

**Zeitschrift:** bulletin.ch / Electrosuisse  
**Herausgeber:** Electrosuisse  
**Band:** 97 (2006)  
**Heft:** 9

**Artikel:** La fusion thermonucléaire  
**Autor:** Paris, Pierre J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-857674>

### **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:** 14.01.2026

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

# La fusion thermonucléaire

## 100 MWh à partir d'un gramme de combustible

La fusion thermonucléaire pourrait-elle résoudre le problème mondial de l'énergie? Énergie des étoiles, il n'est pas facile de la réaliser sur terre. Le projet ITER à Cadarache devra en démontrer, dans les vingt ans prochains, la faisabilité expérimentale et rentable, avant qu'un prototype de réacteur commercial soit réalisable.

Au sein du soleil, comme dans d'autres étoiles, les noyaux légers fusionnent en libérant de formidables quantités d'énergie. C'est la fusion de l'hydrogène en hélium qui entretient, dans le soleil, ce gigantesque flux de puissance. Chaque

Pierre J. Paris

seconde, 500 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent, l'équivalent d'un cervin par minute! L'homme, avec l'aide des techniques et des technologies nouvelles, et en imitant la nature, pourra-t-il relever ce défi énergétique du XXI<sup>e</sup> siècle?

### Réactions de fusion sur terre

Dans les étoiles, le processus de fusion s'enclenche lorsque sous l'effet des forces gravitationnelles la matière en son cœur atteint des densités et des températures suffisantes pour que les réactions thermonucléaires libérant de l'énergie prennent place. La tendance naturelle du plasma à se disperser, donc à se refroidir, est contrebalancée par la force gravitationnelle.

Il est impossible de reproduire sur terre exactement les mécanismes mis en œuvre dans le soleil, du fait, notamment, de la force gravitationnelle de cette étoile qui a une masse 330 000 fois supérieure à celle de la terre. Pour parvenir à la réalisation du bilan énergétique, essentiellement deux voies sont explorées: La première méthode, le confinement inertiel (la voie «rapide»), peut être initiée par un apport très rapide d'énergie issue de faisceaux de lumière ou de particules pendant un temps très court, de l'ordre du milliardième de seconde.

La deuxième méthode, le confinement magnétique (la voie «lente»), consiste à piéger et maintenir à très haute température un plasma formé de particules électriquement chargées par des champs magnétiques. Un plasma de basse densité, emprisonné dans un champ magnétique, réagit pendant un temps supérieur à la seconde. Une très grande majorité des recherches internationales en fusion contrôlée s'est concentrée sur cette méthode. Les recherches ont été effectuées dans de multiples configurations; cylindriques et toriques, mais depuis 1968, les meilleures performances ont été obtenues sur des tokamaks.

### Les réactions possibles

Alors que dans le soleil des réactions de nucléosynthèse utilisent l'hydrogène, l'atome le plus léger, sur terre la réaction principale de fusion thermonucléaire la plus envisageable utilise les isotopes de l'hydrogène: le deutérium et le tritium,

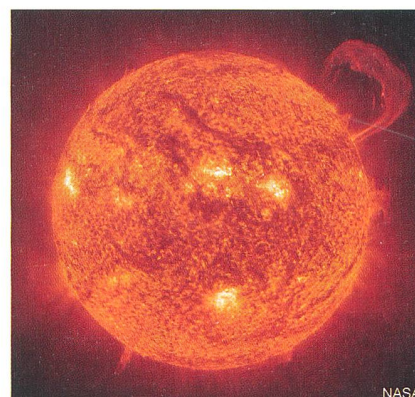
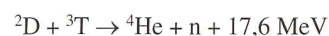


Figure 1 La fusion de l'hydrogène en hélium au centre du soleil s'effectue à 15 millions de degrés.

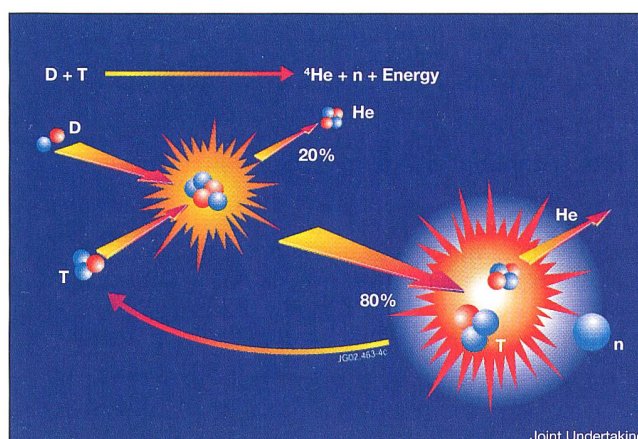
car la probabilité de fusion des atomes d'hydrogène est beaucoup plus faible. Cependant la température de fusion optimale est environ de 100 millions de degrés.



L'énergie libérée, par la réaction D-T, est de l'ordre de 100 MWh pour 1 gramme de combustible – dix millions de fois plus qu'un gramme de pétrole. Le deutérium est omniprésent dans la nature, dans l'eau (33 grammes par mètre cube, un atome de deutérium pour environ 6700 atomes d'hydrogène) bien répartie sur le globe ( $>10^{13}$  tonnes).

Le tritium est une forme radioactive (émetteur  $\beta$  de 5,7 keV) de l'hydrogène qui a une courte demi-vie radioactive (12,36 ans). Celui-ci n'existe pas dans la nature, il doit être régénéré à partir du li-

Figure 2 Schéma de principe de la réaction D-T et la régénération du tritium issue de l'impact d'un neutron (issu de la fusion) avec du lithium





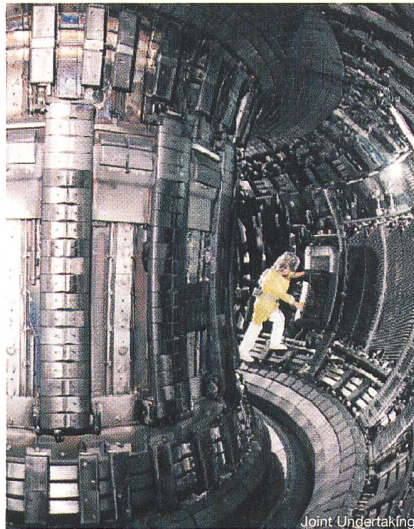


Figure 3 JET (Joint European Torus), le plus grand et le plus performant tokamak au monde

thium, un métal léger. Il y a suffisamment de réserves de lithium dans la croûte terrestre et dans les océans pour fournir l'électricité nécessaire au monde pendant plusieurs dizaines – voir centaines – de millénaires. Dans la croûte terrestre on trouve 20 mg de lithium naturel (7,5% de  ${}^6\text{Li}$  et 92,5% de  ${}^7\text{Li}$ ) par kg, soit plus de 9 millions de tonnes. Dans les océans, c'est 0,18 mg par litre d'eau que l'on trouve ( $>10^{11}$  tonnes).

${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{T} + 4,8 \text{ MeV}$   
réaction exothermique

${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{T} + n - 2,5 \text{ MeV}$   
réaction endothermique

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

${}^2\text{D} + \text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + \text{neutrons} + \text{énergie}$

Pour un réacteur de 1000 MW<sub>e</sub>, la consommation annuelle serait de 88 kg de deutérium et de 132 kg de tritium (236 kg de  ${}^6\text{Li}$ ). A titre de comparaison ceci équivaldrait à brûler 2 000 000 de tonnes de pétrole ou 3 600 000 de tonnes de charbon.

Des réacteurs plus avancés pourraient utiliser seulement le deutérium (réaction D-D), réaction plus attrayante, mais plus difficile encore à réaliser que la réaction D-T. La réaction  ${}^2\text{D}-{}^3\text{He}$  semble intéressante car sans neutron comme sous-produit, mais cet isotope de l'hélium est instable et rarissime.

### Avantages de la fusion

La fusion pourrait devenir une source nouvelle et considérable d'énergie avec des avantages intrinsèques, en accord avec les critères de développement durable:

- Les combustibles de base (D, Li) sont non radioactifs, abondants et distribués assez uniformément dans les océans et la croûte terrestre, c'est une énergie quasi illimitée.
- Pas de divergence possible du réacteur. La quantité de combustible présente à tout moment dans le réacteur est très faible et une perte de contrôle de la réaction l'arrête aussitôt.
- Les problèmes de déchets radioactifs sont limités: pas de cendres radioactives, régénération du tritium dans l'installation même. Avec une sélection rigoureuse des matériaux constitutifs du réacteur, le stockage des composants de la structure mécanique, qui auront

été activés par les neutrons, pourrait être limité à une ou deux générations.

- Aucune pollution atmosphérique conduisant à des pluies acides ou à des effets de serre.

### Le tokamak

Le tokamak<sup>1)</sup> développé par les scientifiques russes au milieu des années 1950 est un dispositif annulaire à courant torique. Le tokamak est un transformateur dont le plasma est le secondaire (figure 3). Le plasma est chauffé par effet Joule jusqu'à des températures de l'ordre de 30 à 40 millions de degrés. Des méthodes de chauffage complémentaire sont nécessaires pour porter celui-ci aux températures de fusion. Ce chauffage additionnel peut être réalisé par:

- injection de particules neutres très énergétiques,
- des ondes électromagnétiques à haute puissance à des fréquences bien choisies.

En laboratoire la condition de viabilité pour qu'un réacteur «à confinement magnétique» soit «allumé» et «rentable» est résumée ci-dessous pour un réacteur D-T: Produit de fusion:

$$n \tau_E T_i > 6 \times 10^{22} \text{ m}^{-3} \text{ s M}^\circ\text{K}$$

(assimilable au critère de Lawson)

Où:

- $n$  est la densité au centre du plasma
- $\tau_E$  est le temps de confinement de l'énergie
- $T_i$  est la température du mélange

Cette condition, qui est celle de l'ignition, spécifie que l'énergie cédée par les particules d'hélium (sous-produit de la fusion) entretient les réactions dans le

## Energie erzeugen ►► Energie transformieren ►► Energie messen ►► **Energie**

Mittelspannungsanlagen für die Energieverteilung müssen zuverlässig und wirtschaftlich sein.

### UNIFLUORC

- ist modular aufgebaut und unterstützt einen platzsparenden Anlagenbau
- gestattet den Einsatz konventioneller Kabelanschlusstechnik
- ist ausgelegt für UN: 24 kV, IN: 630 A, Nennkurzeitstrom (1s): 20 kA
- unterstützt Sie entscheidend beim Aufbau einer sicheren Energieversorgung



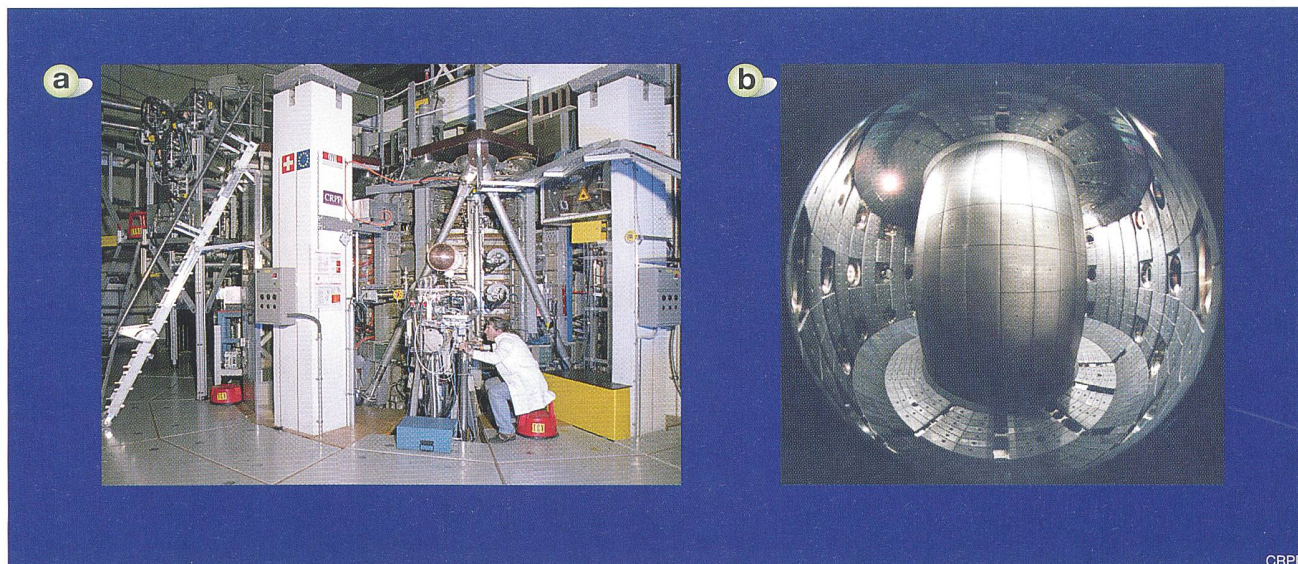


Figure 4 TCV à l'extérieur (a) et à l'intérieur (b)

combustible fraîchement injecté dans le tore. En 1970, nous en étions à 1/30 000 de cette valeur et actuellement à 1/6: un progrès impressionnant! Ce sont ces conditions que le projet ITER devrait réaliser.

Un indice de performance des machines à fusion, nommé facteur d'amplification (ou facteur de mérite)  $Q$ , est le rapport de la puissance produite par les réactions de fusion divisée par la puissance de chauffage appliquée au plasma. Un plasma de fusion atteint la condition autoentretenu ( $Q$  infini) quand les pertes d'énergie du plasma sont compensées par son propre chauffage produit par les réactions de fusion. Quand cette condition est atteinte, il n'est plus nécessaire de

chauffer le plasma de l'extérieur pour le maintenir aux conditions de haute température de fusion. Comme pour un feu, le plasma continuera de brûler aussi longtemps qu'il sera alimenté en combustible, grâce à l'énergie des particules d'hélium sous-produit de la réaction D-T. Dans les prochains réacteurs à fusion, il ne sera pas nécessaire d'atteindre cette condition, il suffira de concevoir un amplificateur de puissance ( $Q > 30$  à 40, en continu).

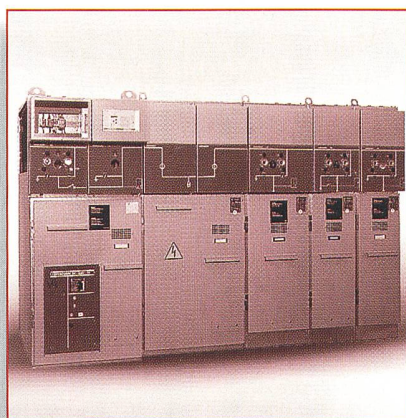
### Les progrès: JET et les grandes installations

Depuis 1970, qui marque le début d'un programme tokamak à l'échelle mondiale, les progrès ont été spectaculaires.

Notamment en 1982, c'est sur ASDEX (à IPP, Garching, D) que le mode à haut confinement énergétique a été découvert, rendant les machines à «diverteur» presque deux fois plus performantes qu'auparavant.

Le plus grand tokamak au monde, le Joint European Torus (JET) construit à Abingdon, Royaume-Uni, par l'ensemble des Associations européennes, est entré en fonctionnement en 1983 et a obtenu une série de records mondiaux dont la première fusion contrôlée D-T en 1991, 16 MW de puissance de fusion en 1997 pendant 2 secondes ( $Q = 0,65$ ) ainsi que 22 MJ d'énergie pendant 5 secondes. De belles performances ont été également enregistrées avec JT-60U (Japon) – cou-

**verteilen**



**stationenbau**

Stationenbau AG  
Schützenhausstrasse 2  
5612 Villmergen  
Telefon 056/619 88 00  
Telefax 056/619 88 04  
[info@stationenbau.ch](mailto:info@stationenbau.ch)  
[www.stationenbau.ch](http://www.stationenbau.ch)



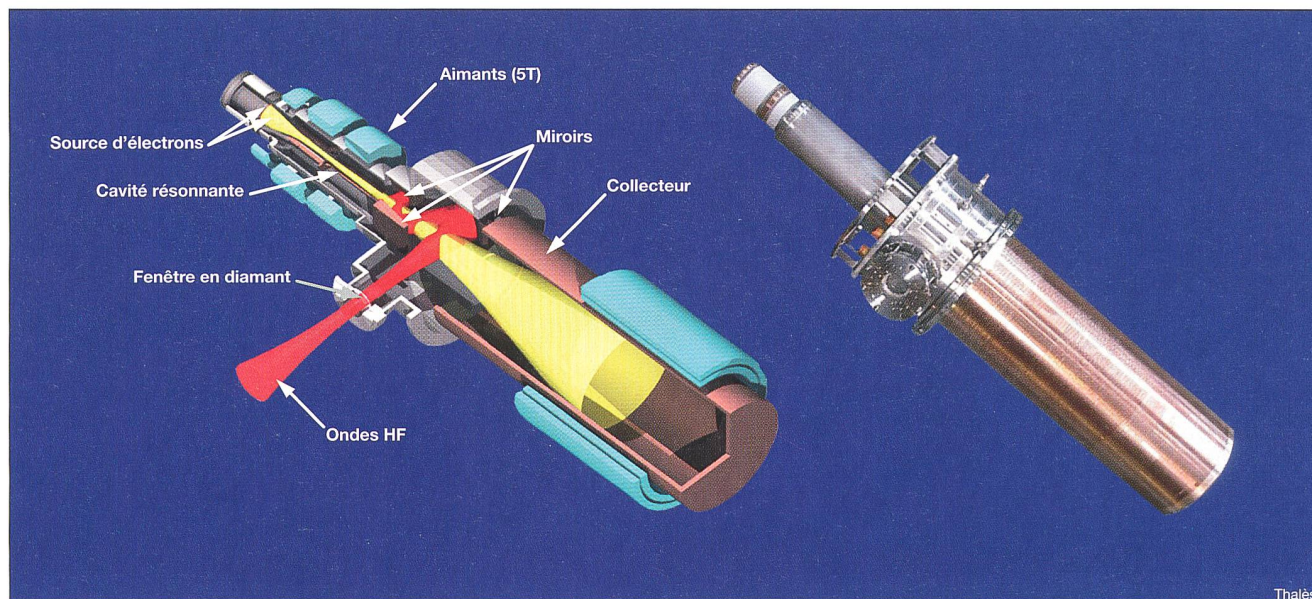


Figure 5 Gyrotron de 140 GHz (Thalès)

rant de plasma généré par des ondes – et TFTR (USA) – également plasmas DT. Un résultat récent a ainsi été obtenu sur le tokamak TORE SUPRA en France, qui étudie le fonctionnement en régime quasi continu des dispositifs de fusion. En 2003, il a produit un plasma performant pendant une durée record de 6 minutes et demie. L'énergie totale injectée pour maintenir ce plasma pendant tout ce temps, et qu'il a aussi fallu extraire sous forme de chaleur, était supérieure au Gigajoule (un million de Joule, assez pour faire bouillir 3 tonnes d'eau).

Le développement de ces installations de recherche a mobilisé des spécialistes des matériaux, de la mécanique, de la robotique, des aimants, de la cryogénie et de l'optique. Leurs travaux ont fait progresser les connaissances, en particulier, dans le domaine des matériaux capables de résister à des flux d'énergie intenses et à des températures extrêmes, comme celle du plasma supérieure à une centaine de millions de degrés.

### L'Association Confédération Suisse-Euratom

L'Euratom est une des trois communautés européennes, née dans les années 1950, en parallèle avec la CECA (Communauté européenne du charbon et de l'acier) et la CEE (Communauté économique européenne). L'Euratom fonctionne de manière décentralisée, en coordonnant les travaux scientifiques et techniques qui sont effectués dans les centres nationaux. L'histoire du centre suisse:

- 1<sup>er</sup> mai 1961, Création du CRPP par le Fonds National Suisse de la Recher-

che. Activités de physique des plasmas et veille technologique sur la fusion.

- 1973. Rattachement du CRPP à l'EPFL, EPUL devenu alors EPFL.
- 1979. La Suisse est associée au programme européen de recherche en fusion thermonucléaire dont l'objectif est de développer un réacteur thermonucléaire. L'exécution de la fraction suisse de ce programme est effectuée au CRPP.
- 1980. Mise en exploitation du premier tokamak du CRPP: le TCA.
- 1992. Mise en exploitation du deuxième tokamak: le TCV.

- Octobre 94. Le groupe de technologie de la fusion du PSI (Paul Scherrer Institut, Villigen) a été rattaché au CRPP et est devenu «l'antenne» de celui-ci au PSI. Les activités «fusion» de l'Association Euratom–Confédération Suisse se trouvent ainsi concentrées sous la bannière du CRPP.

### TCV: le tokamak suisse

La première paroi du TCV (tokamak à configuration variable) est approximativement recouverte à 90% de tuiles de graphite qui subit un conditionnement

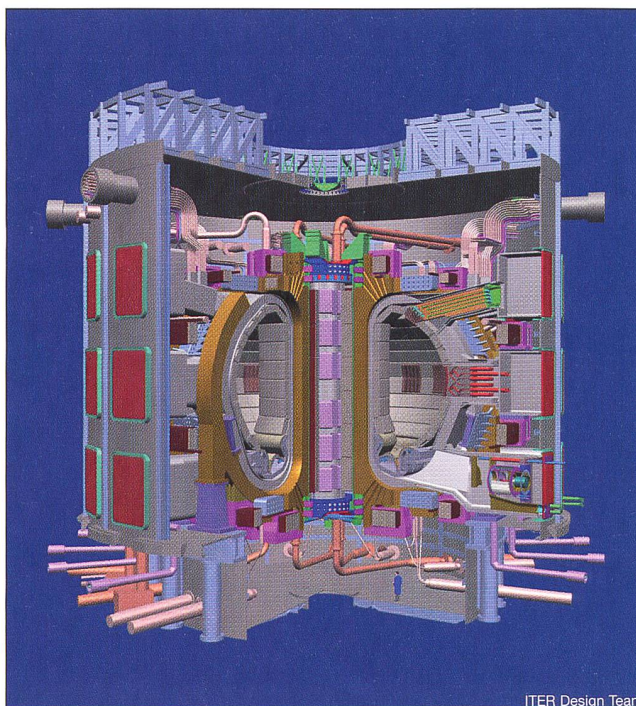


Figure 6 ITER, vue isométrique





Figure 7 Site d'ITER à Cadarache, situé à l'arrière du centre actuel de fusion du CEA

par un étuvage à 230 °C et celle-ci est recouverte par un dépôt de carbure de bore par un processus de boronisation (par décharge dans un mélange de méthane et de diborane). De plus un plasma de nettoyage à l'hélium est effectué de manière régulière, afin d'exclure les gaz (et vapeurs) occlus dans la surface de la première paroi.

Parmi les objectifs du tokamak suisse TCV, citons les plus importantes études que l'on mène sur celui-ci :

- Confinement des plasmas à forte élongation et de formes différentes
- Stabilité Magnétohydrodynamique (MHD)
- Contrôle du plasma
- Chauffage ECRH et génération de courant
- Etude des modes de bon confinement (mode H)
- Physique du plasma de périphérie: modes localisés de bord
- Développement des tubes à hyperfréquences, les gyrotrons<sup>2)</sup>

Le CRPP est le centre européen de compétence pour l'étude des systèmes de chauffage du plasma, par ondes à des fréquences de l'ordre de 100 à 170 GHz; ondes générées dans les gyrotrons.

### Etudes technologiques au CRPP

Celles-ci sont effectuées à l'Institut Paul Scherrer, implanté sur les communes de Villigen et Würenlingen, en Ar-

govie. Deux groupes sont actifs dans les domaines de :

- Supraconductivité
  - SULTAN: installation unique au monde
  - Essais critiques des éléments de bobines magnétiques pour ITER et dans les conditions d'ITER
  - Améliorer la compréhension des «quench» pour optimiser la fiabilité et la sécurité de fonctionnement
- Recherches en matériaux
  - SIN Q: source de neutrons
  - Améliorer la banque de données sur les matériaux structurels pour réacteur
  - Essayer et développer les matériaux
  - Elaboration nouveaux matériaux
  - Participation à IFMIF

### ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est une installation expérimentale dont les partenaires sont: la Communauté Européenne (plus la Suisse), la Fédération de Russie, le Japon, les Etats-Unis, la Chine et la Corée du Sud. L'Inde s'est montré intéressée à supporter ce projet et a émis le désir d'entrer dans le partenariat. Il en est de même pour le Brésil et l'Australie. Il a été récemment décidé de construire ITER en Europe, sur le site de Cadarache en France.

Sa taille imposante (12,4 mètres de diamètre) répond à une règle simple: plus la machine est importante, plus elle est effi-

cace. Un plasma volumineux peut abriter de très nombreuses réactions de fusion et dégager plus d'énergie. Celui d'ITER atteindra un volume de 840 m<sup>3</sup>, soit un volume environ de huit fois celui de JET. En construisant ITER, machine mondiale, on devrait réussir à atteindre les conditions d'ignition et un facteur d'amplification de l'énergie de l'ordre de 5 à 10. Par ailleurs ITER devrait montrer que les technologies nécessaires à un réacteur sont disponibles (p.ex. supraconducteur, télémanipulation). Certains composants internes permettront également de réaliser des expérimentations de production de tritium à l'intérieur de la machine, indispensables pour valider cette technologie dans la perspective d'un réacteur industriel. Avec le flux neutronique, des tests de composants structurels d'un réacteur pourront être entrepris en parallèle avec une nouvelle installation technologique pour les essais en matériaux adaptés à la fusion (IFMIF); également des tests conceptuels qui seront nécessaires pour assurer dans un réacteur la génération du tritium, l'extraction de la chaleur et la génération d'électricité.

Les premières années seront consacrées à l'étude du plasma d'hydrogène et du deutérium. Ensuite, ITER visera à répondre à deux objectifs scientifiques essentiels sur la base d'un mélange deutérium-tritium:

- générer une puissance de base de 500 MW tout en n'en injectant que 50 durant plus de 6 minutes;
- démontrer que les réactions de fusion dans le plasma peuvent être maintenues en quasi-continu pendant plus de 10 minutes.

La génération de machines suivant ITER sera celle du réacteur de démonstration («DEMO-PROTO») qui, pour la première fois, serait capable de produire des quantités importantes d'électricité et de s'autoalimenter en tritium. Ceci ouvrira alors la voie à la construction commerciale des centrales électriques à fusion.

Le programme stratégique ITER, PROTO-DEMO, devient plus acceptable et volontaire dans la quête urgente de la validité de la fusion à terme de 35 ans. Il ne faut pas perdre de vue qu'il faut remplacer les fossiles en 40-75 ans. Mais pour arriver à ce qu'il y ait une participation notoire de la fusion dans la panoplie énergétique mondiale, il faudra sans doute attendre la fin du siècle. A titre de comparaison, il a fallu plus de cinquante ans pour que la fission joue un rôle important dans la production d'électricité (actuellement environ 450 centrales ins-



tallées dans le monde, soit environ 18% de l'électricité produite).

### Les impacts économiques d'ITER

Les retombées de l'implantation du projet ITER à Cadarache, dont le budget global est de 10 milliards d'euros sur 30 ans (environ 5 milliards d'investissement, 5 milliards de coût de fonctionnement, provisions pour le démantèlement comprises), sont multiples: social et culturel, économique et scientifique. ITER emploiera directement 500 personnes en moyenne durant la phase de construction (2007 à 2015) et 1000 personnes en moyenne durant l'exploitation (2015 à 2035).

Même si la plus grande partie des composants de l'installation seront construits ailleurs, les retombées économiques d'un tel projet auront un impact bénéfique sur la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. De plus un développement technologique pourrait favoriser l'implantation de laboratoires de recherches et d'entreprises innovantes comme cela s'est déjà produit lors de l'implantation du CERN à Genève.

La recherche en fusion est une locomotive technologique qui favorisera l'émergence d'autres technologies, informati-

que et robotique par exemple. Elle agit comme un moteur pour l'industrie permettant de faire progresser les connaissances des uns et des autres. Les composants de haute technologie développés dans le cadre des recherches pour la fusion trouvent des applications dans les domaines de l'électronique de puissance ou de l'aérospatiale, mais encore dans la médecine et l'astronomie et bien sûr dans le domaine des instruments de mesure du plasma qui trouvent également des applications industrielles. Le développement de matériaux à basse activation soumis à des doses de neutrons équivalentes à celles reçues par les éléments d'un réacteur au terme de leur vie, non seulement permettra à la fusion d'être acceptée comme source d'énergie, mais trouvera aussi des applications industrielles et énergétiques.

### IFMIF

L'attractivité de la fusion est certaine, encore faudra-t-il s'affranchir des «déchets» qui devraient pouvoir être recyclés et entreposés sur le site de la centrale même.

Les partenaires du projet ITER sont sur le point de prendre une décision importante concernant la construction d'une autre grande installation spécialement

conçue pour étudier les matériaux structuraux d'un cœur de centrale à fusion. La nécessité d'une source de neutrons à 14 MeV pouvant être exploitée en parallèle avec ITER est impérative, d'où le projet mondial IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility).

A titre de compensation, l'Europe recevant ITER, le Japon pourrait être le pays d'accueil pour ce nouveau projet mondial. Parmi les objectifs principaux d'IFMIF:

- études consacrées à la couverture tritium avec refroidissement à l'hélium, ces recherches sont capitales pour le développement du cycle du tritium d'un réacteur à fusion;
- développement des matériaux de structure pour les futurs réacteurs axé sur les aciers ferritiques et martensitiques à faible activation (type EUROFER) et sur les matériaux composites de carbure de silicium;
- études consacrées à la sécurité et à l'environnement sont bien sûr étudiées attentivement;
- amélioration des concepts et la réduction des quantités de matériaux actifs.

### La centrale à fusion

Contrairement à une centrale à fission, qui fonctionne comme une pile, une centrale à fusion est une chaudière dans laquelle le mélange combustible D-T est injecté et ionisé. Le plasma «brûle», aussi le réacteur produit des cendres (les atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de particules rapides ou de rayonnement. L'énergie produite sous forme de particules chargées et de rayonnement est absorbée dans la «première paroi», l'enceinte contenant le plasma. L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est, quant à elle, convertie en chaleur dans la couverture (ou manteau): élément au-delà de la première paroi, mais néanmoins à l'intérieur de la chambre à vide. La chambre à vide elle-même est le composant qui clôt l'espace où ont lieu les réactions de fusion. Première paroi, couverture et chambre à vide sont refroidies par un système d'extraction de la chaleur qui est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble classique turbine et alternateur producteur d'électricité.

Le neutron, qui quitte le plasma et est absorbé dans la couverture, ne fait pas qu'abandonner son énergie qui est évacuée en direction des générateurs de vapeur par un fluide caloporteur, il provoque aussi une réaction sur le lithium présent pour produire du tritium. Effec-

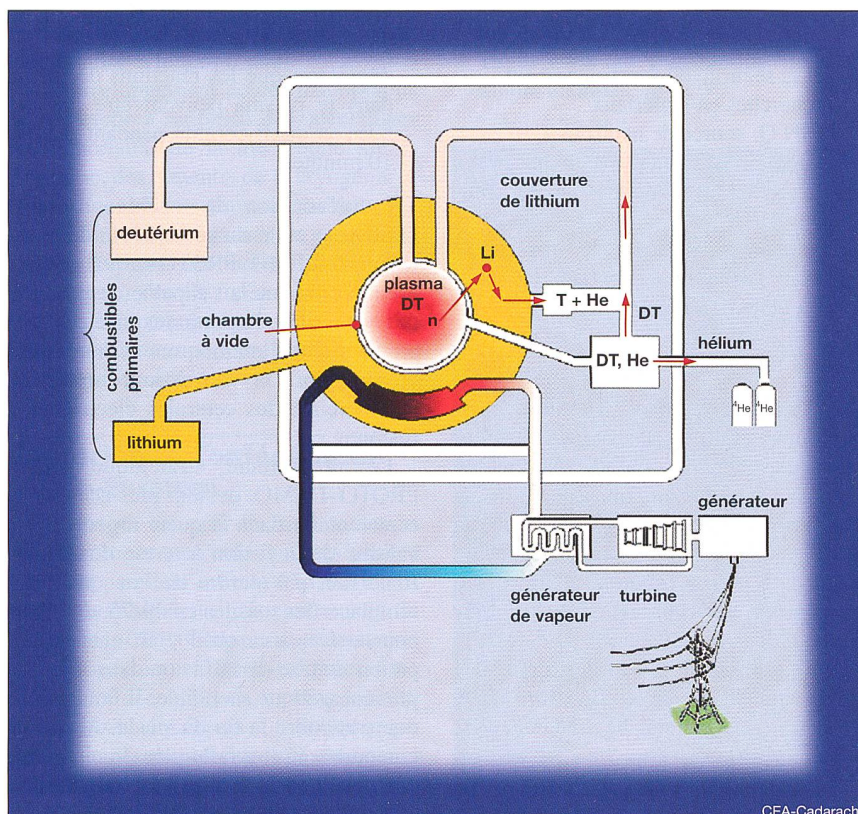


Figure 8 Schéma de principe d'une centrale à fusion D-T



tivement, comme nous l'avons vu la production du tritium se fait par une réaction des neutrons sur le lithium naturel, contenant deux isotopes, le  $^6\text{Li}$  et le  $^7\text{Li}$ . On a intérêt à privilégier la réaction sur  $^6\text{Li}$ , qui est exothermique, et donc à utiliser du lithium enrichi en  $^6\text{Li}$ . Cette opération d'enrichissement est simple et déjà pratiquée industriellement.

A l'arrière de cette couverture tritigène existe un système qui assure à la fois, la fourniture de lithium, l'extraction de la chaleur et l'extraction du tritium.

Une autre fonction de la couverture est celle de protection neutronique. En réduisant considérablement et l'énergie des neutrons et le flux neutronique la couverture protège les composants postérieurs, notamment les aimants supraconducteurs. Cette protection est complétée autour du tore par une protection biologique assurée par une paroi en béton.

## Conclusion

Avec l'accès au breakeven, les progrès récents réalisés dans la recherche en fusion

thermonucléaire laissent entrevoir que le calendrier prévu par les scientifiques pour la démonstration de la faisabilité scientifique sera tenu. Il faudra cependant attendre la réalisation d'ITER pour atteindre l'ignition et la confirmation que la voie choisie, celle du tokamak, est bien la bonne. Les recherches technologiques, menées en parallèle, apporteront plus précisément l'approbation finale de la fusion comme étant une option énergétique compatible au développement durable, accessible et acceptée par la population.

## Informations sur l'auteur

**Pierre J. Paris** est adjoint à la direction du Centre de Recherches en Physique des Plasmas à l'EPF Lausanne (Association Euratom-Confédération Suisse) et responsable de la communication. Coordinateur administratif auprès des instances de recherches européennes (EFDA). Président de l'Association Internationale de spécialistes en Energie (AISEN). Il est ingénieur physicien (Conservatoire National des Arts et Métiers [CNAM] - Université de Paris), diplômé post-grade (Energie) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

EPFL, 1015 Lausanne, pierre.paris@epfl.ch

<sup>1</sup> Acronyme russe de Toroidalnaya Kamera Magnitnomyi Katushkami: chambre à vide toroïdale et bobine magnétique

<sup>2</sup> En collaboration avec d'autres associations et des entreprises européennes, notamment Thalès à Velizy (F), FZK à Karlsruhe (D), ENEA à Milan (I), CEA à Cadarache (F) et FOM à Nieuwegein (NL)

## Zusammenfassung

### Kernfusion – Experimentalreaktor in Frankreich

Wird die Kernfusion das Energieproblem der Erde lösen? Diese gewinnt aus einem Gramm Brennstoff 100 MWh Energie. Das Prinzip, das auf der Sonne automatisch läuft, lässt sich auf der Erde nur schwierig realisieren. Das Projekt ITER bei Cadarache in Frankreich wird in den nächsten 20 Jahren zeigen, ob Kernfusion auf der Erde möglich und wirtschaftlich ist, bevor ein erster Prototyp eines kommerziellen Reaktors gebaut wird.

Ihr Geschäft können Sie auf vielen Wegen ins Rollen bringen.  
Hier einer der wirtschaftlichsten.

**3,9%\***  
Top-Leasing

Opel. Frisches Denken für bessere Autos.

Die Nutzfahrzeuge von Opel bieten für jede Transportaufgabe die passende, individuelle und vor allem wirtschaftlich attraktive Lösung. Mit exklusivem Opel Dienstleistungs- und Servicepaket «all-in» auf Vivaro und Movano. Auf Wunsch und je nach Motorisierung auch mit neuem MTA-Techshift-Getriebe (automatisierte Schaltung). So lässt sich gut wirtschaften. Infoline 0848 810 820.

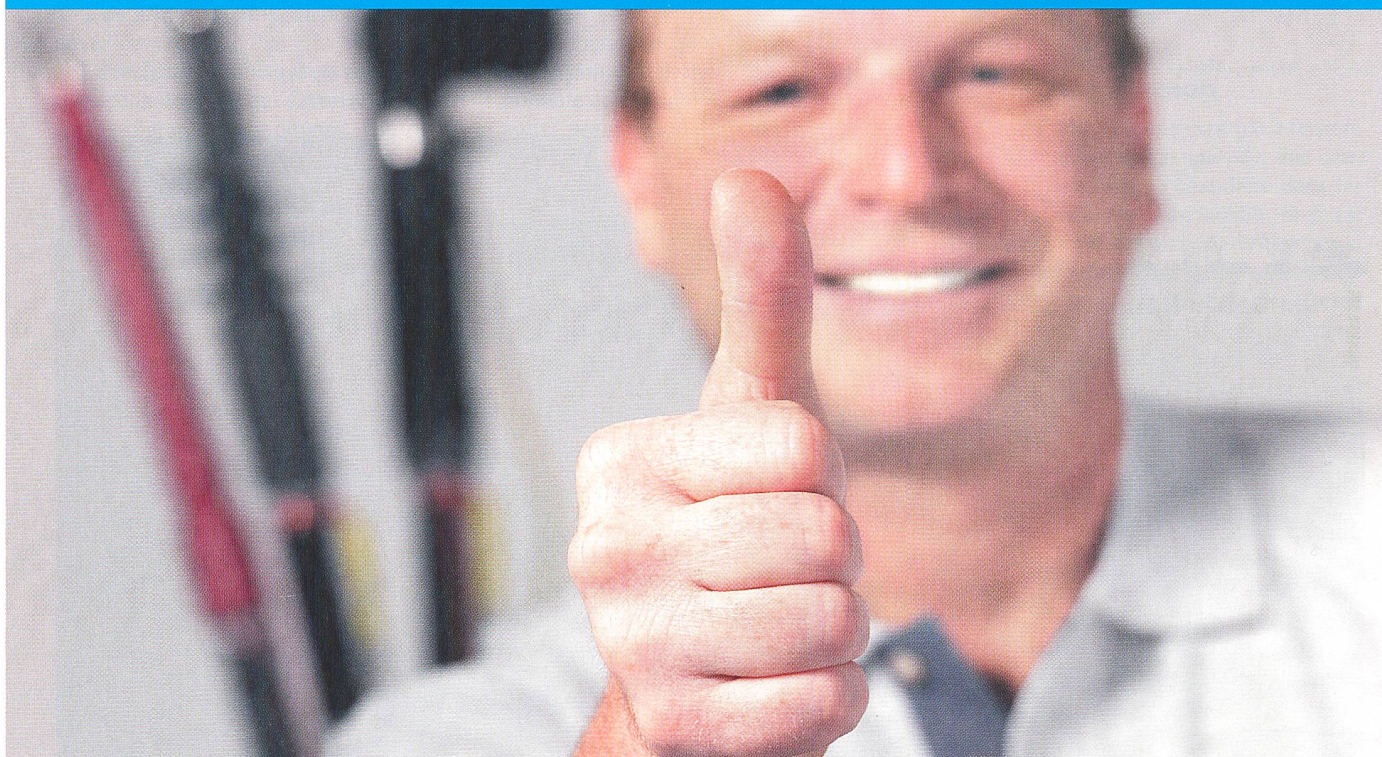
**all-in** 3 Jahre oder 100.000 km  
Gratis-Service\* und  
Gratis-Reparaturen.  
\*exkl. Motoröl

**Opel Leasing** **Opel Mobilitätsgarantie** **www.opel.ch**

\*Beispiel: Opel Combo Van 66 kW/90 PS, 1364 cm<sup>3</sup>, 3 Türen, Listenpreis Fr. 15'500.- (exkl. 7,6% MWSt.), Leasing-Rate Fr. 202,55/Monat (inkl. 7,6% MWSt.), effektiver Jahreszins 3,97%, Laufzeit 36 Monate, 10.000 km/Jahr, Sonderzahlung Fr. 3'335,60 (inkl. 7,6% MWSt.), obligatorische Vollkaskoversicherung nicht inbegriffen. GMAC Suisse SA schliesst keine Leasingverträge ab, falls diese zur Überschuldung des Konsumenten führen können. Das 3,9% Leasing-Angebot gilt für alle Opel Fahrzeuge und ist bis 30. Juni 2006 gültig.



# Alles im Griff: mit Zubehör für Kabelsysteme bis 30 kV.



Mit Zubehör von Brugg Cables für Nieder- und Mittelspannung machen Sie als Profi einmal mehr einen guten Griff. Denn alles Zubehör der gängigsten Montagetechniken können Sie bei uns aus einer Hand beziehen. Wir haben aktuelle und nach internationalen Normen geprüfte Produkte von anerkannten Herstellern für Sie verfügbar und können direkt ab Lager liefern. [Besuchen Sie uns an den Powertagen 2006 in Zürich, Halle 6, Stand A17.](#) Wir freuen uns, Ihnen mit unseren Lösungen zur Hand gehen zu können:

Brugg Kabel AG, Klosterzelgstrasse 28, CH-5201 Brugg,  
Telefon +41 (0)56 460 33 33, Fax +41 (0)56 460 34 83,  
E-Mail [info.energiekabel@brugg.com](mailto:info.energiekabel@brugg.com), [www.brugg.com](http://www.brugg.com).

**BRUGG**

**CABLES**  
Well connected.