

DOSSIER DE PRESSE



Tore Supra : vers la fusion « longue durée »

Voyage de presse des 1^{er} et 2 avril 2008

CONTACT PRESSE : CEA / Service Information-Média

Marie VANDERMERSCH Tél. : 01 64 50 17 16 - marie.vandermersch@cea.fr

CEA Saclay / Siège
Direction de la Communication
Service Information-Média
91191 Gif-sur-Yvette Cedex
Tél. : (33) 01 64 50 20 11
Fax : (33) 01 64 50 28 92
www.cea.fr/presse

Sommaire :

Tore Supra : vers la fusion « longue durée »

3 Introduction

- 3 Pourquoi tant d'énergie autour de la fusion ?
- 3 Le chemin est long... mais on aperçoit le sommet
- 3 Tore Supra : le marathonnier de la fusion

5 La fusion nucléaire ou l'énergie des étoiles à portée de Terre

- 5 Retour aux fondamentaux
- 7 De la réaction solaire à la fusion sur Terre

12 Les grands défis de la fusion nucléaire

- 13 Maîtriser les instabilités du plasma en fusion
- 13 Assurer le fonctionnement fiable d'un réacteur de fusion
- 13 Eviter la pollution du plasma par les matériaux qui l'entourent
- 14 Atteindre des décharges de longues durées
- 15 Modéliser le comportement d'un plasma en fusion
- 16 Mettre au point les matériaux adaptés à l'environnement de la fusion thermonucléaire
- 18 Passer de l'installation expérimentale au réacteur de fusion industriel

19 Tore Supra : à la recherche du « continu »

- 19 Tore Supra : le marathonnier de la fusion
- 20 Caractéristiques de l'installation
- 22 Les apports de Tore supra aux recherches sur la fusion
- 25 Tore Supra : défricher le champ des décharges longues

26 ITER et DEMO : du domptage de la fusion à sa domestication

- 26 ITER : de la nécessité de voir plus grand
- 28 DEMO ou comment boucler la boucle

29 Annexes

- 30 L'épopée de la fusion : quelques dates clés
- 32 Déroulement d'une décharge de plasma dans Tore Supra
- 34 Réacteurs thermonucléaires et sûreté : petit tour de la question

Intervenants

- Bernard Bigot, Haut Commissaire à l'énergie atomique,
- Yves Caristan, Directeur des sciences de la matière du CEA,
- Serge Durand, Directeur du CEA-Cadarache,
- Michel Chatelier, Chef de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (IRFM) et toute son équipe,
- François Gauché, Directeur de l'Agence Iter France

Introduction

Pourquoi tant d'énergie autour de la fusion ?

Produire sur Terre l'énergie des étoiles... Il y a soixante ans, cette ambition s'inscrivait purement dans une démarche de recherche fondamentale. Elle recouvre désormais un enjeu de civilisation. L'accès à une énergie abondante est en effet l'un des plus grands défis que doit relever l'humanité au cours de ce siècle : les ressources énergétiques sur lesquelles le monde moderne s'est édifié s'amenuisent inexorablement tandis que le réchauffement climatique fait peser de nouvelles contraintes sur les moyens de production d'énergie.

Dans l'éventail des choix énergétiques auxquels nous devons dès aujourd'hui procéder, la fusion thermonucléaire s'impose comme une option majeure. L'enjeu est tel que les recherches menées sur le sujet ont fait exploser les cadres nationaux et c'est une grande partie de la communauté internationale qui s'engage dans la construction de l'installation ITER. La Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis, l'Europe, l'Inde, le Japon et la Russie sont impliqués dans ce projet de dix milliards d'euros.

La fusion thermonucléaire a en effet l'avantage de produire en toute sécurité de l'énergie en grande quantité avec très peu de combustible : avec moins de deux kilogrammes par jour de deutérium et de tritium, on pourrait produire 1000 MW d'électricité en continu, alors qu'il faudrait plus de 6000 tonnes de combustibles pétroliers pour produire cette puissance avec une centrale thermique. Le combustible employé est très abondant : les réserves de deutérium sont infinies à l'échelle de la durée de vie de notre planète ; les réserves de lithium, nécessaires pour fabriquer le tritium, sont finies mais sont disponibles sur plusieurs milliers d'années à un coût économique acceptable.

Autre atout de la fusion, elle constitue un mode de production d'énergie relativement peu polluant : elle ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets toxiques ou hautement radioactifs à vie longue. Enfin, elle implique une réaction qui ne peut conduire à l'emballement : les conditions requises pour la fusion thermonucléaire sont à ce point exigeantes que toute altération de l'un ou l'autre paramètre du système entraîne l'arrêt immédiat de la réaction. De plus, l'installation est alimentée en combustible en continu et ne fait intervenir que quelques grammes de deutérium et de tritium à la fois. Il suffit d'interrompre l'alimentation pour que la réaction s'arrête en une fraction de seconde.

Le chemin est long... mais on aperçoit le sommet

Confiner de manière durable cet univers de turbulences que constitue un plasma chauffé à plus de 100 millions de degré, apprivoiser cette réaction de manière à en faire un moyen de production d'électricité fiable et rentable suppose de relever un certain nombre de défis de R&D. Si le chemin est encore long, il est raisonnable de penser que l'on assistera à un déploiement significatif de réacteurs industriels avant la fin de ce siècle, dans les années 2070-2080.

Il est prévu en effet que la construction d'ITER prenne dix ans. Les recherches nouvelles qu'autorisera cette installation devraient exiger une vingtaine d'années avant que l'on acquière les connaissances scientifiques et techniques suffisantes pour maîtriser de manière satisfaisante la production d'une puissance de fusion d'environ 500 millions de watts pendant plusieurs

centaines de secondes et d'environ 200 millions de watts pendant plusieurs dizaines de minutes, objectifs considérés comme des étapes clés pour envisager la construction d'un réacteur électrogène. La mise en service d'un démonstrateur (d'ores et déjà baptisé « DEMO ») est prévue pour 2040 et son utilisation exigera sans doute à nouveau une vingtaine d'années. La construction du premier prototype industriel, dont la puissance électrique devrait être de l'ordre de 1500 gigawatts, ne peut donc être envisagée avant 2060 et conduire à un déploiement de réacteurs industriels avant 2070-2080.

Tore Supra : le marathonien de la fusion

D'ici la mise en fonctionnement d'ITER, vers 2016, les recherches au sein des tokamaks déjà existants à travers le monde se poursuivent et progressent. En France, c'est au sein de l'installation Tore Supra, implantée sur le centre de Cadarache, que les chercheurs font progresser la fusion. Premier grand tokamak supraconducteur de l'histoire, Tore Supra a permis d'ouvrir le champ des « décharges longues », dont il détient le record mondial, et de développer des concepts, des systèmes et des matériaux propres à soutenir ce mode de fonctionnement « continu », qui sera l'un de ceux d'ITER.

L'installation entre dans sa vingtième année de fonctionnement. Avec son cousin européen JET, situé à Culham en Grande Bretagne, il est, à bien des égards, un précurseur d'ITER et sa longévité est en soi riche d'enseignements qu'il faut tirer pour concevoir les prochaines installations. Tore Supra, c'est aussi tout un vivier de chercheurs sur lesquels pourra s'appuyer le « grand frère » ITER.

Mais aujourd'hui encore, Tore Supra reste un « défricheur » qui repousse les limites de la connaissance : dans ce champ de la science qu'est la fusion, il reste un outil unique en son genre puisqu'il est la seule installation capable de produire des décharges longues à des niveaux de puissance proches de ceux d'un réacteur de fusion.

La fusion nucléaire ou l'énergie des étoiles à portée de Terre

Les étoiles sont de gigantesques boules de plasma chaud et dense. Au cœur de celles-ci, les noyaux légers d'hydrogène, fortement agités en raison des températures élevées qui y règnent, entrent violemment en collision, ce qui leur permet de fusionner pour former des noyaux plus lourds. Ce processus dégage une énergie considérable et est à l'origine de la chaleur et de la lumière que nous recevons. *Mutatis mutandis*, c'est ce processus que l'homme cherche à reproduire sur Terre.

Mais reproduire telles quelles les conditions qui règnent au cœur du Soleil n'est guère possible : pour allumer et entretenir un tel feu, l'Homme ne dispose ni de 4 milliards d'années — âge actuel de notre Soleil —, ni de la force gravitationnelle d'un tel corps céleste, qui permet au plasma de ne pas se disperser. L'homme s'est pourtant lancé dans l'aventure.



Le Soleil : une boule de plasma en fusion. © Digital vision ltd

Retour aux fondamentaux

Un principe : sauter la barrière

Faire fusionner deux noyaux légers ne va pas de soi : loin de s'attirer, les noyaux, chargés positivement, se repoussent sous l'effet de la force électrostatique¹. Cette barrière n'est cependant pas infranchissable : **si l'on accélère les noyaux, leur vitesse leur donne l'élan nécessaire pour traverser cette barrière**. Ils entrent alors dans le champ d'action, irrésistible, de la force nucléaire². Les deux noyaux se collent l'un à l'autre et constituent un

¹ **La force électrostatique** fait se repousser deux charges électriques de même signe (deux protons par exemple), et s'attire deux charges de signes opposés (un électron et un noyau). Elle sous-tend les propriétés chimiques des atomes.

² **La force nucléaire** assure la cohésion du noyau de l'atome en faisant fortement s'attirer les protons et les neutrons. Elle ne s'exerce qu'à des distances très courtes. A distance égale, elle est 100 à 1000 fois plus intense que l'interaction électrostatique.

noyau unique, plus lourd : on dit qu'ils fusionnent (c'est ainsi que dans le creuset qu'est une étoile, se constituent, à partir de l'hydrogène, les corps présents dans l'univers).

Si l'on pèse les noyaux avant la collision et que l'on pèse le noyau qui en résulte, on constate qu'il **manque un peu de matière. Celle-ci, selon la célèbre formule d'Einstein ($E=mc^2$), s'est transformée en énergie.** C'est l'intérêt majeur de cette réaction de fusion.

Dans la fusion « chaude », c'est en portant ces noyaux à très haute température qu'on leur permet de franchir l'obstacle de la force électrostatique. En effet, **la température d'un milieu correspond au degré d'agitation des particules qui le composent.** Plus elle est élevée, plus les particules se déplacent à grande vitesse en tous sens, augmentant ainsi les probabilités de collision. A de tels niveaux de température, la matière est à l'état de **plasma**.

Qu'est ce qu'un plasma ?

Si la masse connue de l'univers est constituée à plus de 99% de plasma, cet état est beaucoup plus rare sur la Terre où il se manifeste dans l'éclair, l'aurore boréale et, plus prosaïquement, dans les tubes à néon ou les écrans d'ordinateurs et de télévision.

Le plasma est le quatrième état de la matière, avec les solides, les liquides et les gaz. On atteint l'état de plasma lorsque, sous l'effet de la température, les atomes se sont heurtés à un tel point que la liaison entre les électrons et le noyau s'est brisée : noyaux et électrons circulent en toute indépendance. Un plasma est donc un « gaz ionisé³ ».

Les propriétés de ce gaz sont profondément différentes de celles d'un gaz « ordinaire » : tandis qu'un gaz est un isolant, le plasma est un excellent conducteur d'électricité ; il a en outre une certaine sensibilité au champ magnétique. Ces deux propriétés sont d'une importance capitale dans la perspective de la maîtrise de la fusion magnétique.

La température, la densité et le degré d'ionisation des plasmas sont extrêmement variables. Dans un tube à néon, le gaz est peu ionisé : la quantité d'ions est faible par rapport à celle des atomes. Dans un plasma en fusion, le gaz est presque entièrement ionisé, ce qui suppose d'atteindre des températures de l'ordre de 10 à 100 millions K⁴.

³ Les atomes qui ont perdu tout ou partie de leurs électrons sont appelés des ions.

⁴ Le kelvin est une mesure absolue de la température. La température de 0 K est égale à -273,15°C et correspond au zéro absolu. N'étant pas une mesure relative, le kelvin n'est jamais précédé du mot « degré » ni du symbole «°», contrairement aux degrés Celsius ou Fahrenheit.

Le critère du triple produit

Pour parvenir à produire de l'énergie à partir de la fusion, trois paramètres interviennent et doivent être combinés de manière optimale :

- la **température** : elle doit être suffisante pour que la vitesse des noyaux leur permette de vaincre la répulsion électrique, et pas trop élevée pour que les noyaux aient le temps de fusionner. La valeur optimale est de l'ordre de 200 millions de degrés ;
- la **densité**, c'est-à-dire le nombre de particules présentes dans un volume donné et susceptibles de fusionner. Elle doit être la plus importante possible pour que la probabilité de fusion et donc le taux de réaction soit grand ;
- le « **temps de confinement** » de l'énergie, c'est-à-dire le temps que met le plasma à se refroidir. Il doit être suffisamment important pour que la puissance apportée au plasma par les réactions de fusion soit suffisante pour compenser les pertes d'autant plus importantes que le temps de confinement est court.

Le produit de ces trois grandeurs définit le « **critère du triple produit** ». Plus ce nombre est grand, plus on se rapproche des conditions thermonucléaires. Lorsque le critère du triple produit est satisfait, l'énergie cinétique des particules alpha qui sont issues des réactions de fusion suffit à maintenir la température globale du plasma, permettant ainsi à de nouvelles réactions de se produire.

Pour pouvoir produire de l'énergie, le cœur d'un réacteur de fusion doit être « autochauffé » à au moins 80/90%. Il suffit alors d'injecter 10 à 20% de puissance de chauffage en plus de la puissance apportée par les réactions de fusion pour maintenir la température nécessaire à la fusion. Le JET a déjà réalisé une décharge « autochauffée » à 10% pendant une seconde. L'un des objectifs d'ITER est de produire un plasma « autochauffé » à 70% pendant 400 secondes.

De la réaction solaire à la fusion sur Terre

Quand l'hydrogène cède la place à ses isotopes

Le combustible brûlé au sein du Soleil est de l'hydrogène « ordinaire » (^1H). Or, la **fusion de l'hydrogène est un processus statistiquement très rare**. La quantité d'atomes d'hydrogène et la durée de confinement extrêmement longue (plusieurs millions d'années) permettent de compenser cette faible probabilité : les collisions, qui débouchent sur la fusion des noyaux, restent suffisamment fréquentes pour entretenir la température nécessaire aux réactions de fusion pendant environ 10 milliards d'années, durée de vie de notre Soleil. Sur Terre, nous ne disposons évidemment pas d'une telle masse et il nous faut nous tourner vers des réactions plus faciles à réaliser.

Avantages de la réaction deutérium-tritium

Dans la perspective de production d'énergie, c'est la réaction entre deux isotopes⁵ « lourds » de l'hydrogène, le **deutérium** (D) et le **tritium** (T) qui se révèle la moins ardue et la plus prometteuse : une trentaine de grammes de ce mélange suffirait pour produire toute l'énergie que chacun de nous consomme au cours de sa vie ; cela remplacerait les 400 tonnes d'équivalent pétrole que nous utilisons actuellement.

La fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium se traduit par la formation d'un noyau d'hélium, appelé aussi « particule alpha » et par l'émission d'un neutron très énergétique. Les particules alpha, particules chargées, sont confinées dans le plasma et cèdent leur énergie aux autres particules du plasma par collisions, provoquant le phénomène d'« autochauffage » du plasma décrit précédemment. Le neutron, sans charge électrique, n'est donc pas confiné ; il entre collision avec la paroi de l'installation, produit de la chaleur, qui sera à l'origine de la production d'électricité.

Très énergétique, la réaction deutérium–tritium a un autre atout : **le deutérium se trouve en abondance dans la nature** — chaque mètre cube d'eau de mer en contient 33 grammes qui peuvent en être extraits aisément. Le tritium, en revanche, est rare à l'état naturel : c'est un élément radioactif dont la durée de vie est assez courte (sa période⁶ est de 12 ans)⁷. Il peut cependant être produit à partir du lithium, un métal léger plus abondant sur Terre que le plomb ou l'étain et présent également dans l'eau de mer à raison de 0,17 grammes par m³. Dans une machine mettant en œuvre la réaction D+T, **le tritium pourra être produit dans l'enceinte même du réacteur**. Pour ce faire, on tirera partie des neutrons issus de la réaction thermonucléaire pour transformer les atomes de lithium présents dans la couverture interne du réacteur (la couverture tritigène) en atomes de tritium.

Confiner le plasma grâce aux champs magnétiques

Dans une étoile, c'est la gravité qui empêche le plasma de se disperser dans l'espace et qui le maintient confiné sous la forme d'une immense sphère. Rien de tel ne peut être reproduit sur Terre. Dès lors, dans quel récipient contenir cette soupe d'ions et d'électrons libres portée à une centaine de millions de degrés ?

Toute interaction trop intense avec un matériau est exclue : non que le matériau risque d'être détruit par le plasma ; **c'est au contraire le plasma qui serait détruit par le contact direct avec un quelconque « récipient »**. En effet, une installation de fusion ne met en œuvre que quelques grammes de deutérium et de tritium. Si le plasma vient à toucher les parois internes du récipient qui le

⁵ Hydrogène, deutérium et tritium ont un noyau doté du même nombre de proton (un seul) mais d'un nombre différent de neutrons (respectivement 0, 1 et 2 neutrons).

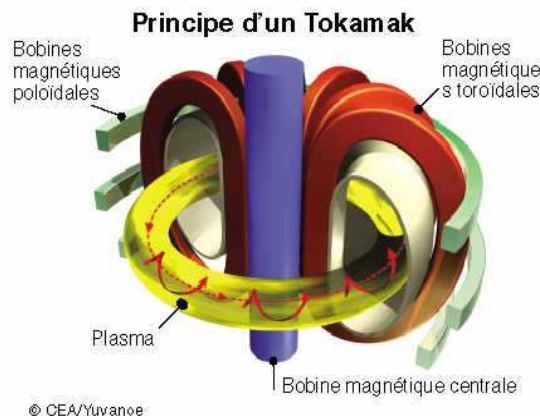
⁶ La période, ou demi-vie d'un élément radioactif est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes de cet élément se désintègre naturellement.

⁷ Radioactif, le tritium se désintègre en émettant un électron dont l'énergie moyenne est extrêmement faible – quelques millimètres d'air ou l'épaisseur de la peau suffisent pour l'arrêter. Il ne présente aucune toxicité chimique. En revanche, il peut endommager les cellules en cas d'inhalation ou d'ingestion.

contient, c'est lui qui se refroidit. L'isoler de son enceinte constitue donc un impératif absolu.

Comment y parvenir ? En emprisonnant ce plasma dans une cage magnétique. Le plasma, on l'a vu, est un milieu conducteur d'électricité et sensible à l'action d'un champ magnétique. Il peut donc être dirigé, emprisonné par la **force électromagnétique**. En revanche, celle-ci ne peut confiner, aux températures qui nous intéressent, que des densités de gaz très faibles. Il faut alors que les temps de confinement soient beaucoup plus longs pour laisser aux noyaux le temps de passer et repasser devant leurs partenaires potentiels jusqu'à ce que les conditions d'une franche collision et d'une fusion réussie se présentent.

Le confinement stable d'un plasma chaud par un champ magnétique n'est pas une mince affaire car les instabilités qui règnent dans un tel milieu sont nombreuses. Depuis les années 50, diverses configurations d'installations ont été testées. La plus efficace d'entre elles s'est avérée être la structure de confinement baptisée **tokamak**. De forme toroïdale⁸, le tokamak est aujourd'hui la machine la plus utilisée à travers le monde et c'est sur ce modèle qu'a été construite la machine Tore Supra et conçue l'installation ITER.



Dans un tokamak, le champ magnétique, en forme d'hélice, est généré par des courants électriques qui circulent à la fois à l'extérieur (dans des bobines magnétiques poloidales et toroïdales) et à l'intérieur de la chambre à vide (dans le plasma). Les noyaux et les électrons, chargés donc sensibles à ces champs magnétiques, vont pirouetter autour de ces lignes de force fermées sur elles-mêmes. Le plasma reste ainsi confiné⁹.

⁸ Un tore est engendré par la rotation d'un cercle autour d'un autre cercle. Une bouée est de forme toroïdale.

⁹ Une autre voie fait l'objet de recherche : celle de la fusion par confinement inertiel : contrairement à la fusion par confinement magnétique, les temps de confinement sont extrêmement brefs et doivent être compensés, pour satisfaire au critère du triple produit, par des densités phénoménales. L'une des méthodes employées consiste à utiliser un grand nombre de faisceaux lasers qui compriment simultanément une bille de deutérium-tritium. C'est ce qui se fera au sein du futur Laser mégajoule (LMJ), en chantier sur le centre du CEA-Cesta, près de Bordeaux. D'autres installations de striction axiale (Z-pinch) produisent pendant un temps très court un plasma qui est comprimé par rayons X générés. La plus grosse installation de ce type est la Z-machine des laboratoires Sandia installée au Nouveau Mexique. Pour le confinement inertiel, on dépense encore plus d'énergie que ce que l'on peut espérer récupérer. Sur ce point, la technologie des tokamaks a pour l'instant un avantage certain. Les expériences de confinement inertiel sont pour le moment essentiellement dédiées à l'étude des armes nucléaires et aux programmes de simulation associés.

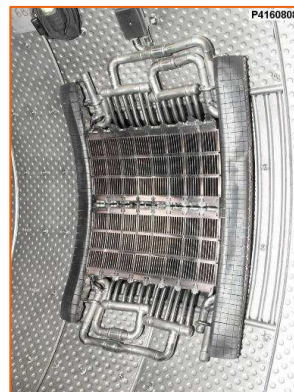
Chauffer le plasma

Au cœur du Soleil, les températures sont de l'ordre de 15 millions de degrés. La puissance produite par kilo de matière n'est que de quelques milliwatts. Pour accroître les chances de collision entre les noyaux, l'Homme parvient à atteindre dans ses installations des températures supérieures à 100 millions de degrés. Il est ainsi capable de produire une centaine de watts par kilo de matière. En termes de rendement, il fait donc cent fois mieux que le Soleil...

Pour atteindre de telles températures, trois méthodes de chauffage peuvent être employées dans un tokamak, soit séparément, soit en combinaison.

- La première méthode utilise le **chauffage ohmique** ; elle consiste à faire circuler dans le plasma un courant électrique de grande intensité. Comme dans une ampoule, ce courant permet de chauffer le plasma grâce à l'effet de résistance électrique, tout en créant une des composantes du champ magnétique indispensable au confinement. Un courant de quelques millions d'ampères va permettre de porter le plasma jusqu'à la température d'environ 20 millions de degrés. Au-delà, d'autres modes de chauffage doivent prendre le relais. En effet, le chauffage ohmique est limité par son principe même : plus le plasma est chaud, plus sa résistivité diminue et moins il peut être chauffé par effet Joule.
- Une autre méthode consiste à **injecter des atomes neutres de deutérium fortement accélérés** dans la chambre à vide du tokamak. Leur neutralité électrique leur permet de franchir la barrière du champ magnétique de confinement pour venir frapper les particules du plasma et augmenter leur agitation, donc la température.
- Enfin des **ondes à haute fréquence** injectées dans la chambre du tokamak par des antennes communiquent, sous certaines conditions, leur énergie aux ions et aux électrons du plasma.

Antenne de chauffage hybride pour la génération du courant plasma protégée sur ses flancs par 2 limiteurs en graphite activement refroidis. © P.Fiet/CEA



Une fois les réactions de fusion déclenchées, ce sont les **particules alpha** (autrement dit les noyaux d'hélium issus de la fusion), qui participent à leur tour au chauffage du plasma en percutant d'autres particules. Dans un réacteur fonctionnant en continu, il est nécessaire d'injecter de la puissance pour maintenir le courant qui circule dans le plasma, puisqu'il est une des composantes du confinement. C'est pour cette raison que le taux d'autochauffage du plasma ne peut être de 100%.

De la fusion à la production d'électricité

La fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium se traduit par la formation d'un noyau d'hélium, appelé aussi « particule alpha » et par l'émission d'un neutron très énergétique. L'énergie du noyau d'hélium est de 3,5 MeV, celle du neutron de 14,1 MeV.

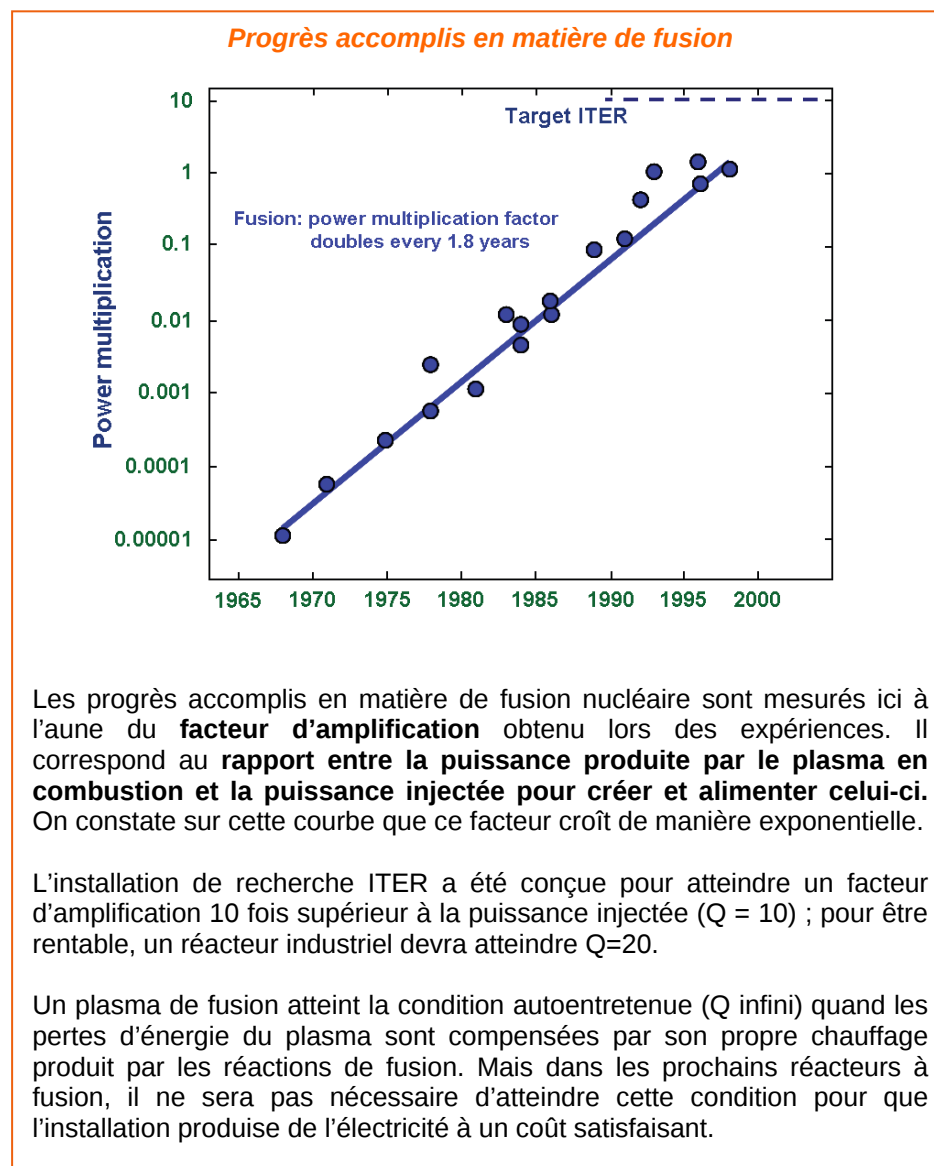
Dans un plasma confiné par un champ magnétique, le noyau d'hélium, doté d'une charge électrique positive, ne sort pas du système. Il transfère son énergie au plasma et contribue à le chauffer. Le neutron, lui, est insensible au champ magnétique : il « s'échappe » vers les parois où son énergie peut être récupérée et convertie en chaleur. C'est cette chaleur qui, comme dans un réacteur à fission, peut être utilisée pour alimenter des turbines à vapeur, lesquelles actionneront à leur tour un alternateur qui produira de l'électricité.

La production d'hydrogène est elle aussi envisageable : si les matériaux des parois sont en mesure de résister à des températures de l'ordre de 1000°C, il est alors possible d'utiliser la chaleur pour casser des molécules d'eau et produire ainsi de l'hydrogène.

Les grands défis de la fusion nucléaire

La fusion nucléaire est l'une des rares options envisageables pour produire en toute sécurité une énergie abondante et respectueuse de l'environnement. Au vu des progrès qui ont été réalisés, on peut espérer que la maîtrise de la fusion sur terre et son exploitation industrielle soient une réalité à la fin de ce siècle. En seulement trente ans, des progrès considérables ont été accomplis (cf. graphique ci-dessous) : la température et le temps de confinement de l'énergie ont notamment été multipliés par 1000, soit une progression fulgurante car légèrement supérieure à la croissance des performances des micro-processeurs (loi de Moore).

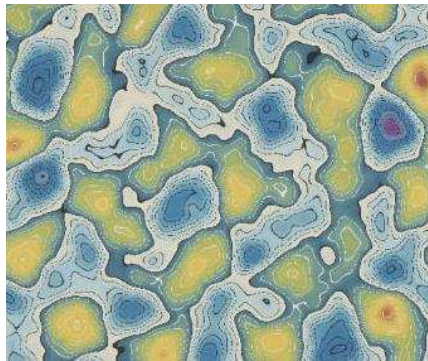
Les défis à relever restent cependant très complexes. Aujourd'hui, sept grandes missions jalonnent la R&D sur la fusion nucléaire.



Mission 1 : maîtriser les instabilités du plasma en fusion

L'énergie apportée au plasma par les noyaux d'hélium (ou particules alpha) est à l'origine d'instabilités en tout genre qui peuvent dégrader le temps de confinement du plasma. Parmi elles, on distingue les instabilités macroscopiques et les instabilités microscopiques. Les premières engendrent des déformations à l'échelle du plasma lui-même, qui échappe alors à sa prison magnétique et va à la paroi. Ces pertes majeures de confinement compromettent totalement la réaction. Aujourd'hui, grâce à l'avènement de la configuration tokamak, ces macro-instabilités sont bien maîtrisées.

Il reste cependant à comprendre et à déjouer les instabilités microscopiques qui perturbent également la réaction en accroissant le transport de la chaleur entre le cœur et le bord du plasma. Dans l'anneau de plasma confiné au sein d'un tokamak, seul le cœur du plasma, soit 10 % de son volume total, est en fusion. Les températures atteignent à cet endroit plusieurs dizaines de millions de degré. Les 90% du plasma restants jouent en fait le rôle d'isolant entre la partie en fusion du plasma et les parois du tore qui l'accueille. Les micro-instabilités qui se développent dans le plasma créent des turbulences qui accroissent le transfert de la chaleur du centre du plasma vers les bords. Comprendre et maîtriser ces instabilités suppose à la fois d'approfondir les connaissances en physique des plasmas mais aussi de développer des instruments de diagnostic pour pouvoir comprendre et contrôler les réactions.



Simulation numérique de microturbulences au sein du plasma.
© CEA

Mission 2 : assurer le fonctionnement fiable d'un réacteur de fusion

Une installation expérimentale est poussée jusqu'aux limites de ce qu'elle peut donner ; à ce régime, les macro-instabilités réapparaissent et provoquent des disruptions : le plasma se refroidit et la décharge s'arrête. Dans un réacteur de fusion à usage industriel, le taux d'utilisation de la machine devra être très élevé, de l'ordre de 80 %. Les disruptions du plasma et autres imprévus doivent être écartés. Il s'agira donc de choisir les paramètres de fonctionnement de l'installation suffisamment éloignés des valeurs limites susceptibles d'entraîner des dysfonctionnements.

Mission 3 : Eviter la pollution du plasma par les matériaux qui l'entourent

La chambre du tore qui accueille le plasma est composée d'objets assez divers qui constituent les « composants face au plasma ». La gestion de l'interface entre le plasma et ces parois est capitale. Le plasma émet en effet en direction de la paroi du tore des particules plus ou moins énergétiques et des rayonnements divers. La paroi est soumise à des flux énergétiques dont la

valeur atteint et même dépasse localement 20 MW par mètre carré, ce qui correspond au flux d'énergie à la surface du Soleil.

Si la paroi se dégrade sous l'effet du plasma, elle risque de renvoyer de petites quantités de matériaux qui vont pénétrer dans le plasma, le refroidir et diluer le combustible. Le plasma ne pèse qu'un gramme et la présence de moins d'1% d'atomes indésirables peut en dégrader très fortement la température.

Plusieurs types de phénomènes viennent fragiliser le matériau : gonflement sous l'effet des gaz émis au cours de la réaction, érosion sous l'action de particules rapides, alternance de phases d'échauffement et de refroidissement (cf. mission 6).

Le « divertor », une pièce maîtresse pour éviter la pollution du plasma

Le divertor est l'une des pièces maîtresses d'une installation de fusion. Il remplit une double fonction : débarrasser le plasma de ses cendres et de ses impuretés et évacuer une partie de la chaleur générée par le système. Une fois que le noyau d'hélium produit par la réaction de fusion transmet son énergie au plasma, dont il contribue à entretenir la température, il se transforme en « cendre », dont l'accumulation pourrait polluer le plasma et dont il convient de se débarrasser. C'est cette fonction que remplit le divertor, dispositif qui tire parti d'une perturbation du champ magnétique pour guider vers la partie basse de la machine les écoulements de plasma qui atteignent la périphérie.

Le divertor doit pouvoir résister à des densités de puissance très élevées, qui peuvent atteindre 10 à 20 MW par mètre carré. ITER en testera plusieurs types. Actuellement, le JET et le JT-60 japonais sont tous deux équipés de divertors ; leur forme en « D » se prête naturellement à ce dispositif, de par leur configuration magnétique. Dans Tore Supra et plus généralement dans toutes les machines à section circulaire, c'est un « limiteur » qui remplit ces fonctions sans bénéficier toutefois du « guidage magnétique ».

Mission 4 : Atteindre des décharges de longues durées

Un réacteur à fusion électrogène devra fournir de l'énergie en continu. Ce mode de fonctionnement intensif suppose de relever à la fois des défis d'ordre technologiques et d'ordre physique. Il faut en effet assurer un bon refroidissement des matériaux qui entrent en interaction avec le plasma, et réduire au maximum la consommation d'énergie déployée pour confiner le plasma. Il faut aussi parvenir à maintenir en continu le confinement du plasma.

→ Assurer un bon refroidissement des matériaux

Toute la puissance injectée dans le plasma ou générée par celui-ci s'écoule hors du plasma après un temps de confinement. Lorsque l'on travaille sur des décharges longues, cette opération d'évacuation des flux de chaleur suppose de mettre au point des systèmes de refroidissement extrêmement efficaces. Il faut également disposer d'une instrumentation en mesure d'assurer un contrôle en temps réel des températures des parois internes du tore.

→ Confiner le plasma en continu

Un « fonctionnement en continu » suppose de pouvoir maintenir en permanence le champ magnétique qui confine le plasma. Or, une alimentation continue de bobines de cuivre en électricité consomme beaucoup d'énergie. Dans la perspective d'une mise en œuvre industrielle de la fusion, il faut à tout

prix éviter que la consommation des bobines ne pèse trop lourdement sur le bilan énergétique global de l'installation. Le recours à des bobines supraconductrices permet de contrer le problème : la résistance d'un matériau supraconducteur étant nulle, le champ magnétique se maintient en permanence sans consommation d'électricité. Cela suppose que les bobines, refroidies à une température proche du zéro absolu voisinent avec un gaz porté à 200 millions de degrés. Ce défi technologique a déjà été validé pour la première fois à grande échelle dans Tore Supra. Dans les prochaines installations, il faut parvenir à générer des champs magnétiques plus élevés encore (supérieurs à 13 teslas).

→ **Maintenir en continu un courant non inductif au cœur du plasma**

Dans un tokamak, le confinement magnétique du plasma est assuré à la fois par les bobines toroïdales et poloïdales qui entourent la chambre d'expérience et par le courant qui circule à l'intérieur du plasma. Ce courant, généré par « effet transformateur », est appelé courant inductif (on fait varier un courant dans une bobine et cela crée par induction un courant dans le plasma). Il permet à la fois de chauffer le plasma et de le maintenir confiné. Mais cet effet transformateur est limité dans le temps ; il faut trouver alors d'autres solutions pour maintenir ce courant à l'intérieur du plasma. Cela peut passer par l'injection de particules neutres dans le plasma, particules qui, par effet de collision, vont générer un courant, ou par l'utilisation d'ondes à haute fréquence.



Décharge de plasma dans Tore Supra en appui sur le limiteur pompé toroïdal de l'installation. © CEA.

Mission 5 : modéliser le comportement d'un plasma en fusion et des matériaux qui subissent son action.

Nous l'avons vu, un plasma en fusion est un univers d'instabilités qu'il faut parvenir à maîtriser. Aujourd'hui, chercheurs et ingénieurs avancent sur le sujet de manière semi-empirique car la modélisation du comportement des 10^{23} particules qui entrent en interaction dans un plasma n'est pas encore réalisable avec les ordinateurs actuels. Une telle modélisation permettrait de mieux comprendre mais surtout de prédire le comportement du plasma en fusion. Si la progression des performances des ordinateurs continue au rythme actuel, il devrait être possible de modéliser le plasma d'un réacteur de fusion dans une vingtaine d'année.

La simulation d'un plasma en fusion requiert la description d'un grand nombre de phénomènes physiques. Chacun constitue un domaine de spécialisation en soi. Ce vaste programme comprend aussi la description de l'interaction entre plasma et paroi, qui couvre des processus complexes de physique atomique, de physique des matériaux.

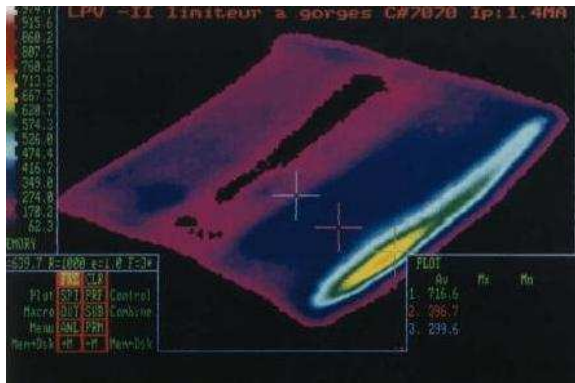


Image thermographique infrarouge à un instant donné d'un « limiteur » de Tore Supra. © CEA

La modélisation numérique dans le domaine de la fusion par confinement magnétique progresse suivant deux voies parallèles. La première approche a pour but l'élaboration d'un "simulateur" de tokamak permettant de préparer et d'interpréter les expériences, et de concevoir les tokamaks du futur.

La deuxième approche consiste à prédire avec la meilleure précision possible le comportement d'un plasma en fusion en apportant un éclairage sur des phénomènes tels que le transport turbulent, l'évolution non-linéaire d'instabilités, la propagation d'onde dans un milieu très inhomogène, et l'interaction plasma-paroi. La complexité des phénomènes mis en jeu implique une grande complexité de programmation et des temps de calcul très élevés.

Mission 6 : mettre au point les matériaux et composants adaptés à l'environnement spécifique de la fusion nucléaire

→ Le premier objectif de cette mission est de **développer et de caractériser les matériaux capables de résister sur le long terme aux flux de neutrons intenses** d'un réacteur de fusion, sans générer de déchets à vie longue. La fusion d'un noyau de deutérium et d'un noyau de tritium engendre un neutron de 14 MeV. Ces neutrons, qui ne sont pas confinés puisqu'ils ne portent aucune charge, quittent le plasma et impactent la paroi de l'installation. C'est ce bombardement neutronique intense qui permet de produire la chaleur qui sera récupérée pour faire tourner les turbines du réacteur. Ce bombardement neutronique affecte les matériaux : à chaque fois qu'un neutron touche la paroi, il perturbe le réseau cristallin du matériau qu'il percute. Par ailleurs, il peut arracher des nucléons aux noyaux des matériaux et engendrer une production de gaz (hydrogène et hélium) au sein même des matériaux. Les quantités produites sont une centaine de fois plus importantes que celles produites par les neutrons des réacteurs de fission, sept fois moins énergétiques. L'accumulation d'hélium dans les matériaux les fragilise et provoque des phénomènes de gonflement.

Dans une installation expérimentale comme ITER, les temps d'exposition des matériaux à ces flux de neutrons sont finalement assez brefs car les décharges de plasma ne sont pas permanentes : l'utilisation d'un acier classiquement utilisé dans les centrales nucléaires est satisfaisant ; dans un réacteur industriel, le taux d'utilisation élevé de la machine suppose de développer des matériaux bien plus résistants. L'installation IFMIF (International fusion Materials irradiation facility), actuellement en projet, sera chargée de tester la résistance de ces matériaux à une source de neutrons de 14 MeV.

IFMIF : un maillon essentiel des recherches sur la fusion

La qualification de matériaux capables de résister à l'irradiation intense par les neutrons de 14 MeV et de longue durée, est une étape essentielle pour le réacteur (DEMO) qui succédera à ITER, qui devra tester l'efficacité de la transformation d'énergie en électricité. Alors que le dommage causé par irradiation sera de l'ordre de 30 dpa (déplacements par atome) par an pour DEMO, il ne sera que de 3 dpa sur la durée de vie d'Iter (30 dpa signifie que chaque atome dans le matériau a été déplacé en moyenne 30 fois de sa position initiale dans le réseau cristallin, provoquant des défauts structurels).

IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), qui vise des niveaux d'irradiation très élevés (20 à 50 dpa par an), sera une installation d'irradiation unique au monde. Cet instrument, qui vise à qualifier des matériaux avancés résistant aux conditions extrêmes spécifiques des futurs réacteurs de fusion, sera constitué de deux accélérateurs de deutons, délivrant en parallèle et en continu leurs faisceaux d'une puissance totale de 10 MW sur une source lithium liquide, pour générer le flux intense de neutrons (1017 neutrons/s) de 14 MeV.

La mise en œuvre de cet ambitieux projet nécessite dans un premier temps la construction de prototypes des principaux sous-systèmes. C'est le but d'IFMIF-EVEDA (Engineering Validation Engineering Design Activities) qui comporte trois thèmes principaux : l'accélérateur prototype, la cible lithium et les cellules de tests. Les activités, prévues sur une période de six ans, sont partagées entre l'Equipe Projet basée à Rokkasho (Japon) et les Groupes Système répartis entre l'Europe et le Japon.

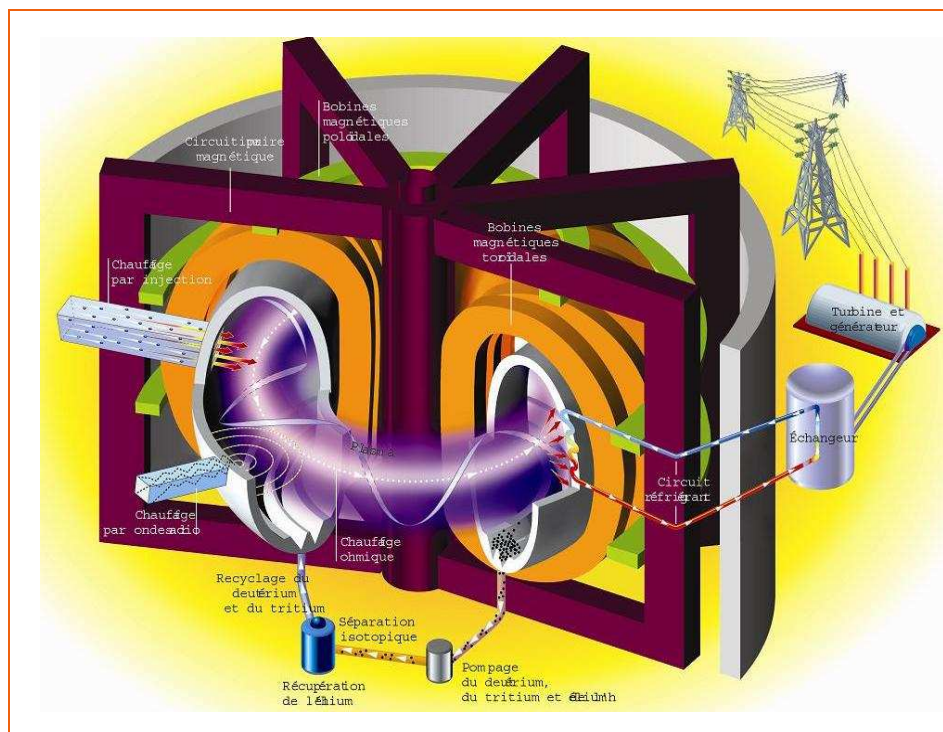
Les activités Accélérateurs sont menées au niveau européen par 3 pays : la France (CEA-Irfu à Saclay), l'Espagne (CIEMAT-Madrid) et l'Italie (INFN-Legnaro). La coordination des études et la réalisation du prototype accélérateur sont confiées à une équipe européenne (Accelerator System Group) localisée au CEA/Saclay.

→ Le second objectif de cette mission est de **mettre au point la couverture tritigène**, située juste derrière les composants face au plasma. Cette couverture doit produire le tritium nécessaire aux réactions de fusion, tout en récupérant l'énergie des neutrons : La possibilité de produire le tritium in-situ est validée au niveau des concepts. On se dirige vers deux types de couverture : les concepts à matériaux tritigènes solides, où l'extraction du tritium s'effectue en faisant circuler un gaz entre des billes de céramiques à base de lithium ; les concepts à matériaux tritigènes liquides : ce métal liquide circule à l'intérieur du réacteur pendant la réaction et est ensuite traité pour en extraire le tritium. Il faut désormais trouver la meilleure combinaison qui résultera de compromis sur la compatibilité des matériaux entre eux et sur les fenêtres d'utilisation admissibles (température de fonctionnement, résistance au gonflement ...).

Le choix des matériaux de structure de la première paroi et des couvertures tritigènes des réacteurs de fusion est capital car c'est lui qui dicte en grande partie les performances du réacteur en termes de rendement (température de fonctionnement maximale admissible) et en termes de disponibilité (durée de vie des éléments de couverture).

Mission 7 : Passer de l'installation expérimentale au réacteur de fusion industriel DEMO

L'installation DEMO a pour objectif de démontrer la viabilité technologique et commerciale d'un réacteur de fusion nucléaire. Intégrer de manière cohérente toutes les composantes d'un réacteur, du tokamak à proprement parler au système de production d'électricité (circuit transportant le fluide caloporteur, turbines, alternateur...) constitue un défi important. Parmi toutes les options technologiques qui se présentent, il s'agit de trouver la combinaison la plus efficace, la plus sûre et la plus rentable. Il faut aussi développer les instruments qui permettent d'intervenir dans le milieu radioactif que sera la chambre du tokamak. Il faut enfin mener une analyse à tous les stades de la filière (extraction du combustible, construction de la centrale, exploitation, démantèlement).



Tore Supra : à la recherche du « continu »

Tore Supra : le marathonien de la fusion

Utiliser la fusion nucléaire à des fins de production d'électricité suppose de pouvoir faire fonctionner le réacteur en continu – ou du moins sur de longues durées. Mais, outre la difficulté de maintenir un plasma en fusion parfaitement confiné sur la durée, un tel mode de fonctionnement fait peser sur l'installation des contraintes technologiques importantes.

Tout d'abord, un mode de fonctionnement continu suppose de pouvoir évacuer de manière extrêmement efficace la puissance injectée dans le plasma et générée par celui-ci. Evacuer en continu ces flux de chaleur, qui sont de l'ordre de ceux qui règnent à la surface du Soleil, implique la mise au point de systèmes de refroidissement extrêmement performants.

Autre point, pour maintenir le champ magnétique qui confinera le plasma, un tokamak équipé de bobines de cuivre doit consommer beaucoup d'énergie. Dans le JET¹⁰, par exemple, l'alimentation des bobines consomme à elle seule 150 mégawatts (soit environ un dixième de ce que fournit un réacteur électrogène classique). Dans la perspective d'une mise en œuvre industrielle de la fusion, de tels ordres de grandeur sont inacceptables car ils compromettent le bilan énergétique global de l'installation. La solution : avoir recours à des bobines supraconductrices, qui n'offrent quasiment aucune résistance au courant électrique. Mais supraconductivité et fusion ne font pas forcément bon ménage. L'aimant refroidi à une température proche du zéro absolu voisine, à moins d'un mètre de distance, avec un gaz porté à plus de 100 millions de degrés. Valider un tel concept était nécessaire et c'est l'une des principales missions que devait remplir Tore Supra.

Sur ces points essentiels, l'installation Tore Supra a réussi à apporter des solutions extrêmement efficaces et pérennes puisque le tokamak a aujourd'hui vingt ans. Tore Supra est le seul parmi les grands tokamaks à disposer de bobines supraconductrices permettant de générer un champ magnétique important et sur une longue durée. Il est également le seul tokamak à pouvoir extraire en continu la puissance injectée dans le plasma grâce à des composants face au plasma refroidis par une boucle d'eau pressurisée.

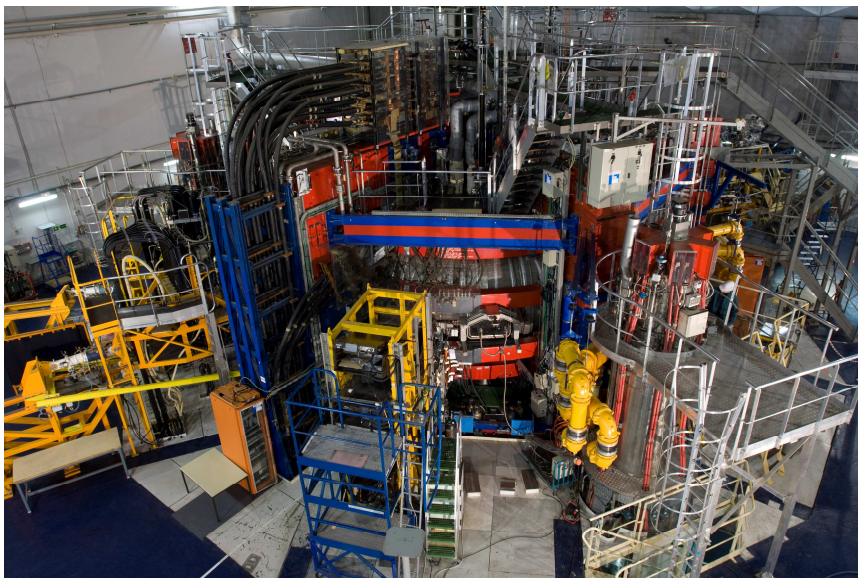
Les caractéristiques uniques de l'installation ont permis aux équipes de Tore Supra d'apporter une contribution capitale à la problématique du « fonctionnement continu ». Jusqu'alors, dans les autres installations, les décharges n'avaient duré que quelques secondes. Tore Supra a rapidement franchi le cap de la minute, puisqu'il a produit en 2003 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 fallu aussi extraire sous forme de chaleur, était supérieure au gigajoule (un million de joules, soit assez

¹⁰ Le tokamak européen JET (Joint European Torus) situé à Culham, au Royaume-Uni, est la plus grande installation de fusion au monde et la seule actuellement capable de fonctionner avec le mélange de combustible D-T. JET détient le record de puissance jamais obtenu dans une installation de fusion. En 1997, il a produit 16 MW d'énergie de fusion (soit $Q=0,7$, Q étant le facteur d'amplification, c'est-à-dire le rapport de la puissance produite par les réactions divisée par la puissance de chauffage appliquée au plasma).

d'énergie pour faire bouillir 3 tonnes d'eau). Ceci correspond au record mondial d'énergie injectée et extraite dans un tokamak.

Tore Supra reste aujourd'hui la seule installation capable de pratiquer des décharges longues qui mettent en jeu des puissances proches de celles qui interviennent dans un réacteur de fusion. A ce titre, elle reste une installation incontournable pour dompter la fusion. Dans Tore Supra, il est possible de travailler en régime quasi permanent sur des plasmas longue durée. Cela permet :

- d'étudier en situation représentative le comportement et la tenue des composants internes de l'enceinte (composants de première paroi, antennes micro-ondes de type avancée, injecteur de glaçons à fort taux de répétition, bras robot articulé d'inspection de l'enceinte, etc.) ;
- de développer et de tester des moyens de chauffage fonctionnant en continu ;
- d'aborder les phénomènes physiques qui ne se manifestent que sur des temps longs.



Le tokamak Tore Supra, situé sur le site du CEA/Cadarache. © P. Stroppa/CEA

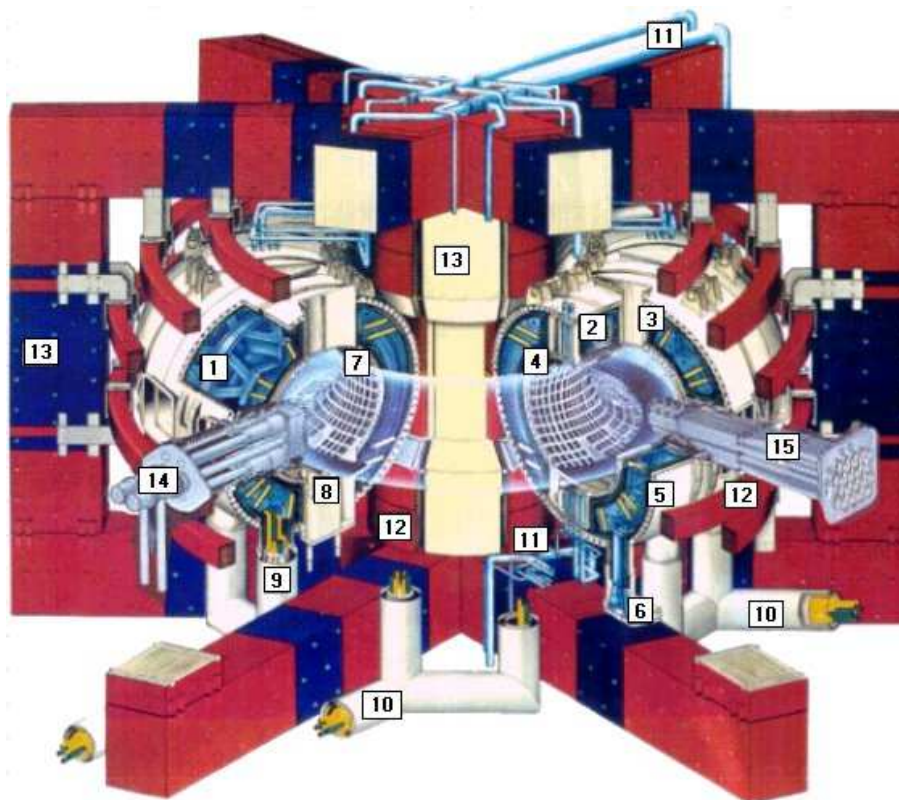
Caractéristiques de l'installation

D'une taille plus modeste que le JET – 25 m³ de plasma contre une centaine – Tore Supra fut mis en chantier en 1982 sur le site de Cadarache, dans le cadre de l'association Euratom-CEA. La machine a obtenu son premier plasma en 1988. Depuis, elle a produit plus de 20 000 décharges de plasma et ses dix-huit bobines supraconductrices ont fonctionné quasiment sans interruption. Chacune de ces dix-huit bobines pèse 45 tonnes et se trouve enchâssée dans un boîtier étanche, rempli de 20 000 litres d'hélium superfluide maintenu à la température de 1,8 K.

Dans Tore Supra, le plasma n'est pas composé d'un mélange de deutérium-tritium mais uniquement de deutérium, injecté sous forme de glaçons à l'intérieur de la chambre à vide.

Principaux paramètres de Tore Supra

• Grand rayon du plasma	2.40 m
• Petit rayon du plasma	0.72 m
• Volume du plasma	25 m ³
• Champ magnétique toroïdal (au centre du plasma)	4.2 T
• Courant plasma	1.5 MA
• Durée potentielle de la décharge	1000 s
• Chauffage additionnel du plasma (par ondes HF)	20 MW



- | | |
|--|---|
| 1 Structure mécanique à 4 K des bobines | 8 Limiteur pompé toroïdal |
| 2 Bobinage supraconducteur 1.8 K | 9 et 10 Alimentation cryogénique, 1.8 K, 4 K et 80 K |
| 3 Écran thermique 80 K | 11 Vers échangeur, eau pressurisée à 220°C, 40 bars |
| 4 Cryostat, enceinte interne 220°C | 12 Bobines du champ poloïdal |
| 5 Cryostat, enceinte externe 20°C | 13 Circuit magnétique |
| 6 Pied support : du cryostat, des écrans | 14 Antenne de chauffage à la fréquence cyclotronique ionique |
| 7 Première paroi activement refroidie à 220°C | 15 Antenne de chauffage à la fréquence hybride |

Les apports de Tore Supra aux recherches sur la fusion

Tokamak et supraconducteurs : de l'art de marier les contraires

Supraconductivité et fusion : un casse-tête d'ingénieur...

Dans un tokamak, les conditions d'utilisation des supraconducteurs sont les pires que l'on puisse imaginer :

- Les supraconducteurs classiques fonctionnent dans un domaine très restreint de température (entre -271 et -260 °C). Or, dans un tokamak, les bobines supraconductrices doivent être très proches du cœur du plasma, chauffé à 150 millions de degrés (dix fois la température du centre du Soleil), et pourtant rester à une température proche du zéro absolu, la température la plus froide qui puisse exister. De plus, ils sont très sensibles aux neutrons et aux divers rayonnements, qui ont tendance à les réchauffer. Or, les réactions de fusion génèrent des neutrons très énergétiques, à faible distance des supraconducteurs, ainsi que des flux de rayonnement de toutes sortes, dont certains sont très pénétrants.
- Les supraconducteurs fonctionnent également dans une gamme limitée de champ magnétique ; si le champ est trop élevé, ils perdent leur supraconductivité. Or, dans un tokamak, les champs qu'ils doivent générer sont précisément très élevés (3-13 teslas).
- Autre difficulté liée au confinement magnétique, le contrôle du plasma nécessite un réajustement constant des champs magnétiques qui permettent d'agir sur lui. Les supraconducteurs sont donc en permanence soumis à des variations de champs alors qu'ils sont très sensibles à celles-ci.
- Dans un tokamak, la densité de courant qui circule dans les supraconducteurs doit être la plus élevée possible parce que la place disponible pour faire passer ce courant est très limitée ; or les supraconducteurs ne fonctionnent plus au-delà d'une certaine densité de courant.
- Enfin, certains supraconducteurs (niobium-étain) voient leurs propriétés se dégrader lorsqu'ils sont soumis à des efforts mécaniques. Dans un tokamak, les forces qui agissent sur eux sont considérables, et génèrent des contraintes qui peuvent limiter leurs performances.

... Casse-tête résolu par les concepteurs de Tore-Supra

Tore Supra a montré pendant vingt ans qu'il est possible de faire fonctionner un grand tokamak supraconducteur avec une grande fiabilité. Le pari n'était pas évident. A preuve : la machine supraconductrice russe T-15, d'une taille proche de Tore Supra, a démarré très peu de temps après Tore supra, en décembre 1988, mais n'a jamais pu atteindre son champ nominal. Les physiciens de l'institut Kurchatov avaient choisi d'utiliser du niobium-étain (Nb3Sn), théoriquement très performant.



Bobine toroïdale supraconductrice de Tore Supra, réalisée dans un alliage de niobium-titane.
© P. Stroppa/CEA

Le câble supraconducteur dont est constitué chacune des bobines de Tore Supra a été réalisé dans un alliage de niobium-titane qu'un bain d'hélium liquide refroidit à 1,8 K (-270°C). A cette température, sensiblement inférieure au seuil de supraconductivité de l'alliage, l'hélium se trouve dans une phase singulière, que l'on appelle « superfluide » et qui lui confère une propriété tout à fait remarquable : il évacue très rapidement les élévations de températures pouvant apparaître durant le fonctionnement du tokamak.

Le choix de l'alliage en niobium titane (NbTi) s'est révélé le plus judicieux. Le pari était cependant très risqué ; la technologie NbTi hélium superfluide n'avait à l'époque été testée qu'à l'échelle du laboratoire. Il s'agissait en effet de construire ce qui était à l'époque le plus grand aimant supraconducteur du monde, à partir de cette expérience très réduite.

Evacuer des flux de chaleur proches de ceux de la surface du soleil

Quand un plasma est maintenu sur de longues durées, les composants qui lui font face doivent évacuer de très importantes quantités de chaleur. Des problèmes, qui ne se posent pas dans une machine fonctionnant sur des durées courtes deviennent alors cruciaux.

S'il était possible d'uniformiser le flux de chaleur incident sur les parois face au plasma d'un réacteur de fusion, ce flux serait de l'ordre de 0.5MW/m^2 . C'est-à-dire un niveau de flux proche de celui des assemblages de combustible d'un réacteur de fission du type EPR. En fait, dans les machines de fusion, il est impossible d'aligner parfaitement le plasma avec les parois du tore et donc de garantir que le plasma vienne "lécher" uniformément les parois. La moindre instabilité déforme très rapidement le plasma qui vient alors déposer presque toute sa puissance au point où il est en contact avec la paroi. Le flux de chaleur au point de contact peut alors atteindre $10 \text{ à } 15 \text{ MW/m}^2$, c'est-à-dire presque le quart du flux de chaleur à la surface du soleil. Ce flux de chaleur considérable produit dans les parois une variation de température de l'ordre de 1000°C par centimètre. Or, la variation très importante de température sur une très courte distance produit une dilatation différentielle des matériaux de la paroi, ce qui entraîne des contraintes mécaniques (cisaillement) très fortes.

Sur Tore Supra, la paroi interne est maintenue à une température constante de 220°C par un circuit d'eau sous pression qui en extrait la chaleur. Quant à son plancher, il est équipé d'un bouclier thermique capable de résister à de très hauts flux d'énergie.

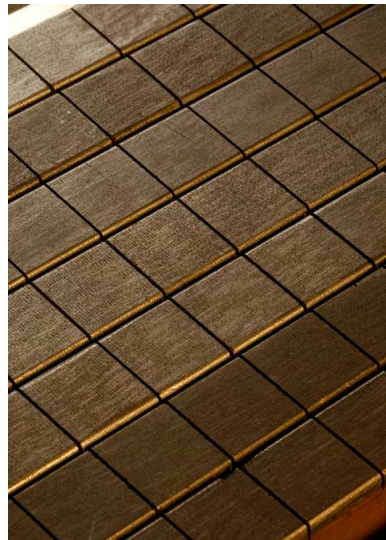
Le « limiteur » : un bouclier thermique pour extraire la chaleur en continu



Chambre à vide de Tore Supra, avec, au premier plan, le « limiteur pompé toroïdal ». © P.Fiet/CEA

Pour que la température de la surface de la paroi en contact avec le plasma ne dépasse pas 1000° C, les concepteurs de Tore Supra ont eu recours à une paroi capable de supporter de hauts flux de puissance, refroidie en permanence. Cette paroi, qui court sur le plancher de la chambre à vide de Tore Supra, est appelée « limiteur pompé toroïdal » (LPT). Le limiteur est mis suffisamment en avant des autres parois, de manière à garantir que le plasma n'entrera en contact qu'avec lui. Equiper en effet toute la paroi face au plasma (dizaines à centaines de m²) par ces éléments de parois très haut flux est inenvisageable pour des raisons de coût (1M€ par m²) et de circulation d'eau (densité de canalisation trop importantes, débits d'eau considérables).

12000 briquettes de fibres de carbone (~574 éléments comprenant chacun 21 briquettes, en tout 7,6 m²) noyées dans une matrice de carbone (CFC) composent ce limiteur. Elles sont fixées sur des tubes de cuivre dans lesquels circule à grande vitesse et à moins d'un centimètre de la surface de l'eau sous pression. Le LPT permet d'évacuer en continu jusqu'à 15 MW. Le choix du matériau choisi s'est porté sur le carbone car celui-ci a des propriétés thermomécaniques intéressantes. A très haute température, il ne fond pas mais se vaporise. Il a l'avantage de n'engendrer que de légères impuretés qui ne polluent pas trop le plasma lorsqu'elles y pénètrent. Les fibres de carbone permettent de résister aux efforts dus à la dilatation différentielle. En revanche, ce matériau, poreux, ne permet pas d'assurer l'étanchéité nécessaire à la circulation d'eau, c'est pourquoi il doit être fixé sur du cuivre.



Briquettes en fibre de carbone du limiteur pompé toroïdal de Tore Supra.
© P. Stroppa/CEA

Un des défis majeurs a été de trouver une méthode de fixation des briquettes sur le cuivre, aucune brasure ne résistant aux efforts et températures. Marier ces deux matériaux a donc nécessité le développement d'une technique

particulièrement délicate, appelée « active metal casting ». Ce mode d'assemblage fait intervenir le perçage de microscopiques trous coniques dans lesquels le cuivre est coulé.

Tore Supra : défricher le champ des décharges longues

Fort de ses caractéristiques technologiques uniques, Tore Supra reste, dans l'état actuel, la machine la plus à même de défricher le vaste champ des décharges longues et de déchiffrer les phénomènes physiques qui en découlent. Il s'agit notamment de mieux comprendre et de mieux contrôler le comportement du courant généré dans le plasma, de façon à augmenter encore les temps de confinement, l'un et l'autre étant corrélés. Progresser dans ce domaine suppose d'augmenter la puissance injectée dans Tore Supra.

Nous l'avons vu, le courant qui circule dans le plasma (une des composantes essentielles du confinement du plasma d'un tokamak) est obtenu par induction en utilisant un effet transformateur. Mais cet effet transformateur est en fait très court dans le temps puisqu'il ne dure que quelques secondes sur les tokamaks actuels (ITER, du fait de sa taille pourra toutefois opérer dans ce régime durant 400 secondes). Pour parvenir à des décharges longues, il est nécessaire de recourir à d'autres modes non inductifs de génération de courant. Dans Tore Supra, le relais est assuré par des ondes à haute fréquence (3,7 GHz), générées par des klystrons et injectées dans la chambre du tokamak par des antennes.

Or, les Klystrons qui équipaient jusqu'à maintenant Tore Supra datent d'une époque où l'on considérait qu'une décharge longue durerait 30 secondes. Ils ont donc été conçus dans cette optique (et ont d'ailleurs largement dépassé les exigences du cahier des charges). Aujourd'hui, ils atteignent leurs limites ; l'arrêt de la décharge record de 2003 est dû à des arrêts intempestifs des klystrons, utilisés bien au delà de leur spécification initiale en termes de durée.

Dans le cadre du programme Cimes (Chauffage et injection de matière en stationnaire), prévu par le 7^e PCRD qui court jusqu'en 2011, le remplacement de ces klystrons par de nouveaux klystrons, capables de fournir de plus fortes puissances en fonctionnement continu, est acté. D'une puissance équivalente à quelques 10 000 fours à micro-ondes, ils permettront d'injecter jusqu'à 10 MW pendant 1000 s. En montant ainsi la puissance, les chercheurs pourront travailler sur des flux de chaleur plus importants et des plasmas plus denses. D'un point de vue technologique, il devrait être possible de valider les concepts retenus dans Tore Supra, tels que le limiteur pompé toroïdal, à un niveau de flux de chaleur proche de 10 MW/M² pendant 1000 s, ce qui se rapproche des conditions de fonctionnement d'ITER et d'un réacteur. Augmenter dans Tore Supra les capacités de génération d'un courant non inductif permettra aussi de disposer d'un outil permettant d'investiguer mieux encore la physique des décharges très longues où le plasma serait dans un état quasi-stationnaire. Ce que Tore Supra sera encore pour longtemps le seul capable de faire.

Fiche 5 : ITER et DEMO : du domptage de la fusion à sa domestication

Tout comme une chaudière thermique ou un réacteur nucléaire conventionnel, un réacteur de fusion est une installation destinée à produire de la chaleur, qui permet de générer de la vapeur. Celle-ci à son tour actionne une turbine et entraîne la rotation d'un alternateur, produisant ainsi de l'électricité. L'installation de recherche ITER produira de la chaleur, mais elle ne sera pas couplée à un générateur de vapeur et ne produira donc pas d'électricité. L'objectif qui lui est assigné est de démontrer la « faisabilité » scientifique et technique de la fusion thermonucléaire contrôlée. Au terme de vingt années d'exploitation, un « démonstrateur » lui succèdera. Celui-ci, d'ores et déjà baptisé « DEMO », sera électrogène et constituera un prototype des réacteurs de fusion qui pourraient être opérationnels dans la deuxième moitié de ce siècle.

ITER : de la nécessité de voir plus grand

Sept partenaires (la Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis, l'Europe, l'Inde, le Japon et la Russie), un coût global de dix milliards d'euros, un chantier de dix ans suivi d'au moins vingt ans d'exploitation, un millier de personnes — chercheurs et techniciens — en permanence sur le site... L'ampleur du programme ITER (*International thermonuclear reactor*) est à la mesure de ses objectifs : ce tokamak de 12,4 mètres de diamètre devra démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion à des fins pacifiques en démontrant tout d'abord que la fusion contrôlée d'un plasma de deutérium-tritium est possible, ensuite que cette combustion peut se faire de manière continue.

Les expériences menées dans les tokamaks actuels ont permis de comprendre que la dimension de la machine était un facteur essentiel pour parvenir à atteindre les conditions thermonucléaires : en effet plus le plasma est grand, meilleur est son isolement thermique. Le « temps de confinement » de l'énergie devient suffisamment grand pour que l'autochauffage du plasma devienne prépondérant. Le volume du plasma d'ITER atteindra un volume de 840 m³, soit un volume environ trente fois plus important que celui de Tore Supra.

ITER doit remplir un double objectif, de puissance et de durée.

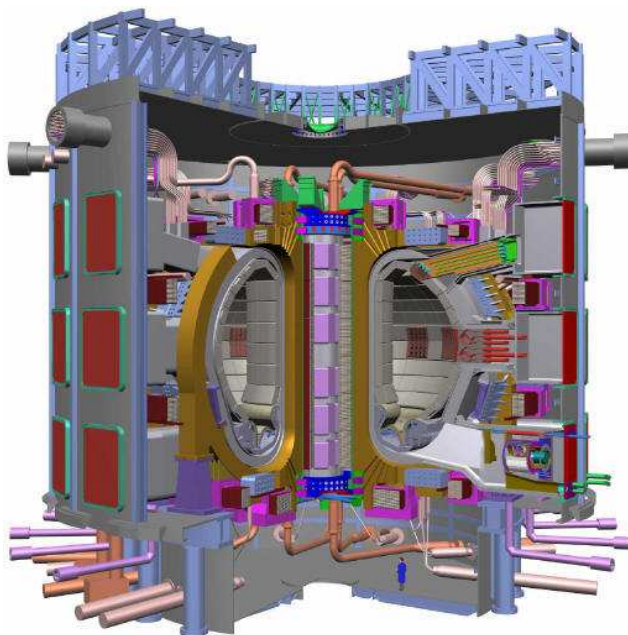
- **Puissance** : l'installation devra générer une puissance de 500 mégawatts tout en n'en consommant que 50 (soit un gain de fusion dix fois supérieur à la puissance injectée) durant 400 secondes, soit 6 minutes et 40 secondes. Cela suppose que les particules alpha (l'hélium), issues de la réaction de fusion, participent à hauteur de 66% au chauffage du plasma (contre 10% dans le tokamak européen JET. Le record mondial de ce dernier, de 16 mégawatts pendant 1 seconde pour une puissance injectée de 25 mégawatts environ, devrait être pulvérisé.
- **Durée** : le second objectif vise, lui, à maintenir les réactions de fusion dans le plasma pendant au moins 1000 secondes (16 minutes 40 secondes). Pour atteindre ces durées, il faudra utiliser des ondes et l'injection de particules neutres pour générer le courant au sein du plasma de façon non inductive, sans utiliser l'effet transformateur. Les méthodes de génération de courant non inductive étant moins efficaces

que l'utilisation de l'effet transformateur, le courant au sein du plasma sera donc moins important que dans le scénario précédent. Les performances du plasma seront donc inférieures et le gain de fusion visé n'est plus que de 5. Pour 50 mégawatts de chauffage fournis, seuls 250 mégawatts seront produits.

Pour réaliser ces objectifs, ITER mettra en œuvre des technologies de pointe. Ses systèmes magnétiques seront exclusivement constitués de supraconducteurs. A ce titre, il bénéficiera pleinement des apports de Tore Supra. Dans la machine ITER, les bobines seront encloses dans un cryostat, une enceinte hermétique refroidie à la température de l'hélium liquide. Elles voisineront, à moins d'un mètre de distance, avec un gaz porté à 100 millions de degré. Ce cryostat sera constitué d'une « coquille » de 24 m de hauteur et 28 m de diamètre, qui contiendra une vingtaine de mètres cubes d'hélium liquide, maintenant les bobines à la température de -268°C (soit 4,5 K).

De nouveaux matériaux capables de résister au très haut flux d'énergie, notamment pour le divertor (le « cendrier ») seront éprouvés. La paroi interne du tokamak ne sera pas dotée d'une couverture tritigène, destinée à produire le tritium *in situ*, mais différents modules seront testés dans la chambre de manière à pouvoir choisir la meilleure option parmi celles qui sont étudiées.

Afin d'éviter toute exposition à la radioactivité, générée à la fois par le tritium et par les matériaux potentiellement activés par les neutrons issus de la réaction de fusion, la totalité de la maintenance d'ITER sera robotisée et aucun homme ne pénétrera dans la chambre à vide de l'installation. Dans ce domaine, plusieurs dispositifs de filtrage seront installés afin de maintenir d'éventuels rejets de l'installation aussi bas que possible et sans danger pour l'environnement.



Représentation du Tokamak ITER, réacteur expérimental de fusion où le plasma atteindrait 800 m³. © ITER

DEMO ou comment boucler la boucle

Aujourd'hui, avant même que la construction d'ITER ne soit achevée, des études pour DEMO sont entreprises. L'installation devrait prendre le relais d'ITER à partir de 2040. DEMO sera un tokamak de 16 mètres de diamètre, connecté cette fois au réseau et doté d'une couverture tritigène pour produire directement le tritium. Il devra délivrer *a minima* 1500 mégawatts électriques (Mwe), ce qui suppose de délivrer 30 fois plus d'énergie que celle qu'on lui aura injectée, et six fois plus que dans ITER.

Comme dans une centrale thermique fonctionnant au gaz, le réacteur de fusion devra être alimenté en continu en combustible deutérium-tritium. Les quantités en jeu sont, cependant, sans commune mesure : il n'y aura jamais, en un temps donné, plus de quelques grammes de combustible dans la chambre à vide. Quand la fusion sera entrée dans la phase industrielle, le cycle du combustible s'effectuera en circuit fermé dans l'installation. Il sera constitué des éléments suivants :

- un dispositif d'injection du mélange gazeux dans la chambre à vide, soit par une simple buse, soit, ce qui est plus efficace, en projetant au cœur du plasma de minuscules « glaçons » constitués du même mélange.
- Des modules de production de tritium qui tapisseront entièrement la paroi interne de la chambre à vide. Ces modules tritigènes contiendront du lithium et un multiplicateur de neutrons constitué de plomb ou de béryllium. Sous l'effet des neutrons issus de la réaction de fusion et du multiplicateur en présence, le lithium générera suffisamment de tritium pour compenser celui qui aura été « brûlé » par les réactions de fusion.
- Un système de pompage et de séparation isotopique pour extraire les gaz collectés par le divertor. Ces « effluents » contiendront de l'hélium, des impuretés mais aussi du deutérium et du tritium qui n'auront pas été « brûlés ». Le système de séparation isotopique permettra de récupérer ces deux derniers éléments pour en réalimenter le système après avoir fait l'appoint avec le tritium produit dans les couvertures fertiles.

Dans DEMO, le réacteur sera ensuite classiquement couplé à un circuit alimenté par un fluide caloporteur qui transportera la chaleur produite par les neutrons issus de la fusion jusqu'à un générateur de vapeur qui à son tour alimentera les turbines pour produire de l'électricité.

La qualification des matériaux est une étape essentielle pour le réacteur DEMO¹¹. C'est tout l'enjeu de « l'approche élargie »¹², qui accompagne le projet ITER.

¹¹ Alors que le dommage causé par irradiation sera de l'ordre de 30 dpa (déplacements par atome) par an pour DEMO, il ne sera que de 3 dpa sur la durée de vie d'ITER 30 dpa signifie que chaque atome dans le matériau a été déplacé en moyenne 30 fois de sa position initiale dans le réseau cristallin, provoquant des défauts structuraux

¹² L'approche élargie comprend trois projets : IFMIF-EVEDA (International Fusion Materials Irradiation Facility (cf. p.17)), la construction du JT60- SA (tokamak du format du JET actuel mais équipé de bobines supraconductrices) et un centre de calcul.

Annexes

- **Annexe 1 - L'épopée de la fusion : quelques dates clés**
- **Annexe 2 - Déroulement d'une décharge de plasma dans Tore Supra**
- **Annexe 3 - Réacteurs thermonucléaires et sûreté : petit tour de la question**

Annexe 1 - L'épopée de la fusion : quelques dates clés

- 1920 : l'astrophysicien britannique Sir Arthur Eddington (1882-1944) démontre que le centre du Soleil connaît des pressions 10 milliards de fois supérieures à la pression atmosphérique ainsi que des températures s'élevant à 15 millions de degrés et donc capables de produire des réactions de fusion nucléaires (réaction qui, dans un plasma, transforme les noyaux atomiques d'hydrogène en hélium en libérant une énergie considérable due à la perte de masse associée).
- 1940 : les premières expériences en laboratoire ont lieu aux États-Unis pour explorer le domaine encore inexploré des plasmas chauds et tenter de trouver un moyen de confinement à partir de champs magnétiques.
- 1946 : deux chercheurs de l'université de Londres, Thomson et Blackman, déposent un brevet pour le premier réacteur de fusion mettant déjà en œuvre une chambre à vide en forme de tore et des courants par onde radiofréquence.
- 1955 : la France rejoint les Anglais pour intensifier les recherches sur la fusion sur lesquelles travaillent également soviétiques et Américains mais sans communiquer ni publier en raison de la Guerre froide.
- 1958 : lors de la conférence *Atomes pour la paix* qui se tient à Genève, les grandes puissances révèlent leurs résultats de recherche sur la fusion, lesquelles démontrent que les bases du confinement magnétique peuvent être considérées comme établies ; les recherches sur la fusion acquièrent une dimension internationale.
- 1959 : afin de se donner les moyens de relever les défis scientifiques et technologiques posés par la maîtrise de l'énergie de fusion des associations se créent entre l'Agence européenne EURATOM et différents organismes de recherche dont le CEA.
- 1968 : les chercheurs soviétiques de l'Institut Kourtchatov obtiennent une avancée significative en produisant un plasma à une température encore jamais atteinte sur Terre (10 millions de degrés pendant une durée de l'ordre de la milliseconde) grâce à un appareil nommé *Tokamak* (un acronyme russe signifiant « chambre magnétique à courant en forme de tore ») ; dans ce réacteur, les hautes températures du Soleil sont recréées et le plasma contrôlé grâce à un confinement magnétique.
- 1969 : en pleine guerre froide, une équipe de chercheurs britanniques se déplace à Moscou et confirme les résultats obtenus par le *Tokamak* 3 ouvrant une ère de construction de cet appareil à travers le monde.
- 1970 : le CEA construit un tokamak sur son centre de Fontenay-aux-Roses (TFR) qui avait déjà connu ZOE, le premier réacteur français de fission élaboré par le prix Nobel Frédéric Joliot-Curie ; avec son TFR, la France fait entrer l'Europe dans l'ère des tokamaks. Trois ans plus tard, les performances du TFR français dépassent, pour la première fois, celles de son rival soviétique avec des températures atteignant 2 KeV (20 millions de degrés) ; en parallèle, cette installation obtient des résultats importants en matière de confinement et de chauffage du

plasma ; deux autres dispositifs sont construits en France à Grenoble (Petula et Wega).

- 1979 : début de la construction du tokamak européen JET (*Joint European Torus*) à Culham (Grande-Bretagne) sous la direction d'un physicien venu du CEA ; avec ses 100 m³ de plasma, il devient le plus grand tokamak jamais réalisé. C'est en 1983 qu'ont lieu les premières décharges de plasma.
- 1988 : après six ans de chantier, Tore Supra, installé sur le site du CEA-Cadarache, obtient son premier plasma. Il est le premier grand tokamak à aimants supraconducteurs. Pour réaliser cette prouesse, les chercheurs sont parvenus à faire cohabiter, à moins d'un mètre de distance, des températures allant de – 271 °C à 100 millions de degrés, soit probablement le record de gradient de température dans l'Univers.
- 1991 : le JET obtient une puissance fusion de 2 millions de Watts (MW) pendant 2 secondes, une expérience qui réalise la première introduction de tritium dans un réacteur de fusion par confinement magnétique et qui confère à l'Europe une avance incontestable dans le domaine de la fusion thermonucléaire contrôlée.
- 1992 : les chercheurs travaillant sur Tore Supra parviennent à maintenir le plasma en équilibre quasi-stationnaire pendant plus d'une minute réalisant ainsi un record. Par ailleurs, la complexité des problèmes incitent les chercheurs à regrouper leurs connaissances pour franchir de nouvelles étapes : le 21 juillet, après une série de consultations approfondies, les États-Unis, le Japon, la Communauté des États indépendants (CEI), le Canada et l'Union européenne signent un accord à Washington, pour une durée de six ans, pour engager le programme pour *l'International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER) destiné à démontrer la faisabilité d'un réacteur de fusion.
- 1998 : l'Union européenne, le Japon, la Russie prolongent l'accord de trois ans, les États-Unis renonçant à poursuivre la coopération tout en acceptant de contribuer à l'effort commun pendant encore un an.
- 2000 : le conseil d'ITER valide les propositions d'orientations techniques de l'équipe internationale.
- 2001 : candidature du CEA/Cadarache pour abriter le futur réacteur de fusion tandis que d'autres pays seront candidats (Espagne, Canada et Japon).
- 2003 : la Chine demande à participer aux négociations et les États-Unis annoncent qu'ils participeront à ITER.
- 2005 : Cadarache est choisit pour recevoir ITER. L'Inde s'associe au projet.

Annexe 2 - Déroulement d'une décharge de plasma dans Tore Supra

La réalisation d'expériences sur un dispositif tokamak nécessite la mise en œuvre combinée de nombreux sous-systèmes. Sur Tore Supra, les principaux sous-systèmes sont :

- le système de pompage de l'enceinte qui permet, associé à l'utilisation de différentes techniques de conditionnement de la paroi (étuvage, décharges lumineuses, etc.), d'obtenir le niveau de vide (typiquement 10^{-5} Pa) nécessaire à l'initiation et à l'entretien des décharges plasma ;
- le système de champ toroïdal qui permet de générer la composante principale du champ magnétique de confinement du plasma. Sur Tore Supra, ce champ est créé par un ensemble de 18 bobines dont le conducteur de NbTi, plongé dans un bain d'Hélium superfluide à environ 1.8 K, a des propriétés supraconductrices. Ce bain est entretenu par un réfrigérateur cryogénique ;
- le système de refroidissement des parois (typiquement 120°C sous 24 bars) qui permet d'extraire les flux de chaleur arrivant aux parois durant les décharges ;
- le système de champ poloïdal qui permet d'induire une partie du courant électrique dans l'anneau de plasma et d'assurer le bon positionnement dans l'enceinte de celui-ci ;
- les systèmes d'alimentation en matière de la décharge, avec sur Tore Supra, des systèmes d'injection de matière sous forme gazeuse ou solide (glaçons) ;
- les systèmes de chauffage du plasma, avec sur Tore Supra toute la palette des chauffages micro-ondes développés à cet effet : système à la fréquence cyclotronique ionique (fréquence de giration des ions autour des lignes de champ magnétique, typiquement 40-80 MHz), système à la fréquence dite « hybride » (3.7 GHz) et système à la fréquence cyclotronique électronique (fréquence de giration des électrons, typiquement 100 GHz). Ces différents systèmes peuvent aussi permettre de générer de manière non inductive une partie du courant électrique dans l'anneau de plasma ;
- les systèmes de mesures, en grand nombre, avec environ une trentaine de diagnostics différents sur Tore Supra. Ces systèmes de mesures, aussi appelés diagnostics, permettent à la fois la conduite en temps réel de la décharge (positionnement, densité du plasma, etc.), la protection de la machine (par exemple en mesurant la température des composants de première paroi par thermographie infrarouge ou le taux d'impuretés par analyse spectroscopique) et l'analyse physique des propriétés du plasma.

Les caractéristiques techniques de Tore Supra (champ magnétique toroïdal permanent, paroi activement refroidie) permettent d'en faire aujourd'hui encore un outil unique au monde pour mettre en œuvre et valider expérimentalement de façon intégrée des modes avancés de conduite des décharges en préparation d'ITER et des machines futures.

La réalisation d'une décharge plasma passe schématiquement par les phases suivantes :

- **Mise en configuration des sous systèmes :** chacun des sous-systèmes procède à sa mise en configuration, avec déroulement de

séquences automatisées et/ou intervention d'un opérateur. L'objectif pour chaque sous-système est d'atteindre un état de disponibilité pour la réception des consignes (par exemple, haute tension établie pour les générateurs des systèmes de chauffage). Une unité générale de supervision reçoit une information synthétique de type feu vert / feu rouge de la part de chaque sous système.

- **Préparation de la décharge :** chaque sous-système charge un ensemble de paramètres (notamment des courbes de consignes, par exemple de puissance à coupler au plasma) préalablement définis par un opérateur pour l'expérience spécifique à venir. Un certain nombre de contrôles de conformité sont effectués. S'ils sont satisfaisants, le pilote de la machine obtient une autorisation de lancement de la décharge.
- **Déroulement de la décharge :** la décharge est lancée en déroulant des séquences propres à chaque sous-système, sachant que de plus en plus de consignes sont en réalité générées en temps réel par des boucles de rétroactions afin d'optimiser la performance de la décharge tout en assurant le respect des différentes limites opérationnelles de la machine. L'apparition d'éventuels défauts ou dysfonctionnements est traitée par une unité de coordination des sous-systèmes afin de mettre en œuvre des stratégies de récupération, de repli ou d'arrêt prématuré de la décharge le cas échéant.



Vérification du bon déroulement de la décharge depuis la salle de contrôle de Tore Supra. © P. Stroppa/CEA

Annexe 3 - Réacteurs thermonucléaires et sûreté : petit tour de la question

Le dégagement d'énergie phénoménale qui accompagne la réaction de fusion pourrait inquiéter : ne peut-elle pas être à double tranchant et conduire à l'emballement de la réaction ? En fait, dans un réacteur à confinement magnétique, les conditions requises pour parvenir à la fusion nucléaire sont à ce point complexes que toute légère altération de l'un ou l'autre des paramètres en jeu entraîne immédiatement l'arrêt immédiat de la réaction. Tout risque d'emballement est exclu. De plus, le réacteur de fusion est alimenté de façon continue en combustible gazeux : il suffit d'interrompre cette alimentation pour que la réaction s'arrête en une fraction de seconde. La réaction de fusion mise en œuvre dans un réacteur industriel sera intrinsèquement sûre.

Les températures de 100 millions de degrés qui règnent au cœur du plasma sont, elles aussi, impressionnantes, mais dans les faits, si le plasma échappe au confinement magnétique et va à la paroi, l'installation ne court pas de danger : c'est le plasma qui est détruit ; tout comme une goutte d'eau, aussi brûlante soit-elle, ne suffit pas à réchauffer un bain glacé, la faible quantité de plasma présente dans le tokamak ne peut produire un accident majeur. En revanche, sur le long terme, les contraintes que les hautes températures, les neutrons, la production d'hydrogène et d'hélium et les rayonnements font peser sur les matériaux supposent de trouver des alliages suffisamment résistants pour ne pas venir polluer le plasma, ce qui compromettrait la réaction de fusion.

Les « risques nucléaires », liés à l'utilisation du tritium¹³, radioactif, et à l'activation progressive du revêtement interne de la chambre à vide de la machine par les neutrons¹⁴ sont identifiés et pris en compte tant dans la conception de la machine que dans les règles qui s'appliqueront à son exploitation et à son démantèlement. Les réacteurs de fusion seront classés parmi les « Installations nucléaires de base » (INB) et soumis, à ce titre, à la surveillance de l'Autorité de sûreté nucléaire. Le principe de « défense en profondeur » qui prévaut dans toute INB et qui suppose que des barrières de confinement successives soient mises en place, sera appliqué. Dans les réacteurs industriels, grâce aux couvertures tritigènes, le cycle du combustible s'effectuera dans l'enceinte de la machine, ce qui exclut les problèmes que pourraient poser le transport du tritium.

La réaction de fusion, très différente de la réaction de fission, ne produit aucun élément comparable aux « produits de fission ». Aucun déchet de haute activité à vie longue ne résultera de l'activité des réacteurs de fusion. Il y aura en revanche production de déchets de très faible activité (20% du volume total), de

¹³ Le tritium a une période relativement courte de 12,3 ans et se désintègre en émettant un électron de faible énergie : 5 millimètres d'air ou une simple feuille de papier suffisent pour l'arrêter et il ne peut traverser la peau. Il ne peut donc endommager les cellules de l'organisme qu'à condition d'être inhalé ou ingéré. Il ne présente aucune toxicité chimique.

¹⁴ Les neutrons très énergétiques produits par la fusion, nécessaires pour produire la chaleur qui sera exploitée pour fournir de l'électricité, ont l'inconvénient de fragiliser les matériaux ; ils peuvent aussi donner naissance à des éléments instables. Tout l'enjeu des recherches est de créer des aciers à « faible activation » dans lesquels la production d'éléments instables sera minimisée. Chrome, tungstène, vanadium, tantale sont des matériaux qui possèdent ces propriétés.

faible et moyenne activité à vie courte (75%) et, en faible quantité (5%), des éléments de moyenne activité à vie longue.

Une centaine d'années après la mise à l'arrêt d'un réacteur de fusion, la radiotoxicité des matériaux qui constituaient l'installation sera à peu près du même ordre que celle qu'induit l'exploitation d'une centrale thermique au charbon (mais contrairement à la centrale à charbon, les éléments radioactifs contenus dans le combustible ne seront pas dispersés dans l'environnement).