

iter le magazine

N°4 JUILLET - AOÛT 2014

- Dans ce numéro
- Le plus grand Meccano du monde Page 2
 - A chaque fonction son béton Page 3
 - L'heure du « T » Page 4



1

Le plus grand Meccano du monde

Editorial

C'était le 4 août 2010 : sur la plateforme d'ITER, une pelleteuse s'affairait, creusant les premiers mètres de ce qui serait bientôt la fosse du tokamak.

Quatre ans plus tard, on finalise le « plancher » de béton armé sur lequel reposera la machine la plus complexe que le génie humain ait jamais conçue.

En Europe, en Asie, sur le continent américain, les usines tournent à plein pour fabriquer les millions de pièces du tokamak ITER – une organisation complexe, pour laquelle il a fallu inventer un mode de collaboration inédit.

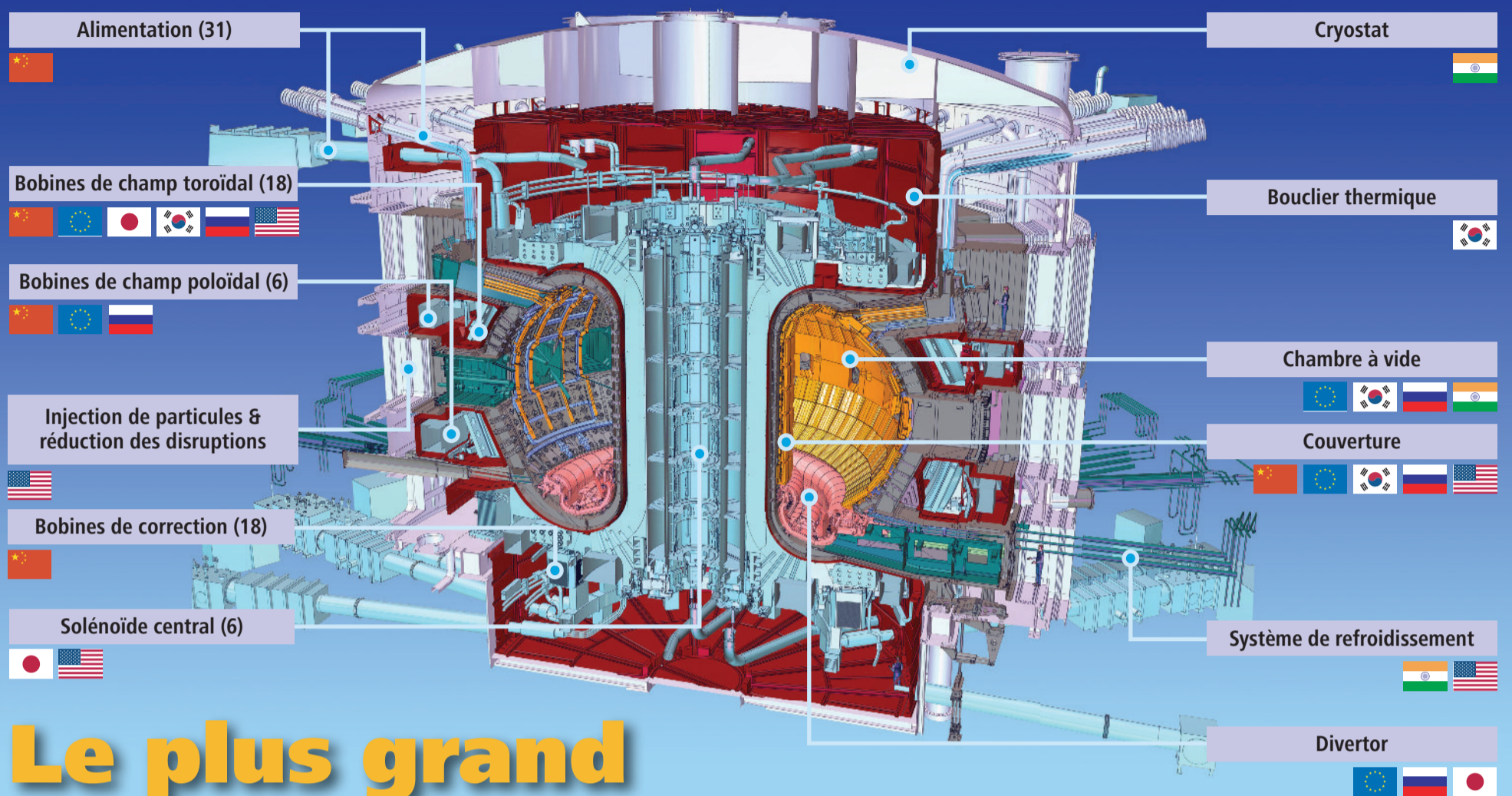
Ce quatrième numéro d'ITER le Magazine vous explique pourquoi, sans cette complexité, ITER ne pourrait exister.

L'équipe d'ITER le magazine.

editormag@iter.org



china eu india japan korea russia usa



Le plus grand Meccano du monde

Tous les systèmes, et donc toutes les contributions des membres d'ITER, n'apparaissent pas dans ce schéma.

2

Lorsqu'on les compare au tokamak ITER, une navette spatiale, un porte-avions, un sous-marin nucléaire, sont des « objets » relativement simples. Leur technologie est éprouvée et leur fabrication quasiment industrialisée.

Rien de tel avec ITER. La machine est unique et la plupart de ses éléments sont expérimentaux. S'il existe d'autres grands tokamaks dans le monde, aucun n'approche la taille et la complexité de celui que l'on construit à Saint-Paul-lez-Durance.

Au défi de la complexité s'en ajoute un autre, non moins redoutable : celui de la fabrication des différentes pièces de la machine, coordonnée par ITER Organization mais répartie entre les sept partenaires du programme – la Chine, les 28 états membres de l'Union européenne et la Suisse, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les Etats-Unis.

Si le programme ITER se résumait à construire et à faire fonctionner un tokamak géant, capable de générer plus d'énergie qu'il n'en consomme, tout serait beaucoup plus simple. Mais ITER est bien autre chose : ses promoteurs, dès l'origine, ont voulu que le programme soit une « école » pour les partenaires du programme.

Participer à ITER, c'est donc apprendre à maîtriser tous les paramètres, scientifiques, technologiques, organisationnels et industriels permettant d'aborder la construction, à l'horizon 2030, d'un prototype de réacteur de fusion industriel (voir « ITER, et après ? », *Le magazine n°3*).

Dans cette perspective, il faut que chacun puisse toucher à tout. Ainsi, l'Europe et la Corée se partagent la fabrication des neuf « tranches » de la chambre à vide ; le solénoïde central est l'œuvre des Etats-Unis et du Japon ; le divertor est le fruit d'une collaboration entre l'Europe, la Russie et Japon ; l'Inde partage la responsabilité du système de refroidissement avec les Etats-Unis ; la fabrication des modules de couverture est répartie entre la Chine, l'Europe, la Corée, la Russie et les Etats-Unis et six des sept partenaires sont impliqués dans la production des aimants de la machine.

Finalisée au début de l'année 2006, la répartition des tâches s'est faite en tenant compte à la fois des souhaits et des compétences techniques et industrielles de chacun.

Pour la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les Etats-Unis, ces fabrications représentent 9,1% de la valeur totale de la construction de l'installation. Pour l'Europe qui, outre sa part dans la fabrication des éléments de la machine fournit la quasi-totalité des bâtiments du site, la contribution s'élève à un peu plus de 45% – un investissement compensé par les retombées économiques du programme (4 milliards d'euros de contrats ont été passés depuis 2007) sur le territoire européen.

Pour gérer ces contributions en nature, un système très particulier a été mis en place : ITER Organization, concepteur et chef d'orchestre de l'ensemble du programme, passe des « accords de fourniture » (*Procurement Arrangements*) avec les agences domestiques mises en place par chacun des sept partenaires, lesquelles lancent alors des appels d'offres auprès des industriels de leur pays. A ce jour, une centaine d'accords de fourniture ont été conclus, représentant près de 90% de la valeur totale de la machine et des bâtiments du programme (voir encadré). Ils ont débouché sur plus de 1 800 contrats de design ou de fabrication.

En Europe, en Asie, sur le continent américain, les usines tournent désormais à plein pour fabriquer les éléments et les systèmes du plus grand Meccano du monde – un million de « composants », plus de dix millions de pièces...

La gestion de ce système est lourde et complexe, parfois frustrante, mais sans lui, ITER n'existerait tout simplement pas.

Pour créer ITER, pour rassembler les partenaires autour d'un projet commun, il fallait dépasser la relation client-fournisseur qui est de règle dans l'industrie. Il fallait inventer une forme de partenariat, à la fois libre et contraignant, ménageant les intérêts de chacun et ceux de l'ensemble du programme.

C'est là la difficulté, mais aussi la beauté d'ITER, fondé sur un mode de collaboration et de partage qui n'avait jamais été expérimenté à ce jour.

Combien ça coûte ?

Les coûts de fabrication d'un même objet, qu'il s'agisse d'un T-shirt ou d'un module de couverture destiné à la chambre à vide d'ITER, varient fortement d'un pays à l'autre.

De même, sur le long terme qui est l'échelle de temps d'ITER, l'évolution des monnaies nationales, du coût du travail et des matières premières, peut connaître d'importantes fluctuations.

Pour s'affranchir de ces contraintes et garantir la stabilité, en valeur, de la contribution de chacun des membres, une « monnaie » spécifique, à usage interne, a été mise en place : l'ITER Unit of Account (IUA). C'est en IUA, ou plutôt en milliers d'IUA (kIUA), que sont libellés des accords de fourniture passés entre ITER Organization et les agences domestiques des partenaires du programme.

L'Europe, qui contribue à hauteur de 45,5% au programme ITER (bâtiments et pièces de la machine), a fixé un plafond de 6,6 milliards d'euros à son engagement (lequel inclut une collaboration bilatérale avec le Japon appelée « Approche élargie »). En extrapolant, on peut estimer que le coût total de l'installation ITER devrait être de l'ordre de 13 milliards d'euros.

Mais ce chiffre ne reflète probablement pas la réalité, car il impliquerait que les coûts de fabrication, dans chacun des pays membres, sont les mêmes qu'en Europe. Or, c'est loin d'être le cas.

Quand bien même la « facture » totale d'ITER s'élèverait à 13 milliards d'euros, il faut rappeler que cette somme, étalée sur dix ans, est partagée entre 35 pays qui représentent 80% de la production de richesse de la planète. A titre de comparaison, le Qatar investit 200 milliards d'euros dans les infrastructures de la Coupe du monde de football 2022.



Pour ITER, la qualité du béton et de sa mise en œuvre est essentielle. Elle conditionne l'intégrité et la sûreté de l'installation tout entière.

A chaque fonction son béton

Des cailloux, du sable, un liant, de l'eau, parfois un additif... a priori, rien de plus simple qu'un béton.

Mais nous sommes à ITER où tout obéit à des normes strictes, où tout est soumis à de multiples procédures de tests et de vérification.

Dans la fosse du tokamak, deux dalles d'un mètre et demi d'épaisseur ont déjà été coulées. Pour la première, qui porte les 493 colonnes du système parasismique, on a utilisé un béton standard dont la résistance à la compression est de l'ordre de 3 000 tonnes par mètre carré.

Pour la seconde, qui constitue le « plancher » sur lequel reposeront la machine et ses bâtiments annexes, on a besoin d'une résistance à la compression sensiblement supérieure (4 000 tonnes par mètre carré).

Le béton du plancher est un « béton nucléaire » qui doit agir comme ultime barrière de confinement après les parois de la chambre à vide et l'enceinte de protection biologique (3,5 mètres d'épaisseur) qui entoure la machine.

La couronne sur laquelle reposeront les 23 000 tonnes du tokamak devrait faire appel à un béton encore plus particulier, offrant une résistance à la compression deux à trois fois supérieure à celle du béton de la dalle, et dont la formulation est en cours qualification.

Des éléments de protection biologique, dans l'immédiate proximité du tokamak, seront réalisés dans un « béton lourd » au sein duquel les agrégats habituels peuvent être remplacés par du minerai de fer – la masse, au mètre-cube, passe alors de 2,4 à 3,6 tonnes.

Qu'ils soient ordinaires ou exceptionnels, les bétons utilisés dans la construction d'ITER font l'objet de contrôles à chacune des étapes de leur élaboration et de leur mise en œuvre.

Une fois la formulation établie par le fabricant (elle relève souvent du secret industriel), l'entreprise chargée des opérations de coulage met en place un programme d'essais en laboratoire, que confirmeront les essais sur maquettes, à échelle réelle.

Ces différents bétons, quelle que soit leur formulation, doivent être coulés et se répartir de manière homogène

dans le réseau serré du ferrailage. Aussi, leur consistance, leur « étalement », sont-ils systématiquement testés au sortir de la centrale, avant chargement dans les « toupies » (les camions équipés d'une cuve rotative qui transportent le béton de la centrale au chantier).

A chaque coulée, des échantillons sont prélevés de manière à étudier l'évolution du béton, à court et moyen terme (de 2 à 90 jours). « *Nous multiplions les tests et les vérifications*, expliquent Damien Sorbier et Romain Paix, deux des ingénieurs travaux du consortium Engage, maître d'œuvre du chantier et sous-traitant de Fusion for Energy, l'agence européenne pour ITER. *Mais tout est mis en œuvre, en amont, pour qu'il n'y ait pas de surprise...* »

La température est également très surveillée. Le béton ne doit pas sortir de la centrale à moins de 10° C et ne peut être coulé à plus de 30. En fonction des conditions climatiques, qui sont parfois extrêmes sur le site d'ITER, il faut tantôt le réchauffer, tantôt le rafraîchir.

Pour ITER, la qualité du béton et de sa mise en œuvre est essentielle. Elle conditionne l'intégrité et la sûreté de l'installation tout entière.



Barroso : « Fier d'avoir misé sur ITER »

La visite du président de la Commission européenne, le 11 juillet, intervenait à un moment crucial dans l'avancement du chantier.

Sur la photo officielle de la signature de l'Accord ITER, au palais de l'Élysée le 21 novembre 2006, il occupait la place d'honneur, à la droite du président Chirac.

C'est en évoquant ce moment que José Manuel Barroso, qui achève au mois d'octobre son deuxième mandat à la tête de la Commission européenne, a entamé sa visite du site d'ITER le 11 juillet dernier.

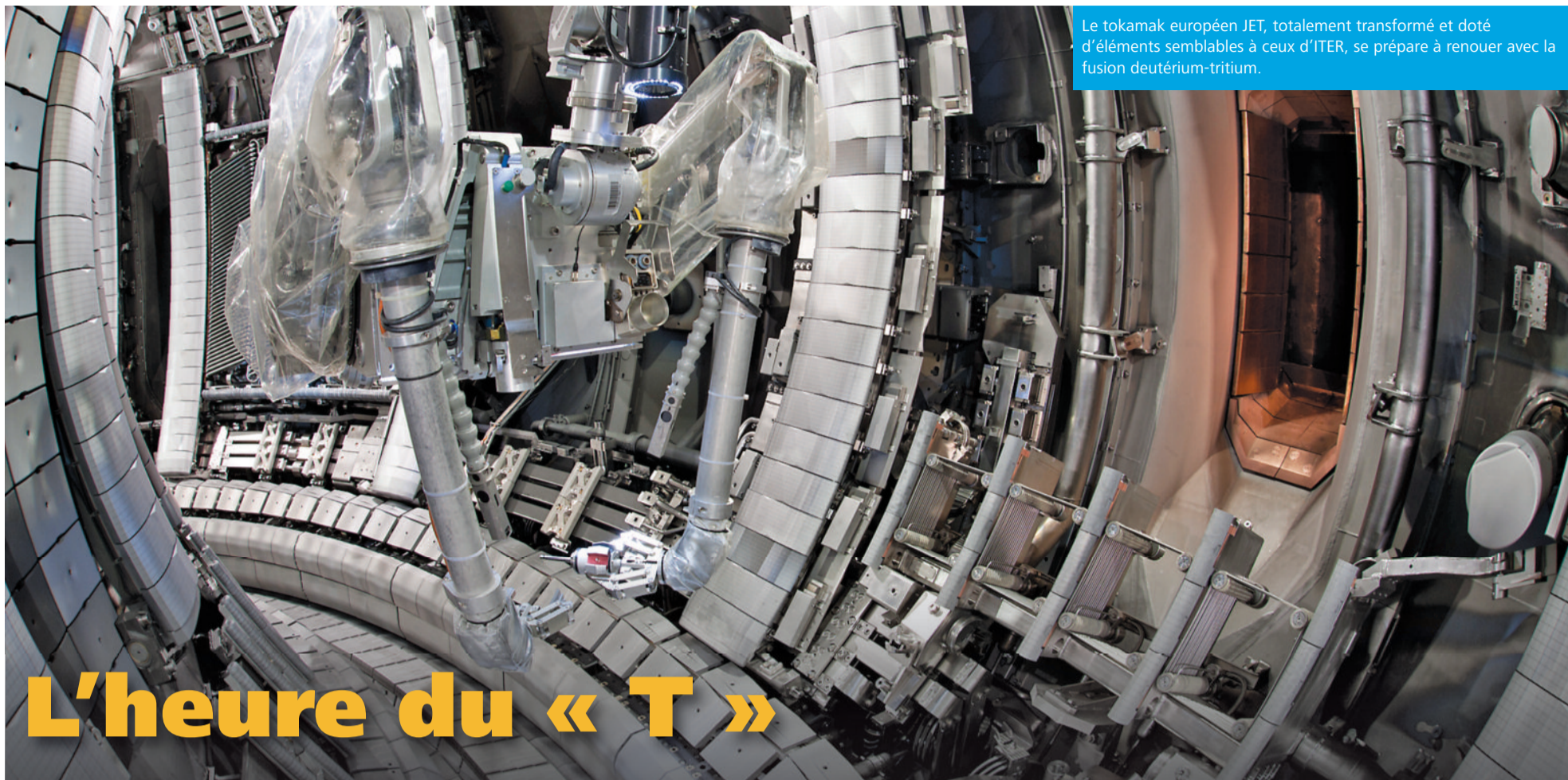
« *Aux côtés du président Chirac, se souvient-il, j'ai beaucoup travaillé pour qu'ITER soit construit ici. Huit ans plus tard, la Commission européenne est fière d'avoir misé sur ITER.* »

La visite du président de la Commission s'inscrivait dans une tournée européenne des grands projets « *stratégiques pour la lutte contre le changement climatique et la transition énergétique.* »

Elle intervenait à un moment crucial dans l'avancement du chantier, au lendemain des premières opérations de coulage du béton dans la partie centrale du Complexe Tokamak.

Accompagné de Geneviève Fioraso, secrétaire d'État à l'Enseignement supérieur et à la Recherche, le président de la Commission a réaffirmé le soutien de l'Europe à ITER – « *parce que le futur de l'Europe est dans la science et dans l'innovation* » et parce que la réalisation du programme « *offre une opportunité unique à nos industries.* »

Sur un ton plus léger, il a noté un parallèle entre sa fonction et celle du directeur général d'ITER Organization, Osamu Motojima. « *Je dois coordonner l'action de 28 pays, vous, de 35. Je sais que ce n'est pas facile tous les jours...* »



Le tokamak européen JET, totalement transformé et doté d'éléments semblables à ceux d'ITER, se prépare à renouer avec la fusion deutérium-tritium.

L'heure du « T »

Tous les jours, dans l'un ou l'autre des tokamaks en activité dans le monde, on crée des plasmas que l'on chauffe à des températures de plusieurs dizaines, voire centaines de millions de degrés.

Ces expériences, réalisées avec des plasmas d'hydrogène, de deutérium ou d'hélium permettent de mieux comprendre le comportement à très haute température du « quatrième état de la matière » et se révèlent précieuses pour affiner encore le design d'ITER.

Mais elles ne produisent pas, ou très peu, d'énergie de fusion.

Pour qu'un tokamak produise une quantité significative d'énergie, il faut utiliser ce qui est pour l'heure, en l'état présent de notre technologie, le combustible le plus efficace : un mélange à parts égales de deutérium (D) et de tritium (T).

Or, le tritium, deuxième isotope « lourd » de l'hydrogène, génère de nombreuses contraintes : sa radioactivité, quoique faible, fait de toute installation le mettant en œuvre une installation nucléaire, soumise à des règles de sûreté et de sécurité très contraignantes.

L'utilisation du tritium, en outre, contribue à « activer » certains des éléments de la machine, interdisant de ce fait toute intervention de maintenance autre que robotisée.

Dans l'attente d'ITER, il n'existe aujourd'hui qu'un seul tokamak capable de réaliser des expériences de fusion deutérium-tritium (DT) – c'est le JET (*Joint European Torus*), la machine européenne opérationnelle depuis 1983 près d'Oxford, au Royaume-Uni.

Le JET est à la fois le plus grand tokamak du monde, celui réalisa la première expérience de fusion DT en 1991 et celui qui détient le record de production d'énergie avec les 16 MW de la campagne de 1997. Le tokamak

américain TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*), qui avait lui aussi produit une quantité significative d'énergie (10,7 MW) en 1994, a été démantelé trois ans plus tard.

Si l'on excepte la campagne du JET de 2003, au cours de laquelle un très faible pourcentage de tritium fut ajouté aux plasmas de deutérium, il s'est écoulé 17 ans depuis que les dernières expériences de fusion DT ont été réalisées – 17 ans depuis qu'une petite étoile artificielle s'est brièvement allumée sur la planète Terre.

Ce prodige va bientôt se reproduire : le JET, totalement transformé, doté d'éléments semblables à ceux d'ITER (parois internes de béryllium et de tungstène notamment), se prépare à renouer avec la fusion « pour de vrai ».

La campagne d'expériences, programmée pour 2017-2018, doit préparer l'événement historique que constituera, à l'horizon 2027, le lancement des opérations DT du tokamak ITER. (Pendant les six années qui suivront sa mise en service, ITER réalisera des plasmas d'hydrogène, d'hélium et de deutérium.)

Au JET, on s'apprête pour cette grande aventure. Mais on n'allume pas une étoile en pressant un bouton et trois ans ne seront pas de trop pour affiner tous les réglages de la machine, former une nouvelle génération d'opérateurs et réactiver tout le savoir et toute l'expérience accumulés lors des campagnes des années 1990.

Dans trois ans, l'heure du « T » va sonner à nouveau pour le JET – une répétition générale pour la grande première d'ITER.

Les combinaisons gagnantes

La réaction de fusion, qui libère, à masse égale, quatre à cinq millions de fois plus d'énergie que la plus puissante des réactions chimiques, peut être obtenue à partir de plusieurs combinaisons de noyaux atomiques légers.

Dans l'état actuel de notre technologie, c'est la réaction entre les deux isotopes « lourds » de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T) qui est la plus accessible.

Cette réaction, qui sera mise en œuvre dans ITER et dans les centrales de fusion de première génération, présente cependant des inconvénients : le tritium est un élément radioactif et l'impact des neutrons très énergétiques issus de la fusion DT contribuera à activer les parois internes de la machine.

D'autres réactions, pour l'heure inaccessibles à notre technologie (notamment parce qu'elles requièrent des températures très supérieures à celles que l'on peut atteindre aujourd'hui) n'impliquent pas d'élément radioactif et ne produisent pas (ou très peu) de neutrons.

C'est le cas des combinaisons impliquant un isotope de l'hélium, (^3He) qui peut fusionner avec lui-même et avec le deutérium. Un seul souci : le gisement de ^3He le plus proche se trouve dans les roches lunaires...

Il existe cependant une réaction « idéale », que les réacteurs de fusion des siècles futurs pourraient utiliser : celle du proton (un ion hydrogène H^+) avec un isotope du bore (^{11}B).

Parfaitement « aneutronique », cette réaction est en quelque sorte le Saint-Graal de la fusion. Elle requiert toutefois des températures de l'ordre de 6,5 milliards de degrés et un principe de confinement qui reste à inventer.

Photo de Une: À l'Institut de physique des plasmas de l'Académie des sciences chinoise (ASIPP), la fabrication des 18 « bobines de correction » est lancée.

ITER Organization Headquarters
Route de Vinon-sur-Verdon
CS 90 046
13067 St. Paul-lez-Durance Cedex
France

Directeur de la publication
Michel Claessens
michel.claessens@iter.org
Responsable de la rédaction
Robert Arnoux
robert.arnoux@iter.org