

Maîtriser sur Terre la fusion des noyaux légers tels que le deutérium et le tritium à des fins de production d'énergie ouvrirait la voie à des ressources quasiment illimitées. C'est l'objectif des recherches engagées par les grandes nations industrielles et, en particulier, par l'Union européenne. L'état de développement de ces recherches doit permettre à la communauté "fusion" de relever aujourd'hui le défi de la construction du dispositif expérimental devant démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion : ITER. Non producteur d'électricité, ITER servira de base à l'étape suivante : un démonstrateur de réacteur électrogène.

La fusion par **confinement magnétique**



Les installations du réacteur expérimental ITER telles qu'elles se présenteraient sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône) proposé par l'Union européenne. Au premier plan, l'installation existante construite autour de Tore Supra.

Les grands principes de la fusion

Pour obtenir une réaction de **fusion**, il faut rapprocher avec suffisamment de force deux **noyaux** qui, chargés tous deux positivement, ont une tendance naturelle à se repousser (encadré D, **Les réactions de fusion nucléaire**, p. 47). Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière naturelle et arriver dans la zone, très proche du noyau, où se manifestent les forces nucléaires capables de l'emporter.

La fusion exige donc de hautes températures du milieu réactant, typiquement plus de 100 millions de degrés (10 **keV**), qui permettent d'optimiser la quantité de réactions produites. À de telles températures, les **électrons** sont détachés des noyaux et la matière entre alors dans son quatrième état, l'état "**plasma**". Le plasma

existe dans l'univers sous des formes très diverses et avec des caractéristiques en température et densité très variables.

La réaction de fusion la plus accessible en pratique est la réaction impliquant le **deutérium** (D) et le **tritium** (T), deux **isotopes** de l'**hydrogène**, sur laquelle se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée à des fins énergétiques.

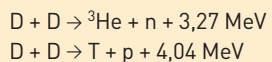
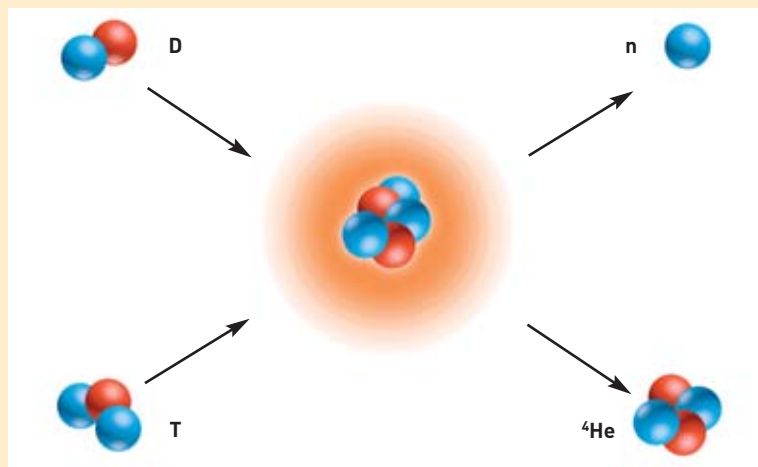
Les conditions nécessaires aux réactions de fusion

En plus de températures élevées, d'autres conditions sont nécessaires pour espérer utiliser la fusion comme source d'énergie. Le plasma chaud subit des pertes thermiques diverses, par rayonnement mais aussi par

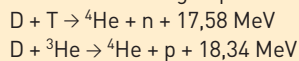
D Les réactions de fusion nucléaire

Pour obtenir la **fusion** de deux **noyaux** atomiques légers, il faut les rapprocher tout près l'un de l'autre alors qu'ils se repoussent naturellement, portant tous deux une charge électrique positive. Si l'on veut récupérer l'énergie libérée par cette fusion, il faut donc d'abord fournir celle nécessaire pour franchir cette barrière et permettre à chaque noyau d'arriver dans la zone, très proche de l'autre, où se manifestent les forces nucléaires capables de vaincre cette répulsion électrostatique ou **barrière coulombienne**. Une fois ce résultat obtenu, les réactions les plus énergétiques sont celles qui aboutissent au noyau fusionné dont l'énergie de liaison est la plus élevée. C'est en l'occurrence le cas de l'**isotope** ^4He de l'hélium, qui possède quatre **nucléons** (deux **protons** p et deux **neutrons** n).

Parmi les réactions de fusion qui produisent de l'énergie en même temps qu'elles génèrent, d'une part, un nouveau noyau, noyau d'**hélium** (He) ou de **tritium** (T), et d'autre part un **nucléon**, quatre sont *a priori* particulièrement intéressantes*. Les deux premières sont séduisantes parce qu'elles n'impliquent que du **deutérium** (D); l'isotope de l'**hydrogène** le plus abondant sur Terre. Leur maîtrise peut constituer le but ultime de la fusion contrôlée, mais elles sont, de loin, les plus difficiles à réaliser.



Les deux suivantes, formant le noyau très stable de l'hélium 4, sont particulièrement énergétiques :



La réaction de fusion la plus facile à réaliser, car présentant la **section efficace** la plus élevée, est celle impliquant un noyau de deutérium (D) et un noyau de tritium (T), fusion qui donne un noyau d'hélium et un neutron dont l'énergie est respectivement de 3,5 MeV et de 14,1 MeV. C'est donc sur elle, appelée D-T, que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée, aussi bien pour la **fusion à confinement inertiel** que

pour la **fusion à confinement magnétique**. La production du tritium nécessaire est assurée par une cinquième réaction mettant en jeu le **lithium** et... les neutrons de la réaction D-T.

$${}^6\text{Li} + \text{n} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + 4,78 \text{ MeV}$$

$${}^7\text{Li} + \text{n} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T} + \text{n} - 2,47 \text{ MeV}$$

Les combustibles primaires, c'est-à-dire les véritables matières premières d'un réacteur, sont donc le deutérium et le lithium (Li).

*Ces réactions sont dites *thermonucléaires* parce que seule une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés, en même temps que d'autres conditions de densité et de temps de confinement (cf. texte principal), permet de les obtenir. Voir en p. 8 le tableau des principales réactions nucléaires qui ont lieu dans le Soleil.

convection et par **conduction**. On définit généralement un temps synthétisant l'ensemble de ces pertes appelé **temps de confinement de l'énergie** (τ): c'est le temps que met le plasma à se vider de sa chaleur si l'on coupe brutalement les sources d'énergie qui l'alimentent. D'une certaine façon, τ caractérise la qualité de l'isolation thermique du plasma.

Pour que la fusion soit rentable sur le plan énergétique, il faut que l'énergie produite par les réactions de fusion excède largement ces pertes. Cette condition impose une limite inférieure au produit densité (n) \times temps de confinement de l'énergie, donnée par le **critère** dit de **Lawson**: $n\tau > f(Q)$ où Q est le rapport entre la puissance de fusion produite et la puissance extérieure fournie au plasma pour le chauffer. Le facteur Q est souvent appelé **facteur d'amplification de l'énergie**. Deux valeurs typiques de Q sont l'unité et l'infini. Si $Q = 1$, la puissance générée par le plasma est égale à la puissance qui lui est couplée de l'extérieur. Cet état connu sous le nom de **breakeven** est approché dans les machines expérimentales actuelles les plus performantes. L'égalité $Q = \infty$ signifie que la puissance extérieure apportée au plasma est nulle. Le plasma s'auto-entretient; on dit qu'il est en **ignition**.

Pour un plasma de deutérium et de tritium, la fonction $f(Q)$ vaut environ 1 pour $Q = 1$ et tend rapidement vers 5 pour les valeurs élevées de Q . Dans ces conditions et pour une température de 10 keV, le critère de Lawson s'écrit: $n\tau \approx 10^{20} \text{ (m}^{-3}\cdot\text{s)}$.

Fusion dans les étoiles... fusion sur Terre

Dans le Soleil et les étoiles, les conditions nécessaires à la fusion en termes de température, densité et temps de confinement sont maintenues grâce à la gravité, solution qu'il est impossible d'utiliser sur Terre. La pression exercée par la gravitation peut y être remplacée par la pression exercée par des champs magnétiques intenses.

Des boîtes magnétiques pour contenir le plasma

Le plasma est un fluide électriquement conducteur, mais neutre globalement, et dans lequel les **ions** et les électrons se meuvent presque indépendamment les uns des autres. Plongés dans un champ magnétique, ils vont suivre des trajectoires en forme d'hélices qui s'enroulent autour des lignes de champ et y restent "piégés". C'est le principe du confinement magnétique.

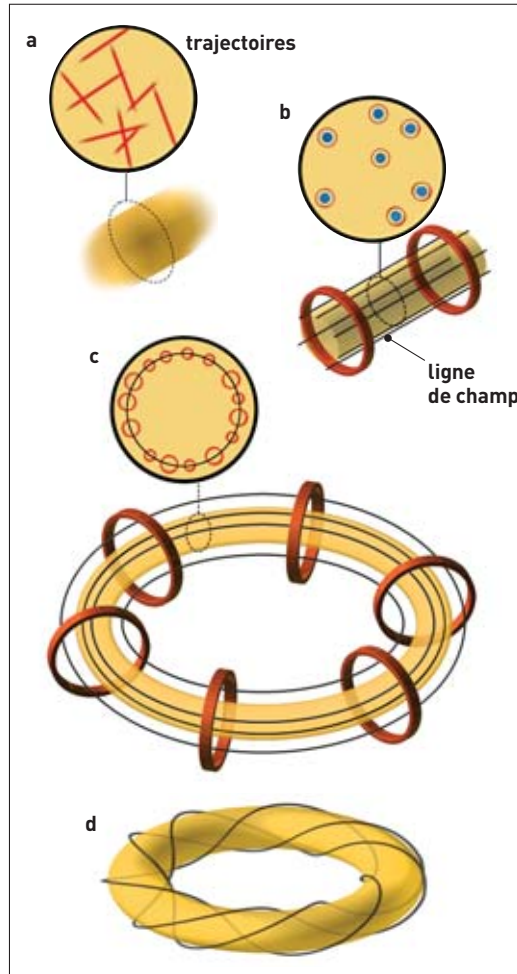
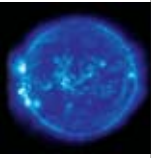


Figure 1. Principe du confinement magnétique. Dans un plasma à l'état libre (a), les particules ont une trajectoire aléatoire et vont s'échapper. Si ce plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne (b), les particules s'enroulent autour des lignes de champ et ne peuvent plus atteindre les parois latérales. Afin d'éviter les pertes aux extrémités, la boîte est refermée en tore (c). Pour minimiser encore les fuites de particules, les lignes de champ doivent être hélicoïdales (d).

Les géométries droites (ou cylindriques) d'abord étudiées présentent l'inconvénient de laisser échapper le plasma aux extrémités. Pour éviter cela, le cylindre est refermé sur lui-même afin d'obtenir une configuration torique. Cependant, dans une telle configuration, la courbure (et donc la force centrifuge) et l'inhomogénéité du champ magnétique (plus élevé sur la face intérieure du tore que sur la face extérieure) sont la cause d'une dérive des particules chargées. Ions et électrons ont tendance à se séparer, les uns vers le haut et les autres vers le bas, et ils finissent par sortir du piège magnétique. Pour compenser cet effet de dérive, les lignes de champ sont rendues hélicoïdales (figure 1). Les particules passent alors successivement en haut puis en bas de la configuration magnétique: l'effet de dérive, qui est toujours dans le même sens, est alors en moyenne compensé. Ceci est réalisé en ajoutant au champ torique (dit "toroïdal") initial un autre champ magnétique qui lui est perpendiculaire (le champ "poloïdal"). Dans un "tokamak", machine de conception russe, le champ magnétique poloïdal est créé par un courant axial circulant dans le plasma lui-même, qui devient le secondaire d'un transformateur (les plasmas ainsi créés sont dits "inductifs"). Le tokamak est donc au départ un dispositif *impulsionnel*. Il peut devenir continu en générant le courant axial de façon "non inductive" par des ondes ou des faisceaux de particules qui transfèrent leur impulsion aux électrons du plasma. Dans un "stellarator", la configuration magnétique repose entièrement sur des courants circulant dans des bobines externes. Cette configu-

ration, naturellement continue mais plus complexe sur le plan des principes et de la géométrie, n'est pas au même niveau de développement que la configuration tokamak. Ses qualités intrinsèques motivent toutefois la poursuite des efforts dans ce domaine. Le plasma se comporte comme un gaz et exerce vers l'extérieur une pression (cinétique) dont la valeur augmente avec la température et la densité. Si l'on veut confiner le plasma, cette pression doit être équilibrée par une pression vers l'intérieur. C'est le rôle de la pression (magnétique) exercée par le champ magnétique. Dans la pratique, on montre que pour éviter l'apparition d'instabilités hydrodynamiques, la pression cinétique doit être très inférieure (d'un facteur 10) à la pression magnétique. On voit donc ici apparaître une limite sur la densité. Avec des valeurs usuelles pour la température (10-20 keV) et le champ magnétique (5-10 teslas), cette densité limite est de l'ordre de 10^{20} m^{-3} . Ceci fixe aussi la valeur du temps de confinement que doit viser la fusion magnétique: de l'ordre de quelques secondes (critère de Lawson).

Comment chauffer le plasma ?

D'emblée, le plasma n'a jamais la température requise pour les réactions de fusion. Outre le chauffage par le courant qui circule dans le tokamak (chauffage ohmique), deux méthodes sont possibles pour chauffer un plasma :

- le chauffage par injection de particules neutres de haute énergie consiste à créer et accélérer un faisceau d'ions, en dehors de l'enceinte de confinement. Ce faisceau est ensuite neutralisé avant de pénétrer dans le plasma où les particules sont à nouveau ionisées et confinées par le champ magnétique. Les collisions redistribuent l'énergie et la température du plasma augmente;
- dans le chauffage par ondes électromagnétiques à des fréquences caractéristiques du milieu, l'énergie des ondes est transmise au plasma par des antennes qui tapissent une partie de l'enceinte de confinement. Le choix de la fréquence permet de définir l'espèce de particules (ions ou électrons) qui sera chauffée et la région où se fera l'absorption de l'onde et donc le chauffage.

En plus de chauffer le plasma, ces méthodes permettent de générer du courant de façon permanente et donc d'envisager un fonctionnement continu du tokamak en mode "non inductif".

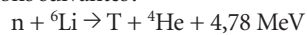
Dans un réacteur, la température du plasma pourrait être amenée au niveau adéquat par une combinaison de ces méthodes. Lorsque les réactions de fusion seront en nombre important, l'énergie portée par les noyaux d'hélium qui restent confinés dans le plasma deviendra alors la méthode de chauffage dominante ($Q > 5$).

Le principe du réacteur

Le principe du réacteur est présenté en figure 2. Le mélange combustible deutérium-tritium est injecté (en 1) dans une chambre où, grâce au système de confinement et de chauffage, il passe à l'état de plasma et brûle de façon continue (2). Le plasma produit des cendres (atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de rayonnement ou de particules chargées (3), qui abandonnent leur énergie dans la "première paroi",

premier élément matériel rencontré au-delà du plasma. L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des **neutrons** est, quant à elle, convertie en chaleur dans la couverture (4), élément situé après la première paroi, à l'intérieur de la chambre à vide. Cette chambre est le composant qui clôt l'espace où a lieu la réaction de fusion. Première paroi, couverture et chambre à vide sont bien évidemment refroidies par un système d'extraction de la chaleur. Cette chaleur est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble turbine et alternateur (5) qui génère finalement l'électricité.

La couverture remplit plusieurs fonctions. Son premier rôle consiste à récupérer l'énergie que les neutrons abandonnent en chauffant les matériaux. Un fluide caloporteur circule dans la structure et évacue la chaleur produite vers les équipements classiques que sont le générateur de vapeur, la turbine et l'alternateur. Son deuxième rôle est de régénérer le tritium nécessaire à la réaction de fusion. Le tritium n'existe en fait qu'en très petite quantité dans la nature. Il sera donc produit *in situ* par bombardement neutronique sur un autre corps, le **lithium**, présent dans la couverture, *via* les réactions suivantes :



On a évidemment intérêt à privilégier la première réaction, qui dégage de l'énergie. Ainsi la couverture est, elle aussi, le siège de réactions productrices d'énergie, intervenant pour 20% dans le bilan du réacteur. Le lithium peut être sous forme solide (céramique) ou liquide (alliage métallique), suivant le concept de couverture.

La couverture doit, enfin, jouer un rôle de protection en réduisant considérablement l'énergie et le flux neutronique afin d'abriter les composants suivants (chambre à vide, système magnétique...).

Pour atteindre un rendement global de l'ordre de 35%, un réacteur devra pouvoir réaliser des facteurs d'amplification de l'énergie Q supérieurs à 25-30. Ceci impose que les réacteurs de fusion seront, nécessairement, des unités de grande taille, typiquement capables de

produire 1 000 MW électriques, soit l'ordre de grandeur de la capacité d'un réacteur de **fission**.

Les avantages de la fusion

L'énergie de fusion présente un certain nombre d'avantages importants. Ses combustibles sont abondants et géographiquement également répartis. Le deutérium peut être extrait de façon économique de l'eau de mer (à raison de 33 g par m³). Les ressources en deutérium représentent plus de 10 milliards d'années de consommation annuelle mondiale ! Le tritium est fabriqué *in situ* à partir du lithium, que l'on trouve dans l'écorce terrestre. Les ressources en lithium sont estimées à 2 000 ans, limite repoussée à plusieurs millions d'années si l'élément est tiré de l'eau de mer.

La fusion présente des avantages en terme de sûreté. Les conditions d'entretien de la réaction de fusion permettent l'utilisation d'un plasma très peu dense (quelques grammes de combustible dans un volume supérieur à 1 000 m³). La quantité de combustible présente dans la chambre de combustion pendant la réaction est donc toujours très faible. Toute perturbation non contrôlée de ce milieu entraîne son refroidissement rapide et l'arrêt des réactions de fusion. L'emballement de la réaction est par conséquent intrinsèquement impossible.

L'énergie de fusion, comme les énergies renouvelables et la fission, ne produit en fonctionnement ni gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique.

Aucun des combustibles de base, le deutérium et le lithium, pas plus que le produit de la réaction, l'hélium (un gaz rare), n'est **radioactif** ou toxique. Le tritium sera entièrement produit sur site. C'est un élément radioactif qui se décompose en hélium par émission d'un rayon **bêta** peu énergétique (5,7 keV) et avec une **période** relativement courte (12,3 ans). Sa radiotoxicité est faible. Une conception adéquate du réacteur devra permettre de prendre en compte la **perméation** importante du tritium à travers les matériaux.

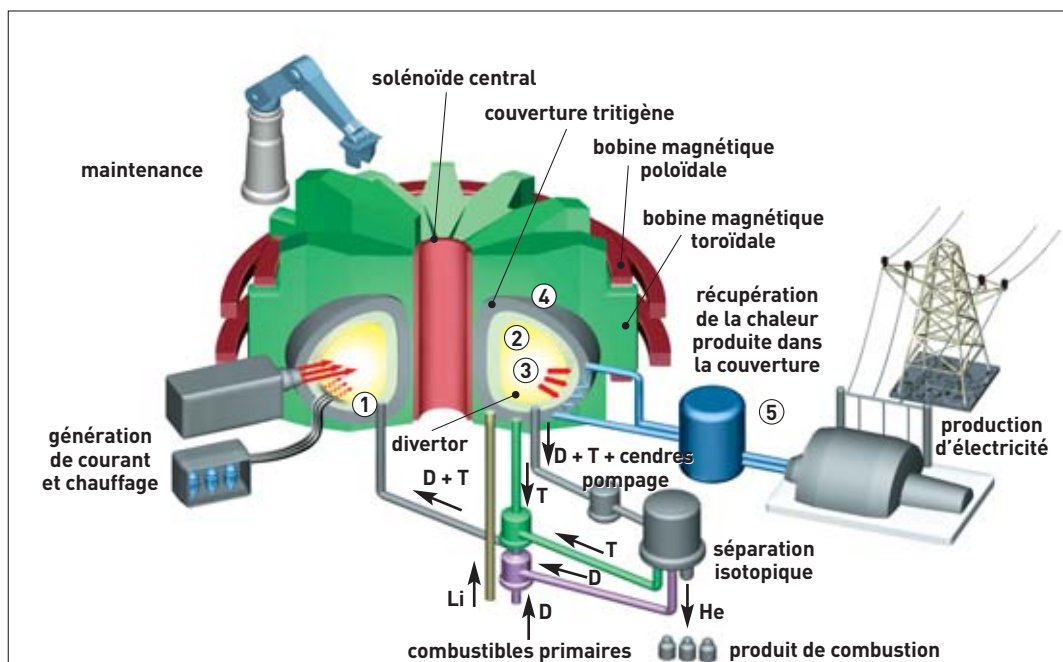
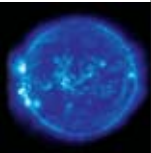


Figure 2. Schéma de principe d'un réacteur à fusion électrogène.



Comme dans toute installation soumise à un flux de particules de haute énergie (réacteur à fission, accélérateur), les matériaux constituant la structure du réacteur seront **activés**. Sur le plan de l'impact environnemental, le choix pour ces éléments de matériaux à temps de décroissance rapide devrait permettre de minimiser les quantités de déchets radioactifs. Une centaine d'années après l'arrêt définitif du réacteur, la majorité (voire la totalité) de ces matériaux devrait pouvoir être, soit considérée comme déchet de très faible activité, soit recyclée dans la filière nucléaire.

L'évolution des recherches

Les premières expériences de confinement avec des champs magnétiques sont initiées aux États-Unis dès 1938. L'année 1958 marque la déclassification des recherches. Plusieurs configurations magnétiques sont étudiées : décharges⁽¹⁾ toroïdales, machines à miroir... Afin de se donner les moyens de relever les défis scientifiques et technologiques posés par la maîtrise de l'énergie de fusion, des collaborations s'organisent à l'échelle internationale. Au niveau européen, ces recherches sont coordonnées par le traité Euratom dès 1957. Cette organisation complètement intégrée, toujours en vigueur, a beaucoup contribué à la position dominante de l'Europe sur le sujet.

En 1968, les scientifiques russes de l'Institut Kurchatov annoncent des performances largement supérieures aux autres expériences avec une configuration magnétique bien particulière : le tokamak, qui va rapidement supplanter les autres configurations. Dès lors, de nombreux tokamaks de taille encore modeste sont

(1) Décharge : terme désignant la présence d'un plasma dans l'enceinte de confinement.

Le JET, *Joint European Torus*, est actuellement le tokamak le plus puissant pour l'étude de la fusion thermonucléaire contrôlée.

Tore Supra, particulièrement adapté aux décharges longues, préfigure ITER, notamment par ses composants supraconducteurs et ses parois activement refroidies.



CEA/DRFC

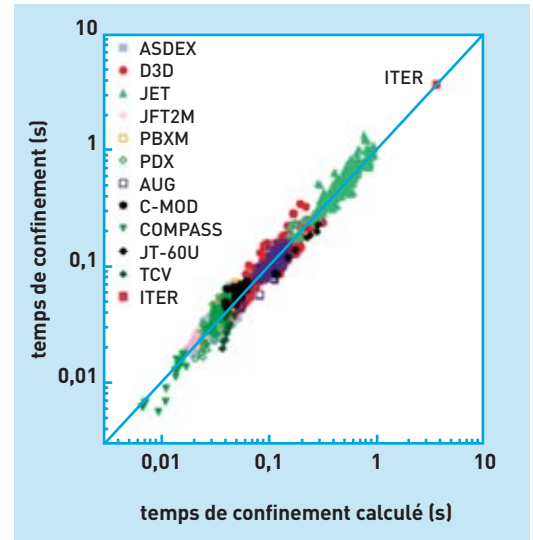
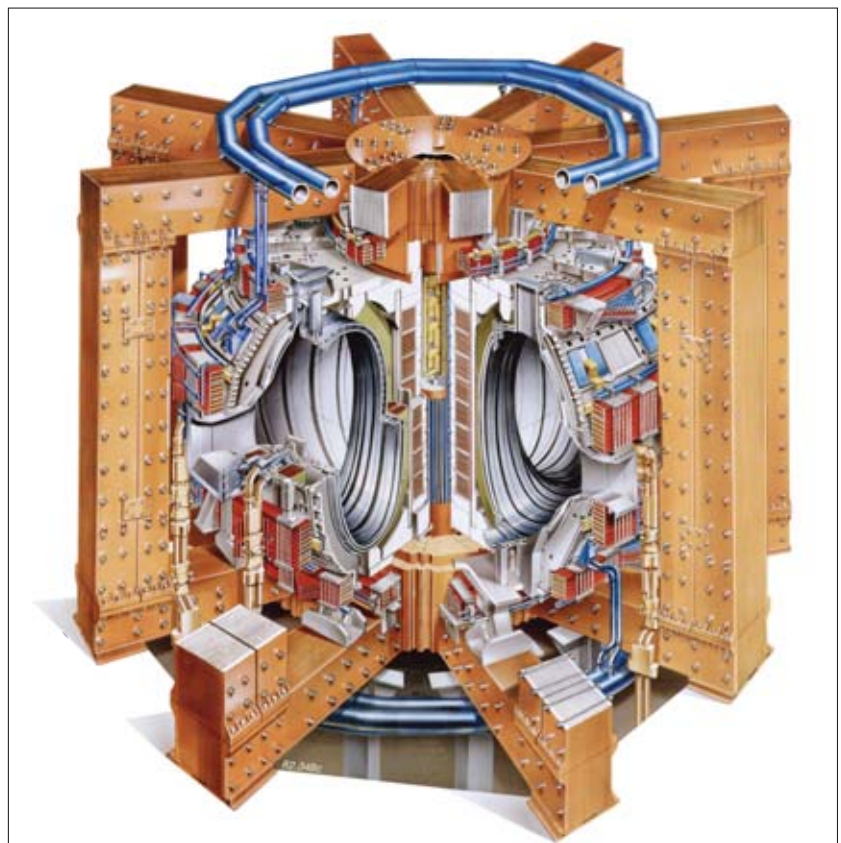


Figure 3. Loi d'échelle sur le confinement (comparaison calcul/expérience). L'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur différentes installations permet de déterminer une loi d'échelle empirique exprimant le temps de confinement à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma. Cette loi d'échelle, qui couvre deux ordres de grandeur de variation des paramètres, est d'une importance primordiale pour extrapoler les performances actuelles à celles d'une machine de prochaine génération.

construits en France, en Allemagne, en Angleterre et en Italie, mais aussi aux États-Unis, en Union soviétique et au Japon. C'est sur ces dispositifs que sont développés les diagnostics ainsi que les moyens de chauffage du plasma qui permettent de progresser rapidement sur la physique des tokamaks.

Les projets de construction de la plupart des grands tokamaks modernes (JET en Europe, JT60 au Japon,



JET

TFTR aux États-Unis) sont lancés vers la fin des années 1970. La France, après avoir fait entrer l'Europe dans l'ère des tokamaks avec la machine TFR de Fontenay-aux-Roses (machine la plus performante au monde de 1973 à 1976), prépare dès les années 1980 la technologie et la physique du fonctionnement continu pour les réacteurs à fusion, avec la construction d'un grand tokamak à aimant toroïdal supraconducteur, Tore Supra, qui entre en service en 1988.

Des principes de base démontrés

Depuis le début de l'ère des tokamaks, à la fin des années 1960, des progrès considérables ont été accomplis dans la compréhension des phénomènes physiques et le développement des technologies mises en œuvre dans la construction des outils expérimentaux.

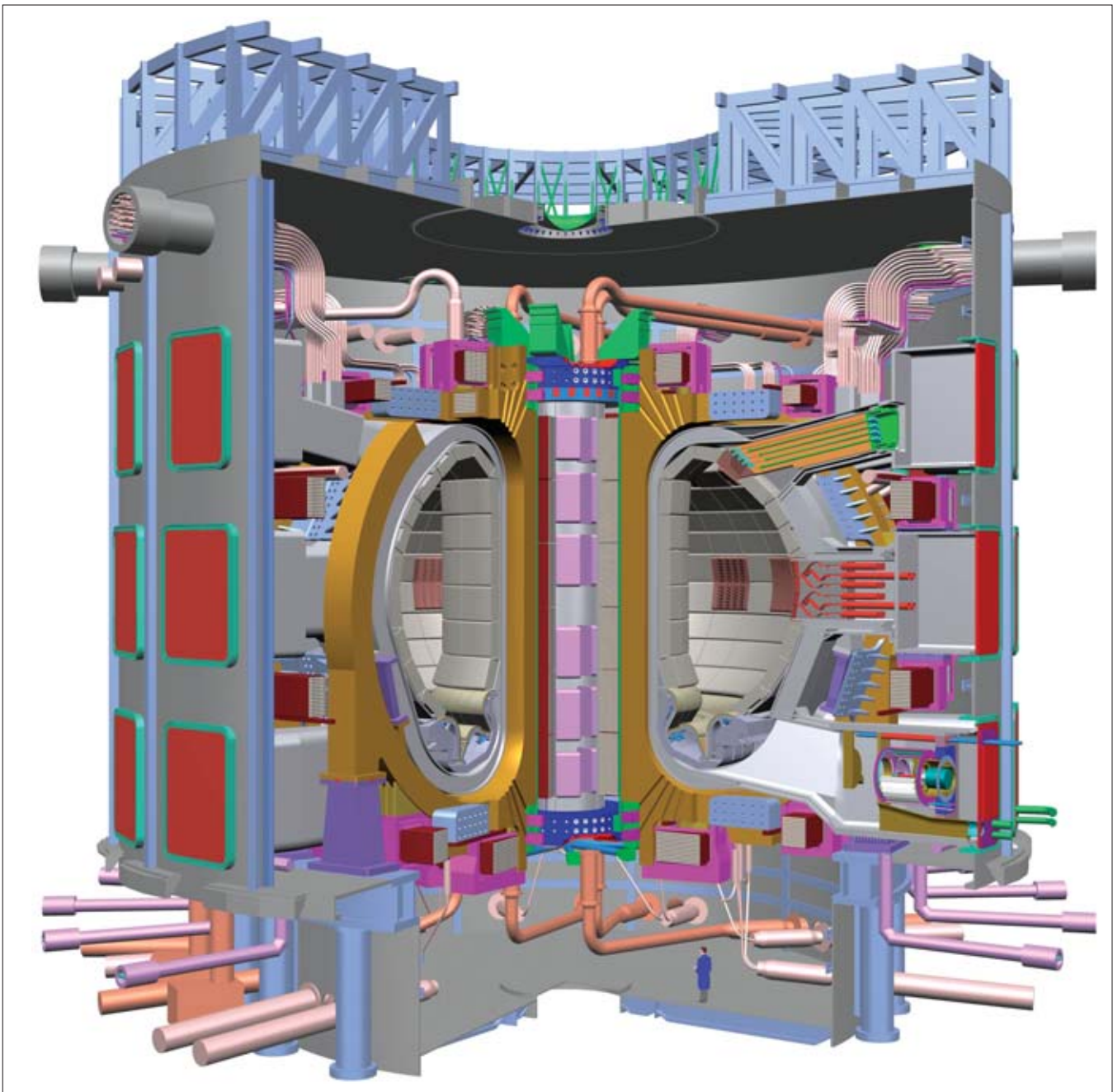
Ces résultats ont été obtenus sur les nombreuses installations, de tailles très diverses, conçues et exploitées dans les années 1970 à 1990 (tableau, p. 52). Tous les

grands problèmes posés par l'énergie de fusion ont été abordés et, pour la plupart d'entre eux, des solutions ont été proposées.

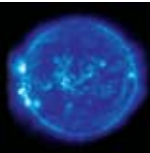
Confinement amélioré du plasma

Les nombreuses études expérimentales sur le confinement menées dans les machines à travers le monde ont notamment mis clairement en évidence que le confinement s'améliorait avec la taille de la machine et qu'il se dégradait avec l'augmentation de la puissance de chauffage additionnelle couplée au plasma. Toutefois, sous certaines conditions, un seuil en puissance à partir duquel le confinement s'améliore spontanément est observé: ce régime, dit mode H (pour *High confinement*, par opposition au mode obtenu en dessous du seuil en puissance, dit mode L, pour *Low confinement*), constitue une amélioration du temps de confinement de presque un facteur 2 qui atténue l'effet de dégradation observé par ailleurs. La découverte dans

Dessin d'artiste
du projet ITER.



ITER



les années 80 du mode H, sur la machine ASDEX, est capitale. Ce mode reste aujourd'hui le scénario de référence pour la machine de prochaine génération, ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). L'ensemble des résultats est regroupé dans une base de données à partir de laquelle a été déterminée une loi d'échelle exprimant le temps de confinement à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma (figure 3). Bien qu'empirique, cette méthode est d'une importance primordiale pour extrapoler les performances en confinement actuelles à celles d'une machine de prochaine génération, proche des conditions d'un réacteur. La figure souligne l'importance de la machine européenne JET (*Joint European Torus*), qui est actuellement la plus grande installation expérimentale de fusion avec la machine japonaise JT-60U.

Le JET : décharges performantes et technologies associées

Conçu dans les années 1970, JET représentait à l'époque un saut considérable puisque la plus grande machine européenne était alors TFR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses), d'un volume plasma moyen de 1 m³, soit environ 100 fois moins que celui de JET. Le JET est toujours actuellement le plus grand tokamak au monde. Son système magnétique, composé de 32 bobines entourant l'enceinte de confinement, produit un champ de 3,4 teslas (T) au centre du plasma. Le JET est aussi équipé des technologies nécessaires à la gestion du tritium (stockage, injection dans l'enceinte de confinement, séparation des hydrogènes des gaz extraits, séparation isotopique) et à la télé-manipulation de ses composants internes.

Les objectifs du JET sont essentiellement tournés vers la réalisation de décharges performantes et la qualifi-

cation des scénarios de confinement retenus pour la machine de prochaine génération. Les aspects liés au chauffage du plasma par les **particules alpha** sont aussi abordés. Les 16 MW de puissance de fusion obtenus pendant environ une seconde, en 1997, avec un facteur d'amplification de la puissance Q d'environ 0,65 très proche des conditions du *breakeven* (Q = 1) restent le résultat le plus spectaculaire. La possibilité unique de réaliser des plasmas D-T sur JET s'accompagne évidemment de la maîtrise des technologies associées: la gestion du cycle du tritium et les moyens de télé-manipulation. Ce dernier système a permis de remplacer chaque tuile de la première paroi. L'opération a été menée en 1998 sur le **divertor** (composant gérant l'extraction en continu des cendres de la réaction), qui a été totalement remplacé par télé-manipulation.

Tore Supra : temps longs, supraconduction et refroidissement actif

Parallèlement aux recherches du JET sur les plasmas performants, la problématique des plasmas de longue durée (plusieurs minutes) est aussi étudiée au sein de l'Union européenne sur le tokamak Tore Supra, implanté sur le site CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Bien qu'ayant un volume de plasma cinq fois inférieur à celui du JET, Tore Supra n'en est pas moins le plus grand tokamak à aimants **supraconducteurs** au monde. Cette caractéristique, associée à la présence de composants face au plasma activement refroidis par circulation d'eau, permet l'étude des plasmas en régime quasi permanent.

Tore Supra est équipé de 18 bobines toroïdales supraconductrices. Le matériau supraconducteur adopté est l'alliage niobium-titane refroidi dans un bain d'hélium **superfluide** (1,8 K; 1 bar) dont les remarquables propriétés de transfert thermique assurent un refroidissement efficace du supraconducteur sans circulation de fluide. Ces aimants sont exploités sans problème majeur depuis 1989, démontrant du même coup la viabilité de la technologie supraconductrice dans la configuration d'un dispositif de fusion contrôlée.

Les composants face au plasma sont activement refroidis, deuxième caractéristique unique de Tore Supra. Ils sont principalement constitués d'un limiteur pompé toroïdal (LPT), capable d'extraire en permanence 15 MW de puissance transférée par les particules du plasma, soit 3 MW/m² en moyenne et au moins 10 MW/m² en crête en continu (des valeurs très proches de celles du réacteur). Ce limiteur, placé en partie basse de la machine, est constitué d'une structure porteuse en acier inoxydable sur laquelle sont fixées des aiguilles en composite de fibre de carbone (CFC) et cuivre durci (CuCrZr) capables de supporter de forts flux thermiques (plusieurs MW/m²) en continu.

Ces technologies ont permis de réaliser des décharges de plusieurs minutes. La décharge record de décembre 2003, d'une durée de 6 minutes et demie, soutenue par une puissance de 3 MW, a permis d'extraire plus de 1 000 mégajoules d'énergie thermique.

Des technologies spécifiques pour le réacteur

Les technologies plus spécifiques au réacteur sont aussi étudiées. Les couvertures **tritigènes** font l'objet d'études spécifiques, tant au niveau conceptuel qu'expérimental

machine	pays	petit rayon a(m)	grand rayon R(m)	courant plasma I (MA)	champ magnétique B (T)
ITER	international	2	6,2	15	5,3
JET	Union européenne	1	2,96	7	3,5
JT-60U	Japon	0,85	3,2	4,5	4,4
TFTR (fermée)	USA	0,85	2,5	2,7	5,6
Tore Supra	France	0,8	2,4	2	4,2
T-15	Russie	0,7	2,4	2	4
DIII-D	USA	0,67	1,67	3	2,1
ASDEX-U	Allemagne	0,5	1,67	1,4	3,5
TEXTOR-94	Allemagne	0,46	1,75	0,8	2,6
FT-U	Italie	0,31	0,92	1,2	7,5
TCV	Suisse	0,24	0,875	1,2	1,43
C-MOD	USA	0,22	0,67	1,5	8,07
MAST	GB	0,5	0,7	2	0,63
NSTX	USA	0,67	0,85	1	0,6

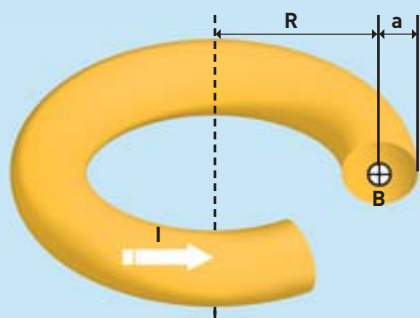
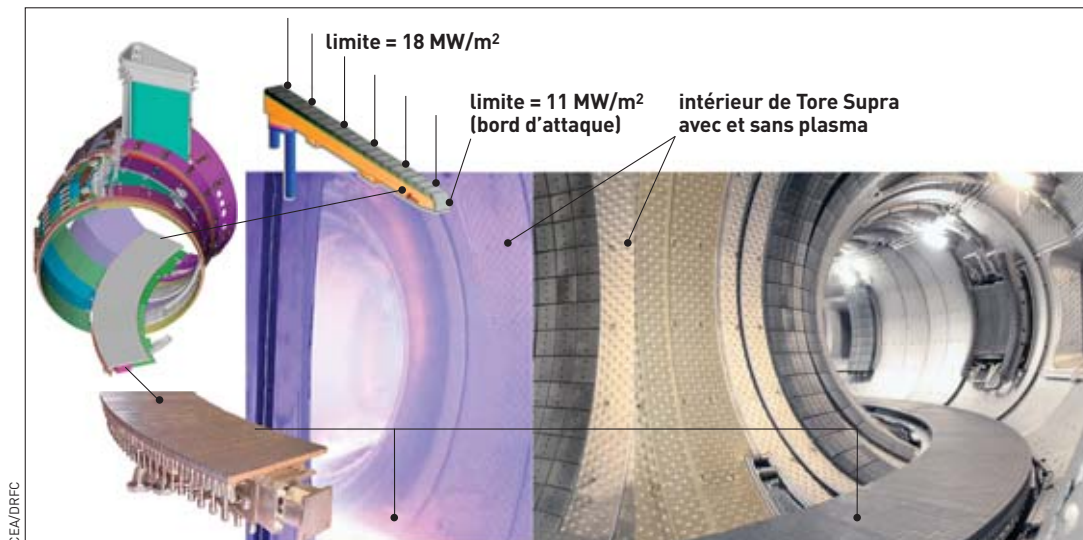


Tableau. Caractéristiques des principales machines de fusion de type Tokamak.



Les composants internes de Tore Supra.

(procédés de fabrication, réalisation de maquettes...). Il a été, par exemple, démontré que la production auto-suffisante de tritium était réalisable, et ce, selon divers concepts. L'Europe en étudie deux qui diffèrent selon les matériaux tritigènes et le fluide caloporteur employés. Le premier utilise un matériau liquide sous forme d'alliage de plomb (LiPb) refroidi à l'eau sous pression; le second, des céramiques et de l'hélium comme réfrigérant. Plusieurs céramiques font l'objet d'études (Li_4SiO_4 , Li_2TiO_3), incluant leur méthode de fabrication, qui en sont à un stade de préindustrialisation. Ces études déboucheront sur la réalisation de modules de couverture complets à tester dans ITER.

La viabilité de la fusion comme future source d'énergie sera en partie déterminée par des facteurs liés à la sûreté et à l'environnement. La fusion peut tirer ici avantage de sa relative jeunesse de développement pour intégrer le plus tôt possible dans la conception les solutions qui impliquent l'utilisation de matériaux de structure dits à basse activation. Ces derniers, qui ont l'avantage de présenter une décroissance rapide de leur activation, sont particulièrement développés en Europe qui a axé ses études sur les aciers martensitiques⁽²⁾. Une nuance particulière (Eurofer) a été sélectionnée et a déjà donné lieu à des coulées significatives (quelques tonnes) permettant la fabrication d'échantillons soumis à de nombreux tests (comportement sous irradiation, corrosion, soudage...).

Le développement de ces matériaux et la validation de leurs performances sous des flux de neutrons typiques de la fusion (neutrons de 14 MeV) sont d'une importance majeure pour le futur réacteur. Ces matériaux constituent un élément déterminant pour l'efficacité thermique et la durée de vie des composants internes et, par corollaire, ils déterminent en grande partie le rendement global et la disponibilité du réacteur. Une validation complète suppose la disponibilité d'une source de neutrons de 14 MeV dont le développement fait l'objet du programme international IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*).

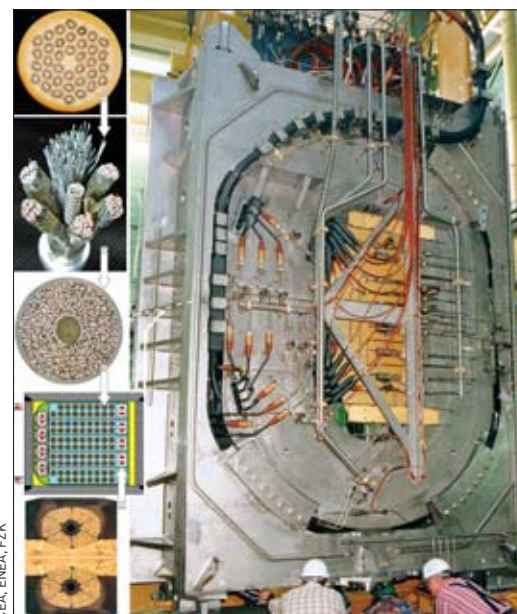
(2) Acier martensitique (du nom du physicien Martens) : acier au carbone à basse teneur en nickel et/ou en manganèse issu de la trempe d'un acier, traitement qui déforme le réseau à structure cubique centrée de façon homogène. Les aciers de ce type constituent le groupe le plus important des aciers inoxydables.

ITER, la prochaine étape

Les exemples précédents illustrent les progrès considérables réalisés en physique, en technologie, ou encore sur l'image que l'on peut se faire aujourd'hui d'un réacteur de fusion électrogène. Ces résultats ont été obtenus sur plusieurs installations expérimentales "spécialisées": la physique des plasmas performants sur des temps courts (quelques secondes) sur JET, la problématique des décharges longues (quelques minutes) sur Tore Supra, sans oublier les nombreuses avancées, en particulier sur les principes d'amélioration du confinement, obtenues sur l'ensemble des machines exploitées par la communauté européenne et internationale (tableau). Des réponses à la majorité des interrogations suscitées par les études sont apportées, mais de façon encore indépendante. La prochaine étape doit constituer l'intégration de tous ces résultats au sein d'une même installation: c'est l'un des objectifs du projet international ITER.

Les origines du projet

Au cours des années 1980, le succès des expérimentations comme celles menées sur le JET, associé aux



Conception et tests d'éléments supraconducteurs (de haut en bas, le brin, le câble et sa coupe, et une connexion) pour ITER.

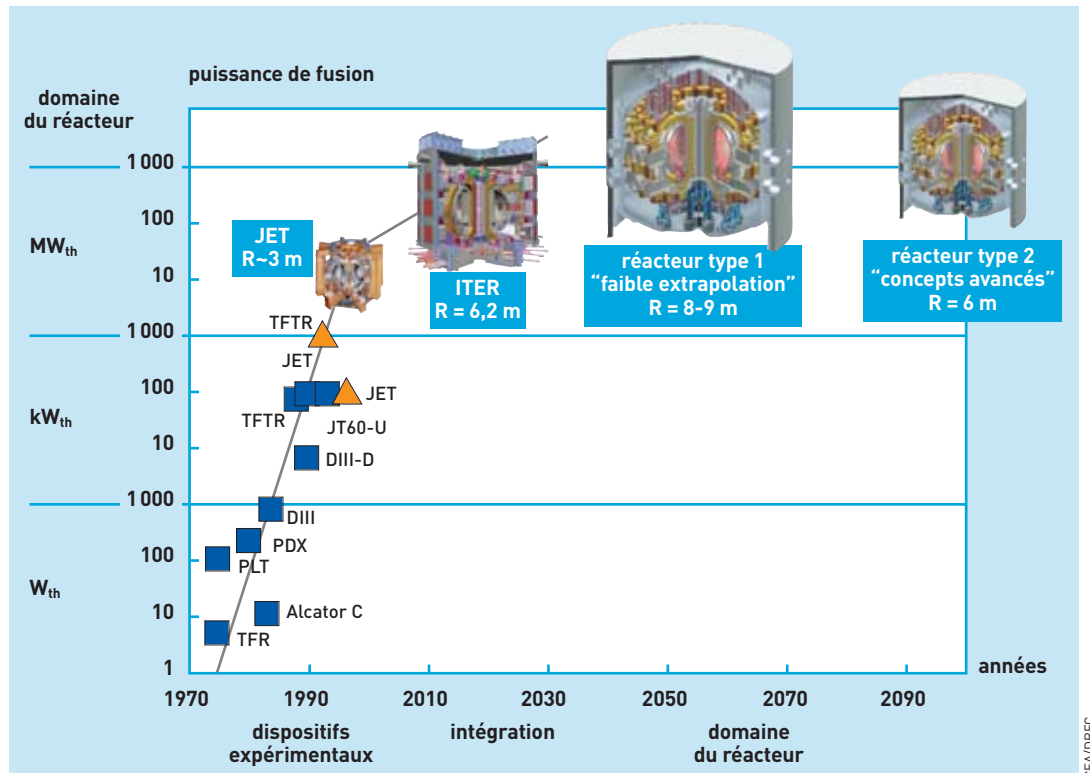
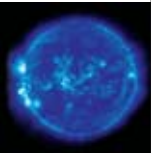


Figure 4. Le chemin vers le réacteur : l'objectif devrait être atteint dans la seconde moitié du siècle.

progrès dans la compréhension du comportement du plasma réalisés dans des installations plus modestes, a amené la communauté scientifique à étudier une installation expérimentale de "prochaine étape" dédiée à l'étude des plasmas proches de ceux d'un réacteur de fusion. Lors du Sommet de Genève en novembre 1985, le président Gorbatchev propose aux présidents Reagan et Mitterrand de construire la prochaine génération de tokamak sur la base d'une collaboration intégrant les quatre partenaires majeurs du programme fusion. En octobre 1986, les États-Unis, l'Europe ainsi que le Japon répondent favorablement : le projet ITER est né. Il regroupe sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) les États-Unis, le Japon, l'Union soviétique et l'Europe associée au Canada. ITER est donc la première installation expérimentale conçue *via* une collaboration scientifique à l'échelle planétaire. Une première version du projet incluant la réalisation de maquettes à grande échelle des principaux composants est présentée en 1998. Les États-Unis se retirent alors du projet. Les partenaires restants orientent leurs efforts vers la conception d'une installation conservant l'essentiel des objectifs scientifiques tout en ayant un coût réduit. La phase d'ingénierie détaillée de cette nouvelle version s'est achevée en juillet 2001.

Les objectifs d'ITER

L'objectif essentiel du programme ITER est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion par confinement magnétique. La machine pourra produire 500 MW de puissance de fusion pendant plus de 400 s avec l'assistance de 50 MW de puissance de chauffage, soit une amplification de l'énergie d'un facteur 10 ($Q = 10$). Elle permettra donc l'étude des plasmas en combustion, c'est-à-dire des plasmas où le chauffage par les particules alpha créées lors des réactions de fusion est majoritaire. Dépassant 60 %, la part de chauffage due aux particules alpha

sera sextuplée par rapport aux meilleures décharges réalisées dans la machine JET. ITER réalisera la synthèse des performances de Tore Supra (plasma de longue durée) et du JET (plasma énergétique).

ITER sera aussi la première machine intégrant la plupart des technologies essentielles au réacteur : aimants supraconducteurs de très grande taille, composants face au plasma refroidis activement, gestion du tritium, maintenance robotisée, tests de modules de couvertures tritigènes.

Avec un grand rayon de 6,2 m (distance axe de la machine – centre du plasma), le volume plasma d'ITER sera environ huit fois supérieur à celui du JET. Le système cryomagnétique, entièrement supraconducteur, est conçu pour délivrer 5,3 T au centre du plasma. À l'intérieur de l'enceinte à vide, les composants internes (cassettes de divertor, limiteurs, modules de couverture...) pourront être entièrement remplacés par maintenance robotisée. Les principaux composants d'ITER ont fait l'objet d'études très détaillées allant jusqu'à la réalisation de maquettes à l'échelle 1, comme pour l'enceinte à vide ou la manipulation du divertor. Les différents câbles supraconducteurs et connexions supraconductrices ont été testés avec succès en 2000 et 2001 sous la forme de bobines modèles (câble à échelle 1, bobine échelle 1/3) permettant également de valider les différentes étapes de la fabrication dans l'industrie.

Le coût du projet est évalué à environ 4,7 milliards d'euros à partager entre les partenaires. Après huit années de construction, la mise en route se fera de façon progressive avec d'abord une phase de plasmas d'hydrogène, qui permettra de tester la machine et de valider les scénarios de confinement pour les phases en deutérium et deutérium-tritium. La durée d'exploitation est évaluée à une vingtaine d'années.

ITER est une expérience scientifique et technologique destinée à démontrer la faisabilité de cette nouvelle option de production d'énergie. Tous les composants

essentiels à un réacteur seront présents, à l'exception de ceux dédiés à la production de tritium et à la génération d'électricité. Ces éléments spécifiques du réacteur électrogène auront la particularité d'être construits avec des matériaux basse activation : ils feront l'objet de tests à petite échelle (module de couverture) dans ITER.

L'après-ITER : quelles extrapolations pour le réacteur ?

Les options retenues pour le fonctionnement d'un réacteur reposent sur des extrapolations plus ou moins fortes des options retenues pour ITER (figure 4).

Les réacteurs avec des *extrapolations modérées* ne nécessitent pas de sauts technologiques. Ils impliquent cependant un contrôle de la puissance transmise aux éléments de première paroi par une maîtrise du rayonnement du plasma de bord. Les rendements globaux sont les mêmes que ceux rencontrés dans les réacteurs nucléaires classiques (30 – 40 %). La taille se situe autour des 9 m de grand rayon.

Les réacteurs avancés supposent des *extrapolations fortes* par rapport aux connaissances actuelles, tout en restant crédibles. Leur développement serait en général accompagné des mêmes extrapolations au niveau technologique (structure en carbure de silicium, par exemple). La topologie et les paramètres du plasma sont choisis afin de minimiser la puissance recirculante. Les instabilités sont supposées complètement maîtrisées, de même que le rayonnement du plasma de bord où un "manteau" radiatif est établi, sans conséquence sur le confinement et les performances du plasma central. Ceci conduit à des flux de chaleur sur les éléments de première paroi plus faibles que ceux des concepts précédents (d'un facteur deux, moins de 10 MW/m²) et une taille de réacteur proche de celle d'ITER (typiquement 6 m). Ces concepts offrent le potentiel de pouvoir fonctionner à très haute température (1 000 °C) et donc d'accéder à des rendements dépassant les 60 %. Leur niveau de développement ne permet toutefois pas d'envisager leur utilisation à court terme.

La construction d'un réacteur électrogène (démonstrateur ou prototype) nécessitera des programmes d'accompagnement ayant une vocation plus orientée "réacteur". Sont notamment déjà en cours ceux concernant le développement de matériaux basse activation et des couvertures tritigènes. Ils sont complétés par des études plus globales sur les aspects socio-économiques. Il peut paraître prématuré d'évoquer les coûts de production du kilowattheure d'une source d'énergie qui est encore à plusieurs dizaines d'années de sa commercialisation. Ce type d'étude a pourtant plusieurs intérêts.

Le premier est de mettre en évidence l'impact de telle variable physique ou de telle hypothèse technologique sur les coûts. Ces résultats qui fixent les ordres de grandeurs relatifs et les sens de variation, ont une influence directe sur la stratégie de développement.

Le deuxième intérêt est de vérifier que le dispositif proposé peut correspondre aux exigences du marché. Les modèles économiques employés sont dans le prolongement direct de ceux employés pour la conception, l'optimisation et le calcul des coûts des machines actuelles ou d'ITER. Sous beaucoup d'aspects, ce dernier est



ENEA

voisin du réacteur. Les coûts de construction ont été directement déterminés par les industriels en Europe, au Japon, en Russie et aux États-Unis. On dispose ainsi d'une base d'évaluation solide. Les incertitudes qui restent, certes importantes, portent plus sur la disponibilité du réacteur que sur le coût direct de ses composants. Les études montrent que, contrairement à ce qui a été parfois avancé, les coûts de l'énergie de fusion ne sont pas de nature à hypothéquer son avenir. En intégrant les impacts environnementaux et des hypothèses conservatrices pour la physique et les options technologiques, le coût du kilowattheure fusion se situe entre 1,5 et 2 fois le coût du kilowattheure nucléaire "fission", entre celui de l'éolien et celui du solaire.

Préparer l'avenir énergétique

Les recherches civiles sur la fusion ont véritablement démarré à la fin des années 1950 avec un effort important de coopération internationale. Les progrès ne se sont depuis jamais démentis. Le bilan énergétique du plasma, mesuré par le produit de la densité, de la température et du temps de confinement de l'énergie, a été multiplié par 1 000 ! Plusieurs mégawatts de puissance fusion ont déjà été produits et des décharges de plusieurs minutes réalisées. Les bases scientifiques sont aujourd'hui suffisamment solides pour envisager la construction d'un appareil validant la faisabilité de l'énergie de fusion : ITER. L'insertion dans l'offre énergétique pourrait avoir lieu dans la seconde partie du siècle, à une époque où l'épuisement des ressources classiques et les conséquences climatiques de notre consommation se feront sentir de façon forte. La fusion présente des avantages qui peuvent contribuer à une production d'énergie respectueuse de notre environnement. Il est très certainement du devoir de la génération actuelle de préparer la base de connaissances permettant aux décideurs de demain d'envisager sereinement toutes les solutions énergétiques possibles.

Installation d'essai du remplacement robotisé des éléments du divertor d'ITER à Brasimone (Italie). Un prototype à l'échelle 1 du robot de montage des éléments de la protection interne de la chambre à vide a par ailleurs été réalisé au Japon.

> **Michel Chatelier et Philippe Magaud**
Direction des sciences de la matière
Association Euratom-CEA
CEA centre de Cadarache

C Particules élémentaires et interactions fondamentales

Les **neutrinos** sont les plus furtives des particules du **modèle standard de la physique des particules**, cadre théorique qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues et les **interactions fondamentales** auxquelles elles participent (tableau).

Les constituants élémentaires de la matière, les **fermions**, se partagent en deux grandes catégories, les **leptons** qui ne répondent pas à l'**interaction forte**, et les **quarks** qui subissent toutes les interactions. Les six quarks forment trois paires (bas/haut, étrange/charmé et beauté/top). Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** (**électron** e^- , **muon** μ , **tau** τ) participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique** ν_e , **neutrino muonique** ν_μ , **neutrino tauique** ν_τ) ne

participent à l'**interaction électromagnétique** et à l'**interaction faible** et les **leptons neutres** (**neutrino électronique** ν_e , **neutrino muonique** ν_μ , **neutrino tauique** ν_τ) ne

		leptons peuvent se déplacer librement		quarks prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le big bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille	électron responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas	sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 5 – 8,5 MeV/c ²
	deuxième famille	muon un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange	un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 – 155 MeV/c ²
	troisième famille	tau encore plus lourd masse : 1777 MeV/c ²	neutrino tauique propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté	encore plus lourd masse : 4 000 – 4 500 MeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive		
Boson de Higgs ? responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"					

Tableau. Constituants élémentaires.

sont assujettis qu'à l'interaction faible. Au sein du modèle standard, les neutrinos sont de masse nulle mais des expériences ont prouvé qu'ils en possèdent une, très faible, dont la valeur exacte reste inconnue à ce jour. La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs nombres quantiques, ou charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur⁽¹⁾...). À chaque constituant de la matière est associée son **antiparticule**, particule de même masse et de charges opposées. La **force gravitationnelle**, qui n'est pas incluse dans le modèle standard, s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse. Le tableau des constituants élémentaires de la matière montre une autre classification, indépendante de leur participation aux interactions fondamentales, en trois générations ou familles. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons chargés de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses. L'électron, le quark haut et le quark bas, qui appartiennent à la première famille, sont les particules massives les plus légères. Stables, elles sont les constituants de la matière ordinaire. Par exemple, le **proton** contient deux quarks haut et un quark bas ; le **neutron** deux quarks bas et un quark haut. Les particules des deux autres familles sont instables et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille. D'après la mécanique quantique, pour qu'il y ait interaction, il faut qu'au moins une particule élémentaire, un

boson, soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le vecteur de l'interaction électromagnétique, les bosons **W⁺**, **W⁻** et **Z⁰** sont les médiateurs de l'interaction faible et les **gluons** les messagers de l'interaction forte. Les quarks et les leptons chargés échangent des photons mais conservent leur charge électrique après l'échange, le photon n'ayant pas de charge électrique. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique. Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés** où les vecteurs de l'interaction sont **W⁺** et **W⁻**, et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z⁰**. Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (80 400 MeV/c² pour **W[±]** et 91 180 MeV/c² pour **Z⁰**), la portée de l'interaction faible est infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W[±]** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent

changent de charge électrique et également de nature (**saveur**). Par contre, le boson **Z⁰** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changent pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont aussi capables d'échanger un **Z⁰**. De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z⁰** avec une autre particule, mais pas un photon. Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluon entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais étant dotés d'une charge de couleur ils peuvent interagir. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10⁻¹⁵ m. Le **graviton**, vecteur de l'interaction gravitationnelle, n'a pas encore été observé. La théorie prédit l'existence d'un autre mécanisme d'interaction fondamentale, responsable de la masse des particules élémentaires, dont le messager est le **boson de Higgs** qui reste à découvrir. Le champ de Higgs permet, selon cette théorie, de donner une masse aux fermions élémentaires interagissant avec lui.

(1) Charge de couleur : nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes. La charge de couleur peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue", ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles. Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

interaction fondamentale	messager	actions
gravitationnelle	graviton ?	fait s'attirer deux masses entre elles et est responsable de la chute des corps
électromagnétique	photon	est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
faible	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	à la base de la fusion thermonucléaire dans le Soleil, elle assure sa longévité. La radioactivité β ⁻ et β ⁺ et les réactions impliquant le neutrino sont des interactions faibles
forte	gluons	assure la cohésion du noyau atomique

Tableau. Interactions fondamentales.