

ÉNERGIE

# Iter, le réacteur qui produit

THIERRY LUCAS [1]

**Le réacteur expérimental de fusion nucléaire, actuellement en construction à Cadarache (Bouches-du-Rhône), est déjà un générateur d'innovations.**

Imaginez une partie de poker, avec une mise à 15 milliards d'euros... « pour voir ». Voir s'il est possible de faire fonctionner un réacteur de fusion nucléaire de taille quasi industrielle, avec un rendement significatif et de manière suffisamment stable pour envisager la production d'électricité. Vous aurez alors une bonne idée d'Iter. Beaucoup d'argent à mettre sur la table pour beaucoup de questions encore sans réponses, pensera-t-on ! Des scientifiques de renom, et même des Prix Nobel, ne se sont d'ailleurs pas gênés pour contester le projet, et le coût exorbitant de ce qui ne sera, quand il sortira de terre, qu'un réacteur expérimental puisqu'il ne produira pas d'électricité. Les 34 États promoteurs d'Iter préfèrent mettre en avant l'enjeu considérable du projet : disposer à terme d'une énergie dont le combustible, le deutérium [lire l'encadré p. 7], peut être produit à partir de l'eau de mer. Avec, en principe, un problème de déchets radioactifs bien moindre que dans les réacteurs nucléaires en activité, fondés sur une réaction de fission.

Le chantier a démarré en 2010 sur le site de 42 hectares de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Le siège d'Iter Organization est construit. Le bâtiment tokamak, qui accueillera le réacteur, est en en chantier. À la fin octobre, 3,1 milliards d'euros de contrats avaient été passés pour la construction et la fourniture des équipements. La livraison des premiers grands composants sur le site est prévue pour 2014. Les choses avancent, donc, même si le calendrier, qui a déjà glissé, laisse rêver. En 2020 au plus tôt sera lancé le « premier plasma » du réacteur... qui expérimentera pendant une vingtaine d'années. Avant de devenir, si tout va bien, un réacteur « de démonstration ». Baptisé Demo, il devrait produire de 2000 à 4000 MW d'électricité. D'ici là, la science et la technologie auront beaucoup progressé. Et c'est au moins l'un des seuls résultats sûrs et tangibles du projet Iter que d'être, du BTP à la simulation numérique, de la cryogénie à la production industrielle de pièces hors normes, un générateur d'innovations ! Du 2 au 4 décembre, les acteurs du projet se sont retrouvés pour faire le point sur l'avancement

**mots-clés**  
énergie, innovation,  
production, puissance

des travaux dans le cadre du Monaco Iter International Fusion Energy Days (Miifed). Tour d'horizon.

**Des matériaux qui tiennent le choc**

« Vous voulez construire un réacteur de fusion, mais les matériaux pour le faire n'existent pas ! » C'est l'un des arguments massues des détracteurs d'Iter. Les responsables du projet ne disent pas le contraire, mais ils pensent que les recherches menées depuis des années permettront de trouver les matériaux capables de résister aux flux de chaleur et au rayonnement intense de neutrons dans l'enceinte du réacteur. Ils ont surtout divisé le problème en deux parties. Le réacteur expérimental, qui ne fonctionnera que par séquences de 400 secondes [lire l'encadré p. 7]. Et les futurs réacteurs de démonstration (Demo) puis de production, dont les matériaux devront subir en continu des doses massives de chaleur et de rayonnement.

Pour le réacteur expérimental, tous les choix sont faits ou presque. Des matériaux et des alliages déjà utilisés dans le nucléaire, ou testés dans de précédentes machines de recherche sur la fusion. « Le principal problème, ce sont les composants qui sont face au plasma », précise Philippe Magaud, spécialiste de ces composants au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies renouvelables (CEA). Particulièrement le divertor, sur le plancher de l'enceinte du plasma, où le flux de chaleur, 10 MW/m<sup>2</sup>, est du même ordre qu'à



■ À La Seyne-sur-Mer, Cnim a mis au point des technologies de production innovantes pour fabriquer des plaques radiales pour les aimants supraconducteurs

[1] Article extrait de *L'Usine nouvelle*, n° 3355, 28 novembre 2013.

# de l'innovation



■ Le tokamak Tore-Supra du CEA est utilisé pour tester des composants qui font face au plasma

la surface du soleil... Pour cette partie, un revêtement en tungstène a été choisi pour Iter (au lieu du carbone initialement retenu). Mais ce n'est pas un matériau qualifié pour le nucléaire, et des tests seront menés dans le tokamak du CEA, Tore Supra.

« Pour Demo, le principal défi est celui des matériaux de structure du réacteur: les aciers et alliages traditionnels sont fragilisés et deviennent radioactifs sous un flux intense et prolongé de neutrons », prévient Philippe Magaud. Un acier spécial, l'Eurofer, est en cours de développement. Pour le mettre à l'épreuve, les grands moyens seront employés: un accélérateur spécifique, installé au Japon, permettra de reproduire les flux de neutrons attendus dans le réacteur de fusion, afin de valider la résistance des nouveaux matériaux en vraie grandeur.

## La production de pièces hors normes

Grandes tailles, alliages non conventionnels, niveau de qualité élevé: les composants des équipements clés d'Iter – l'enceinte de la réaction de fusion et les aimants supraconducteurs – posent des problèmes inédits aux industriels. Ainsi, pour les aimants, Cnim va fabriquer, dans son usine de La Seyne-sur-Mer (Var), 35 plaques en forme de D de 14 mètres sur 9 mètres, chacune étant le squelette sur lequel sera enroulé un câble supraconducteur, chez ASG, en Italie. Les bobines assemblées formeront les plus grands aimants supraconducteurs jamais construits. L'italien Simic fabrique, lui aussi, 35 plaques; le japonais Hitachi 63 autres. « Notre outil

de production est presque prêt. La première plaque sortira fin juillet 2014, la dernière fin 2016 », annonce Jean-Claude Cercassi, le responsable du projet Iter chez Cnim. L'aboutissement de trois ans de R&D sur les techniques de fabrication. Première difficulté: la plaque est fabriquée avec une nuance d'acier parfaite pour les très basses températures (le câble supraconducteur est refroidi à l'hélium liquide)... mais difficile à usiner. Cnim disposait de la technique de soudage par faisceau d'électrons, sous vide, mais pas pour une pièce de 14 mètres! La solution est une petite chambre à vide « portable » que l'on déplace autour de la plaque pour faire les soudures. Autre contrainte, la plaque assemblée doit être usinée en fin de fabrication, pour l'ajuster au câble qu'elle va recevoir. Là encore, vu les dimensions, il a fallu bâtir une machine portative, unique par sa taille. La longueur de la gorge qui accueille le câble – 700 mètres – est réalisée avec une tolérance meilleure que 25 mm. La planéité de la plaque, elle, est assurée à moins d'un millimètre près. « Il faudra tenir les cadences de fabrication: une plaque toutes les trois semaines et demie », indique Jean-Claude Cercassi. Pour Cnim, le contrat Iter, c'est une vitrine technologique. Et 300 000 heures de travail!

## La plus grande usine d'hélium du monde

Pour refroidir les 10 000 tonnes de câbles supraconducteurs des aimants d'Iter à  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une température proche du zéro absolu, Air liquide va installer sur le site la plus grande usine d'hélium liquide jamais construite. « L'usine du Qatar, qui a démarré cette année, est aujourd'hui la plus grande, souligne Xavier Vigor, le directeur général d'Air liquide Advanced Technologies. Iter, ce sera trois fois le Qatar! » Trois unités, en fait, fonctionneront en parallèle. Une configuration qui permet

## 400 secondes de fusion

La réaction nucléaire que l'on cherche à réaliser dans Iter est la fusion entre le deutérium et le tritium, deux isotopes de l'atome d'hydrogène. La réaction produit un noyau d'hélium, et un neutron doté d'une grande énergie. C'est avec cette énergie, transformée en chaleur, que l'on peut produire de l'électricité. La réaction se déclenche dans un plasma – un mélange de noyaux et d'électrons à très haute température (150 millions de degrés) – confiné dans une enceinte à l'aide de champs magnétiques. Dans l'enceinte du réacteur, l'objectif sera d'entretenir la réaction de fusion pendant des périodes continues de 400 secondes, en produisant dix fois plus d'énergie que celle nécessaire au fonctionnement du réacteur. Une option différente pour déclencher la fusion, étudiée notamment aux États-Unis (National Ignition Facility), est fondée sur l'action d'un puissant laser sur un mélange de deutérium et de tritium. C'est aussi le principe du laser Mégajoule, en cours de construction en Gironde, avant tout pour des recherches militaires.

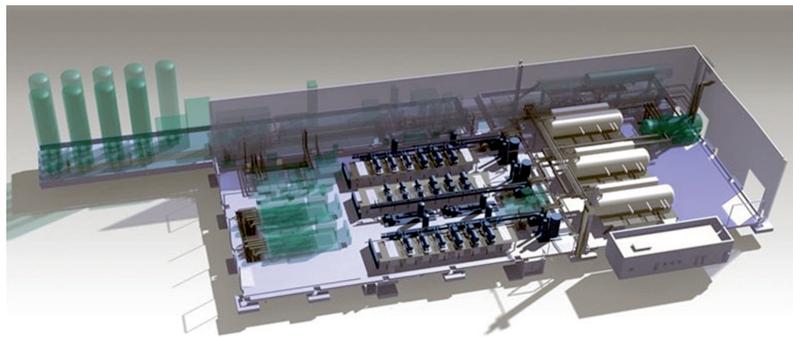
de répondre aux critères de sûreté du réacteur et aux modes de fonctionnement prévus par les expérimentateurs. Outre sa taille sans pareille, l'usine d'hélium liquide innovera en matière de contrôle de procédé. Car les unités devront accompagner la marche du réacteur, avec des variations en cours de fonctionnement. La conception de l'usine est en cours de finition sur le site d'Air liquide de Sassenage (Isère), où aura lieu aussi l'intégration des équipements. Le début de l'installation à Cadarache doit commencer à la fin 2015, pour se terminer au début 2017. D'ici là, les contrats de réalisation du reste du système cryogénique d'Iter auront été attribués : le système de prérefroidissement à l'azote, 3 km de tuyauteries cryogéniques, et 50 boîtiers d'interconnexion. Le tout en 2014, faute de quoi c'est la cryogénie qui risque de retarder tout le projet.

### 360 000 tonnes en zone sismique

Comme souvent dans Iter, les chiffres astronomiques pleuvent : le réacteur pèsera 23 000 tonnes (trois fois le poids de la tour Eiffel) et le bâtiment qui l'accueillera, le complexe tokamak, 360 000 tonnes (plus que l'Arche de la Défense). Sa construction nécessitera 150 000 m<sup>3</sup> de béton... L'ensemble est conçu selon les normes nucléaires en vigueur en France pour les centrales. Plus étonnant : tout le site étant en zone sismique, l'énorme édifice de 120 mètres de longueur est construit sur des fondations qui le mettent à l'abri des



Le réacteur reposera sur 493 colonnes antisismiques



Air liquide installera la plus grande usine d'hélium liquide jamais construite

secousses. Quelque 493 colonnes de béton ont été coulées à 17 mètres de profondeur. Chacune d'elles comporte un support antisismique composé de couches alternées de métal et de caoutchouc. Les supports peuvent bouger latéralement de 10 centimètres, ce qui devrait permettre d'absorber les mouvements du sol en cas de tremblement de terre. Le plancher du complexe tokamak repose sur ces 493 colonnes. Le génie civil est une part importante du projet Iter, car pas moins de 39 bâtiments seront construits sur le site. À proximité du complexe, il y aura notamment l'atelier de préassemblage des composants du réacteur, et l'usine d'hélium liquide.

### La simulation en quête de puissance

Le plasma ? Une soupe très chaude de noyaux atomiques et d'électrons (150 millions de degrés au centre), pleine de tourbillons... Les physiciens ont appris à mieux le contrôler, en particulier ces turbulences minuscules qui créent des pertes de chaleur et nuisent au rendement du réacteur. Mais pour comprendre ce qui se passe, c'est sur la simulation numérique que l'on compte. Plusieurs groupes de chercheurs y travaillent (École polytechnique fédérale de Lausanne, Max Planck Institute, CEA-Inria). L'équipe du CEA-Inria a réalisé, en 2012, la première simulation des turbulences sur le supercalculateur Curie,



« Chaque partenaire vise la future filière de la fusion »

Rem Haange,  
directeur technique du projet Iter

#### En quoi Iter est-il un projet unique ?

Il existe d'autres grands projets internationaux, comme la station spatiale internationale ISS.

Mais dans l'ISS, chaque pays partenaire est responsable d'un module. Dans Iter, la réalisation de chaque composant est répartie entre plusieurs partenaires de différents pays. C'est le cas des segments qui composeront la chambre à vide du réacteur, l'enceinte dans laquelle sera formé le plasma et où aura lieu la réaction de fusion, dont la fourniture est partagée entre l'Europe, la Russie, la Corée du Sud et l'Inde. Mais aussi des aimants supraconducteurs, dont le rôle est de confiner le plasma par des champs magnétiques intenses : un supraconducteur fabriqué en Russie pourra être transformé en câble en Italie, puis en bobine en Corée... La principale raison de cette distribution des tâches est que chaque partenaire veut se qualifier en vue d'une future filière industrielle de la fusion.

#### Comment gère-t-on une telle complexité ?

Le principe est que chaque composant est financé par les gouvernements des pays participants et livré par les agences domestiques Iter. Iter Organization n'est donc pas en relation directe avec les entreprises. Dans certains cas, des accords sont ou seront signés avec les agences afin de centraliser les achats, comme les 60 km de tuyauteries du réacteur.

#### Quels seront les premiers composants livrés sur le site ?

Au début de l'été 2014, nous verrons arriver les premiers grands composants : les cuves de drainage du système de refroidissement par eau. Il faut les installer pendant la construction du bâtiment du tokamak, qui est en cours. C'est aussi en 2014 que doit démarrer la fabrication sur site des plus grandes bobines supraconductrices.

**AIMANTS 6 bobines de champ poloidal****FONCTION**

Ils maintiennent le plasma à l'écart des parois et contribuent à sa stabilité.

**FOURNISSEURS**

**La Chine** (Asipp) fournit 67 % du supraconducteur, **la Russie** 19,7 % et **l'Europe** 13,3 %.

Montant des contrats : NC

L'italien **ASG** a été retenu pour la production de bobines sur le site d'Iter.

Montant du contrat : 27,5 millions d'euros

**AIMANTS 19 bobines de champ toroidal****FONCTION**

Le confinement du plasma à l'intérieur de la chambre à vide.

**FOURNISSEURS**

**ASG** (Italie), **Iberdrola** et **Elytt** (Espagne) : 10 bobines

Montant des contrats : NC

**Cnim** (France) et **Simic** (Italie) fabriquent 70 plaques radiales, support des câbles bobinés.

Montant du contrat : 160 millions d'euros

**Mitsubishi** (Japon) : 9 bobines (y compris les plaques) - Montant des contrats : NC

**CHAMBRE À VIDE****FONCTION**

L'enceinte contient le plasma, lieu de la réaction de fusion.

**FOURNISSEURS**

**Ansaldo, Mangiarotti**

et **Walter Tosto** (Italie) : 7 segments

Montant du contrat : 300 millions d'euros

**Hyundai Heavy Industries**

(Corée du Sud) : 2 segments

Montant du contrat : NC

**DIVERTOR****FONCTION**

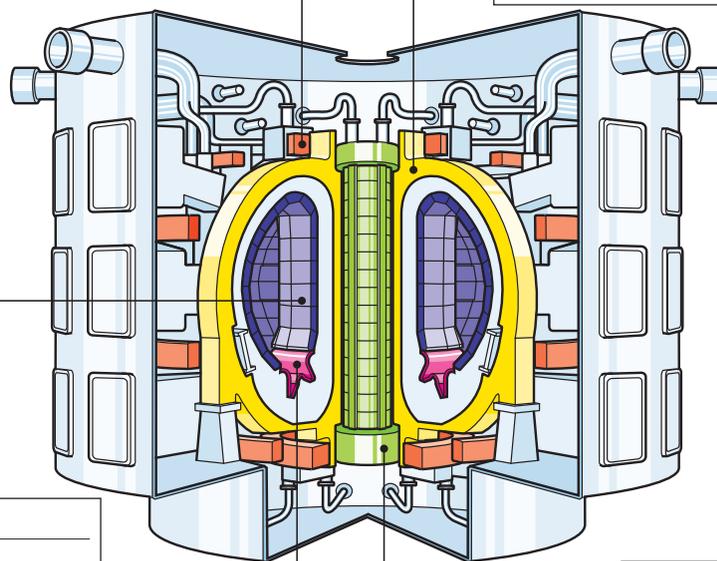
C'est le « cendrier » du réacteur. Il évacue le produit de la fusion (hélium), et reçoit l'essentiel des flux de chaleur.

**FOURNISSEURS**

**Ansaldo** (Italie) et **Plansee** (Autriche) sont capables

de fournir les composants internes.

Le contrat n'est pas encore passé.

**BÂTIMENT DU TOKAMAK****FONCTION**

Abrite le réacteur.

**FOURNISSEURS**

**Vinci - Ferrovia Agroman - Razel-Bec**

(France et Espagne)

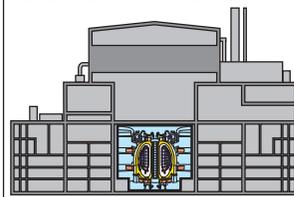
Montant du contrat : 300 millions d'euros

(y compris 9 bâtiments annexes)

Le consortium franco-allemand

**GDF Suez - M+W Group** couvre les services (ventilation, alimentation électrique, réseaux de gaz et liquides...).

Montant du contrat : 530 millions d'euros

**AIMANTS Solénoïde central****FONCTION**

La partie centrale du système d'aimants qui crée et contrôle le plasma.

**FOURNISSEURS**

**General Atomics** (États-Unis) - Montant du contrat : NC

**Des contrats hors norme pour 22 industriels internationaux**

l'un des plus puissants du monde. Mais la simulation comportait des simplifications, et le volume de plasma était 25 fois inférieur à celui d'Iter. Les chercheurs préparent les logiciels qui tourneront sur la future génération de supercalculateurs, ceux qui atteindront l'exaflops, soit mille fois la puissance de calcul des plus grosses machines actuelles. Ce qui n'est pas sans poser de problèmes, surtout quand il s'agit de répartir les calculs entre des centaines de milliers de processeurs, tout en évitant au maximum les transmissions de données entre eux. Gysela, le code calcul CEA/Inria, a récemment montré son efficacité sur une machine de 450 000 cœurs de calcul. Une étape, en attendant de disposer d'un supercalculateur qui fera tourner plus d'un million de cœurs. Et permettra de comprendre les phénomènes physiques complexes dans le plasma, pour les maîtriser et finalement optimiser le fonctionnement du réacteur.

**Un meccano assemblé par 34 pays**

Depuis l'accord signé en novembre 2006, les partenaires du projet Iter ont adopté un mode de fonctionnement qui tente de concilier partage des tâches, coordination et respect du planning.

Complexe, l'Europe à 28 ? Allez donc voir du côté d'Iter. Le projet fait plus fort, en mettant 34 pays autour de la

table. L'Union européenne, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, l'Inde, le Japon et la Russie : le gratin de l'industrie mondiale participe à la construction d'une machine comprenant près d'un million de composants, des bâtiments et des équipements annexes. Au centre du puzzle, Iter Organization, dont la lourde tâche est de coordonner des travaux qui s'étalent sur une vingtaine d'années. Un puzzle, dont chaque grande pièce est un projet coopératif [lire l'encadré p. 8]. Pour gérer cette complexité, Iter s'appuie sur sept agences domestiques, une par pays, plus une pour l'Union européenne, baptisée F4E (Fusion for Energy). Elles traitent avec les laboratoires et les industriels des pays concernés. Si bien que 90 % du financement sont apportés « en nature » par les partenaires. Et c'est à partir de l'été 2014 que l'on verra se succéder 200 convois exceptionnels, qui, depuis l'étang de Berre, livreront sur le site de Cadarache des pièces pesant des centaines de tonnes. Les opérations d'assemblage pourront commencer, pour se terminer en 2020, à condition que le planning des livraisons soit respecté... 2020, c'est la date prévue pour le « premier plasma » d'Iter. Le rôle d'Iter Organization sera terminé. Et ce sera parti pour vingt ans d'expérimentations, dans un contexte non moins international. ■