

À MI-CHEMIN DU PREMIER PLASMA



DANS CE NUMÉRO

Page 2 Pourquoi faire si compliqué ?

Page 3 À mi-chemin du premier plasma

Page 4 Il y a 50 ans, l'avènement des tokamaks

EDITORIAL

Quand un programme se déploie à la fois sur un site de construction et dans des centaines d'usines et de laboratoires disséminés sur trois continents, comment connaître avec précision son état d'avancement ? À cette question, ITER doit pouvoir répondre à chaque instant ou presque. Comment ? Les explications en page 3 de cette nouvelle livraison de notre *Magazine*.

On peut se demander également, pourquoi les processus de fabrication des éléments de la machine et de ses systèmes annexes sont si lourds et complexes. La réponse est en page 2 et tient en quelques mots – parce qu'ITER ne consiste pas seulement à construire un tokamak à Saint-Paul-lez-Durance...

Mais rien de tout cela ne serait possible si, il y a 50 ans, un nouveau concept de machine de fusion ne s'était imposé : le tokamak, dont ITER est aujourd'hui l'aboutissement (Page 4).

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

POURQUOI FAIRE SI COMPLIQUÉ ?



L'assemblage submillimétrique de pièces d'acier massives (ici, dans les ateliers Hyundai en Corée, celle d'un « boîtier » de bobine verticale) est un exploit industriel. Quand les éléments de ces pièces sont fabriqués dans différents pays, c'est un défi à la limite du raisonnable – mais qui procède de la nature même d'ITER.

Des pièces d'acier hautes comme un immeuble de quatre étages et pesant plusieurs centaines de tonnes qui s'ajustent avec une précision inférieure au quart de millimètre, c'est un exploit industriel. Quand les éléments qui les composent sont fabriqués dans des pays de culture industrielle différente et que ces mêmes éléments, avant leur assemblage final, doivent affronter des mois de navigation entre plusieurs continents, c'est un défi à la limite du raisonnable.

La fabrication des 18 aimants verticaux du système magnétique d'ITER – les « TF Coils », chacune haute de 17 mètres pour une masse de l'ordre de 350 tonnes – offre l'illustration la plus extrême de ce processus : la production du câble supraconducteur est assurée par six des sept membres d'ITER ; la structure externe (le « boîtier ») se compose de deux éléments, l'un fabriqué en Corée, l'autre au Japon ; les tests cryogéniques et l'insertion finale des bobinages se font, selon les cas, en Europe ou au Japon. Et une fois finalisée et débarquée à

Fos-sur-Mer, la bobine doit encore être livrée à ITER en empruntant les quelque 100 kilomètres d'un « itinéraire » spécialement aménagé.

Le choix de ce mode de production, lourd, complexe, difficile à gérer, procède de la nature même d'ITER. L'objectif de cette immense entreprise, déployée sur trois continents, ne consiste pas seulement à construire un tokamak à Saint-Paul-lez-Durance – son organisation a été conçue, aussi, comme un programme pédagogique, une école mondiale des technologies de la fusion.

En répartissant l'ensemble des fabrications entre les différents membres du programme, ITER offre à chacun un double bénéfice : à court terme, une expertise scientifique et industrielle dans des domaines tels que la cryogénie, la robotique en milieu extrême, les technologies du vide, le magnétisme, l'électronique de puissance, etc. ; à moyen terme, les moyens humains et technologiques de lancer son propre programme de réacteur de fusion.

Les « pères fondateurs », il y a plus de trente ans, assumaient les difficultés de cette approche. Comme leurs successeurs aujourd'hui, ils savaient que ces contraintes étaient le prix à payer pour permettre à tous d'accéder à l'énergie de fusion.

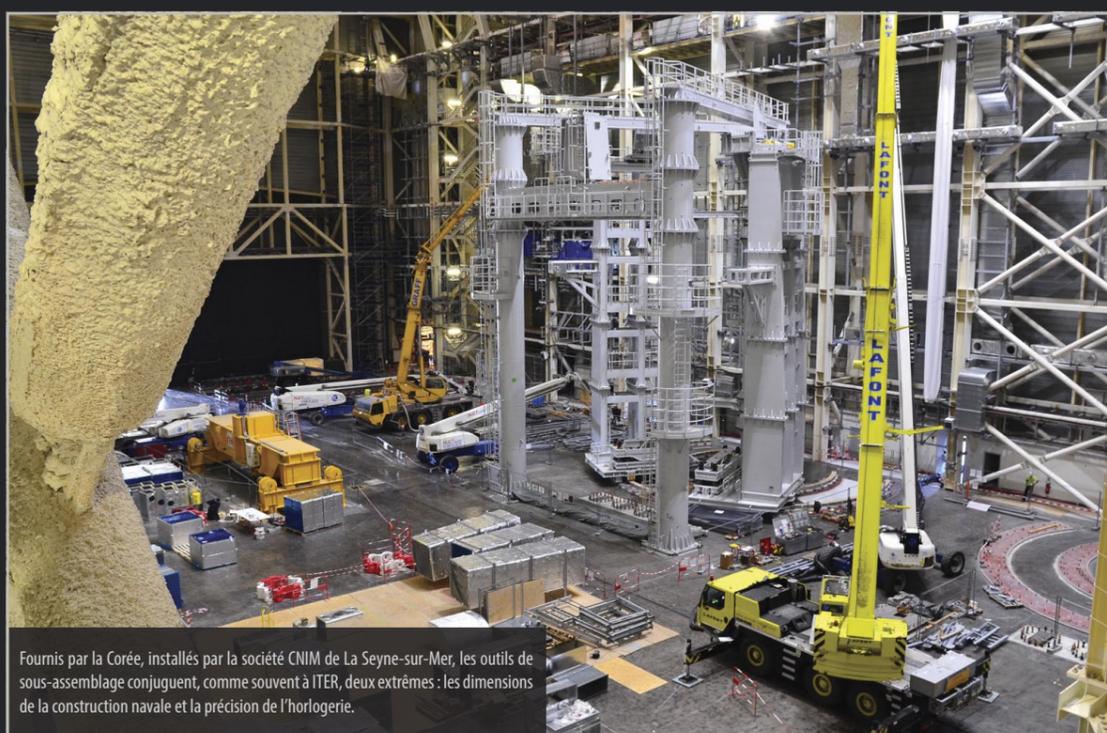
Le Titan et son jumeau

Dans le vaste hall d'assemblage qui jouxte le bâtiment tokamak, un Titan attend son jumeau...

Ces structures monumentales (22 mètres de haut, 800 tonnes), capables de manipuler des charges de l'ordre de 1 200 tonnes, sont des outils de « sous-assemblage ». Se déplaçant sur des rails circulaires, ils ont pour mission d'accoupler les « secteurs » de la chambre à vide aux aimants verticaux et aux panneaux de l'écran thermique qui protège le système magnétique.

Deux outils de ce type opéreront en parallèle. L'installation du premier est aujourd'hui finalisée ; celle du second commencera à l'automne.

L'opération de sous-assemblage sera reproduite à neuf reprises – autant de fois que la chambre à vide compte de secteurs. Le double pont roulant, capable de lever 1 500 tonnes (l'équivalent de quatre Boeing 747 à pleine charge) prendra alors le relais pour aller déposer chaque sous assemblage dans la fosse du tokamak, distante d'une centaine de mètres.



Fournis par la Corée, installés par la société CNIM de La Seyne-sur-Mer, les outils de sous-assemblage conjugués, comme souvent à ITER, deux extrêmes : les dimensions de la construction navale et la précision de l'horlogerie.

À MI-CHEMIN DU PREMIER PLASMA



Plus de la moitié des tâches indispensables à la production du « premier plasma » sont aujourd'hui finalisées. Ce cap symbolique a été franchi au mois de novembre 2017 ; depuis, le programme progresse au rythme soutenu de 0,6% par mois.

Quand on construit un immeuble, un pont, un tronçon d'autoroute, les tâches à accomplir s'enchaînent de manière quasi-linéaire. Du premier coup de pioche à la livraison, le chemin est balisé et en dépit des surprises toujours possibles, des incidents, des contretemps, l'état d'avancement des travaux se mesure sans grande difficulté – on sait toujours où on en est.

Quand on construit ITER, tout est infiniment plus complexe. Étiré sur plusieurs décennies, le programme se déploie sur trois continents et mobilise des milliers de participants – consortiums de construction, géants industriels et petites sociétés hautement spécialisées, centres de recherche publics et privés, prestataires logistique...

Pour construire la machine, dix millions de pièces doivent être fabriquées, livrées et assemblées ; pour lui permettre de fonctionner, de véritables usines – cryogénie, alimentation électrique, chauffage du plasma, etc. – doivent être édifiées. Sur le site de Saint-Paul-lez-Durance, les « systèmes industriels » d'ITER occupent la majeure partie des 42 hectares dévolus à l'installation.

Comme le maître d'œuvre de l'immeuble, du pont ou du tronçon d'autoroute, ITER Organization, le « chef d'orchestre » de cette immense entreprise, a besoin de mesurer, en temps réel et avec le plus de précision possible, la distance qui le sépare de la « livraison » – en l'occurrence la mise en service de l'installation et la production d'un « premier plasma » à la fin de l'année 2025.

Cette distance ne se mesure pas en années ou en mois, mais au nombre de tâches (tasks) accomplies et restant à accomplir. Le planning général d'ITER en compte plus de 250 000 – depuis la finalisation du bobinage d'un aimant de 360 tonnes jusqu'au test d'un gyrotron ou au contrôle de fabrication d'un câble coaxial.

Mais là encore, rien n'est linéaire. Les tâches s'inscrivent dans différentes catégories de travaux qui progressent chacune à leur rythme et ne pèsent pas d'un même poids dans le calcul final.

En fonction de son importance dans la réalisation de l'objectif, chacune de ces catégories a été affectée d'un pourcentage : le design, par exemple, compte pour 24% du total ; la fabrication des pièces et la construction des bâtiments pour 48% ; les livraisons pour 8%... et c'est le degré d'avancement des tâches dans chacune des catégories qui détermine l'état d'achèvement des travaux de l'ensemble du programme.

Reste, pour le chef d'orchestre devant son pupitre, à Saint-Paul-lez-Durance, à savoir précisément comment progressent les travaux dans toutes les parties du monde où se déploient les activités liées à ITER. Où en est la fabrication du secteur de chambre à vide n°6 au chantier naval Hyundai, en Corée ? L'Institut Efremov, en Russie, a-t-il avancé dans la fabrication de la bobine annulaire dont il a la responsabilité ? Les usines européennes, chinoises, indiennes, japonaises, américaines, tiennent-elle leur calendrier ?

Le 5 de chaque mois est inscrit en lettres rouges sur le calendrier de Colette Ricketts, qui dirige l'équipe d'une quarantaine de personnes chargée de suivre l'évolution du planning.

Ce jour-là, ITER Organization reçoit les rapports adressés par les « agences domestiques » de chacun des sept partenaires du programme. Commence alors un processus qui, au terme de dizaines de réunions et de téléconférences, d'innombrables échanges de courriels entre l'Europe, l'Amérique et l'Asie, aboutit à une image précise de l'état d'avancement des différentes fabrications qui incombent à chacun des membres d'ITER.

Une fois ventilée par catégories et traitée par de complexes algorithmes, cette masse de données va livrer une information vitale pour la conduite du programme. « Pour prendre les bonnes décisions au bon moment, explique Colette Ricketts, il est impératif de savoir, à chaque instant ou presque, où nous nous situons par rapport à notre objectif. »

Au mois de novembre dernier, le verdict des algorithmes est tombé : ITER avait parcouru un peu plus de la moitié du chemin qui le sépare encore de son premier plasma. Depuis, le programme progresse au rythme de 0,6% par mois. À Saint-Paul-lez-Durance, la petite étoile devrait s'allumer à l'heure prévue.

Une très progressive montée en puissance

Le « premier plasma » d'ITER, programmé pour la fin de l'année 2025, est l'étape initiale d'une très progressive montée en puissance qui culminera, dix ans plus tard, par la production de plasmas nucléaires générateurs d'énergie.

Dix ans ne seront pas de trop pour finaliser et valider les équipements de la machine, ajuster le plus finement possible ses paramètres opérationnels, apprendre à la piloter et former les personnels qui, tout au long de sa durée de vie, en assureront le fonctionnement.

Avant d'aborder la phase nucléaire (deutérium-tritium) en 2035, ITER va produire des plasmas d'hydrogène, d'hélium et de deutérium. Avantages : les plasmas non-nucléaires n'activent pas la machine, et l'essentiel du retour d'expérience peut être extrapolé aux plasmas nucléaires.

Dans les années 1990, deux machines, le JET européen (toujours en activité) et le TFTR américain (démantelé en 1997) s'étaient brièvement aventurés dans les territoires inexplorés des plasmas nucléaires.

ITER ira beaucoup plus loin et s'installera durablement dans ces territoires dont les contours sont maintenant mieux connus. Pour la première fois, on pourra observer, comprendre et préparer l'exploitation de « plasmas en ignition » : la source d'énergie virtuellement inépuisable qui, depuis des milliards d'années, alimente le Soleil et les étoiles.

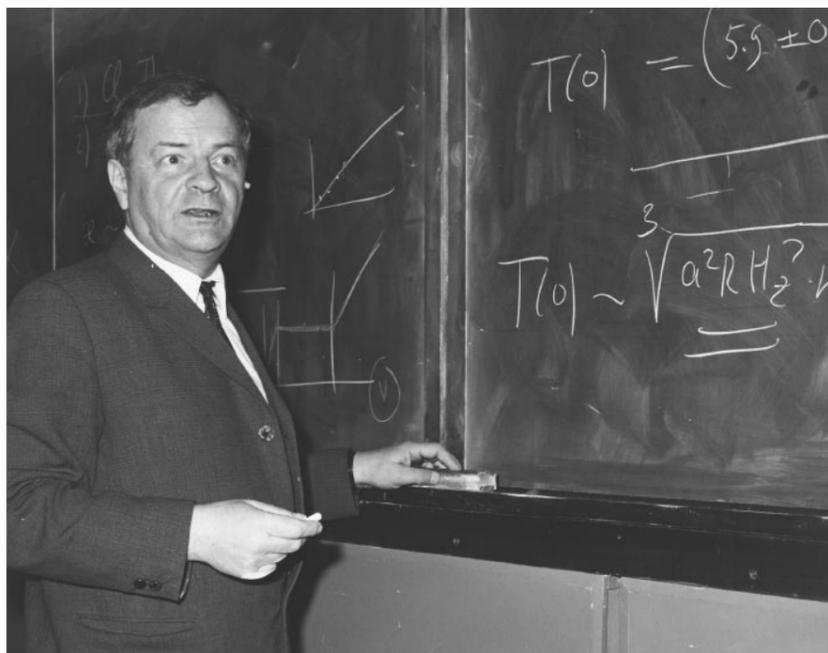
IL Y A 50 ANS, L'AVÈNEMENT DES TOKAMAKS

En 1968, la fusion était une science encore jeune. Les machines sur lesquelles s'appuyait la recherche étaient primitives, leurs performances décevantes. Porter un plasma à 1 million de degrés et le maintenir pendant quelques millisecondes relevait de l'exploit. Les spécialistes désespéraient – arriveraient-ils jamais à maîtriser le feu des étoiles ?

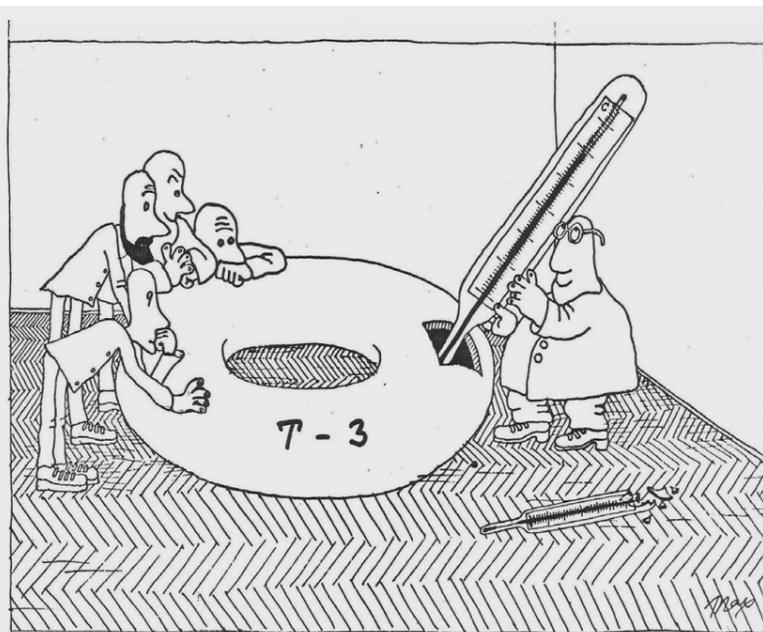
« Du point de vue scientifique, c'était une période assez confuse, se souvient Jean Jacquinot, ancien directeur du JET, à l'époque jeune physicien au CEA. En dépit des progrès accomplis, les machines à striction (Z-pinch), les stellarators, les levitrons, les superstators... tous les concepts qui étaient développés à l'époque se révélaient instables et le comportement des plasmas échappait largement à notre compréhension. »

Depuis le début de la décennie, sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), les chercheurs européens, américains, japonais et soviétiques avaient pris l'habitude de se réunir, tous les trois ans, pour faire le point de leurs travaux. En 1968, le rendez-vous était fixé pour le 1er août à Novossibirsk, en Sibérie. On ne s'attendait à rien de particulier. On eut une énorme surprise.

Dans le souvenir de ceux qui y prirent part, la conférence de Novossibirsk résonne encore, cinquante ans plus tard, comme un « coup de tonnerre ». D'emblée, le physicien Lev Artsimovitch, qui dirigeait les recherches sur la fusion à l'Institut Kurchatov de Moscou, annonça que dans deux machines toroïdales, T3 et TM3, un plasma porté à la température de 10 millions de degrés avait conservé son énergie pendant 20 millisecondes. A Princeton, aux États-Unis, où



Doté d'une « chambre toroïdale et de bobines magnétiques » le tokamak s'est imposé, dès la fin des années 1960, comme la plus performante des machines de fusion. Son concept doit tout au physicien Lev Artsimovitch (1909-1973). Promoteur de la collaboration scientifique entre l'Est et l'Ouest, il considérait que l'énergie de fusion « serait disponible quand l'humanité en aurait besoin ».



Boris Kadomtsev (1928-1998), qui succéda à Lev Artsimovitch à la tête de la recherche sur la fusion en Union soviétique était un grand physicien qui savait également dessiner. Il a « croqué » les membres de l'équipe britannique (Harry Jones, Nicol Peacock, Mike Forrest, Derek Robinson et Peter Wilcock) affairés à la mesure de la température du plasma dans le tokamak T-3.

les meilleurs résultats avaient été obtenus jusqu'alors, la température du plasma n'avait pas dépassé un million de degrés et le temps de confinement était demeuré très inférieur à la milliseconde.

Valery Chuyanov, ancien directeur-adjoint d'ITER (2008-2013), qui travaillait alors à l'Institut Kurchatov, se souvient de l'extrême prudence avec laquelle ces données avaient été présentées : « En fait, nous avons largement minimisé nos résultats... en dépit de ces précautions toutefois, la plupart des participants demeuraient incroyables. »

Si ces chiffres, même minorés, reflétaient la réalité, tout devenait possible : avec ces machines qu'ils appelaient « tokamak » (un acronyme de « chambre toroïdale, bobine magnétique ») les Soviétiques venaient de faire un bond de géant vers la maîtrise de l'énergie des étoiles.

Mais l'avaient-ils vraiment accompli? Et comment le vérifier? Le problème était politique autant que technique. Même si la recherche sur la fusion était exceptionnellement « ouverte », les relations entre l'Est et l'Ouest demeuraient tendues. Et pour déterminer la température d'un plasma, les moyens étaient encore rudimentaires, les mesures imprécises.

Lev Artsimovitch, qui depuis dix ans œuvrait inlassablement pour une plus grande ouverture internationale (voir ITER Mag n°9, « Il y a 60 ans, les Soviétiques levaient le voile »), balaya les hésitations politiques. Des physiciens de l'agence atomique britannique venaient de développer une nouvelle technique de mesure de la température du plasma (fondée sur la diffusion de la lumière laser) ; il les invita à venir « juger par eux-mêmes » les performances des deux petits tokamaks de l'Institut Kurchatov.

Moins de huit mois après le « coup de tonnerre » de Novossibirsk, l'équipe britannique, chargée de cinq tonnes de matériel, débarquait à Moscou. Elle allait y passer le plus clair de l'année 1969 et son verdict serait sans appel : oui, incontestablement, les données présentées à Novossibirsk reflétaient bien la réalité.

Dès lors, le monde de la fusion bascula dans une ère nouvelle. À Princeton, on transforma presque aussitôt le stellarator Model-C en tokamak ; Au CEA, on se lança dans la construction de TFR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses), qui allait dominer la recherche mondiale jusqu'à la fin des années 1970 ; partout on abandonna les concepts anciens pour les promesses de l'architecture nouvelle.

Un demi-siècle a passé et les tokamaks n'ont pas trahi les espoirs qu'ils avaient fait naître un jour d'été à Novossibirsk. Toujours plus puissants, toujours plus performants, capables de produire des plasmas toujours plus chauds et d'en confiner l'énergie toujours plus longtemps, ils ont conduit la recherche jusqu'au seuil de l'expérience décisive – celle qui, avec ITER, ouvrira la voie à une utilisation industrielle de l'énergie de fusion.