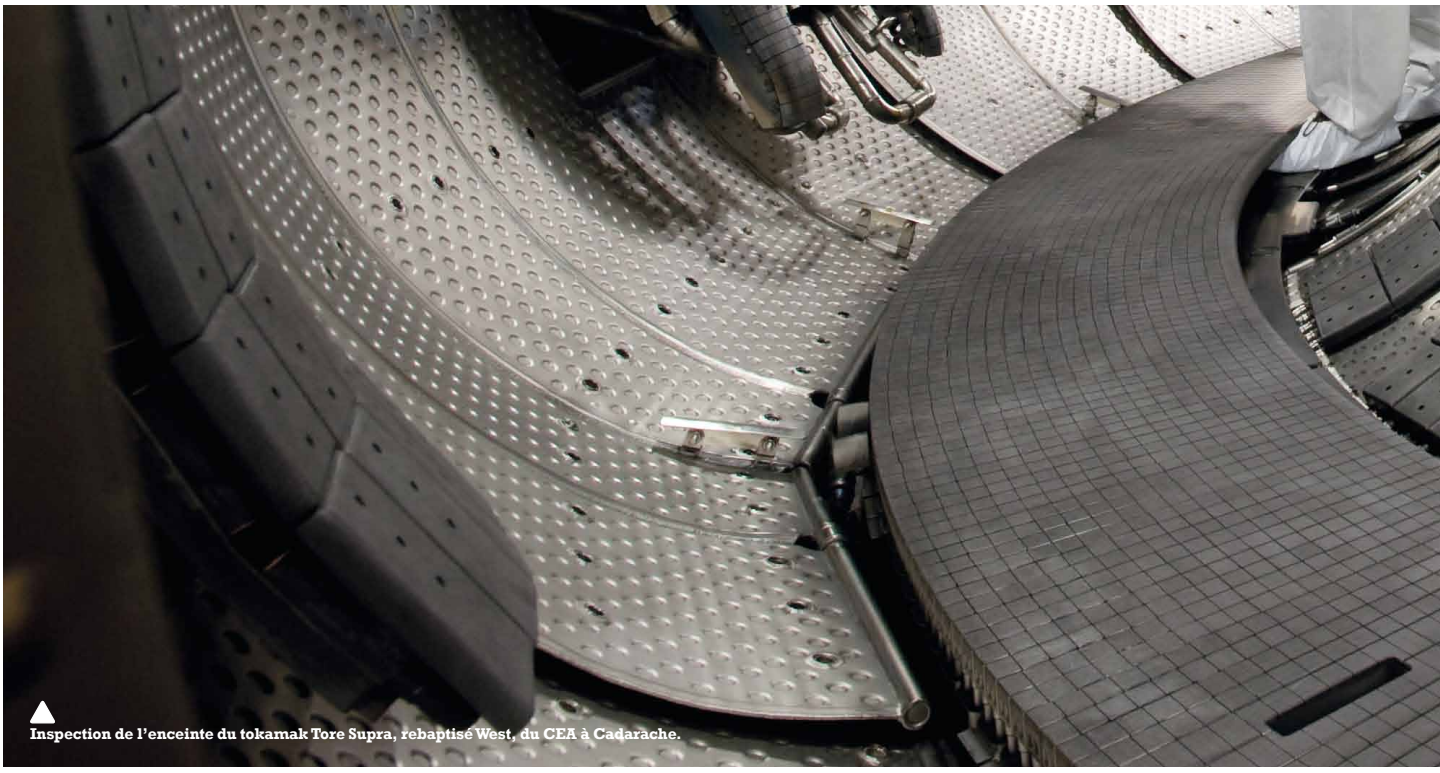
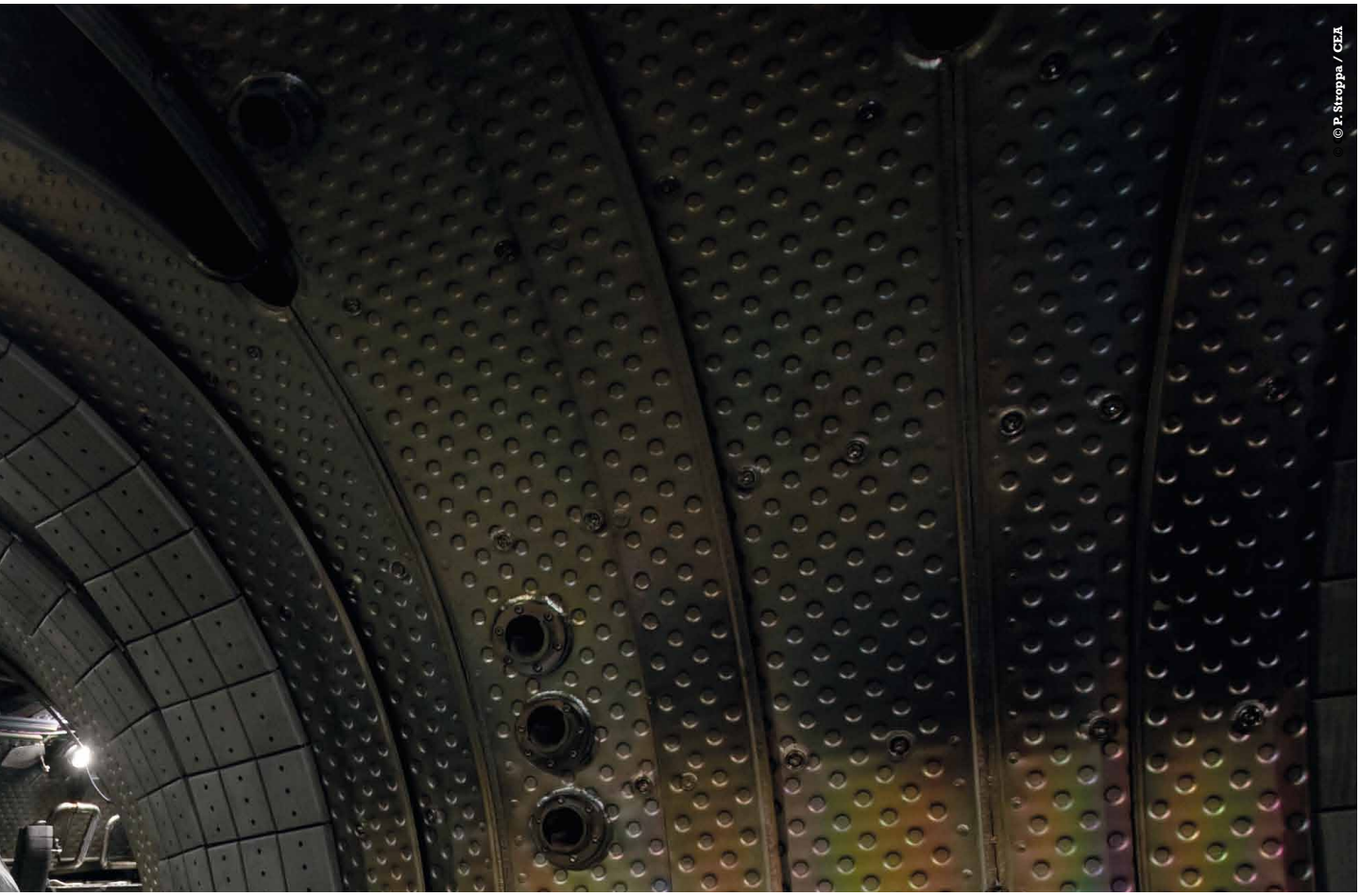


# ITER FUSIONNE LES COMPÉTENCES



Inspection de l'enceinte du tokamak Tore Supra, rebaptisé West, du CEA à Cadarache.


© P. Stroppa / CEA



**Le tokamak international ITER, destiné à valider la faisabilité scientifique et technique de la production d'électricité à partir de la fusion nucléaire, se construit à Cadarache. La France, pays hôte, réorganise donc totalement sa recherche avec des équipes du CEA qui, dans toute leur diversité, restent très mobilisées.** *Dossier réalisé par Patrick Philipon*



# LA RECHERCHE FAIT PEAU NEUVE AUTOUR D'ITER

## LE CEA AU CŒUR DU DISPOSITIF

## INTERVIEW : JÉRÔME PAMELA

**directeur de l'Agence ITER France (AIF)**

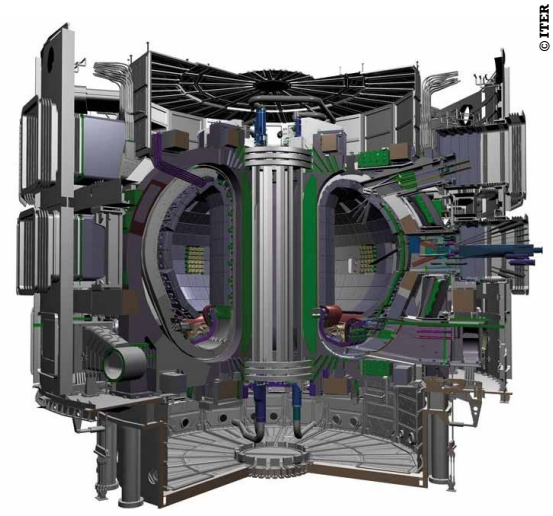
# LA RECHERCHE FAIT PEAU NEUVE AUTOUR D'ITER

**À Cadarache, les 110 hectares du site d'ITER[1] sont aujourd'hui un immense chantier. Juste à côté, le** tokamak• **Tore Supra du CEA, s'apprête à changer de fonction – et de nom[2] – pour un passage de relais. Restructuration en France, restructuration en Europe : avant même ses premiers** plasmas•**, ITER donne déjà des résultats.**

• **Tokamak :** réacteur de fusion nucléaire. Nom venant du russe *Toroidalnaya kamera c magnitinymi katushkami*, signifiant « chambre à vide toroïdale et bobine magnétique ».

• **Plasma :** gaz ionisé dans lequel électrons et noyaux atomiques sont dissociés ; communément appelé « quatrième état de la matière ».

ITER représente en effet l'aboutissement d'une phase marquée en Europe par deux grands tokamaks de recherche. D'une part, la machine européenne JET implantée en Grande-Bretagne qui a approché, durant une brève impulsion, le breakeven – point où le plasma fournit autant d'énergie qu'on lui en injecte. D'autre part, Tore Supra, opéré par le CEA-IRFM, qui s'est attaqué à l'autre face du problème, celle de faire durer la réaction de fusion nucléaire, avec un record mondial à la clé : maintien d'un plasma à 40 millions de degrés pendant 6 minutes et 30 secondes. *« Mais dans les deux cas, nous avons compris que l'échelle était insuffisante pour aller au-delà. Il fallait passer à celle d'ITER, qui est peu ou prou celle des futurs réacteurs de production ou celle des réacteurs actuels de fission nucléaire, ce qui est une entreprise à notre portée ! »* souligne Alain Bécoulet, qui dirige l'IRFM.



© ITER

**Vue 3D du futur tokamak ITER.**

## Une remise à plat des missions et de l'organisation des recherches

*« Aujourd'hui, le CEA-IRFM se donne pour objectif de participer à ITER afin de prouver que la fusion nucléaire peut devenir une source d'énergie pleine de promesses »* (voir encadré) explique ainsi le chef de l'institut.

L'IRFM se transforme donc en « centre de compétences », mettant ses plates-formes expérimentales à disposition du projet international, tant pour la conception et l'exploitation du réacteur expérimental que pour le programme baptisé Approche élargie. Celui-ci, cofinancé par l'Union européenne et le Japon, vise, d'une part, la reconstruction du tokamak japonais JT60[3] avec des aimants supraconducteurs. Il comprend, d'autre part, la création d'un centre international de recherche sur la fusion à Rokkasho (Japon) doté d'un centre de calcul haute performance, d'un centre de « participation à distance » à ITER, ainsi que d'une source de neutrons de fusion IFMIF[4], notamment pour étudier la tenue des matériaux des parois des futurs réacteurs.

## Une fédération de recherche et un master de sciences pour rassembler étudiants, chercheurs et industriels

Les moyens développés par le CEA (voir pages suivantes) seront donc placés au service de tous les chercheurs, étudiants et industriels intervenant dans le domaine de la fusion nucléaire. La communauté scientifique française se restructure d'ailleurs autour de la Fédération de recherche sur la fusion par confinement magnétique, regroupant environ deux cents chercheurs de quarante laboratoires du CEA, du CNRS, d'universités, de grandes écoles et de l'Inria.

Autre nouveauté, la création d'un master de Sciences de la fusion, associant le CEA (via l'INSTN[5]), des universités et des grandes écoles, pour former des spécialistes des plasmas chauds qui se destinent à la recherche ou à l'industrie. *« Les étudiants font des manips ici à Tore Supra ou sur la Ligne d'intégration Laser du CEA à Bordeaux »* précise Alain Bécoulet.

## Une insertion européenne complexe

La Fédération a par ailleurs vocation à se substituer à l'IRFM en tant qu'interlocuteur des instances européennes. Un rôle délicat étant donné la complexité du système européen : l'agence F4E[6] rassemble toutes les fournitures européennes nécessaires à la construction d'ITER, l'European Fusion Development Agreement (branche fusion du traité Euratom) gère la préparation de l'exploitation d'ITER, le « training » des communautés et les études préparatoires au futur réacteur de démonstration DEMO[7].

Quant à la Commission européenne, elle peut également financer directement certaines recherches, *via* ses programmes communs de R&D dont le 7e PCRD qui démarre en 2014.

**Notes :**

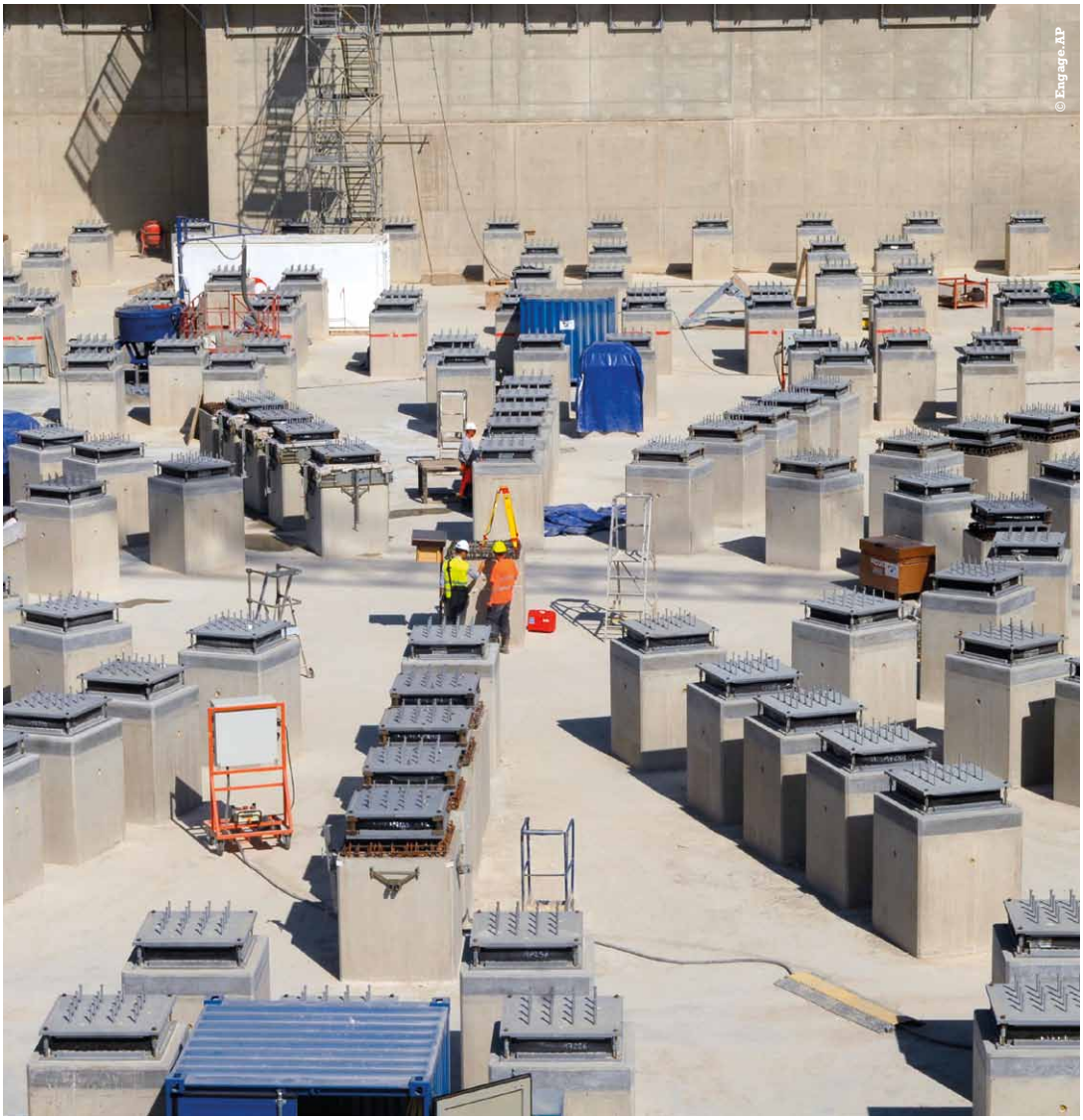
1. *International Thermonuclear Experimental Reactor, projet rassemblant Chine, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Japon, Russie et Union européenne.*
2. *Tore Supra s'appelle désormais West (voir page 20).*
3. *Le tokamak sera alors baptisé JT60-SA pour super advanced.*
4. *International fusion materials irradiation facility.*
5. *Institut national des sciences et techniques nucléaires.*
6. *Fusion for Energy.*
7. *Demonstration Power Plant, réacteur qui devrait succéder à Iter.*



Plus d'informations sur www.cea.fr

## QU'EST-CE QUE LA FUSION NUCLÉAIRE ?

Les noyaux d'atomes d'hydrogène, principal constituant solaire, se transforment en hélium en fusionnant. Cette réaction, dite de fusion nucléaire, libère une incroyable énergie : celle que le Soleil prodigue à notre planète depuis 5 milliards d'années ! Pour reproduire ce phénomène sur Terre, les chercheurs imaginent depuis plus de cinquante ans de faire fusionner des isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Objectif : profiter de la chaleur exceptionnelle dégagée par la réaction pour la transformer en vapeur afin d'actionner des turbines pour produire de l'électricité. Mais faire fusionner ces isotopes n'est pas une mince affaire car les noyaux, chargés positivement, se repoussent. Pour les rapprocher, il faut leur communiquer une très grande vitesse, c'est-à-dire les soumettre à des températures très élevées, de l'ordre de quelques centaines de millions de degrés, dans un plasma. Il s'agit alors de concevoir le réacteur pouvant assurer la réaction dans des conditions physiques extrêmes.




**Aperçu des fondations du tokamak avec ses 493 colonnes et plots parasismiques.**

### CEA IRFM

L'expérience des équipes de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique est unique aussi bien dans les domaines théoriques, expérimentaux que technologiques. Aussi prennent-elles pleinement part au programme expérimental ITER à plusieurs niveaux : conception de composants face au plasma, de couvertures tritigènes et de matériaux de structure ; conception des grands aimants supraconducteurs ; étude et développement des moyens de chauffage ; études de sûreté, etc. Le tout, en partenariat avec les instituts du CEA IRFU (Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers), Inac (Institut nanosciences et cryogénie), List (laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies) ou encore la DAM (Direction des applications militaires), la DEN (Direction de l'énergie nucléaire) et la DSV (Direction des sciences du vivant).

# LE CEA AU CŒUR DU DISPOSITIF

**Bien que coordinateur de la participation française à ITER et gros contributeur à l'effort de recherche, le CEA-IRFM n'est pas le seul à intervenir et travaille en étroite collaboration avec d'autres laboratoires du CEA.**

*« Pendant plusieurs décennies, les sept grands pays (dont l'Union européenne) engagés dans la recherche sur la fusion avaient chacun leur tokamak. Avec ITER, nous avons tous dû nous repositionner et nous répartir les tâches en fonction des compétences acquises »* se souvient Alain Bécoulet, directeur du CEA-IRFM. Cela vaut pour le CEA qui coordonne l'effort français en la matière.

## Une alliance transversale et multidisciplinaire

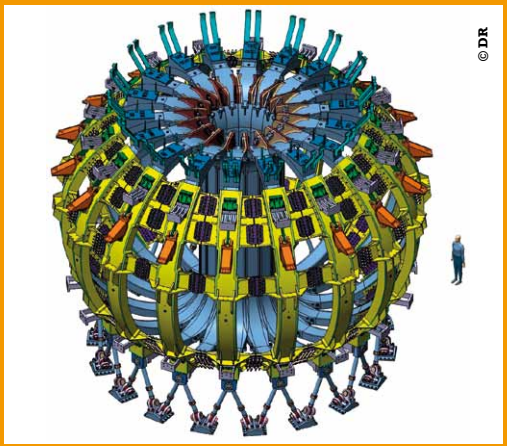
Ainsi, les instituts Inac et IRFU du CEA, ainsi que la DEN, sont parties prenantes du programme Approche élargie (voir encadré ci-dessous) et c'est le CEA-List qui a créé le bras articulé robotique, actuellement en test à Cadarache pour intervenir grâce à une commande à distance dans la chambre d'ITER, en cas de besoin.
La DSV étudie les aspects toxicologiques (voir encadré page 20) quand la DAM fournit des « métamatériaux » capables de reproduire les caractéristiques des milieux électromagnétiques, comme les plasmas, pour tester des composants sans devoir les installer dans un vrai tokamak.
La DEN joue à cet égard un rôle prépondérant, tant en ce qui concerne les éléments producteurs de tritium que les aspects de sûreté et de gestion des déchets (voir encadré page 19). En effet, bien qu'il ne soit pas une machine de production et comporte relativement peu de tritium, ITER devra répondre à la réglementation française sur la sûreté des installations nucléaires.




**Bobine supraconductrice de rechange pour le tokamak Tore Supra, rebaptisé West.**

## APPROCHE ÉLARGIE : L'APPORT DU CEA

La France fournit près de la moitié de la contribution européenne à l'Approche élargie. Pas étonnant que le CEA y consacre beaucoup de ressources, impliquant ses instituts IRFM, IRFU, Inac, ainsi que la DEN.
Pour le tokamak JT60-SA, il fournira à F4E la moitié des bobines supraconductrices et l'ensemble des structures de liaison et de support de l'aimant toroïdal. Ensuite, il testera, aux conditions nominales de Saclay, toutes les bobines de champ toroïdal. Il livrera également l'installation cryogénique destinée à refroidir, à l'hélium liquide, les aimants supraconducteurs ainsi que les **cryopompes**• du tokamak. Enfin, il apportera cinq unités d'alimentation électrique. Devenu « tokamak satellite » d'ITER, JT60-SA pourrait être aussi opéré à distance depuis le centre de Rokkasho. Il servira à préparer le démarrage et l'exploitation d'ITER, et à étudier la physique du plasma dans le futur réacteur DEMO.
Par ailleurs, le CEA a déjà fourni le supercalculateur Helios[1] du Centre international de recherche sur la fusion de Rokkasho, ainsi que ses systèmes périphériques. Ce monstre de puissance (1,5 pétaflops) est indispensable pour traiter les énormes quantités de données circulant entre JT60-SA et Rokkasho, puis entre ITER et Rokkasho.




**Modèle de l'assemblage de l'aimant toroïdal du JT60-SA**

• **Cryopompe :** dispositif de panneaux métalliques refroidis à 3.7 K permettant de contrôler la densité et la pureté du plasma.

**Note :**
1. *Développé par Bull sous l'égide du CEA et installé à Rokkasho en mars 2012.*

### Tore Supra : le maillon fort

Outre sa participation à la machine européenne JET, le CEA-IRFM a construit et utilise toujours Tore Supra qui est le plus grand tokamak à aimants supraconducteurs opérationnel et le seul au monde à produire des plasmas de très longue durée (6 minutes et 30 secondes).
Fort de cette expérience, l'institut participe à la conception des antennes de chauffage du plasma et, surtout, il maîtrise un système d'injection de puissance additionnelle, utilisant des ondes électromagnétiques pour créer un courant électrique dans ce milieu. *« Nous sommes les pionniers de cette méthode dite d'ondes hybrides, et en assurons la maîtrise d'œuvre pour ITER »* explique Alain Bécoulet, chef du CEA-IRFM, institut qui a également la charge, en tant que leader d'un consortium de laboratoires européens, des études d'un des **porte-plug**• d'ITER. *« Pour le tokamak japonais JT60-SA, nous étudions et construisons les systèmes dont nous avons la charge. Pour ITER, nous intervenons au stade de la conception, mais aussi de la qualification des éléments. En effet, nous disposons des plates-formes d'essais et des savoir-faire nécessaires. C'est aujourd'hui le "gros" de notre participation à ITER »* précise André Grosman, adjoint du chef de l'IRFM. Le meilleur exemple en est le système de refroidissement actif des éléments, ceux qui « côtoieront » le plasma (intérieur de la chambre, antennes, instruments de mesure).

*(suite page 20)*




**Visualisation, sur écran, des paramètres du plasma créé dans le tokamak Tore Supra.**




**Nettoyage des composants qui se trouvent face au plasma dans l'enceinte Tore Supra.**

## LA DEN, DEMO ET ITER




**Maquette des éléments de première paroi de la chambre à vide d'ITER.**

Si ITER n'a pas vocation à produire du tritium, il servira de banc d'essais pour des éléments de couverture tritigène du futur réacteur DEMO, et contiendra donc plusieurs kilos de cet élément radioactif. De plus, les composants métalliques de structure, soumis au bombardement de neutrons venant du plasma, seront activés.
Les éléments de couverture de la paroi intérieure de DEMO – et de tout réacteur de fusion – devront assumer trois rôles : produire le tritium nécessaire à la réaction de fusion, à partir de lithium bombardé par des neutrons provenant du plasma ; multiplier ces neutrons pour améliorer le rendement de production du tritium ; convertir en chaleur l'énergie cinétique de ces neutrons et l'extraire par un fluide caloporteur pour alimenter un turbo-alternateur et produire de l'électricité.
*« La DEN est à l'origine d'un concept utilisant l'hélium comme fluide caloporteur et un mélange eutectique liquide lithium-plomb comme matériau "tritigène" et multiplicateur de neutrons »* expliquent Antonella Li Puma et Giacomo Aiello. Ce concept, appelé HCLL[1] est l'un des deux sélectionnés par l'Europe pour ITER – l'autre étant porté par le Karlsruhe Institute of Technology, en Allemagne. La DEN se positionne aujourd'hui sur les études de conception et la mise au point de méthodes de fabrication de maquettes de couverture à tester dans ITER, leur intégration dans la machine et leur devenir après irradiation. La première maquette de couverture HCLL sera livrée en 2020 pour des tests commençant l'année suivante. Par ailleurs, à Saclay, des chercheurs étudient le comportement sous irradiation de différents alliages métalliques envisagés pour DEMO.
Enfin, la DEN s'est vu confier par l'AIF[2] des missions pour la gestion des déchets contenant du tritium, pour le démantèlement d'ITER et pour les expertises tritium.

• **Porte-plug :** élément qui s'ajuste à une fenêtre de la chambre à vide d'ITER pour porter des antennes ou des instruments de mesure surveillant la température par thermographie infrarouge.

**Notes :**
1. *Helium cooled lithium lead.*
2. *Agence ITER France.*

### De Tore Supra à West

Avec ses plasmas de longue durée, Tore Supra a été le premier à disposer de structures refroidies par circulation d'eau pressurisée. En vingt ans de recherche, l'IRFM est parvenu à maîtriser cet aspect. Sa première proposition pour ITER, retenue à l'époque, comportait des éléments de couverture en fibres de carbone. Ce matériau ayant une propension à stocker le tritium en interagissant avec le plasma (démonstration faite dans Tore Supra), la communauté s'est tournée vers les métaux réfractaires « lourds », en particulier le tungstène. Des cibles de tungstène sont actuellement testées au JET et sur ASDEX-U en Allemagne, mais seul Tore Supra pourra assurer la confrontation des éléments dotés de la technologie refroidie à l'eau d'ITER avec des plasmas de longue durée. *« Nous proposons de le modifier à cet effet. Il s'appelle désormais West, pour W environment for stationary tokamak, puisque le symbole du tungstène est W »* précise Alain Bécoulet.


© P. Stroppa/CEA

**Groupe de pompage qui maintient sous vide l'enceinte du tokamak Tore Supra.**

## LA DSV SURVEILLE LES POUSSIÈRES

C'est inévitable : des poussières de tungstène chargées en tritium se formeront dans ITER – et dans les futurs réacteurs. Certes, des filtres de haute efficacité isolent la chambre de l'extérieur mais, en tant que structure d'accueil, le CEA se doit d'étudier l'impact d'une éventuelle dispersion dans l'environnement. C'est l'objet du projet transversal Tuntox, coordonné par un service de la DSV à Marcoule. D'autant que, comme le précise Christian Grisolia, de l'IRFM, *« si on connaît assez bien le tritium gazeux ou liquide, on ne sait pas grand-chose sur les poussières tritiées ».*

Tuntox se déroulera en cinq phases. D'abord la production de poussières de tungstène, par ablation laser ou broyage planétaire, dans des laboratoires du CNRS, puis leur caractérisation à l'IRFM et au CNRS. Ensuite, leur toxicité sera testée sur deux modèles biologiques, sur une lignée de cellules pulmonaires humaines, et sur un tissu pulmonaire reconstitué : *« Cultivé entre l'air, d'un côté, et le liquide nutritif, de l'autre, ce tissu est plus proche de la réalité anatomique et nous permettra donc d'étudier le passage des particules inhalées dans l'organisme »* explique Véronique Malard, qui dirige le projet. Ensuite, les mêmes poussières seront tritiées dans un autre service de la DSV de Saclay et de nouveau étudiées sur les modèles biologiques.

Aujourd'hui intégralement financé par le CEA, Tuntox pourrait à l'avenir recevoir d'autres subsides, par exemple pour étudier le devenir des particules dans des animaux vivants.




# L'AIF, UN ACTEUR CLÉ DANS LE DÉPLOIEMENT DU PROJET EN FRANCE

**Le traité de novembre 2006 met en place plusieurs niveaux de gouvernance d'ITER avec une organisation internationale à Cadarache, soutenue par sept agences domestiques par lesquelles les partenaires[1] fournissent leur contribution en nature. En France, pays hôte du projet, un haut représentant – Bernard Bigot, administrateur général du CEA – porte les engagements du pays et s'assure de l'insertion locale d'ITER *via* l'AIF[2].**

## Où en est la contribution française ?

L'AIF termine actuellement plus de quatre années de travaux de viabilisation et de réalisation d'installations et de bâtiments sur le site de Cadarache. Ces travaux étaient suffisamment avancés pour que le site puisse être transféré à l'organisation d'ITER en juillet 2010. Un second chantier important fut la réalisation d'un itinéraire spécial de transport des éléments du futur tokamak ITER de l'étang de Berre à Cadarache[3]. Il représente plus de 100 km de voies et ponts pouvant accueillir des convois de 600 à 700 t, de plus de 10 m de haut et 9 de large ! Achevé en 2010, il est coordonné par l'AIF depuis février 2011. Troisième contribution française, la construction d'une école internationale à Manosque, financée par la Région PACA.

## Quelles sont les autres missions de l'AIF ?

L'AIF gère également l'accueil des personnels d'ITER et prépare avec les collectivités locales des solutions d'hébergement pour les travailleurs du chantier. Chantier qui sera, pendant plusieurs années, l'un des plus importants du pays. L'AIF héberge aussi le comité industriel ITER[4] qui prépare les entreprises françaises à répondre aux appels d'offres et aide les PME à se positionner auprès des industries étrangères en recherche de sous-traitants. Nous organiserons en mars 2013 à Toulon le ITER Business Forum. Sur le plus long terme, il s'agit pour l'AIF de mettre en place une filière de traitement des déchets d'ITER. Comme ils contiendront du tritium, ils devront être entreposés pour décroissance radioactive avant d'être acceptés pour stockage par l'Andra. Une installation d'entreposage, construite et opérée par le CEA, sera opérationnelle en 2023. La même filière servira à l'entreposage des déchets issus du démantèlement d'ITER, démantèlement que nous essayons d'anticiper sur le plan technique car, bien que financé par les partenaires d'ITER, il sera réalisé par la France. Dans ces deux domaines, l'AIF bénéficie d'un excellent soutien de la DEN.

## Combien tout cela coûte-t-il et quelles sont les retombées pour la France ?

L'agence européenne F4E, située à Barcelone, finance à 45 % la construction d'ITER. La France assure 20 % de la part européenne, soit 1 168 millions d'euros. L'AIF collecte les financements français[5] et les reverse à F4E. Fin 2011, les entreprises françaises avaient bénéficié de 828 millions d'euros de contrats signés avec l'AIF, la Région, l'État, F4E et l'organisation ITER. Les entreprises françaises ont des atouts importants et nous continuerons à les valoriser.

*Propos recueillis par Patrick Philipon*

**Notes :**

1. *Chine, Corée, États-Unis, Inde, Japon, Russie et Union européenne.*
2. *Agence créée par décret interministériel en 2006 et mise en place au sein du CEA.*
3. *Itinéraire réalisé par la DREAL PACA (direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement de Provence-Alpes-Côte d'Azur) et le conseil général des Bouches-du-Rhône.*
4. *Comité dépendant du ministère de l'Industrie.*
5. *Financement du ministère de la Recherche, du CEA et des collectivités locales.*