



UN DES PLUS GRANDS CHANTIERS D'EUROPE

DANS CE NUMÉRO

Page 2 ITER c'est bon pour l'économie

Page 3 Un des plus grands chantiers d'Europe

Page 4 Une cassette dans la fournaise

EDITORIAL

ITER, c'est beaucoup de choses à la fois – une collaboration internationale sans équivalent, qui rassemble 35 pays représentant plus de la moitié de la population mondiale ; un défi scientifique et technologique majeur, ouvrant la voie vers la maîtrise d'une source d'énergie sûre, virtuellement inépuisable et respectueuse de l'environnement ; un chantier de construction parmi les plus importants d'Europe qui a déjà généré plus de 5,3 milliards d'euros de contrats, dont plus de la moitié attribuée à des entreprises françaises.

C'est à ce dernier aspect que nous nous intéressons aujourd'hui – comment ITER dynamise l'économie et stimule l'emploi dans le territoire qui l'accueille.

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

ITER C'EST BON POUR L'ECONOMIE



Dans le « Territoire à 30 minutes autour d'ITER » tel que le définit l'Insee, l'emploi salarié privé connaît un taux de croissance exceptionnel.

Les chiffres sont tombés et ils sont éloquentes : en un peu moins de dix ans (janvier 2007- décembre 2016), les travaux et les services directement liés au chantier ITER ont généré plus de 5,3 milliards d'euros de contrats, dont plus de la moitié (2,9 milliards d'euros) a été attribuée à des entreprises françaises. Sur cette somme, 2,1 milliards d'euros (73%) sont allés à des entreprises de la région PACA.

Sur le plan régional et local, ces contrats ont largement amorti les effets de la crise.

L'Institut national de la statistique et des études économiques (Insee), qui a récemment analysé l'évolution de l'emploi sur le « *Territoire à 30 minutes autour d'ITER* » a noté que, dans cet espace, l'emploi salarié privé était resté fortement dynamique après 2008, année du déclenchement de la crise, « *alors qu'il subissait un brutal coup d'arrêt partout ailleurs* ».

Tandis que sur des territoires comparables, comme autour du technopôle de Sofia-Antipolis, dans les Alpes-Maritimes, l'emploi salarié privé progressait de 0,8% par an entre 2004 et 2014, il a enregistré ici un taux de croissance près de trois fois supérieur, de l'ordre de 2,3% – un effet « *en partie imputable au*

chantier ITER », selon les experts de l'Insee.

Aux emplois que les entreprises ont pu créer ou préserver pour répondre aux besoins d'ITER s'ajoutent ceux (à peu près un millier) qui dépendent directement d'ITER Organization et de l'Agence européenne pour ITER (*Fusion for Energy*) – ces emplois représentent chaque année un apport de plus d'une centaine de millions d'euros à l'économie locale.

Au-delà du territoire proche et au-delà des contrats directement liés au chantier de construction, de nombreuses entreprises françaises contribuent au programme ITER et bénéficient de ses retombées.

Industeel, au Creusot (Saône-et-Loire), a fourni 8 000 tonnes d'acier à l'industrie russe, indienne et coréenne pour la fabrication des pièces du tokamak ITER ; CNIM, à La Seyne-sur-Mer (Var), est engagé dans la fabrication de quelques-uns des éléments essentiels de la machine – divertor, plaques radiales des bobines verticales, bobines annulaires, etc. ; Air Liquide, à Sassenage (Isère), fournit l'équipement de l'usine cryogénique la plus puissante du monde ; REEL et Robatel Industries dans la région lyonnaise, Thalès, Bertin... les entreprises françaises sont nombreuses à avoir emporté des contrats qui se chiffrent en dizaines, voire en centaines de millions d'euros.

<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2663096>

L'astucieux petit manchon

L'acier et le béton se sont rencontrés dans les dernières années du XIX^e siècle et ne se sont plus quittés depuis. De leur union est né le « béton armé » qui permet de construire toujours plus solide, toujours plus grand, toujours plus haut.

Sans recours massif au béton armé, qui garantit à la fois la résistance des bâtiments et la robustesse des barrières de confinement, la construction d'une installation nucléaire ne saurait être envisagée. Et c'est naturellement dans le monde du nucléaire que la densité des armatures atteint les valeurs les plus élevées – le seul Complexe tokamak, qui occupe le cœur de l'installation ITER, mobilisera au total 30 000 tonnes de barres d'acier (l'équivalent d'une cinquantaine d'Airbus A380 à

pleine charge) pour 100 000 mètres cubes de béton.

Les barres étant souvent très épaisses (15 à 20% du ferrailage du Complexe tokamak est constitué de barres de 40 millimètres de diamètre) et leur maillage très serré, un problème aigu se pose : celui de l'encombrement.

Pour conserver leur résistance, les barres ne peuvent être soudées bout à bout – les calculs exigent un « recouvrement » qui peut représenter jusqu'au cinquième de leur longueur (de l'ordre de 2 à 2,5 mètres pour une barre 40 mm de diamètre et 12 mètres de longueur). Outre l'espace qu'ils occupent, ces recouvrements génèrent une surconsommation d'acier qui se répercute sur le coût de l'ouvrage.

Confrontés à ce casse-tête les « armaturiers » ont mis au point, il y a une trentaine d'années, une solution astucieuse : le « coupleur », un manchon fileté qui se visse aux deux extrémités des barres à relier et n'altère en rien leur résistance. Perfectionné dans les années 2000 par une PME de Saint-Chamas (13), la SAMT, cette petite pièce d'acier forgé,

adaptée au calibre des barres, s'est imposée comme l'élément indispensable de tout ferrailage d'envergure – à ITER, le Complexe tokamak en consommera près de 250 000.

Cette petite pièce pourrait paraître insignifiante au regard de la taille et de la complexité d'une installation comme ITER. En allégeant la masse des aciers dans les structures sans en affaiblir la résistance et en réduisant de manière sensible les coûts liés à la consommation d'acier, elle est au contraire essentielle.



Le chantier ITER utilisera près de 250 000 de ces « coupleurs » produits par une PME de Saint-Chamas (13)

UN DES PLUS GRANDS CHANTIERS D'EUROPE



ITER est aujourd'hui l'un des plus grands chantiers d'Europe sur lequel interviennent près 2 000 ouvriers, techniciens et ingénieurs appartenant à 450 entreprises, françaises à plus de 80%.

Sur la rive gauche de la Durance, à mi-chemin de Manosque et du pont de Mirabeau, un édifice nouveau a surgi. Au soleil levant, ses façades d'acier poli étincellent ; à mesure que le jour avance, il semble s'effacer pour se fondre dans le paysage.

Cet édifice n'est que la partie la plus visible d'une vaste installation, sans équivalent dans le monde et dans l'histoire, et sur laquelle repose une partie de l'avenir de notre civilisation.

ITER existe. Sur les rives de Durance, c'est un chantier sur lequel s'affairent près de 2 000 personnes, ouvriers, techniciens et ingénieurs¹ ; ailleurs, en Europe, en Amérique, en Asie, ce sont des centaines d'usines qui fabriquent les pièces de la machine et les éléments de l'installation.

En 2025, cet immense effort international connaîtra son aboutissement – ITER sera prêt pour son « Premier Plasma », prélude à une campagne d'expériences qui devrait durer au moins une vingtaine d'années.

ITER doit confirmer que l'on peut exploiter les réactions de fusion nucléaire – similaires à celles qui se produisent au cœur du Soleil et des étoiles – pour produire de l'énergie de manière massive et, partant, de l'électricité.

Acronyme de *International Thermonuclear Experimental Reactor*, ITER est également le mot latin pour « le chemin » – ce chemin qui, d'étapes en étapes, doit conduire à la maîtrise industrielle d'une source d'énergie nouvelle, sûre, fondée sur des ressources virtuellement illimitées et respectueuse des grands équilibres environnementaux.

ITER est un aboutissement : plus de soixante années de recherches, nourries du retour d'expérience de centaines de machines de fusion, en ont défini les paramètres.

Et ITER est un commencement : pour la première fois dans une machine de fusion (un « tokamak », acronyme russe de « chambre toroïdale, bobines magnétiques »), la quantité d'énergie produite (500 MW) sera supérieure à la puissance de chauffage investie (50 MW). (voir encadré)

Pour réaliser cette percée qui ouvre la voie aux réacteurs industriels de demain, les plus grandes puissances de la planète – la Chine, l'Europe, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les Etats-Unis – ont mis en commun leurs ressources scientifiques, industrielles et humaines.

La contribution des membres d'ITER se fait principalement « en nature », chacun fournissant à l'organisation internationale ITER (*ITER Organization*) les fabrications qui lui ont été attribuées.

L'Europe, en tant que « membre-hôte » assume en outre la construction de l'ensemble des bâtiments de l'installation, ce qui porte sa contribution à 45% de la valeur totale du programme.²

L'ampleur du chantier, en lisière du site du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) de Cadarache, sur la commune de Saint-Paul-lez-Durance, donne la mesure de l'entreprise.

Les quelque 42 hectares défrichés, nivelés et équipés par la France entre 2007 et 2009 pour être mis à la disposition d'ITER Organization sont aujourd'hui presque entièrement occupés par des bâtiments à différents états d'achèvement.

Car le tokamak n'est pas seul. La machine – 23 000 tonnes, l'équivalent de trois Tour Eiffel – n'est que le cœur d'un vaste complexe industriel s'étirant sur une plateforme longue de plus d'un kilomètre.

Le poste électrique qui connecte l'installation au réseau 400 kV s'étend sur plus de 4 hectares ; l'usine cryogénique, qui fournit l'hélium et l'azote liquides aux aimants supraconducteurs, sera la plus puissante du monde ; le bâtiment qui abrite les systèmes de chauffage radiofréquence et micro-ondes a la taille d'un immeuble de dix étages...

ITER est aujourd'hui l'un des plus grands chantiers d'Europe sur lequel interviennent près de 450 entreprises, françaises à plus de 80%.

La plateforme accueille également les deux installations qui fabriquent ou assemblent les éléments trop encombrants pour être livrés par la route : quatre aimants annulaires (17 à 24 mètres de diamètre) fournis par l'Europe ainsi que le « cryostat », un thermos géant (30 mètres de haut, autant de diamètre) qui isole le tokamak de l'environnement et dont les différentes « sections » sont fournies par l'Inde.

L'assemblage du tokamak ITER, la machine la plus complexe jamais conçue, commencera l'année prochaine et se poursuivra jusqu'en 2025.

Le « chemin » s'ouvrira alors vers un âge nouveau, à l'horizon du dernier quart de ce siècle, où l'humanité ira puiser au feu des étoiles une part significative de ses besoins énergétiques.

(1) Au total, avec le personnel d'ITER Organization et de ses sous-traitants directs, plus de 3 500 personnes sont aujourd'hui présentes sur le site d'ITER.

(2) En 2003, les Conseils départementaux 04, 05, 06, 13, 83 et 84, le Conseil régional PACA et ce qui était alors la Communauté d'agglomération du Pays d'Aix ont décidé d'apporter au programme ITER la somme totale de 467 millions d'euros sur dix ans.

E=mc²

Dans la chambre à vide du tokamak ITER, un mélange gazeux très peu dense (un plasma), composé à parts égales de deutérium et de tritium (deux isotopes de l'hydrogène), est porté à une température de l'ordre de 150 millions de degrés par de puissants systèmes de chauffage (radiofréquence, micro-ondes, injection de particules neutres).

Dans ce milieu très chaud, confiné par d'intenses champs magnétiques, les noyaux de deutérium et de tritium sont animés d'une vitesse très élevée. Lorsqu'ils entrent en collision, ils fusionnent et les particules (protons et neutrons) dont ils sont constitués se recomposent en perdant une infime partie de leur masse. Cette perte de masse, conformément à la célèbre équation $E=mc^2$, se traduit par une considérable libération d'énergie – un gramme de mélange deutérium-tritium équivaut à 8 tonnes de pétrole.

La fusion du deutérium et du tritium donne naissance à un noyau d'hélium et à un neutron. L'hélium reste prisonnier de la cage magnétique et contribue par son énergie à entretenir la réaction de fusion ; le neutron s'en échappe et transfère son énergie aux parois de la machine. La chaleur ainsi générée est évacuée par un circuit d'eau sous pression à partir duquel, dans les futurs réacteurs de fusion, s'amorcera le processus de production d'électricité.



Dans le vaste atelier de CNIM, à La Seyne-sur-Mer (83), le prototype d'une pièce d'acier massive et tourmentée prend forme. Cette « cassette », destinée au divertor d'ITER, baignera dans un environnement infernal, beaucoup plus chaud qu'à la surface du Soleil.

La pièce d'acier, massive et tourmentée, n'évoque rien de familier. Est-elle tombée d'un vaisseau spatial en détresse ? Appartient-elle à une machine venue du futur au travers d'une faille de l'espace-temps ? Sa forme étrange évoque la proue d'un drakkar, le berceau d'un géant ... de quelle intelligence, de quel savoir-faire technologique est-elle le produit ?

Pour qui connaît l'architecture d'un tokamak, la réponse va de soi : cette pièce fait partie du « divertor », l'élément qui recouvre la partie basse du tokamak et qui est le plus directement exposé au feu du plasma.

Dans un tokamak, tout est extrême – le vide, le chaud, le froid, les forces électromagnétiques... Et c'est dans la région du divertor que ces conditions atteignent leur paroxysme – la pièce baigne dans un environnement infernal où il fait beaucoup plus « chaud » qu'à la surface du Soleil.

Un tel contexte explique pourquoi une cassette de divertor ne ressemble à rien de connu : c'est un objet qui va devoir non seulement résister à la température et au rayonnement d'une étoile, mais également supporter sans dommage les monstrueuses forces mécaniques qu'un tokamak peut générer ⁽¹⁾.

La cassette – et il y en aura 54, arrangées en cercle dans la partie basse du tokamak – porte les différents boucliers (on les appelle des « cibles ») placés directement face au plasma. ⁽²⁾

Ensemble, cassettes et cibles forment le divertor, dont la fonction consiste à infléchir le champ magnétique de manière à extraire les « cendres » d'hélium et les impuretés du plasma, tout en évacuant la chaleur et en protégeant les éléments de la machine des charges thermiques et neutroniques générées par la réaction de fusion.

La fourniture des cassettes est de la responsabilité de l'Europe. Un industriel italien, Walter Tosto, et un consortium franco-italien (CNIM et Simic) ont été chargés d'en produire chacun un prototype.

Les trois industriels sont déjà fortement engagés dans le programme ITER : Walter Tosto pour la fabrication des éléments de la chambre à vide ; CNIM pour les bobines annulaires et, en collaboration avec Simic, pour la fourniture des « plaques radiales » des bobines verticales.

Nous nous sommes rendus, récemment, dans les ateliers de CNIM, à La Seyne-sur-Mer (83) où le prototype du consortium franco-italien est en cours de finalisation.

Au sein du consortium, CNIM et Simic se sont réparti les tâches pour transformer progressivement un bloc d'acier de 25 tonnes en un élément de haute technologie n'en pesant plus que quatre : les « segments primaires » ont été usinés et soudés (par faisceau d'électrons) par CNIM, envoyés à Simic pour soudage additionnel (tungstène - gaz inerte) et contrôles non destructifs, puis renvoyés en France pour l'usinage final, les ultimes vérifications et les tests fonctionnels.

Dans le vaste atelier de CNIM, une machine-outil à commande numérique s'affaire sur la pièce avec un mélange de puissance et de délicatesse. Fraction de millimètre après fraction de millimètre, sa fraise affine les formes dans un grand éclaboussement de lubrifiant et de copeaux d'acier.

Les tolérances sont extrêmement rigoureuses – l'opération est si précise, si patiente, qu'il ne faut pas moins d'une semaine pour ôter un millimètre d'acier.

A quelque 1 000 kilomètres de là, des opérations similaires sont en cours dans les ateliers de Walter Tosto à Chieti en Italie – le cahier des charges est le même, mais chacun applique ses propres méthodes, « recettes » et procédures.

Une fois ces prototypes finalisés, testés et analysés, l'agence domestique européenne choisira celui des deux sous-traitants qui réalisera la série – 54 cassettes, plus 4 à 6 « rechanges ».

L'industrie européenne aura alors produit un composant sans équivalent dans l'histoire des sciences et des technologies.

(1) Les cassettes sont conçues pour résister à des forces de l'ordre de 100 tonnes, qui peuvent être générées pendant quelques millisecondes en cas de « disruption » du plasma.

(2) Les « cibles » qui font directement face au plasma sont fournies par l'Europe, le Japon et la Russie.