

**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:** 84 (1993)

**Heft:** 15

**Artikel:** Comment recréer l'énergie du soleil? : Un tokamak comme cœur de réacteur de fusion thermonucléaire contrôlée

**Autor:** Paris, Pierre J.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-902702>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 04.04.2025

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

Trente-cinq ans après la Conférence de Genève portant sur l'utilisation de l'atome à des fins pacifiques (1958), date à laquelle la «déclassification» des recherches a été effectuée, qu'en est-il de la recherche en matière de fusion thermonucléaire contrôlée? L'Europe a opté principalement pour la voie du confinement magnétique, plus fortement couplée à la recherche civile que la fusion inertielle. L'impulsion donnée par les résultats obtenus dans les grands tokamaks, tels que JET, TFTR, JT60-U et Doublet III-D, a stimulé la collaboration mondiale face à ce défi du 21<sup>e</sup> siècle. Cette collaboration se cristallise autour du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), pour faire d'un tokamak un cœur de réacteur.

# Comment recréer l'énergie du soleil?

## Un tokamak comme cœur de réacteur de fusion thermonucléaire contrôlée

■ Pierre J. Paris

### Quelle énergie pour le futur?

D'ici 2050, la population mondiale devrait doubler et la consommation énergétique tripler, quelles possibilités s'offrent à nous pour affronter ces prévisions qui paraissent insurmontables. Comment offrir à l'humanité un horizon de progrès où la pénurie énergétique en serait exclue?

Les réserves en pétrole – principal combustible des pays industrialisés – sont estimées à 50 ans d'exploitation. Peut-être 100 ans avec le pétrole offshore (exploitation en mer + sables bitumeux), mais à quel coût? Il faut donc lui trouver une énergie de substitution qui soit, si possible quasi inépuisable, géographiquement bien répartie, économique et qui ne porte pas atteinte à notre éco-système. Le tableau I donne une idée de la durée

Charbon	80 – 400 a
Pétrole	40 – 80 a
Gaz	70 – 100 a
Uranium (sans surgénérateur)	50 – 100 a
Uranium + Thorium (avec surgénérateur)	1000 a – ?
Lithium (réacteur D-T)	150 – >1000 a
Deutérium (réacteur D-D)	10 <sup>6</sup> a – ∞

Tableau I Estimation des réserves mondiales en combustibles

estimée en années des réserves mondiales existantes.

Le charbon pourrait représenter le combustible d'attente (≈ 400 ans) et serait sans doute le substituant idéal permettant de produire économiquement des hydrocarbures de synthèse liquides ou gazeux pouvant être utilisés dans les convertisseurs d'énergie traditionnels. Cependant, la trop grande consommation de ce combustible aurait des effets néfastes sur notre éco-système, dûs aux dégagements importants de produits chimiques toxiques ou cancérigènes.

Actuellement, la tendance est aux énergies «propres»: solaire, éolienne, marémotrice, géothermique, biomasse, etc. Celles-ci sont localisées et intermittentes et ne sauraient suffire à nos besoins croissants (2/3 de la production énergétique mondiale sont consommés par les pays industrialisés, 40% de ceux-ci par les USA), elles peuvent cependant devenir un apport sensible.

Cependant, ces énergies combinées entre elles suivant le lieu peuvent être suffisantes pour couvrir les besoins d'une société peu industrialisée. L'énergie hydraulique peut suffire, dans certains pays, à couvrir la consommation d'électricité, mais elle ne pourrait être le substituant énergétique du pétrole, de plus elle est souvent utilisée à un grand pourcentage de ses potentialités, ce qui ne laisse pas percevoir un accroissement sensible de son développement dans les pays industrialisés.

Le nucléaire à fission souffre du fait que les réacteurs conventionnels n'ont, du fait des réserves limitées d'uranium, devant être en-

Cette vue d'ensemble de la recherche internationale en fusion fut présentée dans le cadre d'une journée ETG qui eut lieu le 24 mars 1993 à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

#### Adresse de l'auteur:

Pierre J. Paris, ing.-phys. DPE,  
Centre de Recherches en Physique des Plasmas  
(CRPP/EPFL), 21, avenue des Bains, 1007 Lausanne.

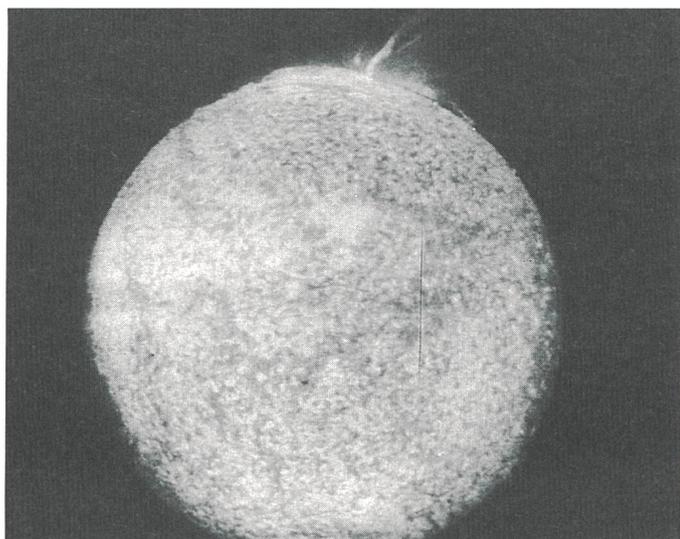


Figure 1 Le soleil, un énorme réacteur thermonucléaire, pas toujours calme! Eruption solaire du 21 août 1973

riche, pas un grand avenir. Les surrégénérateurs présentent par contre une potentialité plus grande, mais leur exploitation est contestée. Autres points noirs dans cette utilisation du nucléaire: l'entreposage et le traitement des déchets radioactifs à long terme.

Il reste qu'un potentiel important est offert par les réserves quasi-inépuisables de deutérium, à condition d'amener au bout les recherches en fusion thermonucléaire contrôlée!

### Un exemple de réacteur: le soleil

Dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent à des températures de l'ordre de 10 millions Kelvin (au centre du soleil

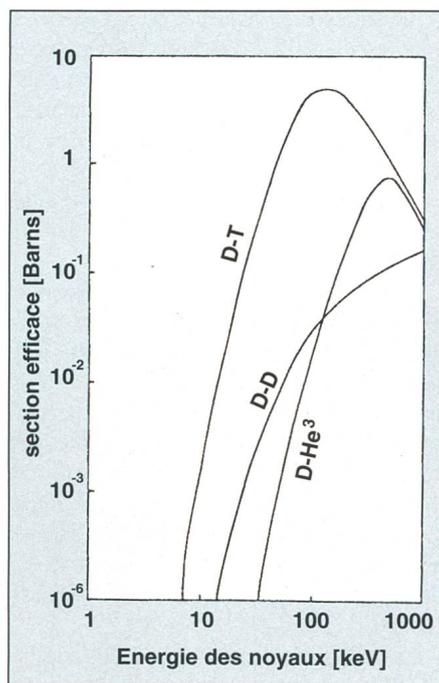
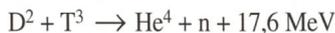


Figure 2 Sections efficaces de réactions de fusion

1,5·10<sup>7</sup> K) et à des pressions considérables (au centre du soleil, 10<sup>11</sup> atm; la densité est de l'ordre de 10<sup>32</sup> particules/m<sup>3</sup>). Ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise, le confinement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation. Le soleil est un réacteur dont la surface reflète les turbulences et les instabilités que l'on trouve dans les plasmas (figure 1).

### La fusion thermonucléaire

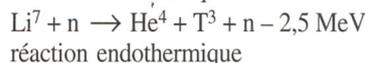
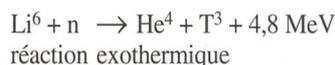
La réaction proton-proton, qui a lieu dans le Soleil, possède une faible réactivité. Ceci entraînerait des temps de réactions extrêmement longs, des millions d'années, en laboratoire. Dans un réacteur où il faudra chauffer et contenir le combustible, il est nécessaire d'avoir une plus forte probabilité de fusion. La réaction principale de fusion thermonucléaire envisageable en laboratoire utilise les isotopes lourds de l'hydrogène: le deutérium et le tritium,



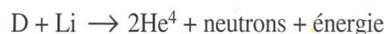
L'énergie libérée, par cette réaction D-T, est de l'ordre de 100 MWh pour 1 gramme de combustible (comparativement dix millions de fois plus que par la combustion d'un gramme de pétrole)!

Le deutérium est omniprésent dans la nature, dans l'eau (34 grammes par mètre cube)

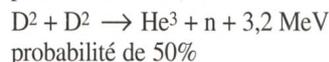
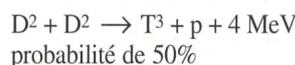
bien répartie sur le globe (>10<sup>12</sup> tonnes). Le tritium est une forme radioactive (émetteur β de 5,7 keV en moyenne, 18,6 keV au maximum) de l'hydrogène qui a une courte demi-vie radioactive (12,36 ans); celui-ci n'existant pas dans la nature, il doit être régénéré à partir du lithium, un métal léger. Il y a suffisamment de réserves de lithium (avec 7,5% de Li<sup>6</sup> et 92,5% de Li<sup>7</sup>) pour fournir l'électricité nécessaire au monde pendant plusieurs millénaires. La régénération du tritium s'effectue à travers les réactions:



L'équation finale de la chaîne (D, Li) est donc:



Des réacteurs plus avancés pourraient utiliser seulement le deutérium, réaction plus attrayante, mais plus difficile encore à réaliser que la réaction D-T. Les lacs suisses pourraient fournir du deutérium pour 10 réacteurs pendant plusieurs millénaires. La réaction D-He<sup>3</sup> semble intéressante car sans neutron comme sous-produit, mais cet isotope de l'hélium est rarissime sur Terre.



### Fusion en laboratoire: magnétique ou inertielle?

Les sections efficaces des réactions de fusion (figure 2) montrent que pour atteindre des seuils de rentabilité énergétique il faut que les noyaux soient chauffés à des températures supérieures à 100 millions de degrés Kelvin. Pour un mélange de deutérium et de tritium à ces températures, le critère de Lawson indique que le produit du temps de confinement de l'énergie, τ<sub>E</sub> (identique à la qualité d'isolation thermique), fois la densité de particules, n, doit être supérieur à 10<sup>20</sup> s·m<sup>-3</sup>. On exprime aujourd'hui très souvent le produit de fusion en tenant compte de la tem-

Température du mélange D-T:	100-200 millions Kelvin (MK)
Temps de confinement de l'énergie:	1-2 secondes
Densité au centre:	Un millième de gramme/m <sup>3</sup> (2,5·10 <sup>20</sup> particules/m <sup>3</sup> )
Produit de fusion: (Critère de Lawson)	n·τ <sub>E</sub> ·T <sub>i</sub> > 6·10 <sup>22</sup> m <sup>-3</sup> ·s·MK

Tableau II Conditions d'ignition pour plasma D-T

pérature des ions,  $T_i$ , alors l'ignition aura pour seuil une valeur:

$$n \cdot \tau_E \cdot T_i > 6 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{MK}$$

Aux températures supérieures à 100 millions de degrés Kelvin, la matière se trouve à l'état de plasma, c'est à dire sous forme ionisée, ce sont alors les propriétés physiques des plasmas dont on tiendra compte.

Pour parvenir à la réalisation d'un bilan énergétique positif essentiellement deux voies ont été explorées: la voie rapide et la voie lente.

**La voie «rapide» ou «par confinement inertiel»**

Une petite sphère de combustible est comprimée par un faisceau de lumière laser ou d'ions (légers ou lourds) provoquant l'ignition dans la partie centrale très dense (environ 1000 à 10000 fois la densité du solide,  $n = 10^{30}$  à  $10^{32} \text{ m}^{-3}$ ) pendant une très courte durée (pico ou nanoseconde) (figure 3). Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'actuellement on se heurte au mauvais rendement des lasers et des sources de particules qui nécessitent le développement d'accélérateurs. D'autre part ces domaines, liés à la recherche militaire, sont pour la plupart encore «nationaux et classifiés», quoiqu'à l'heure actuelle on désirerait les faire supporter par les budgets «civils».

Deux approches peuvent faciliter l'implosion de la cible:

- la compression directe, dans laquelle l'énergie du faisceau est utilisée pour déclencher l'ablation de la partie externe de la cible, l'effet rocket prend alors le dessus et on assiste à la compression du combustible, puis à l'explosion.
- la compression indirecte où l'énergie du faisceau est confinée dans une cavité dans laquelle la capsule de combustible est contenue (effet hohlraum), le gain en illumination est alors supérieure et l'homogénéité d'ablation améliorée.

Actuellement quelle que soit la façon d'illuminer la cible, on utilise une cible structurée de manière à contenir du D-T solide enrobé dans une sphère à plusieurs coquilles permettant de transformer l'énergie des faisceaux en rayons X, facilitant le couplage de l'énergie pour que la combustion nucléaire ait lieu en un temps plus court que le temps d'explosion hydrodynamique de la matière. Cette propriété qui donne son nom à «l'inertiel» traduit également le gain en compression (30 à 50 pour les faisceaux de particules et 100 à 200 pour les lasers) sans lequel la fusion inertielle ne serait pas viable. L'énergie à fournir serait trop élevée sans parvenir à l'ignition du combustible. Dans le cas présent, à la différence de la fusion magnétique, l'ignition – soit la participation des

Figure 3 Principe de la fusion inertielle

- a Introduction d'une capsule D-T dans un réacteur «inertiel»
- b Les faisceaux laser compriment la capsule en évaporant et ionisant la périphérie de la capsule
- c Après l'implosion, l'explosion emporte l'énergie (de fusion) vers la paroi du réacteur

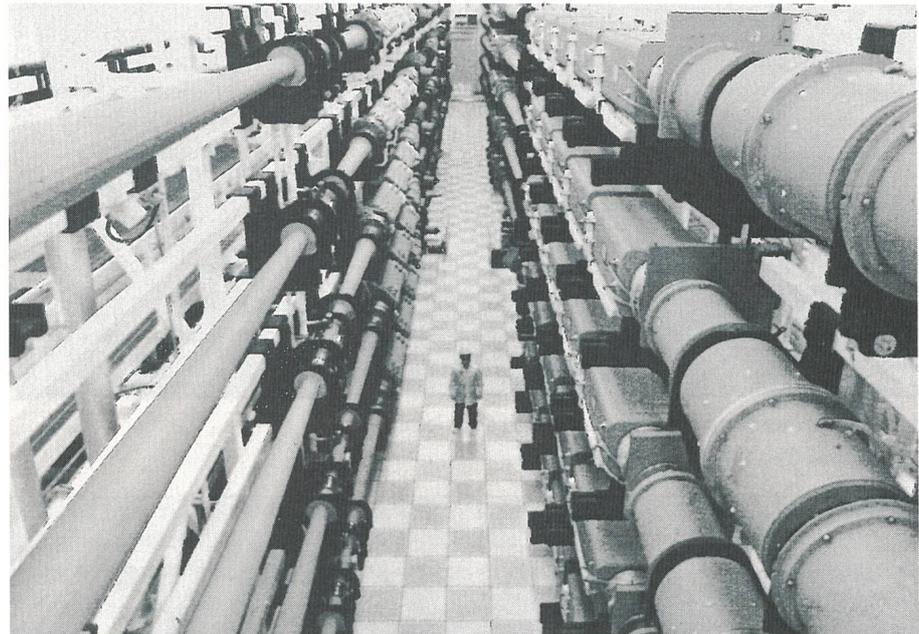
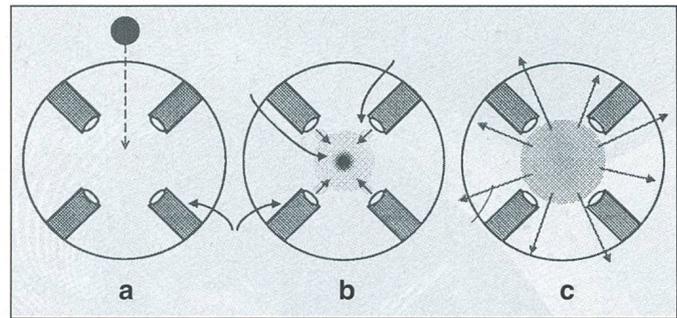


Figure 4 Nova, le grand laser de Livermore USA

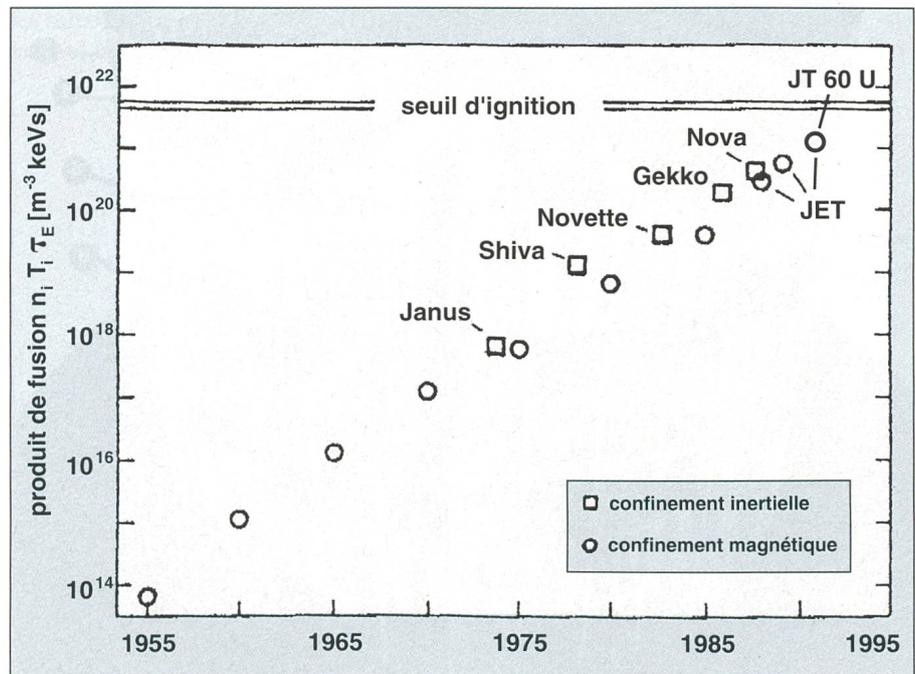


Figure 5 Performance des expériences inertielles en comparaison avec JET et JT 60-U

particules d'hélium au chauffage du combustible – est atteinte avant le breakeven technique qui tient compte du bilan d'énergie du réacteur.

Les lasers les plus importants comme Nova (Livermore USA, 125 kJ, figure 4), Gekko XII (Osaka/Japon, 20 kJ), Phebus (Limeil/France, 20 kJ) et Omega (Rochester/

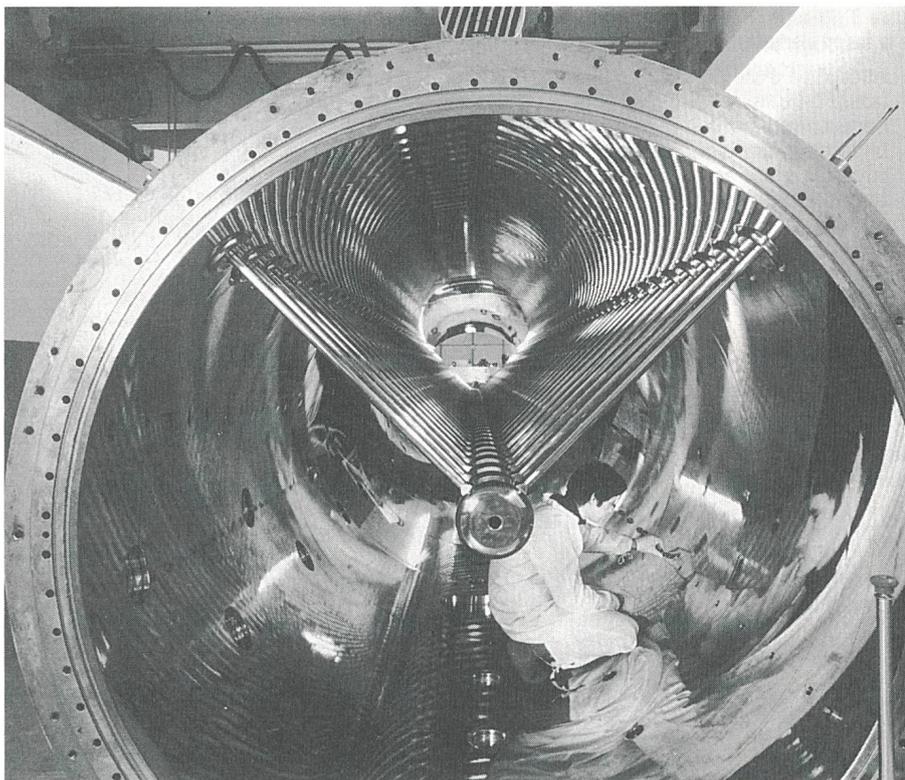


Figure 6 Eléments d'un accélérateur pour faisceau d'ions lourds  
Installation du GSI à Darmstadt/Allemagne

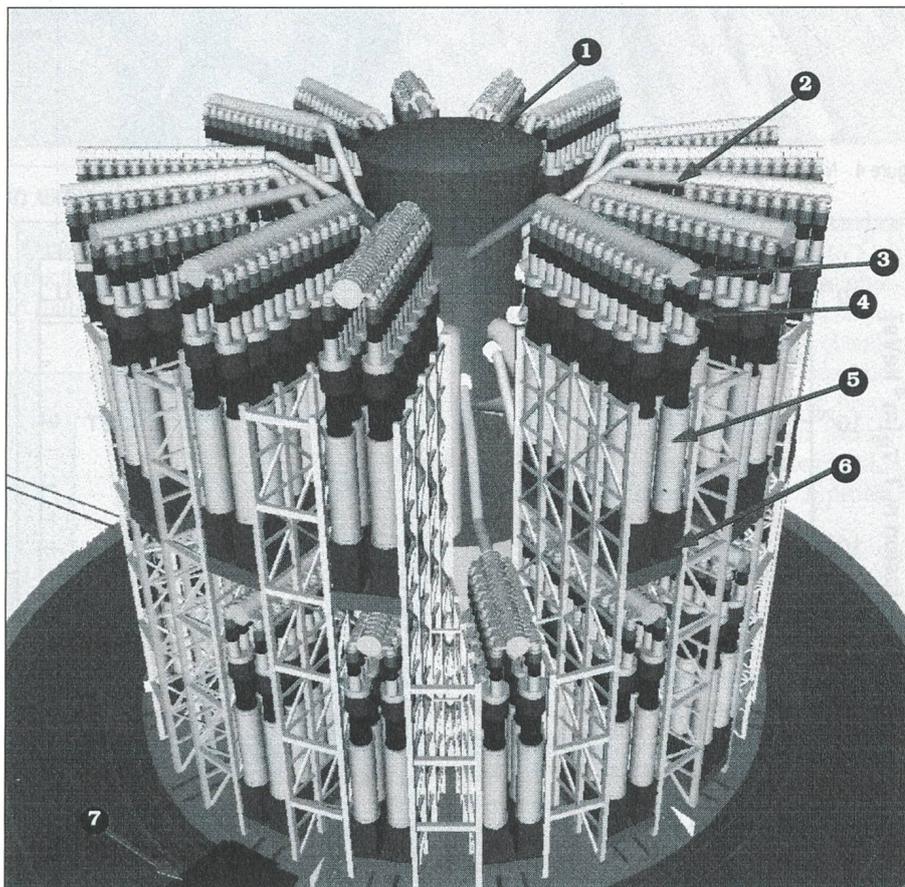


Figure 7 Projet Libra-Lite, futur concurrent d'Iter?

Dans l'installation ions légers «Libra-Lite», à Sandia, pour la fusion inertielle la compression de la capsule sera réalisée à l'aide d'ions légers.

- |   |                                    |   |                           |
|---|------------------------------------|---|---------------------------|
| 1 | chambre du réacteur                | 5 | étage temps: 5 $\mu$ s    |
| 2 | générateur des faisceaux           | 6 | capacités et commutateurs |
| 3 | cellules intégrantes               | 7 | charriot de transport     |
| 4 | lignes de formation des impulsions |   |                           |

USA, 3 kJ en UV) ont permis d'obtenir des compressions de matière (à faible température) de 100 à 200 fois par couplage direct ou indirect; des flux neutroniques de quelques  $10^{13}$  ont été obtenus. Le meilleur produit de fusion a été atteint sur Nova avec  $2 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ . Les résultats obtenus par les lasers sont montrés figure 5.

Les expériences effectuées par ions légers et ions lourds ne sont pas au même niveau, même si la voie par ions lourds représente aujourd'hui une solution qui semble prometteuse, elle n'en est qu'au tout début. L'accélérateur à ions lourds (figure 6), utilisé au GSI à Darmstadt, en Allemagne, en est au stade préliminaire. A Sandia, USA, l'installation PBFA-II produit des impulsions de plusieurs mégajoules d'ions légers (Lithium) dont l'énergie est de 30 MeV, la focalisation et le transport d'un tel faisceau restent les éléments-clé d'une telle investigation. Le projet international, associant les USA et l'Allemagne, Libra (figure 7), représente cette filière.

#### La voie «lente» ou «par confinement magnétique»

Un plasma (de basse densité) tenu emprisonné dans un champ magnétique réagit pendant un temps supérieur à la seconde. Dans cette seconde voie, c'est l'installation du type tokamak qui est actuellement la plus performante. Un anneau de plasma, dans lequel un courant électrique  $I_p$  circule, est maintenu, suspendu par des forces magnétiques, dans une enceinte de forme torique. Le courant circulaire  $I_p$ , induit par des champs magnétiques variables, sert en même temps à chauffer le plasma par effet Joule. Dans cette configuration on réalise les expériences dans du «vide», le nombre de particules étant  $10^5$  fois moins nombreuses que dans l'atmosphère ambiante. Le confinement magnétique utilise les propriétés électromagnétiques des particules chargées. Le principe de fonctionnement d'un tokamak en général et celui du Tokamak à Configuration Variable du CRPP en particulier est décrit plus en détail dans l'article de A. Perez [1].

Les performances de cette configuration s'avèrent être meilleures lorsque:

- le tore est compact,
- le courant  $I_p$  du plasma est grand, jusqu'à une valeur maximale où des disruptions (perte de confinement) ont lieu,
- le champ magnétique est grand (ceci permet d'accroître le courant),
- les dimensions de la machine sont importantes.

Ces critères ne s'accordent pas toujours facilement avec les solutions techniques et technologiques. C'est pourquoi des machines du type Stellarator, dans lesquels aucun courant ne circule dans l'anneau de plasma, rede-

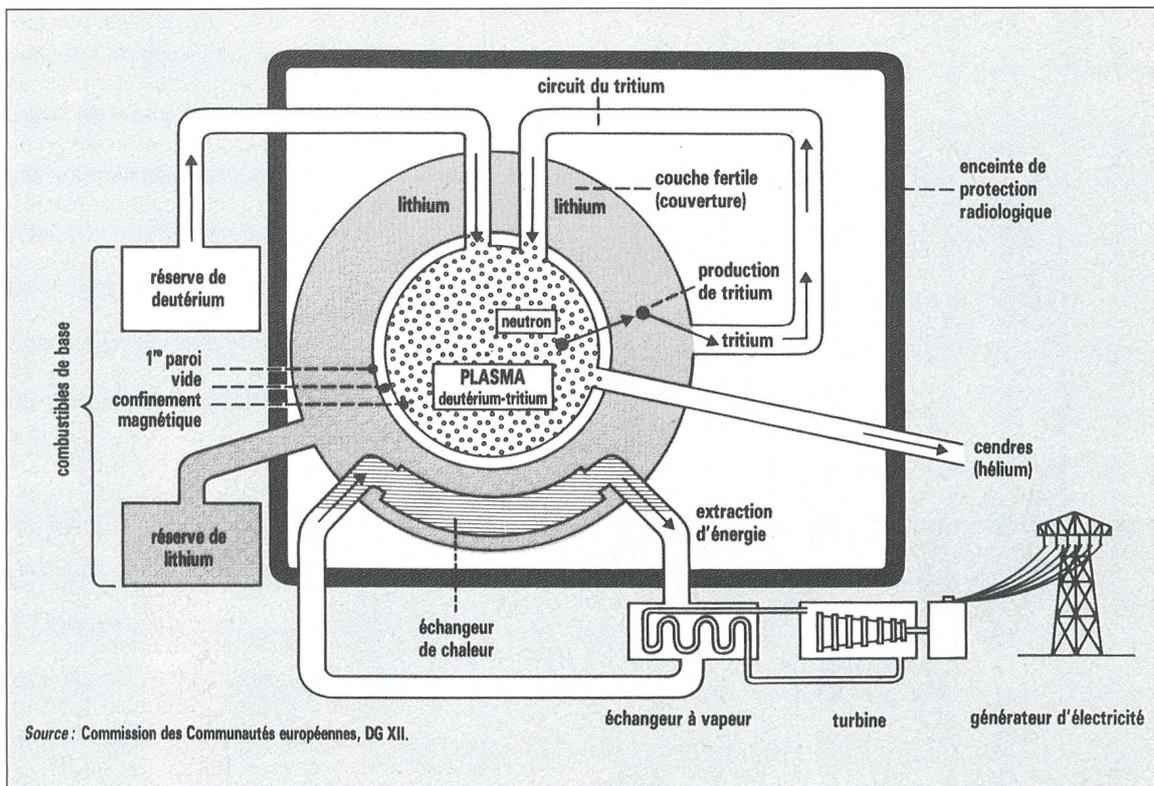


Figure 8 Schéma d'un réacteur

viennent d'actualité. On évite ainsi les disruptions dues au courant. Les Stellarators ont la particularité de ne pas nécessiter de transformateur d'induction ce qui peut être une limite pour un tokamak, à cause des grands courants à produire.

Un autre aspect réside dans le fait que le plasma à haute température devient meilleur conducteur, le chauffage par effet Joule n'est alors plus efficace, et on doit compléter le chauffage ohmique par des injections d'atomes neutres énergétiques ou par des ondes spécifiques aux paramètres et aux particules des machines.

En laboratoire les conditions de viabilité pour qu'un réacteur «à confinement magnétique» soit «allumé» et «rentable» sont résumées dans le tableau II.

Ces conditions, qui sont celles d'ignition, spécifient que l'énergie cédée par les particules d'hélium (sous-produit de la fusion) entretient les réactions dans le combustible fraîchement injecté dans le tore. Les neutrons, pour leur compte, régénèrent le tritium dans le manteau du réacteur, en même temps qu'ils cèdent de l'énergie au système d'échangeur de chaleur (figure 8).

### Éléments critiques pour le choix des réacteurs à fusion

Un réacteur produisant de l'énergie doit satisfaire à un certain nombre de critères pour qu'il soit socialement accepté. L'énergie de fusion, basée sur les réactions D-T, répond au

moins en partie à ces critères. Il est possible de dégager un grand nombre de choix dans le design pour approcher de ceux-ci. Parmi les avantages et les désavantages nous pouvons retenir:

- L'approvisionnement doit être garanti par des combustibles existants en quantité abondante et bien répartis sur le globe. C'est le

cas pour le deutérium et en partie pour le lithium.

- La propreté chimique, absence d'émission de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ou de substances toxiques: La fusion ne créera pas de pollution gazeuse, origine de l'effet de serre ou des problèmes de pluies acides.

- Un impact radiologique faible sur l'environnement par rapport au fond naturel

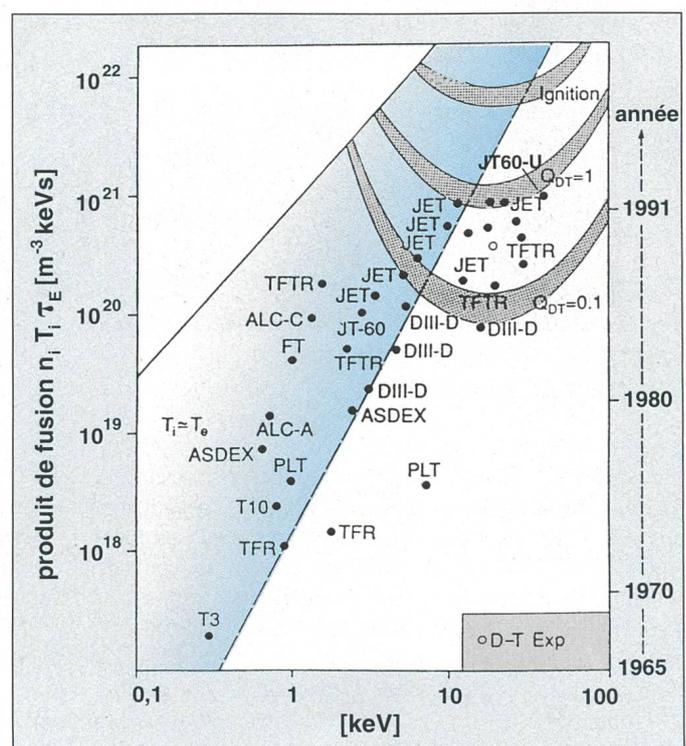
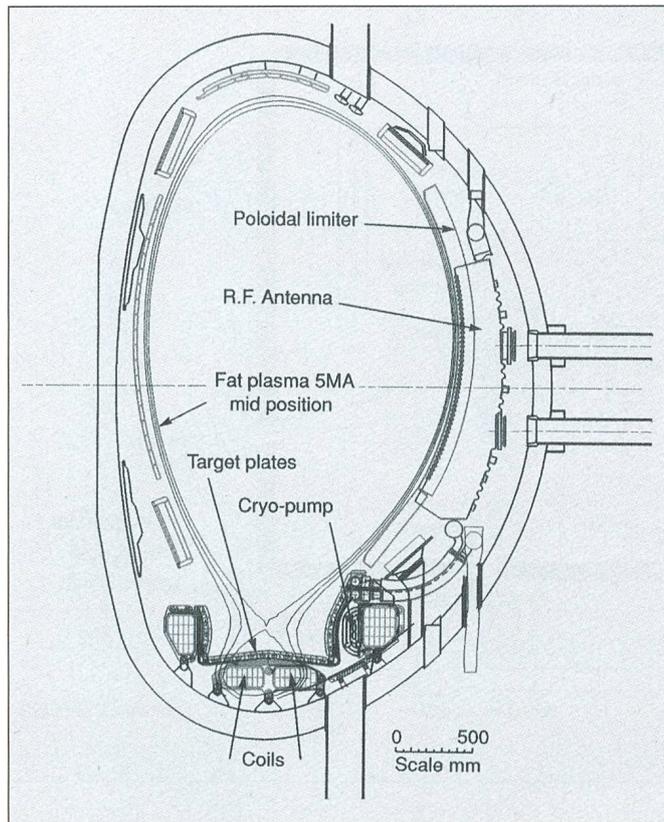


Figure 9 L'évolution des performances dans la filière tokamak  
NB: 1 keV  $\approx$  10 million Kelvin

Figure 10 JET: schéma du diverteur (écorceur) magnétique pompé



développant des matériaux de faible activation, l'entre-posage des composants radioactifs des réacteurs pourrait être limité à moins d'une centaine d'années – ainsi l'entreposage des déchets produits ne serait pas envisagé à long terme, la gestion en serait facilitée et améliorée. Par contre la quantité de ces composants risquent d'être importante en volume.

- La résistance aux accidents et aux catastrophes: Les céramiques ou les alliages contenant du lithium dans le manteau doivent être sélectionnés avec beaucoup de prudence de manière à se débarrasser des problèmes liés aux incendies des métaux alcalins.

- La fiabilité technique: La chaleur résiduelle est faible (la densité de puissance dans un réacteur à fusion pourrait être de 0,5–1 MW<sub>th</sub>/m<sup>3</sup> comparée à 15MW<sub>th</sub>/m<sup>3</sup> dans un réacteur à fission). Des matériaux adaptés aux futurs réacteurs sont en cours de développement et devraient être prêts. Des moyens de robotique complexes, permettant de manipuler des parties activées dans le réacteur, sont également testés, notamment sur JET.

- L'acceptabilité économique: Une centrale de 1000 MW<sub>e</sub> consommerait 300 kg de lithium et 90 kg de deutérium par an. A titre de comparaison ceci équivaldrait à brûler 2 000 000 de tonnes de pétrole ou 3 600 000 de tonnes de charbon. Ce n'est pas le coût des combustibles qui est important. Par contre le coût de construction d'un tel réacteur qui reste complexe peut être élevé. De plus le remplacement fréquent de la première paroi du réacteur, soumise au flux neutronique intense, peut constituer un problème de disponibilité en phase de production d'énergie; autre raison majeure de rechercher des matériaux adaptés.

## De JET à Iter

### Une étape primordiale: les résultats de JET

L'expérience européenne JET (Joint European Torus) implantée à Culham, près d'Oxford en Grande-Bretagne, a franchi en 1991 une étape primordiale. Pour la première fois, du tritium a été introduit dans le tore sous forme d'atomes fortement accélérés à partir des injecteurs de chauffage par atomes neutres de deutérium. Les conditions principales étaient pour ces décharges: un courant de plasma de 3 MA et un champ magnétique torique de 2,8 Tesla. L'énergie contenue dans le plasma par rapport à l'énergie investie pour la production de celui-ci représente un bilan énergétique de l'ordre de 0,12. Si le tritium avait été injecté à 50%, au lieu de 11%, du mélange (quantité égale à celle du deutérium), le bilan énergétique aurait été de l'ordre de l'unité, si tant est qu'on puisse extrapoler. L'évolution des résultats des tokamaks est

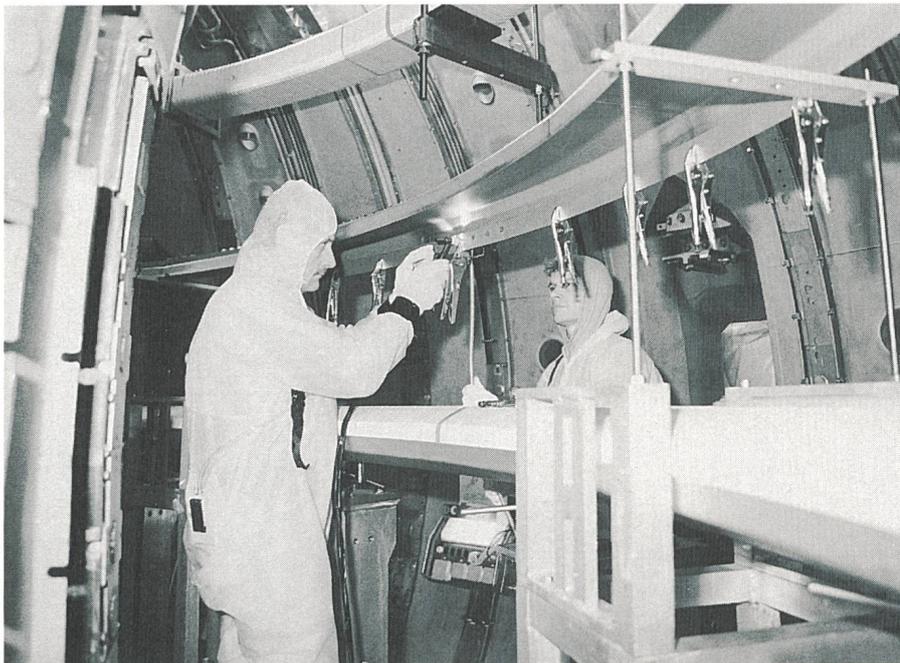


Figure 11 Vue de l'intérieur de l'enceinte du JET  
Construction in-situ du diverteur

de rayonnement: Les combustibles primaires (Li, D) et le sous-produit de réaction He ne sont pas radioactifs. Le tritium radioactif est produit dans la centrale et devrait y rester. Seule une première quantité, nécessaire à la première charge du réacteur, doit être transportée. La régénération in-situ du tritium réduit de manière considérable l'inventaire du tritium nécessaire à la production d'énergie. La quantité de combustible dans le

réacteur est faible, elle est juste suffisante pour un fonctionnement de quelques dizaines de secondes. L'interruption de l'écoulement du combustible ou un défaut du système de confinement se traduirait par un arrêt des réactions.

C'est, cependant, un processus nucléaire qui pourrait être à l'origine d'un faible niveau de radioactivité. En choisissant avec précaution les matériaux des parois et en

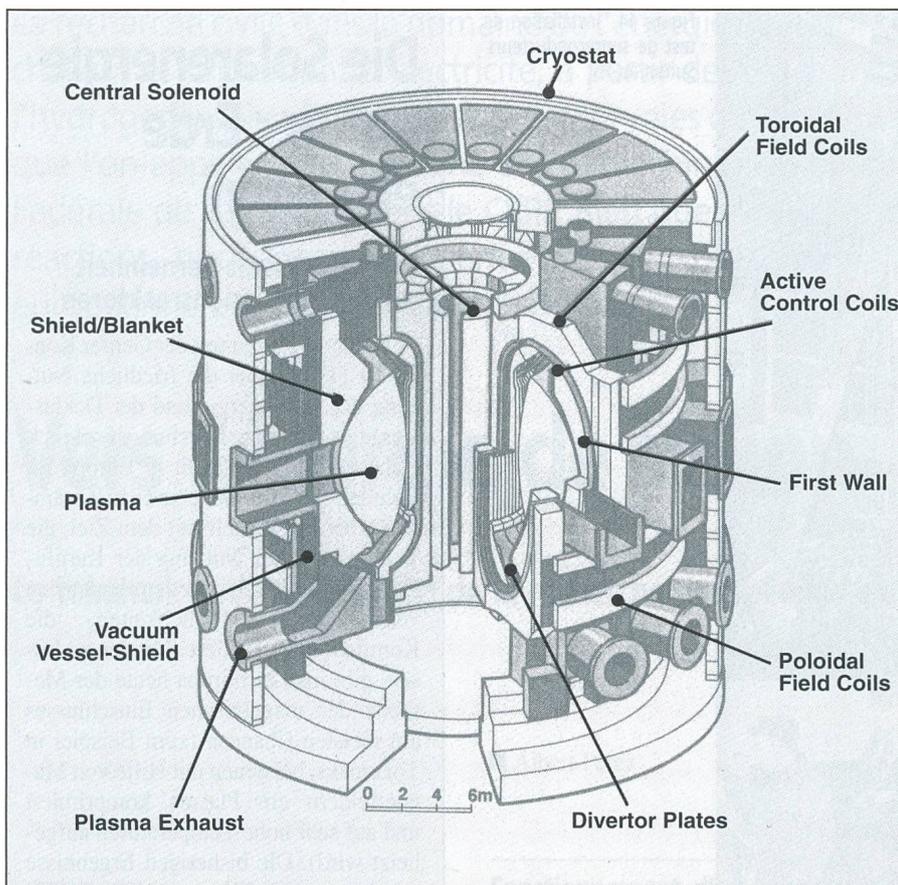


Figure 12 Schéma du tokamak Iter

présentée dans la figure 9, on constate que les performances vont de paire avec le temps et l'exploitation de machines de plus en plus grosses.

La maîtrise de la technologie du tritium est un autre aspect de cette étude préliminaire. Les équipements de manipulation du tritium et les méthodes de récupération ont pu être testés, de même que le temps de transit du tritium dans l'installation expérimentale.

Afin de réduire l'activation de l'enceinte, due aux neutrons issus des réactions de fusion, les expériences avaient été jusqu'alors conduites avec des plasmas de deutérium. Pour cette même raison, le nombre d'expériences D-T a été limité. JET procède actuellement à des modifications à l'intérieur de la chambre à vide, pour permettre la mise en place d'un écorceur magnétique pompé (figure 10 et 11) qui aura pour tâche de réduire la migration des impuretés issues des parois et de pré-étudier le pompage des cendres d'hélium.

Il est prévu d'opérer à pleine puissance avec le mélange 50/50 de deutérium et de tritium au cours de la dernière année de fonctionnement de l'installation (95/96).

### Le projet Iter

Le projet JET a démontré les avantages majeurs d'une collaboration multinationale. L'étape suivante, un réacteur expérimental,

semble pouvoir s'étendre à une collaboration encore plus large qui inclut le Japon, l'URSS, les USA et l'Europe. Ce sera le projet Iter (International Thermonuclear Experimental Reactor); la figure 12 représente une vue éclatée de ce que pourrait être Iter. Un design conceptuel d'Iter basé en grande partie sur les résultats de JET a été établi, et les quatre partenaires ont agréé sur 3 sites pour la phase

de détails d'ingénierie (General Atomie à San Diego/USA, Max Planck à Garching/Allemagne, Jaeri à Naka au Japon), le siège administratif a été fixé à Moscou. Le réacteur devra produire environ 1000–3000 MW<sub>th</sub> de puissance de manière quasi continue, les périodes allant jusqu'à 1000 secondes. Pour cela un courant de 25 MA devra être généré à l'intérieur d'un champ magnétique de 5–6 Teslas. Les bobinages utilisés seront supraconducteurs. Plusieurs thèmes seront abordés:

- étudier le domaine de l'ignition et les conditions d'opération
- définir les technologies de la première paroi, de l'échappement et de l'approvisionnement en combustible frais
- tester les modules de manteau de régénération du tritium
- démontrer que le coût par GW est comparable aux autres sources d'énergie
- démontrer les avantages de la fusion magnétique face aux problèmes de sécurité et d'environnement.

Les projets JET et Iter qui présentent une certaine homothétie d'un facteur 2,5 (JET a 150 m<sup>3</sup> de volume de plasma, Iter en aura 1000) sont comparés sur la figure 13. L'étape ultime, celle de construire un réacteur de démonstration «Démon», ne prendra sans doute place qu'au début du prochain siècle, après un temps d'exploitation d'Iter, le système de planification avec chevauchement des projets serait conservé.

### Place de la Suisse dans l'Europe

L'Europe a su rassembler les synergies existantes et les transcender par des programmes impulsifs en privilégiant certains

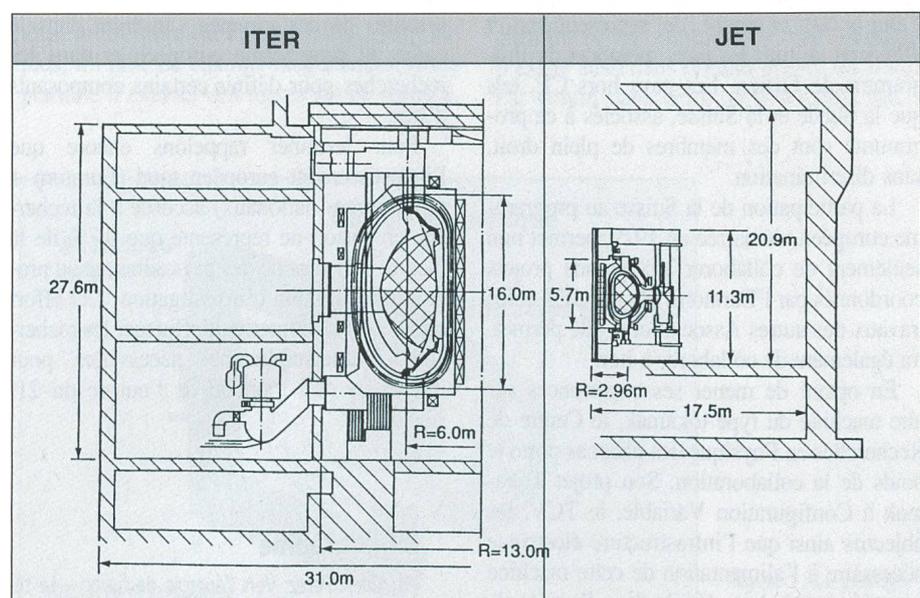


Figure 13 Comparaison des sections de JET et d'Iter

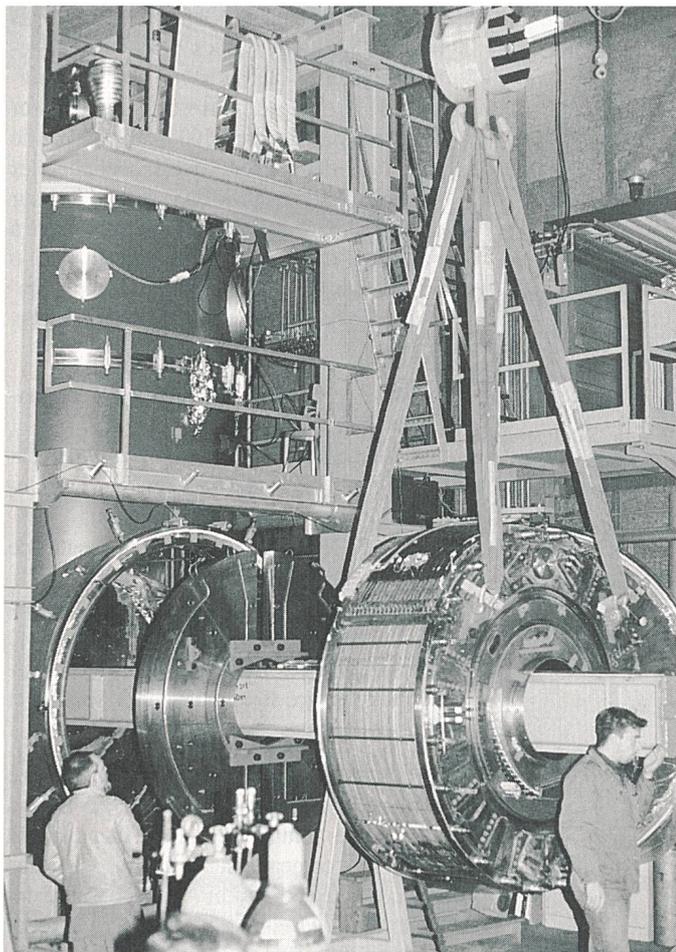


Figure 14 Installation de test de supraconducteurs Sultan au PSI

thèmes de recherche. La coordination du programme européen est effectuée par l'Euratom, soit la Communauté Européenne de l'Energie Atomique. La structure du programme européen est fédéraliste et parlementaire, la Commission de Bruxelles est l'organe suprême responsable du programme et de son application, mais la stratégie et la supervision sont laissées à la charge du Comité Consultatif du Programme de Fusion. Celui-ci est composé de représentants et d'experts de tous les pays membres du Programme de Fusion. Les pays hors CE, tels que la Suède et la Suisse, associés à ce programme sont des membres de plein droit, sans discrimination.

La participation de la Suisse au programme européen, démarrée en 1979, permet non seulement de collaborer aux grands projets coordonnés par l'Euratom, tels que JET et les travaux des autres Associations, elle permettra également de collaborer à Iter.

En optant de mener ses expériences sur une machine du type tokamak, le Centre de Recherches en Physique des plasmas porte le poids de la collaboration. Son projet Tokamak à Configuration Variable, le TCV, les objectifs ainsi que l'infrastructure électrique nécessaire à l'alimentation de cette machine sont décrits plus en détails dans l'article de A. Perez [1].

La recherche technologique est effectuée à l'Institut Paul Scherrer à Villigen (PSI) où le programme est focalisé sur d'une part le développement et le test d'aimants supraconducteurs de très haut champ (Sultan: installation de test à 12 Tesla, figure 14) et d'autre part sur des études de matériaux soumis aux irradiations et aux protons à haute énergie (590 MeV), pour simuler les dommages pouvant être créés par des neutrons (Pirex). Les activités de ces groupes s'insèrent dans le cadre du programme européen et dans les recherches pour définir certains composants d'Iter.

Pour terminer rappelons encore que l'investissement européen total (Euratom + programmes nationaux) accordé à la recherche en fusion ne représente que 0,7% de la facture d'électricité des pays adhérant au programme commun d'investigation! Cet effort suffit-il pour permettre d'effectuer les recherches multidisciplinaires nécessaires pour relever ce défi mondial de l'aurore du 21<sup>e</sup> siècle?

### Bibliographie

[1] Albert Perez: Vers l'énergie de fusion - Le tokamak TCV, un maillon de la recherche européenne et mondiale. Bull. ASE/UCS 84(1993)15, p. 25.

## Die Solarenergie auf der Erde erzeugen

### Ein Tokamak als Kerneinheit zukünftiger Fusionsreaktoren

In den 35 Jahren seit der Genfer Konferenz (1958) über die friedliche Nutzung der Kernenergie und der Deklassierung der Fusionsforschung bezüglich Geheimhaltung hat sich in Europa im Rahmen von Euratom eine enge Zusammenarbeit entwickelt mit dem Ziel, die Technologie zur Nutzung der Kernfusionsenergie bereitzustellen. Unter den verschiedenen Möglichkeiten, die Kernfusion kontrolliert ablaufen zu lassen, gibt man in Europa heute der Methode des magnetischen Einschlusses am meisten Chancen (zum Beispiel in Tokamaks, bei denen mit Hilfe von Magnetfeldern ein Plasma komprimiert und auf sehr hohe Temperaturen aufgeheizt wird). Die bisherigen Ergebnisse mit den grossen Tokamaks JET, TFTR, JT60-U und Doublet III-D sind erfolgversprechend; sie haben dazu geführt, dass man sich bereits auf das nächste grosse gemeinsame Tokamak-Projekt, nämlich Iter (International Thermonuclear Experimental Reactor, Fig. 12), mit einer erweiterten Beteiligung (Europa, Japan, USA, URSS) geeinigt hat.

Nach einem Hinweis auf die begrenzten Reserven an Primärenergieträgern (Tab. I) gibt der Aufsatz einen Überblick über Kernreaktionen, welche für die Energieerzeugung in Frage kommen. Damit die Fusionsreaktionen stattfinden können, muss das Kriterium von Lawson erfüllt sein: es sagt aus, dass das (Fusions-)Produkt aus Teilchendichte, Temperatur und Einschlusszeit einen bestimmten Minimalwert erreichen muss. Am ehesten erreichbar sind diese Bedingungen für die Fusion von schwerem (Deuterium) und überschwerem Wasserstoff (Tritium), wobei für eine genügend hohe Reaktivität gleichzeitig Temperaturen von mindestens  $10^8$  K notwendig sind (Fig. 2). Das erreichte Fusionsprodukt konnte in grossen Tokamaks über die Jahre schrittweise erhöht werden (Fig. 5 und 9), und die kritische Grenze scheint heute in Reichweite (Fig. 5). Wie aus heutiger Sicht ein Fusionsreaktor möglicherweise einmal aussehen wird, zeigt schematisch die Figur 8.