



Dans le Hall d'assemblage, les éléments du Tokamak ITER sont équipés, le cas échéant préassemblés, avant d'être positionnés dans le puits d'assemblage, visible à l'arrière-plan de cette photo.

SOMMAIRE

QUINZE ANS DE TRÈS GRANDS TRAVAUX	P.2
IN MEMORIAM	P.2
UNE ANNÉE EN IMAGES	P.3
LÀ OÙ PERSONNE N'EST JAMAIS ALLÉ	P.4
UN NOUVEAU DIRECTEUR GÉNÉRAL	P.4

ÉDITO

Alors que le monde de la fusion voit se multiplier les initiatives privées - une trentaine de start-ups créées en quelques années - quelle est la place d'ITER dans ce paysage renouvelé? Elle demeure unique, expliquent deux des responsables scientifiques du programme (page 4). Le Tokamak ITER est la seule machine au monde dont la taille et les équipements vont permettre « d'explorer des territoires qui ne l'ont jamais été jusqu'ici ».

Dans cette attente, les travaux entrepris il y a plus de quinze sur le site de Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache se poursuivent. À ce jour 85% du génie civil de l'installation est finalisé. Le chantier, l'un des plus grands d'Europe, mobilise quotidiennement plus de 2 500 personnes, appartenant à quelque 500 entreprises différentes, françaises pour 80% d'entre elles (page 2).

Ce 15^e numéro du Magazine rend hommage à Bernard Bigot, directeur général d'ITER (2015-2022), prématurément disparu au mois de mai, et présente son successeur, l'Italien Pietro Barabaschi, 56 ans, un ingénieur dont la carrière a été tout entière consacrée à la recherche sur la fusion.

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



Le chantier de construction de l'installation ITER à Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache (13) mobilise quotidiennement plus de 2 500 personnes, appartenant à quelque 500 entreprises.

QUINZE ANS DE TRÈS GRANDS TRAVAUX

Plus de quinze ans ont passé depuis ce jour de janvier 2007 où, sous la responsabilité de la France, les travaux de défrichage, de terrassement et de viabilisation du site d'ITER furent lancés à Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache (13). Cette entreprise titanesque allait durer près de trois ans, au terme desquels près de 2,5 millions de mètres-cubes de matériaux seraient déplacés et 20 kilomètres de réseaux hydrauliques réalisés.

À la fin de l'année 2009, le site était aménagé¹ et la plateforme de 42 hectares qui en occupe le cœur (l'équivalent d'une soixantaine de terrains de football), était prête à accueillir les premières constructions.

La France, « pays hôte » du programme international ITER, avait rempli sa mission initiale. Au « membre hôte », l'Europe, revenait désormais la responsabilité de construire et d'équiper les quelque 39 bâtiments de l'installation. Au mois d'août 2010, les bulldozers et les pelleteuses réinvestissaient la plateforme, cette fois pour entamer les travaux de deux structures emblématiques : le Complexe Tokamak, un ensemble de trois bâtiments d'une masse totale de 400 000 tonnes reposant sur une dalle parasismique flottante, et l'usine où seraient fabriqués quatre des six aimants annulaires de la machine (deux de 17 mètres de diamètre, et deux de 24 mètres).

C'était il y a douze ans. Mi-2013, l'usine de bobinage était inaugurée et les premières fabrications étaient lancées. En 2020, l'élément central du Complexe Tokamak, le Bâtiment Tokamak qui abrite le Hall d'assemblage et le puits de la machine, était livré. C'est dans cet espace de 350 000 mètres-cubes que se déploient, depuis deux ans et demi, les opérations d'assemblage du Tokamak.

Autour de ces deux édifices, des dizaines de bâtiments et d'installations techniques et industrielles ont vu le jour, ont été équipés et, pour certains, déjà mis en service : un poste électrique d'une superficie de quatre hectares ; une usine cryogénique, la plus puissante au monde ; des alignements de transformateurs, de convertisseurs, de redresseurs de courant ; toute une infrastructure dédiée à l'évacuation de la chaleur, sans omettre les kilomètres de galeries souterraines, les réseaux de distribution, les chaussées, l'éclairage. À ce jour, plus de 85% du génie civil de l'installation est finalisé.

En moyenne aujourd'hui, le chantier mobilise quotidiennement plus de 2 500 personnes, appartenant à quelque 500 entreprises différentes, françaises pour 80% d'entre elles. On estime que, depuis le début des travaux, plus de 15 000 personnes ont contribué à la construction de l'installation. Depuis la PME locale jusqu'au consortium de grandes sociétés européennes, près de 5 000 entreprises sont intervenues sur le site.

Le montant des marchés attribués depuis 2007 par les différentes entités responsables de la construction d'ITER (ITER Organization, l'agence européenne Fusion for Energy, l'agence Iter-France) s'élève à plus de 9 milliards d'euros. Sur ce total 5,4 milliards sont allés à des entreprises implantées en France, dont 4,2 milliards à des entreprises de la région Sud-PACA. En termes de contrats aux entreprises, d'emplois maintenus ou créés, de retombées économiques induites, l'impact d'ITER sur la région qui l'accueille est sans équivalent.

Le chantier de la plus grande installation de fusion au monde, toutefois, est loin d'être terminé. Tandis que le Tokamak prend forme dans le « puits d'assemblage », plusieurs bâtiments et structures requis pour la production du Premier Plasma² (Centre de contrôle de l'installation, bâtiment tritium, passerelles pour les circuits d'alimentation, etc.) sont en cours de construction. Un dernier édifice apportera la touche finale à ce spectaculaire paysage industriel : le bâtiment des « Cellules chaudes », indispensable pour la phase de fonctionnement à pleine puissance à l'horizon 2035, sera tout aussi massif et volumineux que le Complexe Tokamak.

1 Par bail emphytéotique, la France a concédé un espace de 180 hectares à l'organisation internationale ITER (ITER Organization).
2 La phase de « Premier plasma » permet de vérifier l'alignement des champs magnétiques au sein de la machine ainsi que le bon fonctionnement de l'ensemble des équipements et systèmes.

ÉCONOMIE RÉGIONALE UN IMPACT MAJEUR

Dès 2001, anticipant de cinq ans la décision des membres d'ITER de construire l'installation sur le site que proposait l'Europe, à Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache (13), les collectivités territoriales de la région PACA s'étaient engagées à participer au financement du programme à hauteur de 467 millions d'euros (~ 650 millions en monnaie constante).

La contribution du Conseil régional PACA, des Conseils généraux (aujourd'hui « départementaux ») des Bouches-du-Rhône, du Var, de Vaucluse, des Alpes-Maritimes, des Alpes-de-Haute-Provence et des Hautes-Alpes, ainsi que de la Communauté d'agglomération du Pays d'Aix était alors équivalente, en valeur, à celle d'un membre « plein ».

Mais plus encore que leur engagement financier, c'est l'implication politique des collectivités territoriales qui se révélerait déterminante dans la décision (unanime) à laquelle les membres parviendraient le 28 juin 2005.

Cet investissement n'a pas été perdu. Quinze ans après le premier coup de pioche donné sur le chantier et alors que les travaux ne sont finalisés qu'à 85%, les chiffres (voir ci-contre) sont éloquentes.

MONTANT TOTAL DES CONTRATS AUX ENTREPRISES



IN MEMORIAM BERNARD BIGOT, DIRECTEUR GÉNÉRAL D'ITER ORGANIZATION (2015-2022)

Directeur général d'ITER Organization depuis le mois de mars 2015, Bernard Bigot s'est éteint le 14 mai 2022, emporté par la maladie. Tout au long de sa brillante carrière, il avait occupé d'importantes fonctions dans le monde de la recherche, de l'enseignement supérieur et de la haute administration. À divers titres, il était engagé depuis plus de vingt ans dans le programme ITER et dans la recherche sur la fusion.

Sa détermination, sa puissance de travail sans égale, auront durablement façonné les multiples aspects du programme ITER. Sa disparition prématurée a été ressentie avec une immense tristesse par l'ensemble de la communauté scientifique et, tout particulièrement, dans le monde de la recherche sur la fusion.

Une année en images

Fabrications, assemblage du Tokamak, construction d'infrastructures et de bâtiments nouveaux, équipement des bâtiments existants, mise en service de systèmes industriels... de multiples activités se déploient en parallèle sur le site d'ITER à Saint-Paul-lez-Durance/Cadarache (13). Toutes convergent vers un même objectif : disposer, à l'horizon 2035, d'une installation capable, pour la première fois au monde, de générer une production nette d'énergie à partir des réactions de fusion de l'hydrogène au sein d'un « plasma en combustion ». En photos, ci-dessous, quelques unes des réalisations marquantes de l'année écoulée.



Pour limiter les échanges thermiques entre le milieu ultra-froid des aimants supraconducteurs et l'environnement extérieur, le Tokamak ITER est enclos dans un thermos géant, fourni par l'Inde et appelé « cryostat ». La dernière des quatre sections de ce cryostat, le couvercle, a été finalisée au mois de mars 2022.



Progressivement, les différents systèmes industriels de l'installation sont mis en service. Ici, l'usine cryogénique qui gère et distribue les fluides de refroidissement destinés au système magnétique supraconducteur, aux écrans thermiques et aux cryopompes du Tokamak (septembre 2022).



Quatre des six aimants annulaires du Tokamak (17 et 24 m de diamètre) sont fabriqués sur site par CNIM, un des sous-traitants de l'Agence domestique européenne. Au mois de juin 2022 le dernier bobinage (« double galette ») a été finalisé. Les deux derniers aimants abordent les ultimes phases de fabrication et seront livrés mi-2023 et mi-2024 respectivement.



Ce bâtiment de 3 500 m² sur trois niveaux abritera la salle de contrôle de l'installation ITER et les quelque 60 à 80 opérateurs qui l'occuperont. Un effort particulier a été consenti pour optimiser l'ergonomie des espaces et des postes de travail. Les travaux ont débuté à l'automne 2021 et se termineront prochainement.



Fourni par les États-Unis, le solénoïde central (18 m de haut, 1 000 tonnes) est l'aimant le plus puissant jamais conçu. Des 6 modules qui le composent, deux ont été livrés. Le premier est en cours d'équipement.



Le système d'évacuation de la chaleur, fourni par l'Inde, a été dimensionné pour dissiper une puissance de 1,2 gigawatts. La mise en service de ses différents éléments (pompes, vannes, systèmes de contrôle commande, tours de réfrigération actives, etc.) a commencé au mois d'août 2021.

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, durable et sans impact significatif sur l'environnement.

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 C) à laquelle les réactions de fusion peuvent se produire.

Les acteurs : la Chine, l'Union européenne, 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 : l'impact de la pandémie de Covid-19, les difficultés liées à la fabrication d'éléments d'une taille et d'une complexité inédites conduisent à une révision du calendrier. L'objectif d'un fonctionnement à pleine puissance à l'horizon 2035 est cependant maintenu.

Les défis : la phase d'assemblage de la machine, qui a débuté au printemps 2020, est une des plus délicates de tout le programme. Des pièces aussi hautes qu'un immeuble de 5 étages, pesant plusieurs centaines de tonnes, doivent être assemblées et positionnées avec des tolérances inférieures au 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, le DEMO européen fonctionnera de manière continue et produira de l'électricité.

L'avenir : l'enjeu d'ITER est de permettre à chacun des pays participants de disposer du savoir-faire lui permettant, à terme, de développer une filière de fusion industrielle et commerciale. En complément du nucléaire traditionnel et des énergies renouvelables, la disponibilité de cette filière permettra de réduire de manière significative la dépendance de nos sociétés aux énergies fossiles.



Le Tokamak ITER est la seule machine au monde dont la taille et les équipements vont permettre d'explorer un état de la matière qui n'existe qu'au cœur du Soleil et des étoiles.

LÀ OÙ PERSONNE N'EST JAMAIS ALLÉ

Entreprise dès les lendemains de la Deuxième guerre mondiale, la recherche sur la fusion de l'hydrogène a connu de grands moments d'optimisme et de nombreux épisodes de déconvenue. L'objectif que l'on a cru atteindre s'est souvent dérobé mais la détermination des chercheurs n'a jamais vacillé. Au fil des six décennies écoulées, trois générations de physiciens et d'ingénieurs ont été portées par cette ambition prométhéenne : reproduire les réactions nucléaires à l'œuvre au cœur du Soleil et des étoiles et y puiser une source d'énergie virtuellement intarissable.

Depuis quelques années, la quête de l'énergie de fusion est entrée dans une phase décisive. Les physiciens comprennent chaque jour un peu mieux le comportement des plasmas – le milieu extrêmement chaud au sein duquel se produisent les réactions de fusion – et les ingénieurs ont su construire des machines de plus en plus puissantes et performantes. Les pouvoirs publics, longtemps les seuls financeurs de la recherche, ont pris la mesure des enjeux : la fusion de l'hydrogène, dont l'impact sur l'environnement est particulièrement faible, est désormais reconnue comme un atout majeur dans la lutte contre le changement climatique.

À cette prise de conscience publique s'ajoute depuis peu l'intérêt manifesté par les investisseurs privés. Dans le monde anglo-saxon, mais également en France, en Allemagne, en Italie, au Japon, en Israël ou en Chine, des dizaines de start-ups ont été créées, proposant des approches nouvelles ou reprenant des pistes délaissées. On estime que ces « jeunes pousses » ont bénéficié à ce jour de plus de 4,8 milliards d'euros d'investissement, dont 2.8 pour la seule année 2021.

Dans ce paysage renouvelé, foisonnant, dynamique, la place d'ITER est unique. Le Tokamak ITER est la seule machine au monde dont la taille et les équipements vont permettre « d'explorer des territoires qui ne l'ont jamais été jusqu'ici », comme le dit Tim Luce, le responsable scientifique d'ITER. Son collègue Alberto Loarte, lui aussi physicien de renom, explique : « Ce qui nous allons faire avec ITER, et qui n'a jamais été réalisé nulle part, c'est démontrer que la température d'un plasma peut être 'auto-entretenu' par les réactions de fusion. » Deux machines, le TFTR américain aujourd'hui démantelé et le JET européen, toujours opérationnel au Royaume-Uni, ont démontré dès les années 1990 qu'il était possible de produire de l'énergie à partir des réactions de fusion. Cependant, pour atteindre les conditions de température auxquelles les réactions de fusion se produisent, il avait fallu dans les deux cas injecter dans le plasma plus d'énergie que celui-ci n'en avait restitué.

La machine ITER a été conçue pour amplifier d'un facteur 10 l'énergie que les systèmes de chauffage externe apporteront au plasma : 50 MW en « entrée » ; 500 MW en « sortie ».

ITER toutefois, est une expérience scientifique très particulière. « Dans la plupart des grandes installations de recherche, explique Tim Luce, on sait comment les équipements fonctionnent et on les utilise à des fins d'observation. ITER est totalement différent : ITER crée l'objet scientifique qu'il va observer. »

Alberto Loarte ajoute : « Nous sommes confiants. Nous allons générer des réactions de fusion qui produiront des centaines de mégawatts de puissance. Mais nous ne savons pas exactement comment le plasma auto-entretenu se comportera parce que cet état de la matière n'a jamais été observé jusqu'ici. » C'est là tout l'enjeu d'ITER et l'objectif que se sont assignés les 35 pays qui participent au programme : recréer un milieu qui n'existe qu'au cœur des étoiles, l'explorer et le comprendre, et ouvrir ainsi la voie à l'exploitation d'une source d'énergie nouvelle « pour le bénéfice de l'ensemble de l'humanité »¹.

¹ Selon les termes mêmes de la déclaration commune Reagan-Gorbatchev, à l'issue du Sommet de Genève du mois de novembre 1985, acte de naissance du programme de recherche international ITER.

Pietro BARABASCHI

Nommé directeur général d'ITER

Réuni en session extraordinaire à Paris les 14 et 15 septembre 2022, le Conseil, organe exécutif du programme ITER, a désigné le successeur de Bernard Bigot à la tête d'ITER Organization (voir page 2). Après avoir auditionné plusieurs candidats, le choix du Conseil s'est unanimement porté sur Pietro Barabaschi, 56 ans, un ingénieur dont la carrière a été tout entière consacrée à la recherche sur la fusion.

Celle-ci a débuté au tokamak européen JET (Oxford, Royaume Uni) et s'est très vite orientée vers les activités d'ingénierie du programme ITER, que les quatre partenaires originels (Fédération de Russie, États-Unis, Europe et Japon) ont lancé en 1992 et poursuivi jusqu'en 1998. Dans ce cadre, Pietro Barabaschi a travaillé successivement au sein des Joint Work Sites de San Diego, en Californie, et de Garching/Munich, en Allemagne.

Depuis 2008, il dirigeait un programme de recherche baptisé « Approche Élargie » que l'Europe et le Japon ont établi en soutien et en complément d'ITER.

À deux reprises—en 2015 et à nouveau depuis le mois de juin 2022—Pietro Barabaschi a occupé la fonction de directeur par intérim de l'agence qui gère la contribution de l'Union européenne au programme ITER (Fusion for Energy, basée à Barcelone).

De nationalité italienne, Pietro Barabaschi est le quatrième directeur général d'ITER Organization, après les Japonais Kaname Ikeda (2006-2010) et Osamu Motojima (2010-2015), et le Français Bernard Bigot (2015-2022).



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

Responsable de la rédaction
Robert Arnoux / robert.arnoux@iter.org

Contributions
Krista Dulon / krista.dulon@iter.org

www.iter.org     