**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 75 (1984)

**Heft:** 10

**Artikel:** J.E.T. (Joint European Torus) : une étape importance vers la fusion thermonucléaire contrôlée en laboratoire

**Autor:** Paris, P. J. / Yasseen, F.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-904404

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

**Download PDF:** 09.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch**

# J.E.T. (Joint European Torus) – Une étape importante vers la fusion thermonucléaire contrôlée en laboratoire

P. J. Paris et F. Yasseen

*JET, le Joint European Torus, est le plus grand projet du programme européen de fusion nucléaire contrôlée. L'installation à Culham, Grande-Bretagne, a été inaugurée officiellement par la reine Elizabeth II il y a quelques semaines. C'est la plus grande installation expérimentale au monde, basée sur le concept du confinement magnétique, dans laquelle les physiciens tentent de reproduire en laboratoire les réactions de fusion d'éléments légers dont les étoiles tirent leur énergie.*
*Cette expérience vise à prouver la faisabilité scientifique du procédé – c'est-à-dire réussir à produire un bilan d'énergie positif – et ainsi à démontrer la possibilité de son utilisation comme source d'énergie à long terme. Les «combustibles» utilisés, des isotopes de l'hydrogène, existent en abondance sur la planète.*

*JET, der «Joint European Torus», ist das grösste Projekt des europäischen Kernfusionsforschungsprogramms. Die Anlage in Culham, Grossbritannien, ist erst vor kurzem von Königin Elizabeth II. offiziell eingeweiht worden. Sie ist die grösste Versuchsanlage der Welt, die auf dem Konzept des magnetischen Einschlusses beruht, mit welchem die Physiker die Verschmelzungsreaktionen leichter Elemente im Labor nachzuvollziehen versuchen, von denen auch die Sterne ihre Energie beziehen.*
*Ziel dieses Experimentes ist es, die wissenschaftliche Machbarkeit des Verfahrens zu beweisen – d.h. eine positive Energiebilanz zu erzielen – und so die Möglichkeit zu demonstrieren, es langfristig als Energiequelle zu nutzen. Die verwendeten «Brennstoffe», Isotopen des Wasserstoffs, sind auf unserem Planeten im Überfluss vorhanden.*

**Adresse des auteurs**
*P. J. Paris*, ingénieur physicien DPE-SIA, et *F. Yasseen*, ingénieur physicien EPFL, Centre de Recherches en Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1007 Lausanne

## 1. Introduction

Le programme de recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée, coordonné par la Communauté Européenne de l'Energie Atomique (Euratom), est financé à 80% par celle-ci, à 11% par la Grande-Bretagne (pays hôte de l'expérience) et pour le reste par des contributions directes des pays membres du Marché Commun et des pays associés au programme de fusion, dont la Suisse.

L'expérience a nécessité cinq ans de construction; son coût total – environ 650 millions de francs suisses – représente le plus gros investissement que l'Europe a placé dans la recherche d'une énergie de substitution au pétrole, charbon, ou à l'uranium. JET, après de longs pourparlers politiques, a été installé en Grande-Bretagne, à Culham près d'Oxford, sur un site adjacent au centre britannique de recherches en fusion. L'exploitation expérimentale du projet a débuté en juin 1983 comme prévu dans la planification, mais l'inauguration officielle n'a eu lieu que récemment, le 9 avril 1984[1]).

## 2. Energie nucléaire de fission et de fusion

Il existe deux types de réactions nucléaires permettant de libérer une grande quantité d'énergie: la fission, actuellement utilisée dans les réacteurs nucléaires conventionnels, et la fusion (fig. 1).

[1]) La reine Elisabeth II a procédé à l'inauguration officielle en présence de M. François Mitterrand, président en exercice du Conseil de la Communauté Européenne. La délégation suisse était conduite par le professeur U. Hochstrasser, directeur de l'Office Fédéral de l'Education et de la Science, et par M. F. Pictet, ambassadeur de Suisse à Londres.

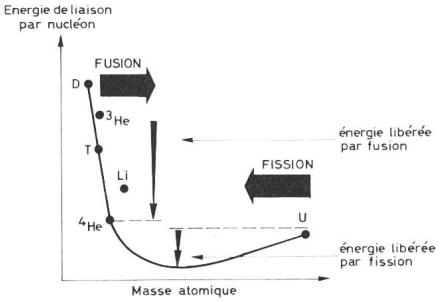


**Fig. 1 Energie nucléaire de fission et de fusion, fonction de la masse atomique des éléments**

La fission utilise des éléments lourds, tels que l'uranium 235, qui éclatent sous l'impact d'un neutron dont l'énergie maximalise la probabilité de réaction de fission. D'une part, les sous-produits des réactions emportent avec eux des énergies cinétiques récupérables par le fluide caloporteur – permettant le transport de l'énergie vers l'échangeur – et d'autre part, les neutrons issus des réactions maintiennent la réaction en chaîne.

La fusion thermonucléaire, quant à elle, utilise des noyaux d'éléments légers qui, en s'amalgamant, produisent des noyaux plus lourds. Ces réactions nucléaires de synthèse sont extrêmement rares aux températures ordinaires. Pour atteindre les seuils de rentabilité énergétique, il faut que les noyaux soient chauffés à des températures supérieures à 100 millions de degrés centigrades. Par ailleurs, un nombre suffisant de ces particules est nécessaire à l'entretien de réactions capables de maintenir le combustible à ces hautes températures.

Dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent à des températures plus basses, de l'ordre de quelques millions de degrés (~ 15 000 000 °C au centre du soleil), mais à des pressions considérables; ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise, le confi-

nement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation.

Les réactions de fusion ayant lieu dans le soleil constituent un cycle de réactions compliqué qui implique des réactants tels que l'hydrogène, le carbone et l'hélium. Il n'est guère possible de reproduire en laboratoire ces réactions extrêmement lentes à notre échelle et dont nous ne pouvons satisfaire les contraintes physiques. Cependant, il existe des réactions utilisant des isotopes de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T), qui semblent être, en principe, plus faciles à réaliser en laboratoire.

Le deutérium est un élément présent dans l'eau à raison de 0,034 g/litre. Il est isolé par centrifugation et par électrolyse. Les réserves de deutérium contenues dans les mers et les océans sont évaluées au total à $5 \cdot 10^{13}$ tonnes, une quantité qui permettrait de produire 100 milliards de fois l'énergie consommée dans le monde en 1983.

Le tritium n'existe pas à l'état naturel, il doit être produit artificiellement à partir du lithium. Les réserves mondiales de lithium contenues dans l'écorce terrestre sont actuellement estimées à $10^8$ tonnes, ce qui permettrait d'exploiter la réaction de fusion D-T pendant plusieurs millénaires.

La synthèse nucléaire deutérium-tritium, libérant un noyau d'hélium et un neutron (voir tab. I), produit 94 000 kWh par gramme de combustible, comparativement dix millions de fois plus qu'un gramme de pétrole. Tout ceci explique l'intérêt d'une telle source d'énergie. Malheureusement, ce pari énergétique de cette fin de siècle comporte des difficultés dans sa démonstration et sa réalisation qui sont à la mesure des avantages qu'on peut en tirer.

*Les réactions principales de fusion* Tableau I

| | | | |
|---|---|---|---|
| $D^2+T^3$ | → | $He^4+n+17{,}6$ MeV | |
| $D^2+D^2$ | → | $T^3+p+4{,}00$ MeV | à 50% |
| | | $He^3+n+3{,}2$ MeV | à 50% |
| $D^2+He^3$ | → | $He^4+p+18{,}8$ MeV | |
| $B^{11}+H$ | → | $3He^4+8{,}7$ MeV | |

Le tritium est un élément radioactif dont le temps de décroissance caractéristique (demi-vie) est de 12,3 ans. C'est un émetteur $\beta$, qui permet aussi d'obtenir l'isotope $He^3$,

$$T \rightarrow He^3 + e + 5{,}7 \text{ keV}$$

Ce sont des réactions de fission du lithium qui permettent d'obtenir le tritium. L'isotope $Li^6$ donne lieu à une réaction exothermique qui, en cas de régénération du tritium dans le «manteau du réacteur», permettrait d'augmenter l'énergie récupérée,

$$Li^6 + n \rightarrow He^4 + T + 4{,}8 \text{ MeV}.$$

L'isotope $Li^7$, quant à lui, donne lieu à une réaction endothermique dont le neutron secondaire produit augmente le rapport de régénération du tritium, son énergie étant suffisante,

$$Li^7 + n \rightarrow He^4 + T + n - 2{,}5 \text{ MeV}.$$

Il existe 7,4% de $Li^6$ contenu dans le lithium naturel. Si une fraction supérieure de $Li^6$ était nécessaire, l'enrichissement est relativement peu coûteux.

Si la réaction D-T semble être manifestement la plus réalisable actuellement, les autres réactions:

- D-D, dont les réserves de combustible sont plus grandes,
- D-$He^3$, où le $He^3$ inexistant à l'état naturel peut être produit par la désintégration du tritium, ou par la réaction D-D,
- H-$B^{11}$, qui ne produit pas de neutrons,

sont envisageables, quoiqu'elles nécessitent des conditions de température plus élevées.

## 3. Libération de l'énergie de fusion: critère de Lawson et condition d'ignition

Les sections efficaces de réactions font apparaître une probabilité maximale lorsque les noyaux sont à températures très élevées. L'agitation thermique des atomes est alors telle que ceux-ci éclatent et forment un mélange d'ions et électrons, c'est-à-dire un plasma dont une des propriétés est de réagir aux champs électriques et magnétiques. Cette caractéristique est utilisée dans la réalisation de la fusion magnétique (lente).

Il n'est évidemment pas possible de maintenir un plasma à une température de 100 millions de degrés en contact avec une paroi matérielle, il faut le contenir et l'isoler thermiquement: c'est le problème de l'isolation ou encore du confinement de l'énergie. La qualité de cette isolation peut être comparée, par analogie, à celle d'une bouteille thermos: plus longtemps le liquide contenu dans celle-ci restera à sa température initiale, meilleure sera l'efficacité de l'isolation. De plus, les particules devant être maintenues à ces hautes températures, il faut compenser les pertes énergétiques dues aux rayonnements ou à la convection.

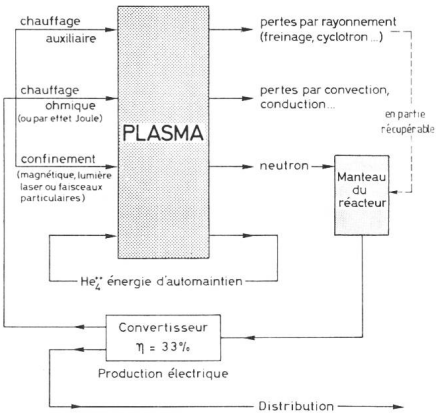


**Fig. 2 Bilan d'énergie**

Toute l'énergie requise pour assurer le confinement et le chauffage font partie du bilan énergétique du réacteur. La limite pour que le bilan soit positif, en admettant un rendement conventionnel de 33%, est appelée le critère de Lawson (fig. 2). Pour un mélange Deutérium-Tritium à environ 100 millions de degrés, le produit de la densité (n) des particules par le temps $\tau_E$ de confinement de l'énergie doit être: $n\tau_E > 7 \cdot 10^{13}$ particules par $cm^3 \cdot s$. C'est la première étape de la démonstration scientifique de la fusion; elle décrit le bilan nul. L'énergie issue du plasma est sans cesse réinvestie pour le maintien de celui-ci. La condition pour qu'un plasma thermonucléaire continue de «brûler» sans apport d'énergie extérieure est appelée la condition d'ignition (ou auto-entretien). Elle sous-entend que l'énergie des particules $\alpha$ (hélium) issues des réactions de fusion compense toutes les fuites d'énergie et contribue au maintien des conditions de réaction de fusion. Ce critère est plus difficile à satisfaire: $n\tau_E > 2 \cdot 10^{14}$ particules (à 100 millions de degrés) par $cm^3 \cdot s$ (fig. 3).

Dès lors, on constate qu'il existe deux méthodes pour obtenir le confinement.

La première méthode – la fusion rapide ou inertielle – consiste à créer un plasma extrêmement dense pendant un temps très court (typiquement: $T = 10^8$ K, $n = 10^{26}$ $cm^{-3}$, $\tau = 10^{-10}$ s). A cette fin, une cible en matériau fusible, d'un diamètre de quelques dixièmes à quelques millimètres, est irradiée par

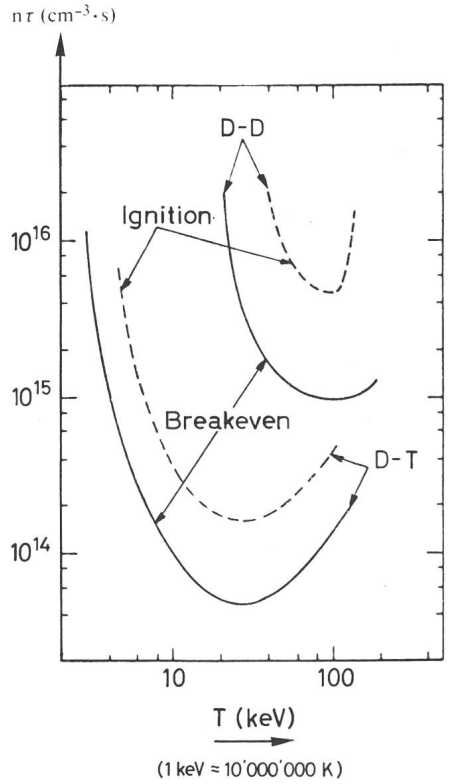


**Fig. 3 Critère de Lawson - fonction de la température des mélanges D-T et D-D - (breakeven et ignition)**

des faisceaux de lumière laser ou des jets de particules à très haute énergie. Le problème majeur réside là dans les rendements des lasers et la focalisation des faisceaux d'ions. Cependant, les faisceaux d'ions lourds semblent prometteurs.

La seconde méthode - la fusion lente ou magnétique - consiste à confiner magnétiquement pendant un temps relativement long un plasma ténu, mais très chaud (typiquement; $T = 10^8$ K, $n = 10^{14}$ cm$^{-3}$, $\tau = 1$ s). En effet, dans un champ magnétique, les particules chargées du plasma suivent des trajectoires hélicoïdales autour des lignes de champ et sont ainsi confinées. Un des obstacles à surmonter dans cette méthode est l'apparition de nombreuses instabilités dans le plasma. Celles-ci provoquent des pertes d'énergie inacceptables et vont parfois même jusqu'à détruire le confinement du plasma (disruption).

## 4. La fusion magnétique: le tokamak

La voie la plus prometteuse semble être celle du confinement magnétique, en particulier le tokamak (fig. 4) qui est une machine où les lignes de champs magnétiques sont refermées

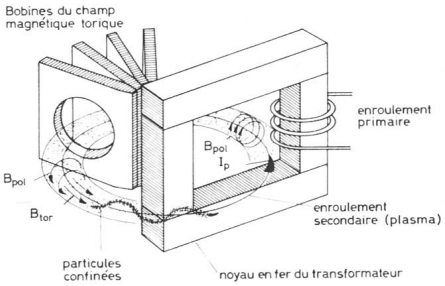


**Fig. 4 Principe du tokamak**

Comme dans toutes les configurations fermées, le tokamak a un champ magnétique toroïdal $P_{tor}$, produit par des bobines enroulées autour de la chambre toroïdale. Un second champ magnétique $B_{pol}$, engendré par un courant électrique $I_p$ circulant dans le plasma lui-même assure une stabilité supplémentaire. On crée ce courant en construisant l'appareil de telle sorte que le plasma forme l'enroulement secondaire d'un transformateur: c'est le courant circulant dans l'enroulement primaire qui engendre le flux $I_p$. Les systèmes tokamak produisent le meilleur confinement réalisé jusqu'ici.

sur elles-même en formant un tore. Cette topologie ressemble à celle d'un anneau de stockage des hautes énergies mais beaucoup plus petit, le plasma occupant le volume entier.

Mais alors que dans la fusion inertielle, l'apport d'énergie est fourni par les faisceaux eux-mêmes, dans la fusion «tokamak», le problème est plus complexe.

Dans un premier temps, c'est le courant induit dans le plasma qui, par dissipation ohmique, permet d'atteindre des températures de l'ordre de 15 000 000 °C. Au-delà de cette limite, la méthode perd de son efficacité: la résistivité du plasma décroît lorsque sa température augmente. Deux méthodes principales de chauffage supplémentaire sont alors utilisées:

- la première consiste à injecter dans le plasma des particules neutres très énergétiques, qui chauffent le plasma par collision.

- la seconde utilise la propriété qu'ont les ondes électromagnétiques, à travers diverses résonnances, de se coupler au plasma. L'énergie contenue dans les ondes est absorbée par les particules du plasma. Suivant le type de fréquence utilisée, cette méthode porte des noms différents.

Les tokamaks ont permis d'obtenir des résultats prometteurs reflétés par les progrès obtenus au fil des ans (fig. 5). Même si le tokamak ne représente pas la filière incontestée pour un réacteur, il semble néanmoins probable que la démonstration scientifique soit

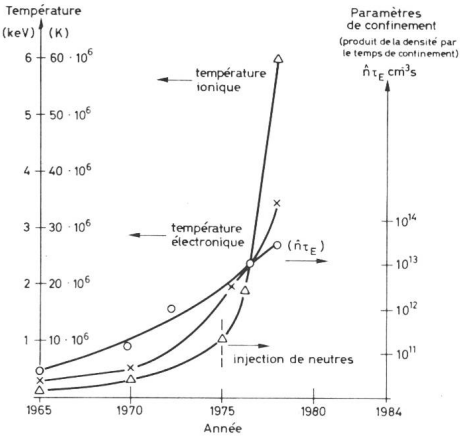


**Fig. 5**

Au cours de ces dernières années, à Princeton (USA), deux machines (PLT et PDX) ont dépassé une température de l'ordre de 75 millions de degrés Kelvin. Plus récemment, en hiver 1983, au Massachusetts Institute of Technology (USA), le produit $n\tau_E$ a atteint au centre du plasma une valeur supérieure à $10^{14}$ cm$^{-3}$·s - le tokamak du MIT utilise un champ magnétique très élevé de 6 à 10 Teslas. D'autres tokamaks à fort champ magnétique créé par des supraconducteurs sont en opération tel que celui de Frascati (Italie) ou ceux, plus grands, Tore Supra (Cordarache - France) et T15 (URSS) qui sont en construction.

prouvée sur cet appareillage complexe de recherche.

L'importance de l'enjeu et les coûts inhérents à cette recherche ont stimulé la coopération scientifique. Les pays de la Communauté Economique Européenne ont fondé la Commission à l'Energie Atomique (Euratom) à laquelle la Suède et la Suisse ont souscrit au programme de fusion nucléaire. Dans le cadre de cette collaboration, deux laboratoires suisses contribuent intensivement aux recherches. Le programme européen est principalement concentré sur la fusion magnétique et plus particulièrement sur le tokamak. JET est le plus grand tokamak au monde dont l'objectif est d'approcher les conditions de bilan positif.

## 5. JET: description de l'expérience

Les performances de JET peuvent être évaluées en extrapolant, dans les limites d'incertitude, les connaissances actuelles des mécanismes de pertes d'énergie et d'instabilités du plasma.

Ces extrapolations se basent sur des lois empiriques, appelées lois d'échelle, qui font apparaître des dépendances entre certains paramètres des tokamaks. Ainsi, pour un plasma torique à faible taux d'impuretés et

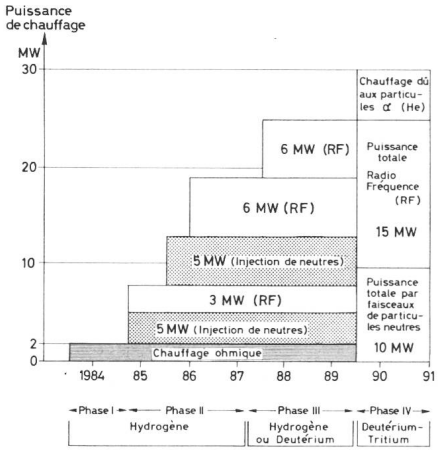


**Fig. 6 Séquence des diverses phases planifiées pour accroître la puissance de chauffage additionnel**

chauffé ohmiquement, le temps de confinement de l'énergie pour une densité donnée est proportionnel au carré du petit rayon du plasma ($\tau_E = c_\tau \cdot na^2$, avec la constante $c_\tau \approx 5 \cdot 10^{-21}$ m · s, n densité en $m^{-3}$). La nécessité de construire de grands tokamaks a été largement vérifiée au milieu des années septante, c'est ainsi que la conception de grandes expériences du type de JET date d'une dizaine d'années.

Une meilleure compréhension des phénomènes suivants permettra de progresser dans la physique des plasmas thermonucléaires:

- Les propriétés de confinement et de stabilité du plasma lorsque les paramètres sont proches de ceux d'un réacteur.
- Les interactions entre le plasma et les parois du tore, une des causes importantes des pertes d'énergie par radiations. Les impuretés métalliques arrachées aux parois viennent polluer et refroidir le plasma.
- Le chauffage additionnel qui devrait porter le plasma aux très hautes températures requises pour la fusion.
- Le comportement des particules $\alpha$ énergétiques, issues des réactions de fusion deutérium-tritium et pouvant contribuer au maintien de la température du plasma si leur énergie est bien confinée.

JET est prévu, dans sa version améliorée, pour qu'un courant de plasma de 4,8 MA y circule pendant une durée de décharge de 10 s à 10 mn d'intervalle. La puissance effective totale du chauffage additionnel est de 25 MW. L'expérience a été mise en service l'été dernier et en décembre, un courant de 3 000 000 d'ampères circulait dans la décharge gazeuse pendant $1/10^e$ de seconde. La température du plasma était de l'ordre de 15 000 000 °C. Ces performances correspondent pratiquement à celles de base planifiées pour cette installation.

Jusqu'en 1988, on prévoit d'utiliser un plasma d'hydrogène et de deutérium, et d'augmenter par paliers successifs la puissance de chauffage auxiliaire (fig. 6).

Finalement, pour la période 1988–1990, si les résultats préliminaires sont concluants, il est prévu d'utiliser des mélanges de deutérium et de tritium qui produiront des réactions de fusion. Pendant cette dernière phase, il faudra adopter des systèmes de télémanipulation par robotique, car les risques biologiques se trouveront accrus par la radiation engendrée par les neutrons issus des réactions de fusion.

JET se compose d'une chambre à vide torique, imbriquée dans un système métallique de soutien, en étoile octogonale (fig. 7). Autour de la chambre à vide sont enfilées les 32 bobines qui génèrent le champ torique. Le champ polaire sera induit par un ensemble de 4 bobines placées autour de la chambre à vide, perpendiculairement au bobines du champ torique (tab. II donne les paramètres principaux).

La conception de JET est basée sur le principe des composants modulaires assemblés sur place. Une grue de 150 tonnes permet d'installer ces modules dans la halle de montage, puis de les déplacer dans la halle expérimentale. JET se compose de huit «octants», comprenant chacun $1/8^e$ de la chambre à vide, quatre bobines du champ torique et $1/8^e$ de la structure métallique de soutien, ainsi que d'autres petits éléments. Chaque octant a été assemblé indépendamment des autres. Cette structure modulaire simplifiera les opérations de réparation et de remplacement éventuelles (fig. 8 et 9).

La conception mécanique a été dominée par des considérations de fatigue des matériaux, le mode d'opération d'un tokamak étant pulsé, les

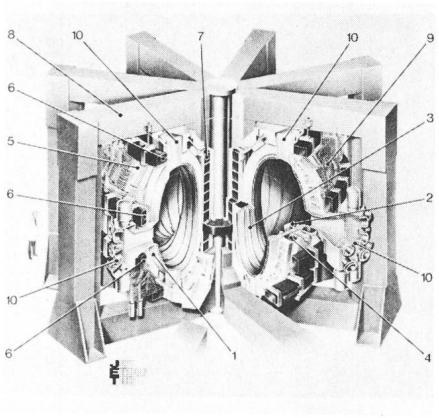


**Fig. 7 JET**

1 Chambre à vide (double paroi)
2 Limiteurs métalliques définissant le bord du plasma
3 Ecrans polaires empêchant le contact du plasma et du tore
4 Bobine en forme de D du champ magnétique torique
5 Structure mécanique
6 Bobines externes du champ magnétique polaire
7 Bobines internes du champ magnétique polaire (permettent également d'induire le courant dans le plasma)
8 Noyau et branches en fer du transformateur
9 Raccords d'eau et connections électriques pour les bobines du champ magnétique torique
10 Accès radiaux et verticaux à la chambre à vide

*Paramètres principaux de JET* — Tableau II

| | | |
|---|---|---|
| Petit rayon du plasma (a×b) | 1,25 m×2,10 m | |
| Grand rayon du plasma ($R_0$) | 2,96 m | |
| Rapport d'aspect ($R_0$/a) | 2,37 | |
| Elongation du plasma (b/a) | 1,68 | |
| Durée de la décharge | 20 s | |
| Poids de la chambre à vide | 108 t | |
| Poids des bobines du champ torique | 384 t | |
| Poids du noyau du transformateur | 2567 t | |
| | 1re phase | 2e phase |
| Puissance dissipée dans les bobines de $B_{tor}$ | 250 MW | 380 MW |
| Champ magnétique au centre | 2,77 T | 3,45 T |
| Courant plasma: forme circulaire | 2,6 MA | 3,2 MA |
| forme en D | 3,8 MA | 4,8 MA |
| Volts-seconde disponibles pour induire le courant plasma | 25 Vs | 34 Vs |
| Chauffage additionnel | 10 MW | 25 MW |

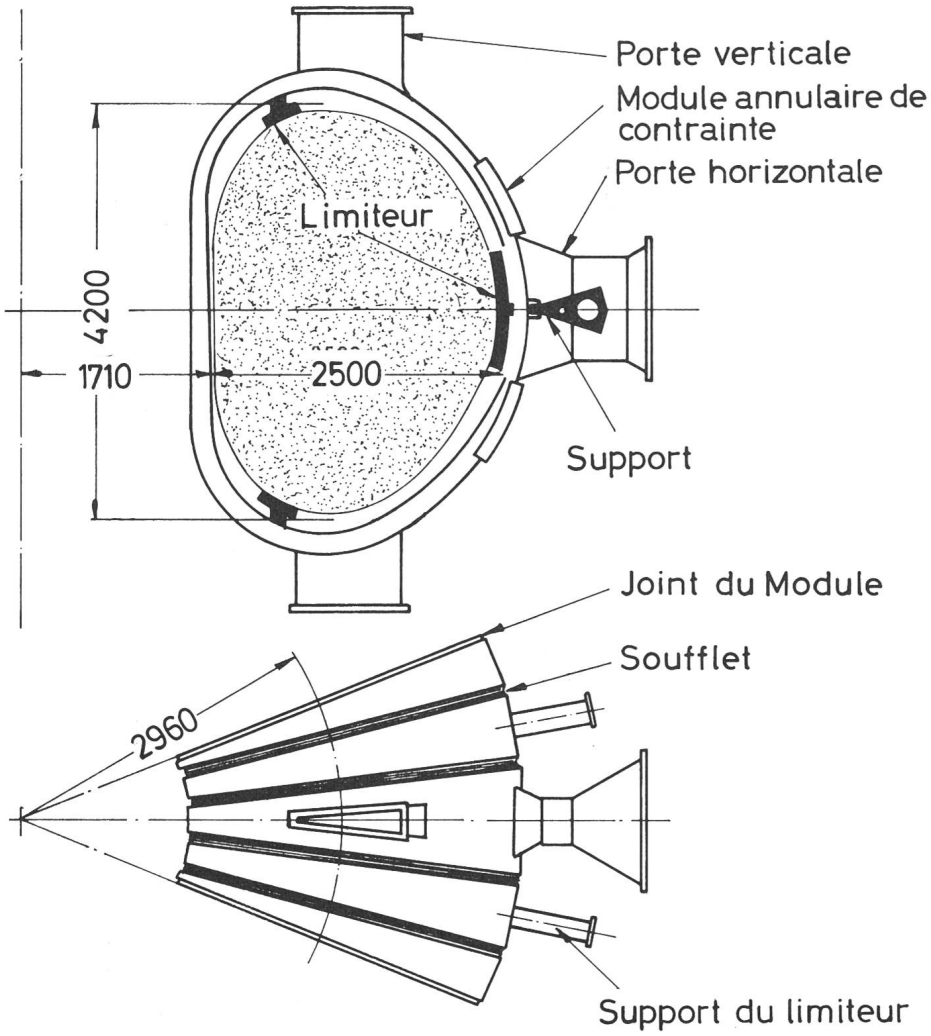


**Fig. 8 Coupe d'un octant de JET**
Les limiteurs permettent de fixer les dimensions du plasma, ce sont des sortes de «sabots» dont la position à l'intérieur de la chambre peut être modifiée

champs magnétiques élevés induisant de fortes contraintes. Ainsi, des études numériques de contraintes bi et tridimensionnelles ont été effectuées pour toutes les pièces mécaniques.

La chambre à vide est constituée de 32 sections rigides et à double paroi, en Nicrofer, interconnectées par des doubles soufflets (intérieurs et extérieurs) en Inconel 625. Elle a la topologie d'un récipient à double paroi, dont l'utilité est de faire passer dans la chemise externe le gaz carbonique chauffé à 500 °C pour l'étuvage ou l'eau pour le refroidissement en phase d'opération. L'étuvage, accélérant le dégazage du tore, permet d'obtenir un plasma de plus grande pureté. Les soufflets font que la chambre vide présente une résistivité électrique beaucoup plus grande que celle du plasma, ainsi le courant induit circule principalement dans le plasma.

La forme en D des bobines du champ torique à pour effet d'annuler les contraintes de torsion qu'elles subissent, elles n'ont donc pas besoin de structures de soutien individuelles. Ceci n'est pas le cas des bobines du champ polaire au centre du tokamak, qui subissent des contraintes très élevées, et qui sont renforcées par des cerceaux en acier. Toutes les bobines sont refroidies par circulation d'eau.

L'alimentation électrique utilise deux lignes à haute tension. La puissance pulsée est assurée par un réseau à 400 kV transformé à 30 kV. Les besoins annexes, moteurs, pompes, compresseurs, sont assurés par un réseau à 132 kV redistribué sur le site par des lignes à 11 kV et 415 V. Les bobines créant les champs magnétiques torique et polaire sont alimentées par deux générateurs à volants - machines tournantes - de 2600 MJ chacun.

Comme on l'a déjà mentionné, le plasma est initialement chauffé par dissipation ohmique du courant de plasma. On prévoit d'adjoindre à ce chauffage ohmique deux sources supplémentaires de chauffage: l'injection de neutres et le chauffage radiofréquence (RF). L'injection de neutres sera produite par deux sources, chacune pouvant délivrer 5 MW de puissance au plasma. Chaque source comprend huit canons à particules neutres (Plug-in Neutral Injector, PINI's) pouvant produire individuellement un courant d'hydrogène équivalent à 60 A, à une énergie de 80 keV. On prévoit d'augmenter l'énergie à 160 keV en utilisant du deutérium. L'injection de neutres a permis d'atteindre (sur PLT à Princeton) des températures de 75 millions de degrés.

Le chauffage RF utilise des ondes électromagnétiques émises depuis une source extérieure dont l'énergie est absorbée par le plasma. Cette dissipation se fait sur les particules dont la vitesse est proche ou égale à la vitesse de phase des ondes. Ces particules (dites «résonnantes») distribuent cette énergie acquise aux autres particules (dites «non résonnantes») par collision binaires. Sur JET, des ondes de fréquence 25-55 MHz ont été choisies. Ces fréquences correspondent à la fréquence de giration des ions autour des lignes de champ magnétique: on parle ici de ICRH (ion-cyclotron resonant heating). Ce type de chauffage RF a per-

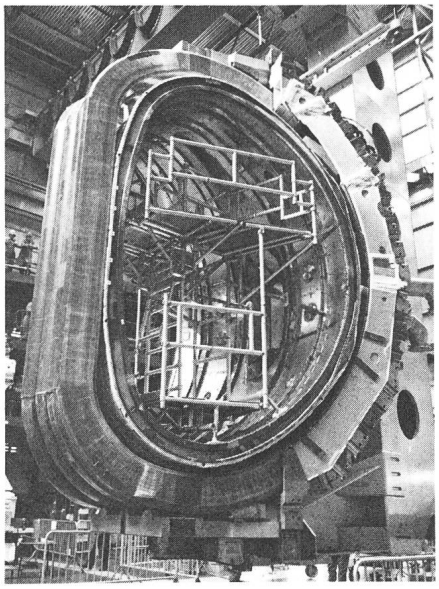

**Fig. 9 Vue d'un octant de JET inséré dans une carcasse contenant quatre bobines du champ torique**

mis d'augmenter la température du plasma dans le tokamak TFR à Fontenay-aux-Roses, de 10 millions de degrés, en couplant 2 MW de puissance au plasma. Il existe d'autres types de chauffage RF, suivant le type et la fréquence de l'onde émise[1]).

On prévoit d'injecter 30 MW de puissance RF dans le plasma, produits par dix générateurs, chacun relié à une des dix antennes réparties autour de la chambre à vide. Environ 50% de la puissance injectée sera couplée au plasma. La construction de ces antennes a posé un défi technologique, puisqu'elles sont proches du plasma et sont ainsi sujettes à de fortes contraintes mécaniques et thermiques. Par ailleurs, elles sont soumises à de très hautes tensions électriques. De plus, on doit pouvoir les installer à distance par des moyens de télémanipulations.

Une expérience de la taille et de la complexité de JET requiert une connaissance aussi complète que possible d'un nombre élevé de données expérimentales. Ceci implique d'abord un système de diagnostics qui puisse mesurer quantitativement tous les paramètres importants du plasma et ensuite un système de traitement de données capables de gérer intelligemment ces informations. Parmi les diagnostics utilisés sur JET, on trouve: les sondes magnétiques, les interféromètres à microondes, les interféromètres par diffusion Thomson d'un rayon laser, l'analyseur de particules neutres, etc.

Ces données sont receuillies immédiatement après chaque décharge. Une analyse partielle a lieu sur l'ordinateur ND-500 sur place, pour guider les expérimentateurs dans le choix des paramètres pour le choc suivant. Les résultats de cette analyse sont affichés 20 s après la décharge.

Une autre analyse, qui est exhaustive, est entreprise sur l'ordinateur vectoriel de Harwell (Cray), portant sur une décharge ou une série de décharges. Les résultats seront traités statistiquement afin de mettre en évidence les corrélations et les lois d'échelle. On projette de pouvoir analyser jusqu'à 100 décharges par semaine.

Actuellement JET emploie environ 500 personnes dont 160 chercheurs. Ces derniers proviennent pour ⅓ de Grande-Bretagne, les ⅔ restants venant des autres pays de l'Euratom. Cette proportion est inversée pour les services auxiliaires. Pour des problèmes spécifiques, JET peut faire appel à toutes les compétences individuelles existantes dans les laboratoires associés à l'Euratom et même aux entreprises qui ont participé aux diverses étapes de la construction. De plus, JET, par des contrats de recherche portant sur des projets bien déterminés (développement de nouveaux diagnostics, étude théorique de stabilité, ...), associe les laboratoires européens à ses préoccupations scientifiques immédiates.

La réalisation d'un projet aussi important que JET ne saurait se faire sans la collaboration de l'industrie, pour laquelle le développement et la construction de certains éléments ont d'ailleurs été de véritables défis technologiques. Les éléments de l'installation ont été fabriqués à 99% dans les 12 états membres et associés. Dans ce cadre, l'industrie suisse a pu démontrer sa compétitivité en fournissant entre autres des bobines de champ magnétique, une partie du système de haut vide, des composants électroniques et électromécaniques. C'est ainsi qu'au 1er décembre 1983, environ 5% du montant total des commandes de JET ont été attribuées à des entreprises helvétiques.

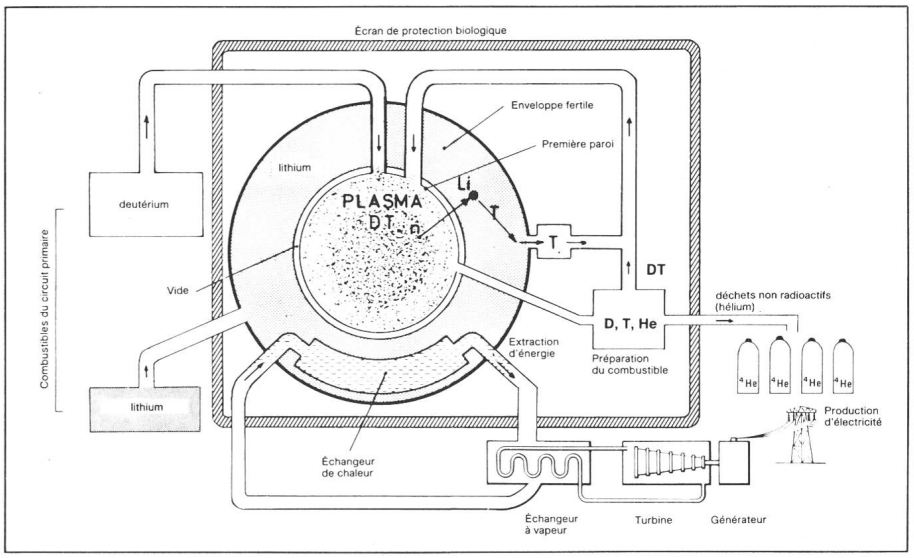


**Fig. 10 Schéma de principe actuel du réacteur à fusion nucléaire**

## 6. Conclusion

JET est encore une expérience de physique, comme d'autres grands tokamaks (par exemple le TFTR à Princetown, USA ou le JT-60 à Tokai Mura, Japon), elle pourrait être complétée par une expérience de technologie nécessaire à l'étude des matériaux à utiliser notamment dans la paroi de l'enceinte, la régénération du tritium dans le manteau de lithium en utilisant les neutrons de fusion. D'autres problèmes importants subsisteront encore et l'expérience post-JET aura bien des thèmes à affronter. Les objectifs devront être définis dans la seconde partie de cette décennie grâce aux résultats acquis sur JET, mais aussi grâce aux travaux essentiels réalisés dans les associations. On tiendra compte des progrès obtenus dans les diverses filières menant à la compréhension des problèmes importants. D'autre part, l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (Vienne, Autriche) synthétisera l'évolution des idées et des résultats, permettant ainsi la conception des nouvelles unités expérimentales de recherche. Ceci devrait aboutir à la construction d'un réacteur de démonstration (DEMO). Un réacteur commercial (fig. 10) serait envisageable dans le deuxième quart du siècle prochain.

[1]) Le chauffage par dissipation d'ondes d'Alfvén (notamment étudiée sur le TCA au Centre de Recherches en Physique des Plasmas), qui s'apparente à l'ICRH; le chauffage par injection d'ondes hybrides inférieures; l'ECRH (electron cyclotron resonant heating) où la fréquence de l'onde correspond à la fréquence cyclotronique électronique et qui chauffe directement les électrons puis, par collision, les ions. Ce dernier type de chauffage prometteur nécessite malheureusement des sources microondes millimétriques de haute puissance, de fréquences très élevées (60–150 GHz) qui sont en cours de développement (au CRPP, avec une collaboration extérieure, un gyrotron de 120 à 150 GHz est en étude).

## L'EURATOM et la participation suisse

Créée en 1957 pour contribuer au développement des usages pacifiques de l'énergie atomique, la Communauté Européenne de l'Energie Atomique, ou Euratom, a pour buts essentiels la coordination et la stimulation des recherches, l'échange et la mise en commun des connaissances acquises, l'élaboration de règles homogènes de protection sanitaire, la fixation d'objectifs généraux devant déterminer l'orientation de la nouvelle industrie et enfin la création d'installations communes pour certains projets importants ou intéressant plusieurs pays.

Des états non membres du Marché Commun Européen peuvent adhérer à des projets spécifiques sans devoir participer à la totalité des programmes Euratom. C'est en tant qu'«Etat tiers associé» que la Suisse a conclu en 1979 un contrat de coopération avec Euratom en matière de fusion thermonucléaire, devenant ainsi après la Suède, le deuxième Etat associé.

La participation de la Suisse au budget de l'Euratom s'élève environ à 3,5% de celui-ci. Une grande partie du budget global de l'Euratom est investie dans la construction et l'exploitation du JET, une autre est redistribuée vers les centres associés. C'est ainsi que l'Euratom contribue aux travaux des divers instituts suisses impliqués dans la recherche en fusion en finançant 25 à 45% de leurs dépenses.

L'exécution de la fraction suisse de ce programme de recherches est effectuée principalement à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, au Centre de Recherches en Physique des Plasmas (CRPP). Une participation à ce programme est réalisée à l'Institut Suisse de Recherches Nucléaires (SIN) situé à Villingen et à l'Institut Fédéral des Réacteurs (EIR à Würenlingen). Grâce à l'association de la Suisse au programme Euratom, notre industrie participe à la construction de plusieurs grandes expériences européennes et au développement de nouveaux appareillages. Elle s'est montrée compétente et compétitive dans les domaines de haute technologie ayant participé ainsi à la construction du JET. Des mandats de l'ordre de 32 millions de francs suisses ont été ainsi obtenus par les entreprises suisses (décembre 1983).

*Tokamak à Lausanne*

Environ trente tokamaks sont actuellement opérationnels dans le monde. Leur objectif scientifique est l'étude des problèmes liés à ce type de configuration, sans systématiquement prétendre atteindre les paramètres de fusion.

L'objectif principal du tokamak TCA (Tokamak pour l'étude du chauffage par absorption résonnante d'ondes d'Alfvén) de Lausanne est l'étude d'un plasma soumis à un rayonnement haute fréquence (1-5 MHz). L'énergie contenue dans ce rayonnement est absorbée par les particules du plasma qui s'échauffent. L'efficacité du chauffage par cette méthode a été démontrée. La température du plasma augmente de 50% environ, mais comme dans toutes les autres méthodes de chauffage HF le taux d'impuretés croît pendant la phase de chauffage. Grâce à sa conception très flexible, le TCA permet également l'étude de problèmes plus généraux, tels que la stabilité du confinement, les turbulences dans le plasma, les effets des impuretés métalliques issues des parois qui viennent refroidir le plasma. Des études portant sur la connaissance du plasma ont aussi cours au CRPP notamment sur des machines linéaires de diverses configurations (avec et sans champ magnétique). Des méthodes de diagnostic du plasma utilisant le laser sont en cours de développement. Relevons l'existence de diverses collaborations étroites à l'échelle mondiale (USA, Japon, RFA, France, etc.) entretenues par le CRPP.

*Les travaux sur les supraconducteurs au SIN*

Les futures recherches en fusion contrôlée nécessiteront des champs magnétiques beaucoup plus élevés que ceux réalisables aujourd'hui.

L'Institut Suisse de Recherches Nucléaires (SIN) à Villingen est en train d'étudier des bobines spéciales refroidies à −269 degrés Celsius (température de l'hélium liquide). Ces aimants dits «supraconducteurs» peuvent produire des champs magnétiques 10 fois plus élevés que les électro-aimants actuels. Ce travail s'effectue en collaboration avec d'autre laboratoires européens (ENEA, Frascati-Italie et ECN, Petten-Hollande).