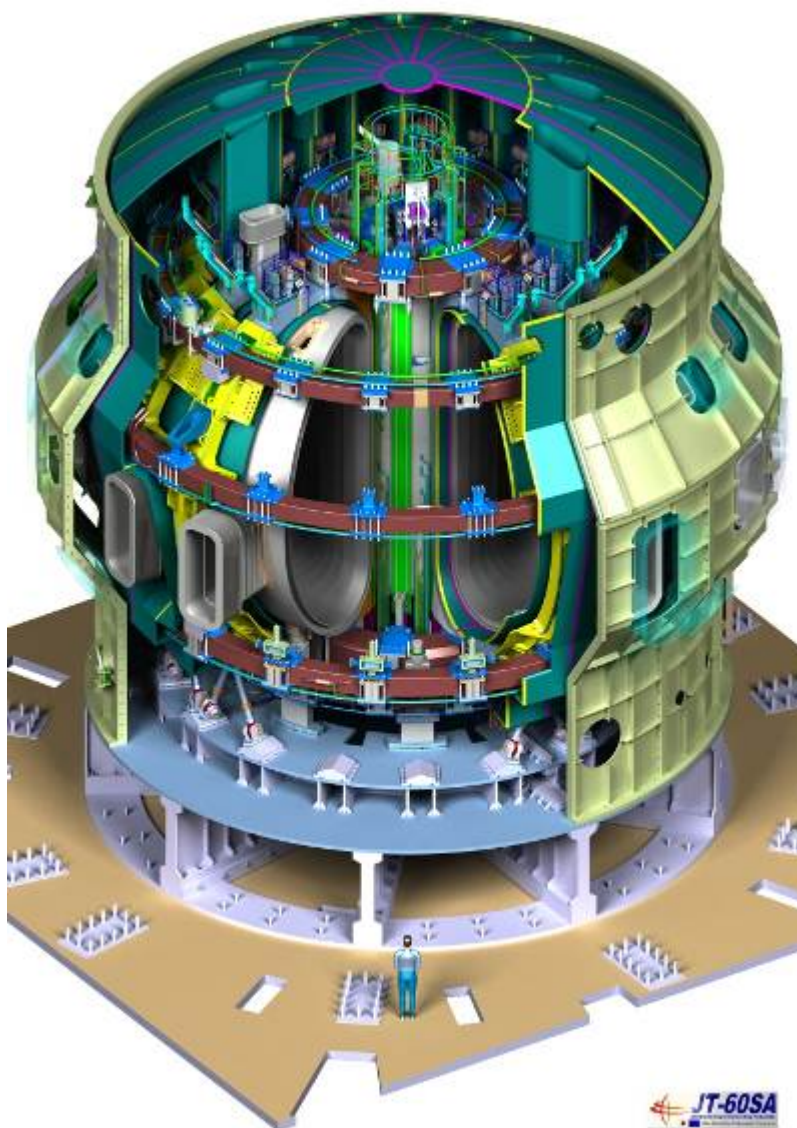


Fusion thermonucléaire : La collaboration franco- japonaise en soutien à Iter

14 novembre 2014



DOSSIER DE PRESSE

Contact Presse : CEA / Service Information-Media

François Legrand | T. +33 (0)1 64 50 20 11

francois.legrand@cea.fr



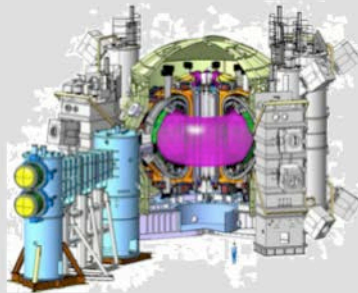
Approche élargie à Iter



Ifmif-Eveda : prototype d'une installation dédiée à la qualification des matériaux pour le réacteur Demo



Iferc : centre de recherche international pour la fusion



JT-60SA : transformation du tokamak japonais JT-60U en tokamak supraconducteur

Sommaire

En route vers l'exploitation industrielle de la fusion	4
L'UE et le Japon dans le partenariat « Approche Élargie »	4
Le rôle du CEA	5
Le rôle des entreprises françaises et européennes	5
Deux grandes étapes pour l'exploitation de la fusion.....	7
Iter : démontrer la faisabilité physique.....	7
Demo : démontrer la faisabilité industrielle	7
Ifmif-Eveda, prototype d'une installation dédiée à la qualification des matériaux pour le réacteur Demo.....	10
Ifmif : caractériser les matériaux pour la fusion.....	10
L'apport du CEA au projet Ifmif	12
Iferc : centre de recherche international pour la fusion	13
Le CSC (Computational Simulation Center).....	13
Le supercalculateur Helios	13
L'apport du CEA au projet Iferc	13
L'utilisation d'Hélios.....	14
JT-60SA : transformation du tokamak japonais JT-60U en tokamak supraconducteur	16
Le projet JT-60SA	16
L'apport du CEA à JT-60SA	16
L'utilisation de JT-60SA.....	21
Point d'étape sur l'Approche élargie	22
Les instituts du CEA dans l'approche élargie.....	25
Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (CEA IRFM)	25
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA Irfu)	25
Institut nanosciences et cryogénie (CEA Inac).....	26
Les entreprises partenaires.....	27

Air Liquide	27
Alstom	28
Alsytom.....	29
Bull	30
Jema.....	32
SDMS	33
Thales.....	34
LGM.....	36
Annexe I : La fusion par confinement magnétique	38
La fusion au cœur des étoiles	38
Créer un plasma de fusion sur Terre.....	38
Le principe du tokamak : Confiner les particules pour créer un plasma.....	39
Principe de fonctionnement d'un réacteur électrogène de fusion nucléaire par confinement magnétique	40
Annexe II : Enjeux scientifiques et technologiques de la fusion par confinement magnétique	41
Consolider les régimes de référence du plasma	41
Qualifier les systèmes d'évacuation de la chaleur	42
Développer les matériaux résistant aux flux de neutrons.....	42
Valider un concept d'alimentation du réacteur en tritium	43
Mettre en œuvre la sûreté intrinsèque du réacteur de fusion.....	43
Annexe III : Point d'étape sur le chantier Iter	45
Un soutien pour l'économie locale	46
Les murs sortent de terre	46
Premiers convois Iter en 2015.....	47
Index	48

En route vers l'exploitation industrielle de la fusion

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 ont signé, en 2007 et pour

une durée de dix ans, un accord baptisé « 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.



Signature de l'Accord sur l'Approche élargie à Iter, Tokyo, 5 Février 2007

L'UE et le Japon dans le partenariat « Approche Élargie »

Les projets inclus dans l'Approche élargie s'inscrivent en complément de tout ce qui est actuellement entrepris à travers le monde pour réaliser Iter. L'Approche élargie englobe trois grands projets de recherche en cours d'implantation au Japon :

- **Ifmif/Eveda**, comprenant, d'une part, l'étude détaillée d'une source d'irradiation de neutrons de 14 MeV, appelée Ifmif, dont l'objectif sera de qualifier pour Demo les matériaux résistants aux neutrons de fusion et d'autre part la validation des composants les plus critiques d'Ifmif au moyen de prototypes.
- **Iferc** (*International Fusion Energy Research Center*) un centre de recherche incluant notamment la mise en place et l'exploitation d'un des plus puissants supercalculateur au monde, dédié à la simulation numérique du comportement du plasma, à l'étude des matériaux et à l'étude du dimensionnement de Demo;
- **JT-60SA**, un tokamak supraconducteur pour étudier la physique des plasmas de fusion en général, et les modes d'opération dits « Avancés », en particulier.

L'organisation Européenne

Pour assurer ses engagements l'Union Européenne s'appuie sur le soutien d'états membres qui participent, sur la base de contributions volontaires, aux projets de l'Approche élargie. Les contributeurs volontaires sont par ordre décroissant d'engagement : la France (46%), l'Italie (24%), l'Espagne (12%), l'Union Européenne (12%), la Belgique (3%), l'Allemagne (3%). Les contributions se font sous la forme de fournitures en nature (composants,

services, main d'œuvre, ...) pour chacun des trois projets de l'Approche élargie. La coordination de l'activité des contributeurs volontaires est assurée au niveau européen par l'Agence Européenne pour Iter : « Fusion For Energy, F4E ».

Le rôle du CEA

Le CEA porte les engagements de la France dans l'accord de l'« Approche élargie », à savoir une participation à hauteur de 70% de la contribution de l'UE dans Iferc, 33% dans Ifmif-Eveda et 42% dans JT-60SA.

Le CEA, par son expertise, a contribué en partenariat avec F4E, les autres contributeurs volontaires européens et l'agence japonaise de l'énergie atomique JAEA (Japan Atomic Energy Agency) au design et à la spécification des principaux composants des projets de l'Approche élargie. Dans le cadre de la fourniture en nature des composants entrant dans la contribution du gouvernement français, il assure la définition des spécifications détaillées, la réalisation, la fourniture et, dans certains cas, la maintenance et l'opération des composants lui incombant. Les fournitures en nature pour l'Approche élargie sont des éléments de hautes technologies et en général de très grandes dimensions. Le niveau élevé de performance, de précision, de qualité et de fiabilité requis font de la réalisation de ces composants des défis technologiques majeurs.

Dans ce cadre, le CEA joue pleinement son rôle de médiateur technologique, de la recherche à l'industrie, en transférant à l'industrie des compétences issues de ses développements internes et en stimulant la R&D de ses principaux partenaires industriels.

Au-delà de ses engagements au titre de l'Approche élargie, le CEA est également impliqué dans le développement du plan de recherche de JT-60SA et dans la préparation de sa mise en service et de son exploitation scientifique.

Le rôle des entreprises françaises et européennes

Le CEA, dans le respect de la procédure de passation des marchés publics, a lancé pour les contrats industriels nécessaires à la réalisation des fournitures en nature, des appels d'offre européens. Le cas de la fourniture du supercalculateur Hélios, pour lequel la concurrence européenne était insuffisante, a fait l'objet d'un appel d'offre international. Ces procédures commerciales ont permis au CEA, d'une part d'obtenir des offres aux conditions techniques et commerciales les plus avantageuses et d'autre part d'évaluer l'attractivité des entreprises de hautes technologies. L'ensemble de ces consultations a mis en évidence le fort potentiel des entreprises françaises de hautes technologies qui, bien que mises en concurrence au plus haut niveau, ont remporté la grande majorité des consultations. Ces entreprises souvent leader dans leurs domaines respectifs s'appuient sur un réseau de sous-traitants français et européens.

L'ensemble des procédures commerciales engagées a été validé par la Commission Consultative des Marchés, CCM, placée auprès du CEA selon les termes du décret du 6 décembre 1952 modifié. La CCM est un organisme indépendant présidé par un haut magistrat de la Cours des Comptes.

- Ainsi, pour le projet Iferc, l'entreprise Bull a fourni et installé à Rokkasho, Japon, le supercalculateur Hélios, elle en assure également

- pour une durée de 5 ans la maintenance et l'exploitation.
- Pour le projet Ifmif/Eveda, l'entreprise Thalès a délivré les amplificateurs radiofréquences de l'accélérateur prototype, l'entreprise Bergoz a fourni les systèmes de mesures faisceau.
 - L'entreprise Air Liquide a fabriqué à Sassenage, Isère, et va installer à Naka, Japon, l'usine cryogénique de JT-60SA.
 - Alstom fabrique, à Belfort, neuf des dix-huit bobines de champ toroïdal de JT-60SA. SDMS fabrique, à Saint-Romans, Isère, les structures de liaison interbobines.
 - L'entreprise Alsyom, à Tarbes, fabrique les pieds supports du système de champ magnétique.
 - L'entreprise JEMA à Lasarté-Oria, Espagne, fabrique des alimentations électriques pour les aimants supraconducteurs de JT-60SA.

Pour coordonner la gestion de l'ensemble des activités et contrats relatifs aux contributions françaises pour JT-60SA, le CEA s'est également appuyé sur la société française LGM pour établir un référentiel qualité commun.

L'implication de la France et de l'Europe dans l'Approche élargie à Iter participe au renforcement au niveau national et européen des compétences clés pour le développement des filières industrielles nécessaires à la définition et à la construction des futurs réacteurs électrogènes à fusion.

Deux grandes étapes pour l'exploitation de la fusion

Iter : démontrer la faisabilité physique

En 2005, sept partenaires, représentant plus de la moitié de la population mondiale¹, ont pris la décision de construire, à Cadarache en France, le tokamak Iter (iter signifie « le chemin », vers le fusion, en latin). Iter sera le premier dispositif expérimental de taille suffisante pour entretenir un plasma en combustion thermonucléaire. Il sera suivi par la construction d'un démonstrateur de réacteur électrogène – Demo-, préalable à un parc de réacteurs industriels à fusion.

Iter doit permettre à la communauté scientifique de démontrer la possibilité d'obtenir et de stabiliser un plasma produisant de l'énergie.

Ses missions :

- consolider la physique des plasmas en combustion thermonucléaire ;
- démontrer la production d'énergie de fusion en produisant 400 MW durant des décharges de 400 secondes avec un gain de fusion de 10 (Une quantité d'énergie de fusion produite 10 fois supérieure à celle injectée dans le plasma) ;
- explorer le régime stationnaire à un gain de fusion de 5 ;
- démontrer la disponibilité des technologies essentielles (aimants supraconducteurs, composants face au plasma, maintenance robotisée...);
- tester des modules de couverture tritigène (pour l'alimentation du réacteur en tritium – voir page 44) ;
- démontrer la sûreté de fonctionnement et le faible impact sur l'environnement de la fusion.

Le combustible nucléaire pour la fusion est composé de deux isotopes de l'hydrogène le deutérium et le tritium. Le deutérium se trouve en abondance dans l'eau. Le tritium n'existe sur Terre qu'à l'état de trace. Toutefois, le tritium peut être produit in situ dans les éléments de couverture du réacteur en faisant interagir les neutrons issus de la réaction de fusion avec du lithium, un élément chimique relativement abondant (33^{ème} élément le plus abondant sur Terre) et largement distribué dans la nature.

Demo : démontrer la faisabilité industrielle

Demo doit permettre aux scientifiques et aux ingénieurs de démontrer la possibilité d'exploiter la fusion pour fournir de l'électricité et de dimensionner un réacteur industriel.

Ses missions :

¹ Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, Inde, Japon, Russie et Union européenne.

- produire de l'électricité ;
- qualifier les matériaux à basse activation et résistants aux neutrons (le flux neutronique intégré sera bien trop faible sur Iter pour mener cette étude de façon approfondie) ;
- démontrer l'autosuffisance tritium : c'est-à-dire produire dans Demo autant de tritium qu'en consommera la réaction de fusion ;
- démontrer la disponibilité nécessaire pour un réacteur électrogène véritablement industriel.

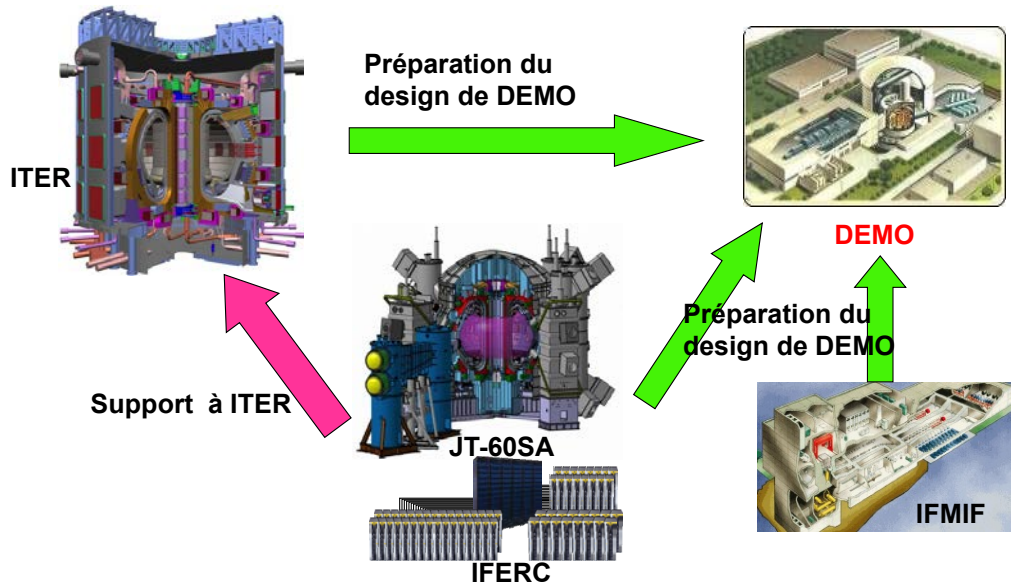
L'Approche élargie : un programme d'accompagnement pour Iter et Demo

Les projets de l'Approche élargie ont pour objectifs :

- 1) de préparer l'exploitation d'Iter
- 2) de compléter le programme de recherche d'Iter
- 3) d'anticiper une partie de la R&D nécessaires au développement du design de Demo, dans l'optique d'accélérer la mise au point d'une filière de réacteurs électrogènes à fusion.

La préparation de l'exploitation d'Iter comprend avec JT-60SA et Iferc :

- La réalisation d'expériences dédiées
- La validation de scénario d'opération
- La simulation numérique des expériences
- La préparation des outils d'analyse des résultats expérimentaux
- La préparation du contrôle des expériences
- La formation des équipes techniques et scientifiques



Intégration de l'Approche élargie dans les étapes de développement de l'énergie de fusion

Le programme de recherche de JT-60SA complète le programme d'Iter dans l'étude de modes d'opération dits « avancés » qui devrait permettre d'atteindre des performances allant au-delà des performances spécifiées pour Iter. Ces modes d'opération avancés sont actuellement moins documentés que ceux retenus pour l'opération d'Iter mais pourraient offrir, s'ils sont validés sur JT-60SA des perspectives intéressantes pour le dimensionnement et l'optimisation de Demo.

Une des dernières briques nécessaires au développement de Demo concerne l'étude et la qualification des matériaux de structure résistants aux neutrons énergétiques de fusion. Dans l'Approche élargie, cette problématique est abordée par la simulation numérique avec Iferc et avec Ifmif/Eveda par le dimensionnement et le prototypage de la source d'irradiation Ifmif, qui pourrait permettre de qualifier des matériaux de nouvelle génération.

Ifmif-Eveda, prototype d'une installation dédiée à la qualification des matériaux pour le réacteur Demo



Ifmif : caractériser les matériaux pour la fusion

La qualification de matériaux capables de résister à l'irradiation intense de neutrons de 14 MeV est le principal objectif du projet d'installation d'irradiation Ifmif (*International Fusion Materials Irradiation Facility*). En préalable à la construction d'Ifmif, la phase d'ingénierie (*Ifmif-Eveda, Engineering Validation and Engineering Design Activities*) est effectuée dans le cadre de l'Approche élargie.

Ifmif vise à qualifier des matériaux avancés résistant aux conditions extrêmes spécifiques des futurs réacteurs à fusion, dont, en premier lieu, Demo. Il sera constitué de deux accélérateurs de deutons de 40 MeV, délivrant en parallèle et en continu leurs faisceaux d'une puissance totale de 10 MW sur une cible en lithium liquide, pour générer le flux intense de neutrons (10^{17} neutrons/s) de 14 MeV. Cette valeur correspond au flux que connaîtront les matériaux de la couverture interne du tokamak de futurs réacteurs comme Demo.

La mise en œuvre du projet nécessite dans un premier temps la construction de prototypes des principaux sous-systèmes. C'est le but d'Ifmif-Eveda qui, outre la fourniture du rapport d'ingénierie d'Ifmif, doit valider le fonctionnement de l'accélérateur, de la cible lithium et des modules de tests à haut flux. Les activités, prévues sur une période de dix ans, sont partagées entre l'équipe de coordination basée à Rokkasho (Japon), où sera installé l'accélérateur prototype (LIPAc), et d'autres équipes réparties entre l'Europe et le Japon.

L'Europe fournit la grande majorité de l'accélérateur prototype, le Japon fournissant essentiellement l'infrastructure pour les essais. Quatre pays européens sont concernés : la France (CEA-Irfu à Saclay), l'Espagne (CIEMAT à Madrid), l'Italie (INFN à Legnaro) et la Belgique (SCK-CEN à Mol). La coordination des études et de la réalisation du LIPAc est assurée par F4E.

Mi-2013 a marqué la fin des études d'ingénierie d'Ifmif qui ont permis de définir les grandes composantes de cette infrastructure : le bâtiment de l'accélérateur, celui contenant la cible de lithium, les cellules de test, les salles de post-irradiation et d'examen des matériaux irradiés, ainsi qu'un bâtiment composé de laboratoires conventionnels et de bureaux. Ces études incluent aussi l'évaluation budgétaire globale du projet, comprenant non seulement la construction et l'exploitation mais aussi le démantèlement de l'installation à la fin de la période d'exploitation.

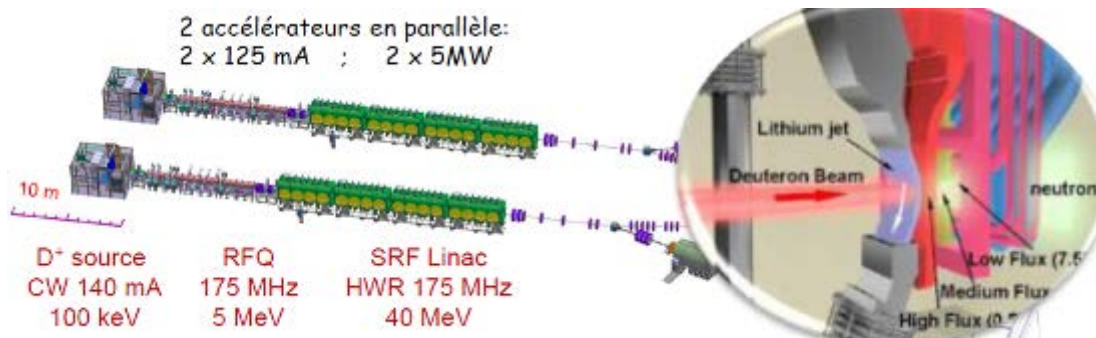


Schéma de principe du double accélérateur d'Ifmif, de la cible en lithium permettant la production de neutrons énergétiques et des cellules blindées pour l'irradiation des matériaux

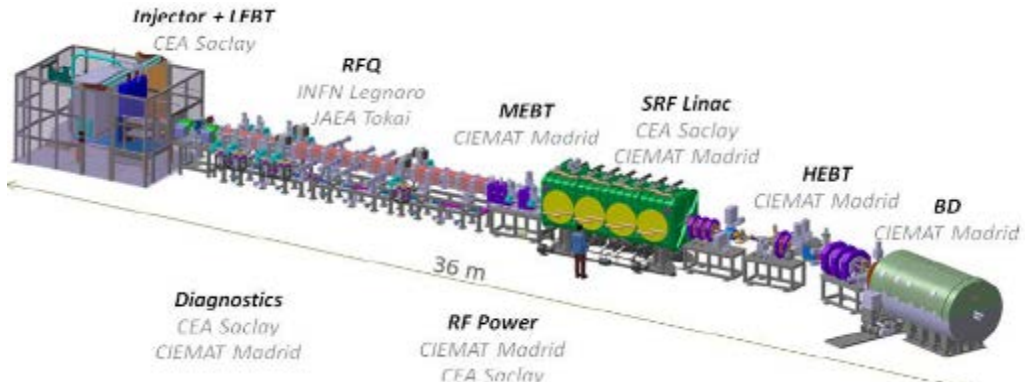
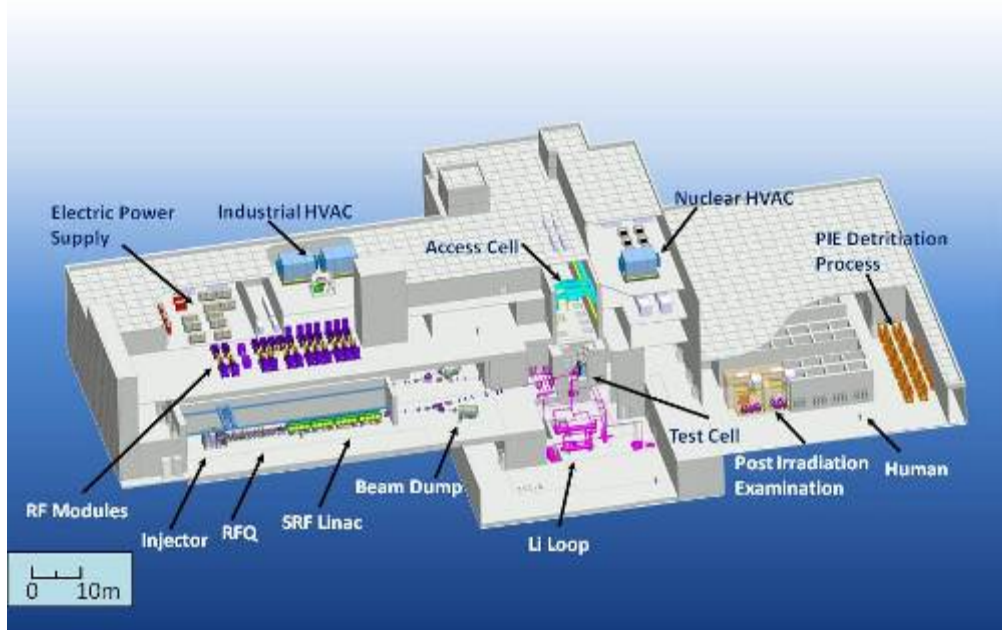


Schéma de principe de l'accélérateur prototype LIPAc en cours de construction à Rokkasho. Les contributeurs des différents composants sont mentionnés.



Infrastructure Ifmif (résultant de l'étude design terminée en 2013) avec accélérateur supraconducteur (SRF-Linac).

L'apport du CEA au projet Ifmif

Le CEA possède une maîtrise internationalement reconnue dans le design et la fabrication de grands accélérateurs de particules. C'est à ce titre qu'il participe activement au dimensionnement des accélérateurs d'Ifmif, en menant en particulier les études sur la dynamique de faisceau qui permettent d'en optimiser le fonctionnement et d'en assurer la protection, et à la réalisation des composants essentiels de l'accélérateur prototype d'Ifmif, le « Linear Ifmif Prototype Accelerator, ou LIPAc». Le rapport de dimensionnement (design) détaillé a été validé en novembre 2013. Les composants prototypes: Injecteurs, diagnostics faisceau et module d'accélération supraconducteur sont pour les deux premiers en cours d'installation à Rokkasho et pour le troisième en phase d'appel d'offre.

Les équipes du CEA ont effectué les tests avec faisceau de l'injecteur du LIPAc en Novembre 2012, au CEA-Saclay. Les résultats ont démontré son bon fonctionnement, puisqu'un faisceau record de 140 mA à 100 keV de deutons (noyaux isotopes de l'hydrogène) en continu a été obtenu, l'émission (représentant la taille du faisceau et son évolution à un endroit donné de l'accélérateur) du faisceau étant meilleure que les spécifications à cycle utile réduit et proche des spécifications en faisceau continu. Le CEA a livré l'injecteur de deutons à Rokkasho en 2013.

Le CEA a aussi mené à bien le développement et la qualification de l'instrumentation faisceau, une série de composants prototypes permettant la caractérisation des faisceaux de particules de haute intensité. Ces composants très spécifiques, qui seront requis pour contrôler le fonctionnement du futur Ifmif par adaptation du faisceau accéléré, ont été livrés en octobre 2014 sur le site de Rokkasho.

Les équipes du CEA étudient aussi l'accélérateur linéaire équipé de cavités accélératrices supraconductrices intégrées sous forme d'un cryomodule, appelé le SRF-Linac. Les réalisations ou appels d'offres des principaux composants sont en cours (coupleurs de puissance RF, cavités supraconductrices, enceinte à vide, écrans thermiques, circuit cryogénique, systèmes d'accord en fréquence, blindage magnétique, ...), et la notification du marché pour la fabrication et la livraison de la station de production cryogénique associée est prévue pour novembre 2014.

En 2015, l'injecteur sera mis en fonctionnement opérationnel sur le site de Rokkasho, une partie de l'instrumentation faisceau sera installée et la fabrication de composants du cryomodule du SRF-Linac et de sa machine cryogénique se poursuivra.

Iferc : centre de recherche international pour la fusion

Le projet Iferc comprend trois volets :

- 1) des actions de R&D et d'études préliminaires pour Demo,
- 2) la mise en place d'une salle de participation à distance pour le suivi des expériences menées sur Iter (le REC : Remote Experimentation Center)
- 3) la mise en place et l'exploitation pour une durée de 5 ans (2012-2016) d'un centre de calcul de classe mondiale (le CSC : Computational Simulation Center) pour les chercheurs japonais et européens.

La plupart des activités se déroulent sur le site de Rokkasho (Japon). La participation du CEA à Iferc se concentre sur le point numéro trois : fourniture, mise en place, exploitation et maintenance du supercalculateur et de ses périphériques. Depuis 2011, le CEA assure, à Rokkasho la direction du CSC.



Le CSC (Computational Simulation Center)

Ouvert aux utilisateurs en janvier 2012, le CSC est organisé autour du supercalculateur Helios fourni par la société Bull dont il constitue le troisième ordinateur d'une puissance dépassant 1 petaflop/s (1 Petaflop/s correspond à un million de milliards d'opérations de calcul par seconde).

Outre le supercalculateur Helios, le CSC dispose d'un système de stockage de données d'une capacité exceptionnelle permettant de conserver les données de simulation (25 Po stockés sur des disques et des bandes).

Le supercalculateur Helios

Helios est utilisé par plus d'une centaine de chercheurs ou de groupes de chercheurs japonais et 300 européens. Son adoption par la communauté fusion a été extrêmement rapide.

Avec une puissance crête de plus de 1,5 pétaflops, Helios était classé en juin 2013 à la douzième place des plus puissants ordinateurs (Top 500) au monde. Il permet aux chercheurs européens et japonais de modéliser les nombreux défis que pose la fusion : comportement du plasma, étude des matériaux, par exemple.

L'apport du CEA au projet Iferc

Le CEA est mandaté par F4E pour mettre en place et exploiter le centre de calcul d'Iferc, jusqu'en 2017. L'organisme a assuré, en liaison étroite avec les communautés utilisatrices ainsi qu'avec JAEA, la définition du cahier des charges, l'expression de besoin et la consultation des fournisseurs potentiels.

L'architecture d'Helios en détail

Le supercalculateur Helios est doté d'une architecture associant initialement 4 410 nœuds de calcul bullx B510, intégrant 8 820 processeurs Intel® Xeon® E5 et développant une puissance de 1,5 pétaflops. Installés en 2014, ses 180 nouveaux nœuds de calcul bullx B515 qui intègrent chacun 2 coprocesseurs Intel® Xeon Phi™ fournissent une puissance additionnelle de plus de 400 téraflops auxquels s'ajoute 90 nœud de calcul bullx B510. Ces évolutions, portent la puissance du système Helios à près de 2 pétaflops.

Au terme d'un appel d'offres international, la société française Bull a été retenue. Elle a conçu et réalisé le supercalculateur Helios mis en service en janvier 2012 et dont la puissance a été accrue en 2014 en le dotant de nœuds supplémentaires Bullx™ intégrant des coprocesseurs de dernière génération Intel® Xeon PHI™. Bull assure également la maintenance et l'exploitation du CSC pour la période 2012-2017

Ces nouveaux coprocesseurs vont permettre aux chercheurs de bénéficier de performances exceptionnelles. Leur architecture massivement parallèle et leur consommation énergétique maîtrisée préfigurent les technologies 'exaflop/s'. Un exaflop/s correspond à un milliard de milliards d'opérations par seconde, soit 500 fois la puissance d'Helios. Les premiers supercalculateurs ayant une puissance d'un exaflop devraient apparaître à partir de 2020. Helios ouvre la voie vers le développement de ces futures machines et permet à l'entreprise Bull de maîtriser ces nouvelles technologies.

Le CEA assure également la Direction du CSC, avec un co-Directeur Japonais, en étroite liaison avec les équipes en charge du centre de calcul du CEA à Bruyères-le-Château (CCRT).



Le supercalculateur Hélios, installé à Rokkasho

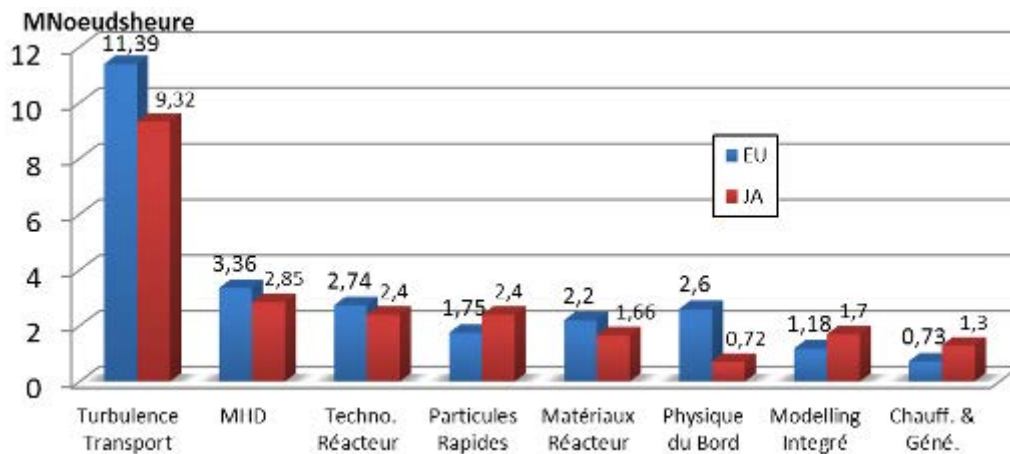
L'utilisation d'Hélios

L'utilisation d'hélios est partagée à 50 % du temps de calcul disponible pour le Japon et 50% du temps de calcul disponible pour l'Europe. Depuis janvier 2012, une communauté scientifique de 400 utilisateurs (300 européens et 100 japonais) exploite intensivement le supercalculateur. Les différents domaines de recherches concernent :

- 1) La physique des plasmas de tokamak (turbulence, transport, MagétoHydroDynamique(MHD), les particules rapides, la physique du plasma de bord, le chauffage du plasma et la génération de courant)
- 2) La technologie des réacteurs et des matériaux
- 3) La modélisation intégrée permettant aussi bien l'analyse intégrée d'expériences réalisées que la simulation d'expériences numériques

pour Iter, Demo et JT-60SA.

Conformément aux attentes de ses promoteurs, le supercalculateur Hélios est devenu le point focal d'une équipe scientifique internationale utilisant quotidiennement, à distance, cette machine, aussi bien depuis l'Europe que depuis tout le territoire japonais. Depuis janvier 2012, trois cycles de calcul intensifs ont été conduits et plusieurs centaines d'articles scientifiques ont été publiés dans diverses revues spécialisées, témoignant du fort dynamisme des équipes impliquées. A lui seul, le cycle de calcul n°2 a généré 120 publications. Le taux d'utilisation d'Hélios varie entre 85% et 90%. En général, le nombre de demandes d'utilisation excède largement les capacités de traitement du supercalculateur (35 millions de nœuds.heure), d'un facteur 1.8 sur le 1^{er} cycle à un facteur 3 sur le prochain cycle de calcul, montrant bien l'engouement des scientifiques pour cet outil dédié.



Répartition du temps de calcul (million de noeuds.heure) entre les domaines de recherche et les contributeurs (Europe/Japon)

helios supercomputer	Cycle 1	Cycle 2	Cycle 3	Cycle 4
Compute period runs from-to	Apr 2012 - Oct 2012	Nov 2012 - Oct 2013	Nov 2013 - Oct 2014	Nov 2014 - Oct 2015
Number of received Proposals	62	82	122	126
total proposals asking (Mnodeh)	65,8	70,6	102,7	107,0
avg asking (Mnodeh)	1,1	0,9	0,8	0,8
overasking vs resource	1,8	2,0	2,9	3,0

Table des demandes d'utilisation du supercalculateur Hélios.

JT-60SA : transformation du tokamak japonais JT-60U en tokamak supraconducteur



Le projet JT-60SA

JT-60SA (SA pour *Super-Advanced*) est une installation expérimentale de fusion destinée à préparer l'exploitation d'Iter et à optimiser les régimes de fonctionnement des réacteurs de fusion qui seront construits après Iter. JT-60SA réutilise les infrastructures du tokamak japonais JT-60-U, à Naka, Japon, dont le démantèlement s'est achevé en janvier 2013. Le tokamak JT-60SA est une machine entièrement nouvelle équipée de bobines supraconductrices. Le programme de recherche de JT-60SA alimentera les études de physique sur des régimes de plasma dans des scénarios dits « avancés » qui pourraient être d'un grand intérêt pour le dimensionnement des réacteurs à fusion. JT-60SA sera le plus grand tokamak mis en service avant le démarrage d'Iter. Il permettra de préparer l'exploitation d'Iter et de former les équipes d'opération et d'exploitation. Il apporte par ses caractéristiques (dimensions, puissance, intégration technologique, capacités opérationnelles,...) un renouvellement important au programme d'accompagnement à Iter reposant actuellement en Europe sur les machines de la génération précédente, c'est-à-dire mises en service dans les années 1980 : Jet, West/Tore Supra, Asdex-upgrade.

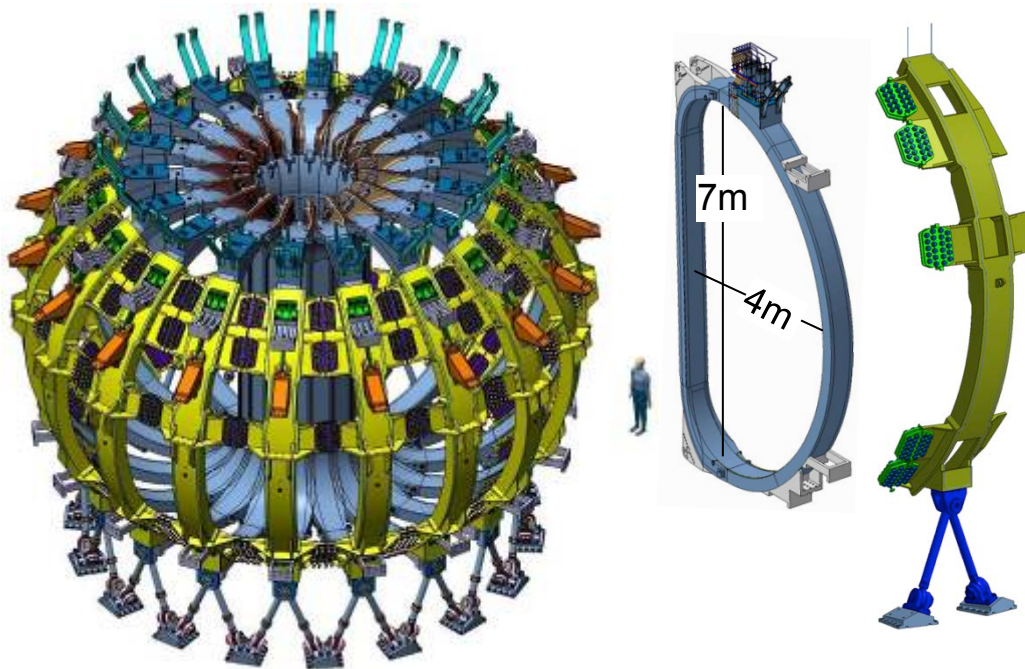
L'apport du CEA à JT-60SA

Après avoir participé activement, avec l'ensemble des partenaires internationaux aux phases de design des composants de JT-60SA, le CEA gère, maintenant, la réalisation des fournitures en nature dont il a la charge.

Ainsi pour JT-60SA, le CEA assure l'approvisionnement :

- de 9 des 18 bobines supraconductrices de champ magnétique toroïdal, ainsi que de l'ensemble des structures mécaniques de support du système de champs magnétique,
- du système cryogénique nécessaire au refroidissement des bobines supraconductrices ,
- de cinq alimentations électriques pour le système de champ magnétique.

Le CEA assure également, à Saclay, le développement, la construction et l'exploitation d'une station cryogénique de tests et de qualifications des dix-huit bobines de champ toroïdal. Il supervisera aussi l'installation, les tests et la mise en service de l'usine cryogénique et des alimentations électriques sur place à Naka.



Echelle des éléments du système magnétique de JT-60SA en cours de fabrication en France

Au terme de consultations internationales, les commandes ont été passées avec des industriels entre 2011 et 2013 et les fabrications sont en cours en France et en Europe. Pour assurer la conformité des fournitures en nature avec les spécifications techniques détaillées, un système d'assurance qualité basé sur les méthodes de gestion de configuration a été développé avec le support de l'entreprise LGM. Ce système qualité est également appliqué par l'ensemble des partenaires industriels du CEA pour JT-60SA.

A Belfort, dans les ateliers d'Alstom, la fabrication des bobines supraconductrices de champ toroïdal, qui a démarré en décembre 2013, après deux années de mise au point des procédés industriels et des outillages dédiés progresse à plein régime en accord avec le planning de fabrication.



ALSTOM
Première bobine en cours de bobinage à Belfort, juillet 2014



Premier bobinage terminé (avant imprégnation), septembre 2014

La première bobine en provenance de Belfort sera livrée à la station d'essai de Saclay dans le courant de l'été 2015.

Au CEA Saclay, l'installation de la station d'essais cryogénique permettant de tester dans les conditions nominales (-269°C, 25700 Ampères) de fonctionnement les 18 bobines de champ toroïdal est maintenant achevée. Les tests de mise en service et de qualification de cette nouvelle plateforme de test appelée CTF, pour « Cold Test Facility » vont commencer en novembre 2014 pour s'achever mars 2015, avec quelques semaines d'avance sur la date de livraison annoncée des premières bobines.



La plateforme 'Cold Test Facility' CTF au CEA Saclay, septembre 2014

Après le test à la CTF, les bobines qualifiées seront assemblées, au CEA Saclay, avec leur structure de liaison, appelée OIS pour « Outer Intercoil Structure ». Ainsi équipé, l'assemblage bobine et structure de liaison sera expédié au Japon. L'activité pré-assemblage commencera en septembre 2015. Actuellement les outillages nécessaires sont en cours d'approvisionnement, et le hall d'assemblage en cours de préparation.

C'est à Saint-Romans, Isère, que la société SDMS fabrique les structures de liaison interbobine. Le contrat avec SDMS a été signé en mars 2013. La

qualification industrielle des procédés de fabrication et de soudage, ainsi que la phase d'approvisionnement des matériaux se sont achevées dans le courant de l'été 2014, permettant le lancement de la fabrication industrielle.



1ère structure de liaison interbobine en cours de fabrication (septembre 2014)

A Tarbes, Haute Pyrénées, la société Alsyom a démarré la fabrication des 18 pieds supports, GS (Gravity Support). La fabrication des composants élémentaires des pieds supports est achevée. La phase d'assemblage et de soudage devrait démarrer début 2015. L'expédition vers le Japon de ces composants s'envisage avant la fin 2015.



Composants élémentaires d'un pied support avant soudage sur les tubes de liaison

A Sassenage, Isère, dans les locaux d'Air Liquide Advance Technologies la fabrication du plus important réfrigérateur cryogénique dédié à la fusion est à ce jour quasiment terminée. Ce système cryogénique assurera le refroidissement à -269°C (4K) de l'ensemble des aimants supraconducteurs du tokamak ainsi que le refroidissement de divers équipements comme les écrans thermiques, les cryopompes, et les amenées du courant servant à l'alimentation électrique des aimants. A ce jour, les tests usine ont été réalisés

avec succès et l'ensemble des colis sera expédié à Naka avant la fin 2014.



Les deux boites froides pour JT-60SA, septembre 2014

A Lasarte-Oria, Espagne, la société Jema a démarré la fabrication de quatre des cinq alimentations électriques de fortes puissances nécessaire au fonctionnement des aimants supraconducteurs de JT-60SA. Le contrat avec la société JEMA a été passé en mars 2013. L'achèvement des études techniques de réalisation industrielle et des phases d'approvisionnement se sont échelonnées dans le courant de l'année 2014. Les fabrications ont démarré en parallèle. Les tests en usine effectués à la puissance nominale s'échelonneront au cours de l'année 2015. L'expédition au Japon est prévue début 2016. Sous le contrôle du CEA l'entreprise Jema assurera aussi sur le site de Naka, l'installation et le test de mise en service dans le courant de l'année 2016.



Armoires de puissance pour deux alimentations électriques en cours d'assemblage par Jema en Espagne, septembre 2014

Au-delà de ses engagements résultant de l'accord sur l'Approche élargie, le CEA pilote aussi, à l'échelle européenne la préparation du programme de recherche scientifique qui sera mené sur JT-60SA ainsi que la préparation de l'opération de la machine et de l'exploitation scientifique du dispositif expérimental.

Le projet JT-60SA offre au CEA une formidable opportunité de participer à l'exploitation technique et scientifique du tokamak le plus performant qui sera mis en service plusieurs années avant le démarrage d'Iter. Ce sera avec le projet West/Tore supra à Cadarache (voir page 44) un moyen pour le CEA de maintenir et de développer ses compétences et ses équipes pour préparer l'exploitation d'Iter.

L'utilisation de JT-60SA

Lorsqu'il sera mis en service en 2019, l'Europe possédera un droit d'exploitation correspondant à 25% du temps de disponibilité de JT-60SA pour conduire ses propres expériences. De plus, l'ensemble des partenaires (JAEA, Institutions de Recherche Japonaises, Europe) disposera d'un accès intégral aux données expérimentales produites sur la totalité du programme de recherche. La définition du programme (plan) de recherche est déjà l'objet d'une intense collaboration entre l'Europe et le Japon.

Point d'étape sur l'Approche élargie



Carte du Japon indiquant les sites JAEC de Naka et de Rokkasho-Mura

Les installations Ifmif-Eveda et Iferc sont implantés sur le site du JAEC (Japan Atomic Energy Agency) de Rokkasho-Mura, Préfecture d'Aomori, dans le nord de l'île de Honshu au Japon. JT60SA est situé à Nakka.



Bâtiments Ifmif/Eveda et Iferc sur le site de Rokkasho

Le site de Rokkasho comprend un bâtiment de bureaux abritant les équipes sur site d'Iferc et d'Ifmif/Eveda, le bâtiment du supercalculateur Helios et de ses auxiliaires, le bâtiment qui abritera l'accélérateur prototype LIPAc actuellement en cours d'installation ainsi qu'un bâtiment pour la R&D sur les matériaux.

Dans le cadre d'Ifmif-Eveda, l'équipe CEA qui participe à l'installation et au démarrage de l'injecteur et de l'instrumentation faisceau évolue de 2 à 6 agents sur la période 2013-2015.

Pour Iferc, depuis septembre 2011, le CEA assure la Direction sur site du CSC. Le Directeur CEA s'assure de la bonne exécution des prestations de maintenance et d'exploitation par les équipes mise en place par Bull sur le site en liaison avec une organisation mise en place par le CEA en France pour lui assurer le support nécessaire. Pour mémoire, la très grande majorité des utilisateurs du CSC font « tourner » leurs codes et exploitent leurs résultats à distance en utilisant les liaisons numériques à haut débit du réseau internationale (10 Gbits/s de bout en bout entre le site Rokkasho de l'approche élargie et les grands laboratoires européens).

La machine JT-60SA et ses auxiliaires sont implantés pour la plupart dans les bâtiments de l'ancien tokamak JT-60U se trouvant sur le site du JAEA de Naka, Préfecture d'Ibaraki. Le site de Naka se trouve à environ 180 km au nord-est de Tokyo, près du port d'Hitachi où transitera la plupart des colis en provenance d'Europe. Les plus gros colis seront constitués par les deux boîtes froides de l'usine cryogénique ~4m de diamètre, 22m de long, 70t et par les bobines supraconductrices 5m de large, 12m de long, 2m de haut pour un poids de 30t.

A Naka la déconstruction de la machine JT-60U s'est achevée en janvier 2013



Vue du hall tokamak à Naka après la déconstruction de JT-60U

De mars 2015 à septembre 2016 une équipe CEA de deux à trois personnes contrôlera l'installation, les essais de qualification et de mise en service de l'usine cryogénique fournie par Air Liquide et des alimentations électriques fournies par JEMA.



Pose des deux premiers secteurs de l'enceinte à vide de JT-60SA, juin 2014

Les instituts du CEA dans l'approche élargie

Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (CEA IRFM)

Installé au CEA Cadarache depuis 30 ans, l'IRFM (irfm.cea.fr) est reconnu par la communauté scientifique internationale pour son expertise sur les plasmas de longue durée et les technologies associées. L'IRFM 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.

L'IRFM opère et ouvre à la collaboration de la communauté fusion française et internationale :

- le tokamak Tore Supra, actuellement en mutation (projet West)
- Des plateformes de R&D et de tests :
 - Cryogénie et Aimants Supraconducteurs
 - Composants Face au Plasma (haut flux, refroidissement actif)
 - Imagerie Visible et Infra-rouge
 - Conception, Ingénierie et Réalité Virtuelle
 - Chauffage et Génération de Courant
 - Robotique en milieu fusion
- Une plateforme complète de simulation :
 - Théorie et Simulation à partir des premiers principes, et calcul Haute-Performance
 - Simulation intégrée, Scenarios plasmas et Dimensionnement réacteur

Le projet West est une évolution du tokamak Tore Supra. Cette installation réunit –cas unique au Monde- l'ensemble des moyens techniques permettant de réaliser des plasmas de longue durée. Sa transformation en West (W-tungstène Environment in Steady-State Tokamak) en fera une plateforme de test pour Iter.

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA Irfu)

Basé au CEA Saclay, l'Irfu (irfu.cea.fr) mène des programmes de recherche pour les domaines de l'astrophysique, la physique nucléaire et la physique des particules. Dans ces domaines, l'Irfu participe aux programmes scientifiques ainsi qu'à la conception, la réalisation et la mise en œuvre de l'instrumentation lourde. Les ingénieurs de l'Irfu ont ainsi conçu et réalisé des composants supraconducteurs essentiels du LHC, le grand accélérateur du Cern et de ses deux plus grandes expériences Atlas et CMS.

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 magnétiques pour des réacteurs de fusion et pour des machines d'imagerie médicale à très haute résolution.

Institut nanosciences et cryogénie (CEA Inac)

L'Inac (inac.cea.fr), institut de recherche fédératif CEA-UJF, est un acteur majeur de la recherche fondamentale sur la matière condensée, la matière molle et la cryogénie, à Grenoble.

La majorité de ses activités en physique, chimie et à l'interface avec la biologie se regroupe sous la bannière des nanosciences. Les programmes de l'institut se déploient dans plusieurs domaines stratégiques dont la cryogénie pour le spatial et les grands instruments de la physique (Tore Supra, CERN). Les compétences du Service des Basses Températures ont de longue date été mises au service du développement de la cryogénie pour la fusion et les grands instruments, et en particulier pour le développement du système cryogénique de Tore Supra. Cette compétence reconnue pour le dimensionnement des systèmes cryogéniques de forte puissance a été mise à contribution pour la définition et le suivi de réalisation de l'usine cryogénique de JT-60SA délivrant une puissance frigorifique d'environ 10 kW équivalent à 4,5 K (soit $-268^{\circ}\text{C}^{\circ}$) et devant gérer les pics de charge thermique générés par le fonctionnement pulsés du tokamak. L'Inac possède aussi une longue expertise dans le domaine des injecteurs de glaçons (« pellets ») de deutérium solide. L'injection à haute vitesse (qq 100m/s) de petits glaçons (10mg) est un des moyens d'injecter le « combustible » de la fusion directement dans le cœur des plasmas de tokamaks (Tore Supra, Jet, ...).

Les entreprises partenaires

Air Liquide



Air Liquide advanced Technologies

Leader mondial des Hautes Technologies dans le domaine des gaz, Air Liquide advanced Technologies opère dans des secteurs d'activité aussi variés et pointus que l'Aéronautique, l'Espace, la Marine, la Recherche scientifique, l'Hydrogène énergie, mais également la Chimie et la Pharmacie, l'Electronique et l'Optoélectronique. Filiale du Groupe Air Liquide, advanced Technologies est un pôle de développement technologique dédié à l'exploration de nouveaux marchés par l'innovation.

Advanced Technologies c'est aussi :

- Plus de 50 ans d'expérience technique, industrielle et commerciale, une référence en matière d'expertise de séparation des gaz, réfrigération très basse température, liquéfaction, analyse et contrôle de la qualité, traitement, stockage et distribution des gaz
- Une entité basée en France (Sassenage, près de Grenoble) et 4 implantations internationales : Allemagne, États-Unis, Chine et Japon
- Un centre d'essais unique en Europe (16 zones d'essai, 5 laboratoires et 2 blockhaus)
- Plus de 700 collaborateurs

Air Liquide et le projet JT-60SA

Le projet JT-60SA, (Japan Torus - Super Advanced) au Japon, est une expérience de fusion qui vise à optimiser les performances des plasmas de fusion en support du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Air Liquide advanced Technologies est chargée de concevoir et construire l'équipement cryogénique nécessaire à son bon fonctionnement.

L'équipement cryogénique est composé de quatre compresseurs hélium en cycle fermé, d'une boîte froide de réfrigération, d'une boîte froide de distribution d'hélium, d'un système de gestion des fluides hélium et azote, d'un système de stockage gazeux et liquide, ainsi que de lignes de distribution des fluides cryogéniques associées. Conçus et fabriqués dans nos ateliers à Sassenage, les différents équipements du système cryogénique vont être acheminés au Japon. L'équipement cryogénique complet sera installé, démarré et testé par nos experts courant 2015, avec le support des équipes Air Liquide japonaises.

Pour mémoire, le projet JT-60SA, est une infrastructure de type Tokamak basée à Naka au Japon. JT-60SA est piloté par l'Agence japonaise de l'énergie atomique (JAEA) et l'organisme français CEA. Aussi, pour mener à bien ce projet, les équipes d'Air Liquide ont notamment travaillé en étroite collaboration avec les équipes du CEA. Plus largement, les équipes d'Air Liquide et du CEA ont mené conjointement plusieurs projets ces dernières années dans les domaines de la recherche scientifique, de la transition énergétique et du spatial.

Air Liquide et la cryogénie scientifique

Air Liquide dispose d'une expertise unique au monde dans le domaine des basses températures et d'un savoir-faire reconnu dans la conception, la fabrication et l'installation de systèmes de liquéfaction et de réfrigération de gaz de grandes capacités (LHC du CERN en Suisse, ITER...).

Air Liquide a également fourni les équipements cryogéniques des plus grands projets de fusion de ces 25 dernières années (Tore Supra, JET, SST-1, KSTAR).

Contact presse :

Direction de la Communication advanced Business & Technologies

Dominique Lecocq - Tél. : +33 (0)4 76 43 64 97

Air Liquide advanced Technologies / 2 rue de Clémencièrre -BP 15 / 38360 Sassenage – France

www.airliquideadvancedtechnologies.com

A propos du groupe Air Liquide

Leader mondial des gaz, technologies et services pour l'industrie et la santé, Air Liquide est présent dans 80 pays avec plus de 50 000 collaborateurs et sert plus de 2 millions de clients et de patients. Oxygène, azote et hydrogène sont au cœur du métier du Groupe depuis sa création en 1902. L'ambition d'Air Liquide est d'être le leader dans son industrie, en étant performant sur le long terme et en agissant de façon responsable.

Pour Air Liquide, ce sont les idées qui créent de la valeur sur le long terme. L'engagement et l'inventivité permanente des collaborateurs du Groupe sont au cœur de son développement.

Air Liquide anticipe les enjeux majeurs de ses marchés, investit à l'échelle locale et mondiale et propose des solutions de haute qualité à ses clients, ses patients, et à la communauté scientifique.

Le Groupe s'appuie sur sa compétitivité opérationnelle, ses investissements ciblés dans les marchés en croissance et l'innovation pour réaliser une croissance rentable dans la durée.

Le chiffre d'affaires d'Air Liquide s'est élevé à 15,2 milliards d'euros en 2013. Ses solutions pour protéger la vie et l'environnement représentent environ 40 % de ses ventes. Air Liquide est coté à la Bourse Euronext Paris (compartiment A) et est membre des indices CAC 40 et Dow Jones Euro Stoxx 50.



JT60SA - TOKAMAK Bobines de champs
Toroidal en cours de fabrication
- 5,2 Tesla
- 20 Tonne



22*26mm

Supraconducteur en Niobium Titane refroidi à 4 Kelvin par de l'hélium supercritique. Courant nominal 25.7 kA.



Belfort est l'un des 6 sites industriels d'Alstom Thermal Power en France

ALSTOM Thermal Power

**BELFORT, CENTRE D'EXCELLENCE:
CENTRALES CLES EN MAIN, SERVICES,
FABRICATION TURBINE VAPEUR ET
ALTERNATEUR, CONTROLES COMMANDES,
AIMANTS SUPRACONDUCTEURS**

Contexte

Berceau historique du groupe Alstom, le site de Belfort est aujourd'hui un centre d'excellence mondial pour la production d'énergie de puissance.

Alstom investit fortement en R&D pour développer des produits et services innovants toujours plus performants et relever de nombreux défis industriels et sociétaux du futur.

Déjà dans les années 1970 Alstom s'est engagée à Belfort dans le domaine de la supraconductivité par l'étude, la construction et le test, en partenariat avec EDF, d'un rotor turbo-alternateur supraconducteur refroidi à l'hélium liquide. Ce rotor de puissance apparente de 400MVA a été testé en rotation à 3000 T/mn pendant plusieurs semaines. Il constitue encore aujourd'hui un record inégalé. Alstom a fabriqué également par le passé des câbles supraconducteurs réputés.

De nombreux autres projets en collaboration avec les laboratoires de recherche ont bénéficié du savoir faire et des capacités industrielles du groupe. On peut citer ALEC le premier dipôle supraconducteur et son cryostat fabriqué par l'industrie pour le compte du CEA en 1972, les 126 quadripôles pour le projet HERA à Hambourg. Cette expérience a été mise à profit pour la fabrication de 500 aimants compacts pour imagerie médicale dans les années 90.

La référence majeure pour Alstom est la fabrication de 416 dipôles supraconducteurs qui forment 1/3 des 27 km de l'anneau du LHC, au CERN.

Les aimants supraconducteurs sont complexes et uniques, la production génère des défis industriels relevés par les ingénieurs Alstom qui bénéficient des apports d'une étroite collaboration avec les Instituts du CEA.

La technologie développée, souvent novatrice, enrichit les méthodes de fabrication Alstom.

Approche Elargie

Dans le cadre de l'approche élargie, Alstom a répondu à l'appel d'offres lancé par le CEA pour la fourniture de 9 bobines toroidales.

L'approche élargie a permis à Alstom de travailler étroitement avec la communauté des chercheurs du domaine de la fusion. Outre la fierté pour Alstom de s'inscrire dans un des plus ambitieux et stratégiques programmes de recherche de la communauté mondiale, ces relations ont permis aux experts de progresser vers une approche industrielle standardisée, mais encore flexible qui permettra de répondre efficacement aux besoins futurs dans un environnement concurrentiel.

Pour Alstom, l'opportunité de démontrer la qualité de ses solutions, dans un environnement de grande capacité industrielle est une étape intéressante et valorisante vis-à-vis des donneurs d'ordre internationaux.

La mise en œuvre d'outillages et de procédés spéciaux de bobinage, de soudage et d'imprégnation est susceptible d'être réutilisée pour de nouveaux appels d'offres.

Contrats en cours

Iseult : Aimant IRM 11,74 Tesla
Corps entier, Accord de collaboration avec IRFU/CEA, Centre Neurospin du CEA à Saclay.

JT60SA 9 Bobines de Champs toroidales IRFM CEA

Développement du prototypage d'aimants très haut champs, Niobium Etain, Nb3Sn, dans le cadre du projet High Luminosity du LHC – CERN

Contacts Alstom :

Christopher English - +33 141492685 - +33 661604154 - christopher.english@alstom.com
Raphaël Hinninger (Site Belfort) - +33 384552275 - +33 680483131 - raphael.hinninger@alstom.com

ALSYOM

ALCEN

Créée en janvier 2011 suite à la cession par Sagem Défense et Sécurité de ses activités liées au programme Laser MegaJoule (LMJ) au Groupe Alcen, Alsyom est spécialisée dans la conception, la réalisation, l'intégration et l'installation sur site de systèmes mécaniques et opto-mécaniques complexes.

Elle emploie aujourd'hui plus de 110 personnes sur les sites de Tarbes (conception, fabrication, intégration en salle blanche), La Barp (intégration sur site pour les besoins du LMJ), Saclay (intégration de systèmes complexes pour accélérateurs de particules) et Argenteuil (Directions Programmes et Commerciale) et réalise un chiffre d'affaires annuel de l'ordre de 20 million d'euros.

Forte de l'expertise acquise depuis plus de vingt ans sur le LMJ, et tout en poursuivant et diversifiant ses activités sur ce grand programme, Alsyom base aujourd'hui sa stratégie de développement sur l'international et plus précisément sur les très Grandes Infrastructures de Recherche. La société dispose pour ce faire de forts atouts industriels et technologiques (ateliers d'usinage et de soudage de pièces mécaniques de très grandes dimensions et précision, complexe de salles blanches de plus de 1500 m²) et d'une expérience unique dans la gestion de grands projets de haute technologie. Elle peut en outre s'appuyer sur les synergies et les apports technologiques d'autres sociétés du Groupe Alcen (www.alcen.com).

Cette stratégie a rapidement été validée par la signature de contrats significatifs notamment :

- avec le CEA dans le domaine des accélérateurs de particules (assemblage, en environnement propre, de sections supraconductrices sur le site de Saclay pour le compte de la machine européenne XFEL en cours de construction à Hambourg)
- avec l'Institut de Physique de Nucléaire de Magurele (Roumanie) et en partenariat avec divers instituts de recherche (dont le CNRS) et industriels européens, dans le domaine des lasers de puissance (source de gamma basée sur l'interaction entre électrons et laser)

Le projet ITER et son approche élargie entrent également et tout naturellement dans cette stratégie. Alsyom est ainsi impliquée dans deux projets de réalisation de prototypes pour ITER :

- pour le compte d'Areva, la réalisation de sous-ensembles mécaniques de panneaux de première paroi assurant la protection thermique du réacteur
- pour le compte de F4E, et en partenariat avec la société allemande RI-Research Infrastructures, la réalisation de la pompe cryogénique de pré-série garantissant les conditions de pression idéales à la réaction de fusion.

La réalisation des « Gravity Supports » du réacteur JT-60SA constitue la première expérience d'Alsyom dans le cadre de l'Approche Elargie. Ce contrat, signé avec le CEA DSM en 2013, consiste en la réalisation des composants mécano-soudés et mécano-assemblés constitutifs des 18 ensembles supports. Les prestations associées vont de l'approvisionnement matière (acier inoxydable et cuivre) à l'assemblage final en passant par l'usinage et le soudage de certaines pièces élémentaires.

Il constitue une opportunité unique pour Alsyom de démontrer son potentiel technologique et industriel au Japon, pays à la pointe dans les domaines du nucléaire et des grandes infrastructures de recherche.

IFMIF-EVEDA, autre pilier de l'approche élargie, représente une autre forte opportunité d'activité pour Alsyom, notamment au niveau de l'accélérateur de protons nécessitant la mise en œuvre de savoir-faire similaires à ceux développés en collaboration avec le CEA dans le cadre du projet X-FEL.



Bull



Participation de Bull à l'approche élargie

Bull, société du groupe Atos, est un leader des solutions de calcul haute performance (HPC). Depuis 2005, Bull a démontré sa capacité à proposer des systèmes HPC au meilleur niveau mondial et à fournir des machines classées dans le Top10 mondial d'une très grande efficacité et fiabilité. Bull est le seul acteur Européen à maîtriser cette technologie HPC qui est stratégique à la fois pour la recherche, l'industrie et de nombreux défis sociétaux. Pour ce faire, Bull investit fortement en R&D pour développer des solutions innovantes toujours plus performantes et efficaces. Cette recherche bénéficie des apports d'une étroite coopération avec le CEA qui est un acteur clé de ce secteur en Europe. En plus de cette recherche Bull dispose d'experts capables d'aider les utilisateurs à tirer le meilleur parti des machines et des équipes apportant des services professionnels autour de l'exploitation des grands systèmes HPC. Au total c'est plus de 600 experts de haut niveau qui donnent à Bull cette position unique en Europe et sa capacité à offrir les meilleures solutions HPC.

Dans le cadre de l'approche élargie, Bull a répondu à l'appel d'offres lancé par le CEA en coordination avec F4E pour la fourniture d'un système de visibilité mondiale (performance « petaflopique », c'est-à-dire supérieur à un million de milliards de calculs par seconde) pour la communauté de la fusion nucléaire. La solution proposée par Bull, approuvée par JAEA et le chef de projet IFERC, a été choisie face à des offres concurrentes japonaises et américaines. Bull a installé fin 2011 à Rokkasho une machine, nommée Helios, d'une puissance de 1,5 petaflops avec 15 Poctets de stockage. Cette machine opérationnelle dès le début de 2012 a démontré sa capacité à répondre aux besoins des utilisateurs travaillant sur la simulation de la fusion aussi bien en Europe qu'au Japon. Les retours des utilisateurs sont très positifs et ils apprécient particulièrement la performance du système, son bon équilibre entre puissance de calcul et gestion des données, sa grande fiabilité, la capacité à exécuter des travaux mobilisant un très grand nombre de cœurs de calcul, et la compétence des équipes de support. Devant ce succès, en 2014, la puissance d'Helios a été augmentée pour offrir encore plus de performance aux utilisateurs et leur permettre de préparer les codes de la communauté fusion aux architectures des futurs supercalculateurs.



Le supercalculateur Helios

L'approche élargie a permis à Bull de travailler étroitement avec la communauté des chercheurs du domaine de la fusion. Outre la fierté pour Bull d'être associé à un des plus ambitieux et stratégiques programmes de recherche de la communauté mondiale, ces relations ont permis de s'assurer que les architectures de Bull sont bien adaptées pour exécuter très efficacement les codes de simulation des plasmas. Cette expertise est extrêmement utile pour concevoir les futures architectures de Bull et s'assurer qu'elles répondront bien aux exigences de ce type de codes qui représentent une classe d'applications importante en HPC.

Cette initiative entre l'Europe et le Japon a également permis à Bull de développer ses contacts au Japon. Ce pays a également une forte expérience dans le domaine du HPC et maîtrise cette technologie. Pour Bull la reconnaissance de la qualité de ses solutions par des utilisateurs japonais est une étape intéressante qui ne peut qu'aider à développer la notoriété des offres de Bull.

L'installation de la machine Helios a aussi permis de démontrer la capacité de Bull à maintenir un grand système HPC, et plus généralement un centre de calcul complet, incluant maintenance et opération, sur un autre continent que l'Europe. Cet élément est clé pour le développement de Bull sur le marché mondial. Cette expérience a notamment été utile pour convaincre le Brésil de faire confiance à Bull pour installer son infrastructure nationale de calcul haute performance.

La fourniture de la machine Helios dans le cadre de l'approche élargie est donc une opération très positive pour Bull, qui, nous l'espérons, a apporté et continue d'apporter un instrument efficace de recherche pour la communauté de la fusion nucléaire.

Jema



Description de l'entreprise

Jema Energy conçoit et fabrique des convertisseurs d'électronique de puissance pour différents secteurs tels que: les centrales électriques, l'industrie pétrolière et gazière, la physique des plasmas, les accélérateurs de particules, le ferroviaire et les énergies renouvelables.



Avec une Orientation Client, Jema développe des systèmes et des solutions sur mesure qui répondent aux exigences spécifiques de chaque projet. Ce sont des solutions innovantes à haut contenu technologique.

L'objectif de Jema Energy est d'être une entreprise internationale leader dans la fourniture de solutions sur mesure basées sur l'électronique de puissance.

La société regroupe les branches d'activités suivantes:

- Systèmes ASI (convertisseurs AC-DC avec batteries)
- Les énergies renouvelables (onduleurs solaires, systèmes de stockage d'énergie, réseaux intelligents)
- Electronique (solutions électroniques pour les bus classiques et 100% électriques)
- Convertisseurs (alimentations de haute puissance, compensation de puissance réactive)

Chiffres clés:

- Créé en 1953.
- Siège à San Sebastian, Espagne avec des bureaux aux Etats-Unis, Brésil et Mexique.
- Intégrée dans le Groupe Irizar (3500 salariés et 500 M€ de CA annuel).
- Certifications ISO-9001, ISO-14001 et OHSAS-18001.
- 110 employés, plus de 60% dédiés à la recherche et développement de nouveaux produits.

Projet JT-60SA

Depuis plus de 25 ans, Jema a fourni des équipements pour les installations de recherche sur la fusion nucléaire tels que: JET (Royaume-Uni), TJ-II (Espagne), W7-X (Allemagne), SST-1 (Inde), TCV (Suisse) et MAST (Royaume-Uni).

Le contrat avec le CEA donne la possibilité à JEMA de participer à un projet de fusion nucléaire prestigieux tel que le JT-60SA et a renforcé notre position comme fabricant de convertisseurs de puissance pour les installations de fusion nucléaire.

Relation avec le CEA

Une collaboration étroite avec le CEA est indispensable en raison de la complexité technique et organisationnelle du projet. En particulier, en intégrant de nombreux intervenants internationaux, le projet JT-60SA nécessite un système de gestion du projet de haut niveau. De plus, le transfert d'expériences et de connaissances techniques est essentiel pour garantir l'atteinte des objectifs du projet.

SDMS, société indépendante de 120 personnes, est fabricant d'équipements et de sous-ensembles réalisés à partir de métaux nobles (aciers inoxydables, aluminium, cuivre, titane, zirconium, niobium,... et leurs alliages respectifs).

SDMS, dépositaire de la marque "la chaudronnerie blanche®" est spécialisée dans la réalisation d'assemblages mécano-soudés, par soudage classique TIG/MIG/plasma ou par faisceau d'électrons (FE) et par brasage sous vide.

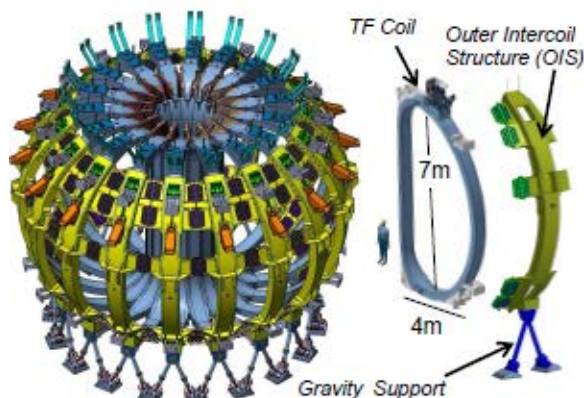
SDMS intervient dans les domaines de l'énergie et du nucléaire ainsi que pour les grands équipements de recherche (accélérateurs de particules, tokamaks, synchrotrons, cyclotrons,...).

Ces compétences s'étendent aux techniques du vide et de l'ultra-vide, de la cryogénie des très basses températures, et à la réalisation de cavités supraconductrices.

Ces réalisations concernent des équipements spécifiques, prototypes ou petites séries, développés sur cahier des charges fonctionnels du client, avec respect des codes de constructions, normes, et contraintes particulières en assurant les exigences de traçabilité à tous niveaux.

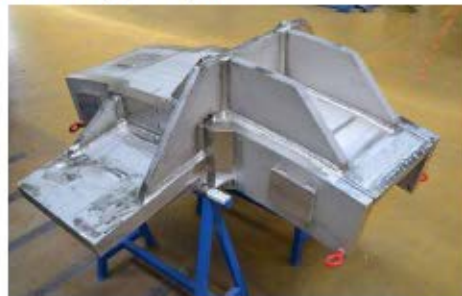
SDMS est qualifiée ISO 9001 et ISO 14001, certifiée KTA-1401 et EN-ISO 3834-2 pour les techniques de soudage.

Dans le cadre de l'Approche Elargie d'ITER, SDMS a été sollicitée par son client CEA pour la réalisation des 18 structures de support des aimants TF supraconducteurs du Tokamak JT-60SA.



Système magnétique de JT-60SA, Bobines (TF Coil), OIS (Outer Intercoil Structure) et GS (Gravity Support)

Cette fabrication passe par la réalisation d'outillages spécifiques et d'une maquette de qualification (un tiers d'un corps complet de la structure). Cette maquette permet de valider les paramètres de soudage faisceau d'électrons, de soudage TIG/MIG, de contrôle des soudures par ultrasons et de prendre en compte les déformations pour en anticiper l'impact.



Maquette (1/3 à l'échelle 1 du corps d'un OIS)

Cette maquette est également utilisée pour qualifier la procédure de relâchement des contraintes mécaniques par la méthode de vibrations.

Compte tenu des résultats satisfaisants obtenus, SDMS a validé en mai 2014 la production de la tête de série des 18 corps OIS : roulage des tôles, soudure des flancs par faisceau d'électrons, préusinage de la forme en U des OIS et soudage TIG/MIG des plaques renforts.

Entre chaque étape de soudure puis en fin d'assemblage, l'ensemble du corps est usiné pour respecter les tolérances géométriques finales.

La livraison des 18 structures devrait s'échelonner jusqu'en fin 2015.



Usinage de l'OIS tête de série



Thales bénéficie de 60 ans d'expérience dans la conception et la fabrication de tubes électroniques et de détecteurs radiologiques. Ses produits et solutions se trouvent au cœur de nombreux systèmes de haute technologie : satellites, grands instruments de recherche fondamentale et appliquée (accélérateurs de particules, tokamak, stellerators), radars ou équipements d'imagerie médicale de pointe.

Thales dispose pour ces activités de huit centres de production dotés de moyens importants de conception, de fabrication et de test, conçus sur mesure. Les équipes techniques maîtrisent des procédés et méthodes de réalisation de produits souvent uniques au monde. Ce dispositif multi-sites est complété par un important réseau de vente et de services en proximité directe des clients.

Thales est depuis de nombreuses années un partenaire de la recherche en fusion nucléaire, présent sur tous les systèmes de chauffage cyclotroniques et hybrides. A ce titre, nous développons et fabriquons de nombreux types de sources de puissance radiofréquence dans les gammes VHF (<300MHz) et ondes millimétriques (<300GHz). Les tubes à grilles et les gyrotrons fabriqués en France équipent de nombreux laboratoires de référence internationale comme TORE-SUPRA à Cadarache, l'EPFL en Suisse, le FZK en Allemagne, ou le JET au Royaume-Uni. Plus récemment, nous nous sommes engagés dans le développement et la fabrication de sources de neutres (troisième modalité de chauffage ou de diagnostic sur ITER) et dans la fourniture d'équipements RF complets. Fort de notre expérience sur le projet LMJ, nous proposons également des solutions multi-technologiques pour répondre aux besoins spécifiques des programmes de fusion à travers le monde, tel ITER.

Thales est aussi un acteur incontournable dans le monde de la physique des particules. Ses klystrons et ses tubes à grille amplifient les ondes RF directement exploitables dans les accélérateurs linéaires et circulaires. Le CEA à Saclay, le GANIL à Caen, l'ESRF à Grenoble et le CERN sont utilisateurs quotidiens de nos solutions.

Relativement à l'approche élargie d'ITER, Thales est présent sur LIPAc (démonstrateur IFMIF) en cours d'installation à Rokkasho. Cet accélérateur utilise des tétrodes fabriquées sur notre site de Thonon comme sources de puissance RF à 175MHz.

Pour toutes ces réalisations, nous travaillons dès la conception en étroite collaboration avec les différents laboratoires de recherche dans le domaine de la fusion. Pour la production de composants ou de solutions multi technologiques, nous nous appuyons sur un réseau mondial de PME et ETI. Thales joue ainsi un rôle d'intégrateur maître d'œuvre permettant de garantir sur le long terme la réalisation de ces solutions.

Notre collaboration avec le CEA*

- La technologie est au cœur de notre collaboration avec le CEA. Le CEA/LETI est notre partenaire institutionnel français de référence dans le domaine de l'imagerie médicale par RX. A titre d'exemple, une collaboration établie depuis une quinzaine d'années a permis la mise au point de détecteurs de RX à base de CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

NEWS

DIRECTION DE LA COMMUNICATION | CORPORATE COMMUNICATIONS

Thales Microwave & Imaging Sub-systems – 2 rue Marcel Dassault – 78141 Vélizy Cedex- France
www.thalesgroup.com/mis

THALES

- Le CEA/DSM est aussi notre client/partenaire pour le développement de composants clés dans le domaine de la fusion et des accélérateurs.
- Le CEA/DAM est notre client de référence dans le domaine des grands projets pour le nucléaire et un partenaire potentiel pour le développement de nouvelles technologies autour des neutrons, grâce à l'expérience acquise en maîtrise d'œuvre des grands projets sur le programme Simulation de la France (LMJ, Epure).

* Outre le cofinancement de thèses de doctorat



Présentation de la société

La société LGM, créée en 1991, réalise des activités de conseil et de formation dans les principaux domaines suivants :

- Le Management de Programme, de la qualité et de l'organisation industrielle,
- Le Soutien Logistique Intégré, Maintien en Condition Opérationnelle et Ingénierie documentaire
- La Sûreté de Fonctionnement et la Sûreté Nucléaire,
- L'ingénierie des systèmes critiques.

La stratégie

La stratégie de LGM vise à offrir à ses clients une démarche d'ensemble dans le management et la conception de systèmes liés aux grands projets industriels de haute technologie, avec une politique de niches métiers dans lesquelles un leadership est recherché au travers d'une politique d'innovation volontariste.

Une réelle chaîne de valeur industrielle, technique et organisationnelle est créée par une combinaison originale de ces niches permettant à LGM de se positionner sur des marchés de maîtrise d'œuvre déléguée. Cette démarche d'ensemble est particulièrement nécessaire dans le domaine des hautes technologies, compte tenu de l'évolution rapide des techniques et des méthodes concernées.

Grâce à cette stratégie de positionnement, les ingénieurs et techniciens de LGM appliquent, au fil des projets qui leur sont confiés, les méthodes les plus à la pointe de la technologie.



Collaboration avec le CEA sur le projet JT-60SA

LGM travaille depuis plus de quinze ans avec le CEA sur ses grands programmes de Recherche et Développement. Depuis 2009, LGM apporte son expertise au CEA afin de lui permettre d'optimiser la structuration projet et les processus de gestion associés adaptés au cadre collaboratif international exigeant du projet JT-60SA. LGM assure également une assistance pour le management des délais, des coûts, des risques et de la qualité avec la direction CEA du projet JT-60SA.

Sur un projet complexe tel que JT-60SA, LGM a mis en place des outils et méthodes pour la gestion des exigences et la gestion de la configuration des systèmes développés.

Les exigences formalisent l'expression des besoins et engagements des parties prenantes, elles sont au cœur du processus de développement des systèmes. L'ingénierie des exigences consiste, au travers de méthodes, règles et processus, à :

- Etablir et maintenir un référentiel unique d'expression des besoins,
- Démontrer la satisfaction des besoins et des engagements tout au long du cycle de vie,
- Assurer la traçabilité complète des exigences, en gérer les évolutions et allocations.

La mise en place et le suivi de la gestion de la qualité, en général, et de la gestion des exigences, en particulier, permettent aujourd'hui au CEA d'optimiser le suivi des contrats et l'atteinte des objectifs de performances et de qualité nécessaires au succès du projet JT-60SA.

LGM (siège) 13 avenue Morane Saulnier 78140 Vélizy-Villacoublay
www.lgm.fr - Tél : 01.30.67.08.00

Annexe I : La fusion par confinement magnétique

Produire une grande quantité d'énergie en toute sécurité avec très peu de combustible, tel est l'enjeu de la fusion par confinement magnétique.

En théorie, la fusion de moins d'un kilo par jour de deutérium et de tritium produirait la chaleur nécessaire à la production de 1 000 MW d'électricité en continu, soit ce que l'on réalise aujourd'hui dans une centrale thermique à partir d'environ 5 000 tonnes de combustibles fossiles². Le combustible employé pour la fusion est abondant et équitablement réparti sur la planète ; il pourrait être produit à partir de l'eau de mer.

La fusion du deutérium et du tritium (D-T) produit un noyau d'hélium, un neutron et libère de l'énergie. Dans un tokamak, le noyau d'hélium reste confiné dans le plasma où il cède son énergie par collision. 80% environ de l'énergie produite par la réaction est emportée hors du plasma par le neutron. Elle est absorbée par les parois du tokamak, la transformant en chaleur. Cette chaleur peut être récupérée pour produire de l'électricité.

La fusion au cœur des étoiles

La réaction de fusion nucléaire se déroule au cœur des étoiles. À des températures extrêmes, de l'ordre de millions de degrés celsius, la matière se présente alors sous forme de plasma. Dans ce quatrième état de la matière où elle n'est ni solide, ni liquide, ni gazeuse, la matière est comparable à une « soupe » où noyaux et électrons ne sont plus liés et circulent librement. Bien que rare sur Terre, il s'agit de l'état le plus commun de la matière dans l'Univers. Dans un plasma, deux noyaux « légers » qui se percutent à grande vitesse peuvent fusionner, créant un noyau plus lourd. Lors de cette réaction, la masse des produits de fusion est inférieure à la somme des masses des éléments de départ : cette différence de masse est libérée sous forme d'énergie, selon la formule d'Einstein $E=mc^2$... énergie à l'origine de la chaleur qu'émet le Soleil.

Dans le cœur des étoiles, il faut faire appel à des réactions impliquant quatre noyaux d'hydrogène pour former des noyaux plus lourds, et libérer l'énergie de fusion de l'hydrogène en hélium.

Créer un plasma de fusion sur Terre

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 contenant respectivement un proton et un ou deux neutrons.

² Un réacteur nucléaire de type REP (réacteur à eau pressurisée) de 1 000 MW consomme pour sa part environ 25 tonnes de combustible / an.

Cette réaction produit un noyau d'hélium, aussi appelé particule alpha (α), et un neutron doté d'une grande énergie cinétique.

- Les particules α , particules chargées, restent confinées dans le plasma et transmettent leur énergie en collisionnant avec les autres particules. Ainsi, les particules α contribuent à « l'autochauffage » du plasma.
- Le neutron, sans charge électrique, n'est pas confiné : il est arrêté dans la paroi de l'installation. Son énergie cinétique est transformée en chaleur. Dans un réacteur, elle sera récupérée et transformée pour fournir de l'électricité. Le neutron est également utilisé pour régénérer *in situ* le tritium, et éviter ainsi toute manipulation en dehors de l'enceinte de confinement.

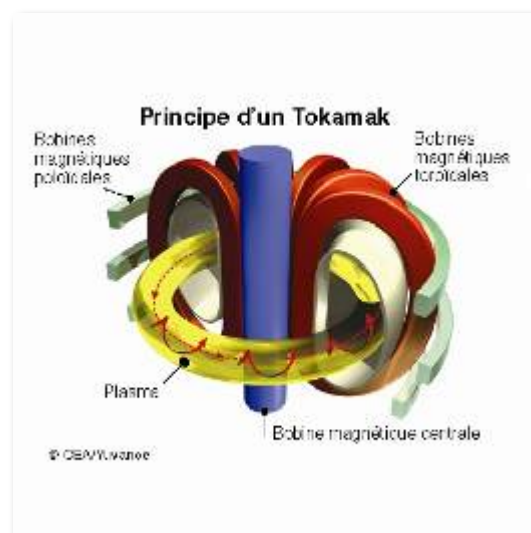
Le principe du tokamak : Confiner les particules pour créer un plasma

À la fin des années 1960, la communauté scientifique, à commencer par les scientifiques russes, précurseurs en ce domaine, a développé une machine capable de créer et confiner un plasma chaud (150 millions de °C) dans une cage magnétique, en forme d'anneau (ou « tore ») : le tokamak, pour « *Toroidalnaya Kamera Magnitnymi Katushkami* ».

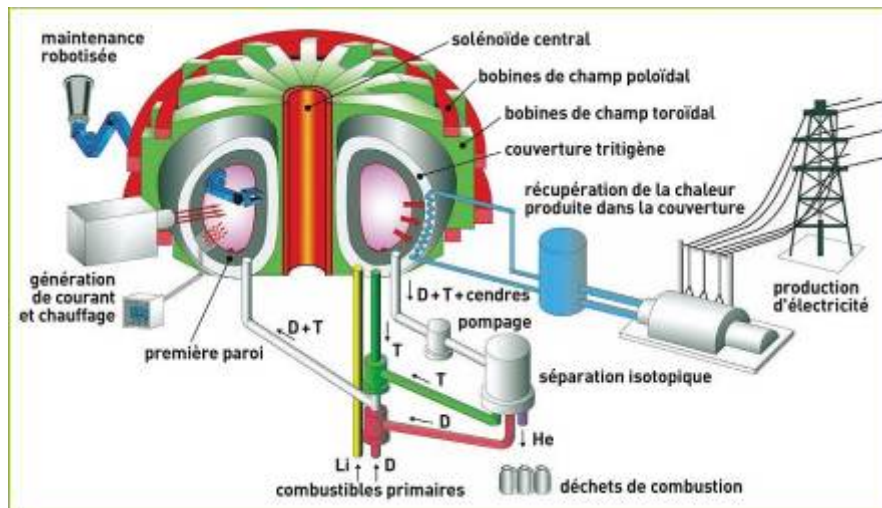
Le plasma est confiné à l'aide d'une superposition de champs magnétiques :

- Le champ magnétique toroïdal dont l'intensité est de l'ordre de 100 000 fois le champ magnétique terrestre. Il est créé par les bobines magnétiques toroïdales.
- Le champ magnétique poloïdal créé, en induisant dans le plasma un courant de plusieurs millions d'ampère, par l'intermédiaire de la bobine magnétique centrale.
- un ensemble d'aimants horizontaux appelés bobines poloïdales assurant l'équilibre du plasma, sa position, sa forme et le contrôle du courant.

Le champ magnétique résultant à l'intérieur de l'enceinte du tokamak est un champ en forme d'hélice.



Principe de fonctionnement d'un réacteur électrogène de fusion nucléaire par confinement magnétique



Le principe de fonctionnement d'un réacteur électrogène sera proche de celui d'un réacteur expérimental. Néanmoins, comme dans une centrale thermique fonctionnant au gaz, le réacteur de fusion devra être alimenté en continu en combustible deutérium (D)-tritium (T).

Le deutérium est largement présent sur Terre mais ce n'est pas le cas du tritium. Celui-ci sera produit à l'intérieur de la machine à partir d'une « couverture tritigène » constituée à base de lithium (Li). Sous l'effet des neutrons issus de la réaction de fusion, le lithium générera suffisamment de tritium pour compenser celui qui aura été « brûlé » par les réactions de fusion. Un système de pompage et de séparation isotopique permettra de récupérer le deutérium et le tritium pour les réinjecter dans le système.

Le réacteur sera ensuite classiquement couplé à un circuit alimenté par un fluide caloporteur, qui transportera la chaleur produite par les neutrons issus de la fusion jusqu'à un générateur de vapeur qui, à son tour, alimentera les turbines pour produire de l'électricité.

Annexe II : Enjeux scientifiques et technologiques de la fusion par confinement magnétique

Une vision globale du programme fusion menant à la production d'électricité a été développée par la communauté « fusion » européenne sous forme d'une feuille de route qui explicite les étapes qui permettront de faire d'Iter un succès tout en préparant Demo.

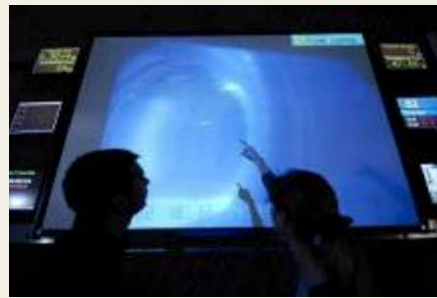
Consolider les régimes de référence du plasma

La communauté scientifique étudie les processus physiques à l'œuvre, et en particulier les instabilités liées aux turbulences du plasma. En effet, l'énergie apportée au plasma pour le chauffer aux températures thermonucléaires est à l'origine d'instabilités du plasma qui peuvent provoquer des interruptions de fonctionnement.

Comprendre et maîtriser ces turbulences suppose à la fois d'approfondir les connaissances en physique des plasmas mais aussi de développer des instruments de mesure (diagnostic) permettant la validation expérimentale de la modélisation.

Les phénomènes de turbulence restent encore extrêmement difficiles à modéliser : il s'agit en effet d'un problème multi-échelle aussi bien spatial que temporel se déroulant dans un milieu très complexe : fortes températures, milieu magnétisé, densités de courant élevées... Durant ces dernières années, l'augmentation de performance des supercalculateurs a permis des progrès considérables dans cette compréhension. Avec l'arrivée prévisible de supercalculateurs au niveau de l'Exaflops, il sera possible dans peu de temps de prendre en compte l'ensemble des échelles gouvernant la turbulence et donc d'en comprendre les mécanismes intimes.

Dans le cadre de l'Approche élargie, ces sujets sont abordés par la simulation à Iferc et expérimentalement sur le tokamak JT60-SA.



Etude des paramètres d'un plasma depuis la salle de contrôle-commande de Tore Supra, au CEA IRFM (2008). © P.Stroppa/CEA

Qualifier les systèmes d'évacuation de la chaleur

La mise au point des systèmes d'évacuation de la chaleur produite par le plasma constitue un enjeu en termes de choix et de mise en œuvre des matériaux utilisés.

Quand un plasma est maintenu sur de longues durées, les composants qui lui font face doivent évacuer de très importantes quantités de chaleur. La zone d'interaction entre le plasma et la paroi qui supporte les flux de chaleur et de particules les plus intenses se situe au niveau du plancher de la chambre à vide, zone appelée le divertor. Le flux de chaleur peut y atteindre 10 à 20 MW/m², c'est-à-dire près du quart du flux de chaleur présent à la surface du Soleil.

Seuls quelques très rares matériaux sont capables de fournir les conditions de conductivité de la chaleur et de supporter les contraintes et les fortes températures, pendant les quelques dizaines d'années d'exploitation d'un tokamak. Ces matériaux existent, mais ont encore besoin de qualification et de caractérisation dans un environnement de tokamak en opération, en particulier dans l'optique de leur utilisation sur Iter.

C'est l'enjeu du programme d'accompagnement West conduit par le CEA IRFM sur le tokamak Tore Supra, à Cadarache.

Développer les matériaux résistant aux flux de neutrons

Les matériaux de structure du tokamak doivent non seulement résister à la chaleur mais aussi à l'irradiation intense issue du plasma.

Les neutrons très énergiques de la réaction de fusion (14 MeV - Méga électron-volt) qui bombardent la paroi du réacteur fragilisent les matériaux qui la constituent. Ils peuvent déplacer les atomes et perturber le réseau cristallin du matériau, ou réagir avec les atomes et engendrer une production de gaz (hydrogène et hélium) en leur sein.

Cet enjeu constitue un verrou technologique clair pour la communauté scientifique, motivant un programme de recherche dédié par les partenaires d'Iter.

Pour aborder expérimentalement cette question et mettre au point les matériaux ayant la tenue adéquate, une source intense d'irradiation par des neutrons de 14 MeV est nécessaire. L'infrastructure Ifmif, regroupant la source de neutrons et les aires expérimentales, a été proposée dans ce but. Le programme du projet d'Ifmif-Eveda de l'Approche élargie vise à étudier

Le projet WEST

Le projet WEST – pour *Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak* - consiste à installer et tester un tel divertor au sein de Tore Supra, qui se transforme ainsi en banc d'essai pour Iter. De par sa configuration particulière qui lui permet de réaliser des plasmas de longue durée, notamment grâce au refroidissement « actif » des composants, Tore Supra constitue une base unique d'expérimentation des matériaux face au plasma, avant leur assemblage sur Iter. Avec le projet WEST, Tore Supra devient une plateforme de tests pour un composant « critique » d'Iter, le divertor en tungstène activement refroidi.

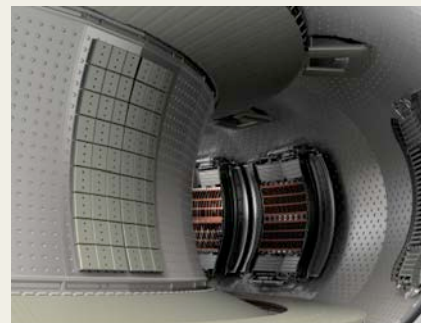


Image virtuelle du tokamak Tore Supra configuré pour le projet West. © CEA

puis à valider les différents systèmes permettant la construction d'Ifmif.

Valider un concept d'alimentation du réacteur en tritium

Dans la perspective d'un réacteur industriel de fusion, un autre enjeu réside dans la capacité d'assurer l'auto-alimentation de la machine en tritium, fermant ainsi en interne le « cycle du combustible ». En effet, le tritium, de par sa période radioactive courte (12,3 années) est un élément très rare sur Terre : la production naturelle est de 0,2 kilo / an et l'inventaire actuel du tritium mobilisable sur Terre est d'environ 19 kilos. Le tritium utilisé dans une centrale à fusion devra donc être produit par la centrale elle-même.

Sur cet enjeu, le programme Iter lui-même permettra d'avancer un choix d'options technologiques. La démonstration intégrée de l'auto-suffisance en tritium sera l'une des missions de Demo.

Mettre en œuvre la sûreté intrinsèque du réacteur de fusion

Dans un réacteur à confinement magnétique, une légère altération de l'un ou l'autre des paramètres de la décharge plasma provoque l'arrêt immédiat de la réaction. Tout risque d'emballement est donc exclu. De plus, le réacteur de fusion est alimenté de façon continue en combustible gazeux : il suffit d'interrompre cette alimentation pour que la réaction s'arrête en une fraction de seconde.

Les « risques nucléaires » liés à l'utilisation du tritium³, radioactif, et à l'activation progressive du revêtement interne de la chambre à vide de la machine par les neutrons, sont identifiés et pris en compte tant dans la conception de la machine que dans les règles qui s'appliqueront à son exploitation et à son démantèlement. Le concept des couvertures tritigènes permet que le « cycle du combustible » soit limité à l'enceinte de la machine : cela exclut les problèmes que pourrait poser le transport du tritium.

La réaction de fusion, très différente de la réaction de fission, ne produit aucun élément comparable aux « produits de fission ». Aucun déchet de haute activité à vie longue ne résultera de l'activité des réacteurs de fusion. Il y aura en revanche production de déchets de très faible activité (20% du volume total), de faible et moyenne activité à vie courte (75%) et, en faible quantité (5%), des éléments de moyenne activité à vie longue. Ces déchets ne sont que ceux provoqués par l'activation de l'installation elle-même.

³ Le tritium a une période relativement courte de 12,3 ans et se désintègre en émettant un électron de faible énergie : 5 millimètres d'air ou une simple feuille de papier suffisent pour l'arrêter et il ne peut traverser la peau. Il ne peut donc endommager les cellules de l'organisme qu'à condition d'être inhalé ou ingéré. Il ne présente aucune toxicité chimique.

La mise au point de matériaux à faible activation et résistants aux neutrons de 14 MeV, permet d'envisager qu'une centaine d'années après la mise à l'arrêt d'un réacteur de fusion, la radiotoxicité des matériaux qui constituent l'installation sera redescendue à un niveau proche de la radioactivité naturelle.

Cette problématique est partie intégrante de la problématique matériaux étudiée par les partenaires d'Iter. Elle fait aussi partie des programmes de R&D sur Demo. Dans le cadre de l'Approche élargie des études numériques sont conduites sur le supercalculateur Helios. Au-delà de l'Approche élargie, c'est aussi l'objectif du programme Ifmif de tester expérimentalement de nouveaux matériaux (SiC/SiC, RAFM, alliage au vanadium, ...)

Annexe III : Point d'étape sur le chantier Iter

Le choix du site de Cadarache pour l'accueil d'Iter remonte à juin 2005. Cinq ans plus tard, le site viabilisé et aménagé sur une centaine d'hectares par l'Agence Iter France au titre des engagements pris par la France et l'Europe, est mis à la disposition d'*Iter Organization* en juillet 2010.

L'aménagement de cet espace où se construit actuellement le complexe tokamak représente un investissement de 155 millions d'euros financés à environ 30 % par l'Europe et à 70 % par la France. Depuis 2007 les travaux de génie civil ont représenté un investissement de 330 millions d'euros, pour l'aménagement du site de construction, l'adaptation des routes entre Berre et Cadarache et la construction de l'école internationale à Manosque.

La construction des bâtiments techniques a été lancée en 2010. Le premier de ces bâtiments (bâtiment *PF Coil Building*, en haut à droite sur la photo) a été livré par l'agence domestique européenne (F4E) en 2012. C'est dans ce bâtiment que seront assemblées les plus grandes pièces du tokamak : les bobines de champ poloïdal. Les opérations de bobinage y seront notamment réalisées.



© *Matthieu COLIN / Iter Organization*

En juin 2012, au terme d'un an de travaux comprenant l'adaptation de la ligne très haute tension qui alimente l'installation Tore Supra et la construction du poste d'alimentation électrique, le site Iter a été connecté au Réseau de Transport d'Electricité (RTE).

Le 9 novembre 2012, le décret d'autorisation de création de l'installation nucléaire de Base (INB) Iter a été signé : il constitue une étape majeure dans le lancement de la construction de l'installation de recherche à Cadarache.

Les bâtiments du Siège Iter (en bas à gauche sur la photo) ont été inaugurés par Geneviève Fioraso, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et Günther H. Oettinger, commissaire européen, le 17 janvier 2013. D'une superficie d'environ 20 500 m², le bâtiment de bureaux offre une capacité d'accueil de 500 personnes, des salles de conférences et de réunions, ainsi que la salle du conseil et un restaurant d'entreprise dimensionné pour pouvoir servir un millier de repas.

Un soutien pour l'économie locale

Depuis le lancement du programme Iter, plus de 700 appels d'offres ont été lancés par les différents acteurs du projet. Plus de la moitié des contrats de travaux et de prestations de services attribués ont été remportés par des entreprises françaises pour un montant de plus de 2,1 milliards d'euros. Sur ces 2,1 milliards d'euros investis en France, les entreprises régionales ont remporté 1,6 milliards d'euros de contrats (dont 1,3 milliards pour les entreprises implantées dans le département d'implantation du projet (Bouches-du-Rhône). L'attribution de ces contrats est également générateur d'emplois en particulier dans les sociétés d'ingénierie et de conseils. A l'instar de la société Soditech qui a créé une cinquantaine d'emplois depuis la mise en place de ses premiers contrats auprès d'ITER en 2006.

Les murs sortent de terre

La construction de l'installation de recherche a démarré. Les fondations parasismiques ont été terminées le 27 août 2013. Elles sont constituées de deux dalles en béton armé de 1,5 mètre d'épaisseur entre lesquelles ont été construits 493 plots parasismiques. Ce bâtiment de sept étages s'élèvera sur 73 mètres de hauteur (13 mètres au-dessous du niveau de la plateforme et 60 mètres au-dessus). La construction des murs du complexe tokamak (bâtiment de l'installation de recherche, bâtiment diagnostics et bâtiment tritium) a été lancée en novembre 2014. Leur réalisation nécessitera 16 000 tonnes de ferrailage, 150 000 m³ de béton et 7 500 tonnes d'acier pour les structures des bâtiments.



© Agence Iter France. *Vue de la zone centrale où sera positionné le cœur de la machine. Sur les côtés, structures métalliques des murs des bâtiments dans l'attente des opérations de coulage de béton.*

La construction du hall d'assemblage a également été engagée en parallèle. Sa structure d'acier (6 000 tonnes) s'étendra sur 100 mètres de long et 60 mètres de large et reposera sur 44 piliers (comme sur la photo ci-dessous).



© Agence Iter France. Premiers piliers du hall d'assemblage.

Premiers convois Iter en 2015

Une remorque autopropulsée préfigurant les convois XXL (800 tonnes) a permis de tester à deux reprises plus d'une trentaine d'ouvrages d'art (ponts, voûtes, canalisations...) sur les 104 km de l'itinéraire Iter spécialement aménagé entre Berre l'Etang et Cadarache. Ces campagnes de mesures ont été organisées en septembre 2013 et en avril 2014 dans le cadre de répétitions générales permettant de valider l'organisation mise en place.

Les premiers convois très exceptionnels sont attendus en janvier 2015. Certains composants (180 tonnes) transiteront en trois nuits tandis que d'autres, d'une taille plus modeste (97 tonnes), parcourront l'itinéraire en une nuit. Près de 220 convois très exceptionnels dont une trentaine de près de 800 tonnes sont attendus sur les cinq prochaines années.

Index

- Ciemat : Centre de recherche sur l'énergie et l'environnement, organisme public espagnol - www.ciemat.es
- CSC : Computational Simulation Center (au sein d'Iferc)
- CTF : Cold Test Facility
- Demo : démonstrateur de la faisabilité industrielle de la fusion
- Euratom : Communauté européenne de l'énergie atomique
- Eveda : Phase d'ingénierie d'Ifmif à Rokkasho au Japon
- F4E : Agence Européenne pour Iter - fusionforenergy.europa.eu
- Hélios : supercalculateur du centre Iferc à Rokkasho au Japon
- Iferc : International Fusion Energy Research Center, à Rokkasho au Japon
- Ifmif : source d'irradiation de neutrons de 14 MeV,
- Inac : Institut nanosciences et cryogénie (CEA-UJF) - inac.cea.fr
- INFN : Institut national de physique nucléaire italien - www.infn.it
- Irfu : Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA) - irfu.cea.fr
- IRFM : Institut de Recherche sur la Fusion par confinement Magnétique (CEA) - irfm.cea.fr
- Iter : démonstrateur de la faisabilité physique de la fusion
- JAEA : Japan Atomic Energy Agency - www.jaea.go.jp
- JT-60SA : tokamak supraconducteur à Naka au Japon.
- OIS : Outer Intercoil Structure
- SCK-CEN : centre d'étude belge sur l'énergie nucléaire - www.sckcen.be
- WEST : Tungsten (W) Environment in Steady-State Tokamak, modification du tokamak Tore Supra du CEA – west.cea.fr

