

## PIÈCE À PIÈCE LA MACHINE...

### DANS CE NUMÉRO

**Page 2** Les gens d'ITER

**Page 3** Pièce à pièce la machine...

**Page 4** Aux petits soins

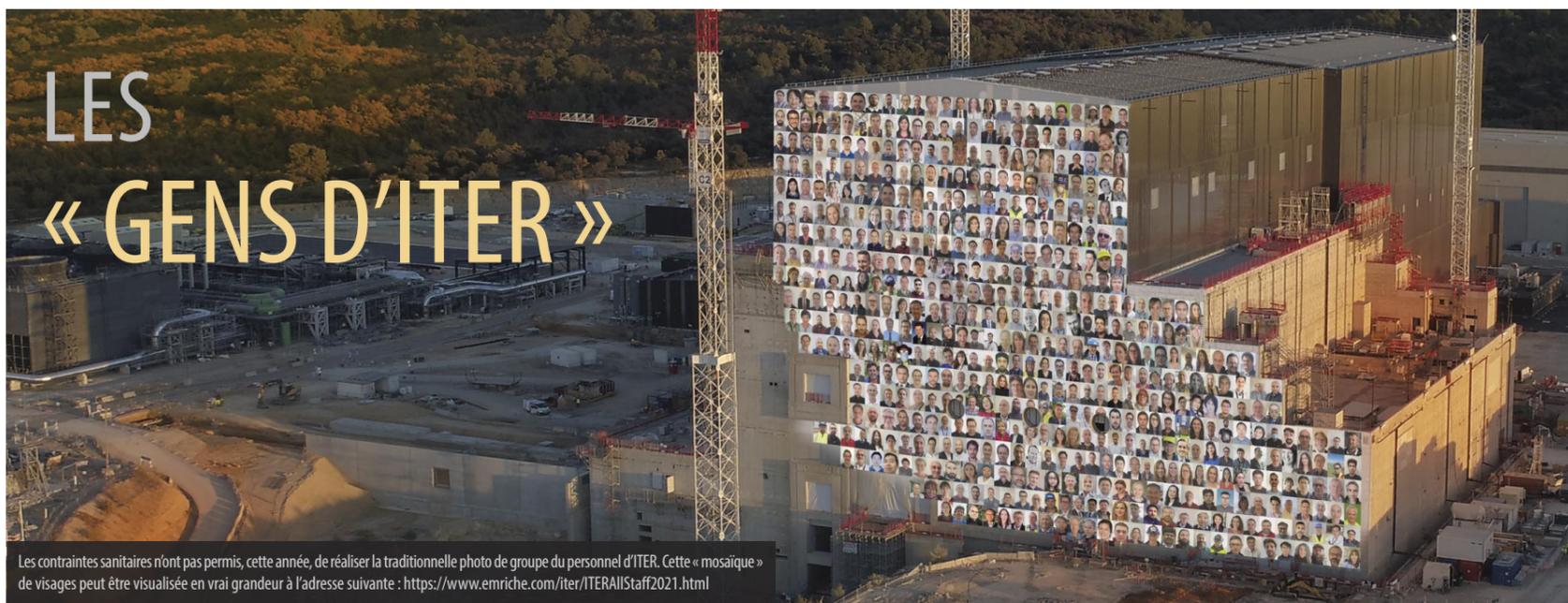
### ÉDITORIAL

Cette machine dont trois générations de physiciens et d'ingénieurs ont rêvé, la voici qui prend forme, pièce à pièce, sous nos yeux. Depuis un peu plus d'un an, pas une semaine ne passe sans qu'une pièce majeure soit réceptionnée, vérifiée, préparée, et finalement installée dans le vaste puits d'assemblage du tokamak (page 3).

Ce travail titanesque, aussi patient que méticuleux, est l'œuvre des « gens d'ITER » et des milliers de prestataires et sous-traitants à l'œuvre sur le chantier de Saint-Paul-lez-Durance (page 2).

D'ici cinq ans, le tokamak ITER sera prêt à produire son « premier plasma ». Et la suite appartiendra à l'histoire.

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



Les contraintes sanitaires n'ont pas permis, cette année, de réaliser la traditionnelle photo de groupe du personnel d'ITER. Cette « mosaïque » de visages peut être visualisée en vraie grandeur à l'adresse suivante : <https://www.emriche.com/iter/ITERAllStaff2021.html>

**Avant d'habiter Manosque, Pertuis ou Aix-en-Provence, ils vivaient à Tokyo, Séoul ou Atlanta ; sur les côtes de l'Océan indien ou de la mer Baltique ; au fin fond de la Sibérie ou au cœur de la Chine. Ils travaillaient pour de grands laboratoires de recherche, des industries de pointe, des administrations publiques. ITER les a rassemblés sur les rives de Durance : un gros millier de femmes et d'hommes, ressortissants de 35 pays et parlant presque autant de langues.**

Sur le millier de salariés directs que compte ITER Organization, ~ 69% sont Européens (et Français pour près de la moitié d'entre eux). Ce pourcentage reflète l'importance de la participation de l'Europe, qui contribue à hauteur de ~ 45% à la construction de l'installation ITER.

Pour les membres non-Européens, dont la participation au programme est de l'ordre de ~ 9%, la répartition par nationalité est la suivante : Chinois, 9% ; Russes, 6% ; Coréens, 5,2% ; Américains, 5% ; Japonais 3,5% et Indiens 2,8%.

À ces salariés directs s'ajoute une catégorie nouvelle depuis 2017, les « ITER Project Associates » (IPA) qui, tout en continuant de dépendre de leur institution d'origine, sont détachés auprès d'ITER Organization à Saint-Paul-lez-Durance. Les IPA, au nombre de 225 aujourd'hui, sont majoritairement Indiens (55,5%) ; 20% d'entre eux sont Européens, 10% Chinois, le reste se répartit entre les quatre membres restants.

À la fin de l'année 2020, 20% des salariés d'ITER Organization étaient des femmes, une part en légère augmentation depuis plusieurs années. L'âge moyen du personnel est d'un peu moins de 45 ans, mais la tranche d'âge la plus représentée (217 personnes) est celle des 35-39 ans.

Plus de la moitié des « gens d'ITER », qu'ils soient mariés/pacsés (79%) ou célibataires (21%), ont élu domicile à Manosque (28%) et Aix-en-Provence (24%). Un peu moins de 10% d'entre eux vivent à Vinon-sur-Verdon, à quelques kilomètres du site de construction, 5% à Pierrevert et 4% à Pertuis.

Plus de la moitié d'entre eux sont titulaires d'un master ou d'un diplôme d'ingénieur (56%) et près de 20% d'un doctorat.

En 2020, ITER Organization a ouvert une centaine de postes, pour lesquels le service des Ressources humaines a reçu près de 3 500 candidatures en provenance des pays participant au programme.

Les salariés directs de l'Organisation internationale, ses IPA, intérimaires et experts ne sont pas seuls sur le site d'ITER. L'Agence européenne pour ITER (*Fusion for Energy*), responsable de la construction des quelque 50 bâtiments que compte l'installation, y emploie directement 80 personnes ; 180 personnes travaillent pour le consortium Momentum, qui gère et coordonne l'assemblage de la machine et des systèmes, et les 480 entreprises sous-traitantes

intervenant sur le chantier (françaises à 80%) comptent au total plus de 2 500 salariés. Avec leur famille, les « gens d'ITER » forment une communauté de la taille d'une petite ville comme Sisteron.

Et l'impact de cette communauté sur l'économie locale est considérable : les dépenses de logement, d'alimentation et d'habillement, de transports et de loisirs se chiffrent chaque année en centaines de millions d'euros et induisent des centaines d'emplois, particulièrement dans le secteur des services.

## Des contrats, des emplois...

**Plus de quatorze ans ont passé depuis que les premiers bulldozers, au mois de janvier 2007, ont entrepris de niveler la plateforme sur laquelle ITER se dresse aujourd'hui. Onze ans se sont écoulés depuis que le premier coup de pioche a été donné sur le chantier de l'usine de fabrication des bobines, le premier des quelque 40 bâtiments que compte l'installation. Ces travaux, d'abord sous la responsabilité de la France, puis de l'Europe, ont mobilisé des centaines d'entreprises, des milliers de travailleurs.**

Hors assemblage de la machine, près de 15 millions d'heures de travail ont, à ce jour, été investis dans la construction d'ITER. Le génie civil de l'installation est finalisé à 80%, l'ensemble des tâches indispensables à la production d'un premier plasma d'ici cinq ans est réalisé à près de 75%.

Ces travaux de toute nature ont généré à ce jour quelque 7,2 milliards d'euros de contrats, dont 4,3 milliards (60%) ont été attribués à des entreprises françaises et près des trois-quarts de cette somme (3,2 milliards) sont allés à des entreprises de la région Sud-Paca.

- Bouches-du-Rhône : 2,3 milliards d'euros
- Var : 362 millions d'euros
- Vaucluse : 256 millions d'euros
- Alpes-de-Haute-Provence : 232 millions d'euros
- Hautes-Alpes : 4 millions d'euros
- Alpes-Maritimes : 67 millions d'euros

Pour répondre aux besoins du chantier, les entreprises ont créé des centaines d'emplois. Des sociétés extérieures à la région, ou étrangères comme le Coréen KEPCO ou l'Italien Ansaldo Nucleare (ingénierie nucléaire), ont ouvert bureaux et agences à Aix, Manosque, Nice, Sainte-Tulle ou Pertuis.

Tandis que la construction va vers son terme, l'effort se porte aujourd'hui vers la finalisation des systèmes industriels et l'assemblage de la machine – avec d'autres contrats, d'autres emplois qui continueront de dynamiser l'économie de la région pendant de longues années.

## ITER, pourquoi et comment ?

**L'enjeu :** démontrer la faisabilité technique et scientifique de la « fusion de l'hydrogène » à l'œuvre dans le Soleil et les étoiles et ouvrir la voie à une source d'énergie nouvelle, sûre, propre et virtuellement inépuisable.

**Les moyens :** une machine de fusion – un « tokamak » – au sein de laquelle un plasma d'hydrogène est porté à la température (150 millions de degrés Celsius) à laquelle les réactions de fusion peuvent se produire.

**Les acteurs :** la Chine, l'Union européenne avec le Royaume-Uni et la Suisse, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis. La France participe à ITER à la fois dans le cadre de l'Union européenne et au titre de « pays hôte » de l'installation.

**Le calendrier :** le Tokamak ITER doit être opérationnel d'ici cinq ans, et monter progressivement en puissance pour aborder les opérations à pleine puissance à l'horizon 2035.

**Les défis :** la phase d'assemblage de la machine, qui a débuté au printemps 2020, est une des plus délicates de tout le programme ITER. Des pièces pesant plusieurs centaines de tonnes doivent être assemblées avec des tolérances de l'ordre du 10<sup>e</sup> de millimètre.

**ITER et au-delà :** ITER (en latin « le chemin ») ouvre la voie à la maîtrise industrielle de la fusion de l'hydrogène. Déjà, les membres du programme ont engagé les études conceptuelles de la « machine d'après », collectivement baptisée DEMO. Proche du prototype industriel, DEMO fonctionnera de manière continue et sera raccordé au réseau de distribution de l'électricité.

**L'avenir :** les premières centrales de fusion pourraient voir le jour dès 2045. Les années 2055-2060 seraient celles du déploiement industriel et commercial. À partir de 2060, en complément des énergies renouvelables, la « filière fusion » pourrait contribuer de manière significative à l'alimentation en électricité des populations de la planète.

# PIÈCE À PIÈCE LA MACHINE...



Le 6 avril 2021 le premier des neuf secteurs de chambre à vide a été positionné dans un des portiques du Hall d'assemblage pour être associé à deux bobines verticales et former un « sous-assemblage » d'une masse de l'ordre de 1 250 tonnes.

**Au mois de mai 2020, une pièce d'acier de 30 mètres de diamètre, aussi lourde que trois Airbus A380, était délicatement déposée au fond du vaste puits d'assemblage du tokamak ITER. Avec l'installation de ce premier élément – la base du cryostat – ITER abordait un chapitre nouveau de sa longue histoire. Patiemment, pièce à pièce, l'assemblage de la machine pouvait commencer.**

Au fil des mois, d'autres éléments ont emprunté le même chemin : le cylindre inférieur du cryostat le 31 août 2020 (voir *Le Magazine* n°13) ; la partie inférieure de l'écran thermique au mois de janvier 2021 ; la première des six bobines annulaires au mois d'avril suivant. À ces pièces, dont la masse oscille entre plusieurs dizaines et plusieurs centaines de tonnes, se sont ajoutés des éléments plus légers mais non moins stratégiques : les « feeders » qui alimenteront les bobines de correction latérales en électricité et en fluides cryogéniques ; la base de la colonne centrale, un colossal outil d'assemblage et d'alignement haut de 25 mètres et pesant quelque 600 tonnes, ainsi que trois anneaux de pré-compression de réserve.

Tandis que ces éléments aux intitulés exotiques prennent place dans le puits d'assemblage, d'autres activités, tout aussi cruciales, se déploient dans le hall adjacent. Là, dans cet immense volume de quelque 300 000 mètres cubes (comparable à celui de la cathédrale de Chartres), le premier des « sous-assemblages » de la machine est en cours de préparation.

Un sous-assemblage associe trois pièces particulièrement spectaculaires : un secteur de chambre à vide de 40° (~ 440 tonnes), deux bobines verticales (~ 350 tonnes chacune) et des éléments plus légers, les boucliers thermiques. Le poids de cet ensemble est de l'ordre de 1 250 tonnes et il faut en réaliser neuf pour refermer sur lui-même le tore de la machine.

Des outils très particuliers, d'une puissance et d'une précision exceptionnelles, ont été conçus pour mener à bien ces opérations. Hauts d'une vingtaine de mètres, les deux « portiques de sous-assemblage » sont les plus formidables d'entre eux.

Fournis par la Corée, ces deux Titans sont capables d'aligner avec une précision quasi millimétrique des pièces de plus de 15 mètres de haut, pesant plusieurs centaines de tonnes.

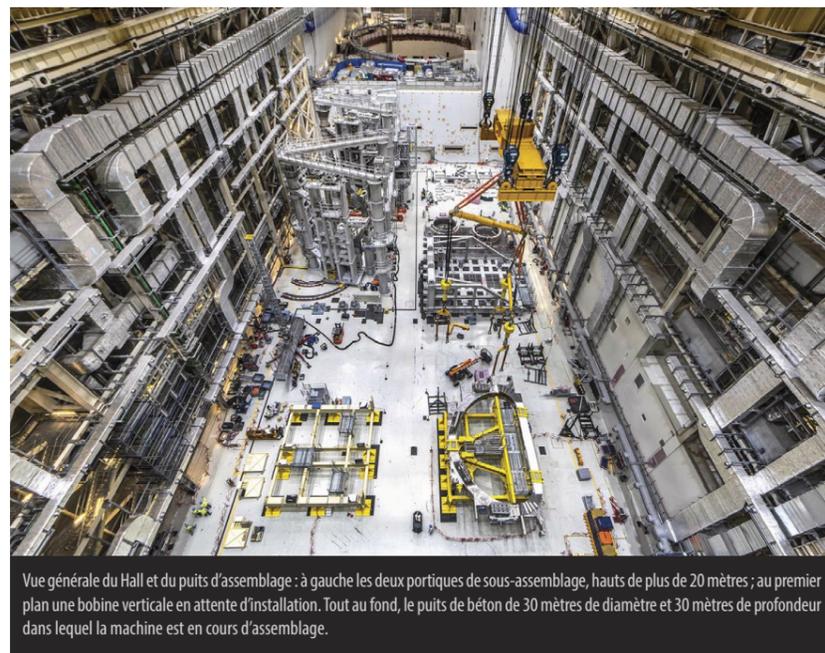


La bobine annulaire n°6 (10 mètres de diamètre, 330 tonnes) a été positionnée dans la fosse d'assemblage le 21 avril.

Réaliser un sous-assemblage, ou mettre en place une pièce dans l'espace qui lui est dévolu au sein de l'assemblage final, c'est conjuguer les contraintes de l'horlogerie aux dimensions de la construction navale.

La plupart des mouvements sont « répétés » en utilisant des charges fantômes – blocs de bétons de masse et centre de gravité équivalents à ceux des charges réelles – qui permettent de préregler les systèmes de levage, de valider les cheminements et d'anticiper les difficultés éventuelles.

Tout au long de la séquence d'installation, la métrologie joue un rôle essentiel : le basculement, le levage, le transfert, la mise en place s'effectuent sous la surveillance de faisceaux laser qui s'assurent que les déformations que subit la pièce demeurent dans les étroites limites des tolérances – ce qui, jusqu'ici, a toujours été le cas.



Vue générale du Hall et du puits d'assemblage : à gauche les deux portiques de sous-assemblage, hauts de plus de 20 mètres ; au premier plan une bobine verticale en attente d'installation. Tout au fond, le puits de béton de 30 mètres de diamètre et 30 mètres de profondeur dans lequel la machine est en cours d'assemblage.

Ces opérations qui se succèdent depuis plus d'un an génèrent un précieux retour d'expérience. « *Nous ne cessons d'apprendre et d'améliorer nos procédures*, expliquait Jens Reich, l'un des responsables de l'assemblage de la machine, à l'issue de l'installation de la première bobine, le 21 avril dernier. *La coordination entre les différents intervenants s'affine et tout ce qui se passe depuis un an confirme l'importance des tests et des 'répétitions' systématiques.* »

Les mois qui viennent ne seront pas moins intenses que les mois écoulés. Septembre verra la mise en place d'une deuxième bobine annulaire dans la fosse d'assemblage (PF5, 17 mètres de diamètre) et le premier pré-assemblage devrait être finalisé à la fin du mois d'octobre.

D'ici cinq ans, la totalité des pièces et systèmes indispensables à la production d'un « premier plasma » seront en place. ITER pourra dès lors engager sa campagne d'exploration scientifique, prélude à la production de « plasmas de puissance » à l'horizon 2035.

À ce stade, et pour la première fois dans l'histoire, la fusion de l'hydrogène donnera lieu à une production nette d'énergie. La voie sera dès lors ouverte à la maîtrise, puis à l'exploitation industrielle et commerciale de cette source d'énergie nouvelle, propre, sûre et virtuellement inépuisable. Et l'avenir du monde s'en trouvera changé.



Sur les « supports du cryostat », des pièces cylindriques qui agissent comme des rotules, pèse toute la masse (23 000 tonnes) du Tokamak. L'hygrométrie de leur environnement doit être contrôlée de manière très régulière tandis que des inspections visuelles assurent qu'aucune trace de graisse, de poussière ou d'humidité n'affecte leur intégrité.

**L'assemblage du tokamak ITER et de ses systèmes auxiliaires est une entreprise de très longue haleine. Dans certains cas, il s'écoulera plus de dix ans entre l'installation d'un élément et sa mise en service. Comment s'assurer, dans ces conditions, que ces équipements souvent complexes et délicats ne seront pas altérés par cette longue période d'inactivité ? Comment garantir que, le moment venu, ils rempliront leur fonction sans défaillance ?**

Cette problématique, commune à toute entreprise de très haute technologie, présente à ITER une acuité particulière. On peut remplacer sans trop de difficulté, au dernier moment, un dispositif défaillant dans une sonde en partance pour la planète Mars. Dans la machine ITER cette option n'est guère envisageable : pesant souvent plusieurs dizaines de tonnes, enchâssés dans les structures de béton ou imbriqués dans des assemblages complexes, nombre d'éléments, qualifiés de « captifs », ne pourraient être extraits et remplacés qu'au prix d'immenses difficultés.

Pour garantir que ces équipements ne failliront pas au moment de la mise en service, ITER a mis en place un ensemble de procédures strictement codifiées – les « activités de préservation ».

Ces procédures s'appliquent aux éléments captifs, dont certains sont en place depuis plusieurs années déjà, comme aux éléments « stockés » dans l'attente de leur installation.

« Certaines de ces procédures sont relativement simples, explique Richard Brown, le responsable de l'entretien au sein de la division des opérations. Dans certains cas, il s'agit simplement de mettre en route de manière régulière des moteurs et des pompes, de graisser et d'activer des vannes, de s'assurer que les gaz inertes qui remplissent certaines cuves pour éviter la corrosion demeurent à la bonne pression. »

Les éléments plus sophistiqués, ou plus exposés, exigent des soins plus spécifiques. Au fond de la fosse d'assemblage, où sont positionnés les 18 supports du cryostat<sup>1</sup>, l'hygrométrie doit être contrôlée de manière très régulière et des inspections visuelles doivent s'assurer qu'aucune trace de graisse, de poussière, d'humidité n'affecte leur intégrité. De la même manière, on doit veiller en permanence à ce que les activités qui se déploient dans l'environnement des réservoirs de drainage ne génèrent pas de « contamination » – l'acier inoxydable des réservoirs, en effet, pourrait être pollué par les particules d'autres « nuances » d'acier, notamment carbonés.

Au fil des arrivages d'éléments de haute technologie, les « activités de préservation » deviendront plus exigeantes et plus délicates. « La qualité du vide dans les gyrotrons<sup>2</sup> destinés au chauffage du plasma ne devra pas être affectée par la longue période de stockage qui précédera leur installation effective, poursuit Brown. Ces systèmes ne préserveront leur fonctionnalité qu'à la condition d'être connectés, pendant toute la durée du stockage, à une alimentation électrique haute-tension.

*Il est donc essentiel de mettre en place cette infrastructure bien avant que les gyrotrons nous soient livrés. »*

Pour l'équipe responsable de ces activités le défi est à la fois technique et organisationnel. Il s'agit de définir la nature et la fréquence des opérations requises par chacun des éléments à « préserver » ; de faire en sorte que chaque observation soit systématiquement enregistrée et décrite avec précision ; d'assurer une traçabilité sans faille depuis le moment où la pièce ou le système est réceptionné et celui de la mise en service.

Dans sa détermination à construire ITER et à maîtriser le feu des étoiles, l'humanité s'est lancée dans la plus grande aventure scientifique, technologique et industrielle de toute son histoire. La conception de la machine, de ses systèmes auxiliaires et de l'imposante infrastructure industrielle dont ils dépendent a mobilisé la compétence et la créativité de milliers d'hommes et de femmes de par le monde.

Tous ces efforts pourtant se révéleraient vains si, par manque de soins, l'un ou l'autre des éléments de ce formidable Meccano venait à faillir.

- 1 Les premières sections du cryostat (base et cylindre inférieur) reposent déjà sur ces supports, qui agissent comme des rotules autorisant les mouvements générés par les forces qui s'exercent sur le tokamak. À terme, ce sont les 23 000 tonnes de la machine (soit 3,5 fois la masse de la Tour Eiffel) qui reposeront sur ces 18 éléments.
- 2 Les gyrotrons (du grec « gyro », cercle, et « tron », abréviation d'électron) sont des dispositifs conçus pour générer des ondes électromagnétiques de très haute fréquence. Dans le tokamak ITER, 24 gyrotrons, fournis par la Russie, le Japon, l'Inde et l'Europe, contribuent au chauffage du plasma.



Un logiciel dédié permet de planifier les tâches, d'enregistrer et de transmettre les données acquises, et de garantir la traçabilité des opérations.

Couverture : Pièce à pièce, le tokamak ITER prend forme dans le puits d'assemblage de 30 mètres de diamètre et autant de profondeur. Ici, un jeu d'anneaux de pré-compression est délicatement inséré dans l'espace central, partiellement occupé par la première des six bobines annulaires.