



china eu india japan korea russia usa

LE PROGRAMME ITER

CONSTRUCTION, FABRICATIONS & ASSEMBLAGE



PROGRÈS EN IMAGES

2013
2024





LE PROGRAMME ITER



CONSTRUCTION, FABRICATIONS & ASSEMBLAGE

PROGRÈS EN IMAGES

2013.2024

MAÎTRISER LE FEU DES ÉTOILES

Au cœur du Soleil et des étoiles, les conditions de température et de pression sont telles que les noyaux d'hydrogène fusionnent et libèrent de formidables quantités d'énergie. Sitôt cette réaction identifiée, dans les premières décennies du XX^e siècle, une ambition s'est fait jour : reproduire et exploiter cette source d'énergie pour produire de l'électricité.

Depuis qu'elle a été véritablement engagée, il y a plus de 75 ans, la recherche sur « l'énergie de fusion » a progressé de manière spectaculaire. Les principes physiques sur lesquels elle repose ont peu à peu livré leurs secrets ; des centaines de machines, toujours plus performantes, ont été construites et exploitées dans la plupart des pays industrialisés.

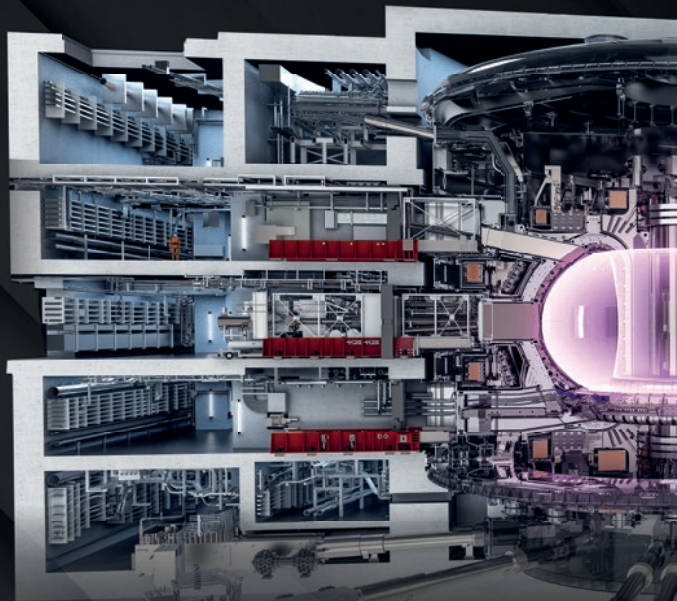
Avec ITER, la communauté scientifique internationale est aujourd'hui prête à démontrer la faisabilité scientifique, technique et industrielle de cette nouvelle source d'énergie, propre, sûre, et fondée sur des combustibles abondants et universellement disponibles.

Pour construire et exploiter ITER, sept partenaires—la Chine, l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis—ont mis en commun leurs moyens scientifiques, technologiques, industriels et humains. ITER est la plus large collaboration scientifique jamais établie.

À Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache (Bouches-du-Rhône), à une quarantaine de kilomètres au nord d'Aix-en-Provence, la construction des bâtiments de l'installation est aujourd'hui terminée et la fabrication des principales pièces de la machine touche à sa fin. La phase d'assemblage est en cours et la machine, un « tokamak¹ », devrait être opérationnelle à l'horizon 2035.

Des collines de Haute-Provence aux usines et aux laboratoires des partenaires du programme, ce livre de photos vous invite à découvrir la réalité d'ITER, cette entreprise immense qui se déploie sur trois continents et rassemble des milliers d'hommes et de femmes animés par une même ambition : maîtriser le feu des étoiles et le donner en partage aux générations futures.

¹ « Tokamak » est un acronyme russe qui signifie « chambre toroidale, bobines magnétiques ». Ce type de machine a été initialement développé par des scientifiques soviétiques dans les années 1960.

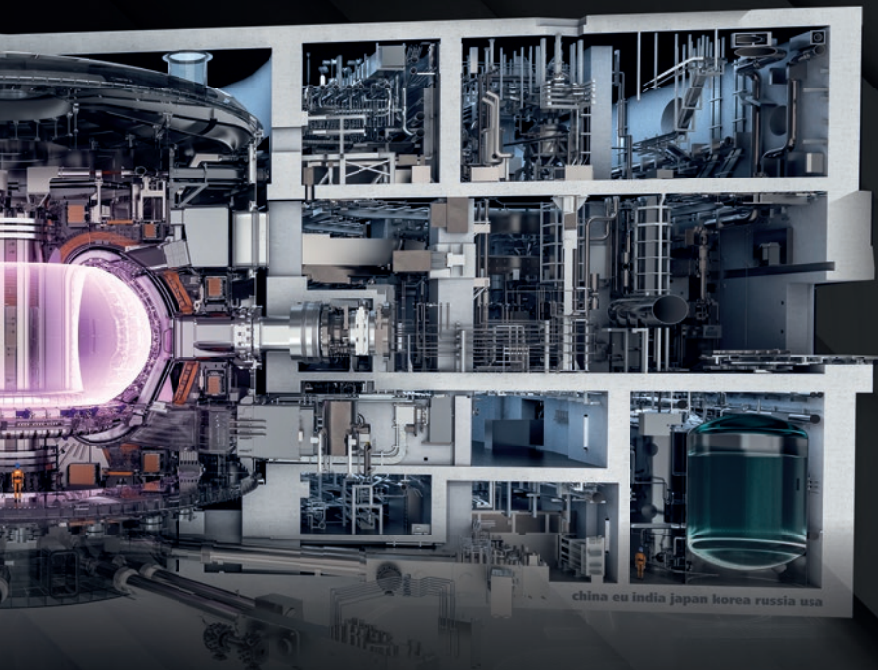


LE TOKAMAK ITER

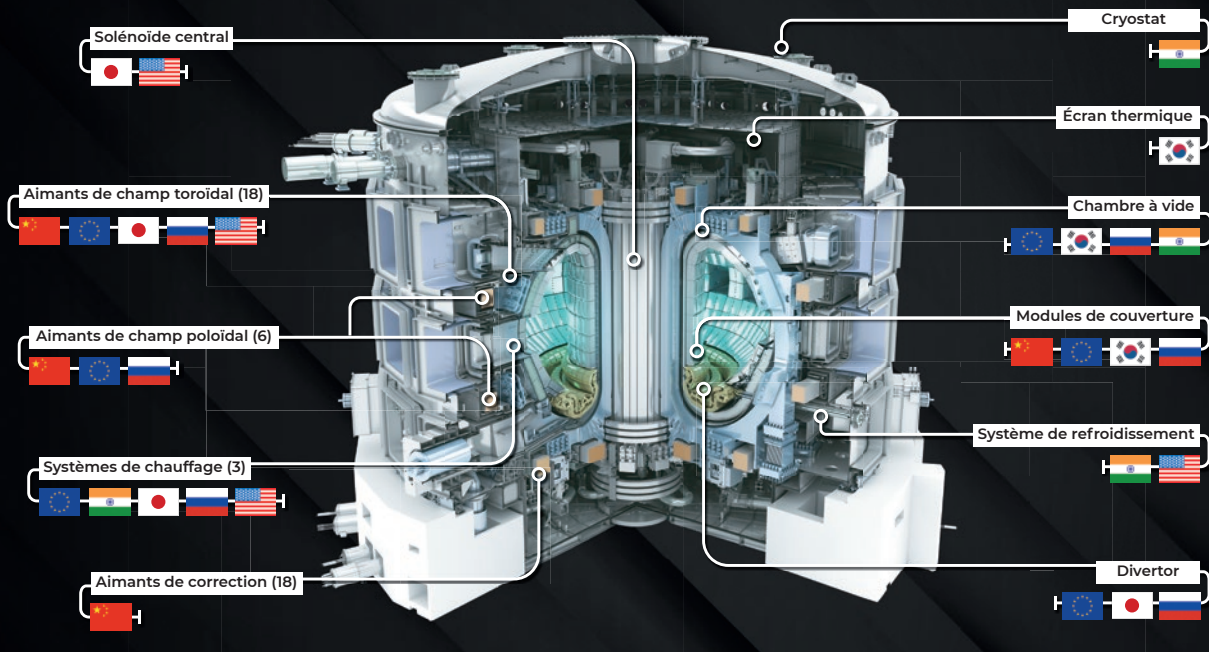
Les premiers tokamaks ont été construits à la fin des années 1950, à une époque où la communauté scientifique internationale testait différents concepts de machines susceptibles de reproduire les réactions nucléaires à l'œuvre dans le Soleil et les étoiles.

Développée en Union soviétique, l'architecture tokamak allait se révéler particulièrement performante. Au terme de deux décennies, on compterait quelque 200 tokamaks en opération dans différents pays. En explorant la physique des plasmas (des gaz ionisés très chauds), en testant divers matériaux et en expérimentant des technologies inédites, ces machines ont ouvert la voie au programme ITER.

ITER est, de loin, le plus grand et le plus puissant des tokamaks jamais construits. Disposant d'un volume de plasma de 840 m³, cinq fois plus important que celui du plus grand tokamak existant, d'un système magnétique supraconducteur d'une puissance inégalee et de dispositifs de chauffage capables de porter la température du plasma à 150 millions de degrés C, le tokamak ITER intègre l'ensemble des systèmes et des technologies indispensables aux futurs réacteurs de fusion industriels et commerciaux.

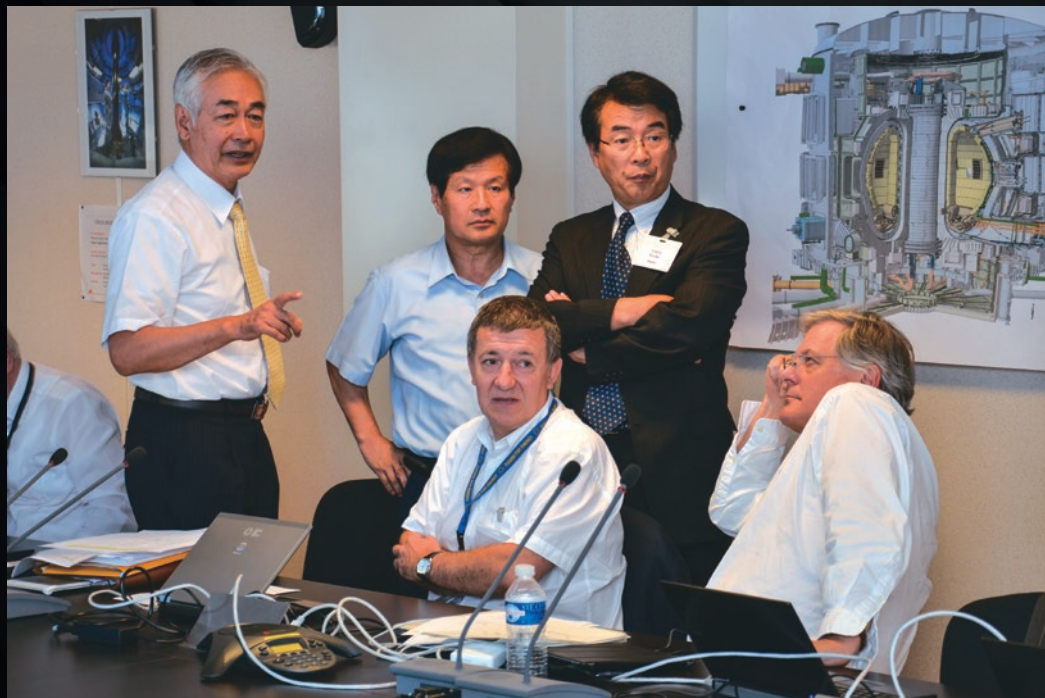


QUI FOURNIT QUOI ?





Le 28 juin 2005, les membres d'ITER ont unanimement choisi le site proposé par l'Europe : un espace de 180 hectares dans la vallée de la Durance, à 75 kilomètres au nord de Marseille. Les travaux d'aménagement ont débuté au mois de janvier 2007 sous la responsabilité de la France. Deux ans plus tard, une plateforme de 42 hectares était viabilisée et dès le mois d'août 2010, la construction des premiers bâtiments était lancée.



En 2013, réunion au sommet avec certains des responsables des Agences domestiques ITER. De gauche à droite : Osamu Motojima, deuxième directeur général d'ITER, Kijung Jung (Corée), Jean-Marc Filhol (Europe, intérim), Eisuke Tada (Japon) et Ned Sauthoff (États-Unis).



Au travers de ce ferrailage particulièrement complexe, plus de 15 000 m³ de béton seront bientôt coulés pour réaliser le radier du Complexe tokamak - une dalle de 1,5 mètre d'épaisseur, reposant sur 493 plots parasismiques, qui supportera la masse du bâtiment (400 000 tonnes) et, au centre, celle de la machine (23 000 tonnes).



Sur la plateforme, dans l'usine où l'Europe s'apprête à lancer la fabrication des aimants annulaires du tokamak, ce palonnier circulaire sera utilisé pour déplacer les bobinages tout au long des différentes étapes de leur élaboration et de leur intégration.



Une vue aérienne partielle de la plateforme ITER au mois de septembre 2013 : au premier plan, la dalle encore nue de l'Atelier du Cryostat ; en bas à gauche, l'extrémité de l'usine de bobinage des aimants de champ poloidal (annulaires) ; au centre le radier du Hall d'assemblage et, en contrebas, les fondations du Complexe tokamak ; à l'arrière plan, le siège d'ITER Organization qui, à cette date, accueille déjà quelque 500 personnes.



Le 11 décembre 2013, le coulage du béton de la dalle sur laquelle reposeront les 400 000 tonnes du Complexe tokamak commence peu avant l'aube. Le Complexe tokamak est un ensemble constitué du Bâtiment tokamak, qui abritera la machine, du Bâtiment tritium et du Bâtiment diagnostics.



Au mois d'août 2014, au terme de quatre années de travaux, les équipes coulent le béton dans la partie centrale de la dalle du Complexe tokamak, à l'emplacement futur de la machine, là où la charge sera la plus lourde.



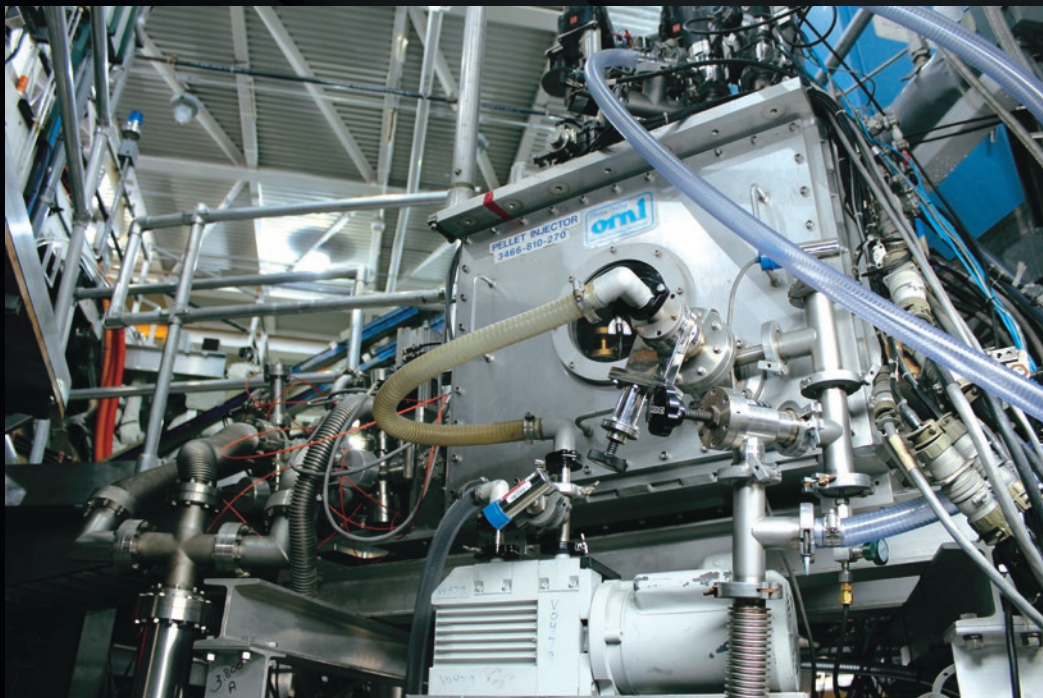
En Italie, un prototype de secteur de chambre à vide, à échelle 1:3, est soumis à des tests de flexion. L'Europe fournit 5 des 9 secteurs de chambre à vide requis pour créer le volume toroïdal dans lequel se produiront les réactions de fusion.



La Corée, qui doit fournir 4 des 9 secteurs de chambre à vide de la machine, a également lancé les fabrications. Ici, dans l'usine Hyundai Heavy Industries de Ulsan, sur la côte orientale de la péninsule, on procède à l'usinage d'un sous-élément de secteur.



À Glazov, dans la région d'Oudmourtie, en Russie, l'usine Chepetsky Mechanical Plant produit les brins supraconducteurs destinés aux bobinages des aimants du tokamak.



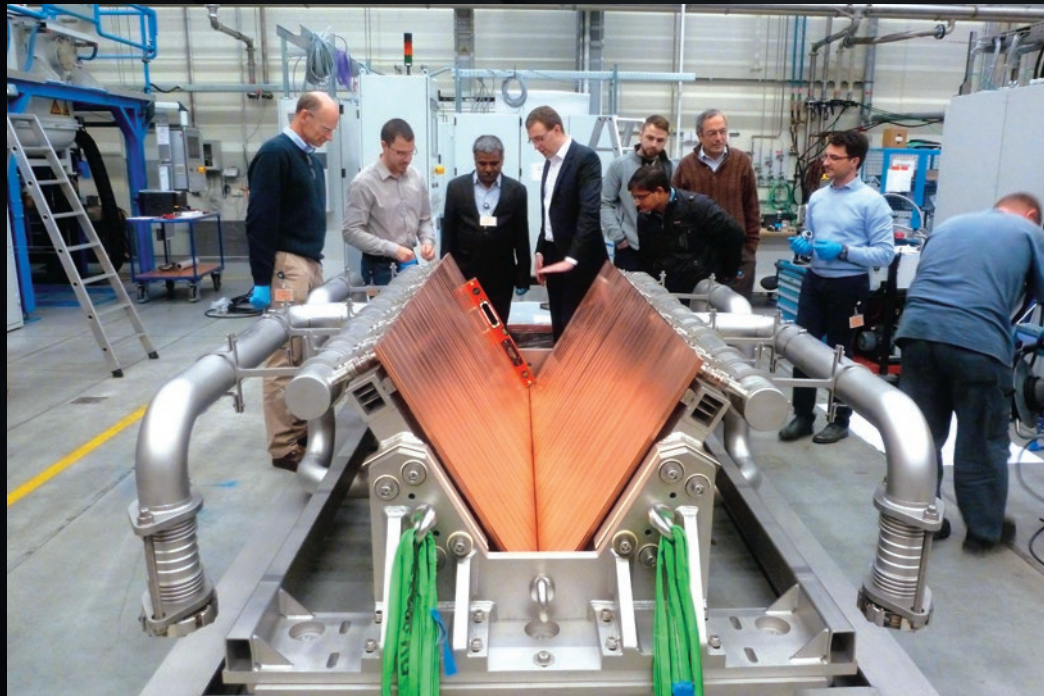
Porté à la température de 150 millions de degrés, le plasma sera alimenté en combustible par de minuscules glaçons de deutérium-tritium. Ici, un injecteur de glaçons développé par le laboratoire de Oak Ridge, aux États-Unis, est en cours de test sur le tokamak DIII-D.



Dans la fonderie d'Industeel-Le Creusot (Saône-et-Loire), les lingots d'acier sont transformés en plaques qui seront expédiées en Corée, en Inde, en Russie et ailleurs en Europe. La fonderie fournit quelque 10 000 tonnes de plaques d'acier destinées à ITER.



Une centaine de kilomètres séparent le site d'ITER du port de Marseille-Fos où sont déchargées les plus volumineuses des pièces de la machine. L'itinéraire dédié, que la France a aménagé, a été testé avec une charge de 600 tonnes.



Au mois de décembre 2014, l'Inde livre sa première contribution « en nature » : un élément (*beam dump*) destiné à la source d'ions du système d'injection de particules neutres (Neutral Beam Test Facility) en cours de développement à Padoue, en Italie.



Un transformateur électrique de 90 tonnes, fourni par les États-Unis, inaugure « l'itinéraire ITER ». Quelque 250 convois « hautement exceptionnels » vont se succéder tout au long des phases de construction et d'assemblage de l'installation ITER.



La structure métallique du Hall d'assemblage, culminant à 60 mètres, est désormais en place. C'est ici, dans ce vaste bâtiment, que se dérouleront les activités de pré-assemblage des principaux éléments de la machine.



Au mois de mars 2015, Bernard Bigot (5e depuis la droite), ancien administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), a été nommé directeur général d'ITER. Le Comité de gestion du programme (*Executive Project Board*) qu'il a mis en place doit renforcer la collaboration avec les Agences domestiques.



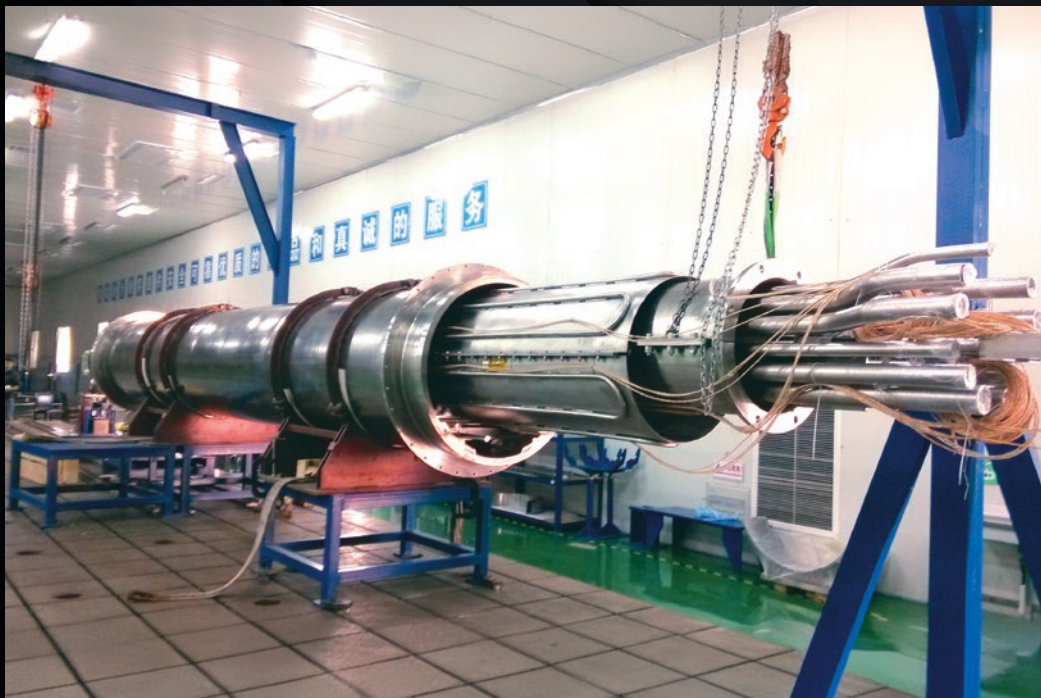
Fourni par les États-Unis, un des cinq réservoirs de drainage destinés au système de refroidissement du tokamak vient d'être livré sur site.



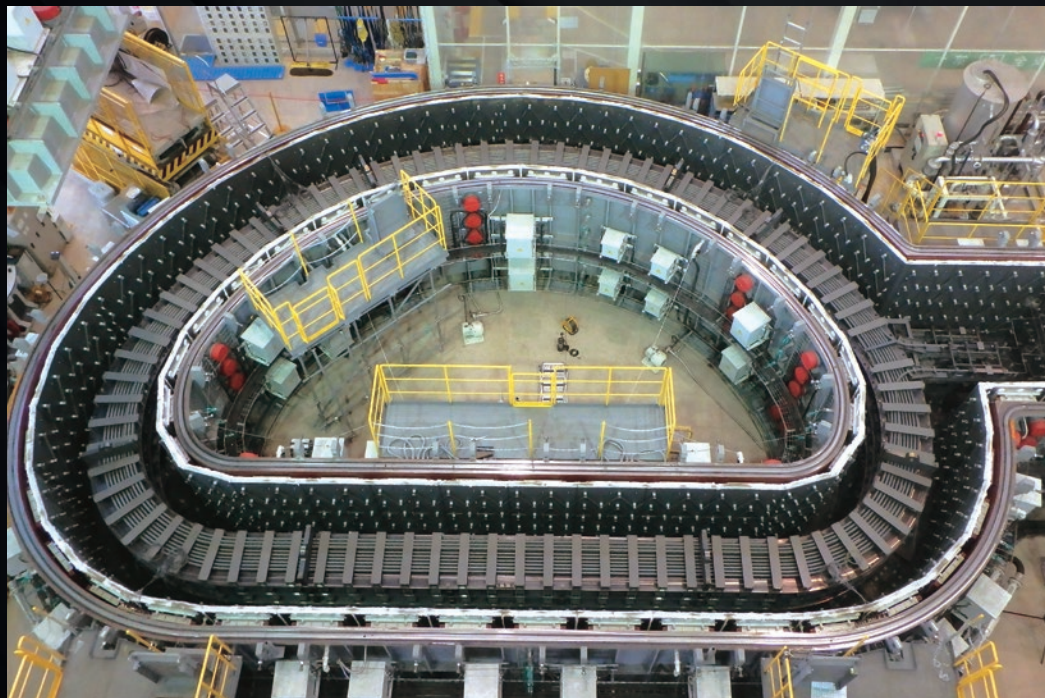
Au printemps 2015, deux cuves de 100 m³ destinées au système de traitement du tritium sont livrées sur site. Fournies par l'Europe, elles ont été fabriquées en Espagne.



Deux fois par an, ITER ouvre grand ses portes au public – l'occasion de découvrir l'installation, de rencontrer et de questionner ceux qui l'ont conçue et la construisent.



Refroidissement, alimentation électrique, instrumentation, tout passe par ces éléments complexes appelés « cryostat feedthroughs ». Ici, un prototype d'une longueur de 10 mètres est en cours de test à l'Institut de physique des plasmas de l'Académie des sciences chinoise (ASIPP).



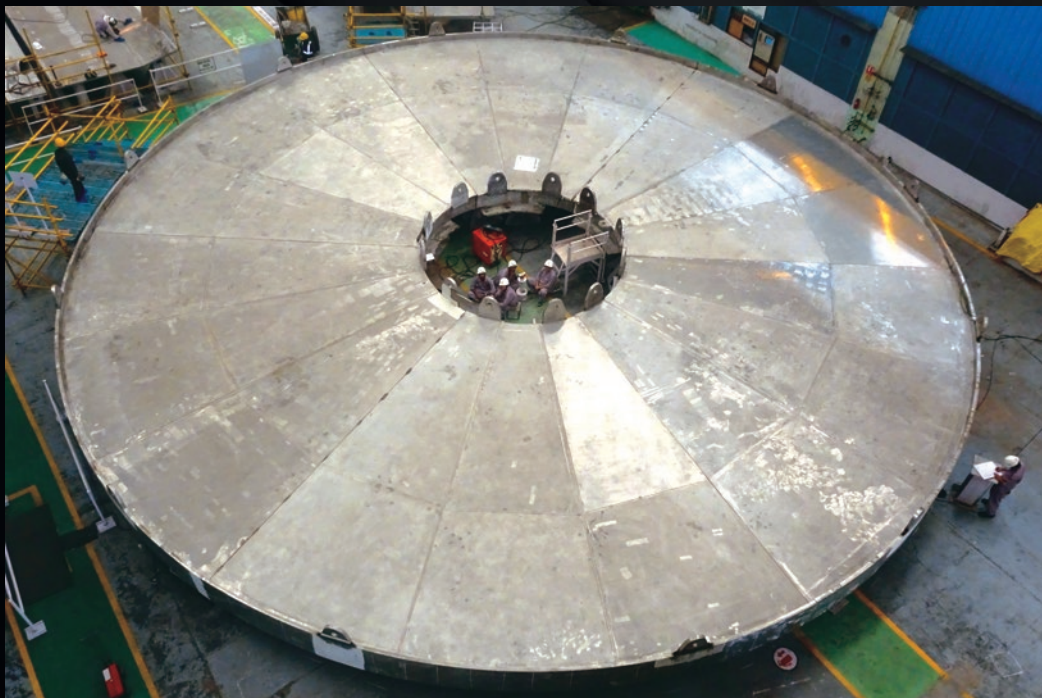
Pour former le composé supraconducteur niobium-étain, les bobinages des aimants de champ toroidal (verticaux) doivent être soumis pendant une centaine d'heures à une température de 650°C (ici chez Mitsubishi Heavy Industries au Japon).



Des cuves de drainage destinées au circuit de refroidissement du tokamak sont en cours de fabrication dans l'usine Joseph Oat Corporation de Camden, dans le New Jersey.



L'Europe fournit le système de télémanipulation du divertor de la machine. Ici, début 2015 au DTP2 Divertor Test Platform facility de Tampere, en Finlande, on procède aux tests finaux sur l'une des 54 cassettes du divertor



Chez Larsen & Toubro Ltd, en Inde, on a assemblé les différents segments de la base du cryostat pour en vérifier l'alignement. Une fois finalisée, la base pèsera 1 250 tonnes – le plus lourd de tous les éléments de la machine.



Au mois de juin 2015, à l'Institut de physique des hautes énergies de Protvino, près de Moscou, les spécialistes du Cable Institute (JSC VNIIPK) finalisent la production de câbles supraconducteurs destinés aux aimants de champ toroïdal du tokamak. Au total, en cinq ans, 120 tonnes de « câbles en conduit » auront été produites par la Russie.



Au mois d'avril 2015, la ligne de production des bobines destinées aux six modules (plus une rechange) du solénoïde central est inaugurée au Centre des technologies magnétiques de General Atomics à Poway, près de San Diego, en Californie.



Au mois de mai 2015, un prototype de « gyrotron », le dispositif qui génère les puissants faisceaux de micro-ondes utilisés pour chauffer le plasma, vient de subir avec succès les tests de réception dans les ateliers de la société Gycom Ltd. à Nijni Novgorod, en Russie.



D'une épaisseur de 3 mètres, le bouclier de protection biologique (bioshield) en cours de construction (au centre) isole l'environnement des radiations générées par les réactions de fusion au cœur du tokamak.



Ce vaste espace dans les sous-sols du Bâtiment tokamak sera bientôt occupé par une forêt de câbles, de canalisations et de barres d'alimentation électrique. Les supports de ces équipements seront soudés aux plaques d'ancrage visibles sur le sol, sur les murs et au plafond.



Quatre des six bobines de champ poloidal qui ceignent le tokamak seront fabriquées sur site par l'Europe, dans cette usine dont l'outillage est en cours de qualification.



En 2016, quelque 1 500 ouvriers, techniciens et ingénieurs sont directement mobilisés par la construction de l'installation scientifique ITER. Le travail est organisé en deux postes et demi, le dernier se terminant à 22 heures 30



Pour maintenir à très basse température les aimants supraconducteurs et les systèmes de pompage sous vide, ITER recourt à un vaste éventail de technologies cryogéniques. Produits par une « usine à froid » parmi les plus puissantes au monde, les fluides seront distribués par un vaste réseau de tuyauteries, de pompes et de vannes.



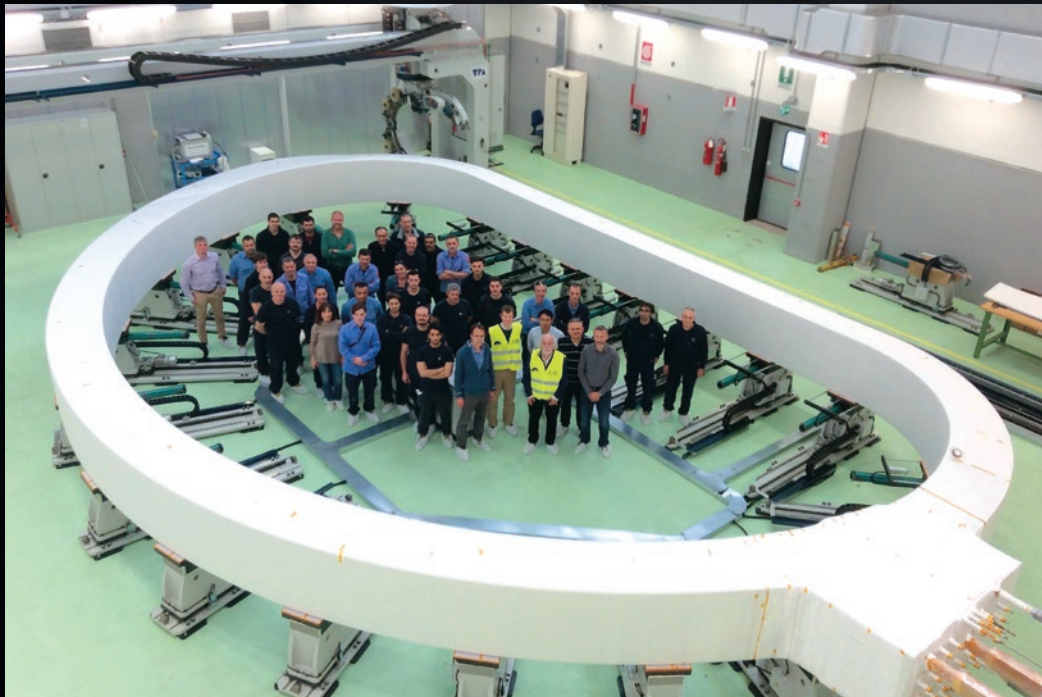
Les pièces les plus massives, comme cette cuve fournie par l'Europe et destinée à l'usine cryogénique, sont déchargées au port de Fos-sur-Mer avant d'emprunter « l'itinéraire ITER » pour être livrées sur le site de construction.



Chez Mitsubishi Heavy Industries, à Futami, au Japon, la production en série des « doubles galettes » qui forment le cœur des bobinages des aimants de champ toroidal du tokamak est lancée.



Destinés au réseau électrique pulsé, les trois transformateurs-abaisseurs (300 MVA, 460 tonnes, 15 mètres de haut) que fournit la Chine ont passé avec succès les tests de réception en usine. Le premier d'entre eux sera livré au mois de septembre 2016.



En forme de « D », les aimants de champ toroïdal créent le champ magnétique qui confine le plasma. L'Europe a finalisé un premier bobinage, le cœur supraconducteur de l'aimant, qui sera ultérieurement inséré dans une structure d'acier.



Tirée et poussée par deux puissants remorqueurs, et escortée par un détachement de la Gendarmerie maritime, la barge de transport et son chargement (un semi-remorque et une poutre de pont roulant de 155 tonnes) s'apprêtent à entrer dans l'étroit chenal qui donne accès à l'Étang de Berre.



Activement refroidi et recouvert d'une mince couche d'argent, l'écran thermique protégera les aimants des transferts de chaleur radiatifs. Chez SFA Engineering, en Corée, les opérations de soudage d'un premier panneau sont en cours.



La plus petite des bobines de champ poloidal (9 mètres de diamètre) est en cours de fabrication au chantier naval Srednevesky de Saint-Petersbourg, en Russie. La première de ses huit « doubles galettes » est terminée.



Fabriquées en Espagne, deux poutres destinées au double pont roulant du Hall d'assemblage stationnent en rase campagne, à une vingtaine de kilomètres d'ITER. Les convois transportant les charges les plus lourdes ne circulent que la nuit, de manière à limiter leur impact sur les riverains.



Pour mettre en place les poutres du double pont roulant, une grue à chenilles capable de lever 1 000 tonnes a été mobilisée. Les câbles et crochets de son système de levage passent au travers du toit du Hall d'assemblage pour manipuler les poutres et les aligner sur des rails à 43 mètres de hauteur.



Comme des cardinaux réunis en conclave, les participants à l'ITER Business Forum se font face dans une salle du Palais des Papes d'Avignon. La manifestation est organisée depuis 2009 et réunit autour d'ITER les industriels du monde entier.



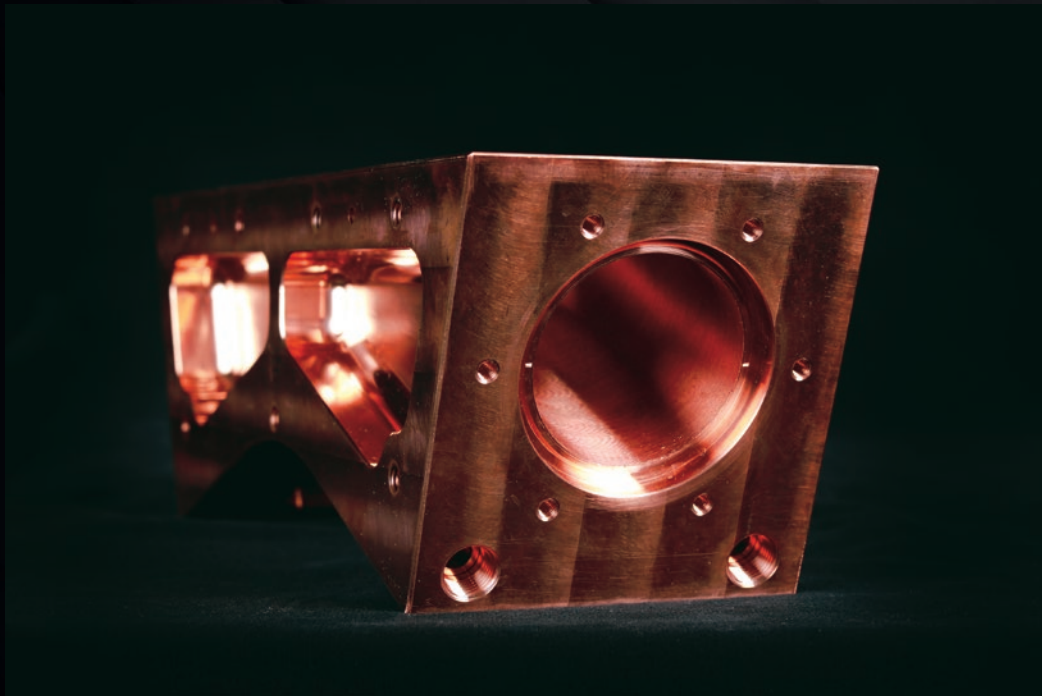
Les opérations de coulage du béton se poursuivent afin de finaliser le bouclier de protection biologique (*bioshield*) préalablement à l'installation des éléments captifs. C'est au cœur de cet espace cylindrique que sera assemblé le plus grand tokamak du monde.



Sur site, dans sa vaste usine de bobinage, l'Europe vient de lancer la fabrication de la bobine de champ poloidal n° 5 d'un diamètre de 15 mètres et d'un poids de 340 tonnes.



À six mètres au-dessus du sol, la maquette au 1/15e d'un dispositif haute tension destiné à l'installation MITICA vient d'être testée par la société allemande HSP GmbH. MITICA est un banc-test en cours de construction au Neutral Beam Test Facility de Padoue, en Italie.



Générées dans le Bâtiment radiofréquence, les faisceaux de micro-ondes du système de chauffage électron-cyclotron sont acheminés vers le plasma par des guides d'ondes, dont cet élément prototype fait partie. La conception et la fabrication des guides d'ondes relèvent de la responsabilité des États-Unis.



La quasi-totalité de la plateforme ITER se révèle dans cette image prise depuis l'une des plus hautes grues du chantier. La structure rectangulaire en cours de construction, au centre, est le Bâtiment diagnostics. Un éclaté du tokamak (70% de la taille réelle) orne la façade temporaire du Hall d'assemblage.



Le cryostat est une enceinte à vide qui enveloppe le tokamak et agit comme un thermos pour limiter les échanges thermiques entre le milieu ultra-froid des aimants et l'environnement extérieur. Fabriqués en Inde, ses éléments sont en cours d'assemblage sur site, sous la responsabilité de l'Agence domestique indienne.



À l'usine Wakamatsu de Nippon Steel and Sumikin Engineering Co. Ltd., au Japon, la fabrication de 43 kilomètres (700 tonnes) de câbles supraconducteurs en niobium-étain destinés au solénoïde central du tokamak vient d'être finalisée.



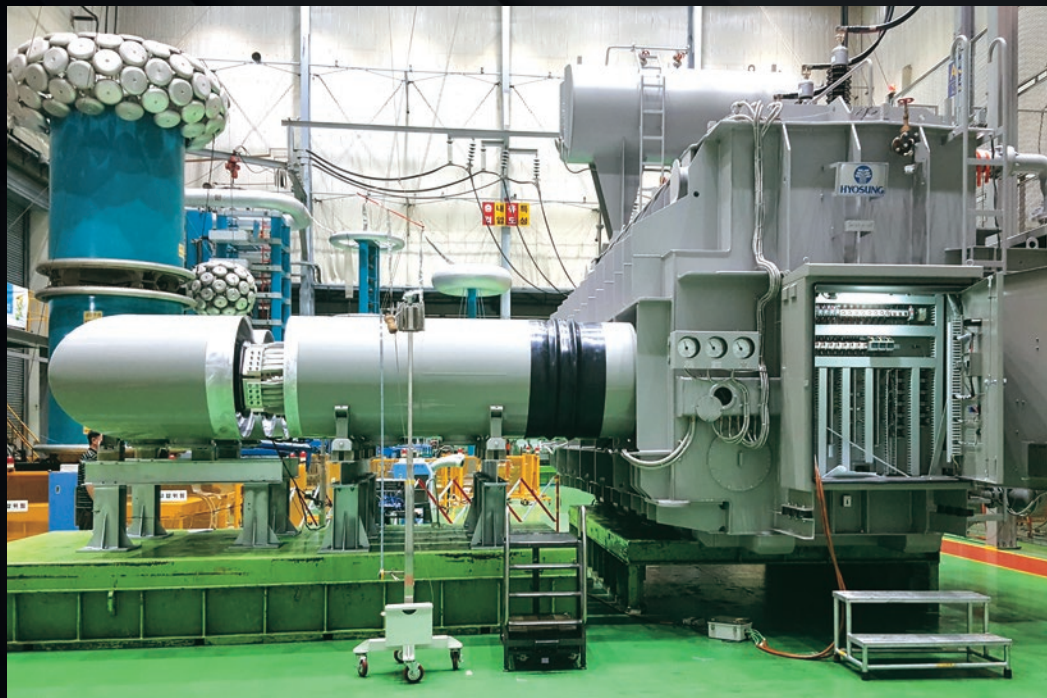
La Journée Portes Ouvertes, organisée conjointement par ITER Organization et l'Agence domestique européenne Fusion for Energy permet au public d'accéder au cœur des bâtiments en cours de construction.



Fabriquée dans la région de Grenoble par la société Air Liquide, cette « boîte froide » est destinée à l'installation hélium liquide de l'usine cryogénique. Deux équipements similaires seront livrés et installés au cours de l'année.



Les principaux éléments de la machine seront pré-assemblés dans le vaste espace du Hall d'assemblage. Pour l'heure, une cloison provisoire (au fond) sépare cet espace du Bâtiment tokamak et du puits d'assemblage, en cours de construction, dans lequel les pièces seront progressivement intégrées.



Au mois de juillet, un transformateur de 130 tonnes et son système de connexion au convertisseur de courant alternatif-continu ont été testés à l'usine Hyosung de Changwon, en Corée. La structure en forme de champignon, au second plan, fait partie d'un équipement de tests haute tension.



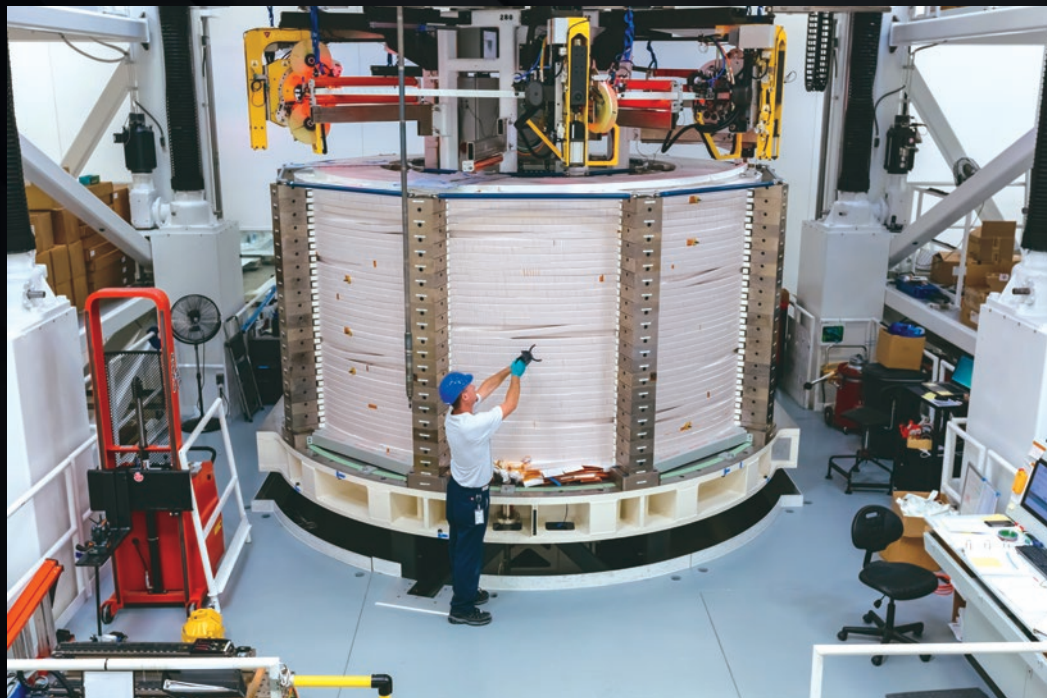
Le puits d'assemblage du tokamak, un espace cylindrique de 30 mètres de diamètre et 30 mètres de hauteur, est en cours de construction.



À mi-distance du poste électrique (au fond) et du Complexe tokamak, le Bâtiment de conversion électrique fournira le courant continu aux 10 000 tonnes d'aimants supraconducteurs de la machine.



Ces « jeux de barres » activement refroidis transportent le courant continu destiné aux aimants supraconducteurs. Près de 5,5 kilomètres (500 tonnes) de ces éléments de très haute technologie sont en cours de fabrication à l'Institut Efremov de Saint-Pétersbourg, en Russie.



Au Magnet Technologies Center de General Atomics, près de San Diego, en Californie, le premier des six modules (plus une rechange) du solénoïde central vient de passer avec succès les tests d'isolation électrique. D'un poids total de 1 000 tonnes, le solénoïde central est le plus puissant (13 tesla) des aimants de la machine.



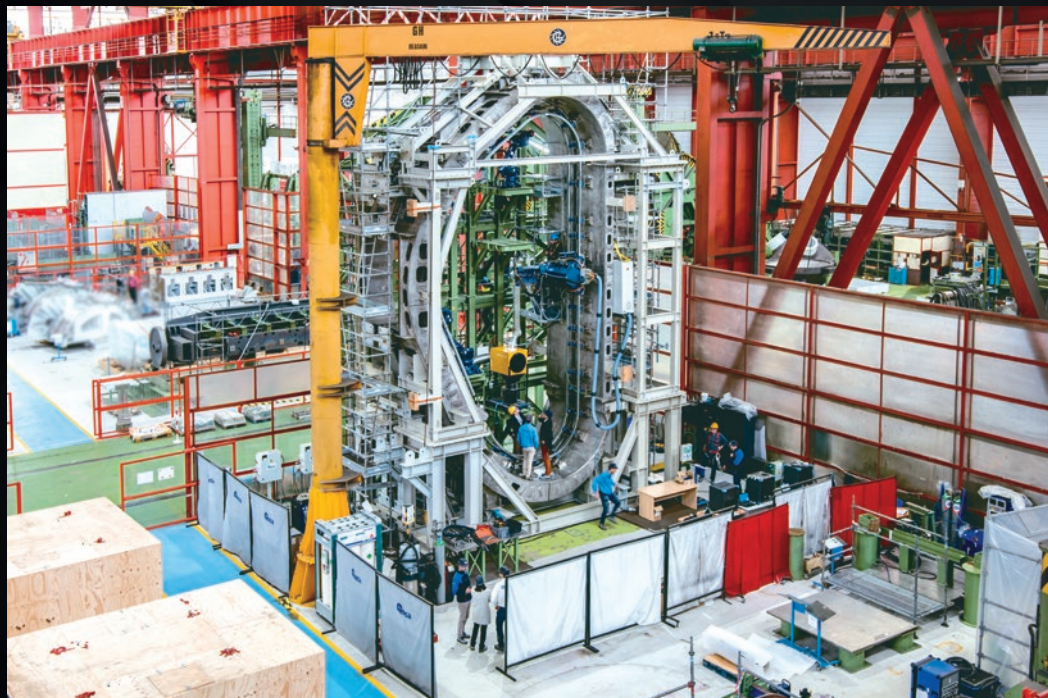
L'organisation internationale ITER a été créée par un accord international au mois de novembre 2006. Elle a formellement vu le jour près d'un an plus tard au terme des procédures de ratification de chacun de ses membres. Au mois de novembre 2017, on a célébré son dixième anniversaire.



Évoquant les colonnes brisées d'un temple grec, ces lingots d'acier seront laminés pour fabriquer les éléments du cryostat d'ITER. Pour l'heure, ils refroidissent sur un lit de sable dans la fonderie de Larsen & Toubro Ltd à Hazira, en Inde.



Haut de 22 mètres, ce portique de pré-assemblage permettra d'intégrer les différents éléments qui constituent les « modules » de la chambre à vide. Un deuxième portique, en tout point identique, sera bientôt érigé à proximité.



Haute comme un immeuble de quatre étages, cette maquette d'un secteur de chambre à vide se dresse dans l'atelier des projets spéciaux de la compagnie ENSA, près de Santander, en Espagne. À l'exception de sa largeur (10 degrés au lieu de 40), elle reproduit fidèlement les dimensions et les caractéristiques d'un véritable secteur. Cette maquette est utilisée pour développer et tester des systèmes de soudage automatique.



La société française Air Liquide et la compagnie indienne INOXVA (photo) assurent la fourniture des cryolines, ces tuyauteries hautement sophistiquées qui transportent les fluides cryogéniques. ITER intègre quelque 5 kilomètres de cryolines dont le diamètre varie de 2,5 centimètres à 1 mètre.



Il est près de minuit et, dans les profondeurs du Bâtiment tokamak, les équipes coulent le premier béton de la « couronne ». L'opération revêt une importance stratégique : la couronne doit non seulement supporter la masse combinée de la machine et du cryostat qui l'enveloppe (23 000 tonnes), mais également transférer les forces et les tensions générées lors des chocs de plasma.



Le « couvercle » qui ferme désormais le bouclier de protection biologique (*bioshield*) permet aux équipes de travailler en toute sécurité dans les niveaux inférieurs du puits d'assemblage du tokamak.



Tout au fond du puits d'assemblage du tokamak, le coulage du béton de la « couronne » se poursuit.



Le siège d'ITER Organization accueille désormais quelque 500 personnes.



En Corée, Hyundai Heavy Industries doit fabriquer 4 des 9 secteurs de la chambre à vide du tokamak. Sur cette photo, des techniciens insèrent des blocs de protection neutronique dans un segment du secteur n° 6, qui sera finalisé en 2019.



Dans les profondeurs du Bâtiment tokamak, on pose des plaques d'acier sur le sol et au bas des murs de la salle qui accueillera les cuves de drainage. En cas de fuite dans le circuit de refroidissement, cet espace doit être parfaitement étanche de manière à contenir les effluents contaminés.



Un second portique de pré-assemblage en tout point identique au premier (22 mètres de haut, 800 tonnes) vient d'être livré par la Corée.



Certains des éléments directement exposés au plasma doivent résister à des flux thermiques de l'ordre de 20 MW/m^2 , deux fois plus intenses que ceux que rencontre une capsule spatiale rentrant dans l'atmosphère. Ici, un élément prototype du divertor (*inner vertical target*), fabriqué en Italie par Ansaldo Nucleare et ENEA, va être testé à l'Institut Efremov de Saint-Petersbourg, en Russie.



Fournie par la Chine, cette pièce massive (6,6 tonnes et 10 mètres de long) est un élément du système d'alimentation des aimants. Ce *magnet feeder* est le premier composant à être installé dans le puits d'assemblage du tokamak.



Sous sa toute nouvelle livrée, d'un blanc étincelant, le premier sous-sol du Bâtiment diagnostics est désormais prêt à être équipé. Au sol, aux murs, au plafond, les plaques d'ancrage sur lesquelles seront soudés les supports des différents systèmes.



Bon pour le service : les tests d'étanchéité auxquels ce bloc de protection (*shield block*) d'un poids de 2,8 tonnes vient d'être soumis en Chine confirment son adaptation à l'ultravide qui régnera au cœur du tokamak.



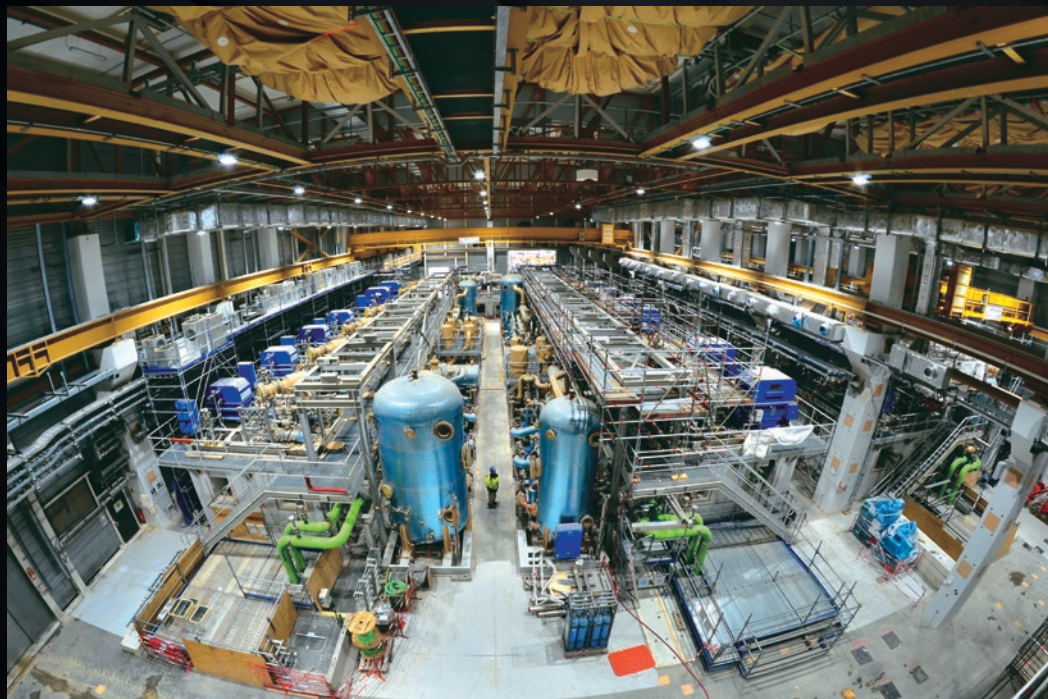
Les éléments directement exposés au plasma, les systèmes de diagnostics et de refroidissement du divertor seront assemblés sur ces châssis de 8 tonnes (*divertor cassettes*) dont un prototype à échelle 1:1 vient d'être réalisé par l'entreprise italienne Walter Tosto.



Ces "extensions" seront soudées aux ouvertures des secteurs de chambre à vide avant que la pièce soit installée dans le puits d'assemblage du tokamak. La production en série de ces *port stub extensions* a commencé en Russie.



Le tokamak, enveloppé de son cryostat, sera assemblé dans ce volume de 25 000 m³ aux allures d'amphithéâtre. Les parois de béton brut sont désormais recouvertes de plusieurs couches de peinture spéciale.



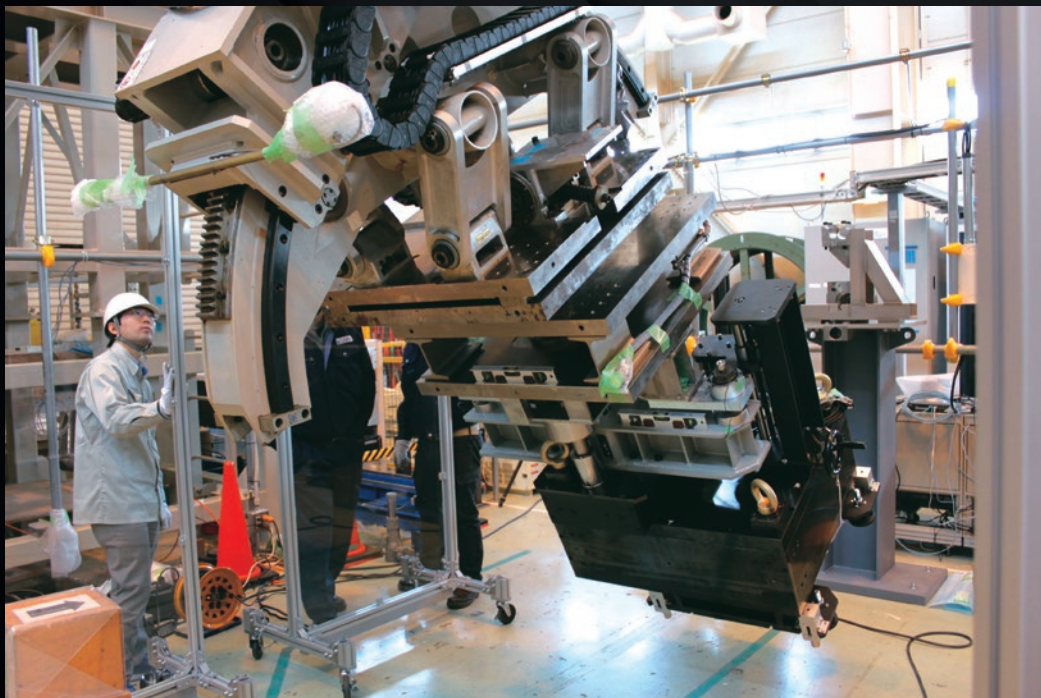
C'est la plus puissante unité cryogénique du monde : vaste comme deux terrains de football, elle fournit les fluides ultra-froids qui circulent au cœur du système magnétique, des cryopompes et de l'écran thermique.



Dans la vallée de la Durance, au cœur des collines de Haute-Provence, ITER est une enclave futuriste nichée dans un paysage millénaire. Au sud, la Méditerranée n'est distante que d'une soixantaine de kilomètres ; au nord, deux heures et demie de route conduisent au massif des Écrins, qui culmine à 4 000 mètres.



Cet élément semi-circulaire fait partie du système d'alimentation électrique et cryogénique des bobines de correction. Ce convoi est en route vers le port de Shanghai et, de là, vers le site d'ITER.



Ce bras articulé a été conçu pour serrer les boulons qui attachent les modules de couverture à la paroi interne de la chambre à vide. Il délivre un couple de 10 kilonewton/mètre (k-Nm).



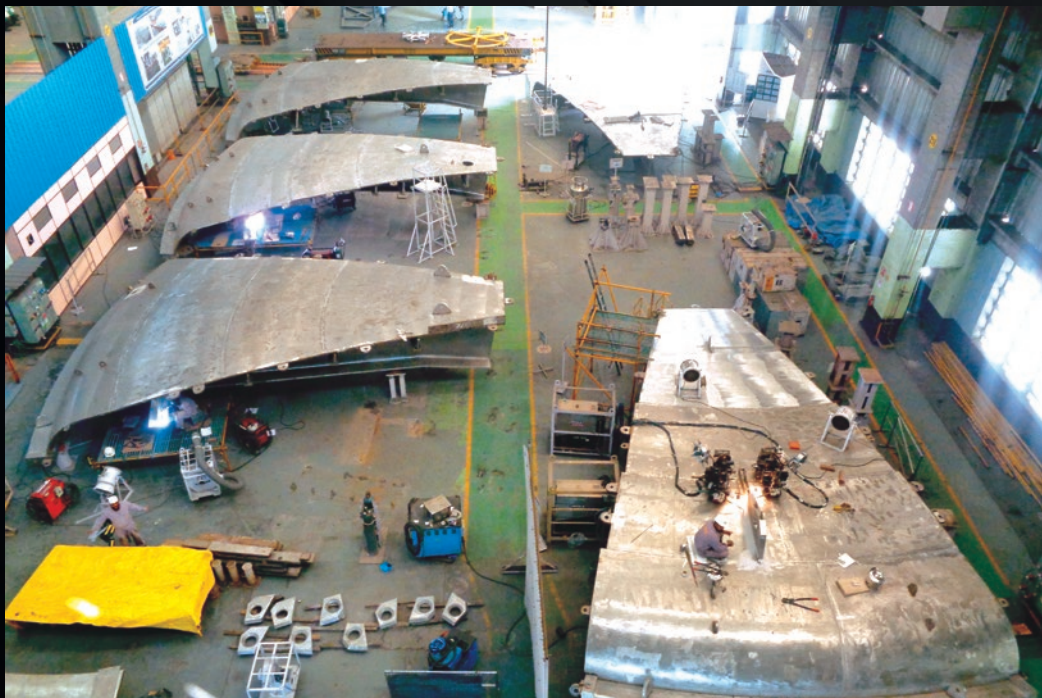
Tout au long du processus de fabrication, les parties haute et basse des modules du solénoïde central doivent demeurer accessibles. Cet outil de bascule, conçu par General Atomics, y pourvoit.



Pour les ouvriers du chantier, c'est l'heure de la pause déjeuner. Depuis le début des travaux de construction, au mois d'août 2010, plus de 15 000 personnes, appartenant à quelque 5 000 entreprises différentes, ont été mobilisées par le chantier ITER.



Fournies par l'Inde, treize pompes à turbine d'une capacité de 10 m³/s assurent la circulation de l'eau de refroidissement. Animée par un moteur électrique de 870 kW, chaque pompe est équipée d'un arbre de transmission de 10 mètres de long et pesant plus de 6 tonnes.



À l'usine Larsen & Toubro Ltd de Hazira, en Inde, les éléments du « couvercle » du cryostat sont en cours de fabrication. Une fois finalisés, ils seront livrés sur le site d'ITER pour être assemblés et soudés sous la responsabilité de l'Agence domestique indienne.



Deux fois par an, les hauts représentants de la Commission européenne et des gouvernements chinois, indien, japonais, coréen, russe et américain se réunissent au siège d'ITER Organization à Saint-Paul-lez-Durance (13). Le Conseil ITER est l'organe exécutif d'ITER Organization, qui décide des orientations stratégiques du programme.



Aux premières lueurs de l'aube, le 4 décembre, une puissante grue sur chenille s'apprête à lever le premier des cinq modules de la charpente métallique du Bâtiment tokamak.



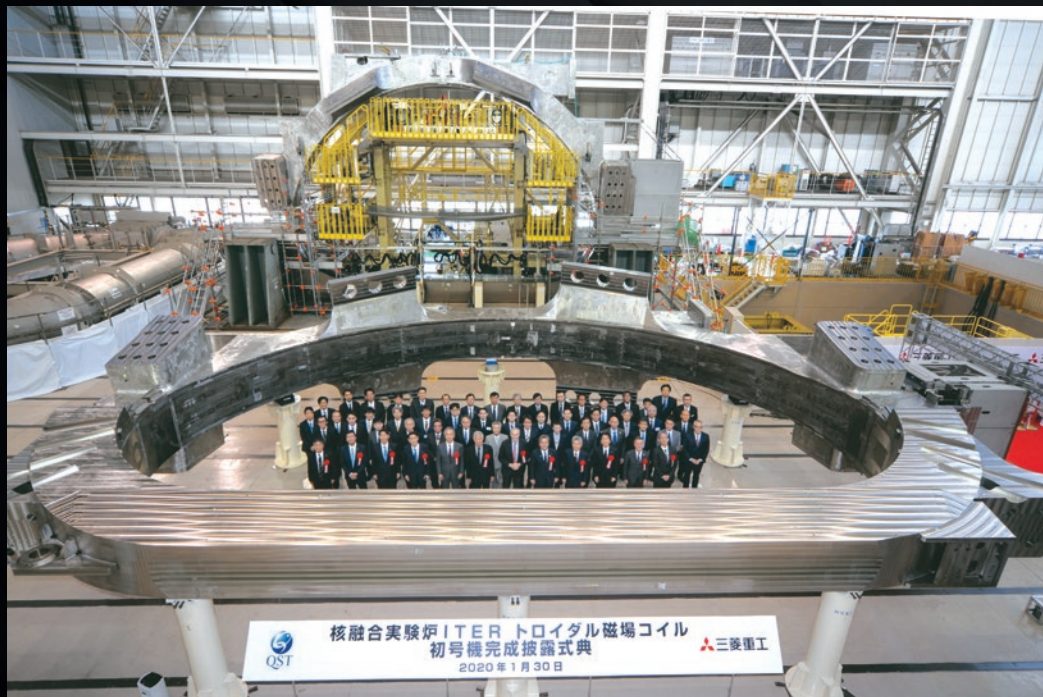
Le Bâtiment tokamak sera bientôt couvert et l'assemblage de la machine va pouvoir commencer.



En 2020, ITER a adapté son organisation aux contraintes imposées par la pandémie de Covid-19 : maintien des activités critiques du chantier, comme ici l'assemblage de la machine, et recours au télétravail de manière à protéger salariés et sous-traitants.



De simples câbles ne suffiraient pas pour fournir aux aimants du tokamak la puissance électrique requise. On utilise donc des « jeux de barres » en aluminium (*busbar*) activement refroidis. Ici, en jaune, dans l'un des deux bâtiments de conversion électrique.



Au Japon, la fabrication de la première bobine de champ toroidal est terminée ; les personnels des National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) et de l'industriel Mitsubishi Heavy Industries, ainsi que les représentants d'ITER Organization célèbrent cette importante étape.



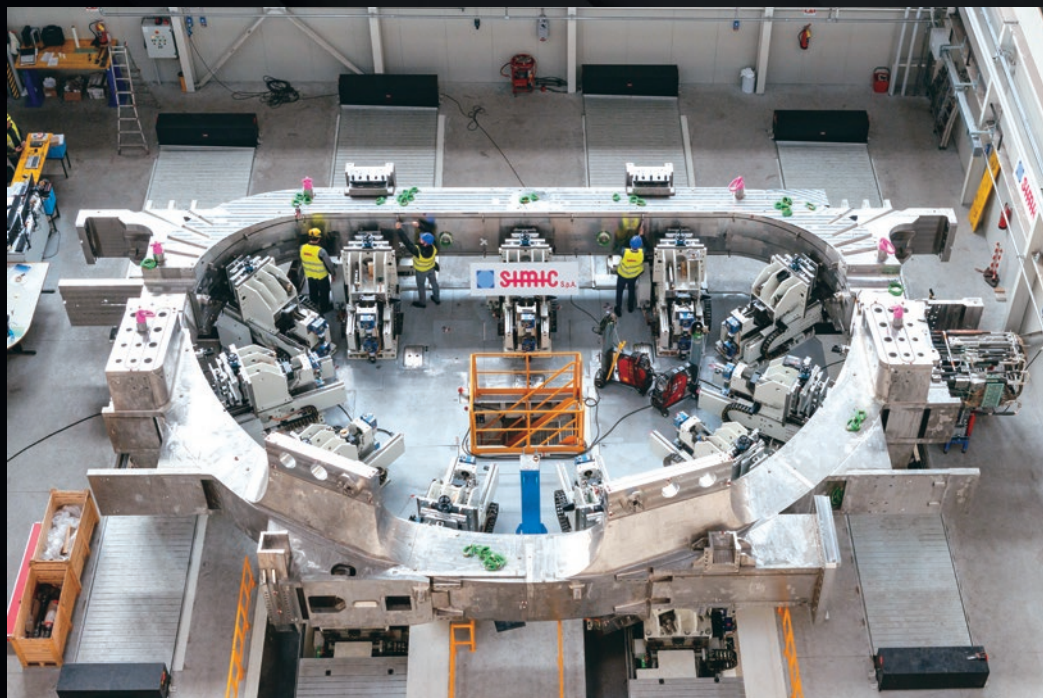
Hyundai Heavy Industries a consacré près de dix années à l'élaboration de cette pièce – un des 4 secteurs (sur 9) de la chambre vide du tokamak, dont la fabrication incombe à la Corée.



Dans le port de Kobe, au Japon, une bobine de champ toroidal soigneusement « emballée » et arrimée à son cadre de transport, s'apprête à entreprendre le long voyage vers le sud de la France.



Aménagé par la France, « l'itinéraire ITER » permet d'acheminer les plus massives des pièces de la machine depuis le port de Berre l'Étang jusqu'au site de construction, distant d'une centaine de kilomètres. Ici, la bobine de champ poloidal n° 6, fabriquée en Chine pour le compte de l'Europe.



En Italie, la première des dix bobines de champ toroïdal dont la fabrication incombe à l'Europe est prête à prendre la mer. Lancé dix ans plus tôt, ce programme mobilise plus de 700 personnes et une quarantaine d'entreprises.



La bobine de champ poloidal n° 6, fournie par l'Europe et produite en Chine, sera la première à intégrer l'assemblage de la machine. Depuis Hefei, où elle a été fabriquée, jusqu'au site d'ITER, elle aura parcouru plus de 10 000 kilomètres.



La large porte de l'espace de nettoyage, antichambre du Hall d'assemblage, vient de s'ouvrir pour laisser passage à la base du cryostat – la plus lourde (1 250 tonnes) de toutes les pièces de la machine et la première dans la séquence d'assemblage.



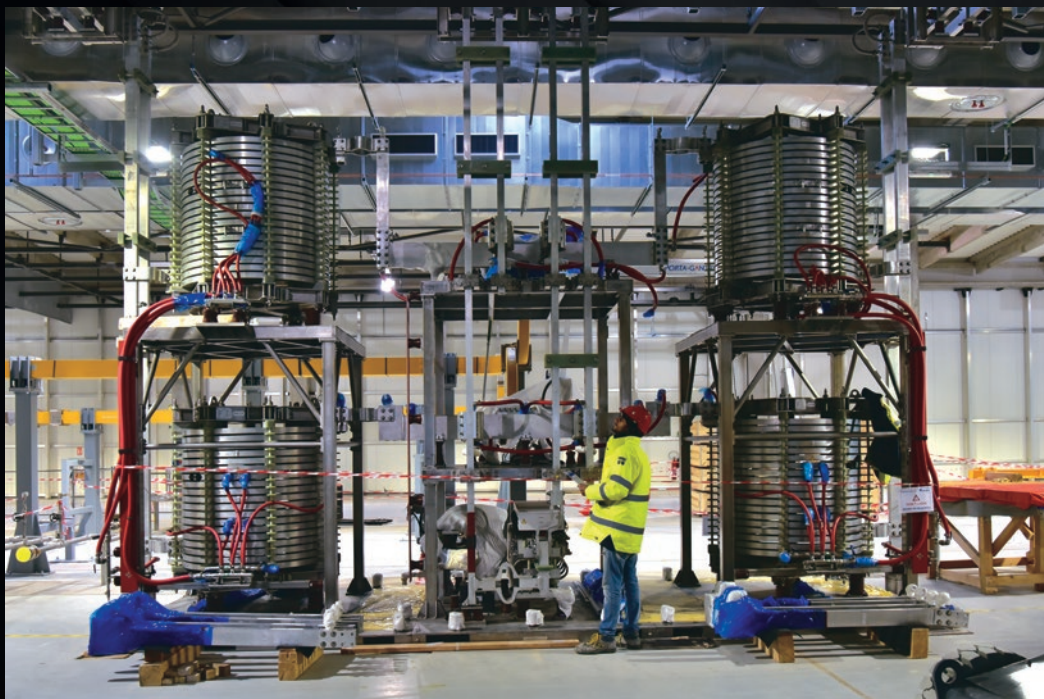
La puissante remorque qui transporte cette bobine de champ toroïdal en provenance du Japon est un prototype développé par la société hollandaise Mammoet pour le compte du prestataire logistique DAHER. Développant deux fois 1 000 CV, on la voit ici traverser de nuit le village de Peyrolles-en-Provence lors de la dernière étape de son long voyage.



Dix ans tout juste après le début du chantier, le premier élément de la machine, et le plus lourd de tout l'assemblage (1 250 tonnes), est mis en place dans le puits du tokamak.



Sur trois niveaux, toutes les galeries qui entourent le tokamak disposent de « portes nucléaires » aussi épaisses qu'un mur de pierres et aussi lourdes (60 tonnes) qu'une motrice de TGV. Leur cadre en acier est rempli d'un béton de formulation spéciale qui bloque le passage des neutrons générés par la réaction de fusion.



Deux bâtiments jumeaux abritent les systèmes électriques qui convertissent le courant alternatif en courant continu destiné aux aimants supraconducteurs de la machine. Cette étrange installation, un « réacteur », génère un champ magnétique qui filtre les instabilités du courant continu.



Huit années durant, l'Agence domestique européenne Fusion for Energy, ITER Organization et le consortium Vinci Ferroviaire Razel-Bec (VFR) ont travaillé en étroite collaboration pour édifier le Bâtiment tokamak. « Mission accomplie », c'est ce que proclame la banderole que des spécialistes des travaux en hauteur installent sur la façade du bâtiment.



Deux bobines de champ poloidal de 17 mètres de diamètre, ainsi qu'une enceinte sous vide destinée aux tests à très basse température (à droite), sont visibles sur cette image.



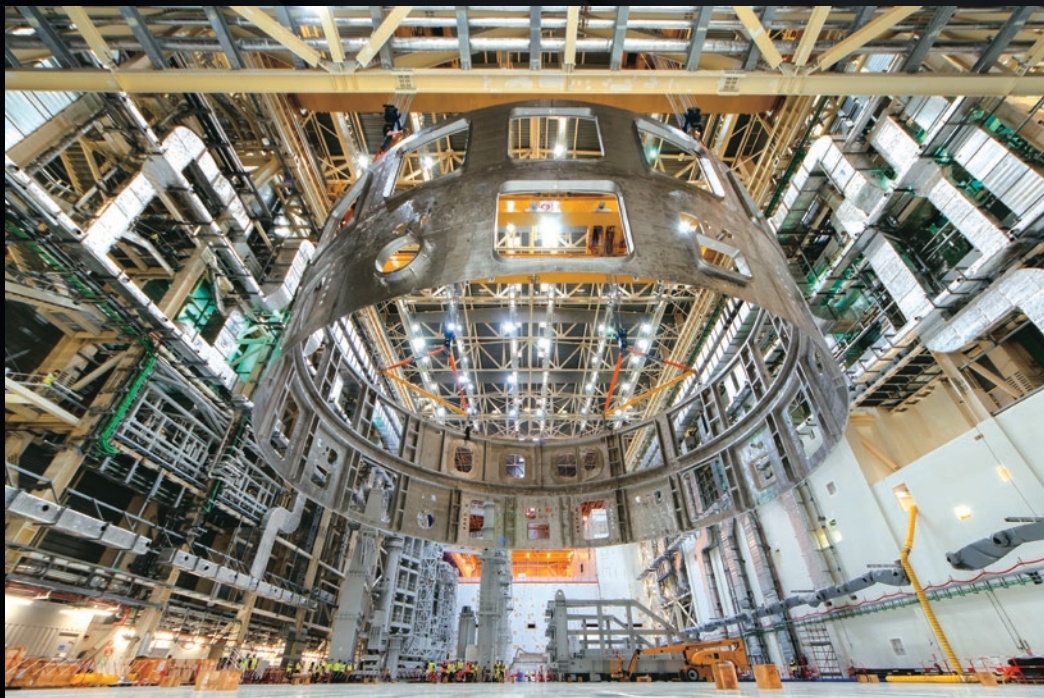
Chacun des 18 aimants de champ toroïdal (verticaux) reposera sur un piédestal de ce type (*gravity support*), activement refroidi à l'hélium liquide et boulonné à la base du cryostat. Celui-ci s'apprête à subir un test d'étanchéité en Chine avant d'être livré à ITER.



Fourni par la Corée, un premier secteur de chambre à vide, une pièce particulièrement massive (440 tonnes), est en cours de déchargement au port de Fos-sur-Mer.



Accueillis par un message vidéo du président Macron, les hauts représentants des Membres d'ITER ont donné le coup d'envoi de la phase d'assemblage de la machine lors d'une cérémonie virtuelle organisée le 28 juillet dans le Hall d'assemblage.



Après la base du cryostat au mois de mai, le cylindre inférieur est à son tour déposé dans le puits d'assemblage. Sensiblement plus haut que la base (12 mètres contre 4), le cylindre inférieur est beaucoup moins lourd (375 tonnes contre 1 250).



Chacune des 10 cellules de réfrigération du système d'évacuation de la chaleur est équipée de puissants systèmes de ventilation qui accélèrent le processus d'évaporation des eaux de refroidissement de l'installation.



La fabrication des premiers éléments des lignes de transmission du chauffage électron-cyclotron est en cours aux États-Unis. Ici, des prototypes de guides d'ondes



Au terme de six années de travaux, l'industriel coréen SFA vient de finaliser le dernier des secteurs de 40 degrés formant le bouclier thermique de la chambre à vide. Ces panneaux d'acier inoxydable, recouverts d'une couche d'argent de 5 à 10 micromètres d'épaisseur, seront associés à chacun des secteurs de chambre à vide avant insertion dans le puits d'assemblage.



Compenser la puissance réactive et lisser les distorsions harmoniques générées par la conversion du courant alternatif en courant continu requiert de nombreux équipements, fournis par la Chine, qui occupent un bâtiment entier ainsi qu'une zone d'un hectare attenante.



Cette étrange structure, contrôlée par de puissants interrupteurs électroniques appelés « thyristors », fait partie du système de compensation de la puissance réactive.



En Russie, la fabrication du premier prototype d'un dôme de divertor (échelle 1:1) est terminée. Cette pièce, l'une des trois « cibles » directement exposées au plasma, est conçue pour supporter des charges thermiques d'une extrême intensité (10 à 20 MW par mètre carré). Les cibles équipent chacune des 54 cassettes du divertor.



Fournie par l'Europe mais fabriquée en Chine, la bobine de champ poloidal n° 6 (PF6) vient de subir pendant trois mois des tests sous vide à très basse température. PF6 sera la première bobine à prendre place dans le puits d'assemblage.



Recouverte d'une fine couche d'argent, cette pièce cylindrique fine et relativement légère (10 millimètres d'épaisseur, 50 tonnes) forme la partie inférieure de l'écran thermique du cryostat et protège les aimants ultra-froids du transfert radiatif de chaleur. Fournie par la Corée, elle a été assemblée sur site.



Les derniers éléments du cryostat viennent d'être livrés par l'Inde. Ils seront assemblés et soudés pour former le couvercle de ce thermos géant qui isole la machine de l'environnement extérieur.



Au cours des opérations de pré-assemblage, ce "berceau de basculement" est utilisé pour faire passer les éléments les plus lourds, comme ce secteur de chambre à vide de 440 tonnes, de la position horizontale à la position verticale.



Sous la plateforme ITER courent plus de 4,5 kilomètres de galeries, parcourues de câbles et de tuyauteries de toute taille.



L'objectif photographique fish-eye embrasse la totalité du « théâtre d'assemblage », avec à droite le Hall d'assemblage et ses deux portiques géants et, séparé par un mur, le puits du tokamak, profond de 30 mètres, dans lequel les pièces de la machine sont progressivement insérées.



Un laboratoire de spectroscopie a été créé à Moscou pour accompagner le développement des systèmes de diagnostics optique qui mesurent les profils de température et de densité du plasma.



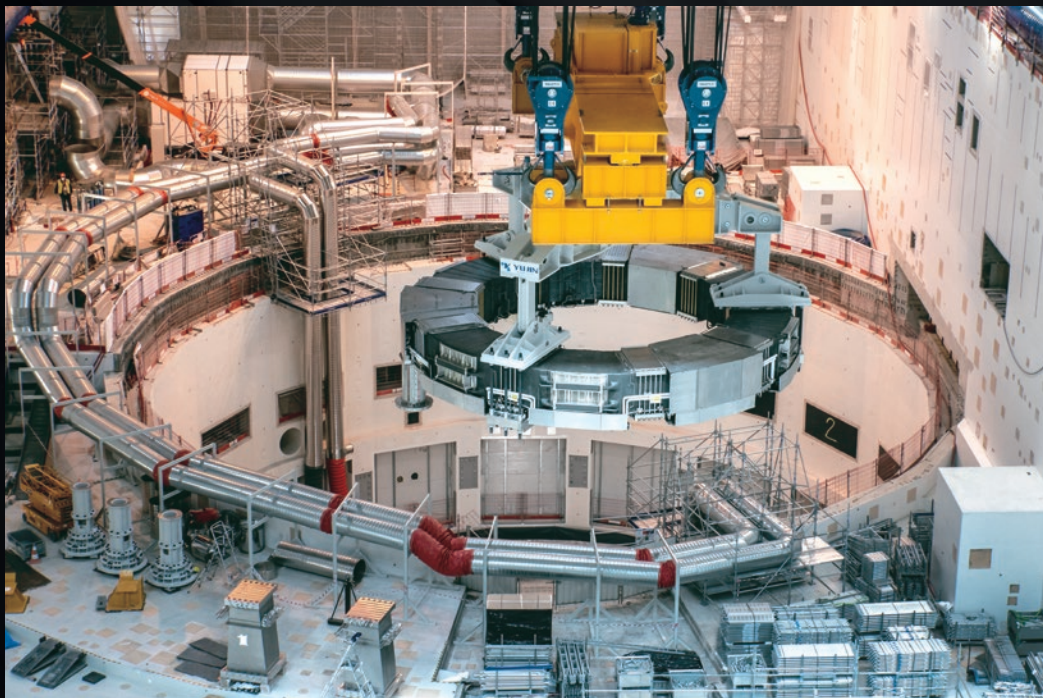
La phase d'assemblage du cœur de la machine a été lancée au mois de mai 2020. La base du cryostat et le cylindre inférieur, la partie basse de l'écran thermique, les piédestaux des bobines verticales ainsi que les supports temporaires destinés à la bobine annulaire PF6 sont en place.



Les éléments « captifs » ayant été installés, comme ici les systèmes d'alimentation des aimants, le puits d'assemblage du tokamak est officiellement prêt à recevoir le premier secteur de chambre à vide.



Entre les crochets du double pont roulant et les 440 tonnes du secteur de chambre à vide, un système de levage complexe s'interpose, qui permet de contrôler le positionnement de la charge et de piloter sa rotation.



La bobine de champ poloidal n° 6 (PF6) est la plus lourde (330 tonnes) des bobines annulaires de la machine et la première à être positionnée dans le puits d'assemblage du tokamak.



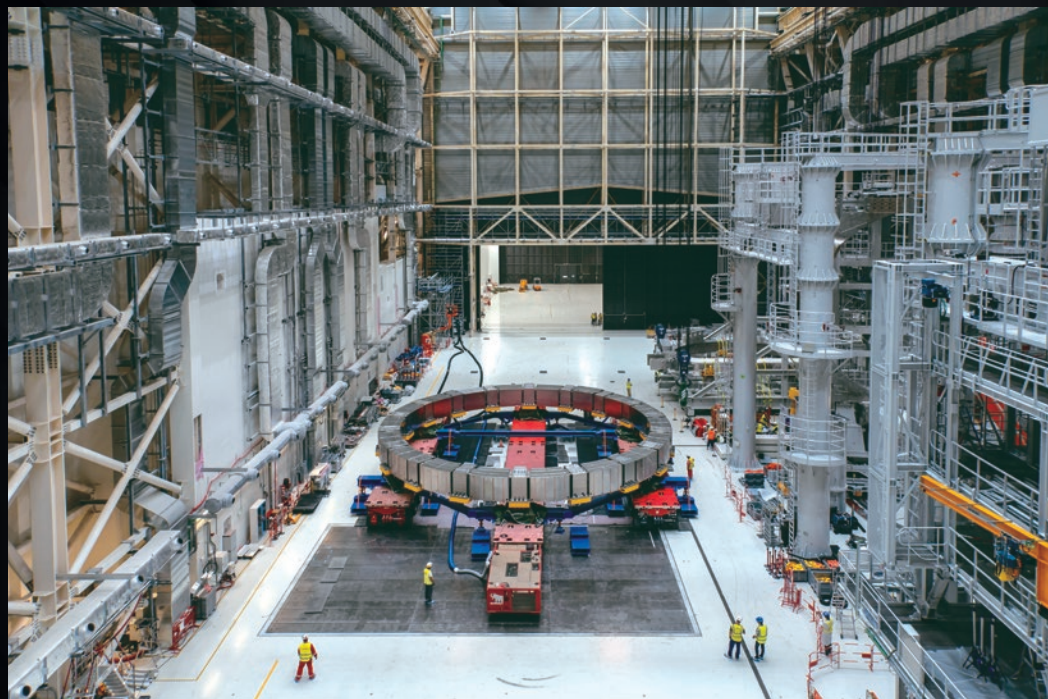
Près de 10 000 kilomètres de câbles serpentent dans les galeries souterraines de l'installation. C'est la distance qui sépare le sud de la France de la côte du Pérou.



Par leur action, les 18 bobines de correction insérées entre les aimants verticaux et annulaires permettront d'atténuer les perturbations du champ magnétique et leur incidence sur la stabilité du plasma. À l'automne 2021, six bobines sont d'ores et déjà installées.



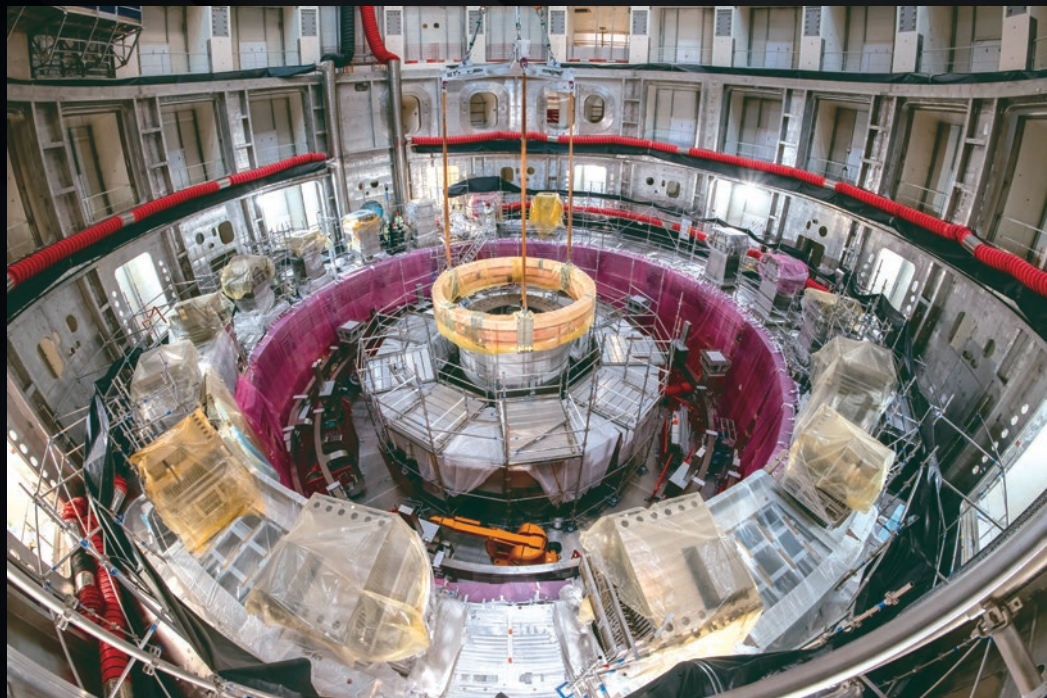
Partenaire d'ITER depuis 2009, la Principauté de Monaco attribue tous les deux ans une bourse postdoctorale à cinq étudiants qui intègrent les équipes de chercheurs et d'ingénieurs du programme.



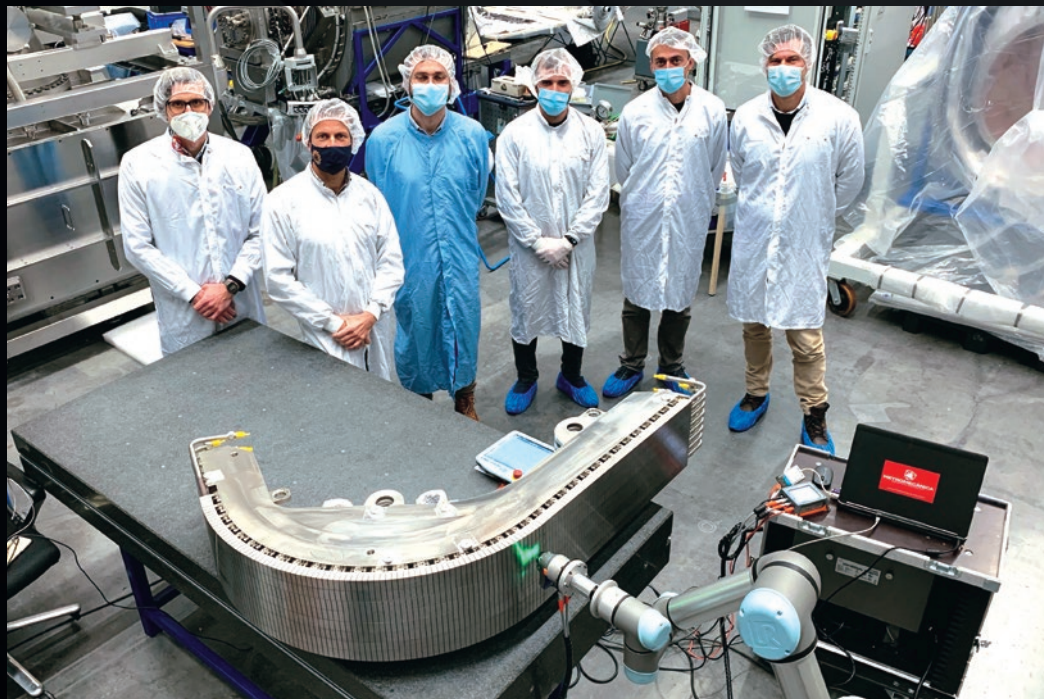
Les portes coulissantes du Hall d'assemblage se referment derrière la bobine de champ poloidal n° 5 (PF5, 17 mètres de diamètre). Une fois totalement équipée, elle sera installée dans le puits d'assemblage du tokamak.



ITER Organization emploie désormais près de 1 200 personnes issues d'une trentaine de nationalités, auxquelles s'ajoutent 2 500 sous-traitants. Quelque 1 400 personnes supplémentaires relèvent directement ou indirectement de l'agence domestique européenne Fusion for Energy, responsable de la construction des bâtiments de l'installation.



Fournis par l'Europe, les anneaux de pré-compression visibles au centre de cette photo font partie du système magnétique d'ITER. Réalisés dans un composite fibre-époxy, ils sont conçus pour maintenir fermement en place les bobines de champ toroidal et peuvent absorber des forces radiales de l'ordre de 7 000 tonnes par bobine.



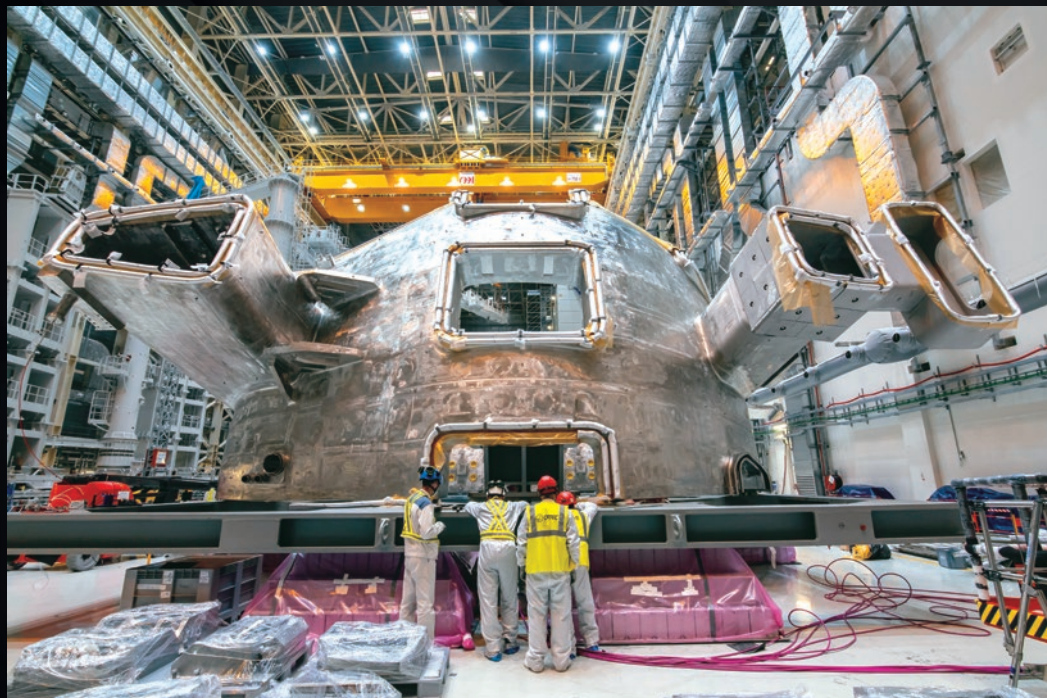
Des représentants de Fusion for Energy, Research Instruments et Metromecnica procèdent à des opérations de métrologie sur le prototype d'un élément du divertor (*inner vertical target*). Recouvert de monoblocs de tungstène, cet élément est conçu pour résister à des charges thermiques parmi les plus élevées de toute la machine.



Le courant alternatif fourni par le réseau électrique doit être converti en courant continu pour alimenter les aimants supraconducteurs du tokamak. De nombreux dispositifs y contribuent, comme ces équipements fournis par la Corée.



Cet élément de ligne cryogénique fait partie du réseau qui transporte les fluides de refroidissement de l'usine cryogénique au Bâtiment tokamak.



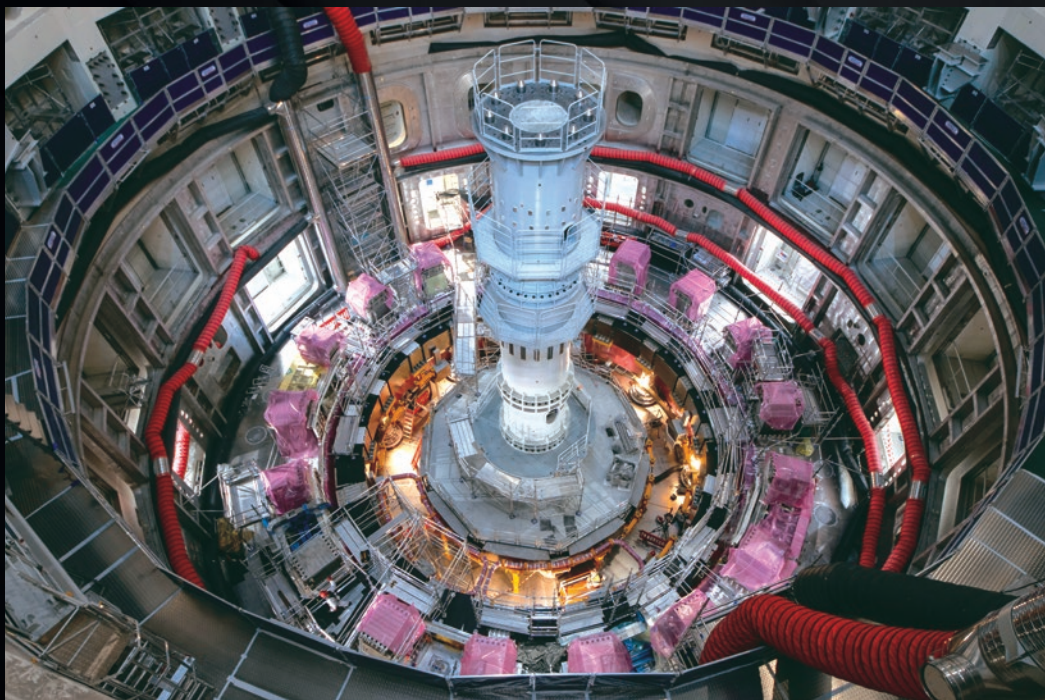
Un deuxième secteur de chambre à vide vient d'être livré par la Corée. Les neuf secteurs de 40 degrés qui, une fois assemblés et soudés, forment l'espace toroïdal au cœur de la machine, sont tous quasiment identiques. Seuls quelques détails, liés à leur position respective et aux éléments avec lesquels ils sont connectés, les différencient les uns des autres.



Les National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology japonais (QST) fournissent 8 gyrotrons – de puissants générateurs d'ondes électromagnétiques – destinés au système de chauffage électronique-cyclotronique du plasma. Quatre d'entre eux ont passé avec succès les tests de réception en usine et seront opérationnels pour la production du premier plasma.



En 2021, l'Europe a finalisé sur site une deuxième bobine de champ poloidal (PF2). Cette bobine annulaire de 17 mètres de diamètre sera stockée dans l'attente de son installation.



Au cœur du Bâtiment tokamak, dans ce puits de 30 mètres de diamètre et autant de profondeur, la machine prend forme. En 2021, les équipes chargées de l'assemblage ont installé deux aimants annulaires de 10 et 17 mètres de diamètre respectivement, les bobines de correction inférieures, les anneaux de compression de recharge et la colonne centrale.



En Californie, General Atomics développe le prototype d'un système de diagnostics par réflectométrie, qui permet de mesurer les fluctuations de la densité d'électrons dans le plasma.



Dans le Hall d'assemblage, l'activité est à la fois très intense et très diverse. Supervisés par les équipes d'ITER Organization et de MOMENTUM (Construction Management-as-Agent), les deux principaux consortiums chargés de l'assemblage de la machine, CNPE et DYNAMIC, doivent coordonner leur activité, partager l'espace et gérer les équipements et les services communs.



Destinée au système de chauffage du plasma par résonance électronique-cyclotronique, une alimentation électrique haute tension est en cours d'installation dans le Bâtiment radiofréquence.



Au mois de juillet, Eisuke Tada (centre), directeur général par intérim, effectue une visite de chantier.



Une fois positionné dans le portique de pré-assemblage, le secteur de chambre à vide est associé à un écran thermique recouvert d'une fine couche d'argent (visible sur cette photo) et à deux bobines verticales. L'ensemble forme un module, prêt à être transféré dans le puits d'assemblage.



Arrivé des États-Unis au mois de septembre 2021, le premier des six modules du solénoïde central (un aimant d'une masse totale de 1 000 tonnes) est transféré dans le Hall d'assemblage.



Le système d'extraction de la chaleur est conçu pour dissiper les charges thermiques générées par le fonctionnement de l'installation. Cette infrastructure majeure, dimensionnée pour une puissance de 1,2 gigawatt, couvre une superficie de 6 000 mètres carrés.



Le deuxième secteur de chambre à vide livré par la Corée a été mis en place dans le portique d'assemblage au mois de décembre. Il s'agit maintenant d'associer au secteur les éléments (bobines verticales, écran thermique, etc.) qui permettront de réaliser un module prêt à être positionné dans le puits d'assemblage.



Les quatre sections du cryostat (la base, le cylindre inférieur, le cylindre supérieur et ici le « couvercle ») ont été successivement assemblées et soudées sur site – une aventure industrielle qui aura duré plus de six ans.



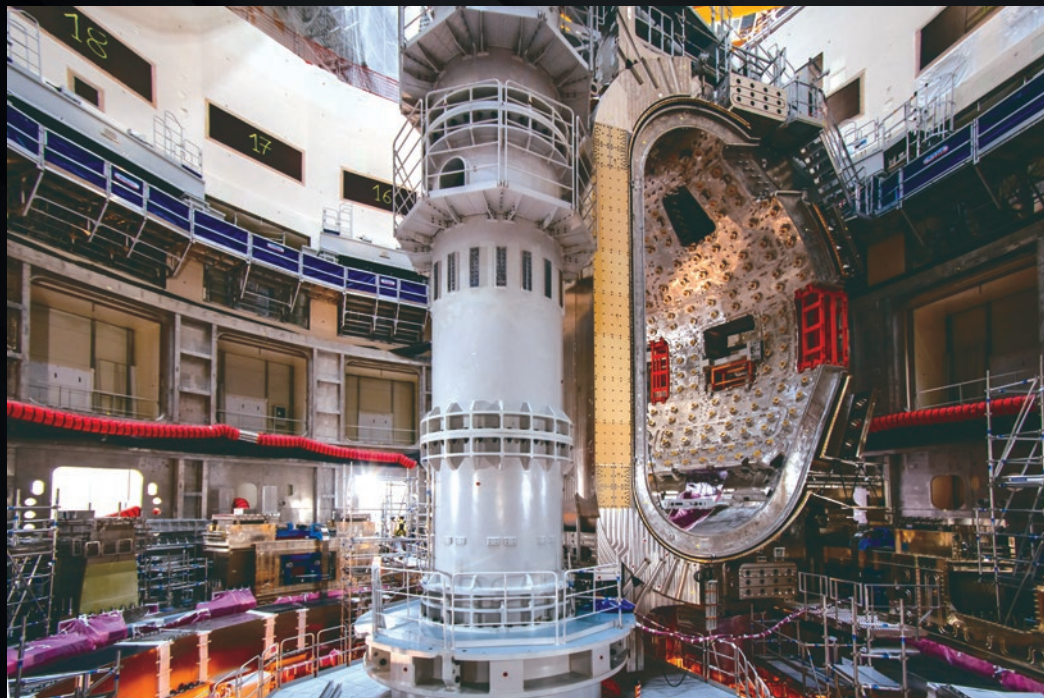
Préalablement à son installation imminente dans le puits du tokamak, le module de chambre à vide n° 6, d'un poids de 1 380 tonnes, est soulevé de 50 centimètres puis reposé sur ses supports. Il s'agit de vérifier les systèmes de levage, la succession des séquences et la coordination des équipes.



Récemment finalisé, le premier des neuf modules de chambre à vide (n° 6) est extrait du portique de sous-assemblage. Deux jours seront nécessaires pour l'amener à la verticale du puits du tokamak avant de le positionner sur ses supports avec une précision de l'ordre du millimètre.



Le module de chambre à vide n° 6 vient de passer le mur qui sépare le Hall d'assemblage du puits du tokamak. Haut comme un immeuble de 4 étages, cet assemblage est aussi lourd que quatre Boeing 747 à pleine charge. Pour former la chambre toroïdale au sein de laquelle se produiront les réactions de fusion, huit modules similaires doivent encore être installés.



Dernière étape du levage et de l'insertion : au fond du puits du tokamak, le module est suspendu à 50 cm au-dessus de ses supports. La mise en place ne sera définitive qu'après une dernière série de relevés métrologiques.



Chacun des neuf secteurs de chambre à vide est formé de quatre segments assemblés et soudés. Sur cette photo, les deux premiers segments du secteur n° 4, fourni par l'Europe, viennent d'être associés.



Dans les profondeurs du Bâtiment tokamak, des spécialistes mettent en place un premier joint supraconducteur sur une ligne d'alimentation (*feeder*) haute tension. L'opération est particulièrement délicate et devra être reproduite plus de 300 fois.



Les lignes cryogéniques assurent la circulation des fluides de refroidissement entre l'usine cryogénique et le Bâtiment tokamak. Celles dont la section est la plus large peuvent accommoder jusqu'à six lignes de tuyauterie, chacune dédiée à un fluide différent, à un sens de circulation ou à une fonction particulière.



Pour la première fois depuis qu'il a été nommé, au mois d'octobre 2022, le nouveau directeur général d'ITER, Pietro Barabaschi (2^e à partir de la gauche), s'adresse au personnel. À ses côtés, les responsables de six Agences domestiques (le représentant de la Chine était absent) et le directeur adjoint Eisuke Tada.



Au mois de novembre, la phase d'assemblage de la machine doit être suspendue : deux éléments constitutifs des modules – les écrans thermiques et les secteurs de chambre à vide – présentent des « non-conformités » auxquelles il doit être remédié.



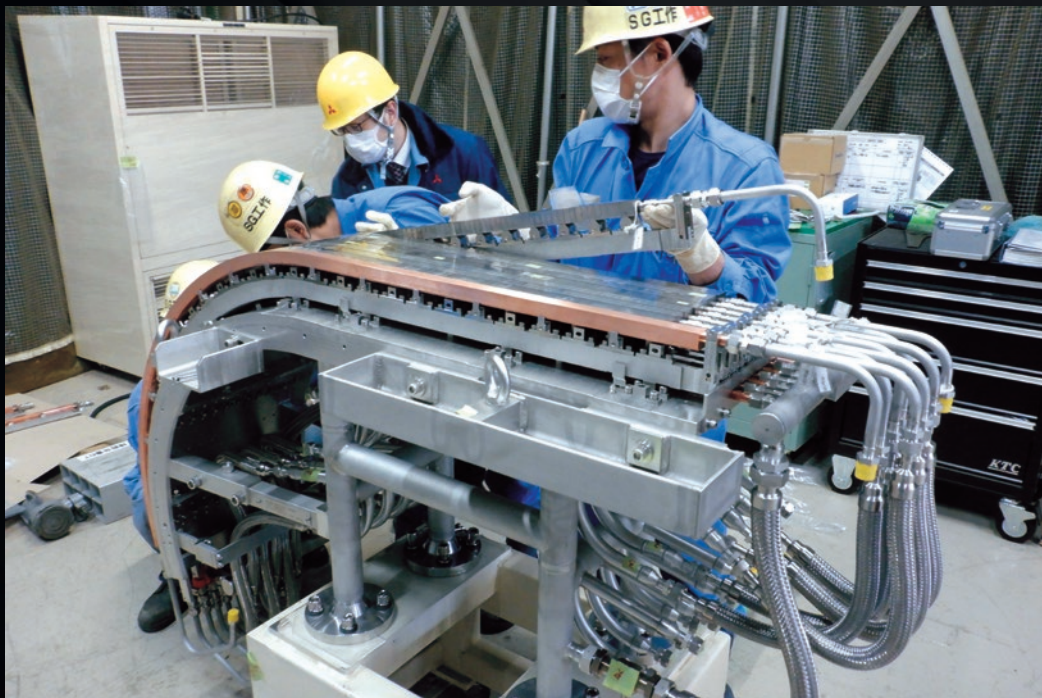
Au terme d'une cérémonie organisée au chantier naval Sredne Nevsky de Saint-Petersbourg, la plus petite des bobines annulaires destinées au tokamak (PF1, 9 m de diamètre, 160 tonnes) vient d'être chargée sur une barge fluviale avant de prendre la mer dans les jours suivants.



À l'exception de quelques structures secondaires – ici deux bâtiments de distribution électrique – le génie civil de l'installation est désormais finalisé.



Sous une lune pleine, les lueurs du couchant se reflètent dans la façade d'acier poli du Bâtiment de contrôle, le futur centre nerveux de l'installation ITER.



Cet élément du divertor, dont le Japon finalise la qualification, est exposé à des flux de chaleur de l'ordre de 20 MW/m^2 , ce qui équivaut aux conditions que rencontre une capsule spatiale lors de sa rentrée dans l'atmosphère.



Six modules individuels seront « empilés » les uns sur les autres pour former le solénoïde central du tokamak. Le premier d'entre eux, dont on voit ici les arrivées d'hélium et le câblage électrique, vient d'être positionné sur sa plateforme d'assemblage.



Six mois après avoir quitté la Russie, où elle a été fabriquée, la bobine de champ poloïdal n° 1 arrive sur le site d'ITER. C'est la plus petite (9 mètres de diamètre) des six bobines annulaires qui ceinturent le tokamak.



Deux nouveaux bâtiments, dédiés à l'alimentation électrique du système de chauffage par injection de particules neutres, sont en cours de construction. Ils abriteront un ensemble d'équipements conçus pour délivrer 1 MeV de très haute tension aux injecteurs situés dans le Bâtiment tokamak



Depuis le Bâtiment de contrôle, une centaine d'ingénieurs et de physiciens piloteront le tokamak ainsi que l'ensemble des activités de l'installation.



La salle de réalité virtuelle propose une immersion 3D dans les entrailles de la machine et de l'installation. L'expérience se révèle précieuse pour résoudre les problématiques liées au design et à l'intégration des différents composants et systèmes.



L'augmentation des effectifs a conduit ITER à organiser chaque année deux journées Portes Ouvertes réservées aux familles du personnel.



Un puissant téléobjectif et l'attente patiente du « moment décisif » ont permis de réaliser cette photo depuis une distance de 4,5 kilomètres du site d'ITER.



Préalablement à la production en série, cet élément du divertor, fabriqué au Japon par Mitsubishi Heavy Industries, s'apprête à subir une batterie de tests d'étanchéité.



Le Conseil ITER examine le projet de nouvelle feuille de route, qui doit être actualisé pour prendre en compte un certain nombre de paramètres : difficultés industrielles dans la fabrication de certaines pièces, retards dans la procédure d'assemblage de la machine et problématique de la démonstration de sûreté.



Pour réparer les non-conformités dimensionnelles des secteurs de chambre à vide et les microfissures que la corrosion a causées dans le circuit de refroidissement des écrans thermiques, le module n° 6 doit être extrait du puits d'assemblage du tokamak. L'assemblage de la machine est temporairement suspendu.



Les mêmes équipes qui, au mois de mai 2022, avaient procédé à l'installation du module n° 6 sont mobilisées pour extraire cette pièce de 1 350 tonnes du puits d'assemblage.



Détacher le module de ses ancrages, le lever et le transporter jusqu'au portique de sous-assemblage où il sera démonté requiert plus d'une centaine de séquences différentes, dûment validées et intégrées dans la procédure de transfert.



Pour alimenter leurs « clients » dans le Bâtiment tokamak, les fluides de refroidissement et le courant continu emprunteront ces passerelles en cours d'équipement.



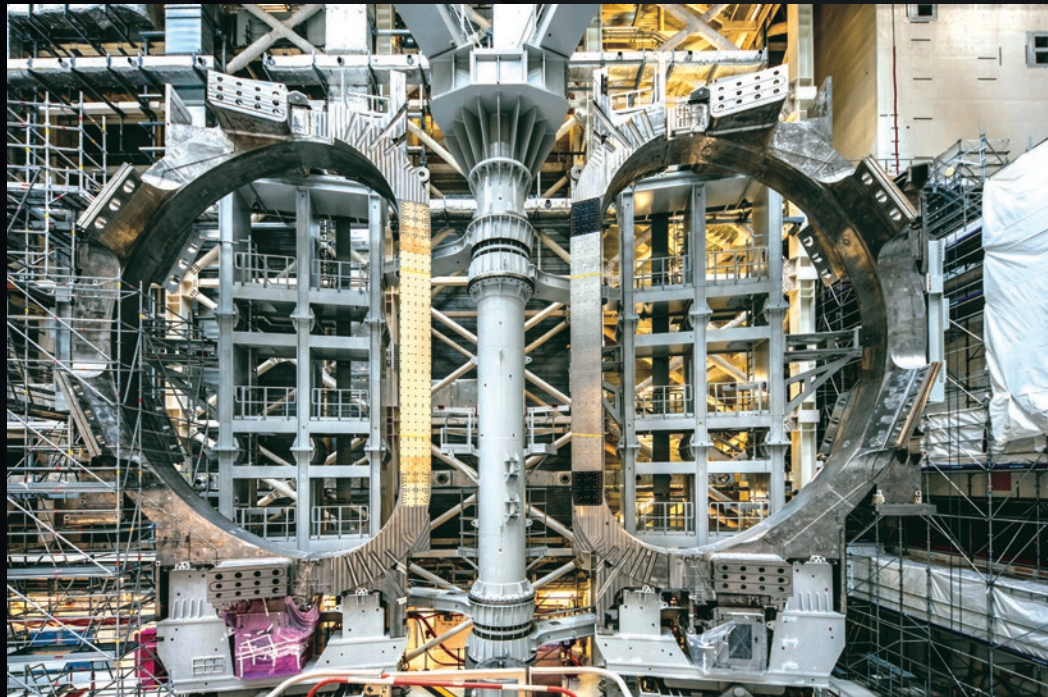
Des « Journées Sécurité » sont organisées tous les ans pour rappeler à l'ensemble des acteurs du programme, dans les bureaux comme sur le chantier, que la sécurité de tous repose sur l'engagement de chacun.



Dans le Complexe tokamak, la procédure d'installation se poursuit à un rythme soutenu. Ici, la première des cinq boîtes froides auxiliaires, qui distribuent les fluides de refroidissement aux différents systèmes de la machine, est en cours de transfert vers le Bâtiment tokamak.



Des panneaux d'acier inoxydable, polis comme des miroirs, alternant avec d'étroits panneaux laqués gris sombre : c'est la signature architecturale d'ITER qui s'imprime désormais sur le paysage provençal.



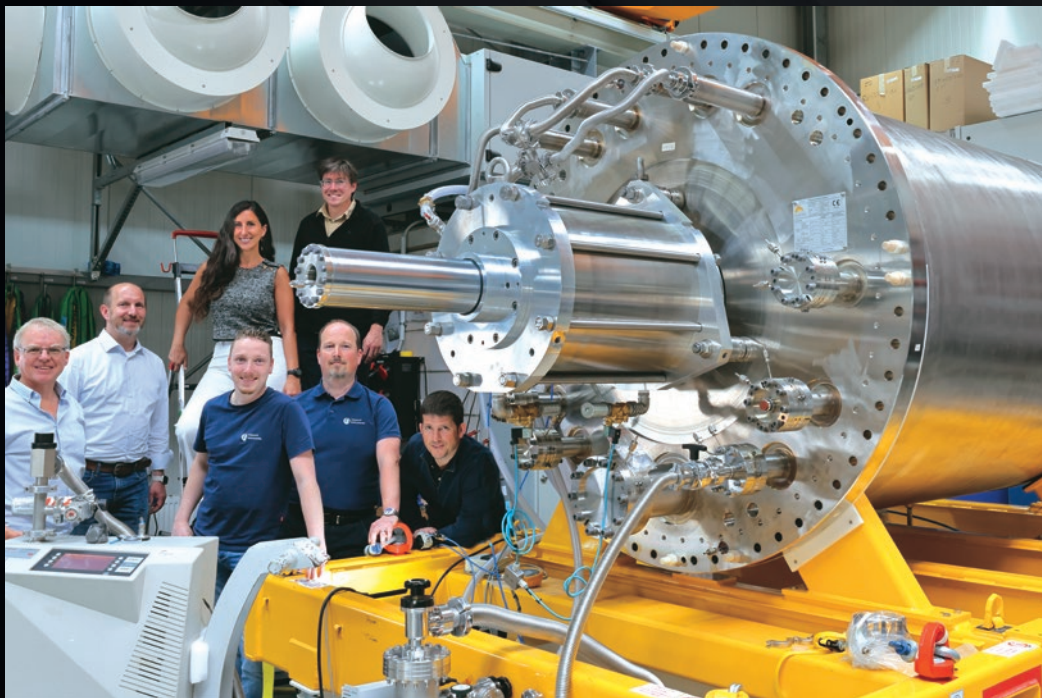
Les opérations de démontage et de transfert ont créé cette opportunité unique : photographier, sans obstacle, deux bobines de champ toroïdal dans les bras du portique de sous-assemblage. Ici TF9 (Europe) et TF8 (Japon).



Au terme de 14 années de travail, l'agence domestique européenne Fusion for Energy et ses sous-traitants célèbrent la fin des travaux de génie civil du Bâtiment tritium.



Au total, 19 bobines de champ toroïdal ont été produites et livrées à ITER par l'Europe et le Japon. L'arrivée de la dernière d'entre elles (TF18, fabriquée en Italie) marque la fin d'une entreprise industrielle parmi les plus longues et les plus complexes de tout le programme.



La première des pompes cryogéniques requises pour la machine a passé avec succès les tests de réception en Allemagne, dans les locaux de la société Research Instruments. Six pompes de ce type seront utilisées pour créer l'ultravide (un million de fois inférieur à la densité de l'air) au sein de la chambre à plasma.



Au début de l'année 2024, à Hefei, en Chine, les équipes scientifiques d'ITER s'associent à celles du tokamak EAST pour conduire une campagne d'expériences conjointe. Cette opération s'inscrit dans la décision d'ITER d'équiper le tokamak d'une paroi interne en tungstène plutôt qu'en béryllium.



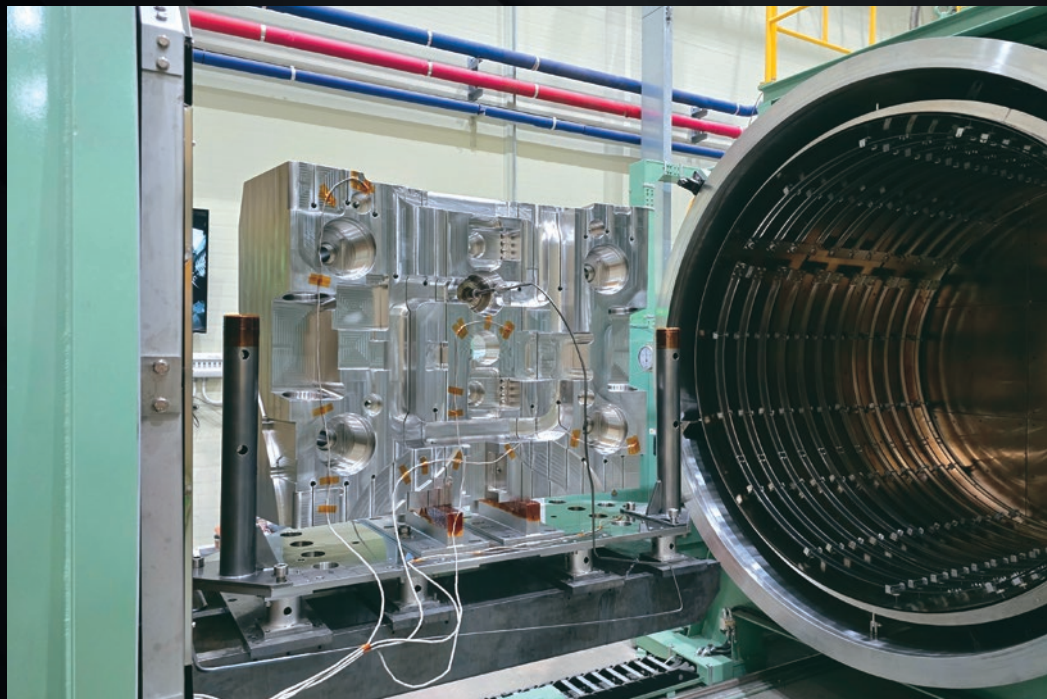
Au mois de février, les experts d'ITER Organization et leurs homologues des Agences domestiques se réunissent pour optimiser le programme de recherche avant de le soumettre au Comité consultatif pour la science et la technologie (STAC) et au Conseil ITER.



Suite à la mise en évidence de microfissures dans les tuyauteries du système de refroidissement des panneaux thermiques, un vaste programme de réparation est en cours. Une fois réparés (et, dans certains cas, refabriqués), les panneaux seront associés à un secteur de chambre à vide et à deux bobines de champ toroïdal pour former un des 9 « modules » constitutifs de la chambre à plasma du tokamak.



La Corée et la Chine ont fabriqué plus de la moitié des modules de couverture destinés à la paroi interne de la machine. Sur cette photo, les équipes d'ITER viennent de procéder à une inspection à l'usine Dongfang Heavy Machinery, en Chine



Les modules de couverture qui recouvrent la paroi interne de la chambre à vide sont conçus pour absorber la plus grande partie du flux de particules généré par le plasma en combustion et pour arrêter, ou ralentir, les neutrons issus des réactions de fusion. Pesant chacun plus de 3 tonnes, les modules présentent une structure interne extrêmement complexe. Ici, à l'usine Vitzrotech, en Corée.



La dernière des six bobines de champ poloidal qui équiperont la machine vient d'être finalisée. Dans son usine, sur site, l'Europe a fabriqué quatre de ces aimants annulaires – PF5, PF2, PF4 et PF3 (photo). Les deux autres bobines ont été fabriquées en Russie (PF1) et en Chine pour le compte de l'Europe (PF6).



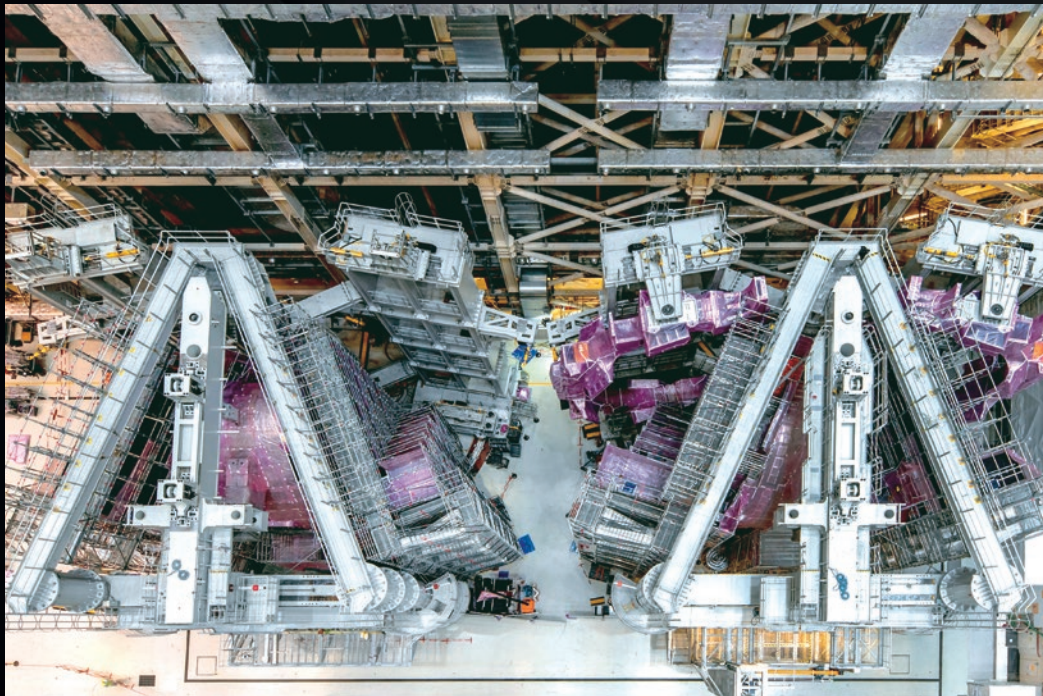
Au terme de deux années consacrées à sa mise à niveau, le banc-test SPIDER de la Neutral Beam Test Facility de Padoue, en Italie, est prêt à entrer en service. SPIDER est une source d'ions négatifs qui préfigure les sources d'ions qui seront utilisées par ITER pour le chauffage du plasma et les diagnostics.



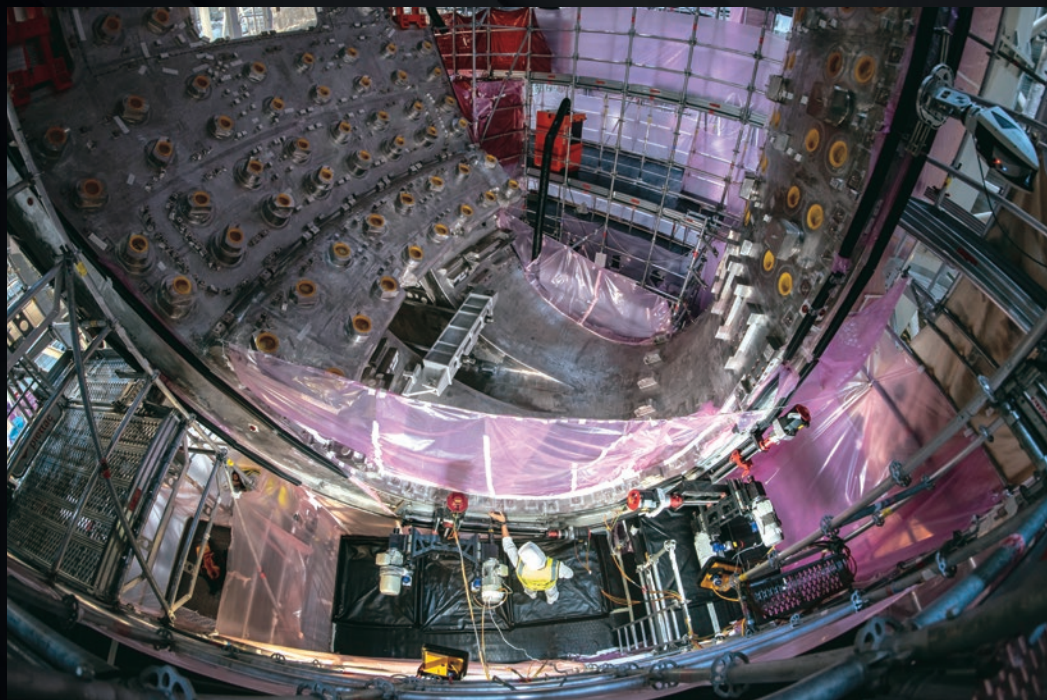
Une campagne de réparation est engagée pour traiter les non-conformités dimensionnelles qui affectent les interfaces des secteurs de chambre à vide.



Un à un, les modules du solénoïde central sont « empilés » et connectés les uns aux autres. Ici, le troisième module est en phase de positionnement. Le solénoïde central, d'une hauteur de 18 mètres, comprendra six modules au total.



Vue plongeante depuis la charpente du Hall d'assemblage : dans les portiques de sous-assemblage jumeaux, les réparations sont en cours simultanément sur les secteurs de chambre à vide n° 7 et n° 6. Les opérations sur le secteur n° 7 (à gauche) sont pratiquement terminées ; la phase de sous-assemblage va pouvoir commencer.



La géométrie des chanfreins des secteurs de chambre à vide doit retrouver ses paramètres nominaux de manière à permettre aux robots de soudage d'opérer sans obstacle une fois la pièce installée dans le puits d'assemblage du tokamak. Deux secteurs sont en cours de réparation en position verticale ; le troisième (n° 8) sera réparé en position horizontale.



La réparation des secteurs de chambre à vide a été confiée à ITER et au consortium SIMANN (SIMIC S.p.A. and Ansaldo Nucleare). Les opérations ne peuvent être engagées qu'après avoir qualifié outils et procédures sur des maquettes.



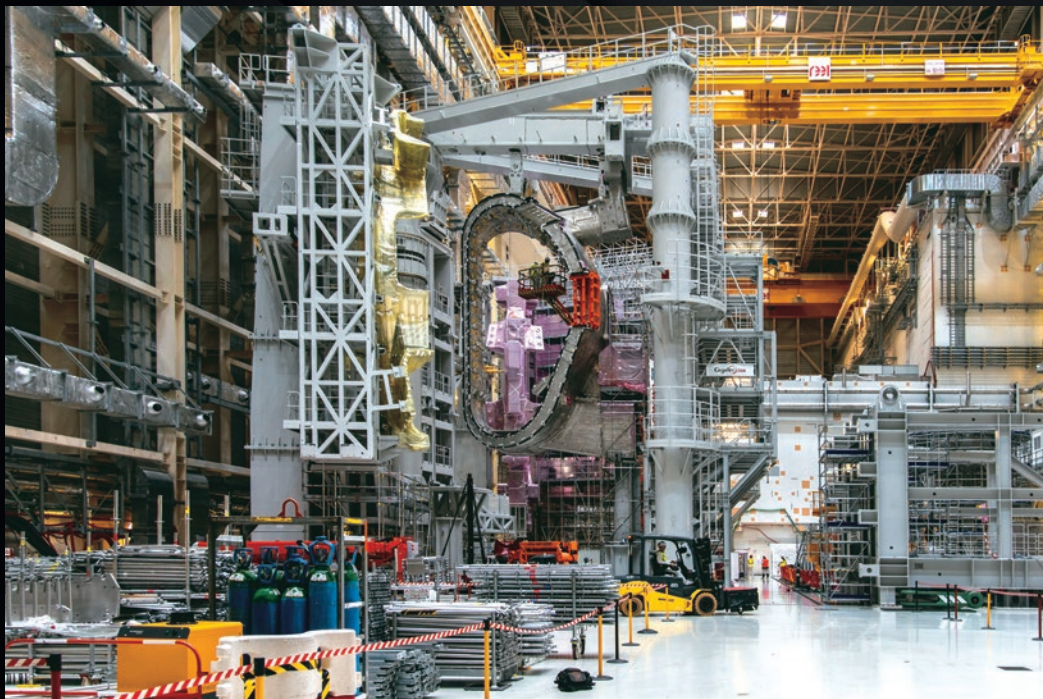
Le site d'ITER au mois de juin 2024. La quasi-totalité de l'infrastructure technique et industrielle est désormais en place.



Le partage des connaissances et de l'expérience acquise est une des caractéristiques historiques de la recherche sur la fusion. Tandis que des start-ups privées voient le jour un peu partout dans le monde, ITER accueille au mois de mai le premier atelier public-privé. Thème de ces rencontres : « Comment ITER peut-il vous aider ? ».



Dans un esprit de partage des connaissances, ITER Organization, les Agences domestiques du programme et les start-up privées s'engagent à œuvrer conjointement dans le cadre d'un écosystème planétaire, avec pour objectif de hâter l'avènement de la fusion industrielle et commerciale.



Près de deux années ont passé depuis que l'assemblage des modules a été interrompu, suite aux défauts identifiés dans les secteurs de chambre à vide et dans les panneaux d'écran thermique. Au mois de septembre 2024, l'assemblage du module n° 7 redémarre.



ITER – CONSTRUCTION, FABRICATIONS & ASSEMBLAGE

Directeur de la publication

Laban Coblenz
laban.coblenz@iter.org

Responsables éditoriaux

Robert Arnoux
robert.arnoux@iter.org

Krista Dulon
krista.dulon@iter.org

CRÉDITS PHOTO :

Pages 9, 20, 83, 133, 196 : EJF Riche-ITER Organization
Page 12 : Walter Tosto
Pages 14, 30, 32, 44, 61, 75, 80, 117, 124, 160 : ITER Russia
Pages 15, 27, 31, 51, 62, 86, 113, 142 : US ITER
Pages 18, 29, 89 : ITER India
Pages 25, 40, 78, 84, 108, 184, 187 : ITER China
Pages 26, 39, 54, 85, 95, 97, 139, 163, 171 : ITER Japan
Pages 41, 79, 99, 135, 155 : Fusion for Energy

Pages 38, 42, 109 : Emmanuel Bonici
Pages 43, 58, 72, 96, 114, 188 : ITER Korea
Pages 50, 104 : Consorzio RFX
Page 169 : Laban Coblenz
Page 170 : Donato Lioce
Page 183 : Robert Pearce
Page 190 : Luca Lotto
Page 197 : Christian Lünig
Toutes les autres photos : Robert Arnoux-ITER Organization

www.iter.org





ITER Organization Headquarters
Route de Vinon-sur-Verdon CS 90 046
13067 St. Paul-lez-Durance Cedex
France

2013
PROGRÈS EN IMAGES
2024

www.iter.org

