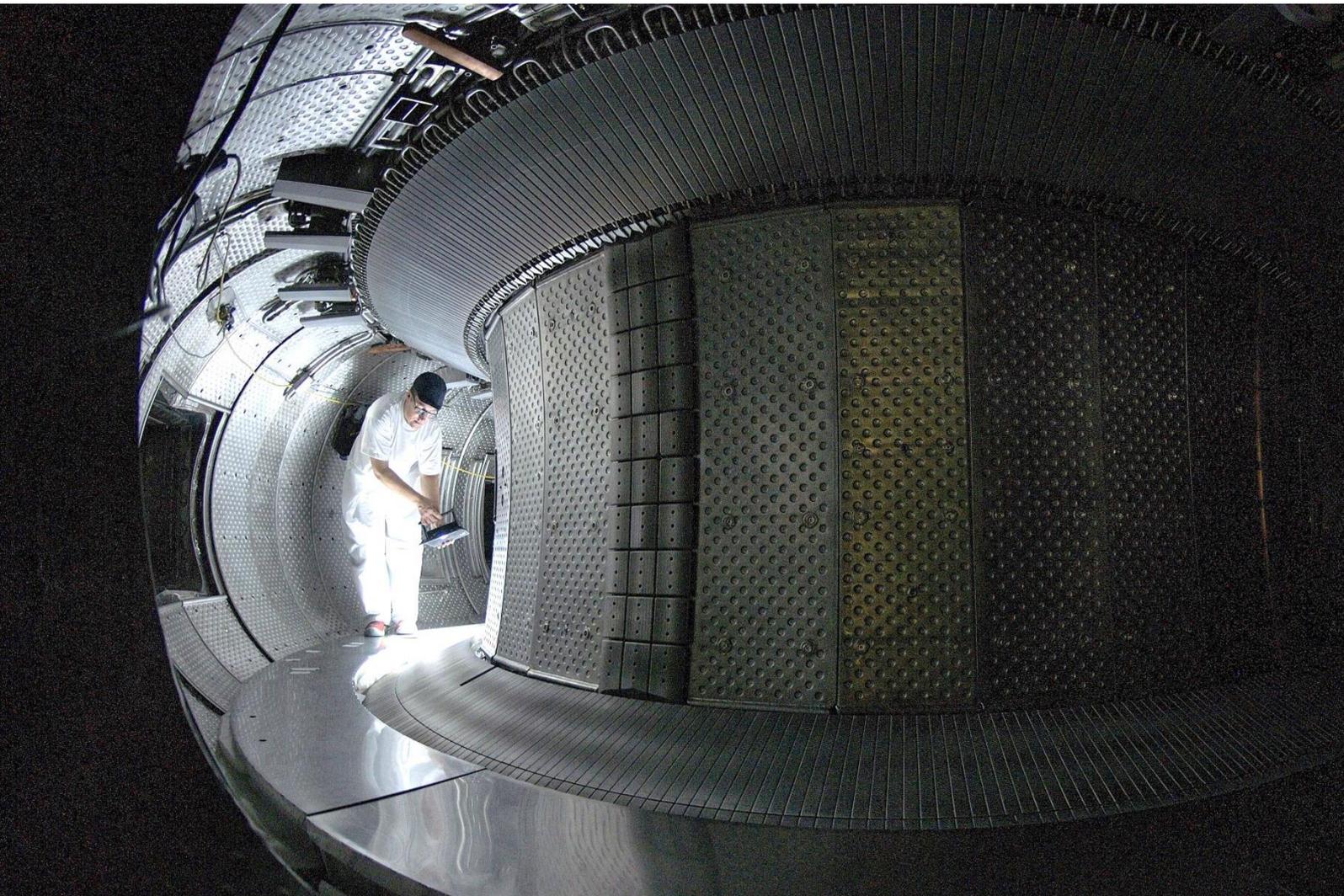


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

Dossier de presse

7 février 2017



WEST :

À la conquête de la fusion nucléaire

Contacts presse

Nicolas Tilly | nicolas.tilly@cea.fr | 01 64 50 17 16 – 06 82 47 39 85

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Direction de la communication | Service Information Média

91191 Gif-sur-Yvette | 01 64 50 20 11 | fax : 01 64 50 28 92

Sommaire

Introduction	5
1. La genèse de WEST	6
2. WEST : caractéristiques principales	10
3. Un programme scientifique international	14
ANNEXES	17
• Fusion nucléaire : en quête d'une ressource énergétique	19
• Communiqué de presse du 16 décembre 2016	24
• Contenus en ligne pour aller plus loin :	26
• À propos du centre CEA de Cadarache	27

Introduction

Le CEA est un des premiers organismes de recherche européens dans le domaine de la fusion par confinement magnétique. L'organisme, en particulier à travers son Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (CEA-IRFM) à Cadarache (Paca), participe pleinement à la feuille de route internationale de la recherche dans ce domaine. Au centre de ces travaux, le projet international ITER mobilise l'Union Européenne, la Russie, les États-Unis, le Japon, la Chine, la Corée du Sud et l'Inde. En construction à proximité du centre de Cadarache, ce tokamak doit démontrer la faisabilité d'une filière énergétique basée sur la fusion thermonucléaire.

Le CEA accompagne le projet ITER depuis son lancement et s'est adapté, depuis quelques années, afin de répondre aux grands défis technologiques et scientifiques du futur réacteur, en se dotant d'outils et de bancs de tests spécifiques. Il dispose de ses propres plateformes et moyens d'essai pour la R&D sur la fusion, non seulement à l'IRFM mais aussi à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA-Irfu) à Saclay, et à l'Institut nanoscience et cryogénie (Inac) à Grenoble.

La plus emblématique de ces plateformes est Tore Supra, le tokamak du CEA-IRFM, devenu aujourd'hui **WEST** - pour *Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak*. Ce champion du monde des plasmas de fusion « longs » s'est transformé en une plateforme de tests pour ITER. Il va permettre d'en étudier l'un des composants clés : le divertor. WEST va tester des composants en tungstène, identiques à ceux que l'on installera sur ITER : ils seront exposés à des flux de chaleur équivalents à ceux attendus sur le futur tokamak international. WEST permettra également d'explorer les problématiques de physique des plasmas sur des longues durées en environnement tungstène.



Aperçu de l'installation Tore Supra, aujourd'hui WEST © C. Roux/CEA

1. La genèse de WEST

De Tore Supra...

Au sein de la Communauté européenne de l'énergie atomique Euratom, le CEA a disposé, de 1988 à 2013, du tokamak Tore Supra, situé sur le centre de Cadarache (Paca). Cette machine avait pour objectif la réalisation et l'étude de plasmas en régime permanent, c'est-à-dire sur plusieurs dizaines - voire centaines - de secondes.

Tore Supra a d'abord permis de définir trois grandes options technologiques qui ont apporté une contribution capitale à la problématique du «fonctionnement continu»:

- l'emploi de bobines supraconductrices pour assurer le confinement magnétique du plasma ;
- la validation de différentes technologies de chauffage additionnel et de génération non inductive du courant plasma, en vue de décharges longues ;
- l'expérimentation d'un refroidissement continu via des boucles d'eau pressurisées.



Affichage d'un plasma généré dans Tore Supra en salle de contrôle-commande. © P. Stroppa/CEA

Les résultats obtenus par les équipes travaillant sur Tore Supra ont permis à l'IRFM d'acquérir une expertise reconnue mondialement sur les plasmas en régime stationnaire et les technologies associées :

- 25 ans d'exploitation d'un tokamak avec des plasmas de longue durée ;
- un record mondial de puissance injectée/puissance extraite (1 GJ sur une durée de 400 secondes, obtenu en 2003) ;
- une expérience unique dans la conception et la fabrication de « composants face au plasma » activement refroidis ;
- une expertise dans la physique du plasma de bord et ses conséquences sur les interactions plasma / paroi et l'intégration des différents composants nécessaires au fonctionnement d'un tokamak.

De par sa configuration particulière, notamment le refroidissement « actif » des composants, Tore Supra a constitué une base unique d'expérimentation des composants face au plasma. Il a ainsi documenté l'ensemble des caractéristiques du fonctionnement continu des tokamaks dans un environnement « carbone », invalidant en particulier son usage dans des machines manipulant le tritium.

Selon le plan initial, ITER devait être équipé pour son démarrage d'une cible de divertor constituée d'un matériau composite en carbone renforcé de fibres de carbone (CFC), qui

Suivez-nous sur :

[espace presse](#) | [le fil science et techno](#) | [@CEA Recherche](#)

présente une excellente conductivité thermique et bénéficie d'un retour d'expérience important, avant d'être équipé dans un second temps pour la phase tritium d'une cible de divertor en tungstène – matériau compatible avec le tritium – qui s'érode plus lentement et offre donc une plus grande longévité. Dans un souci de maîtrise des coûts, les partenaires d'ITER ont privilégié un démarrage d'ITER directement sur l'option tungstène.

Le projet WEST a consisté à modifier Tore Supra pour en faire une plateforme unique de tests pour ce composant « critique » du tokamak ITER, le divertor tungstène activement refroidi.



Obtention du premier plasma de WEST, très attendu en salle de contrôle-commande, le 14 décembre 2016. © C.Roux / CEA

... à WEST, banc d'essai pour ITER

La mise en œuvre du tungstène dans des composants activement refroidis ne bénéficie pas encore du même retour d'expérience que celle du CFC. WEST est une évolution en profondeur du tokamak Tore Supra. Un divertor utilisant la même technologie que celle du divertor d'ITER a été installé dans l'enceinte à vide. Dans un premier temps, seule une dizaine d'éléments « cibles » identiques à ceux d'ITER seront testés, et dans un second temps l'ensemble de la couronne du divertor de WEST sera équipée de composants de type ITER basés sur des monoblocs de tungstène.

Le tokamak devient ainsi un véritable banc d'essai pour ITER. De par sa nouvelle configuration magnétique, ses équipements spécifiques et son environnement entièrement métallique, la machine constitue une base unique d'expérimentation des matériaux face au plasma. En effet, si la température et la densité au cœur du plasma de WEST seront plus faibles que dans ITER, les conditions à la périphérie du plasma seront très similaires, avec des flux de chaleur et de particules dans le divertor pouvant atteindre

20 MW / m² – soit dix fois plus intenses que ce que subit le bouclier d'une navette spatiale à son entrée dans l'atmosphère.

Les grandes missions de WEST sont :

- permettre une diminution des risques et délais liés à l'industrialisation des composants du divertor et une meilleure définition des critères d'acceptation des séries industrielles.
- permettre surtout de tester de manière accélérée la tenue et le vieillissement de ces matériaux lors de décharges longues, et de détecter ainsi d'éventuels problèmes d'exploitation que pourrait rencontrer ITER.
- diminuer les délais d'apprentissage de fonctionnement d'un tel divertor et préparer les équipes à son exploitation scientifique. WEST permettra notamment de mettre au point des procédures d'opération et de surveillance du composant.

Zoom sur le divertor

Rôle du divertor dans un tokamak

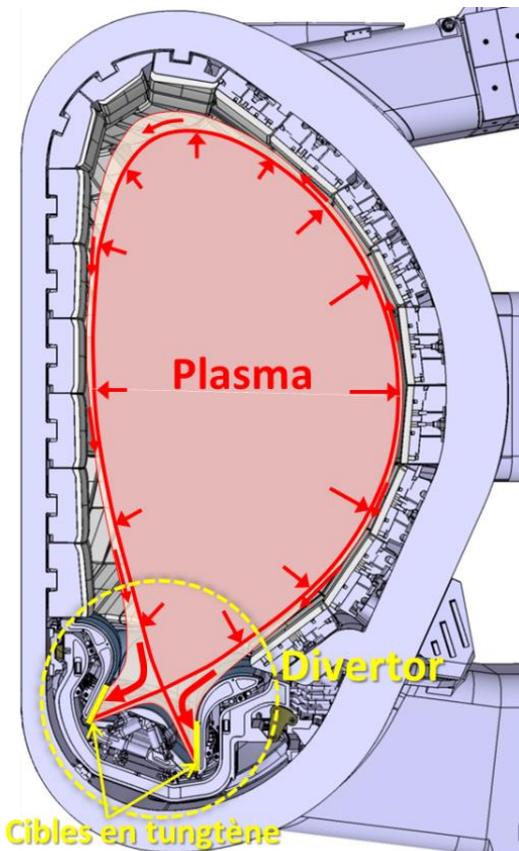
Le divertor est l'un des composants fondamentaux d'ITER : cette partie, qui épouse le plancher de la chambre à vide, reçoit l'essentiel des flux de chaleur et de particules provenant du plasma central. Il a pour fonction d'extraire les « cendres » (hélium) produites par la réaction de fusion et d'évacuer une partie de la chaleur générée par le système, tout en minimisant la contamination du plasma par les autres impuretés.

Le divertor tire parti d'une perturbation du champ magnétique pour guider vers la partie basse de la machine les écoulements de plasma qui atteignent la périphérie. Les densités de puissance reçues par ce composant peuvent atteindre 20 MW / m².

Des contraintes fortes sur le divertor

Le divertor est composé de différents secteurs (sur WEST), ou « cassettes » (sur ITER), comprenant eux-mêmes des « cibles » en contact direct avec le plasma. Ces cibles sont placées à l'intersection des lignes de force du champ magnétique, là où les particules de plasma rencontrent les composants, cédant leur énergie sous forme de chaleur. Les cibles sont soumises à une charge thermique d'une extrême intensité et sont refroidies par circulation d'eau pressurisée. On parle alors de composants activement refroidis.

Schéma du principe du divertor dans un tokamak. © DR



Afin d'évacuer ce flux de chaleur considérable sans que la température de surface ne dépasse celle où le matériau face au plasma fondrait ou se vaporiserait, il est nécessaire de faire circuler de l'eau à grande vitesse, à quelques millimètres de la surface de cette paroi. Entre la surface qui peut atteindre des températures supérieures à 2 000 °C et les canaux de refroidissement où circule de l'eau sous pression à une température de l'ordre de 100 °C, le très fort gradient de température produit une dilatation différentielle des matériaux de la paroi, avec de fortes contraintes mécaniques (cisaillement). De plus, le bombardement de la surface par les particules énergétiques en provenance du plasma entraîne des phénomènes d'érosion et de pulvérisation. L'étude du comportement de ces composants face à des plasmas de longue durée est fondamentale pour ITER et constitue un sujet clé pour WEST.



Composants du divertor haut de WEST avant leur installation, avec revêtement tungstène et canaux de refroidissement. © C.Roux / CEA

2. WEST : caractéristiques principales

Changement de configuration

- **Configuration du tokamak Tore Supra** : avec un grand rayon de tore de 2,40 m (du centre de la machine au centre du plasma) et un petit rayon plasma de 0,72 m, Tore Supra se classait parmi les plus grands tokamaks au monde. Ce tokamak de section plasma circulaire et de configuration magnétique de type « limiteur »¹ se caractérisait par une combinaison unique de composants permettant des décharges longues :
 - des bobines toroïdales supraconductrices et un système cryogénique associé ;
 - des composants face au plasma activement refroidis à base de matériau composite en carbone renforcé de fibres de carbone (CFC) ;
 - des boucles de refroidissement par circulation d'eau sous pression ;
 - des antennes de chauffage du plasma par injection d'ondes électromagnétiques à différentes fréquences pour une puissance totale de 15 MW ;
 - de nombreux « diagnostics » (instruments de mesure à l'intérieur du tokamak), dont des caméras infra-rouges, qui permettent de surveiller l'échauffement des composants face au plasma ;
 - un système d'acquisition des données en continu.

Depuis sa construction dans les années 1980, le tokamak Tore Supra n'a cessé d'évoluer afin d'améliorer les performances plasmas. Il a été doté d'une seconde génération de composants CFC activement refroidis installée au début des années 2000 : quelques 500 aiguilles constituées de 12 000 petites tuiles de carbone soudées sur des barreaux de refroidissement en cuivre durci formaient son limiteur. À la fin des années 2000, ce sont les moyens de chauffage du plasma qui ont été améliorés.

¹ C'est-à-dire que le matériau fait face au plasma sans la protection d'une « frontière » magnétique supplémentaire comme dans le cas de WEST ou ITER.

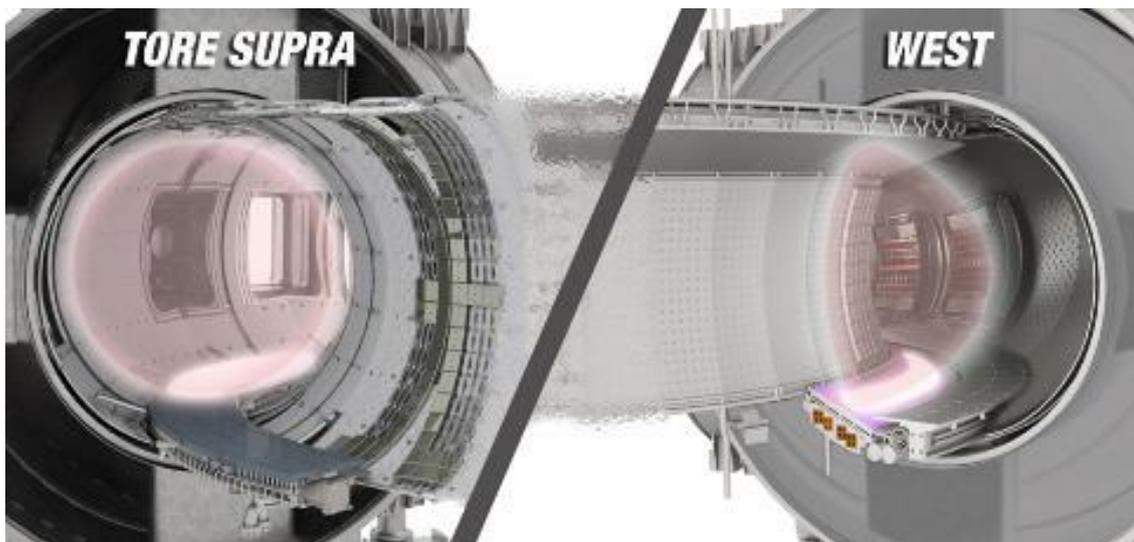


Schéma comparant la configuration des installations Tore Supra et WEST. © CEA

- **Reconfiguration de Tore Supra en WEST** : Les modifications de la machine pour la transformer en WEST ont été nombreuses et complexes :
 - installation de bobines de champ poloïdal à l'intérieur de l'enceinte à vide pour changer la configuration magnétique du plasma de la configuration de type « limiteur » à une configuration de type « divertor » (avec un « point X », zone de champ magnétique poloïdal nul, identique à celle d'ITER) ;
 - installation de nouveaux composants face aux plasmas pour avoir un environnement complètement métallique dans l'enceinte à vide, et parmi ces éléments, installation des composants divertor en tungstène massif identiques à ceux d'ITER ;
 - conception et réalisation de trois nouvelles antennes de chauffage compatibles avec le nouveau mode d'opération en confinement amélioré (mode H) ;
 - implantation de nouveaux diagnostics (système infrarouge de surveillance des composants, sondes de Langmuir, spectroscopie visible, etc.).

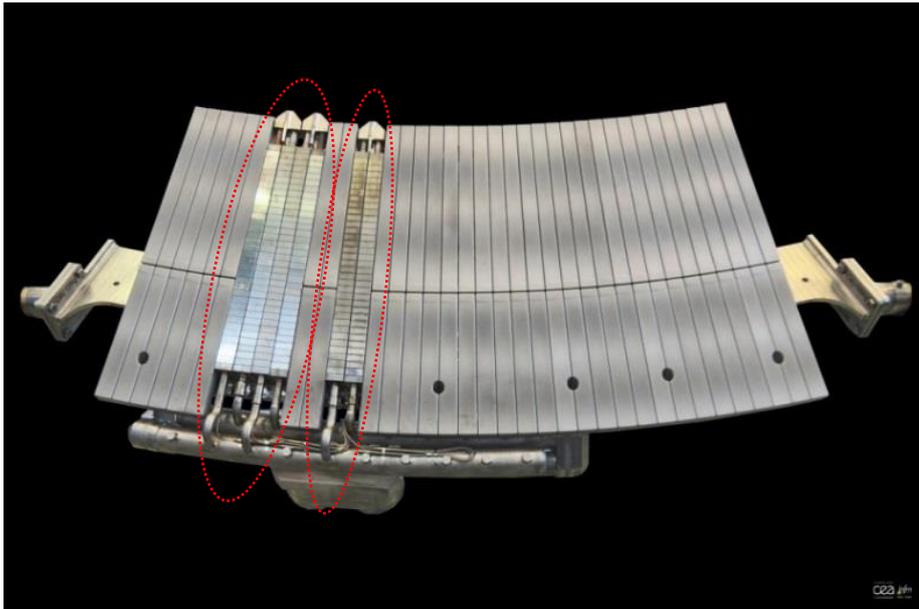
Les travaux sur le tokamak se sont déroulés entre 2013 et 2016, mais se poursuivront encore de manière ponctuelle dans les mois à venir.

Le chantier de reconfiguration de la machine a commencé par un déshabillage de l'ensemble des éléments se trouvant à l'intérieur de l'enceinte à vide, dont les éléments du limiteur en carbone, et le retrait de nombreux systèmes (diagnostics, antennes de chauffage, etc.) situés en périphérie.

Les bobines du divertor ont été construites à l'intérieur de l'enceinte à vide. Une fois les boîtiers réalisés, ils ont été introduits par secteur angulaire de 60° dans l'enceinte à vide et positionnés au dixième de millimètre en haut et en bas de l'enceinte. A commencé ensuite le brasage des segments de conducteurs en cuivre pour constituer le bobinage de

la bobine haute et de la bobine basse : opération délicate dans un environnement très exigü réalisée avec des outillages spécifiques conçus à cet effet.

Les nouveaux composants face au plasma ont ensuite été installés, soit 1 800 composants conçus à l'IRFM, réalisés par des partenaires industriels et testés par les équipes du CEA. Les six premiers prototypes de type ITER constitués de monoblocs en tungstène ont été installés sur le secteur de test du divertor. Ils ont été fournis par la Chine et le Japon. Les composants fournis par l'Europe seront installés courant 2017.



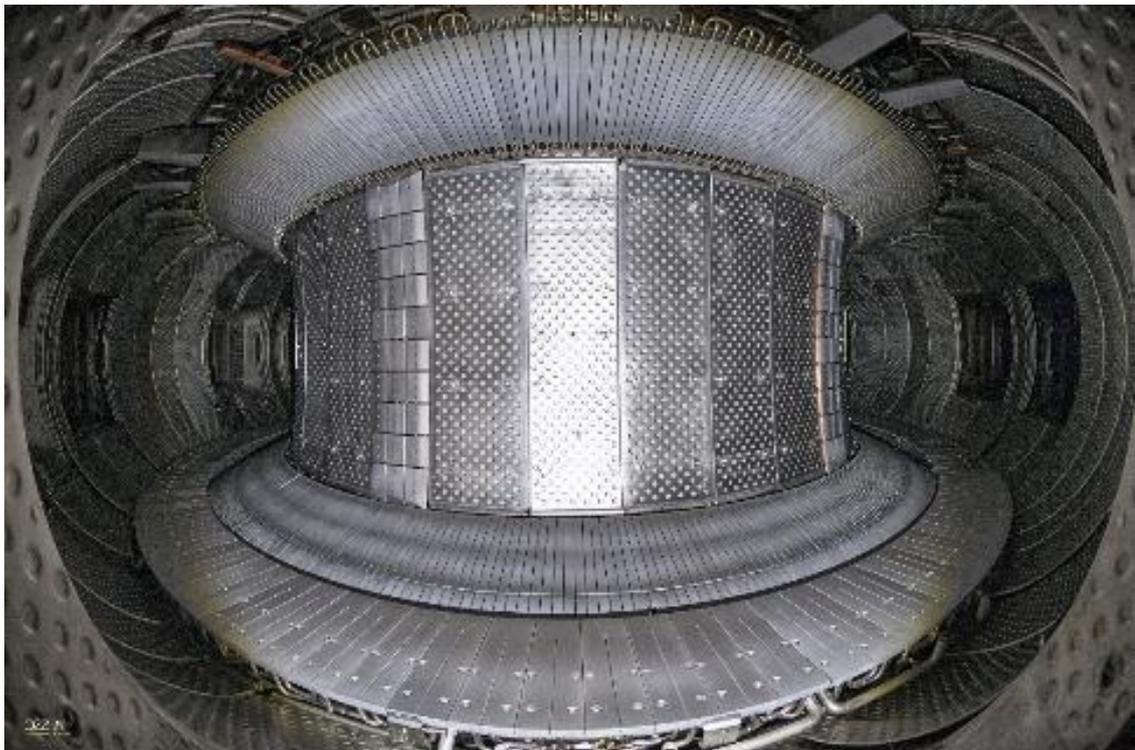
Secteur de test du divertor bas, équipé des 6 premiers éléments « Iter-like » en monoblocs de tungstène massif, activement refroidis (pointillés rouges). © C. Roux / CEA

La R&D sur les nouveaux diagnostics a également été importante. On peut citer par exemple la conception des télescopes qui permettront de mesurer les sources de tungstène, implantés à l'intérieur de la chambre à vide. Ils ont été conçus pour résister aux conditions extrêmes durant les plasmas.

Les trois nouvelles antennes de chauffage ont été conçues au travers d'une collaboration internationale et sont fabriquées en Chine dans le cadre d'un accord de collaboration. La première de ces antennes a été montée à blanc en présence des équipes du CEA en Chine. Elle est arrivée fin 2016 dans les locaux de l'IRFM et est en cours de montage pour être installée sur le tokamak dans les semaines à venir. La Chine a également fourni les alimentations électriques nécessaires au fonctionnement des nouvelles bobines de champ poloïdal du divertor.



Évolutions des travaux d'adaptation du tokamak Tore Supra en WEST. © C. Roux / CEA



Enceinte à vide avant sa fermeture en novembre 2016 © C. Roux / CEA

3. Un programme scientifique international

WEST : des objectifs scientifiques au service d'ITER ...

1. Côté composant, évaluer en environnement tokamak les performances en matière d'extraction de chaleur des composants face au plasma en tungstène de WEST, utilisant la même technologie que celle d'ITER et leur vieillissement. Les composants seront soumis à des flux de chaleur équivalents à ceux attendus pour ITER, dans la gamme de 10-20 MW/m². Le fonctionnement avec un composant dégradé (avec fusion locale du tungstène par exemple) sera également testé. Le système de surveillance en temps réel des composants (système infrarouge associé à des modèles de simulation des flux plasma) sera optimisé en vue de servir de base à celui d'ITER. En plus des flux de chaleur, WEST permettra dans sa seconde phase d'exploitation d'accumuler en un nombre de décharges limité des fluences de particules sur les composants face au plasma de l'ordre de celle attendues sur le divertor d'ITER. Ceci permettra d'explorer les interactions plasma / paroi à forte fluence (érosion par le plasma, évolution de la morphologie de surface du matériau, rétention du combustible ...), qui déterminent la durée de vie du composant et ont des conséquences sur son exploitation.
2. Côté plasma, explorer les problématiques de physique des plasmas sur des longues durées en environnement tungstène. En effet, WEST permet dès aujourd'hui de fournir des durées d'impulsion se rapprochant de celles d'ITER (plusieurs centaines de secondes). L'un des objectifs du programme sera de contrôler le régime de référence d'ITER (le mode H) sur des temps longs, en s'attaquant notamment au problème du contrôle de la contamination du plasma par le tungstène. WEST s'attaquera également au développement de régimes dits avancés (meilleur confinement du plasma)², notamment en soutien à la machine japonaise JT-60SA.

... et un programme construit à l'international avec les partenaires d'ITER

Avec WEST, le CEA a ouvert son programme vers les partenaires internationaux d'ITER non seulement lors de la phase de construction de la plate-forme, mais aussi pour son exploitation scientifique.

Aujourd'hui, ce sont plusieurs dizaines de laboratoires Fusion majeurs à travers le monde (Europe, Chine, Japon, Inde, Corée, États-Unis) qui collaborent avec les équipes du CEA

² Sous certaines conditions, un seuil en puissance à partir duquel le confinement s'améliore spontanément est observé. Ce mode de fonctionnement de référence, appelé mode H (pour *High confinement*), correspond aux critères de fonctionnement du réacteur ITER.

Calendrier de WEST

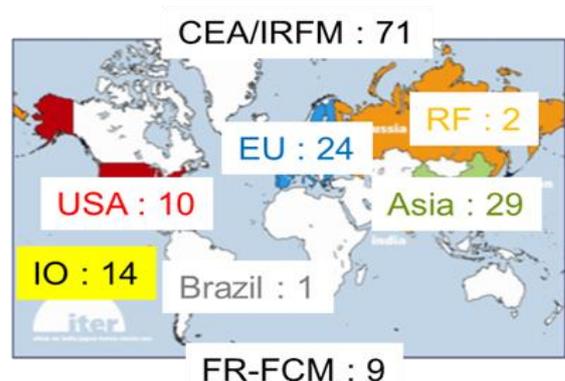
2012-2015: Études de conception des nouveaux composants
Février 2013 : Démarrage du démontage de nombreux composants de Tore Supra.
Juin 2013 : Premières commandes pour la réalisation des nouveaux composants WEST
Octobre 2014 : Montage des premiers composants dans l'enceinte à vide
Fin 2016 : Premier plasma obtenu.
Printemps 2017 : mise en fonction de WEST et début des campagnes expérimentales.

pour tirer le meilleur parti des résultats scientifiques de WEST. En particulier, les experts d'ITER Organization et des agences domestiques européennes et japonaises en charge de fournir le divertor sont associés au programme. Au niveau national, WEST est également un élément structurant pour la Fédération de Recherche Fusion par Confinement Magnétique (FR-FCM), qui regroupe une quarantaine de laboratoires français travaillant dans le domaine. Enfin, au niveau régional, c'est avec l'université d'Aix-Marseille que WEST a tissé des liens privilégiés. WEST contribue donc à mettre en visibilité le pôle fusion d'envergure mondiale qui se crée en région Paca autour du projet ITER.



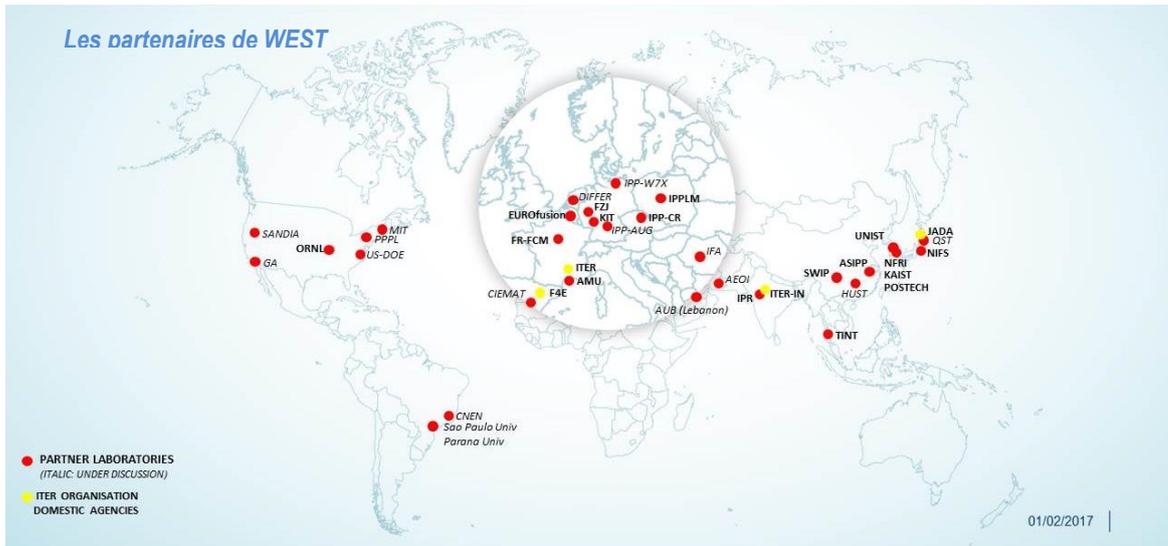
1st Experimental Planning Meeting, 2016

En ce qui concerne le programme scientifique de WEST, il a été construit sur la base de propositions expérimentales soumises par l'ensemble des partenaires du projet et discutées lors de workshops internationaux, puis approuvé par un « Governing Board » où siègent une fois par an des représentants de tous les partenaires.



Propositions expérimentales soumises par les partenaires internationaux du projet pour construire collectivement le programme scientifique de WEST.

La première campagne expérimentale, dont l'objectif principal sera la recherche du mode H et la caractérisation des dépôts de chaleur sur les composants face au plasma dans la nouvelle configuration WEST, est prévue au printemps 2017. Et c'est une centaine de collaborateurs internationaux qui sont attendus pour participer l'aventure scientifique de WEST durant les premières années de son exploitation.



La Fédération nationale de Recherche Fusion par Confinement Magnétique - ITER

La FR-FCM a été créée à l'initiative du CNRS, du CEA, de l'INRIA, et de six établissements d'enseignement supérieur, les Universités d'Aix-Marseille, de Nice, Nancy et l'École Polytechnique.

La Fédération a pour mission d'assurer la coordination des recherches menées en France dans le domaine de la fusion par confinement magnétique, dans le cadre du projet ITER, et dans le programme d'accompagnement soutenu par l'Europe (Euratom).



« Timeline » expérimentale de la première phase d'exploitation de WEST, telle qu'approuvée par le Governing Board, où siègent des représentants des partenaires du projet.

ANNEXES

Fusion nucléaire : en quête d'une ressource énergétique

L'essentiel sur la fusion nucléaire

La fusion nucléaire est une réaction qui se déroule au cœur des étoiles : des noyaux d'atomes fusionnent, dégageant l'énergie à l'origine de la lumière et de la chaleur qu'émettent les étoiles. Les quantités d'énergie libérée sont très importantes, ce qui pousse les scientifiques à chercher le moyen d'exploiter la fusion comme nouvelle source d'énergie durable.

Le principe physique

Le noyau des atomes est composé de neutrons et protons, qui tiennent ensemble grâce à la force la plus intense de la nature : l'interaction forte, responsable de « l'énergie de liaison nucléaire ». Cette énergie peut être libérée de deux façons :

- soit en cassant des noyaux lourds : c'est ainsi que fonctionne une centrale nucléaire actuellement ;
- soit en fusionnant des noyaux légers : ce qui se passe dans les étoiles

Dans des conditions de température extrême (des millions de degrés Celsius), la matière se présente sous forme de plasma : ni solide, ni liquide, ni gazeuse, la matière est comparable à une « soupe » où noyaux et électrons ne sont plus liés, ils circulent librement. Lorsque deux noyaux « légers » se percutent à grande vitesse, ils peuvent fusionner, créant un noyau plus lourd : c'est la fusion nucléaire. Durant l'opération, une partie de l'énergie de liaison des composants du noyau est libérée sous forme de chaleur ou de lumière.

Dans le cœur des étoiles, ce sont quatre noyaux d'hydrogène, noyaux composés uniquement d'un proton, qui par plusieurs étapes successives produisent des particules, dont un noyau plus lourd : l'hélium 4 qui contient deux protons et deux neutrons. Sur Terre, pour récupérer de l'énergie de fusion, les scientifiques se concentrent sur la réaction la plus accessible : la fusion de deutérium et de tritium, deux isotopes de l'hydrogène (noyaux contenant un proton et un ou deux neutrons). Cette réaction donne elle aussi naissance à deux particules très énergétiques : un noyau d'hélium et un neutron.

Enjeu : créer et maintenir un plasma de fusion sur terre

Pour imaginer récupérer de l'énergie à partir de la fusion nucléaire, il faut être capable de créer des conditions physiques similaires à celles des étoiles, et atteindre des températures de 150 millions de degrés (dix fois la température interne du Soleil). Ce défi scientifique et technologique posé aux chercheurs représente un important enjeu stratégique : la fusion pourrait devenir une nouvelle ressource d'énergie illimitée, sans risque majeur, et sans déchets hautement radioactifs à stocker.

ZOOM SUR... le tokamak

À la fin des années 1960, la communauté scientifique – à commencer par les scientifiques russes, qui inventèrent le concept – est parvenue à développer une machine capable de contenir le plasma dans une enceinte fermée et à le chauffer à des températures importantes: le tokamak. En forme d'anneau (ou « tore »), les particules qui y sont injectées sont soumises à des champs magnétiques si intenses qu'elles restent maintenues dans la partie centrale de l'anneau, sans contact avec les parois. Leur chauffage est assuré par différents moyens : l'injection de matière chaude et le chauffage par ondes sont les plus utilisés actuellement.

La participation du CEA aux recherches sur la fusion

Dès les années 1950, les Soviétiques ont obtenu et confiné des particules à des températures de plusieurs millions de degrés en développant le premier tokamak. À partir de 1959, le CEA a construit plusieurs tokamaks expérimentaux : TFR à Fontenay-aux-Roses et Petula à Grenoble. Ces tokamaks ont apporté des connaissances en physique des plasmas et des briques technologiques qui ont permis de passer à la deuxième génération de tokamaks, avec entre autres : JET (*Joint European Torus*), machine européenne construite entre 1978 et 1982 en Grande Bretagne, et Tore Supra qui a réalisé son premier plasma en 1988. Ces machines ont fournis des résultats décisifs pour la conception de l'étape suivante, ITER. Ainsi les ingénieurs et les chercheurs de Tore Supra ont obtenu en 2003 une durée record de plasma - plus de six minutes - et ceux de JET ont établi en 1997 le record mondial de puissance de fusion produite - avec 16 MW. JET poursuit son programme expérimental en soutien à ITER et Tore Supra est devenu WEST afin de tester les composants du divertor d'ITER.

ITER : le changement d'échelle

Le Tokamak international ITER, à proximité du centre CEA de Cadarache, est une nouvelle étape qui succède à cette longue lignée de machines. ITER est la première installation à réunir toutes les conditions pour obtenir et étudier un plasma en combustion, c'est-à-dire un plasma dominé par les réactions de fusion. **Avec le réacteur ITER, la communauté scientifique change d'échelle d'expérimentation.** C'est à la fois le moyen de dépasser les limites des machines actuelles, et une série de défis technologiques pour soutenir les objectifs visés.

Deux grandes missions scientifiques :

→ Atteindre un facteur $Q=10$, c'est-à-dire une énergie de fusion produite 10 fois supérieure à la puissance injectée dans le plasma. Les données fixées dans le cadre de l'exploitation d'ITER sont de parvenir à générer 400 MW d'énergie avec un apport de 40 MW (données à comparer aux résultats obtenus au JET : 16,5 MW obtenus pour environ 20 MW injectés).

→ Comprendre et démontrer les paramètres de fonctionnement d'un réacteur de fusion en régime stationnaire, voire proche de l'ignition (auto-entretien de la température du plasma) : dans les deux cas, il s'agit de produire et d'observer des plasmas au sein desquels la réaction de fusion contribue de manière significative à l'entretien du processus, préfigurant ainsi le fonctionnement d'un réacteur à échelle industrielle.

Ces objectifs font d'ITER une étape de validation avant la conception d'un prototype industriel, évoquée aujourd'hui sous le concept DEMO. ITER devra permettre de conclure sur la faisabilité technique du processus, c'est-à-dire établir si la fusion nucléaire par confinement magnétique est, ou non, un procédé pouvant conduire à une filière de réacteurs nucléaires totalement différents de ceux existant actuellement.

Demo : démontrer la faisabilité industrielle

Les expériences sur ITER seront suivies par la construction d'un démonstrateur de réacteur électrogène - Demo - préalable à un parc de réacteurs industriels à fusion. Demo doit permettre aux scientifiques et aux ingénieurs de démontrer la production d'électricité et de qualifier les technologies spécifiques à un réacteur industriel. Dans le cadre de collaborations internationales, le CEA s'implique dans le dimensionnement de Demo notamment avec le développement d'un code système permettant d'intégrer l'ensemble des contraintes physiques, technologiques et nucléaires. Par ailleurs, le CEA réalise de la R&D dans le domaine de l'autosuffisance en tritium (couvertures tritigènes) et des matériaux résistants aux neutrons produits par les réactions de fusion, deux technologies essentielles pour le réacteur industriel.

L'Approche élargie

Pour soutenir la feuille de route internationale de la R&D sur la fusion, qui passe notamment par le projet ITER, la Communauté européenne de l'énergie atomique (Euratom) et le gouvernement japonais mènent une coopération baptisée « Approche élargie » (ou *Broader Approach*) définissant un programme de recherche et de développement en commun. Les objectifs de l'Approche élargie sont de préparer l'exploitation d'ITER, d'élargir son programme de recherche et de développer la R&D pour dimensionner un réacteur électrogène prototype, Demo, économiquement attractif. L'approche élargie compte trois grandes infrastructures de recherche implantées au Japon :

- le tokamak JT60SA ;
- le centre de calcul Iferc ;
- le centre Eveda (Engineering Validation and Engineering Design Activities) où sont conduites les activités d'ingénierie pour le design et la validation de la future source d'irradiation Ifmif.

Le CEA porte les engagements de la France dans l'accord de l'« Approche élargie ». L'organisme pilote plusieurs projets clés de la collaboration, avec l'appui de nombreux partenaires industriels en Europe.

Voir le dossier de presse « La collaboration franco-japonaise en soutien à lter » : http://irfm.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=547.

Les compétences du CEA

L'IRFM (<http://irfm.cea.fr>) est reconnu par la communauté scientifique internationale pour son expertise sur les plasmas de longue durée et les technologies associées, et dispose de plateformes très pointues pour l'expérimentation (le nouveau tokamak WEST, nouvelle configuration de Tore Supra), les tests de composants (imagerie infra rouge, robotique, etc.) ainsi que pour la simulation (calcul haute performance, modélisation, représentation en réalité virtuelle 3D).

Deux autres instituts du CEA apportent des contributions majeures dans la conception des technologies nécessaires à la fusion :

- l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu), au CEA Saclay, mène des programmes de recherche pour les domaines de l'astrophysique, la physique nucléaire et la physique des particules. Les compétences développées en matière d'accélérateurs de particules et de détecteurs de particules pour ces trois domaines sont aujourd'hui valorisées dans d'autres domaines dont les composants cryo-magnétiques pour des réacteurs de fusion et pour des machines d'imagerie médicale à très haute résolution.
Après les tests réussis des 70 bobines de la machine de fusion allemande W7-X (Institut de physique du plasma de Garching), l'institut est chargé de ceux des 18 bobines toroïdales supraconductrices du tokamak japonais JT-60SA, dans le cadre de « L'Approche élargie ».
- L'Institut nanosciences et cryogénie, au CEA Grenoble, est un laboratoire de recherche fondamentale du CEA et de l'Université Joseph Fourier, sur la matière condensée, la matière molle et la cryogénie. L'institut dispose de fortes compétences en cryogénie pour le spatial et les grands instruments de la physique (Tore Supra, CERN). Ses ingénieurs et ses chercheurs ont participé à la mise au point du système cryogénique de Tore Supra ainsi qu'à la définition et au suivi de réalisation de l'usine cryogénique de JT-60SA. L'Inac possède aussi une longue expertise dans le domaine des injecteurs de glaçons (« pellets ») de deutérium solide, un des moyens d'injecter le « combustible » de la fusion directement dans le cœur des plasmas de tokamaks.

Enfin, la Direction de l'énergie nucléaire du CEA mène des études de R&D dans le domaine de la conception et de la fabrication des couvertures tritigènes, ainsi que des matériaux des structure de la première paroi, matériaux résistants aux neutrons produits par les réactions de fusion à des températures élevées. Ces deux technologies sont essentielles pour un futur réacteur industriel.

Fusion par confinement inertiel

Le CEA s'intéresse aussi à une autre voie pour créer des conditions de la fusion thermonucléaire : convertir la lumière amplifiée par un laser en rayonnement X, par interaction laser-matière au sein d'une cavité, puis d'utiliser ce rayonnement pour comprimer une cible contenant quelques microgrammes de matériau fusible. C'est l'un des objectifs du Laser Mégajoule, dont le but premier est de recréer, en laboratoire, les conditions thermodynamiques semblables à celles rencontrées lors du fonctionnement d'une arme nucléaire.

Communiqué de presse du 16 décembre 2016

Premier plasma pour WEST : le tokamak prêt à tester les composants internes d'ITER

Le tokamak WEST a produit son premier plasma le 14 décembre 2016, traduisant la réussite des opérations menées depuis 2013 sur le réacteur à fusion nucléaire du CEA. Ce jalon majeur étant franchi, la préparation de la machine se poursuit pour une première campagne expérimentale au printemps 2017. WEST va permettre au CEA et à ses partenaires nationaux et internationaux de qualifier des « briques » technologiques pour le projet ITER.

Depuis sa construction dans les années 1980, le tokamak Tore Supra n'a cessé d'évoluer afin d'améliorer les performances du plasma, jusqu'à obtenir un record mondial avec un plasma stationnaire pendant plus de six minutes pour une puissance extraite de 1 gigajoule (GJ). Le projet WEST – pour *Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak* - vise à transformer Tore Supra en banc d'essai pour ITER, plus précisément, à tester un « divertor » utilisant la technologie d'ITER. Situé sur le plancher de la chambre à vide, le divertor est un composant fondamental parce qu'il reçoit l'essentiel des flux de chaleur et de particules provenant du plasma central. Il a pour fonction d'extraire les « cendres » (l'hélium) et une partie de la chaleur produites par la réaction de fusion, tout en minimisant la contamination du plasma par les autres impuretés.

WEST permet :

- de minimiser les risques (coûts et délais) liés à l'industrialisation des composants haute technologie du divertor d'ITER. Des prototypes réalisés par les fournisseurs sélectionnés pour la fabrication du divertor d'ITER sont déjà installés, des préséries industrielles sont en préparation ;
- d'acquérir des premiers résultats expérimentaux sur le fonctionnement de ce divertor et de préparer les équipes à son exploitation scientifique dans ITER ;
- de tester de manière accélérée la tenue et le vieillissement de ce composant face au plasma lors de décharges de longues durées.



Vue de l'enceinte à vide WEST avec sa nouvelle configuration et les prototypes ITER de composants face au plasma éclairés par le technicien. © CEA/C. Roux /CEA Cadarache, le 22 novembre 2016

Les défis de la maîtrise du plasma

Le plasma est un quatrième état de la matière au-delà de la forme gazeuse, obtenu en chauffant un gaz à plusieurs millions de degrés. On peut comparer le plasma à une « soupe » où noyaux et électrons ne sont plus liés et circulent librement. Lorsque deux noyaux « légers » se percutent à grande vitesse, ils peuvent fusionner, créant un noyau plus lourd : c'est la fusion nucléaire. Les quantités d'énergie libérées sont alors très importantes, ce qui pousse les scientifiques à chercher le moyen d'exploiter cette réaction comme une nouvelle source d'énergie durable, mais il faut pour cela être capable de créer, maintenir et contrôler ces plasmas.

Contenus en ligne pour aller plus loin :

Films, animations, infographies...

- Un film sur le projet WEST : <http://west.cea.fr/en/Phocea/Video/index.php?id=8>
- Un film expliquant la fusion nucléaire :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/physique-chimie/fusions.aspx>
- Une animation sur la fusion :
<http://www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/reaction-de-fusion.aspx>
- Une infographie sur la technologie des tokamaks :
<http://www.cea.fr/multimedia/Documents/infographies/tokamak-defisCEA.pdf>

Dossiers complémentaires...

- Un dossier web : <http://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/fusion-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=1>
- Un dossier de presse 2013 « Le projet WEST au CEA de Cadarache, banc de test pour ITER » <http://www.cea.fr/presse/Pages/dossiers/2013/fusion-thermonucleaire-projet-WEST-CEA-Cadarache-banc-essai-ITER.aspx>

Sites internet...

- Le site internet WEST : <http://west.cea.fr>
- Le site internet du CEA-IRFM : <http://irfm.cea.fr/>
- Le site internet d'ITER : <https://www.iter.org/fr/accueil>

À propos du centre CEA de Cadarache

Cadarache est un des 10 centres de recherche du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). C'est l'un des plus importants centres de recherche et développement technologiques pour l'énergie en Europe.

Implanté sur la commune de Saint-Paul-Lez-Durance (Bouches-du-Rhône), le centre du CEA/Cadarache, créé le 14 octobre 1959, est situé à une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence aux confins de trois autres départements (Alpes-de-Haute-Provence, Var et Vaucluse).

Les activités du centre du CEA/Cadarache sont réparties autour de plusieurs plates-formes de recherche et développement (R&D) technologiques essentiellement pour l'énergie nucléaire (fission et fusion) mais aussi pour les nouvelles technologies pour l'énergie et les études sur l'écophysiologie végétale et la microbiologie.

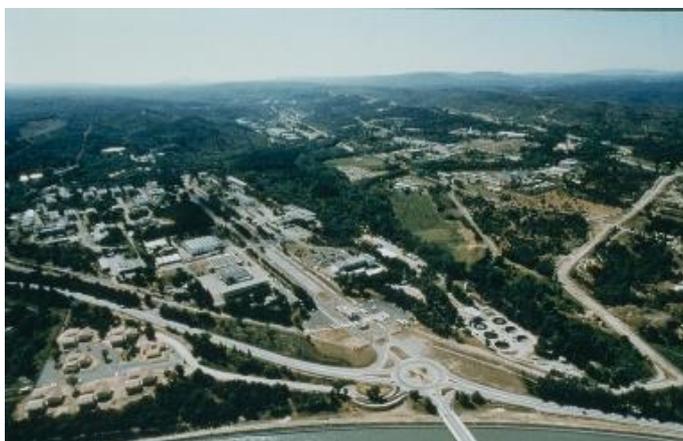
En appui de ces activités de R&D, le centre de Cadarache dispose d'une plate-forme de services rassemblant à la fois les moyens nécessaires :

- à la gestion des matières nucléaires, des déchets et des rejets des installations nucléaires et les moyens généraux pour assurer la surveillance des installations et de l'environnement, la sécurité.
- au bon fonctionnement des installations de recherche (réseaux de traitement des eaux, eau, électricité).

Plusieurs collaborations ont été développées avec les entreprises régionales, Aix-Marseille Université et des instituts de recherche [Institut français de recherche et exploitation de la mer (Ifremer)], le centre de recherches et d'enseignement en géosciences de l'environnement [Cerege] dans le cadre de collaborations scientifiques, d'enseignement et de la création de laboratoires mixtes.

Environ 90 thésards sont accueillis par les équipes de recherche du centre de Cadarache dans le cadre des conventions établies avec des universités.

Il existe également de nombreux échanges et collaborations dans le cadre de programmes de recherche européens et internationaux pour l'énergie nucléaire (fusion et fission). Entre 150 et 200 chercheurs d'une vingtaine de nationalités différentes travaillent chaque année sur le centre de Cadarache dans le cadre de collaborations scientifiques européennes ou internationales.



Les chiffres-clé du centre

- 1 600 hectares, dont 900 clôturés
- Environ 480 bâtiments, dont 20 installations nucléaires de base civiles et une de défense
- Environ 2 000 emplois indirects (sous-traitance) et 1 000 emplois induits (estimation)
- 300 millions d'euros d'achat / an, dont 40 % en région Paca
- 200 brevets actifs
- 300 publications scientifiques / an

Contacts presse

Nicolas Tilly | nicolas.tilly@cea.fr | 01 64 50 17 16 – 06 82 47 39 85

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Direction de la communication | Service Information Média

91191 Gif-sur-Yvette | 01 64 50 20 11 | fax : 01 64 50 28 92