

INT 136/87

DECEMBRE 1987

FUSION : CONTRIBUTION DU CRPP A L'ASSOCIATION  
SUISSE-EURATOM

Pierre J. Paris

**FUSION : CONTRIBUTION DU CRPP A L'ASSOCIATION  
SUISSE-EURATOM**

**Pierre J. Paris**

**CRPP octobre 1987**

Texte soumis à Polyrama, octobre 1987

## FUSION - CONTRIBUTION DU CRPP A L'ASSOCIATION SUISSE-EURATOM

### Un peu d'histoire... Prémisses d'une association...

L'association de la Suisse au programme européen de fusion avait été sérieusement envisagée en 1975, lorsqu'une délégation conduite par le chef de la Mission suisse à Bruxelles fut chargée d'étudier la participation de la Suisse aux travaux de l'Euratom. Cette délégation était composée de représentants des divers départements fédéraux concernés, ainsi qu'au nom de l'EPFL du Professeur E. Weibel, alors directeur du CRPP. Organe moteur de la recherche en physique et en technique du plasma en Suisse, le CRPP se trouvait être naturellement la clef de voûte d'un tel projet d'association.

### L'accord

C'est en 1978 que l'accord d'association fut conclu. L'année suivante il était ratifié par le parlement helvétique et entré en vigueur. Ainsi après la Suède, la Confédération Helvétique se trouvait être le deuxième pays, extérieur à la CEE (1), associé au programme européen de fusion.

Bien que depuis un accord cadre de coopération scientifique et technique soit intervenu entre la Communauté et l'AELE (Association Européenne de Libre Echange), dont la Suisse est membre, les activités concernant la fusion continuent à être régies par l'accord de 1978. Accord, grâce auquel la Suisse est considérée comme membre fondateur de JET (2) et membre ordinaire du programme Euratom.

Cette situation a été renforcée en 1982, par l'adjonction d'un amendement stipulant, parmi les clauses de non discrimination, que les Etats tiers associés sont parties, de droit comme les membres de la CEE, à tous les accords bilatéraux conclus par l'Euratom, envers des pays ou institutions tiers à la CEE.

Dans un autre souci d'équité, les compétences industrielles européennes sont mises à contribution dans la fabrication des appareillages de recherches, la

-----  
(1) Communauté Economique Européenne (Marché Commun)

(2) Joint European Torus

sélection des offres de service est effectuée sans discrimination, selon des critères très sévères. L'exemple type est la construction de l'Expérience Commune JET - installation actuellement la plus grande et la plus performante au monde - qui a été fortement basée sur le savoir-faire européen. En effet, 98% de l'appareillage a été fabriqué par les entreprises européennes. Les industries suisses ont participé à ce projet et bénéficié d'un excellent pourcentage des contrats attribués.

### Structure du programme européen

La structure consultative du fonctionnement du programme fusion présente un aspect "fédéraliste" et "parlementaire" (Fig. 1(a)). Si la Commission de Bruxelles est l'organe suprême responsable de l'application du programme, la stratégie et la supervision en incombe au Comité Consultatif du Programme de Fusion (CCPF). Celui-ci, composé de représentants et d'experts de tous les pays membres et associés, est assisté de deux sous-comités: le Comité de Programmes (CP) pour les questions relatives à la physique et à la technique du plasma et le Comité de Gestion de la Technologie de Fusion (CGTF) pour le NET (3) et la technologie. Quant à l'Entreprise Commune JET, les responsabilités incombent au Conseil de JET et au directeur du projet. Le Conseil de JET est assisté d'un Comité Exécutif et peut consulter le Conseil Scientifique - dont le président actuel est le Professeur F. Troyon -.

Les tâches sont réparties entre les Associations, en fonction de la stratégie et des impératifs de l'Euratom ainsi que des compétences des Associations elles-mêmes. JET est un cas particulier, programme phare de l'Euratom, on y exécute des recherches spécifiques à un projet de grande dimension, la priorité étant notamment la réalisation de performances dans le diagramme de Lawson (Fig. 2), c'est-à-dire la démonstration scientifique d'un bilan énergétique proche de l'unité - sans récupération d'énergie -. Un accord multilatéral permet la gestion de NET, encore au stade d'avant projet. Celui-ci a pour mission d'explorer la conception de certaines parties d'un réacteur en sous-traitant, par mandats, des études réalisées dans les industries spécialisées et les associations.

-----  
(3) Next European Torus

### Structure de l'Association Confédération Suisse - Euratom

Le Centre de Recherches en Physique des Plasmas est le centre de gravité de l'Association, c'est par excellence le laboratoire associé. Les travaux réalisés au CRPP font partie du programme de base de l'Euratom. La structure de l'Association est schématisée sur la Fig. 1(b). Un comité de gestion, composé de représentants suisses, de l'EPFL et de l'Office de la Science et de l'Education, et d'experts de l'Euratom, organise et contrôle les travaux de l'Association. Un comité de coordination permet de définir une politique de la recherche en matière de fusion contrôlée. Une partie des travaux de technologie incombe à des équipes de l'EIR et du SIN (aujourd'hui, ces deux laboratoires sont regroupés en un seul, l'Institut Paul Scherrer). Leurs programmes reposent essentiellement sur deux installations de recherches: SULTAN (étude des supraconducteurs) et PIREX (études des dommages causés aux matériaux par les radiations). Ces instituts apportent ainsi leur soutien au projet NET. Signalons encore que l'EPFL, par le biais de l'Institut de Génie Atomique collabore au projet PIREX.

### Activités du CRPP dans le cadre de l'Association

Les recherches qui se déroulent au CRPP tant au point de vue théorique qu'expérimental portent sur: le confinement magnétique du plasma, les processus de chauffage du plasma, la physique fondamentale et la technique de mesure des paramètres du plasma et enfin la technologie du chauffage additionnel avec pour objectif le développement de nouveaux tubes à hyperfréquences. Certaines de ces activités, entrant dans le cadre de la démonstration scientifique de la fusion en laboratoire, quintessence du programme européen, ont reçu un support budgétaire préférentiel de la part de l'Euratom. Ce support est attribué aux travaux de recherche et développement, qui après avoir été examinés par des comités d'experts internationaux, ont été approuvés pour leur valeur scientifique, leur intérêt dans la perspective générale du programme de l'Euratom et leur faisabilité technique. Lors de ces examens, les investissements financiers inhérents aux projets sont également analysés et discutés, les solutions techniques pouvant alors être révisés. D'une façon générale la contribution de l'Euratom est de l'ordre de 25% du budget "recherche" des centres associés, pour les projets préférentiels les subsides sont portés à 45%. Au

CRPP, quatre projets ont fait l'objet d'un tel octroi, dont récemment l'expérience TCV (Tokamak à configuration variable) qui est dans sa phase préparatoire.

Ces projets sont décrits systématiquement dans les lignes qui suivent :

a) Mesure de la température ionique d'un plasma par diffusion Thomson dans l'infrarouge lointain (1979)\*

*Pour cette mesure, la radiation diffusée est si faible qu'un laser de grande puissance est nécessaire. L'équipe du CRPP a développé un laser D<sub>2</sub>O libérant 2 MW pour une radiation de longueur d'onde 0,385 mm. Ce laser est pompé optiquement par un laser CO<sub>2</sub> de 1000 MW. Ce dispositif est le plus puissant au monde dans sa catégorie. L'expérience vient d'être installée sur le TCA et devrait fournir des résultats cet hiver. (Photo 1)*

b) Augmentation de la puissance HF installée sur TCA pour l'étude du chauffage par ondes d'Alfvén (1983)\*

*Le Tokamak TCA (Photo 2), planifié en 1977, soit donc avant la conclusion de l'accord, a permis de démontrer l'efficacité du chauffage additionnel par absorption de l'énergie HF couplée au plasma à travers l'onde d'Alfvén, l'augmentation de température était de l'ordre de 30%. Le générateur, objet de ce support préférentiel, délivre 1.2 MW (400 kW pour l'ancien) pendant 120 msec (30 msec pour l'ancien). Il permettra de balayer la fréquence de sortie pendant l'impulsion, maintenant la couche de résonance fixe alors que la densité du plasma varie. La puissance de sortie est également modulable permettant l'étude des phénomènes transitoires et dynamiques.*

c) Développement des tubes à hyperfréquences - gyrotrons - pour le chauffage cyclotronique électronique du plasma (1983)\* (Fig. 3)

*Cette méthode de chauffage apparaît être une des plus efficaces, cependant elle n'a été pas explorée par le passé à cause du manque de source à très haute*

-----  
\* Dates d'obtention de support préférentiel

fréquence (120-150 GHz) et à très haute puissance (200 kW à plusieurs Mégawatts). C'est pourquoi, intégré dans le programme Euratom, le CRPP avec pour partenaire la division des tubes électroniques EKR de la firme Brown, Boveri & Cie SA (Baden) a entrepris le développement d'un tube à hyperfréquences (120 à 150 GHz) utilisant l'interaction d'un faisceau magnétisé d'électrons relativistes et une onde électromagnétique. Durant cette interaction le faisceau d'électrons fournit de l'énergie à l'onde dans un résonateur quasi-optique - suivant un concept analogue à celui d'un laser -.

Actuellement des bobines supraconductrices créant le champ magnétique (~ 50 kG) sont en cours d'essai, et c'est sans doute au printemps prochain que l'installation complétée entrera en service. Signalons que le Laboratoire d'Electromagnétique et d'Acoustique de l'EPFL collabore à ce projet.

d) Le Tokamak TCV (Tokamak à Configuration Variable) (1986)\*

C'est le dernier projet à avoir reçu le support préférentiel de l'Euratom. La caractéristique essentielle de ce tokamak est que la section du plasma peut varier de façon contrôlée. On peut ainsi étudier les limites de stabilité du plasma en fonction de son élongation (rapport de la hauteur du plasma sur sa largeur). La limite de pression du plasma est généralement proportionnelle au courant, et d'après des lois d'échelles, l'augmentation du courant est possible en allongeant la section du plasma selon l'axe du tore. L'expérience TCV apportera donc, en partie, une solution à cette hypothèse. Le projet est dans sa phase conceptuelle (Photo 4), des appels d'offres pour sa construction ayant été émis récemment. Les bâtiments, qui arbitreront le projet, sont en voie de construction.

Du fait de son appartenance au programme Euratom, parallèlement aux secteurs principaux d'activités que nous avons décrits, le CRPP entretient des rapports privilégiés avec les laboratoires de la Communauté Européenne. D'une part, un contrat spécial le lie à JET depuis 1984, des scientifiques du CRPP y sont détachés en permanence ou y effectuent périodiquement des campagnes de mesures. Parmi ces scientifiques il convient de signaler la préparation d'une thèse sur la mesure des fluctuations magnétiques du plasma de JET. Une collaboration portant sur tous les aspects du chauffage par onde cyclotronique ionique avait fait l'objet d'une autre thèse avec la mise au point d'un code

numérique utilisé par JET. L'accession à une telle expérience est motivante et stimulante pour de jeunes chercheurs qui se trouvent ainsi hissés dans la sphère de la communauté scientifique internationale.

Dans le cadre des programmes internationaux, d'envergure mondiale, citons la participation du CRPP au projet INTOR, basé sur le confinement magnétique torique. Ce projet de réacteur international, placé sous les auspices de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique ( AIEA) à Vienne avait permis de faire le point sur la situation de la recherche et mis en évidence les éléments importants qui restaient à être élucidés avant la construction d'un tel réacteur. Lors de cette contribution, les calculs numériques d'équilibre et de stabilité effectués au laboratoire ont débouché sur la limite de pression que peut atteindre un plasma de tokamak. Les résultats obtenus ont permis, non seulement de prédire les performances de JET, mais aussi d'intervenir dans le choix des paramètres des nouveaux projets. Encore dans le cadre de ce projet, le CRPP a contribué aux travaux concernant la stabilisation positionnelle du plasma par l'ajustement des courants circulants dans les divers bobinages d'un tokamak au cours de la décharge.

Actuellement des travaux théoriques portant sur l'utilisation du chauffage par ondes d'Alfvén dans le NET sont en cours. Spécialisé, comme nous l'avons vu, dans le calcul des limites de pression du plasma, le groupe théorique collabore à l'étude de NET en adaptant dans ses calculs la structure actuelle du tokamak projeté.

L'équipe du TCA a mis en évidence que certaines propriétés des ondes d'Alfvén peuvent être utilisées comme moyen de diagnostic du plasma d'un tokamak. Une étude théorique a démontré la sensibilité de la méthode aux variations de la masse du plasma ainsi qu'au profil de courant dans la décharge. Il s'avère que le profil de courant est une mesure difficile et que des indications complémentaires à d'autres diagnostics sont utiles à la synthèse des résultats. Cette technique a pu être vérifiée sur le tokamak TCA, son exploitation sur d'autres tokamaks des laboratoires associés a fait l'objet de collaboration. C'est ainsi que la méthode a été testée au CENG (Grenoble) et au KFA (Jülich-RFA).

Experte dans le chauffage du plasma par l'absorption d'énergie transmise par l'onde d'Alfvén, l'équipe du TCA collabore à l'implantation de cette technique sur le tokamak ASDEX de IPP-Garching (KFA). Un générateur HF, conçu et

précédemment utilisé au CRPP, est en cours d'intégration sur l'installation ASDEX. Le but de cette collaboration est de vérifier le couplage de l'onde du plasma et l'efficacité de cette technique de chauffage sur un tokamak possédant un diverteur, système qui a permis d'obtenir des modes de confinement énergétique favorables.

Toujours dans le cadre des collaborations entre associations, citons encore qu'un ancien accord permettait au groupe théorique du CRPP d'accéder au superordinateur CRAY de l'IPP, Garching. Ces travaux sont d'ailleurs en partie à l'origine de l'implantation du CRAY à Lausanne. Il existe encore des projets conjoints de calculs entre l'IPP et le CRPP, étendus à une participation du GASOV, portant sur le développement de codes tridimensionnels. L'objectif est d'étudier des nouveaux systèmes de confinement torique et comprendre les phénomènes qui apparaissent au centre du plasma.

#### L'engagement européen et mondial

Des nouveaux programmes d'envergure, comme le développement des gyrotrons ont pu être abordés grâce à l'intégration du CRPP dans un système plus vaste, fixant des objectifs que seul le caractère supranational peut justifier. Paradoxalement cette opportunité a facilité le rapprochement de la recherche publique à celle des entreprises privées; c'est ainsi que dans le cadre du projet "gyrotron" il existe un partenariat entre l'Euratom, le CRPP et l'entreprise BBC.

L'accord d'Association permet non seulement les échanges d'idées, les contacts, les collaborations à terme mais encore grâce à la clause de mobilité du personnel, figurant dans les dispositions de l'Euratom, de recevoir soit des boursiers (position doctorale ou postdoctorale), soit des experts qui partagent leur temps entre leur laboratoire d'origine et le CRPP.

Les accords bilatéraux conclus par l'Euratom avec les Etats-Unis, le Japon et le Canada se répercutent sur les activités des associations et sont initiateurs de nouvelles collaborations. Conséquence directe des négociations récentes (Octobre 87) entre la Communauté Européenne, le Japon, l'URSS et les USA, devraient aboutir au développement du programme ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). La coopération internationale, déjà active par le passé dans le domaine de la fusion, s'est ainsi engagée sous des formes plus vastes et

plus substantielles à relever le défi scientifique et technologique que représente la réalisation d'un réacteur à fusion thermonucléaire contrôlée (Fig. 4). Partie intégrante à cet effort, la Suisse permet à son potentiel scientifique et industriel de se maintenir au meilleur niveau de la compétition internationale.

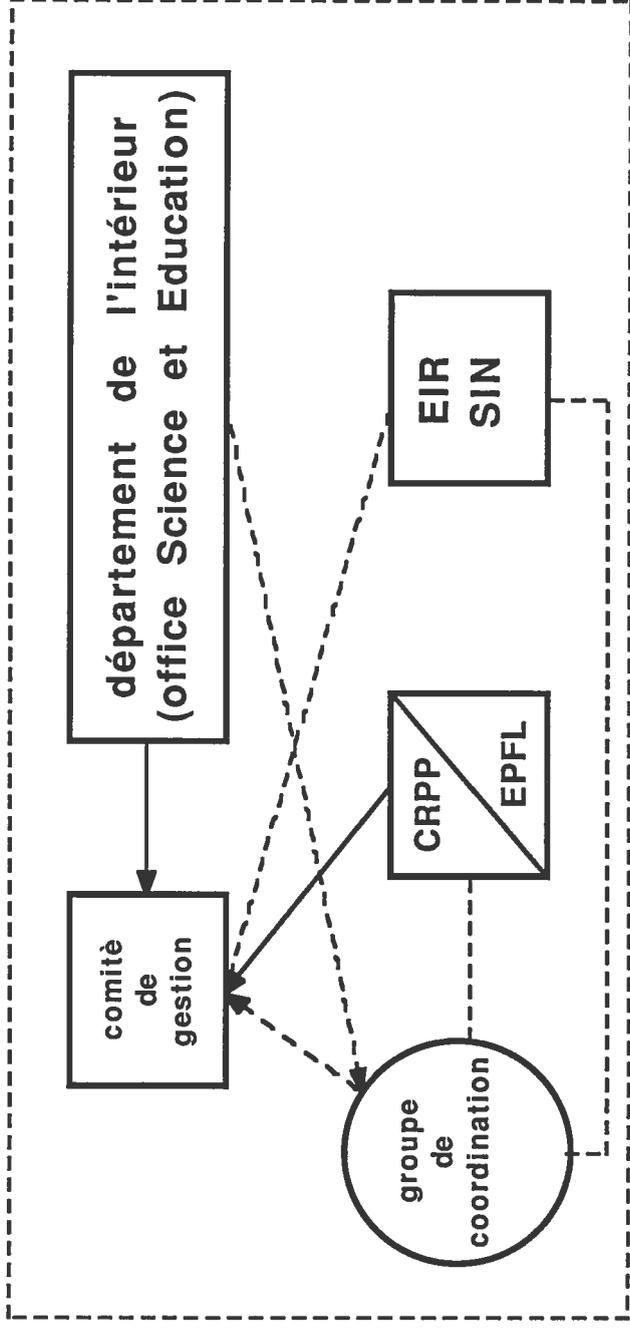
## Appendice : *L'EURATOM*

L'Euratom a été créée en 1957 par le traité de Rome pour contribuer au développement des usages pacifiques de l'énergie atomique - basée sur la fission - . Ses buts essentiels sont la coordination et la stimulation des recherches, l'échange et la mise en commun des connaissances acquises. Elle a aussi pour mission la fixation d'objectifs généraux facilitant l'orientation des entreprises européennes.

Dès 1959, suite à la conférence de Genève sur "l'usage pacifique de l'atome", l'Euratom s'est fixée une autre tâche: celle de coordonner dans un programme à long terme toutes les activités européennes dans le domaine de la fusion contrôlée. Le but final étant d'aboutir à la réalisation de prototypes de réacteurs en vue de leur industrialisation et de leur commercialisation, avec comme postulat la production d'énergie utilisant un combustible pratiquement inépuisable et ayant un impact très modéré sur l'environnement.

Les raisons à cette collaboration européenne sont évidentes: les grandes puissances qui pensaient pouvoir domestiquer rapidement l'énergie de fusion, se sont trouvées confrontées à d'énormes difficultés devant la démonstration scientifique de ce procédé en laboratoire. Les contraintes physiques régissant le mécanisme de synthèse des atomes légers (deutérium et tritium) en atomes plus lourds (hélium) ,source d'énergie dans la plupart des étoiles, s'avèrent excessivement difficiles à réaliser en laboratoire. Le programme de recherche et développement inhérent à cet objectif requiert un effort à long terme de la part de tous les participants, une technologie de haut niveau - motivante pour les industries -, et surtout des ressources humaines et financières importantes difficilement supportable par un pays seul. En retour, en cas de succès, la réalisation d'un réacteur européen entraînera des retombés bénéfiques pour les pays membres et associés à ce programme.

Schématiquement trois étapes sont nécessaires pour atteindre l'objectif fixé: la démonstration de la faisabilité scientifique du procédé de fusion en laboratoire, la faisabilité technologique et la faisabilité économique (Fig. 5). Pour la démonstration scientifique, le programme européen s'articule sur le développement de la "filère tokamak". Actuellement avec l'expérience JET et le programme coordonné réalisé dans les laboratoires associés, l'Europe joue un rôle de leader dans l'effort mondial.



Structure de fonctionnement A+B à l'intérieur de l' Association Suisse - Euratom

Fig. 1(b)

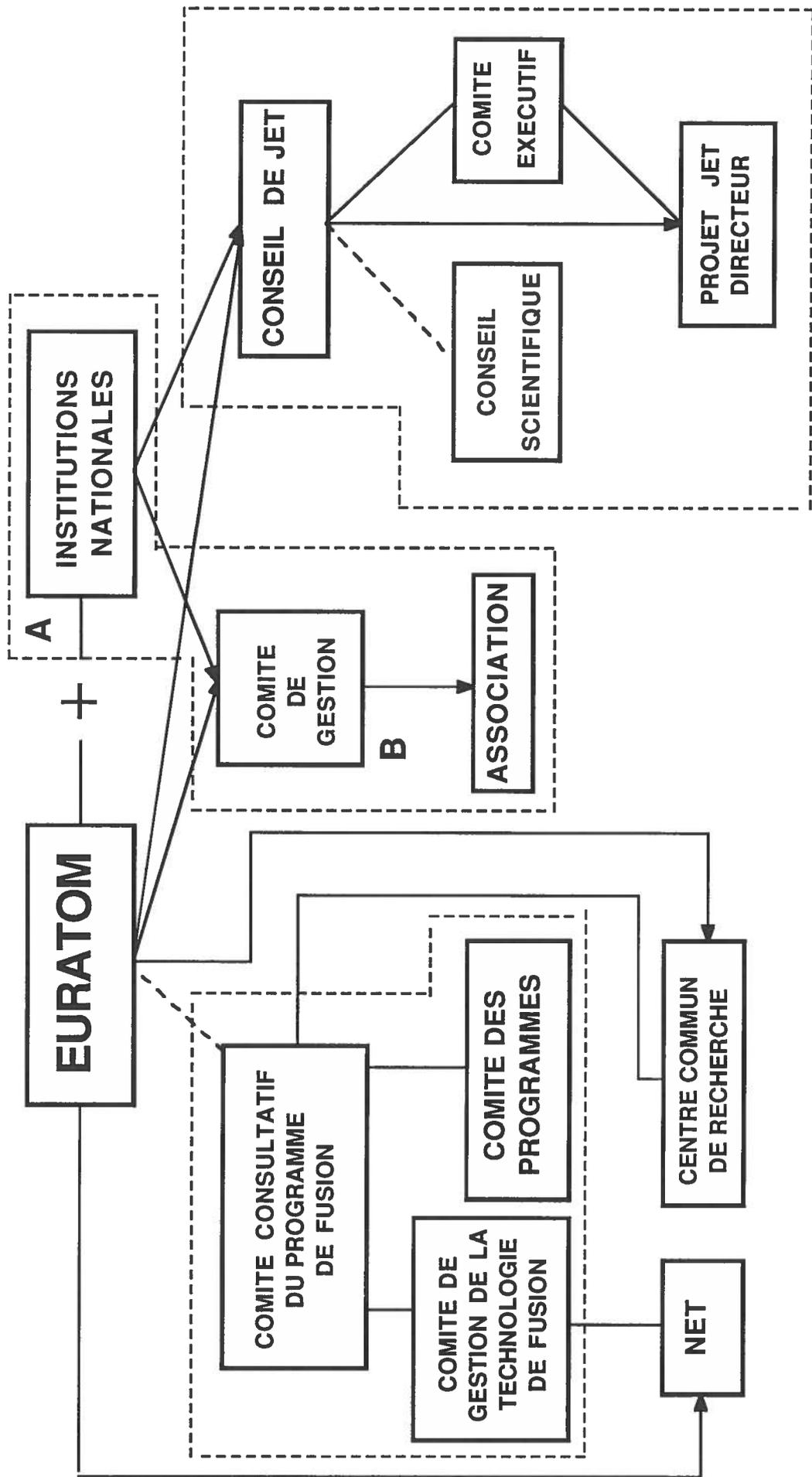


Fig.1 (a)

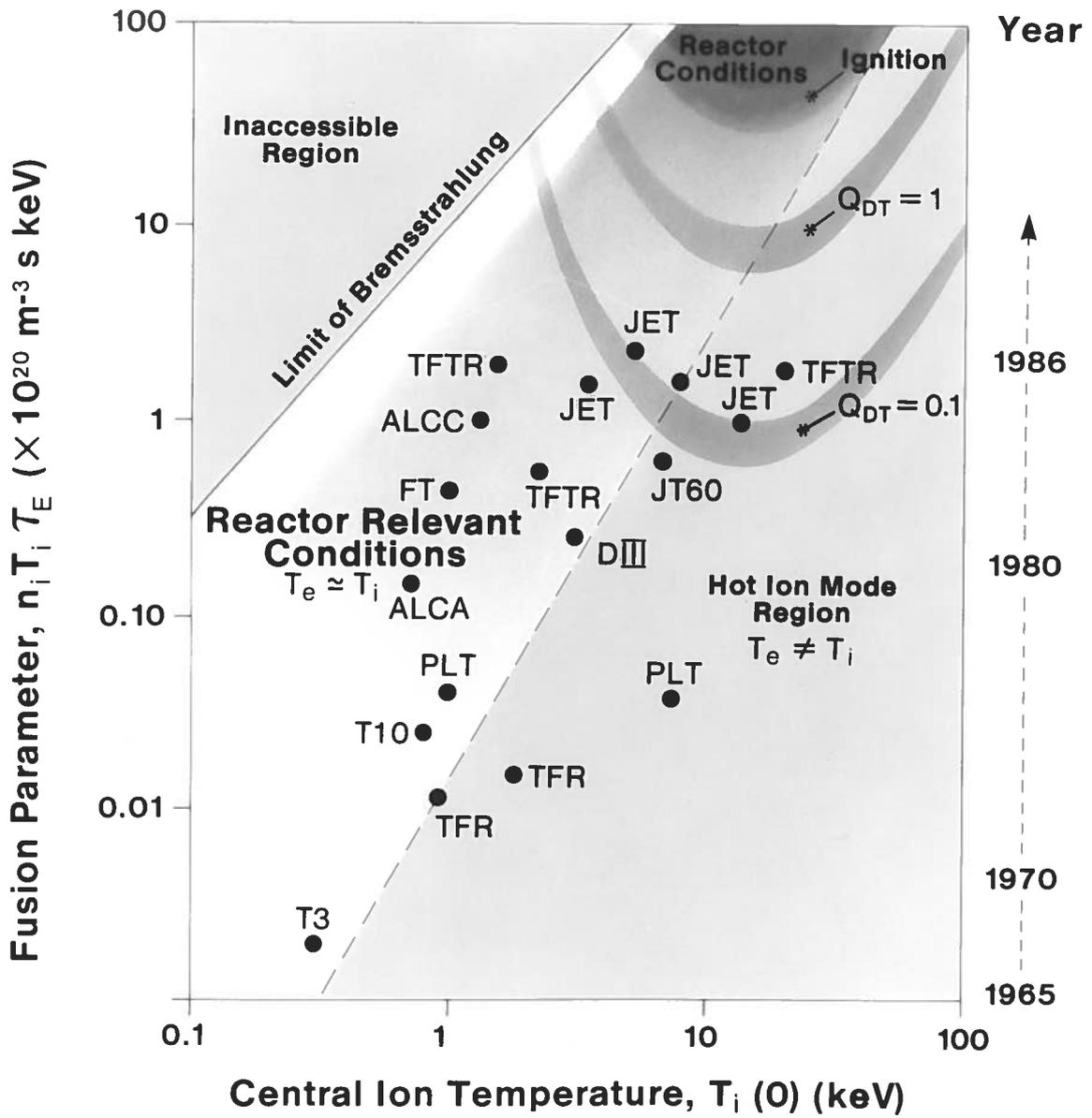


Fig. 2 : Diagramme de Lawson : critère et progrès des recherches (jusqu'en 1986)

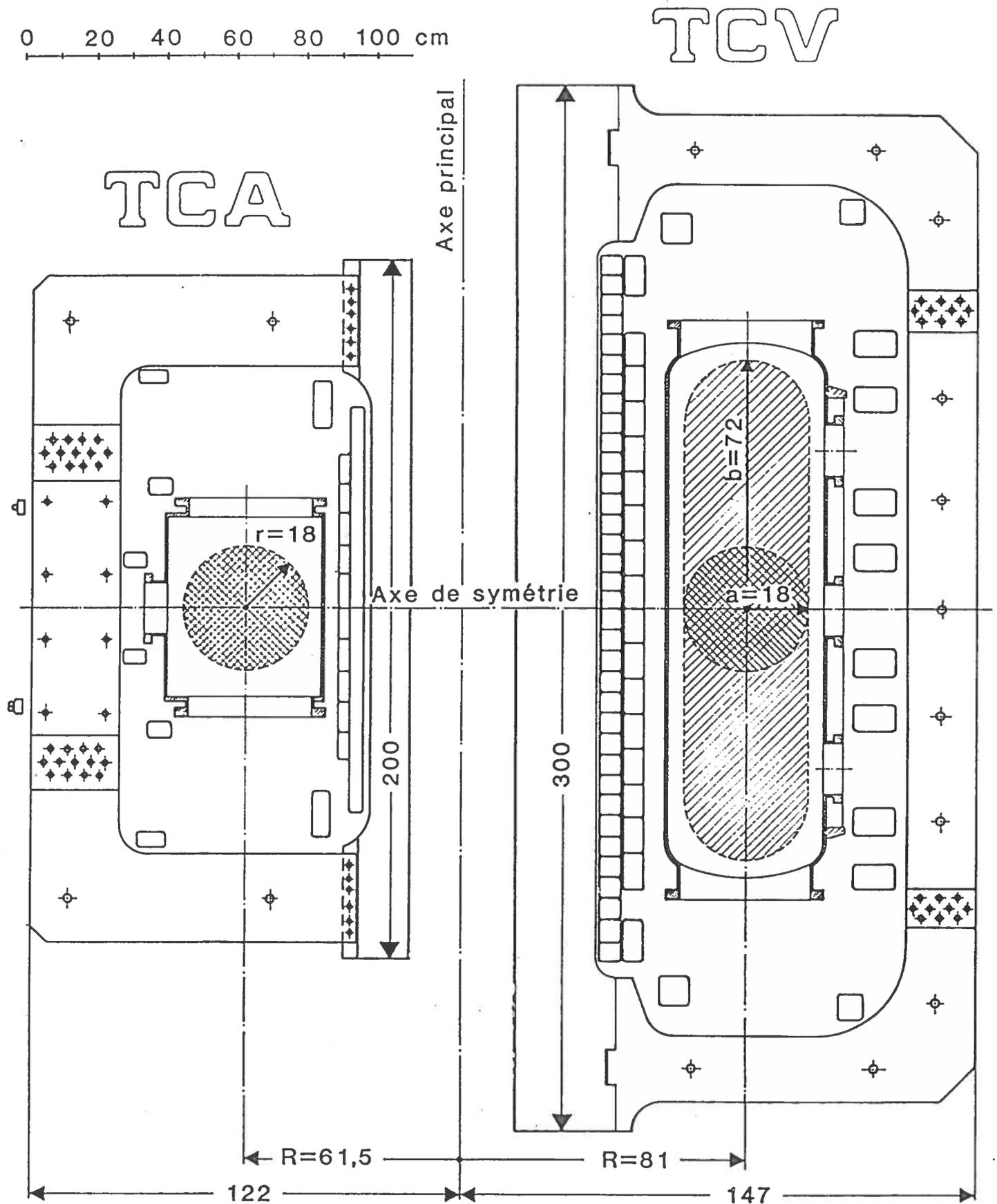


Fig. 3 : Comparaison de la section du tokamak TCA avec celle du projet TCV.  
 Dans TCA, la section est circulaire alors que dans le projet TCV la section allongée peut être conçue avec une élongation variable.

Schéma de principe d'un réacteur de fusion

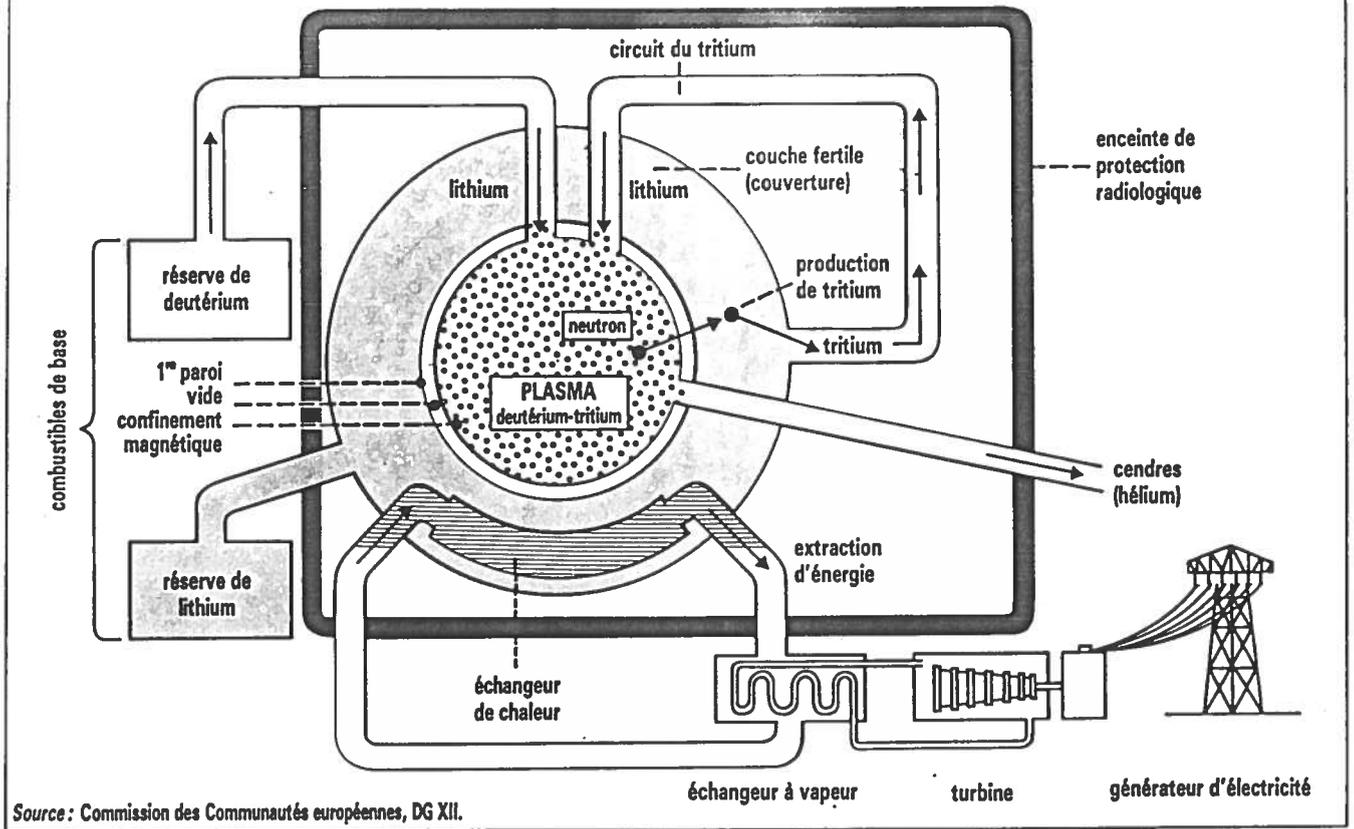


Fig. 4

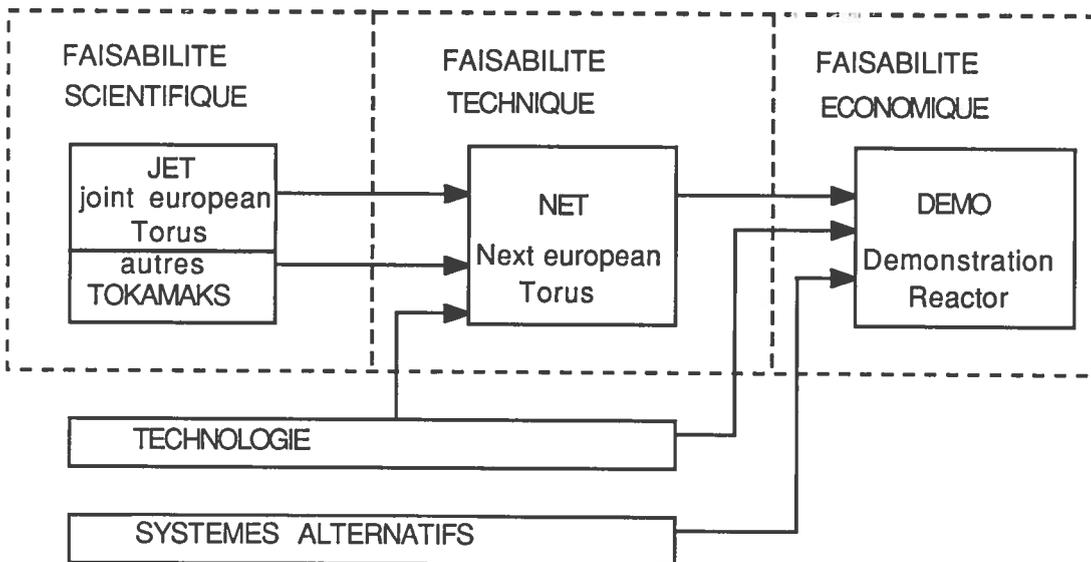


Fig5 LES DIVERSES ETAPES DE LA STRATEGIE DU PROGRAMME EUROPEEN

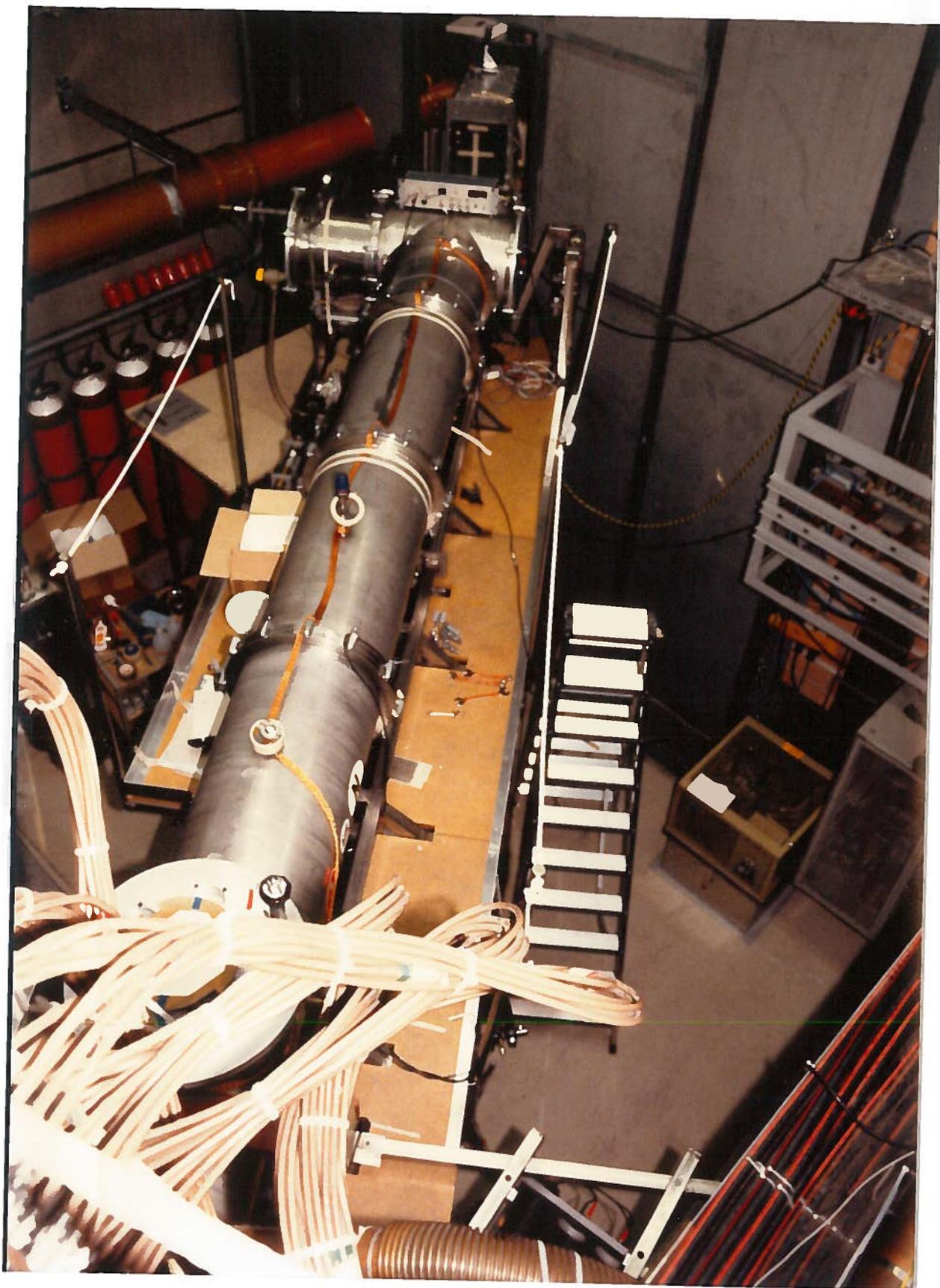


PHOTO 1

Implantation sur TCA du diagnostic de mesure de la température des ions par laser infra-rouge lointain (le faisceau laser accède au tokamak, protégé dans un tube en acier inox). (photo : A. Gorgerat)

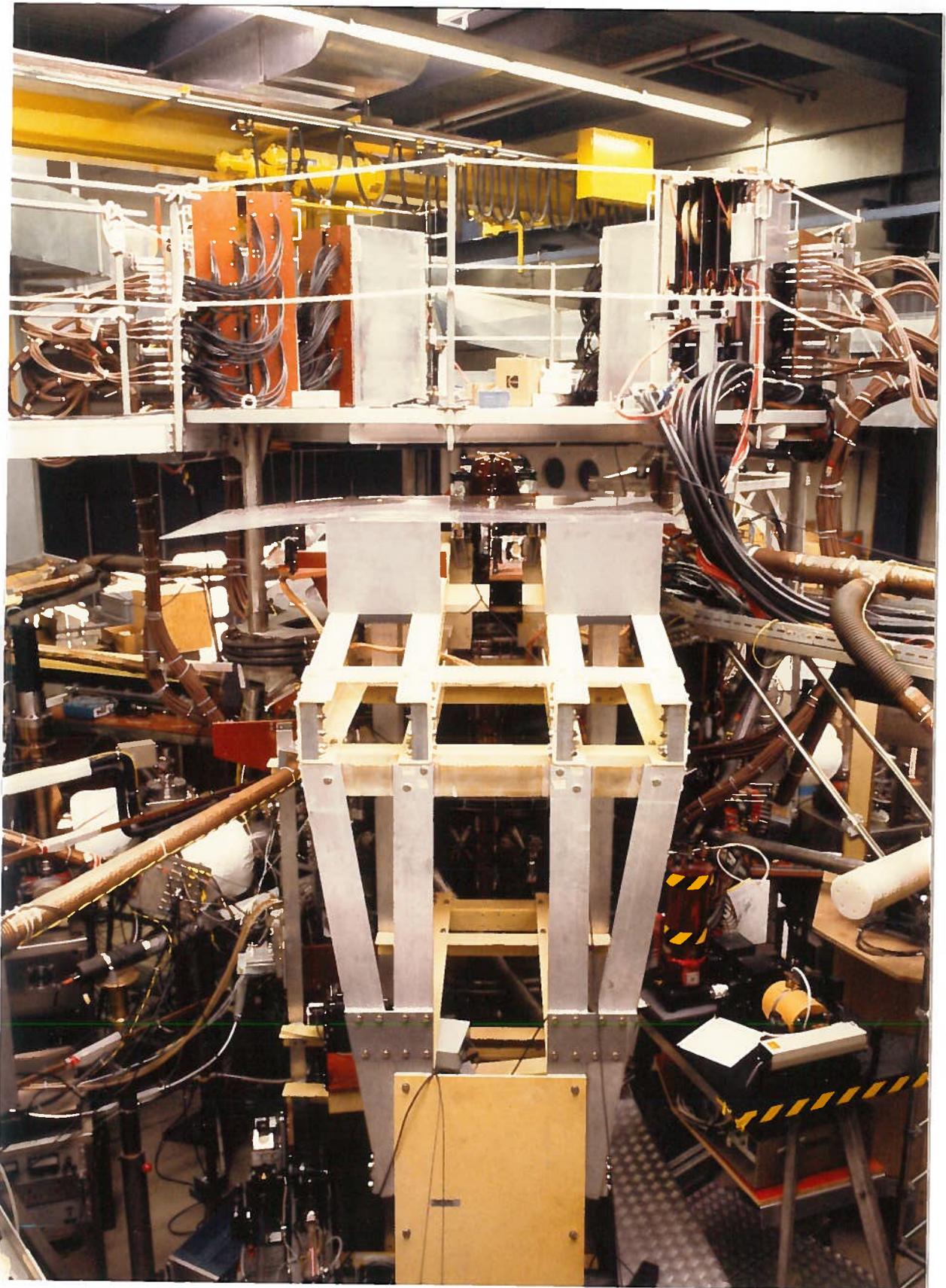


PHOTO 2

TCA : Vue générale de TCA entouré des appareillages de diagnostics.  
(photo : A. Gorgerat)

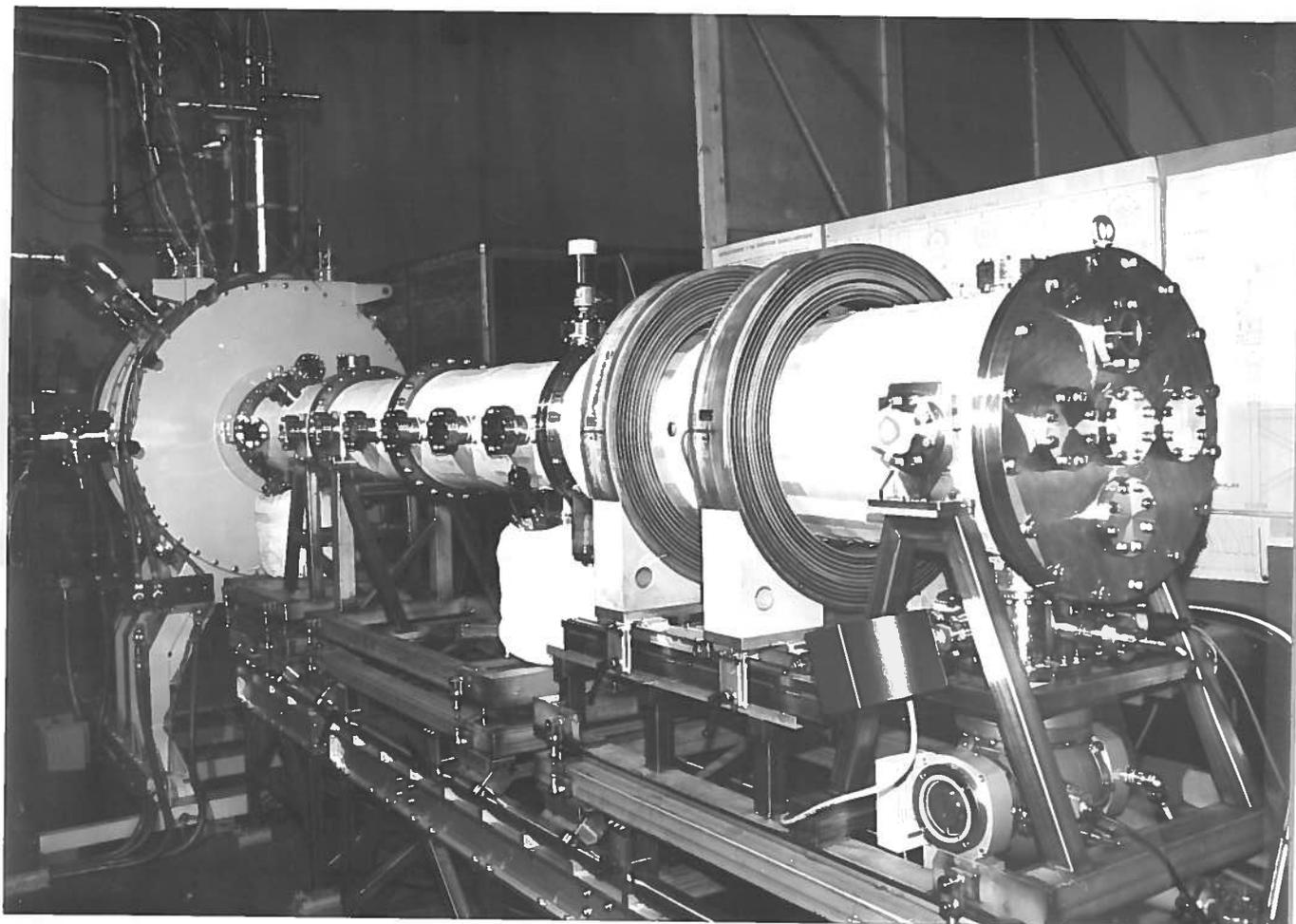


PHOTO 3

Gyrotron 120GHz dans sa phase de montage.

(photo : A. Gorgerat)