

TRITIUM: COMMENT CHANGER LE PLOMB EN OR?



DANS CE NUMÉRO

Page 2 Cryostat, une, première !

Page 3 Tritium: comment changer le plomb en or?

Page 4 Dans la fabrique des anneaux

EDITORIAL

Les alchimistes cherchaient à changer le plomb en or. Les physiciens et les ingénieurs d'ITER devront transformer le lithium, un métal aussi répandu que le plomb, en tritium, un élément encore plus rare et plus précieux que l'or. Pourquoi et comment ? Ce numéro 8 d'*ITER Le Magazine* lève le voile sur les « *modules tritigènes* », ces composants qui, intégrés à la paroi de la chambre à vide du tokamak, réaliseront cette transmutation (page 3).

Voilà pour la physique. Mais ITER c'est aussi, et de plus en plus, l'industrie : les premières pièces de la machine, monumentales, ont été livrées sur site (page 2) et l'outillage se met en place dans le bâtiment de bobinage où seront fabriqués quatre des six aimants de champ poloidal, trop imposants pour être transportés par la route (page 4).

L'équipe d'*ITER Le Magazine*.
editormag@iter.org

CRYOSTAT, UNE, PREMIÈRE !



Soigneusement entreposées dans l'immense atelier où les opérations d'assemblage et de soudage commenceront dans quelques mois, ces pièces donnent dès aujourd'hui la mesure du gigantisme de la machine ITER.

Depuis un an, les livraisons de pièces lourdes se succèdent sur le site d'ITER. Certaines, comme les quatre transformateurs réceptionnés aux mois de janvier et mai, ont été installées sur leurs emplacements définitifs ; d'autres ont été stockées dans l'attente de leur intégration dans l'un ou l'autre des bâtiments de l'installation. Quoique spectaculaire, leur arrivée, au cœur de la nuit, fait désormais partie de la routine du chantier.

Le convoi qui a franchi les grilles d'ITER le 10 décembre à 2 heures trente du matin a pourtant été accueilli avec une émotion particulière : composé de trois semi-remorques, il transportait les trois premiers éléments du cryostat, ce « thermos » géant qui enveloppera le tokamak, lui servira de support et assurera l'isolation thermique de ses aimants supraconducteurs. (Voir *Le Magazine* n°6, février 2015).

Une semaine plus tard, un deuxième convoi, chargé de trois autres éléments – des « segments » identiques à ceux du premier convoi, pesant chacun 50 tonnes –, suivait le même chemin. Avec les éléments annexes, acheminés indépendamment, le premier niveau (*Tier 1*) de la base du cryostat était complet – une douzaine de pièces d'acier poli, pour un poids total de 460 tonnes.

Déchargées, déballées, soigneusement entreposées dans l'immense atelier où les opérations d'assemblage et de soudage commenceront dans quelques mois, ces pièces qui représentent moins d'un huitième de la masse totale (3 850 tonnes) du cryostat donnent dès aujourd'hui la mesure du gigantisme de la machine ITER.

La livraison de ces premiers éléments, fournis par l'Inde et fabriqués par le géant industriel Larsen & Toubro Ltd, constitue également le premier des 29 « jalons » (*milestones*) validés par le Conseil ITER pour les années 2016-2017. Programmé

pour le premier trimestre 2016, ce premier jalon a été passé avec quelques semaines d'avance sur le calendrier.

« Nous pouvons célébrer aujourd'hui un accomplissement majeur, fruit d'un remarquable travail collectif et d'un effort coordonné, a déclaré Bernard Bigot, directeur général d'ITER, lors d'une brève cérémonie organisée dans le vaste atelier où le cryostat sera progressivement assemblé. *La collaboration est l'essence même d'ITER – c'est la condition première de notre succès.* »

Dans quelques mois, le deuxième niveau (*Tier 2*) de la base du cryostat sera livré, suivi par le premier niveau du cylindre inférieur. La base du cryostat est l'élément le plus lourd (1 250 tonnes) de tous ceux qui seront intégrés dans la machine.

Chacun des six segments livrés pèse 50 tonnes. Il faut en assembler six, ainsi que des pièces annexes, pour former le premier niveau de la base du cryostat, l'élément le plus lourd (1 250 tonnes) de tous ceux qui seront intégrés dans la machine.



Une naissance au Sommet

Par une froide journée de novembre à Genève, il y a un peu plus de trente ans, deux hommes se rencontraient pour la première fois.



Novembre 1985 : les deux hommes les plus puissants de la planète donnent l'impulsion politique à « la collaboration internationale la plus large possible » dans le domaine de la fusion.

Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev, à la tête des deux « superpuissances » qui dominaient alors le monde, avaient beaucoup à se dire.

Les tensions entre Soviétiques et Américains étaient fortes. La guerre froide menaçait de se réchauffer – ce que les deux hommes, en dépit de leurs différences, étaient déterminés à empêcher.

A Genève pendant les deux journées (19-20 novembre 1985) que dura ce Sommet, on parla beaucoup de réduction des armements nucléaires, du spectre d'une Troisième Guerre mondiale et de l'aspiration commune à une paix durable. « *Une guerre nucléaire ne peut être gagnée et doit être à tout prix évitée* » disait le communiqué commun publié à l'issue de la rencontre.

Le communiqué mentionnerait également l'engagement, dans une perspective de paix, « à promouvoir la collaboration internationale la plus large possible » dans le domaine de l'énergie de fusion afin de maîtriser « cette source d'énergie

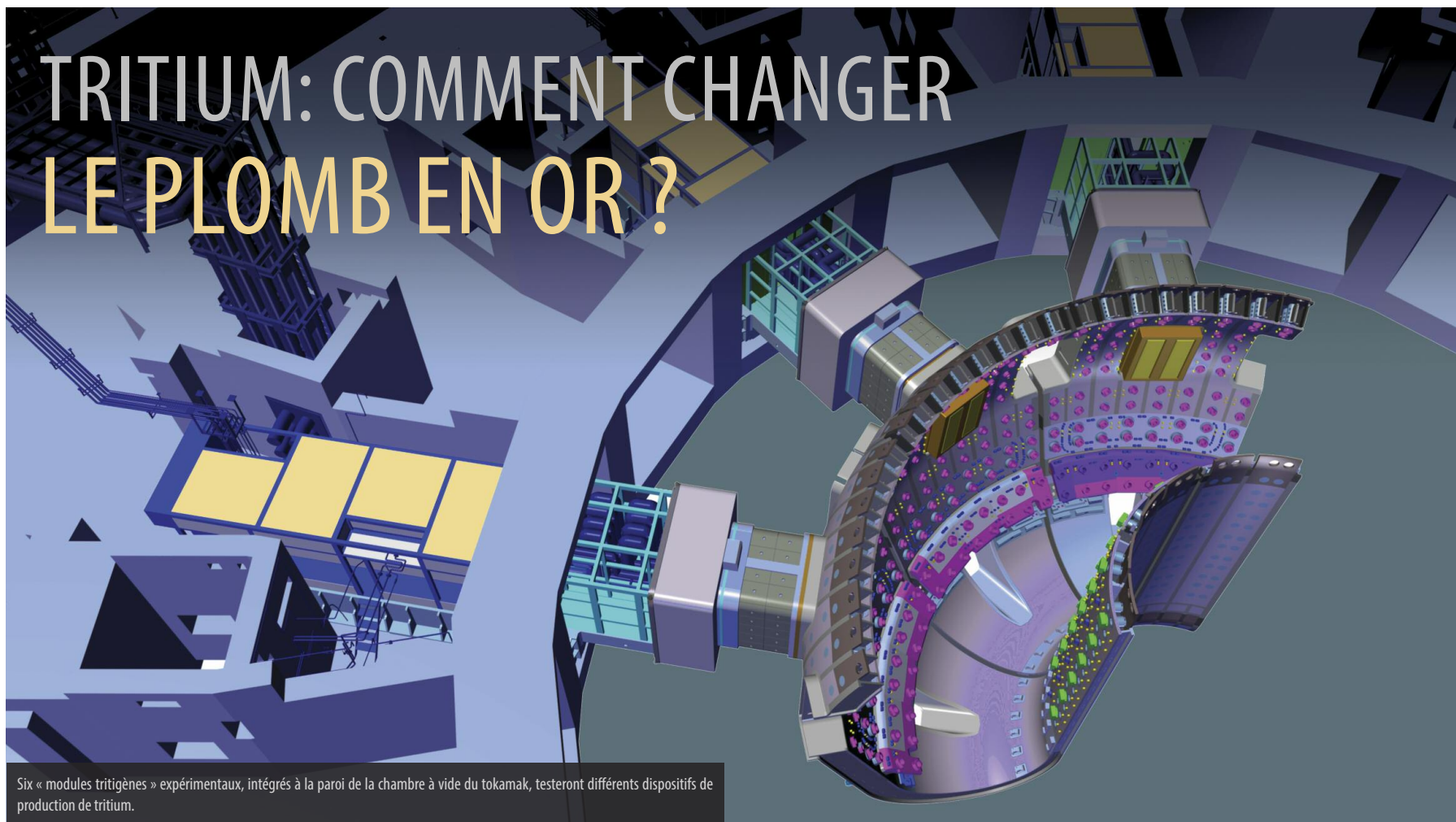
virtuellement inépuisable pour le bénéfice de l'ensemble de l'humanité. »

Ces quelques mots, la communauté internationale des spécialistes de la fusion les attendaient depuis des années. « *Nous savions que seul un vaste programme international pourrait nous permettre de construire la très grande machine capable de démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie de fusion*, se souvient Evgeny Velikhov, alors conseiller scientifique de Mikhaïl Gorbatchev et futur président du Conseil ITER de 2010 à 2012.

Le projet était ambitieux et promettait d'être coûteux. A Genève, les deux hommes les plus puissants de la planète venaient de lui donner l'indispensable impulsion politique.

Le « vaste programme international » était désormais en marche. Deux ans plus tard, il recevrait un nom, décliné en deux langues : ITER, acronyme de l'anglais Réacteur Thermonucléaire International Expérimental, ou plus simplement, en latin, « le chemin ».

TRITIUM: COMMENT CHANGER LE PLOMB EN OR?



Six « modules tritigènes » expérimentaux, intégrés à la paroi de la chambre à vide du tokamak, testeront différents dispositifs de production de tritium.

Pour produire de l'énergie à partir de la fusion d'atomes légers, la nature offre une dizaine de combinaisons possibles. En l'état actuel de la technologie, une seule toutefois nous est accessible : celle des deux isotopes¹ de l'hydrogène, le deutérium et le tritium.

Problème : si chaque mètre-cube d'eau contient 33 milligrammes de deutérium que l'on sait extraire de manière industrielle, le tritium lui, est d'un accès beaucoup plus difficile.

Dans la nature, le tritium n'existe qu'à l'état de traces : l'interaction des rayons cosmiques avec les hautes couches de l'atmosphère en produit annuellement quelques kilos (ou quelques grammes, les estimations varient...) auxquels s'ajoutent quelques dizaines de kilos, issus des essais nucléaires atmosphériques réalisés entre 1945 et 1980 et qui sont pour l'essentiel dissous dans l'eau des océans.

De petites quantités de tritium sont également générées par certains types de réacteurs nucléaires conventionnels, de type « CANDU » : de l'ordre de 100 grammes par an, en moyenne pour un réacteur de 600 MW. Multiplié par le nombre de réacteurs de ce type en service dans le monde, on obtient une production annuelle de l'ordre d'une vingtaine de kilos.

Cette production, aujourd'hui inutilisée, suffira pour alimenter ITER pendant la quinzaine d'années que durera sa campagne d'expériences nucléaires.

Au-delà, il faudra développer des solutions permettant de produire du tritium en grande quantité – de l'ordre de 100 à 200 kilos annuellement pour chaque réacteur en activité.

La nature, comme si elle avait anticipé cette problématique, offre une solution qui combine élégance et efficacité : c'est la réaction de fusion elle-même qui produira le tritium qui, en retour, l'alimentera. Mieux : tout se passera dans l'enceinte même du réacteur, de façon continue, dans un cycle parfaitement clos.

Lorsqu'au sein d'un plasma de fusion un noyau de deutérium fusionne avec un noyau de tritium, les particules dont ces deux éléments sont constitués (protons et neutrons) se recomposent en un noyau d'hélium et un neutron. Le noyau d'hélium, électriquement chargé, demeure prisonnier de la « cage » magnétique qui confine le plasma ; le neutron, électriquement neutre, s'en échappe et impacte la paroi de la chambre à vide. L'énergie du noyau d'hélium entretient la réaction de fusion, celle du neutron chauffe l'eau sous pression qui circule dans la paroi, amorçant ainsi le cycle de production d'électricité.

Ce neutron toutefois peut être utilisé à d'autres fins. Quand un neutron impacte un atome de lithium-6² il fait voler en éclats les « briques » qui le constituent (3 protons et 4 neutrons) et les réagence en un atome d'hélium (2 protons, 2 neutrons) et un atome de tritium (1 proton, 2 neutrons) tout en libérant de l'énergie.

Du strict point de vue de la physique, le problème se trouve donc résolu. Reste à mettre en œuvre les solutions technologiques qui permettront de traduire une loi physique en dispositif de production et réaliser ainsi l'indispensable « autosuffisance en tritium » des réacteurs de demain.

Luciano Giancarli est de ceux qui, depuis près de trente ans, se penchent sur cette question. Au sein du programme ITER, il dirige la section chargée du développement des « modules tritigènes » (*Test Blanket Modules*, ou TBM), ces composants qui, intégrés à la paroi de la chambre à vide du tokamak, testeront différents dispositifs de production de tritium. « Le premier problème qui se pose, explique-t-il, est celui du ratio entre les neutrons générés par la réaction de fusion et

les atomes de tritium effectivement produits. Pour que le système fonctionne, ce ratio doit impérativement être supérieur à 1. Il faut donc interposer entre le neutron incident et sa cible de lithium un élément 'multiplicateur de neutrons' – comme le plomb ou le béryllium.³ »

Ce principe posé, les membres d'ITER ont développé un certain nombre de concepts de modules qui seront testés, dans les conditions réelles d'un réacteur de fusion, au sein de la chambre à vide du tokamak ITER. Fondés sur le même principe physique (la réaction neutron/lithium-6), chacun des modules diffère par son architecture, ses matériaux de structure, la forme (solide ou liquide) sous laquelle le lithium sera utilisé, la manière dont le tritium sera extrait, le système de refroidissement, etc.

Dans la conception du tokamak ITER, six emplacements leur ont été réservés. L'Europe en occupera deux ; la Chine, l'Inde, le Japon et la Corée occuperont les quatre autres. (Les Etats-Unis et la Russie participent au programme en fournissant les données expérimentales essentielles à la réalisation de ces systèmes.)

Les résultats de ces expérimentations seront accessibles à tous, mais les enjeux économiques de la production de tritium sont tels que chacun gardera pour lui les « secrets de fabrication » des modules.

« Nous estimons que, dans les conditions de fonctionnement d'ITER, la production de tritium maximale de chacun des modules devrait être de l'ordre de 20 milligrammes par jour. Dans un tokamak commercial, elle sera proportionnelle à la puissance délivrée – de l'ordre de 150 grammes par jour et par gigawatt », rappelle Luciano Giancarli.

La phase de conception (*conceptual design*) de chacun des modules et de leurs systèmes associés est aujourd'hui finalisée. Comme pour chaque élément de l'installation ITER, ces concepts seront disséqués, analysés et passés en revue par un comité spécialisé avant d'être formellement approuvés. Quant à la fabrication, elle devrait être lancée à partir de 2020.

Dans le cadre des objectifs d'ITER, comme dans celui, plus large, de l'avenir de la fusion, ces six modules jouent un rôle fondamental : en démontrant leur capacité à transformer un élément aussi abondant que le plomb en un autre, plus rare et précieux que l'or, ils ouvrent la voie à l'exploitation industrielle et commerciale de l'énergie de fusion.

Alors que l'hydrogène « ordinaire » H est constitué d'un unique proton, celui de son isotope ³H (tritium) compte un proton et deux neutrons. Le tritium est un élément radioactif (émetteur β très peu pénétrant) dont la demi-vie est de 12,3 ans.

Son rayonnement est si faible qu'il est arrêté par l'épaisseur de l'épiderme ou d'une simple feuille de papier. Le tritium ne présente un danger pour la santé que s'il est ingéré ou inhalé après s'être lié à d'autres éléments (eau tritiée par exemple).

La gestion du tritium dans ITER fait donc l'objet d'une réglementation et de procédures très strictes.

¹ La plupart des éléments chimiques existent sous plusieurs formes différentes qu'on appelle isotopes. Les isotopes d'un même élément diffèrent par la composition de leur noyau atomique. Dans une réaction chimique, ils se comportent de manière identique ; dans une réaction nucléaire, ils peuvent se comporter de manière très différente.

² Le lithium-6 est un isotope stable du lithium, présent à raison de 7,5% dans le lithium naturel.

³ Quand un neutron impacte un atome de plomb ou de béryllium il en perturbe la structure atomique. Après absorption du neutron incident, l'atome perturbé éjecte deux neutrons, ce qui augmente le nombre de neutrons disponibles pour, dans un deuxième temps, générer du tritium à partir du lithium-6 contenu dans les modules.



Dévidoirs, machine de redressage, table de bobinage, moules d'imprégnation sous vide... l'outillage industriel se met progressivement en place dans l'installation de bobinage, un bâtiment de 12 000 mètres carrés, long de 257 mètres et large de 49.

Les bobines de champ poloïdal (PF Coils), ces anneaux magnétiques qui ceinturent la chambre à vide du tokamak, comptent parmi les pièces les plus imposantes de toute l'installation ITER.

Au nombre de six, elles s'étagent depuis les « pôles » jusqu'à « l'équateur » de la machine. Leur diamètre varie de ~ 8 à ~24 mètres, leur poids, de 193 à 396 tonnes.

Les plus petites seront fabriquées l'une par la Chine (sous contrat avec l'Europe), l'autre par la Russie. Comme les autres éléments du tokamak, elles seront transportées par voie maritime jusqu'au port de Fos-sur-Mer et acheminées par l'itinéraire spécialement aménagé jusqu'au site d'ITER.

La taille des quatre autres, fabriquées par l'Europe, exclut toute possibilité de transport routier. Elles seront donc produites sur le site même, dans un bâtiment de 12 000 mètres carrés, long de 257 mètres et large de 49 – l'installation de bobinage.

Dans cet espace immense, que domine l'impressionnant palonnier circulaire qui déplacera les bobines au fil des différentes étapes de leur fabrication, l'outillage est en cours d'installation : dévidoirs, machine de redressage, table de bobinage, moules d'imprégnation sous vide... tout reflète la démesure des pièces et la complexité des procédures.

Tout commence avec un objet très particulier : le « câble en conduit », conditionné en tourets de 10 à 20 tonnes contenant des enroulements longs de 400 à 900 mètres. Produit par l'Europe, la Chine et la Russie, le « câble en conduit » se présente sous la forme d'un fourreau d'acier, d'une section de 5 cm, contenant les brins de niobium-titane au cœur desquels circule l'hélium liquide qui les refroidit à *moins* 269° C. Un mètre de « câble-en-conduit » pèse plus de 25 kilos ; il en faudra 65 kilomètres pour fabriquer les six bobines PF de la machine ITER, dont 47 pour les seules bobines produites sur site...

Une fois livré, le câble-en-conduit doit être dévidé, redressé, nettoyé, enveloppé d'un ruban isolant, puis cintré pour épouser précisément, par enroulements successifs, le diamètre de la bobine à laquelle il est destiné. Cette opération permet d'obtenir une « double galette » d'un poids de 16 à 35 tonnes qui sera alors transférée vers un autre poste de travail pour être imprégnée, à chaud et sous vide, de résine isolante.

Pour finaliser la bobine, il faut encore « empiler » les doubles galettes les unes sur les autres (entre 6 et 9 selon les bobines) ; les imprégner à nouveau de résine pour renforcer leur rigidité et les équiper de leurs accessoires et de leur instrumentation.

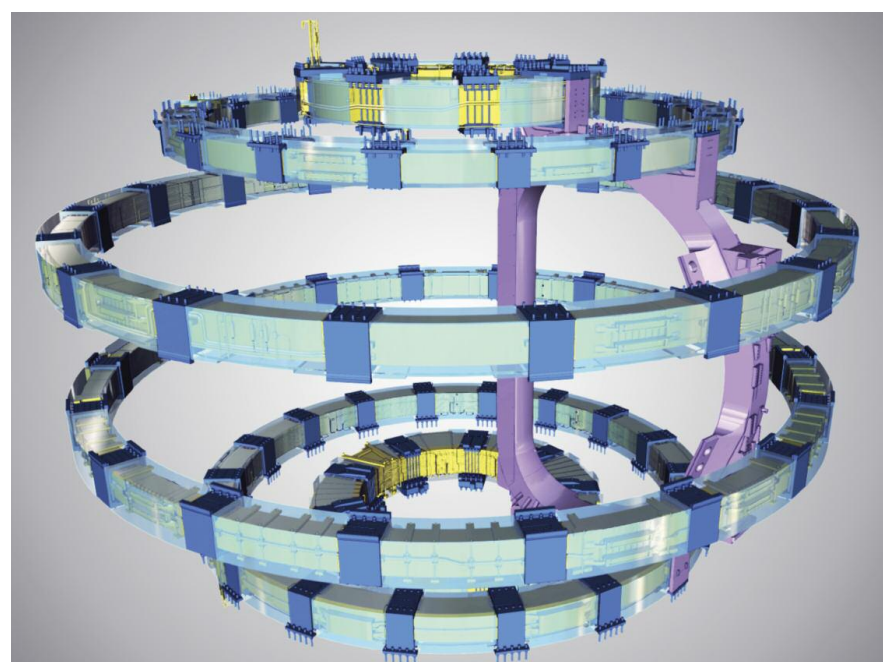
La bobine subit alors un ensemble de tests électriques et cryogéniques d'une durée approximative de trois mois. Bonne pour le service, elle peut alors être

chargée sur une plateforme de transport qui la conduira jusqu'au Hall d'Assemblage voisin – dernière étape avant l'intégration dans le tokamak.

Pour valider l'ensemble de ces procédures, une bobine-test aux dimensions de la bobine n°5 (17 m de diamètre) sera mise en chantier dès le mois de février. La fabrication des « vraies » bobines devrait commencer au mois d'août selon la séquence suivante : PF 5 et PF 2 (~ 17 m de diamètre) ; PF 3 et PF 4 (~ 24 m) – l'outillage étant conçu pour s'adapter aux dimensions de chaque bobine.

Pour chaque bobine, il s'écoulera en moyenne un an et demi entre les premières opérations (dévidage du câble) et la fin de la fabrication.

Une par une, à mesure que progresseront les opérations d'assemblage du tokamak, les bobines seront positionnées autour de la chambre à vide du tokamak : tout en bas, la bobine PF 6, fabriquée en Chine (~ 8,5 m de diamètre), puis les quatre bobines européennes, enfin, tout en haut, la bobine PF 1 (~ 8 m) livrée par la Russie.



Ceinturant la chambre à vide du tokamak, six bobines en forme d'anneau (~ 8 à ~ 24 mètres de diamètre) créent la composante poloïdale du puissant champ magnétique qui confine le plasma.