

COMME UN BATEAU DANS UNE BOUTEILLE



DANS CE NUMÉRO

Page 2 Plasmas: la matière dans un drôle d'état

Page 3 Comme un bateau dans une bouteille

Page 4 28 juin 2005: l'heure du choix

EDITORIAL

Dans le monde de la fusion, le mot « plasma » est de ceux que l'on entend le plus souvent. Mais qu'est-ce qu'un « plasma » ? C'est ce que nous tentons d'expliquer en page 2 de ce 7^{ème} numéro d'*ITER le Magazine*. Et puisqu'il fait très chaud en ce mois de juillet 2015, partons, avec un peu de retard, pour la Finlande. Alors que le pays sortait de l'hiver arctique, une opération capitale pour ITER se déroulait, assez semblable à celle qui consiste à insérer un bateau dans une bouteille (page 3).

Quatre mois après qu'un nouveau directeur général, le Français Bernard Bigot, a été nommé à la tête d'ITER Organization, ce numéro célèbre un anniversaire: il y a dix ans, le 28 juin 2005, les membres d'ITER décidaient à l'unanimité de construire à Saint-Paul-lez-Durance (13) la plus grande machine de fusion au monde.

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

PLASMAS: LA MATIÈRE DANS UN DRÔLE D'ÉTAT

L'Univers visible est presque tout entier constitué de plasma, et c'est dans des plasmas très chauds que l'on crée les conditions propices à la fusion. Depuis plus d'un demi-siècle, les physiciens explorent ce « quatrième état de la matière » pour en comprendre les dynamiques et tenter d'en organiser le chaos.

Le moins connu des quatre états de la matière est aussi, paradoxalement, le plus répandu : 99,99% de l'univers visible – les étoiles, le milieu intergalactique... – se trouve à l'état de plasma. Dans notre système solaire, qui compte pourtant quatre planètes bien solides (dont l'une, la nôtre, regorge d'eau liquide) et quatre géantes gazeuses, le pourcentage est à peine moindre : le Soleil, énorme sphère de plasma brûlant, concentre 99,85% de la masse totale du système.

Un plasma est un gaz dont les atomes, sous l'effet de la température, ont été dissociés. Alors que dans les trois autres états de la matière (solide, liquide et gazeux) le noyau et les électrons des atomes sont étroitement liés, ils cessent de l'être dans un plasma. Changeant de nature, le gaz « ionisé » (autre appellation du plasma) change radicalement de propriétés.

Lorsque l'idée naquit de reproduire les réactions physiques qui se surviennent au cœur du Soleil et des étoiles pour en exploiter la prodigieuse énergie, deux propriétés des plasmas se révélèrent d'une importance capitale : la conductivité électrique et la sensibilité aux champs magnétiques. Alors qu'un gaz est un isolant, un plasma est au contraire un bon conducteur de l'électricité que l'on peut confiner et « modeler » par un champ magnétique.

L'astrophysicien Lyman Spitzer (1914-1997), au début des années 1950, comprit tout le parti que l'on pouvait tirer de ces propriétés : en portant un plasma d'hydrogène à très haute température et en le confinant dans un champ magnétique, on pourrait créer des conditions propices à la fusion des noyaux – on recréerait la réaction nucléaire qui, depuis des milliards d'années, inonde l'univers de lumière et d'énergie. Pour rappeler que son inspiration était née dans les étoiles, Spitzer baptisa « stellarator » la machine qu'il construisit en 1951 à l'Université de Princeton aux Etats-Unis.

Dans la communauté scientifique, beaucoup pensaient alors que la maîtrise de l'énergie de fusion serait réalisée à brève échéance. Ce que les chercheurs n'imaginaient pas c'est à quel point les plasmas allaient se révéler difficiles à dompter – instables et capricieux, imprévisibles, déroutants, ils se vidaient

presque instantanément de leur énergie, échappant aux champs magnétiques dans lesquels on tentait de les confiner.

On mesura alors à quel point cet étrange état de la matière était mal connu. Et l'on entreprit de l'explorer, d'en comprendre les dynamiques et de tenter d'en organiser le chaos. La physique des plasmas était née ; son étude occuperait trois générations de physiciens.

Parallèlement aux recherches fondamentales, les chercheurs des grandes nations développées, Etats-Unis, France, Royaume-Uni, Union soviétique, Allemagne, Japon, mettaient au point des « machines de fusion » (machines ouvertes à miroir, theta-pinch, machines toroïdales fermées...) dont les performances, au final, se révélaient toujours décevantes. L'enjeu toutefois était trop immense pour laisser le découragement l'emporter.

Au début des années 1960 un type de machine nouveau, conçu par des chercheurs soviétiques, vint tout bouleverser : avec le « tokamak » (acronyme russe de « chambre toroïdale, bobines magnétiques), la performance était enfin au rendez-vous. Dans le tokamak T-3 de l'Institut Kurchatov, on avait pu porter le plasma à une température de l'ordre de 10 millions de degrés C et, plus impressionnant encore pour un physicien des plasmas, le temps de confinement de l'énergie avait dépassé 10 millisecondes, dix fois plus que ce que l'on avait obtenu jusqu'alors.

La descendance de T-3, incarnée dans des centaines de machines de plus en plus puissantes et de plus en plus performantes, allait tenir sa promesse : les tokamaks produisent aujourd'hui des plasmas de plusieurs centaines de millions de degrés et, dans ITER, le plus grand tokamak jamais construit, le temps de confinement de l'énergie sera de l'ordre de plusieurs secondes – suffisant pour que les réactions de fusion s'amorcent et libèrent leur formidable énergie.

Le plasma lui, garde toujours une part de ses mystères. Mais les physiciens ont appris à composer avec lui. Dans les tokamaks contemporains, le plasma a été « discipliné » par des systèmes magnétiques sophistiqués et l'on sait désormais anticiper, canaliser et atténuer ses brutales sautes d'humeur.

Plus de soixante ans se sont écoulés depuis la géniale intuition de Spitzer. Avec ITER, pour la première fois, l'humanité va s'approprier le feu des étoiles.

B. Bigot: « Une seule entité, un but commun »

Après l'ambassadeur Kaname Ikeda (2006-2010) et le physicien Osamu Motojima (2010-2015), tous deux japonais, un troisième directeur général, français cette fois, a été nommé à la tête d'ITER Organization le 5 mars 2015.

Bernard Bigot, 65 ans, qui a dirigé et développé pendant douze ans la recherche nucléaire en France, d'abord comme Haut-commissaire à l'Energie atomique puis en tant qu'Administrateur général du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), était également, depuis 2008, le haut-représentant pour l'accueil en France du programme ITER.

Directeur de cabinet de la ministre déléguée à la Recherche et aux nouvelles technologies, Claudie Haigneré, de 2002 à 2004, il avait joué un rôle clé dans la promotion de la candidature du site de Cadarache (voir article en page 4).

Familier d'ITER, de ses enjeux et de ses problématiques, Bernard Bigot a pris ses fonctions au moment où s'ouvre un nouveau chapitre dans l'histoire du programme : la montée en puissance de la construction sur le site de Saint-Paul-lez-Durance et celle de la fabrication des composants de l'installation et de la machine dans les usines des pays membres.

« Plus de 7 milliards d'euros sont aujourd'hui engagés dans ces activités, explique le nouveau directeur général. Nous devons donc créer les conditions d'une gestion efficace et intégrée de l'ensemble du programme ITER. »

Car le programme ITER forme un tout, qui doit être pensé et géré comme tel. « Que l'on appartienne à l'Équipe centrale d'ITER Organization, ici à Saint-Paul-lez-Durance, ou que l'on travaille pour l'une des sept Agences domestiques des membres d'ITER, nous devons fonctionner comme une seule entité, tendue vers un but commun. »

Cette profession de foi se traduit déjà dans les faits : mise en place d'un Comité exécutif associant la direction de l'Équipe centrale et celles des différentes agences domestiques ; créations d'équipes-projet mixtes ITER Organization-Agences domestiques, etc.



Pour Bernard Bigot, qui a pris ses fonctions le 5 mars 2015, ITER forme un tout, qui doit être pensé et géré comme tel.

« Je ne minimise pas les difficultés, confie Bernard Bigot, mais elles sont d'une nature industrielle et organisationnelle beaucoup plus que scientifique ou technologique. Les enjeux de la fusion sont tels que nous n'avons pas le droit de ne pas réussir. »

COMME UN BATEAU DANS UNE BOUTEILLE



Dans le grand hall du Centre de recherches techniques de Finlande (VTT), à Tampere, la « cassette » de 10 tonnes vient d'être insérée dans la chambre à vide... aussi délicatement qu'un bateau dans une bouteille.

À Tampere, une petite ville de Finlande à plus de deux heures de route au nord d'Helsinki, une opération capitale pour ITER est en train de se dérouler.

Venus de Barcelone, siège de l'agence européenne⁽¹⁾ pour ITER, et de Saint-Paul-lez-Durance (13) où se construit l'installation, une dizaine de spécialistes ont fait le déplacement. Ils vont assister au couronnement de près de vingt années d'efforts : l'insertion, au travers d'un étroit tunnel, d'une pièce d'une dizaine de tonnes dans une réplique de la chambre à vide d'ITER.

On pense à ces vieux marins qui parvenaient à faire entrer une maquette de bateau, toutes voiles déployées, dans une bouteille. Eux aussi devaient soigneusement anticiper leurs mouvements et calculer leurs gestes au millimètre près. Mais une fois dans la bouteille, le bateau n'en sortait plus. La pièce de dix tonnes, elle, est destinée à être remplacée au moins une fois au cours de la période d'exploitation d'ITER. Après l'avoir insérée, il va donc falloir démontrer qu'on peut l'extraire.

Cette pièce massive est l'une des 54 « cassettes » qui constituent le divertor du tokamak ITER – un anneau de 9 mètres de diamètre situé dans la partie basse de la chambre à vide et directement exposé au feu du plasma.

Lors du montage du tokamak, les cassettes devront être installées une à une après que la chambre à vide qui leur sert de support aura été assemblée. La difficulté est double, liée à l'étroitesse du chemin d'accès et à l'impossibilité de visualiser la progression de la cassette à l'intérieur du tunnel.

L'opération qui se prépare, ce 26 février 2015 dans le grand hall du Centre de recherches techniques de Finlande (VTT), est la dernière d'une série entamée il y a quatre ans. « La dernière et la plus délicate », précise Mario Merola, responsable des éléments internes du tokamak à ITER Organization. *Nous allons simuler l'installation d'une des trois 'cassettes centrales' qui permettent de fermer l'agencement circulaire du divertor – de boucler la boucle en quelque sorte.*

Un système robotisé long de 22 mètres, équipé d'un rail et animé par des moteurs hydrauliques (le *Cassette Mover*) va progressivement amener la cassette jusqu'à son ancrage dans la structure de la chambre à vide. Les derniers mètres du parcours sont masqués aux regards comme ils le seront lors de la phase d'installation réelle, lorsque la cassette cheminera par l'une des « pénétrations » qui donnent accès à la chambre à vide du tokamak. Entre la pièce de dix tonnes et les parois de cet étroit passage, l'espace n'est que de quelques millimètres.

Dans une pièce aveugle, pas très loin du *Cassette Mover*, Hannu Saarinen,

ingénieur-chef au Centre de recherches VTT, a les yeux rivés sur une batterie d'écrans. Sur le plus large d'entre eux, la progression de la cassette s'affiche, « visualisée » sous plusieurs angles différents. L'image ne provient pas d'une caméra – impossible à installer compte tenu de l'exiguïté du passage – mais d'une restitution en réalité virtuelle, tridimensionnelle et actualisée en temps réel par un système de capteurs.

Grâce à ce flux d'information, Hannu sait à chaque instant où et dans quelle position se trouve la cassette, quelles sont les forces qu'elle exerce sur la structure, quelles infimes déformations son déplacement lui fait subir. Plus de 80% de l'opération est programmée et se déroule de manière automatique. Le joystick que Hannu garde à portée de main ne sert qu'à des « *petits ajustements.* »

Hannu, son joystick et ses écrans se trouvent à quelques dizaines de mètres de la cassette et de la machine qui la déplace. Mais ils pourraient tout aussi bien être séparés par des millions de kilomètres de vide spatial ou des milliers de lieues de profondeurs marines. « *C'est tout l'enjeu de ce type de système,* explique-t-on chez VTT. *Nous l'avons mis au point pour ITER, mais il peut être appliqué au pilotage d'un robot sur une planète ou un astéroïde distants ou d'un sous-marin sur le plancher océanique.* »

Dans les « conditions de laboratoire » du Centre de recherches techniques de Finlande, tout s'est déroulé de manière parfaite. Mais saura-t-on reproduire ce sans-faute lors de l'assemblage de la machine, dans le contexte d'un vaste chantier industriel ? C'est tout l'enjeu de la phase de développement qui s'ouvre aujourd'hui : il s'agit maintenant, sur la base de l'expérience acquise, de développer une robotique adaptée aux exigences d'un « vrai » réacteur de fusion et aux contraintes de l'environnement nucléaire.

« *Ce que nous avons vu ici,* résume Carlo Damiani, le responsable des systèmes robotisés à l'Agence européenne pour ITER (Fusion for Energy), *c'est le début d'une grande aventure technologique, dont ITER est le moteur. L'industrie, les PME, les laboratoires vont devoir mobiliser leur savoir-faire, leur créativité et leur capacité d'innovation pour concevoir les systèmes des futurs réacteurs de fusion industriels.* »

Au-delà d'ITER, au-delà même de la fusion, le champ d'application de ces systèmes est immense. Comme dans d'autres domaines – les aimants supraconducteurs, la cryogénie, les matériaux – les exigences d'ITER ont porté une technologie aux limites de sa faisabilité.

(1) L'Europe contribue à hauteur de 250 millions d'euros aux systèmes robotisés d'ITER, dont 40 millions destinés aux systèmes d'installation/remplacement des cassettes du divertor.

28 JUIN 2005: L'HEURE DU CHOIX

Le 28 juin 2005, il y a tout juste dix ans, ITER trouva enfin un toit. A Moscou, où les ministres et vice-ministres des partenaires du programme s'étaient réunis, un consensus s'était dégagé : le réacteur de fusion expérimental que la Chine, l'Union européenne, le Japon, la Corée, la Russie et les Etats-Unis avaient conçu (l'Inde les rejoindrait à la fin de l'année) serait construit à Cadarache, un lieu-dit de la petite commune (980 habitants) de Saint-Paul-lez-Durance, à quelque 75 kilomètres au nord de Marseille.

Pour tous ceux qui s'intéressaient à la fusion, Cadarache était un nom familier. Dans ce vaste centre de recherche dédié aux réacteurs nucléaires, le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) avait construit, à la fin des années 1980, le tout premier tokamak équipé d'aimants supraconducteurs. Tore Supra avait réalisé en 2003 une décharge d'une durée record de six minutes et trente secondes – une éternité dans le monde des plasmas.

Au terme de deux années de négociations, c'était donc le site que proposait l'Union européenne qui avait été choisi à l'unanimité pour accueillir le plus grand tokamak du monde.

La décision prise à Moscou, vingt ans après le lancement du projet, marquait le terme d'un processus qui avait été long, difficile, et parfois douloureux.

Tout avait commencé au printemps 2001 quand les plans détaillés de la machine (*ITER Final Design Report*) étaient en cours de finalisation.

Cette même année, au mois d'avril, un groupe d'industriels et de scientifiques canadiens, désireux d'intégrer le programme ITER, avait proposé d'accueillir l'installation sur le site de Clarington, dans l'Ontario, à une vingtaine de kilomètres à l'est de Toronto. « Pour la première fois depuis le lancement du programme en 1985, se souvient Jean Jacquinot, l'un des experts impliqué dans les négociations, le nom d'ITER se trouvait associé à un lieu précis. La proposition canadienne, même si elle n'émanait pas du gouvernement, a contribué à renforcer la crédibilité du programme. »

De fait, l'option Clarington allait agir comme un déclencheur et un accélérateur. A Cadarache, dès le milieu des années 1990, un groupe d'experts avait entrepris des « études de site » préliminaires. En 2003, après avoir été actualisées, elles donnèrent lieu à une proposition formelle – de la France à l'Europe d'abord, puis de l'Europe aux membres d'ITER.

Le 30 juin, deux jours après la décision historique, le président Chirac était à Cadarache. Personne n'avait « gagné » ; personne n'avait « perdu ». Les membres d'ITER avaient démontré leur capacité à surmonter leurs divergences et à concevoir une solution acceptable par tous.



Janez Potočnik, le commissaire européen pour la Science, et Noriaki Nakayama, le ministre japonais de la Science et de la Technologie. Dix-huit mois de négociations avaient été nécessaires pour décider qui, de l'Europe ou du Japon, accueillerait l'installation ITER.

L'Espagne entre temps était entrée dans le jeu, proposant le site de Vandellòs, sur la côte méditerranéenne au sud de Tarragone. Quant au Japon, il avançait la candidature de Rokkasho-Mura, dans la préfecture d'Aomori au nord du pays, à un peu plus d'une heure de vol de Tokyo.

Tous les sites proposés étaient des « sites nucléaires », hébergeant centre de recherche comme Cadarache ; centrale de production, comme Clarington et Vandellòs ; usine d'enrichissement de l'uranium, installation d'entreposage de déchets et unité de retraitement du combustible usé comme Rokkasho-Mura.

A la fin de l'année 2003 les options demeuraient ouvertes... mais il y avait trois sites de trop. En Europe, la question fut résolue le 26 novembre quand les 25 ministres de la Recherche des pays membres se prononcèrent à l'unanimité pour Cadarache. A titre de compensation, l'Espagne obtenait le siège de « l'agence domestique » chargée de gérer la contribution européenne à ITER. Quant au consortium canadien, faute d'un soutien suffisant du gouvernement d'Ottawa, il se retirait des négociations au mois de décembre.

L'année 2003 tirait à sa fin et il était temps de choisir entre l'Europe et le Japon. Quatre jours avant Noël, les ministres des membres d'ITER se retrouvèrent à Reston, un faubourg de la capitale fédérale américaine. La réunion s'annonçait décisive – des équipes de télévision campaient devant les grilles de Cadarache, journalistes et négociateurs ne quittaient plus leur téléphone – mais rien de décisif ne devait sortir de Reston.

Rien... à l'exception d'un communiqué au ton étonnamment optimiste. « Les six parties ont obtenu un fort consensus sur un grand nombre de sujets. Nous avons deux excellents sites pour ITER, excellents au point que de nouvelles évaluations s'avèrent nécessaires pour prendre une décision consensuelle. »

Dix-huit mois allaient encore s'écouler avant de parvenir à cette décision. Pour sortir de l'impasse, on élaborait un programme baptisé « Approche élargie », au terme duquel le partenaire qui ne serait pas retenu (le « non-hôte ») se verrait attribuer, en compensation, une installation de recherche sur les matériaux de fusion ; une machine « satellite » d'ITER ; un centre de calcul pour les sciences de la fusion ; un autre pour la télémanipulation.

Tout au long de l'année 2004, les rencontres se succédèrent ; côté européen comme côté japonais, la classe politique et les médias étaient mobilisés ; éditoriaux et « opinions », de plus ou moins bonne foi, se multipliaient dans les journaux. Le printemps 2005 fut celui des déclarations sibyllines, des allusions, des ballons d'essai...

Le 28 juin 2005 enfin, la décision si longtemps attendue fut prise et rendue publique par un communiqué commun du Commissaire européen pour la Science, le Slovène Janez Potočnik, et du ministre japonais des Sciences et Technologies, Noriaki Nakayama. Ce dernier déclarait : « Ce jour est à la fois triste et heureux pour le Japon. Cependant, ce projet est d'une telle importance que nous avons décidé de surmonter notre déception pour la transformer en enthousiasme. »

Deux jours plus tard, le président Chirac était à Cadarache pour célébrer l'événement. Personne n'avait « gagné » ; personne n'avait « perdu ». Chinois, Européens, Japonais, Coréens, Russes et Américains avaient démontré leur capacité à surmonter leurs divergences et à concevoir une solution acceptable par tous. Dix ans plus tard, cette approche et cet état d'esprit demeurent.