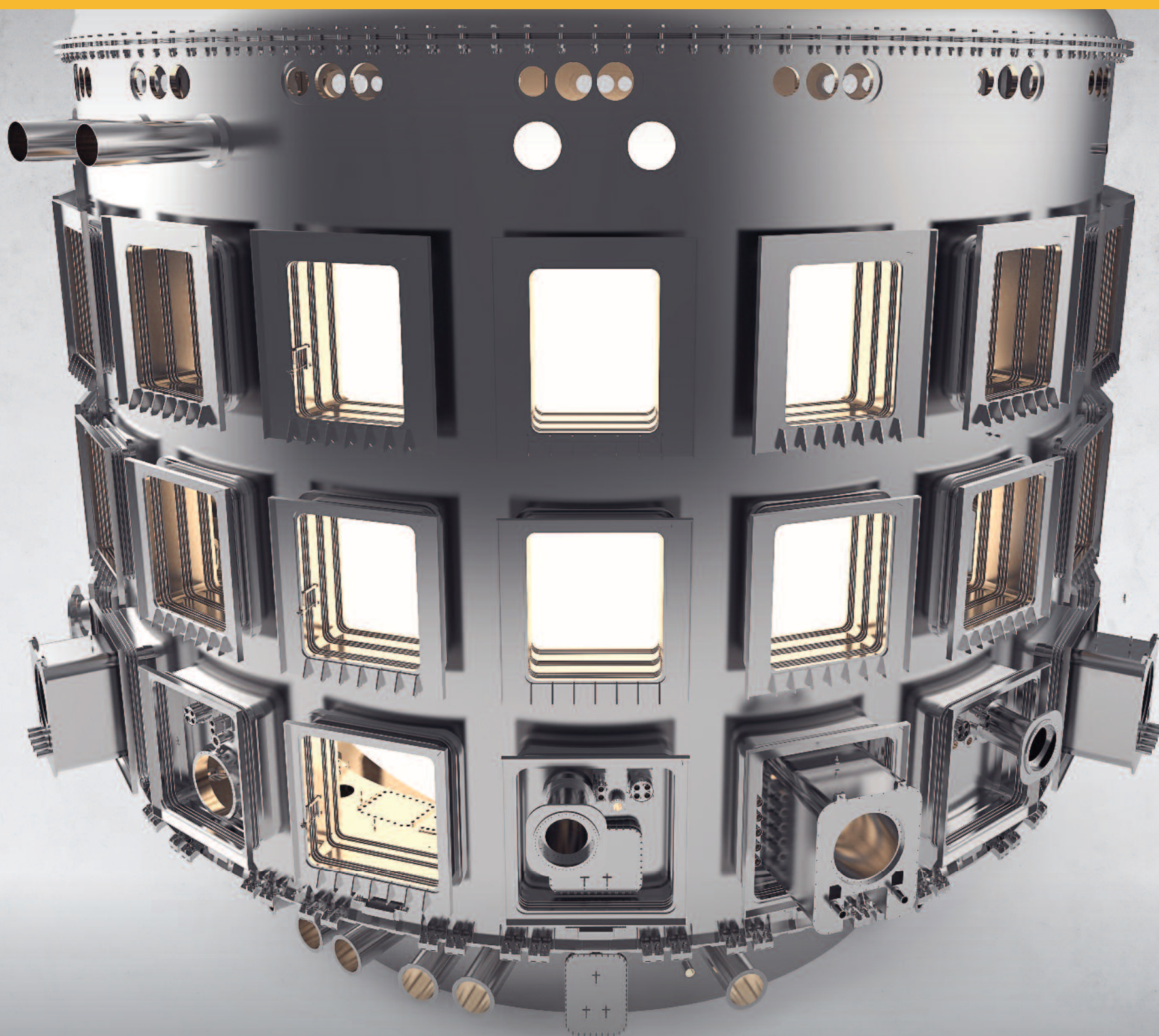


Dans ce numéro

- Dans les forges d'ITER Page 2
- Maintenir au frais Page 3
- Fusion et fiction Page 4

# iter le magazine

N°6 FEVRIER 2015



## Maintenir au frais

### Editorial

Ce mois-ci *ITER le magazine* nous fait pénétrer dans les forges du Creusot, en Saône-et-Loire, où s'élaborent les aciers spéciaux dont ITER sera grand consommateur – 3 850 tonnes pour le seul cryostat, ce « thermos » géant qui enveloppe la machine et maintient son système magnétique à une température proche du zéro absolu.

Ce sixième numéro nous invite également au cinéma : depuis trente ans, par petites touches, la fusion s'inscrit en toile de fond de nombreux films d'anticipation, alimentant les centrales électriques, les moteurs des vaisseaux spatiaux et...les machines à voyager dans le Temps.

L'équipe d'*ITER le magazine*.  
[editormag@iter.org](mailto:editormag@iter.org)



china eu india japan korea russia usa



# Dans les forges d'ITER



Depuis 2004 Industeel-Le Creusot a livré au programme ITER près de 10 000 tonnes de plaques d'aciers dans des dizaines de « nuances » différentes.

**Les hommes de ce qui ne s'appelait pas encore « l'âge de fer » ont découvert par hasard qu'en mêlant un peu de charbon de bois au minerai de fer en fusion on obtenait un métal d'une dureté incomparable : l'acier.**

Trois mille ans ont passé et l'acier joue un rôle toujours plus central dans notre civilisation. La production mondiale, qui n'atteignait pas 30 millions de tonnes en 1900, a dépassé le milliard et demi de tonnes en 2013.

L'acier d'aujourd'hui n'est plus, loin s'en faut, celui des fourneaux de l'âge du fer. Si la recette de base demeure (du fer et une pincée de carbone), la palette des fabrications compte désormais des centaines de « nuances » différentes – les aciéristes, sur ce point, utilisent le même vocabulaire que les parfumeurs.

Chacune de ces nuances, finement ajustée, répond à des exigences précises : l'acier d'une carrosserie automobile n'est pas celui d'une charpente métallique ; celui d'un rail de TGV a peu de points communs avec celui d'une citerne alimentaire.

Certaines activités, certains équipements, requièrent des aciers plus sophistiqués encore.

A une centaine de kilomètres au sud-ouest de Dijon, la société Industeel-Le Creusot, (héritière des forges Schneider fondées en 1836 et désormais intégrée au géant indien Arcelor-Mittal), s'est spécialisée dans ces productions particulières – ces « nuances » subtiles dont la machine ITER sera grande consommatrice.

Depuis les premiers prototypes de chambre à vide, réalisés en 2004, jusqu'aux récentes commandes passées par les industries coréenne, russe, indienne et européenne, Industeel-Le Creusot a livré près de 10 000 tonnes de plaques d'aciers, dans des dizaines d'épaisseurs et de « nuances » différentes, au programme ITER.

Ces aciers très spéciaux – « *Le très haut de gamme de notre production* », explique-t-on au Creusot – doivent répondre aux exigences fonctionnelles et technologiques des différents éléments du tokamak ITER. Certains de ces éléments seront exposés au plasma ultra-chaud et au vide extrême ; d'autres devront résister à des températures proches du zéro absolu. Dans certains cas, ces aciers devront être totalement transparents aux champs magnétiques ; dans d'autres, ils contribueront à leur donner forme et orientation.

L'élaboration de ces aciers est avant tout affaire de chimie : une bonne dose de chrome empêchera

l'oxydation ; quelques pourcents d'azote amélioreront les propriétés mécaniques ; un zest de titane, de niobium ou de molybdène confèrera à telle nuance une meilleure résistance à la corrosion ; un soupçon de bore permettra à une autre de mieux absorber les neutrons – qualité essentielle pour certaines des pièces d'ITER.

Mais si la chimie est à la base de tout, les procédés de fabrication jouent également un rôle essentiel. « *L'industriel coréen, par exemple, qui fournit le bouclier thermique de la machine, doit ajouter une fine couche d'argent aux plaques d'acier que nous lui livrons*, explique Jean-Christophe Gagnepain, le directeur des ventes d'Industeel-Le Creusot. *La qualité de cette couche dépend de la parfaite régularité de la surface des plaques qui sortent de nos installations.* »

L'aciérie a déjà livré 5 000 tonnes de ces « aciers de spécialité » à l'Inde, dont une moitié pour la fabrication du cryostat (voir article en page 3) ; 3 500 tonnes au Japon et à la Corée et quelque 300 tonnes à la Russie.

Ce qui naît ici, dans l'un des bassins industriels les plus anciens du pays, c'est une bonne part d'ITER : d'énormes lingots d'acier qui, une fois laminés, prendront la mer pour les usines de Corée, d'Inde, de Russie ou du Japon. Là, l'acier du Creusot deviendra section de chambre à vide ou de cryostat, bouclier thermique, éléments de paroi ou du système magnétique.

## La plus « légère » des charges lourdes

**Le voyage avait commencé à la mi-novembre au sortir du port d'Ulsan, en Corée, à plus de 9 000 kilomètres du site d'ITER. Deux mois plus tard, le 17 janvier, le « colis » arrivait enfin.**

Les deux dernières étapes avaient été les plus délicates : arrivé par porte-conteneur au port de Fos, le colis avait été entreposé le temps des vacances de fin d'année, puis chargé sur une remorque, elle-même embarquée sur une péniche ; il avait alors traversé l'Étang de Berre avant de s'engager sur l'itinéraire ITER – un parcours terrestre

d'une centaine de kilomètres effectué en une nuit.

Fourni par les États-Unis, fabriqué par Hyundai en Corée, transporté par DAHER, ce colis – un transformateur électrique – est la première des « charges exceptionnellement lourdes » qui seront livrées à ITER au cours des années qui viennent. C'est également l'une des moins imposantes : 87 tonnes, alors que les charges les plus lourdes sont de l'ordre de 600 tonnes.

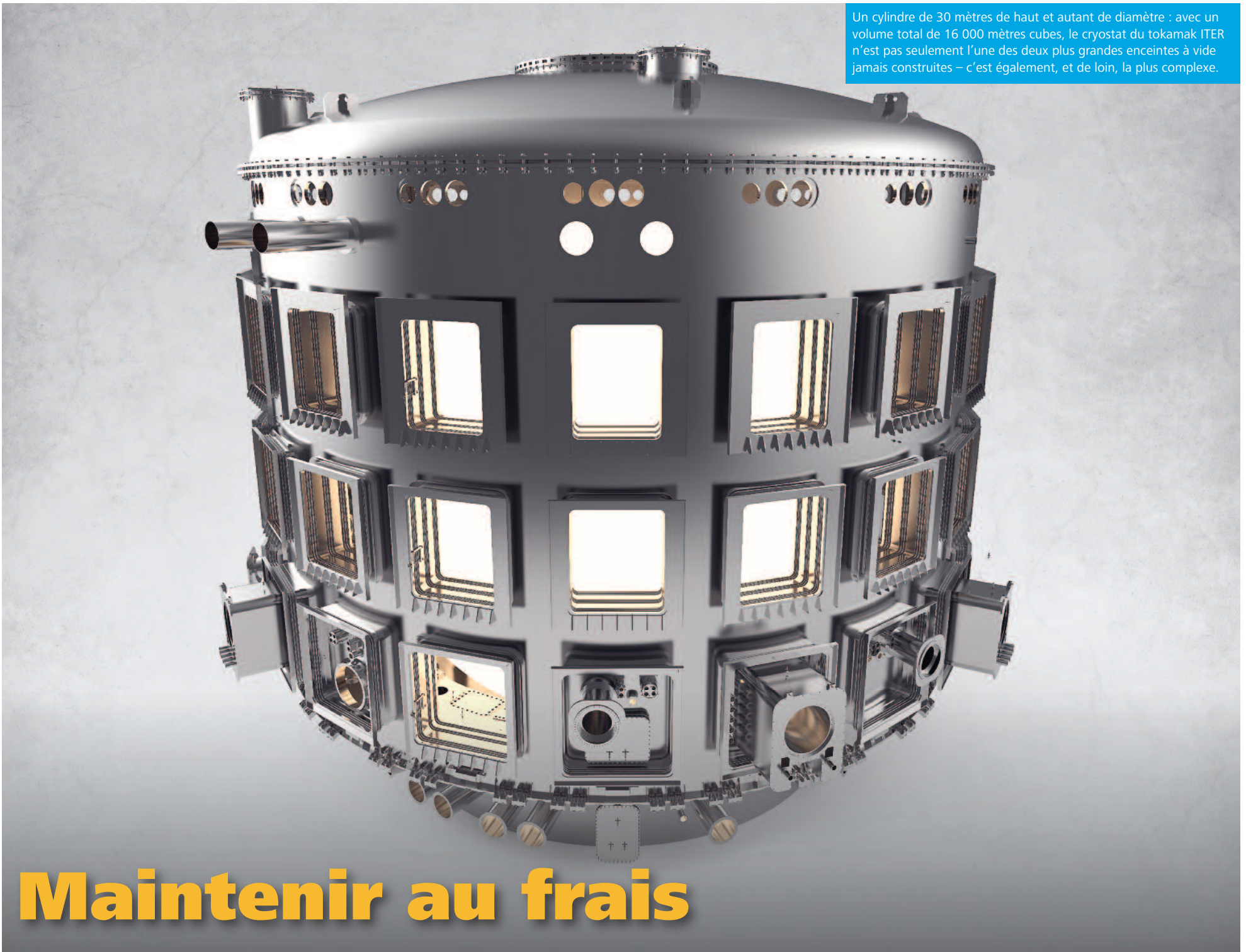
La dernière partie du voyage, depuis Fos-sur-Mer jusqu'au site d'ITER, a été organisée par DAHER, l'agence Iter France et les autorités françaises, et financée par l'agence européenne pour ITER.

Pour finaliser l'assemblage du tokamak ITER, plus de 250 « charges exceptionnellement lourdes » devront être acheminées sur le site.

Fourni par les États-Unis, fabriqué en Corée, ce transformateur électrique de 87 tonnes a été livré sur le site d'ITER le 17 janvier à l'aube.







Un cylindre de 30 mètres de haut et autant de diamètre : avec un volume total de 16 000 mètres cubes, le cryostat du tokamak ITER n'est pas seulement l'une des deux plus grandes enceintes à vide jamais construites – c'est également, et de loin, la plus complexe.

## Maintenir au frais

**Pour garder son café au chaud, rien de tel qu'un thermos. Le dispositif, inventé à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle est à la fois simple et efficace : un thermos est une bouteille dotée de deux parois entre lesquelles un vide plus ou moins poussé a été obtenu. Agissant comme un isolant thermique, le vide empêche le café de se refroidir comme il le ferait dans un contenant ordinaire.**

Et ce qui vaut pour le chaud, vaut également pour le froid : un liquide glacé, isolé de son environnement par le vide du thermos, conservera lui aussi sa température pendant plusieurs heures.

Dans le tokamak ITER, la préservation du froid est essentielle pour assurer la supraconductivité du système magnétique, qu'un flux d'hélium liquide refroidit à la température de moins 269° C (voir *Le Magazine* n°5).

Cette température extraordinairement basse – il fait plus chaud sur Pluton ! – ne doit en aucun cas s'élever : quelques degrés de plus et l'alliage des aimants perdrait ses capacités supraconductrices, ce qui conduirait à l'arrêt des opérations.

Il est donc impératif que le système magnétique soit isolé, le plus parfaitement possible, de l'environnement.

Comment ? En plaçant l'ensemble de la machine dans un énorme thermos – une enceinte à vide cylindrique de 30 mètres de haut et autant de diamètre appelée « cryostat ».

Entre l'hélium liquide qui circule dans le bobinage des aimants et l'environnement du tokamak, la différence de température est de l'ordre 300 degrés C. On réduit cet énorme gradient de température en dressant une barrière d'isolation intermédiaire, le « bouclier thermique », placé à une dizaine de centimètres des aimants et activement refroidi à moins 193° C.

Le vide (un million de fois moins dense que l'atmosphère) qui isole le bouclier thermique du cryostat interdit les échanges thermiques entre les deux environnements.

Avec un volume total de 16 000 mètres cubes, le cryostat du tokamak ITER n'est pas seulement l'une des deux plus grandes<sup>(1)</sup> enceintes à vide jamais construites – c'est également, et de loin, la plus complexe.

A la différence d'un thermos, qui n'a pas de trous, le cryostat lui, est perforé par près de 280 ouvertures, certaines larges de 4 mètres, laissant passer canalisations, alimentations électriques, systèmes de chauffage, de diagnostics, de télémanipulation... et chacune de ces « pénétrations » doit être aussi étanche que possible de manière à préserver la qualité du vide.

Mais l'étanchéité des joints et des soufflets ne suffit pas. Parce que les matériaux « dégazent »<sup>(2)</sup> et ne sont jamais parfaitement imperméables, le vide se charge peu à peu en molécules diverses et perd de sa qualité. Il faut donc régulièrement évacuer ces molécules à l'aide de pompes à vide très particulières, les « cryopompes »<sup>(3)</sup>.

Pièce essentielle de la machine, aussi complexe que monumentale, le cryostat ne se contente pas d'isoler le système magnétique supraconducteur de

l'environnement extérieur.

« Le cryostat participe de la structure même de la machine dont il est mécaniquement solidaire, explique Igor Sekachev, l'ingénieur responsable de la section cryostat au sein d'ITER Organization. Le socle d'acier sur lequel il repose a donc été conçu et dimensionné pour supporter une masse totale de près de 23 000 tonnes – les 3 850 tonnes du cryostat lui-même et les 18 900 tonnes de l'ensemble constitué par la chambre à vide, le système magnétique et le bouclier thermique. »

Confiée à la société indienne Larsen & Toubro Ltd, qui a réalisé la majeure partie de la fusée et de la sonde spatiale martienne *Mangalyaan*, la fabrication des différents éléments du cryostat a été lancée au début de l'année 2014. Les premières pièces de cet énorme cylindre, dont l'acier est fourni par Industeel-Le Creusot (voir article en page 2), seront livrées à ITER en 2016.

A partir de ces 54 « segments », les quatre sections principales du cryostat seront alors soudées et assemblées dans un bâtiment spécial, « l'Atelier du cryostat », inauguré le 21 novembre dernier sur le site d'ITER.

La procédure d'assemblage de la machine débutera avec l'installation de la base du cryostat (1 250 tonnes) dans la fosse du tokamak. La mise en place du "couvercle" (600 tonnes) en marquera l'achèvement.

(1) Seul, le Space Power Facility de la Nasa, construit pour recréer le vide spatial et y tester satellites et équipements, offre un volume de vide plus important (22 500 m<sup>3</sup>). Une des scènes les plus spectaculaires du film *The Avengers* y a été tournée en 2011.

(2) Dans certaines conditions de température, les matériaux libèrent une infime partie des molécules qui les constituent – c'est le « dégazage ».

(3) Les cryopompes sont utilisées en complément des pompes mécaniques pour créer un vide poussé de dans de très grands volumes en capturant les molécules de gaz figées par le froid intense.



Le vaisseau spatial Endurance, qui emporte les personnages du film *Interstellar* (2014) dans leur quête d'une planète colonisable, est propulsé par un ensemble de « tokamaks compacts » qui l'alimentent également en électricité.

## Fusion, fiction...

4

**En 1985, l'année même où Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev jetaient les bases politiques de ce qui serait bientôt le programme ITER, l'énergie de fusion faisait une apparition, discrète mais remarquée, dans un film appelé à devenir culte : le premier volet de la trilogie *Retour vers le futur*.**

Dans une des dernières scènes du film, la voiture de sport qui avait permis aux héros de voyager dans le passé grâce à son « convecteur temporel » dopé au plutonium est désormais équipée d'un dispositif nouveau : un générateur en forme de moulin à café sur lequel figure l'inscription « Mr Fusion ».

Cette allusion à la maîtrise de l'énergie de fusion, symbole d'un progrès majeur dans le développement technologique, se retrouve dans de nombreuses productions : la fusion (froide) est au cœur de l'intrigue du film d'espionnage *Le Saint* (1997) ; on la retrouve dans *Spider-Man 2* (2004) dans lequel un autre « Doc » (Octavius) en contrôle la prétendue puissance dévastatrice. Les super-héros entretiennent un rapport étroit avec la fusion, comme Iron Man dans le film éponyme (2008) dont l'exosquelette intègre un réacteur miniaturisé, et Batman qui, dans *The Dark Knight Rises* (2012), empêche un « méchant » de transformer un réacteur de fusion expérimental en bombe thermonucléaire.

Avec *Oblivion* (2013), dont l'action se situe en 2077, l'énergie de fusion alimente les centrales off-shore qui fournissent l'énergie aux colons terriens établis sur Titan, l'une des lunes de Saturne. Pour la première fois au

cinéma, la science-fiction traite la fusion pour ce qu'elle est : une source d'énergie dont la vocation première est de produire de l'électricité.

Vocation première, mais pas exclusive : depuis de nombreuses années, les scientifiques étudient la possibilité d'utiliser l'énergie de fusion dans le domaine de la propulsion spatiale. La Nasa, par exemple, développe un concept (« Discovery II », en hommage au vaisseau de 2001, *une odyssée de l'espace*) basé sur un petit tokamak sphérique qui produirait suffisamment d'énergie pour propulser un vaisseau vers Jupiter et l'atteindre en une centaine de jours. L'énergie produite par les réactions de fusion permettrait de chauffer et d'expulser avec une grande vélocité un propergol<sup>(1)</sup> qui, par réaction, propulserait le vaisseau spatial à la vitesse de 500 kilomètres/seconde.

Ce principe futuriste est mis en œuvre dans le vaisseau spatial *Endurance*, qui emporte les personnages du film *Interstellar* (2014) dans leur quête d'une planète colonisable : logés dans chacun des modules du vaisseau, des « tokamaks compacts » en assurent la propulsion tout en fournissant l'électricité à l'ensemble de ses systèmes.

Si la création d'un établissement humain sur Titan ou la

quête d'une planète colonisable relèvent d'un futur lointain et hypothétique, la représentation de l'énergie de fusion dans les œuvres de fiction se rapproche, au fil des productions, de sa réalité de demain.

(1) En astronautique, un propergol est une substance dont la détente fournit une force de poussée.



C'est dans cette scène de *Retour vers le futur I* que la fusion a fait ses débuts au cinéma en 1985.

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](mailto:michel.claessens@iter.org)  
Responsable de la rédaction  
Robert Arnoux  
[robert.arnoux@iter.org](mailto:robert.arnoux@iter.org)

**iter**

china eu india japan korea russia usa