

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

SACLAY, LE 30/01/2018

Fusion nucléaire : la collaboration franco-japonaise en soutien à l'ITER

DOSSIER
DE
PRESSE

CONTACTS PRESSE

www.cea.fr

[@CEA_Recherche](https://twitter.com/CEA_Recherche)

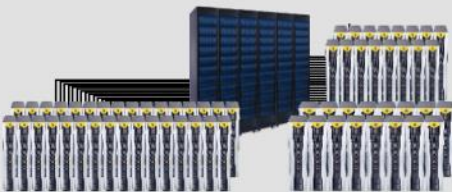
Guillaume MILOT
guillaume.milot@cea.fr
Tél. : 01 64 50 14 88



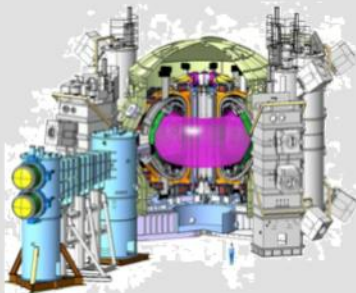
Approche élargie à Iter



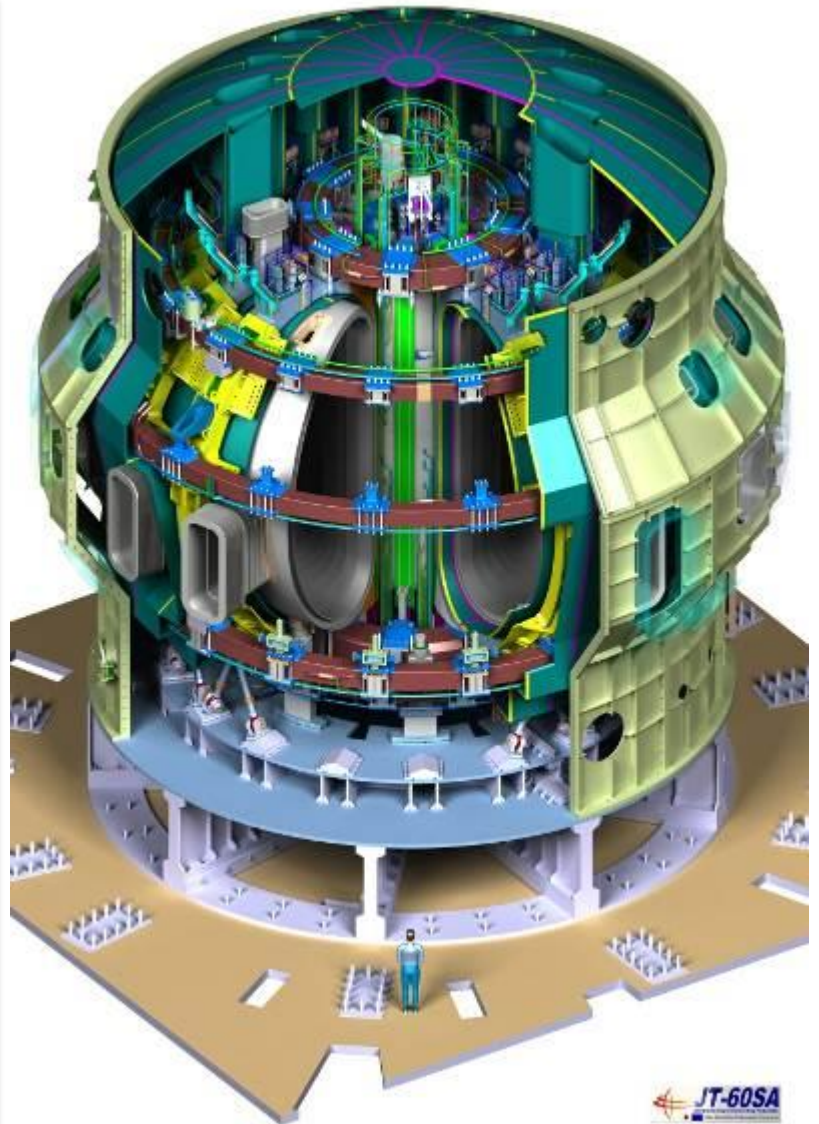
IFMIF-EVEDA : prototype d'une installation dédiée à la qualification des matériaux pour le réacteur Demo



IFERC : centre de recherche international pour la fusion



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



JT-60SA

Crédits page de couverture :

1^{ère} illustration : *Opération d'insertion du premier assemblage (bobine + structure de liaison externe) sur JT-60SA. Les bobines sont enfilées sur la structure de l'enceinte à vide de JT-60SA comme des perles sur un collier* © CEA/DR

2^{ème} illustration : *La construction des bâtiments ITER a démarré en 2010. Au cœur de la plateforme, le Complexe tokamak prend forme.* © EJF Riche, décembre 2017

© EJF Riche

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| <i>En route vers l'exploitation industrielle de la fusion</i> | 5 |
| L'UE et le Japon dans le partenariat « Approche élargie » | 5 |
| Le rôle du CEA..... | 5 |
| Le rôle des entreprises françaises et européennes | 6 |
| <i>Deux grandes étapes pour l'exploitation de la fusion</i> | 8 |
| Iter : démontrer la faisabilité scientifique..... | 8 |
| Demo : démontrer la faisabilité industrielle..... | 8 |
| <i>Ifmif-Eveda, prototype d'une installation dédiée à la qualification des matériaux pour le réacteur Demo</i> | 10 |
| Ifmif : caractériser les matériaux pour la fusion..... | 10 |
| L'apport du CEA au projet Ifmif | 11 |
| <i>Iferc : centre de recherche international pour la fusion</i> | 13 |
| Le CSC (Computational Simulation Center) | 13 |
| Le supercalculateur Helios | 13 |
| L'apport français au projet Iferc | 14 |
| L'utilisation d'Helios | 15 |
| Les perspectives | 16 |
| <i>JT-60SA : transformation du tokamak japonais JT-60U en tokamak supraconducteur</i> | 17 |
| Le projet JT-60SA..... | 17 |
| L'apport du CEA à JT-60SA..... | 18 |
| Des bobines supraconductrices <i>made in France</i> | 18 |
| L'utilisation de JT-60SA | 24 |
| <i>Les instituts du CEA dans l'approche élargie</i> | 26 |
| Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (CEA IRFM) | 26 |
| Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA Irfu)..... | 26 |
| Institut nanosciences et cryogénie (CEA Inac)..... | 26 |
| <i>Les entreprises partenaires</i> | 28 |
| Air Liquide | 28 |
| Alsion | 29 |
| Atos-Bull..... | 30 |
| GE en France | 31 |
| Jema | 32 |
| LGM..... | 33 |
| SDMS | 34 |
| Thales..... | 35 |
| <i>Annexe I : La fusion par confinement magnétique</i> | 35 |

| | |
|---|-----------|
| La fusion au cœur des étoiles | 36 |
| Créer un plasma de fusion sur Terre | 36 |
| Le principe du tokamak : Confiner les particules pour créer un plasma | 36 |
| Principe de fonctionnement d'un réacteur électrogène de fusion nucléaire par confinement magnétique | 38 |
| <i>Schéma du principe de fonctionnement d'un réacteur électrogène de fusion nucléaire par confinement magnétique.</i> | 38 |
| <i>Annexe II : Enjeux scientifiques et technologiques de la fusion par confinement magnétique</i> | 39 |
| Consolider les régimes de référence du plasma..... | 39 |
| Qualifier les systèmes d'évacuation de la chaleur | 39 |
| Développer les matériaux résistant aux flux de neutrons | 40 |
| Valider un concept d'alimentation du réacteur en tritium | 40 |
| Mettre en œuvre la sûreté intrinsèque du réacteur de fusion..... | 41 |
| <i>Annexe III : Le chantier ITER</i> | 42 |
| Un chantier hors norme..... | 42 |
| Un soutien pour l'économie locale | 42 |
| Des convois lter aux dimensions du projet | 42 |
| <i>Annexe IV : Index</i> | 44 |

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 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 comprend trois grands projets de recherche implantés au Japon :

- ▶ **Ifmif/Eveda** (*International Fusion Materials Irradiation Facility/ Engineering Validation and Engineering Design Activities*), 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 supercalculateurs 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** (*JT 60 Super Advanced*), 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'institut de recherche sur la fusion QST¹ 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 fait 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.

- ▶ Ainsi, pour le projet Iferc, l'entreprise Atos-Bull a fourni et installé à Rokkasho, Japon, le supercalculateur Hélios, elle en a assuré également pour une durée de 5 ans la maintenance et l'exploitation.
- ▶ Pour le projet Ifmif/Eveda, l'entreprise Thales 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, puis installé à Naka, Japon, l'usine cryogénique de JT-60SA. Air Liquide a aussi livré et installé à Rokkasho le cryoplant pour Ifmif/Eveda
- ▶ GE Power (anciennement Alstom) a fabriqué à Belfort, dix des vingt bobines de champ toroïdal produites pour JT-60SA. SDMS a fabriqué, à Saint-Romans, Isère, les structures de liaison interbobines externes.
- ▶ L'entreprise Alsym, à Tarbes, a fabriqué les pieds supports du système de champ magnétique.
- ▶ L'entreprise JEMA à Lasarté-Oria, Espagne, a fabriqué cinq 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.

¹ National Institutes for Quantum and Radiological Science and technology.



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.

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.

Deux grandes étapes pour l'exploitation de la fusion

Iter : démontrer la faisabilité scientifique

En 2005, sept partenaires, représentant plus de la moitié de la population mondiale², ont pris la décision de construire, à Cadarache en France, le tokamak Iter³. 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 500 MW durant des décharges de 400 secondes avec un gain de fusion de 10 ;
- ▶ 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 *Annexe II*) ;
- ▶ démontrer la sûreté de fonctionnement et le faible impact sur l'environnement de la fusion.

Le gain de fusion correspond à la quantité d'énergie de fusion produite par la réaction par rapport à celle injectée dans le plasma. Avec un gain de fusion de 10, cela signifie que l'énergie de fusion produite est dix fois supérieure à celle injectée dans le plasma pour le chauffer.

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 :

- ▶ 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 ;

² Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, Inde, Japon, Russie et Union européenne.

³ Iter signifie « le chemin », vers la fusion, en latin

- ▶ démontrer la disponibilité nécessaire pour un réacteur électrogène véritablement industriel.

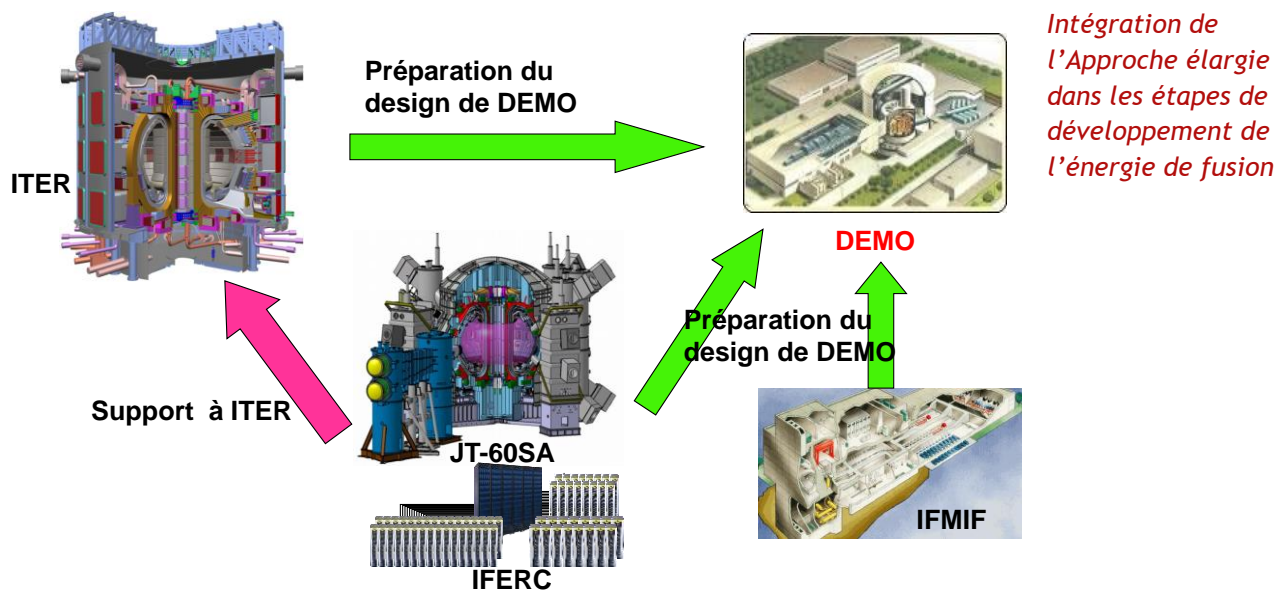
L'Approche élargie : un programme d'accompagnement pour Iter et Demo

Les projets de l'Approche élargie ont pour objectifs :

- ▶ de préparer l'exploitation d'Iter ;
- ▶ de compléter le programme de recherche d'Iter ;
- ▶ 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.



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'infrastructure 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 ont été partagées entre l'équipe de coordination basée à Rokkasho (Japon), où est installé l'accélérateur prototype (LIPAc), et les autres équipes réparties entre l'Europe et le Japon.

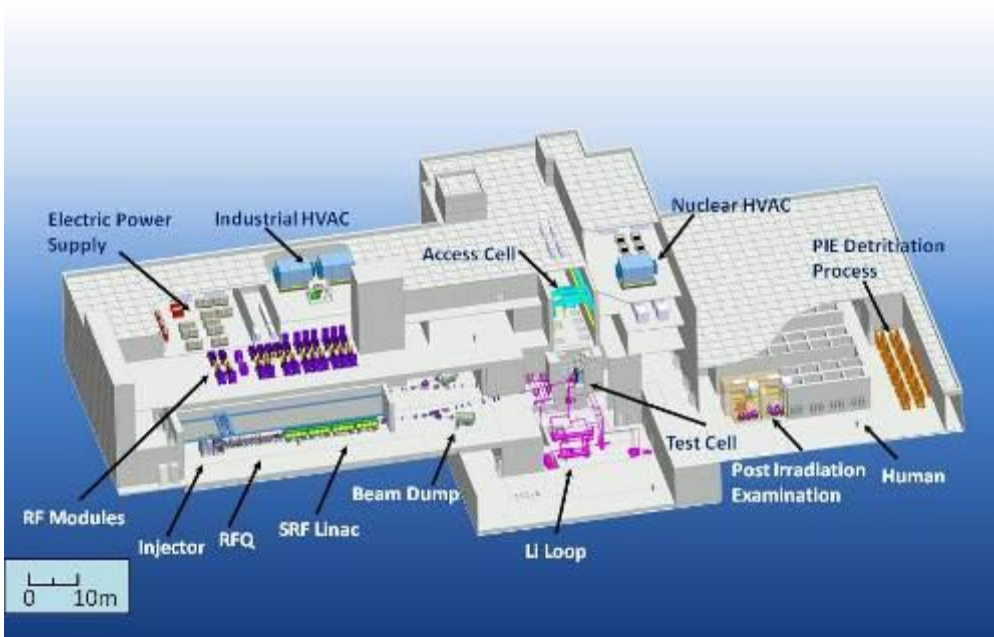
La période initiale 2007-2017 a été étendue à mars 2020 afin de tester l'ensemble des composants accélérateurs du LIPAc. Des discussions sont ouvertes pour poursuivre le fonctionnement de LIPAc pendant quelques années supplémentaires afin de recueillir des informations cruciales sur le fonctionnement et la fiabilité des composants.

L'accélérateur prototype est fourni en grande majorité par l'Europe, le Japon se chargeant essentiellement l'infrastructure pour les essais ainsi que de la validation de la cible de lithium liquide. Quatre pays européens sont concernés : la France (CEA⁴, à Saclay), l'Espagne (CIEMAT à Madrid), l'Italie (INFN à Legnaro) et la Belgique (SCK-CEN à Mol). L'activité dévolue aux laboratoires européens est coordonnée par F4E.

En 2013 se sont terminées les 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).



⁴ Au sein de l'Irfu, l'Institut du CEA sur les Lois Fondamentales de l'Univers



Infrastructure d'Ifmif telle que définie dans le rapport d'étude de 2013.



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

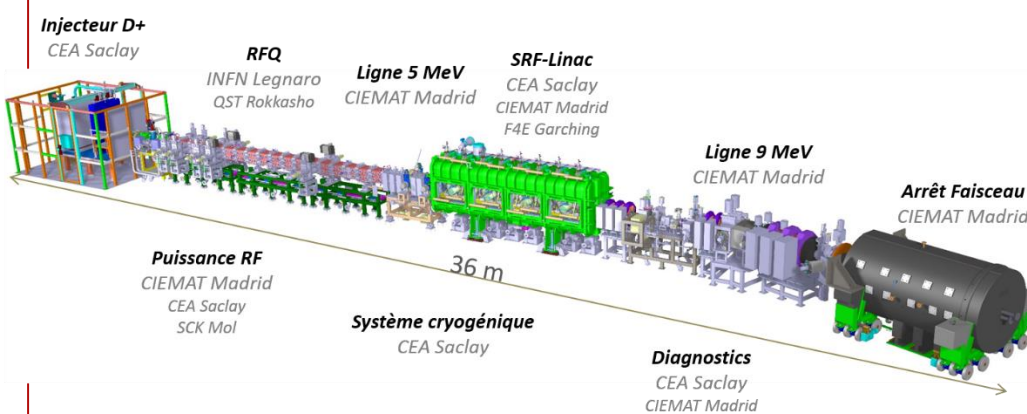


Schéma de principe de l'accélérateur prototype LIPAc. Les contributeurs des différents composants sont mentionnés. La section 5 MeV (de l'injecteur jusqu'à la ligne 5 MeV) est à ce jour installée sur le site de Rokkasho.

L'apport du CEA au projet Ifmif

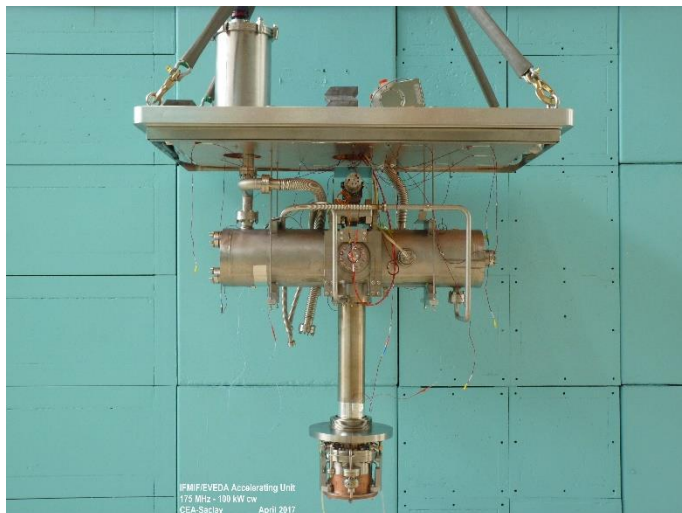
Le CEA possède une maîtrise internationalement reconnue dans le design et la fabrication de grands accélérateurs de particules. C'est à ce titre qu'il a participé activement au dimensionnement des accélérateurs d'Ifmif, en menant en particulier les études sur la dynamique de faisceau qui permettent d'en 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 fut ainsi validé en novembre 2013.

Pour l'accélérateur prototype, le CEA s'est chargé de la fourniture de l'injecteur, des diagnostics faisceau, du SRF Linac, du système cryogénique et a contribué à la chaîne de puissance RF ainsi qu'au système de contrôle.

Une contribution importante du CEA concerne l'injecteur de deutons livré à Rokkasho en 2013. Il a depuis fonctionné dans différents modes (pulsé, continu) et avec différents faisceaux de caractérisation (protons, deutons) jusqu'à des courants records de 140 mA.

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 installés et testés en 2016 sur le site de Rokkasho et insérés dans la chaîne de pilotage de l'accélérateur.

En 2016 et 2017, à travers un contrat avec Air Liquide -Advanced Technologies, le CEA a livré le système cryogénique qui sera nécessaire pour la dernière section de l'accélérateur dont la particularité est d'être équipé de cavités accélératrices supraconductrices qui fonctionnent à 4.45 K. Ces dernières seront assemblées sur le site de Rokkasho et sous la responsabilité de F4E pour former un cryomodule, appelé le SRF-Linac. Toutefois, les réalisations des principaux composants du SRF Linac restent à la charge du CEA (coupleurs de puissance RF, cavités supraconductrices, enceinte à vide, écrans thermiques, circuit cryogénique, systèmes d'accord en fréquence, blindage magnétique, etc.), et de CIEMAT (solénoïdes supraconducteurs). Afin de qualifier le fonctionnement d'une unité accélératrice composée d'une cavité supraconductrice, d'un coupleur de puissance RF et d'un système de réglage en fréquence, le CEA a développé un banc spécifique appelé Sathori fonctionnant à température cryogénique. Fin 2017, deux tiers des composants du SRF-Linac étaient en cours de transport vers Rokkasho, la livraison des derniers composants étant prévue pour Juin 2018.



Unité accélératrice du SRF-Linac qualifiée en avril 2017 au CEA-Saclay

Sur le site de Rokkasho, grâce en particulier à la mise en fonctionnement opérationnel de l'injecteur et à l'intégration de l'instrumentation faisceau dans la chaîne de pilotage de l'accélérateur ces dernières années, le démarrage de la section 5 MeV de l'accélérateur va débuter en février 2018. Ce fonctionnement sera suivi par l'installation et le raccordement des systèmes de la section 9 MeV en vue de la qualification du SRF-Linac et du système cryogénique associé à l'échéance 2020.

Iferc : centre de recherche international pour la fusion

Le projet Iferc comprend trois volets :

- ▶ Des actions de R&D et d'études préliminaires pour Demo,
- ▶ La mise en place d'une salle de participation à distance pour le suivi des expériences menées sur Iter (le REC : Remote Experimentation Center)
- ▶ 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 s'est concentrée sur le troisième volet avec la fourniture et la mise en place (en 2011), la maintenance et l'exploitation (de début 2012 à fin 2016) ainsi que le démantèlement (en début 2017) d'un supercalculateur et d'équipement périphériques associés. Le CEA a assuré en outre la direction du CSC de son démarrage en 2011 à sa fermeture en début 2017.

Le CSC (Computational Simulation Center)

Ouvert aux utilisateurs en janvier 2012, le CSC était organisé autour du supercalculateur Helios fourni par la société Atos-Bull dont il constituait 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 disposait d'un système de stockage de données permettant de conserver les données de simulation (25 Po stockés sur des disques et des bandes).

Le supercalculateur Helios

Helios fut utilisé par plus d'une centaine de chercheurs ou de groupes de chercheurs du côté japonais et environ du triple côté européen. Son adoption par la communauté fusion fut extrêmement rapide.

L'architecture d'Helios en détail

Le supercalculateur Helios était 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.

Une première évolution de configuration a eu lieu en 2014 avec l'ajout de 180 nœuds de calcul bullx B515 qui intègrent chacun 2 coprocesseurs Intel® Xeon Phi™ (génération KNC) fournissant une puissance additionnelle de plus de 400 téraflops et l'ajout de 90 nœud de calcul bullx B510. Ces évolutions ont porté la puissance du système Helios à près de 2 pétaflops.

Une seconde évolution de configuration a eu lieu en 2016 avec l'ajout de 6 nœuds de calcul intégrant chacun trois GPGPU Nvidia portant la puissance totale d'Helios à 2.02 pétaflops.

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 - à son arrêt, en fin 2016, il faisait toujours partie des 100 machines les plus puissantes du monde (82^{ème} place au Top 500). Pendant la durée de vie d'Helios, deux ajouts majeurs ont été effectués à la configuration installée (voir encadré) avec l'ajout de composants innovants visant à permettre aux communautés fusion de se préparer aux architectures hautement parallèles des futures générations de supercalculateurs.

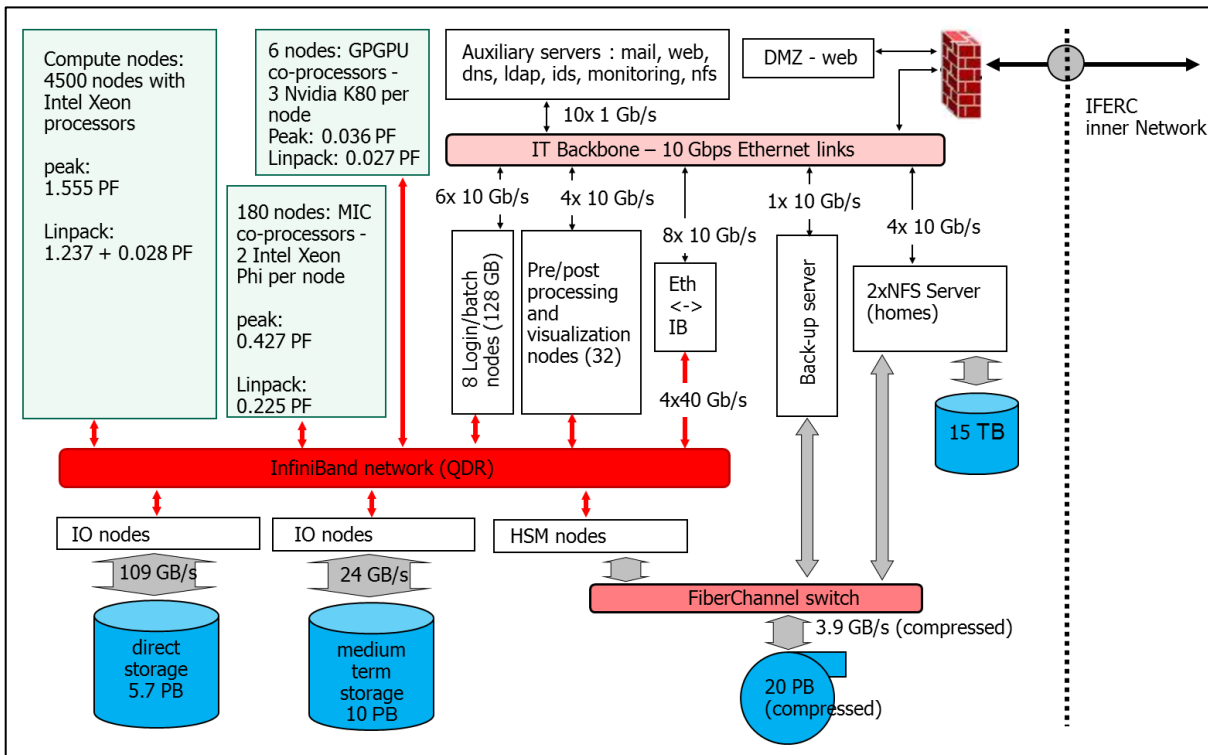
Avec une disponibilité dépassant 98% et un taux d'utilisation dépassant régulièrement 95 %, deux chiffres tout à fait exceptionnels pour de tels systèmes, Helios a permis des progrès scientifiques importants dans le domaine de la fusion.

L'apport français au projet Iferc

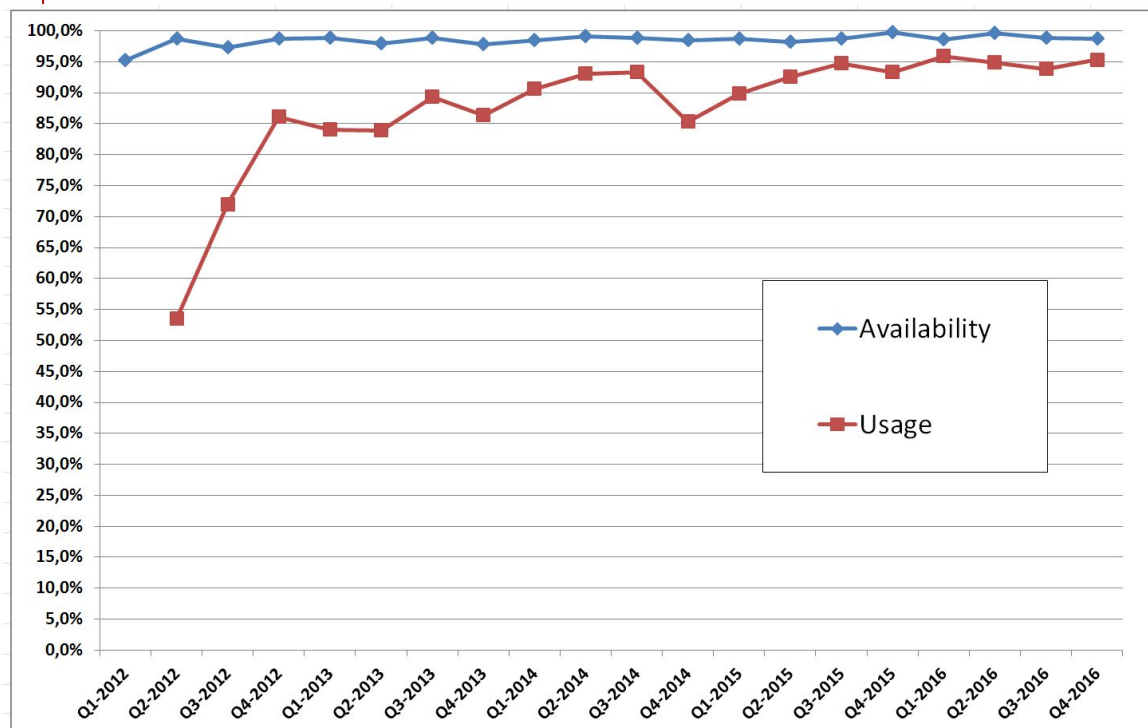
- ▶ **L'apport du CEA :** Le CEA a été mandaté par F4E pour mettre en place et exploiter le centre de calcul d'Iferc, jusqu'en fin 2016. L'organisme a assuré, en liaison étroite avec les communautés utilisatrices ainsi qu'avec QST (ex JAEA), la définition du cahier des charges, l'expression de besoin et la consultation des fournisseurs potentiels. Il a, en outre, piloté sur place pendant 5 ans le fonctionnement opérationnel du CSC en liaison étroite avec les équipes japonaises en charge des aspects infrastructure et support applicatif ainsi qu'avec l'équipe Atos-Bull sur le site. Il a enfin assuré, pour F4E, le transfert d'une partie des composants du CSC à QST pour permettre à QST de continuer à exploiter ceux-ci au profit des utilisateurs fusion japonais.
- ▶ **L'apport d'Atos-Bull :** L'apport majeur d'Atos-Bull est la fourniture, la maintenance et l'exploitation d'un supercalculateur et d'équipements périphériques offrant à la fois des performances très élevées et un taux de disponibilité exceptionnel. Ce taux de disponibilité est le fruit d'une maintenance préventive régulière et d'une capacité d'intervention 7/7-24/24 en cas d'incident. En outre, les nouveaux coprocesseurs Intel Xeon Phi installés par Atos-Bull en 2014 puis les GPGPU Nvidia installés en 2016 ont permis aux utilisateurs d'explorer de nouvelles architectures hautement parallèles offrant performances élevées et consommation énergétique maîtrisée. De telles architectures 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 s'inscrit dans le développement de ces futures machines et a permis à l'entreprise Atos-Bull d'élargir son expérience dans ce domaine.



Le supercalculateur Helios, installé à Rokkasho



La configuration finale du CSC après les 2 évolutions majeures effectuées en 2014 et 2016.



Disponibilité et Utilisation d'Helios

L'utilisation d'Helios

L'utilisation d'Helios a été partagée à 50 % du temps de calcul disponible pour le Japon et 50% du temps de calcul disponible pour l'Europe. De janvier 2012 à fin 2016, une communauté scientifique d'environ

400 utilisateurs (300 européens et 100 japonais) a intensivement exploité le supercalculateur. Les différents domaines de recherches concernent :

- ▶ la physique des plasmas de tokamak (turbulence, transport, MagnétoHydroDynamique(MHD), les particules rapides, la physique du plasma de bord, le chauffage du plasma et la génération de courant)
- ▶ la technologie des réacteurs et des matériaux
- ▶ 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.

Le bilan global est la production de 639 articles scientifiques publiés dans des revues de premier plan dont Physics of Plasmas (120 articles), Nuclear Fusion (103 articles) or Physical Review Letters (15 articles) portant sur les domaines indiqués.

Les perspectives

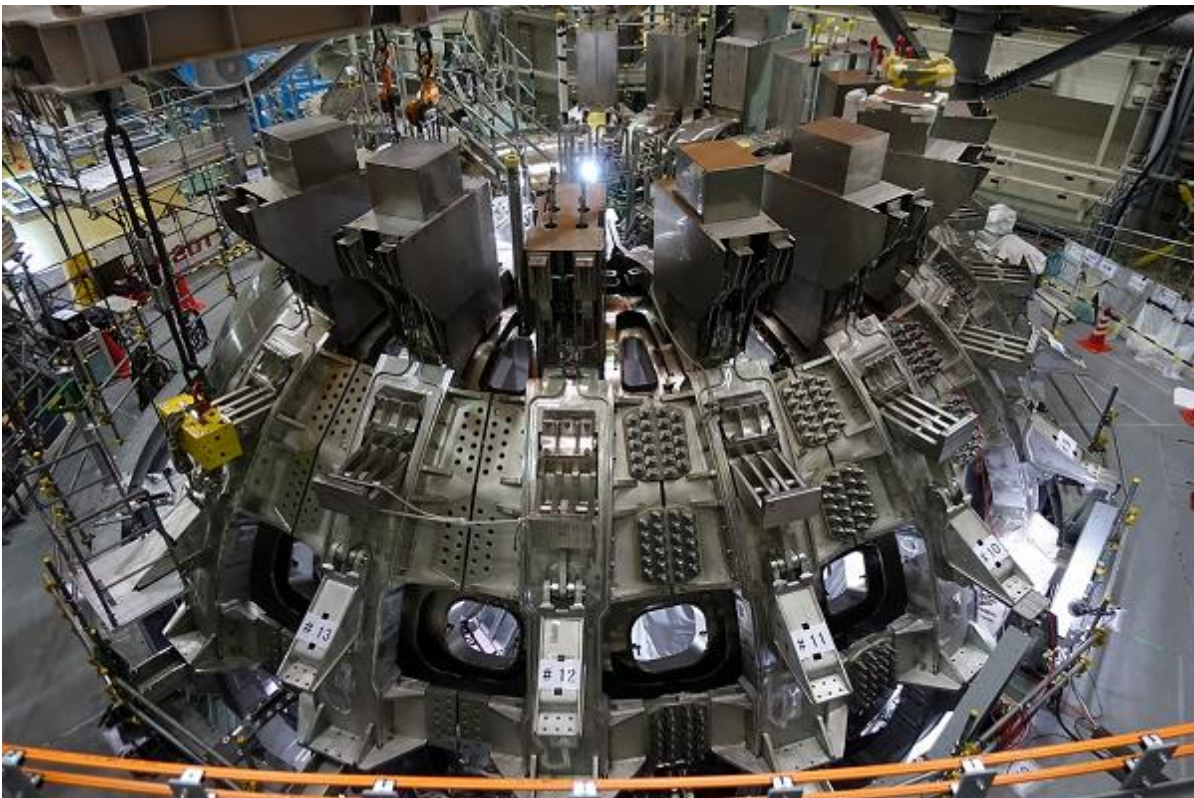
Lors de la cérémonie de clôture du CSC, tous les orateurs, tant japonais qu'européens, tant scientifiques que décideurs et représentants des états, ont souligné l'exceptionnelle réussite du CSC qui a atteint et dépassé tous les objectifs fixés dans le respect des couts et des délais. Ceux-ci ont également souligné l'importance de poursuivre des échanges Europe-Japon en matière de calcul haute performances indispensable aux progrès dans le domaine de fusion.

Ainsi, en anticipation d'un nouveau possible supercalculateur commun dans le cadre de la phase 2 de l'approche élargie (au-delà de 2020), il est envisagé de commencer en 2019 la mise en commun de ressources de calcul fusion situées en Europe et au Japon pour des projets conjoints impliquant des équipes Européennes et Japonaises ... en quelques sorte un nouveau CSC distribué !

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 Iiter. 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 magnétiques 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. Avec une mise en service programmée pour le troisième trimestre 2020, JT-60SA sera le plus grand tokamak en opération avant le démarrage d'Iter programmé en 2025. Il permettra donc de préparer l'exploitation d'Iter et de former les équipes d'opération et d'exploitation. Il apportera par ses caractéristiques (dimensions, puissance, intégration technologique, capacités opérationnelles, etc.) un renouvellement important au programme d'accompagnement à Iiter reposant actuellement en Europe sur les machines de la génération précédente, c'est-à-dire mises en service dans les années 1980 : Jet, Tore Supra/West, Asdex-Upgrade.



État du montage des bobines de champ toroïdal de JT-60SA, en novembre 2017. 12 bobines de champ toroïdal

sont installées avec leurs structures mécaniques respectives. La fin du montage de ces bobines est planifiée pour juin 2018.

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 a géré, la réalisation des fournitures en nature dont il avait la charge.

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

- ▶ de 10 des 20 bobines supraconductrices de champ magnétique toroïdal, incluant deux bobines surnuméraires réalisées pour sécuriser le planning de livraison de ces éléments critiques pour la construction de JT60-SA,
- ▶ de l'ensemble des structures mécaniques de support du système de champ magnétique (pieds supports), et de liaison externe des bobines de champ toroïdal (structures externes de liaison),
- ▶ du système cryogénique nécessaire au refroidissement des bobines supraconductrices, incluant son installation et sa mise en service sur le site japonais,
- ▶ de cinq alimentations électriques pour le système de champ magnétique, incluant également leur installation et mise en service au Japon.

Le CEA a également assuré également, à Saclay, les activités suivantes :

- ▶ le développement, la construction et l'exploitation d'une station cryogénique de tests, ainsi que la qualification des vingt bobines de champ toroïdal aux conditions nominales de fonctionnement (température de 4,5 kelvins soit -268°C et de courant 25700 ampères),
- ▶ l'assemblage mécanique des dix-huit premières bobines de champ toroïdal avec les dix-huit structures de liaison externe réalisé dans une station d'assemblage spécialement développée pour atteindre les précisions mécaniques requises.

Des bobines supraconductrices *made in France*

Au terme de consultations internationales, les contrats ont été passés avec des industriels entre 2011 et 2013 et les fabrications terminées en France et en Europe à la fin de l'année 2017. 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.

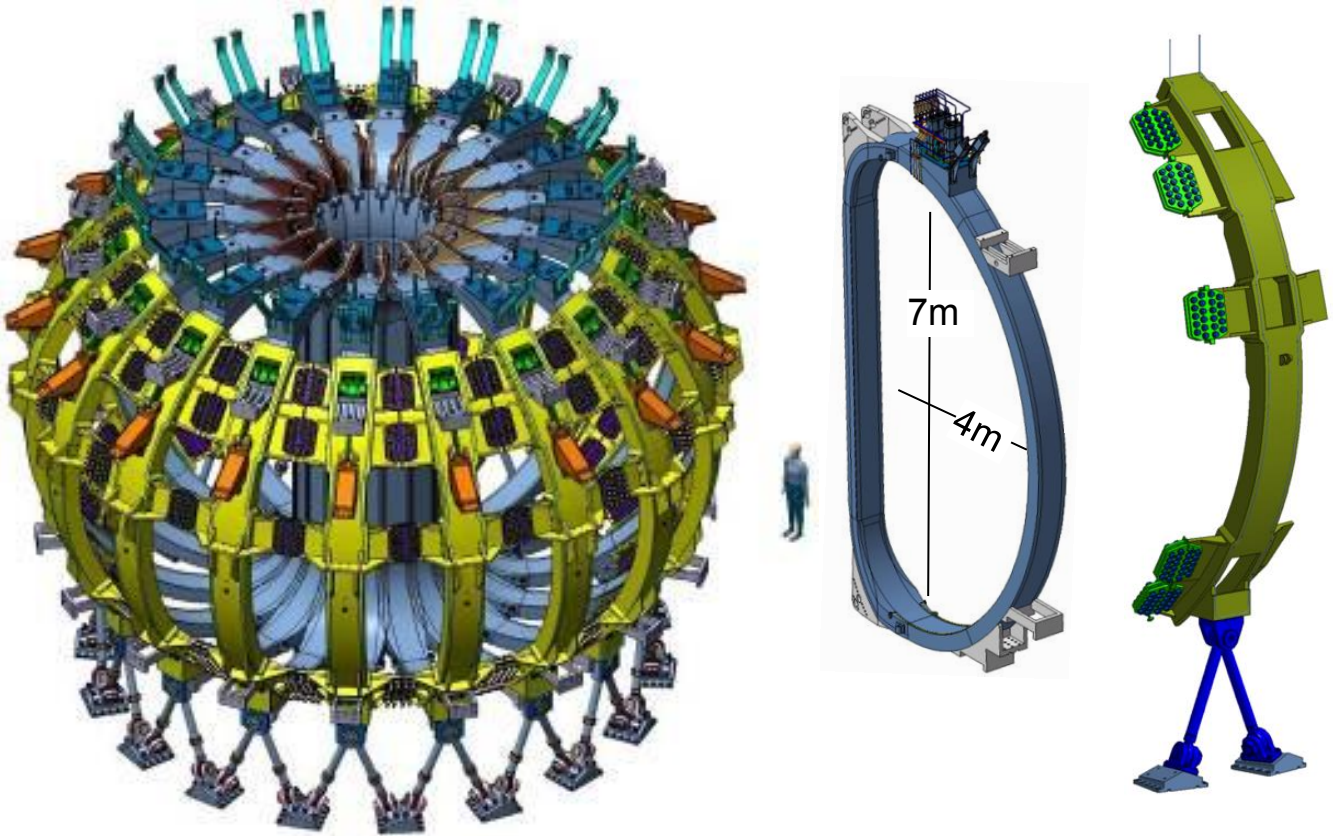


Première bobine en cours de bobinage à Belfort en juillet 2014. © GE Power/ Alstom

A Belfort, dans les ateliers de GE Power, la

fabrication des bobines supraconductrices de champ toroïdal, a été réalisées entre décembre 2013 et

décembre 2017, après la mise au point des procédés industriels et des outillages dédiés, en accord avec le planning de fabrication.



Echelle des éléments du système magnétique de JT-60SA fabriqués en France.

En bleu clair, les bobines de champ toroïdal, en jaune les structures externes de liaison et en bleu marine les pieds supports)

La fabrication des bobines à Belfort a concerné la réalisation du bobinage magnétique, à partir de câbles supraconducteurs, l'insertion de ce bobinage dans un boîtier en acier inoxydable permettant de fournir à la bobine la rigidité mécanique requise nécessaire à son fonctionnement, l'usinage mécanique permettant de conférer à la bobine la précision géométrique submillimétrique spécifiée et enfin le raccordement des éléments nécessaires pour l'alimentation électrique et le refroidissement cryogénique, sans oublier la réalisation de l'ensemble des tests et contrôles qualités intermédiaires. Les câbles supraconducteurs, en partie spécifiés par le CEA, de même que les éléments des boîtiers ont été fournis par F4E.

La ligne de production des bobines était divisée en 12 postes de travail correspondant aux 12 étapes fondamentales de fabrication qui ont toutes été qualifiées au préalable sur des maquettes de fabrication représentatives.

Chaque bobine a parcouru l'ensemble de la ligne de production en un peu plus de 18 mois en moyenne et jusqu'à cinq bobines ont été présentes simultanément sur les différents postes de travail. L'objectif était de pouvoir livrer, après la première bobine, une bobine tous les deux mois. Ce rythme a pu être atteint sur les sept premières bobines. Une difficulté d'approvisionnement des boîtiers a finalement allongé les délais de livraison des trois dernières bobines.

La dixième bobine en provenance de Belfort a été livrée à la station d'essai de Saclay le 15 décembre 2017.

L'organisation industrielle et la haute technicité des équipes mise en place par GE Power ont permis d'atteindre, avec le support technique du CEA, l'ensemble des critères qualité exigeants de ces fabrications exceptionnelles.

A Saint-Romans, Isère, la société SDMS a fabriqué les structures de liaison externe (OIS⁵). 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 en 2014, permettant le lancement de la fabrication industrielle. Ces pièces d'une grande complexité technique ont été réalisées par des procédés mécano-soudés suivi d'un usinage de précision qui a permis d'atteindre sur ces pièces de plus de 6 tonnes, d'un développé de plus de 7 mètres les tolérances mécaniques submillimétriques requises pour l'assemblage du système magnétique de JT-60SA. La fabrication de ces composants par la société SDMS a nécessité la mise en place d'une organisation industrielle complexe faisant intervenir pour chaque étape de fabrication industrielle des sous-traitants hautement spécialisées dans les activités en particulier de soudage par faisceau d'électrons et d'usinage de précision, et un contrôle qualité rigoureux.

Le 1^{er} OIS a été livré en décembre 2016 et le dernier en janvier 2018 en parfait synchronisme avec le planning d'assemblage.

A Tarbes, Haute Pyrénées, la société Alsym a fabriqué les 18 pieds supports, dénommés GS (pour 'Gravity Support'), du système magnétique de JT-60SA.

Ces composants de haute technicité, mettant en œuvre des liaisons rotulées, ont été dimensionnés pour supporter les quelques 600 tonnes du système magnétique, les dilatations différentielles liées aux différences de températures lorsque le tokamak est en maintenance à température ambiante ou en opération lorsque les bobines sont à 4,5 K ainsi que les efforts développés lors des fréquents séismes de forte magnitude qui affectent les îles du Japon.

Les rotules nécessaires, de fabrication standard, ont été fournies par la société RWG.

La qualification des soudures de ces composants mécano-soudés et le contrôle qualité de l'exécution des soudures ont fait l'objet d'une attention vigilante aussi bien de la part du CEA que de la part de la société Alsym.

Le contrat entre le CEA et Alsym a été signé le 17 avril 2013. Les 18 pieds supports ont été fournis et expédiés au Japon fin septembre 2016.

A Sassenage, Isère, dans les locaux d'Air Liquide a été fabriqué, selon les préconisations du CEA s'appuyant sur des simulations numériques et des résultats expérimentaux obtenu sur une boucle d'essais cryogéniques dédiée, un réfrigérateur cryogénique de très grande envergure dédié à la fusion conçu avant celui qui équipera Iter, le plus grand système de réfrigération centralisé. En outre, l'optimisation avancée des processus innovants mis en œuvre a bénéficié du savoir-faire exceptionnel d'Air Liquide. Ce système cryogénique assurera le refroidissement à $-268,5^{\circ}\text{C}$ (4,5K) de l'ensemble des aimants supraconducteurs du tokamak ainsi que le refroidissement de divers équipements auxiliaires tels que les écrans thermiques, les cryopompes, et les amenées de courant servant à l'alimentation électrique des aimants.

Le contrat entre le CEA et Air Liquide a été signé le 18 décembre 2012. Les composants du système cryogénique ont été livrés au Japon le 20 avril 2015. L'installation et la mise en service ont été réalisées par les équipes d'Air Liquide pour le compte et avec la collaboration du CEA et avec le support des

⁵ Pour 'Outer Intercoil Structure' en anglais.

équipes européenne de F4E et japonaise de QST. L'installation s'est terminée en avril 2016, suivie de tests de réception concluants en novembre 2016 avec moins de 3 mois de décalage par rapport au planning initial courant sur 44 mois d'activité. La compétence, l'engagement et la disponibilité des équipes d'Air Liquide à chaque étape depuis la conception industrielle jusqu'aux phases d'installation et de mise en service, qui ont duré pour ces dernières environ 20 mois au Japon, furent reconnus par l'ensemble des partenaires internationaux

A Lasarte-Oria, Espagne, la société JEMA a fabriqué cinq alimentations électriques nécessaires au fonctionnement des aimants supraconducteurs de JT-60SA. Le contrat avec la société JEMA a été passé en mars 2013. Les études, la fabrication et les tests de qualification à pleine puissance ont été conduits en Espagne avant l'expédition des composants au Japon. Parties du port de Bilbao le 7 mai 2016, les alimentations sont arrivées à Naka le 4 juillet 2016. L'installation et les tests de mise en service se sont déroulés sous le contrôle du CEA et se sont terminées en octobre 2017.

Les deux boîtes froides pour JT-60SA en septembre 2014. © DR



Les quatre alimentations EF2, EF3, EF4, et EF5 en cours d'installation à Naka en juillet 2017.



Au CEA Saclay a été construite une station d'essai cryogénique dédiée aux tests des 20 bobines de champ toroïdal dans les conditions nominales (-269°C , 25700 Ampères) de fonctionnement. Cette station de test est appelée CTF, pour « Cold Test Facility. » La CTF est constituée d'un grand cryostat⁶ de 11 mètres de long, d'un réfrigérateur cryogénique, d'une alimentation électrique, d'un système de protection des bobines et des auxiliaires et systèmes de mesures nécessaires à la mise en œuvre des essais.

La construction de la station a démarré en 2011. Son fonctionnement a été validé sur une bobine supraconductrice prototype en octobre 2015. Les tests de la première bobine ont démarré en janvier 2016, les tests de la 18^{ème} bobine nécessaire à l'assemblage de JT-60SA se sont terminés fin janvier 2018. Outre l'opération de la bobine aux conditions nominales de fonctionnement, la procédure de qualification inclut également un test de transition résistive à plein courant, dit test de quench, permettant de déterminer la marge de fonctionnement en température de ces bobines, dont, in fine, le

⁶ Fourni par SCK-CEN en contribution de la Belgique.

bon fonctionnement sera la base des futurs succès du tokamak JT-60SA. Il faut noter que toutes les bobines testées ont satisfait haut-la-main les critères de qualification les plus exigeants. De plus la réalisation de ces tests a permis de constituer une base de données unique pour la caractérisation de grands aimants supraconducteurs qui fera l'objet d'analyses approfondies permettant dans les prochaines années de valider les outils numériques nécessaires à la simulation du fonctionnement de tels composants.



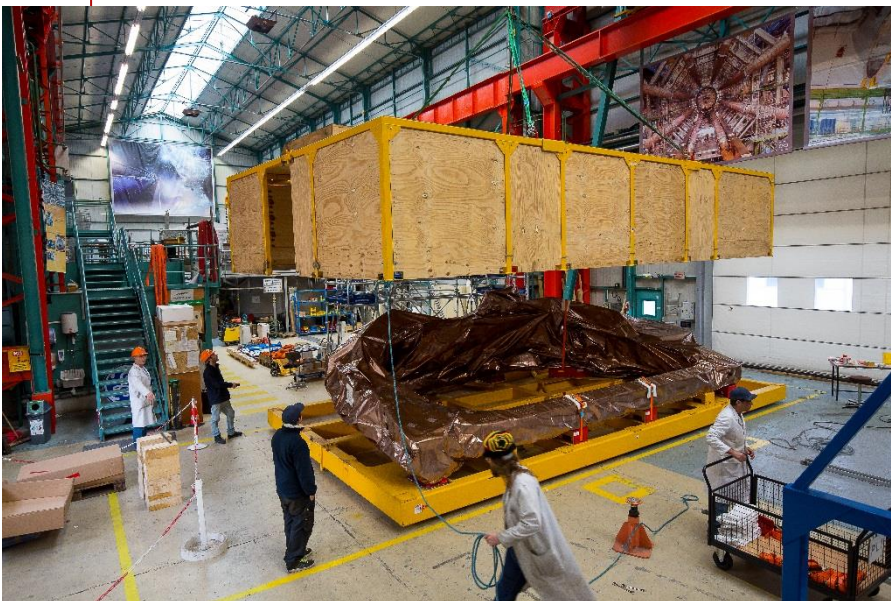
La plateforme 'Cold Test Facility' CTF au centre CEA de Saclay. © P.Dumas /CEA

Une fois validées, et avant leur départ pour le Japon, chaque bobine est équipée de sa structure de liaison externe dans une station d'assemblage mécanique de précision également implantée à Saclay. La procédure d'assemblage requiert la manipulation d'objets lourds (16 t pour la bobine et 6 t pour la structure de liaison), volumineux et extrêmement précieux nécessitant toutes les attentions d'une équipe hautement qualifiée.

L'assemblage se réalise avec la bobine en position verticale, la bobine en forme de D reposant sur la barre droite du D. La structure de liaison externe venant alors « couronner » la jambe courbe de la bobine.



Mise en position d'une bobine (à gauche / © P.Dumas/ CEA), en préparation de son couronnement (en bas à droite/ © CEA/Irfu) puis la bobine est installée dans son emballage de transport (en bas à gauche / © P.Dumas / CEA)



Le voyage final des bobines

Après avoir été couronnées, nommées et solidement installées dans leur emballage de transport respectif, les seize premières bobines ont été expédiées entre avril 2016 et janvier 2018 au Japon par bateau, leur voyage durant environ 10 semaines. Pour économiser ce délai de transit et accélérer la fin de la construction de JT-60SA, il a été prévu d'envoyer les deux dernières bobines par avion gros porteur, Antonov 124, le 15 février 2018.

Le poids de chacun des deux colis est d'environ 30 t (16 t pour la bobine, 6 t pour la structure de liaison et 8 t pour la structure de transport) et le volume unitaire de 150 m³ (12 m x 5 m x 2,5 m). Avec le départ de l'Antonov 124 affrété pour leur dernier voyage, c'est donc une aventure technique, scientifique et humaine de plus de dix ans qui est en passe de s'achever dans les tous prochains jours.

Le baptême d'une bobine

A la demande des partenaires internationaux, lorsque chaque bobine est couronnée, elle reçoit officiellement un nom, qui remplace son numéro de série. Le CEA a fait le choix de nommer les bobines dans l'ordre alphabétique à partir du prénom d'actrices françaises. Les 10 bobines « françaises » ont reçu les noms suivants : Annie, Brigitte, Cécile, Danielle, Emmanuelle, Fanny, Géraldine, Hélène, Isabelle et Jeanne.

Les bobines « italiennes » ont été nommées à partir des noms des enfants féminins des membres de l'équipe italienne.



Baptême de la 1ère bobine, « Annie », 06 avril 2016 à Saclay. © CEA / Christophe Roux

L'utilisation de JT-60SA

Au-delà de ses engagements résultant de l'accord sur l'Approche élargie, le CEA gère aussi, à l'échelle européenne (dans le cadre d'une tâche EUROfusion) 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. Avec le tokamak du CEA West à Cadarache (*voir page 41*), c'est un moyen supplémentaire pour le CEA de maintenir et de développer ses compétences et ses équipes pour préparer l'exploitation d'Iter.

Lors de sa mise en service dans le courant de l'été 2020, 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 (QST, 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 de recherche fait déjà l'objet d'une intense collaboration entre l'Europe et le Japon.



CEA / à droite : © CEA/Irfu



La première bobine et sa structure de liaison sont livrées au Japon et préparées pour une installation sur JT60-SA en juillet 2016. Crédits : A gauche ©

Les instituts du CEA dans l'approche élargie

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

Installé au CEA Cadarache depuis plus de 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 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 devenu West (*W-tungsten Environment in Steady-State Tokamak*) et des plateformes de R&D et de tests dans les domaines suivants :

- ▶ 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 environnement de fusion.

L'IRFM dispose également d'une plateforme de calcul haute performance permettant :

- ▶ des simulations à partir des premiers principes,
- ▶ des simulations intégrées, des scénarios de plasmas et le dimensionnement du réacteur.

La plateforme West réunit l'ensemble des moyens techniques permettant de réaliser des plasmas de longue durée. Son premier plasma a été produit en 2017. Les chercheurs vont ainsi tester certains composants clés pour Iter et explorer les problématiques de physique des plasmas sur des longues durées en environnement tungstène. La machine a démarré fin 2016.

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

Localisé au centre CEA Paris Saclay, l'Irfu (irfu.cea.fr) mène des programmes de recherche en astrophysique, physique nucléaire et 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. 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 et de détecteurs de particules sont aujourd'hui valorisées dans d'autres domaines, notamment pour des réacteurs de fusion et pour des machines d'imagerie médicale à très haute résolution (IRM à 11,7 teslas).

Institut nanosciences et cryogénie (CEA Inac)

L'Inac (inac.cea.fr), institut de recherche fédératif CEA-Université Grenoble Alpes, 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 (Herschel, Athena) et les grands instruments de la physique (LHC au Cern, Iter). 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 et d'Iter. Cette compétence reconnue pour le dimensionnement des systèmes cryogéniques de forte puissance a permis la définition et le suivi de réalisation de l'usine cryogénique de JT-60SA délivrant une puissance frigorifique d'environ 10 kW (soit 4,5 K ou -269°C) et devant gérer les pics de charge thermique générés par le fonctionnement pulsé 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 (quelques centaines de m/s) de petits glaçons (10 mg) est un des moyens d'injecter le « combustible » de la fusion directement dans le cœur du plasma d'un tokamak (Tore Supra, Jet, etc.).

Les entreprises partenaires

Air Liquide



A propos du Groupe Air Liquide

Air Liquide est le leader mondial des gaz, technologies et services pour l'industrie et la santé. Présent dans 80 pays avec environ 65 000 collaborateurs, le Groupe sert plus de 3 millions de clients et de patients. Oxygène, azote et hydrogène sont des petites molécules essentielles à la vie, la matière et l'énergie. Elles incarnent le territoire scientifique d'Air Liquide et sont au cœur du métier du Groupe depuis sa création en 1902.

Air Liquide a pour ambition d'être le leader de son industrie, d'être performant sur le long terme et de contribuer à un monde plus durable. Sa stratégie de transformation centrée sur le client vise une croissance rentable dans la durée. Elle s'appuie sur l'excellence opérationnelle et la qualité des investissements, de même que sur l'innovation ouverte et l'organisation en réseau mise en place par le Groupe à l'échelle mondiale. Grâce à l'engagement et l'inventivité de ses collaborateurs pour répondre aux enjeux de la transition énergétique et environnementale, de la santé et de la transformation numérique, Air Liquide crée encore plus de valeur pour l'ensemble de ses parties prenantes.

Le chiffre d'affaires d'Air Liquide s'est élevé à 18,1 milliards d'euros en 2016. Ses solutions pour protéger la vie et l'environnement représentent plus de 40 % de ses ventes. Air Liquide est coté à la Bourse Euronext Paris (compartiment A) et appartient aux indices CAC 40, EURO STOXX 50 et FTSE4Good.

Air Liquide et la cryogénie scientifique

Air Liquide dispose d'une expertise unique au monde dans le domaine des très 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 grande capacité (par exemple : le Large Hadron Collider du CERN en Suisse ou la plus importante unité de liquéfaction d'hélium du monde au Qatar). 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, JT-60SA dans le cadre de l'approche élargie d'ITER et ITER en cours de réalisation).

Air Liquide et l'approche élargie d'ITER : JT-60SA, IFMIF

Pour JT-60SA, Air Liquide a conçu, fabriqué et installé au Japon, un système de réfrigération hélium destiné au refroidissement du Tokamak opéré par QST (Quantum & Radiological Science and Technology) à Naka, au Japon. Cet équipement cryogénique a pour objectif d'optimiser les besoins en énergie et de refroidir les aimants supraconducteurs utilisés pour contrôler le plasma. L'unité cryogénique de Naka est aujourd'hui opérationnelle.

IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility). Pour ce projet, Air Liquide a conçu, fabriqué et installé un réfrigérateur hélium pour refroidir les aimants supraconducteurs de l'accélérateur de particules d'IFMIF-EVEDA, situé au Japon, à ROKKASHO.

Air Liquide et ITER

Dans le cadre du projet ITER, Air Liquide a conçu et finalise actuellement la fabrication des derniers éléments qui constitueront le plus grand système de réfrigération centralisé jamais construit à ce jour. Ces équipements cryogéniques sont indispensables au maintien à une température de froid extrême des 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs du Tokamak*. Ce système de réfrigération en circuit fermé est basé sur les propriétés de l'hélium liquéfié qui a une température proche de la plus basse température possible : « le zéro absolu », 0 K soit - 273°C. Air Liquide a livré à ce jour la majorité des équipements constituant l'usine cryogénique d'ITER : trois réfrigérateurs d'une puissance globale de froid de 75kW à 4,5 K soit -269 °C, deux réfrigérateurs azote et deux boîtes froides hélium 80 K (-193°C) qui apportent une puissance frigorifique complémentaire, ainsi que plusieurs unités de stockage azote et hélium. L'installation des équipements a débuté en ce mois de janvier 2018. Air liquide a également conçu et fabrique actuellement une partie de lignes cryogéniques permettant de véhiculer l'hélium à différentes températures entre l'usine cryogénique et le tokamak.

Contacts :
Relations Média Air Liquide
Caroline Philips : +33 (0)1 40 62 50 84
Caroline Brugier : +33 (0)1 40 62 50 59

Pour en savoir plus : www.airliquide.com

Alsyom

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.

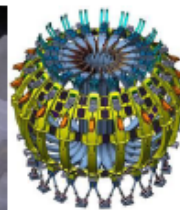
IFMIF-EVEDA, autre pilier de l'approche élargie, représente une autre forte opportunité d'activité pour Alsyom, notamment au niveau de l'accélérateur de protons nécessitant la mise en œuvre de savoir-faire similaires à ceux développés en collaboration avec le CEA dans le cadre du projet XFEL.



Atelier d'usinage climatisé

Intégration en salle blanche

Composants de première paroi ITER



JT-60SA



Gravity Supports

Mise à jour Novembre 2014

Atos est un leader des solutions de calcul haute performance (HPC). Depuis 2005, Atos 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. Atos 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, Atos 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, Atos 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 Atos une position unique en Europe et sa capacité à offrir les meilleures solutions HPC.

Dans le cadre de l'approche élargie, Atos 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 Atos, approuvée par JAEA et le chef de projet IFERC, a été choisie face à des offres concurrentes japonaises et américaines. Atos a installé fin 2011 à Rokkasho une machine, nommée Helios, d'une puissance de 1,5 petaflops avec 15 Pockets 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.

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.



Le supercalculateur Helios

À propos d'Atos

Atos est un leader international de la transformation digitale avec environ 100 000 collaborateurs dans 72 pays et un chiffre d'affaires annuel de l'ordre de 12 milliards d'euros. Numéro un européen du Big Data, de la Cybersécurité, des supercalculateurs et de l'environnement de travail connecté, le Groupe fournit des services Cloud, solutions d'infrastructure et gestion de données, applications et plateformes métiers, ainsi que des services transactionnels par l'intermédiaire de Worldline, le leader européen des services de paiement. Grâce à ses technologies de pointe et son expertise digitale & sectorielle, Atos accompagne la transformation digitale de ses clients dans les secteurs Défense, Finance, Santé, Industrie, Médias, Énergie & Utilities, Secteur Public, Distribution, Télécoms, et Transports. Partenaire informatique mondial des Jeux Olympiques et Paralympiques, le Groupe exerce ses activités sous les marques Atos, Atos Consulting, Atos Worldgrid, Bull, Canopy, Unify et Worldline. Atos SE (Societas Europea) est une entreprise cotée sur Euronext Paris et fait partie de l'indice CAC 40.

GE en France

General Electric (GE) investit et développe sa présence en France depuis plus de 100 ans. Une implantation que le groupe a encore renforcée en 2015 après le rachat des activités énergie d'Alstom.

Aujourd'hui, GE est un acteur industriel de premier plan dans l'Hexagone, grâce à ses 16.000 collaborateurs, répartis sur 20 sites industriels. Avec un chiffre d'affaires d'environ 7 milliards d'euros, dont 90% réalisés à l'export, GE en France est un leader technologique dans les domaines des énergies renouvelables, des énergies thermiques, des réseaux électriques, de l'imagerie médicale, du numérique et des moteurs d'avions.

La France accueille cinq des sièges mondiaux de GE (GE Renewable Energy, GE Hydro, GE Power Conversion, GE Grid Solutions et GE Offshore Wind Solutions) et les sièges européens de GE Healthcare et de GE Power. GE a également basé son nouveau centre digital européen à Paris. Parmi les principaux sites de GE en France, on peut noter :

- ▶ **Belfort** (GE Power) : Avec plus de 4.000 employés, ce centre d'excellence mondial produit les turbines à gaz et les turbines à vapeur les plus puissantes et efficaces du marché.
- ▶ **Buc** (GE Healthcare) : Siège européen de GE Healthcare, il est aussi un centre d'excellence mondial pour la mammographie, l'imagerie interventionnelle et le développement d'applications avancées en imagerie médicale.
- ▶ **Saint-Nazaire** (GE Renewable Energy) : Avec ses usines dédiées à l'assemblage et test de nacelles et de générateurs d'éoliennes en mer, ce centre d'excellence produit l'éolienne Haliade™ 150-6MW.
- ▶ **Le Creusot** (BHGE) : Ce site est le centre d'excellence de GE en France pour la conception et la production de turbomachines, compresseurs centrifuges et turbines à vapeur pour l'industrie du pétrole et du gaz.
- ▶ **Aix-les-Bains** (GE Grid Solutions) : Le site est spécialisé dans la conception, la fabrication, l'installation et le service de sous-stations haute tension à isolation gazeuse servant à interconnecter et sécuriser les réseaux électriques de 170 kV à 800 kV.
- ▶ **La fonderie digitale à Paris** (GE Digital) : Ce pôle de compétences unique en Europe est à la fois le centre européen d'expertise digitale de GE, un centre de co-développement avec les clients et un accélérateur de startups.
- ▶ Dans le domaine de l'aéronautique, CFM International, une société commune détenue à parité par GE et Safran Aircraft Engines, est devenue le premier motoriste mondial grâce au succès historique du CFM56, le moteur d'avion le plus vendu dans le monde, et du nouveau moteur LEAP.

A propos de GE :

GE est la plus grande entreprise industrielle numérique mondiale, qui transforme l'industrie grâce à des machines contrôlées par logiciel et des solutions connectées, adaptées et prédictives. GE s'organise autour d'un échange mondial de connaissances, le « GE Store » (offre de produits GE), au sein duquel chaque activité partage et a accès aux mêmes technologies, marchés, structures et intelligences. Chaque invention nourrit les innovations et les applications dans tous nos secteurs industriels. Fort de ses collaborateurs, ses services, sa technologie et sa taille, GE produit de meilleurs résultats pour ses clients en parlant le langage de l'industrie. www.ge.com | www.ge.com/fr/ | www.gereports.fr | [@GE France](https://www.facebook.com/GE.France/) | www.facebook.com/GE.France/



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.

LGM

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

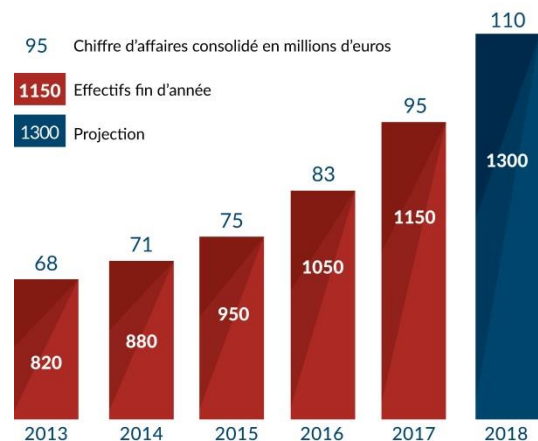
LGM travaille depuis plus de quinze ans avec le CEA sur ses grands programmes de Recherche et Développement. Entre 2009 et 2016, LGM a apporté son expertise au CEA afin de lui permettre d'optimiser la structuration projet et les processus de gestion adaptés au cadre collaboratif international exigeant du projet JT-60SA. LGM a assuré 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, ont permis au CEA d'optimiser le suivi des contrats et l'atteinte des objectifs de performances et de qualité nécessaires au présent succès du projet JT-60SA.



LGM (siège) 13 avenue Morane Saulnier 78140 Vélizy-Villacoublay

www.lgm.fr - Tél : 01.30.67.08.00

SDMS



Fabrication des 18 structures support OIS des aimants TF du tokamak JT-60SA

SDMS, société française de 100 personnes, est fabricant d'équipements et de sous-ensembles réalisés à partir de métaux nobles (alliages d'inox, nickel, aluminium et cuivre).



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, etc.).

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 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 OIS des aimants TF supraconducteurs du Tokamak JT-60SA.

La fabrication de ces structures a nécessité la mise en oeuvre de tout le savoir-faire SDMS et la mobilisation de son réseau de sous-traitants : Ingénierie méthodes, soudage manuel et FE, chaudronnerie de pointe, usinages grandes dimensions

Projet débuté en 2013, le 18^{ème} OIS a été livré en décembre 2017. Le montage de ces équipements sur le site JT-60SA au Japon, commencé en 2016, est une réussite.

SDMS la chaudronnerie blanche®

Les Condamines, 761 route de Valence - CS 40004 - 38160 SAINT-ROMANS France • Tél: +33 (0)476 64 99 99 • Fax: +33 (0)476 64 99 98
e-mail : sdms@sdms.fr • www.sdms.fr

Certifications ISO 9001 - ISO 14001 • Chaudronnerie blanche® est une marque déposée de SDMS • N° d'Agrément Formation : 82380394238
S.A.S. au capital de 1 114 000 € • RC Grenoble 62 B 225 • SIRET 062 502 257 00017 • Code NAF 2530Z • N° T.V.A. FR 60 062 502 257

Thales

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, stellarators), 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*).
- 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

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 fossiles⁷. 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.

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

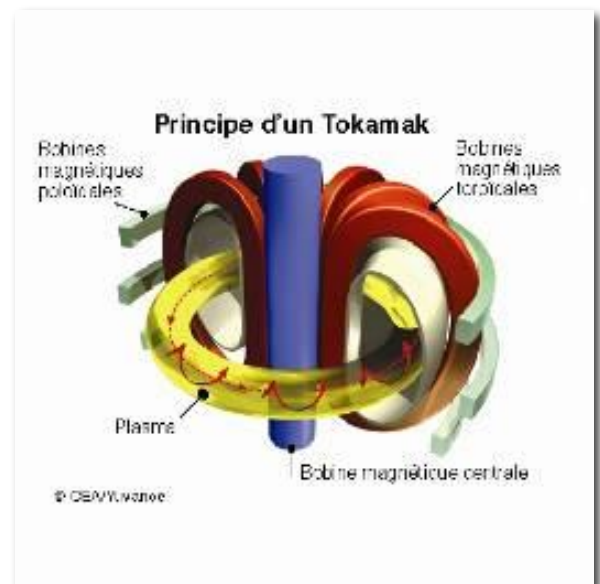
⁷ Un réacteur nucléaire de type REP (réacteur à eau pressurisée) de 1 000 MW consomme pour sa part environ 25 tonnes de combustible / an.

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.

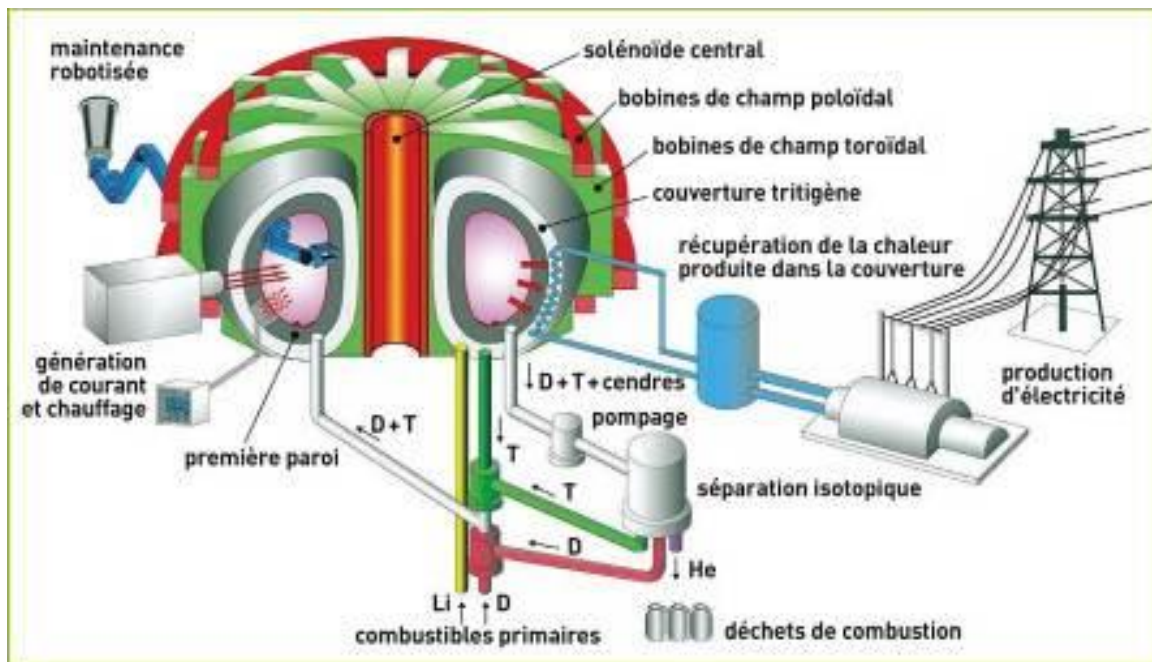


Schéma du principe de fonctionnement d'un réacteur électrogène de fusion nucléaire par confinement magnétique.

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.

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.

Le tokamak WEST du CEA

L'enjeu du programme scientifique de WEST - pour *Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak* - consiste à tester des composants pour le divertor d'Iter au sein de Tore Supra, qui s'est transformé en banc d'essai pour le grand tokamak international en construction à Cadarache. De par sa configuration particulière qui lui permet de réaliser des plasmas de longue durée, notamment

grâce au refroidissement « actif » des composants, West constitue une base unique d'expérimentation des matériaux face au plasma, avant leur assemblage sur Iter. Le tokamak du CEA devient une plateforme de tests pour un composant « critique » d'Iter, le divertor en tungstène activement refroidi. Son premier plasma a été produit l'année dernière.



Intérieur de l'enceinte du tokamak West (anciennement Tore Supra)

© CEA

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 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 tritium⁸, 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.

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, etc.).

⁸ 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.

Annexe III : 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 a débuté en 2007 les avec des travaux de génie civil sur le site, l'adaptation des routes entre Berre et Cadarache et la construction de l'école internationale à Manosque.

Un chantier hors norme

La construction des bâtiments techniques a été lancée en 2010. Les bâtiments du Siège Iter ont été inaugurés le 17 janvier 2013.

Les fondations parasismiques du réacteur, terminées le 27 août 2013, 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'élève sur 73 mètres de hauteur (13 mètres au-dessous du niveau de la plateforme et 60 mètres au-dessus). La construction du complexe tokamak (bâtiment de l'installation de recherche, bâtiment diagnostics et bâtiment tritium) devrait être terminée en 2018. Sa réalisation aura nécessité près de 16 000 tonnes de ferraille, 150 000 m³ de béton et 7 500 tonnes d'acier pour les structures des bâtiments !

Novembre 2017 a marqué la finalisation de 50 % du périmètre total des réalisations indispensables à la production du premier plasma.

Un soutien pour l'économie locale

Depuis le lancement du programme Iter, plusieurs centaines d'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, essentiellement locales, pour un montant d'environ 3 milliards d'euros à la mi 2017. L'attribution de ces contrats est également générateur d'emplois en particulier dans les sociétés d'ingénierie et de conseils.

Des convois Iter aux dimensions du projet

Des convois XXL (près de 800 tonnes) ont débuté sur les 104 km de l'itinéraire Iter spécialement aménagé entre Berre l'Étang et Cadarache.

Certains composants (180 tonnes) transitent en trois nuits tandis que d'autres, d'une taille plus modeste (97 tonnes), parcourent l'itinéraire en une nuit. Près de 250 convois exceptionnels dont une trentaine de près de 800 tonnes sont attendus de 2015 à 2020.



La construction des bâtiments ITER a démarré en 2010. Au cœur de la plateforme, le Complexe tokamak prend forme en décembre 2017. © ITER Organization

Annexe IV : 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



CONTACTS PRESSE

Guillaume MILOT
guillaume.milot@cea.fr
Tél. : 01 64 50 14 88

www.cea.fr
 [@CEA_Recherche](https://twitter.com/CEA_Recherche)