

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 109 (1983)
Heft: 6

Artikel: JET: breakeven dans la fusion thermonucléaire?
Autor: Paris, Pierre Jean / Simm, Wolfgang / Troyon, Francis
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74932>

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: 16.01.2026

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

JET¹: Breakeven dans la fusion thermonucléaire?

par Pierre Jean Paris, Wolfgang Simm, Francis Troyon, Lausanne

Les recherches en matière énergétique deviennent fondamentales, que ce soit dans le domaine des énergies renouvelables ou dans celui des énergies dont les combustibles, existant en grande quantité, permettent une utilisation quasi illimitée. La fusion thermonucléaire, répondant à cette deuxième catégorie, présente de sérieux avantages en ce qui concerne les combustibles employés: elle ouvre la porte à l'indépendance énergétique. Il reste cependant des problèmes importants à résoudre: l'installation de recherche expérimentale JET, implantée en Grande-Bretagne sous l'égide de l'Euratom, une organisation dont la Suisse est membre associé. Cette machine devrait permettre de démontrer la faisabilité scientifique de la fusion, et sera suivie par d'autres générations d'installations qui aborderont la faisabilité technologique et économique.

Première partie: la fusion

En 1980, la consommation énergétique mondiale a été de $308 \cdot 10^{18}$ Joules, soit l'équivalent de 7 milliards de tonnes de pétrole, et soit encore 4 fois la consommation de l'année 1950. 85% de cette énergie sont consommés dans les pays industrialisés, dont 35% aux Etats-Unis et 25% en Union soviétique. Selon les prévisions, la demande énergétique mondiale augmentera d'un facteur 2,5 entre 1980 et 2000, en particulier à cause du développement industriel et économique des pays du tiers monde (tableau I).

Les ressources énergétiques

En fait, quelles sont les exigences concernant une méthode de production d'énergie?

Elle devrait être bon marché, peu polluante, aussi indépendante que possible des conditions climatiques (soleil, vent, précipitations, etc.), et devrait également utiliser une source d'énergie sinon renouvelable, du moins présente en abondance sur notre Terre, ainsi que géopolitiquement bien répartie.

Globalement, il est possible de distinguer deux formes d'énergie. L'avantage des énergies non renouvelables à base de combustibles fossiles (pétrole, charbon) ou fissiles (uranium, thorium) réside dans le fait que, sur le plan strictement technique, les unités de production d'énergie peuvent être construites à proximité des utilisateurs. Cependant, elles sont peu écologiques et, de plus, les réserves mondiales de combustibles sont limitées. Au rythme d'exploitation actuel, les réserves de pétrole sont ainsi estimées à 50 ans (150 ans avec les schistes bitumeux, les sables asphaltiques et les forages en mer), celles de charbon à 400 ans. Quant aux réserves connues de ma-

tières fissiles, elles sont évaluées à 400 ans pour les centrales nucléaires classiques (LWR, PWR, etc.) et à 4000 ans pour les centrales de type surrégénérateur.

Les énergies renouvelables (hydro-électrique, marémotrice, solaire, éolienne, etc.) ont les avantages d'être peu polluantes et relativement bon marché à long terme. Cependant, leur utilisation est limitée par des facteurs climatiques et le nombre des sites exploitables. En Suisse, par exemple, environ 90% des sites hydro-électriques sont déjà équipés pour la production d'énergie.

Il est donc indispensable de découvrir et de développer de nouvelles sources d'énergie. Dans ce sens, la maîtrise de la fusion thermonucléaire est peut-être le plus grand pari énergétique du XX^e siècle. En effet, les réactions de fusion utilisent des combustibles existant en grande quantité sur notre planète — pour les plus accessibles d'entre elles, des isotopes de l'hydrogène tels que le deutérium (D) et le tritium (T), obtenu à partir du lithium (Li).

La fusion: combustibles et réactions

Le deutérium est un élément présent dans l'eau, à raison de 0,034 g/l; son rendement énergétique par gramme équivaut à celui de 10 000 l de pétrole. Il est produit par centrifugation et par électrolyse, et son prix de revient actuel est de l'ordre de \$1000/kg. Les réserves de deutérium contenues dans les mers et les océans sont évaluées au total à $5 \cdot 10^{13}$ t, une quantité qui permettrait de produire 10^{11} fois l'énergie consommée dans le monde en 1981.

Le tritium n'existe pas à l'état naturel, il doit donc être produit artificiellement à partir du lithium. Les réserves mondiales de lithium contenues dans l'écorce terrestre sont actuellement estimées à 10^8 t (prix de revient environ \$50/kg), ce qui permettrait d'exploiter la réaction de fusion D-T pendant plusieurs millénaires. On estime d'autre part aujourd'hui que les 10^{11} t de lithium présentes dans l'eau de mer pourront être extraites de façon rentable, en profitant entre autres des usines de désalinisation.

Quant à l'hélium 3 (He_3), il n'existe pas dans la nature, mais peut être fabriqué par désintégration du tritium ou dans la réaction de fusion deutérium-deutérium (D-D) dans laquelle il est partiellement utilisé.

Les réactions de fusion thermonucléaire les plus intéressantes pour la production d'énergie sont indiquées sur la figure 1. La plus grande partie de l'énergie dégagée par ces réactions est transportée par les neutrons, pour être ensuite transformée en chaleur et entraîner un système classique de turbines à vapeur.

Contrôler ces réactions qui ont lieu naturellement dans le soleil et les étoiles, maîtriser cette énergie pratiquement inépuisable, voilà le but que poursuivent depuis plus de 20 ans les nations industrialisées. Dans le cadre de ces recherches en fusion thermonucléaire

TABLEAU I: Progression de la consommation d'énergie et accroissement de la population mondiale

Zone	Part dans la consommation mondiale			Part dans la population mondiale		
	1950	1974	2000	1950	1974	2000
Pays occidentaux	75%	61%	45%	24%	21%	16%
Pays de l'Est	18%	23%	25%	11%	9%	7%
Tiers monde	7%	16%	30%	65%	70%	77%
Monde	100%	100%	100%	Pop. totale (en 10^6 hab.)		
				2483	3871	6403
Consommation mondiale (en 10^{18} Joules)	75,08	243,81	807,21	Consommation en J/hab.		
				$3 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{10}$	$12,6 \cdot 10^{10}$

Pays occidentaux = Amérique du Nord, Europe occidentale, Japon, Afrique du Sud, Océanie, etc.

Pays de l'Est = URSS, Europe de l'Est

Tiers monde = Chine, Afrique, Asie, Amérique du Sud, etc.

¹ Joint European Torus.

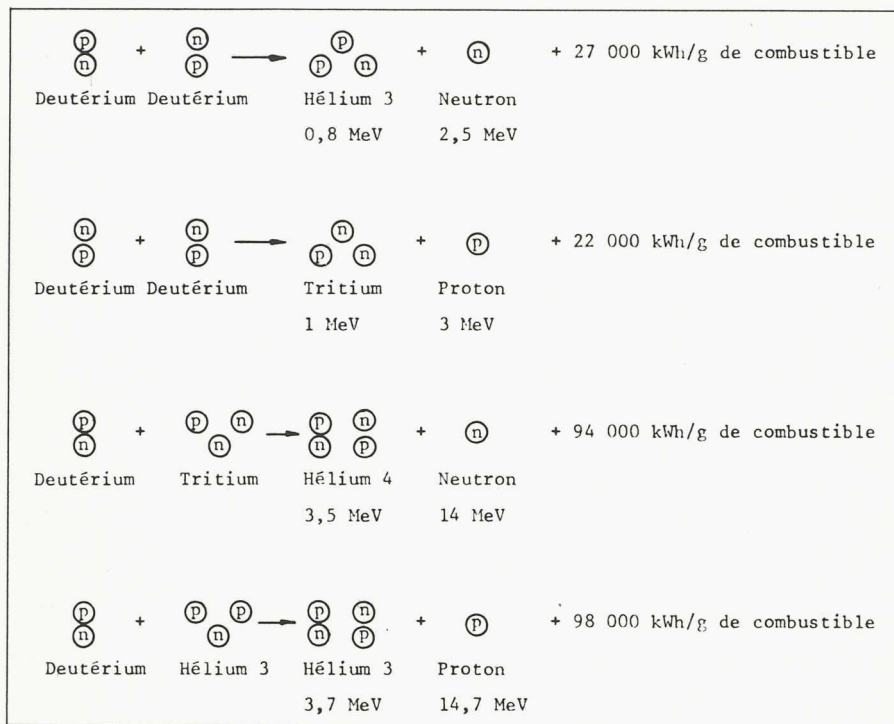


Fig. 1. — Les principales réactions de fusion.

contrôlée, l'expérience européenne JET (Joint European Torus) est appelée à jouer un rôle de première importance.

Son but est en effet de produire des conditions proches de celles d'un réacteur à fusion et, par là même, d'essayer de démontrer la faisabilité scientifique de cette nouvelle méthode de production d'énergie.

L'énergie nucléaire de fission et de fusion

Un atome est composé d'un ou plusieurs électrons (e^-) gravitant autour d'un noyau qui contient des neutrons (n) et des protons (p^+). Ces protons ayant la même charge positive, ils se repoussent sous l'effet de forces dites coulomb-

biennes. La cohésion du noyau est cependant assurée par d'intenses forces dites nucléaires, qui contrairement aux forces électriques, n'agissent qu'à très courte distance.

La masse d'un noyau atomique n'est pas (rigoureusement) égale à la somme des masses des protons et des neutrons qui le constituent. Selon la célèbre équation d'Einstein $E = \Delta m \cdot c^2$, ce défaut de masse correspond à l'apparition d'une énergie de liaison dans le noyau, énergie différente selon le type d'atome. Et c'est grâce à cette propriété qu'il existe deux possibilités de libérer l'énergie nucléaire: par la fission d'atomes lourds et par la fusion d'atomes légers (fig. 2).

L'énergie de fission peut s'expliquer schématiquement de la façon suivante. Lorsqu'un noyau atomique contient trop de particules, il devient instable

et se fractionne en un temps variant selon sa composition: un exemple typique d'un tel processus est l'éclatement de noyaux lourds tels que l'uranium.

Lorsqu'il capture un neutron, l'uranium 235 ($92 p^+$, $143 n$) éclate spontanément en produisant des noyaux plus légers, des neutrons et de l'énergie emportée sous forme cinétique par les produits de fission. Les neutrons issus de cette réaction peuvent à leur tour induire d'autres fissions: c'est la réaction en chaîne caractéristique des réacteurs nucléaires actuels (fig. 3).

La fusion (fig. 4), au contraire, est produite par la réaction de noyaux légers qui, sous certaines conditions, s'amalgament en produisant des atomes plus lourds et de l'énergie. Afin de surmonter la répulsion coulombienne qui, à cause de la charge positive des noyaux, s'oppose aux collisions et donc à la fusion de ceux-ci, des températures très élevées sont requises. En fait, le taux de réaction de fusion est proportionnel à $\langle \sigma v \rangle$, le produit de la section efficace de réaction et de la vitesse moyenne des noyaux.

Libération de l'énergie de fusion

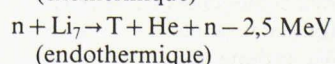
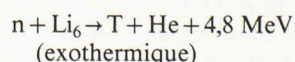
Dans le soleil et dans les étoiles, les réactions de fusion s'effectuent, avec des temps de confinement de l'énergie excessivement longs, à des températures de l'ordre de quelques millions de degrés et à des pressions extrêmement élevées. Dans les expériences (artificielles) réalisées sur Terre, de tels régimes ne sont pas atteignables et le maximum de $\langle \sigma v \rangle$ est obtenu à des températures d'environ 100 à 200 millions de degrés (pour la réaction D-T) (fig. 5).

L'agitation thermique des atomes à ces températures est telle qu'ils éclatent et forment un mélange de noyaux et d'électrons: le plasma. Dans cet état, la matière est ionisée et acquiert des propriétés particulières, notamment de réagir aux champs électriques et magnétiques.

La réaction de fusion techniquement la plus accessible est:



Dans son bilan énergétique, il faudra de plus tenir compte de la production de tritium régénéré à travers les réactions suivantes:



D'autres types de réactions comme D-D (réserves de combustible plus absorbantes) ou $p^+ - B_{11}$ (pas de neutrons) sont envisageables. Elles nécessitent cependant des conditions de fonctionnement beaucoup plus sévères (température) et ne pourraient donc être utilisées

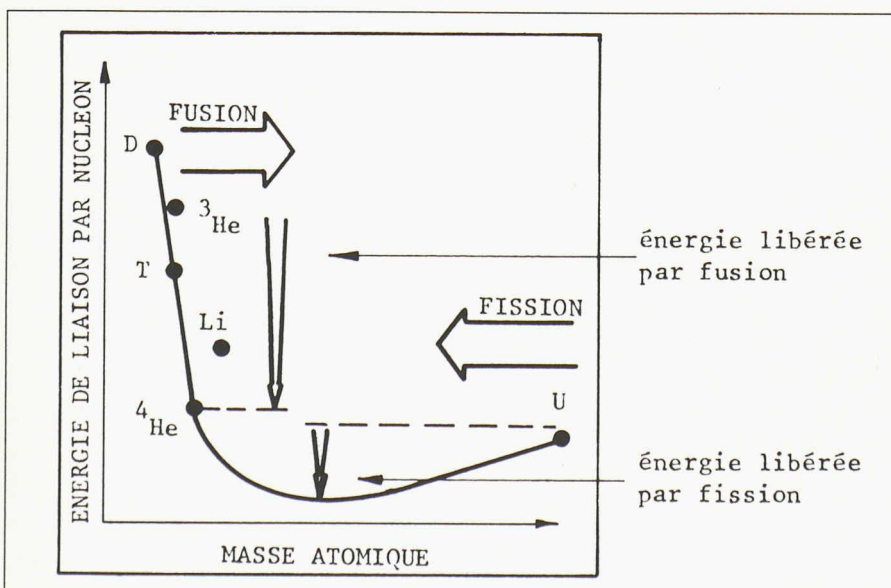


Fig. 2. — Illustration de l'énergie libérée par les réactions nucléaires.

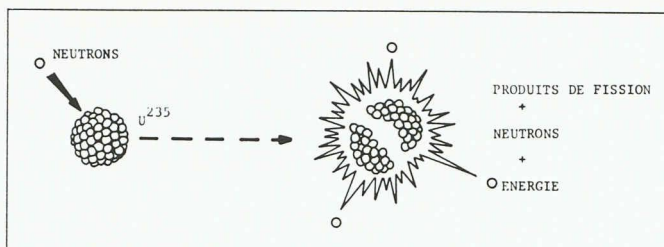


Fig. 3. — Schéma de principe de la fission.

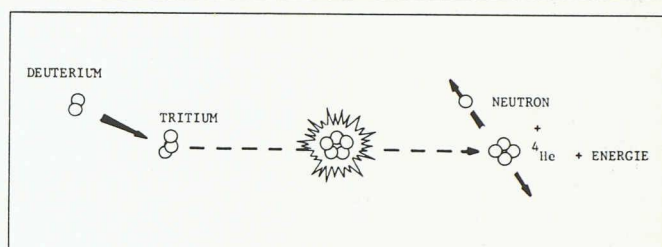


Fig. 4. — Schéma de principe de la fusion.

que dans une phase de développement ultérieure des réacteurs à fusion.

Le paramètre servant à formuler ces conditions de fonctionnement est le produit de la densité (n) du plasma par le temps (τ) de confinement de l'énergie. (τ) caractérise la qualité de l'isolation du plasma par rapport au milieu ambiant ou, comme on dit généralement, la qualité du confinement. En d'autres termes il est la mesure du temps de refroidissement du mélange de particules laissé à lui-même, sans aucun apport d'énergie.

Pour que le bilan énergétique des réactions de fusion soit positif, il faut que le produit $n\tau$ satisfasse le critère de Lawson:

$$n \cdot \tau \geq 0,7 \cdot 10^{14} [\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}]$$

pour un mélange D-T à 100 millions de degrés.

A titre indicatif, la densité n dans l'air vaut 10^{19} particules par centimètre cube (10^{19} cm^{-3}).

Quant à l'ignition du plasma, c'est-à-dire l'auto-entretien des réactions de fusion, elle nécessite des paramètres encore plus sévères ($n\tau \geq 0,2 \cdot 10^{15} [\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}]$, à 100 millions de degrés): l'énergie perdue par le système doit être au moins compensée par l'énergie de fusion qui reste et qui est

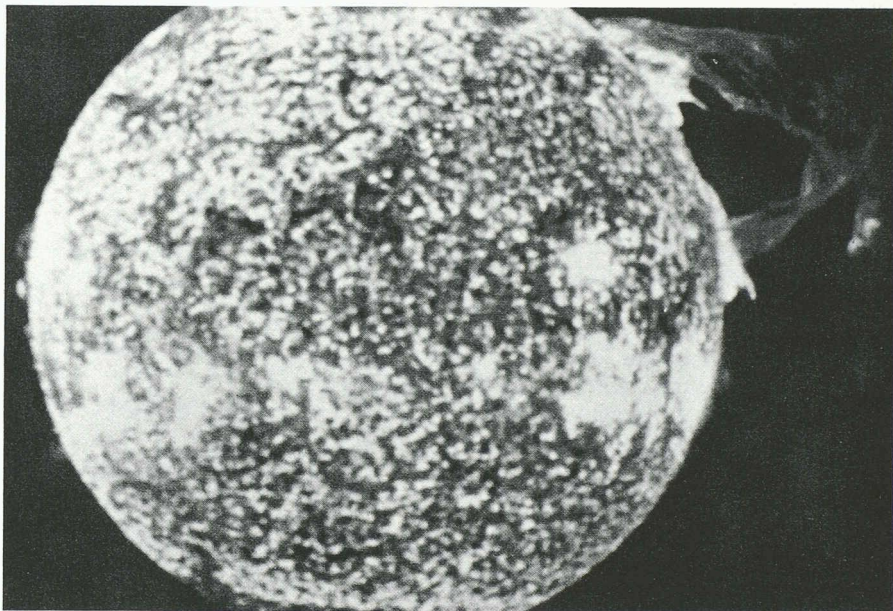


Fig. 7. — Soleil et éruption solaire: un réacteur à fusion et un plasma turbulent.

(Photo Observatoire de Sauvery/GE)

due aux particules α (He_4) dans le cas de la réaction D-T (fig. 6).

Les problèmes à résoudre

Schématiquement, les deux problèmes fondamentaux qui doivent être résolus

pour pouvoir créer un plasma de fusion sont les suivants. Comme il n'est évidemment pas possible de maintenir un plasma ayant une telle température en contact avec une paroi matérielle, il faut le contenir et l'isoler thermiquement: c'est le problème du confinement particulaire et énergétique. De plus, pour

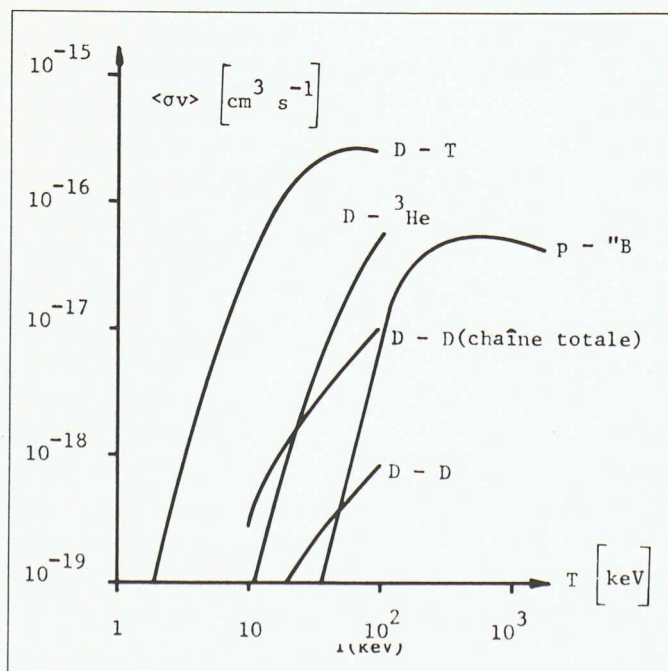


Fig. 5. — Sections efficaces des réactions de fusion en fonction de la température des particules du mélange.

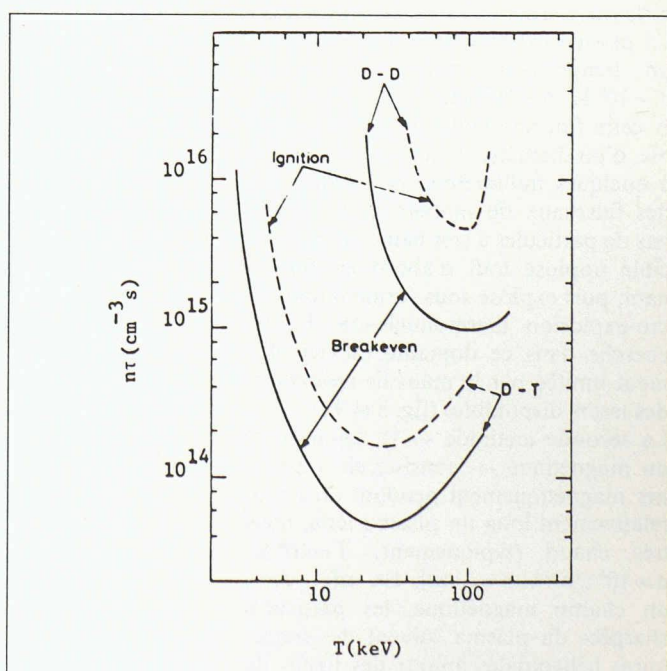


Fig. 6. — Critère de Lawson: pour que le plasma énergétique des réactions de fusion soit positif, il faut que le régime de travail se situe au-dessus des courbes de Breakeven ou d'ignition — suivant l'état d'auto-entretien des réactions (l'auto-entretien correspond à l'ignition).

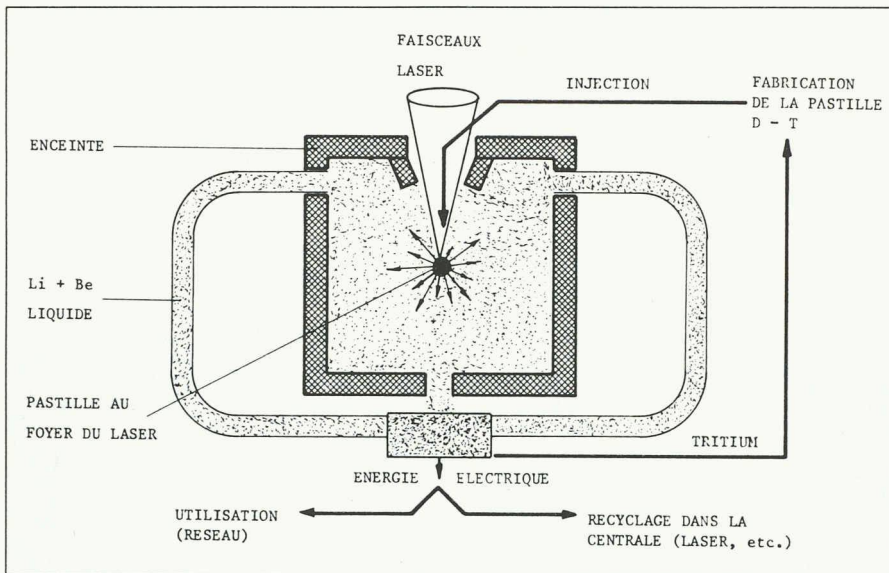


Fig. 8. — Principe de la fusion laser.

faire fusionner les atomes du plasma, il faut le porter à de très hautes températures et l'y maintenir en compensant les pertes thermiques: c'est le problème du chauffage.

a) Le confinement

Dans le soleil et les étoiles, ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise pour porter la matière du centre aux températures de fusion (fig. 7). Le confinement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation. Ces solutions ne sont évidemment pas applicables aux expériences à échelle réduite réalisées sur Terre. En conséquence, d'autres forces de confinement que la gravitation devront être utilisées.

Une première méthode — la fusion rapide ou inertielle — consisterait à créer un plasma extrêmement dense pendant un temps très court (typiquement: $T = 10^8$ K, $n = 10^{26}$ cm $^{-3}$, $\tau = 10^{-10}$ sec). A cette fin, une cible en matériau fusible, d'un diamètre de quelques dixièmes à quelques millimètres, est irradiée par des faisceaux de lumière laser ou des jets de particules à très haute énergie. La cible impluse tout d'abord en fusionnant, puis explose sous forme d'une micro-explosion thermonucléaire. La recherche dans ce domaine est actuellement limitée par le mauvais rendement des lasers disponibles (fig. 8 et 9).

La seconde méthode — la fusion lente ou magnétique — consisterait à confiner magnétiquement pendant un temps relativement long un plasma ténu, mais très chaud (typiquement: $T = 10^8$ K, $n = 10^4$ cm $^{-3}$, $\tau = 1$ sec). 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, dans le plasma, de nombreuses instabilités. Celles-ci

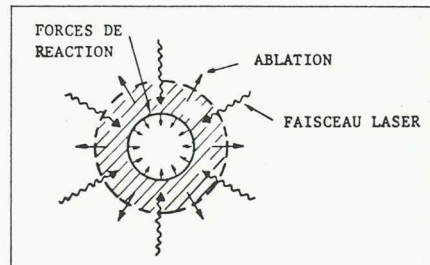


Fig. 9. — Schéma d'irradiation d'une cible par faisceau laser: compression puis explosion.

provoquent des pertes d'énergie par rayonnement inacceptables et vont parfois même jusqu'à détruire le plasma. C'est pourquoi d'importantes recherches ont été consacrées ces dernières années à l'étude de ces phénomènes.

Il existe essentiellement deux types de machines à confinement magnétique. Lorsque les lignes de champ sont droites, on parle de «configuration ouverte»: ce sont par exemple les pinches et les machines à miroir. Un des inconvénients majeurs de ces installations est la fuite de l'énergie et des particules du plasma aux extrémités du volume confiné. Par contre lorsque les lignes de champ sont refermées sur elles-mêmes en formant un tore, on parle de «configuration fermée» (fig. 10). Parmi les divers concepts de ce genre, ce sont les tokamaks (du russe *Toroidal Kamera Magnetik*) qui ont donné à ce jour les meilleurs résultats. Il existe cependant d'autres configurations toriques telles que les stellarators, les tores compacts, etc., sur lesquels se poursuivent des travaux expérimentaux à moindre échelle.

b) Le chauffage

Quant au chauffage du plasma, de nombreuses méthodes ont été développées (fig. 11). La première d'entre elles consiste à induire un courant électrique dans le plasma, en profitant des excel-

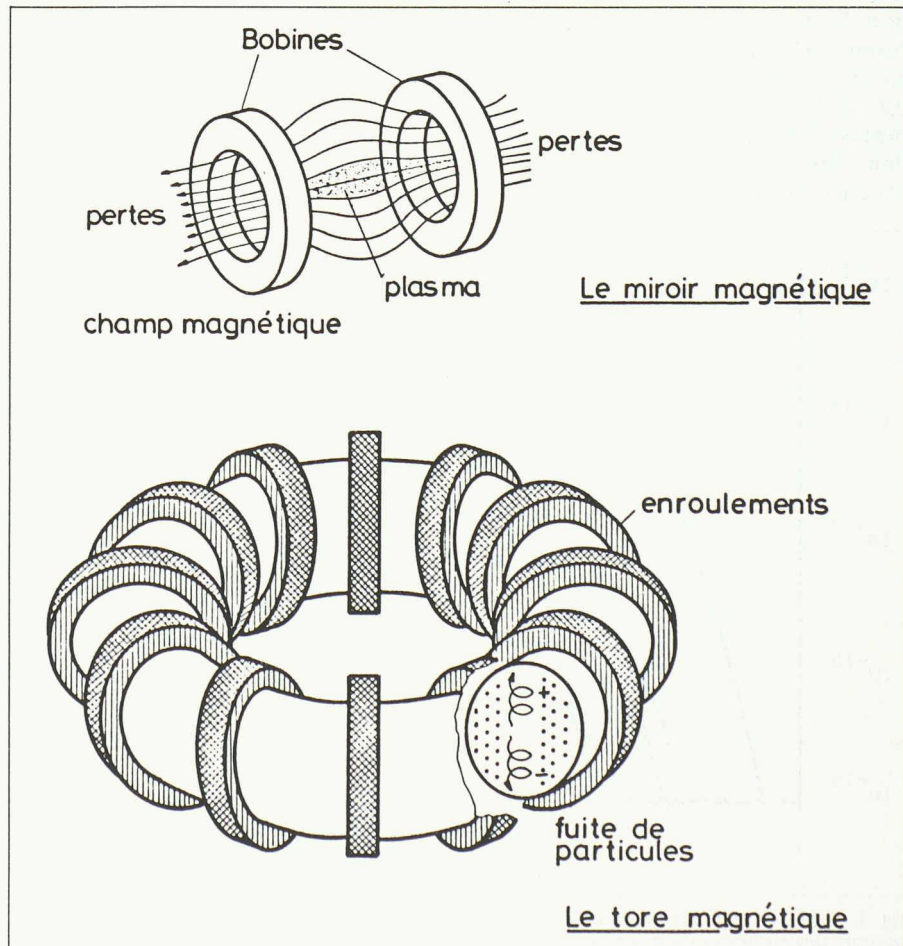


Fig. 10. — Machines à confinement magnétique.

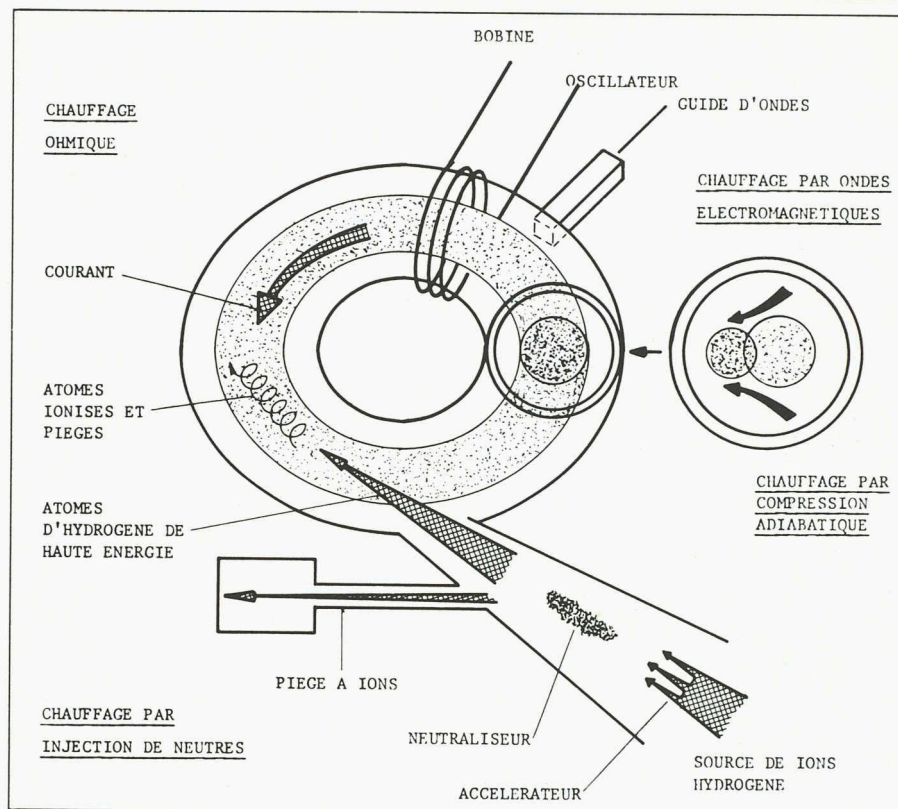


Fig. 11. — Illustration des méthodes de chauffage.

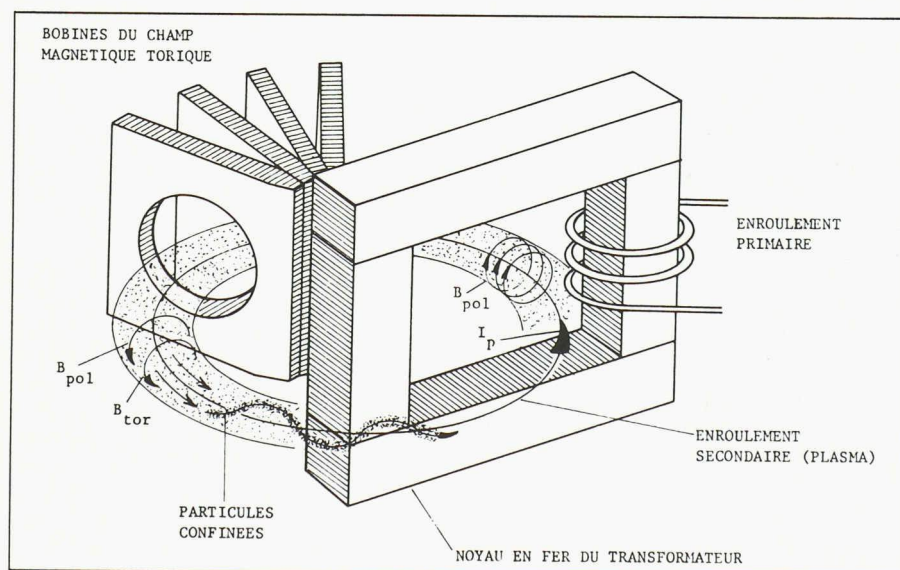


Fig. 13. — Schéma des principes du tokamak.

TABLEAU II: Les principaux tokamaks en opération

Machines		a (cm) ($a \times b$)	R (cm)	I_{\max} (kA)	B_{\max} (T)
TFR 600	(F)	25	98	500	6,0
DITE	(GB)	25	115	280	2,8
FT	(I)	21	83	600	10,2
JFT-2	(Japon)	25	90	140	1,8
JIPP T-II	(Japon)	25	90	160	2,0
ASDEX	(RFA)	40	152	500	3,0
TEXTOR	(RFA)	50	175	480	2,0
TCA	(CH)	18	61	135	1,5
T-4	(URSS)	17	100	180	3,5
T-10	(URSS)	36	150	560	4,5
ALCATOR	(USA)	10	54	200	7,5
DOUBLET	(USA)	40 x 150	140	800	2,6
ISX	(USA)	26	92	175	1,5
PDX	(USA)	47	145	500	2,4
PLT	(USA)	42	130	600	5,0

lentes qualités conductrices de celui-ci (500 fois meilleures que l'argent à 10^8 K). La dissipation ohmique produite permet d'atteindre des températures de 5 à 15 millions de degrés, limite au-delà de laquelle la méthode perd son efficacité, la résistivité du plasma décroissant lorsque sa température augmente.

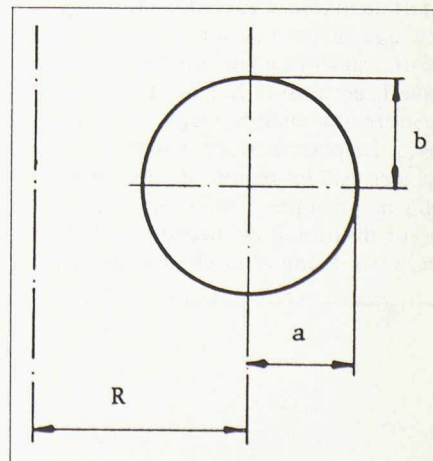
La compression adiabatique — c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'extérieur —, réalisée par l'application de forces magnétiques supplémentaires, est un autre procédé de chauffage, malheureusement limité par des paramètres techniques.

Une méthode qui a rencontré un succès expérimental considérable consiste à injecter des particules neutres de très haute énergie dans le plasma. Des systèmes d'injecteurs de faisceaux d'hydrogène neutre (40 kV, 6 MW) ont déjà été utilisés, alors que l'on construit actuellement pour JET une installation d'une puissance de quelques MW, opérant à 120-160 kV et utilisant du deutérium. Cette méthode souffre malheureusement d'une efficacité trop faible et d'un prix trop élevé, c'est pourquoi la production de particules neutres à partir de faisceaux primaires d'ions négatifs est à l'étude.

Un autre procédé consiste à coupler au plasma, à travers diverses résonances, l'énergie d'ondes électromagnétiques. Connue sous le terme général de « chauffage h.f. », cette méthode porte différents noms selon la fréquence utilisée: TTMP (~ 50 kHz), ICRH (~ 50 MHz), LHR ($\sim 1,5$ GHz), ECRH (~ 30 GHz et plus, domaine dans lequel il n'existe pas encore de générateurs puissants). Des évidences de chauffage ont été vérifiées à toutes ces fréquences, allant du kW au MW. L'étude d'un nouveau procédé de chauffage h.f. — l'absorption résonnante par ondes d'Alfvén (1-5 MHz) — est d'ailleurs l'objectif du tokamak suisse TCA, sis au Centre de recherches en physique des plasmas, à l'EPFL (fig. 12).

La voie tokamak

Comme toutes les configurations fermées, le tokamak a un champ magnéti-



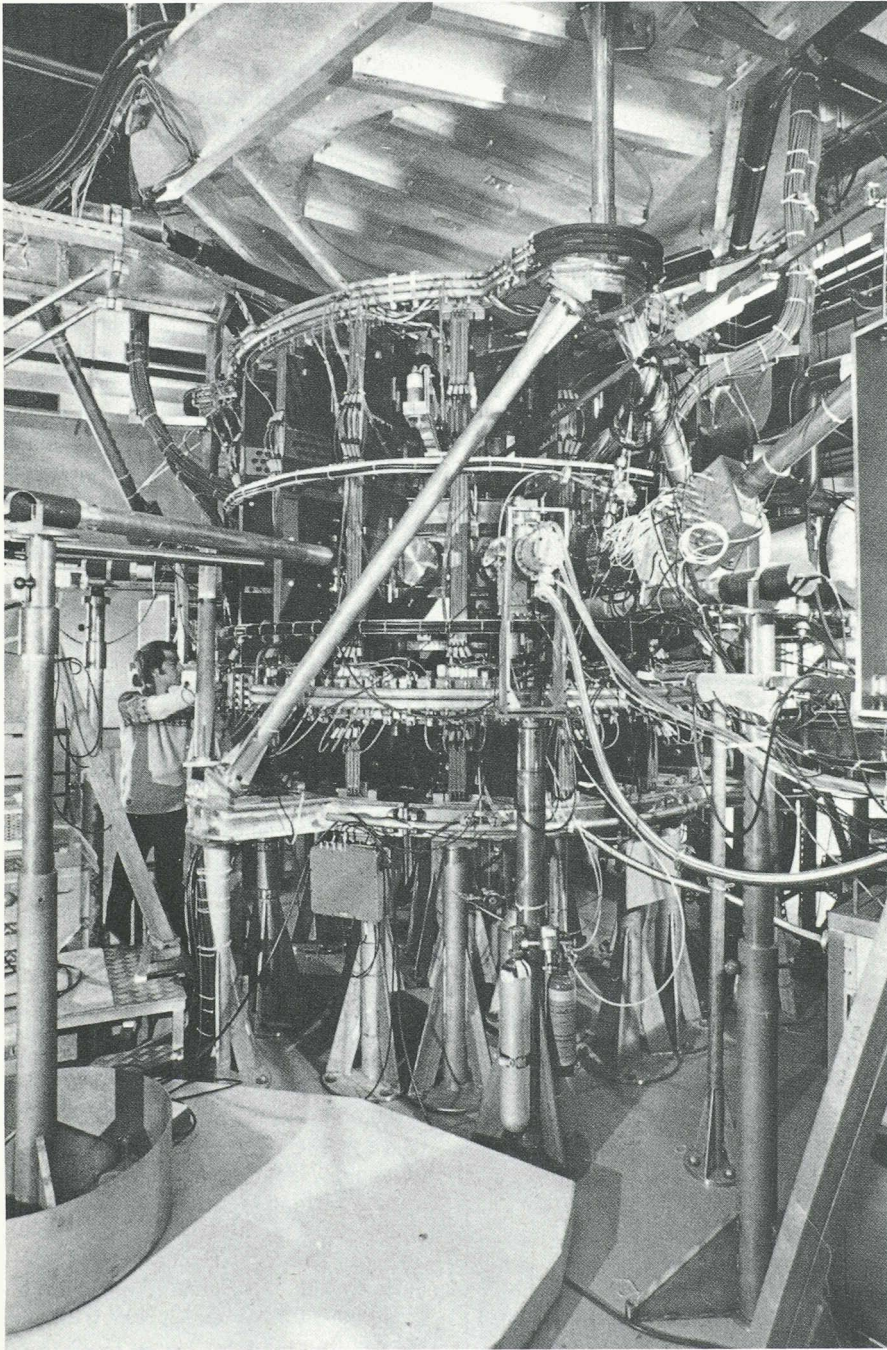


Fig. 12. — Le Tokamak TCA (Tokamak pour l'étude du chauffage du plasma par absorption d'énergie déposée par les ondes dites d'Alfvén); centre de recherches en physique des plasmas, EPFL.

que torique B_{tor} , produit par une série de bobines disposées autour de l'enceinte contenant le plasma. D'autre part, le tokamak est construit de façon à ce que le plasma forme le secondaire d'un transformateur: un courant électrique I_p est ainsi induit, qui à son tour engendre un champ magnétique polaire B_{pol} . Le plasma ayant tendance à se déplacer vers les régions de moindre énergie magnétique, c'est-à-dire vers l'extérieur du tore, il est nécessaire de la stabiliser à l'aide d'un champ magnétique

vertical B_v . La superposition de ces trois champs, ainsi que le courant I_p créent des surfaces magnétiques ayant la topologie de tores emboîtés, évitant ainsi que les lignes de force ne se ferment individuellement et les particules du plasma sont ainsi confinées (fig. 13). Pendant ces vingt dernières années, des progrès considérables ont été réalisés avec des systèmes du type tokamak. Les paramètres extrêmes atteints à ce jour sont $n\tau = 4 \cdot 10^{13} [\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}]$ avec une température des particules $T = 1 \text{ keV}$

($1 \text{ eV} = 11\,600^\circ\text{C}$), respectivement $T = 6 \text{ keV}$ pour $n\tau = 4 \cdot 10^{11} [\text{cm}^{-3} \cdot \text{sec}]$. Pour atteindre le paramètre de la fusion thermonucléaire, il faudra donc encore augmenter simultanément la température d'un facteur 3 et le produit $n\tau$ d'un facteur 20, et ce dans la même installation expérimentale.

La trentaine de tokamaks de petite et de moyenne taille existant dans le monde ont pour objectif l'étude des problèmes spécifiques à ce type de configuration, contribuant en cela de façon déterminante à la conception et à la réalisation des grands projets (tableau II). Ceux-ci sont actuellement au nombre de quatre en construction: le projet européen JET sous l'égide de l'Euratom en Grande-Bretagne, TFTR (Test Fusion Tokamak Reactor) aux Etats-Unis, T-15 en URSS et JT-60 au Japon. Dans ces machines, les paramètres du plasma seront poussés jusqu'aux limites des critères de faisabilité scientifique de la fusion contrôlée, les machines soviétique et japonaise se distinguent par l'utilisation respectivement de bobines magnétiques supraconductrices et de diverteurs.

Mais même si les scientifiques espèrent réussir le «breakeven» dans la fusion thermonucléaire, le réacteur commercial n'est certainement pas pour le XX^e siècle: en effet, il faudra bien encore une vingtaine, si ce n'est une trentaine d'années pour résoudre les immenses problèmes théoriques scientifiques et techniques de la fusion. Le programme de recherche européen prévoit de construire vers 1990 une installation post-JET, appelée NET (Next European Torus) et dont le but principal sera l'étude de la faisabilité technologique de la fusion. Cette machine représente une étape nécessaire à la définition et à la construction vers l'an 2000 d'un prototype de réacteur (DEMO). En addition au programme JET, l'EURATOM poursuit avec les centres de recherches associés des études intensives sur des installations de petite et moyenne taille, dont la flexibilité permet d'aborder des problèmes spécifiques (méthodes de chauffage, configuration magnétique, etc.).

(à suivre)

Adresse des auteurs:

Pierre Jean Paris,
Wolfgang Simm,
Francis Troyon,
Centre de recherche physique
des plasmas (CRPP) de l'EPFL
Avenue des Bains 21
1007 Lausanne