

COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

COM(69) 350 - ANNEXE TECHNIQUE N° 10

Bruxelles, le 30 avril 1969

ACTIVITES FUTURES D'EURATOM

Annexe technique n° 10

" FUSION ET PHYSIQUE DU PLASMA "

COM(69) 350

ANNEXE TECHNIQUE N° 10

IV.1 FUSION ET PHYSIQUE DU PLASMA

FUSION ET PHYSIQUE DU PLASMA

I. INTRODUCTION

Le but ultime de ces recherches est la production d'énergie électrique à des prix compétitifs en exploitant les réactions entre noyaux atomiques légers (essentiellement H^2 , H^3 , He^3). Les principaux avantages par rapport aux autres sources classiques ou nucléaires (fission) sont: large disponibilité et répartition pratiquement uniforme du combustible ou, en général, des matières premières; grande sécurité; absence presque totale de déchets dangereux et protection contre les radiations, vraisemblablement plus facile que dans les réacteurs à fission.

Alors que pour la fission nucléaire l'exploitation industrielle est relativement aisée, dans le cas de la fusion le problème est plus compliqué: pour que les réactions de fusion se produisent en nombre suffisant, le combustible doit être maintenu à des températures très élevées (centaines de millions de $^{\circ}K$) et se trouve à l'état de "plasma". A ces températures, l'emploi de parois matérielles pour contenir ce plasma est exclu. Le problème de confinement devient primordial: on pense qu'il peut être résolu par l'emploi de champs magnétiques ou plus généralement électromagnétiques.

II. ROLE DE LA COMMISSION

1. Conformément aux dispositions du Traité qui dans les Annexes I et V prévoyait une action importante dans le domaine de la Fusion et dans la Physique des Plasmas, la Commission a joué depuis 1959 un rôle de promotion et de coordination qui a été généralement reconnu utile et efficace.

Pour les années à venir elle se propose de continuer son action avec des modalités semblables, dans la mesure du possible, à celles utilisées dans le passé. Elle y est encouragée par les conclusions du Groupe ad hoc "Fusion Thermonucléaire Contrôlée" du Comité Consultatif de la Recherche Nucléaire ^{*)} et par l'accord unanime déjà exprimé par tous les organes du Conseil pour l'inclusion de cette action dans un IIIème programme quinquennal.

^{*)} Doc. S/415/68 (CRN 6)

Son intention est de continuer à participer à la réalisation d'un large programme communautaire cohérent et coordonné, aux moyens d'Associations avec les Institutions et laboratoires suivants:

CEA	(France)	- Fontenay-aux-Roses et Saclay, et prochainement Grenoble
CNEN	(Italie)	- Frascati
IPP	(Allemagne)	- Garching
FOM	(Pays-Bas)	- Jutphaas, Amsterdam
KFA	(Allemagne)	- Jülich
CEA	(Belgique)	- U.L.B., E.R.M., Bruxelles

Dans le cadre de chaque Association on s'efforcera, lorsque cela se révélera utile et possible d'avoir recours à la collaboration d'autres Instituts et en particulier des Universités, qui développent une activité significative dans le domaine.

On ne peut exclure que des motifs techniques, qui seront mentionnés plus loin, demandent le transfert d'une partie de l'activité, très modeste en volume, dans un centre proprement nucléaire.

2. Parmi les activités scientifiques modernes le problème de la fusion thermonucléaire contrôlée a plusieurs caractéristiques qui le rendent particulièrement adapté à une collaboration communautaire. On peut mentionner l'universalité et l'importance des bénéfices qu'on pourra tirer de sa réussite et l'énorme complexité des problèmes qui demandent la collaboration de théoriciens, d'expérimentateurs, d'ingénieurs et la mise en oeuvre de moyens techniques compliqués, coûteux et d'avant-garde.

L'éloignement relatif d'un intérêt industriel immédiat (bien que des bénéfices indirects pour l'industrie ne puissent être exclus même à courte échéance) élimine en ce moment des difficultés rencontrées dans d'autres secteurs d'activité; finalement l'établissement et le maintien d'une collaboration communautaire réelle au stade actuel des recherches scientifiques promettent de faciliter la solution de problèmes économiques et industriels propres à la phase de développement et d'exploitation qui devrait suivre les études en cours.

Le nombre et la diversité des problèmes à résoudre pour faire converger les efforts vers un but défini et commun rendent la collaboration et la coordination extrêmement utiles.

3. Partant presque à zéro, au moment où les Etats-Unis, la Russie et l'Angleterre disposaient déjà d'équipes, de laboratoires importants et s'attaquaient à un programme d'une ampleur considérable, la Commission a développé en collaboration étroite avec les laboratoires nationaux une activité qui représente maintenant une fraction importante de l'effort mondial.

On a mis l'accent sur la promotion de l'activité en assurant simultanément une répartition des tâches pour éviter des doubles emplois inutiles et coûteux.

Si la répartition mondiale des travaux dans le domaine de la fusion se présentait sensiblement comme suit en 1959: Communauté 7,5%, Royaume Uni 8%, USA 36%, URSS 40%, en 1968 l'effort de la Communauté était légèrement inférieur à celui des Etats-Unis et représentait environ 20% de l'effort mondial. Cette progression se manifeste aussi bien sur le plan financier que sur celui des publications et des résultats scientifiques obtenus.

Ces buts peuvent être considérés aujourd'hui comme atteints. Le prolongement des Associations doit en assurer le maintien.

Le "Groupe ad hoc" a très fortement insisté sur le fait qu'une telle répartition des tâches et une telle collaboration sont rendues possibles par l'existence du système communautaire d'associations comportant financement, personnel et gestion mixte, ainsi que par les liaisons entre associations. En effet, dans la situation actuelle, des recherches en matière de fusion, où de nombreuses voies semblent possibles sans que puisse, à priori, être décelé laquelle est la meilleure, la tentation est forte pour chaque laboratoire et, en particulier pour les plus importants, d'en suivre le plus grand nombre possible. S'il en était ainsi, il en résulterait des dépenses plus lourdes, des dispersions inévitables et une diminution d'efficacité.

Par contre, comme l'expérience du passé l'a démontré, chacun des laboratoires associés peut accepter et faire accepter par son personnel scientifique le risque de se spécialiser dans un nombre restreint de secteurs à condition que son programme soit une partie d'un programme commun couvrant l'ensemble des domaines importants.

En conclusion, le Groupe ad hoc, se félicitant de l'intérêt que présentent, pour la Communauté les résultats obtenus, recommande vivement au Comité Consultatif de la Recherche Nucléaire la poursuite de cette action dans le cadre des activités futures d'EURATOM.

Aujourd'hui la situation scientifique a considérablement évolué par rapport à 1959. Les résultats acquis permettent une meilleure définition des problèmes et des procédés à suivre pour leur solution. Certaines voies d'approche, choisies comme toutes les autres d'ailleurs, sur des bases plus ou moins empiriques, sont maintenant abandonnées. Plusieurs autres reçoivent par contre une attention croissante. L'effort se concentre, ce qui rend la répartition des tâches à la fois plus difficile et plus nécessaire. L'objectif majeur de la Commission pour la prochaine période quinquennale est donc le renforcement de la collaboration entre groupes et laboratoires sur les sujets communs.

4. Les moyens dont la Commission veut disposer pour l'accomplissement de ces tâches sont:

- a) Le maintien du personnel de la Commission dans les Associations,
- b) Sa participation financière,
- c) Les Comités de Gestion,
- d) Le Comité des Directeurs, le Groupe de Liaison,
- e) Les Groupes de travail sur des sujets d'intérêt commun.

a) La Commission espère continuer à mettre à la disposition des laboratoires des physiciens et ingénieurs collaborant sur un pied d'égalité avec le personnel national.

On provoque ainsi un brassage d'idées et de méthodes de travail et on favorise des contacts permanents entre les laboratoires des différents pays.

Il serait en plus très souhaitable de pouvoir disposer d'un certain nombre de cases temporaires pour favoriser l'échange de personnel national entre associations.

b) La participation financière de la Commission sera constituée par la presque totalité de dotation accordée par les pays-membres. Elle est utile pour plusieurs raisons:

- les droits aux connaissances et brevets qui en résultent, ainsi que le Groupe ad hoc l'a fait remarquer, rendent possible la coordination des travaux.

- comme l'expérience du passé l'a prouvé, la pluralité des sources de financement et l'existence des contrats de longue durée atténue les conséquences de difficultés temporaires ou de fluctuations de tendance de la part d'un partenaire.

- le financement commun donne au personnel de la Commission et aussi au personnel national, la sensation de travailler pour la Communauté.

c) Les Comités de Gestion, nécessaires au point de vue administratif, se sont montrés utiles lors de la définition des programmes et notamment pour éviter les doubles emplois.

La participation dans un Comité des dirigeants scientifiques d'autres laboratoires facilite le développement d'un programme commun.

d) Le Groupe de Liaison, ainsi que le Comité des Directeurs - plus récemment constitué - se sont révélés efficaces chaque fois que des problèmes, aussi bien scientifiques que d'organisation, ont été soulevés.

On se propose de renforcer le Groupe de Liaison, dont l'avis sur chaque projet important sera demandé avant toute décision du Comité de Gestion compétent.

e) Des Groupes de Travail permanents, ou des Groupes "ad hoc", assurent l'échange d'information dans plusieurs domaines d'intérêt commun ou la discussion de problèmes particuliers.

Depuis plusieurs années il y a des groupes pour :
la technologie, les lasers, les interactions plasma-Haute Fréquence.
D'autres sont envisagés.

- - - - -

III. BUT ET ACTION

Comme il a déjà été mentionné le but à long terme est la réalisation d'un réacteur thermonucléaire.

Pour l'atteindre il faudra en premier lieu franchir l'étape préliminaire de la production et du confinement d'un plasma dense et chaud, pendant une durée qui, pour que l'opération soit rentable, doit

dépasser une valeur minimum inversement proportionnelle à la densité. P.e. pour un réacteur fonctionnant en régime quasi stationnaire cette durée devrait être supérieure à la seconde. Une fois le problème physique résolu, il restera à surmonter des problèmes technologiques considérables, mais qui ne semblent pas en dehors des limites du possible.

Il faut en tout cas considérer qu'une solution positive du problème sera obtenue non seulement par le progrès en physique de plasma, mais aussi par le progrès général de la science et de la technologie. Ainsi on ne peut pas exclure la possibilité de sources d'énergie pulsées, utilisant des plasmas de densité très élevée et de temps de vie très court. Ceci même si la technologie actuellement disponible ne permet pas leur réalisation industrielle.

En dehors de ce but principal on ne peut négliger l'intérêt général et les sous-produits possibles du programme de recherches proposé.

Le seul fait que le plasma constitue plus de 95% de la matière de l'univers impose la nécessité de faire progresser la physique du plasma ne serait-ce que pour son intérêt scientifique et ses interactions avec d'autres domaines de la science.

Les recherches physiques qu'il faut poursuivre engendrent de nombreuses "cross-fertilization" en particulier avec l'astrophysique, l'étude des propriétés de l'ionosphère, de la magnétosphère, le problème général de la structure de la matière, la recherche spatiale à titre d'exemples.

Il en est de même dans le domaine de la technologie de pointe et notamment dans le domaine de la propulsion spatiale, de la conversion directe, de l'électronique gazeuse, des communications spatiales et d'autres applications possibles des propriétés des plasmas.

En outre ces recherches exigent l'emploi de matériaux et d'équipements techniques aux caractéristiques de plus en plus poussées et entraînent de nombreuses retombées technologiques. Citons à titre d'exemple la réalisation de nouvelles sources d'énergie, de sources ioniques, la production de champs magnétiques à l'aide de matériaux supraconducteurs, la réalisation d'appareillages permettant d'atteindre un vide poussé ou de nouveaux appareillages de diagnostics et de dépouillement et exploitation de mesures extrarapides.

Un autre avantage est la création d'un réservoir de spécialistes dans les divers domaines les plus avancés de la physique appliquée: microondes, champs magnétiques très élevés, laser, etc.

Finalement il ne faut pas négliger l'intérêt que pourrait avoir cette activité dans le domaine de l'assistance technique aux pays en voie de développement. L'approfondissement de l'état des connaissances acquises ouvre un très large champ d'expériences peu coûteuses et dépourvues de danger, qui sont d'excellents instruments de promotion scientifique permettant de mettre les étudiants en contact avec de nombreux sujets de la technologie et de la physique moderne.

Le programme, qui est détaillé dans les pages suivantes, a été dans ses grandes lignes approuvé par le Groupe "ad hoc"-Fusion.

Les principales actions peuvent être regroupées comme suit:

- 1) Confinement: Problèmes relatifs à l'équilibre, la stabilité et la diffusion en configurations fermées du type "pièges magnétiques", pinch toroïdal" et "multipolaires".
Configurations ouvertes et en particulier possibilités d'employer des bouchons H.F."
- 2) Production et chauffage de plasma, "in situ", et par injection.
- 3) Plasma non confiné ou marginalement confiné de très haute densité: méthodes de production; applications, technologies relatives.
- 4) Physique générale du plasma: Expériences fondamentales; ondes dans le plasma; développement des diagnostics.
- 5) Etudes et développement technologiques, en relation aussi bien aux problèmes posés par un futur réacteur thermonucléaire, qu'en connexion avec les expériences en cours ou en programme.

Comme il a été dit précédemment, au cours de ces recherches, les possibilités d'applications de la physique des plasmas dans d'autres domaines ne devraient pas être perdues de vue.

IV. ETAT DE L'ART ET PROGRAMME DE LA COMMUNAUTE

Les progrès réalisés au cours des dernières années dans l'accroissement des connaissances sur les propriétés physiques d'un plasma permettent aux spécialistes d'avoir une idée assez claire de comportement physique de cet état de la matière. Les phénomènes prédits par la théorie et ceux observés dans les expériences se coordonnent aujourd'hui de manière cohérente. L'acquisition de cet "état de l'art" élimine pratiquement l'empirisme qui a longtemps caractérisé les recherches entreprises et permet d'affirmer que des progrès certains vers la réalisation de l'objectif seront accomplis dans les années à venir.

Un plasma confiné dans un volume par un champ magnétique n'est jamais en état d'équilibre thermodynamique. L'écart à cet équilibre crée un réservoir d'énergie libre capable d'alimenter l'amplification de perturbations apparaissant au sein du système et de détruire le confinement. Pour bloquer l'apport d'énergie vers une perturbation de type donné, il est nécessaire de donner une structure à l'ensemble plasma-champ magnétique. Il convient d'interdire le développement de toutes les instabilités dont le taux de croissance est incompatible avec la durée du temps de confinement nécessaire. Les instabilités résiduelles n'ont alors d'autre effet que d'accroître le phénomène classique de diffusion.

L'obtention d'un confinement prolongé conduit à deux catégories de problèmes d'ailleurs liés: celui de la stabilité de l'équilibre du plasma et celui de la diffusion.

Les instabilités sont divisées en instabilités magnétohydrodynamiques qui ne font intervenir que les propriétés fluides du plasma indépendamment de sa microstructure et en instabilités liées à l'écart de la fonction de distribution des particules par rapport à une fonction de distribution Maxwellienne. Deux structures particulières du champ magnétique empêchent totalement le développement des instabilités magnétohydrodynamiques et portent remède à la majorité des instabilités dues à des effets de microstructure: l'une présente un cisaillement des lignes de force du champ en tout point du volume de confinement, l'autre est une configuration présentant un puits magnétique moyen ou absolu.

En l'absence d'instabilités violentes le "déconfinement" du plasma n'est plus dû qu'à des phénomènes de diffusion. Le mécanisme normal, la diffusion résistive a un temps de relaxation suffisamment long pour atteindre la durée de confinement nécessaire. En présence d'instabilités résiduelles un mécanisme de diffusion turbulente se superpose dont le temps de relaxation peut ruiner la réalisation de l'objectif (Diffusion de Bohm).

Plusieurs expériences montrent actuellement que l'on peut atteindre un contrôle suffisant du niveau des instabilités résiduelles pour que le temps de relaxation soit sensiblement supérieur au temps de Bohm.

L'activité majeure de la Communauté au cours du troisième plan sera centrée sur les problèmes de confinement, plus particulièrement dans le domaine des configurations fermées.

On peut distinguer deux classes de confinement toroïdal. Dans la première le champ magnétique nécessaire au confinement est créé par des bobinages extérieurs au plasma; dans la seconde les courants électriques dans le plasma sont essentiels.

Dans le premier cas, chaque particule du plasma est en principe confinée individuellement, l'équilibre d'ensemble du gradient de pression du plasma résultant d'un effet diamagnétique créé dans le milieu par la superposition des mouvements individuels. On dénomme ce type de machine "piège magnétique fermé". L'exemple le plus connu est le Stellarator.

Le confinement en pièges magnétiques fermés sera étudié principalement dans les laboratoires de la Communauté à GARCHING et à FONTENAY-AUX-ROSES.

Les deux programmes se différencient de manière intéressante. Outre un champ magnétique longitudinal de base, ces machines comportent un ensemble de bobinages hélicoïdaux disposés à la surface du tore, parcourus par des courants de signes opposés lorsque l'on passe d'un bobinage au suivant dans la machine de GARCHING, et de même signe dans la machine de FONTENAY-AUX-ROSES.

La superposition de ces champs peut créer dans le volume de confinement les effets de cisaillement et de puits magnétique.

Il s'agit en général de configurations assez compliquées dont l'étude théorique est encore en cours de développement.

Le programme entrepris à GARCHING s'est développé dans le cadre de l'activité WENDELSTEIN centrée sur l'utilisation de plasmas de Cesium et Barium de faible densité et température. On a montré que des plasmas pouvaient avoir des temps de diffusion largement supérieurs au temps de diffusion de Bohm.

Ces travaux, qui constituent un succès indéniable, méritent d'être poursuivis énergiquement. On continuera les études sur des plasmas de la même nature, probablement dans des dispositifs nouveaux d'un plus grand volume et avec des champs magnétiques allant jusqu'à 50 kGauss produits par des bobinages supraconducteurs. On passera ensuite progressivement à des plasmas d'hydrogène de température et densité plus élevées pour s'approcher du domaine d'intérêt thermonucléaire.

Le programme de FONTENAY-AUX-ROSES se concentre sur le développement éventuel d'une filière "TORSATRON" basée sur des études théoriques détaillées établissant la possibilité de réaliser des pièges magnétiques disposant simultanément de manière non négligeable des deux effets stabilisants, cisaillement et puits magnétique.

L'intérêt d'entreprendre à petite échelle une première réalisation expérimentale pour tester les difficultés technologiques qu'entraîne la réalisation d'une configuration magnétique très précise ne fait pas de doute.

Un groupe de travail interassociations pour l'étude et la coordination de cette partie du programme a été constitué.

La seconde classe de configurations fermées, qui font appel aux courants propres du plasma pour la création du champ de confinement est celle des "machines à striction toroïdale" dont les exemples les plus connus sont ZETA (U.K.), TOKAMAK (URSS) et Screw Pinch (Jutphaas). Ces configurations présentent l'avantage d'une symétrie axiale ce qui permet sur des bases théoriques solides de prévoir les conditions d'existence d'un confinement.

C'est dans le domaine de configurations "TOKAMAK" et "Screw Pinch" stabilisées par un champ longitudinal fort que devrait se porter un effort considérable de la Communauté au cours du troisième plan. L'absence de toute machine importante de ce type dans la Communauté apparaît à l'heure actuelle comme une lacune qu'il convient de pallier de manière d'autant plus pressante que des progrès sensibles ont lieu en Union Soviétique qui détient un quasi monopole depuis de nombreuses années dans ce domaine.

Plusieurs projets sont en cours d'élaboration au sein de la Communauté et l'intérêt de resserrer la coordination des efforts de recherche par une planification des travaux apparaît évident.

Le laboratoire de JÜLICH projette la réalisation d'une machine qui atteindrait un rapport entre la pression cinétique du plasma et la pression du magnétique (rapport "Beta") plus élevé que dans toutes les machines réalisées jusqu'ici en URSS et s'attachera à l'étude de l'équilibre et de la stabilité du plasma obtenu.

Le laboratoire de FRASCATI envisage de réaliser un projet à champ magnétique intense et s'efforcera d'utiliser la compétence qu'il a acquise sur les techniques lasers pour étudier en détail les profils des distributions radiales de densité et de courant et doper le plasma, normalement réalisé par chauffage ohmique, d'une population de particules plus chaudes.

Le laboratoire de FONTENAY-AUX-ROSES développe depuis plusieurs années les études théoriques que posent ces machines et estime nécessaires de prévoir la réalisation d'une première machine au cours du troisième plan, à la fin des études en cours, qui prolongera le programme HARMONICA.

La Commission s'efforcera de développer une collaboration étroite entre les laboratoires de FONTENAY-AUX-ROSES et de FRASCATI dont les orientations sont similaires.

Il est aussi proposé d'établir une collaboration entre les laboratoires de FONTENAY-AUX-ROSES et de GARCHING pour accélérer l'étude en calcul numérique des problèmes théoriques.

D'autres filières de la catégorie des machines à strictionnements toroïdales doivent être poursuivies dans la Communauté.

Le laboratoire de JUTPHAAS s'est particulièrement intéressé au rôle que la zone annulaire, qui sépare dans une configuration fermée le volume de plasma chaud confiné de la paroi de la machine, peut jouer sur le confinement.

En accord avec les calculs théoriques plusieurs réalisations expérimentales ont confirmé qu'une stabilité supérieure vis-à-vis des instabilités magnétohydrodynamiques par rapport aux cas précédents

était obtenue lorsque la structure hélicoïdale du champ magnétique dans la zone annulaire avait la structure d'un champ "sans force". Bien que le temps de confinement soit plus court que celui des machines mentionnées auparavant, les densités de plasma y sont plus élevées. C'est pourquoi il convient de poursuivre les recherches et de réaliser un nouvel appareil de taille plus importante qui exige une source importante d'énergie.

Un groupe de travail interassociations a été constitué pour l'étude et la coordination de cette partie du programme.

Une autre voie a encore été développée au laboratoire de JUTPHAAS qui se base sur l'idée de séparer le plasma chaud de la paroi matérielle par une gaine de plasma froid et d'utiliser le champ magnétique comme réducteur de la conductibilité thermique dans les directions perpendiculaires aux lignes de force du champ.

Les laboratoires de JUTPHAAS et de GARCHING ont déjà établi une collaboration étroite pour les recherches basées sur cette possibilité.

Le laboratoire de GARCHING porte son activité sur les études expérimentales et théoriques liées à l'existence du gradient de température dont le comportement est fondamental dans cette approche.

Le laboratoire de JUTPHAAS concentre actuellement son activité sur les méthodes de réalisation d'une telle configuration et sur la stabilisation dynamique rendue possible par la mise en rotation de la gaine extérieure.

Enfin dans la ligne d'une conversion en géométrie toroïdale des résultats obtenus sur les machines "Theta Pinch" ISAR, le laboratoire de GARCHING développera un projet, dont les étapes préliminaires sont en cours d'études au sein d'un groupe de travail du laboratoire, qui conduira à la réalisation de machines fermées confinant un plasma où le "facteur Beta" sera très élevé.

Un autre groupe de configurations fermées permet de donner au champ magnétique les effets stabilisants de cisaillement ou de puits magnétique. Elles se distinguent des précédentes par la présence de conducteurs matériels au coeur de la zone de confinement. Leur intérêt résulte de la qualité ou de la précision avec lesquelles on peut contrôler les influences du cisaillement et d'un puits

magnétique grâce à la souplesse introduite par la présence des conducteurs dans le volume de confinement. La présence du conducteur pose néanmoins un problème dans l'optique d'une extrapolation thermonucléaire.

A FONTENAY-AUX-ROSES plusieurs machines de tailles croissantes ont été ou sont en construction, qui appartiennent à la catégorie "LEVITRON" formée d'une machine toroïdale dont le conducteur central doit être maintenu en lévitation par le champ magnétique engendré. La machine "STATOR II" doit fournir un ensemble de résultats importants sur le temps de confinement, sur la possibilité de chauffage cyclotronique d'un plasma. Une réalisation plus importante "SUPERSTATOR" est proposée qui extrapole en dimension cette machine et tend à vérifier le confinement prolongé d'un plasma et d'en étudier le comportement dans une gamme de paramètres élevés.

A GARCHING deux configurations multipolaires à puits magnétiques produits par des anneaux intérieurs à l'enceinte torique sont étudiées dans le cadre de l'activité WENDELSTEIN de ce laboratoire: un octopole à quatre anneaux dont l'exploitation sera poursuivie et un quadrupole à deux anneaux supraconducteurs lévités dont la réalisation est en cours. Ces dispositifs utilisent des plasmas de Cesium. L'activité est concentrée sur l'étude des mécanismes de pertes par diffusion anormale.

Outre les configurations fermées dont la vocation thermonucléaire paraît possible, les configurations ouvertes ont fait l'objet d'un effort particulier lors des premiers plans quinquennaux.

Dans une configurations ouverte le plasma n'occupe qu'une section de longueur finie des lignes de force du champ de confinement et plus particulièrement le volume de l'espace où ces lignes créent un puits magnétique absolu. A la différence des configurations fermées où les mêmes effets n'existent que de manière marginale, par le principe même du mécanisme de confinement d'une configuration ouverte, les fonctions de distributions des populations de particules confinées sont fortement anisotropes dans l'espace des vitesses. Il existe en tout point un "cône de pertes" source d'énergie libre non éliminable à l'heure actuelle, qui, compte tenu des mesures récentes sur le développement rapide des microinstabilités spécifiques, réduit considérablement

l'intérêt porté à ces configurations comme base d'un éventuel réacteur. Toutefois les machines ouvertes ont été dans le passé d'une utilité incontestable car c'est à leur étude que l'on doit la mise en évidence de l'intérêt des configurations à puits magnétique pour la stabilisation d'un plasma.

De manière générale les recherches dans le domaine des configurations ouvertes subissent un net ralentissement.

Il serait cependant inopportun d'arrêter toute activité dans ce domaine. Il convient en effet d'examiner la possibilité de remédier aux inconvénients inhérents à ces configurations et de ne pas négliger l'apport scientifique que l'on peut retirer de ces expériences pour l'étude de phénomènes particuliers. Il serait aussi inopportun d'interrompre brutalement l'exploitation des machines réalisées sans que les recherches spécifiques entreprises sur chacun d'elles ne soient conduites à leurs termes.

Le laboratoire de FONTENAY-AUX-ROSES avait pris en charge l'étude de ces configurations lors des premiers plans quinquennaux. Dans l'intérêt pour la Communauté de ne pas rompre toute activité en la matière, il se propose de mettre au point un système d'injection de neutres rapides dont la distribution en énergie pourra être contrôlée de manière précise. Outre l'intérêt générale de disposer d'un tel système d'injection, son emploi permet d'élaborer un programme centré sur l'étude expérimentale détaillée de la théorie des microinstabilités et pourrait permettre d'alimenter en plasma une version très élaborée de machine ouverte dénommée "lacet quadrupolaire".

Dans le cadre d'un programme de recherche étendu décrit plus loin le laboratoire de SACLAY, prochainement transféré à GRENOBLE, étudie sur plusieurs machines de la série "PLEIADE" la possibilité de remédier aux inconvénients propres des machines ouvertes (Bouchons H.F.).

Quittant le problème du confinement le second problème fondamental objet du programme est la production et le chauffage du plasma afin de porter les paramètres densité et températures dans la gamme des valeurs d'intérêt thermonucléaire ou de remplir des configurations particulières.

Au delà des problèmes spécifiques de préionisation et d'ionisation du gaz neutre, le premier mode de chauffage est le mécanisme classique du chauffage ohmique. Son efficacité décroît lorsque la température augmente et empêche qu'il puisse à lui seul conduire au domaine thermonucléaire. A cet égard des problèmes spécifiques doivent encore être étudiés et élucidés dus à l'existence et à l'exploitation d'une résistivité anormale dans certaines machines.

Deux méthodes non ohmiques de chauffage sont extrêmement efficace. Elles utilisent la propagation d'ondes de choc fortes ou une compression rapide par un champ magnétique. Ces méthodes font l'objet des expériences de striction rapide "Theta-pinch". Elles ont l'inconvénient de laisser peu de liberté d'action sur la structure du champ, mais ont la qualité de créer des plasma chauds, denses et très purs sans confinement prolongé.

La poursuite des travaux sur ces méthodes sera essentiellement accomplie aux laboratoires de GARCHING et JÜLICH.

Le laboratoire de GARCHING travaille en configuration ouverte sur les dispositifs ISAR et concentre son étude sur le bilan d'énergie.

Le laboratoire de JÜLICH étudie sur le dispositif JULIETTA l'influence d'un champ magnétique piégé de direction apposée à celle du champ principale de compression.

On a déjà indiqué auparavant que le laboratoire de GARCHING prépare l'extension de ces travaux à la géométrie fermée. A JÜLICH on se propose par ailleurs d'étudier les mécanismes engendrant une rotation élevée dans de telles expériences dont l'élucidation est importante pour la compréhension du comportement de plasma en géométrie toroïdale.

D'autres méthodes plus souples permettent de produire un plasma et de combler l'insuffisance du chauffage ohmique, et sont basées sur la propagation d'ondes et phénomènes d'interaction ondes-plasma soit par utilisation de plages de résonance permettant un transfert d'énergie aux électrons ou aux ions du plasma, soit par la création d'un état de turbulence faible par excitation de microinstabilités particulières.

L'essentiel de l'activité du laboratoire de SACLAY/GRENOBLE s'exerce dans ce domaine, dont l'ensemble de l'activité est centrée sur les

interactions d'ondes électromagnétiques avec le plasma et répartie sur un assez grand nombre de dispositifs, soit pour la construction de sources alimentant une configurations, soit pour l'accélération de plasma à densité et énergie élevées en haute et basse fréquence, soit pour l'étude du transfert non collisionnel d'énergie d'une onde électromagnétique aux particules d'un plasma et l'étude de la puissance absorbée ou engendrée par les différents modes excités par une source dans un plasma, soit pour étudier différentes possibilités de stabilisation dynamique par champ B.F.

Le laboratoire de JUTPHAAS travaille dans le même domaine en collaboration avec le laboratoire de SACLAY.

La technique "laser" qui concentre une très grande énergie dans un volume restreint permet de développer d'autres méthodes de chauffage qui ont l'attrait fondamental d'être totalement indépendantes de la configuration du champ magnétique: on ionise et chauffe localement une masselotte solide de deutérium soit pour le remplissage d'un piège magnétique en plasma chaud soit pour ajouter une population chaude à un plasma déjà confiné.

Le programme le plus étendu sur cette activité sera poursuivi au laboratoire de FRASCATI dans le cadre de l'expérience HOT-ICE. On étudiera en particulier son adaptation aux machines à striction toroïdale stabilisées par un champ magnétique fort comme on l'a déjà mentionné.

D'autres expériences de même nature sont entreprises à GARCHING, FONTENAY-AUX-ROSES et SACLAY/GRENOBLE.

Une collaboration étroite est établie entre ces laboratoires, concrétisée par l'existence d'un groupe de travail permanent.

Enfin, plus particulièrement pour le cas des pièges magnétiques le développement de techniques qui créent hors de la configuration des faisceaux d'ions ou de neutres rapides permet, par mise au point de système d'injection, de remplir une configuration d'une population chaude.

L'essentiel de l'activité correspondante sera effectué au laboratoire de FONTENAY-AUX-ROSES ainsi qu'on l'a déjà mentionné.

Une autre voie d'approche pour l'utilisation des réactions de fusion consiste dans la formation de plasma de très haute densité, marginalement confiné ou non confiné, ou dans l'exploitation de l'action de

"trigger" produite par la réalisation instantanée de très haute densité d'énergie. Cette activité qui comporte entre autres l'emploi de champs magnétiques très élevés et la compression inertielle par "liners" plasmatiques ou d'autre nature a été activement poursuivie à FRASCATI.

Le maintien d'une activité dans ce domaine semble opportun, d'autant plus que même si l'on peut s'attendre à des progrès dans le temps de confinement des configurations fermées, des difficultés supplémentaires peuvent être engendrées dans un réacteur quasi-stationnaire par la présence de produits de réactions.

Au cours des recherches faites à FRASCATI et dans plusieurs autres laboratoires, les plasmas de très hautes densités se sont déjà révélés comme sources pulsées de neutrons de fission. L'action dans ce domaine sera poursuivie. Il se peut que la quantité de neutrons produits pose des problèmes d'utilisation ainsi que de protection qu'on devrait plus facilement résoudre dans un centre de Technologie nucléaire que dans un laboratoire de Physique des Plasmas; le transfert d'une partie de cette activité, qui ne représente que quelques pourcents du total pourra donc s'avérer utile en cours de plan, mais il est encore prématuré de fixer une proposition précise.

La quatrième partie du programme résulte de l'enrichissement des connaissances acquises sur les propriétés physiques caractéristiques d'un plasma qui permet d'introduire une grande souplesse dans les recherches. Ainsi l'étude d'un phénomène spécifique important pour la réalisation de l'objectif thermonucléaire est souvent mieux accomplie lors qu'elle est entreprise dans un domaine de paramètres physiques sans rapport avec les valeurs d'intérêt thermonucléaire.

Ceci conduit les différents laboratoires de la Communauté à entreprendre un certain nombre d'études et d'expériences, qui ne s'encadrent pas directement dans une filière, qu'il convient de caractériser comme "satellites" et ayant un but propre, dont l'effet est d'accélérer la progression vers l'objectif principal. Le même enrichissement permet de donner naissance à de nouvelles méthodes de diagnostics qui ne se limitent plus à la mesure de quelques paramètres globaux mais se raffinent en exploitant spécifiquement les lois physiques du plasma étudié.

Les résultats de ces recherches à but spécifique apportent régulièrement des perfectionnements de méthodes existantes ou en engendrent de nouvelles qui contribuent à la progression d'ensemble du programme.

Le laboratoire d'AMSTERDAM s'est spécialisé dans un programme d'étude de microinstabilités en provoquant de manière contrôlable des déviations de la fonction de distribution d'énergie d'un plasma à l'aide de plusieurs systèmes d'injection de faisceaux de particules chargées.

Le laboratoire de l'Ecole Royale Militaire à Bruxelles, étudie de manière approfondie et exhaustive les interactions ondes-plasma lors de résonances dans des plasmas de dimensions limitées et qui se relie aux problèmes de chauffage.

Le laboratoire de SACLAY/GRENOBLE étudie les interactions ondes-plasma dans des configurations ouvertes en s'orientant vers leur application à divers objectifs déjà mentionnés.

Le laboratoire de JÜLICH s'intéresse à l'utilisation des interactions ondes-plasma en vue d'accélérer un plasma par ondes progressives. L'intensité des sources quasi-continues de plasma qui doivent résulter de ce programme présente un intérêt évident pour l'injection dans des pièges magnétiques toroïdaux ou autres.

Le laboratoire de FONTENAY-AUX-ROSES s'attache particulièrement, dans la poursuite des travaux sur les microinstabilités, aux effets d'interaction non linéaire des ondes, dont on peut prévoir l'application dans de nouvelles méthodes de diagnostics.

Les laboratoires de FRASCATI, de FONTENAY-AUX-ROSES et de SACLAY poursuivront ou termineront leurs études de l'excitation d'ondes de dérive engendrées par les non-uniformités du plasma.

Les recherches sur la propagation d'ondes sans collisions, seront poursuivies à JÜLICH et éventuellement FONTENAY-AUX-ROSES.

Les recherches sur la réalisation d'arcs dans des géométries particulières seront poursuivies à JUTPHAAS et GARCHING.

Le développement de l'ensemble de ce programme, qui vient d'être détaillé ne peut se faire qu'à l'aide du soutien des études théoriques.

La connaissance du milieu matériel que constitue le quatrième état de la matière formé d'un grand nombre de particules chargées en interaction collective mène à l'utilisation de formalismes mathématiques de plus en plus poussés. Cet aspect du problème sera étudié à l'UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES particulièrement dans le domaine de forte turbulence et d'interaction rayonnement-plasma.

D'autre part les améliorations des méthodes de diagnostics en cours et la meilleure précision des réalisations expérimentales ne permettent plus de se limiter à des modèles théoriques idéalisés et conduisent à développer les calculs en tenant compte des effets géométriques réels d'une expérience. Ceci ne peut se faire que par le développement d'un effort dans le domaine du calcul numérique conduisant à des expériences numériques qui nécessitent l'emploi d'ordinateurs de grande capacité.

Il va de soi que l'exposé qui précède n'est pas exhaustif mais fixe les grandes lignes du programme, qui doit toujours être susceptible d'évoluer au fur et à mesure de l'amélioration de la connaissance.

En terminant l'exposé du programme de la Communauté qu'elle se propose de promouvoir au cours du plan quinquennal, la Commission estime qu'il lui appartient de mettre les Etats Membres en garde contre le tort que causerait à la Communauté le maintien inutile d'une situation transitoire dont l'existence en 1968 a porté préjudice à la rentabilité globale des recherches entreprises dans la Communauté, dans le domaine de la Fusion Thermonucléaire.

V. MOYENS NECESSAIRES

On peut estimer raisonnablement que le budget total des Associations pour le plan quinquennal, s'élèverait à environ 150 MUC.

Avec un pourcentage de participation de la Commission de 30%, la dotation nécessaire s'élève à 45 MUC.

En ce qui concerne le personnel l'effectif moyen nécessaire en cours de plan est de 94 agents EURATOM.

En outre afin de faciliter les échanges de personnel national entre les associations de former des équipes internationales de chercheurs sur des projets déterminés, il faut prévoir 10 postes d'agents temporaires (durée 1 à 2 ans) ou toute autre solution équivalente permettant de tels échanges.

Conformément à la recommandation du groupe "ad hoc" il est en outre opportun de prévoir une réserve au cas où une grosse opération aujourd'hui imprévisible, se révélerait nécessaire en cours de plan.