

iter

le magazine

Dans ce numéro

- ITER, et après ? Page 2
- L'art de tisser l'acier Page 3
- Qui a « inventé » la fusion ? Page 4

N°3 MAI 2014



Et vogue le convoi...

Editorial

Un deuxième convoi test qui arrive à bon port, au terme d'une longue route et, pour la première fois, d'une traversée maritime ; une toile d'acier que l'on tisse au cœur de la fosse du tokamak, et sur laquelle reposeront bientôt les 360 000 tonnes de l'installation ; un après-ITER qui, avec DEMO, commence à prendre forme...

Rien de tout cela n'aurait été possible sans cette poignée de physiciens qui, il y a moins d'un siècle, surent répondre à cette simple question : « Pourquoi le Soleil brille-t-il ? »

Ce troisième numéro d'ITER le Magazine se conjugue au passé, au présent et au futur.

L'équipe d'ITER le magazine.

editormag@iter.org



china eu india japan korea russia usa

Et vogue le convoi...

Au mois de septembre dernier, un premier « convoi-test », reproduisant les conditions de transport des pièces du Tokamak, avait permis de mesurer la résistance des ouvrages d'art qui jalonnent les 104 kilomètres de « l'itinéraire ITER », entre l'Etang de Berre et le site de Saint-Paul-lez-Durance (Voir Le Magazine n°1, décembre 2013).

Sept mois plus tard il s'agissait de tester, outre la logistique globale du convoi jusqu'au site de construction, la partie maritime du trajet depuis le Golfe de Fos, où les pièces de la machine ITER seront déchargées, jusqu'au débarquement sur la rive nord-ouest de l'Etang de Berre – une répétition générale pour les quelque 250

livraisons qui devront être effectuées au cours des six années qui viennent.

Tout a donc commencé, cette fois, non pas à Berre comme au mois de septembre, mais Quai Gloria, dans le Golfe de Fos. Le 28 mars, un samedi, la remorque et sa charge de blocs de béton, d'un poids total de 800 tonnes, ont été chargées à bord d'une barge spécialement conçue pour ce transport exceptionnel. Le lundi suivant, après avoir traversé le Golfe, la barge et son chargement se présentaient à l'entrée du Canal de Caronte, l'étroit chenal par lequel le Golfe communique avec l'Etang de Berre.

Aux abords du Canal, dans la vieille ville de Martigues, la foule s'était massée sur les quais. Le spectacle était aussi inhabituel qu'impressionnant : encadrée par deux remorqueurs, accompagnée par deux vedettes de la Gendarmerie Maritime, la barge, longue de près de 80 mètres, large de plus de 11, a traversé la ville, glissant sous

le pont-basculant avant de gagner les eaux de l'Etang.

En dépit de deux pannes hydrauliques, survenues au cours des deux premières nuits du trajet terrestre et vite réparées, les organisateurs du convoi (Agence Iter France, Groupe DAHER et autorités françaises) ont pour la deuxième fois démontré leur capacité à gérer une opération d'une extrême complexité, tant sur le plan technique que logistique.

L'arrivée sur le site ITER était prévue le vendredi 4 avril au matin. Le retard occasionné par les pannes et l'interdiction de circuler le week-end l'ont reportée à l'aube du mardi suivant.

Les tests sont désormais terminés et le prochain convoi sera « pour de vrai » : courant octobre, il livrera à ITER un gros transformateur électrique (87 tonnes, 8,50 mètres de long, 4 de large et 5 de haut), fabriqué en Corée et destiné à l'alimentation du site.



ITER, et après?

Dans le monde de la fusion, les programmes de recherche ne se succèdent pas, ils se chevauchent. On réfléchissait déjà à ce que pourrait être ITER (sous le nom d'INTOR) lorsque le JET européen était en chantier au début des années 1980 ; on s'attelle aujourd'hui à la conception de DEMO alors qu'ITER commence tout juste à sortir de terre.

Avec DEMO, la recherche sur l'énergie de fusion va s'approcher au plus près d'un prototype de réacteur. Après ITER, machine expérimentale qui aura démontré la faisabilité de l'énergie de fusion, DEMO ouvrira la voie à son exploitation industrielle et commerciale.

DEMO sera peut-être, à l'image d'ITER, le fruit d'une collaboration internationale. Ou peut-être pas. Pour l'heure, chacun des membres d'ITER (Chine, Union européenne, Inde, Japon, Corée, Russie et dans une moindre mesure Etats-Unis) a d'ores et déjà défini les grandes lignes de ce que pourrait être son propre DEMO.

Cette démarche procède de l'essence même d'ITER, programme scientifique et technologique autant que « pédagogique » : pour chacun des pays membres, participer à ITER c'est acquérir l'expérience qui doit permettre d'aborder, seul, l'étape suivante. DEMO ne se conçoit pas sans ITER ; ITER est en quelque sorte « l'école » où l'on apprend à construire DEMO.

Au mois de décembre dernier, à Monaco, lors du colloque consacré à ITER et à la fusion (*Monaco ITER International Fusion Energy Days, MIIFED*), chacun des membres d'ITER a présenté son projet pour DEMO. Si les calendriers, les spécifications techniques, la détermination varient d'un pays à l'autre, l'objectif est commun : il s'agit de construire la machine qui démontrera que la fusion peut, à l'horizon 2050, produire de l'électricité à l'échelle industrielle.

A Monaco, le Japon, la Corée, l'Inde, l'Europe et la Russie ont affiché leur calendrier : lancement de la construction d'un DEMO dans les années 2030 ; début de l'exploitation à l'orée de la décennie suivante.

La Chine, après avoir exploré les problèmes de physique et d'ingénierie du futur DEMO dans un réacteur test mis en chantier en 2020 (*CFETR, China Fusion Engineering Test Reactor*) serait également prête à lancer DEMO dans les années 2030.

Les Etats-Unis sont un cas particulier : pour des raisons qui tiennent à l'organisation de la recherche dans ce pays, le gouvernement (Département de l'Energie) n'est pas officiellement engagé dans un projet DEMO. Les physiciens du programme de fusion considèrent, eux, qu'ils ont besoin de deux machines « intermédiaires » – une installation à vocation technologique, une autre dont l'objectif serait plus scientifique – avant d'aborder un programme DEMO tels que les autres partenaires d'ITER l'entendent.

A quoi ressembleront ces différents DEMO ? De manière générale, ils seront plus imposants qu'ITER. Le « grand rayon » de l'anneau de plasma (« R »), qui détermine la taille de la machine, varie, selon les projets, entre 6 et 10 mètres – à comparer aux 6,20 mètres d'ITER et aux 3 mètres de JET, le plus gros des tokamaks en activité.

Leur puissance ? De 500 MWe pour le DEMO européen à 1 500 MWe pour le projet japonais – soit,

pour ce dernier, quasiment l'équivalent d'un réacteur nucléaire de dernière génération (EPR) du type Flamanville ou Olkiluoto (Finlande).

Leur vocation ? Pour certains, DEMO sera un « démonstrateur pré-industriel » ; pour d'autres, un quasi-prototype ne nécessitant pas d'étape supplémentaire avant le passage à l'échelle industrielle.

Dans ce paysage, un projet se distingue de tous les autres – c'est le DEMO (ou plutôt le pré-DEMO) russe, une machine « hybride » conjuguant dans une même installation le principe de la fusion et celui de la fission.

Un peu de physique pour comprendre : la réaction de fusion telle qu'elle sera mise en œuvre dans ITER et les machines qui lui succéderont produit un neutron porteur d'une très grande énergie. C'est l'impact de ce neutron sur les parois internes de la machine qui génère la chaleur à l'origine de la production d'électricité.

Certains physiciens considèrent que ce neutron mériterait d'être mieux utilisé. Ils envisagent de mettre son énergie à contribution pour produire, par interaction avec des éléments lourds tels que le thorium ou l'uranium appauvri, du combustible nucléaire destiné aux réacteurs conventionnels, et pour « brûler » les déchets radioactifs de ces mêmes réacteurs.

C'est cette piste que les Russes explorent aujourd'hui. Telle qu'ils l'ont présentée à Monaco, leur machine sera un réacteur hybride, baptisé DEMO-FNS (*pour Fusion Neutron Source*) au cœur duquel un petit tokamak (R=1,9m) générera les neutrons nécessaires à la production de combustible nucléaire et à la transmutation des déchets radioactifs.

Dans la conception de ces différentes machines, rien, toutefois, n'est encore figé – c'est le retour d'expérience d'ITER qui dessinera les différents visages de DEMO.



Au total, 4 000 tonnes d'acier forment le squelette du « plancher » de béton qui portera la masse (360 000 tonnes) du Complexe Tokamak. C'est dans la partie centrale, sur laquelle reposera la machine, que l'agencement des barres d'acier est le plus complexe.

L'art de tisser l'acier

Au centre de la fosse du tokamak, le ferrailage dessine un vaste cercle, tissé de barres d'acier de 40 millimètres de diamètre. Une fois le béton coulé, cette structure complexe, étagée sur 16 niveaux, supportera toute la masse de la machine.

Au total, sur l'ensemble de la dalle, 4 000 tonnes de barres d'acier doivent être précisément agencées de manière à ce que les efforts, en situation normale comme en situation accidentelle, se répartissent de la manière la plus homogène possible.

Les plans qui guident les gestes des ouvriers, barre après barre, niveau après niveau, sont l'aboutissement de centaines d'heures de calculs, de modélisations et de simulations.

Tout commence avec des questions simples : quels bâtiments, quels équipements, les éléments de structure doivent-ils porter ? Quel est leur poids ? Quelles fonctions

de sûreté – confinement, radioprotection, résistance aux séismes – doivent-ils assurer ?

Mais le poids n'est pas tout. Il y a les « forces » auxquelles bâtiments et équipements vont être soumis pendant la phase d'exploitation de la machine. Le cryostat (le réfrigérateur géant qui enveloppe la machine) se contracte et se dilate ; le tokamak lui-même peut être soumis à des mouvements verticaux ; les champs magnétiques génèrent d'énormes contraintes mécaniques ; un séisme peut survenir...

Dans un bâtiment conventionnel, ces forces se mesurent en *décanewtons*. Dans le Complexe Tokamak c'est le *méganewton* (100 000 *décanewtons*) qui règne – l'unité de force qui correspond à une accélération d'un mètre par seconde appliquée à une masse de mille tonnes...chaque seconde.

L'ensemble de ces données, augmentées de provisions de sécurité, passe alors au filtre des codes de calcul. « *Le code va nous dire : pour répondre à ces contraintes, il faut telle quantité d'acier par mètre linéaire de béton*, explique Laurent Patisson, responsable des bâtiments nucléaires au sein d'ITER Organization. *Mais il ne nous dira rien de la manière dont le ferrailage doit être agencé.* »

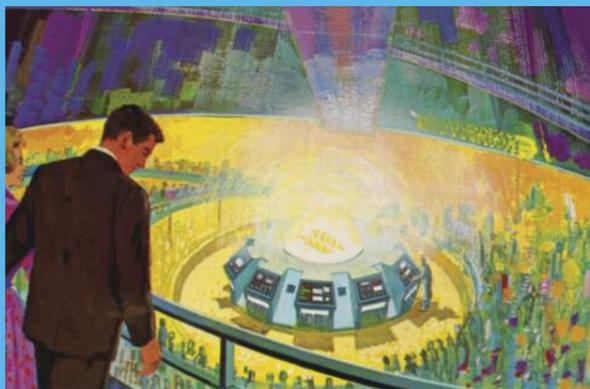
Entrent alors en scène les « ingénieurs calcul », spécialisés dans l'analyse structurelle, qui interprètent les données brutes des codes et les traduisent en schémas de construction tridimensionnels. Les « projeteurs » leur succèdent, affinant encore le design du ferrailage avant que l'entreprise sous-traitante ne le traduise en « plan d'exécution » compatible avec sa propre méthodologie.

« *Il faut que tout cela demeure 'constructible'*, poursuit Laurent Patisson, *c'est-à-dire que, quelle que soit la densité et la complexité de l'agencement des barres d'acier, il faut disposer d'espaces suffisants pour insérer le tuyau de la pompe à béton et les aiguilles des vibreurs...* »

Pour s'en assurer, les plans et les modélisations ne suffisent pas. On a donc construit, à proximité de la fosse du tokamak, une maquette à échelle 1 : 1, sur laquelle on teste à la fois l'agencement du ferrailage et la faisabilité du coulage du béton.

Cette procédure longue, complexe, d'une rigueur extrême, régulièrement contrôlée par l'Autorité de sûreté nucléaire française (ASN), garantit que, même dans les situations les plus improbables (accident, séisme), le confinement de l'installation sera préservé – ce qui constitue, pour la sécurité des populations riveraines, la meilleure assurance.

Quand la fusion était (presque) là



Un tube de quartz (en fait une machine de type "theta-pinch"), un éclair, et la fusion semblait à portée de mains...

En 1964, il y a tout juste 50 ans, l'avenir avait des airs de science-fiction. La France et le Royaume-Uni lançaient le programme *Concorde*, les Américains préparaient les premières missions lunaires et la première greffe d'un cœur (de chimpanzé) était réalisée sur un être humain.

De ce monde plein de promesses, l'Exposition universelle de New York fut la prodigieuse vitrine. Entre le 22 avril 1964 et le 17 octobre 1965, elle allait accueillir quelque 51 millions de visiteurs – plus que la population française de l'époque.

Les attractions y étaient nombreuses et spectaculaires. Au pavillon de la société General Electric (le « Pays du Progrès »), on se pressait autour d'une étrange machine, un tube de quartz entouré d'aimants d'où jaillissait, à intervalles réguliers, un éclair aveuglant, suivi d'un claquement sec – l'*Expérience de fusion nucléaire*.

« *Pour la première fois, pouvait-on lire dans le guide officiel de l'Exposition, le public pourra observer comment, pendant quelques millièmes de seconde, un champ magnétique comprime un gaz de deutérium porté à la température de 10 millions de degrés.* Le guide mentionnait « *l'éclair brillant* », le craquement des « *atomes entrant en collision* », preuve, « *attestée*

par les instruments », d'une production d'énergie.

L'expérience laissait le visiteur convaincu qu'avant peu, la « *collision des atomes* » générerait suffisamment d'énergie pour envisager la production d'électricité à échelle industrielle. Pour General Electric toutefois, l'*Expérience de fusion nucléaire* de 1964 marquait la fin d'une aventure. La société, qui s'était engagée dans la recherche sur la fusion dès 1956, l'abandonnerait en 1965, considérant comme « *faible* » la possibilité de développer, « *dans un proche futur [...] une centrale de production économiquement viable* ».

Cinquante ans ont passé. Depuis le tube de quartz du Pays du Progrès, depuis le confinement, pendant quelques millièmes de seconde, d'un plasma porté à 10 millions de degrés, les progrès ont été immenses. Au-delà d'ITER, au-delà de DEMO (voir article p. 2), la « *centrale de production économiquement viable* » se dessine désormais sur l'horizon des années 2050 – à peine plus distante que le « *proche futur* » de 1965.

Qui a « inventé » la fusion ?



De gauche à droite: Mark Oliphant (1901-2000); Lyman Spitzer (1914-1997); Arthur Eddington (1882-1944); Hans Bethe (1906-2005) et Ernest Rutherford (1871-1937).

Les visiteurs, que l'on accueille par milliers sur le site d'ITER, posent souvent cette question : « Qui a découvert (ou inventé) la fusion ? »

Une première réponse, simple et évidente, consiste à dire : « Mais, c'est la nature ! » Vrai : cent million d'années après le Big Bang, les premières réactions de fusion se sont produites dans le cœur ultra-chaud et ultra-dense des gigantesques sphères gazeuses que l'effondrement des nuages d'hydrogène primitifs avait patiemment formées. Ces étincelles, suivies de formidables embrasements, marquèrent la naissance des premières étoiles.

Des milliards d'années plus tard, ce processus est toujours à l'œuvre et, à l'échelle de l'Univers observable, la fusion demeure l'état le plus « ordinaire » de la matière. Notre Soleil, qui compte pour 99,86% de la masse totale du système solaire, est une énorme boule d'hydrogène, nourrie depuis des milliards d'années par les réactions de fusion qui se produisent en son cœur.

Mais tout cela, il fallut attendre le début du XX^e siècle pour le comprendre. L'astrophysicien anglais Arthur Eddington (1882-1944) fut le premier à suggérer, en 1920, qu'une réaction nucléaire – la transmutation de l'hydrogène en hélium – était à l'origine du feu des étoiles.

Et il fallut près de vingt ans encore pour que le physicien Hans Bethe (1906-2005) mette en équations, en 1939, l'enchaînement de réactions – la « chaîne proton-proton » – qui, partant de quatre noyaux d'hydrogène aboutit à un noyau d'hélium. Ces travaux, inclus dans une explication plus large des processus de transmutation de la matière au sein des étoiles, vaudraient à l'Alsacien Bethe – il était né à Strasbourg alors rattaché à l'Allemagne – le prix Nobel de physique en 1967.

Tandis qu'Eddington, Bethe et quelques autres scrutaient les étoiles pour en percer les mystères, d'autres se penchaient sur l'atome pour en révéler les secrets. En 1911, trois ans après avoir reçu le prix Nobel de chimie pour ses travaux sur la désintégration atomique et la chimie des substances radioactives, le physicien britannique Ernest

Rutherford (1871-1937) avait élaboré le « modèle atomique » qui porte son nom – un petit noyau lourd, un vaste espace vide et un cortège d'électrons périphériques.

En 1934, Rutherford réalisa une expérience fondatrice : en obtenant en laboratoire la fusion du deutérium (un des deux isotopes lourds de l'hydrogène) en hélium ; en observant « l'effet considérable » que cette réaction produisait, il ouvrait la voie aux recherches dont ITER, 80 ans plus tard, constitue l'aboutissement.

Son assistant Mark Oliphant (1901-2000) avait joué un rôle-clé dans la mise au point et l'observation de ces premières expériences de fusion. On lui devra la découverte du deuxième isotope lourd de l'hydrogène, le tritium – l'autre « combustible » de la fusion – et de l'hélium 3, un élément riche de promesses pour les réacteurs de deuxième ou troisième génération.

A la veille de la Deuxième guerre mondiale, un solide cadre théorique avait été établi – on pouvait dès lors envisager de concevoir des machines qui exploiteraient les réactions de fusion pour produire de l'énergie.

De nombreux problèmes de physique fondamentale restaient toutefois à explorer, et cette exploration allait durer beaucoup plus longtemps que les scientifiques ne l'imaginaient.

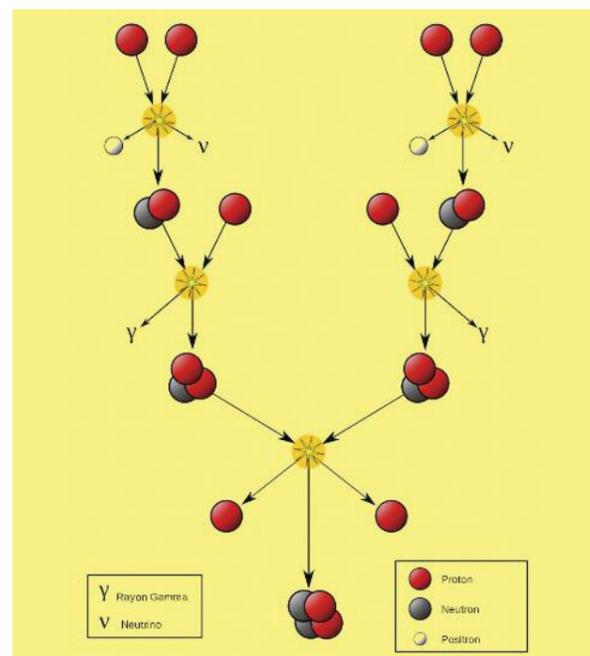
Bien que le premier brevet d'une « machine de fusion » ait été déposé en 1946 au Royaume-Uni (Thomson et Blackman), ce n'est qu'au tout début des années 1950 que la recherche prit véritablement son essor.

Une farce politico-scientifique est à l'origine de cette subite accélération : au mois de février 1951, le président argentin Juan Perón affirma avec fracas que ses équipes scientifiques avaient réussi à « libérer l'énergie de l'atome » dans un réacteur de fusion nucléaire.

C'était faux. Mais ce fut suffisant pour déclencher une véritable course aux réacteurs de fusion, dans

laquelle les Etats-Unis se lancèrent dès le mois de mai suivant. A l'Université de Princeton, l'astrophysicien Lyman Spitzer (1914-1997) proposa un modèle de « machine de fusion », le stellarator, qui allait dominer la recherche tout au long des années 1950-1960 jusqu'à ce qu'il soit « détrôné » par les premiers tokamaks mis au point en URSS.

Tout, dès lors, est allé très vite. Moins d'un siècle après qu'Eddington formula sa prodigieuse intuition, ITER s'apprête à démontrer que le feu des étoiles peut être reproduit, maîtrisé et mis à contribution pour assurer l'avenir énergétique de l'humanité.



La « chaîne proton-proton », qu'Hans Bethe a identifiée en 1939, décrit le processus long et complexe qui permet aux étoiles semblables au Soleil de générer de l'énergie. Dans un réacteur de fusion, la réaction est beaucoup plus simple et produit un résultat similaire : deux noyaux légers (deutérium et tritium) fusionnent en un noyau plus lourd (hélium) et produisent de considérables quantités d'énergie.

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