

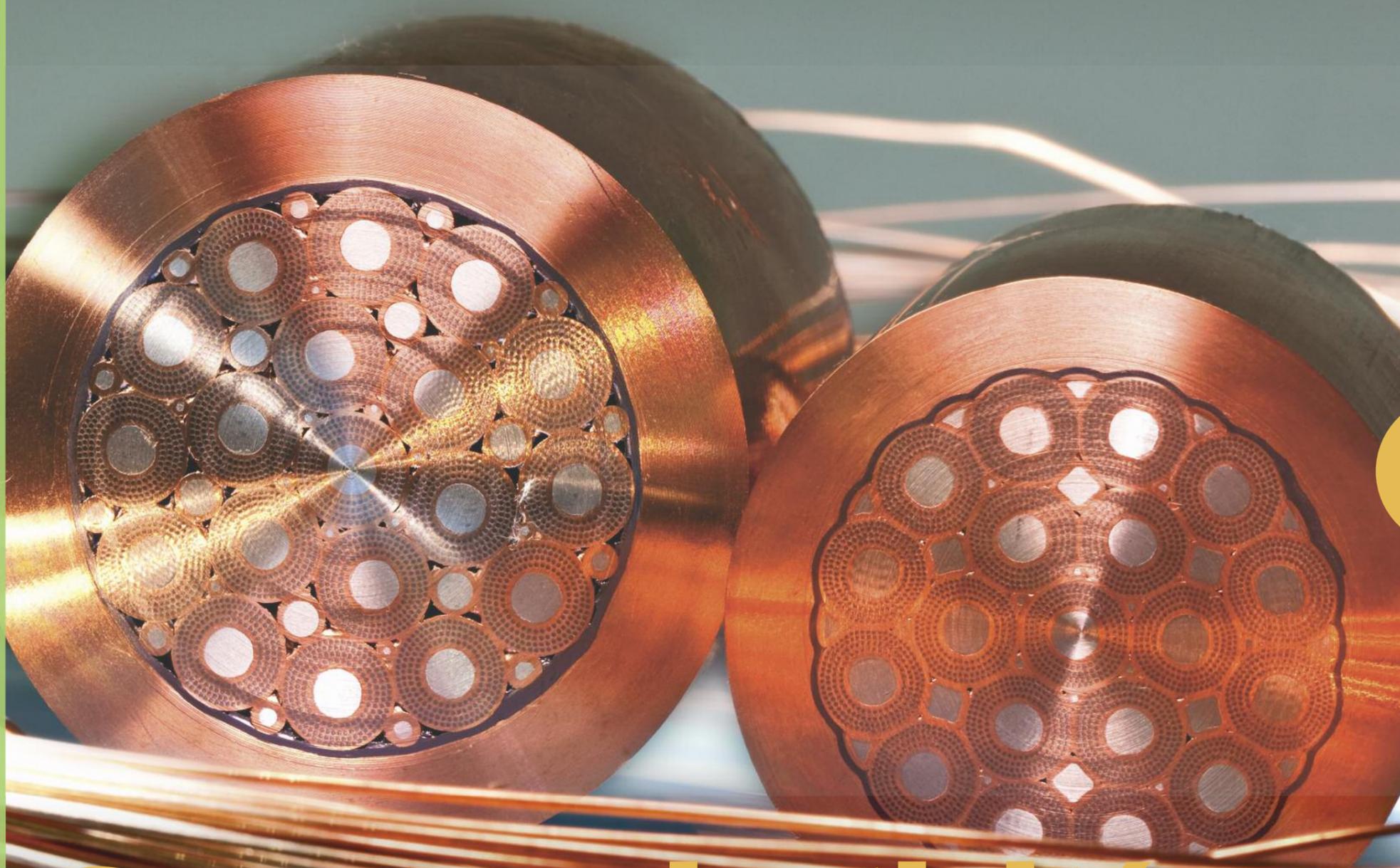
iter

le magazine

Dans ce numéro

- Miroir, génie du miroir... Page 2
- Supraconductivité: le courant passe... Page 3
- Le "Soleil" ITER réchauffe l'économie Page 4

N°5 OCTOBRE 2014



Supraconductivité: le courant passe...

Editorial

La maison ITER a désormais un « plancher » : une ultime coulée de béton, le 27 août, a permis de finaliser l'immense dalle sur laquelle reposeront les 400 000 tonnes du Complexe Tokamak. Reste maintenant à construire les murs et, d'ici 2017, la toiture. Tournez la page pour voir à quoi ressemblera l'installation ITER une fois terminée...

Le chantier ITER a généré quatre milliards d'euros de contrats, dont plus de la moitié attribués à des entreprises françaises, et l'on estime qu'à l'horizon 2017-2020 quelque 3 000 personnes seront mobilisées sur le chantier. Nous faisons le point, en page 4, sur la dimension économique du programme ITER.

Et nous nous intéressons, dans ce 5^e numéro du *Magazine* au petit miracle de la physique qui conditionne l'avenir industriel et commercial de la fusion : la supraconductivité.

L'équipe d'ITER le magazine.
editormag@iter.org

iter

china eu india japan korea russia usa

Miroir, génie du miroir...



Reflétant les tonalités changeantes des saisons qui passent, l'acier miroir exprimera, selon l'architecte, « la précision du travail de recherche effectué à l'intérieur des bâtiments ».

Pour insérer les bâtiments d'ITER dans le paysage, quelle est la marge d'intervention d'un architecte?

Changer leur morphologie ? Impossible : c'est la fonction, scientifique ou industrielle, qui détermine la volumétrie, l'agencement, l'emprise au sol de chaque bâtiment. Parer les constructions d'un revêtement de couleur ? Risqué : ce qui se fonde harmonieusement dans le paysage provençal à midi sous le grand soleil de l'été risque de paraître fade et déprimant sous la pluie de novembre.

« La problématique était intéressante, explique Simon Pallubicki, architecte associé au sein du cabinet ENIA, choisi dès 2009 pour réaliser l'habillage de l'installation ITER. En termes de fonctionnalité, de taille, de matériaux, les bâtiments de la plateforme sont très hétérogènes. Les paramètres sur lesquels un architecte peut jouer, comme la régularité ou l'alignement, sont totalement absents. »

Les architectes d'ENIA, un cabinet parisien spécialisé dans les problématiques industrielles, ont dû relever un double

défi : comment conférer une unité au « désordre » apparent de la plateforme, et comment l'insérer, de la manière la plus subtile possible, dans le paysage environnant.

Conjuguant audace et retenue, la solution proposée – et retenue – consiste à plaquer sur l'ensemble des constructions (à l'exception du Bâtiment de contrôle) un bardage alternant des bandes d'acier poli et de métal laqué gris.

La proportion entre l'acier, poli comme un miroir, et le métal laqué, moins réfléchissant, variera en fonction de l'orientation des bâtiments : 80% de miroir sur les façades orientées est-ouest ; 80% de métal laqué pour les façades nord-sud.

Seul, le Bâtiment de contrôle, « cerveau » de l'installation, bénéficiera d'un traitement 100% miroir.

Reflétant les tonalités changeantes des saisons qui passent, l'acier miroir exprimera également, selon les architectes d'ENIA, « la précision du travail de recherche effectué à l'intérieur des bâtiments. »

L'architecture est affaire de fonctionnalité autant que d'esthétique : l'acier, poli ou laqué, contribuera à une meilleure isolation des façades qu'il recouvre.

Mais quel sera l'impact visuel de cet ensemble de

bâtiments dont le plus haut, qui est aussi le plus vaste, culminera à 60 mètres ? Pour l'évaluer, les architectes d'ENIA ont passé des journées entières à parcourir les environs d'ITER, à pied et en voiture, dans un rayon de 40 à 50 kilomètres.

La tentation était grande, expliquent-ils dans leur *Notice architecturale et paysagère*, de faire d'ITER « une œuvre architecturale complètement autonome ». Mais l'installation n'est pas isolée ; elle marque un « point d'orgue » dans le paysage industriel de la vallée de la Durance et elle est naturellement appelée à dialoguer avec son environnement physique et humain.

Il importe donc que les habitants de la vallée et des collines, ses voisins, se l'approprient comme un élément familier et qu'à terme, l'architecture d'ITER « marque positivement leur histoire locale et régionale. »

Il importe également qu'au travers des choix architecturaux, les enjeux d'ITER soient perceptibles par tous. Pour ENIA, la propreté clinique des façades reflétant le ciel changeant et le passage des saisons évoquera cette source d'énergie inépuisable, universellement disponible, sûre et respectueuse de l'environnement à laquelle ITER doit donner accès.

2

Dernière coulée et première livraison

Double symbole en cette fin d'été 2014 : le 27 août, on finalisait le « plancher » du Complexe Tokamak ; le 4 septembre, ITER réceptionnait les premières pièces de l'installation.

C'était le quinzième et dernier « segment » de l'immense dalle (9 300 m² sur 1,5 mètre d'épaisseur) sur laquelle reposeront les 400 000 tonnes du Complexe Tokamak : une surface de 576 m², parfaitement circulaire, à l'emplacement même où se dressera le tokamak ITER.



14 000 m³ de béton, 3 600 tonnes de ferrailage, 8 mois de travail – le « plancher » du Complexe Tokamak a été finalisé le 27 août.

Le jour n'était pas levé que déjà les hommes et les pompes se mettaient en place. Il s'agissait de couler, en continu pendant douze heures, 865 m³ d'un béton suffisamment fluide pour pénétrer le moindre recoin du ferrailage, exceptionnellement dense dans cette partie de la dalle.

Cette dernière coulée inaugurait une phase nouvelle dans la progression du chantier : après le « plancher », les murs et, d'ici 2017, la toiture de l'immense édifice (120 mètres de long, 80 de large et 60 de haut) qui abritera les bâtiments Tokamak, Diagnostics et Tritium.

Huit jours plus tard, les premières pièces de l'installation étaient livrées sur le site : 12 parafoudres, qui prendront place entre le poste électrique 400 kV et les transformateurs qui alimentent l'installation et protégeront les systèmes électriques des surtensions que pourrait générer un impact de foudre.

Peu spectaculaire mais hautement symbolique, la

Peu spectaculaire mais hautement symbolique, la livraison, le 4 septembre, des premiers éléments qui seront intégrés dans l'installation.



livraison de ces pièces, parties de New York le 5 août, a permis de tester en vraie grandeur l'ensemble des opérations techniques, réglementaires et administratives qui accompagneront chacune des livraisons réalisées par les Agences domestiques.



Vue en coupe d'une « billette » de niobium-étain, produite en République de Corée et destinée aux bobines de champ toroïdal du tokamak ITER. L'étréage transformera cette « billette » en « brins » qui constitueront, après câblage et gainage, le « câble-en-conduit » supraconducteur. © Peter Ginter

Supraconductivité: le courant passe...

Pour confiner le gaz très chaud (le plasma) dans lequel se produit la réaction de fusion, un tokamak met en œuvre d'intenses champs magnétiques, générés par de puissants électro-aimants.

Dans le tokamak européen JET, à ce jour le plus grand du monde, la consommation électrique de ces électro-aimants est de l'ordre de 150 MW – plus du sixième de la puissance que fournit un réacteur électronucléaire de type Tricastin ou Gravelines.

Mais ce qui est acceptable pour une machine expérimentale ne l'est pas pour les réacteurs de fusion commerciaux qui pourraient voir le jour dans la deuxième moitié de ce siècle. Pour que la fusion soit un jour économiquement rentable, il fallait trouver le moyen de réduire significativement la consommation d'électricité du système magnétique.

Celle-ci est directement liée à la *résistance électrique*, qui, même dans un métal conducteur comme le cuivre, est loin d'être négligeable. Sans cette résistance, la consommation électrique serait infime, voire, en théorie, nulle. Et, avantage non négligeable, les matériaux parcourus par le courant électrique ne s'échaufferaient pas.

En 1911, un physicien néerlandais, Heike Kamerlingh Onnes, découvrit, presque par hasard, que certains métaux, lorsqu'ils sont refroidis à très basse température, cessent de résister au passage de l'électricité.

Baptisée *supraconductivité*, cette propriété est restée sans applications pendant près d'un demi-siècle. A la suite de découvertes intervenues dans les années 1950, tant sur le plan théorique que sur celui des matériaux, la supraconductivité a révolutionné l'imagerie médicale, bouleversé la physique des particules et ouvert un avenir industriel et commercial à l'énergie de fusion.

Toutes les grandes machines de fusion construites depuis la fin des années 1980 – le stellarator LHD (Japon), les tokamaks Tore Supra (France), EAST (Chine), KSTAR (Corée) et SST-1 (Inde) – sont équipées d'aimants supraconducteurs, comme le seront le stellarator W7-X (Allemagne), les tokamaks JT-60 SA (Japon) et bien sûr ITER.

« Si les aimants d'ITER étaient en cuivre comme au JET, explique Arnaud Devred, responsable des systèmes supraconducteurs à ITER, nous aurions besoin de l'équivalent d'un réacteur nucléaire (800 MW) pour les alimenter. Et en outre, ils s'échaufferaient très vite... Avec des aimants supraconducteurs, la seule consommation est celle de la source de froid – l'usine cryogénique qui a besoin de 20 MW. »

Les alliages qui constituent le bobinage des aimants d'ITER (niobium-titane pour certains, niobium-étain pour d'autres) ne deviennent supraconducteurs qu'à une température de l'ordre de *moins* 270° C – celle de l'hélium liquide, bien inférieure à celle des recoins les plus froids de l'Univers...

Dans un système magnétique supraconducteur conventionnel, le ou les aimants baignent dans le fluide qui les refroidit. Mais les aimants d'ITER sont bien trop imposants (24 mètres de diamètre pour le plus gros des aimants annulaires, ou PF Coils ; 14 mètres de haut pour les 18 aimants verticaux, ou TF Coils) pour qu'une telle solution puisse être retenue.

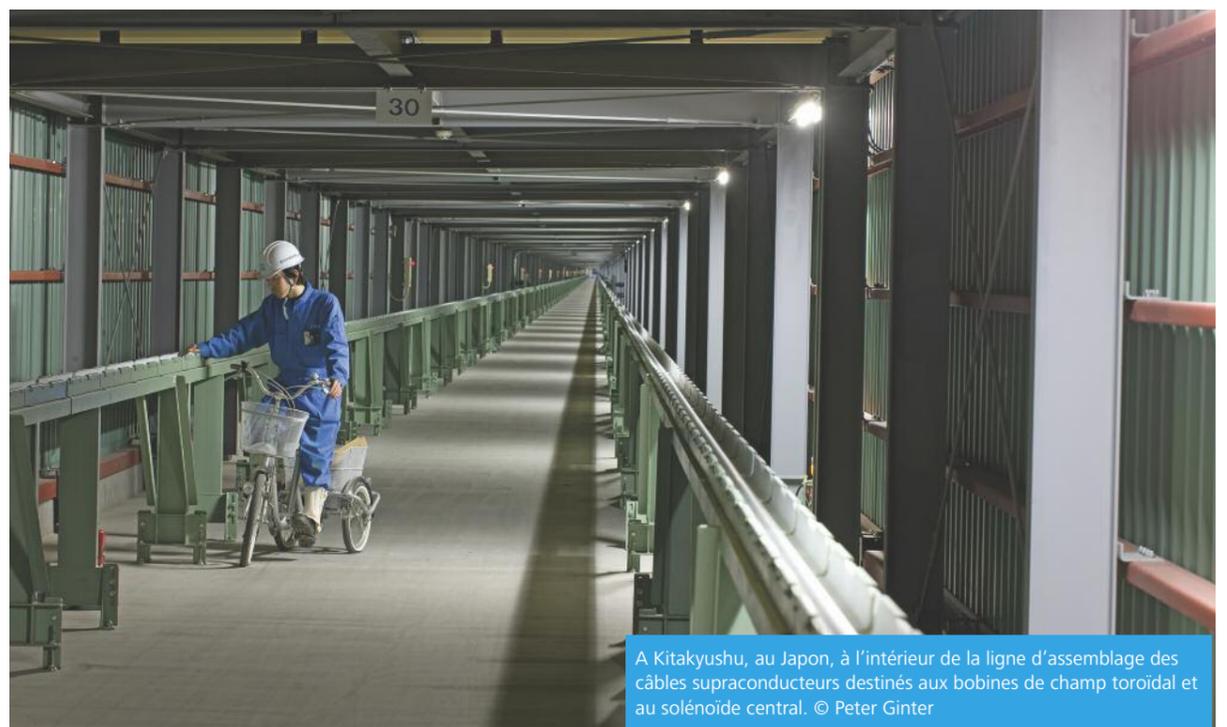
On a donc développé, au milieu des années 1970 et pour

les besoins spécifiques de la fusion, un type de câble supraconducteur inédit : le « câble-en-conduit » qui enserre les brins supraconducteurs dans une gaine d'acier à l'intérieur de laquelle le fluide de refroidissement circule sous flux forcé.

La taille exceptionnelle des aimants d'ITER, et le recours, pour certains d'entre eux, à un alliage très particulier (le niobium-étain) a bouleversé le marché mondial des supraconducteurs : la machine va utiliser, sous forme de « brins » plus du cinquième (275 tonnes) de la production annuelle mondiale de niobium-titane ; quant au niobium-étain, sa production qui était de l'ordre de 15 tonnes annuellement a dû être multipliée par six pour répondre aux seuls besoins d'ITER – de l'ordre de 600 tonnes.

« Grâce à la supraconductivité, résume Arnaud Devred, on a pu développer de nouveaux instruments de physique qui ont repoussé les limites de la connaissance. »

Appliquée à la fusion, ce petit miracle de la physique a permis de concevoir des machines dont la consommation électrique ne grèvera pas le bilan énergétique. Sans supraconductivité, la fusion était condamnée à ne jamais sortir du laboratoire.



A Kitakyushu, au Japon, à l'intérieur de la ligne d'assemblage des câbles supraconducteurs destinés aux bobines de champ toroïdal et au solénoïde central. © Peter Ginter

Par les emplois qu'il crée de manière directe et indirecte et par ceux qu'il induit dans le tissu économique régional, un très grand équipement scientifique comme ITER transforme durablement le territoire qui l'accueille.

Le "Soleil" ITER réchauffe l'économie

Depuis 2007, le chantier ITER, les aménagements de toute nature qui l'accompagnent et les services auxquels ont recours les principaux acteurs du programme ont généré plus de 4 milliards d'euros de contrats. Plus de la moitié de cette somme a été attribuée à des entreprises françaises (2,11 milliards) et sur cette moitié, plus d'un milliard et demi a été engrangé par des entreprises de la région Paca.

A eux seuls, le contrat de construction du Complexe Tokamak (290 millions d'euros, signé au mois de décembre 2012) et celui équipements techniques d'une dizaine de bâtiments (530 millions d'euros, signé au mois de juillet 2013), devraient mobiliser 2 000 ouvriers sur le site.

Cette mobilisation s'effectuera de manière progressive à partir de la fin de cette année pour atteindre un pic à l'horizon 2015-2017. Début 2018, la main d'œuvre affectée à la construction commencera à décliner tandis qu'augmentera celle des ouvriers et techniciens occupés, pendant un peu plus de deux ans, au montage de la machine (un gros millier de personnes en moyenne).

Au total, ce sont donc plus de 3 000 personnes qui travailleront sur le chantier ITER entre début 2017 et fin 2020.

Bien qu'ITER soit un programme international et que les contrats les plus importants aient été attribués à des consortiums européens, 70% des 2 500 travailleurs qui se sont succédé sur le chantier depuis 2010 étaient de nationalité française.

Les projections de l'Agence européenne pour ITER (*Fusion for Energy*), responsable du chantier, montrent que ce pourcentage ne devrait guère varier dans les années qui viennent. Les travailleurs « locaux », c'est-à-dire résidant dans les communes proches d'ITER (bassin

d'emploi de Manosque) pourraient représenter jusqu'à 50% de la main d'œuvre française.

L'impact économique d'ITER ne se résume pas, loin s'en faut, aux retombées directes du chantier de construction. Des centaines d'emplois ont déjà été créés par les industries, les bureaux d'étude, les sociétés d'ingénierie et de services qui ont bénéficié de contrats.

Ainsi, à La Seyne-sur-Mer (Var), dans le cadre du contrat de fabrication d'éléments du système magnétique d'ITER (80 millions d'euros) CNIM, qui emploie déjà 50 personnes, a récemment procédé à vingt recrutements. A Pertuis, le contrat d'ingénierie attribué à Latécoère-Services s'est traduit par quinze embauches. L'Allemand Kraftanlagen Heidelberg, un spécialiste de l'ingénierie nucléaire qui avait ouvert une agence à Manosque dès 2009, emploie désormais une dizaine de personnes.

Et l'on pourrait multiplier les exemples – jusqu'aux sept emplois de chauffeur créés par la société de transport qui assure les navettes entre les différents bâtiments du site ITER...

Dès 2003, anticipant l'arrivée d'ITER, l'Institut d'économie publique de Marseille (Idep) avait estimé à 3 000 (dont 1 500 en région Paca) le nombre de ces emplois « indirects » créés pendant la phase de construction, et à 2 400 ceux qui verront le jour pendant la phase d'exploitation.

Une évaluation de l'impact économique d'ITER doit également prendre en compte les effets induits par la présence, à Aix-en-Provence, à Manosque, dans les bourgades environnantes, des personnels employés sur le site (ITER Organization, Fusion for Energy, sous-traitants directs hors chantier) et de leurs familles.

Leur apport à l'économie locale, sous forme de salaires dépensés localement, peut être estimé à une soixantaine de millions d'euros annuellement.

La dépense directe, toutefois, n'est pas tout. Pour répondre aux besoins de cette population nouvelle (et internationale), des commerces, des services se sont créés ou étoffés. Les études montrent qu'un emploi direct dans un « Très Grand Équipement » scientifique comme ITER en génère deux, voire près de trois, dans son environnement immédiat.

Ainsi, près d'Oxford, au Royaume-Uni, un gros millier d'emplois indirects et induits ont été créés autour des 450 salariés du tokamak européen JET; à Genève, autour du CERN (2 500 salariés), 7 200 emplois indirects et induits ont vu le jour de part et d'autre de la frontière franco-suisse.

Alors qu'ITER vient tout juste d'entrer dans sa quatrième année de construction, une dynamique similaire se dessine, qui ne pourra que s'amplifier au fil des années.

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

Directeur de la publication
Michel Claessens
michel.claessens@iter.org
Responsable de la rédaction
Robert Arnoux
robert.arnoux@iter.org