

Un gaz ionisé

Un gaz est constitué de molécules dont les électrons sont liés aux noyaux des atomes. Lorsque la température d'un gaz s'élève, l'agitation thermique moléculaire augmente. Lorsqu'elle est suffisamment élevée (de l'ordre de quelques milliers de degrés pour l'air), les molécules perdent un ou plusieurs électrons. Le gaz initial se trouve dans un état ionisé : c'est un plasma. Si la température augmente encore (jusqu'à une dizaine de milliers de degrés), les molécules se cassent en atomes. Dans un plasma à très haute température, les atomes formant les molécules du gaz initial sont totalement ionisés.

Une puissante source d'énergie

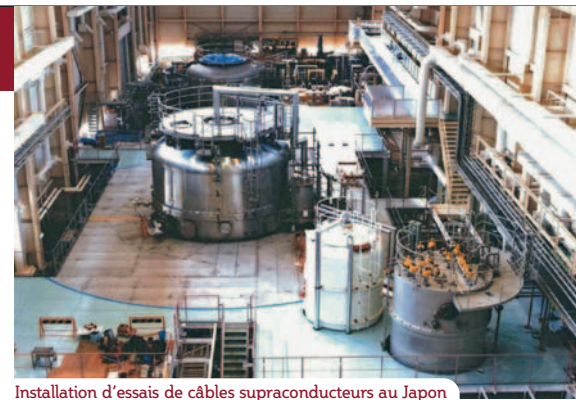
Le principe de l'énergie de fusion consiste à faire fusionner des atomes de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) en les portant à très haute température (plusieurs millions de degrés). Les atomes ionisés sont confinés dans une enceinte immatérielle formée par de puissants champs magnétiques. Les réactions de fusion obtenues entre des atomes de deutérium et de tritium (élément radioactif à vie courte de 12,3 ans), chaque collision donne naissance à un noyau d'hélium et à un neutron libérant une énergie estimée à 17,6 MeV, mille fois plus élevée que celle qui, en moyenne, anime les particules. Cette énergie est transmise en partie au noyau d'hélium qui résulte de cette fusion (3,6 MeV) et au neutron (14 MeV). Les rayonnements ainsi produits chauffent les parois du tore.

Les tokamaks supraconducteurs dans le monde

En exploitation depuis 1988, le tokamak Tore Supra détient le record mondial de durée de plasma de deutérium avec 6 minutes et 30 secondes à une température de 40 millions de degrés. Une performance qu'il doit à ses bobines supraconductrices en alliage de niobium-titane refroidi à -271 degrés celsius qui assurent le confinement magnétique du plasma. Aujourd'hui, les projets de grande ampleur en matière de confinement magnétique sont tous conçus avec des bobines supraconductrices à l'instar des tokamaks KSTAR en Corée du Sud, SST1 en Inde, East en Chine, JT-60 Super Advanced au Japon ou encore ITER à Cadarache.



Système de câble développé pour les bobines du solénoïde central d'ITER : six pétales, composés de brins torsadés, sont câblés autour d'une hélice métallique centrale d'environ 10 mm de diamètre interne et 1 mm d'épaisseur. Dans ce concept développé par les équipes du CEA, l'hélium peut circuler à la fois dans la zone centrale et dans la zone des brins.



Installation d'essais de câbles supraconducteurs au Japon

# Le confinement magnétique

LE CONFINEMENT MAGNÉTIQUE A LONGTEMPS ÉTÉ UN DÉFI POUR LES SCIENTIFIQUES. À PRÉSENT MAÎTRISÉ, IL CONSTITUE UN ÉLÉMENT CLÉ DES INSTALLATIONS DE RECHERCHE UTILISÉES POUR DÉVELOPPER L'ÉNERGIE DE FUSION.

Un plasma est composé d'une multitude de particules dotées d'une charge électrique. C'est un gaz tellement chaud que toute matière se volatilise à son contact. Son confinement a longtemps été au cœur d'expériences et d'essais de laboratoire. L'enjeu consiste à éviter que trop de particules quittent le plasma et aillent heurter la paroi de l'enceinte dans laquelle il est produit. Car les atomes arrachés au cours de ce processus vont interagir avec les particules du plasma et lui faire perdre de l'énergie provoquant son refroidissement. Joseph Weisse, conseiller scientifique au CEA, résume le phénomène avec des mots simples : «envoyer du plasma contre une paroi ressemble à jeter une goutte d'eau bouillante dans un bac à glaçons : les glaçons sont fort peu affectés tandis que la goutte d'eau, elle, est totalement refroidie». Le seul moyen d'éviter que le plasma ne se refroidisse consiste à l'éloigner de toute paroi. Sur le principe, il faut parvenir à mettre en place un subtil agencement de champs magnétiques intenses (100 000 fois le champ terrestre) que vont suivre les particules qui composent le plasma. Car, lorsque qu'elles sont en mouvement, les particules sont contraintes de suivre ces champs magnétiques qui se matérialisent dans l'espace par des lignes de

champ ; elles tournent autour en décrivant une hélice. Confiner un plasma revient ainsi à faire pirouetter les noyaux et les électrons autour de lignes fermées sur elles-mêmes. Le plasma se trouve alors enfermé dans une sorte d'enceinte immatérielle. Si la solution est simple à décrire, sa mise en œuvre s'avère complexe et fait appel à des systèmes de haute technologie.

Une enceinte immatérielle

Dès la fin des années 50, Andreï Sakharov et Igor Tamm du centre d'études nucléaires Kourchatov, à Moscou, ont compris qu'il était nécessaire de prévoir un système de bobines constituées de câbles enroulés produisant un ensemble de surfaces magnétiques emboîtées les unes dans les autres pour confiner un plasma. Leur idée de génie a consisté à faire circuler un courant intense dans le plasma grâce à un ensemble de bobinages complexes disposés autour du tore (cf Interfaces n°3, un tokamak qu'est-ce que c'est ?). Cette technique présente un double avantage, car le courant injecté participe au chauffage du plasma et génère un autre champ magnétique qui contribue à son confinement.

Le succès des supraconducteurs

Jusqu'au début des années 1980, toutes les installations à confinement magnétique étaient équipées d'aimants résistifs généralement à base de cuivre, dopé à l'argent, pour en améliorer les propriétés mécaniques. Mais les durées des décharges plasma obtenues restaient très limitées (de l'ordre de 10 à 30 secondes). Il faudra attendre le développement des supraconducteurs<sup>(1)</sup> (câbles dont le matériau n'offre aucune résistance électrique) pour obtenir des performances inégalées en Europe, avec l'installation Tore Supra à Cadarache.

Héritier de cette technologie, ITER mettra en œuvre les plus grandes bobines supraconductrices jamais construites à ce jour. Les dix-huit bobines de champ toroidal placées tout autour du tore produiront le champ magnétique principal qui assurera le confinement du plasma. La bobine centrale (le solénoïde central) créera un courant intense qui en circulant dans le plasma va le chauffer et générer un autre champ ma-

gnétique participant à son confinement. Les six bobines poloidales encercleront le tore et serviront à stabiliser le plasma à l'intérieur de l'enceinte à vide dans laquelle il sera créé.

Développements technologiques

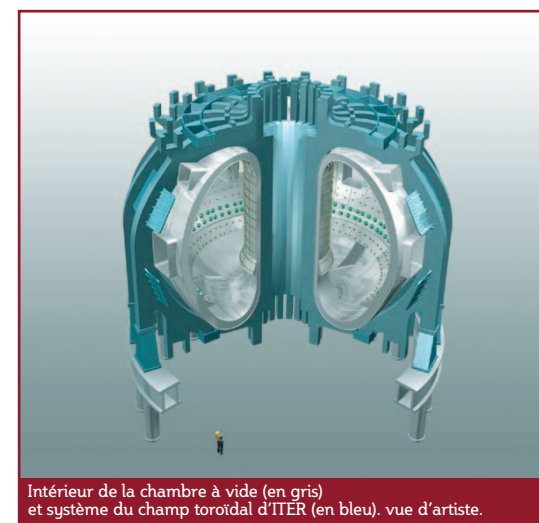
En changeant d'échelle, la conception des bobines d'ITER a nécessité des développements innovants dans différents domaines.

C'est le cas du nouvel alliage développé pour les bobines supraconductrices toroidales d'ITER en niobium-étain qui permettra de disposer de champs magnétiques de 13 teslas alors que les champs obtenus, à ce jour, avec un alliage en niobium-titane sont limités à environ 10 teslas.

«La grande taille de ces systèmes magnétiques rend incontournable l'utilisation de courants forts (de 40 à 70 kA) pour limiter les tensions électriques. Les variations en champ et en courant constituent une spécificité des systèmes magnétiques d'ITER» souligne Jean-Luc Duchateau de l'Institut de recherche en fusion magnétique (IRFM). Ce qui a conduit l'équipe du laboratoire de cryomagnétisme de l'IRFM à plancher durant de longs mois sur la mise au point d'un nouveau concept de conducteurs nécessaires à la fabrication des bobines d'ITER. «Cet élément est complexe dans sa géométrie car il doit laisser passer des courants très forts tout en laissant passer l'hélium qui sert à le refroidir» détaille-t-il.

Cette pièce maîtresse doit aussi pouvoir faire face à toutes les situations y compris les plus extrêmes, comme la disparition brutale du plasma (la disruption). Pour faire face à cet objectif, les ingénieurs ont fait évoluer la structure du conducteur : pour ITER, le conducteur sera donc constitué d'environ un millier de brins torsadés sur plusieurs niveaux et insérés dans une gaine d'acier qui assurera l'étanchéité. Plusieurs appels d'offres ont d'ores et déjà été publiés par les agences domestiques européenne, japonaise et russe pour lancer la fabrication du conducteur en niobium-étain du système de champ toroidal pour un poids de 400 tonnes.

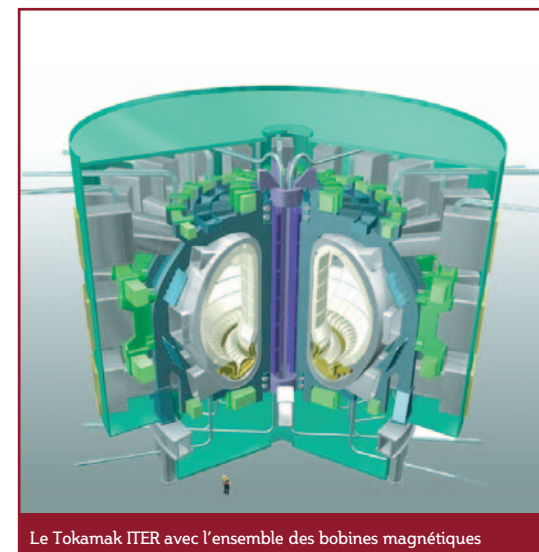
(1) La supraconductivité est la propriété qu'ont certains éléments de laisser passer un courant électrique sans aucune résistance. Aujourd'hui, cette propriété n'est possible, en règle générale, qu'à de très basses températures, proches du zéro absolu.



Intérieur de la chambre à vide (en gris) et système du champ toroidal d'ITER (en bleu), vue d'artiste.



Partie externe de la chambre à vide (en gris) et bobines poloidales d'ITER (en vert), vue d'artiste.



Le Tokamak ITER avec l'ensemble des bobines magnétiques

Le magnétisme

Le magnétisme est produit par des charges électriques en mouvement. Notre environnement baigne dans une multitude de champs magnétiques. Un aimant attire de la limaille de fer en raison du champ magnétique qui lui est associé. C'est également un champ magnétique qui protège la terre des rayons cosmiques. D'une grande complexité, le champ magnétique a pu être domestiqué pour être utilisé dans de nombreux objets quotidiens : aimants de tableau, boussole, moteur électrique, télévisions, réseaux internet haut débit... Son utilisation est également au cœur d'équipements utilisés en médecine (appareils d'imagerie par résonance magnétique) et d'installations de recherche comme l'accélérateur de particules du Cern, le plus puissant au monde, ou les tokamaks.

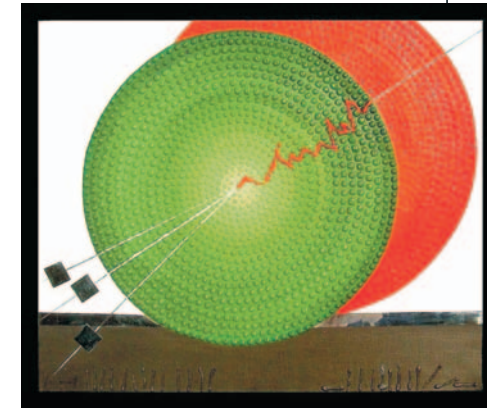
Au service de la médecine

Le système d'imagerie par résonance magnétique NeuroSpin, implanté en région parisienne, contribuera à mieux comprendre le comportement du cerveau, sain ou malade. La réalisation de son aimant, dans le cadre d'une collaboration franco-allemande, sera une première mondiale. L'aimant de cet appareil unique au monde doit générer en son centre un champ magnétique homogène d'une intensité de 11,7 teslas, soit plus de 230 000 fois le champ magnétique terrestre dans un volume de plusieurs m<sup>3</sup>. Un vrai défi s'impose pour positionner les 65 tonnes de bobinages de l'aimant avec une exigence de précision de quelques dixièmes de millimètres. Le bobinage est réalisé à partir de plusieurs milliers de kilomètres de fils en niobium-titane ayant un diamètre de l'ordre du millimètre. Supraconducteur, il est possible de faire passer 400 fois plus de courant dans ce brin que dans un fil classique en cuivre de la même taille.

Art

Human-ITER

Le débat public ITER a constitué pour Patricia Jean Drouart, une source d'inspiration unique en son genre. Cette artiste peintre a fait partie des sept membres de la Commission particulière du débat public (CPDP), ITER en Provence, et accepta cette mission en tant que «candide» du débat. Elle va se nourrir de cette expérience, pousser sa curiosité autour du tokamak et va devenir perméable à tout ce qui s'y passe. C'est ainsi qu'est née l'illustration picturale «Human-ITER» plusieurs mois après la fin du débat. Elle représente l'injection de combustible dans le plasma sous la forme de glaçons (trois carrés métalliques). La spirale verte reproduit le tokamak et le dégradé de vert évoque la collision des atomes entre eux. L'énergie dégagée par la fusion est imagée par la ligne brisée rouge suivie d'un trait oblique signifiant l'avenir d'ITER. La spirale rouge qui s'apparente au soleil apparaît en ombre de la verte et vient «narguer le tokamak». La ligne d'horizon métallique sépare le monde des scientifiques et le public. Les petits traits verticaux en relief dans la partie basse du tableau représentent le public (à gauche) et la CPDP (à droite). Le rouge symbolise le présent, la chaleur et l'énergie. Le vert les attentes et espérances du projet et le gris les anonymes. «Human-ITER» (collection particulière) témoigne «d'une expérience intéressante d'observation du genre humain» selon son auteur. [www.patriciajeandrouart.com](http://www.patriciajeandrouart.com)



## AGENDA

Les 17 et 18 juin 2008  
Conseil ITER

Le prochain conseil ITER aura lieu les 17 et 18 juin prochain à la Préfecture d'Aomori au Japon. Les représentants des sept parties membres de l'organisation internationale ont pour objectif de faire un point d'avancement technique sur le projet, les aspects financiers et le planning.

Du 8 au 12 septembre 2008  
Ecole CEA / EDF / INRIA  
Université de Nice Sophia Antipolis

Tous les spécialistes de mathématiques appliquées et d'informatique se retrouveront du 8 au 12 septembre prochain, à Nice, dans le cadre de l'école CEA / EDF / INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique) pour faire le point sur les derniers développements des modèles numériques pour la fusion contrôlée. L'école CEA / EDF / INRIA comporte à la fois des cours de fond donnés par des experts de renom et des exposés. Son comité scientifique comprend des personnalités des trois organismes impliqués (Bernard Bigot, Haut Commissaire à l'énergie atomique (CEA), Yves Bamberger pour EDF et Michel Cosnard pour l'INRIA). [www.inria.fr](http://www.inria.fr)

# Iter