de l'appareil atteint 380 mégawatts (pour vous donner tout de suite un ordre d'idées des puissances qui vont être demandées ou

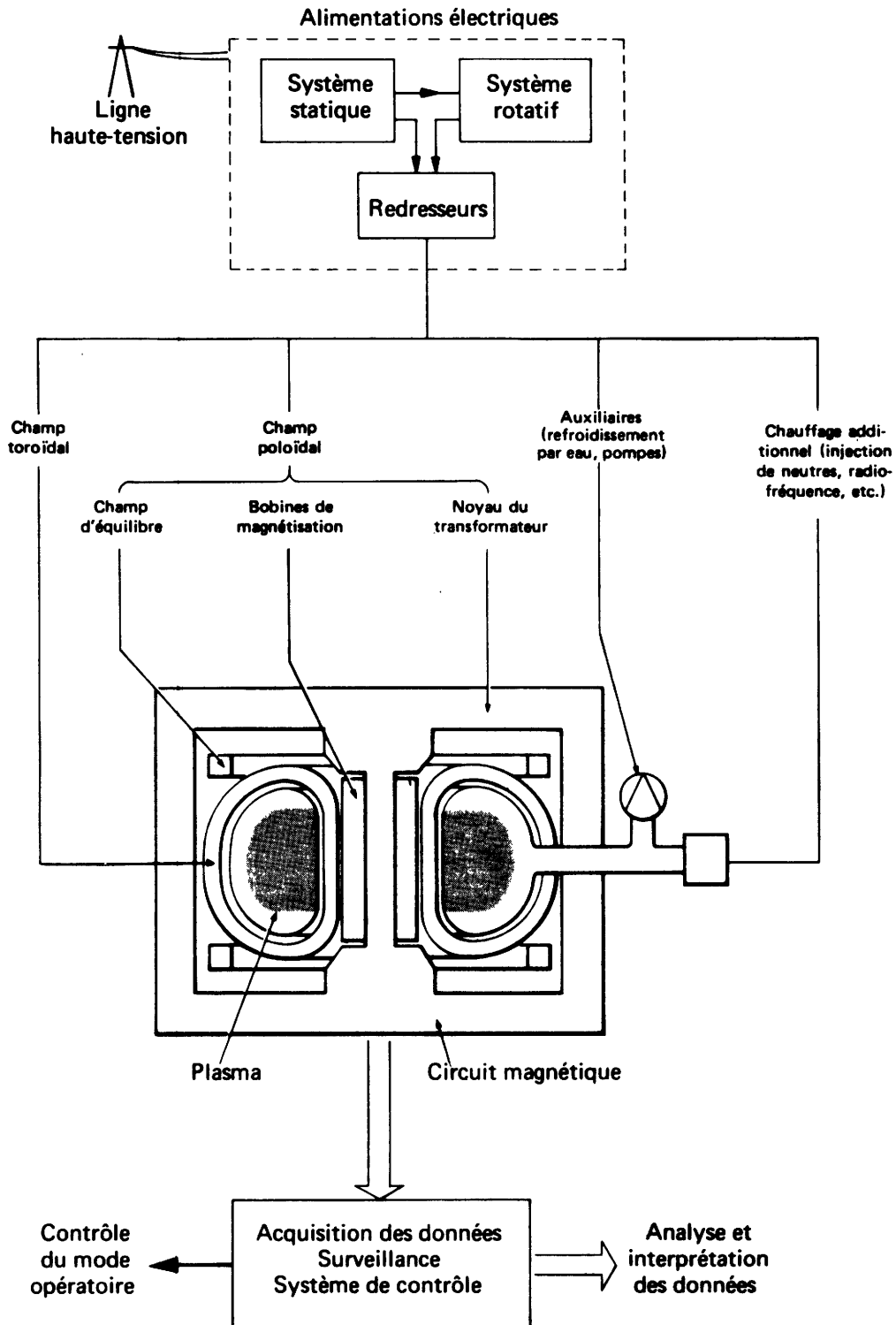


Fig 3.

Un système Tokamak typique

mises en oeuvre dans cet appareil). La prochaine figure vous décrit (Fig.3) grosso modo l'ensemble des accessoires ou parties annexes qui sont autour de l'appareil. En haut il y a les diverses sources d'énergie : les sources d'énergie pour alimenter les bobines toroïdales qui sont les bobines en forme de D que vous voyez schématiquement sur l'appareil et qui correspondent à cette puissance maximum de 380 mégawatts. Vous avez les sources d'énergie du champ poloïdal (le champ poloïdal c'est tout le système de bobines qui a le même axe que le tore et qui sert à induire le courant dans le plasma et à créer les champs dits "verticaux" ou les champs qui définissent d'une manière plus précise la forme et la position du plasma). C'est par l'intermédiaire du champ poloïdal que l'on contrôle la position et la forme du plasma ainsi que le courant qui circule dans le plasma. Ce système d'alimentation et tout le contrôle du plasma se feront par des systèmes à la fois "hublots de détection" et de "boucles de feed-back" qui permettront de contrôler le plasma. Inutile de dire qu'étant donné que c'est ce système qui permet de manoeuvrer le plasma en quelque sorte il est excessivement complexe et vous en aurez tout à l'heure un bref aperçu (c'est-à-dire on doit pouvoir faire un tas de choses qui sont relativement contradictoires : inverser des polarités rapidement, avec des puissances de cette valeur-là, à certains moments avoir des puissances instantanées qui dépassent plusieurs gigawatts pendant une à deux secondes, revenir à des puissances d'une centaine de mégawatts par la suite... vous verrez tout à l'heure un schéma de cette partie).

Parmi les autres auxiliaires, il est indiqué rapidement sur ce diagramme tous les systèmes de puissance nécessaires pour le chauffage auxiliaire du plasma. J'en dirai un mot un peu plus complet tout à l'heure. Ce chauffage auxiliaire est fait soit par des systèmes d'injection de neutres énergétiques dans le plasma, soit par des systèmes de chauffage haute fréquence. Le rendement de ce genre de systèmes est assez faible, les puissances varient entre 3 mégawatts et 30 mégawatts à mettre dans le plasma pour le chauffer avec des rendements que l'on peut estimer de 25 à 30 %. Ces puissances sont fournies soit à partir du réseau, soit à partir de machines tournantes utilisant une énergie stockée dans des volants. Les demandes pour les chauffages additionnels seront encore de l'ordre d'une centaine de mégawatts. Je n'ai pas parlé de tous les auxiliaires que l'on dénomme classiques, qui sont liés au refroidissement des bobines et au pompage de l'enceinte à vide et tous genres de systèmes que l'on peut imaginer autour d'un tel appareil. D'un autre côté de l'appareil vous avez les diagnostics et l'ensemble d'acquisition de données et d'ordinateurs pour traiter ces données et pour alimenter aussi les boucles du type feed-

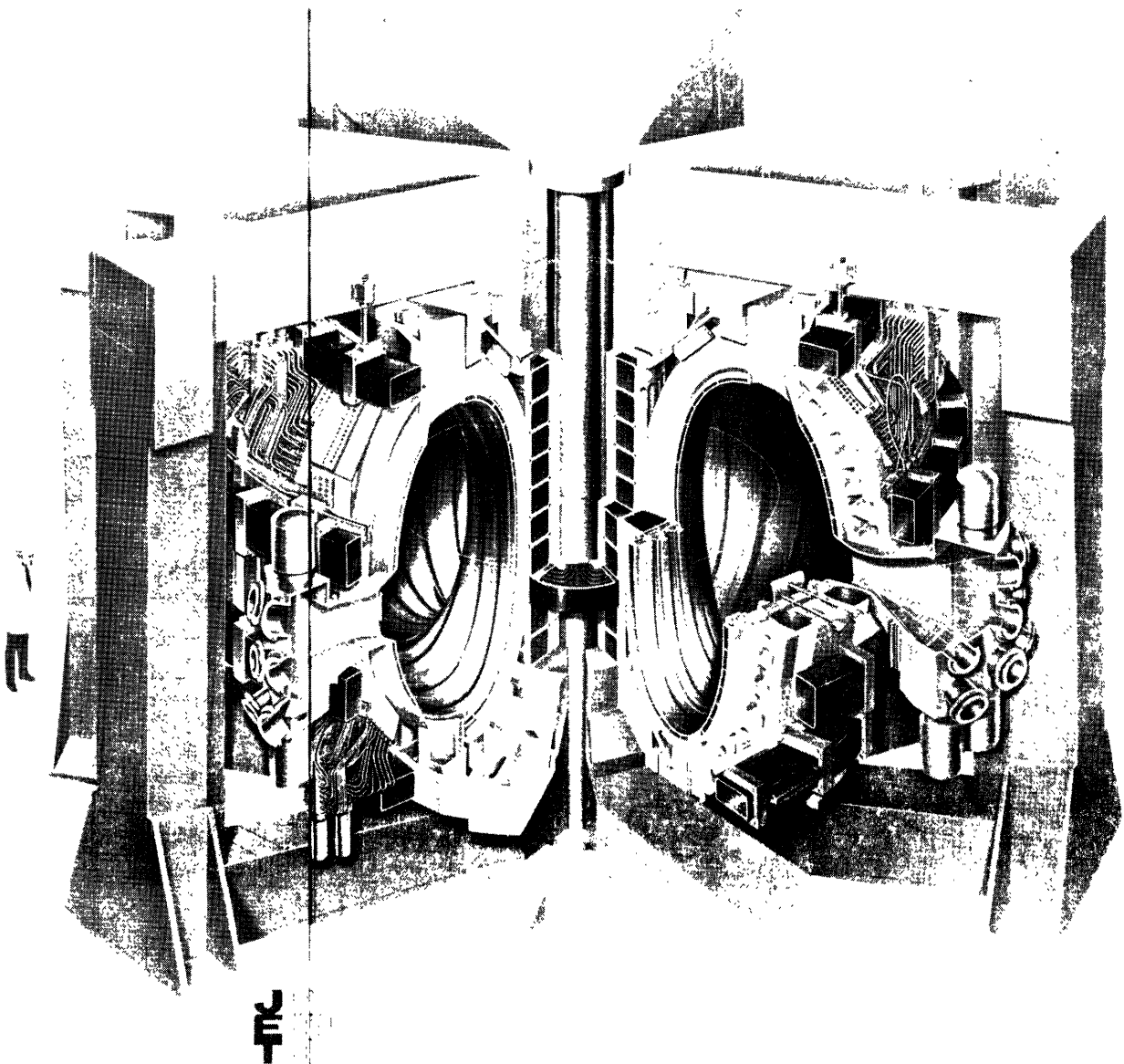


Fig 4.

Vue générale du JET

back qui contrôlent position et forme du plasma. J'espère ultérieurement qu'on aboutira à un contrôle plus poussé du plasma en particulier contrôle des profils de courant et de densités qui ont en fait un effet dominant sur les pertes du plasma.

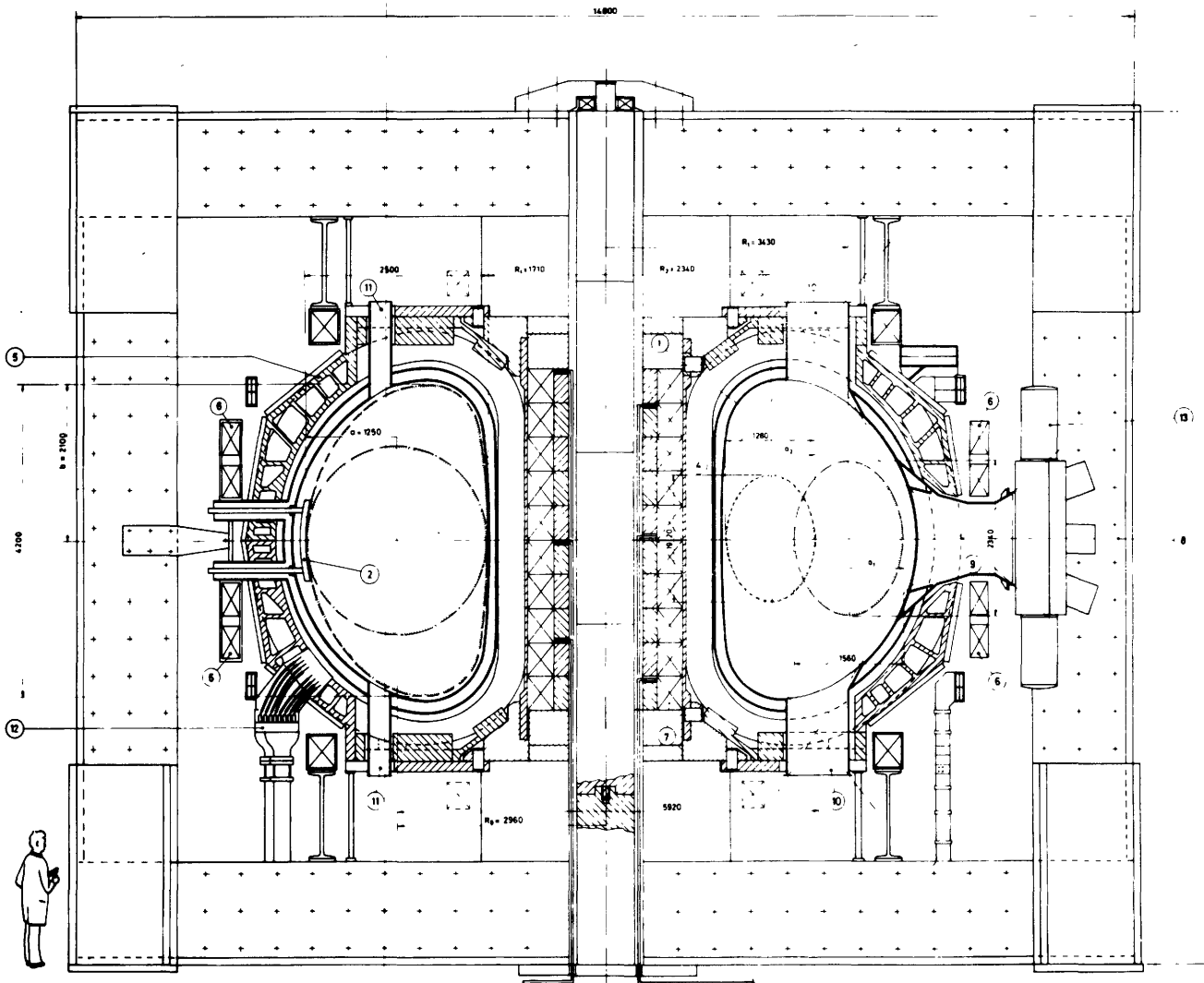
Vous avez maintenant une vue générale de l'appareil, tel qu'il est à l'heure actuelle et tel qu'il figure sur la couverture de R-7. Je vais essayer très rapidement sur cette vue, faite à partir de dessins et des divers plans de l'appareil, de vous montrer les principaux éléments de l'appareil. Vous avez tout d'abord, vu de l'extérieur, le circuit magnétique : il favorise le couplage entre le primaire et le plasma se trouvant dans la zone centrale, qui joue le rôle du secondaire. Les bobines primaires sont essentiellement cette série de bobines que l'on voit. En changeant la distribution des courants dans ce système de bobines extérieures et intérieures, en changeant la répartition de ce système, on peut modifier la position radiale du plasma, et sa forme.

L'utilisation d'un circuit magnétique en acier permet un certain gain sur la puissance - gain non négligeable - et sur la taille des bobines en utilisant un μ relativement faible (1,2) de l'acier à ces valeurs-là (on atteint des champs magnétiques de 6 à 7 tesla à l'intérieur du système). Mais malgré tout si on regarde en termes de puissance ohmique dissipée, comme cela dépend du carré, ça fait un facteur 1,4 qui est tout à fait loin d'être négligeable.

Vous avez ici le système des bobines toroïdales qui est peut-être difficilement visible. Ce système crée le champ toroïdal qui consomme 380 mégawatts ; il fournit un champ magnétique sur l'axe de l'ordre de 3 tesla : on a au voisinage du cuivre un champ de l'ordre de 7 tesla. Ces bobines sont en cuivre et refroidies par l'eau, tout le bobinage de cet appareil est d'ailleurs en cuivre et refroidi par l'eau de façon à utiliser une technique aussi simple que possible. Je vous ai donné, à peu près, les efforts qui agissaient dans ces conducteurs. Vous avez, ensuite, si on va vers l'intérieur, la chambre à vide, qui est une chambre métallique, complètement soudée. Comme on veut pouvoir réaliser un vide de base inférieur à 10^{-9} torr dans le système, il est nécessaire de concevoir un étuvage à haute température de la chambre à vide "in situ". La température maximum qui est choisie est de l'ordre de 500° C. En plus cette chambre à vide ne doit pas court-circuiter le bobinage primaire d'où les problèmes électriques, mais elle ne doit pas non plus court-circuiter les champs verticaux, etc.

Lorsqu'on met tous ces problèmes ensemble vous voyez que le problème de la chambre à vide n'est pas facile.

Vous voyez ici les sections d'accès au plasma ou d'observation et les trous sur lesquels seront branchés les injecteurs de neutres rapides. Les faisceaux de neutres rapides sont obtenus à partir de faisceaux d'ions rapides neutralisés sur un gaz ; ces neutres rapides franchiront les champs magnétiques qui sont ici et ensuite se feront ioniser à l'intérieur du plasma - et c'est ainsi que l'énergie par faisceaux de neutres rapides sera transmise au plasma. Mais cela nécessite des accès assez nombreux et assez grands autour de l'appareil. (Fig. 5).

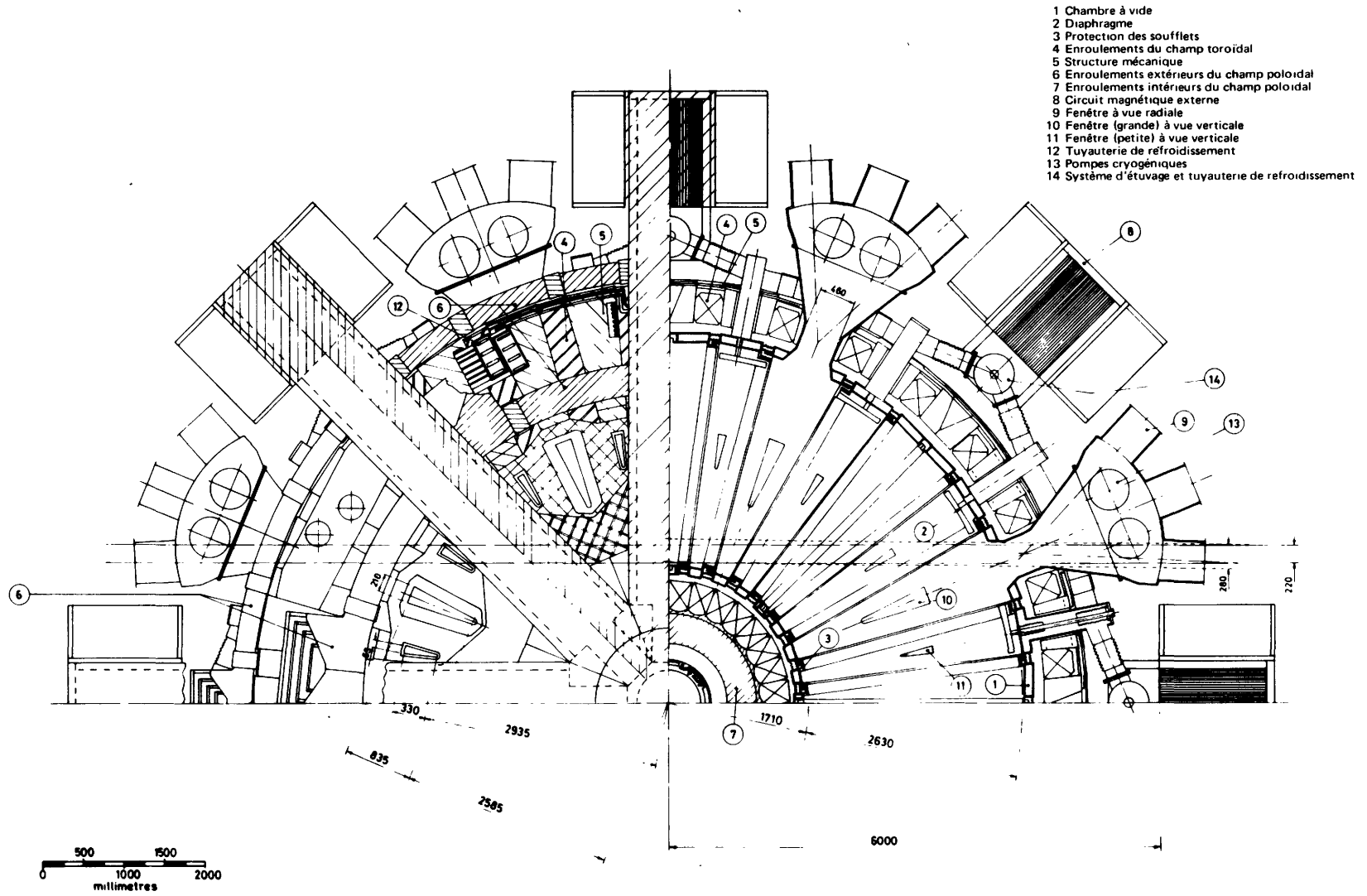


- 1 Chambre à vide
- 2 Diaphragme
- 3 Protection des soufflets
- 4 Enroulements du champ toroidal
- 5 Structure mécanique
- 6 Enroulements extérieurs du champ poloidal
- 7 Enroulements intérieurs du champ poloidal
- 8 Circuit magnétique externe
- 9 Fenêtre à vue radiale
- 10 Fenêtre (grande) à vue verticale
- 11 Fenêtre (petite) à vue verticale
- 12 Tuyauterie de refroidissement
- 13 Pompes cryogéniques

Fig 5.

a) Le JET : Vue en élévation

b) Le JET : Plan et section équatoriale



Il y a encore un dernier point que j'ai oublié de mentionner, c'est la structure mécanique du système qui constitue aussi un des problèmes les plus importants de la machine. Non seulement il y a les forces radiales qui sont données par ce système de bobinages mais vous avez les efforts croisés qui proviennent de l'interaction du courant qui circule dans les bobines toroïdales et du champ magnétique poloïdal de fuite. Tout ça vous sera décrit, et les chiffres vous seront donnés plus en détail tout à l'heure. Simplement cette description, pour vous donner une idée

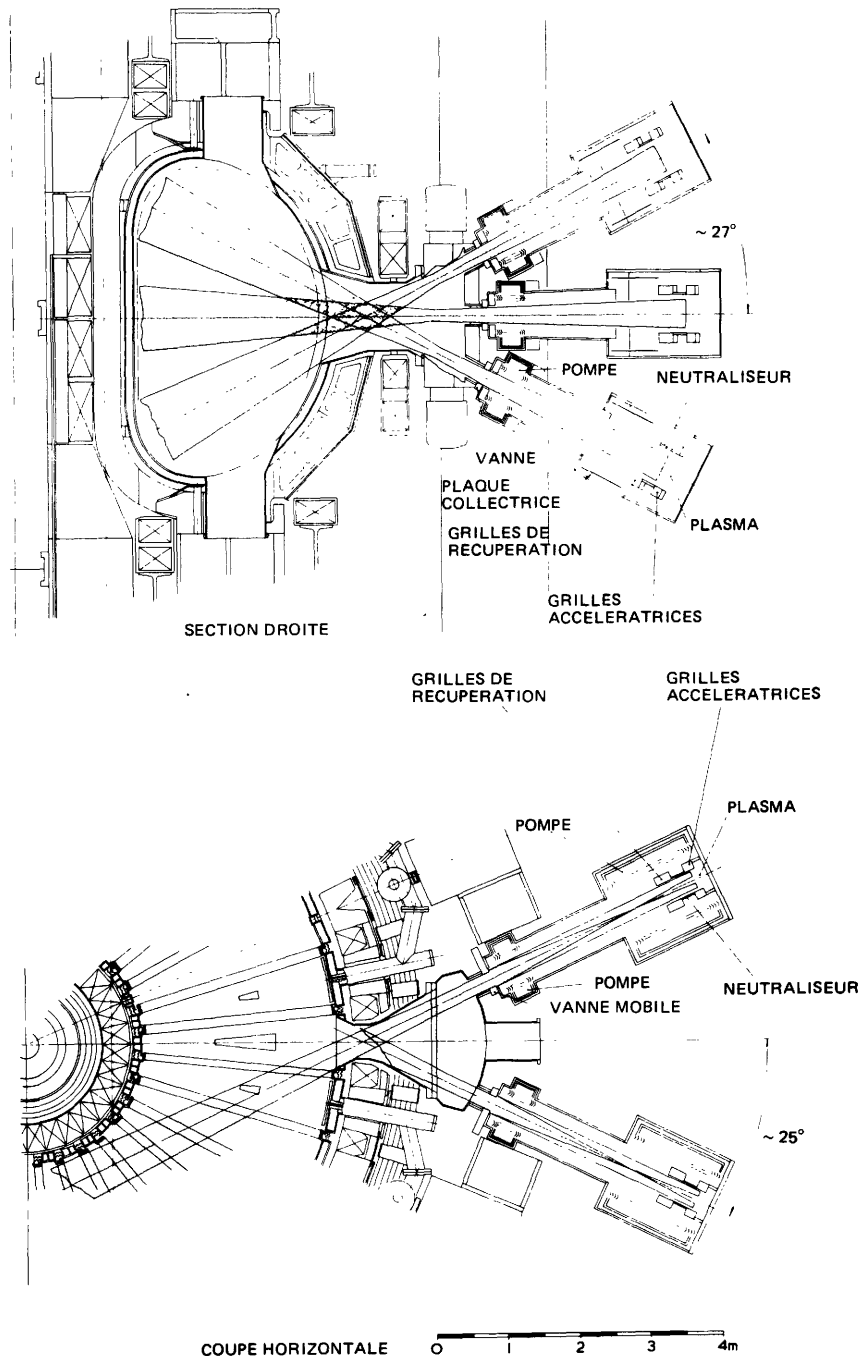


Fig. 6

Installation des six injecteurs sur une fenêtre du JET

d'ensemble de l'appareil représenté sur la Fig. 6. Cette figure donne une description rapide du faisceau de neutres que je viens de commenter sur la vue générale et la façon dont il marche. Vous avez sur cette vue une idée de ce que peut être un injecteur de neutres. Vous voyez que ces appareils auxiliaires sont presque aussi gros que le tore lui-même et ils sont d'une complexité comparable.

Je vais terminer sur la description de l'appareil en donnant une idée des bâtiments et du complexe nécessaires pour le JET ; vous avez, très rapidement, sur cette vue-là un certain nombre de bâtiments pour les sources d'énergie, cette échelle-là est d'une centaine de mètres à peu près, ça vous donne l'idée de l'importance des bâtiments. La cellule dans laquelle se trouve l'appareil nécessite des murs de béton d'environ 2,50 m d'épaisseur pour la protection du personnel contre les neutrons de 14 MeV. (Fig. 7)

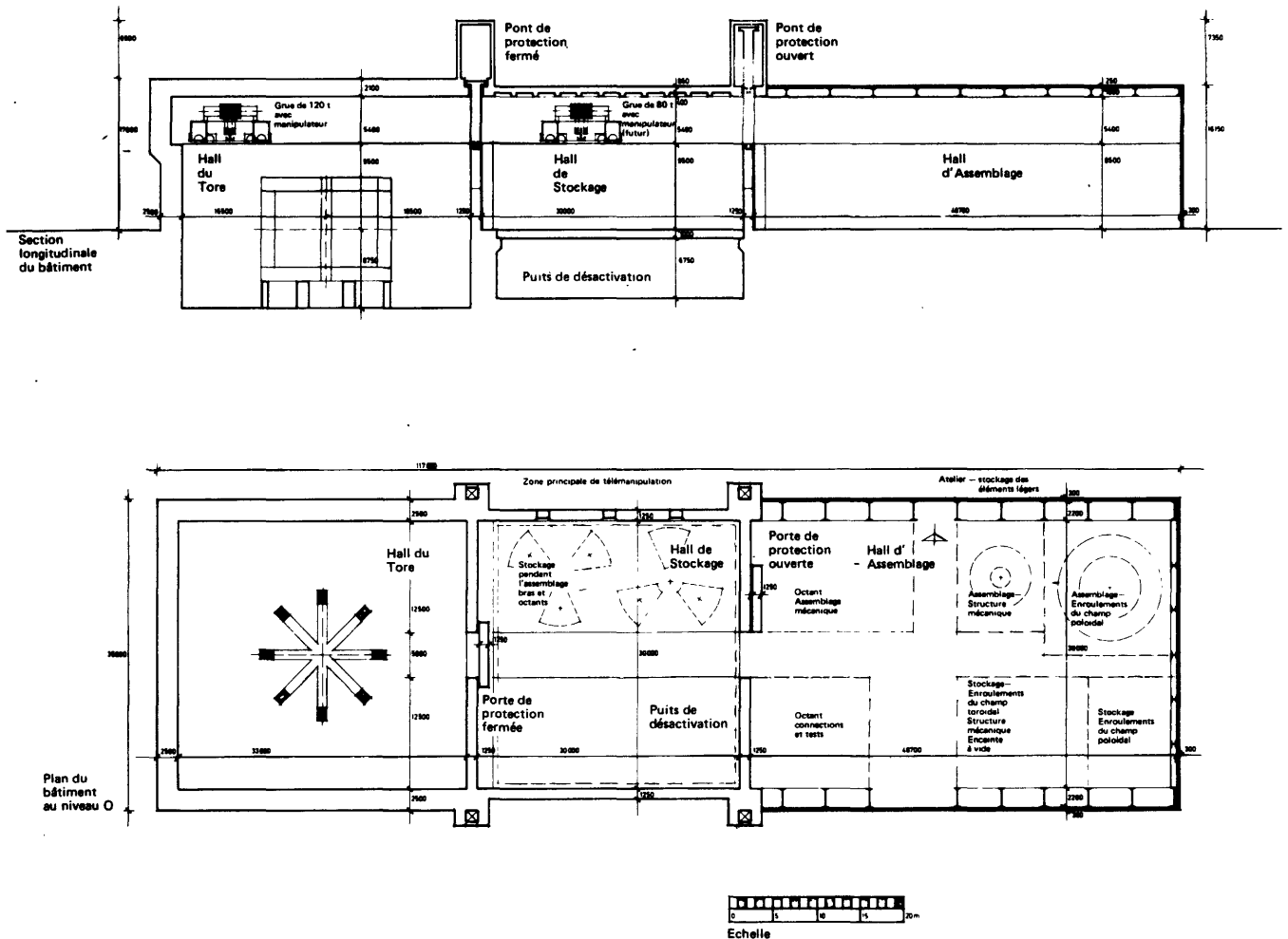
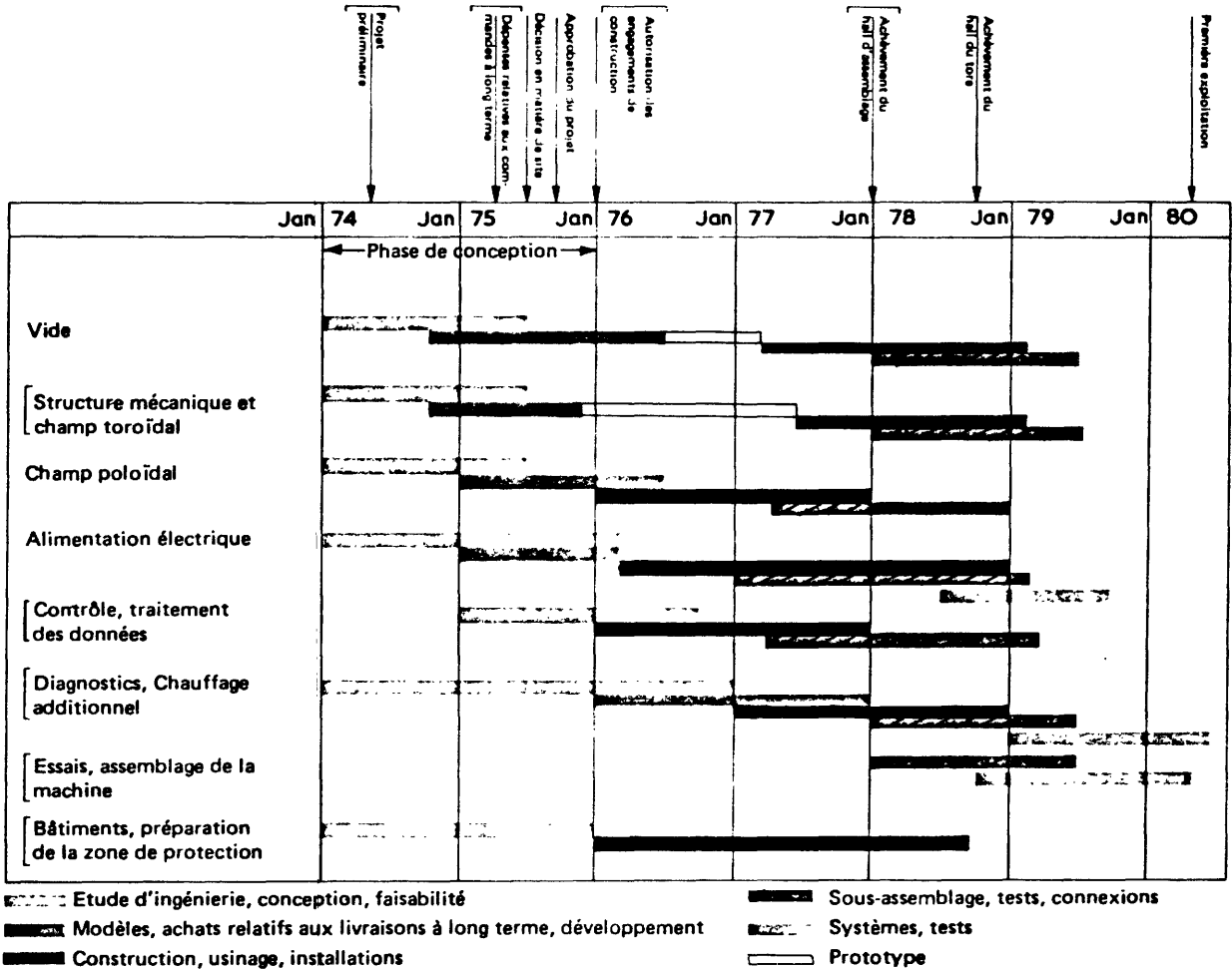


Fig. 7

Bâtiment expérimental : Vue en élévation et plan horizontal

Je vais passer à la dernière partie de cet exposé où je vous donnerai une rapide description des problèmes des plannings, des coûts, et je dirai la façon dont nous travaillons.

TABLEAU II



Avant de passer à ce tableau, (TABLEAU II) qui vous indique les diverses séquences de la phase expérimentale, je dois vous dire que l'ensemble de l'opération a été divisé en trois phases, une phase de "design", une phase de construction et une phase d'exploitation.

La phase de design a une durée d'environ deux ans et demi, elle a commencé en septembre 1973 et se termine à la fin de cette année, c'est-à-dire en décembre 1975.

La phase de construction doit s'étendre sur une période d'environ cinq ans (1975-1980). Quant à la phase d'exploitation de l'appareil, il est difficile d'en prévoir la durée totale, je dois dire un minimum de 5 ans, et sans doute, peut-être, 10 ans. En tout cas il est presque certain qu'il y aura dans la phase d'exploitation, grosso modo, deux grands domaines, un

premier domaine dans lequel l'appareil sera utilisé au plein de ses performances pour établir les différents buts qui ont été cités, et peut-être une deuxième phase dans laquelle on utilisera l'appareil pour des études auxiliaires lorsque d'autres générations d'appareils plus modernes auront vu le jour.

TABLEAU III

Project de programme expérimental

1980	1981	1982	1983	1984
Phase I: Etudes exploratoires		Phase II: Amélioration des performances du plasma		Phase III: Etudes relatives à la fusion
<ul style="list-style-type: none"> • établir une plage de fonctionnement • étude des lois d'échelle • obtention du courant plasma maximum pour l'alimentation électrique installée, y compris l'utilisation d'un plasma à section droite en forme de D • étudier le chauffage additionnel • étudier l'effet exercé par les impuretés • définir les limites de fonctionnement • décider de l'alimentation électrique future • décider de la nécessité d'un divertor 		(on se penchera sur certains points parmi les suivants) <ul style="list-style-type: none"> • augmenter la puissance de l'alimentation électrique • étudier les méthodes de chauffage nécessitant des structures in-situ • augmenter la puissance de chauffage • mettre en place le divertor, si nécessaire • essayer de nouveaux matériaux de diaphragme ou de parois 		<ul style="list-style-type: none"> • essayer des expériences de fusion <ul style="list-style-type: none"> (a) méthodes d'interaction, peut-être avec compression (b) autochauffage si possible

† à condition que les résultats de la Phase I soient extrêmement favorables.

Vous avez rapidement sur le TABLEAU III la stratégie, ou ce que l'on pense que pourrait être la phase d'exploitation. Vous avez une première phase dans laquelle on essaiera d'amener l'appareil à ses performances et de comprendre ce qu'on a fait. Une deuxième phase dans laquelle on étudiera quelles modifications il faut apporter à l'appareil si besoin est : adjonction d'un diverteur, augmentation des sources de chauffage auxiliaire, augmentation de la puissance de l'appareil.

Le choix à faire lors de cette deuxième phase dépendra des résultats obtenus lors de la première phase. Bien évidemment, si tout marche pour le mieux, on passera à la troisième phase aussi rapidement que possible. La troisième phase étant essentiellement l'étude de l'appareil dans un milieu actif, c'est-à-dire en utilisant un mélange deutérium-tritium. Soit dit au passage, lorsqu'on travaillera dans ces conditions-là il faudra évidemment prévoir tout un équipement pour la manipulation du tritium.

Dans R-7 vous avez une vue en couleur qui vous indique le planning de la phase de construction (page 34).

Un commentaire rapide sur ce problème de planning, c'est que d'ores et déjà pour les parties de l'appareil qui sont les plus longues à fabriquer (les bobines toroïdales, des éléments de la chambre à vide) les choses sont relativement avancées et des contrats d'étude ont été placés dans l'industrie. Les appels d'offres correspondants sont soit lancés, soit vont être lancés, dans les quelques mois qui viennent.

Malheureusement il y a plusieurs chemins critiques, et il en reste encore deux qui passent par la définition du site.

Cette partie : définition du site, est en dehors de notre contrôle ; vous conviendrez avec moi qu'il est à peu près impossible de commencer à construire des bâtiments sans connaître le site et qu'il est impossible d'assembler un appareil dans des bâtiments si ces bâtiments ne sont pas construits. Les bâtiments dont vous avez vu la complexité et la taille avec tout le système de portes pour faire passer les grues etc., imposent des délais de construction relativement longs. D'ores et déjà le vrai chemin critique passe par là, c'est-à-dire passe fondamentalement par le choix du site. On avait prévu dans ce planning un choix du site cet été : ce choix n'a pas encore été fait et nous crée déjà de sérieuses difficultés et des retards. Un autre problème lié lui aussi au choix du site et qui est sur le chemin critique est le problème de la puissance électrique à amener sur le site. Une grande partie de la puissance sera prise directement sur des lignes à haute tension : 380.000 volt et 400.000 volt , mais cette opération demande aussi beaucoup de temps. Et il est également impossible de commencer ce genre d'opération avant de connaître le site.

Je n'en dirai pas plus sur ce problème planning.

Maintenant je vais rapidement passer aux ressources nécessaires et à la façon dont nous avons travaillé jusqu'à présent sur le JET.

TABLEAU IV

Fonds pour la construction

TYPE DE DEPENSES	Montant (MUC)
DISPOSITIF JET (comprenant structures mécaniques, bobinages du champ toroïdal, circuit magnétique et structures de support des bobines extérieures, enroulements du champ poloïdal, enceinte à vide, diaphragmes, divers, pièces de rechange, transports)	29,1
SYSTEMES AUXILIAIRES (comprenant systèmes de pompage et de refroidissement, d'assemblage et d'entretien, chauffage additionnel)	9,0
ALIMENTATIONS ELECTRIQUES (comprenant les systèmes afférents au champ toroïdal et au champ poloïdal; alimentations électriques auxiliaires)	22,5
CONTROLE, SURVEILLANCE, ACQUISITION DES DONNEES (comprenant les ordinateurs et les périphériques, la station de contrôle et les connexions)	3,5
DIAGNOSTICS	3,5
BUDGET OPERATIONNEL (préparation de la phase opérationnelle, test et mise en service du dispositif, dispositions pour modifications)	8,9
BATIMENTS (hall d'assemblage et hall du tore, zones d'alimentation électrique, tour de refroidissement, bâtiments auxiliaires en location)	15,3
EFFECTIFS (équipe pour la phase de construction et la préparation de la phase opérationnelle, frais généraux, voyages)	31,9
RESERVE	11,3
	135,0

Sur le TABLEAU IV (qui existe également à la page 46 du R-7) vous voyez la décomposition du coût du projet. Je voudrais faire simplement remarquer que l'appareil lui-même rentre pour grosso modo 30 % dans le coût global. Que les investissements généraux tels que par exemple les alternateurs, redresseurs, calculateurs ou liquéfacteurs qui peuvent servir à d'autres appareils similaires représentent de l'ordre de 23 % ; le coût des bâtiments est de l'ordre de 12 % mais une partie des bâtiments (bureaux, ateliers auxiliaires) sera loué sur le site. Vous avez le coût de l'équipe JET (de l'ordre de 26 %) : c'est environ 400 personnes travaillant sous responsabilité JET sur des parties de l'appareil spécifiques des tokamaks, sur le site lors de la phase d'assemblage de l'appareil. (TABLEAU V).

TABLEAU V

Equipe de construction du JET

Année civile	1976	1977	1978	1979	1980
Hommes-an pour la construction du JET (au total 1.398 hommes-an)	108	206	325	374	385
Ingénieurs	26%	19%	14%	13%	12%
Physiciens	9%	6%	6%	9%	14%
Dessinateurs	30%	20%	11%	9%	10%
Techniciens	17%	24%	32%	32%	32%
Personnel de secrétariat	18%	19%	16%	15%	14%
Ouvriers	0%	12%	21%	22%	18%

Nombre d'hommes-an (cadres) à ajouter aux nombres cités plus haut, et qui est requis pour les Associations.

Année	1976	1977	1978	1979	1980
Hommes-an (cadres)	35	50	60	60	50

Je pense par exemple que pour les sources d'énergie ou montage d'alternateurs on va demander un système en quelque sorte "clef en main" c'est-à-dire qu'on veut telle puissance avec telle forme de courant à la sortie des conducteurs. Le personnel qui montera ces alternateurs et tout le système n'est pas inclus dans les 400 personnes.

Je vais revenir rapidement sur ce que peut être l'équipe JET. On pourra distinguer dans cette équipe trois provenances qui à mon sens devraient être les suivantes : une première provenance à partir des laboratoires nationaux, disons, de l'actuelle équipe de design augmentée ou doublée et sera sous statut JET proprement dit, une deuxième partie du personnel devra venir sans doute de l'association hôte, ou du site hôte, et travailler en relation étroite, presque, à la limite intégrée, avec la première partie.

Enfin la troisième provenance à mon sens doit venir de l'industrie d'une façon ou de l'autre, parce que je ne pense pas qu'il est souhaitable de

construire, à partir de rien dans l'équipe JET un système de compétences que l'on peut trouver ailleurs.

En particulier tout ce qui concerne les problèmes plus classiques : j'ai déjà cité le problème des sources d'énergie, alternateurs, etc... mais tout le problème des bâtiments, tous les problèmes liés à la protection, à la construction de la cellule JET qui sont des problèmes très proches de ceux que l'on peut rencontrer lors de la construction d'un réacteur de fission, je pense que pour ces problèmes-là il sera fait appel aux compétences déjà existantes, soit dans l'industrie, soit dans les laboratoires nationaux. Je voudrais dire un dernier mot sur la façon dont nous avons fonctionné dans la phase de design jusqu'à présent. Hier en répondant à quelques questions je l'ai déjà mentionné. Dans la phase de design nous avons essayé de faire appel au maximum des compétences possibles à l'extérieur de l'équipe JET proprement dite. Ceci s'est fait sous deux formes : une première forme imposée en quelque sorte par le statut de la phase de design qui était de faire appel à ce que nous appelons dans notre jargon "les partenaires" c'est-à-dire les diverses Associations dans leurs connaissances et leurs possibilités à la fois dans le domaine fusion et dans les domaines d'engineering plus généraux (compétences au point de vue métallurgie, protection, etc.). Nous avons donc fonctionné en plaçant d'une part toute une série de contrats avec les diverses associations pour des études spécifiques de tel ou tel point. Ces contrats dans certains cas ont été répercutés à l'extérieur par les partenaires sur certains organismes privés ou para-publics. D'autre part nous avons passé un grand nombre de contrats d'étude directement aux industries privées. En général, nous avons passé deux à trois contrats d'études pour un sujet déterminé de façon à ne pas avoir simplement un seul point de vue sur la question pour un problème donné. On demandait en général à des industries capables de fabriquer les parties ou l'ensemble correspondant de nous faire une étude de faisabilité de ce que l'on proposait, de délais, de coûts. Y avait-il des modifications, des améliorations à apporter et ce qu'en pensait l'industrie en question.

Assez souvent, d'ailleurs volontairement, nous avons essayé de faire étudier plusieurs variantes pour une même pièce ou un même sous-ensemble de façon à pouvoir comparer les divers mérites respectifs. Par exemple sur la chambre à vide, sur les bobines toroïdales, nous avons essayé à la lumière de ces résultats et compte tenu de toutes les remarques, de nous faire une opinion et de définir, à partir de là, les caractéristiques "finales" de l'objet et de rédiger le cahier des charges pour pouvoir faire l'appel d'offres. Le

projet n'étant pas décidé d'une part, mais d'un autre côté, ayant déjà les fonds pour pouvoir lancer les commandes qui demandent les plus grands délais, nous avons été obligés de demander des étapes successives dans nos contrats: la première étape consiste à faire une étude détaillée de l'objet, la deuxième étape à réaliser un prototype (nous avons essayé dans la mesure du possible - je vous l'ai dit - d'avoir des petites séries). La troisième étape est la production en série de tous les éléments. J'en ai terminé maintenant. Les exposés détaillés qui vont suivre vous apporteront les informations supplémentaires.

/1/,/2/,/4/ Voir les références à la fin du livre

2.2 D. ECKHARTT - JET Design Team
 Culham Laboratory
 THE JET VACUUM CHAMBER

The vacuum system of JET, as well as that of any other large fusion experiment, is one of the major sub-systems of the experiment. Its importance lies not only in terms of hardware but also in terms of physics. Here we enter the question of the plasma purity which has been raised in several talks. Its importance can be best assessed by remembering that the success of TOKAMAK systems, about six or seven years ago, can be largely attributed to the improvement of the vacuum conditions in these systems.

TABLE I

- 1 - To create a vacuum environment in which a low-density, extremely pure, ring-shaped plasma with a non-circular cross-section can be
 - generated
 - heated
 - observed and measured
 - magnetically confined
 - manipulated
 - and finally quenched.

- 2 - To establish the (unavoidable) first contact between hot plasma and solid matter, and arrange it in such a way that a minimum amount of non-fuel atoms ("impurities") is released.

On TABLE I, we have defined a number of specific functions for this vacuum system. Each of these specifications can be exactly defined and quantified in terms of the mechanical and electromagnetic characteristics of the vacuum system. But even from the rather abstract definition given in the first part of TABLE I, it becomes clear that we need some sort of material container in order to separate the hot and low density plasma from the outer atmosphere. Hence, there is one immediate and important consequence for the vacuum system: somewhere inside the vacuum system we have the

location where the hot plasma comes into direct contact with solid matter, with the outside world, or shall we say with "reality". Hence, another but equally important role of the vacuum system can be defined as in part 2 of the writings on TABLE I. The minimum rate of impurity release can be achieved, or at least one hopes to do so, by choosing suitable materials for the vacuum vessel and, in particular, for the first wall, or by suitably treating them, or by suitably shaping these surfaces.

So plasma-wall interaction, which is basically an erosion of the material of the first wall, does not lead to significant plasma contamination. One has to bear this important question of plasma impurities in mind when describing the design of the vacuum vessel. Now the vacuum system of JET can be separated into three major components as listed in TABLE II, which we shall discuss in turn.

TABLE II

- 1-The vacuum vessel with its windows, diagnostic ports, inlets, ...etc, which is the material container of the plasma
- 2-The pumping system which is connected to the vacuum vessel through large pumping ports, together with its relevant instrumentation and controls
- 3-The "limiters", or diaphragms, which determine the boundary of the plasma and where we want to localise the first contact of the plasma thus protecting the vacuum vessel inside wall from direct bombardment by the hot plasma

In designing the vacuum vessel a number of specific requirements have to be met. They can be listed as in TABLE III. First of all there is the cross-sectional shape which is non-circular as has been mentioned several times; secondly, there is the question of structural safety under the various load forces which act on the vacuum vessel and this structural safety has to be

TABLE III

-
- 1-To fill in,as completely as possible, the space defined by the inner bore of the toroidal magnet.
 - 2-To withstand the outside atmospheric pressure and the electro-magnetic forces.
 - 3-To present a high electric-resistance path in circumferential direction,i.e.,with respect to currents induced in parallel to plasma current.
 - 4-To provide good access for plasma observation.
 - 5-To comply with ultra-high vacuum standards:
 - to avoid the use of organic materials,
 - to eliminate the risk of leaks through welds,
 - to clean and treat the inside surfaces according to the standards of surface physics and surface chemistry, for example, to remove loosely bound adsorbates by heating in vacuo to temperatures up to 350°- 500° C,
 - to minimise the release of non-fuel atoms during plasma operation.
 - 6-To allow for remotely controlled dismantling and re-assembly under radioactive conditions.
 - 7-To be compatible with the possible later use of tritium.
 - 8-To minimise radiation hazards induced by fusion-reaction neutrons.

prevailed even at elevated temperatures. There are the material characteristics in terms of high electric resistivity and good welding properties. A whole programme of leak testing and vacuum control, even during the manufacturing process, has to be set up because the whole vacuum system

has to be designed according to ultra-high vacuum techniques, and last but not least, it has already been mentioned that we should make use of well-established manufacturing methods. Let me now briefly describe the solution that has been adopted for the vacuum vessel in the outline design of JET.

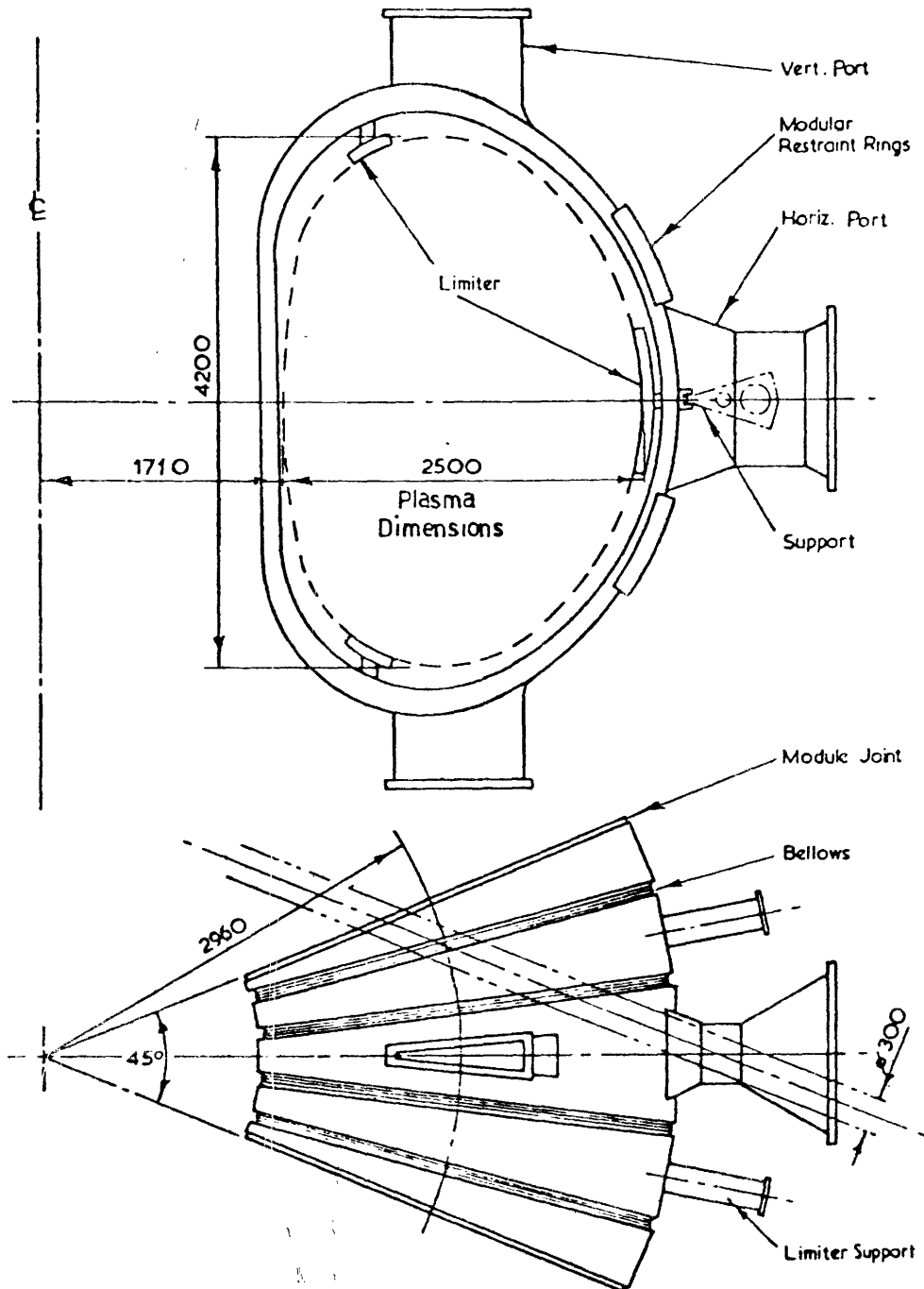


FIG. 1 GENERAL LAY-OUT OF THE VACUUM VESSEL OCTANT (dimensions in mm).

On Fig. 1, a schematic view of the vacuum vessel is shown. All forces acting on the vacuum vessel have to be absorbed by the rigid sectors which also incorporate the openings into the interior of the machine such as ports for pumping, auxiliary heating, diagnostics as well as for the limiters. The rigid sectors have a box-type construction made out of 10 to 15 mm thick plates which are suitably reinforced so that they can support the stresses which are imposed on the vacuum vessel by external forces. The bellows which link these rigid sectors are made out of thin corrugated plates, 1.7 to 2.0 mm thick. They determine the electrical resistance of the metallic vacuum vessel the long way round the torus, i.e., for currents which are induced by the primary transformer in parallel to the plasma current and which must be kept as low as possible. Each of these bellows-sections consists of two bellows fitted concentrically one inside of the other, and welded to end-plates. The interspace between the bellows is connected through holes in the end-plates of the bellows to the interspace of the box-type construction of the rigid sectors. This can be seen in more detail in Fig. 2. Hence, we get a double wall or

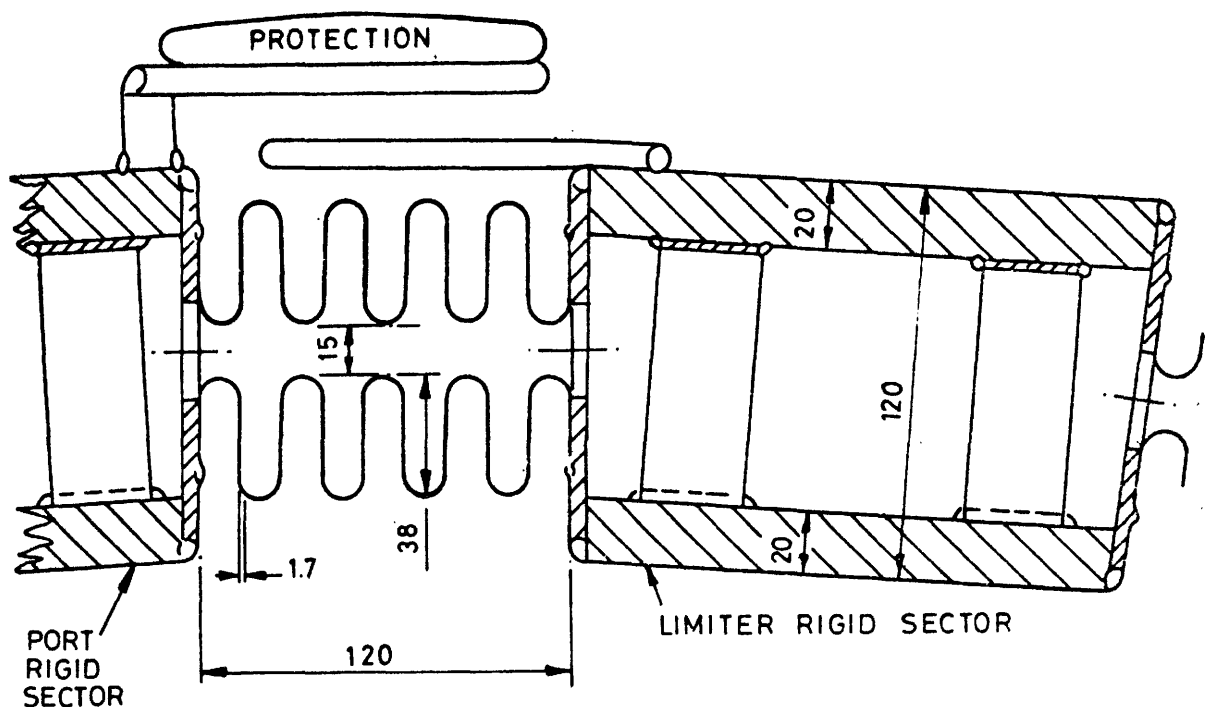


FIG.2. SECTION THROUGH THE WALL OF THE VACUUM VESSEL AT THE INNER, SMALL MAJOR SIDE (dimensions in mm).

shell structure for the whole vacuum vessel which has several tasks to fulfil. Firstly it should act as a safeguard in case one of the bellows develops a leak and, therefore, this interspace can be pumped-off by a separate pumping system. Secondly, when tritium gas is admitted to the vacuum vessel during experiments in the third phase when nuclear heating is tested, this interspace vacuum will reduce the tritium partial pressure above the outer bellows and, in this way, eliminate the tritium permeation through the thin bellows to the outer atmosphere. And thirdly, we shall use this interspace for circulating hot or cold gas in order to control the temperature of the inside wall of the vacuum vessel. This is of particular importance during the cleaning procedure, which will be done by heating the whole vacuum vessel to temperatures in the order of 500°C.

Due to the differences in the tooling and manufacturing techniques involved, we have considered bellows and rigid sectors as two separate items. We have asked competent industries for the bellows as well as for the manufacture of the rigid sectors together with their assembling into octants when the bellows should be supplied as "free issues".

These contacts with industries have been made in the form of study contracts for feasibility studies and for cost assessment and, of course, to give us some idea about the time schedules. The present position is that we have just received the tenders for the bellows sections from six companies inside the EEC. The call for tender for the rigid sectors will be sent out soon. It is then planned to have the octants assembled and machined to the required tolerances at the manufacturer's works before they are transported to the future site of JET. These octants form the basic units of the modular design of the load assembly for JET and should the vacuum vessel suffer a major damage, in particular during the phase when we test nuclear heating and the vacuum vessel will become radio-active, then we shall replace the damaged vacuum vessel octant by exchanging the whole module. Special care has to be taken, therefore, in the design of the octants joints which lie in the middle of the outermost sectors of each octant. These joints should be separable and reweldable by remote handling techniques.

Much consideration has been given to the choice of materials from which the vacuum vessel is to be constructed. Suitable materials are found among the

highly nickel-enriched alloys which are known under the trade names of INCONEL and NICROFER. We have performed a great number of welding tests with the various combinations of these alloys and also for the welding geometries which we shall use in the design for JET. These tests have shown good welding characteristics for these materials, and their results will be communicated to the future manufacturers of the vacuum vessel. Another type of test which we have started concerns the procedures of surface treatment and outgassing which are required in order to reach the cleanliness of the inside wall corresponding to the ultra-high vacuum techniques which are to be employed in this machine.

A number of stress calculations have been carried out inside the JET team for the various mechanical loadings which arise during the operation of the machine. These loadings originate from the atmospheric pressure as well as from electro-magnetic forces which act on the vacuum vessel, and which are caused by the interactions between magnetic fields linking the vacuum vessel, and eddy currents which are induced when these magnetic fields change in time. In the course of these stress calculations we have studied different variations around the basic shape given in the outline design as well as different reinforcement structures inside the box-type construction and different plate thicknesses. Our goal was to keep the local stresses below 12 kg/mm^2 , a figure which gives a good safety margin even at elevated temperatures. (Elevated in this sense means the 500°C produced during the cleaning procedure.)

In addition we have initiated model tests in order to study stress fatigue problems along the critical welding connections. Model tests are also performed to assess the flow patterns of the hot gas circulating in the interspace of the double wall structure in order to ensure uniform heat deposition during the bake-out cycle. Regarding the second item, the pumping system, we can set up a similar list of requirements (see TABLE IV).

TABLE IV

-
- 1-To achieve pumping speeds in the order of 5×10^4 l/s at the entrance of the vacuum vessel and to create base pressures in the order of 10^{-10} torr.
 - 2-To use oil-free and contamination-free pumps.
 - 3-To have a comparatively small size with small-diameter pumping leads.
 - 4-To be bakeable at temperatures up to 300° - 500° C.
 - 5-To show high reliability in operation and low possibility of failures affecting the operation of the experiment.
 - 6-Not to create any stray magnetic fields.
 - 7-To be suitable for operation with tritium.

We have studied a number of possible combinations of high vacuum pumps such as diffusions, sublimation, getter and cryo-pumps together with mechanical pumping units. As it turns out, we find that cryo-pumps combined with turbo-molecular pumps and backed by roughing pumps give an optimum solution. In arriving at this conclusion one has to keep in mind, of course, that pumping the vacuum vessel is not the only pumping requirement for the JET experiment. In particular the injectors which have been mentioned several times before, and which are needed for auxiliary heating, require pumping speeds and pumping geometries which can practically only be realised by cryo-pumping with large cryo-panels. Hence, in any compari-

son with respect to investment costs, one has to consider the overall pumping requirements for the JET experiment, not only the pumps for the vacuum vessel alone. In our outline design we proposed to use 16 cryo-pumps with a pumping speed of 10^4 l/s for each pump, and these pumps should be grouped in pumping units of 4 pumps and placed in front of the 4 pumping ports. These cryo-pumps are backed by turbo-molecular pumps which are needed for pumping helium and for the cleaning of the cryo-pumps. This cleaning procedure has to be performed after around 1 000 discharges.

It should be mentioned that we are consulting manufacturers for cryo-pumps in order to get an assessment of the related problems, for example, the lay-out of the transfer lines for liquid helium and liquid nitrogen which should be compatible with remote dismantling and remote reassembling techniques.

The third item in the context of my talk is the design of the so-called "limiters" which, as mentioned earlier, should experience the first direct contact with the hot plasma. You can see the limiter arrangement on Fig.3. In present-day Tokamak experiments, these limiters are diaphragms with a circular aperture to define the plasma boundaries. They are made out of heavy refractory metals like molybdenum and tungsten. In our present outline design we have used two sets of limiters. The first one, as shown in Fig. 3, is the so-called "plate limiters", 16 plates which are distributed along the major circumference of the machine and lie in the equatorial plane. The position of these plates can be adjusted from the outside. Through this adjusting device we can also admit cold gas in order to cool the limiter plates if their heat loads become excessively high.

There is a second series of 32 so-called "bellows shields" which are indicated on Fig. 3. They sit in front of the bellows and protect these

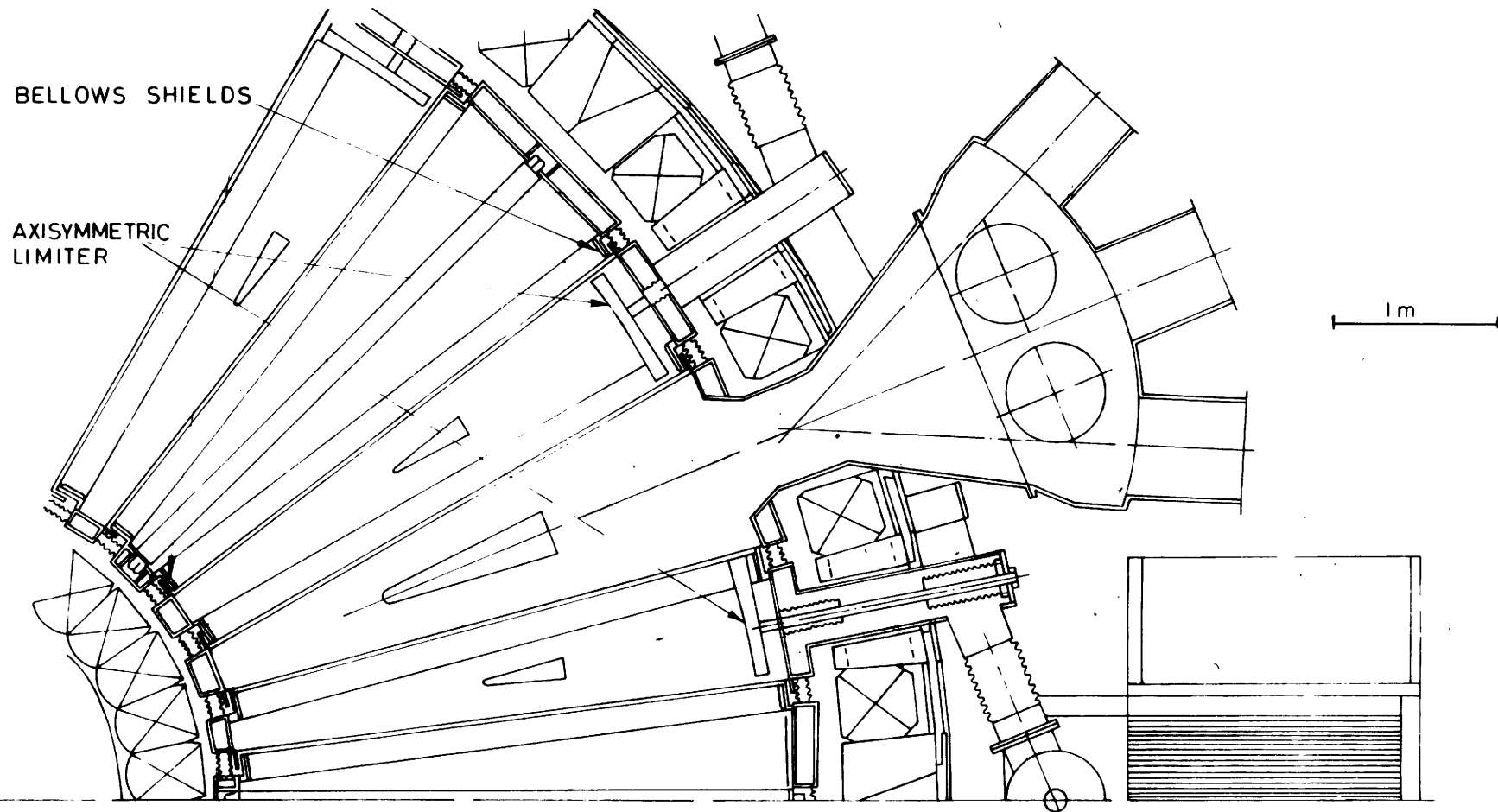


FIG. 3. PLAN VIEW OF THE TORUS MIDPLANE SHOWING THE DISTRIBUTION OF LIMITER PLATES OF THE OUTER AXISYMMETRIC "RAIL" LIMITER AND BELLOWS SHIELDS.

bellows from direct bombardment by the hot plasma. The weight of all these limiters and shields, if they were made out of molybdenum, would be about 7 t. There is, however, a growing tendency to avoid the use of heavy elements like tungsten and molybdenum in future large experiments. The reason for this lies in the deteriorating effect of heavy ions on the plasma power balance. When these ions have entered the hot plasma region, they radiate an immense amount of power and, of course, this power loss should be avoided. Therefore we are looking into the possibility of using light-element, low-Z refractory materials like the borides, carbides and oxides of light metals, or even for carbon in its various forms. We have initiated a series of tests to study the characteristics of commercially available materials like boron-carbide, silicon-carbide, etc. If suitable materials can be found they would be used for the limiters and shields and in the end, perhaps, one would cover the whole inside wall of the vacuum vessel with thin exchangeable plates or tiles of such material, and in this way relieve the erosion problem in this machine or, in any case, in a future fusion reactor.

The final topic of my talk concerns the activation of the JET assembly due to nuclear reactions which are caused by fusion neutrons. If a successful plasma performance can be demonstrated during the first phase of the experimental programme, and that has been outlined by Dr REBUT, one would like to go ahead and try an ignition experiment in JET. This can be done either by true thermonuclear burning of a deuterium-tritium mixture or by injecting energetic tritium ions into a deuterium plasma. In either case a large number of fusion reactions will take place which produce energetic He-ions (α - particles) and energetic neutrons. The α - particles are confined inside the plasma volume and give up their kinetic energy by heating the plasma. The neutrons, on the contrary, escape from the plasma volume and penetrate the surrounding material structures where they cause nuclear reactions and create radio-active nuclides. The subsequent decay of these nuclides gives rise to high-energy γ - radiation resulting in a radio-active contamination of the machine. We have been initiating numerical calculations to estimate the level of radioactivity one would expect in the vicinity of the machine after a certain number of discharges

with nuclear heating. These calculations are based on the assumption that the number of fusion reactions is so high that the total power from the α -particles would be enough to sustain the plasma energy against all power losses. This gives a reaction rate of about 10^{19} fusion events per second during the discharge, and hence on purely energetic terms the JET-machine could be regarded as a nuclear reactor of about 20 MW power output. This figure lies between the 10 and 100 MW mentioned by Dr REBUT. The corresponding number of neutrons leave the plasma and activate the surrounding structure. Preliminary results indicate that after 100 discharges and a waiting time of about 30 days, the radio-activity near the machine is still at such a high level that radiation workers could not stay longer than 5 hours near the machine. Hence, any major maintenance or repair work has to be done by remote handling techniques.

2.3 M. HUGUET - JET Design Team
Culham Laboratory
THE JET MAGNET

I. TOROIDAL MAGNET

The toroidal magnet is composed of 32 identical coils which are distributed evenly around the torus. Fig.1 shows a single

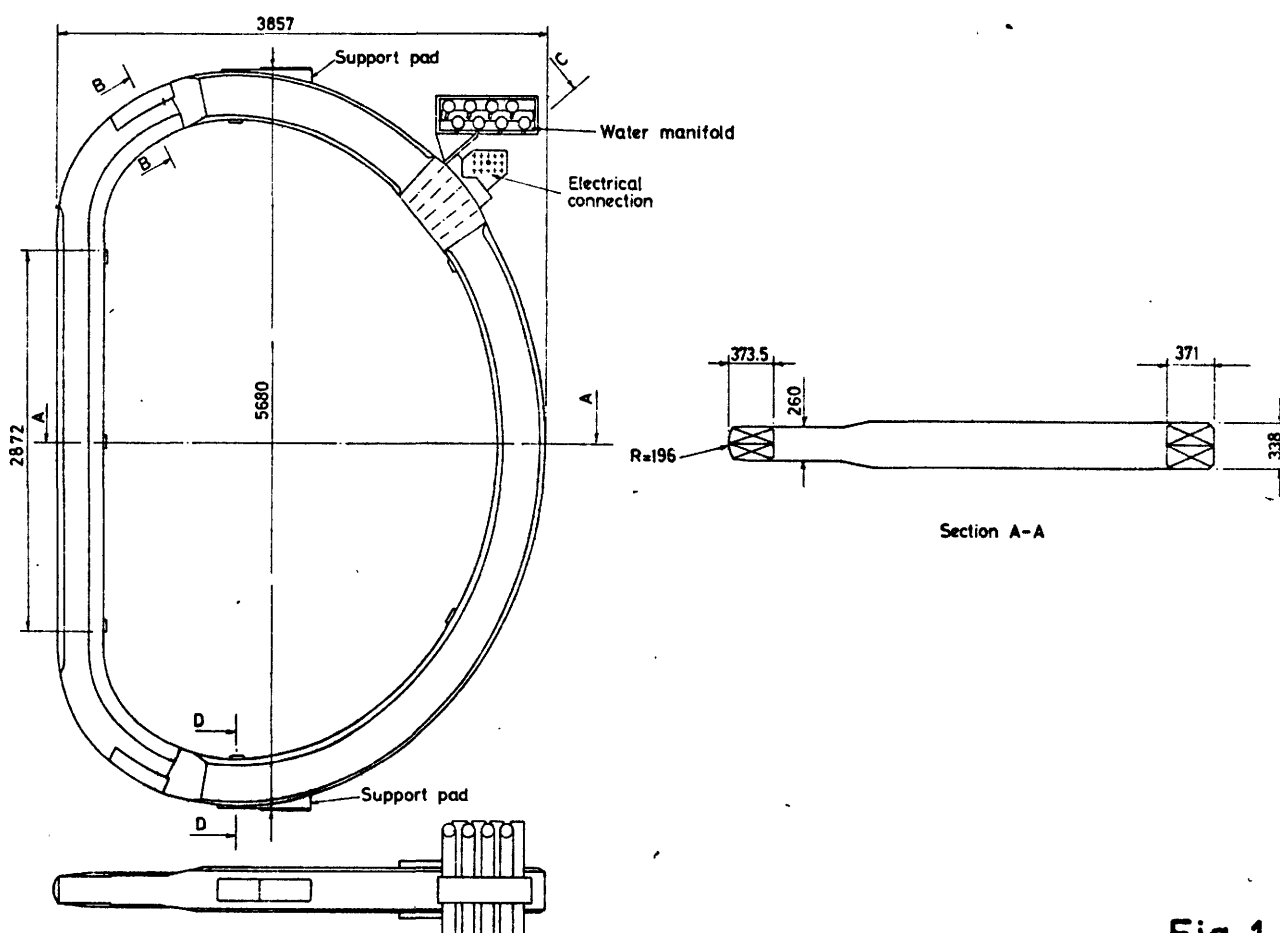


Fig.1

toroidal coil. An interesting feature of these coils is their shape. These coils are not circular but, they are D-shaped. This particular shape has been chosen in order to minimize the stresses inside the coils. Another interesting feature of these coils is that fact that the cross section is reduced along the straight part of the D. This reduction of cross section has been made in such a way that the coils can all fit together

around the central support. These coils are very large, the height is about 5.7 m, the width about 3.9 m and the weight of one coil alone is approximately 12 t. It is quite clear that very large engineering facilities are required to manufacture these heavy components. Fig.2 shows two typical cross sections

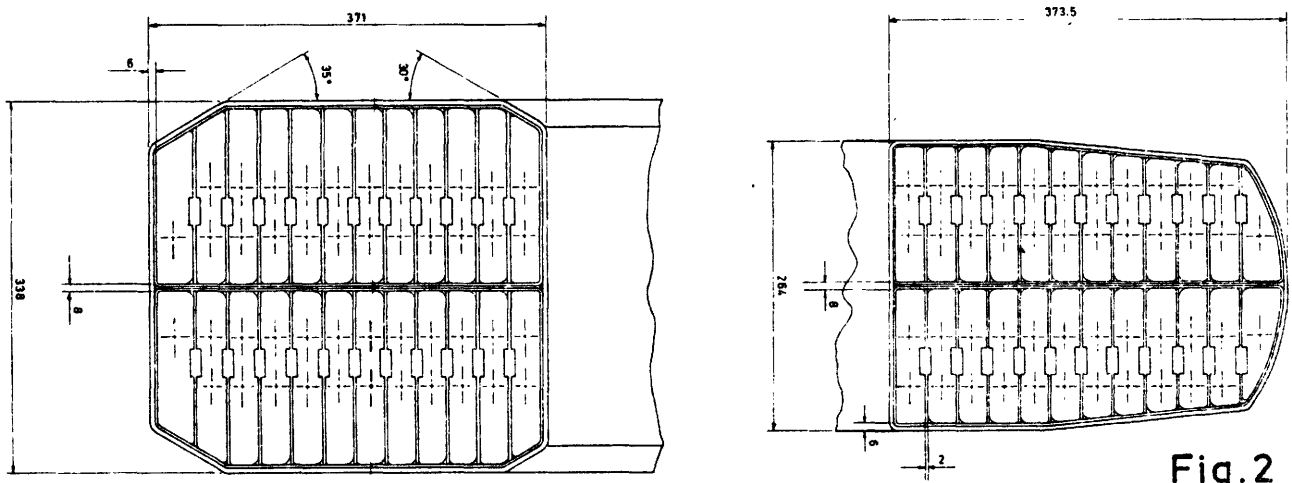


Fig.2

of the coil. The coils are actually composed of two "pancakes" and each "pancake" consists of 12 copper turns. Fig.3 shows

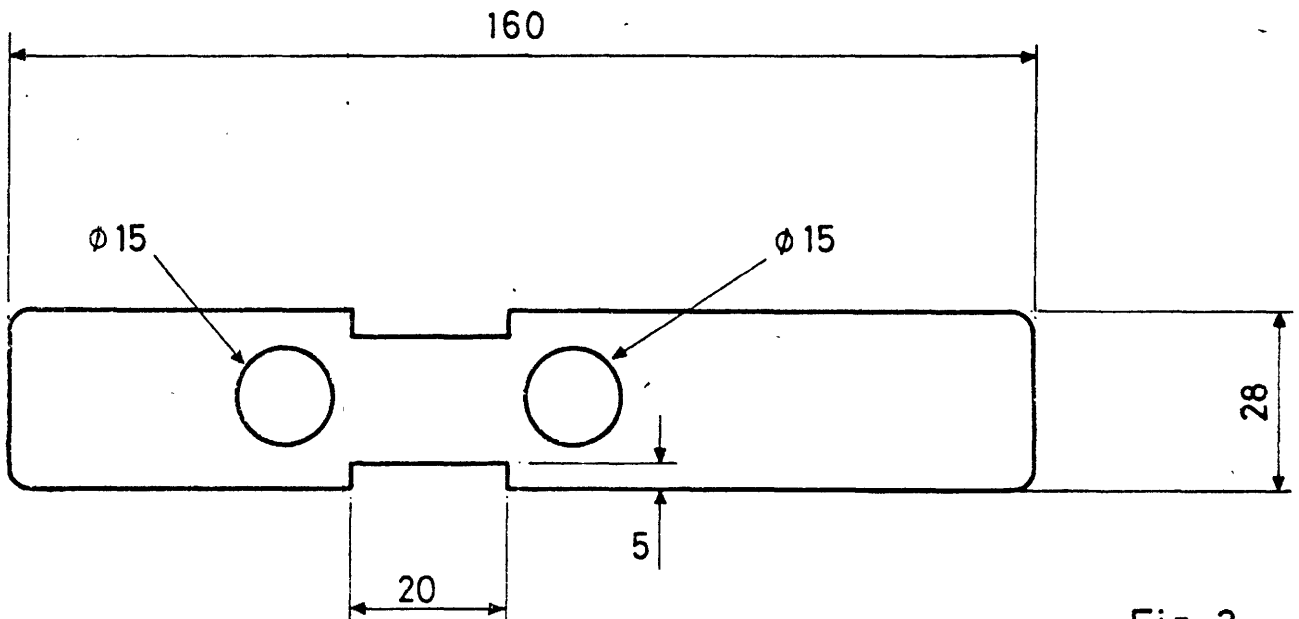


Fig.3

one copper turn. This copper conductor is made of hard copper containing a small percentage of silver. The coils are cooled by water flowing in the two channels (Fig.3). TABLE I gives the major operation parameters of the magnet. The energy dissipated per pulse in the magnet is about 5.3 Giga J. The cooling equip-

TABLE I

TOROIDAL MAGNET

	Basic	Ultimate
Current (kA)	53	66
Magnetic field(kG)	27,7	34,5
Resistive power(MW)	175	270
Energy dissipated per pulse (GigaJ)	5,3	5,3
Pulse duration (s)	30	20

ment is not fully designed and it is quite clear that help from industry will be required for the study and design of the cooling equipment. The copper conductors for these coils have already been ordered (see TABLE II). Early discussions with copper

TABLE II

PRESENT SITUATION

Copper conductor-first discussion Jan.74

- Call for tender sent in April 75
- Contract placed in July 75

Coils - Study contracts July 74

- Call for tender sent in July 75
- Answers expected: end of october 75
- The contract should be placed at the end of 1975, or early in 1976.

manufacturers took place in January 1974, and this gave the copper manufacturers the opportunity to collaborate with us when the design was at its early stage. This copper conductor is very difficult to manufacture because of the size of the cross section and the length of single bars. We have placed contracts with two German firms, Kabelmetal and VDM, and both these firms will produce a small quantity of copper bars corresponding to the first stage of the contract. A decision will be taken later to select which of these two firms will produce the total quantity, which is about 450 tons. Of course, this procedure has been discussed with the companies concerned during the negotiations before signing the contracts. This is for us a general policy to discuss very openly with companies and explain very carefully what are our intentions.

Concerning the manufacture of the coils, we had very early discussions with the manufacturers and we placed study contracts with major European manufacturers in July 1974, this gave them the opportunity of influencing the design (see TABLE II). These coils are in the critical path, according to the planning, and we cannot tolerate any delay because the manufacture will require three years from placing the contract to the delivery of the last coil.

II. MECHANICAL STRUCTURE

The forces acting on the coils are due to the toroidal and poloidal fields (TABLE III).

TABLE III

MECHANICAL FORCES ACTING ON THE TOROIDAL FIELD COILS

1 - Forces due to the toroidal field itself
~ internal pressure

2 - Forces due to the poloidal field (plasma)
- lateral forces orthogonal to
the plane of the coil

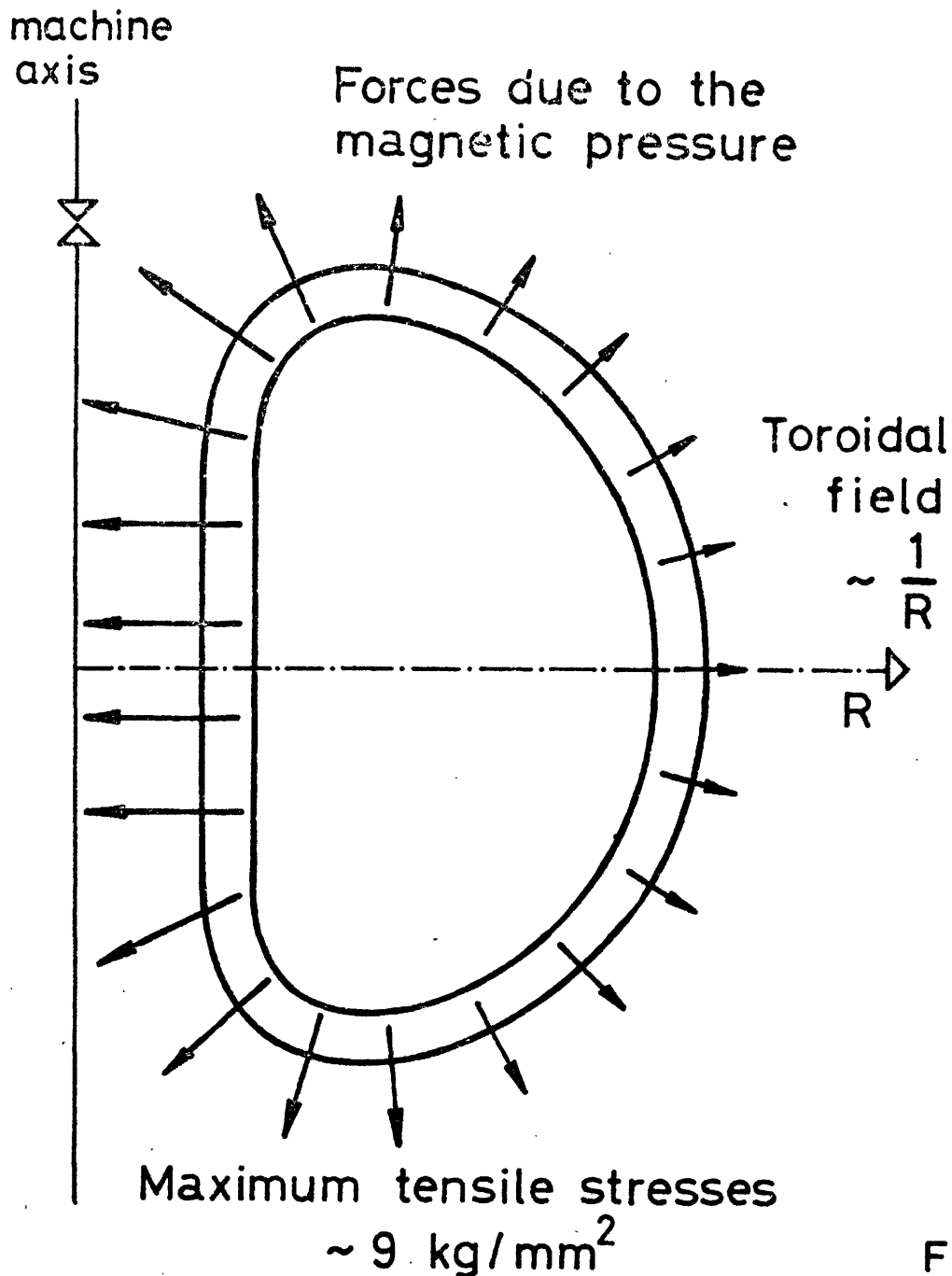
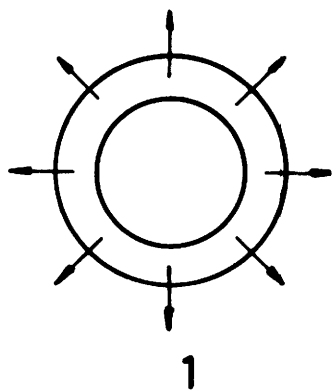


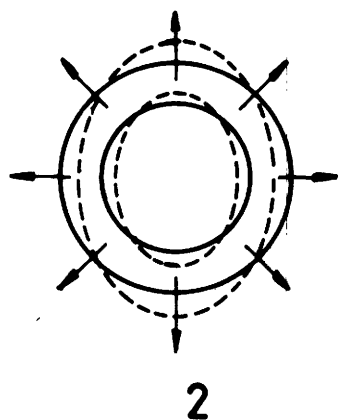
Fig.4

1. Forces due to the Toroidal Field

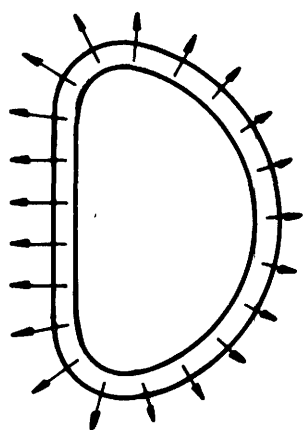
Fig.4 shows a meridian cross section of the toroidal magnet and the toroidal field which is not constant but which falls off according to a distribution which is roughly one over R. This non-uniform magnetic field produces forces which are not uniform but distributed as shown by the arrows. This non-uniform distribution has two consequences; first of all, each coil is subjected to the resultant force of 2,000 t which is directed towards the machine axis. The second consequence of this non-uniform distribution is the fact that the shape of the coil has to be carefully chosen in order to avoid internal stresses:



Circular coil { no bending
Uniform field { moments



Circular coil { bending moments
Toroidal field { (shear stresses)



D-shaped coil { no bending
Toroidal field { moments

3

Fig. 5

Fig. 5.1 shows that a circular coil producing uniform field, is not subjected to any bending moments. It is only subjected to an internal pressure like a pressure vessel. Fig. 5.2 shows that a circular coil producing a toroidal field is subjected to bending moments and tends to deformate according to the dotted lines.

If this coil was totally flexible it would naturally assume a D-shape, and therefore the D-shape which is shown on Fig.5.3 is really the natural equilibrium shape of a totally flexible coil in the toroidal field. It means that the D-shape coil is not subjected to any bending moments, it is only subjected to internal pressure. Fig.6 gives an analogy between the D-shaped

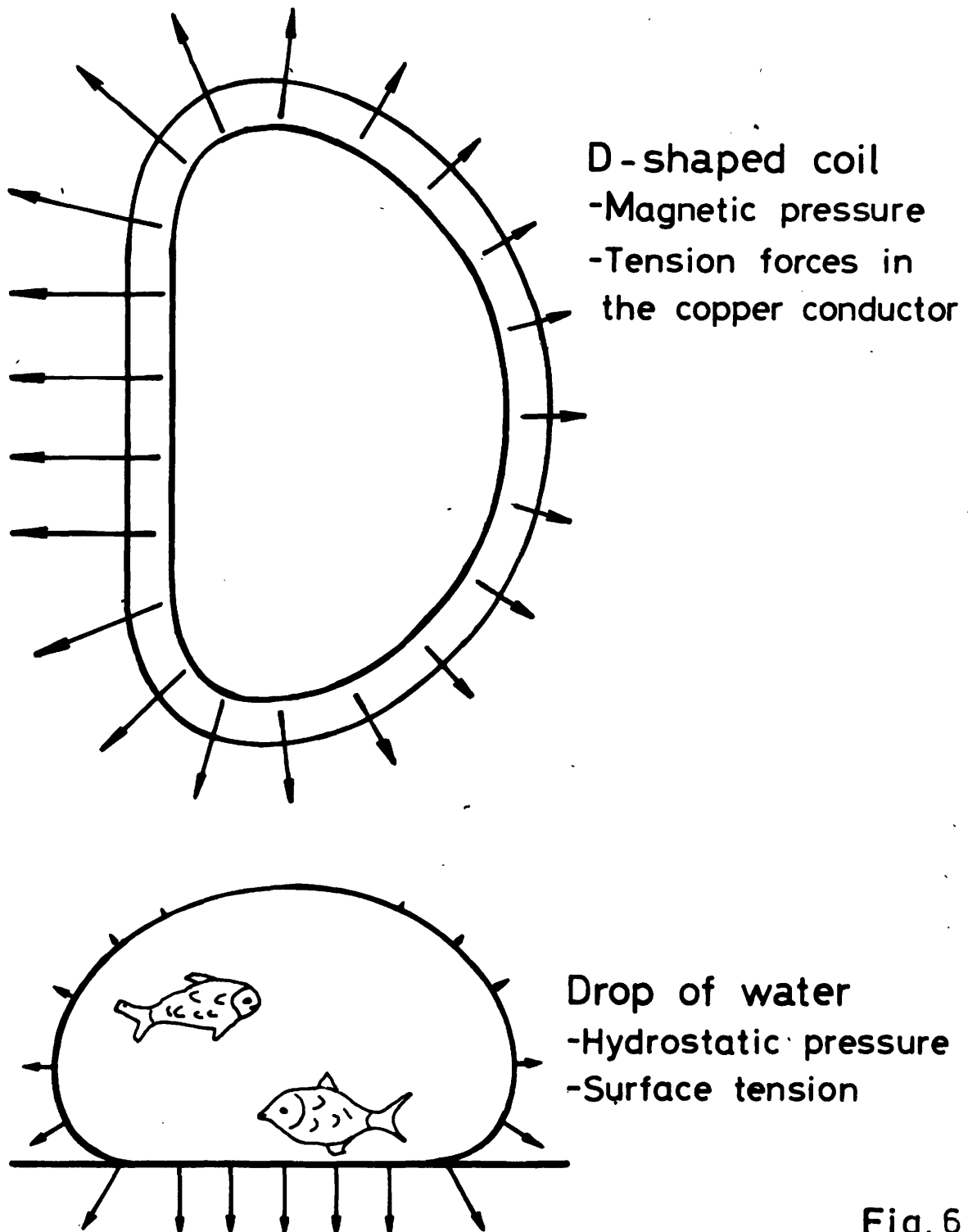


Fig.6

coil and a drop of liquid. For a D-shaped coil the magnetic pressure is balanced by the tension in the copper conductor, for a drop of liquid the hydrostatic pressure is balanced by the surface tension. A computation has been made to check that the shape of the coil was correct and this shows the mesh which has been used for the finite element calculations.

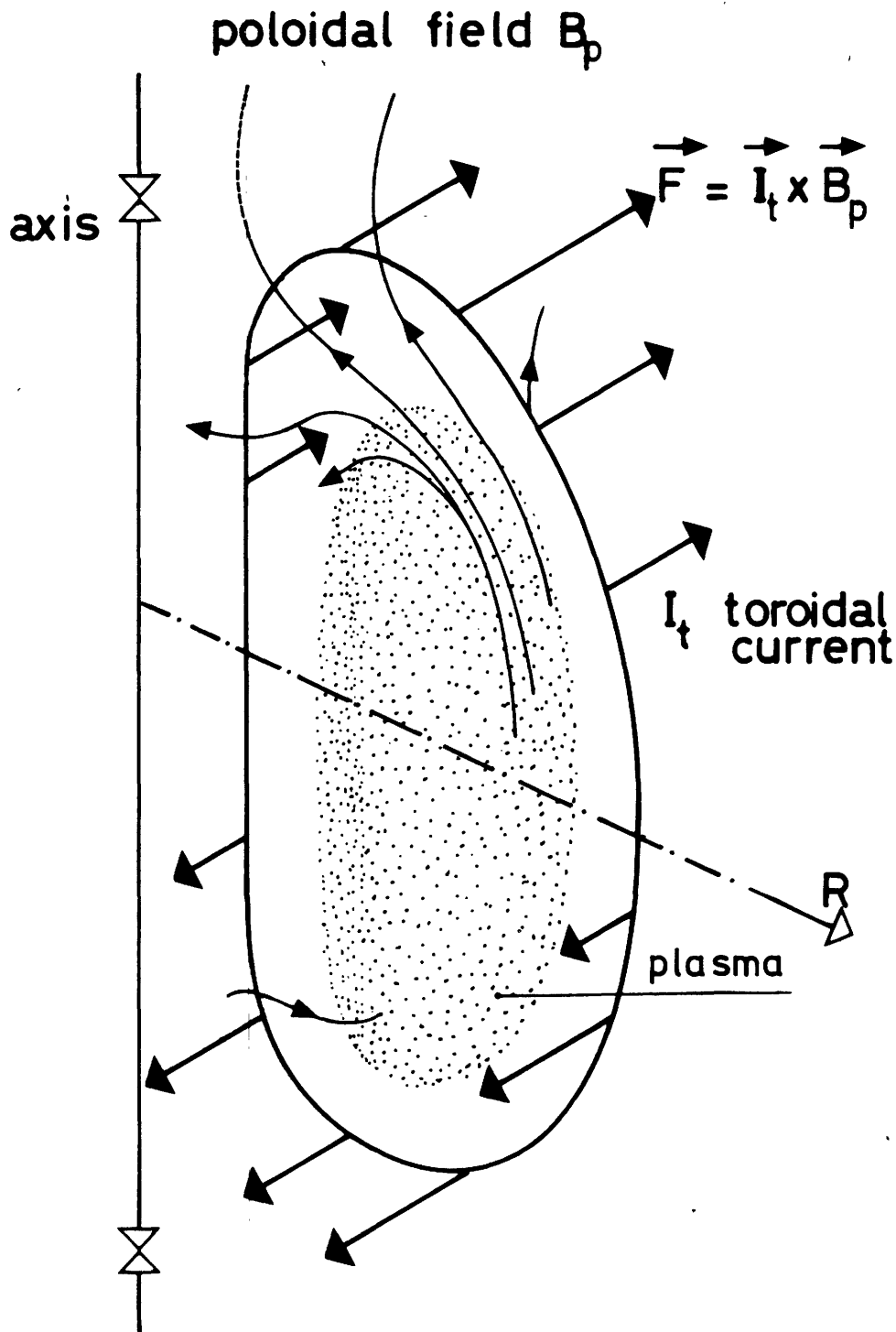
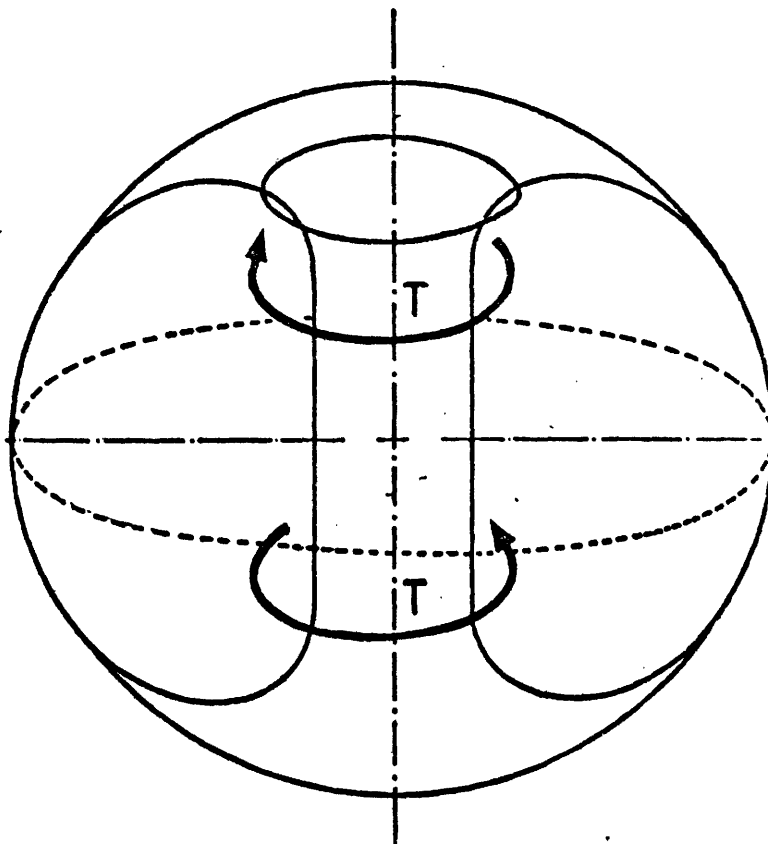


Fig . 7

2. Forces due to the Poloidal Field

Fig. 7 shows in the perspective view the toroidal coil, the toroidal current I_t , the plasma and the poloidal field lines. These poloidal field lines cross the toroidal current and produce a force which results from the vector product, $\vec{I}_t \times \vec{B}_p$ (B_p is the poloidal field). These forces which are shown in the figure are orthogonal to the plane of the coil and they are in opposite directions above and below the machine mid plane. Therefore each toroidal coil tends to rotate around the axis R which is lying in the machine mid plane. It means that the whole magnet is subjected to a torsion torque because the upper half of the magnet tends to rotate in one direction and the lower half of the magnet is rotating in the opposite direction. Fig. 8 represents the torsion torque acting on the machine. The value

Torque due to the poloidal field



Maximum value: $T = 12000 \text{ t}\cdot\text{m}$

Fig.8

of the torsion torque in the worst case is 12,000 t per metre. This torque is acting on one half of the machine, and the same torque with the opposite sign is acting on the lower half of the machine.

3. Design of the Structure

To resist the torque an exceptionally strong and stiff structure is required. Deflections of only a few millimetres can be tolerated. Greater deflections should perturb the toroidal field and they also produce additional stresses in the toroidal coil. In order to get a very stiff structure the basic principle of the design was to resist to the forces where the forces arise and therefore avoid large deflections due to bending moments. Therefore the structure looks like a spherical shell which

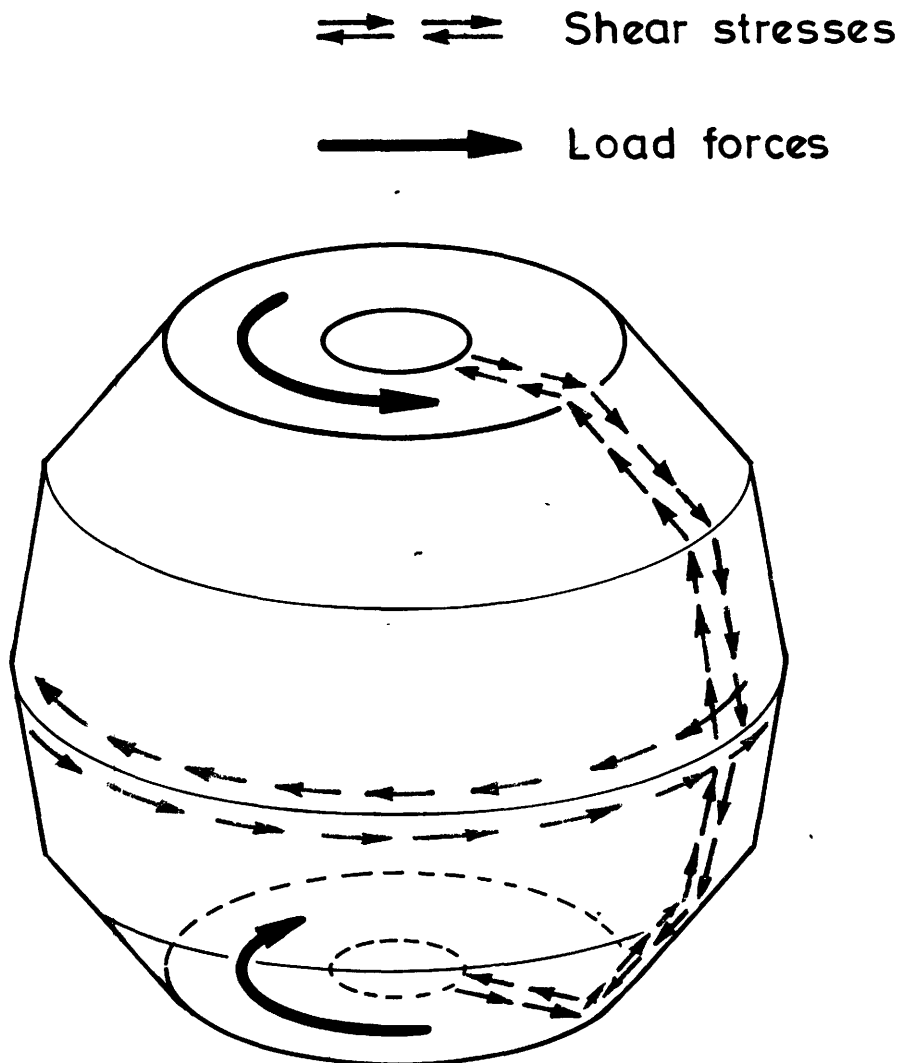


Fig.9

encloses completely the magnet. Fig. 9 shows the load and the shear stresses in the shell. In Fig.10 the coils and the structure are shown. This shell structure is composed along the

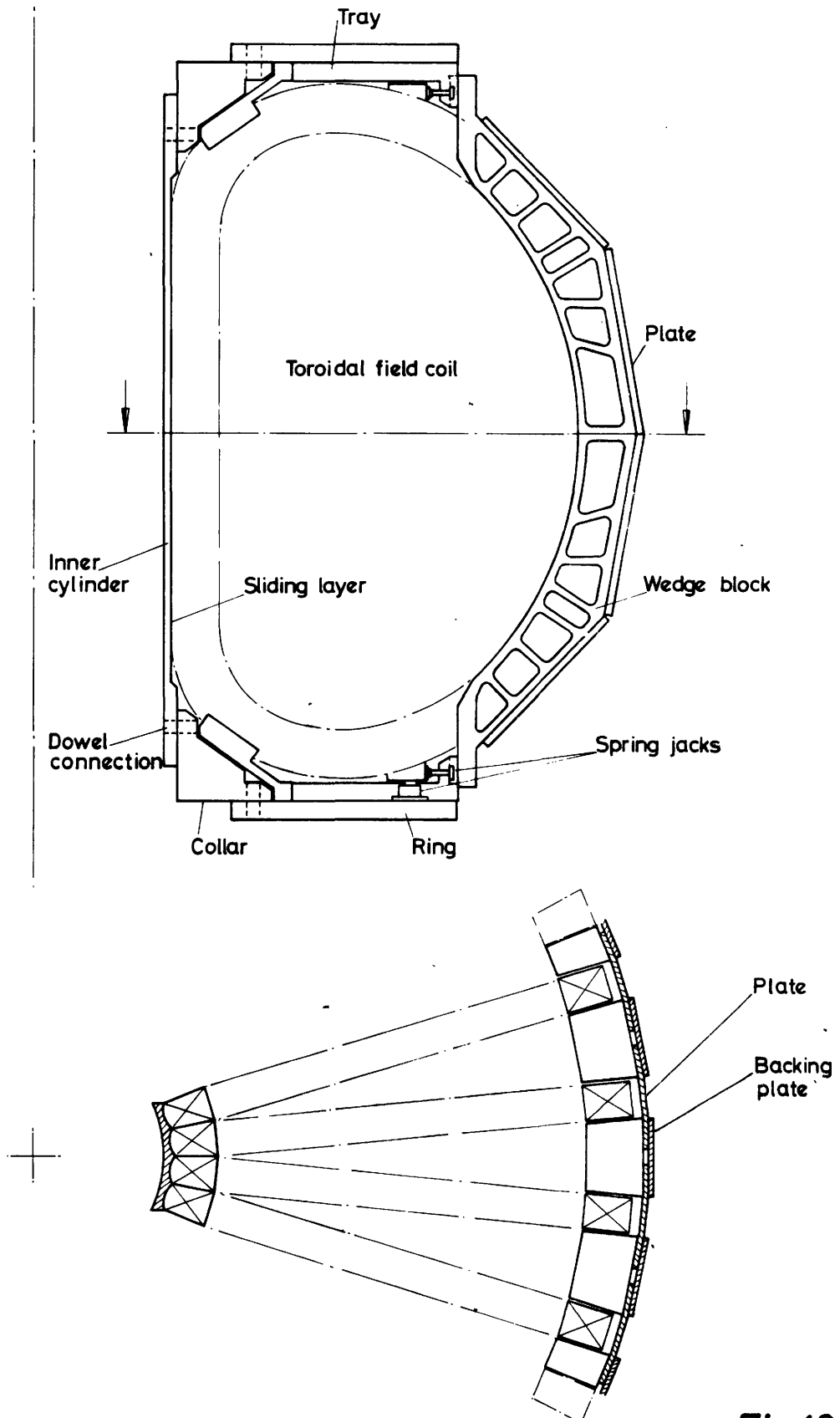


Fig.10

outside of blocks which are placed between each coil. These blocks provide a support for the coil. The blocks are connected by dowels and bolts which can resist shear forces. On the top and bottom these blocks are connected to rings, an upper and a lower ring. Along the straight part of the D we have also a support which is called the "inner cylinder". Each coil rests in a groove which is machined in the inner cylinder. These mechanical components are fairly conventional and for their manufacture we have several alternatives. One possibility is to cast some components; another possibility is to fabricate these components by welding. The material would be stainless steel. The design is not fully completed and help from engineering consultants will probably be required to finalize the design and to write the specifications for the calls for tender for these components in mid 1976. This structure (see TABLE IV) looks

TABLE IV

MECHANICAL STRUCTURE

Basic concept of the design

Shell structure: optimum design to get the smallest deflections with a light structure

Additional requirements

- 1-Free expansion of coils
- 2-Accesses to the coils and the vacuum vessel
- 3-Electrical insulation

rather simple but the design is complicated by additional requirements. The first requirement is to let the coils expand freely inside the structure. Due to the mechanical stresses and also due to the temperature rises the coils expand by several millimetres, for instance 6 millimetres in the vertical direction and therefore each coil must slide against the supports. These supports must provide a low friction factor coefficient and at the same time a good strength against the compression stresses. The second requirement is that accesses towards the coils and towards the vacuum vessel are required. These accesses are required for instance for the coil terminals, the cooling pipes and also for the vacuum ports for pumping and diagnostics. This means that the shell structure cannot be a closed one but has many holes. It has been necessary to make very careful computations of the mechanical structure to make sure that this shell was stiff enough even with so many holes. The third requirement which is the last one but the most difficult to meet is the electrical insulation. This machine operates like a transformer, the plasma being the secondary of the transformer. Therefore voltages up to 100 or 200 volts are induced along the torus and the mechanical structure has to include insulated gaps in order not to short-circuit the plasma. This is a major difficulty because very large forces and high stresses have to be transmitted through insulating materials.

III. THE PROBLEMS OF ASSEMBLY, MAINTENANCE AND REMOTE HANDLING

The problems of remote handling arise when the machine has been activated by deuterium-tritium discharges and the activity which results from these discharges will prevent the personnel from approaching the machine. In these conditions all repairs or modifications have to be performed remotely. As it is virtually impossible to foresee all the operations which may be necessary we have tried to design a remote handling scheme which is as flexible and as versatile as possible. For this we envisage the use of tele-manipulators which are operated via closed-circuit television. The scheme of TABLE V shows the basic

TABLE V
BASIC REMOTE OPERATIONS
1 - Minor repairs or modifications

Manipulators + TV

2 - Replacement of parts of the machine

- * Dismantling of faulty components
- * Assembly of new components
- * Storage of faulty components or repairing (manipulator + direct viewing)

remote operations which are envisaged. First we envisage making minor repairs or modifications by using the tele-manipulators and the television system. We also envisage replacing parts of the machine and this involves the dismantling of faulty components; it also involves the assembly of new components, the storage of faulty components and if possible the repair of these faulty components. TABLE VI shows the basic equipment which

TABLE VI
BASIC EQUIPMENT FOR REMOTE HANDLING
1) Positioning device

Telescope boom supported by a crane

2) Manipulators + TV

2 types are envisaged

- Force reflecting servo manipulator
- On-off type manipulator

3) Special purpose tools

to be used by the manipulator to perform various operation

is needed for remote handling. This basic equipment is composed first of a positioning device, which is a telescopic boom supported by a crane. Second, and this is the essential part of the remote handling equipment, the tele-manipulator. We envisage using two types of tele-manipulators. First a force reflecting servo-manipulator, which is a rather light duty device. It can handle roughly 20 kg but it is capable of carrying out tasks which require a very high degree of dexterity because this device gives the operator the feeling of doing the work because of the force reflecting system. The other manipulator, the on/off type manipulator is a medium duty device which can handle approximately 100 kg and will be used to handle fairly heavy tools or components while the precise positioning of these components will be done by the force reflecting servo-manipulator. With these two servo-manipulators we also have to use a television system (a closed circuit television system) which will provide the operator with the visual information. Third, the equipment will include special purpose

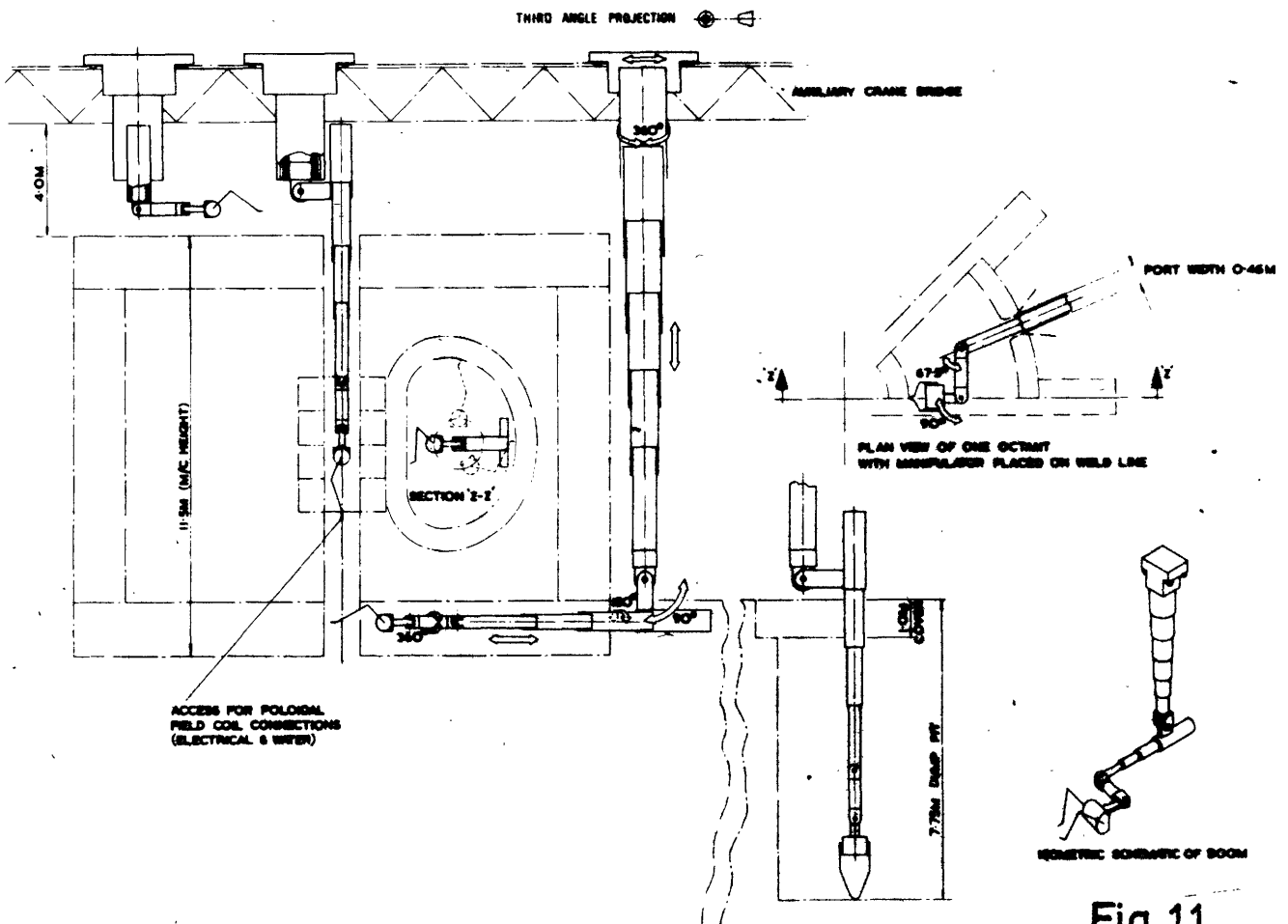
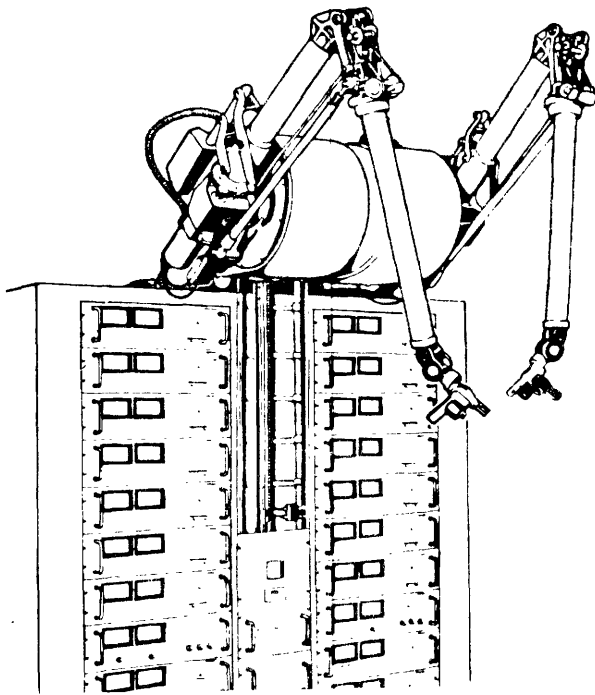


Fig.11

tools which have to be used by the manipulator to perform various operations, for instance, these tools could be welding trolleys, or cutting trolleys to weld or cut remotely the vacuum chamber. Fig. 11 shows the telescopic boom which supports the tele-manipulator. The telescopic boom is designed to position the manipulator in the various parts of the machine including the inside of the vacuum vessel. This is a very large piece of equipment which requires a high degree of precision machining. Fig. 12 shows one type of force-reflecting



MASTER

located
in the
remote control room

SLAVE

positioned in
the torus hall
or
the storage hall
by crane and telescopic boom

weight	160 kg
upperarm length	0.7 m
forearm length	0.9 m
lifting capacity (each arm)	20 kg

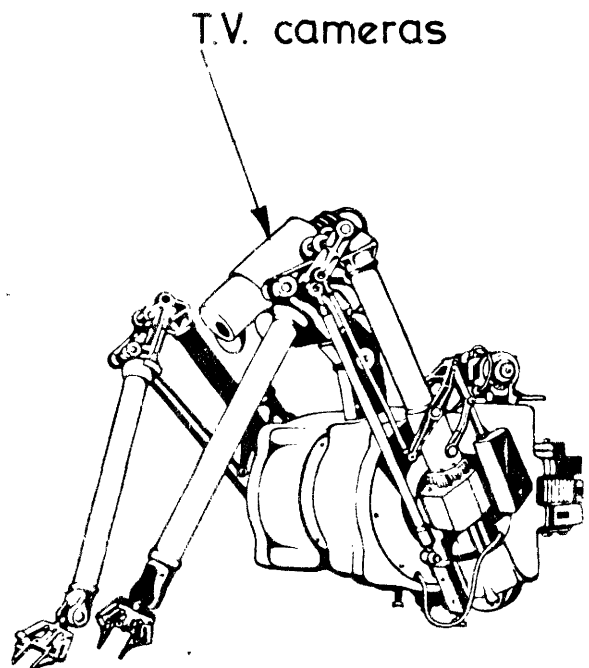


Fig.12

servo-manipulator which is composed of two elements - the Master and the Slave which is in the hot area. Some remote handling tests have already been carried out to assess that the major operations which have to be done remotely for JET can really be performed. Fig. 13 shows the servo-manipulator which

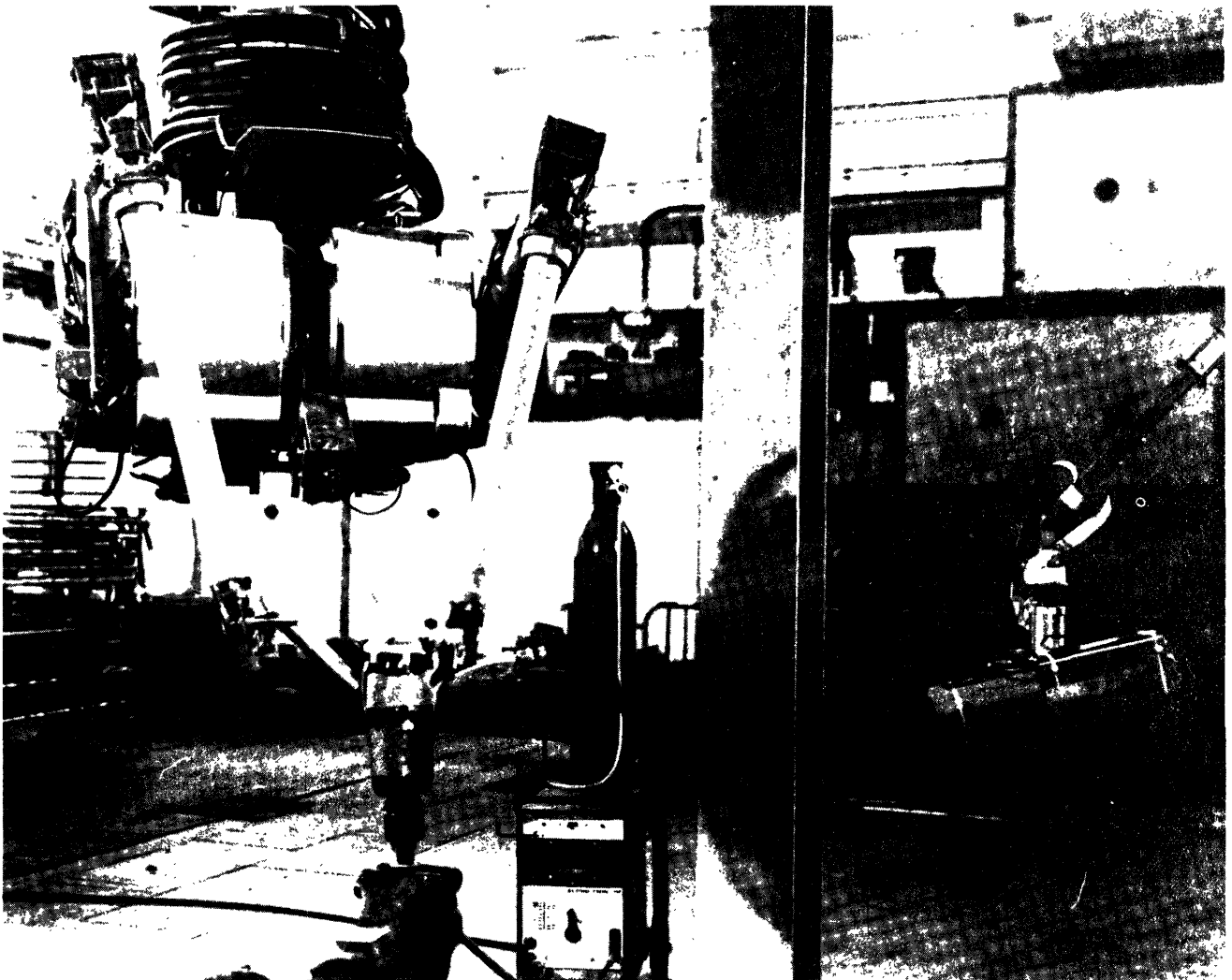


Fig. 13

is handling a pneumatic wrench with a capacity of 80 kg m. Fig. 14 shows an operation which is probably the most difficult of remote operations: this is remote welding. We have found that continuous remote welding, is very difficult because of the problem of viewing. The TV cameras do not give good enough accuracy and they do not give the stereo-scopic viewing which is required. We have solved this difficulty by overlapping spot welds after careful adjustment of the position of the torch.



Fig. 14

2.4 D. L. SMART - JET Design Team
 Culham Laboratory
 THE JET POLOIDAL FIELD SYSTEM

In the JET a plasma ring forms the single turn secondary winding of the transformer. The poloidal field system is shown in

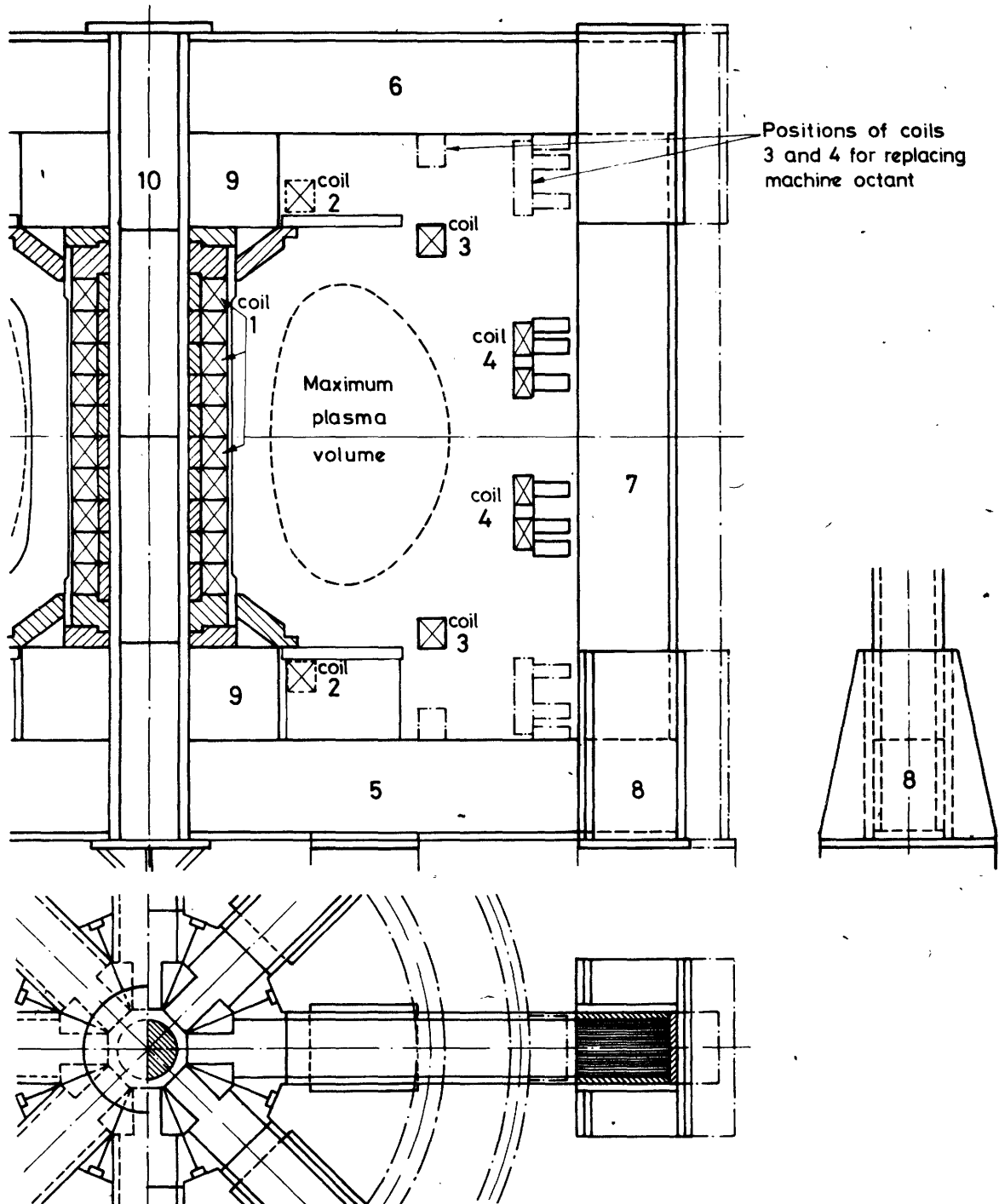


Fig.1 General Arrangement of the Poloidal Field System

fig 1 and consists of the magnetic circuit of the transformer, the primary windings consisting of the coils marked 1, 2, 3, and 4 and the external power supplies to feed these circuits. The purpose of the poloidal system is to set up the plasma current and maintain it at its peak value for the required time and to control the position of the plasma current within the torus.

Operation and Electromagnetic Design

If we now look at fig. 2, this shows a typical sequence of operation. Looking at the 2 top graphs (fig. 2a and 2b), we see that the special feature of the JET transformer is that instead of having an alternating voltage and current the operating pulse in JET consists of a single half-cycle during which the flux change in the coil is always in the same direction and the voltage generated is always of the same polarity. In order to use the core to the greatest advantage we therefore start by Premagnetizing it so that the flux is at its maximum positive value (time period $t_{\text{prem}} = \sim 1.5$ secs). At this point we introduce the right pressure of gas into the torus and pre-ionise that so that we can obtain an easy breakdown of the gas. We then start the Fast Rise phase of current build-up, by a rapid reduction of the pre-magnetising flux in a period $t_f = \sim 100$ milliseconds. The resulting plasma current will be from $1\frac{1}{2}$ to 2 MA and the flux change of 6-10 volt-seconds is needed to overcome the resistance loss and self inductance of the plasma current. The next phase is the Slow Rise phase of plasma current in which it is raised to a maximum value of 3 or 4 MA in total time ($t_f + t_s$) in the order of 1 second, by means of a slower flux change. The current may then be maintained at its peak value (in the Flat-Top phase) by a further slower rate of change of flux for a period of perhaps between 3 and 20 seconds until the core flux reaches its maximum negative value and finally the current is reduced to zero. Fig. 2(c) shows the coil currents, which demonstrate a second special feature of the JET transformer; this is that the very small space available in the centre of the machine

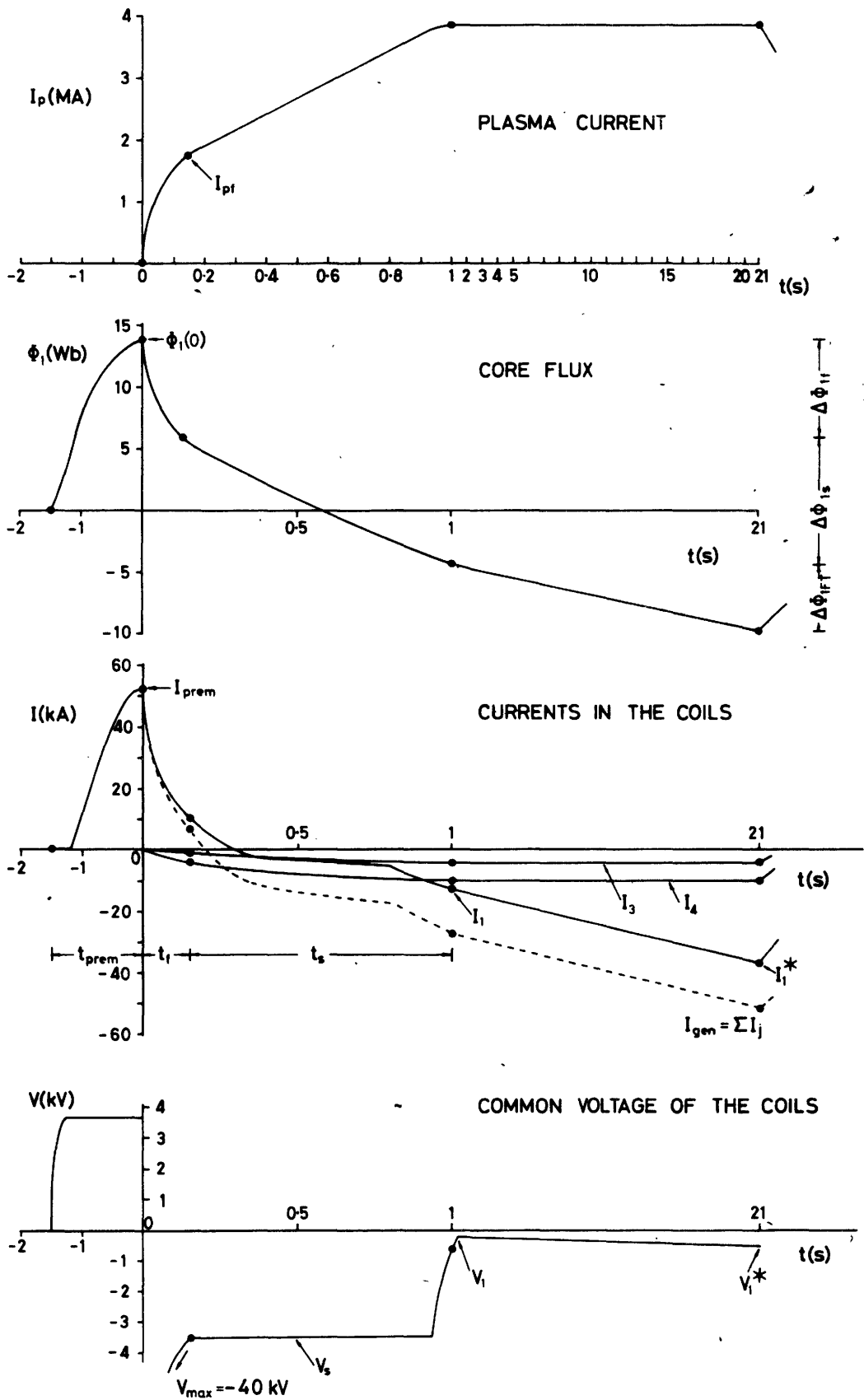


Fig.2 (a-d) Typical Currents, Core Flux, and Voltages in the Poloidal Field System

requires the use of magnetising flux densities in the centre part of the core of up to 3 or more times the normal saturation value for the steel. Thus for the major part of the flux swing, the centre part of the coil behaves more like an air-core transformer and requires very high magnetising currents of up to 15MA turns, most of which flows in the inner magnetising coils (coil 1), which immediately surround the central core. The premagnetising current (and voltage, fig. 2(d)) are provided by a fly-wheel motor alternator set with a rectifier, and the fast rise is achieved by rapidly reducing this primary current by switching resistors into circuit. The peak voltage of $\sim 40\text{kV}$ across the coils occurs in this phase, as shown in the bottom curve. This is a balanced voltage of ± 20 kilo-volts to earth across the 300 turn coil, or ~ 130 volts per turn. The outer windings 3 and 4 are connected in parallel with winding No. 1 and thus the same voltage is applied to each. Thus adjustment of the number of turns in circuit in windings 3 and 4 will alter their current and fluxes, and this gives us a control of the position and shape of the plasma. Fig 2(c) shows the currents in coils 3 and 4 rising in proportion to plasma current; a similar current flows in coil 1 but is overshadowed by the amount of magnetising current.

The slow rise and the flat-top phases are achieved by reconnecting the alternator and rectifier set with reverse polarity (V_s in fig. 2(d)) at this stage and fig. 2(c) also shows the increasing magnetising current as the core saturates in its new direction. Fig. 3 shows the type of computer-generated flux pattern which is used in analysing the poloidal field requirements. This particular pattern shows fluxes due to the plasma and primary currents and the corresponding magnetising flux for the so called D-shaped plasma in its equilibrium position. If we put more ampere-turns in the outer coils this will push the plasma towards the centre line and vice-versa. This pattern also shows the net vertical field flux which passes through the position of the toroidal field coil, and returns through the outer limbs of the core, and which is responsible for the twisting forces which appear on

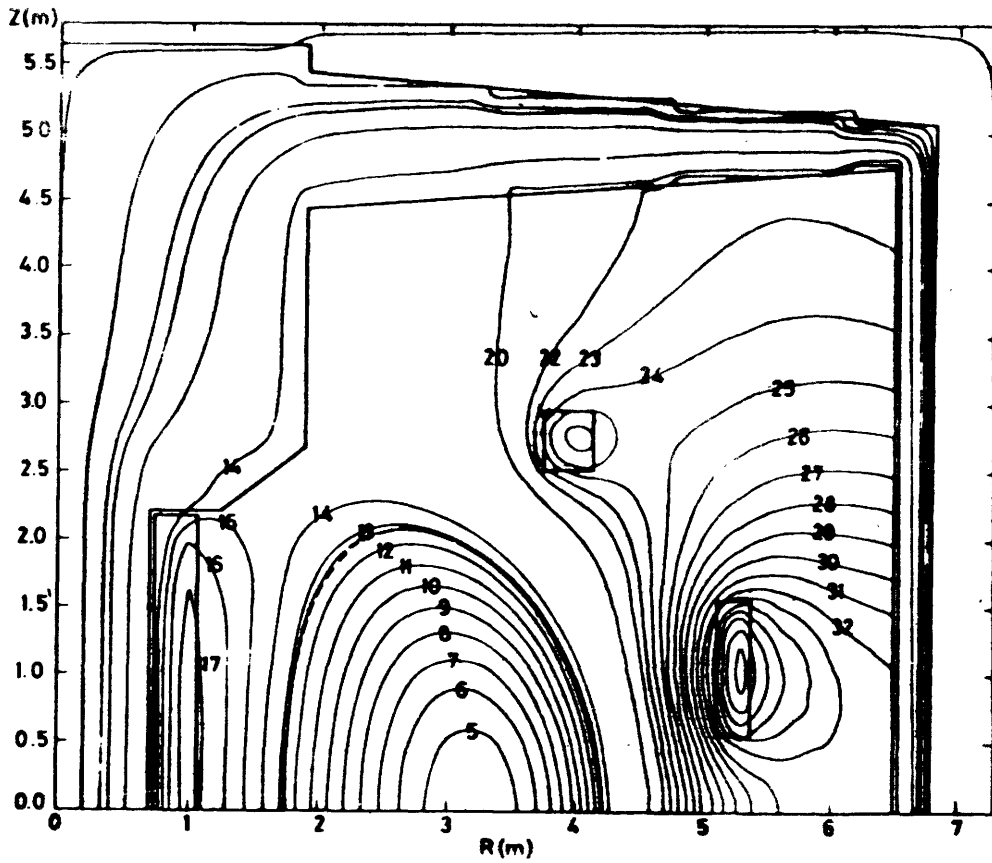


Fig. 3 Flux Contours, D-Shape Plasma, end of flat-top

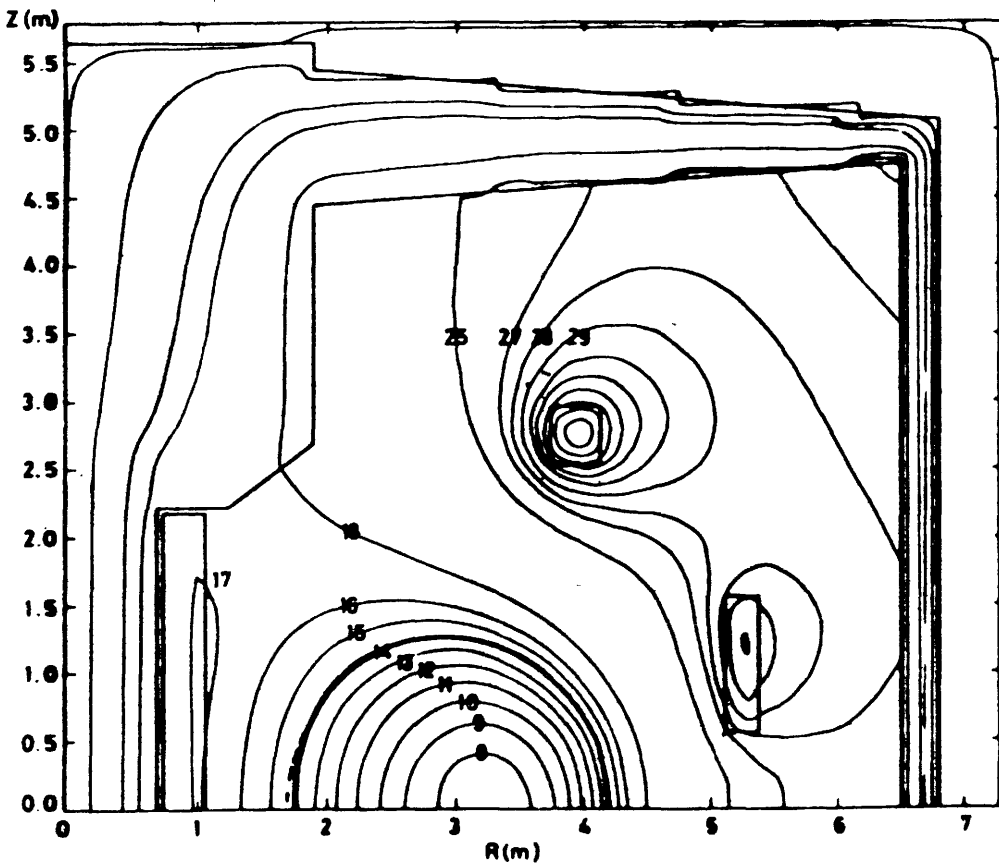


Fig. 4 Flux Contours, O-Shape Plasma, end of flat-top

the toroidal coils. Fig. 4 shows how a change in the turns ratio of coils 3 and 4, is expected to result in a circular plasma equilibrium by altering the currents and flux linkages.

Turning now to the practical design features of the system, fig. 1 shows how the No. 1 coil closely surrounds the part of the transformer core which can be highly saturated so that the currents in this coil can provide the magnetising force needed there. This arrangement results in the minimum generation of stray field to affect the plasma behaviour. All the parts of the core outside this coil are made of large enough cross-sections to avoid saturating the iron and thus avoid the even larger magnetising currents and energy which would be needed for a completely air-core machine. Fig. 1 also shows coil no. 2 at the top and bottom of the torus. A few turns of this coil may be included in series with coil 1 or coil 3, to give additional control of the plasma shape in the region of the top corner of the D.

Practical Design - The Magnetic Circuit

The transformer core construction has been the subject of two industrial design studies in both of which the design phase is now complete and the work has moved on to consider the more detailed questions of manufacturing costs. The parts of the core are very large; for example the outer vertical limbs are about 8 metres long and 1 by 1½ metres cross-section and weigh about 100 t each. The parts also have much slower flux change than in a conventional power transformer and it is not yet clear whether the most economic result may be obtained by building the core of thin laminations using existing transformer manufacturing expertise or whether we should go to laminations which may be up to 5mm thick using manufacturing methods appropriate to general steel construction work. Great care must obviously be taken in the detailed design of the central joints which hold the radial limbs together at the top and bottom of the machine, of the foundation arrangements underneath the radial limbs (which must carry the whole weight of the machine ~3000t), and also of the vertical limbs and outer joints. The joints at the top of the vertical limbs must allow small movement and some tilt of the top radial arms to allow for

assembly tolerances of the machine and also for the expansion of the inner coils due to their temperature rise in operation. The vertical limbs do not have any specific strong forces applied to them in the operation of the machine but must obviously be supported strongly enough to avoid any problems due to them being knocked during assembly or due to fault conditions which may arise in the machine. The limbs therefore have substantial feet and sufficiently strong outer plates on at least three sides of the laminations to resist these forces. When the two industrial design studies are completed, we hope to be in a position to issue a specification and call for tenders for the manufacture of the core, based on the results obtained, by about April 1976.

The Poloidal Coils

The design and manufacture of the poloidal coils are also at present the subject of industrial design studies. Fig. 5 shows a possible construction of the inner (type 1) coils. Twelve identical coils are proposed to allow series production, each consisting of a multi-layer coil of large (about 20 cm²) water cooled conductors of hard copper of a total weight of about 5t per coil. The insulation is by a vacuum-impregnated epoxy/glass-fibre insulating system. These coils have to withstand relatively severe mechanical stresses consisting of an axial compressive force of up to 4,500t due to the maximum premagnetising current, giving a compressive stress on the surface of up to 2.5 Kg/mm², and also the very large radial compressive forces which Dr Huguet has mentioned, resulting from the toroidal field system, applying a maximum stress of up to 3Kg/mm² on the external cylindrical surface of the coils. There is a steel support cylinder inside the coils to enable them to resist this radial force with an adequate safety margin. The problems which therefore have to be studied in these coils are a complex stress analysis, the selection of a suitable insulating system and details of a suitable manufacturing procedure. The electrical and water connections are all brought out to the inside of the coil, and are led vertically from there to the bottom of the machine through the annular space between the

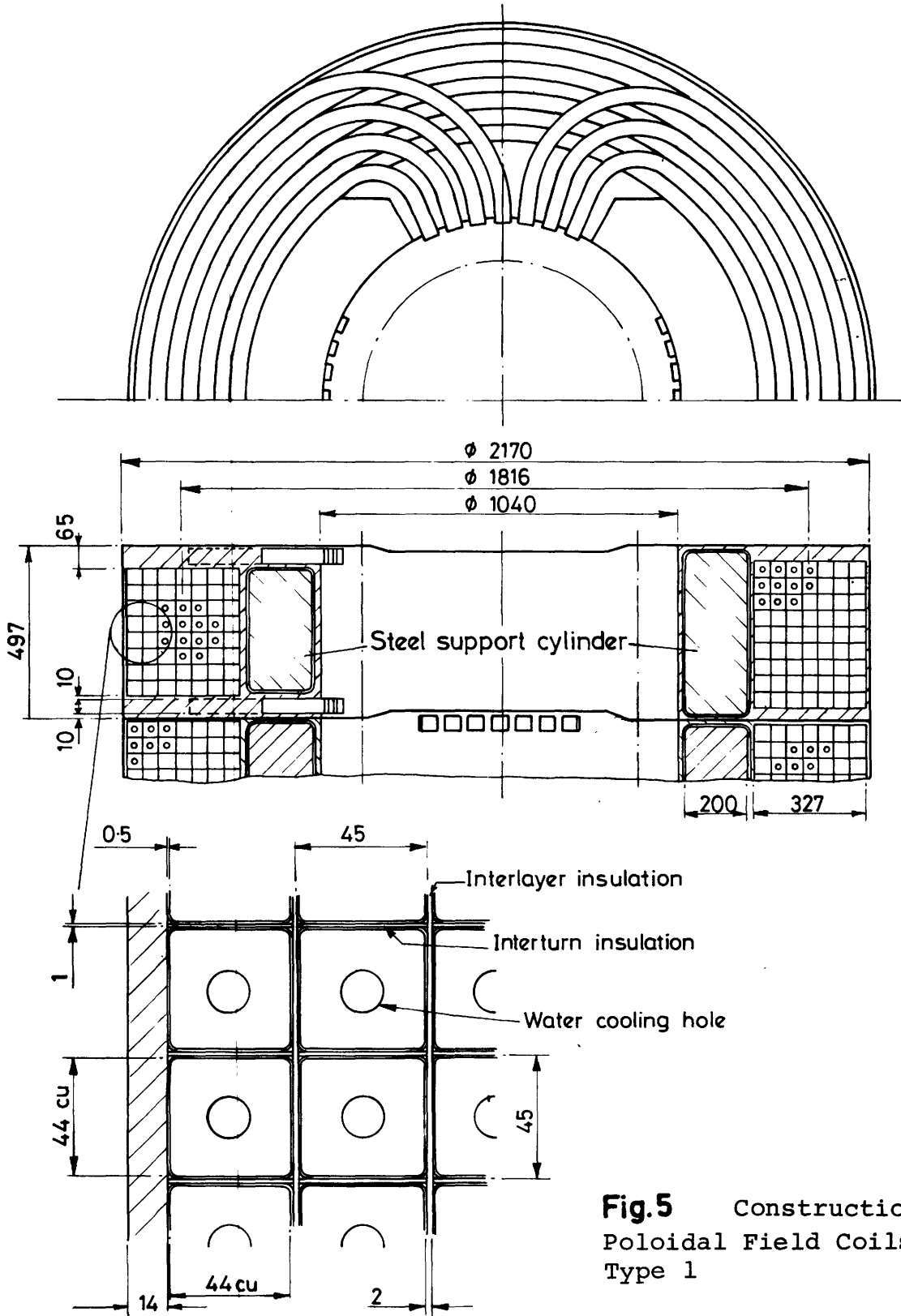


Fig.5 Construction of Poloidal Field Coils Type 1

steel support cylinder and an inner steel cylinder which forms part of the magnetic circuit.

Coil number 2 is a comparatively simple coil, about 4½m in diameter. Each coil amounts to 10t of copper but will probably be made as four separate "pancakes" of 2½t each.

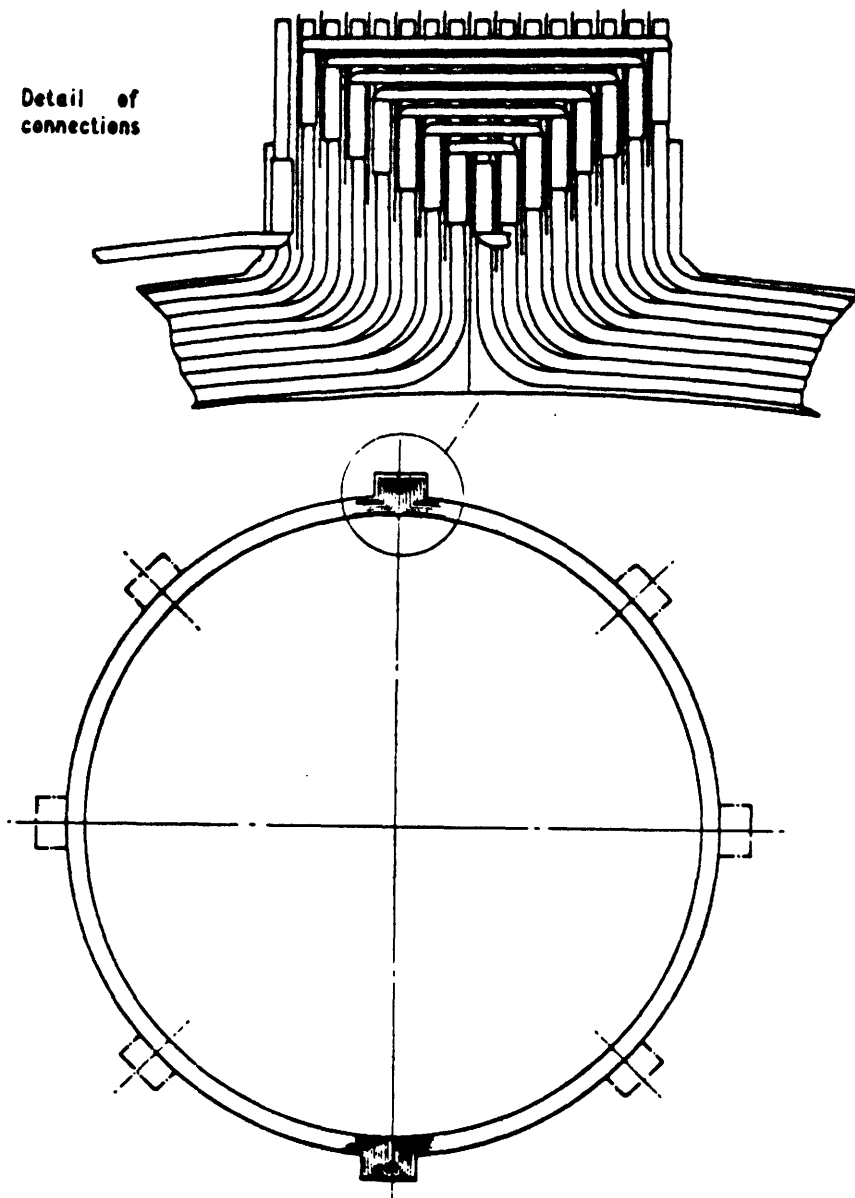


Fig. 6 General Construction of Poloidal Field Coils Type 4

Fig. 6 illustrates the principle of construction of the outer coils numbers 3 and 4. Here there is no problem of mechanical stresses but the coils are 8m and 10½m in diameter and are too large for transport as complete coils. This design, which again is suggested to allow for easy series production, consists of separate 180 degree half-pancakes connected together by clamped joints. The complete coils will be built up by a number of pancakes with the joint positions moved round the coil by 45 degrees for each pancake. This construction also allows for easier adjustment in the number of turns in use in the coils and makes it possible to repair a coil by replacing a half-pancake without dismantling the main JET torus and

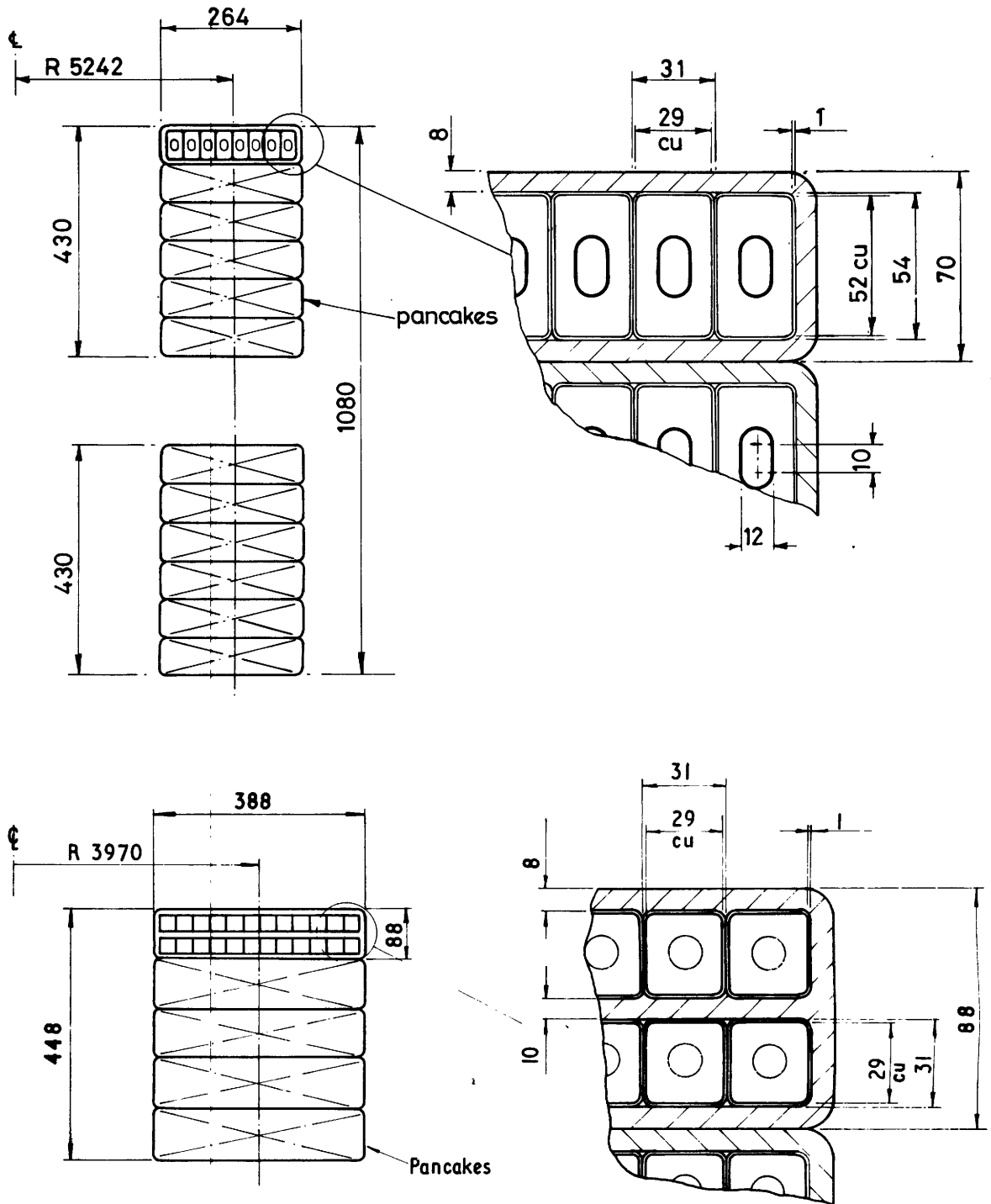


Fig. 7 (a) Cross-sections of Coil 4

Fig. 7(b) Cross-sections of Coil 3

mechanical structure. Fig. 7(a) shows a cross section of one of the type 4 coils which is made of 12 pancakes each of 8 turns. The total weight of both number 4 coils will be about 70t. Fig. 7(b) shows a similar cross section for the number 3 coil which consists of five 24 turn pancakes; the total weight of the two number 3 coils will be about 40t of copper. Tests on individual clamped connections and on a full-sized model of the complete joint between the two half pancakes, are now being arranged in order to prove the electrical insulation designs and the life and reliability of the connections. If we keep to our present programme we expect to issue a call for tenders for the manufacture of the type 3 and 4 coils in March or April 1976 and perhaps for the type 1 and 2 coils about June.

The Poloidal Power Supply

An outline diagram of the Poloidal Power Supply is shown in Fig. 8. Time will only allow me to give a list of the main components and a very brief description of their functions and of the present status of our design studies. At the left hand end of the diagram is the fly-wheel motor alternator set which we expect to be of the same electrical design and output as the generator for the toroidal field coil supply which will be described later by Dr Bertolini. For basic performance we require a peak rectifier output voltage of about 5kVDC and a peak current of 67 kA for a few seconds during the pulse. This output looks like >300 MVA; but we expect the most economical pulse-rated machine to have a high impedance characteristic with an actual peak power output of about 180MW. Thyristor rectifiers would give us the most desirable and rapid control characteristics but we can in principle use a diode rectifier if we get rather rapid field control on the machine, and we will probably be forced to use this solution by the question of cost.

The premagnetising circuit is set up through the rectifier, the two main circuit breakers S6 and the number 1 coil. The circuit breakers are each rated at 67kA peak and 23kV.

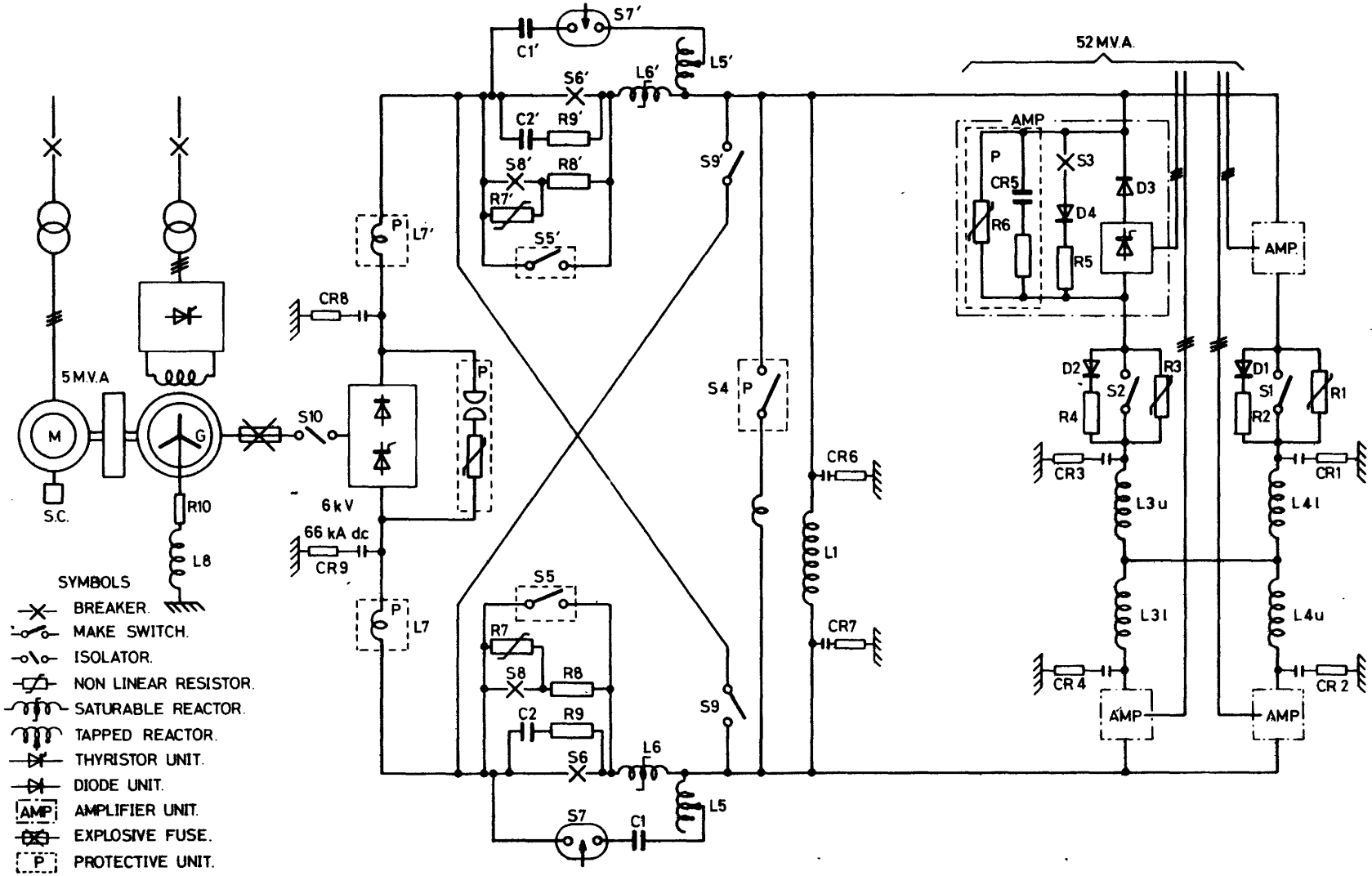
After they are opened their arcs are extinguished by the discharge of the capacitor banks C1, and they then divert the current into the main resistors R8. This rapidly reduces the primary current and gives us our initial fast rise of plasma current. The resistors are rated at about 120 MJ and although we would like to use a non-linear type of resistor here, such as a silicon-carbide resistor, we have not yet found a type which is reliable enough at reasonable cost. We will therefore probably use a metallic type of resistor and an additional circuit breaker, S8, to switch further resistors into circuit at the end of the fast rise.

As regards the circuit breakers we are having tests done in this mode of operation on a particular type of air-blast circuit breaker, and on a vacuum circuit breaker. Both types are characterised by high speed of operation and very accurate timing with mechanical jitter times of less than ± 0.25 ms, which is very desirable in this type of application. Although in some ways very attractive, vacuum switches have the disadvantage that several will be required in parallel for this duty and this may lead to severe problems with protection in case of faulty operation.

The switches S9 are closing switches only and are required for reconnecting the main rectifier to the circuit for the slow rise phase. The thyristor amplifiers shown in series with the numbers 3 and 4 coils will have a total installed rating of around 50MW and form part of the feed-back control loop for controlling the plasma position and shape during the flat top phase of operation. The various other resistors and switches in this part of the circuit are intended to give suitable control to the currents during the premagnetising and current rise phases and there are also a number of components in various parts of the circuit which are required for protection against possible faults. We expect to issue enquiries for the study and development or for manufacture of these remaining components over the next 18 months. The sequence of this work will depend on whether commercial items are already available, and the expected manufacturing time for each component.

Fig. 8

Schematic Circuit of Poloidal Field Power Supplies



Additional circuits which are not shown on this diagram will be installed to give the possibility of the fast radial compression of the plasma when it is carrying a current of about 1MA. This circuit will use an external 30MJ inductive energy store, probably switched by two vacuum circuit breakers in series, and its function is to create a sudden rise in the current in the outer coils number 4, in a period of between 50 and 100 milliseconds.

2.5 E. BERTOLINI - JET Design Team
Culham Laboratory

THE JET LOADS AND POWER SUPPLY SYSTEM

1. The total power to be supplied to the JET is of the same order of magnitude as the peak power required by the TOKAMAKS already in operation or to be operated in the near future (hundreds of MW), while the total energy associated with each pulse is between one and two orders of magnitude greater (thousands of MJ).

This is due to the fact that JET is large in geometric dimensions and it is supposed to be operated for much longer times than the previous Tokamaks (tens of seconds).

2. The main electrical loads are:
 - 1) The toroidal field coils
 - 2) The poloidal field coils
 - 3) The poloidal field amplifiers
 - 4) The additional heating

These loads have to be supplied by DC current in pulses 30 - 60 seconds long every 5 - 10 minutes. In addition a continuous AC supply for auxiliaries (vacuum, cooling, laboratory equipment, cranes, etc.) is required, in the range of a few MW and they will be neglected in this talk.

A careful assessment of the JET requirements leads to the fundamental choice of considering conventional systems only, like flywheel-generator-rectifier systems and static systems, which are directly supplied by the mains through transformers and controlled rectifiers.

The JET will be operated at the beginning at the so-called BASIC PERFORMANCE (Total DC power required 400 - 500 MW) and later at the EXTENDED PERFORMANCE (Total DC power required 600 - 700 MW).

The Power Supplies should first be designed for the Basic Performance but suitable to be extended without too much delay, when required by the JET exploitation programme.

3. In the following figures the diagrams show the DC characteristics of each load versus time for the so-called JET Basic Performance (toroidal magnetic field $B_T = 2.77$ T, plasma current circular cross-section $I_p = 2.6$ MA; I_p D cross-section = 3.85 MA; 10 MW of Additional Heating to the plasma).

In the figures also the reactive power associated to each load is shown, but this is meaningful only for those loads taken directly from the H.V. line.

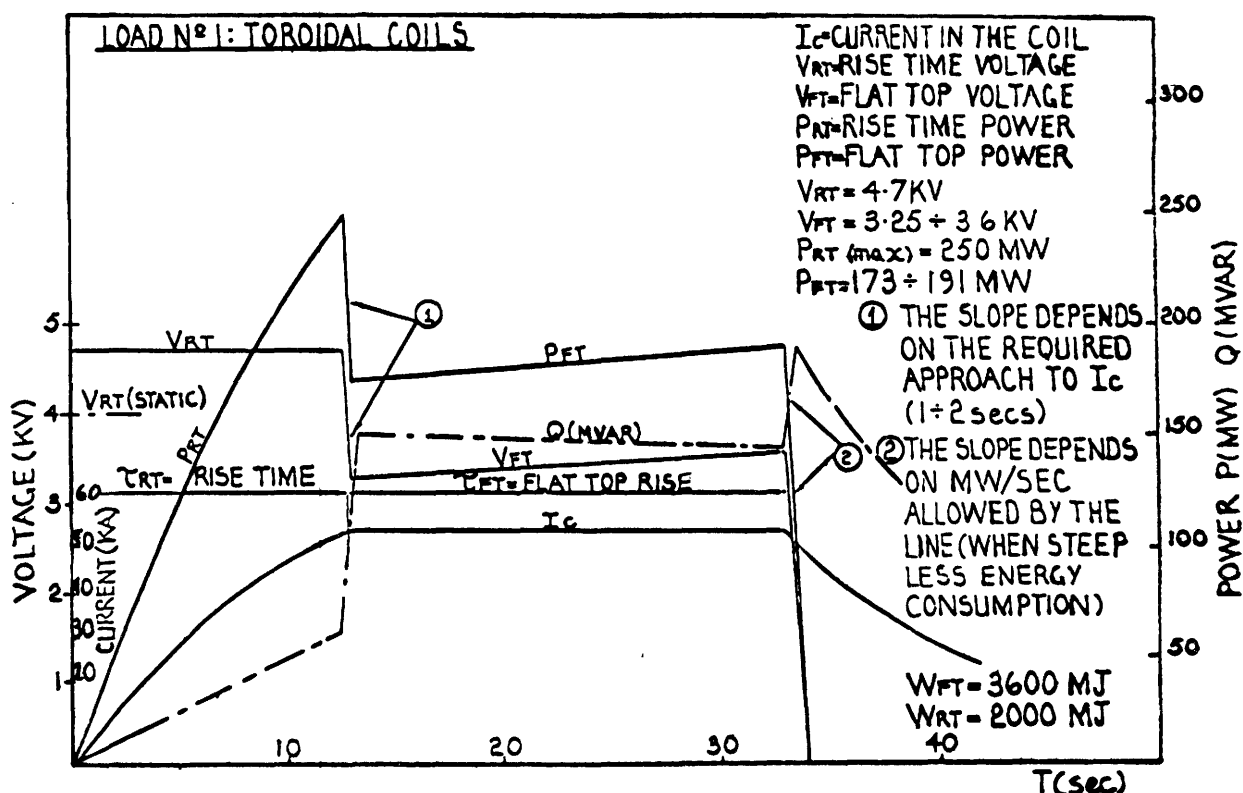


Fig. 1 Toroidal Magnetic Field D C Characteristics
 JET Basic Performance ($B_T = 2.77$ T)

The toroidal field coils (Load No.1) Fig. 1

The peak power required is 250 MW, while the flat top power (when the magnetic field has been established at its peak

required value) is about 180 MW average (this resistive power is slightly increasing during the flat top due to the heating of the coils).

Both the rise and the decay times of the field are not critical and the times shown (rise ~ 13 sec close to the time constant of the magnet and natural decay) are a reasonable compromise between peak power and overall energy required per pulse. The sharp peak of the reactive power Q at the end of the pulse is associated with the phase control of the rectifiers and it depends on how fast the active power P is taken to zero. The energy per pulse is about 5500 MJ and the load can be supplied either by F.W. Generator or from the mains as well.

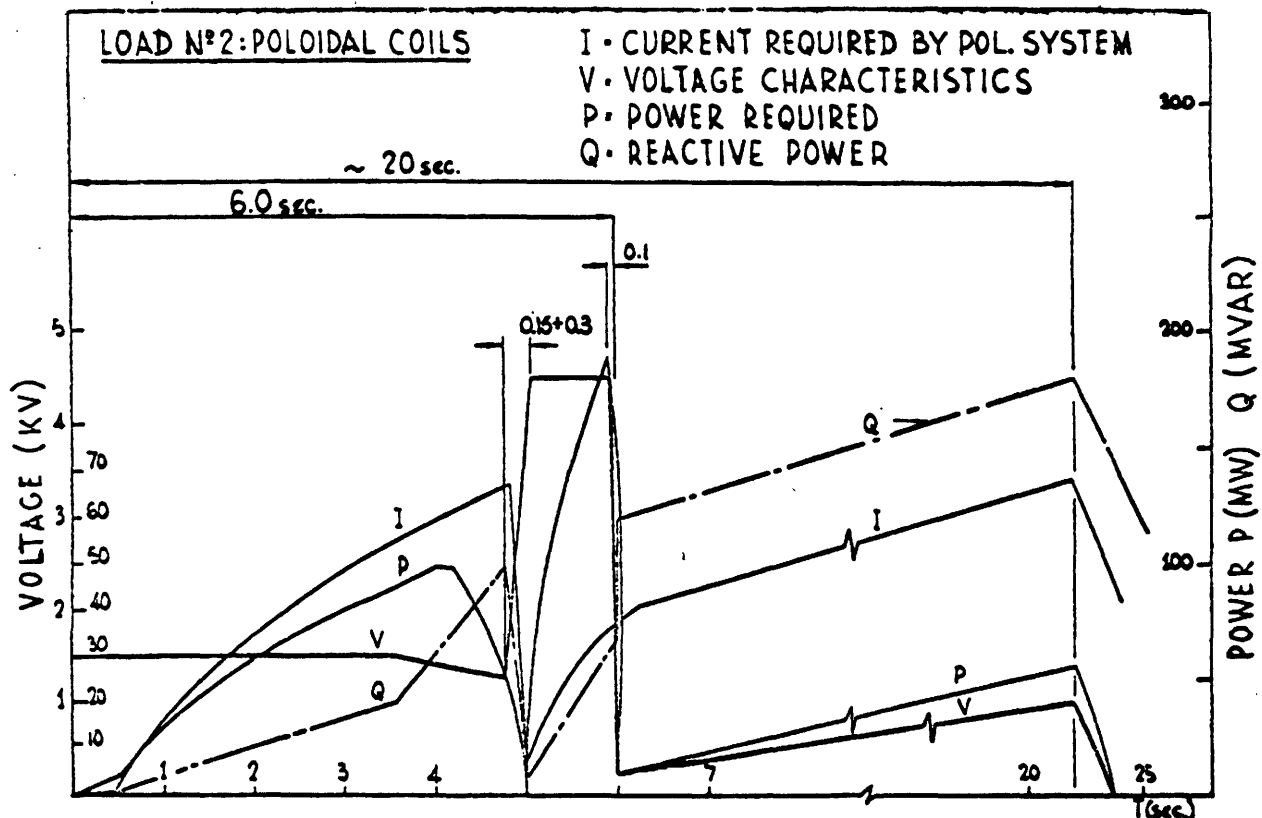


Fig. 2 Poloidal Magnetic Field Load D.C. Characteristics
JET Basic Performance (D - Shape, I max = 67 kA)

The poloidal field coils (Load No.2) Fig. 2

This pulse of power is more complicated than the one of

Load No. 1, owing to the fact that the poloidal system has two duties: to establish the plasma current and to control the plasma position (see Mr. D. Smart's talk). Various scenarios can be considered but the one shown in Fig. 2 is good enough for power supply design purposes, at this stage. The peak power is about 200 MW and the associated energy is about 500 MJ for basic performance. The load requires high power derivatives (hundreds of MW/sec.) which makes, basically, this load more suitable for a F.W. Generator unless a very powerful H.V. interconnecting point is available.

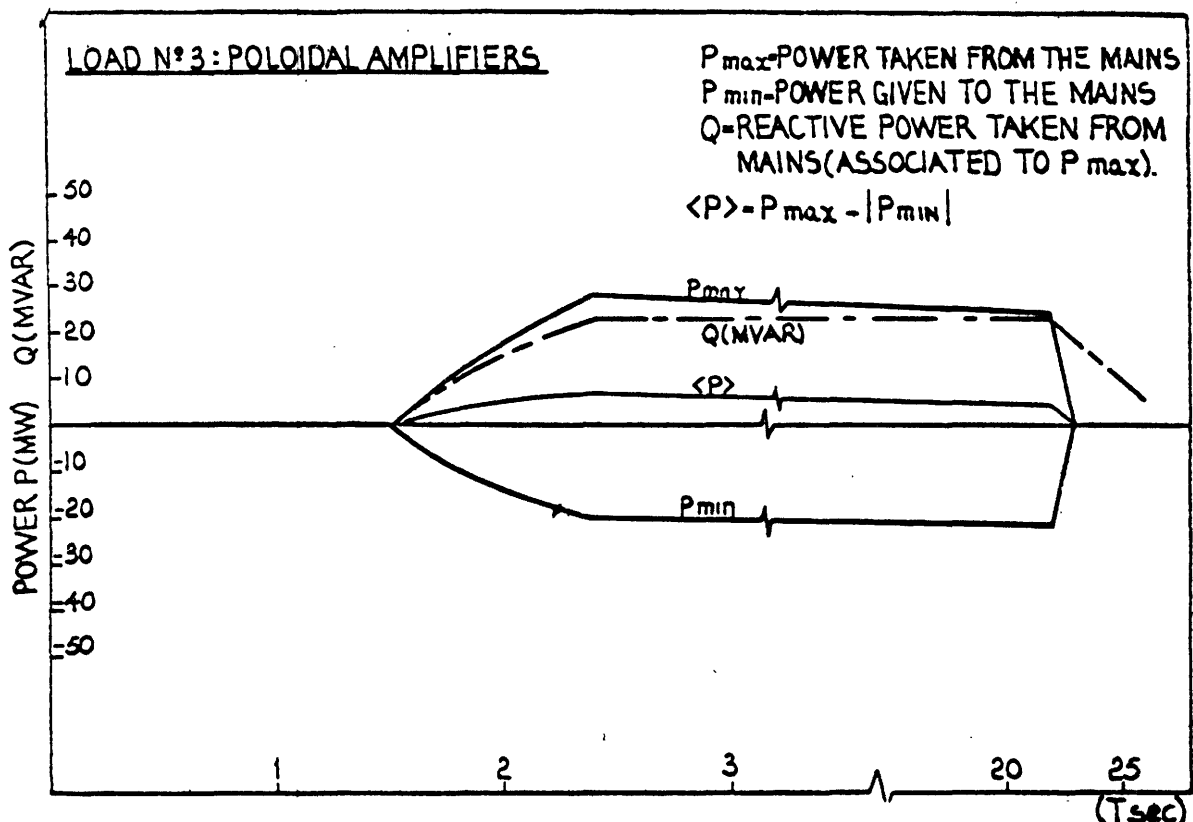


Fig. 3 Poloidal Magnetic Field Load Amplifiers D C Characteristics (T sec)
JET Basic Performance

The poloidal field amplifiers (Load No. 3) Fig. 3

In the poloidal field circuit there are rectifier controlled amplifiers connected in series with the equilibrium coils in order to have a fast control of the plasma position.

They should be able to increase or reduce the power to the coils and therefore the power might vary, with characteristic time higher than 1 sec between + 30 MW and - 20 MW for basic performance in random steps of typically 3 MW/100 sec. This load can be supplied either by a F.W. Generator or by the mains.

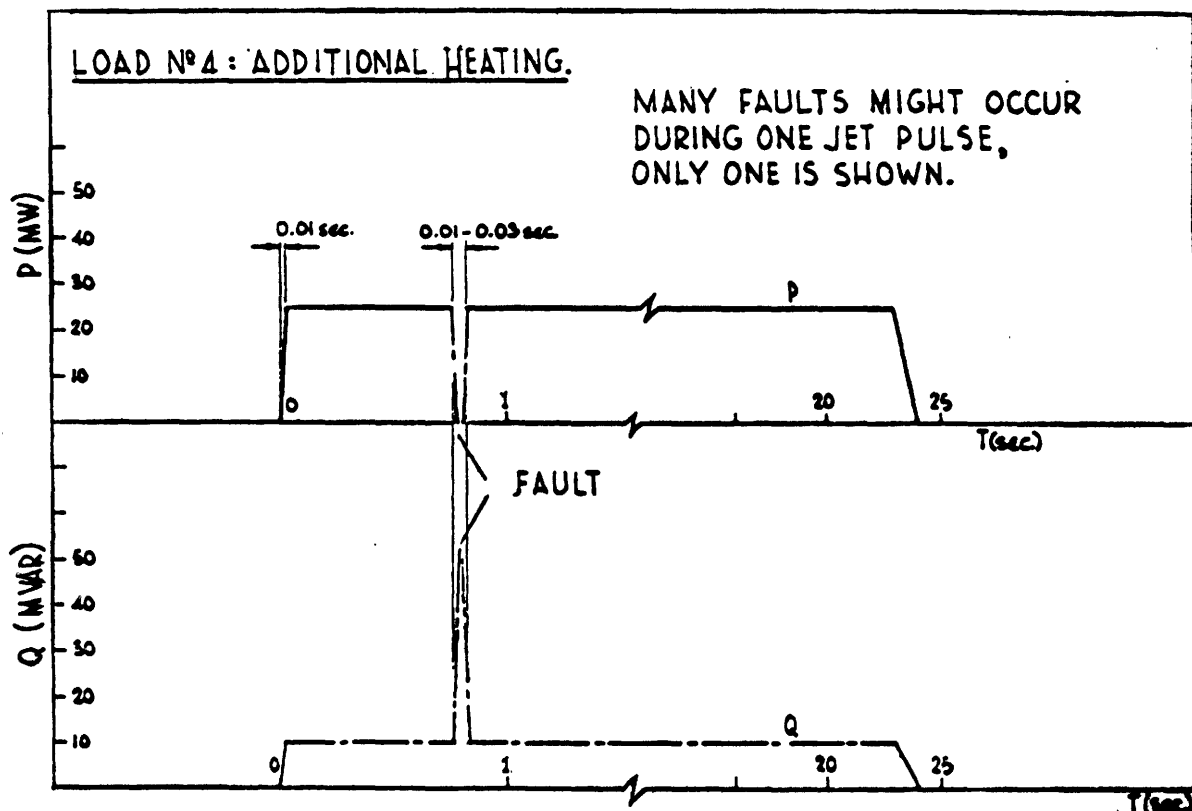


Fig. 4 Additional Heating Load - DC Characteristics
JET Basic Performance (D - Shape Pinj ~ 10 MW)

The additional heating (Load No. 4) Fig. 4

After the plasma current has been established the plasma temperature should be increased by one of the possible heating methods. When neutral injection is considered, repeated "faults" due to the injectors, are expected to occur in the system, i.e. the active power to one or more injectors goes to zero and the reactive power reaches a maximum; then the load is quickly re-established and the total time of the fault should be 0.01 - 0.03 sec. The peak power required to supply the whole injector system for the basic performance is 25 MW.

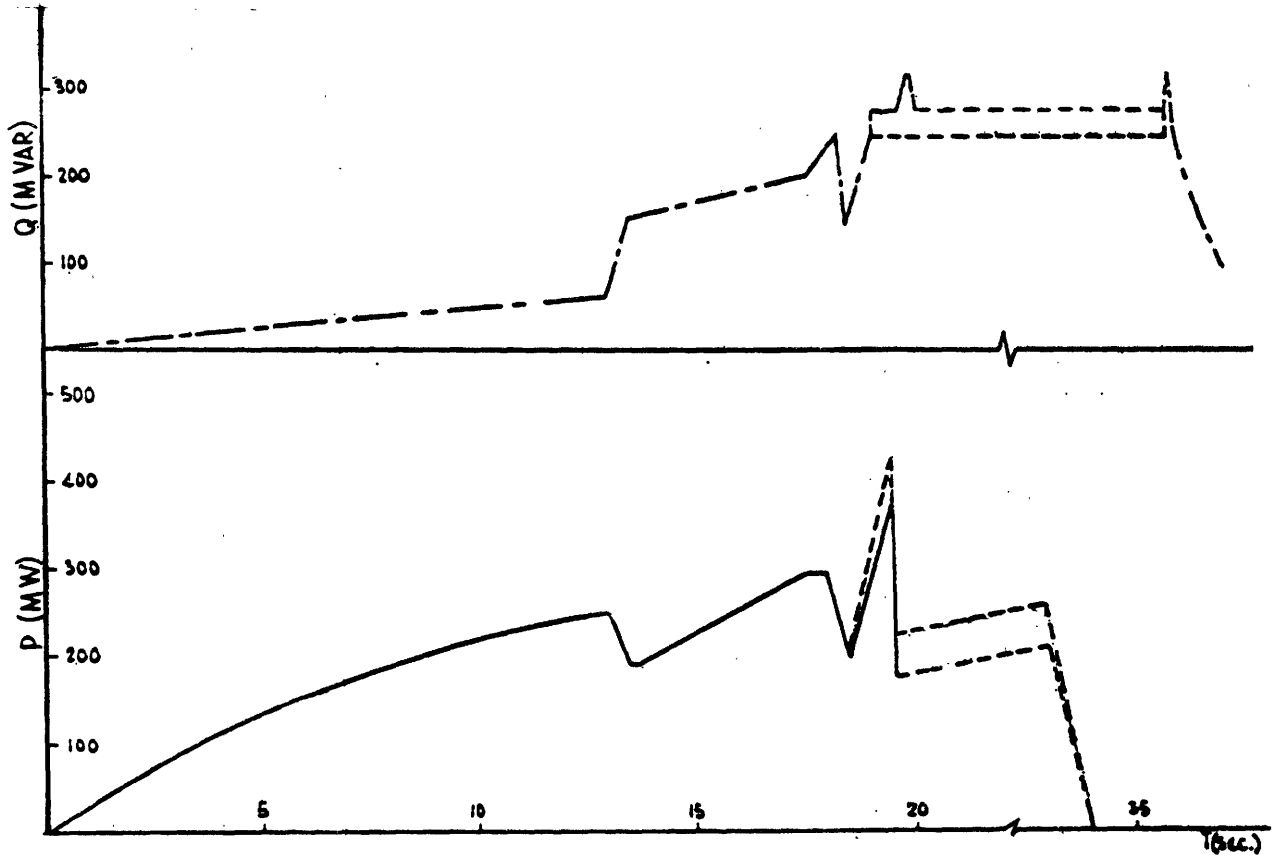


Fig. 5 Sum of Load Powers (JET Basic Performance)

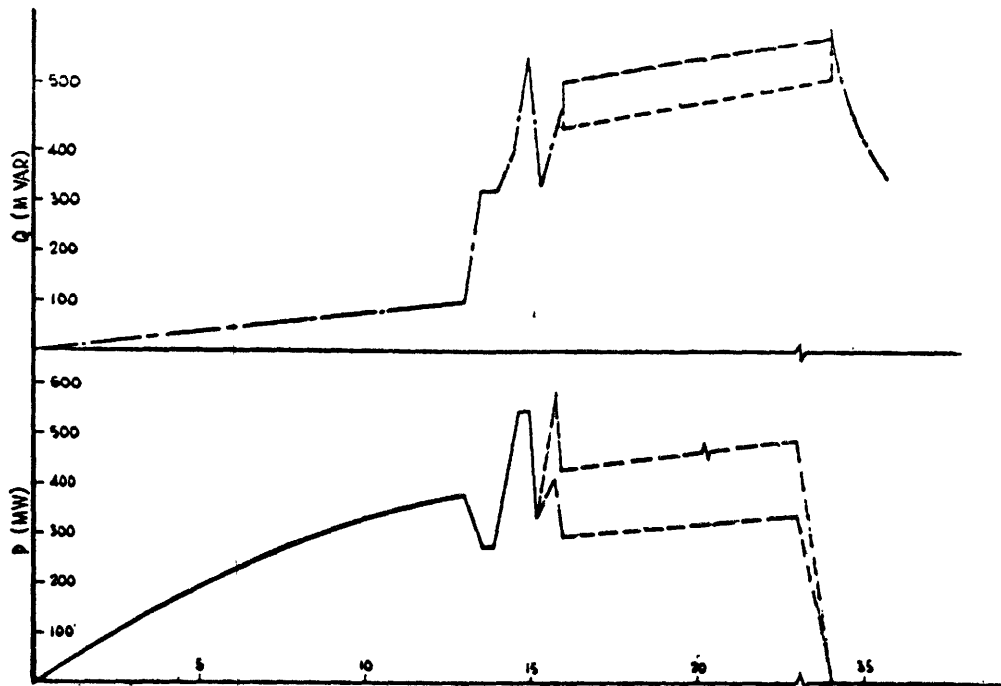


Fig. 6 Sum of Load Powers (JET Extended Performance)

The total pulse shape (Σ Loads 1,2,3,4) Fig.5, Fig. 6

Assuming that all the JET loads are taken from the same source (for example the H.V. line) the overall shape of the JET pulse is shown in Fig. 5 (Basic Performance).

A peak power of about 450 MW is required when the various loads enter at the proper time according to a typical JET operation (Loads 1,2,3,4 in sequence). The associated reactive power peak would be about 300 MVAR.

For JET Extended Performance Fig. 6 gives the overall JET pulse ($B_T = 3.45$ T, I_p shape = 4.8 MA, additional heating in the plasma 20 MW).

The peak power would be 600 MW and the associated reactive power would be 550 MVAR approximately.

4. The JET Power Supply Scheme

Taking into account the JET requirements (for power, energy and flexibility), the results of preliminary design and cost studies done in co-operation with the European industries and the characteristics of the H.V. line at the proposed sites, the scheme shown in Fig. 7 has been worked out. The study contracts were placed early in 1974 with CEM/BBC (France), GEC (Great Britain), Siemens (Germany) TIBB/ASGEN (Italy) following the usual JET rules (more than 10 industries, selected by the Partners, have received the call for tender).

The Power Supply system shown in Fig. 7 is a combined scheme where about 300 MW are taken directly from the mains (with about 70% of the energy) and the rest is taken from two identical Motor Flywheel Generator sets.

Part of Load No.1, Load No.3 and No.4 is taken from the network while part of Load No.1 and Load No.2 is taken from the generators.

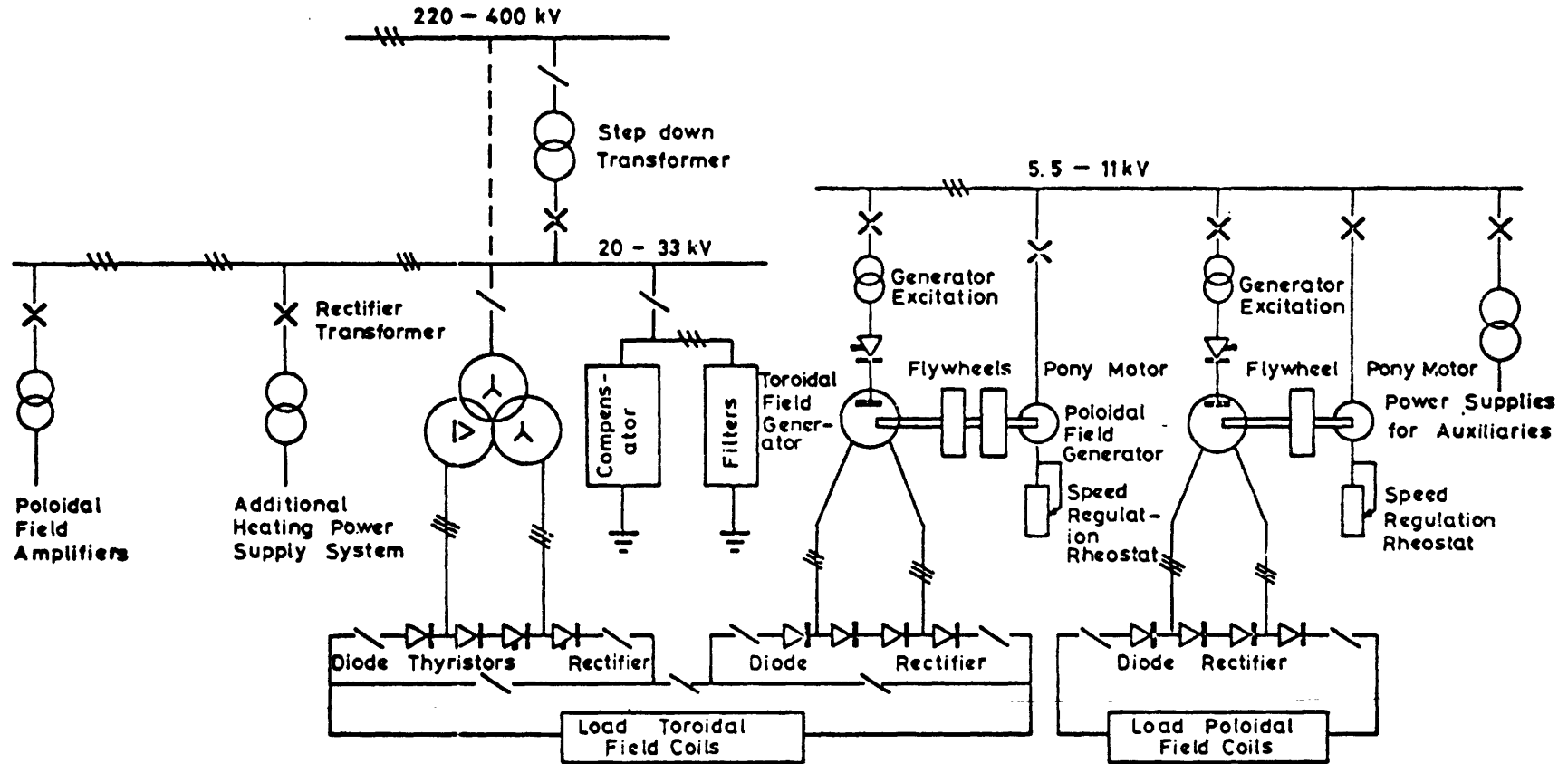


Fig. IV.7-4 JET Main Power Supply Scheme

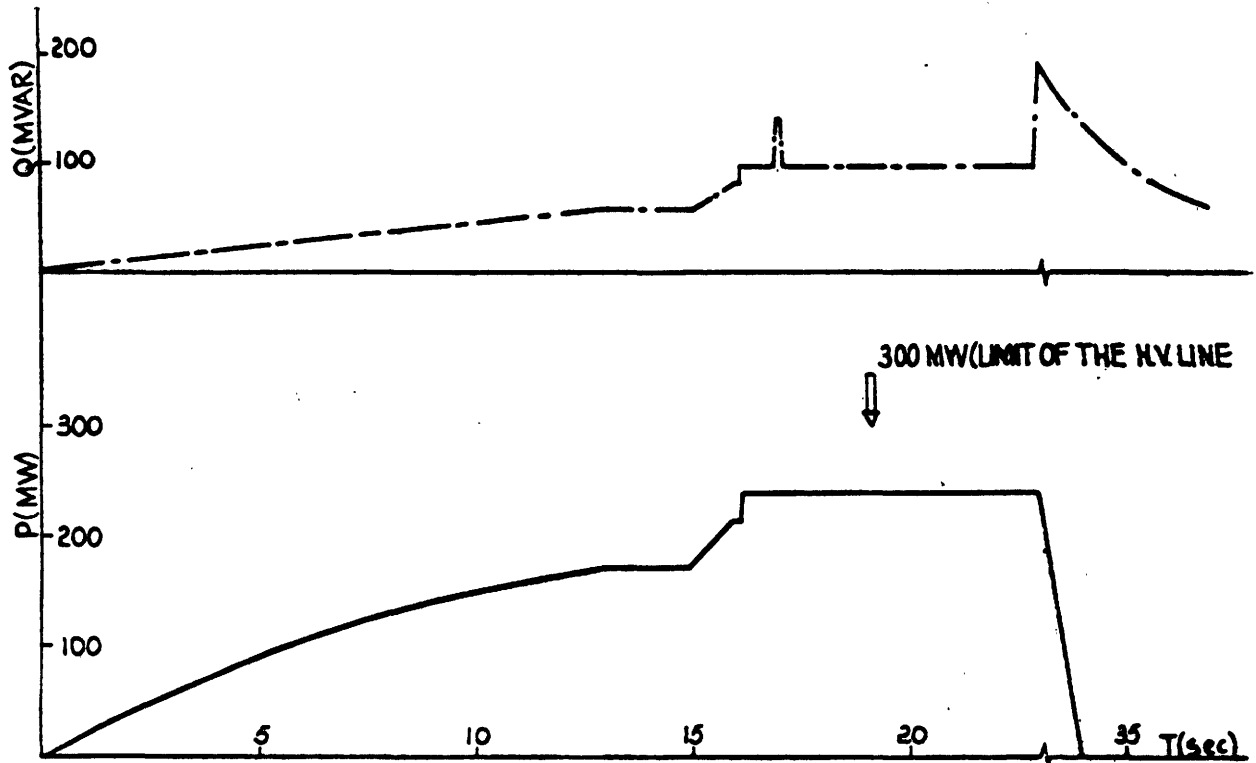


Fig. 7 Sum of Load Powers from the H.V. Line (Part of Fig. 1 + 3 + 4) JET Basic Performance

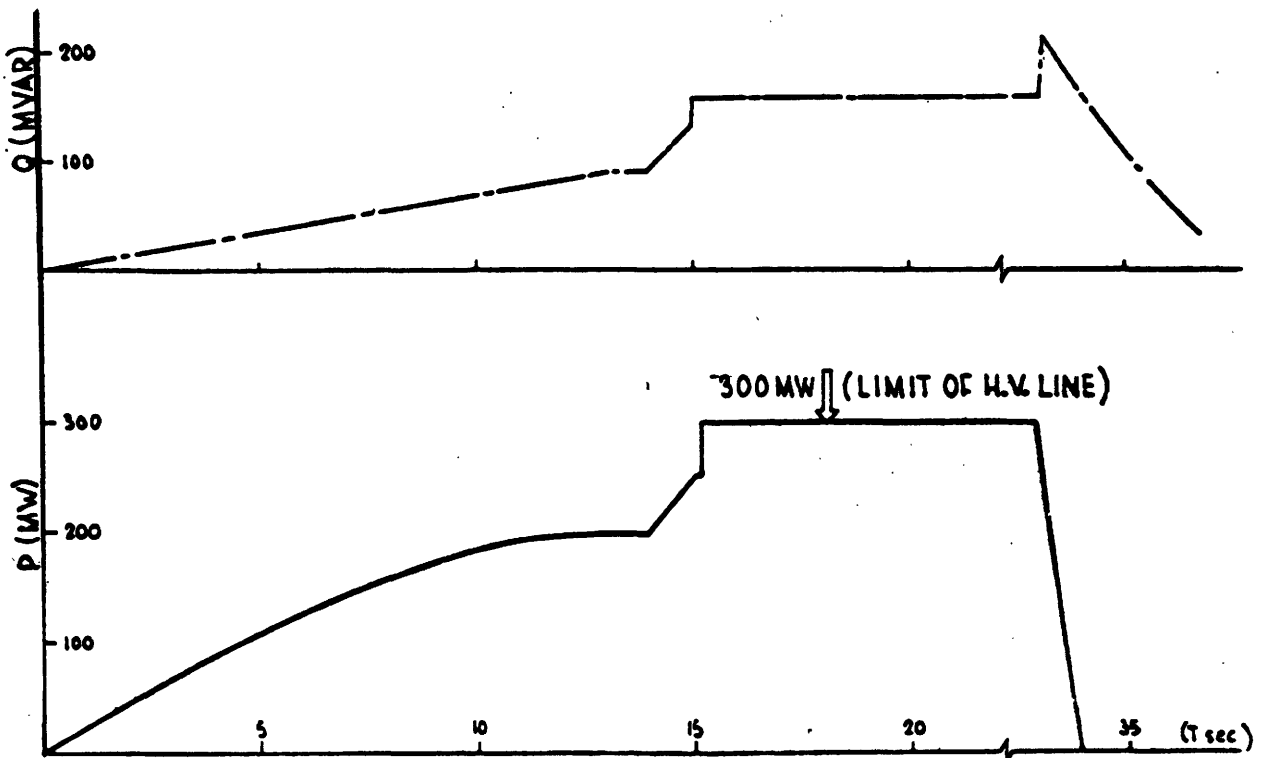


Fig. 8 Sum of Load Powers from H.V. Line (JET Extended Performance)

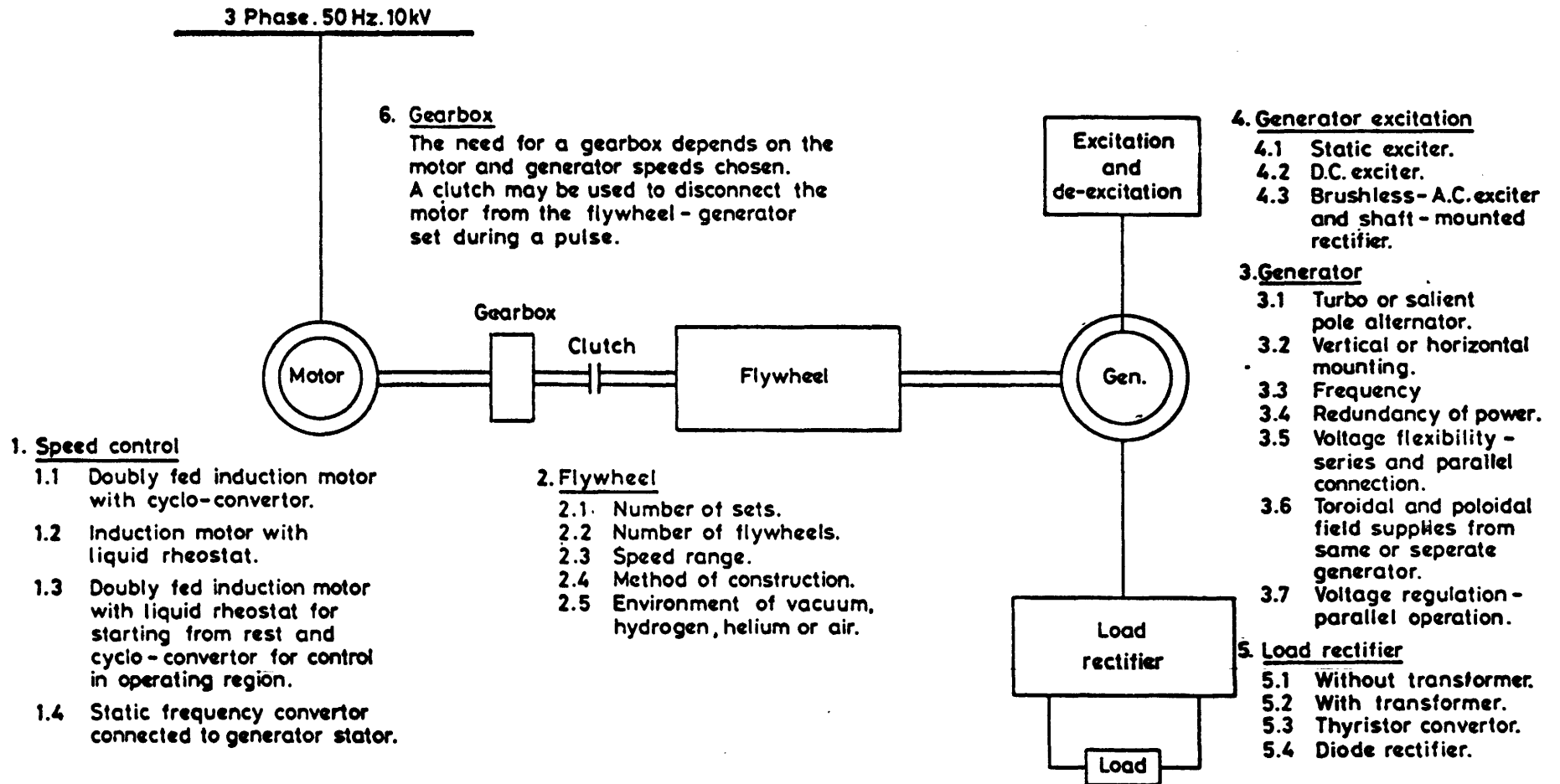


Fig. IV.7-1 Variations in Rotating Systems

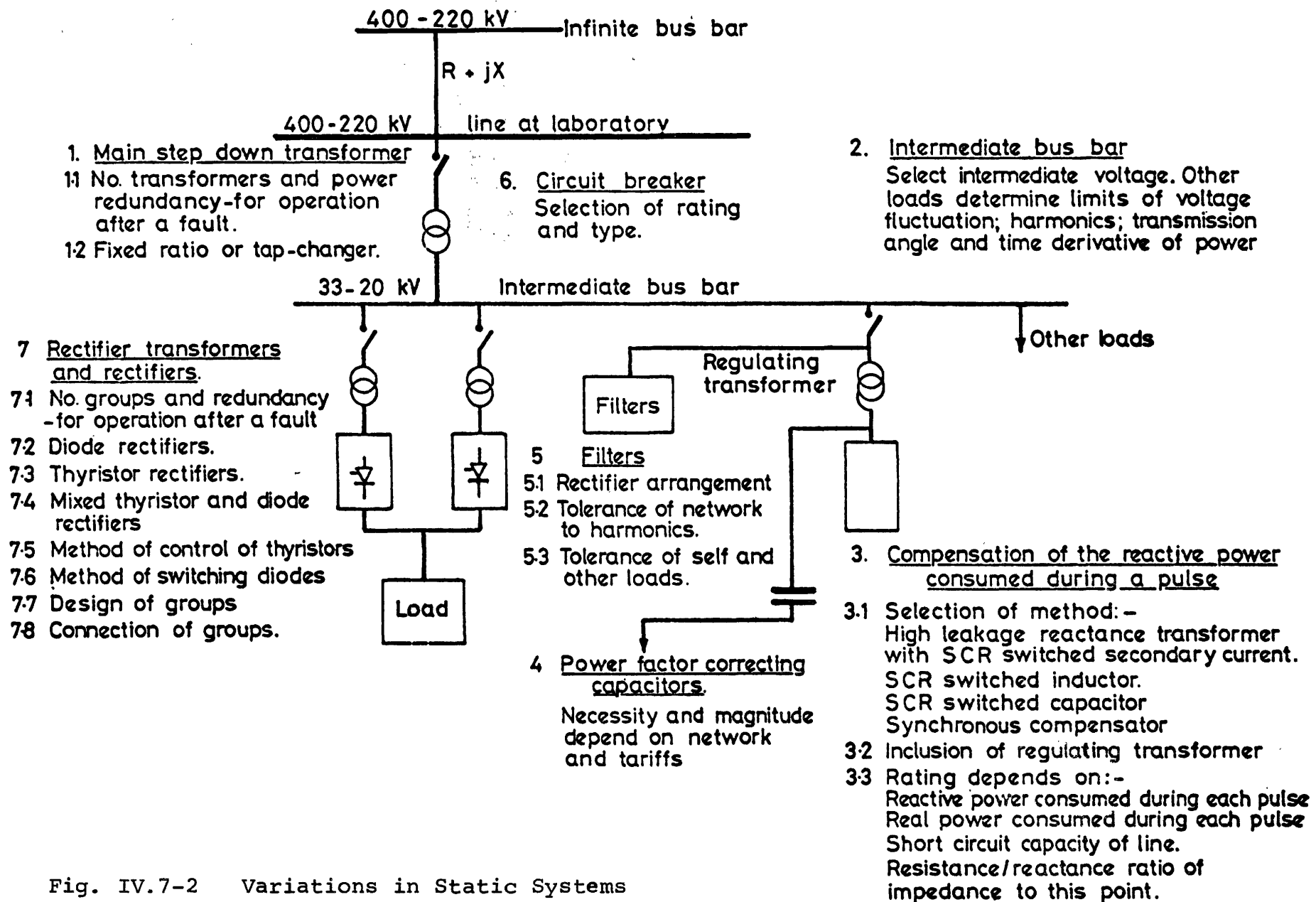


Fig. IV.7-2 Variations in Static Systems

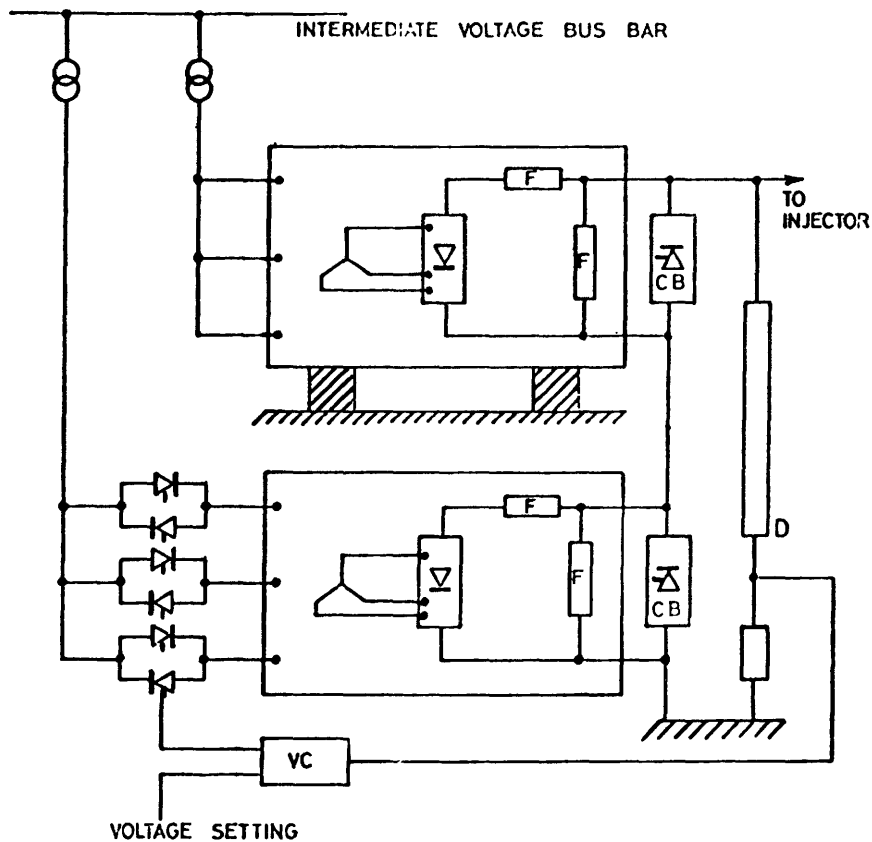


Fig. IV.7-11 Additional Heating Power Supply

F = Ripple Filter

CB = Crow Bar

D = Voltage Divider

VC = Voltage Regulator

Under the above assumption ($P_{line} \leq 300$ MW) the power taken from the mains is shown in Fig. 7, giving P_{peak} (DC = 240 MW and $Q_{peak} \leq 190$ MVAR for JET Basic Performance and $P_{peak}^{DC} = 305$ MW and $Q_{peak} \leq 220$ MVAR for JET Extended Performance. The conversion efficiency of about 90% should be considered to get the value of the peak AC power actually taken from the mains.

The power supply units will therefore have the following ratings:

Static: toroidal field

3.0 kV DC 53.5 kA (Basic Performance)

66.7 kA (Extended Performance)

made up by one of preferably two transformer + rectifier units fed by one or two H.V. step down transformers.

: additional heating (Fig. 12)

160 - 200 kV DC in units of 66.7 kV and 25 A (1.67 MW)
to be connected in series and in
parallel with a voltage control
better than 5%.

: poloidal field amplifiers

1 kV DC 13 kA (Basic Performance and Extended
Performance)

for each of the 4 units

Rotating: toroidal field

4.5 kV DC 53.9 kA (Basic Performance)
66.7 kA (Extended Performance)

by one generator with diode and/or thyristor rectifiers
with or without a rectifier transformer

: poloidal field

4.5 kV DC 66.7 kA (Basic Performance)
(5.5 kV)DC 66.7 kA (Extended Performance)

The two generators will be identical and they should be
able to deliver 1.2 - 1.5 GJ per pulse.

A call for tender concerning two study contracts on the
Additional Heating Power Supply are now ready to be sent
to about 20 European industries. The first contract
deals with the power supply itself, and the second one with
the required protection system.

5. The power from the network

Following the scheme shown, the active (P) and reactive (Q)
power diagrams are shown in Fig. 7 for Basic Perform-
ance and Fig. 8 for Extended Performance.

The size of the power factor and/or reactive power compen-
tion equipment strongly depends on the capability of the

H.V. line. The same applies to the filter system for the harmonics introduced by the rectifier operation.

6. Possible technical solutions

Figs. 10 and 11 show a wide range of possible options for a F.W. Generator set and for a static supply respectively. Some of these options will be closed in the call for tender for power supply, according to the JET requirements and to the technical judgement of the JET Team. Nevertheless, we will try to do our best, in preparing the specifications, to keep all the manufacturers interested and therefore we will not close any option which could prevent or give less chance in tendering to a particular company.

Moreover, we would like tenders for the whole power supply system and/or for specific and self-consistent spare items (like F.W. Generator, main step down transformer, rectifying units, made-up rectifiers and the associated transformer, power factor and reactive power compensation). The specification for the call for tender should be ready by the end of this year.

7. Conclusions

7.1 The basic choice of using conventional equipment although the duty is not conventional, has been made, i.e. motor-flywheel-generator rectifier sets and transformer-rectifier sets connected to the mains with the required compensation.

7.2 The power supply scheme is made up of a combination of rotating and static units suitable for extending at a later stage.

7.3 The D C outputs (Voltage, Current and Power) for each JET load have been given. The power sharing between static and rotating units is such that the total power available from the mains will be used for the Extended

Performance and the static units will take up to 70% of the total energy required.

7.4 Study contracts have been placed with most of the largest European Manufacturers to obtain technical and cost information on the power supply units considered. The call for tender for further study contracts on the Additional Heating power supply are ready.

7.5 The specifications concerning the JET call for tender for the JET Power Supply system will be ready by the end of this year.

GENERAL DISCUSSION

PALUMBO

I propose to spend some time on specific and general JET questions, starting from the beginning. From the information you now have on JET you see that the design is well advanced.

WEIGAND

Ich habe eine generelle Bitte : Besteht die Möglichkeit, dass wir die Vorträge, vor allen Dingen die vielen Diapositive, von denen die meisten nicht in diesem Buch stehen, in schriftlicher Form haben könnten, um uns für eine Mitarbeit in diesem Thema auf den neuesten Stand zu bringen*)

PALUMBO

The answer is yes. We will try to do it as soon as possible.

APPLETON

On the cryo-pumping system, can you tell me please how large is the load on the liquid helium refrigerator? In other words, for the requirement of cryo-pumping, what is the cryogenic load on the helium refrigerator?

ECKHARTT

The question is, how large is the cryogenic load on the refrigerator. This is a difficult question to answer, because we are in the process of assessing the main load to the cryo-pumping system which comes from the auxiliary heating system. Thus the torus pumping itself is only a minor part of the whole pumping and cryogenic requirements of the whole machine.

*) WEIGAND

I have a general question : Is there any possibility of obtaining the speeches in written form, and the many slides, most of which are not given in EUR-JET R/7. These would greatly help us to cooperate in this field.

(translated by our coordinator)

APPLETON

I appreciate that there are many pumping duties. I was particularly interested in the helium refrigerator level.

ECKARTT

My answer referred also to the helium refrigerator.

THIBAUT

Je m'excuse de revenir un peu en arrière, c'est un renseignement que je n'ai pas noté en ce qui concerne le circuit magnétique : le transformateur est-il en tôle magnétique ou en tôle ordinaire? Et quand seront lancés les appels d'offres ?

REBUT

Je peux vous répondre au moins en ce qui concerne les tôles; le fait que ce soient des tôles magnétiques ou pas, importe peu, compte tenu que tous les problèmes de pertes à l'intérieur des circuits magnétiques sont tout à fait secondaires pour le système. Nous avons simplement à transporter un flux..

Au sujet des problèmes d'appels d'offres sur la partie circuit magnétique proprement dite, je pense qu'elle se fera ... disons peut-être un peu avant mi-76.

LEVY

It has been indicated that four contracts have been let, study contracts, for the total electrical system, and it has also been indicated that you are about to let a further study contract for the additional heating system. Are you also intending to have study contracts on the poloidal amplifier or on any other parts of the electrical systems?

SMART

We don't think that a study contract as such is necessary for the poloidal amplifiers because so far as we can see the requirements

fall within the normal range of commercial possibilities and so our present view is that a straight-forward call for tenders is all that is required.

THIBAUT

J'ai noté que dans certains cas il y a à réaliser des prototypes, un prototype pour un composant déterminé. Comment est-il procédé? Est-ce que la réalisation du premier prototype, les essais de ce prototype sont compris dans l'appel d'offre général ou est-ce qu'il y a des appels d'offres successifs, un pour la réalisation d'un prototype et un deuxième appel d'offre après avoir eu des essais ?

REBUT

Je vais essayer de répondre à votre question. C'est un problème qui s'est posé d'une manière générale ; faisons-nous des appels d'offres séparés pour le prototype suivis d'un appel d'offre pour la série et, en fait, en examinant ce genre de chose et en examinant ce qui s'était passé pour d'autres projets, notre conviction a été qu'il ne fallait pas utiliser ce genre de procédure et essayer de faire en sorte que l'Industrie qui fabriquait le prototype et qui apprenait le problème posé par cette fabrication, qui est assez souvent assez spécial, fabrique aussi la série de façon à ne pas recommencer les mêmes erreurs avec une autre entreprise par la suite. Je m'excuse, je reviens une fois de plus sur la façon dont nous procédons qui est, en fait, de demander une étude par étapes successives, je dirais les trois étapes étant une première étape d'étude, l'étape de fabrication du prototype et l'étape de la fabrication en série. En principe, le contrat, lorsqu'il est passé, est fait pour l'ensemble du système. La seule chose est que, si quelque chose ne va pas dans l'étude ou si le projet n'est pas approuvé, nous pourrions nous arrêter à une de ces étapes. Mais il y a des dates de définition pour aller à l'étape successive, c'est-à-dire qu'on doit donner l'avis d'étape successive, disons tant de temps après la signature du contrat ou après la fin de l'étape précédente.

PALUMBO

Peut-être je peux ajouter que nous avons des contraintes juridiques et financières, disons dans la phase de design nous disposons de 3 Muc pour le contrat industriel et nous ne pouvons pas prendre des engagements juridiques allant au-delà de la phase de design et des préparations de prototypes et de l'approvisionnement de certains matériaux - ça c'était la décision du Conseil ; donc, nous avons des limites aussi bien financières que juridiques et à l'intérieur de ces limites nous avons taché d'établir la stratégie qui nous semble la plus opportune.

MORAND

Toujours dans le domaine des appels d'offres, quelle date est prévue pour celui concernant la chambre à vide?

ECKHARTT

As I mentioned before, we considered "bellows" and "rigid sectors" as two separate items, the bellows being delivered as free issues to the company who makes the rigid sectors and the assembly into octants. The call for tenders for the bellows was received last week and we are now trying to establish the procedure of this prototype work. As for the rigid sectors, I think that we will be able to send out the call for tenders during this year.

NOME NON SPECIFICATO

Riallacciandomi all'intervento del Professor PALUMBO, vorrei chiedere se per questa disponibilità finanziaria nel corso delle fase di studio, è stata rispettata una ripartizione di assegnazione di contratti in accordo alle contribuzioni comunitarie o, se questo invece non si è verificato, si è in previsione di farlo nella fase successiva*)

*) With reference to Professor Palumbo's remark, I would like to know whether, as concerns the availability of funds during the study phases, the distribution and allocation of contracts was respected according to Community country contributions or, if not, whether this procedure is foreseen for subsequent phases.

(translated by our co-ordinator).

PALUMBO

Disons cela Vous avez compris la question ? Ca a été traduit. Donc, la question était : Est-ce que, dans la présente phase d'étude, on avait taché de répartir parmi les différents pays le contrat selon la contribution financière au budget communautaire de ces différents pays ? La réponse est "non". Disons, en principe est "non", c'est-à-dire notre critère doit être en principe de choisir la meilleure offre indépendamment de sa provenance géographique. En fait, dans la phase de contrat d'étude, plusieurs fois nous avons placé plusieurs contrats d'étude sur le même sujet pour deux raisons : 1° pour avoir un spectre plus large d'informations ; 2° et ici je réponds en quelque sorte à votre question - pour donner à plus de firmes, donc en général à plusieurs pays, la possibilité de se pencher sur le problème mais disons comme politique générale nous n'avons pas l'intention d'assurer une répartition proportionnelle des commandes. Nous estimons que la meilleure politique est d'assurer la meilleure et la plus économique fabrication de la machine. D'après l'expérience d'entreprises similaires, il apparaît que cette politique mène simultanément, même si le fait n'était pas recherché, à une répartition des commandes assez équitable même au point de vue que vous dites. Mais disons que ces critères ne pourront être utilisés qu'en 2ème et 3ème approximation et non pas comme ... disons ... le guide de notre comportement.

NOM NON INDIQUE

Ce que je veux vous demander à ce sujet c'est qu'hier j'ai entendu dans les explications parler de plusieurs projets Tokamaks, par exemple, qui se passent dans toutes les nations de la Communauté, c'est-à-dire que d'un côté, votre réponse est une bonne réponse et de l'autre, elle ne dit pas tout ce que j'ai demandé, car semblerait-il que les "know-how" devraient être disponibles dans toutes les nations de la Communauté à ce point là.

PALUMBO

Ma réponse était pour JET. En ce qui concerne les expériences satellites ou les expériences d'une taille moyenne qui se font dans

tous les pays de la Communauté, nous avons des règles très strictes. Ces expériences, par exemple, le Tokamak de Frascati, le Tokamak de Fontenay, le Stellarator de Garching, etc, sont faites avec ce que nous appelons le "support prioritaire" de la Commission, c'est-à-dire la Commission paie environ 45% des frais d'investissements. Il y a une règle pour la concession de ces 45% : toutes les commandes dont les coûts excèdent, si mon souvenir est exact, 500.000 uc, doivent être préparées par un appel d'offre adressé à toutes les industries de la Communauté qui peuvent être concernées. Le Comité de Gestion de chaque Association dans lequel la Commission est toujours présente a en quelque sorte un droit de veto et est chargé de vérifier que ceci a été fait. Quant aux "know-how" et non seulement le "know-how, les machines sont à la disposition de tous, c'est-à-dire quand une machine de cette sorte a été construite disons par exemple à Fontenay-aux-Roses avec le support prioritaire de la Commission, tous les Laboratoires Associés - les Italiens, les Anglais, les Danois etc., ont le droit d'utiliser cette machine. Ceci a été dit dans la Décision du Conseil des Ministres et est répété dans chaque contrat que nous avons avec les Laboratoires Associés.

NO NAME

How soon will the buildings be put up to enable storage to take place on site ?

PALUMBO

I think you have the time-table of all the operations on page 34 of the booklet. You have put a very difficult question because it is strictly connected with the site problem. In the programme for the JET building an assembly hall is included, so I think that the answer to your question is partially that the JET building will provide for, at least, some partial stocking of what is manufactured. But really I cannot give you the final answer to your question today. I do not know whether Dr. REBUT intends to add something. We are really held up by this site problem.

FLINTA

Are you going to mention anything about instrumentation ?

REBUT

Almost nothing has been said about instrumentation at this meeting. Two kinds of instrumentation are foreseen on the apparatus. The first is for plasma diagnostics. This is already used on other apparatus and this instrumentation was basically constructed by the Fusion Laboratories, which are already working on plasma. The second part for machine diagnostics is a much more classical one and will in fact be included in each component of the apparatus. Very little has been said about the problem of control and data handling of all these data. I think that we will use a complex system based on a number of small computers.

MILANO

From Mr. BERTOLINI's talk, we heard that you are planning to request a power supply for additional heating for two main experiments : injection of neutral particles and high frequency heating.

My question is : Are these two experiments going to be performed successively, and when do you expect to place the call for tenders for the high-frequency heating ?

This question does not refer to the power supply equipment, but to the actual equipment required for heating, say the particle injectors and the high frequency equipment for microwave heating.

REBUT

I will try to answer your question. Concerning neutral injection, there are several possibilities of heating which have not been discussed in detail at this meeting. With neutral injection you have several ranges of power. This holds for energy of the order of 60 to 80 kilovolts for neutrals up to 100 or 160 kilovolts. This already represents two types of equipment. I think that neutral injection equipment is being developed by two national

laboratories, CULHAM and FONTENAY, in this range. JET will not be in charge of the development of one line but will be responsible for the various lines needed for the experiment itself. As concerns radio frequency heating things are much less advanced than for neutral injection, because, from the physical viewpoint, there are still many uncertainties as no demonstrations have been performed, so far, at a sufficiently high power level of radio frequency heating on the present Tokamak. Perhaps this situation will change over the coming years and, in any case, the first thing for this system is to have a better understanding of the physical process of heating, which is plasma physics work. Technical work, which is a development of CLYSTRONS, for example, if we use the low hybrid frequency, must also be done, but it seems to me that all this will depend on the outcome of the experiment in the coming years, I would say in 1976 or 1977. We basically envisage high frequency heating in the second phase of JET. This phase will be delayed by, at least, one year or two, if we compare it with neutral injection, except if there is a real breakthrough in this field.

PALUMBO

Perhaps I can add that in our present planning the first heating system studied is neutral injection, but at the same time high frequency heating is being studied mainly at Grenoble (though also in other laboratories). It will perhaps be applied in the Frascati Tokamak, and certainly in the Fontenay Tokamak.

SCHURINK

With all respect to you Mr. PALUMBO, as Chairman, I regret Dr. Schuster's absence today, as he postponed answers to certain questions till today which is the most important day. I regret his absence because he mentioned, for instance, that every industry has to buy its "entry ticket". How many entry tickets are available for each seat in the Jet theatre in order to follow the performance? The second question I would like to ask is: What is the follow-up to this meeting? Dr. Schuster yesterday mentioned

Steering Committees in which industry would participate. Another question arises here : What is the authority of these industrial Steering Committees ? In another connection, I get the impression that the JET design team has already gone far in establishing contacts with industry as regards contracts, prototypes, and also tendering, and I think it is already too late for Steering Committees. However, what are your plans in the follow-up to this meeting?

PALUMBO

I shall try to answer your question. First of all Dr. SCHUSTER apologised for his absence today; unfortunately, he was committed by a previous engagement. I think there was no question of "buying tickets for JET", or for participating in the Jet site. The ticket, if any (I do not know exactly what Dr. SCHUSTER's ideas on the subject are), was for joining the "fusion society", and not only Jet. JET is just one single object, albeit a very big object.

What is the follow-up to this meeting ? I think Dr. SCHUSTER spoke yesterday of a Steering Committee, but I also think he said that he wanted to have a sort of Liaison Group with industry rather than a Steering Committee. Again this was not limited to Jet. Concerning Jet, I repeat that we are trying to establish, what seems to us, to be the most convenient procedure. By this, I mean that for each item, for each part of Jet, a list of possible tenders has been requested from the Director of each national laboratory associated with Euratom. And I think that all or nearly all the firms indicated by the Directors of the laboratories have been contacted by us, by the Jet team. Is that correct, Dr. REBUT ?

REBUT

Yes, it depends on what type they are, though some were not contacted.

PALUMBO

Now, concerning the follow-up to this meeting, Here we are moving towards general questions, I think we can propose, first of all, regular meetings like this one, for instance, once a year. But not

necessarily limited to a particular object like Jet. Certainly Jet for many would represent the major part of our activity, but for a few of us, I think there are other programmes too. So let us have regular meetings on the general field of fusion. A second proposal would be to have regular meetings on specific questions, and by specific questions I think we mean a specific class of industry, for instance, electronics, electro-mechanics, etc. These could be two solutions of a general character. In parallel, we can also have the more modest but perhaps most pragmatical approach to the programme. A suggestion was made to me yesterday to extend the system now operating between the Fusion Associations for the circulation of personnel between different laboratories. This system already exists. The rules are that each laboratory pays a regular salary to the physicist on its payroll, and when this physicist works from several months up to 2 years in one of the Associated Laboratories, the Commission pays all extra charges, travel expenses, etc. Perhaps this system can be a standard for industry.

As I think I said yesterday, provision was made in the present programme to allow industry to send scientists and engineers to each Associated Laboratory but I have no example of the use made of this possibility up to now. Perhaps extension of this procedure to industrial personnel will encourage industry to participate in our laboratory work, including JET.

With specific reference to JET, I think that if any industry, interested in so doing, sent me a letter of intent for sending engineers from various fields to join the JET team for one or more years, we would certainly favourably consider the request. There are several solutions we can offer. First, we can ask the Council of Ministers to give us more money to extend this system to industry. Perhaps the Council will react positively. Secondly, as Dr. REBUT mentioned this morning, part of the JET staff, the JET construction personnel, will be requested from industry. This matter must certainly be studied. Probably the Commission will offer temporary positions to all members of the JET team whether from the laboratories or industry. With the

laboratories, we have an agreement which though not yet official can soon become official, which states that the laboratories will consider the people sent to JET as on leave of absence from the laboratory so that they can go back to their parent laboratory when they are no longer required for JET. A similar arrangement may be found with various industries concerning their personnel.

Concerning industry's participation in JET, I think that if you send to Brussels, to me for instance, a letter of intent saying "we are interested in working in this sector, or in contributing to this part of JET", you will certainly receive an answer. I think this is a matter for discussion, as I have put forward several possibilities. I would certainly appreciate your reactions.

BAUKLOH

Ich muss mich entschuldigen, meine Frage ist sehr speziell :
Das Kupfer für die toroidalen Feldspulen wird unabhängig von dem Spulenhersteller gekauft, von der Kommission. Gilt das auch für die poloidalen Spulen oder nicht ? Für die Spulen 1 bis 4 der poloidalen Feldes ? *

REBUT

I will briefly answer this question. In the present circumstances it is the case.

I would also like to make another comment which is a little more general. Speaking on behalf of the JET team, we will welcome whatever you can offer. You have seen what the main technical part of the apparatus is, and if you are interested in one particular technical part of it, we will be very glad to know where your interest lies. We would also like to have detailed information on what you have already done in your specific field so that we may know what

*) BAUKLOH

I apologize for my very specific question: The copper for the toroidal coils is bought by the Commission, independently of the producer of the coils. Is this also true for the poloidal coils or not ? For coils 1 to 4 of the poloidal field ? (Translated by our co-ordinator)

your specific field is, what your individual technical capability is. This will help us greatly in finding suitable competence outside the JET team.

DRUCE

The first contribution to the discussion raised the question of information concerning data, charts and diagrams which were shown on the screen, and those of us who didn't have our cameras or our shorthand-typist were unable to record them. You gave an answer, Sir, that it would be dealt with. May I ask as a point of clarification whether you intend to circulate this information to all those present here today ?

PALUMBO

I think that you will all receive the proceedings of this meeting.

LISSER

I have a question for Mr. BERTOLINI. I understand that for the general power supply, study contracts were given to a number of firms, and I made a note that they were CEM, BBC and ASGEN. I am very interested to know whether you got different answers from these firms ?

BERTOLINI

There were more than the three firms you have mentioned. They were CEM, BBC, ASGEN, TIBB, SIEMENS, GENERAL ELECTRIC (Great Britain). All these firms were given practically the same problem to study, namely the JET power supply, which was then mainly related to the toroidal field and supply load number 2, which is the poloidal field. Naturally, we got different answers from different firms. For example, the main difference was that different firms proposed a different synchronous speed for the generators, the range being from about 500 rpm for the vertical shaft machine up to 3,000 rpm for the horizontal shaft machine. Apart from this main difference, each firm also proposed different technical solutions, compared their proposals

with other possibilities, and gave their reasons for the solution they recommended most. However, I must say that most of the firms made an assessment of various possibilities in order to support their basic choice. Thus we have a wide spread of information, and now our great problem is to make the final choice.

LISSER

The reason for my question is that to my knowledge CEM and BBC are the same firm, and so they got two contracts for the same subject. Is that not a waste of money? Or did you get different answers from both?

BERTOLINI

We placed a contract with CEM and, since they are BBC at the same time, they shared the award between CEM in Paris and BBC in Mannheim in the following way : CEM studied the rotating machinery and BBC Mannheim studied the static parts of the system. But for us, it was one contract with two companies situated in different parts of Europe, of different nationalities, and engineers speaking different languages were involved.

PALUMBO

At the end of this meeting, I would like to have some short responses to all the various possibilities and difficulties that I mentioned previously.

MEIJER

At the moment attention is being concentrated on the JET project, which we appreciate of course, is a physical experiment. Now, industry's interest will be greater and there will probably be a greater wish to pay for entrance tickets if there is continuation in the programme.

Now, during the design phase of JET, is there already a plan to start developing other parts of the system, a power generating system, and I am thinking particularly of the components, the heat transfer system components design, and the problems that may be expected there. On the assumption that everything goes well with JET, can you give a brief general outline of what the next steps would involve and when they will be taken?

PALUMBO

I think I mentioned briefly yesterday what the next step is. I said the official target for the Tokamak line in the next 5-year programme is to start the design of the next step, which will be the "D-T Burner", at the end of this period. I don't think that the D-T burner will cause any great problems. What I hope is that, if the Tokamak line progresses according to the present optimistic estimate, we should, in the next 5-year programme, be able to have the D-T burner in the position that JET was in the present 5-year programme. After the experience provided by JET, we will certainly contact industry more directly and on a much larger scale than we did for JET, but I think, as I said yesterday, that JET, from the point of view of an interaction between industry and the Fusion Programme, represents very great progress in comparison with what existed before.

FELDMANN

Ich beziehe mich auf das Bild auf Seite 16 des Berichtes R-7 und möchte fragen, ob man in dieses Bild Linien gleicher Erfolgswahrscheinlichkeiten für das Projekt einmalen kann. Mit anderen Worten : Wenn wir das Feld in der gelben Farbe betrachten, würde dann eine Linie mit geringer Erfolgswahrscheinlichkeit für das Projekt in der Nähe der Reaktordomäne liegen, und würde die Erfolgswahrscheinlichkeit für das Projekt vielleicht grösser sein am unteren Ende des gelben Feldes?*)

REBUT

It is difficult to answer. These domains represent more or less our ignorance of the scaling laws. In fact if we have severe losses from the plasma, the performance of the JET plasma will be at the bottom of this yellow area (this means an entire value of n of the order of 10^{13} and a temperature of perhaps 5 keV). If we are a little more optimistic, and I will say that a realistic value... ..

*) FELDMANN

I refer to the figure on page 16 of report EUR JET R/7, and I would like to ask whether it is possible to draw, in this figure, curves of equal success probability for the project: In other words : If we look at the yellow area would the curve of lower success probability for the project be near the domain of the reactor , and would the success probability for the project possibly be higher at the lower end of the yellow area?

(Translated by our co-ordinator)

of what can be the parameters of the JET plasma seems to lie in the range of 3 (or 5) x 10¹³ and, for the entire project 3 (or 5) x 10¹⁴, with a temperature close to 10 keV for the ions. If the plasma losses are much lower than we expect, if we are really optimistic, we can, in fact, already place JET in the "reactor domain", which means having an end product of the order of 3 (or 4) x 10¹⁴ and a temperature somewhat more than 10 keV. These domains, in fact, represent the uncertainty in our extrapolations and our knowledge of plasma physics.

MILANO

As regards my reactions to the Chairman's proposals as to what should follow this meeting, I can only talk for myself and my firm. I think that there is an immediate objective need to follow up the developments of the JET programme in order to see what the developments are in those areas where there is no definite choice of solutions at present, and where there is a need to know the results of the experiments in progress so as to choose the right solution for the future. In other words, what I am saying is that it is not easy for industry to commit itself to some venture, if the final solution is not known in some definite way in advance. In other words, industry needs to have a forecast of what is going to happen in a certain number of years. Now, it is impossible in certain areas to make such a forecast, unless we are placed in a position where we can follow the developments of the programmes. Thus it seems to me that the suggestion that has been made to repeat this type of meeting at least once a year would be something useful along these lines. Perhaps there are industries, more involved with these fusion programmes, which will choose other ways of participation, such as sending scientists to join the JET team and so on, but I think that for a large number of industries a channel of information should be kept open and meetings such as this would probably be a useful initiative.

PALUMBO

Je pense que nous arrivons à la fin de notre "meeting" et je voudrais tâcher de tirer quelques conclusions. La première remarque, c'est que nous avons été agréablement surpris par la quantité et la qualité

des gens que nous avons eu l'honneur d'accueillir ici. C'est la première fois que le Programme Fusion fait cela et, à mon avis, le but a été atteint; je vois qu'il est nécessaire d'améliorer l'échange d'informations entre le Programme Fusion et l'Industrie. Nous prenons note de cela avec satisfaction; je dis "échange d'informations" parce que dans certains cas, ce que nous voulons faire dépend de ce que vous pouvez faire, par ex. : le cas qui vient juste d'être mentionné dans la dernière intervention c'est le chauffage par haute fréquence et là le problème réside dans la disponibilité des générateurs quoique ce problème soit plus le vôtre que le nôtre nous disons que ceci démontre qu'il faut renforcer une interaction constante avec l'Industrie. Pour ma part, j'ai à proposer un échange de personnel, c'est-à-dire l'admission de personnel industriel dans l'entreprise JET et plus en général dans tous les laboratoires Fusion. J'ai fait des propositions et bien sûr nous sommes ouverts à toutes suggestions de votre part. J'apprécierais beaucoup si quelqu'un de vous m'écrit et nous lui répondrons certainement. La deuxième façon, c'était comment les Industries peuvent participer à JET pour ce qui n'est pas encore décidé et il y a beaucoup de choses qui ne sont pas encore décidées. Alors, là aussi, si vous écrivez à Bruxelles, à moi-même ou à mon service ou au JET Design Team à Culham, certainement vous recevrez une réponse. Voilà! finalement je dois conclure ce "meeting" étant donné que l'heure est déjà dépassée, en ce sens, avant tout au nom de la Commission, je voudrais remercier vous tous pour votre participation, je voudrais remercier les interprètes qui ont fait un gros travail pendant ces deux jours et je voudrais remercier mon collaborateur, Dr. LAFLEUR qui s'est donné énormément de peine pour l'organisation de ce "meeting". Il est ici à côté de moi et il a été l'organisateur de ces journées. Merci beaucoup, Messieurs.

2.6. APPENDIX

Mr. E. CANOBBIO of the CEN-CEA Département de Physique du Plasma et de la Fusion contrôlée - Service d'Ionique Générale at Grenoble (France) contributed a useful paper on plasma heating problems.

2.6.1 E. CANOBBIO - Association EURATOM-CEA sur la Fusion
Grenoble

LE PROBLEME DU CHAUFFAGE DES PLASMAS TOROIDAUX

RESUME :

On étudie les différentes méthodes de chauffage du plasma qui peuvent être utilisées afin de surmonter les limitations du chauffage ohmique dans la réalisation des conditions d'ignition d'un plasma toroïdal à beta faible.

On examine :

- a) la compression magnétique adiabatique,
- b) l'injection de faisceaux d'atomes neutres,
- c) les chauffages H F relativement lents.

On ne traite pas les processus plus rapides tels que les ondes de choc, la turbulence, les champs H F de grande amplitude, les faisceaux d'électrons relativistes et les chauffages par laser, qui sont inutilisables dans des configurations toroïdales à beta faible de taille thermonucléaire.

Les méthodes de chauffage H F les plus intéressantes sont, par ordre croissant de fréquence : le Pompage Magnétique par Temps de Transit, l'Absorption Cyclotron Ionique (dans deux versions différentes) et le Chauffage à la Résonance Hybride Inférieure.

On donne une explication simple du mécanisme physique qui est à la base de chacune des méthodes et on signale les résultats déjà obtenus ainsi que les aspects qui restent à éclaircir.

1 - LIMITES DU CHAUFFAGE OHMIQUE

Le champ magnétique poloïdal nécessaire à l'équilibre du plasma est produit dans un Tokamak par un anneau de courant induit dans le plasma à l'aide d'un transformateur. Ce courant chauffe le plasma par l'effet Joule, qui consiste en la dissipation par les collisions coulombiennes de l'énergie cinétique du mouvement relatif (ordonné) des électrons par rapport aux ions produit par le champ électrique induit.

Dans un Stellarator les courants qui créent le champ magnétique de confinement circulent dans des conducteurs extérieurs au plasma et ne chauffent donc pas celui-ci. Cependant on peut toujours induire un courant toroïdal dans un Stellarator pour y chauffer ohmiquement le plasma.

Contrairement aux conducteurs habituels, le plasma a une résistivité électrique qui diminue quand la température augmente :

$$\eta \propto 1/T_e^{3/2}$$

(T_e est la température des électrons), car les collisions coulombiennes deviennent de plus en plus rares quand la température croît.

D'autre part, l'intensité du courant électrique qui circule dans un plasma confiné magnétiquement ne peut pas dépasser la valeur limite dite de Kruskal-Shafranov

$$I_{K-S} \propto \frac{a^2}{R} \cdot B_T$$

(a et R sont le petit et le grand rayon du plasma et B_T est le champ magnétique toroïdal), car au-delà de cette limite l'équilibre devient instable. Ainsi, la puissance ohmique maximum qui peut être déposée dans le plasma

$$P_{ohm}^{(max)} \propto \frac{(a B_T)^2}{R T_e^{3/2}}$$

se trouve limitée en pratique à quelques centaines de KW-valeur qui ne peut être atteinte qu'au-dessous de $T_e \approx 1 - 2$ keV ce qui est insuffisant pour porter les ions à la température d'ignition.

Lorsque $T_e \gtrsim 1-2$ keV, la puissance du rayonnement électromagnétique de freinage (Bremsstrahlung) émis sous forme de X mous par les électrons pendant les collisions coulombiennes

$$P_{Br} \propto n_e \cdot \left(\sum_i n_i Z_i^2 \right) T_e^{1/2}$$

($n_{e(i)}$ = densité électronique (ionique), Z_i nombre de charges des différents ions présents dans le plasma) devient comparable ou même supérieure à P_{ohm} . La puissance P_{Br} est rayonnée à l'extérieur du plasma et constitue une perte inévitabile. Les autres pertes du plasma sont dues à la conduction thermique et à la convection. Les lois qui gouvernent ces deux sortes de pertes dans les machines toroïdales actuelles ne sont pas encore comprises. La raison en est au moins en partie que les effets de parois, relevant du domaine de la physique atomique et de la chimie, compliquent énormément le bilan énergétique des plasmas ayant une faible valeur du rapport volume/surface.

D'autre part la théorie prévoit d'ores et déjà que d'autres effets complexes interviendront lorsque l'on voudra augmenter la taille, le courant et le

contenu énergétique du plasma en vue de franchir les différentes étapes du "Programme Fusion Contrôlée".

Aussi on admet généralement que le chauffage d'un plasma thermonucléaire ne pourra être assuré entièrement par l'effet Joule et qu'il sera nécessaire de disposer de puissants moyens de chauffage additionnel. Ce qui est demandé à ces moyens, c'est d'être capables d'élever la température ionique au-delà de la limite ohmique pour pouvoir satisfaire, en principe au moins, à la première condition de Lawson : $T_i \gtrsim 10 \text{ keV}$, sans pour autant détériorer gravement le temps de vie de l'énergie du plasma, qui doit satisfaire à la seconde condition de Lawson : $n \tau_E \gtrsim 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$.

En pratique : le temps nécessaire pour produire l'accroissement voulu de température doit être inférieur au temps de confinement de l'énergie du plasma en présence du chauffage additionnel. Si ce temps de confinement se révèle inférieur au temps de confinement en l'absence du chauffage additionnel, il faudra en compensation pouvoir confiner et chauffer une densité de plasma plus importante.

Une évaluation des besoins en chauffage additionnel du Programme Fusion dans ses étapes principales est donnée à titre indicatif dans le TABLEAU I, où

TABLEAU I

	Machines actuelles p.e T.F.R.	Machine d'igni- tion p.e JET	Reacteur thermonucléaire
Densité moyenne du plasma	$\approx 3 \cdot 10^{13}$	$\geq 3 \cdot 10^{13}$	$\approx 10^{14}$
Température des deutons	1	10	20
petit rayon du plasma (cm)	≈ 20	120	250
Contenue énergé- tique du plasma	$\approx 10 \text{ KJ}$	10 - 20 MJ	$\approx 500 \text{ MJ}$
Temps de confi- nement de l'éner- gie	10 - 20 ms	$\approx 10 \text{ s}$	$\geq 1 \text{ s}$
Champ magnétique toroïdal sur l'axe	25 - 50	≥ 30	60 - 100
Courant toroïdal	a few 100 KA	$\geq 3 \text{ MA}$	$\approx 10 \text{ MA}$
Puissance du chauf- fage additionel	0.3 - 1 MW	5 - 20 MW	50 - 100 MW
Flux de puissance du chauffage addi- tionel	4 - 12	4 - 15	4 - 15

la densité est mesurée en cm^{-3} , la température en keV, le champ magnétique en kilogauss, la puissance en watt, le courant électrique en ampères.

2 - COMPRESSION MAGNETIQUE ADIABATIQUE

L'anneau de plasma peut être comprimé en augmentant progressivement l'intensité d'une au moins des composantes du champ magnétique de confinement, pendant un temps long par rapport aux temps de collision, mais court par rapport au temps de confinement du plasma (Fig. 1). Le champ de compression agit comme un piston mobile : après chaque réflexion sur ce piston la vitesse des particules du plasma augmente de deux fois la vitesse du piston.

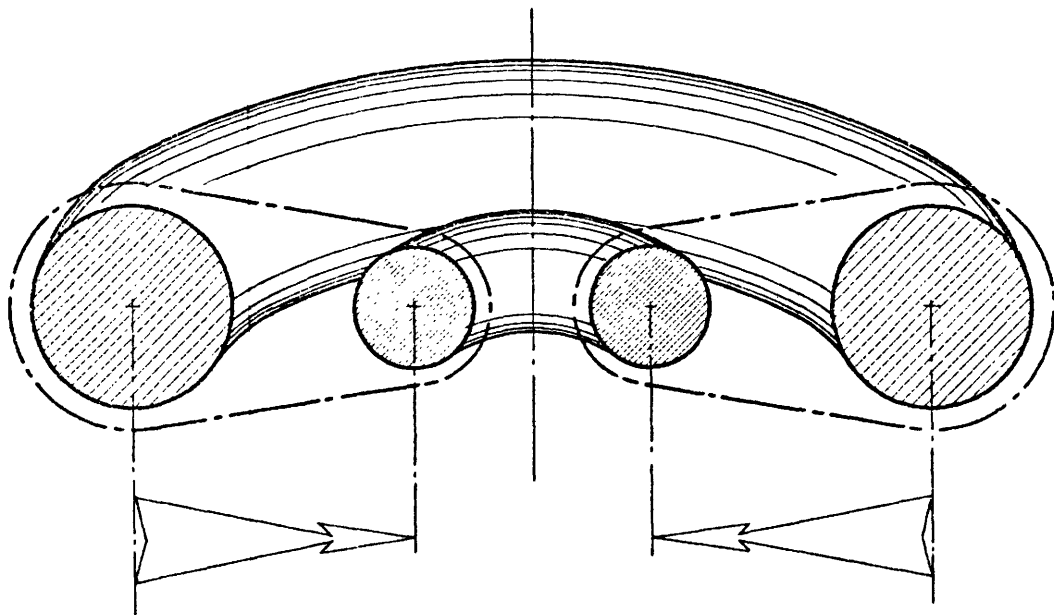


Fig.1 Exemple de compression adiabatique réalisée en augmentant le champ vertical. Le trait discontinu figure la coupe verticale de la chambre à vide.

C'est un mécanisme réversible car il ne fait pas appel aux collisions binaires. En pratique il est limité par l'encombrement de l'état initial et (ou) par la quantité d'énergie magnétique qu'il nécessite. Son principe a été testé avec succès dans des machines de taille modeste. En tant que méthode de chauffage additionnel en vue de l'ignition, il est envisagé, à présent, seulement en liaison avec d'autres méthodes de chauffage.

3 - INJECTION D'ATOMES NEUTRES RAPIDES

La thermalisation dans un plasma confiné magnétiquement de l'énergie dirigée d'un faisceau de particules rapides provenant de l'extérieur du plasma, nécessite le recours à des particules neutres. En effet le confinement magnétique est conçu précisément pour empêcher le passage, dans un sens ou dans l'autre, de particules chargées à travers toute surface fermée autour du plasma.

La technique de l'injection d'atomes neutres s'articule en pratique dans les phases suivantes :

- 1 - Source intense d'ions positifs,
- 2 - Accélération électrostatique des ions jusqu'à l'énergie voulue,
- 3 - Neutralisation du faisceau d'ions rapides dans une cellule appropriée,
- 4 - Transport et injection des neutres rapides dans le plasma où ils s'ionisent le long d'une corde du tore,
- 6 - Transfert collisionnel de l'énergie cinétique de cette population d'ions rapides, maintenant piégés par le champ magnétique, aux ions du plasma soit directement soit par l'intermédiaire des électrons, mais en tout cas pendant un temps court par rapport au temps de vie de l'énergie du plasma. Il convient de souligner que ce transfert collisionnel est aussi peu efficace que celui qui intervient dans le chauffage ohmique. Cependant ici le réservoir d'énergie n'étant pas lié à un courant électrique - source potentielle d'instabilités destructives - n'est pas limité aussi sévèrement.

L'énergie des atomes du faisceau, E_0 , est fixée par la condition que l'ionisation se fasse à l'intérieur du plasma et non pas à sa surface : $E_0 \propto n a Z_{\text{eff}}$.

D'autre part il est nécessaire que la recombinaison des ions rapides et l'échange de charge de ceux-ci avec le gaz résiduel soient négligeables.

Actuellement, les énergies requises sont estimées à qq 10 keV pour les plasmas de taille modeste, à \lesssim 100 keV (H^0) pour les plasmas de la taille du JET, et à plusieurs centaines de keV ou même à quelques MeV pour le réacteur.

A présent on dispose d'unités capables d'injecter dans le plasma 100~200 kW, ce qui est encore inférieur à P_{ohm} . A l'aide de ces injecteurs on a obtenu un important accroissement de température sans effets négatifs observables sur le confinement. Cependant il reste à prouver que ceci sera vrai aussi pour $P_{\text{neutres}} > P_{\text{ohm}}$.

La réalisation des unités nécessaires à l'étape suivante (JET) bien qu'encore à ses débuts est considérée comme techniquement faisable.

Par contre ce qui semble nécessaire au futur réacteur, paraît actuellement assez difficile à réaliser. En effet, l'efficacité de neutralisation d'ions positifs de quelques centaines de keV est extrêmement petite. Des ions négatifs rapides perdraient beaucoup plus facilement leurs électrons mais leur production en faisceaux intenses est malheureusement bien plus difficile que celle des ions positifs.

En dépit de ces difficultés à long terme, la méthode de l'injection d'atomes neutres jouit à présent de la faveur de la majorité des spécialistes. Ceci est dû d'une part au succès des expériences actuelles et d'autre part au fait que la méthode n'impose aucune modification importante des structures internes des machines toroïdales, réacteur compris.

4 - CHAUFFAGE PAR CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Contrairement au cas des faisceaux de neutres, on dispose d'ores et déjà de sources R F et H F capables de délivrer en continu (ou en impulsion longue) et avec un rendement très élevé ($\gtrsim 60\%$), des mégawatts pour toute fréquence au-dessous de quelques GHz. En effet, la transformation de l'énergie électrique continue en énergie électromagnétique se fait très facilement dans les tubes R F et H F, grâce à la très grande mobilité des électrons.

Il est heureux que dans une grande partie du spectre des fréquences où l'on dispose de toute cette énergie, les ondes électromagnétiques puissent se propager dans les plasmas thermonucléaires à bêta faible (bêta est le rapport des densités de l'énergie thermique du plasma et de l'énergie magnéto-statique du champ de confinement et de stabilisation). D'autre part, il est aussi heureux que ces plasmas soient capables d'absorber efficacement cette énergie électromagnétique grâce à de nombreux phénomènes d'interaction ondes-particules, phénomènes qui ne pourraient pas exister si les fréquences de collision des particules du plasma étaient comparables ou supérieures aux fréquences propres du plasma !

En effet un chauffage H F purement collisionnel ($\nu_{HF} \lesssim \nu_{coll}$) utiliserait des champs de forte amplitude qui sont énergétiquement peu intéressants et, de plus, dangereux pour le confinement du plasma qu'ils perturberaient fortement.

Les fréquences propres du plasma qu'il convient d'utiliser, si l'on veut se limiter aux champs de faible amplitude, sont d'une part celles du mouvement individuel des particules le long et autour des lignes de force magnétiques, et d'autre part les fréquences des oscillations collectives du plasma qui peuvent se développer grâce à l'interaction électrique de ses constituants.

Le mouvement individuel le long du champ magnétique étant essentiellement uniforme, il y aura interaction forte entre une particule de vitesse $v_{//}$ et une onde $(\omega, K_{//}, K_{\perp})$ de faible amplitude, seulement lorsque $v_{//} \approx \frac{\omega}{K_{//}}$ (effet Cerenkov). Ce type de chauffage est connu sous le nom de Pompage Magnétique par Temps de Transit (sigle anglais : T T M P), car il est produit par une perturbation du champ magnétique de confinement qui, périodiquement, comprime et dilate l'anneau de plasma. Il peut agir soit directement sur les ions, soit sur les électrons.

Le mouvement individuel autour du champ magnétique étant caractérisé par la fréquence cyclotron

$$\omega_{ci(e)} = \frac{e B_0}{c m_i(e)}$$

($m_i(e)$ est la masse ionique (électronique)), l'interaction onde-particules sera forte si $\omega \approx \omega_{ci(e)}$ (effet cyclotron) et, sous certaines conditions, si $\omega \approx 2 \omega_{ci(e)}, 3 \omega_{ci(e)}$ (effet cyclotron harmonique). Le chauffage à la résonance cyclotron des ions (électrons) est en général indiqué par le sigle anglais I C R H (E C R H).

Lors de ces résonances onde-particules, l'énergie passe de l'onde aux particules et non dans le sens contraire, si les particules résonnantes

($v_{//} \approx \omega/K_{//}$) ayant une vitesse plus faible que la vitesse de phase de l'onde sont plus nombreuses que les particules résonnantes plus rapides. Ceci implique que la dérivée de la fonction de distribution des vitesses par rapport à $v_{//}$ soit négative pour $v_{//} = \omega/K_{//}$ (effet Landau). Dans le cas d'un plasma essentiellement à l'équilibre thermodynamique on aura intérêt à choisir $\omega/K_{//} \approx v_{ti,e}$ (la vitesse thermique ionique ou électronique) car c'est pour $v \approx v_{t}$ que la pente d'une Maxwellienne est maximum. Bien que l'énergie gagnée ainsi par la population résonnante soit ensuite transmise par les collisions au reste des particules du plasma, l'effet immédiat de l'accélération unidirectionnelle des particules résonnantes est d'égaliser le nombre des particules

résonnantes lentes et rapides ce qui annule le transfert d'énergie de l'onde au plasma. (Fig. 2). C'est à nouveau le rôle des collisions coulombiennes que de rétablir à chaque instant la pente de la fonction de distribution des vitesses. Heureusement, ceci est possible même lorsque $v_{col} \ll \omega$.

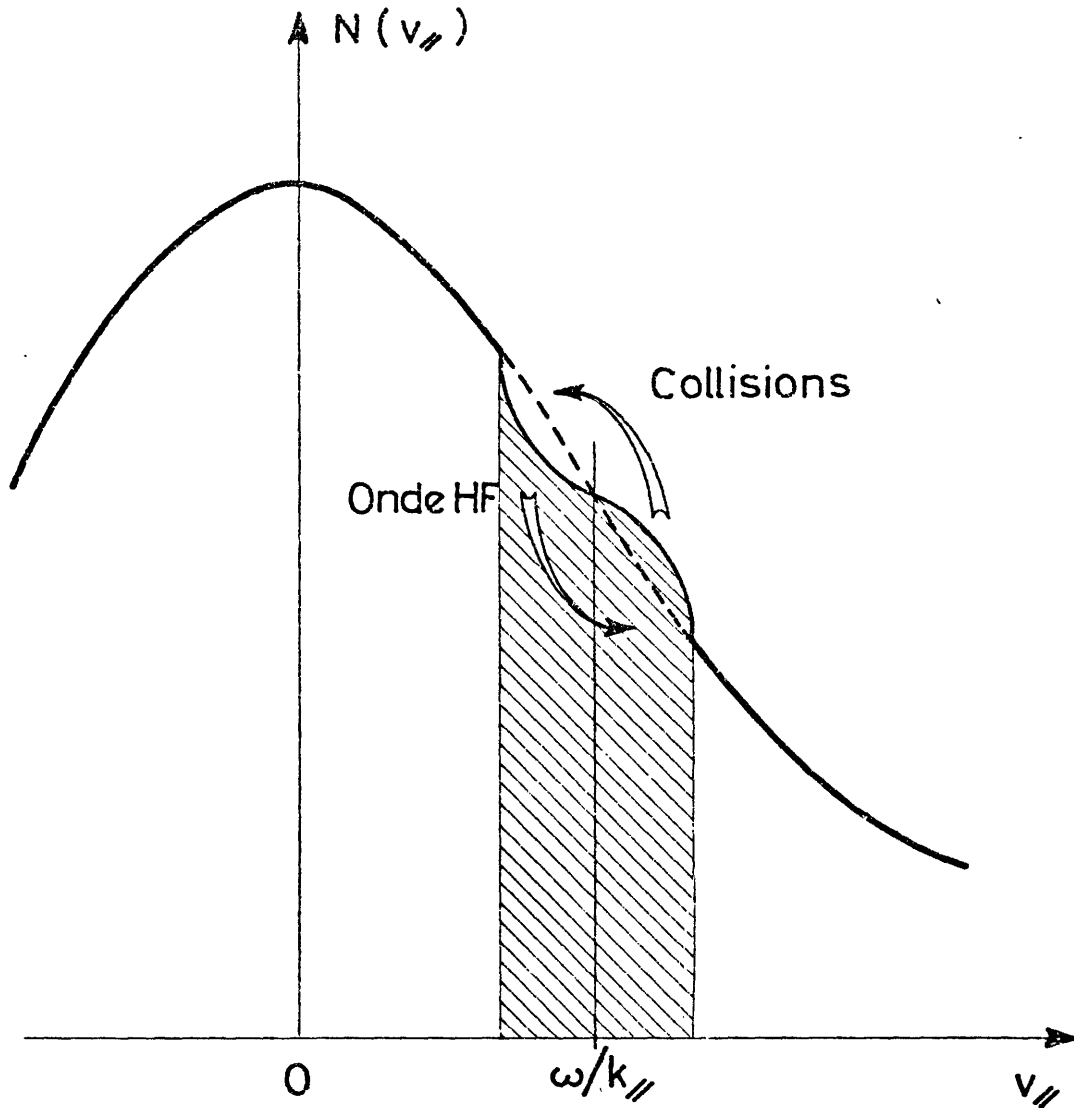


Fig.2 Schéma de principe de l'interaction résonnante onde-particules. L'onde H F déforme la fonction de distribution des particules dans la région où $\omega / k_{||} \cong v_{||}$ (zone hachurée). En effet l'onde accélère unidirectionnellement les particules pour lesquelles $v_{||} < \omega / k_{||}$, ralentit celles pour lesquelles $v_{||} > \omega / k_{||}$ et tend donc à égaliser leurs nombres. Les collisions coulombiennes tendent à rétablir la chute de la fonction de distribution assurant ainsi un transfert continu d'énergie de l'onde au plasma.

La plus connue des oscillations collectives du plasma est certainement celle qui, à cause de sa très haute fréquence ne fait intervenir que les électrons. Dans ce cas, ceux-ci oscillent comme un milieu élastique à fréquence propre $\omega_{pe} = (4\pi e^2 n_e / m_e)^{1/2}$, tandis que le milieu ionique reste immobile. Cette fréquence très élevée intéresse davantage l'interaction laser que les microondes.

Dans une onde de fréquence ω très inférieure à ω_{pe} qui est elle-même inférieure ou égale à ω_{ce} dans Tokamaks et Stellarators, les électrons ne peuvent pas se déplacer perpendiculairement au champ magnétique. Les ions, par contre, peuvent ignorer le champ magnétique puisque $\omega_p = (4\pi e^2 n_i / m_i)^{1/2} \gg \omega_{ci}$, et se comporter comme un milieu élastique à fréquence propre ω_{pi} . Ainsi dans un plasma toroïdal, l'équation $\omega = \omega_{pi}(r)$ définit une surface toroïdale de résonance, dite résonance hybride inférieure. En s'approchant de cette surface de résonance une onde électromagnétique envoyée de l'extérieur devient de plus en plus électrostatique et lente, donc de plus en plus intense. Dans ce cas plusieurs mécanismes physiques peuvent contribuer à dissiper enfin l'énergie de l'onde dans le plasma. Ce type de chauffage est en général indiqué par le sigle anglais L H R H.

Puisque les collisions sont rares le plasma s'écarte facilement de l'équilibre thermique en présence d'une onde suffisamment intense. L'énergie libre présente alimente alors des mouvements collectifs qui créent des champs électriques dont l'intensité peut dépasser le niveau thermique. Selon les cas on peut voir apparaître soit des fluctuations stochastiques produisant de fréquentes déflexions des particules, donc en définitive du chauffage par résistivité turbulente, soit deux ondes monochromatiques

$$(\omega_1, \vec{k}_1), (\omega_2, \vec{k}_2) \text{ telles que } \omega = \omega_1 + \omega_2, \vec{k} = \vec{k}_1 + \vec{k}_2.$$

La thermalisation de l'énergie H F par l'intermédiaire de ces ondes devient en général beaucoup plus aisée.

D'autres phénomènes non-linéaires peuvent se produire près des bords du plasma lors des interactions onde-particule examinées auparavant. En effet dans ces cas, certaines composantes de l'onde extérieure peuvent alimenter d'importants mouvements collectifs. L'effet final de ces mouvements pourrait être un flux accéléré de particules et de chaleur à travers les surfaces magnétiques ce qui reviendrait à un refroidissement du plasma par champs H F !

A cet ensemble de considérations sur la physique des interactions ondes-plasma confiné, il faut maintenant ajouter des réflexions sur les aspects techniques des méthodes H F , car en pratique ce sont eux qui imposent les contraintes les plus sévères à leur application aux plasmas thermonucléaires. Les caractéristiques en fréquence (ν) et longueur d'onde dans le vide, λ_0 des différentes méthodes examinées auparavant sont données dans le cas d'un plasma de deuterium, par le TABLEAU II.

TABLEAU II

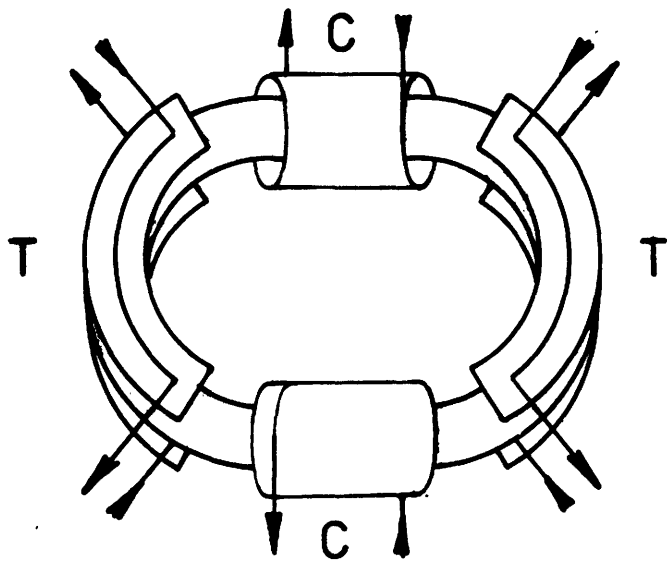
TYPE DE CHAUFFAGE	FREQUENCE ν	$\lambda_0 = c/\nu$
T T M P ionique	30 - 150 KHz	10 - 2 Km
T T M P électronique	2 - 10 MHz	150 - 30 m
I C R H	15 - 75 MHz	20 - 4 m
I C R H harmonique	30 - 150 MHz	10 - 2 m
L H R H	500 MHz - 2.5 GHz	60 - 12 cm

Des valeurs λ_0 indiquées sur ce tableau, il apparaît évident que le couplage de l'onde au plasma sera assuré par les bobines dans les cas du T T M P et du I C R H , et par des guides d'ondes dans le cas du L H R H (Fig. 3) et (Fig. 4).

Les bobines doivent être placées à l'intérieur de la chambre à vide, car ses parois métalliques sont impénétrables aux champs H F (cependant une chambre à vide à parois non métallique et perméable à l'onde H F est possible pour les machines de petite taille). Ces bobines doivent être refroidies, protégées du rayonnement et isolées électriquement (Fig. 5) - l'amplitude des champs H F dans le vide sera de l'ordre de 100-200 V/cm.

De plus la contamination du plasma qui peut résulter de l'érosion des structures métalliques doit être tolérable. Les guides d'onde pour le L H R H , par contre, pourraient ne pas déborder à l'intérieur de la chambre à vide. Si l'on peut appliquer près des guides des intensités de champs H F de 1 - 2 kV/cm, la surface totale des ouvertures demandées par ce type

Fig. 3 Schéma de principe de bobines capables de comprimer et dilater le plasma suivant son petit rayon (Bobines C) et de déplacer latéralement tout le plasma en faisant osciller l'axe vertical parallèlement à lui-même (Bobines T).



Les flèches indiquent la direction du courant HF à un instant donné.

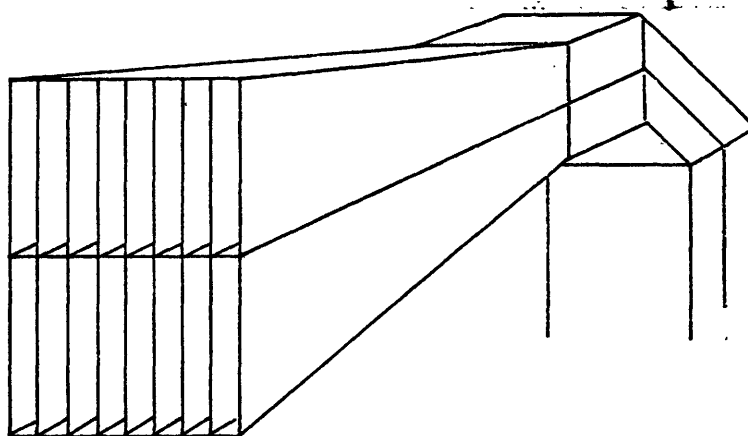
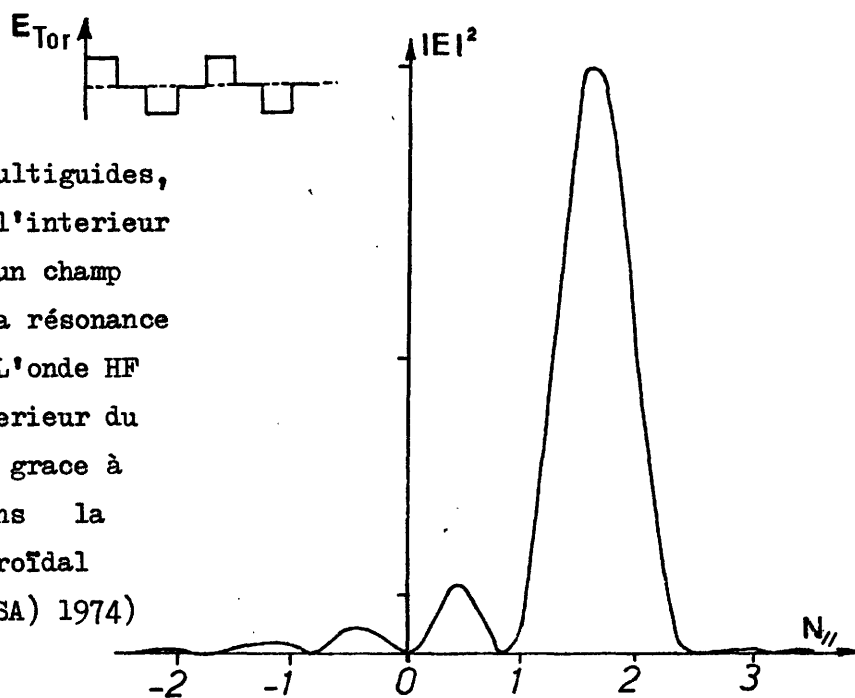


Fig.4

Schéma d'un système multiguïdes, capable d'injecter à l'intérieur de l'enceinte à vide un champ électromagnétique à la résonance hybride inférieure. L'onde HF peut pénétrer à l'intérieur du plasma et s'y amortir grâce à son ralentissement dans la direction du champ toroïdal (P.Lallia, Lubbock (USA) 1974)



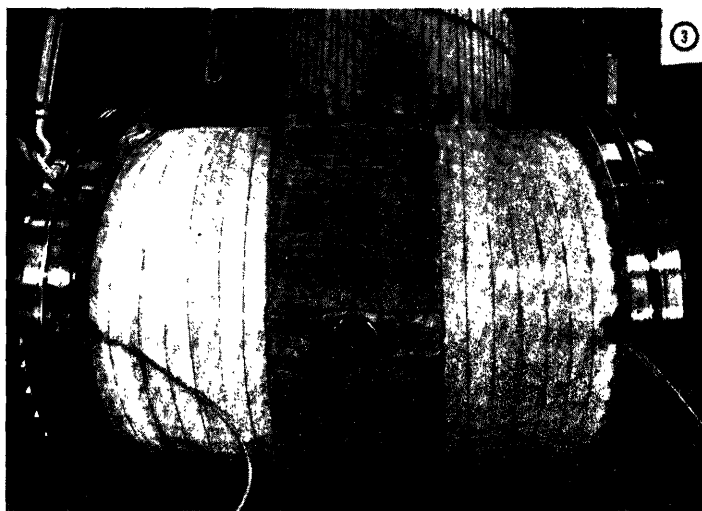
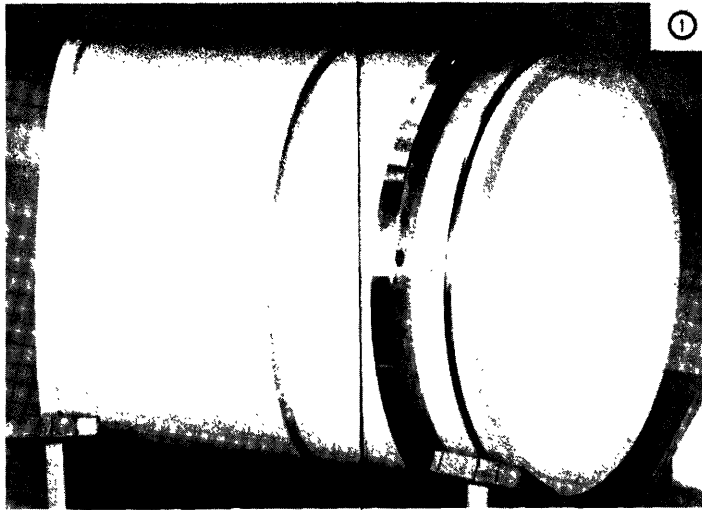
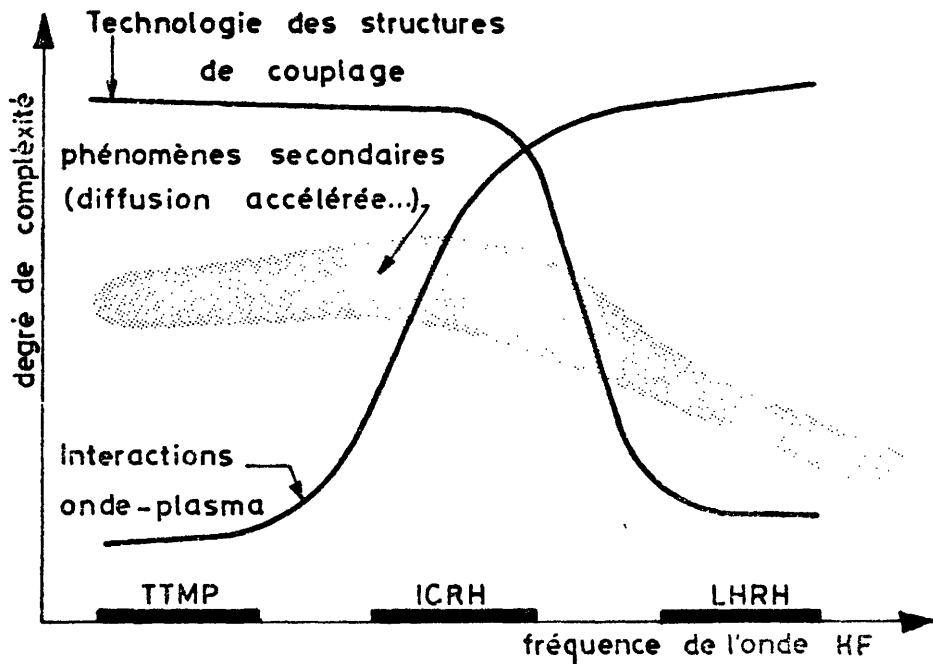


Fig. 5 Technologie des structures H F : Dispositif de couplage utilisé dans le Tokamak PETULA (Grenoble) pour une expérience de chauffage par TTMP. La chambre à vide est constituée par six secteurs de 30° en alumine connectés entre eux par des soufflets en inox (fig. 5-1) Les résistances de chauffage pour le dégazage ainsi qu'un écran électrostatique sont visibles sur la fig. 5-2. La bobine H F proprement dite, revêtue de son isolant, entoure l'écran électrostatique (fig. 5-3). Noter la sortie coaxiale de liaison à l'émetteur H F.

de chauffage ne devrait pas être supérieur à celle nécessaire à l'injection de neutres. Ceci explique en grande partie la faveur dont le L H R H commence à jouir dans le monde entier parmi les différentes méthodes H F. En réalité, à l'heure actuelle, en l'absence de tout résultat expérimental significatif, il est très difficile sinon impossible d'évaluer les mérites et les inconvénients des différentes méthodes H F. Si l'on examine les différents problèmes qui se posent sur le plan :

- 1 - de la physique du mécanisme de chauffage
- 2 - des éventuels effets secondaires du chauffage susceptibles d'influencer le confinement
- 3 - de la technologie des structures de couplage et de leur compatibilité avec le milieu thermonucléaire,

on est tenté d'établir une hiérarchie des difficultés en fonction de la fréquence choisie. Le point de vue de l'auteur de cette étude est visualisé sur la Fig. 6, qui a peut-être le seul mérite de souligner une fois de plus le caractère vraiment complémentaire des différentes méthodes H F.



TTMP = Transit Time Magnetic Pumping
 ICRH = Ion Cyclotron Resonance Heating
 LHRH = Lower Hybrid Resonance Heating

Fig. 6 Diagramme illustrant les difficultés physiques et techniques des différentes méthodes de chauffage H F.

Ces méthodes à leur tour sont tout à fait complémentaires aussi bien du chauffage par l'injection de neutres que de la compression adiabatique. Ainsi il nous semble permis d'espérer que par au moins une de ces voies on arrivera à amorcer un jour dans un tore de dimensions modestes, ces réactions que la nature ne sait produire que grâce à des masses immenses et des volumes immenses dans ces beaux réacteurs thermonucléaires sphériques que sont les étoiles !

REFERENCES

- /1/ THE JET PROJECT. EUR-JET-R/7e
Commission of the European Communities
Directorate General XII - Fusion Programme
- /2/ THE JET PROJECT - Design Proposal
for the Joint European Torus. EUR 5516e
Commission of the European Communities
- /3/ WORLD SURVEY OF MAJOR FACILITIES
IN CONTROLLED FUSION RESEARCH
1976 Edition
(Special Supplement 1976 to NUCLEAR FUSION)
International Atomic Energy Agency
- /4/ LE PROJET JET. XII/717/75 f version française de /1/

2.7 UPDATED INFORMATION

Since this meeting was held, there have been several new developments in the European Fusion Programme. These include mainly the Council of Ministers' approval of the European Pluriannual Fusion Programme 1976-1980, Sweden's adhesion to this programme, and the setting up of the Consultative Committee on Fusion (CCF).

The following table and diagrams show the present position.

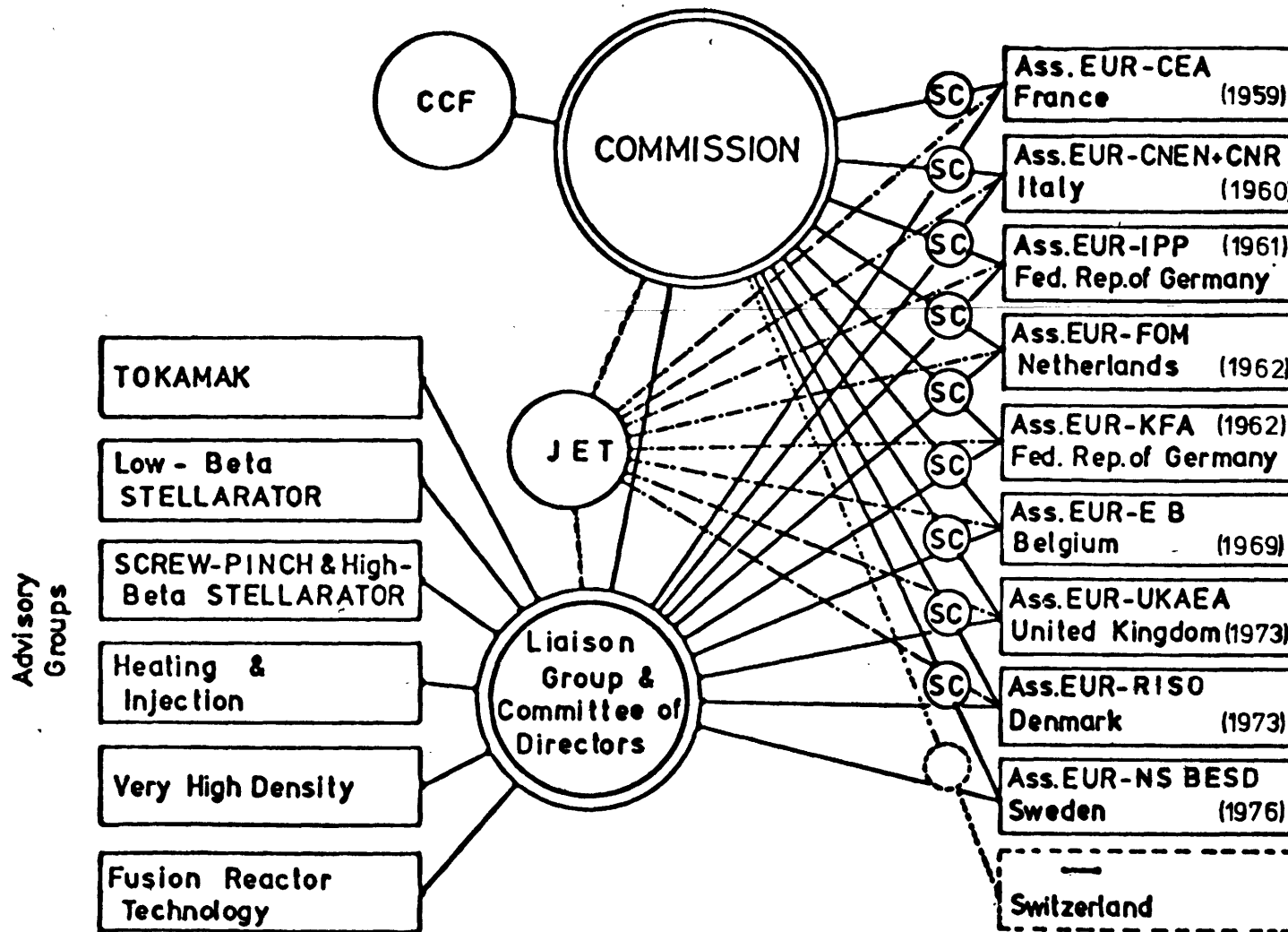
- 2.7.1 - Decisions of the Council of Ministers
- 2.7.2 - Management structure for the Community's Fusion Programme till October 1976
- 2.7.3 - Post-JET large device objectives
- 2.7.4 - Map of Europe showing location of the Fusion Associations
- 2.7.5 - Adresses of the Commission of the European Communities and Associated Laboratories

2.7.1 PLURIANNUAL PROGRAMME 1976-1980

	Mud*	COMMISSION'S CONTRIBUTION	
		%	Mud
<u>APPROVED BY THE COUNCIL</u> **			
- GENERAL EXPENDITURE OF THE ASSOCIATIONS	324	25	81
- NEW INVESTMENTS	87	45	39
- MOBILITY OF PERSONNEL	2	100	2
- MANAGEMENT & ADMINISTRATION	2	100	2
	<u>415</u>		<u>124</u>
 <u>NOT YET APPROVED</u>			
- JET	<u>123</u>	80	<u>98,4</u>
	<u>538</u>		<u>222,4</u>

*) 1 Mud $\hat{=}$ 1,2 Million US dollars

**) Decisions of 24 February and 18 November 1976



SC = Steering Committees

CCF = Consultative Committee for Fusion

October 1976

2.7.2 MANAGEMENT STRUCTURE FOR THE COMMUNITY'S FUSION PROGRAMME

2.7.3 Post-JET Large Devices Objectives

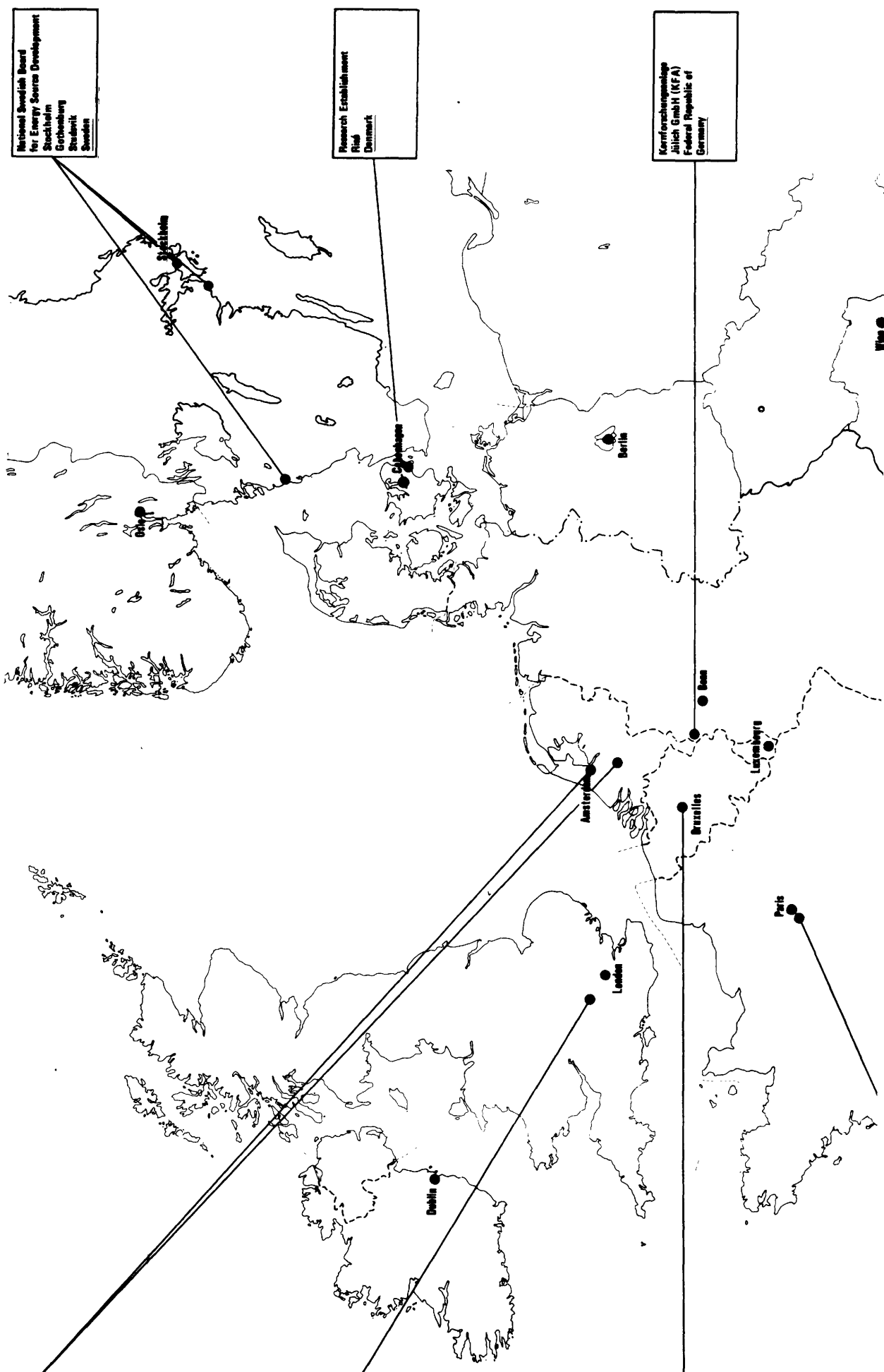
		<u>OBJECTIVE</u>	<u>CONSTRUCTION STARTING</u>
TBX	TRITIUM BURNING EXPERIMENT	STUDY CONFINEMENT OF A REACTING PLASMA	1980-1985
ER	EXPERIMENTAL REACTOR	DEMONSTRATE FUSION POWER PRODUCTION	1985-1990
PR	PROTOTYPE REACTOR	DEMONSTRATE TECHNOLOGICAL FEASIBILITY OF FUSION POWER REACTOR	1990-2000
DR	DEMONSTRATION REACTOR	DEMONSTRATE FEASIBILITY OF ECONOMIC FUSION POWER	2000-2010

188

Other Common Facilities

MTF	MATERIAL TESTING FACILITY	TEST MATERIALS UNDER INTENSE NEUTRON IRRADIATION	1980-1985
SMA	SUPRACONDUCTING MAGNET ASSEMBLY	DEVELOP AND TEST SUPRACONDUCTING MAGNETIC FIELD COILS	1980-1985

2.7.4 Map of Europe showing location of the
Fusion Associations



National Swedish Board
for Energy Source Development
Stockholm
Göteborg
Svea
Sweden

Research Establishment
Risø
Denmark

Kernforschungsanlage
Jülich GmbH (KFA)
Federal Republic of
Germany

Stichting voor
Fundamenteel
Onderzoek der Materie (FOM)
Rijswijk (U.)
Amsterdam
Netherlands

United Kingdom
Atomic Energy Authority
(UKAEA)
Culham Laboratory
United Kingdom

Eur. Belg. (EB)
Ecole Royale Militaire
et Université Libre
de Bruxelles
Belgium

**Commissariat à l'Énergie (CEA)
Atomique
Fontenay-aux-Roses
France**

Scienze

**Commissariat à l'Énergie (CEA)
Atomique
Grenoble
France**

Bonn

Bonn

Ispra

Roma

**Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik (IPP)
Garching bei München
Federal Republic of
Germany**

**Consiglio Nazionale
delle Ricerche (CNR)
Milano
Padova
Italy**

**Comitato Nazionale per
l'Energia Nucleare (CNEN)
Laboratorio Gas Ionizzati
Frascati
Italy**



2.75

Addresses of THE COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES
and Associated Laboratories (*) October 1976.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (CEC)
General Directorate XII - Fusion Programme
Rue de la Loi 200
B - 1049 - BRUSSELS (Belgium)
Tel. : (02) 735.80.40 or : (02) 735.00.40
Telex : 21.877 COMEURBRU

BELGIUM

- EURATOM - Etat belge Association
 - . Laboratoire de Physique des Plasmas
de l'Ecole Royale Militaire
Avenue de la Renaissance 30
B - 1040 - BRUXELLES (Belgium)
Tel. : (02) 733.97.94 (poste 357)
- EURATOM - Etat Belge Association
 - . UNIVERSITE LIBRE DE BRUXELLES
Faculté des Sciences
Service de Chimie-Physique II
Campus Plaine ULB
Boulevard du Triomphe
B - 1050 - BRUXELLES (Belgium)
Tel. : (02) 640.00.15 (poste 5540)
Telex : 23069 UNILIB B

DENMARK

- EURATOM - RISØ Association
 - . Research Establishment RISØ
DK - 4000 ROSKILDE (Denmark)
Tel. : (03) 35.51.01
Telex : RITOM DK 055/43116

FEDERAL REPUBLIC
OF GERMANY

- EURATOM - IPP Association
 - . Max-Planck Institut für Plasmaphysik
D - 8046 GARCHING bei München
(Federal Republic of Germany)
Tel. : (89) 32 991
Telex : 041/5215808 IPP GARCHING
- EURATOM - KFA Association
 - . Kernforschungsanlage Jülich GmbH
Institut für Plasmaphysik
Postfach 1913
D - 517 JÜLICH 1
(Federal Republic of Germany)
Tel. : (2461) 611
Telex : 041/833556 KFA D

(*) According to the EURATOM Treaty (European Atomic Energy
Community - 1958)

FRANCE

- EURATOM - CEA Association
 - . CEN-FaR
 - CENTRE D'ETUDES NUCLEAIRES
 - de Fontenay-aux-Roses (DPh-PFC)
 - Boite Postale N° 6
 - F - 92260 FONTENAY-AUX-ROSES
 - Tel. : (81) 657.13.26
 - Telex : ENERGAT FNAJR 042/204841

- EURATOM - CEA Association
 - . CEN-Gren.
 - Département de la Physique du Plasma
 - et de la Fusion contrôlée
 - Service d'Ionique Générale
 - B.P. N° 85 - Centre de Tri
 - F - 38041 - GRENOBLE Cedex (France)
 - Tel. : (76) 97.41.11
 - Telex : 042/32323 ENERGAT GRENOBLE

ITALY

- EURATOM - CNR Association
 - . CNR Centro di Studio sui Gas Ionizzati
 - Università di Padova
 - Istituto di Elettrotecnica ed
 - Elettronica
 - Via Gradenigo 6/a
 - I - 35100 - PADOVA (Italy)
 - Tel. : (049) 657.844

- EURATOM - CNR Association
 - . Laboratorio di Fisica del Plasma del
 - CNR-Istituto di Scienze Fisiche del
 - l'Università di Milano
 - Via Celoria 16
 - I - 20133 - MILANO (Italy)
 - Tel. : (2) 23.65.541
 - or (2) 23.63.492

- EURATOM - CNEN Association
 - . CNEN Laboratorio Gas Ionizzati
 - Casella Postale N° 65
 - I - 00044 - FRASCATI/Roma (Italy)
 - Tel. : (6) 94.10.41
 - Telex : 043/61167 - XVXV NUCLIT ROMA

NETHERLANDS

- EURATOM - FOM Association
 - . FOM-Instituut voor Plasmafysica
 - "Rijnhuizen"
 - Postbus 7 - Overeindseweg. 2
 - NL - NIEUWEGEIN (Netherlands)
 - Tel. : (3402) 51224
 - Telex : 044/47380 FOM RIJNHZ NL

- EURATOM - FOM Association
 - . FOM-Instituut voor Atoom en Molekulfysica
 - Kruislaan, 407
 - Postbus 4408
 - NL - AMSTERDAM - WATERGRAAFSMEER
 - Tel. : (020) 946711 (Netherlands)

SWEDEN

- EURATOM - NSBESD Association
 - . (NE) National Swedish Board for Energy Source Development
 - 77, Karlbergsvägen
 - Box 21.048
 - S - 100.31 STOCKHOLM 21 (Sweden)
 - Tel. : (08) 24.99.60
 - or:(08) 736.01.50
 - Telex : 10822 ENPROFO S
 - or : 0054 - 10389 KTHB STOCKHOLM

- EURATOM - NSBESD Association
 - .(KTH) Division of Plasma Physics and Fusion Research
 - Royal Institute of Technology
 - C - 100.44 - STOCKHOLM (Sweden)
 - Tel. : (08) 23.65.20
 - Telex : 10389 KTHB S

- EURATOM - NSBESD Association
 - . (CTH) Institute for Electromagnetic Field Theory and Plasma Physics
 - Chalmers University of Technology Fack
 - S - 402.20 GÖTEBORG (Sweden)
 - Tel. : (031) 81.01.00
 - Telex : 2369 CHALBIB S

- EURATOM - NSBESD Association
 - . (AE) Aktiebolaget (AB) Atomenergi Fack
 - S - STUDSVIK - 61101 NYKÖPING (Sweden)
 - Tel. : (0155) 800.00
 - Telex : 640 13 ATERG S

UNITED KINGDOM

- EURATOM - UKAEA Association
 - . UKAEA Research Group
 - Culham Laboratory
 - UK - CULHAM near Abingdon (United Kingdom)
 - Oxfordshire
 - OX 14 3DB
 - Tel. : (865) 41721
 - Telex : 051/83189 ATOM CULHAM

- EURATOM - UKAEA Association
• JET Design Team
Culham Laboratory
UK - CULHAM near Abingdon (United
Kingdom)
Oxfordshire
OX 14 3DB
Tel. : (865) 41721
Telex : 051/837505 JET CULHAM

2.8. Participants and their representatives

- COMMUNITY INSTITUTIONS

COMMISSION OF THE EUROPEAN
COMMUNITIES (CEC)
Rue de la Loi N° 200
B - 1049 - BRUSSELS (Belgium)
Tel. : (02) 735.80.40
Telex : 21877 COMEURBRU

- General Directorate XII
- Brussels
Fusion Programme
Head Office

- JOINT RESEARCH CENTRE
(JRC) - Head Office
- Brussels

- General Directorate XIII
Bâtiment Jean Monnet
L - Luxembourg
Tel. : 43011
Telex : 2752 EURODOC LU

Union des Industries de la
Communauté Européenne (UNICE)
Rue de Loxum N° 6
B - 1000 - Brussels
Tel. : (02) 513.45.62
(or : (02) 512.67.80)
Telex : UNICE B 26013

**- NATIONAL INSTITUTIONS
ASSOCIATED WITH EURATOM
(Fusion Programme)**

- EURATOM-CEA-Association
(France)

REPRESENTED BY :

- G. SCHUSTER, Director-
General Research,
Science and Education

- D. PALUMBO, Director-
of Fusion Programme

- Ch. LAFLEUR

- S. VILLANI, Director-
General

- A. ANCARANI

- J. LANNOY, Director.
Transfer of Technology
and Industrial Property
Questions.

- H. KRONZ, Patens

- S. FABBRI, Patens

- B. SASSEN, Secretary-
General

- A. BOYEN, Head of
Department Industrial
Development

- J. MICHAUX,

REPRESENTED BY :

- F. PREVOT

- | | |
|---|---|
| - EURATOM-CNEN-Association
(Italy) | - R. TOSCHI
- M. CELESTANO
- N. LOVISETTO
- F. FERRINI |
| - EURATOM-CNR-Association
(Italy) | _____ |
| - EURATOM-Etat Belge Association
(Belgium) | - P.E.M. VANDENPLAS |
| - EURATOM-FOM Association
(Netherlands) | - A.M. VAN INGEN |
| - EURATOM-IPP Association
(Federal Republic of Germany) | - K.H. SCHMITTER
- G. DÜSING |
| - EURATOM-KFA Association
(Federal Republic of Germany) | - G. MOHL |
| - EURATOM-RISØ Association
(Denmark) | - I. GADEGAARD |
| - EURATOM-UKAEA Association
(United Kingdom) | - D.F. JEPHCOTT |
| . JET Design Team | - P.H. REBUT
- E. BERTOLINI
- D. ECKHARTT
- A. GIBSON
- M. HUGUET
- J.P. POFFÉ
- D.L. SMART |
|
 | |
| - PERMANENT REPRESENTATIONS TO
THE EUROPEAN COMMUNITIES | <u>REPRESENTED BY :</u> |
| - <u>Belgium</u>
Rue Belliard N° 62
<u>B - 1040 - Brussels</u>
Tel. : 513.61.40 | - M. VAN HOUTTE |
| - <u>Denmark</u>
Rue de la Loi N° 34
<u>B - 1040 - Brussels</u>
Tel. : 512.16.38 | - OLE RICHTER GULDBERG |
| - <u>Federal Republic of Germany</u>
Rue Royale N° 64-66
<u>B - 1000 - Brussels</u>
Tel. : 513.45.00 | - M. NETTESHEIM |

- France
Bd du Régent N° 37-40
B - 1000 - Brussels
Tel. : 513.64.45
- Ireland
Av. Galilée N° 5
B - 1030 - Brussels
Tel. : 218.06.05
- Italy
Rue de la Loi N° 74
B - 1040 - Brussels
Tel. : 513.45.90
- Netherlands
Rue Belliard N° 62
B - 1040 - Brussels
Tél. : 230.31.00
or : 513.65.70
- Sweden
Rond-Point Robert Schuman N° 6
B - 1040 - Brussels
Tel. : 736.90.30
- United Kingdom
Rond-Point Robert Schuman N° 6
B - 1040 - Brussels
Tel. : 736.99.20

- R. SEIZILLES de MAZANCOURT

- ED. P. O'BRIEN

- G. CASTELLANI-PASTORIS

- J.H.W. FIETELAARS

- P.H. MORRICE

- INDUSTRIAL COMPANIES

REPRESENTED BY :BELGIUM

- ACEC
Boite Postale N° 4
6000 CHARLEROI
- BICAL S.A.
Rue du Lombard N° 24
1000 - BRUXELLES
- COCKERILL S.A.
4100 - SERAING

- J.L. MICHIELS

- H. ASSELMAN

- P. WAEBEN

- R. SALKIN

- N.V. ENI S.A.
Postbus 389
2000 - ANTWERPEN

- P. BAECKELMANS
- J.P. ROMBAUX
- EURO PROMOTION S.A.
Rue du Commerce N° 131
1040 - BRUXELLES

- M. SETTERWALL
- ISTITUTO PER LA RICOSTRU-
ZIONE INDUSTRIALE
Rue de la Loi N° 99/101
1040 - BRUXELLES

- L. LAMBERT
- NICKEL ALLOYS INTERNA-
TIONAL S.A.
Avenue de Tervuran N° 168
1150 - BRUXELLES

- M. RAHOI
- PLESSEY S.A.
Chaussée de St. Job N° 638
1180 - BRUXELLES

- R.T. DUCK
- MINISTERE DES AFFAIRES
ECONOMIQUES
Administration de l'In-
dustrie
Square de Meeus N° 23
1040 - BRUXELLES

- M. RADE

DENMARK

- LK-NES
53 Haraldsgade
2100 - COPENHAGEN

- K. LERSTRUP
- NEA - LINDBERG A/S
Industriparken 39-43
2750 - BALLERUP

- K. ABILDGREN
- KEMITERM A/S
83 Nybrovej
2820 - GENTOFTE

- R. ANDERSEN

FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY

- AEG
35 - KASSEL
Postfach 100 129

- M. HUHN
- BABCOCK & WILCOX
4200 - OBERHAUSEN 1
Postfach 10 03 47-48

- R. NOACK

- BROWN BOEHR & Cie
Abt. GM/MSH
6800 - MANNHEIM
Postfach 351
- INTERATOM
506 - BEHSBERG/KÖLN
Friedrich Ebertstrasse
- IWKA
7500 - KARLSRUHE 1
Postfach 3409
- KRAFTWERK UNION AG
REACTORTECHNIK
8520 - ERLANGEN
Postfach 3220
- FRIED KRUPP HÜTTENWERKE AG
4630 - BOCHUM
Postfach 1370
- KRUPP FORSCHUNGSINSTITUT
43 - ESSEN
Postfach 10
- LEYBOLD STEPAEUS GMBH & CO
5 KÖLN 11
Postfach 110 760
- MASCHINENFABRIK AUGSBURG-
NÜRNBERG AG WERK NÜRNBERG
D 8500 NÜRNBERG 1
Katzwalgerstrasse 101
- GUTEHOFFNUNGSHÜTTE STERK-
RADE AG
D - 4200 GIERHAUSEN 11
Postfach 110240
- DEGGENDORFER WERFT und
EISENBahn GmbH
D - 8360 DEGGENDORF
Postfach 1209
- MASCHINENFABRIK AUGSBURG-
NÜRNBERG AG WERK MÜNCHEN
- NEUE TECHNOLOGIE
D - 8000 MÜNCHEN 50
Postfach 500620
- NUKEM GMBH
D - 6450 HANAU 11
Postfach 110080
- H. BIEDER
- W. KÖHLER
- J. VOSS
- B. DEBBERTIN
- H. WILHELM
- Dr. STEHLE
et INTERATOM
- M. KRAUSE
- O. RUDIGER
- E. HILLNHAGEN
- H. NOLLER
- Dr. KIPS
- Herr SILBERMANN
- K.W. MARX
- K. HALLMAYER
- F. HOOGVEEN
- L.T. AUMÜLLER

- SIEMENS AG
8520 - ERLANGEN
Werner von Siemensstrasse 50
- STAHLWERKE PEINE SALTZ-
GITTER AG
315 - PEINE
Postfach 1740
- STAHLWERKE SUDWESTFALEN AG
METTALURGISCHE ZENTRALE
59 - SIEGEN 21
Postfach 10 12 20
- Verein Deutscher Eisenhütten-
leure VDEh
4 DÜSSELDORF 1
Postfach 8209
- Vereinigte Deutsche
Metallwerke AG
6000 FRANKFURT/MAIN 50
Zeilweg Postfach
- Metallschlauch-Fabrik
7530 - PFORZHEIM
Postfach 1280
- Stahlwerke BOCHUM
4630 BOCHUM
Postfach
- W. WEIGAND
- A. STIRBA
- G. BOGNER
- U. FELDMANN
- K. SCHÄFER
- Stahlwerke Peine-
Salzgitter
- A. BAUKLOH
- R. GROPP
- A. ZIMMERMANN
- H. HADRY

FRANCE

- L'AIR LIQUIDE C.E.C.
B.P. 15
38360 - SASSENAGE
- ALSTHOM
90001 - BELFORT
- ALSTHOM
B.P. 75
38100 - GRENOBLE
- CEGEDUR PECHINEY
(CEDEX 08)
75361 - PARIS
- C.E.M.
2, rue Curnonsky
75017 - PARIS
- J.J. THIBault
- R. BOISSIER
- P. FRADIN
- L. CLOCHEY
- M. PERAUD
- M. HELLEGOUARC'H
- M. ANDRIEU

- C.M.P.
B.P. n° 72
13643 - ARLES
- CREUSOT - LOIRE
B.P. n° 131
92402 - COURBEVOIE
- G.A.A.A.
20, av. Edouard Herriot
92350 - LE PLESSIS ROBINSON
- HEURTEY
B.P. n° 323
75823 - PARIS CEDEX 17
- JEUMONT SCHNEIDER
31-32, quai National
92806 - PUTEAUX
- SERETE
72, rue Renault
75640 - PARIS CEDEX 13
- SODETEG
9, avenue Réaumur
92350 - PLESSIS ROBINSON
- S.R.T.I.
Route de Guyancourt
78530 - BUC
- STEFI S.A.
52, rue Josepj de Maistre
75018 - PARIS
- TECHNICATOME
B.P. n° 18
91190 - GIF/YVETTE
- USINOR
B.P. 215 - 09
75426 - PARIS CEDEX 09
- P. MOMMEJA
- M. MORAND
- M. ERTAUD
- M. BOIRON
- M. BIGNON
- A. WIART
- A. JAGUIN
- M. HEUDE
- M. THOMAS
- M. TRIBOUT
- A. TERRIER
- A. GOIRAND
- M. TRANCHANT
- IRSID

- VALLOUREC
7, place Chancelier Adenauer
75016 - PARIS

- M. BUFFET

- A.C.R.
Cedex n° 2
44040 NANTES

- M. BERNARD

- M. NOGRY

- CIT-ALCATEL
41, rue Perier
92120 - MONTROUGE

- L. MAURICE

IRELAND

- BS and B Safety Systems Ltd.
Raheen Industrial Estate
LIMERICK

- A. VAN OSSELEN
Dutch Branch

- System Dynamics Ltd.
27, Merrion Square
DUBLIN 2

- F.J. KENNEDY

ITALY

- ANSALDO
Via Lorenzi 8
16152 GENOVA

- M. FERRARA

- Laboratorio ANSALDO
2, Piazza Carignano
16128 GENOVA

- G. BEHER

- CROMATURA BARATTI
via Istria 20
25100 BRESCIA

- G. INSELVINI

- A. CAPODURO

- E.N.I.
1, Piazzale E. Mattei
00144 ROMA

- E. BATTAGLINI
Rappresentanza presso
la CEE
rue Belliard 20
BRUXELLES

- FIAT
Corso Marconi 10/20
10125 TORINO

- G. CESONI

- FINMECCANICA
Viale Maresciallo Pilsudski 92
00197 ROMA

- M. GAMBARELLA

- M. BEER

- FLEXIDER
Corso Vercelli 501
10156 TORINO
- Carlo GAVAZZI Spa
Via Cardi 9
20148 MILANO
- ITALIMPIANTI
Piazza Piccapietra 9
16121 GENOVA
- MONTEDEL/LABEN
Via Bassini 15
20133 - MILANO
- Progettazioni Meccaniche
Nucleari
3, Largo San Giuseppe
16121 GENOVA
- TIBB
Piazzale Lodi 3
20137 MILANO
- SELENIA
Via Tiburtina, km 12,400
ROMA 00131
- R. BORSA
- M. TORRICELLI
- M. GAI
- G. FEDRIGO
- K. MEYER
- G. BELLOTTI
- M. PAGAN
- M. GAMBARDILLA
- M. LANZAVECCHIA
- M. EUSEPI
- M. MILANO

MONACO

- FLEXTUBE S.A.
MONACO
- H. LEERS

NETHERLANDS

- FDO TECHNISCHE ADVISERUS
Postbus 379
AMSTERDAM
- HAZEMEYER POWER ELETRONICS Dpt.
P.O.B. 23
HENGLO
- HOLEC N.V.
P.O.B. 62
HENGLO
- PHILIPS GLOEILAMPEN
FABRIEKEN
EINDHOVEN
- A.Q. KHAN
- J. LISSER
- SMIT SLIKKERVEER
- M. VAN TOL

- W.F. & R.D.M. GENERAL
ENGINEERING
P.O. Box 188
SCHIEDAM
- SMIT SLIKKERVEER BV
Postbus 50
RIDDERKERK
- SHELL INTERNATIONALE
RESEARCH MAATSCHAPPIJ B.V.
Carel van Bylandtlaan 30
DEN HAAG
- SKF European Research
Centre B.V.
Postbus 50
JUTPHAAS
- T.N.O.
Projektgroep Kernenergie
Postbus 370
APELDOORN
- NERATOM B.V.
Postbus 2244
DEN HAAG - 2078
- J.A. SCHAAP
- C.A. PRINS
- K.U.E. SVENSSON
- H.H. SCHURINK
- J. VAN DIJK
- G. VAN DE VLIES
- L.H. SIPMANN
- D.G. TEN WOLDE
- H. HERLITZ
- M. BOGSTRA
- M. MEIJER
- R.H. FAKKEL
- J. BROODMAN
- H.L. FELKERS
- M. MEYER

SWEDEN

- ASEA - ATOM
Box 53
S - 72104 VASTERAS
- GRANGES METALLWERKEN
721 88
VASTERAS
- ATOMENERGI AB
Fack
S-61101 NYKÖPING
- FEDERATION OF SWEDISH INDUSTRIES
P.O.B. 5501
S - 411485 STOCKHOLM
- M. SETTERWALL,
Brussels
- J. FLINTA
- C. ANDERSSON

UNITED KINGDOM

- ASSOCIATED NUCLEAR SERVICES
123, High Street
EPSOM, SURREY KT 19 8EB
- AVICA EQUIPMENT Ltd.
Mark Road
HEMELHEMPSTEAD HERTS HP2 7 DQ
- BICC RESEARCH and
ENGINEERING Ltd.
38 Wood Lane
LONDON W12 7DX
- BOC Ltd.
Hammersmith House
LONDON W6 9 DX
- BRENTFORD ELECTRIC Ltd.
Manor Royal
CRAWLEY, WEST SUSSEX RH10 2 QF
- FAIREY ENGINEERING Ltd.
P.O. Box 41
STOCKPORT CHESHIRE SK 4 5BD
- GENERAL ELECTRIC COMPANY
Phoenix Works, Thornbury,
Bradford
WEST YORKSHIRE, BD3 8 JZ
- GENERAL ELECTRIC COMPANY Ltd.
1 Stanhope Gate
LONDON W1A 1EH
- GENERAL ELECTRIC COMPANY Ltd.
GEC Transformers
1 Stanhope Gate
LONDON W1A 1EH
- IMPERIAL METAL INDUSTRIES Ltd.
P.O. Box 216
Kynoch Works
BIRMINGHAM B6 7 BA
- INTERNATIONAL RESEARCH &
DEVELOPMENT
Fossway
NEWCASTLE UPON TYNE NE6 6OJ
- H. CARRUTHERS
- P. CHORLEY
- H. ASSELMAN,
Brussels
- J.B. GARDNER
- H.E. LEVY
- R.A. KELSEY
- D.J. NERURKAR
of GEC Machines
- K. DRUCE
- C.J. HARMSWORTH
- J. WOOLNER
- A.D. APPLETON

- MARSTON EXCELSIOR Ltd.
Wobaston Road Forhouses
WOLVERHAMPTON WV 10 60J

- J.F.W. PRICE
- THE PLESSEY COMPANY Ltd.
Alma Road
Ponders End
ENFIELD - MIDDLESEX

- S.S. HALL
- C.E. BATTEN
- TAYLOR WOODROW CONSTRUCTION Ltd.
345 Ruislip Road
Southwall
MIDDLESEX UBI 2QX

- N.O.E. LAKIN
- VICKERS Ltd.
Clifford House
New Road
SOUTHAMPTON SO2 0AB

- R.F.C. BUTLER
- WHESSOE Ltd.
Darlington
DURHAM DL3 6DS

- H. WIGGIN COMPANY
Holmer Road
HEREFORD

- Mr. RAHOI
N.A.I., S.A., Brussels
- LINTOTT ENGINEERING Ltd
Foundry Lane
HORSHAM, Sussex RH13 5 PY

- J. BARR
- R. LAKER

2.9. Alphabetic list of participants

A

K. ABILDGREN	199;
A. ANCARANI	196;
R. ANDERSEN	199;
C. ANDERSSON	204;
M. ANDRIEU	201;
A.D. APPLETON	205; 66, 155,
H. ASSELMAN	198;
H. ASSELMAN (Brussels)	205;
L.T. AUMULLER	200;

B

P. BAECKELMANS	199;
J. BARR	206;
E. BATTAGLINI	202 ¹ 60,
C.E. BATTEN	206;
A. BAUKLOH	201; 165,
M. BEER	202 ¹
G. BEHER	202 ¹
G. BELLOTTI	203;
M. BERNARD	202 ¹
E. BERTOLINI	197; 140, 166, 167
H. BIEDER	200;
M. BIGNON	202;
G. BOGEN	201;
M. BOGSTRA	204;
M. BOIRON	202;
R. BOISSIER	201;
R. BORSA	203;
A. BOYEN	196;
J. BROODMAN	204;
M. BUFFET	202 ¹
R.F.C. BUTLER	206;

C

E. CANOBBIO	173;
A. CAPODURO	202'
H. CARRUTHERS	205;
G. CASTELLANI-PASTORIS	198;
M. CELENTANO	197;
G. CESONI	202'; 68,
P. CHORLEY	205;
L. CLOCHEY	201;

D

B. DEBBERTIN	200;
K. DRUCE	205; 166,
R.T. DUCK	199;
G. DÜSING	197;

E

D. ECKHARTT	197; 96, 156, 158
M. EUSEPI	203;
M. ERTAUD	202; 65,

F

S. FABBRI	196;
R.H. FAKKEL	204;
G. FEDRIGO	203;
U. FELDMANN	201; 168,
H.L. FELKERS	204;
M. FERRARA	202'
F. FERRINI	197;
J.H.W. FIETELAARS	198;
J. FLINTA	204; 161,
P. FRADIN	201;

G

I. GADEGAARD	197;
M. GAI	203;
M. GAMBARDELLA	202'
M. GAMBARDELLA	203;
J.B. GARDNER	205;
A. GIBSON	
A. GORVAND	202;
R. GROPP	201;
OLE RICHTER GULDBERG	197;

H

H. HADRYG	201;
S.S. HALL	206;
K. HALLMAYER	200;
C.J. HARMSWORTH	205;
M. HELLEGOUARC 'H	201;
H. HERLITZ	204;
M. HEUDE	202;
E. HILLNHAGEN	200;
F. HOOGEVEEN	200;
H. HUGUET	197; 108,
M. HUHN	199;

I

G. INSELVINI	202'
IRSID	202

J

A. JAGUIN	202;
D.F. JEPHCOTT	197;

K

R.A. KELSEY	205;
F.J. KENNEDY	202'
A.Q. KHAN	203;
KIPS	200;
W. KÖHLER	200; 26, 54, 60,
M. KRAUSE	200;
H. KRONZ	196;

L

Ch. LAFLEUR	196;
R. LAKER	206;
N.O.E. LAKIN	206;
L. LAMBERT	199;
J. LANNOY	196;
M. LANZAVECCHIA	203;
H. LEERS	203;
L. LERSTRUPP	199;
H.E. LEVY	205; 156,
J. LISSER	203; 28, 166, 167,
M. LOVISETTO	197;

M

K.W. MARX	200;
L. MAURICE	202;
M. MEIJER	204;
K. MEYER	203; 167,
M. MEYER	204;
J. MICHAUX	196;
J.L. MICHIELS	198;
M. MILANO	203; 161, 169,
G. MOHL	197;
P. MOMMEJA	202;
M. MORAND	202;
P.H. MORRICE	198;

N

D.J. NERURKAR	205;
M. NETTESHEIM	197;
R. NOACK	199;
M. NOGRY	202;
H. NOLLER	200;

O

E.D. P. O'BRIEN	198;
-----------------	------

P

M. PAGAN	203;
D. PALUMBO	196; 6, 55, 57, 60, 64, 66, 72, 155, 158, 159, 160, 162, 163, 166, 166, 167, 168, 169.
M. PERAUD	201;
J.P. POFTE	197;
F. PREVOT	30, 52, 53, 54, 196.
J.F.W. PRICE	206; 52,
C.A. PRINS	204;

Q

—

R

M. RADE	199;
M. RAHOI	199;
M. RAHOI (Brussels)	206;
P.H. REBUT	197; 56, 59, 73, 156, 157, 161, 163, 165, 168.
J.P. ROMBAUX	199;
O. RUDIGER	200;

S

R. SALKIN	198;
B. SASSEN	196;
J.A. SCHAAP	204;
K. SCHÄFER	201;
K.H. SCHMITTER	197;
H.H. SCHURINK	204; 25, 162,
G. SCHUSTER	196; 4, 17, 25, 26, 28, 29, 52, 53, 56, 57, 60, 62, 66, 70
R. SEIZILLES de MAZANCOURT	198;

M. SETTERWALL	204;
M. SETTERWALL	199;
SILBERMANN	200;
L.H. SIPMANN	204;
SLIKKEERVEER SMIT (see SMIT)	
D.L. SMART	197; 126, 156
SMIT SLIKKERVEER	203;
D. STEHLE	200;
A. STIRBA	201;
K.U.E. SVENSSON	204;

T

A. TERRIER	202;
J.J. THIBAUT	201; 56, 156, 157
M. THOMAS	202;
M. TORRICELLI	203;
R. TOSCHI	197;
M. TRANCHANT	202;
M. TRIBOUT	202;

U

V

P.E.M. VANDENPLAS	197;
G. VAN DE VLIES	204;
J. VAN DIJK	204;
A.M. VAN INGEN	197;
M. VAN HOUTTE	197;
A. VAN OSSELEN	202'
M. VAN TOL	203; 28, 54
S. VILLANI	196;
J. VOSS	200;

W

P. WAEBEN	198;
W. WEIGAND	201; 155
A. WIART	202;
H. WILHELM	200;
D.G. TEN WOLDE	240;
J. WOOLNER	205;

XYZ

A. ZIMMERMANN	201;
---------------	------



2.10. Subject index

A

α - particles	78, 106, 107
access to plasma	33, 85, 98
activation problems	79, 106, 120
advisory groups, fusion	18
ALCATOR (USA)	42, 50
amplifiers, poloidal field	140, 143
ashes, combustion	16
aspect ratio	47, 77, 78
assembly	120
ATC (USA)	45, 53
atoms, non-fuel (see also : impurities)	96, 98

B

baking	84, 102, 103
balance, energy	9
bellows	99, 100, 101, 104, 105, 158
bending moments	113
beta value	13, 14, 47, 50, 178
blanket	8, 15, 16
boom telescopic	123
bottle, magnetic	10
breakers, circuit	134
burner, D-T	7, 74, 76, 168
burning, nuclear	7, 9
- conditions	9
- temperature	8
- time	9

C

CCE fusion programme	21
- associations	17
- partners (see also : § 1.5.)	94

chamber, vacuum (see : vacuum vessel)	
circuit, magnetic	84
cleaning operations, inside wall	98, 101, 102, 104
magnetic field coils	12
- D-shaped	114, 115
- helicoidal	12
- poloidal	132, 133, 135, 140, 142
- superconductive	16, 20, 55
- toroidal	108, 118, 140, 141
component, magnetic field	
- poloidal	11, 32, 82
- toroidal	32
- vertical	32, 53
compression, adiabatic(see also:heating)	176
configuration, magnetic field	
- cylindrical	10
- magnetic mirror	11
- open-ended	10
- toroidal	11
confinement system	
- economic value of	13
- toroidal (closed)	10
- time of	13, 14, 37
- high-beta	14, 17, 20
- low-beta	14, 17
- very high density	9
contracts, association	17, 63
cooperation, international	76
copper conductor	77, 111
cryostat	16
cryogenic chamber	15
CREST	62
current	
- rising phase of	127
- flat-top phase of	127, 130
current, plasma	33, 75
cylinder, inner	119
D	
data aquisition	82
deuterium	8, 78

diagnostics	82
directors, committee of	18
divertor	42, 43
domain, reactor	see : ignition
DOUBLET (USA)	48, 49
E	
ecological situation	17, 70
economic value of confinement system	see : confinement system
electrotechnical problems	59
engineering problems	52
erosion problems	106
extraction, energy	8
F	
feasibility, scientific	50
feedback circuits	82
field system	
- helicoidal	11
- poloidal	126
- toroidal	84, 108, 110
- vertical	32, 53
fly-wheel motor generator	129, 132, 140, 153
fusion consortia	5, 28
fusion, laser	9, 20, 61, 68
fusion programme	see : CCE
H	
heat exchanger	8
heating, plasma	11, 13, 14, 50
- adiabatic compression	44
- auxiliary	11, 79, 82, 140, 144, 151
- cyclotron	46
- high frequency	13, 19, 46, 54, 79, 82, 173, 178, 185
- neutral injection	13, 46, 79, 82, 85, 144, 173, 177
- ohmic	37, 43, 173
- turbulent	47

I

ignition	73
IIMT (Milan)	62
impurities	40, 41, 50, 76, 96
industry, relations with	
- in Europe	24, 28, 58, 64, 68, 101, 165
- in USA	65
instabilities	40, 41
insulation, electrical	120
interactions, plasma-wall	97

J

JET	19, 20, 50, 51, 55, 73, 76, 77, 78, 83, 86
- ancillary devices	81, 82
- buildings of	88
- construction team	93
- design team	24
- dismantling of	79, 98, 121
- funds for construction	92
- maintenance of	79, 98, 120
- outline of experimental programme	90
- parameters of	80
- re-assembly of	79, 98
- repairs to	79, 98
- siting of	28, 91
- time-bar chart for	89
- torque of whole magnet of	116
- vacuum system of	96

K

know-how, availability of	159, 160
---------------------------	----------

L

Lawson criterion	9, 74
leak, risk of vacuum	98
legal basis	158
Liaison group, fusion	18, 63
limbs	131

limit, Kruskal-Shafranov	174
limiter	12, 97, 99, 104, 105
liner	32
lines of force, geometry of magnetic	10, 32
linkage, flux	131
lithium	6, 8, 15, 16
- mineable deposit of	26, 27
load, electrical	126, 140

M

material, production of	7
merit factor	33, 77
μ of iron	84

N

neutrons	6, 8, 107
- 14 MeV	16, 79, 98
- production of	78
- source of	22
nuclear power generated, density of	13, 79

O

octant	99, 101, 126
--------	--------------

P

pancakes	109, 134, 135, 137
pinch, toroidal	11
plasma	8, 9, 10, 30
- contamination of	97
- focus	20
- position control of	82
- pressure of	11, 13
- shape control of	82
- very high density	20
ports	
- diagnostic	83
- pumping	97, 120

power supply system	140, 146, 147, 153
- for additional heating	140
- from network	152
- requirements on site	91
- for poloidal field	126, 137, 138, 140
- for poloidal field amplifiers	140
- for toroidal field	140

pressure, magnetic 13

Programme, European R & D 4

prototype, production of 157

pumping

- magnetic	46
- cryo-	57, 103, 104
- duties of	156
- turbomolecular	104

Q

quality factor 13

R

radiation 16, 41, 76

- γ	106
- bremsstrahlung	41

reactions

- binary	9
- fusion	6, 7

reactor 7, 15, 16, 107

- dimensions of	75, 78
- domain	73, 74
- prototype	22
- study of materials for	20, 22
- technology	14, 20, 50

rectifiers 134

refractory materials, low-Z 106

reliability of components 79

remote handling 107, 120, 121

S

safety, structural 97

scaling laws 55, 74, 75, 79

screen	
- biological	15
- magnetic	15
sectors, rigid	100, 101, 158
shell structure	101
society, fusion	163
stability conditions	47
steering committee	18
stellarator	12, 14, 55, 173
- line	19, 20
- principle of	11
stray magnetic fields	103
stresses	
- fatigue problem	102
- from forces acting on coils	111
- electromagnetic	98, 102
- load	117
- mechanical	78, 117
- on insulating material	78
- shear	117, 118
structure	
- cellular	15
- mechanical	87, 119
study contracts	59, 60
surface, magnetic	11
switches	137
T	
tec	6
telem manipulator (see : remote handling)	122
tenders, call for	59, 60, 157
terminals, coil	120
IFR (France)	19, 35, 39, 42, 46
ticket, entrance	63
tokamak	12, 14, 30, 34, 40, 42, 46, 48, 49, 50, 75, 173
- dimensions of a	75, 78
- line	19, 168
- principle of	11, 31

torus, fat	78
transfer, energy	78
tritium	7, 78, 98, 101, 103
- breeding of	7
- burner	20, 22
- handling of	16, 90
T-20 (USSR)	76
V	
vacuum	
- conditions of	15, 96
vacuum vessel	12, 32, 42, 82, 85, 96, 97
- atmospheric pressure on	90, 102
- cryogenic	15
W	
wall, first	14, 16, 50, 76
welding	
- geometries	102
- tests	102
WENDELSTEIN VII (Germany, Federal Rep. of)	55
windings, helicoidal	12

Acknowledgements

The coordinator is grateful to all those who have finally helped in producing the present proceedings.

Additional Information

To obtain further information on the
FUSION & INDUSTRY 1st European Meeting
(13-14 October 1975) and copies of
these proceedings, please contact :

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES
Directorate General XII - Fusion Programme
200, Rue de la Loi
B - 1049 BRUSSELS

or :

JET DESIGN TEAM
CULHAM LABORATORY
UK - CULHAM near Abingdon
Oxfordshire
OX 14 3DB