

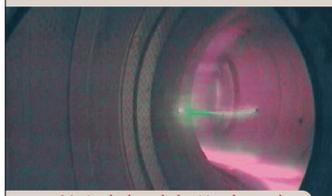
Atomes, particules neutres, ions

Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons (de charge négative). Le noyau est constitué de protons (de charge positive) et de neutrons (dépourvu de charge électrique). Un atome contient autant d'électrons que de protons ; c'est une particule neutre. Quand un atome perd ses électrons, il devient un ion positif ; en revanche, s'il capture un électron, il devient un ion négatif.

Deutérium et tritium

Dans l'enceinte d'ITER, les réactions de fusion seront réalisées à partir de noyaux de deutérium et de tritium. Le deutérium peut être extrait de l'eau de mer tandis que le tritium qui sera utilisé sur ITER proviendra très probablement de certains types de centrales électro-nucléaires. Radioactif, le tritium se transforme en hélium 3 en émettant un électron de faible énergie. Un gramme de ce mélange peut libérer autant d'énergie que huit tonnes de pétrole.

Des particules domptées

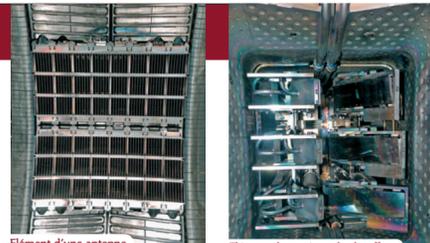


Injection de glaçon de deutérium dans un plasma



Plasma

Porter un gaz à haute température est une chose, mais comment le maîtriser à l'intérieur d'une enceinte fermée sachant qu'aucun matériau ne tient à des températures de plusieurs millions de degrés ? Les chercheurs y parviennent en mettant à profit les propriétés intrinsèques des particules ionisées qui forment un plasma. Les particules ayant la propriété de s'enrouler autour des lignes de champ magnétique, ces dernières sont agencées pour que les particules les suivent lorsqu'elles sont en mouvement. L'agencement des différentes lignes de champ magnétique forme une sorte d'enceinte immatérielle qui assure le confinement du plasma à l'intérieur d'un tokamak.



Élément d'une antenne hybride de Tore Supra

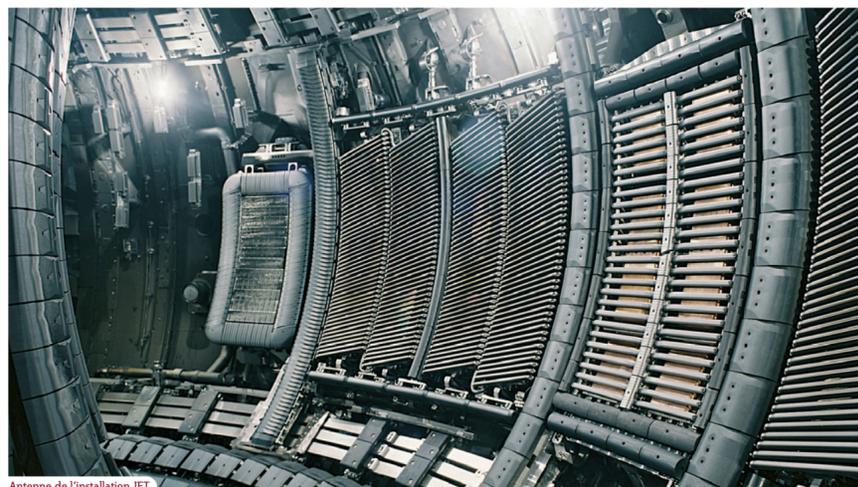
Élément du système de chauffage cyclotronique électrique de Tore Supra



Injecteur de glaçons de Tore Supra

Chauffage des plasmas

LES COMPOSANTS MIS EN ŒUVRE POUR ATTEINDRE DES TEMPÉRATURES DE PLUS DE 100 MILLIONS DE DEGRÉS CONSTITUENT DES ÉLÉMENTS IMPORTANTS DES INSTALLATIONS DE RECHERCHE POUR LA FUSION. ILS RÉSULTENT DE PLUSIEURS ANNÉES DE PROGRÈS DANS LES DOMAINES DE LA PHYSIQUE ET DE LA TECHNOLOGIE.



Antenne de l'installation JET

Porter un gaz à plus de 100 millions de degrés apparaissait comme un défi majeur au début de l'histoire de la fusion, quand on sait que la température à la surface du soleil n'est que de 6 000 degrés.

Au cœur de l'atome

Les premières tentatives remontent aux années cinquante. Racontées par Guy Laval dans son ouvrage «l'énergie bleue, histoire de la fusion nucléaire», les premières expériences ont été conduites en 1954 par des équipes de chercheurs en Angleterre, en Russie et aux Etats-Unis, rapidement rejointes par des équipes implantées en France, en Allemagne et au Japon. Elles ont permis de poser les bases complexes des réactions de fusion obtenues sur terre.

Pour qu'une réaction de fusion se produise entre deux atomes (cf encadré), il est nécessaire que leurs noyaux soient suffisamment proches l'un de l'autre pour que les forces nucléaires qui agissent sur de très faibles distances puissent opérer. Sinon, les deux noyaux chargés positivement se repoussent. Pour surmonter cette répulsion électrostatique, il est nécessaire d'atteindre de très hautes températures (100 millions de degrés) pour que l'agitation thermique des particules

permette un grand nombre de réactions de fusion. A ce niveau de température, les électrons ne sont plus liés aux noyaux et un gaz ordinaire devient alors un gaz ionisé (également appelé plasma), autrement dit un mélange d'électrons et de noyaux.

Partant de ces acquis, des scientifiques russes franchissent une étape essentielle quelques années plus tard. En 1968, ils seront les premiers à porter un plasma d'hydrogène à une température de l'ordre de 10 millions de degrés. Quelques décennies plus tard, des systèmes complexes permettent d'obtenir des niveaux de températures record de plus de 200 millions de degrés.

Techniques de chauffage

Chauffer un plasma revient à lui apporter de l'énergie. Pour cela, la première méthode consiste à faire circuler un courant de grande intensité, de plusieurs millions d'ampères, au sein du plasma. Ce courant électrique permet d'atteindre une température d'environ 20 millions de degrés. «Tout comme le filament d'une ampoule électrique chauffe lorsqu'un courant y circule, le plasma va monter en température sous l'effet du courant induit. Mais cet effet est proportionnel à la résistance du plasma : or plus la température du plasma est élevée plus la résistance du plasma diminue, ce qui

limite les températures que l'on peut atteindre avec cette méthode» précise Bernard Saoutic, adjoint au responsable de l'Institut de recherche en fusion magnétique à Cadarache. Pour pallier cette difficulté, deux autres familles de chauffage complémentaires, dites additionnelles, sont mises en œuvre. La première, appelée «injection de neutres», a été développée à la fin des années soixante-dix, en particulier avec l'installation de recherche TFR à Fontenay-aux-Roses. Elle consiste à injecter des particules, généralement des noyaux de deutérium, à haute énergie. «Il faut que ces particules soient fortement accélérées pour pénétrer au cœur du plasma. Ainsi, leur énergie sera transférée aux particules du plasma par collisions et elles participent à son chauffage» détaille Bernard Saoutic. Cette technologie met en œuvre un niveau d'accélération d'une centaine de kiloélectronvolts (keV) dans les installations actuelles. Mais, il apparaît que l'énergie d'accélération des particules injectées doit être d'autant plus grande

que le plasma est dense et volumineux. Pour ITER, l'accélération sera donc dix fois plus importante (1 mégaélectronvolts [MeV]) pour un atome dont le cœur du plasma dont le volume sera de 840 m³.

La magie des ondes

La deuxième famille de chauffage additionnelle met en œuvre des ondes électromagnétiques haute fréquence. L'objectif est de faire vibrer à la même fréquence les ondes et les particules. Ainsi, les ondes communiquent leur énergie aux ions et aux électrons du plasma : «un peu comme un surfeur qui utilise l'énergie communiquée par une vague pour se déplacer» commente Bernard Saoutic.

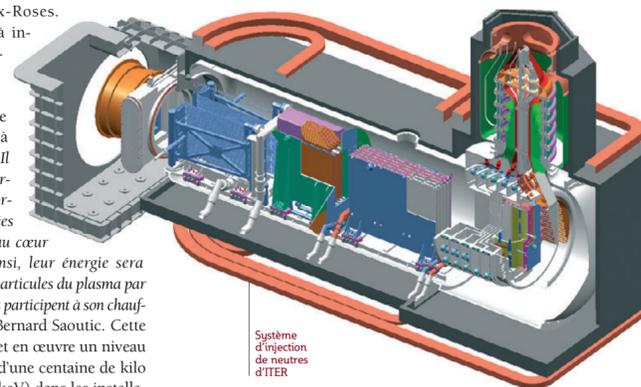
Trois types d'ondes sont utilisés :

- les ondes d'une fréquence de 30 à 70 MHz pour entrer en résonance avec les ions qui tournent autour des lignes de champ magnétique selon un mouvement cyclotronique⁽¹⁾ : on parle de chauffage cyclotronique ionique ;
- les ondes d'une fréquence de 100 à 200 GHz pour entrer en résonance avec les électrons : on parle de chauffage cyclotronique électronique ;
- les ondes à fréquence hybride (de quelques GHz).

En fonction de la fréquence requise, les ondes sont générées par des systèmes différents (tétrodes, diacrodes, klystrons, gyrotrons) avant d'être transmises jusqu'à des antennes placées à l'intérieur de l'enceinte où sont réalisés les plasmas. L'intérieur d'un tokamak se transforme ainsi en une sorte de gigantesque four à micro-ondes.

Au total, les systèmes de chauffage mis en œuvre dans ITER (chauffage ohmique, ondes haute fréquence, injection de neutres) permettront de communiquer une puissance de plus de 70 MW au plasma.

Tous ces systèmes de chauffage constituent des éléments clés d'une installation comme ITER. Ils font appel aux technologies les plus avancées dans le domaine de l'électronique de puissance.



Système d'injection de neutres d'ITER

⁽¹⁾ Les particules du plasma entrent en mouvement circulaire, perpendiculairement à une ligne de champ magnétique (mouvement cyclotronique).

De la première expérience de fusion à ITER

La première réaction de fusion a été obtenue par l'équipe d'Ernest Rutherford en 1934. L'expérience a consisté à bombarder une cible de deutérium sous forme d'eau lourde avec des noyaux de deutérium accélérés. Les chercheurs ont alors obtenu la fusion de deux noyaux de deutérium en un noyau d'hélium accompagnée d'une libération d'énergie. Cette expérience avait été décrite dans un article scientifique «observation d'un effet de transmutation de l'hydrogène lourd». Quatre ans plus tard, Hans Bethe identifiait la séquence des réactions de fusion nucléaires qui se produisent au cœur des étoiles.

Température et énergie

Les éléments d'une matière, quel que soit son état (liquide, solide, gaz), ne cessent de remuer, vibrer et de se déplacer s'ils ne sont pas à une température proche de -273 degrés Celsius. La «température» est l'expression de cette agitation : elle rend compte de l'énergie cinétique des particules. La température s'exprime en degrés Kelvin tandis que l'énergie d'une particule est exprimée en électronvolts (eV). A l'échelle de la physique nucléaire, des températures perçues comme élevées correspondent à des énergies cinétiques assez faibles. Par exemple, une température de 100 millions de degrés Kelvin équivaut à 10 kiloélectronvolts (1keV = 1000eV).

Extrait de La fusion nucléaire, Que Sais-je ?, Joseph Weisse (édition PUF).

Exercice sécurité sur le chantier

Durant la matinée du 21 octobre, plus d'une vingtaine de personnes a été mobilisée dans le cadre d'un exercice de sécurité dont le scénario reposait sur la chute imaginaire d'une grue sur le chantier de construction d'ITER impliquant trois blessés fictifs. Pompiers, responsables de la sécurité, infirmerie, personnels de l'entreprise impliquée dans le scénario, tous ont participé. L'objectif était de tester leur réactivité et leur capacité à faire face à un éventuel accident de ce type. Le premier bilan de l'opération montre que l'organisation mise en place est totalement opérationnelle. La mobilisation des équipes de secours et de l'infirmerie du chantier, du CEA et des pompiers de Saint Paul-Lez-Durance a parfaitement fonctionné. La prise en charge des trois blessés fictifs par l'infirmerie du chantier a eu lieu 5 minutes après l'alerte et leur évacuation s'est faite 35 minutes plus tard.



Personnels de sécurité

AGENDA

13 et 14 novembre 2008

Top Industrie

Durant deux jours, le village de l'industrie organisé par la chambre de commerce et d'industrie Marseille Provence à Marseille a fait le plein. Près de trois mille étudiants, collégiens et lycéens, responsables économiques et politiques locaux se sont rendus sur les 450 m² du village de l'industrie qui accueillait, entre autres, un stand ITER. L'occasion de découvrir les filières scientifiques et technologiques des neuf pôles de compétitivité labellisés.

www.topindustrie.cimp.com

3 décembre 2008
Colloque «nouvelles technologies et énergies de demain»

World Trade Center Marseille Provence 2, rue Henri Barbusse, Marseille

Les différents experts invités dans le cadre du colloque «nouvelles technologies et énergies de demain» traiteront, dans une première partie, «des grandes énergies d'aujourd'hui et de leur avenir» et dans une seconde partie «des nouvelles technologies qui vont changer la donne». Partant des énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole), en passant par la situation énergétique en PACA, jusqu'aux nouvelles technologies (captage, transport et stockage du CO₂, piles à combustibles) et à la fusion, ce colloque a pour ambition d'aborder toutes les questions d'un avenir énergétique complexe.

Iter