

**Source :**

<http://coordination-antinucleaire-sudest.net/2012/index.php?post/2015/01/07/ITER%2C-un-projet-de-fusion-nucleaire-«-en-plein-malaise-et-pouvant-deriver-hors-de-tout-contrôle-»>

**A STAR IN A BOTTLE** By **Raffi Khatchadourian**

( ITER : une tour de Babel techno-scientifique )

<http://www.newyorker.com/magazine/2014/03/03/a-star-in-a-bottle>

**traduction Antoine Calandra, janvier 2015 :**

Des milliers de composants vont être fabriqués plus ou moins parfaitement et en fin de compte, le succès du projet ITER peut reposer sur une simple question :

**Est-ce qu'on parviendra à tout assembler ?**

Stefano Chiocchio, chef de la division intégration-conception d'ITER – chef de puzzle – a son bureau dans l'une des annexes temporaires près du siège. Son BlackBerry contient généralement un calendrier de rendez-vous impossible à tenir. Son téléphone à l'oreille il gesticule comme une particule atomique zigzagante. Les ingénieurs de Chiocchio sont, en quelque sorte, la garde prétorienne du projet, m'a dit un employé.

Jusqu'à présent, la grande machine n'existe que sous forme d'informations numériques de 1,8 téraoctets, accessibles sur un cloud computing sécurisé et sauvegardées tous les soirs dans une banque à Barcelone garantissant la bonne conservation des disques durs.

Mais la principale menace est la manière de travailler en elle-même, avec des modifications venant simultanément du siège ITER, des agences domestiques et des divers sous-traitants à travers le monde. Théoriquement les modifications ne sont ajoutées qu'avec l'approbation de la garde prétorienne. Pourtant les incompatibilités arrivent en nombre.

L'équipe de Chiocchio doit faire face à toutes ces non-conformités et se trouve complètement débordée.

J'avais rendez-vous avec Chiocchio et l'ai trouvé en pleine réunion dans une salle de conférence. Deux douzaines d'ingénieurs étaient assis autour de tables disposées en fer à cheval dans une ambiance assez sombre. Un sentiment de crise semblait planer sur ITER comme une nébuleuse

concentrique autour d'un soleil mourant. Le projet est en retard depuis le début. En 1993 on pensait que la machine pourrait être prête en 2010; et il y aura certainement d'autres retards. Le moral est plus bas que le plancher et les discussions sont remplies de cynisme, de désaccords et d'humour noir.

### **« il y a beaucoup d'anxiété ici, tout ça va imploser » m'a dit un physicien**

De nombreux ingénieurs et physiciens travaillant sur ITER estiment que les retards ont peu à voir avec l'ingénierie ou la physique mais viennent de la façon dont ITER est organisé et géré. Des membres clé de l'équipe technique sont partis, d'autres ont pris un «congé pour stress» afin de récupérer.

Il y a peu, le directeur général, Osamu Motojima, physicien japonais qui dirige l'organisation depuis 2010, a fait poser par des ouvriers, à l'entrée du siège, une dalle de granit pour marquer la présence d' ITER. **Les gens l'appellent la pierre tombale.**

Les ingénieurs de Chiocchio étaient réunis pour discuter du problème le plus urgent : les retards dans la construction de l'énorme bâtiment qui abritera le tokamak.

Dès le début, afin de respecter le calendrier, la construction a démarré malgré que des parties importantes, au niveau de la conception du tokamak, soient incomplètes. C'est comme construire la coque d'une fusée sans avoir conçu son moteur, ou pire encore.

Comme l'a dit Chiocchio : " l'une des difficultés avec ce bâtiment nucléaire est que, une fois construit, on ne pourra plus percer le moindre trou. Une fois terminé, point final. Le bâtiment dispose d'une fonction de sécurité, de confinement, et l'une des principales exigences, c'est qu'il n'y ait pas de fissures à travers lesquelles la radioactivité puisse migrer et s'échapper. Nous devons être sûrs de n'avoir rien oublié – un tuyau, un câble – parce que si nous avons manqué quelque chose et que quelqu'un dise « OK, nous allons visser juste cela au mur » et bien, non, ce ne sera pas possible»

Et pourtant vu l'immense échelle et la densité de la machine ITER, il est pratiquement impossible de savoir où tout ira ! Près de 10 000 km de câbles vont traverser la machine pour distribuer la puissance électrique dans 250 000 points terminaux. Un système de chauffage enverra un million de watts de rayonnement micro-ondes à travers une ouverture constituée d'un gros diamant synthétique. Le système nécessitera un guidage tubulaire parfaitement droit pour transporter les ondes.

Pour résoudre l'énigme du renforcement de la machine, les ingénieurs ont conçu des étais spéciaux dans toute la structure. « Fondamentalement, ce que nous avons à faire maintenant est de s'assurer que nous avons bien prédéfini les emplacements, avec des plaques d'acier encastrées dans les murs, qui pourront soutenir tous les systèmes qui sont à l'intérieur », a expliqué Chiocchio. « Nous devons mettre de nombreuses plaques

d'encastrement, plus de quatre-vingt mille, mais chaque plaque coûte très cher, et l'Agence domestique européenne, qui est responsable de la construction, se plaint que nous en mettons trop. « Les plaintes deviennent des arguments, les arguments deviennent des retards, et les retards dans la construction menacent maintenant l'ensemble du projet. Si le bâtiment n'est pas terminé, nous aurons des composants tout le long de la route.

**Un jour de retard commence à présent à coûter cher, je ne sais pas, probablement près d'un million d'euros ».**

Dans la salle de conférence, les ingénieurs étudiaient une présentation PowerPoint intitulée «TKM Complexe - niveau B1 semaine 34 et actions semaine 35 » Un membre de l'équipe conception-intégration, Jean-Jacques Cordier, menait la discussion. A la fin de la réunion, il a indiqué qu'il manquait du temps pour examiner de près les composants qui occupent le troisième étage: les plans devaient être réunis, les spécifications actualisées, les problèmes réglés. Il a dit « ce n'est pas raisonnable, cela signifie que nous devons traiter des milliers de données en trois semaines »

Chiocchio a demandé si tout ce qui concernait les premiers étages était finis, mais il restait tout simplement trop de détails à retravailler avant de livrer les dessins à l'entrepreneur. « Si nous tardons, nous aurons un retard réel. La seule façon de l'éviter est d'augmenter nos ressources pour y faire face » a déclaré Cordier.

Chiocchio m'a rejoint pour le déjeuner, il semblait épuisé. ITER quand tout sera terminé, contiendra **dix millions de pièces individuelles, mais il y a seulement vingt-huit personnes qui travaillent dessus.** Il m'a montré ensuite une pièce près de son bureau où trois hommes sont en poste tous les jours pour traquer les conflits. Devant chaque homme, un énorme puzzle ITER en miniature remplit deux écrans d'ordinateur. «Nous devons tout vérifier, les conflits comme celui-ci» dit l'un des hommes pointant un schéma où une structure de soutien du tokamak ne s'alignait pas avec la plaque d'ancrage.

Pour résoudre ce problème, il faut informer l'équipe de designers deux étages plus bas. Habituellement, les membres de la Garde transmettent des messages que les autres ne veulent pas entendre » dit-il, ajoutant: « En fait, nous ne sommes pas aimés par grand monde ».

Comme l'a dit Chiocchio, de nombreux problèmes de conception surgissent à cause des fondements politiques du projet. Les modifications apportées à un composant rendent les autres – construits dans d'autres pays – plus cher, et les controverses sont difficiles à résoudre. Depuis le début, les agences domestiques rivalisent pour élaborer le design des composants de la machine, de sorte que leurs industries puissent profiter de ce savoir-faire; la conception et la fabrication des pièces les plus sophistiquées a donc été répartie, ce qui est politiquement judicieux, mais en totale contradiction avec la prudence en ingénierie.

Il aurait fallu un seul fabricant pour la construction de la chambre à vide d'ITER, un dispositif de haute précision qui doit avoir une symétrie parfaite pour fonctionner.

Au lieu de cela, elle sera construite en neuf segments, deux fabriqués en Corée et le reste en Europe. Il aurait fallu des boulons ayant certaines caractéristiques, mais les Européens ont décidé d'en utiliser d'autres qui sont moins chers. La garde prétorienne, avec un peu plus que le pouvoir de persuasion, doit s'assurer que le dispositif est complet.

Les cadres de référence communs sont souvent difficiles à trouver, et Chiocchio doit travailler constamment pour qu'ITER ne devienne pas **une Tour de Babel scientifique**. Il demande aux scientifiques d'utiliser la même terminologie (parfois, **la même langue**) et aussi **la même norme de mesure métrique**. C'est un travail de chien de garde, mais Chiocchio est engagé dans le projet ITER depuis vingt ans, et comme beaucoup de gens qui construisent des tokamaks, il est venu ici avec le sens d'une mission.

La fusion thermonucléaire diffère de la fission, et sa promesse est beaucoup plus grande. Un ingénieur qui a consacré sa carrière à l'objectif d'un réacteur m'a dit une fois : « la fusion a une pathologie intéressante, son attrait est tellement immense ».

Dans le siège ITER on peut sentir cela: une force psychologique qui atténue, ou enferme, le pessimisme comme un champ magnétique. J'ai pu la capter un après-midi quand un physicien découragé déclara, plaisantant à moitié, que le vaisseau spatial dans "Star Trek" était alimenté par la fusion. [...]

Dans les années 90, il y avait toutes les raisons de penser que c'était la fin d'ITER. Au moment où les États-Unis se sont retirés, un autre physicien français, Robert Aymar, était en place et a décidé de réduire le coût astronomique d'ITER en faisant une machine plus petite, avec un budget serré et moins de personnel. Commencé en 1998, il n'a été finalisé qu'en 2001. La nouvelle machine serait construite pour un mélange idéal de tritium, **et l'objectif ne serait plus d'atteindre l'ignition** ( une fusion auto-entrenue), mais de produire dix fois plus d'énergie tiré dans le plasma, un demi gigawatt.

Aymar estima le coût à cinq milliards de dollars, la moitié du coût initial,

**et ce chiffre fut bientôt cité comme son prix réel.**

La conception était encore loin d'être complète, et presque tout le monde savait que ce chiffre était largement sous-estimé. « Bien sûr, les bureaucrates voulaient que ITER soit approuvé, et les politiciens ont volontairement fermé les yeux » m'a dit un employé. « **Oh, si au lieu de 5 milliards ils avaient dit 15 milliards, alors probablement personne n'en aurait voulu** ».

Poussé par un consensus d'universitaires américains, les États-Unis ont rejoint le projet; un accord engageant les deux parties a finalement été signé, et une agence domestique américaine s'est ouverte à Oak Ridge.

### **Mais l'irréalisme délibéré est resté.**

Les deux premiers chefs d'ITER n'avaient aucune expérience en physique des plasmas (...). Le directeur général, Kaname Ikeda, était un fonctionnaire japonais et un ingénieur nucléaire. Son chef adjoint, Norbert Holtkamp, venait du monde des accélérateurs de particules de haute énergie (ce qui n'a rien à voir avec le plasma d'ITER !).

Holtkamp fit ce qu'il put pour protéger l'organisation naissante. « Un jour il a dit:

**- Si vous dépensez le maximum d'argent, passé le premier milliard, personne ne nous arrêtera plus (...).**

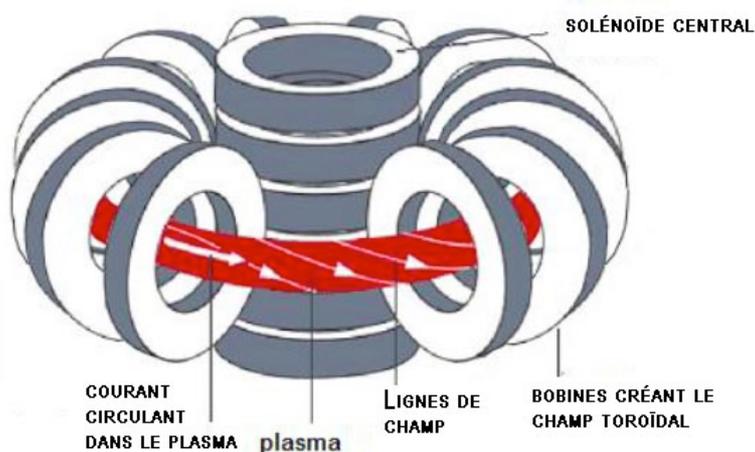
Et donc il a dépensé, dépensé et dépensé » m'a dit un ancien ingénieur ITER. « La conception n'était pas terminée, mais il voulait que ça démarre; bougez, bougez, bougez ! » (Holtkamp nie avoir fait ce commentaire).

### **Science et politique ont fusionné.**

Lorsque les ingénieurs européens qui travaillent depuis des décennies dans la recherche sur les tokamaks ont proposé de construire l'enceinte intérieure, un officiel chinois s'est levé et, profondément choqué, a soutenu avec véhémence que c'était le comble de l'arrogance de penser que la Chine n'était pas capable de fabriquer cette enceinte. Et il a été décidé que la Chine en ferait une partie.

**Assez vite, la réalité a refait surface: le calendrier a dérapé et les coûts ont augmenté.** En 2010, Ikeda et Holtkamp prenaient la porte, et Osamu Motojima prenait le poste de directeur. Étant physicien et spécialiste de la fusion, Motojima comprit ce qui était en jeu: Si ITER échouait, la quête de l'énergie thermonucléaire pourrait être enterrée définitivement. Après avoir pris la barre, il déclara : « Le rêve est vivant ! » Un après-midi, David Campbell, physicien en chef à ITER, m'a dit: « Je peux traverser la salle et regarder le site en construction, et parfois je me dis à moi-même : nous construisons ITER là-bas! Il a fallu longtemps pour en arriver là. Même s'il y a des frustrations avec le système, même si les membres ne sont pas contents du coût qui a augmenté et des retards sur le calendrier, tout le monde est engagé là-dedans ».[...]

Le but de l'examen de Reich, ingénieur dans la garde Prétorienne, était surtout d'étudier les changements que les diverses agences domestiques proposaient pour les aimants, en commençant par celui appelé le solénoïde central, la plus importante contribution américaine à ITER.



Solénoïdes ( schématique )

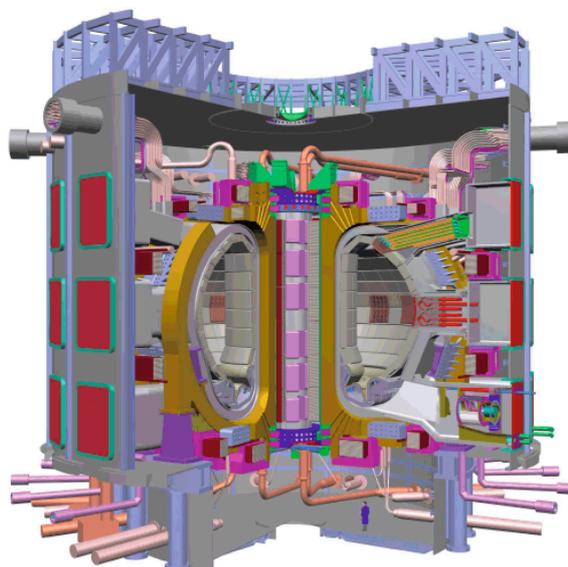


Figure 1.14 – Schéma en coupe d'ITER (Source : ITER Organization)

### Selon l'axe d'ITER : les 6 solénoïdes supraconducteurs

À l'école primaire, les enfants font souvent des sortes de solénoïdes en enroulant un fil autour d'un clou, puis en l'attachant à une batterie : le courant magnétise la bobine. Le solénoïde central d'ITER fonctionnera de la même manière, mais il pèsera mille tonnes, et se tiendra comme une colonne de 12 mètres de haut au centre de la chambre à vide. Sa bobine fera plus de 30 km de long et sera faite avec du niobium-étain ( $Nb_3Sn$ ), un matériau exotique rarement utilisé dans les grands projets industriels. Ce métal a été choisi car il peut générer des champs magnétiques extrêmes: 260 000 fois celui de la Terre ( *13 teslas* ). Clé de conception d'origine soviétique, le solénoïde enverra d'énormes impulsions électriques à travers le plasma, pour le chauffer et le stabiliser. David Everitt, ingénieur à Oak Ridge en charge de

la construction de l'aimant, m'a dit de l'imaginer comme une bougie géante : « Ce sera une merveille technologique. Il a beaucoup de choses à faire, le courant n'est pas constant. Il a un très grand champ magnétique, pas le plus grand mais très grand, le courant à l'intérieur d'un module est opposé à celui du module adjacent, il y a une très grande force de séparation».

Quand les ingénieurs d'ITER parlent de très grande force de séparation, ils pensent à une rupture cataclysmique. Le solénoïde sera construit en six modules, empilés les uns sur les autres comme des jetons de poker. L'avantage de cette conception est que les différents modules peuvent fonctionner avec des champs magnétiques opposés, donnant aux physiciens la capacité de moduler le plasma de différentes manières. L'inconvénient est que cela crée également des forces opposées énormes qui peuvent faire sauter tout l'empilement si elles ne sont pas fortement contrebalancées. Les concepteurs de l'aimant ont calculé que les forces peuvent atteindre soixante méga newtons ( 6000 tonnes ), soit deux fois la poussée dont une navette spatiale de la NASA a besoin au décollage. Toute la pile peut aussi se comprimer puissamment. Lorsque les ingénieurs ont eu connaissance de cette conception, leur réaction a été : « **par le saint Maquereau! Vous voulez faire quoi ?** »

*(Note du commentateur : Les bobinages seraient, d'après ce texte, montés par aires, en opposition, faces nord contre face nord, faces sud contre face sud. D'où une force de répulsion. Le champ magnétique créé par cet ensemble de six bobines croît lentement, pour atteindre 13 teslas. C'est cette variation, lente, qui entretient le champ électrique induit, dans la chambre de très basse densité, crée et entretient le « courant plasma de 15 millions d'ampères. C'est aussi cet aspect qui fait qu'un tokamak n'est fondamentalement pas conçu pour travailler en régime permanent, même si cette montée du courant est lente (500 secondes, soit 8 minutes). Voir :*

[https://www.youtube.com/watch?v=Fi\\_uurHZY-g&list=PLfdj8oy5zeoEyEgTusYRznnwptG\\_n-OVo](https://www.youtube.com/watch?v=Fi_uurHZY-g&list=PLfdj8oy5zeoEyEgTusYRznnwptG_n-OVo)

*Passé ce temps, il faut envisager un autre système pour entretenir ce courant, par « ondes », « current drive », (qui n'est nullement au point, ni garanti). Le fait que ces six aimants soient en opposition découle sans doute du fait que pour faire croître le champ magnétique il est peut être plus facile de commencer par porter l'intensité à son maximum dans toutes les bobines, puis de faire décroître l'intensité de la moitié des bobines, et au bout de 4 minutes de l'inverser. Lors de cette inversion des bobines « en opposition » on monterait à 6 teslas, soit un temps de fonctionnement de 4 minutes, jugé suffisant pour cette « étape de démonstration ».*

Selon à qui vous parlez, l'histoire de ce solénoïde central incarne soit la déficience d'ITER, soit les capacités de l'équipe à surmonter la difficulté. Dès le début, les exigences techniques de l'aimant indiquaient que ce serait extrêmement difficile de le fabriquer. Pour éviter que le solénoïde ne passe à

travers le toit, 1080 vis doivent être fixées à la partie supérieure et à la partie inférieure, afin de maintenir la pile comprimée comme dans un étau. En outre, le niobium-étain est difficile à travailler. Il n'atteint pas ses propriétés supraconductrices tant qu'il n'est pas cuit: les brins de câbles seront enroulés dans un module, puis chauffés pendant plusieurs jours dans un four sur mesure, inondé avec de l'argon. Les brins, de moins d'un millimètre d'épaisseur chacun, seront entrelacés avec le cuivre. Dans le four, les métaux vont se lier dans une matrice fragile qui ne pourra pas être pliée ensuite [...].

### **La politique inadaptée du projet ITER fait que les problèmes ne peuvent que s'aggraver.**

Le personnel utilise le terme de « zoo conducteur » pour désigner la ménagerie de matériaux composant les aimants. Le brin de niobium-étain ( $Nb_3Sn$ ) est produit par un éventail ahurissant de sous-traitants, dans six pays, de manière tellement différente que leurs échantillons ne se ressemblent même pas.

Comme l'a expliqué Chiocchio : "il y a des fournisseurs partout dans le monde, c'est vraiment un cauchemar."

Le Japon, qui a travaillé sur le prototype du solénoïde, voulait s'occuper des câbles et a fait campagne pour fournir ses propres matériaux pour le zoo. En 2010, deux sociétés japonaises ont envoyé leurs échantillons à un laboratoire en Suisse. Les résultats ont été particulièrement mauvais. Les câbles devront supporter soixante mille impulsions, mais le câble japonais était dégradé après seulement six mille. Les ingénieurs ont commencé à s'inquiéter: « cela va-t-il être une erreur fatale pour ITER ? »

Les employés d'Oak Ridge ont craint que le calendrier ne puisse être respecté. Ils ont contacté un fournisseur travaillant pour ITER dans le New Jersey, Oxford Superconducting Technology, qui produit des brins de niobium-étain pour d'autres grands aimants de la machine. Ils ont demandé un échantillon pour le solénoïde, et en 2012, après avoir obtenu de bons résultats dans les tests, ils ont exhorté les Japonais à acheter le matériel d'Oxford.

« Avec le fonctionnement d'ITER, c'était très difficile de convaincre les Japonais, car c'est quelque chose qu'ils voulaient faire » m'a dit un ancien travailleur d'Oak Ridge. Les Japonais ont refusé, et le risque de retard a augmenté. De nouveaux échantillons japonais ont été envoyés en Suisse, et après plus de deux années de discussions et d'essais, le produit japonais a finalement fonctionné.

« Il y a eu un grand soulagement dans le monde entier », a déclaré l'ancien employé. Certains ingénieurs étaient fiers du travail d'équipe, mais ce problème n'aurait pas dû exister et reste un sujet sensible. Lorsque la revue sciences a publié un article là-dessus, Motojima a écrit pour dire qu'il était injuste de laisser entendre que les fabricants japonais avaient échoué. « Ce

n'est pas correct » a t-il insisté.

Les effets du retard sont encore visibles sur le terrain. Les responsables de Oak Ridge ont sous-traité la construction du solénoïde avec General Atomics, une entreprise familiale à San Diego. [...]

En mai 2014, les Japonais doivent livrer le conducteur à General Atomics, qui complétera les six modules d'ici 2018. La société expédiera alors les pièces finies au port de Galveston, avec chaque module – de 14 mètres de diamètre – sur des camions propulsés par trente essieux, pour supporter le poids. Le voyage se fera probablement après minuit, car les camions devront occuper deux voies d'autoroute.

A Galveston, les modules seront chargés sur un navire qui se rendra à Fos-sur-Mer, près de Marseille. De là, ils seront transportés le long d'une route spécialement aménagée jusqu'à la salle d'assemblage du tokamak, puis empilés, compressés, câblés et testés. La hauteur de la salle est dictée par la hauteur du solénoïde. Suspendue au plafond, une grue à pont roulant – avec quatre crochets et des câbles d'acier – soulèvera le gabarit, et avec lui le solénoïde suspendu à la verticale. Chaque variable sera étudié avec précision: la tension des câbles en tenant compte du poids énorme; la dynamique de la grue quand elle se déplace; le degré avec lequel l'aimant va osciller; même la météo, le vent frappant le bâtiment, et comment sa force pourrait affecter le parcours de la grue. Lentement, le solénoïde – avec ses mille tonnes – sera transporté jusqu'au tokamak et placé au milieu de la chambre à vide. S'il est trop grand d'à peine quelques millimètres, il ne pourra pas rentrer dans l'espace cylindrique étanche conçu pour lui. **Il n'y a aucune place pour l'erreur.**

**Remarque du commentateur :** *La qualité des brins supraconducteurs constituant tous les solénoïdes d'ITER est un élément vital pour cette machine. A titre d'exemple, une des bobines supraconductrice de la machine française Tore Supra s'étant révélée défectueuse dès sa mise en service, son remplacement, alors que dans cette machine les éléments sont accessibles ( le refroidissement des bobinages est assuré par des conduits intégrés aux bobines, et non en faisant baigner l'ensemble de la machine dans de l'hélium liquide ), a entraîné une mise à l'arrêt de plus d'une année. Sur ITER, où l'ensemble est immergé dans un cryostat, lui-même pris dans une enceinte en béton, ce remplacement est ... impossible. Il faudrait tout démonter. Pour vous en convaincre, jetez un oeil à cette vidéo :*

<https://www.youtube.com/watch?v=cVlouJuN2pM>

*Confronté en 2014 à cette question lors d'une conférence donnée à l'Ecole des Arts et Métiers d'Aix-en-Provence, Jérôme Pamela a simplement répondu «ça n'arrivera pas ! ».*

Que se passera t-il quand ITER sera activé? Une chose est certaine: une étoile synthétique est une merveille cachées, inaccessible aux regards. La seule

façon de l'observer serait de la sortir de la salle de contrôle ; les champs magnétiques sont invisibles, le plasma ne fait aucun bruit. Mais allez visiter un tokamak en marche – en Corée du Sud, en Suisse ou en Inde – et demandez ce qui se passerait si un incident se produisait et que vous soyez à côté de la machine.

Réponse: **L'aimant pourrait traverser le cœur et faire un trou dans la machine.** Et que faire si le plasma se dissipe soudainement ? Réponse: **des forces titanesques seraient susceptibles de déferler, peut-être même de disloquer l'appareil,** comme des faisceaux d'électrons déchirant sauvagement la machine. Ceci alors que, dans la salle de contrôle, distante de la machine, il pourrait sembler qu'il ne se passe pas grand chose.

Que se passera t-il quand ITER sera activé ? La réponse, comme dans toutes les expériences, est un grand mystère, puisque personne n'a encore produit de plasma chaud, dense et suffisamment durable pour s'auto-entretenir. Une telle chose serait t-elle trop difficile à contenir, ou bien un équilibre imprévu serait-il trouvé ?

**Note du commentateur :** *le comportement d'un éventuel plasma auto-entretenu, jamais obtenu, si tant est que cette configuration puisse être atteinte, est impossible à prévoir. Il aurait été beaucoup plus sage de tenter de créer cette situation dans une machine plus compacte, avec des champs supraconducteurs plus intenses, dans un tokamak qui n'aurait été qu'un outil de recherche (du fait de l'impossibilité de maintenir les champs de confinement pendant un temps long, à cause de l'effet Joule, du chauffage des bobines, et non « la préfiguration d'un générateur d'électricité ».*

Il est difficile de savoir si ITER aura assez de puissance pour atteindre le « mode H » scénario de base du projet. Les systèmes de chauffage du plus grand tokamak existant ont la taille de cinq conteneurs d'expédition; ITER sera encore trois fois plus grand, et devra fonctionner de façon non prouvée. Même si les systèmes fonctionnent, il n'y en aura pas assez. Les extrapolations actuelles ne donnent qu'une indication vague des besoins d'ITER, avec une gamme d'incertitude désespérément grande.

Joe Snipes, physicien m'a dit: « Nous avons essayé, essayé et essayé et quand je dis « nous », je parle de toute la communauté travaillant sur la fusion, les experts du monde entier – nous avons essayé de réduire la marge d'erreurs, mais nous ne pouvons pas le faire; le mode H dépend de tellement de facteurs différents que nous ne pouvons comprendre »

**Note du commentateur :** *Le JET résultait de l'extrapolation de la machine Tore Supra. Ce passage d'une échelle à l'autre fit apparaître un phénomène non prévu : les VDE « Vertical Displacement Effects » ou effondrements brutaux du plasma vers le bas, sur son « divertor » (fentes par lesquelles s'effectue le pompage-réalimentation en combustible frais). Des bobinages additionnels durent être, toute recherche cessante, installés pour assurer un contrôle vertical du plasma. ITER est une extrapolation du JET et nul ne sait si*

*un phénomène imprévu ne pourrait pas survenir qui, étant donnée l'impossibilité de modifier la machine, s'avérerait ingérable. Il est impossible d'effectuer des simulations sur ordinateur du comportement d'une machine à plasma. La puissance de calcul dépasse celle requise et ne sera jamais atteinte. Le plasma d'ITER « évolue dans un espace à 7 dimensions : 3 pour la position des particules, 3 pour leur vecteur vitesse, une pour le temps ».*

Certains ingénieurs se demandent si les systèmes de chauffage pertinents – coûtant un milliard de dollars, initialement conçus pour l'initiative de défense stratégique de Ronald Reagan appelée Star Wars – auront une puissance suffisante.

D'autres pensent que tout doit être essayé, parce que ITER reste finalement une expérience: trouver des pistes pour une solution est son but.

**Note du commentateur :** *Trop d'aléas. Un peu cher pour une « expérience »*

Le travail de Snipes sera de gérer le plasma. Il n'y a pas longtemps, il a donné au siège une conférence pour les ingénieurs intitulé : « Limites de fonctionnement pour ITER » Il a parlé principalement des incertitudes de comportement du plasma, mais il a rappelé à ses collègues que certaines limites étaient simplement dues à la façon dont le projet ITER avait été conçu.

Alors que la garde prétorienne était inquiète des lacunes au niveau des composants, essayant de s'assurer qu'il y aurait assez de place pour assembler la machine, les physiciens avaient la même inquiétude.

Dès le début, les physiciens ont compris que plus il y avait de lacunes dans la conception, plus les neutrons pourraient pénétrer dans la machine, le chauffage les absorbant de toutes façons. Pour étudier les effets du plasma sur la structure, ils ont acquis un million d'heures sur MareNostrum, un superordinateur à Barcelone, situé dans une cage de verre dans la nef faiblement éclairée d'une chapelle du XIXe siècle.

Les aimants d'ITER seront enfermés dans un cryostat et refroidis en continu avec de l'hélium liquide. S'ils deviennent moins froids que -267 degrés, ils deviendront «normaux» et perdront leur qualité de supraconducteur. Alors, l'énorme courant électrique qui les traverse cherchera une autre sortie, comme un fleuve endigué. Si les 18 bobines de champ toroïdal devaient faire l'expérience de ce phénomène, 41 milliards de joules d'énergie chercheraient un nouvel endroit où aller. **Un scientifique a comparé cette issue à deux avions 747 se scratchant simultanément dans la machine.**

**Note du commentateur :** *La déficience du refroidissement n'est pas le seul risque. Un défaut dans un des bobinages peut entraîner au sein de celui-ci un dégagement local de chaleur avec perte de cette « supraconduction ».*

Les calculs sont complexes pour prévoir combien de neutrons viendront

frapper les aimants, et les problèmes liés au changement d'échelle croissent plus vite que la puissance de calcul.

**Note du commentateur :** *Cet aspect avait été d'emblée souligné par feu Gilles Degennes, prix Nobel français.*

« Le physicien qui en est responsable améliore constamment ses modèles » m'a dit Snipes. « Chaque petit écart lui cause d'énormes maux de tête. Maintenant, ce ne sera pas un problème – nous réduirons les performances du plasma avant d'arriver à ce stade dangereux – mais ça nous empêchera de savoir jusqu'où nous aurions pu aller ».

En d'autres termes, même si ITER est capable de produire des réactions thermonucléaires record, la machine peut ne pas être capable d'y faire face – une perspective extrêmement frustrante.

**Note du commentateur :** *Par précaution, il serait nécessaire de brider le régime d'ITER en s'abstenant de le monter en régime.*

A l'époque de Dorland et Kotschenreuther, au moment de la conception de la machine les prévisions des modèles informatiques de l'époque étaient beaucoup plus encourageants; on avait prédit que ITER pourrait théoriquement atteindre l'ignition. Mais, si les nouveaux calculs devaient infirmer cette prédiction, les objectifs fondamentaux du projet pourraient s'en trouver compromis.

« C'est ce qui arrive quand on fonctionne avec un calendrier qui n'est pas réaliste, ou lorsqu'on doit construire une machine avec trop peu de personnes, ou trop peu d'argent, il faut faire alors des sacrifices » m'a dit un scientifique affilié au projet. « Chaque fois que le directeur général fête une étape, il ne reconnaît pas les raccourcis qui ont été pris pour en arriver là »

**ITER est continuellement modifié pour répondre aux exigences de moindre coût.**

Les compromis sont une source de difficultés permanentes, dont beaucoup ne sont pas résolues ou sont résolues cyniquement, les gens disent que c'est parce que Motojima encourage une culture qui est contraire à la science, parce que la structure organisationnelle d'ITER est calquée sur la société japonaise – avec une administration lourde se préoccupant beaucoup de donner une image de progrès.

**« Ce projet est censé apporter de l'espoir, mais c'est la peur qui règne en son sein » a déclaré le scientifique.**

« Des efforts sont faits à plusieurs niveaux pour cacher les problèmes, en partie parce que les gens pensent que la situation ne pourra pas s'arranger, et en partie parce que certains des décideurs seront morts au moment où on

appuiera sur le gros bouton rouge ».

Durant l'été, l'ambiance de travail au sein de la plus grande collaboration scientifique de l'histoire devenait de plus en plus anxieuse. « ITER a toujours été un lieu de travail mouvementé, hein ? » m'avait dit Chiocchio, mais les frustrations montent nettement. L'année précédente, ITER avait à peine atteint la moitié de ses objectifs. La date de démarrage de la machine – 2020 – a été de nouveau reportée. On parle discrètement maintenant de 2023 ou 2024. Et si la date recule encore ? Les ingénieurs opèrent dans un monde de charges strictement mesurées et de flux thermiques, mais les forces politiques sont insensibles à ces mesures précises. Pourtant, les dernières répercussions étaient évidentes. **À un moment donné, finalement, des politiciens frustrés pourraient décider qu'ITER n'en vaut pas la peine, vu le coût croissant des retards.**

En Juin, le Conseil ITER s'est réuni à Tokyo, et il était évident que l'organisation allait se retrouver devant sa propre agitation interne. À un moment donné, un membre du Conseil Coréen a pris ses papiers et claqué la porte.

Ned Sauthoff, le chef de projet des États-Unis, a dit clairement qu'il pensait que la culture de sécurité nucléaire manquait dans le projet ITER et que l'implication américaine allait diminuer.

Le ministère de l'Énergie avait arrêté le financement d'un tokamak au M.I.T (Massachusetts Institute of Technology) pour aider à payer ITER, et cette décision a eu des conséquences. Les membres du Congrès ont été invités à voir la machine inerte, et ils sont retournés au Parlement scandalisés. « ITER est en train d'absorber tout notre programme national ». Les estimations officielles de la contribution des États-Unis ont doublé, pour atteindre un milliard de dollars, puis ont de nouveau augmenté à 2,4 milliards de dollars, simplement pour arriver au « premier plasma », juste pour mettre la machine en marche.

Avant la fin de l'été, Dianne Feinstein, la présidente du comité sénatorial qui gère les crédits pour le développement de l'énergie, a annoncé qu'elle stoppait le financement d'ITER jusqu'à ce que le ministère de l'Énergie fournisse une évaluation détaillée de l'engagement financier américain total. La demande était logique et il était impossible de lui répondre avec précision;

### **Les gens d'ITER eux-mêmes ne le savent pas.**

Le service était peu disposé à donner un chiffre, et Sauthoff m'a dit: « **Nous sommes en terrain inconnu** »

Motojima, quant à lui, avait du mal à rendre l'organisation plus simple et plus centralisée, et il était pris au piège : les agences domestiques ne donneraient pas plus de marge de manœuvre au siège ITER sans une plus grande confiance dans son efficacité, mais l'organisation ne pourrait jamais être plus efficace sans une plus grande autorité centrale. Quelque chose devait

clairement changer. Quand j'ai rencontré Motojima, il rentrait juste de Sibérie – ou il avait rendu visite à un contributeur ITER à Novossibirsk – et il semblait fatigué. Il avait sa propre théorie sur le moral en baisse: il est dû en partie au travail incessant, mais il y a également une composante psychologique, parce que les gens ne peuvent pas voir le résultat concret de leur travail. La plupart des employés ne voient pas le chantier en construction de leurs fenêtres, ni les composants construits en dehors du site. Avec le temps, des grandes pièces arriveraient, le progrès serait mesurable, les attitudes changeraient. De son bureau, au cinquième étage, la construction du vaste chantier du tokamak était toujours visible.

Pourtant, Motojima eut droit à des critiques féroces. Il avait été décidé à Tokyo qu'une fois pour toutes, le calendrier devait être réaliste. Un membre du conseil m'a dit : « des gens recrutés à l'extérieur ont étudié et dit :

**c'est pourri, le projet de fusion lui-même est dépassé, c'est un rêve impossible. Non, non, et non! C'est la gouvernance d'ITER qui est pourrie (...).**

Nous devons trouver une solution, une issue possible à ce pétrin. Si nous n'y arrivons pas, alors nous aurons des problèmes – je pense à un remaniement total de l'ensemble du projet, de la direction, peut-être autre chose.

**Note du commentateur :** *Le fait que Bernard Bigot, totalement ignorant en matière de plasmas (il est chimiste de formation) ait pris la suite de Motojima peut se traduire par la formule connue : « Après Charybde, Scylla ».*

Je pense qu'un pays partenaire peut partir, mais ce n'est pas utile, parce que le projet est réalisable. Mais tous les États membres ne fonctionnent pas ensemble comme une seule équipe, avec un seul objectif. Nous devons remédier à ça ».

**Le remaniement était inévitable. En octobre 2013, une évaluation confidentielle de la gestion interne avait spécifié que le projet était « en plein malaise et pouvait dériver hors de tout contrôle »** Elle a fait onze recommandations sévères, parmi lesquelles remplacer Motojima le plus rapidement possible. Le Conseil ITER a convoqué une réunion d'urgence. Les enjeux étaient particulièrement élevés pour la délégation américaine, qui devait apaiser le Congrès. Le ministère de l'Énergie avait présenté à Dianne Feinstein une nouvelle estimation de la contribution américaine passant de 4 milliards de dollars à 6,5 milliards de dollars et elle avait accepté de financer ITER (et la machine M.I.T) mais pas sans conditions. Environ 12 % de l'argent serait retenu jusqu'à ce que les 11 recommandations soient appliquées de manière significative. En substance, elle a dit qu' ITER devait changer, ou la place des États-Unis serait à nouveau remise en question.

Comme les gens impliqués dans ITER ont commencé à se demander qui succéderait à Motojima – **Condoleezza Rice fut suggérée (!!!)** – il s'empressa de faire des changements. Il congédia le directeur de la section

des aimants, un vétéran au franc-parler, mais respecté de par ses 26 années d'expérience, et il a fusionné le travail de la garde prétorienne avec celui des autres divisions. « Je ne suis plus à la tête de la conception » m'a dit Chiocchio, mais malgré le nombre de fois où il a essayé de m'expliquer sa nouvelle place dans la bureaucratie, je n'ai pas réussi à comprendre. Il avait gagné de nouvelles responsabilités, et en avait perdu d'autres. « Fondamentalement, je continue à faire exactement le même travail » m'a-t-il dit.

[...]

Avant de quitter la France, j'ai rejoint Chiocchio et Günter Janeschitz, conseiller principal auprès du Directeur général, ainsi que d'autres membres de la garde prétorienne, pour une visite du chantier de construction ITER. Il était midi, et le soleil était chaud et éclatant. **Le groupe portait le lourd fardeau d'une physique complexe et d'une politique plus complexe encore, mais c'était un bel après-midi en Provence.** Nous nous sommes dirigés vers le bas par un chemin de terre à travers les arbres, passant devant les câbles et les transformateurs qui amèneront l'électricité directement depuis le réseau national français. Une douzaine de véhicules jaunes – camions-benne, pelles rétro caveuses, bulldozers – étaient alignés soigneusement. Au loin, les grues émergeaient dans les hauteurs, leurs silhouettes en forme de L dans le ciel ouvert. Pour un projet qui devait désespérément rattraper son retard, le site était étrangement calme.

« C'est la pause déjeuner » dit sèchement Janeschitz.

Nous sommes passés devant un bâtiment vide, aussi long que cinq piscines olympiques. C'est ici que le système magnétique poloïdal, trop volumineux pour être déplacé sur des grandes distances, sera assemblé. Nous sommes passés devant une maquette de la grande dalle de béton qui devra soutenir le réacteur. La construction de la dalle était dans l'impasse à cause d'un autre conflit : économiser de l'argent, l'agence domestique européenne avait insisté pour que la dalle soit deux fois moins épaisse que dans la conception initiale – ce changement décidé par la réglementation française était dangereux. Pour sortir de l'impasse, les ingénieurs d'ITER ont conçu une nouvelle structure pour répartir davantage le poids de la machine.

Chiocchio a dû trouver du temps pour ça. « Il a fallu six mois » dit-il « La machine est déjà conçue, **chaque composant est déjà conçu. On ne peut pas changer quoi que ce soit** » Janeschitz secoua la tête et dit: « Bien sûr ensuite il y a des plaintes, en raison du coût et des modifications tardives ».

Pour se rendre dans la fosse de construction du tokamak, nous descendîmes un escalier métallique jusqu'à ce que nos pieds touchent terre, seize mètres plus bas. La fosse était si vaste qu'il a fallu un temps d'adaptation mental pour apprécier sa profondeur. Nous étions dans un canyon. La terre au fond – cuite par le soleil et craquelée, avait été laminé à plat, et des tas d'équipements étaient stockés à la surface. Dominant l'espace où la dalle était en construction, des murs de soutènement renforçaient la fosse. On pouvait voir les plots – 493 en tout, chacun comme un petit monolithe surmonté de coussinets anti-sismiques. En cas de tremblement de terre, les

roulements permettront à la dalle de se balancer de droite à gauche.

Même en tenant compte de toutes les difficultés du projet, il était difficile de ne pas sentir l'envergure du projet. Au centre du tapis de base, des kilomètres de barres d'armature étaient pliées en une élégante toile d'araignée s'étendant sur 60 mètres. Un jour, tout ça sera coulé dans du béton, avec le tokamak au centre. Après une pause au bord, tout le monde a soudainement disposé une rangée de planches de bois vers le rayon intérieur de la toile d'araignée, lieu du centre du tokamak: Ground Zéro. Difficile de savoir pourquoi nous allions tous là-bas; le centre n'offrait pas de meilleure vue de l'énorme dalle que les côtés. Il y avait peut-être l'impulsion humaine, être juste là, où quelque chose de notable pourrait se passer. La fusion, la source d'énergie la plus abondante dans l'univers, n'a jamais produit la moindre énergie sur Terre. [...]

Ce soir-là, dans un café à proximité du site, j'ai pris un verre avec un physicien d'ITER qui était abattu, craignant que la machine ne marche jamais. Pourquoi il restait dans le projet, il ne pouvait le dire. Mais quelques semaines plus tard, après réflexion, il m'a dit que son moral était remonté. Il était venu là jouer son rôle, à la fois petit et sublime, semblable à un tailleur de pierre qui peine des années sur la cathédrale de York Minster (commencé en 1220, terminé en 1472) sans avoir jamais vu le travail achevé. « Je m'attends maintenant à consacrer toute ma carrière professionnelle avant de voir un plasma décent dans ITER » m'a-t-il dit. « Ça ne m'embête pas. Il y a eu de nombreux scientifiques avant moi, travaillant pour un même objectif et n'ayant rien vu. Martin Luther King avait un rêve il y a cinquante ans. Il n'a pas vécu assez longtemps pour voir ce rêve réalisé. Mais, grâce à lui, nous avons fait des progrès merveilleux pour que ce rêve s'accomplisse. Les scientifiques travaillant sur ITER ont un rêve qui pourrait être aussi puissant que celui de Martin Luther King – pas pour l'égalité humaine, mais pour l'indépendance énergétique. Nous ne verrons pas la réalisation de ce rêve. Mais chaque jour je vais au travail avec un sourire caché, car je sais que j'aide à ce qu'un jour notre rêve ITER se réalise ».

voir aussi : <http://www.newyorker.com/news/daily-comment/how-to-fix-iter>