

ARCHIVES HISTORIQUES DE LA COMMISSION

COLLECTION RELIEE DES
DOCUMENTS "COM"

COM (78)616

Vol. 1978/0239

Disclaimer

Conformément au règlement (CEE, Euratom) n° 354/83 du Conseil du 1er février 1983 concernant l'ouverture au public des archives historiques de la Communauté économique européenne et de la Communauté européenne de l'énergie atomique (JO L 43 du 15.2.1983, p. 1), tel que modifié par le règlement (CE, Euratom) n° 1700/2003 du 22 septembre 2003 (JO L 243 du 27.9.2003, p. 1), ce dossier est ouvert au public. Le cas échéant, les documents classifiés présents dans ce dossier ont été déclassifiés conformément à l'article 5 dudit règlement.

In accordance with Council Regulation (EEC, Euratom) No 354/83 of 1 February 1983 concerning the opening to the public of the historical archives of the European Economic Community and the European Atomic Energy Community (OJ L 43, 15.2.1983, p. 1), as amended by Regulation (EC, Euratom) No 1700/2003 of 22 September 2003 (OJ L 243, 27.9.2003, p. 1), this file is open to the public. Where necessary, classified documents in this file have been declassified in conformity with Article 5 of the aforementioned regulation.

In Übereinstimmung mit der Verordnung (EWG, Euratom) Nr. 354/83 des Rates vom 1. Februar 1983 über die Freigabe der historischen Archive der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft und der Europäischen Atomgemeinschaft (ABl. L 43 vom 15.2.1983, S. 1), geändert durch die Verordnung (EG, Euratom) Nr. 1700/2003 vom 22. September 2003 (ABl. L 243 vom 27.9.2003, S. 1), ist diese Datei der Öffentlichkeit zugänglich. Soweit erforderlich, wurden die Verschlussachen in dieser Datei in Übereinstimmung mit Artikel 5 der genannten Verordnung freigegeben.

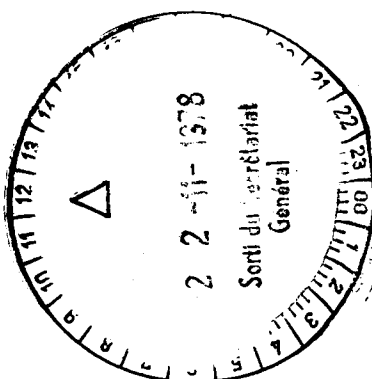
COMMISSION DES COMMUNAUTES EUROPEENNES

COM(78) 616 final

Bruxelles, le 21 novembre 1978

PROPOSITION
DE
PROGRAMME DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT (1979-1983)
POUR LA COMMUNAUTE EUROPEENNE DE L'ENERGIE ATOMIQUE DANS
LE DOMAINE DE LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

(présentée par La Commission au Conseil)



Le programme proposé par la Commission couvre la quasi-totalité du programme Européen sur la fusion. Il est basé sur les recommandations du "Groupe de Liaison" (assisté par ses "Groupes Consultatifs" et des "Groupes d'Experts"), et il tient compte de l'avis préliminaire formulé par le "Comité Consultatif Fusion". L'interaction avec les organismes nationaux associés a été assurée aussi par l'intermédiaire du "Comité des Directeurs". La Commission tient à exprimer sa reconnaissance aux membres de ces Comités pour l'avoir aidée à trouver un compromis entre des propositions techniques ambitieuses et la considération réaliste des contraintes financières.

TABLE DES MATIERES

	page
A) Exposé des motifs	2-61
I. INTRODUCTION	
I.1 La fusion, source d'énergie	2
I.2 Nature communautaire du Programme	3
I.3 Motivation de l'initiative de la Commission	3
I.4 Motivation de la présente proposition de programme	4
II. SITUATION ACTUELLE DE LA RECHERCHE SUR LA FUSION THERMONUCLEAIRE	
II.1 Points de repère	5
II.2 Situation scientifique et technique	6
II.3 Contexte mondial	8
II.4 Situation en Europe	10
II.5 Résumé des principaux progrès enregistrés durant les trois premières années du programme en cours	20
III. PROGRAMME PROPOSE	
III.1 Information provenant des études de planification à long terme	23
III.2 Objectifs du plan quinquennal	23
III.3 Confinement magnétique	26
III.4 Technologie de la fusion	36
III.5 Confinement inertiel	44
III.6 Résumé du programme proposé	46
IV. MOYENS D'EXECUTION	
IV.1 Situation financière du programme 1976-80	49
IV.2 Proposition de programme pour 1979-1983	50
IV.3 Organisation	59
B) Proposition de décision du Conseil arrêtant un programme de recherche et d'enseignement (1979-1983) de la CEEA dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée	62
C) Avis du Comité scientifique et technique Avis du Comité Consultatif sur la Fusion	68
D) Fiche financière	71

A) EXPOSE DES MOTIFSCHAPITRE IINTRODUCTIONI.1 LA FUSION, SOURCE D'ENERGIE

A l'échelle mondiale, le problème des sources d'énergie à long terme est loin d'être résolu. La fusion thermonucléaire est l'une des très rares sources qui pourraient résoudre ce problème ou du moins contribuer substantiellement à sa solution. Il est inutile de souligner ici la gravité du problème de l'énergie pour l'Europe. Les avantages potentiels que l'Europe pourrait tirer de l'énergie de fusion sont particulièrement importants en raison de son niveau élevé de consommation d'énergie par unité de surface, de sa latitude et de son climat.

Le développement de réacteurs de fusion de puissance est une entreprise longue, complexe et coûteuse dont le succès, dans l'état actuel des connaissances, n'est pas garanti. Mais compte tenu de l'importance de l'objectif, les coûts et les risques impliqués ne sont pas disproportionnés. Le coût annuel du programme proposé équivaut en effet au coût d'une journée de consommation actuelle de pétrole dans la Communauté.

C'est en se basant sur de telles considérations qu'en 1958 la Communauté Européenne a lancé un programme sur "la fusion thermonucléaire contrôlée et la physique des plasmas" dont le but est d'évaluer la possibilité de produire à un coût compétitif, de l'énergie utile à partir de réactions entre noyaux légers. Ce programme devrait, le moment venu, conduire à la construction en commun de réacteurs prototypes en vue de leur production à l'échelle industrielle et de leur commercialisation. Il est nécessaire de disposer d'évaluations régulièrement mises à jour sur les perspectives de l'énergie de fusion et sur les ressources requises pour atteindre cet objectif, afin de fournir une base de décision en matière de planification dans le cadre plus général de la recherche et du développement énergétiques.

Compte tenu des progrès réalisés au cours des dernières années, on peut raisonnablement s'attendre à ce que la possibilité scientifique d'une telle entreprise soit démontrée durant la prochaine décennie. La poursuite et l'expansion modérée des recherches actuelles devraient être suffisantes pour atteindre ce premier objectif. Les étapes suivantes devraient être la démonstration d'abord de la possibilité technique, puis de la rentabilité de la production d'énergie. Des études de planification conduites indépendamment par différents groupes d'experts donnent la fin du siècle comme date vraisemblable de construction d'un réacteur de démonstration. Mais pour y parvenir, il est indispensable d'aborder dès maintenant les problèmes de faisabilité technique, ce qui implique un effort accru dans le domaine de la technologie de la fusion.

I.2 NATURE COMMUNAUTAIRE DU PROGRAMME

Le programme doit, conformément aux décisions du Conseil, être réalisé dans le cadre d'une collaboration à long terme couvrant la totalité des activités poursuivies dans les Etats membres dans le domaine de la fusion et de la physique des plasmas, et il est partiellement financé par la Commission. Dans le passé, la Communauté a été capable de surmonter les difficultés présentées par la mise sur pied d'un programme commun européen dans le domaine de la physique. Maintenant, les progrès réalisés impliquent la mise en route d'un programme substantiel dans le domaine de la technologie de la fusion pour lequel l'intégration européenne, bien que difficile, est encore plus nécessaire que pour la partie physique du programme. La décision primitive du Conseil visant à poursuivre à l'échelle européenne l'effort de R et D conduisant aux réacteurs de fusion a été le résultat de négociations d'une grande portée ; les intérêts nationaux spécifiques devraient encore être considérés dans ce contexte. L'aspect communautaire du programme d'ensemble doit être encore accentué pour assurer un développement efficace et économiquement rentable aboutissant à la construction du réacteur. Une telle tendance est bien illustrée par la création récente de l'Entreprise Commune JET, qui sera la pièce maîtresse du programme européen dans les années à venir. La capacité de l'Europe d'élaborer en quelques années un projet avancé de l'importance du JET est le résultat de l'effort patient d'intégration réalisé auparavant au sein des Associations.

I.3 MOTIVATION DE L'INITIATIVE DE LA COMMISSION

Depuis sa création, Euratom, par ses contributions financières et en personnel s'est employé à promouvoir les recherches dans les laboratoires des Etats membres et à les intégrer dans un programme commun à l'intérieur des Associati

Les principales motivations d'une telle initiative de la Commission sont :

- l'importance des ressources humaines et financière requises, qui donne à penser qu'un tel développement ne peut guère être mené à bien à l'échelle nationale ;
- l'existence d'un besoin collectif commun à tous les Etats membres ;
- la durée de l'effort à accomplir (probablement jusqu'à la fin du siècle) pour aboutir à la construction du réacteur ;
- l'ouverture d'un marché intérieur important pour le réacteur européen lorsque les recherches auront abouti.

I.4 MOTIVATION DE LA PRESENTE PROPOSITION DE PROGRAMME

Le principe du "programme glissant" (adoption d'un nouveau programme quinquennal après trois ans de mise en oeuvre du programme précédent) a été proposé par la Commission en 1975 afin d'assurer la continuité du programme et de le réorienter le cas échéant, compte tenu de l'évolution de la situation scientifique et technique.

Le Conseil des Ministres a, le 25 mars 1976, décidé que "la Commission soumettra au Conseil, en 1978, une proposition de révision tendant à substituer au présent programme un nouveau programme quinquennal à compter du 1er janvier 1979" (1).

Le Comité Scientifique et Technique (CST), dans son avis sur la proposition de programme quinquennal 1976-1980 relatif à la fusion, "considère positive l'intention de la Commission de prévoir une révision à mi-programme et un plan glissant", et "demande à la Commission de porter lors de la révision une attention particulière à la fusion par confinement inertiel et aux problèmes technologiques".

La Commission juge nécessaire de proposer le présent programme pour les raisons suivantes :

- a) les progrès réalisés dans le domaine de la physique des Tokamaks permettent d'entreprendre de nouvelles expériences spécifiques, nécessaires à la réalisation de nouveaux progrès ;
- b) les méthodes de chauffage récemment mises au point et éprouvées avec succès peuvent être désormais appliquées aux dispositifs de confinement déjà construits ou en cours de construction : un saut quantitatif dans les efforts consacrés au chauffage du plasma est nécessaire ;
- c) la décision de construire le JET ayant été prise, il semble raisonnable d'entreprendre un travail préparatoire pour définir la prochaine étape afin d'être en mesure d'aborder le stade du projet au cours du programme quinquennal suivant : cela implique un réajustement des objectifs à court terme du programme et de son contenu ;
- d) les problèmes clefs de la technologie de la fusion relatifs à la ligne Tokamak ont été identifiés et une collaboration internationale est déjà mise en place pour deux d'entre eux : les grands bobinages supra-conducteurs, et l'effet du bombardement neutronique sur les matériaux ; la mise en route d'un programme de technologie tendant à la solution des problèmes regardant la prochaine étape est d'ores et déjà possible et souhaitable.

(1) J.O. n° L 90 du 3 avril 1976.

CHAPITRE II

SITUATION ACTUELLE DE LA RECHERCHE SUR LA FUSION THERMONUCLEAIRE

II.1 POINTS DE REPERE

II.1.1 Physique

Pour obtenir un bilan positif d'énergie dans un processus de fusion, la température du plasma (plus précisément celle des ions) doit dépasser une valeur typique de 10 keV et la qualité du confinement du plasma doit aussi dépasser certaines limites. Une mesure de la qualité du confinement est donnée par le produit $n \cdot \tau$ de la densité du plasma " n " par le temps de confinement " τ ". Dans un réacteur de fusion, on doit avoir un " $n \cdot \tau$ " supérieur à 10^{14} ions $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}$. Le problème dans les recherches sur la fusion est donc tout d'abord d'atteindre ces valeurs minima (possibilité physique), puis de construire un dispositif qui aborde tous les problèmes techniques qui seront rencontrés dans un réacteur (possibilité technique), et enfin de réaliser un réacteur qui produise de l'électricité à un coût compétitif (possibilité économique). En fait, ces trois étapes ne sont pas indépendantes : par exemple, en projetant des expériences qui visent à la démonstration de la possibilité physique, on doit évidemment considérer attentivement les possibilités d'une éventuelle extrapolation à des réacteurs futurs.

II.1.2 Confinements magnétique et inertiel

Pour atteindre la valeur de $n \cdot \tau$ requise, deux voies extrêmes sont concevables :

- On peut choisir une densité relativement faible et travailler avec des temps de confinement "longs" (de l'ordre de la minute) ; ceci est la voie du "Confinement Magnétique" dans laquelle un plasma de grandes dimensions (plusieurs mètres cubes) est maintenu dans un volume limité (souvent de forme toroïdale) par l'action de champs magnétiques créés par de forts courants circulant dans des spires extérieures, ainsi que dans le plasma lui-même dans le cas des Tokamaks.
- On peut utiliser de très hautes densités de plasma pendant des temps brefs (inférieurs au millionième de seconde). C'est la voie du "Confinement Inertiel" dans lequel le combustible (deutérium et

tritium) contenu au début dans une petite sphère creuse (diamètre inférieur au cm), est comprimé et chauffé très rapidement par un faisceau intense de lumière (lasers), d'électrons ou d'ions. Des réactions de fusion prennent place durant la libre explosion de la sphère dont la durée n'est limitée que par l'inertie, d'où le nom de confinement inertiel.

- Les recherches passées ont indiqué que les solutions intermédiaires ne semblent pas très prometteuses.

II.2 SITUATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

II.2.1 Confinement magnétique. La situation est illustrée par la figure 1 (A, B et C) qui montre l'évolution au cours des dernières années de quelques paramètres fondamentaux du plasma dans les Tokamaks (un type particulier de dispositif toroïdal). La figure indique aussi les valeurs minimales (déjà mentionnées) nécessaires pour atteindre le domaine du réacteur. Il faut souligner que des résultats remarquables ont été annoncés récemment dans la ligne Tokamak :

1. Des températures ioniques atteignant 60 millions de degrés (assez proches de ce qui sera nécessaire dans un réacteur), à une densité de $2 \cdot 10^{13}$ ions par cm^3 , ont été atteintes à Princeton sur l'appareil PLT. Ce résultat majeur montre que la crainte d'effets délétères dus à la température ionique élevée (voir § III.3.1.3) n'était pas justifiée.
2. La loi d'échelle favorable (voir § III.3.1.1) du temps de confinement τ (τ proportionnel à la densité du plasma et au carré du petit rayon du plasma) a vu sa validité confirmée dans un domaine de paramètres élargi, essentiellement par FT (Frascati) travaillant à 600 kA et 80 kGauss et PLT (Princeton) travaillant à haute température.
3. Les valeurs de beta (voir § III.3.1.2) obtenues dans les appareils T-11 (URSS) et Tosca (Culham) ont atteint 2 % en valeurs moyennes. De plus, pour un champ magnétique toroïdal donné, il a été possible d'augmenter sensiblement le courant de plasma dans un certain nombre d'expériences comme Diva (Japon), Alcator (USA), TFR (Fontenay-aux-Roses) et T-11 (URSS).

La plupart de ces progrès découlent directement de l'application de chauffages auxiliaires puissants.

Une simple extrapolation des progrès enregistrés laisse présager que le domaine du réacteur pourrait être atteint peu après la fin du présent plan quinquennal, grâce à la prochaine génération de machines. Ceci ne veut pas dire que l'on disposera d'un réacteur à cette date ; les prochaines machines vont en effet permettre d'atteindre de nouveaux régimes de plasma à plus haute température, ce qui risque de modifier les lois d'échelles prévues. Le comportement inconnu des plasmas contenant du tritium et produisant une grande quantité d'énergie thermonucléaire demandera sûrement des études très complètes. De plus, les technologies associées devront être entièrement développées avant que l'on puisse démontrer la possibilité technique.

II.2.2 Confinement inertiel. Les résultats récents sont très prometteurs : des implosions symétriques de sphères ont été obtenues, conduisant à des rapports de compression élevés (environ 1000) du plasma et à un taux de réactions thermonucléaires appréciable (10^9 par tir). Les progrès considérables dans la technologie de la fusion laser (cf. fig. 1.D) et dans les générateurs de faisceaux d'électrons devraient conduire à une amélioration rapide des performances de ces systèmes. Nous pouvons mentionner en particulier :

1. Fusion Laser. Deux systèmes à faisceaux multiples fonctionnent maintenant à un niveau de puissance supérieur à 10 TW : Shiva (néodime) à Livermore et Hélios (CO_2) à Los Alamos. Des implosions de cibles doivent être systématiquement effectuées à pleine puissance dans un proche avenir. Antarès, un système de lasers CO_2 de 100 TW est en cours de construction à Los Alamos ; il devrait être achevé en 1982.
2. Faisceaux d'électrons. Des progrès importants ont été enregistrés dans les techniques de transport des faisceaux, permettant d'établir les plans de systèmes à faisceaux multiples. EBFA, un appareil de 30 TW comportant 20 faisceaux, devrait entrer en fonction à Sandia (USA) en 1980. Un appareil de 100 TW est en cours de construction à l'Institut Kurchatov (Moscou).

Des résultats physiques très importants sont donc à attendre dans les prochaines années. Des expériences de "breakeven" démontrant la possibilité physique sont prévues pour le milieu des années quatre-vingt.

II.3 CONTEXTE MONDIAL

II.3.1 Budgets.

En trois ans (75/78), le budget annuel américain pour la fusion a plus que doublé, dépassant 400 millions de dollars en 1978 (pour les confinements magnétique et inertiel). L'effort japonais s'est accru considérablement (par un facteur 12 entre 1970 et 1976) pour se placer maintenant à peu près à la moitié de l'effort européen. En URSS, où des chiffres absolus sont difficiles à obtenir, il semble que l'effort reste comparable à celui des USA.

II.3.2 Grands Tokamaks.

En raison des progrès obtenus sur les Tokamaks, un exemple de machines à confinement magnétique, l'expansion de cette ligne a été beaucoup plus rapide que pour les autres. Chaque programme comporte, en plus des projets de taille intermédiaire, la préparation et la construction d'un grand Tokamak au cours de la prochaine décade (JET en Europe, TFTR aux USA, JT-60 au Japon et T-10 M en URSS). De plus, les problèmes technologiques associés aux futurs réacteurs ont été analysés plus particulièrement dans l'optique Tokamak.

II.3.3 Autres dispositifs de confinement magnétique.

La portion de l'effort total consacrée aux machines à miroirs, aux Stellarators, et aux configurations à bêta élevé est allée en décroissant au cours des dernières années. Néanmoins, les Américains ont obtenu des succès notoires sur les miroirs et maintiennent une activité substantielle dans ce domaine ; ils ont interrompu toute recherche importante sur les Stellarators. L'Europe a fait l'inverse en abandonnant les miroirs pour se concentrer sur les Stellarators (Wendelstein VII-A à Garching est le plus grand Stellarator existant) et les configurations à bêta élevé, de sorte que les programmes sont complémentaires en ce qui concerne ces lignes auxiliaires.

II.3.4 Confinement inertiel.

Cette ligne de recherche représente une réelle alternative aux Tokamaks. Bien qu'assez nouvelle (les activités à grande échelle n'ont démarré qu'en 1971) elle se développe rapidement aux USA, en URSS et au Japon (elle a atteint environ 30 % du budget fusion des USA en 1978 alors qu'elle n'en présentait qu'une fraction négligeable en 1972). Dans cette ligne, beaucoup d'options restent à préciser (par ex. le choix entre laser et

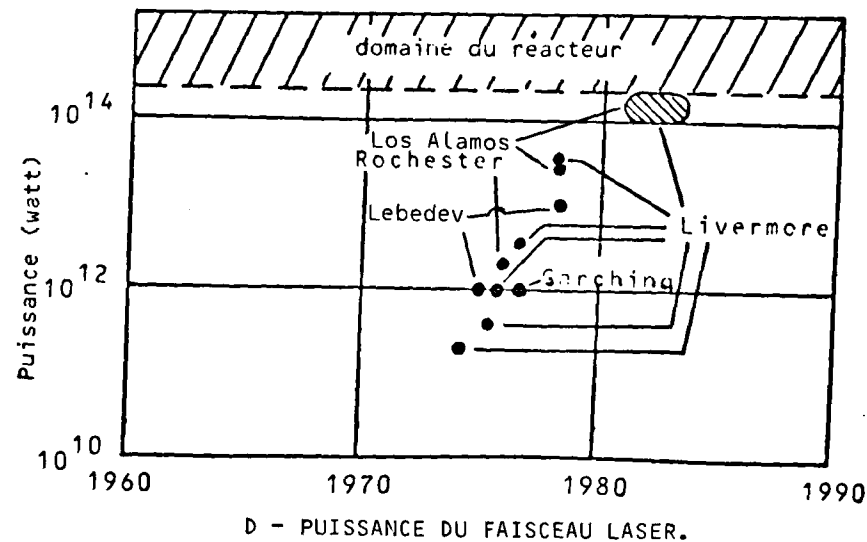
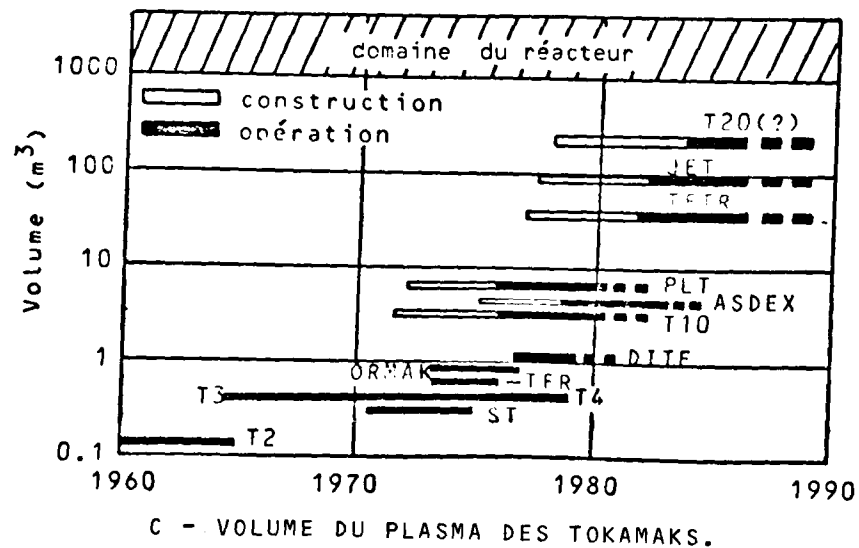
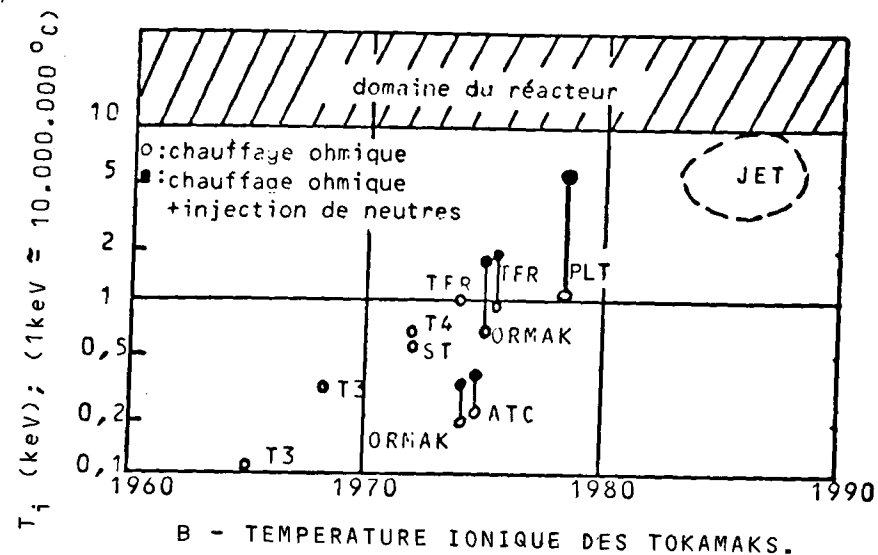
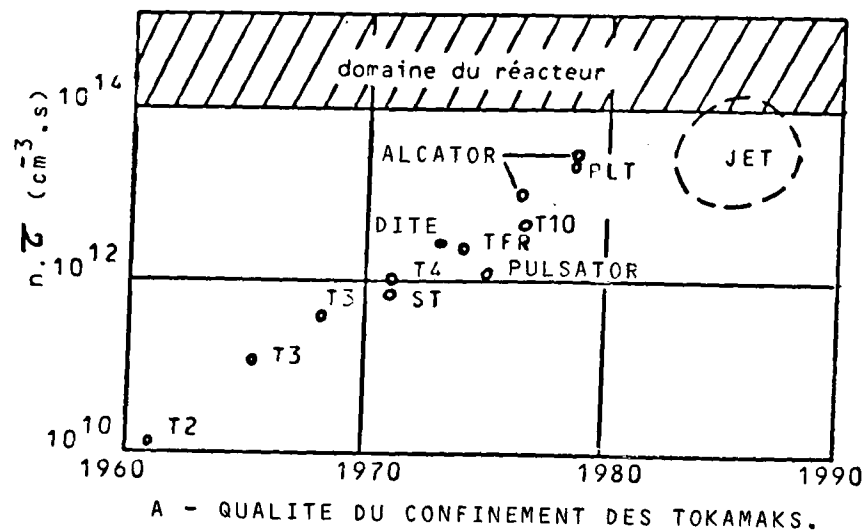


FIG.1. EVOLUTION DES PARAMETRES IMPORTANTS DEPUIS 1960.

faisceaux d'électrons ou d'ions). Néanmoins, des expériences cruciales sont programmées pour le début des années quatre-vingt ; par ex. SHIVA-NOVA, une expérience à faisceau laser de 10^{14} watt à Livermore, devrait être opérationnelle avant JET et pourrait conduire à des conditions de "breakeven".

II.3.5 Collaboration internationale

- Des échanges informels d'information prennent place à l'échelle mondiale depuis de nombreuses années dans des conditions très satisfaisantes, surtout dans le domaine du confinement magnétique. Il faut souligner que les laboratoires associés ne peuvent participer à ces échanges que dans la mesure où le programme fusion de la Communauté se maintient à un niveau compétitif. En fait, un certain déséquilibre commence à se faire sentir, dû au récent accroissement de l'effort américain. La coopération officielle progresse dans le cadre de deux organisations : l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et l'Agence Internationale pour l'Energie (AIE).

- La Commission est représentée dans le Conseil International de la Recherche sur la Fusion de l'AIEA. Elle y contribue à l'organisation des conférences mondiales sur la physique des plasmas et la recherche sur la fusion nucléaire contrôlée, à la publication de la revue "Nuclear Fusion", et à d'autres initiatives de coopération spécifique, par ex. une conférence annuelle sur les grands Tokamaks.

- Dans le cadre de l'AIE, la Commission est "organisation directrice" dans le domaine de la recherche sur la fusion thermonucléaire ; elle agit au nom de ses partenaires dans le programme fusion communautaire pour conclure des accords spécifiques. Trois accords de développement préparés sous l'égide du Comité de Coordination de l'Energie Fusion de l'AIE ont été conclus ces deux dernières années : sur la source intense de neutrons, sur le projet de grande bobine supraconductrice (L.C.P.) et sur l'interaction plasma-paroi (Textor). De plus, un échange périodique d'informations sur les très grandes machines (TFTR aux USA, JET dans la Communauté et JT-60 au Japon), complété par des séries de rencontres sur des problèmes spécifiques de construction, est en cours depuis trois ans.

II.4 SITUATION EN EUROPE

II.4.1 Introduction

- Ce plan quinquennal est le cinquième qui soit présenté au Conseil. Pour la

première fois, un plan est élaboré alors que le précédent est en cours depuis moins de trois ans, conformément à la décision du Conseil du 25 mars 1976. Bien que trois ans soient un délai assez court pour la recherche, nombre de sujets ont enregistré des progrès sensibles depuis la présentation du dernier plan ainsi qu'on le montrera ci-dessous, ce qui justifie a posteriori l'utilité du concept de "plan glissant".

- Le but principal des deux derniers plans était de développer la recherche sur les Tokamaks en Europe à un niveau international compétitif. Ce but a été pleinement atteint : la construction du JET a effectivement commencé, et une série d'appareils de taille moyenne a permis à l'Europe de jouer un rôle de premier plan dans la recherche mondiale sur les Tokamaks au cours de ces dernières années. D'autres appareils sont en phase de construction ou de définition.
- Dans le domaine du confinement magnétique, les lignes alternatives aux Tokamaks (Stellarators, configurations à bêta élevé,...) sont étudiées au niveau approprié. Leur poids relatif dans l'effort d'ensemble est en diminution.
- Les méthodes de chauffage du plasma ont été développées avec beaucoup de succès. Leur mise au point absorbe une part importante, et croissante, du programme fusion.
- Le confinement inertiel représente une petite partie de l'effort total.
- Un programme technologique relativement modeste a démarré, dirigé à la fois vers les machines existantes et vers les expériences de la prochaine génération, avec comme but final le réacteur de fusion. Ce programme s'accroît actuellement surtout dans le domaine de la supraconductivité.

II.4.2 JET

La préparation de l'"Entreprise Commune JET" s'est achevée en 1977 avec le choix de Culham comme site. A la fin de la phase intérimaire (juin 1978), la phase de construction a commencé ; on prévoit que la machine sera opérationnelle en 1983 ou même plus tôt (voir § III.3.2.1) dans ses performances de base. A la fin de la phase intérimaire du projet, les effectifs du JET s'élevaient à environ 50 personnes et les structures de gestion interne de l'équipe avaient été établies. Quelque 150 contrats de développement ont été passés avec les Associations. Pour les travaux effectués par des tiers (essentiellement l'industrie),

une centaine de contrats ont été passés couvrant surtout des tests et la construction d'éléments de la machine. En particulier, on a passé les commandes de la chambre à vide, des bobines toroïdales et des sources d'énergie (groupes tournants). Enfin, un contrat d'architecture industrielle concerne les bâtiments spécifiques du JET et les services qui y sont associés.

II.4.3 Les autres Tokamaks.

Un Tokamak est essentiellement caractérisé par ses dimensions et ses champs magnétiques de confinement. Le plasma qu'il contient devrait si possible être dense, chaud, pur, confiné pour un temps long τ et avoir un "bêta" élevé (bêta est le rapport de la pression du plasma à la pression exercée par le champ magnétique ; c'est une mesure de l'efficacité du système). JET seul ne saurait suffire et n'est d'ailleurs pas adapté à l'étude de tous les problèmes à résoudre avant que la prochaine génération de Tokamaks ne puisse être lancée. Les principaux Tokamaks déjà en fonctionnement, TFR (Fontenay), Pulsator (Garching) et Dite (Culham), ont fourni une contribution très substantielle au progrès général. TFR est resté le Tokamak le plus puissant du monde ($I = 400$ kA) jusqu'en 1976 quand T-10 et PLT furent mis en route ; récemment, des températures de 2 keV y ont été obtenues. Pulsator a produit une excellente contribution à l'étude des instabilités dans les plasmas et, malgré sa taille relativement petite et son champ magnétique modeste, il a fourni des plasmas de forte densité n avec des produits $n \cdot \tau$ élevés. Dite a été le premier Tokamak à incorporer un "divertor" (système magnétique permettant d'extraire les impuretés du plasma) ; il est consacré à d'importantes expériences sur le chauffage du plasma par injection de particules neutres rapides. Tosca (Culham) est un petit Tokamak consacré à l'étude des sections non-circulaires et de la compression adiabatique. Erasmus (Bruxelles), qui est un Tokamak petit mais très compact, et Petula et Wéga (Grenoble) sont consacrés surtout à l'étude du plasma par haute fréquence. F.T. (Frascati), un appareil à champ magnétique élevé, est l'entreprise technologique la plus ambitieuse qui ait été lancée en Europe au cours du 3ème plan ; il fut mis en route fin 1977, et pourrait être parmi les premiers Tokamaks au monde à atteindre des courants de 1 méga-ampère dans le plasma. En plus des modifications récemment effectuées sur TFR pour lui permettre de meilleures performances, quelques nouveaux grands appareils sont presque terminés : Asdex (Garching) sera un Tokamak muni d'un divertor poloïdal et disposant d'un puissant chauffage par injection de neutres, et Textor (Jülich), qui fait l'objet d'un accord international avec les Américains,

se consacrera principalement à l'étude du très important problème de l'interaction plasma-paroi.

II.4.4 Chauffage

- Une configuration Tokamak étant essentiellement définie comme la combinaison d'un courant toroïdal porté par le plasma et d'un champ toroïdal superposé, le chauffage ohmique est intrinsèquement présent dans un Tokamak. Mais on peut démontrer que, à l'exception peut-être des appareils à champ très élevé, le chauffage ohmique ne conduira jamais aux températures de fusion. De plus, pour un champ magnétique donné, l'influence du chauffage ohmique diminue quand la taille de la machine augmente. De ce fait, dans les grandes machines actuellement en service ou en construction, un chauffage auxiliaire est nécessaire pour atteindre des performances élevées. L'importance d'un puissant chauffage auxiliaire n'a été pleinement saisie que ces dernières années : on pense que, dans la plupart des futurs Tokamaks, les systèmes de chauffage auxiliaire pourraient être aussi coûteux que la machine elle-même.
- Deux méthodes sont activement développées : l'injection de faisceaux intenses de particules neutres, qui est déjà opérationnelle à des niveaux de puissance appréciable (un megawatt), et les méthodes par haute fréquence qui, bien que moins avancées, semblent plus prometteuses pour les futurs grands appareils et les réacteurs. La Commission s'est employée avec succès à coordonner les efforts de R & D sur le chauffage : les laboratoires de Culham et Fontenay-aux-Roses sont chargés du développement de l'injection de neutres, tandis que ceux de Grenoble et Bruxelles sont spécialisés dans les hautes fréquences. Des études fondamentales sur le chauffage turbulent et sur le chauffage par faisceaux d'électrons sont aussi en cours.
- Des niveaux de puissance comparables à ceux du chauffage ohmique ont été obtenus récemment par injection de neutres sur TFR (600 KW) et Dite sans que la qualité du confinement ne soit perturbée. En même temps, des unités d'injecteur de 1 MW sont développées à Culham et Fontenay-aux-Roses sous contrat JET. Ces unités seront aussi disponibles pour des appareils comme Textor, Asdex ou TFR 604. Les résultats obtenus récemment dans le développement du chauffage par injection de neutres constituent un des succès les plus marquants des laboratoires associés.

- En ce qui concerne le chauffage HF, un niveau de compétence très élevé a été aussi atteint. L'Europe est certainement très compétitive dans ce domaine et dispose de quelques dispositifs toroïdaux spécialement consacrés à l'étude des applications de ce type de chauffage. Des résultats prometteurs ont été obtenus avec Petula et Wega à Grenoble. Le laboratoire de Grenoble a la responsabilité principale en chauffage HF ; il collabore avec l'E.R.M. (Bruxelles) où la machine Erasmus devrait sous peu produire des résultats.

II.4.5 Stellarators

Ce sont des systèmes toroïdaux dans lesquels les champs magnétiques sont produits essentiellement par des bobines situées en dehors de la chambre à plasma. Bien que de conception plus compliquée que les Tokamaks, ils devraient être plus souples et pourraient en principe travailler en continu. Jusqu'à présent les machines actuelles, Wendelstein VII-A et Cleo, ont fonctionné avec des courants de chauffage ohmique. Des températures ioniques de 300 eV et des $n\tau$ de 10^{12} ont été obtenus. Par rapport à des Tokamaks comparables, ils sont exempts de disruptions, ont une densité limite plus élevée et un confinement qui s'améliore quand on diminue le courant de chauffage ohmique. Des difficultés techniques ont empêché jusqu'à maintenant l'installation de la grande chambre prévue pour W-VIIA. Isar T-1, un Stellarator à bêta élevé, a été abandonné après avoir démontré la possibilité d'obtenir un équilibre dans de telles configurations.

II.4.6 Configurations à bêta élevé

Les Tokamaks n'ont pas encore réussi à atteindre les valeurs de bêta requises par un réacteur économique. De plus, la théorie ne permet pas d'évaluer sans ambiguïté le bêta maximum possible, et les vérifications expérimentales font encore défaut. Le comportement des plasmas à haut bêta est actuellement étudié soit sur des Tokamaks fonctionnant en impulsion, comme Spica (Jutphaas), Belt-Pinch (Garching, terminé) et Tenq (Jülich, terminé), soit sur des Stellarators à bêta élevé, soit sur des "pinches à champ inversé". Dans la Communauté, les recherches ont été concentrées principalement sur les pinches à champ inversé, qui font l'objet d'une collaboration entre Culham (HBTX) et Padoue (Eta-Bêta). La théorie indique que les pinches à champ inversé pourraient rester stables jusqu'à des bêtas de 40 %. Des bêtas compris entre 10 et 40 % ont déjà été obtenus expérimentalement, bien qu'à des températures encore basses. Le projet d'une machine (RFX) d'importance comparable aux Tokamaks actuels est achevé à Culham.

II.4.7 Confinement inertiel.

La situation générale en Europe n'est pas satisfaisante. A cause des possibles intérêts militaires que certains secteurs de telles recherches pourraient présenter, la Commission n'a pu ni coordonner l'ensemble des travaux dans ce domaine, ni promouvoir efficacement une expansion de cette activité qui serait pourtant hautement recommandable vu les résultats récemment publiés et la politique des USA, de l'URSS et du Japon.

- Dans le domaine de la fusion laser, l'Association Euratom-IPP et, à un moindre niveau, l'Association Euratom-CNEN poursuivent des recherches expérimentales limitées, un certain appui théorique étant fourni par les Associations Euratom-Etat Belge et Euratom-NSBESD (Suède). Ces efforts sont trop modestes pour être compétitifs avec ceux faits hors d'Europe. Depuis quelques années, de nouveaux programmes nationaux (Rutherford Laboratory, Ecole Polytechnique) ont fait leur apparition en dehors d'Euratom et se développent à un rythme soutenu. Enfin, dans des laboratoires plus ou moins classifiés, on sait qu'un effort substantiel est fait à Limeil et que certains travaux sont aussi poursuivis à Aldermaston.
- Dans le domaine de la fusion par faisceaux d'électrons ou d'ions, il n'y a pratiquement aucune activité en Europe.
- Dans le domaine du "Plasma Focus", qui est moins délicat, la coordination est plus satisfaisante. Les Associations Euratom-UKAEA et Euratom-CNEN travaillent en contact étroit avec plusieurs universités allemandes (Stuttgart en particulier). Une activité indépendante existe à Limeil. Des plasmas de haute densité et de température vraiment thermonucléaire ont été obtenus pendant des temps brefs, donnant lieu à de nombreuses réactions de fusion. Les performances de la machine de 1 Mégajoule (Frascati) sont actuellement limitées à 10^{12} neutrons par décharge (10^{13} sont prévus par les lois d'extrapolation) à cause d'interactions plasma-paroi qui sont pour l'instant l'objet d'études détaillées.

II.4.8 Diagnostics.

En dépit de progrès remarquables, la recherche sur les Tokamaks est encore dans une situation telle que l'accumulation des données expérimentales reste l'occupation principale des physiciens. Les diagnostics des plasmas

restent donc d'une importance vitale et un effort important est fait dans tous les laboratoires pour appliquer des techniques déjà connues à des machines spécifiques ou pour développer de nouvelles méthodes de mesure. Si les mesures locales de la densité et de la température des électrons sont devenues maintenant classiques, les mesures de la température des ions et de la composition "chimique" du plasma (impuretés) sont moins avancées ; quant aux mesures de la distribution du courant dans le plasma et des interactions plasma-paroi, elles sont encore dans la phase initiale de leur développement.

Dans le domaine du confinement inertiel, l'application de diagnostics même bien connus aux situations spécifiques implique des efforts sérieux du fait de la très grande résolution requise, dans le temps comme dans l'espace (typiquement un millième de millimètre et un milliardième de seconde).

II.4.9 Théorie et calculs numériques

Le développement récent des études théoriques est caractérisé par une interaction croissante avec le programme expérimental et par une rapide augmentation des calculs numériques de part et d'autre. L'effort théorique principal a porté sur la compréhension des limitations des Tokamaks (phénomènes disruptifs, diffusion thermique anormale et dynamique des impuretés) et sur l'application (réussie) de la théorie de la propagation des ondes électromagnétiques à l'étude du chauffage HF. De puissants codes de calcul ont été élaborés portant tant sur le comportement du plasma que sur la construction des Tokamaks et sont actuellement d'usage courant dans les différents laboratoires.

L'interprétation des résultats expérimentaux (systèmes d'acquisition des données) est un autre domaine dans lequel l'utilisation des calculateurs est en croissance rapide.

II.4.10 Technologie de la fusion

L'objectif principal était d'évaluer la possibilité de mettre en place durant le prochain plan un fort programme technologique orienté vers des buts concrets.

Actuellement, les activités sont les suivantes :

- 1) Dans le domaine de la collaboration au sein de l'AIE, trois accords de développement ont démarré :
 - Sources intenses de neutrons : le choix du projet, visant à la construction d'un générateur de neutrons de 14 MeV, est encore à faire.

- Interaction plasma-paroi : Textor-Jülich (cf. II.4.3).
 - Projet de grandes bobines supraconductrices : LCP-Oak Ridge (USA). La contribution européenne consiste en la construction d'au moins une bobine NbTi, qui doit être testée dans une grande configuration magnétique toroïdale en cours de réalisation aux Etats-Unis.
- 2) En juillet 1977, le Conseil des Ministres (1) a décidé de lancer, dans le cadre du programme pluriannuel (1977-80) du Centre Commun de Recherche, un programme de technologie de la fusion articulé autour des points suivants (2) :
- l'extension de la participation du CCR aux projets conceptuels de réacteurs de fusion européens ; cette activité était déjà en cours depuis plusieurs années (groupe FINTOR) en collaboration avec Frascati et Naples ;
 - l'analyse des problèmes liés à la sécurité et à l'environnement ;
 - l'étude des matériaux utiles dans les machines pour la fusion, et en particulier des dommages dus aux rayonnements, ainsi que l'évaluation des techniques et équipements requis par de telles études.
- 3) Dans presque tous les laboratoires associés, on poursuit des travaux sur les études de systèmes, concernant les Tokamaks ainsi que RFX (Culham), "Internal Ring" (Jülich, Stockholm), "Belt/Screw pinches" (Petten, Jutphaas). Un groupe situé à Garching a acquis une position dominante dans la mise en route et le développement d'un code de calcul à structure modulaire pour l'étude des différents concepts de fusion.
- 4) L'injection de granules comme méthode de remplissage est étudiée à Risø et Garching.
- 5) A côté de l'effort principal fait à Karlsruhe sur le développement des bobines supraconductrices conventionnelles en relation

(1) J.O. n° L 200 du 8 juillet 1977.

(2) En ce qui concerne l'administration et le budget, ce travail relève de la responsabilité du CCR-Ispra. De façon à assurer l'unité d'action de la Communauté dans le domaine de la fusion, le travail est coordonné par le directeur du programme fusion ; le Groupe de Liaison, dont le CCR est membre, joue le rôle de Comité Consultatif en Matière de Gestion des Programmes pour le travail de recherche effectué au CCR.

avec le projet de grandes bobines, un certain travail préparatoire sur les matériaux supraconducteurs avancés A-15 est effectué à Frascati, Petten et Saclay, ce dernier laboratoire étant de plus engagé dans les tests de conducteurs refroidis à l'hélium superfluide pour Torus II-Supra.

- 6) Un travail expérimental sur la thermodynamique des systèmes Li-T est en cours à Jülich.
- 7) Des études de simulation des dommages de volume créés par les neutrons sont effectuées à Jülich et Harwell.
- 8) Les dommages de surface créés par des particules de grande énergie sont étudiés à Culham et Garching.
- 9) Jülich, Harwell et Karlsruhe conduisent des études de neutronique.

II.4.11 Moyens d'exécution.

L'importance de la recherche sur la fusion thermonucléaire exige, plus que jamais, une action coordonnée au niveau de la Communauté. Les efforts passés ont été suffisamment fructueux pour conduire des pays qui n'appartiennent pas à la Communauté à introduire des demandes d'association au programme fusion européen : un premier accord a été conclu avec la Suède en 1976 et la Suisse s'apprête à en faire autant en 1978. Ces accords conduisent à des contrats d'association. Pendant le plan quinquennal précédent, les contrats de mobilité du personnel avaient permis à quelque 40 physiciens et ingénieurs de quitter leur laboratoire d'origine pour aller travailler plusieurs mois dans un autre laboratoire associé ; un nombre comparable d'échanges est déjà atteint à la moitié du plan actuel. Un transfert de matériel (par ex. des systèmes de mesure) a souvent lieu en ces occasions. L'étude de l'interaction plasma-paroi sur TFR (équipes de Jülich et Garching à Fontenay) et le programme de collaboration Wega (équipe de Garching à Grenoble) ont été parmi les actions les plus notables de ces dernières années. L'efficacité de cette coopération extranationale est tout à fait comparable aux meilleurs exemples de coopération entre Instituts appartenant à un même Etat.

Pour la mise en oeuvre de son programme fusion, la Communauté dispose :

- 1) d'un effectif de 860 universitaires (milieu 78), y compris l'équipe JET. Les effectifs complets, en incluant le support administratif et technique, dépassent légèrement 3000 personnes. Ce personnel ne représente pas la somme de sous-groupes dispersés géographiquement mais bien plutôt un ensemble organique de spécialistes, capables de fournir un travail commun à l'échelle européenne comme l'a prouvé la phase de projet du JET ;
- 2) de 19 laboratoires spécialisés, disposant d'un équipement moderne. Les noms et les Associations correspondantes sont donnés dans la table I.
- 3) de structures créées à l'initiative de la Commission et par lesquelles le travail de chaque laboratoire est intégré dans un véritable cadre européen. Grâce à ces structures, les Etats membres de la Communauté se trouvent dans une situation compétitive par rapport aux autres programmes fusion dans le monde.

TABLE I

Associations et Organismes	Pays	Dates	Laboratoires
EUR-CEA	France	1959	Fontenay-aux-Roses, Grenoble
EUR-CNEN/CNR	Italie	1960	Frascati et (par la suite) Padoue et Milan
EUR-IPP	R.F.A	1961	Garching
EUR-FOM	Pays-Bas	1962	Jutphaas, Amsterdam
EUR-KFA	R.F.A.	1962	Jülich
EUR-EB	Belgique	1968	ERM et ULB
EUR-UKAEA	Royaume-Uni	1973	Culham
EUR-Risø	Danemark	1973	Risø
EUR-NSBESD	Suède	1976	Stockholm, Göteborg, Studsvik
EUR-CH	Suisse	1978 (?)	Lausanne
JET		1977	adjacent à Culham
CCR		1977	Ispra

II.5 RESUME DES PRINCIPAUX PROGRES ENREGISTRES DURANT LES TROIS PREMIERES ANNEES DU PROGRAMME EN COURS

II.5.1 Tokamaks

Du point de vue de la qualité du confinement, les progrès les plus récents ont été réalisés aux Etats-Unis, où les valeurs $n\tilde{r}$ d'ALCATOR ($3.10^{13} \text{ cm}^{-3}$ s sur l'axe) sont désormais confirmées par PLT qui a, en outre, atteint des températures ioniques de 5.5 keV. Ces résultats sont inférieurs d'à peine un ordre de grandeur au critère de Lawson en valeur $n\tilde{r}$ et de moins d'un facteur 2 en température ionique. Des températures ioniques supérieures à 2 keV ont été réalisées en 1976 en Europe sur TFR où, pour la première fois, la température ionique a dépassé la température électronique.

Des progrès remarquables ont été récemment réalisés dans la Communauté en ce qui concerne la pureté du plasma. Au début du programme 1976-80, il s'agissait là d'un problème très sérieux ($Z_{\text{eff}} \gg 3$). A l'heure actuelle, on obtient couramment des plasmas très purs ($Z_{\text{eff}} \approx 1$) notamment sur TFR, DITE et FT, grâce à de nouvelles techniques de purification de la décharge et aux progrès rapides réalisés dans le diagnostic de la production et de la diffusion des impuretés, de même que dans la connaissance et le contrôle de ces phénomènes. Un divertor "en hernie" a été appliqué pour la première fois (DITE) et le principe de l'"enveloppe froide" est désormais mieux éclairci (Jutphaas, Stockholm).

De nouvelles techniques de feedback, destinées au contrôle de l'équilibre du plasma, sont actuellement disponibles (CLEO-Tok, TFR 600, TOSCA). Sur la quasi-totalité des dispositifs expérimentaux, il est devenu possible de programmer l'évolution dans le temps de la densité moyenne du plasma, qui avait fait l'objet de premiers essais sur ALCATOR et PULSATOR.

Toutes les connaissances sur la physique du Tokamak ont progressé considérablement, grâce notamment aux études approfondies de bilan énergétique réalisées sur TFR et DITE.

II.5.2 Autres appareils

Le fonctionnement de Stellarators (CLEO, W VII A) par courant de chauffage ohmique montre que ces configurations mixtes présentent de meilleures propriétés de confinement que les Tokamaks de niveau équivalent.

Les progrès importants enregistrés dans l'étude théorique du pinch à champ inversé, sur lequel est axée la ligne à bêta élevé, ont abouti à la construction de deux appareils de dimension moyenne (ETA-BETA, HBTX-1A) qui, à l'heure actuelle, sont presque achevés.

II.5.3 Chauffage

Dans le domaine de l'injection de neutres, le présent programme est déjà parvenu à des réalisations remarquables. Les premières applications à un Tokamak (CLEO), il y a quatre ans seulement, ont été réalisées à un niveau de puissance de 50 kW, c'est-à-dire nettement au-dessous de celui du chauffage ohmique. Le niveau 1 MW, bien supérieur au niveau de chauffage ohmique, vient d'être atteint, sans que le confinement du plasma en soit affecté (TFR, DITE). Le développement d'unités de 1 MW pour le JET se trouve à un stade très avancé. La construction de systèmes de plusieurs MW est en cours (DITE, ASDEX, TFR 604).

En ce qui concerne le chauffage haute fréquence, une contribution exceptionnelle à la compréhension et aux essais du chauffage par résonance hybride inférieure a été fournie par la Communauté (Grenoble). L'expérience sur PETULA de pompage magnétique par temps de transit a été la première application réussie (sans perte du plasma) de cette méthode. Dans le domaine du chauffage à la résonance cyclotronique des ions, des résultats préliminaires encourageants ont récemment été obtenus sur TFR.

II.5.4 Confinement par inertie

Les progrès rapides qui ont été réalisés dans ce domaine à l'échelle mondiale sont sans commune mesure avec le modeste effort européen qui a abouti au développement d'un laser à iode de 1 TW (Garching), à quelques progrès dans l'étude théorique de l'interaction lumière-plasma et à la mise en route d'un programme expérimental à Frascati.

II.5.5 Technologie de la fusion

Les principaux problèmes qui se posent dans ce secteur ont été identifiés. En outre :

- dans les domaines des études de sécurité et de systèmes, ainsi que des études de matériaux, à la suite de l'inclusion de ces sujets dans le programme du CCR (1977-80), des travaux nouveaux ont été entrepris à Ispra, où un programme d'étude conceptuelle avait déjà été mis en oeuvre en coopération avec Frascati (groupe FINTOR). Les travaux préparatoires sur la simulation des dommages causés par les rayonnements se poursuivent également.
- dans le domaine de la technologie des aimants supraconducteurs, à la suite de la conclusion d'un accord d'exécution dans le cadre de l'AIE, la Communauté (IPP-Karlsruhe) contribuera au Large Coil Project

(Oak Ridge) en fournissant un bobinage supraconducteur ; l'étude conceptuelle d'un tel bobinage a atteint le stade où la réalisation par l'industrie peut être envisagée. Des essais de refroidissement par hélium superfluide sont en cours (CEA-Saclay).

II.5.6 Conclusion

Les progrès mentionnés ci-dessus montrent que, par rapport à la situation qui existait il y a trois ans, les plasmas Tokamak sont mieux confinés, mieux chauffés et présentent une concentration nettement moindre d'impuretés. Nous nous sommes donc rapprochés considérablement du critère requis pour un réacteur de fusion et nous sommes par conséquent plus confiants dans la possibilité de démontrer la faisabilité physique d'un tel réacteur.

CHAPITRE III

PROGRAMME PROPOSE

III.1 INFORMATIONS PROVENANT DES ETUDES DE PLANIFICATION A LONG TERME

Les études exploratoires de planification à long terme conduites aussi bien en Europe que dans les autres parties du monde et basées sur l'hypothèse que le réacteur futur sera du type Tokamak ont mis en évidence un choix de stratégies possibles pour atteindre un réacteur de démonstration. Ces stratégies conduisent à des échelles de temps différentes et à des coûts globaux différents selon le niveau de risque accepté (pour donner un ordre de grandeur, quelque 25 années et 10 milliards d'UCE pourraient être nécessaires pour atteindre un réacteur de démonstration). Mais toutes ces stratégies, même si elles divergent ultérieurement, ont un tronc commun : la (les) machine(s) à construire après JET (ou ses équivalents étrangers) doit (doivent) "brûler" du deutérium-tritium, c.-à-d. que les réactions de fusion y seront maintenues pendant des temps prolongés. La Communauté Européenne est donc en mesure de fixer clairement les buts à court terme de son programme fusion tant en physique qu'en technologie.

Les études de planification à long terme réexamineront régulièrement les avantages potentiels des différentes stratégies à la lumière des résultats expérimentaux obtenus. Leurs conclusions seront formulées à l'occasion de chaque révision de programme et serviront à définir les nouveaux objectifs à court terme.

III.2 OBJECTIFS DU PLAN QUINQUENNAL

III.2.1 Confinement magnétique

Les progrès réalisés sur les Tokamaks ont déjà abouti à une concentration progressive des efforts dans cette direction et cette concentration se poursuivra au cours du plan 79-83. Les recherches sur les Stellarators à faible β et sur les configurations à β élevé, qui pourraient éventuellement aboutir à des solutions de rechange, se poursuivront dans quelques laboratoires et représenteront environ 10 % de l'effort total. Aucune activité expérimentale n'est prévue pour les machines à miroir.

Les principaux objectifs du programme sont :

- de compléter la construction du JET et de le mettre en opération. La Commission a déjà envoyé au Conseil plusieurs documents⁽¹⁾ qui ont conduit à l'approbation de la phase de construction du projet JET et à la décision d'inclure ce projet dans le programme fusion. Nous ne reprendrons donc pas dans ce programme une description détaillée de cette action prioritaire;
- de réunir assez de connaissances aussi bien en physique qu'en technologie, pour être en mesure de définir la(les) machine(s) post-JET au cours du plan quinquennal de sorte que sa(leur) construction puisse démarrer pendant le plan suivant. En particulier, les recherches devraient conduire à la détermination des champs et dimensions optimaux pour une machine post-JET, permettre de décider si une telle machine devrait produire de l'électricité et du tritium, et fournir des informations expérimentales permettant de choisir entre des bobinages supraconducteurs ou normaux.

Ceci implique :

- la construction du JET prévu pour être opérationnel en 1983 ou même avant (voir § III.3.2.1) et la préparation de son programme expérimental ;
- l'obtention de certaines informations-clefs grâce aux appareils de taille intermédiaire, de type Tokamak ou autre ;
- le développement de systèmes de chauffage auxiliaire de grande puissance, en particulier en vue de leur application au JET ;
- la mise en oeuvre d'un programme technologique plus substantiel, en particulier dans le domaine des matériaux, de la supraconductivité, du maniement du tritium, de la manipulation à distance et des études de systèmes ;
- si les essais préliminaires sur des bobines refroidies à l'hélium superfluide sont positifs, la construction d'un Tokamak supraconducteur de taille moyenne affecté aux études de profilage et au chauffage du plasma ;

(1) en particulier : R/820/78 (ATO 17) du 10 avril 1978.

- si les études préliminaires indiquent un bilan raisonnable entre coût et risque, la construction d'un Tokamak de dimensions moyennes à très haut champ (V.H.F.T), pour étudier pour la première fois quelques aspects spécifiques d'un plasma réactif ;
- le commencement des études de définition de machines post-JET.

Un autre objectif du programme consiste à évaluer jusqu'à quel point d'autres systèmes de confinement magnétique (Stellarators, pinches à champ inversé) peuvent être considérés comme de réelles alternatives aux Tokamaks.

III.2.2 Confinement inertiel

La situation européenne est, et restera sans doute pour un temps, peu satisfaisante. Alors que les résultats déjà obtenus ailleurs ont conduit à une accélération rapide des programmes américains, russes et japonais, une sensibilité politique marquée due à la proximité de certains intérêts civils et militaires dans ce domaine a amené la Commission à présenter, contre ses intentions initiales, un programme minimal suffisant pour :

- être en mesure de faire une évaluation critique des résultats obtenus ailleurs ;
- apporter une contribution non négligeable sur certains problèmes-clefs, condition fondamentale pour un échange fructueux d'informations avec les laboratoires étrangers ;
- maintenir un noyau de chercheurs compétents qui puisse servir de point focal pour le reste des efforts européens dispersés dans divers laboratoires civils et qui permette au cours du prochain plan, si les décisions politiques nécessaires étaient prises, la construction d'une expérience de grande taille visant à démontrer la possibilité de la fusion inertielle.

Un changement de la politique européenne s'imposera si les expériences cruciales prévues ailleurs produisent les résultats attendus, comme le "breakeven" en 1983.

Quoi qu'il en soit, la Commission s'efforcera, malgré ses moyens très limités, de mettre sur pied une formule de collaboration efficace avec d'autres laboratoires civils, comme cela a déjà été fait dans le passé pour le Plasma Focus.

III.3 CONFINEMENT MAGNETIQUE

III.3.1 Problèmes principaux

- 1) Qualité du confinement. On a vu que le paramètre important était le produit de la densité par le temps de confinement " $n \cdot \tau$ ". Un des buts du programme est d'améliorer la compréhension et la qualité du confinement, et en particulier :
 - de s'assurer des lois empiriques qui gouvernent τ , en particulier sa dépendance en fonction de " n " qui n'est pas encore bien comprise ;
 - d'explorer les limitations imposées par l'instabilité violente appelée "disruptive".

Avec la génération d'expériences qui doivent être mises en service au cours de ce plan (y compris JET), on prévoit d'atteindre des valeurs proches de $10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$, c.-à-d. un ordre de grandeur plus élevées qu'à présent.

- 2) Valeurs de bêta. Pour être viable économiquement, un réacteur du genre Tokamak doit atteindre des valeurs de β situées entre 5 et 10 %, (des valeurs moyennes atteignant 2 % ont déjà été réalisés sur certaines machines). Ce point est important dans la mesure où la qualité du confinement pourrait se trouver profondément modifiée quand la pression du plasma n'est plus négligeable devant la pression du champ magnétique. On espère obtenir, au cours de ce plan, des régimes où le bêta pourrait atteindre dans de grandes machines quelques pour-cents, en testant l'effet d'une section non circulaire et d'un profilage du plasma.
- 3) Température. L'ignition (situation où le chauffage nucléaire surpasse les pertes d'énergie du plasma) ne peut être obtenue qu'avec des températures sensiblement plus élevées que celles obtenues actuellement. De telles températures semblent pouvoir

être atteintes avec la technologie déjà disponible, à condition que les propriétés du confinement ne soient pas trop altérées par des effets liés aux températures ioniques élevées. La température minimum requise dépend de la qualité du confinement et de la pureté du plasma et dépasse 5 keV.

- 4) Impuretés. Elles étaient considérées, dans un passé récent, comme l'un des problèmes les plus sérieux à cause de l'augmentation du rayonnement qu'elles entraînent. Actuellement, la situation s'est améliorée, même si beaucoup de questions restent ouvertes. Les faibles taux d'impuretés réalisés récemment sont satisfaisants mais devront être confirmés quand on opérera sur des temps prolongés et avec une puissante injection de neutres. Les études sur l'origine des impuretés ainsi que sur leur dynamique et leur contrôle doivent être poursuivies. Ce problème est étroitement lié à l'interaction plasma-paroi et dans le cas d'un réacteur avec le remplissage et l'extraction.
- 5) Extraction et remplissage. Quand le fonctionnement est de longue durée, ou même continu, il faut avoir les moyens d'extraire les produits de réaction du réacteur et de le réalimenter. Les études d'extraction à l'aide de "divertors" se poursuivront sur Dite et seront l'un des buts majeurs d'Asdex (qui possède un divertor de type différent). On étudiera aussi le moyen de pomper l'hélium (le produit principal des réactions) et de manier de grandes quantités de gaz d'extraction chauds. On continuera l'étude d'une solution d'extraction alternative, par "enveloppe froide". Le remplissage par sphères, granions et entrée de gaz (au travers des enveloppes froides précédemment mentionnées) sera nécessaire, et sera donc étudié de façon intensive au cours de ce plan.
- 6) Particules alpha. Le problème de l'hélium n'est pas seulement lié à la question des impuretés mais aussi au chauffage et au confinement. La présence de beaucoup de particules alpha (ions d'hélium) énergétiques sera l'une des caractéristiques nouvelles et importantes d'un brûleur D-T. Cette question sera abordée sérieusement quand JET passera en opération active et, éventuellement, sur un autre appareil en cours de définition qui est provisoirement dénommé VHFT (Very High Field Tokamak).

III.3.2 Machines (cf. table II)

- 1) JET. L'effort principal du programme porte évidemment sur JET, tant au plan physique qu'au plan financier ou des effectifs. Dans la proposition initiale, on proposait un fonctionnement du JET en deux étapes que l'on désignait comme "performances de base" et "performances élargies". Les performances de base correspondent aux études exploratoires sur un plasma d'hydrogène dans un champ magnétique de 27,7 kG ; la durée du plateau du champ magnétique atteint 20 secondes, le courant dans le plasma 3,8 MA (pour une section en D) et la puissance d'injection de neutres 10 MW. Dès le départ, les structures sont conçues pour pouvoir donner la possibilité, le moment venu, de passer aux performances élargies. Dans ce régime, le champ magnétique est porté à 34,5 kG pour un plateau de durée ramenée à 10 s. alors que le courant dans le plasma peut atteindre 4,8 MA. Pour cette deuxième phase, il faut de nouveaux générateurs d'énergie tant pour le champ magnétique que pour les chauffages auxiliaires dont la puissance doit atteindre 25 MW. Le gaz employé sera le deutérium. Si tout est satisfaisant, le passage à un mélange D-T devrait conduire à la production d'une grande quantité d'auto-chauffage thermonucléaire, de l'ordre d'une dizaine de MW.
- Jusqu'à présent, le déroulement des opérations dans le temps était prévu ainsi : la période 1979-1983 correspond approximativement à la phase de construction prévue pour durer cinq ans, la réalisation de tous les composants principaux de la machine devant être terminée vers le milieu de 1981. A ce moment, le hall d'assemblage devrait être prêt, alors que celui du tore ne le sera qu'au début de 1982, l'installation devant être complètement terminée environ un an plus tard. Il faudra encore six mois pour les tests et les opérations de réception avant que puisse commencer le programme expérimental, mi 1983 à la fin de ce plan. Les principaux objectifs envisagés pour la première phase d'exploitation sont : l'évolution du comportement du plasma quand ses paramètres sont proches de ceux d'un réacteur, l'interaction plasma-paroi dans ces conditions et l'étude du chauffage du plasma. Dans le cadre de cet emploi du

Table II - Principaux appareils dans le confinement magnétique

Expériences	Site	Principaux objectifs et caractéristiques
JET (2)	Culham	Lois d'échelle, interaction plasma-paroi, chauffage du plasma, particules alpha.
Tokamaks de taille intermédiaire :		
TFR (1)	Fontenay	Lois d'échelle, profils du plasma, chauffage
DITE (1)	Culham	Divertor en hernie, injection de neutres, impuretés
FT (1)	Frascati	Champ et densité de plasma élevés, courants forts
Asdex (2)	Garching	Divertor poloïdal, température ionique élevée.
Textor (2)	Jülich	Interaction plasma-paroi, impuretés
Torus II (3)	(CEA)	Profils du plasma, chauffage, aimant supraconducteur(?)
VHFT (3)	Garching	Champ très élevé, compression adiabatique, ignition(?)
Autres Tokamaks :		
Petula (1)	Grenoble	Chauffage HF
Erasmus (1)	Bruxelles	Chauffage HF
TCA (2)	Lausanne	Chauffage HF
Wega (1)	Grenoble	Chauffage HF
Tortur (1)	Jutphaas	Chauffage turbulent
Thor (1)	Milan	Electrons découplés, chauffage HF
Ringboog (1)	Jutphaas	Enveloppe froide
Dante (1)	Risø	Sublimation des granules injectés
Spica (1)	Jutphaas	Comportement à bêta élevé
Tosca (1)	Culham	Bêtas élevés (section non circulaire)
Autres appareils toroïdaux :		
W-VII A (2)	Garching	Stellarator avec chauffage par injection
Cleo (1)	Culham	" " " HF
HBIX-1A (2)	Culham	Pinch à champ inversé
Eta-Bêta (1)	Padoue	" " " "
RFX (3)	Culham	" " " " de hautes performances
F-IV (2)	Stockholm	Enveloppe froide
(1) En opération (2) en construction (3) en préparation		

temps, la deuxième phase d'exploitation devrait démarrer vers 1985.

- Cependant, plusieurs résultats très encourageants ont été obtenus récemment dans le domaine des Tokamaks (II.2.1) : le bon comportement à température élevée ($T_i > 5$ keV) dans le domaine sans collisions ; les lois d'échelle satisfaisantes du temps de confinement de l'énergie du plasma avec les dimensions (il varie comme le carré du petit rayon), l'augmentation du temps de confinement de l'énergie des électrons avec T_e et n_e ; l'indépendance du temps de confinement de l'énergie par rapport au champ magnétique et au courant du plasma ; la réussite dans l'obtention de plasmas propres ; les résultats positifs, tant expérimentaux que théoriques, sur les valeurs maximales de β réalisables. Ces faits, ainsi que la prise en considération des emplois du temps des autres grands appareils - TFTR (USA) doit commencer à fonctionner au début de 1982 et devrait se voir doté de 45 MW d'injection de neutres courant 1983 ; le démarrage de JT-60 (Japon) est prévu pour la fin de 1982 - ont conduit l'équipe JET à revoir son emploi du temps. Elle prépare une proposition visant à une éventuelle accélération de la phase de construction (de sorte que JET soit prêt à fonctionner fin 1982). De plus, l'équipe JET étudie la possibilité de passer, plus vite que prévu, à la réalisation des performances élargies, déjà pendant la phase de construction. Ceci pourrait signifier :
 1. d'avoir 25 MW de chauffage supplémentaire disponible au démarrage de la phase d'exploitation et donc d'installer quelques 125 MW de générateurs (utilisables quel que soit la méthode de chauffage retenue).
 2. de pousser activement l'étude expérimentale du chauffage HF sur les plus grands Tokamaks disponibles de façon à pouvoir prendre en temps voulu, une décision pour JET.
 3. d'installer les sources de puissances requises pour augmenter le niveau du champ magnétique.
 4. d'augmenter l'effort à porter sur le développement de la manipulation à distance et des équipements pour le tritium.
- L'extrapolation des résultats récemment fournis laissent penser qu'en régime de performances élargies, on pourrait produire des plasmas ayant les paramètres suivants ; $T_i \simeq 15$ keV, $n \simeq 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $\beta \simeq 6\%$. Le temps de confinement de l'énergie devrait se situer entre 0,5 et 5 s et si l'on utilise un mélange D-T, on pourrait obtenir une puissance thermonucléaire d'environ 100 MW.

- 2) Autres Tokamaks en fonctionnement et en construction. JET seul ne peut donner toutes les informations nécessaires à la poursuite du programme fusion. Il est intégré dans un ensemble d'expériences complémentaires plus petites, mieux adaptées à l'étude de points spécifiques. Les appareils en question sont pour certains déjà en fonctionnement, pour d'autres à mettre en route au cours de ce plan (ceux qui sont spécialement affectés à l'étude du chauffage ne seront considérés qu'au paragraphe III.3.3). Ce système cohérent, organisé pour couvrir de façon aussi complète que possible le champ des problèmes à aborder dans la ligne Tokamak, s'articule autour de quelques appareils principaux : Dite (Culham), FT (Frascati), TFR (FAR), Asdex (Garching) et Textor (Jülich, après 1981), chacun étant spécialisé dans l'étude de quelques-unes des principales questions indiquées en III.3.1. Dans chaque cas, une puissance adéquate de chauffage permet de porter le plasma dans un régime de performances supérieures. Des Tokamaks plus petits ont des buts bien précis : Ringboog (Jutphaas) est consacré à l'étude des enveloppes froides en collaboration avec le laboratoire de Stockholm (modélisation), Dante (Risø) à l'étude de l'ablation des projectiles en connection avec Garching et Culham. Tosca (Culham) et une expérience du genre Tokamak, Spica (Jutphaas), sont consacrés à la vérification des possibilités limites des configurations Tokamak dans le domaine des bêta élevés.
- 3) Les nouveaux Tokamaks. Selon les résultats auxquels auront abouti les études théoriques et expérimentales en cours, la construction de deux nouveaux appareils (Torus II et VHFT) pourrait être décidée. L'objectif spécifique de ces machines, objectif impossible à atteindre avec les machines actuelles, sera la démonstration de deux faits essentiels pour l'étape ultérieure au JET, à savoir :
- la possibilité d'utiliser des bobines supraconductrices sur un vrai Tokamak ;
 - l'auto-chauffage d'un plasma DT et l'effet des particules alpha sur le confinement du plasma.

Le projet de Torus II, un Tokamak supraconducteur de taille moyenne, est entré dans sa phase finale dans le cadre de l'Association Euratom-CEA. Les essais sur le refroidissement de l'électro-aimant par hélium superfluide sont en cours. En ce qui concerne sa construction, une décision définitive devrait intervenir en 1979. En dehors de l'intérêt considérable qu'il présente sur le plan technologique, cet appareil devrait être affecté à l'étude du chauffage complémentaire de grande

puissance (éventuellement chauffage haute fréquence) et à des recherches sur le problème important du profilage des distributions de plasma. V.H.F.T., un Tokamak à champ très élevé, se trouve actuellement en phase d'étude préliminaire et devrait permettre de nouveaux progrès en prolongeant les résultats positifs obtenus récemment quand on opère à des densités et à des niveaux de champs magnétiques élevés. La phase de définition pourrait être achevée vers la fin de 1978 et l'on pourrait commencer un projet concret en 1979. L'extrapolation des lois empiriques sur le temps de confinement aux densités plus élevées et l'utilisation d'un fort chauffage ohmique (densité de courant élevée), combiné éventuellement avec d'autres méthodes de chauffage (injection de neutres, compression adiabatique), devraient conduire à l'ignition dans un mélange de deutérium et de tritium. Une telle expérience serait construite à Garching avec l'aide de Frascati. Cette collaboration pourrait s'étendre au niveau international.

- 4) Autres machines toroïdales. Une certaine activité a été maintenue sur des lignes qui peuvent être regardées aussi bien comme alternatives que comme contributives à la ligne Tokamak : les Stellarators et les pinches à champ inversé.

Les Stellarators sont représentés par deux appareils : W-VII A (Garching) et Cleo (Culham). Les Stellarators à faible bêta peuvent aider à comprendre les mécanismes de transport dans les Tokamaks. L'effet positif sur la stabilité du plasma des bobinages hélicoïdaux extérieurs est intéressant mais son origine et sa valeur potentielle pour des applications à un réacteur ne sont pas encore clairs. Un effort sérieux sera fait pour obtenir des configurations sans courant global. Des configurations différentes des Stellarators classiques (c.-à-d. champ toroïdal principal plus champ des bobinages hélicoïdaux) sont étudiées dans des expériences de compression rapide. Elles pourraient aussi être utilisées dans un nouvel assemblage pour W-VII. On ne prévoit aucun Stellarator nouveau en ce moment. Le travail sur les pinches à champ inversé se poursuit sur deux appareils : HBTX-1A (Culham) et Eta-Bêta (Padoue) dans le cadre d'une étroite collaboration entre les deux laboratoires. La prochaine étape serait la grande expérience RFX proposée à Culham comme élément du programme de coopération avec Padoue.

- 5) Groupes de planification. Un groupe de définition devrait se mettre au travail en 1979 pour définir l'étape qui suivra JET et en particulier si elle doit comprendre une ou bien deux machines, et si l'appareil venant après JET doit produire une puissance électrique positive.

Le travail de définition pour le réacteur DEMO sera intensifié à partir de 1979 en prenant le groupe Fintor (groupe de travail commun à Frascati, Ispra et Naples) comme noyau.

Ces deux groupes devront rester en contact étroit l'un avec l'autre et avec le groupe de planification à long terme qui continuera, avec son noyau à Bruxelles.

III.3.3 Méthodes de chauffage

Dès le début du programme fusion de l'Euratom, on a reconnu que le chauffage des plasmas était l'un des problèmes majeurs de la recherche sur la fusion thermonucléaire. A la lumière des résultats récents, ce problème apparaît comme toujours plus important : pour atteindre leurs performances maximales, JET et les appareils de taille intermédiaire devront avoir des chauffages complémentaires très puissants. Comme des méthodes de chauffage efficaces commencent à être disponibles, il est à la fois nécessaire et raisonnable de proposer une extension considérable du programme chauffage.

Jusqu'à la taille du JET, l'injection de neutres basée sur des sources d'ions positifs est une solution bien adaptée, mais il est douteux que l'on puisse l'appliquer à des machines plus importantes. Deux solutions alternatives sont à l'étude : le chauffage haute fréquence et l'injection de neutres basée sur des sources d'ions négatifs. On s'efforcera au cours de ces années de déterminer les potentialités relatives de ces deux solutions.

Les développements scientifiques et technologiques sont progressivement concentrés dans des laboratoires choisis qui jouent un rôle de conseil et éventuellement de fournisseurs auprès des autres laboratoires de la Communauté. C'est le cas pour l'injection de neutres qui a été confiée conjointement à Fontenay et Culham. Pour le chauffage par haute fréquence la plupart des compétences sont concentrées au CEA (et à l'ERM).

- 1) Chauffage par injection de neutres. Il consiste à injecter un faisceau d'atomes neutres très rapides obtenus par neutralisation

d'ions accélérés. Les sources que l'on utilise à présent fournissent des ions positifs et sont bien adaptées aux niveaux actuels d'énergie. Par contre, pour les énergies plus élevées nécessaires pour de plus grandes machines, l'efficacité de la neutralisation des ions positifs devient si faible qu'il paraît nécessaire de recourir aux sources d'ions négatifs qui sont bien moins développées pour le moment. Il faudra donc faire un effort pendant ce plan quinquennal pour étudier des sources et des accélérateurs d'ions négatifs de façon à être prêt, au début du plan prochain, à développer une ligne d'injection basée sur les ions négatifs au niveau du mégawatt. Le blindage des injecteurs après l'ignition du plasma pourrait permettre d'appliquer cette méthode aux réacteurs. Des études complémentaires sont nécessaires. Pour l'instant, la collaboration entre Culham et Fontenay-aux-Roses est orientée vers la production d'unités de 1 MW 80 keV d'H⁰ avec des sources d'ions positifs. Un tel développement est nécessaire pour le JET qui aura besoin de 10 MW d'injection de neutres dans les performances de base, et de 25 MW dans les performances élargies mais aussi pour les machines de taille intermédiaire : Dite, TFR 604, Torus II, Asdex, Textor et Wendelstein-VII A. Les contrats pour la fourniture de systèmes d'injection de neutres ont déjà été signés entre les Associations. Une amélioration considérable du rendement de ces systèmes est attendue si l'on réussit à mettre au point les systèmes de récupération actuellement à l'étude. On pense étendre les techniques actuelles à la réalisation d'unités de 1 MW 160 keV de D⁰.

- 2) Chauffage haute fréquence. Le chauffage par haute fréquence n'est pas encore aussi avancé que l'injection de neutres. La physique du chauffage par interaction entre les ondes électromagnétiques et le plasma est encore l'objet d'actives recherches. Les travaux se poursuivent sur une série de schémas possibles caractérisés par la fréquence à laquelle ils opèrent. Au cours de ce plan, on a l'intention de se concentrer progressivement sur les fréquences les plus prometteuses et de les porter à un niveau de puissance comparable à celui actuellement atteint par l'injection de neutres (environ 1 MW). On devrait alors pouvoir, avant la fin du plan, choisir la méthode la mieux adaptée pour JET et post-JET, et comparer ses mérites à ceux de l'injection de neutres.

Les grandes lignes du programme proposé sont les suivantes :

- Dans le domaine des basses fréquences (~ 100 kHz), Petula (Grenoble), éventuellement dans une version améliorée, devrait fournir les informations nécessaires à une extension possible de la méthode à Torus II et JET.
- Dans le domaine des fréquences intermédiaires (1-100 MHz), des tests importants seront faits sur TFR. Erasmus et TCA (Lausanne) fourniront des informations complémentaires.
- Le domaine des hautes fréquences (~ 1 GHz) sera couvert par Wega (Grenoble), une expérience commune à Garching et Grenoble et exploitée avec le concours de l'ERM. FT et peut-être Asdex devraient fournir aussi des informations. Des tests sur JET sont envisagés. Des klystrons de puissance devront être développés par l'industrie.
- Pour ce qui est des très hautes fréquences ($\gg 30$ GHz), un gros effort doit être fait pour développer la technologie correspondante. Les premiers tests sont prévus à Culham et Milan (des gyrotrons à 50 GHz pour Cleo et des gyrotrons à 28 GHz pour Thor et Tosca). Si le développement se révélait positif, cette méthode pourrait être étendue aux Tokamaks existants (Dite, TFR).

- 3) Chauffage ohmique et autres méthodes. Les bons résultats obtenus sur Alcator (USA), une expérience compacte à champ élevé, ont donné un regain d'intérêt à la détermination des limites du chauffage ohmique quand des champs très élevés sont appliqués. Un groupe d'études a été mis sur pied à Garching avec la collaboration de Frascati pour évaluer l'intérêt potentiel et les risques d'une telle expérience connue sous le nom de VHFT (cf. § III.3.1).

Une autre méthode de chauffage très efficace, la compression adiabatique qui a été extensivement expérimentée dans le passé, est intrinsèquement limitée en durée. Il se pourrait qu'on l'applique sur JET. L'utilisation d'une pareille méthode sur VHFT pourrait aider à atteindre les températures d'ignition à partir desquelles le chauffage par particules alpha pourrait prendre le relais.

D'autres méthodes de chauffage comme les ondes de chocs, le chauffage turbulent (Jutphaas), l'implosion de "liners", le chauffage par lasers ou faisceaux d'électrons relativistes (Amsterdam) seront étudiées à un niveau exploratoire.

III.3.4 Théorie et calculs

Tous les secteurs d'activités mentionnés précédemment impliquent des études expérimentales et théoriques. Le travail théorique est essentiel à la compréhension des observations sur le confinement et le chauffage, rendant possible une évaluation correcte des résultats expérimentaux obtenus tant en Europe qu'ailleurs. Il fournira une base solide aux extrapolations vers les nouvelles conditions qu'on rencontrera en s'approchant des réacteurs.

Comme il est nécessaire d'avoir beaucoup plus de détails pour la compréhension et les prédictions, les méthodes de calculs numériques seront d'un usage croissant. On procède actuellement à des discussions techniques pour améliorer la coordination des calculs sur la fusion en Europe, ce qui devrait conduire à un échange plus facile de programmes et à un accès direct aux moyens de calculs des différents laboratoires. Une étude est en cours pour arriver à des propositions concrètes en la matière.

III.3.5 Activités diverses

Les recherches tant théoriques qu'expérimentales sur la physique de base des plasmas ont été pour une grande part transférées aux universités. Une telle collaboration devrait présenter l'avantage supplémentaire de créer une réserve de jeunes chercheurs et ingénieurs qui pourrait s'avérer nécessaire dans un programme en augmentation.

III.4 TECHNOLOGIE DE LA FUSION

III.4.1 Introduction

Les buts principaux de la partie technologie du plan quinquennal sont la définition et la mise en place du support technologique nécessaire pour la phase post-JET. Le programme proposé se rattache aux principaux secteurs suivants :

- Etudes de systèmes
- Sécurité et impact sur l'environnement
- Technologie des aimants supraconducteurs
- Tritium et technologie des "couches fertiles"
- Technologie des matériaux.

Le programme technologique proposé initialement par les "groupes d'experts" était nettement plus vaste et plus ambitieux que celui présenté ci-dessous.

En dépit du grand intérêt présenté par un programme étendu, la Commission a en effet dû faire des coupes sombres dans le budget correspondant de façon à réduire le coût total. Ceci a été fait en se limitant aux problèmes les plus urgents et en particulier à ceux présentant un intérêt direct pour la définition et la construction des machines post-JET. On a donc décidé de reporter la prise en considération de domaines de recherches comme par exemple la source intense de neutrons de 14 MeV, le projet d'aimant supraconducteur à courant variable dans le temps ou la boucle test pour les modules de "couche fertile" en 1981, lors de la révision du programme, ou plus tôt, comme partie du programme du CCR, s'il est augmenté. D'autre part, les programmes de recherches poursuivis actuellement en dehors de la fusion, mais avec des sujets similaires (par ex. le développement des matériaux dans les surrégénérateurs rapides) pourraient être orientés par des programmes de collaboration vers des buts intéressant directement la technologie de la fusion.

Il faut noter que ce plan quinquennal ne comporte pas de travaux de développement pour des éléments tels que des aimants à champs élevés cryogéniques ou refroidis à l'eau, ou de grands générateurs de puissance électrique, puisque actuellement ceux-ci sont développés dans le cadre de projets de machines telles que JET.

III.4.2 Etudes de Systèmes

La fonction des études de systèmes est de développer des modèles conceptuels d'installations de réacteurs fusion, d'indiquer les buts ou les caractéristiques optimales du point de vue de l'"engineering" et d'étudier l'optimisation des paramètres correspondants. Les études de systèmes ont aussi leur utilité pour définir les paramètres des étapes intermédiaires. Pour évaluer la liste des systèmes vers lesquels on doit diriger les études, il faut prendre en considération les options de base du programme européen. C'est ainsi qu'il n'est prévu pour l'instant aucune étude concrète sur les systèmes avec confinement de type miroir ou inertiel. Par ailleurs, l'effort principal sera porté sur le concept Tokamak (pulsé ou quasi-stationnaire) ; on s'intéressera en outre à d'autres systèmes tels que les systèmes hybrides fission-fusion, les réacteurs du type pinch à champ inversé et "Belt-Screw pinch" et aux applications d'utilisation de la chaleur des réacteurs fusion.

Les études conceptuelles pour "Demo" dans lesquelles le CCR joue un rôle directeur incorporeront les découvertes faites dans les laboratoires associés dans une remise à jour continue de la définition d'un réacteur de puissance. Il est important qu'un projet conceptuel de

réacteur de fusion inclue systématiquement la capacité de manipulation à distance pour l'entretien direct nécessaire et pour les réparations. Un programme dynamique sur les applications des manipulateurs est mis en oeuvre dans le cadre du projet JET. Un effort additionnel limité pour le développement de manipulateurs d'intérêt général est inclus dans le programme technologie.

III.4.3. Etudes de la sécurité et de l'impact sur l'environnement

Les principales études concernant la sécurité et l'impact sur l'environnement de l'énergie de fusion se concentreront sur l'établissement et l'évaluation régulière des concepts de sécurité relatifs aux principales installations de réacteurs étudiés dans les groupes de définition et de modèles conceptuels, sur l'évaluation de l'impact sur l'environnement et des implications diverses des procédures d'autorisation. En particulier, ces études incluront l'évaluation du contenu global de tritium et des pertes associées dans les conditions normales d'opération, l'évaluation des risques en cas d'accident, et l'étude de l'élimination des composants radioactifs des réacteurs. Il sera nécessaire d'évaluer, pour chaque projet, les scénarios d'accidents importants qui pourraient entraîner des fuites de matières actives et une libération consécutive de radioactivité dans l'environnement.

III.4.4 Technologie des aimants supraconducteurs

L'effort concentré prévu dans ce domaine devrait placer la Communauté dans une position compétitive lorsque, au cours du prochain plan, devront être prises les décisions fondamentales concernant les futurs grands appareils supraconducteurs. De plus, on considère comme très importante la démonstration du bon fonctionnement d'un système d'aimants supraconducteurs, probablement en liaison avec une expérience de plasma, puisque les futurs grands appareils (basés sur le confinement toroïdal) seront très probablement équipés de systèmes d'aimants supraconducteurs.

- 1) **Projet de grande bobine (LCP).** Le LCP qui doit être construit à Oak Ridge est un dispositif expérimental de test, constitué par l'arrangement toroïdal de six bobines en forme de D. Les dimensions des bobines (4,7 x 2,5 m) permettront d'extrapoler les résultats aux nécessités des grands appareils post-JET. La première bobine européenne utilisant comme matériau supraconducteur du NbTi devrait être livrée par KFK (Karlsruhe) à Oak Ridge à la fin de 1981. Trois autres bobines seront fournies par les USA, une par le Japon et une autre (sous réserve d'approbation finale) par la Suisse.

- 2) Supraconducteur A-15. L'utilisation de composés A-15 permet de faire fonctionner les aimants à des champs plus élevés (typiquement 5 à 8 T sur l'axe du plasma) et/ou d'augmenter la stabilité et la marge de sécurité en température dans des conditions de fonctionnement réalistes. Ces deux facteurs sont importants pour l'évolution la plus probable du programme fusion magnétique. Pour cette raison, on propose le lancement d'un programme dynamique à but précis. En clair, on se propose de construire dans la Communauté une seconde bobine pour l'ensemble test LCP avec des conducteurs A-15. Le composé A-15 le plus prometteur, bien que n'étant pas encore disponible en quantité suffisante en Europe pour construire une grande bobine, est le Nb_3Sn . Une très forte augmentation de l'effort est nécessaire pour le développement de telles bobines conduisant à la réalisation d'une seconde bobine test pour le LCP. Ceci devrait être un des objectifs essentiels ; la date de réalisation devrait être de trois ans postérieure à la livraison de la bobine Nb Ti.
- 3) Refroidissement à l'hélium superfluide (Torus II). Les deux avantages principaux du refroidissement à l'hélium superfluide (He II à 1.8° K) sont l'augmentation des valeurs critiques du supraconducteur et un taux de transfert de la chaleur sensiblement amélioré pour les impulsions courtes. C'est évidemment important pour les bobines relativement petites proposées pour Torus II (grand rayon 2,15 m, champ sur l'axe 4,5 T). Des expériences préliminaires sur une bobine modèle faites à Saclay donnent des résultats prometteurs pour la construction de Torus II.

De plus, il existe d'autres activités de soutien pour les systèmes d'aimants supraconducteurs requis pour les appareils futurs. En particulier, cette proposition de programme inclut les deux domaines suivants :

- 4) Bobines de champ poloïdal. L'utilisation de supraconducteurs pour réaliser les bobines de champ poloïdal, qui dans les machines actuelles transportent des courants essentiellement variables, n'a pas encore été envisagée. Les difficultés liées à la variation du courant dans les bobines supraconductrices doivent être résolues au préalable. Du fait de la priorité accordée aux autres activités sur les supraconducteurs, aucun test à grande échelle n'est prévu avant la révision de programme.
- 5) Soutien au programme supraconducteur. Pour permettre la fabrication finale de systèmes de bobines supraconductrices, un important

travail de développement est requis, en particulier sur les méthodes de stabilisation, le transfert de chaleur, le refroidissement et les effets du cycle thermique sur l'isolement thermique ou électrique.

III.4.5 Technologie du tritium et de la "couche fertile"

La technologie du tritium requise pour le fonctionnement sûr d'un appareil à fusion post-JET dépendra du débit de combustible et de l'ensemble du système de sécurité radiologique. Pour démontrer la capacité de manipuler de façon sûre les quantités de tritium caractéristiques d'un tel appareil, c.-à-d. environ 10 g par jour et 100 ou 200 g présents en permanence dans le système, on se propose de créer un laboratoire européen du tritium. Cela implique que le savoir faire technologique existant à l'extérieur des laboratoires fusion de la Communauté soit accessible au programme fusion.

La nécessité d'intégrer dans un brûleur DT une couche fertile absorbant les neutrons et capable de régénérer au moins partiellement le tritium demande qu'on ait fait auparavant la preuve d'un fonctionnement sûr d'un module de couche fertile. C'est pourquoi, en relation avec le programme sur les matériaux, il faudra réaliser, vers la fin du plan, des tests sur des modules de couches fertiles y compris des tests d'irradiation. En particulier, les composants ou systèmes suivants doivent être développés et testés en vue de leur application aux post-JET :

- 1) Systèmes de stockage et d'alimentation en tritium. Le tritium peut être stocké soit sous forme d'un hydrure métallique, soit sous forme gazeuse. Les techniques de stockage actuelles sont vraisemblablement utilisables, mais on devra les tester et se familiariser avec leur emploi avant de mettre en route un brûleur DT.
- 2) Systèmes de transfert et d'extraction du tritium. Les valves devront comporter exclusivement des joints métalliques et, dans le domaine de pression compris entre 10^{-6} et 10^{-8} Torr, les pompes cryogéniques aussi bien que turbomoléculaires sont compatibles avec le tritium ; néanmoins, un certain travail de développement sera requis pour résoudre certains problèmes particuliers posés par cette application, par exemple le pompage de l'hélium.
- 3) Traitement du gaz d'échappement. Il faudra purifier le DT extrait de ses impuretés chimiques comme O, N et He et réajuster la composition des isotopes de l'hydrogène qui a été modifiée par les réactions de fusion et par l'injection de deutérium. Il existe

plusieurs méthodes disponibles pour chacune de ces deux étapes du traitement, mais il faudra tester et optimiser les équipements correspondant à la méthode finalement retenue.

- 4) Confinement et décontamination. Le confinement et les fuites accidentelles de tritium font l'objet d'une réglementation et de procédures d'autorisation précises dans tous les pays de la Communauté. Leur définition est étroitement liée aux autres problèmes de sécurité des réacteurs et doit être traitée en même temps que ceux-ci. L'évaluation pratique de la méthode choisie est un sujet qui relève du programme expérimental du laboratoire du tritium. Les concepts habituels impliquent de placer l'ensemble des installations dans un bloc traversé par un flux continu de gaz inerte qui serait ensuite traité pour en extraire le tritium. De plus, l'ensemble des bâtiments contenant l'appareil de fusion serait lui-même étanche et relié à un système de circulation et de traitement du tritium assurant par là même un confinement secondaire. On considère que la technologie correspondante est théoriquement disponible. Cependant il sera essentiel de prouver que l'on peut faire confiance au système de confinement, éventuellement à une échelle quelque peu réduite. Ceci est un des objectifs principaux de l'exploitation d'un laboratoire du tritium.
- 5) Récupération du tritium de la "couche fertile". Les techniques de récupération du tritium dépendront du choix du matériel de régénération : lithium métallique liquide ou composés du lithium liquides ou solides. Dans le cas du lithium liquide, plusieurs méthodes de séparation du tritium sont en cours d'analyse. Des résultats expérimentaux encourageants ont été publiés sur la distillation : ils demandent à être confirmés par des expériences pilotes à l'échelle du laboratoire. La récupération à partir des composés solides du lithium souffre de la difficulté d'empêcher le tritium de fuir vers le refroidisseur primaire.

III.4.6 Technologie des matériaux

Le programme matériaux devra interagir fortement avec le groupe de projet de la(des) machine(s) post-JET en ce qui concerne la sélection des matériaux, l'identification des spécifications et l'examen des problèmes particuliers. De plus, du fait des temps de progression très longs, certains travaux exploratoires concernant le réacteur de démonstration doivent démarrer dès maintenant.

Les classes de problèmes les plus importantes pour les matériaux situés dans un environnement de fusion proviennent : des forces mécaniques, qu'elles soient continues ou cycliques ; de la corrosion en présence de lithium, de composés du lithium et des impuretés ; des effets de radiation, dans la masse des matériaux comme en surface. Les problèmes les plus sérieux cependant sont posés par la combinaison de ces effets dont les conséquences sont difficiles à évaluer à la lumière de nos connaissances actuelles.

Dans ce domaine, les points principaux à inclure dans un programme technologique devraient être les suivants :

- 1) Sélection et standardisation des matériaux. La préférence à court terme est donnée aux matériaux bien développés tels que les aciers austénitiques et les alliages de nickel. Du fait des temps importants nécessaires pour tester de nouveaux matériaux, quelques travaux exploratoires sont requis concernant des solutions alternatives (choisies parmi celles déjà disponibles industriellement). La minimalisation de l'activation des matériaux est un critère important.
- 2) Propriétés mécaniques des matériaux non irradiés (fluage et fatigue ; fragilisation et fracture ; problèmes métallurgiques de fabrication). Certaines des conditions que les matériaux devront affronter dans un réacteur de fusion sont très peu familières aux ingénieurs ; par exemple, les contraintes et la charge thermique variables, avec environ 10^6 cycles/an. Dans ces conditions, les propriétés de fluage et de fatigue des matériaux même les plus ordinaires devraient être étudiées attentivement.
- 3) Compatibilité (corrosion en présence de lithium liquide et des composés du lithium ; corrosion par contamination par l'hélium ; perméabilité aux isotopes de l'hydrogène). Tous les matériaux de structure seront vraisemblablement attaqués par corrosion. La présence de matériaux assez peu usuels (Li ou composés de Li) et d'impuretés (comme He et les isotopes de l'hydrogène) rend ce problème très indéterminé, bien que certains résultats expérimentaux commencent à être disponibles. La connaissance de la perméabilité est importante pour prévoir la concentration des isotopes de l'hydrogène dans différentes parties du réacteur, tant en ce qui concerne les effets sur les matériaux (fragilisation) que la sécurité.

- 4) Dommages dus aux rayonnements (simulation par bombardement à l'aide d'électrons et d'ions lourds ou légers ; irradiation dans un réacteur de fission ; irradiation avec des neutrons de 14 MeV ; irradiation de matériaux isolants). Les dommages causés par les rayonnements aux matériaux d'un réacteur de fusion entraînent des gonflements, du fluage, des fragilisations et d'autres changements de propriétés mécaniques et électriques. Les dégâts sont produits par les neutrons de grande énergie, par déplacements et par transmutations : ils dépendent des conditions dans lesquelles le matériau est irradié. A l'heure actuelle on dispose essentiellement de deux instruments de simulation : l'irradiation à l'aide de particules chargées et l'irradiation par neutrons rapides dans les réacteurs de fission. Le premier peut servir à simuler aussi bien les déplacements provoqués par les neutrons que la production de gaz, dans la mesure où des taux d'irradiation élevés peuvent être obtenus. Les sources intenses de neutrons, projetées spécialement, en particulier celles basées sur des réactions DT, peuvent fournir un environnement de radiations qui ressemble de très près à celui prévu dans un réacteur de fusion ; elles permettent ainsi de calibrer et de vérifier les méthodes de simulation ; elles pourraient représenter un important sujet de collaboration internationale. Aussi est-il proposé de développer une contribution européenne à cette collaboration par la mise en route de travaux exploratoires comparant les divers schémas possibles de sources intenses de neutrons, complétés par des projets conceptuels correspondant aux méthodes les plus intéressantes.
- 5) Dommages de surface. L'interaction plasma-paroi est importante tant en ce qui concerne la physique des plasmas qu'en ce qui concerne ses effets sur les propriétés de matériaux. Pour ce qui est des matériaux, les différents types de dommages de surface qui doivent être étudiés comprennent : les modifications des propriétés mécaniques de la première paroi du fait de l'érosion de la surface et de l'implantation de combustible ; des tests de matériaux appropriés afin de minimiser les pertes par rayonnement d'impuretés du plasma contenu ; la rétention et la libération de combustible par la première paroi (cf aussi III.3.1).

III.5 CONFINEMENT INERTIEL

III.5.1 Fusion laser

Les problèmes de la fusion laser peuvent être classés comme suit :

- développement de lasers de puissance ;
- études des interactions lumière-plasma et du transport de l'énergie ;
- hydrodynamique de la compression et combustion thermonucléaire ;
- conception et fabrication des cibles ;
- théorie ;
- études de réacteurs.

Dans les prochaines années, le programme européen de confinement inertiel ne s'élèvera qu'à quelques pour-cents des programmes russe ou américain. Pour réaliser ce qui a été annoncé au § III.2.2, il devra être limité à un petit nombre d'arguments dans lesquels il essayera d'apporter une contribution au niveau mondial. Par ailleurs, avec un effort total faible, il est important que les programmes des différents laboratoires soient complémentaires mais assez proches les uns des autres pour pouvoir s'aider par une collaboration efficace. Enfin, les programmes des différentes Associations devraient tendre vers une certaine convergence de façon à jeter les bases d'une éventuelle réalisation future d'une grande expérience commune de compression (au moins $5 \cdot 10^{13}$ watts, coût minimum 50 MUCE).

En tenant compte des compétences et du matériel disponibles dans les diverses Associations, on propose le programme suivant :

- 1) Développement de lasers de puissance
 - Optimisation du laser à iode de 1 TW déjà développé, et transfert des connaissances acquises à l'industrie dans le but de produire prochainement des modules de 1 TW - 0,3 ns (Garching). Extension éventuelle à des modules de puissance plus élevée.
 - Développement d'une ligne laser CO_2 de 250 J - 1 ns et réalisation de quatre de ces modules pour pouvoir disposer d'un système de 1 TW (Frascati).
 - Recherches sur de nouveaux lasers à efficacité élevée (Garching).
- 2) Interaction lumière-plasma et transport de l'énergie
 - Recherches expérimentales basées sur l'utilisation des faisceaux lasers, tant au néodyme qu'à l'iode, focalisés principalement sur des cibles planes (Garching).
 - Etudes théoriques et numériques (Garching, Bruxelles, Göteborg).

3) Etude des compressions

- Etude de la stabilité hydrodynamique de l'implosion des cibles sphériques à paroi mince en utilisant deux longueurs d'ondes différentes (1 et 10 microns) avec d'abord un système néodyme de $2 \times 100 \text{ J} - 2 \text{ ns.}$, puis ensuite un système CO_2 de $4 \times 250 \text{ J} - 1 \text{ ns.}$ De telles expériences utiliseront des cibles remplies de D T. mais ne visent pas à une production maximum de neutrons (Frascati).
- Réalisation d'une expérience de compression de taille moyenne utilisant 2 lasers à iode de 1 TW pour se familiariser avec les techniques, les diagnostics et les calculs correspondants (Garching).

4) Etudes de base

Poursuite des études théoriques actuelles (Bruxelles, Göteborg) sur les coefficients de transport et les phénomènes non linéaires, en vue de les appliquer aux situations spécifiques rencontrées dans le programme expérimental.

5) Collaboration

Le besoin d'une collaboration efficace se fait particulièrement sentir dans les domaines suivants : calculs, fabrication des cibles (au début on achètera les cibles aux Etats-Unis mais cette situation laisse fortement à désirer), diagnostics et études de réacteurs. On cherchera à augmenter autant que faire se peut les contacts entre les Associations et les autres laboratoires civils (Rutherford, Polytechnique, universités) en étendant par exemple à ces laboratoires l'emploi du fonds de mobilité.

III.5.2 Autres méthodes

- En dépit de leurs potentialités et de leur rapide développement à l'étranger, les recherches sur la fusion par faisceaux d'ions ou d'électrons ne peuvent démarrer dans les Associations dans le cadre du programme très réduit proposé pour le confinement inertiel.
- L'activité sur le Plasma Focus restera limitée pour le moment à l'exploitation de la grande installation de 1 Mégajoule qui existe à Frascati, en collaboration avec Culham et en contact étroit avec différentes universités allemandes. Une évaluation globale de cette ligne de recherche est prévue en 1980.

III.6 RESUME DU PROGRAMME PROPOSE

En dehors de la construction du JET, le programme proposé implique en grande partie la poursuite des activités actuelles. Il comporte cependant une extension de celles-ci et prévoit quelques activités nouvelles.

III.6.1 Poursuite des activités actuelles

Cela consiste essentiellement à construire le JET et commencer son exploitation en phase de performance de base ainsi qu'à exploiter les appareils déjà existants et ceux qui sont en construction. La plupart de ces appareils sont des Tokamaks conçus pour résoudre certains problèmes spécifiques (voir Tableau II) dont l'importance est primordiale pour la prochaine étape. Il est évident qu'il faut obtenir un maximum d'informations de ces machines. Un petit nombre d'autres machines toroïdales, relevant des lignes alternatives, devraient pouvoir fournir les éléments d'information requis pour pouvoir décider s'il convient ou non de poursuivre le développement de ces lignes. En outre, elles pourraient faciliter l'étude de certains problèmes de la ligne Tokamak : dissociation du chauffage et du confinement (Stellarators) et étude des propriétés des plasmas à bêta élevé (appareils à bêta élevé).

Dans le domaine de l'injection de neutres, le développement de lignes d'injection d'hydrogène à un niveau de tension intermédiaire, basées sur des sources d'ions positifs, peut être considéré comme achevé ; leur application extensive à des appareils de confinement a commencé. Le développement de lignes à niveau de tension plus élevé, d'injecteurs de deutérium, de systèmes de récupération et de sources d'ions négatifs est concentré dans deux Associations ; ce développement doit être poursuivi pour pouvoir satisfaire les conditions requises pour JET et pour la prochaine étape.

Dans le domaine du chauffage haute fréquence, le développement du chauffage à la fréquence hybride inférieure est le plus avancé : il entre actuellement dans sa phase d'application. En ce qui concerne les autres méthodes, dont le nombre a été réduit au cours des derniers programmes, il est nécessaire de poursuivre leur développement à des niveaux de puissance plus élevés afin de préparer la sélection de celles qui réunissent les conditions requises pour JET et pour les étapes ultérieures.

Dans le domaine de la technologie de la fusion, quelques activités ont été lancées à une date récente, et la nécessité de les poursuivre ne fait pas de doute. Il s'agit des projets de grande bobine, des essais de matériaux supraconducteurs refroidis à l'hélium superfluide, d'études conceptuelles, d'études portant sur la sécurité et l'environnement, et de la simulation des dommages engendrés par les radiations.

Dans le domaine du confinement inertiel, les travaux réalisés jusqu'ici dans les laboratoires associés ont porté essentiellement, pour la partie technologique, sur le développement d'un laser à iode de 1 TW ainsi que sur le pré-développement d'un laser CO₂ de 250 Joules, et, pour la partie physique, sur l'étude de l'interaction lumière-plasma. A l'extérieur de la Communauté, les progrès sont si rapides et les efforts se sont intensifiés à tel point que, pour ne pas perdre le contact d'une manière irréversible, la Communauté devra obligatoirement renforcer ses activités dans ce domaine.

III.6.2 Extension

- En fonction du résultat des études provoquées récemment par les résultats très positifs enregistrées en 1978 dans la ligne Tokamak, une réduction du temps de construction de JET ainsi que la mise en oeuvre des performances élargies durant la phase de construction pourraient être proposées. La faisabilité technique ainsi que l'intérêt scientifique d'une telle opération n'ont pas encore été évalués par les organes compétents de l'Entreprise Commune.
- En fonction du résultat des études préliminaires, théoriques et expérimentales, actuellement en cours, le programme pourrait inclure la construction de deux nouveaux Tokamaks : un appareil à très haut champ (VHFT) pouvant conduire à l'ignition d'un plasma de deutérium-tritium, un Tokamak supraconducteur (Torus II) affecté aux études de profilage de plasma et de chauffage. Il n'est pas nécessaire de souligner l'importance que présentent, pour la préparation de la prochaine étape, la construction à une date rapprochée d'une expérience d'ignition et l'application de la supraconductivité à un vrai Tokamak. On n'a pas encore déterminé s'il sera possible de construire chacune des deux nouvelles expériences mentionnées ci-dessus. Il n'est pas certain, a fortiori, que les deux expériences devront être construites.
- Dans le domaine du chauffage du plasma, en revanche, une extension des activités est non seulement possible, mais nécessaire. La plupart des

appareils existants ont déjà, ou devront bientôt, fonctionner en régime de base. Pour atteindre leurs performances maximales, ils ont besoin d'un chauffage complémentaire très puissant. Plusieurs unités d'injection de neutres pour une puissance globale de l'ordre de 25 MW devront être construites et appliquées, à JET et à d'autres Tokamaks tels que Asdex, TFR 604, Dite, Textor et Torus II. Un chauffage haute fréquence de grande puissance par résonance hybride inférieure devra être appliqué en particulier à FT.

- Dans le domaine de la technologie de la fusion, les études de systèmes devront faire l'objet d'activités renforcées et le développement d'une bobine supraconductrice en Al5 pour LCP devrait être entrepris.
- L'extension proposée des recherches dans le domaine du confinement inertiel, nécessaire pour atteindre les objectifs minimaux du programme dans ce domaine, implique la production industrielle de modules de laser à iode de 1 TW, le développement et la construction de quatre lasers CO₂ de 250 Joules et la mise en route de tests de compression.

III.6.3 Nouvelles activités

La préparation de la machine post-JET exige une connaissance plus approfondie de la technologie du tritium nécessaire à la fusion. La technologie du tritium qui existe déjà dans les Etats membres devrait être mise à la disposition du programme fusion, mais la création d'un laboratoire européen spécifiquement affecté à la technologie du tritium dans les systèmes de fusion n'en restera pas moins nécessaire. C'est à cette même conclusion qu'on est parvenu aux Etats-Unis, où la construction d'un Tritium System Test Assembly est prévue à Los Alamos. Si l'Europe a l'intention de collaborer efficacement avec les Etats-Unis dans ce domaine, une expertise appropriée doit être créée dans la Communauté. Compte tenu du temps nécessaire pour remplir les strictes conditions d'autorisation applicables dans la Communauté, il conviendrait d'agir le plus rapidement possible. En outre, les essais sur les modules de couche fertile (manteau modérateur) devraient commencer vers la fin du programme quinquennal.

Le problème des matériaux, qui était déjà important pour JET, sera d'une importance primordiale pour l'étape ultérieure et d'une importance cruciale pour le réacteur. Dans l'état actuel des connaissances, on est tout juste capable de définir les domaines qui devront être étudiés. En raison de la longue phase préliminaire que nécessitent certaines procédures d'essai, il conviendrait de commencer dès à présent certains travaux exploratoires, particulièrement en ce qui concerne les dommages causés par les rayonnements.

CHAPITRE IVMOYENS D'EXECUTIONIV.1 SITUATION FINANCIERE DU PROGRAMME 1976-80 DES ASSOCIATIONS

La dotation de la Commission pour le financement du programme des Associations au cours de la période 1976-80, décidée par le Conseil le 25 mars 1976, était de 120 MUC (1). Elle aurait permis de financer un programme d'un volume total d'environ 410 MUC (en appliquant le taux de 25 % pour le support général et de 45 % pour le support préférentiel) si toute la somme attribuée par le Conseil comme plafond pour le financement des actions prioritaires (39 MUC) avait été utilisée pour le support préférentiel de ces actions.

Au moment de l'adoption de cette décision de programme, la Commission fit remarquer (2) que cette dotation correspondait à une réduction substantielle de ses propositions initiales et que par conséquent elle aurait rencontré des difficultés dans la gestion du programme. Par ailleurs, la Commission indiquait que, si nécessaire, elle soumettrait au Conseil en cours d'exécution du programme une proposition visant à adapter sa dotation aux conditions économiques.

En juillet 1977, afin de faire face, du moins en partie, aux difficultés de financement du budget général des Associations, et en tenant compte de la révision de programme prévue pour 1978, les fonds destinés au support préférentiel furent réduits de 39 à 27 MUC et ceux destinés au support général furent augmentés de 12 MUC, avec l'avis favorable du Comité Consultatif Fusion (3). Ceci permettait à la Commission de financer, aux taux prévus par le Conseil, un programme d'un volume total d'environ 430 MUC. Le Comité Consultatif Fusion approuva aussi (3) la proposition de la Commission de demander au Conseil, à l'occasion de la révision qui devait intervenir en 1978, de revoir la dotation financière en tenant compte du changement des conditions économiques depuis le 1er janvier 1976. Le déblocage final de la dotation de la Commission pour le financement du programme quinquennal complet fut décidé par le Conseil en novembre 1976 (4) et les contrats d'association pour la période 1976-1980 ne purent être conclus qu'en 1977. Les changements dans les conditions

-
- (1) J.O. N° L90 du 3 avril 1976 : 120 MUC = 124 MUC (dotation totale)
- 4 MUC (frais de gestion + mobilité)
- (2) Doc. R/781/76 (ATO 42) 1976-80
- (3) Doc. R/1980/77 (ATO 89)
- (4) Doc. T/919/76 (ATO)

entre janvier 1976 et le milieu 1977 (environ 17 % d'inflation moyenne) conduisirent la Commission à conclure des contrats pour un volume financier total d'environ 500 MUC avec le taux de participation habituel de 25 % pour le support général. L'augmentation de 70 MUC du volume financier total, de 430 à 500 MUC, entraîne une augmentation de la participation de la Commission de 17.5 MUC (= 25 % de 70 MUC) pour l'ensemble de la période 1976-1980. Il convient de souligner que cette somme ne représente que le complément dont la Commission a besoin pour faire face à ses engagements envers les Associations (25 % du support général) pris en 1977. La fraction de cette somme engagée pour les trois premières années du programme 1976-1980, qui ne sont pas couvertes par le nouveau programme quinquennal 1979-1983, est d'environ 10 MUC ($\frac{3}{5}$ de 17.5 MUC). En conclusion les engagements de la Commission pour les trois années 1976, 1977 et 1978 s'élèvent à 84 MUC environ (= 10 MUC + $\frac{3}{5}$ de la dotation totale de 124 MUC). La somme de 40 MUC (= 124 - 84 MUC) restant du programme 1976-80 est donc disponible pour financer en partie le programme 1979-83.

IV.2 PROPOSITION DE PROGRAMME POUR 1979-1983

IV.2.1 Effectifs

Le nombre total de chercheurs affectés au programme Fusion, y compris le personnel détaché au JET et les agents d'Euratom travaillant dans les Associations et au CCR, était d'environ 860 vers le milieu de l'année 1978. La répartition approximative de ces effectifs s'établit ainsi :

- chercheurs qualifiés travaillant dans les Associations des Etats membres (y compris 60 agents Euratom)	700
- tâches de caractère général (direction, administration, services techniques, etc..) (y compris 9 agents Euratom)	75
- Equipe JET	48
- Associations Euratom-NSBESD (Suède)	25
- C.C.R. (Ispra)	12
Total :	860

L'effectif total (comprenant le personnel non qualifié) est plus difficile à évaluer car dans quelques Associations, certains services sont utilisés en commun avec d'autres laboratoires qui ne sont pas concernés par la fusion. Une estimation approximative conduit à un total minimal de 3.000 personnes. En ce qui concerne la composition de l'effectif d'origine universitaire, deux remarques s'imposent :

- comme les dispositifs expérimentaux croissent progressivement en taille et en complexité, une insuffisance d'ingénieurs et de techniciens spécialisés se fait sentir pour le projet et la construction de ces dispositifs, alors que le nombre de physiciens pour la conception, l'exploitation, et l'interprétation des résultats de ces machines est suffisant ;
- comme le recrutement de jeunes chercheurs a été pratiquement nul ces dernières années, l'âge moyen des effectifs augmente à un taux proche d'un an par an. Pour un programme qui doit encore se poursuivre pendant quelques décades, ce vieillissement des effectifs est un phénomène dangereux.

Pour l'exécution de la partie du programme de technologie qui aura lieu en dehors des laboratoires associés, l'intention est de procéder à un certain nombre de sous-contrats entre les laboratoires associés et d'autres laboratoires extérieurs au programme fusion, qui en général exercent leur activité dans le domaine de la fission. De ce fait, un recrutement intensif d'experts technologues dans les laboratoires fusion ne semble pas nécessaire dans l'immédiat, bien que les Associations doivent recruter un petit nombre de spécialistes pour superviser les sous-contrats mentionnés.

Les Associations ne prévoient aucun accroissement appréciable de leurs effectifs durant la période 1979-83. Le nombre total d'agents affectés au programme fusion est appelé à augmenter légèrement en raison surtout du renforcement de l'équipe JET et aussi de l'extension éventuelle des activités fusion au C.C.R.

Malgré l'expansion proposée, la Commission ne demande pas d'augmentation de son personnel pour la mise en oeuvre de ce programme quinquennal. Les effectifs resteront de 113 agents communautaires ainsi que l'a décidé le Conseil du 25 mars 1976. La part de ces effectifs travaillant à Bruxelles à la direction du programme fusion a été récemment portée à 20 personnes et devrait rester à ce niveau pendant l'exécution du programme proposé. Le reste du personnel Euratom demeurera dans les laboratoires associés ou sera détaché au JET.

IV.2.2 Dépenses totales des laboratoires associés

Le programme proposé ici résulte d'un compromis entre la tendance à augmenter l'activité dans ce domaine comme le justifierait l'importance du but final pour la Communauté et la conscience que l'effort financier qui peut être demandé est limité.

Un front de recherche plus large comme celui du programme fusion de l'Union Soviétique, ou un programme plus ambitieux et plus accéléré comme le programme américain, serait désirable mais demanderait un effort financier bien plus important. En ce sens, la limite supérieure des dépenses envisagées pour la recherche dans ce domaine se situe bien au-delà des chiffres proposés. La limite inférieure au contraire est bien définie puisqu'elle est strictement liée aux effectifs des laboratoires associés. Si l'on ne faisait aucun investissement nouveau, les progrès de la recherche s'arrêteraient très rapidement mais le niveau des dépenses ne serait pas substantiellement réduit à moins de réduire les effectifs.

Le volume global des crédits analysés ci-après correspond au programme décrit au Chapitre III et résumé au § III.6 sous la rubrique : Poursuite des activités actuelles, extension, nouvelles activités. La partie du programme qui doit être exécutée au C C R , en Suède et éventuellement en Suisse n'a pas été prise en considération.

1) Poursuite des activités actuelles

La somme des crédits inscrits dans les propositions de budgets des laboratoires associés pour l'année 1978 (exprimées en monnaies nationales, puis converties en UCE aux taux du 1er janvier 1978) atteint environ 104 MUCE. Ce chiffre, multiplié par cinq, conduirait à un total de 520 MUCE pour le programme 1979-1983, aux prix de janvier 1978.

Le taux d'inflation dans la Communauté est actuellement d'environ 7,5 % par an (ou plus précisément, il était de 7,5 % entre avril 77 et avril 78). On aboutit de la sorte à un budget quinquennal d'environ 560 MUCE aux prix de janvier 1979. En outre, à effectifs fixes, les dépenses de personnel devraient, comme l'a montré l'expérience passée, augmenter d'au moins 6 % par an dans la Communauté. Cette augmentation inévitable intervient pour environ 40 % dans le budget total de la fusion et aboutit à des besoins supplémentaires se chiffrant à 28 MUCE pour les années 1980 à 1983. Pour poursuivre les travaux au niveau actuel, il faut donc disposer d'un budget quinquennal de 588 MUCE. Cette somme tient compte de l'extrapolation des investissements réalisés en 1978, investissements qui ont été modérés, puisque la plupart de ceux-ci avaient été engagés au début du programme 1976-1980. Cette extrapolation permet de procéder à de nouveaux investissements d'une ampleur limitée, correspondant à la poursuite des activités actuelles, mais interdit le lancement de toute nouvelle action d'envergure.

-	Volume des crédits (aux prix de janvier 78)	520 MUCE
-	Inflation janvier 78 - janvier 79 (7,5 %)	40 MUCE
-	Augmentation des dépenses de personnel (à effectifs constants)	<u>28 MUCE</u>
	<u>Poursuite au niveau actuel</u>	<u>588 MUCE</u>

2) Extension des activités actuelles. Le programme résumé au § III.6.2 implique les engagements financiers suivants :

-	Investissements pour de nouveaux Tokamaks : Torus II et VHFT. Le coût de chacune de ces machines sera de l'ordre de 20 à 30 MUCE	50 MUCE
-	Chauffage complémentaire (JET exclu)	23 MUCE
-	Confinement inertiel	10 MUCE
-	Technologie de la fusion : . études de systèmes et d'impact sur l'environnement, groupes de planification et de définition : 5 MUCE . supraconductivité (principalement bobi- ne A 15 pour LCP) : 15 MUCE	} 20 MUCE
	<u>Total :</u>	<u>103 MUCE</u>

3) Nouvelles activités (voir § III.6.3)

- Technologie du tritium	15 MUCE
- Matériaux	<u>30 MUCE</u>
<u>Total :</u>	<u>45 MUCE</u>

Il convient de bien préciser que ces chiffres correspondent au programme décrit au Chapitre III, excepté en ce qui concerne les matériaux. Dans ce dernier cas, la mise en oeuvre du programme défini par les experts et esquissé au § III.4.6 demanderait un engagement financier beaucoup plus important. Avec les fonds indiqués ci-dessus, la mise en route du programme est possible, mais son rythme de développement sera sérieusement limité.

En conclusion, les dépenses globales des laboratoires associés (y compris les sous-contrats de technologie) pour la période quinquennale 1979-1983 sont évalués comme suit :

Poursuite des activités actuelles	588 MUCE
Extension des activités actuelles	103 MUCE
Nouvelles activités	<u>45 MUCE</u>
<u>Total général :</u>	<u>736 MUCE</u>

IV.2.3 Support préférentiel

Sur la base des descriptions techniques figurant au Chapitre III et dans le cadre des dépenses globales proposées au § IV.2.2, les investissements nécessaires pour la mise en oeuvre du programme 1979-83 sont évalués à 120 MUCE, aux prix du début de l'année 1979.

Les plafonds partiels envisagés pour les investissements des laboratoires associés dans les différentes lignes, qui devraient être financées par la Commission au taux préférentiel de 45 % sont les suivants :

	MUCE
Tokamaks et soutien au JET	64
Autres machines toroïdales	15
Chauffage et Injection	35
Technologie de la fusion	30
Confinement inertiel	6

Dans la première ligne, quelque 10 MUCE ont été inclus pour des travaux destinés à JET (par ex. développement de diagnostics, méthodes de chauffage, contrats d'études etc..) qui doivent être faits dans les laboratoires associés. Dans la même ligne, une réserve (50 MUCE) a été prévue pour la construction éventuelle de Torus II et VHFT.

Il faut souligner que la somme des plafonds partiels (150 MUCE) est supérieure au plafond total proposé pour les actions prioritaires (120 MUCE). Ceci signifie que les plafonds partiels ne peuvent pas être atteints dans toutes les lignes simultanément.

Comme au cours du programme quinquennal précédent, le support préférentiel ne sera attribué par la Commission qu'aux seules actions qui auront reçu du Groupe de Liaison le statut prioritaire.

IV.2.4 Mobilité

Le "Contrat de Mobilité" pour l'échange de personnel entre les divers laboratoires engagés dans, ou contribuant à, la réalisation du programme a été utilisé de façon très large durant les deux derniers programmes quinquennaux à la satisfaction générale. Cet échange s'est révélé être la meilleure méthode pour transférer les acquis scientifiques et techniques et un excellent moyen pour améliorer l'utilisation du personnel et des compétences disponibles. Les fonds attribués aux contrats de mobilité du personnel doivent donc être au moins maintenus constants. Une somme maximale de 2 MUC avait été prévue à cet effet dans le programme 1976-80 et le même plafond (2 MUCE) est proposé pour le programme 1979-83.

IV.2.5 Gestion et administration

Les effectifs de la direction fusion à Bruxelles ont été sensiblement augmentés au cours des deux dernières années conformément aux propositions du plan 1976-80 et ont atteint un total de 20 personnes qui devrait être maintenu pendant le programme 79-83. L'effectif moyen pendant cette période sera donc plus élevé que pendant la période 76-80. Une forte augmentation du coût de ce personnel a été introduite par l'inclusion des taxes communautaires sur les salaires dans les tarifs forfaitaires supportés par le budget de la Communauté européenne, et du fait du passage de l'UC à l'UCE.

L'expansion du programme fusion, en particulier avec l'inclusion de nouvelles activités technologiques, entraîne une augmentation des dépenses d'organisation de réunions, séminaires etc... et des contrats d'experts.

Une augmentation importante des dépenses de gestion et d'administration, essentiellement due au coût du personnel, est donc requise dans le programme 79-83. La dotation de la Commission doit donc inclure un plafond d'environ 7 MUCE à ce chapitre.

IV.2.6 JET

Situation actuelle

Selon la décision du Conseil (R/2404/77 - ATO 116), le coût du projet JET dans la phase de construction (se terminant au milieu de 1983) a été calculé en francs belges et fixé à 7500 millions de francs belges aux prix de janvier 1977. Cette somme représente 184,6 MUCE au taux de 1'UCE du 3 janvier 1977 (1 UCE = 40,6207 FB).

Conformément aux Statuts de l'Entreprise Commune JET adoptés par le Conseil le 30 mai 1978 (1), les dépenses de l'Entreprise Commune seront supportées au taux de 80 % par Euratom.

La fraction du coût total du projet dans sa phase de construction qui doit être couverte par Euratom est donc de 147,7 MUCE (80 % de 184,6 MUCE).

Les fonds nécessaires à la participation d'Euratom aux dépenses du projet dans les années 1976 à 1978 s'élèvent à 16 MUCE (80 % de 20 MUCE). Ces fonds ont été prélevés sur la dotation de 102,4 MUCE attribuée par la décision du Conseil du 30 mai 1978 (2). La Commission propose d'abroger cette décision à partir du 1er janvier 1979, date à laquelle le nouveau programme 1979-83 devrait entrer en vigueur.

Les fonds nécessaires à la participation d'Euratom aux dépenses du projet pour la période allant du début 1979 à la moitié 1983 sont évalués à 131,7 MUCE (= 147,7 MUCE - 16 MUCE). Cette somme doit donc être incluse dans la dotation de la Commission pour le programme fusion 1979/83.

JET entrera en fonction au cours de la seconde moitié de 1983. On a estimé que le budget moyen annuel ne devrait pas changer sensiblement

(1) J.O. N° L 151 du 7 juin 1978, p. 11

(2) J.O. N° L 151 du 7 juin 1978, p. 8

en passant de la phase de construction à la phase d'opération. Sur cette base, il faudra environ 18 MUCE au JET pour le deuxième semestre 1983. Les fonds correspondant à la participation de l'Euratom s'élèveront à 14,5 MUCE (80 % de 18 MUCE). Ces fonds ne sont pas inclus dans la dotation de la Commission demandée dans le présent document.

Par la décision du 30 mai 1978 (1), le Conseil a attribué au programme fusion 1976/80, pour la mise en oeuvre du projet JET, 150 postes d'agents temporaires au sens de l'article 2(a) du Régime Applicable aux Autres Agents des Communautés Européennes. Cette attribution devrait être confirmée dans la décision du Conseil concernant le programme fusion 1979/83 et éventuellement révisée à l'occasion de la révision qui doit être entreprise en 1981.

Evolution possible

La Commission a déjà souligné que, pour permettre la réalisation des performances élargies de la machine, il serait probablement nécessaire d'engager une partie des dépenses correspondantes au cours de la seconde moitié de la phase de construction (2). Les fonds correspondants s'élevaient à quelques 50 MUCE et la Commission avait l'intention de soumettre au Conseil une demande portant sur 80 % de cette somme à l'occasion de la révision prévue en 1981. Du fait des progrès scientifiques récents, une accélération de la construction du JET et un engagement anticipé des performances élargies sembleraient souhaitables (III.3.2.1). S'il apparaissait que cela soit réalisable, l'engagement supplémentaire selon une évaluation préliminaire de l'équipe JET, pourrait s'établir aux environs de 62 MUCE (aux coûts de juillet 78, y compris les "contingences" et le personnel supplémentaire) dont une partie devrait être engagée dès 1980. Les principaux éléments en sont les générateurs permettant de porter le champ magnétique à 35 kGauss, la puissance de chauffage supplémentaire requise pour atteindre 25 MW en tout et la manipulation à distance ainsi que l'équipement "Tritium" pour un fonctionnement en D-T.

Cette question doit être examinée par les organes de l'Entreprise commune JET. La Commission informera le Conseil en temps utile et si nécessaire, soumettra la proposition correspondante.

(1) J.O. N° L151 du 7.6.1978, p. 8

(2) R/820/78 (ATO 17).

IV.2.7 Dotation de la Commission 1979-83

1) Programme des Associations

Le décompte de la dotation requise par la Commission pour le programme 1979-1983 sans JET est, aux conditions économiques de janvier 1979, le suivant :

	Volume global	%	Participation Commission
Support général	616	25	154 MUCE
Support préférentiel	120	45	54 MUCE
Mobilité du personnel	2	100	2 MUCE
Gestion & Administration	<u>7</u>	100	<u>7 MUCE</u>
Total	745 MUCE		217 MUCE =====

D'un point de vue budgétaire, la nouvelle dotation requise pour le financement du programme 1979-83 des Associations est estimée à 177 MUCE (217 - 40 MUCE), en tenant compte des 40 MUCE du programme 1976-80 encore disponibles.

Une réduction de cette dotation entraînerait de nouvelles difficultés dans la gestion du programme. Comme il avait été convenu au CCF, il faudrait éviter que la dotation de la Commission ne soit pas suffisante pour couvrir aux taux de 25 % et 45 % les dépenses encourues par les Associations.

2) JET

Les sommes nécessaires à la participation d'Euratom aux dépenses de la phase de construction de JET pour la période 1979-83 s'élèvent à 131,7 MUCE aux conditions économiques de janvier 77. Cette somme n'inclut pas :

- les sommes nécessaires à la participation d'Euratom aux dépenses, pendant la phase d'opération du projet en 1983; elles sont estimées à 18 MUCE, ou plus si la phase d'opération devait démarrer avant la mi-83.
- Les sommes nécessaires à la participation d'Euratom aux dépenses consécutives à une éventuelle accélération du projet visant à anticiper l'accès aux performances élargies (voir § VI.2.6).

3) Dotation globale

La nouvelle dotation demandée s'établit donc comme suit :

MUCE		
Pour la participation aux programmes des Associations	217	aux conditions économiques de janvier 1979
Pour la participation à JET	131.7	aux conditions économiques de janvier 1977
Total	348.7 MUCE	

Il faut rappeler que la dotation pour la participation au JET a déjà été acceptée par le Conseil.

IV.3 ORGANISATION

L'organisation du programme fusion de la Communauté est basée sur les contrats bilatéraux d'association entre Euratom et les Institutions qui dans les Etats membres et en Suède travaillent sur la fusion. Chaque Association a un Comité de Gestion, constitué d'un petit nombre de représentants de la Commission et de l'Institution associée. Un tel Comité se réunit deux à trois fois l'an et est responsable notamment des programmes et des budgets de l'Association.

Pour l'ensemble du programme fusion de la Communauté, trois Comités jouent un rôle consultatif et de coordination à des niveaux différents :

- 1) Le Groupe de Liaison, composé de personnalités scientifiques éminentes des organismes associés et de la Commission, a la responsabilité de donner des avis scientifiques et techniques à la Commission et aux Associations sur les nouveaux programmes, et de conseiller la Commission sur l'attribution du support préférentiel au niveau de 45 %.

Conformément à la décision du Conseil du 25 mars 1976 (1), ce support préférentiel ne peut être accordé par la Commission qu'aux

(1) J.O. N° L90 du 3.4.1976, p. 13.

opérations qui ont reçu du Groupe de Liaison le statut prioritaire. De plus, le Groupe de Liaison joue le rôle de "Comité Consultatif en Matière de Gestion des Programmes" pour la partie fusion du programme du CCR (1). Le Groupe de Liaison se réunit environ trois fois par an. Il est assisté par six Groupes Consultatifs, un pour chacune des lignes principales du programme - Tokamaks, Screw pinches et Stellarators à bêta élevé, Stellarators à faible bêta, Chauffage et Injection, Très Hautes Densités et Technologie. Les Groupes Consultatifs sont composés de spécialistes de toutes les Associations et se réunissent environ quatre fois par an.

- 2) Le Comité des Directeurs (CoD), composé des Directeurs des laboratoires associés, du Directeur de JET et du Directeur du programme fusion à la Commission, est chargé de préparer les décisions qui concernent les programmes, les conditions d'intervention de la Commission, la mobilité et l'échange de personnel, et il traite de divers problèmes relatifs à la collaboration dans et hors des Associations, et hors de la Communauté. En outre, ce Comité peut être chargé de jouer le rôle de comité technique pour le CCF ; il se réunit en général tous les deux mois.

En cas de nécessité, des groupes ad hoc et des Comités de Coordination sont mis sur pied par le CoD dans des domaines spécialisés (acquisition des données, calculs numériques, etc...). Pour la préparation de la nouvelle partie du programme technologie, quatre groupes d'experts ont été mis sur pied en janvier 1978 par le CoD : "Développement de matériaux pour la fusion", "Développement des aimants", "Technologie du tritium et des couches fertiles" et "Sécurité et études de systèmes". Les propositions de programme élaborées par ces groupes dans leur domaine de compétence propre ont été soumises pour avis au Groupe Consultatif pour la Technologie de la Fusion et au GdL.

- 3) Le Comité Consultatif Fusion (CCF) créé par décision de la Commission du 26 mars 1976 et composé de hauts fonctionnaires des Etats membres et de la Suède au niveau des responsables des recherches

(1) J.O. N° C192 du 11.8.1977, p. 1.

nucléaires et énergétiques, est chargé de conseiller la Commission (ses opinions sont aussi transmises au Conseil) sur les problèmes concernant :

- la mise en oeuvre et le développement du programme, y compris le projet JET ;
- les changements de direction qui peuvent s'avérer nécessaires ;
- la préparation des programmes futurs ;
- la détermination du volume total des activités de recherche fusion dans le cadre européen ;
- la concentration et l'intégration croissantes du travail poursuivi dans les Etats membres

En ce qui concerne le projet JET, sa structure de gestion est définie dans les statuts de l'Entreprise Commune JET. Elle comporte essentiellement le Conseil JET, le Comité Exécutif JET et le Directeur du projet.

L'organisation du programme fusion de la Communauté a évolué continûment dans le passé en fonction des besoins du programme. Deux améliorations pourraient être introduites prochainement :

- une réduction éventuelle du nombre des groupes Consultatifs et une redéfinition de leur domaine de compétence, en tenant compte de l'évolution du programme, pourraient être décidées par le Groupe de Liaison après l'adoption par le Conseil du programme 1979-83 ;
- pour la coordination et la mise en oeuvre du programme technologique, un sous-comité du CoD devrait être créé. En fonction des besoins, cet organe pourrait recourir à l'avis de groupes d'experts semblables à ceux qui ont été mis sur pied pour la préparation de la nouvelle partie du programme technologique.

B) PROPOSITION DE
DECISION DU CONSEIL

du

arrêtant un programme de recherche et d'enseignement (1979/1983)
pour la Communauté européenne de l'énergie atomique
dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée

LE CONSEIL DES COMMUNAUTES EUROPEENNES,

vu le traité instituant la Communauté européenne de l'énergie atomique, et
notamment son article 7,

vu la proposition de la Commission, présentée après consultation du Comité
scientifique et technique,

vu l'avis du Parlement européen (1),

vu l'avis du Comité économique et social (2),

considérant que le Conseil a arrêté, par la décision 76/345/Euratom (3),
modifiée par la décision 78/470.Euratom (4), un programme de
recherche et d'enseignement (1976/1980) dans le domaine de la fusion et de
la physique des plasmas et que cette décision prévoit en son article 3 que
la Commission soumettra au Conseil, en 1978, une proposition de révision
tendant à substituer au programme 1976-1980 un nouveau programme quinquennal
à compter du 1er janvier 1979 ;

considérant que, en raison de l'ampleur de l'effort qui est nécessaire pour
atteindre le stade des applications de la fusion thermonucléaire contrôlée
dont la Communauté pourrait tirer bénéfice, notamment dans le contexte plus
général de la sécurité de son approvisionnement à long terme en énergie, il
convient de poursuivre en commun, dans les différentes phases de leur
développement, les travaux entrepris jusqu'ici dans ce domaine;

considérant que les progrès scientifiques obtenus dans ce domaine durant
les dernières années dans la Communauté ainsi que sur le plan mondial
révèlent la nécessité de construire, en particulier pour les dispositifs de
type Tokamak, des appareils plus grands et plus complexes et de consacrer
un effort particulier au développement des techniques de chauffage des
plasmas et à l'étude de certains problèmes technologiques avec la collaboration
du CCR ;

(1) J.O. N°

(2) J.O. N°

(3) J.O. N° L 90 du 3.4.1976, p. 12

(4) J.O. N° L 151 du 7.6.1978, p. 8.

considérant qu'il est nécessaire de doter la Communauté d'une grande machine de type Tokamak (JET : Joint European Torus) ;

considérant que les recherches proposées par la Commission constituent un moyen adéquat pour poursuivre l'action et que, dès lors, il est de l'intérêt commun d'adopter un programme pluriannuel dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée dont l'existence est, par ailleurs, une condition pour la participation de la Communauté au renforcement de la collaboration à l'échelle mondiale dans ce domaine ;

considérant qu'il importe que la Communauté continue à encourager, d'une part, la réalisation de certains équipements ayant trait à des actions considérées comme prioritaires grâce à l'octroi d'un taux préférentiel de participation aux dépenses afférentes à ces équipements et, d'autre part, la réalisation de grands projets menés en commun par tous les laboratoires associés ou certains d'entre eux;

considérant en outre qu'il convient de favoriser la mobilité du personnel entre les organismes qui collaborent à l'exécution du programme.

DECIDE :

Article premier

Un programme de recherche et d'enseignement dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée, tel qu'il est défini en annexe, est arrêté pour une période de cinq ans à compter du 1er janvier 1979.

Article 2

Les besoins globaux pour la durée totale du programme sans JET sont estimés à 217 millions d'unités de compte européennes et à un effectif de 113 agents.

Les besoins globaux pour la phase de construction du projet JET pendant la durée du programme sont estimés à 131,7 millions d'unités de compte européennes et à un effectif de 150 agents temporaires au sens de l'article 2 sous a) du régime applicable aux autres agents des Communautés européennes.

Ces éléments chiffrés n'ont qu'une valeur indicative.

L'unité de compte européenne est définie à l'article 10 du règlement financier du 21 décembre 1977 applicable au budget général des Communautés européennes (5).

Article 3

La Commission soumettra au Conseil en 1981, une proposition de révision tendant à substituer au présent programme un nouveau programme quinquennal à compter du 1er janvier 1982.

Article 4

Les décisions 76/345/Euratom et 78/470 Euratom sont abrogées. La présente décision entre en vigueur le 1er janvier 1979.

Fait à Bruxelles, le

Par le Conseil

Le président

(5) J.O. n° L 356 du 31.12.1977, p. 1

A N N E X E

FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

1. Le programme qui sera développé aura pour objet :

- a) la physique des plasmas ayant trait au domaine considéré, notamment les études de caractère fondamental intéressant le confinement à l'aide de dispositifs adaptés et les méthodes de production et de chauffage des plasmas,
- b) l'étude du confinement en configurations fermées de plasmas de densité et de température variables dans de larges intervalles atteignant si possible les conditions d'ignition,
- c) la production et l'étude de plasmas de haute et très haute densité, et notamment l'étude de la fusion laser,
- d) le développement et l'application aux dispositifs de confinement de méthodes de chauffage du plasma de puissance adéquate,
- e) l'amélioration des méthodes de diagnostic,
- f) l'étude des problèmes technologiques connexes aux recherches en cours, ainsi que de ceux relatifs à l'utilisation des réactions thermonucléaires,
- g) la réalisation du projet JET.

Les travaux visés sous a), b), c), d), e) et f) seront exécutés par voie de contrats d'association ou de contrats de durée limitée en vue de l'obtention des résultats nécessaires à la mise en oeuvre du programme et en tenant compte des travaux effectués par le CCR notamment dans le domaine de la technologie visé sous f),

La réalisation du projet JET visée sous g) a été confiée à l'Entreprise commune "Joint European Torus (JET), Joint Undertaking", constituée par la décision 78/471/Euratom. (6)

(6) J.O. N° L 151 du 7.6.1978, p. 10.

2. Le programme défini au point 1 constitue un élément de collaboration à long terme couvrant la totalité des activités entreprises dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée dans les Etats membres. Il tend à aboutir, en temps voulu, à la réalisation en commun de prototypes en vue de leur industrialisation et de leur commercialisation.
3. Les besoins globaux pour la durée du programme sans JET sont estimés à 217 millions d'unités de compte européennes et à un effectif de 113 agents. Le montant indiqué est destiné à couvrir :
 - les dépenses relatives aux équipements ayant trait aux actions qui sont considérées comme prioritaires ainsi que certaines dépenses relatives au support à JET,
 - les frais de mobilité du personnel,
 - les autres dépenses relatives aux actions à mener dans le cadre du programme sans JET.
4. La dotation attribuée au programme sans JET peut se répartir de la façon suivante :
 - a) environ 25 % pour le financement de projets avec un taux préférentiel, comme défini au § 5.
 - b) Environ 4 % consacrés aux frais de gestion ainsi qu'aux dépenses destinées à assurer la mobilité du personnel en vue de lui permettre de travailler au sein des organismes qui collaborent à la réalisation du programme ;
 - c) le montant qui n'aura pas été affecté aux actions et dépenses visées sous a) et b) sera affecté à la participation financière de la Communauté aux autres dépenses des associations. Cette participation sera uniforme à un taux d'environ 25 %.

5. Après examen technique, le Groupe de Liaison peut accorder le statut d'action prioritaire à des projets appartenant à l'un des domaines suivants :

- Tokamak et support à JET
- Autres machines toroïdales
- Chauffage et Injection
- Technologie de la fusion
- Confinement inertiel

La Commission peut financer ces projets au taux préférentiel et uniforme de 45 % environ. En contre-partie, tous les associés pourront participer aux expériences effectuées à l'aide de ces équipements.

6. Les besoins globaux pour la phase de construction du projet JET pendant la durée du programme sont estimés à 131,7 millions d'unités de compte européennes et à un effectif de 150 agents temporaires. Le montant indiqué est destiné au financement de la phase de construction du projet JET avec un taux de participation de 80 %.

C) AVIS DU COMITE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE (CST) SUR LE PROJET DE PROPOSITION
DE PROGRAMME QUINQUENNAL 1979-83 RELATIF A LA FUSION THERMONUCLEAIRE CONTROLEE

- Le CST lors de la réunion du 16 octobre 1978 a examiné la proposition de programme quinquennal 1979-83 présentée par la Commission.
- Le Comité a noté avec satisfaction les progrès récemment enregistrés dans le domaine du confinement magnétique. Ces progrès accroissent la confiance que l'on avait de voir JET atteindre les objectifs prévus et laissent présager que la "faisabilité scientifique" (1) de la fusion devrait être démontrée dans la ligne Tokamak au milieu des années 80 ; ils justifient un accroissement de l'effort consacré à la fusion. En conséquence, le Comité considère que le programme général (2) proposé est justifié.
- Le Comité constate que, conformément à son avis antérieur, la Commission réalise progressivement une concentration notable de ses moyens sur deux objectifs bien définis : le Tokamak, et le Chauffage. En ce qui concerne les lignes alternatives dans le cadre du Confinement Magnétique, le CST recommande de tendre vers la concentration des efforts sur une seule ligne qui serait poursuivie avec des moyens significatifs. La dispersion des efforts devrait être évitée grâce à une collaboration internationale accrue.
- Le CST rappelle que, dans son avis antérieur, il avait demandé qu'une attention particulière soit portée, lors de la révision du programme, à la fusion par confinement inertiel et aux problèmes technologiques. En conséquence :
 - . Le CST souhaite que les problèmes de principe relatifs au confinement inertiel puissent être éclaircis dans les meilleurs délais afin de permettre l'adoption d'une position à ce sujet. Entretemps, l'exécution du programme minimum proposé semble opportune.

(1) Faisabilité scientifique : conditions dans lesquelles l'énergie produite par fusion dépasse l'énergie dépensée pour chauffer le plasma.

(2) Programme général : programme proposé par la Commission, réalisation et exploitation de JET exclues.

. Le Comité conscient de l'important effort technologique nécessaire pour la préparation de la phase post-JET, considère d'une manière positive les actions proposées par la Commission dans le domaine de la technologie, mais demande qu'elles soient engagées avec prudence. Il recommande que soient amplifiées les études de systèmes, qui devraient servir de guide dans l'élaboration du programme technologique.

- Le Comité insiste sur le fait que JET fait partie intégrante du programme Fusion. Il souligne, comme l'a fait la Commission dans sa proposition de programme, l'obligation pour les Associations de contribuer efficacement au succès du JET. Il a été informé que, suite aux récents progrès, des actions sont envisagées pour accélérer la construction de JET et la préparation de sa phase d'exploitation. Les moyens financiers nécessaires n'ont pas encore été précisément chiffrés et ne sont pas pris en compte dans la proposition de la Commission. Une partie de ces fonds pourrait être requise dès 1981.

- Le CST réaffirme les avantages du concept de plan glissant : capacité de réévaluation périodique des objectifs et des moyens, assurance de continuité dans la gestion du programme, et possibilité de tenir compte d'éventuelles variations des conditions économiques.

A V I S

du Comité Consultatif Fusion

sur le projet de Proposition de Programme quinquennal 1979-1983

sur la Fusion Thermonucléaire Contrôlée

adopté lors de sa séance du 25 octobre 1978

=====

- Le CCF a examiné le projet de proposition de programme quinquennal 1979-83 présenté par la Commission.
- Le Comité tient à souligner l'importance et la nécessité du concept de programme glissant.
- Le Comité est de l'avis unanime qu'une décision du Conseil sur le programme est requise rapidement (au plus tard à la mi-79). Le document présenté par la Commission constitue une bonne base pour la partie générale du programme quinquennal⁺.
- Le CCF est conscient du fait que, suite à des progrès scientifiques récents, une proposition visant à l'accélération de la construction de JET et à l'obtention anticipée des performances élargies est en cours d'élaboration. Il recommande à la Commission d'introduire dans sa proposition de programme tous les éléments d'information disponibles sur ce sujet, ainsi qu'une évaluation des sommes supplémentaires qui seront requises.

+ - le programme proposé par la Commission à l'exclusion de la réalisation et de l'exploitation de JET.

D) FICHE FINANCIEREI) PROGRAMME FUSION SANS JET

1. LIGNE BUDGETAIRE CONCERNEE : 3351
2. INTITULE DE LA LIGNE BUDGETAIRE : Fusion thermonucléaire contrôlée y compris le projet JET. Cette partie de la fiche ne concerne que le programme fusion sans JET.
3. BASE JURIDIQUE : Art. 7 Traité CEEA
Décision du Conseil 76/345 Euratom (1) et décision prévue avant avril 1979.

4. DESCRIPTION, OBJECTIF(S) ET JUSTIFICATION DE L'ACTION :

4.1 Description

L'action vise à poursuivre le programme de recherches dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée et couvre la totalité des activités dans les pays membres dans ce domaine. La Suède et la Suisse sont associées à ce programme. Il porte notamment sur l'étude du confinement magnétique et inertiel du plasma ainsi que de la technologie de la fusion.

4.2 Objectif

- a) Les objectifs à court terme du programme sont de :
- réunir assez de connaissances, aussi bien en physique qu'en technologie, pour être en mesure de définir la(les) machine(s) post-JET au cours du plan quinquennal de sorte que sa(leur) construction puisse démarrer pendant le plan suivant. En particulier, les recherches devraient conduire à la détermination des champs et dimensions optimaux pour une machine post-JET, permettre de décider si une telle machine devrait produire de l'électricité et du tritium, et fournir des informations expérimentales permettant de choisir entre des bobinages supraconducteurs ou normaux;

(1) J.O. L 90 du 3.4.1976

- évaluer jusqu'à quel point d'autres systèmes de confinement magnétique (Stellarators, pinches à champ inversé) peuvent être considérés comme de réelles alternatives aux Tokamaks;
 - exécuter un programme minimal portant sur le confinement inertiel.
- b) Le but final de ce programme est d'établir la possibilité de produire de l'énergie à des prix compétitifs à partir de réactions de fusion nucléaire entre noyaux atomiques légers et, si c'est le cas, de procéder en commun à la construction de prototypes en vue de leur industrialisation et leur commercialisation.

4.3 Justification

Le problème que constitue la disponibilité à long terme des sources d'énergie à l'échelle mondiale est loin d'être résolu. La fusion thermonucléaire est l'une des très rares sources qui pourraient résoudre ce problème ou du moins contribuer substantiellement à sa solution et ceci d'une façon particulièrement profitable pour l'Europe.

Les principales motivations pour mener les recherches dans ce domaine dans un cadre communautaire sont :

- l'importance des ressources humaines et financière requises, qui donne à penser qu'un tel développement ne peut guère être mené à bien à l'échelle nationale;
- l'existence d'un besoin collectif commun à tous les États membres;
- la durée de l'effort à accomplir (qui peut se prolonger jusqu'à la fin du siècle) pour aboutir à la construction du réacteur;
- en cas de succès, l'ouverture d'un marché intérieur important pour le réacteur européen.

5. INCIDENCE FINANCIERE TOTALE DE L'ACTION PENDANT TOUTE LA DUREE ENVISAGEE (en UCE)

5.0 Sur les dépenses (période de 1979 à 1983)

5.0.0. Coût à la charge :

- du budget des Communautés	217.000.000 UCE (1)
- des administrations nationales et d'autres secteurs au niveau national	<u>528.000.000 UCE</u>
Coût total	745.000.000 UCE

-
- (1) Le montant de 217.000.000 UCE se décompose comme suit :
- | |
|---|
| 31.463.000 UCE déjà engagées sur les crédits du programme 1976/80 |
| 8.537.000 UCE solde des crédits d'engagement 1976/80 |
| <u>177.000.000 UCE besoins nouveaux du programme 1979/83</u> |
| 217.000.000 UCE |

5.1 Echancier pluriannuel

Afin de tenir compte du caractère glissant du programme fusion, l'échancier présenté ci-après porte sur la période de 1976 à 1983 couvrant le programme en cours (1976-1980) et le programme proposé (1979-1983). A cette période 1976-1983 correspond une dotation globale de 301 MUCE, soit 84 MUCE pour la période 1976-1978 plus 217 MUCE pour la période 1979-1983.

5.1.1 Crédits d'engagements (UC 1976-1977, UCE 1978-1983) (arrondis au mille)

Catégorie des dépenses	1976 (exécution définitive)	1977 (exécution provisoire)	1978 (budget 1978 + crédits subsistants de 1977)	1979	1980	1981	1982	1983	Total
Dépenses de personnel	3.240.000	3.782.000	6.157.000	6.127.000	6.561.000	6.955.000	7.372.000	7.815.000	48.009.000
Dépenses de fonctionnement administratif et technique	135.000	170.000	171.000	231.000	247.000	264.000	282.000	302.000	1.802.000
Dépenses par contrat	10.658.000	82.773.000	8.377.000	20.054.000	113.327.000	8.000.000	8.000.000	-	251.189.000
Total	14.033.000	86.725.000	14.705.000	26.412.000 (6.412.000 AP + 20.000.000 NP)	120.135.000 (2.125.000 AP + 118.010.000 NP)	15.219.000	15.654.000	8.117.000	301.000.000 ⁽¹⁾

(1) La totalité des engagements contractés 1976-1978 s'élève à 115.463.000 UCE dont 84.000.000 UCE pour des travaux exécutés en 1976-1978 et 31.463.000 UCE pour des travaux à exécuter en 1979 et ultérieurement.

La totalité des crédits d'engagements demandés pour 1979-1983 s'élève à 185.537.000 UCE, dont 8.537.000 UCE sont encore disponibles en crédits d'engagements du programme 1976-80; donc $185.537.000 - 8.537.000 = 177.000.000$ UCE crédits nouveaux. Au montant de 185.537.000, il y a lieu d'ajouter 31.463.000 UCE engagées avant 1979 pour des travaux à exécuter en 1979 et ultérieurement : $185.537.000 + 31.463.000 = 217.000.000$ UCE.

AP = Ancien programme 1976-80

NP = Nouveau programme 1979-83

5.1.2 Crédits de paiements (UC 1976-1977, UCE 1978-1983, arrondis au mille)

Catégorie des dépenses	1976 (exécution définitive)	1977 (y compris crédits de paiement reportés sur l'exer. 78)	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	Total
Dépenses de personnel	3.240.000	3.782.000	6.157.000	6.127.000	6.561.000	6.955.000	7.372.000	7.815.000	-	48.009.000
Dépenses de fonctionnement administratif et technique	135.000	170.000	171.000	231.000	247.000	264.000	282.000	302.000	-	1.802.000
Dépenses par contrat	17.908.000	16.787.000	19.525.000	30.454.000	33.000.000	36.000.000	40.000.000	44.000.000	13.515.000	251.189.000
Total	21.283.000	20.739.000	25.853.000	AP 26.812.000 NP 10.000.000 Tot. 36.812.000	AP 29.313.000 NP 10.495.000 Tot. 39.808.000	43.219.000	47.654.000	52.117.000	13.515.000	301.000.000 ⁽¹⁾

(1) Paiements 1976-1978 : 67.875.000 UCE

Paiements 1979-1984 : 233.125.000 UCE

Total 301.000.000 UCE

Le montant de 233.125.000 UCE pour la période 1979-1984 inclut un montant de 16.125.000 UCE pour des travaux exécutés antérieurement à cette période : 233.125.000

- 16.125.000
217.000.000

5.2 Mode de calcul

a) Dépenses de personnel

L'effectif proposé pour ce programme comprend les agents suivants :

Année	A	B	C	Total
1979	74	35	3	112
1980- 1983	75	35	3	113

Les calculs tiennent compte des paramètres tels qu'ils sont fixés pour l'établissement de l'avant-projet de budget de l'exercice 1979. Pour la période de 1980 à 1983 le coût du personnel a été majoré de 6 % par an.

b) Dépenses de fonctionnement administratif et technique

Elles couvrent les frais relatifs aux déplacements, missions, experts et organisations de réunions ainsi que l'utilisation d'un support administratif et technique.

c) Dépenses par contrat

Pour la période de 1979 à 1983, le coût de l'exécution du programme fusion aux laboratoires associés à la Communauté est estimé à 736 MUCE y compris le personnel de la Commission affecté auxdits laboratoires. La Communauté participerait au taux d'environ 25 % au financement de ces dépenses. Ce taux pourrait être porté à environ 45 % pour certaines actions considérées comme prioritaires par le Groupe de Liaison. La grande masse de ces dépenses devrait être engagée au début du nouveau programme 1979-1983.

Les dépenses afférentes à la mobilité du personnel autre que celui de la Commission sont évaluées à 2 MUCE pour la période 1979-1983.

5.3 Incidence sur les ressources

- Impôts communautaires sur les salaires des agents de la Commission.
- Contribution desdits agents au régime des pensions.

6. REGIME DE CONTROLE PREVU

- Contrôle scientifique : - Comités de Gestion, instaurés par les contrats d'association à conclure avec les laboratoires nationaux.
- Comité des Directeurs, instauré par les contrats d'association.
- Groupe de Liaison reconnu par le Conseil comme CCMGP (J.O. C 192 du 11/8/1977, page 1).
- Comité Consultatif de la Fusion, instauré par la Commission en vertu de l'article 135 du Traité Euratom.

Contrôle administratif
et financier

- : - Comités de Gestion
- Contrôle financier et Service Contrats de la DG XII de la Commission.
- Cour des Comptes.

7. FINANCEMENT DE L'ACTION

Crédits à inscrire dans les budgets futurs (1979-1984).

II) PROJET JET

1. LIGNE BUDGETAIRE CONCERNEE : 3351
2. INTITULE DE LA LIGNE BUDGETAIRE : Fusion thermonucléaire contrôlée y compris le projet JET. Cette partie de la fiche ne concerne que le projet JET.
3. BASE JURIDIQUE : Art. 7 Traité CEEA
 Décision du Conseil 78/470/Euratom du 30.5.1978
 (J.O. L 151 du 7.6.1978, page 8) et décision du
 Conseil prévue avant avril 1979.
4. DESCRIPTION, OBJECTIF(S) ET JUSTIFICATION DE L'ACTION :

4.1 Description

Construction, fonctionnement et exploitation comme part du programme fusion de la Communauté et au profit des participants à ce programme d'une grande machine torique du type tokamak et de ses installations annexes (Joint European Torus - JET) de façon à étendre la gamme des paramètres applicable aux expériences de fusion thermonucléaire contrôlée jusqu'à des conditions proches de celles requises dans un réacteur thermonucléaire.

4.2 Objectif

Réaliser et étudier un plasma de dimensions et dans des conditions proches de celles d'un réacteur thermonucléaire. Cet objectif implique quatre domaines d'activité principaux :

- (i) l'évolution du comportement du plasma lorsque les paramètres se rapprochent du domaine du réacteur,
- (ii) l'interaction plasma-parois dans ces conditions,
- (iii) l'étude du chauffage du plasma et
- (iv) l'étude de la production et du confinement des particules alpha, et du chauffage du plasma qui en résulte.

4.3 Justification

La réalisation du projet JET constitue une étape essentielle dans le développement du programme fusion de la Communauté. En ce qui concerne le but final de ce programme et sa justification, renvoi est fait à la partie A, § 4.3 de la fiche.

5. INCIDENCE FINANCIERE TOTALE DE L'ACTION PENDANT TOUTE LA DUREE ENVISAGEE (en UCE)

5.1 Sur les dépenses (période de 1976 à 1983)

5.1.1 Coût à la charge :

- du budget des Communautés (80 %)	147.700.000 UCE
- des administrations nationales et d'autres secteurs au niveau national (20 %)	<u>36.900.000 UCE</u>
Coût total	184.600.000 UCE

Il est rappelé que ce coût a été évalué aux prix constants de janvier 1977.

5.1.2 Echéancier pluriannuel

Années	1976/77/78	1979	1980	1981	1982	1983 1ère moitié	Total
Engagements (MUCE)	16	54,4	35,2	25,6	12,8	3,7	147,7 ⁽¹⁾
Paielements (MUCE)	9,6	32	38,4	32,8	23,2	11,7	147,7

5.2 Mode de calcul

Le coût du projet JET dans sa phase de construction a été évalué à 184,6 MUCE au prix de janvier 1977 et au taux de 1'UCE au 3 janvier 1977 (1 UCE = 40,6207 FB). Les crédits nécessaires pour couvrir la participation de 80 % de la Communauté au financement du projet s'élève à 147,7 MUCE.

(1) La somme des engagements 1979-1983 s'élève à 131,7 MUCE (= 147,7 - 16) et correspond à la dotation JET proposée pour le programme 1979-1983.

Le montant de 184,6 MUCE ne tient pas compte :

- a) de la variation des conditions économiques intervenue depuis janvier 1977. Il est rappelé à ce sujet que le projet JET consiste essentiellement en "hardware". L'Entreprise commune JET procède actuellement à une première mise à jour des estimations de coût du projet. La Commission en informera l'autorité budgétaire.
- b) du coût de l'exploitation de l'installation pendant l'année 1983.
- c) du coût des investissements nécessaires pour permettre à cette installation d'atteindre ses performances élargies. Les bons résultats obtenus récemment dans les installations Tokamak semblent justifier une certaine accélération du programme. Il est donc probable qu'une grande partie des dépenses relatives aux performances élargies devra être engagée déjà pendant la phase de construction. Il est entendu que ces dépenses complémentaires ne pourront être engagées que sur la base d'une nouvelle décision du Conseil portant sur ce programme. Les travaux préparatoires relatifs à l'établissement d'un tel programme ont déjà commencé.

5.3 Incidences sur les ressources

Impôts communautaires sur les salaires des agents temporaires.

6. FINANCEMENT DE L'ACTION

- crédits inscrits aux budgets des Communautés européennes 1976/77/78
- crédits à inscrire dans les budgets futurs.

7. REGIME DE CONTROLE

- a) Contrôle scientifique : - Conseil du JET
- Comité consultatif de la Fusion
- b) Contrôle administratif : - Conseil du JET
et financier : - Cour des Comptes.