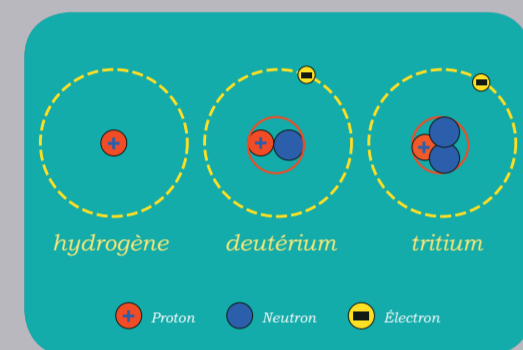


### Z, un nombre déterminant

Pour éviter un trop fort rayonnement qui dissipe de l'énergie dans le centre du plasma, il est souhaitable que les matériaux de protection soumis aux plus forts flux aient un faible numéro atomique.

Au cœur d'ITER, il est prévu d'utiliser trois types de matériaux pour leurs avantages respectifs. Le béryllium a un faible numéro atomique ( $Z = 4$ ) mais une température de fusion faible et présente un taux d'érosion élevé. Il se trouvera sur les parois les plus éloignées du plasma (plusieurs centaines de  $m^2$ ) à l'intérieur de l'enceinte à vide. Le tungstène a une température de fusion élevée et s'érode peu, mais son numéro atomique est élevé ( $Z = 74$ ) ce qui entraîne un fort rayonnement dans le plasma central ; il sera utilisé sur les surfaces soumises à des flux d'intensité moyenne autour de la zone du divertor (une centaine de  $m^2$ ). Le carbone est un très bon conducteur et possède de très bonnes propriétés thermomécaniques et un faible numéro atomique ( $Z = 6$ ), mais son taux d'érosion est élevé. Il sera utilisé dans les zones du divertor qui reçoivent les flux d'énergie les plus forts (environ  $50 m^2$ ) pendant la première phase d'exploitation d'ITER, avant d'être remplacé par du tungstène lorsque la machine entrera dans sa phase nucléaire.

### Le numéro atomique



Les noyaux des atomes sont représentés par le nombre atomique  $Z$ , c'est-à-dire le nombre de protons qu'ils contiennent et par leur nombre de masse  $A$  qui correspond au nombre total de ses nucléons (protons ou neutrons).

Des éléments contenant le même nombre de protons mais possédant des nombres de masse différents sont dits « isotopes ». Par exemple, le deutérium et le tritium (combustibles de la fusion) sont des isotopes de l'hydrogène, comptant respectivement un et deux neutrons pour un proton.

### Béryllium, tungstène et carbone : à chacun ses atouts

Le béryllium est fragile mais il est plus léger et six fois plus résistant que l'aluminium. Sa ductilité est approximativement 1/3 plus grande que celle de l'acier. Il possède une excellente conductivité thermique non magnétique. Dans la nature, on le trouve principalement sous forme d'oxydes ou d'aluminosilicates complexes dont les représentants précieux les plus connus sont l'émeraude et l'aigue-marine. On l'exploite à partir d'une trentaine de minerais. Les principales mines mondiales sont aux États-Unis, en Chine et au Mozambique.

Le tungstène est très utilisé dans différents secteurs comme la métallurgie, l'industrie minière et pétrolière. On se sert du tungstène pour la fabrication des filaments des ampoules électriques, des postes de télévision et des électrodes. Son point de fusion très élevé le rend intéressant pour des applications spatiales.

Le carbone, dont le nom vient du latin carbo, carbonis signifiant « charbon », est présent sur terre depuis la formation de celle-ci : il a été produit par nucléosynthèse au cœur des étoiles qui ont explosé avant la formation du système solaire. Cet élément chimique non-métallique (symbole C), existe à l'état solide sous trois formes (graphite, diamant et fullerènes). Très apprécié pour ses qualités de résistance thermomécanique, il entre dans la fabrication de nanotubes, d'appareils vidéo, automobiles, bateaux de course...

# Les composants face au plasma

LES COMPOSANTS QUI REVÊTENT L'INTÉRIEUR DES INSTALLATIONS DE RECHERCHE EN FUSION SONT SOUMIS À DES CONDITIONS DE FONCTIONNEMENT EXTRÊMES. LE CHANGEMENT D'UNE GRANDE PARTIE DES COMPOSANTS INTÉRIEURS DE L'INSTALLATION DE RECHERCHE EUROPÉENNE JET EN ANGLETERRE PERMETTRA AUX SCIENTIFIQUES D'ALLER ENCORE PLUS LOIN DANS LA MAÎTRISE DES PHÉNOMÈNES MIS EN JEU LORS DES INTERACTIONS ENTRE LE PLASMA ET LES PAROIS DES INSTALLATIONS DE RECHERCHE DE FUSION.



Vue détaillée de l'intérieur de l'installation JET en Angleterre.

Au cours de la décennie des années 90, des étapes majeures ont été franchies par les scientifiques dans le domaine de la fusion thermonucléaire : en 1997, l'installation de recherche JET produit 16 000 kW de puissance fusion pendant une seconde et en 2003 l'installation Tore Supra à Cadarache contrôle des décharges plasma sur plus de 6 minutes. Ces résultats ont contribué à dimensionner les objectifs de la prochaine génération de tokamaks qu'incarne ITER qui devra réaliser simultanément ces deux performances, alliant puissance de fusion (plusieurs centaines de MW) et durée de la décharge. Les composants face au plasma sont exposés à des flux de chaleur

qui pourront atteindre dans ITER jusqu'à 15 à 20 MW/m<sup>2</sup>, soit des niveaux équivalents à ceux que subit le nez de la navette spatiale lors de sa rentrée dans l'atmosphère. Dans les installations de recherche de fusion, les matériaux s'érodent sous l'effet du bombardement des particules très énergétiques du plasma, ce qui génère des impuretés. « Ces impuretés peuvent s'accumuler au centre du plasma et réduire ses performances en diluant le mélange combustible ou en le refroidissant » confirme Pascale Monier-Garbet, physicienne à l'institut de recherche en fusion magnétique (CEA/IRFM). Une fois redéposées sur les parois, ces impuretés peuvent être à l'origine de la formation de couches

mal adhérentes au substrat qui ne demandent qu'à se transformer en poussières. De plus, lorsque la décharge plasma est entretenue sur un temps long, les composants face au plasma s'échauffent : il faut alors avoir recours à des systèmes de refroidissement.

### Contrôle de l'interaction plasma-paroi

Au fur et à mesure de l'obtention de plasmas de plus en plus performants, les équipes de recherche ont mieux compris comment contrôler ces impuretés. Ce contrôle est assuré par un « divertor », une sorte de cendrier placé sur la partie basse de l'enceinte à l'intérieur de



Robot à l'intérieur du JET

Un travail d'orfèvre

Installation de composants au sein du JET

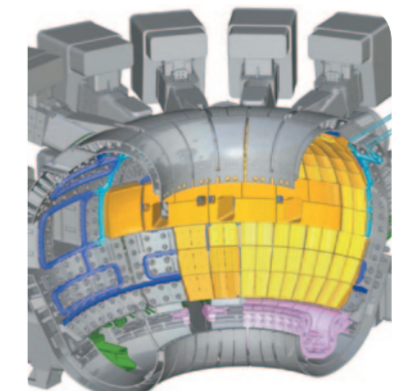
laquelle se produisent les réactions de fusion. Mis en œuvre au sein de la plupart des installations de fusion, ce dispositif permet d'éloigner la zone d'interaction plasma-paroi du cœur du plasma, pour le préserver des impuretés érodées. Constitué de plusieurs milliers d'éléments, il supporte les flux de chaleur les plus élevés (température de surface pouvant monter jusqu'à 2 000 °C). Dans le cas des installations équipées d'un système de refroidissement actif, de l'eau sous pression circule au sein des composants pour évacuer en continu la chaleur apportée par le plasma.

### Combinaison de matériaux

De fait, les composants sont soumis à de très fortes contraintes thermomécaniques qui éprouvent leur résistance. D'où la recherche de la meilleure combinaison possible de matériaux. Ce choix résulte sans aucun doute des programmes expérimentaux développés depuis plus de vingt ans avec des installations de recherche en Europe qui ont permis d'avoir une bonne connaissance des atouts et des faiblesses de chaque matériau (cf encadré « Z, un nombre déterminant »). Durant la décennie 1990-2000, les installations de recherche en fusion ont fait le choix d'un matériau léger comme le carbone.

« C'est un matériau très apprécié pour sa résistance thermomécanique dans les installations actuelles, mais il pose le problème de la rétention du tritium pour les futures machines de fusion » indique Emmanuelle Tsitrone, physicienne à l'IRFM. Mais d'autres matériaux permettent d'éviter cette difficulté, ce qu'a prouvé la machine allemande ASDEX-Upgrade dont les composants en carbone ont été progressivement recouverts par des dépôts en tungstène entre 2002 et 2007. Le résultat des études réalisées a montré que le tungstène est un matériau inerte chimiquement, très réfractaire et qui s'érode moins que le carbone tant que l'on maintient les paramètres du plasma dans une gamme de température favorable. En revanche, il présente l'inconvénient de réduire les performances de la décharge s'il entre dans la composition du plasma, même en très faible proportion. Afin de préparer les programmes expérimentaux sur ITER, qui mettra en œuvre une combinaison de matériaux testés jusqu'alors séparément dans différents tokamaks, l'idée d'un programme baptisé « ITER-Like Wall » a été proposée en 2004 pour être conduit avec le JET. Approuvé en 2005, ce programme a nécessité d'importants efforts pendant plus de cinq ans. Il permettra de tester les performances du plasma dans de nouvelles conditions expérimentales.

Une longue campagne de travaux a été entreprise pour changer des milliers de composants internes sur le JET, à l'arrêt depuis octobre 2009. Ainsi, 4 500 tuiles en carbone qui composent le mur de la première paroi ont été remplacées par des éléments en béryllium et des composants en tungstène ont été installés au niveau du divertor. « C'est un vrai travail d'orfèvre qui est réalisé depuis plus d'un an » indique Pascale. Equipée de ses nouveaux composants, l'installation JET sera en mesure de fonctionner d'ici l'été 2011 dans des conditions expérimentales qui se rapprochent autant que possible de celles d'ITER. Des résultats qui permettront de donner des bases solides aux premières expériences qui seront réalisées avec ITER à partir de 2019. ●



En jaune, composants internes face au plasma et en rose, le divertor (vue d'artiste ITER).

### La cure de jouvence du JET

Démarrée en octobre 2009, la cure de jouvence du JET est une prouesse technique en soi. Avec l'aide d'un robot, près de 40 % des tuiles de carbone qui habillaient l'intérieur de la chambre à vide étaient remplacées fin décembre 2010. Deux équipes (l'une conduite par Andy Parsloe, l'autre par Ian Merrigan) se partagent l'intérieur de la chambre à vide pour souder les nouveaux composants avec un niveau de finition très élevé. Sans oublier l'installation du nouveau réseau d'antennes de chauffage qui ont été conçues avec le support d'équipes américaines et brésiliennes. A cela s'ajoute aussi l'implantation de nouvelles caméras infrarouges qui permettront de vérifier avec une grande précision les températures des composants situés face au plasma, un vrai challenge dans le cas de parois métalliques. L'utilisation de ces systèmes pour contrôler en temps réel les températures des composants a bénéficié des recherches menées à l'IRFM.

Pour suivre l'avancement des travaux du JET pas à pas : [www.jet.fda.org/jet/news](http://www.jet.fda.org/jet/news)



# Agenda

26 mars

### Vox AMICORUM À MANOSQUE



La chorale « Vox Amicorum » donnera un concert le 26 mars 2011 à l'église Saint-Sauveur de Manosque. Basée à Anvers, elle rassemble des artistes et des musiciens venant de différents pays européens (Allemagne, Belgique, France, Italie et Royaume-Uni). Ses concerts sont organisés dans des lieux renommés en Europe comme la Basilica dei Frari, l'église San Polo à Venise, l'église de La Madeleine à Paris, la Basilique de Vézelay, la cathédrale d'Oxford ou encore la Cathédrale Saint-Michel et Saint-Gudule à Bruxelles. Son répertoire est composé d'œuvres, du baroque au contemporain. La représentation de Manosque est placée sous le signe de l'accueil interculturel où la musique constituera un lien fort entre les habitants de la région et les personnels d'ITER Organisation, avec le concours de l'Agence Iter France.

31 MARS - 1<sup>ER</sup> AVRIL

### Des ateliers pour avoir le goût des sciences

Les 31 mars et 1<sup>er</sup> avril prochains, l'Agence Iter France accueillera l'un des groupes de collégiens attendus dans le cadre des rencontres CEA/jeunes. Cette opération mobilise plus de soixante-dix chercheurs et techniciens du CEA et des entités partenaires pour organiser des ateliers pédagogiques et interactifs pour les deux-cents élèves venant des établissements des Bouches-du-Rhône, du Var, du Vaucluse et des Alpes-de-Haute-Provence et, cette année, deux collèges Corses. Pour les organisateurs, c'est aussi un moyen de pallier la désaffection des jeunes pour les carrières scientifiques. Selon le classement Pisa (Programme for International Student Assessment) réalisé à la demande de l'Organisation de la coopération et du développement économiques (OCDE), publié le 7 décembre 2010, « la France pointe seulement au 27<sup>ème</sup> rang sur 65 pour la culture scientifique et au 22<sup>ème</sup> rang pour la culture mathématique ». Ces rencontres constituent une réelle occasion de donner « le goût des sciences » aux élèves.

# Iter