

La face cachée d'ITER

Jean-Pierre Petit

Ancien directeur de recherche au CNRS

Jppetit1937@yahoo.fr

ITER est un tokamak géant, c'est à dire une chaudière en forme de tore, à l'intérieur de laquelle un mélange, d'abord de deutérium-deutérium, puis de deutérium-tritium sera porté à une température de fusion thermonucléaire. Cent cinquante millions de degrés pour le premier mélange, cent pour le second.

Pourquoi ne pas démarrer directement avec le second mélange ? Parce que le tritium est un corps radioactif, ayant une période de 12,3 années. Comme celui-ci a une fâcheuse tendance à se loger n'importe où, sa présence interdirait vite l'inspection de la chambre par des êtres humains. Eh puis il est beaucoup plus coûteux que le deutérium.

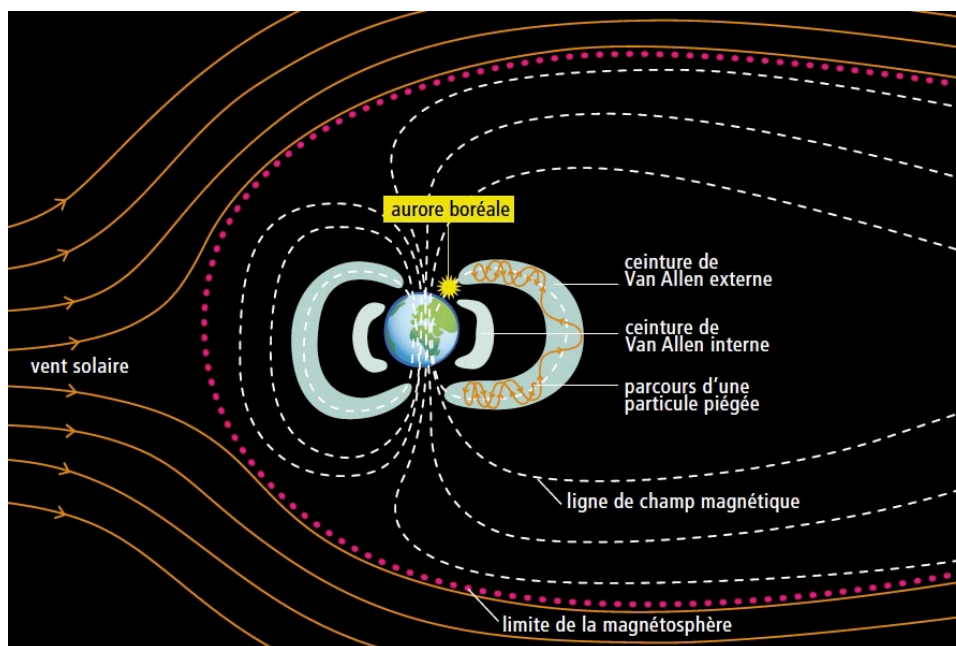
La fusion a été obtenue, avec une production notable d'énergie, 16 MW, dans la machine anglaise JET en 1997. Là encore, l'essentiel des expériences a été, et continue d'être mené avec un mélange deutérium-deutérium, les manip D-T n'ayant été faites, en petit nombre, que pour valider la formule.

Le projet ITER est né d'une rencontre entre deux chefs d'Etat, Reagan et Gorbatchev, en 1984 à Genève. L'idée d'un projet d'envergure internationale, concrétisant le thème d'un « atome pour la paix » est né ce jour-là. L'atome pacifique, c'était la fusion d'isotopes de l'hydrogène. Depuis l'après guerre un grand nombre de manip avaient été montées, qui se sont souvent révélées décevantes. A cette époque, seule la formule du tokamak, initialement suggérée par Andréi Sakharov et Igor Tamm, puis développé par Lev Artsimovitch semblait pouvoir répondre à cette demande.



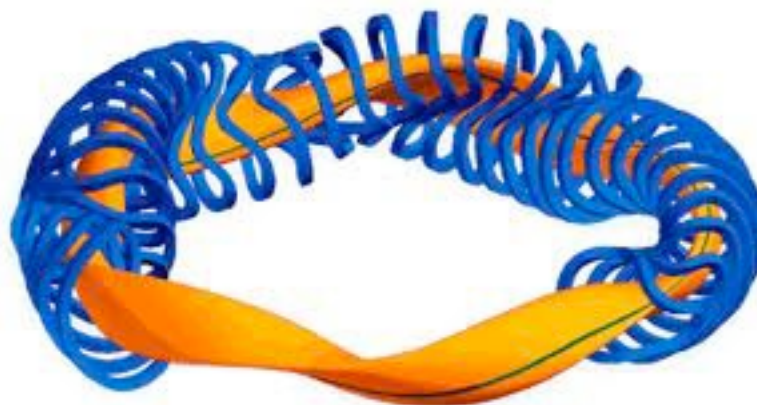
Lev Artsimovitch

Antérieurement à l'émergence de cette idée du tokamak, que les russes gardèrent au départ secrète jusque 1958, l'idée de maintenir prisonnières des particules chargées à l'aide d'un champ magnétique convenablement agencé émergeait de l'astrophysique, même si la réalité d'un tel confinement ne fut révélée que beaucoup plus tard, par des sondes spatiales. La Terre possède un champ magnétique dipolaire. Ses lignes de champ émergent des pôles nord et sud. A mi-parcours, elles s'évasent. De ce fait le champ magnétique est plus intense près des pôles. Cette structure se prête au piégeage d'un plasma raréfié. Les particules s'enroulent en spiralant autour des lignes de champ magnétique. Lorsqu'elles parviennent au voisinage des pôles, elles rebroussement chemin. Elles font ainsi l'aller-retour entre ces deux régions, constituant une structure découverte par James Alfred Van Allen en 1958 en se fondant sur des mesures effectuées par des compteurs Geiger embarqués dans les satellites Explorer 1 et Explorer 3.



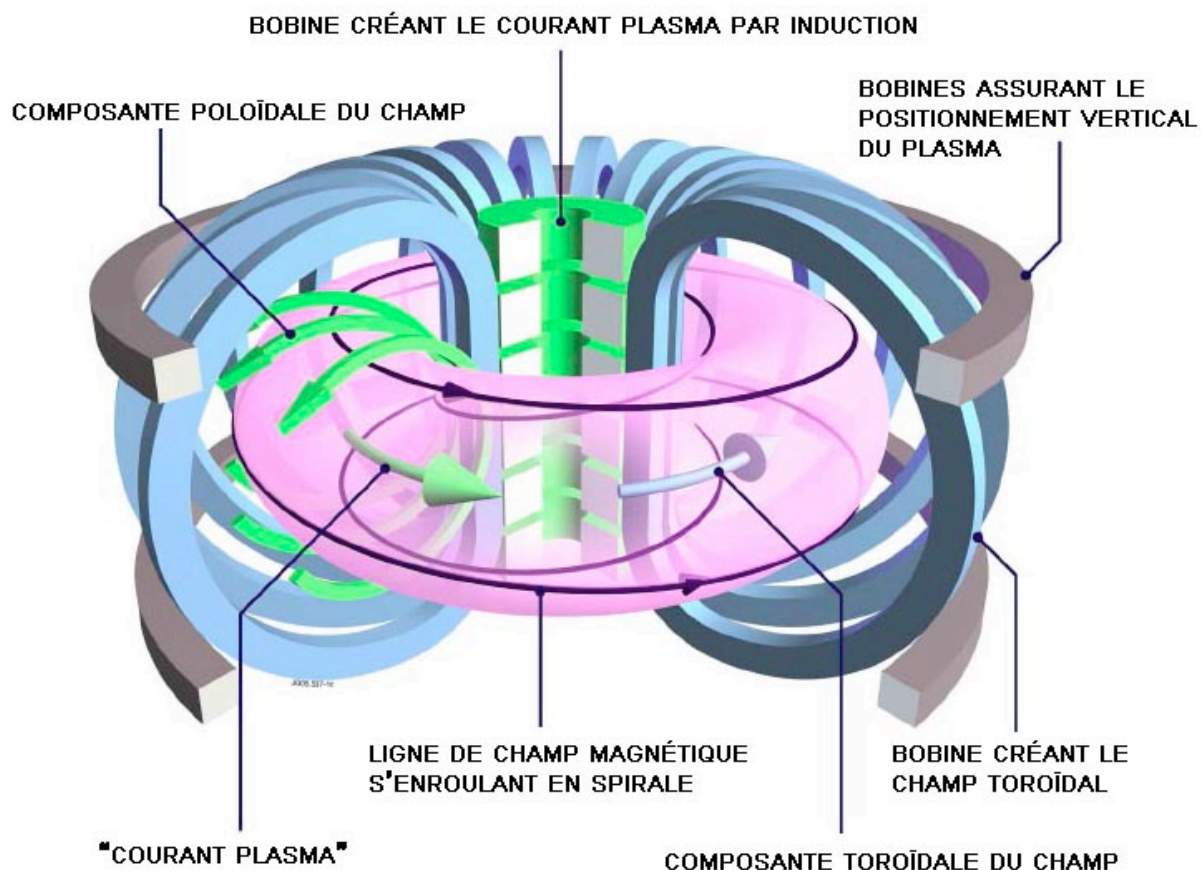
Cette évocation nous fait comprendre deux concepts. Le premier est que dans un plasma raréfié les particules chargées cheminent en spiralant autour des lignes de force du champ magnétique, le second que lorsque ces particules rencontrent une région où la valeur de ce champ se renforce, celle-ci se comporte alors comme un *miroir magnétique*.

La première idée qui émergea consiste à enfermer un gaz raréfié dans une enceinte en forme de tore, sur laquelle s'appuyaient des solénoïdes. Le champ, qualifié de toroïdal, est ainsi plus intense près de la paroi. Par un moyen quelconque on peut ioniser ce gaz sous basse pression. Le gradient de champ magnétique tient alors celui-ci à distance des parois. Mais c'est là que les choses se compliquent. A cause de cette forme torique, comme les bobines sont plus resserrées près de l'axe de la machine, le champ B est plus intense dans cette région. Ceci influe sur les trajectoires des particules chargées, dans le sens haut-bas. Pour obtenir un plasma homogène il serait alors nécessaire de le brasser, comme le fait une cuisinière dans une marmite. La première idée, fort compliquée, consiste à donner à la chambre, et aux bobinages, une forme tourmentée qui fasse que le plasma circule en se vrillant. C'est le Stellarator :

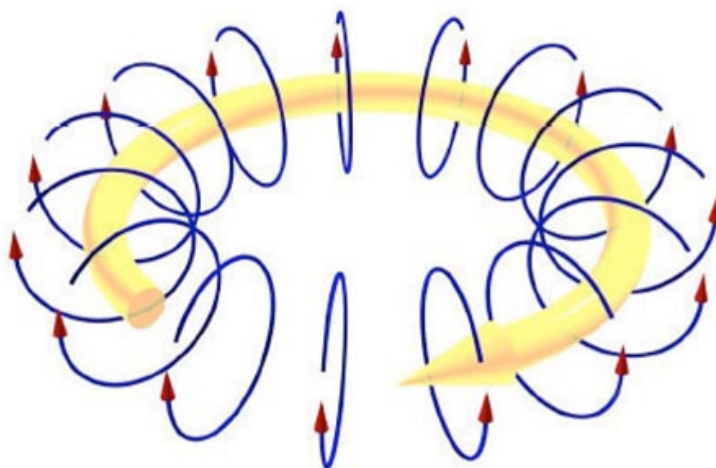


Le Stellarator. En bleu, les bobines, en jaune, le plasma.

Très vite, les Russes imaginent quelque chose de beaucoup plus simple. Il suffit de faire circuler un courant dans le plasma lui-même. Celui-ci crée ainsi son propre champ, qualifié de poloïdal qui, combiné au champ toroïdal donne au résultat des lignes de champ magnétiques s'enroulant autour de « l'âme du tore ». Comme on sait que les particules chargées sont guidées par ces lignes de champ, le brassage haut-bas du plasma est ainsi assuré. Au résultat, on obtient le schéma suivant :



Dans la mise en marche d'un tokamak on crée d'abord le champ magnétique toroïdal à l'aide des grosses bobines bleues. La direction de cette composante du champ est indiquée par une flèche de même couleur, à l'intérieur du tore de plasma rosâtre. Puis le courant monte, dans la bobine verte, qui crée un champ variable dont les lignes traversent le plasma. Par effet d'induction, un « courant plasma » apparaît (flèche verte), qui crée à son tour une composante poloïdale du champ magnétique.



En jaune, le courant plasma (induit). En bleu, le champ poloïdal qu'ils créent

Ce champ poloïdal est beaucoup plus faible que le champ toroïdal, ce qui fait que le degré d'enroulement des lignes de champ magnétique est modéré. Si on suit la ligne de champ présentée dans le dessin précédent, il lui faut effectuer quatre tours pour se boucler sur elle-même. Voilà donc le schéma de ce tokamak inventé par les Russes, qui assure un brassage du plasma, par rotation, les particules chargées suivant ces lignes de force spiralées.

Ceci étant, ce *courant plasma* ne se maintiendra que tant que la plasma sera soumis à un champ magnétique variable, croissant. Si on se contente d'expériences de courte durée, ceci peut convenir. Mais un engin comme ITER est conçu pour pouvoir assurer un fonctionnement *en régime permanent*. Après avoir été établi, ce courant plasma est entretenu à l'aide d'ondes, créées par un système qu'on appelle *current drive*.

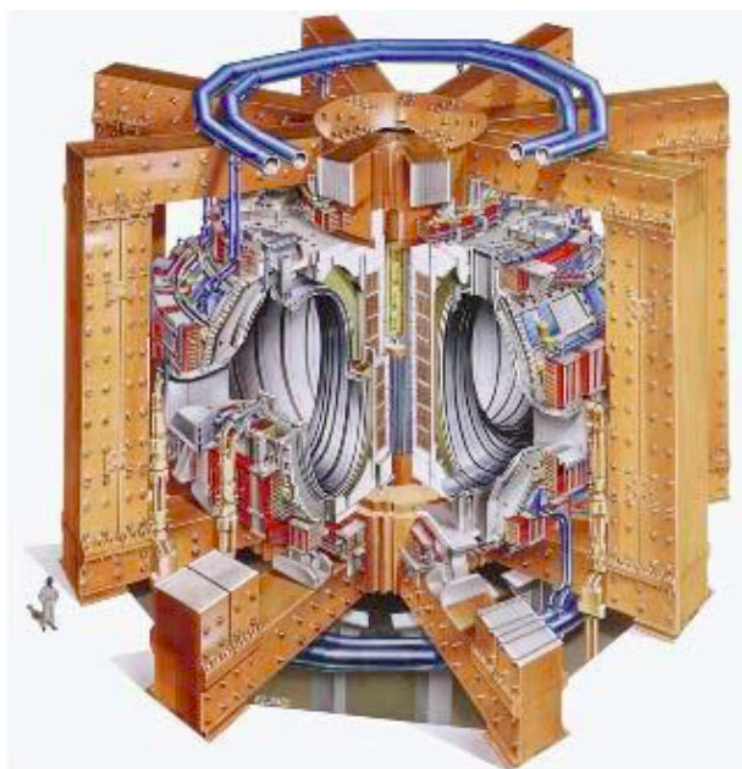
Mais avant que ce régime soit établi, on assiste à un étrange phénomène. Le plasma ayant été pré-ionisé par de la HF, est parcouru par un courant qui atteint 1,5 millions d'ampères sur la machine française Tore Supra, 4,8 millions sur la machine JET et montera jusqu'à 15 millions d'ampères sur ITER. Les électrons circulent alors à 200 km/s. Les collisions entre les électrons et les « espèces lourdes » se traduisent par un transfert d'énergie qui n'est rien d'autre que l'effet Joule. Cette énergie thermique est dissipée de deux façons. A la paroi, dans une couche de 5 cm d'épaisseur, par « transfert turbulent », et par rayonnement, le gaz d'électron émettant celui-ci à travers un mécanisme de *rayonnement de freinage*, que les physiciens préfèrent en général désigner selon la dénomination allemande *bremsstrahlung*. Quand les électrons passent à proximité des ions, ils sont déviés et émettent alors un photon. L'intensité de ce rayonnement croît comme le carré de la charge Z de l'ion qui provoque cette inflexion de la trajectoire de l'électron.

Le phénomène étrange est que plus les électrons vont vite et plus faible est leur probabilité d'interagir avec les ions. On parle de *section efficace de collision*, laquelle varie comme l'inverse de la puissance quatrième de la vitesse de l'électron. Celle-ci croît comme la racine

carrée de la température du *gaz d'électrons libres*. Quand celle-ci dépasse dix millions de degrés, les collisions entre électrons et ions se font rares. En conséquence ce plasma devient *non résistif* : sa résistivité électrique devient négligeable. Aussi pourra-t-on entretenir ce courant avec une dépense d'énergie relativement faible.

Avec ce système de tokamaks, on parvient à porter un plasma à une température de quelques dizaines de milliers de degrés, ce qui est insuffisant pour obtenir l'ignition thermonucléaire. Il faut adjoindre des systèmes de chauffage additionnels : HF et injection de neutres (des noyaux ionisés, accélérés, puis neutralisés juste avant leur injection dans la chambre, sans quoi le champ magnétique se comporte pour eux comme un mur infranchissable).

Les européens conjuguent leurs efforts et ainsi naît en Angleterre le Joint European Torus, le JET, qui fonctionna pour la première fois en 1983. Les aimants de celui-ci ne sont pas supraconducteurs mais permettent de monter à 3,85 teslas. Le fait de créer un champ intense est important, car ceci permettra, à la température fatidique de fusion, de contenir un plasma plus dense (en fait *moins raréfié*, puisque la pression de remplissage de la chambre est de l'ordre de quelques dix millièmes de millimètre de mercure). Grâce à de puissants systèmes de chauffage additionnels, une température de 150 millions de degrés est atteinte et dans cette machine de l'énergie de fusion est produite, en quantité notable : 16 MW, pendant une courte seconde, en 1997.



Le tokamak JET. 100 m³, champ de 3,85 teslas

Ce n'est pas encore un générateur d'énergie, puisque la quantité d'énergie (thermique) produite par fusion n'atteint que 65 % de celle qui se trouve injectée dans l'appareil. Mais l'événement, longtemps attendu, est considéré comme un immense succès, comme une chance donnée à l'humanité.

De leur côté les Français obtiennent des résultats complémentaires en réussissant à créer, à l'aide de bobinages supraconducteurs, un champ de 3,85 teslas dans la chambre torique de 25 mètres cubes de leur tokamak Tore Supra, implanté dans le site de Cadarache, dans le sud de la France. La température (quelques dizaines de milliers de degrés reste très inférieure à ce qui pourrait permettre d'obtenir la fusion, mais un record de durée est obtenu (6 minutes en 2003), ce qui permet d'envisager l'obtention d'un éventuel régime permanent.

Ces deux résultats donnent le top départ à un projet pharaonique : ITER, International (Thermonuclear Experimental Reactor). Le Japon et la France se disputent l'honneur de voir cette machine extrême, prestigieuse, construite sur leur sol. En France Bernard Bigot, à l'époque chef de cabinet du ministre Claudie Haigneré et René Pellat, Haut commissaire à l'Energie atomique militent en ce sens. La décision collective de construire ITER est prise en 2005. La France gagne la partie et le choix du site de Cadarache est retenu. Les ingénieurs se mettent alors sur leur planche à dessin et un énorme travail de conception, sur le papier, est effectué, dont des dizaines de millions de personne ont pu voir le résultat, sous forme d'images de synthèse.

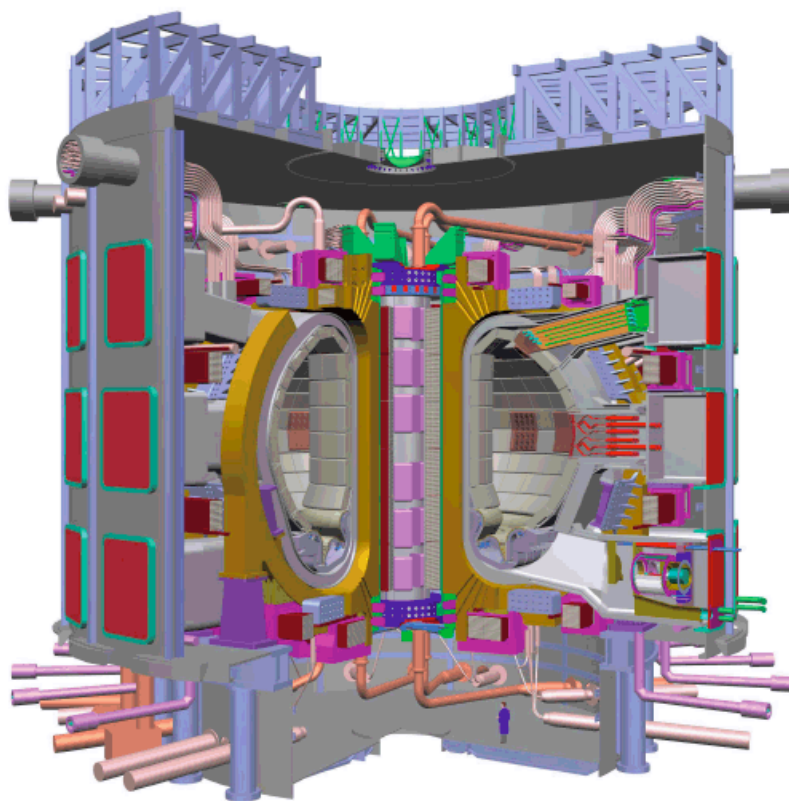
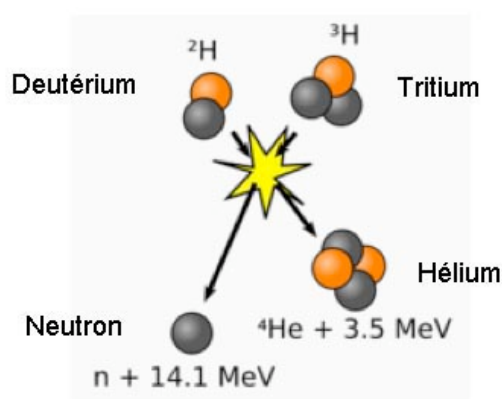


Schéma en coupe d'ITER (Source : ITER Organization)

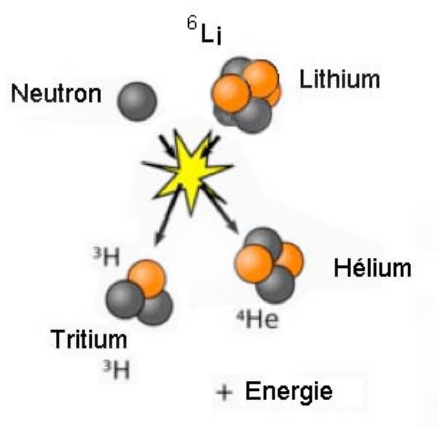
La taille, minuscule, du personnage, en bas de la figure, donne l'échelle. On retrouve les composants de base. D'immenses bobines supraconductrices, fournissent un champ toroïdal de 5,3 teslas, et leur coût représente à lui seul 40 % du prix de la machine. A l'intérieur de la chambre débouchent les systèmes de chauffage et de mesure, qui la ceinturent. Au fond de l'appareil, court la double rigole d'un divertor, au fond duquel s'effectue le pompage, pour extraire la « cendre » de la réaction : l'hélium produit par la réaction de fusion D-T, et pour débarrasser le plasma de ses polluants lourds, issus d'arrachements de particules métalliques à la paroi. Devant encaisser la charge thermique la plus importante, ce *divertor* est tapissé de tungstène, qui présente la plus forte température de fusion : 3000° (on en fait les filaments des

lampes à incandescence). Inconvénient : ses ions peuvent porter jusqu'à 60 charges électriques, et deviennent alors la cause d'un puissant refroidissement radiatif. Voir plus haut.

Juste derrière une « première paroi », se trouve une « couverture tritigène », destinée à régénérer en continu le tritium consommé (100 grammes par jour). Cet isotope de l'hydrogène n'existant dans la nature qu'à l'état de traces devra être fourni par les Canadiens, jusqu'à ce que sa régénération puisse être assurée. La réaction de fusion deutérium-tritium produit *un* neutron de 14 MeV.



En faisant interagir celui-ci avec un alcalin, le lithium, selon la réaction :



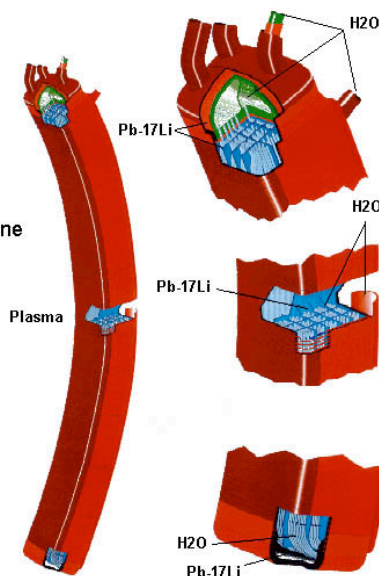
La réaction « tritigène », permettant de régénérer le lithium

on produit *un* nouvel atome de tritium. Cette réaction, exothermique, remplit une double fonction. Elle transforme l'énergie des neutrons incidents en chaleur, tout en les absorbant. Un mélange liquide, sous 300°C de lithium-plomb joue le rôle de fluide caloporteur, l'eau pressurisée complétant cet *échangeur*. Mais tous les neutrons de fusion sont loin d'être récupérés. Il faut donc un *multiplicateur de neutrons*. Il se trouve que le plomb peut assurer cette fonction, et les premières cellules tritigènes envisagées, par le CEA, ont la forme de « bananes » où circule un mélange de lithium et de tritium, à l'état liquide, refroidi par une circulation d'eau pressurisée, qui assure l'emport des calories produites¹. Un voisinage

¹ <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/cea/next/couvertures/blk.htm>

dangereux. Le lithium brûle dans l'air, comme son cousin le sodium (des surgénérateurs à neutrons rapides) et explose au contact de l'eau.

Le concept WCLL (Water Cooled Lithium Lead), développé sous la responsabilité du CEA, utilise un métal liquide (le LiPb) comme matériau tritigène et l'eau comme réfrigérant



Des voix s'élèvent. Un premier prix Nobel, décédé, Pierre Gilles de Gennes, émet des doutes sur la capacité des aimants supraconducteurs à résister à un flux de neutrons dotés d'une énergie de 14 MeV, sept fois celle des neutrons produits par la fission (2 MeV). Un second prix Nobel, également décédé, Charpak, trouve hasardeux de mobiliser une telle somme de crédits pour une machine qui, au mieux, ne produirait de l'énergie électrique qu'à la fin du siècle. Un troisième prix Nobel, Masatoshi Koshiha, Japonais celui-là, signale qu'on ne dispose d'aucun résultat d'expérience démontrant la capacité des matériaux de la première paroi à résister à l'intense flux des neutrons de fusion. Une installation, l'IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) devait être construite, au Japon, pour créer un flux comparable. Une machine complexe, où des noyaux de deutérium sont d'abord accélérés puis, bombardant un film liquide de lithium, sont censés produire en continue ces fameux neutrons, et ainsi permettre de tester les matériaux sur la durée. Coût d'une telle installation : le tiers d'ITER. Durée de fabrication : 5 ans. Le projet n'a pas à ce jour dépassé le stade des esquisses.

Au moment où les dessins de l'appareil s'accumulent, jusqu'au dernier boulon, et que chacun des pays signataires se partagent l'ouvrage, subsistent nombre de problèmes non résolus. Etant donné son très bref temps de fonctionnement, le JET ne se prête guère à l'étude de la résistance de matériaux sur la durée. Ces essais sont menés sur Tore Supra et on pense au départ que la première paroi, celle qui est en contact avec le plasma, peut être constituée par des plaques de carbone, lequel se sublime à 2500°C. Mais l'expérience montre qu'une abrasion s'opère, à la fois par le choc des ions et par une « photo-abrasion », qui peuple la chambre d'atomes de carbone en liberté. Avant de se redéposer n'importe où sur la paroi, ceux-ci ... se combinent avec les isotopes d'hydrogène en donnant des carbures. Ce n'est donc pas du carbone, bon conducteur de la chaleur, qui se redépose sur les parois, mais une couche de carbure, qui réduit la conductivité thermique du revêtement, indispensable pour évacuer les calories produites. Pis encore, le carbone se comporte alors, à travers cette production et redéposition de carbures, comme une véritable pompe à hydrogène. Or, dans un fonctionnement au mélange D-T, parmi les deux isotopes de l'hydrogène se trouve le dangereux tritium, radiotoxique. Le remplacement fréquent de la couverture en carbone

entraînerait une accumulation insoutenable de déchets radioactifs. Celui-ci doit donc être abandonné.

Les cellules tritigènes contenant un mélange lithium-plomb à l'état liquide (300°C), refroidi par eau sont dangereuses. On opte alors pour une couverture en béryllium, le plus léger des métaux, qui fond à 1280°C. On prévoit une couverture d'un centimètre d'épaisseur (18 tonnes dans ITER). Celui-ci peut faire office de doubleur de neutrons, et permettre de loger le dangereux lithium dans une céramique, refroidie par de l'hélium sous pression.

Rien de tout cela n'a été testé comme cela aurait dû l'être au préalable sur l'IFMIF, que les Japonais, après la catastrophe de Fukushima, ne sont pas près de construire. Qu'à cela ne tienne. Le nouveau directeur du projet, le Japonais Osamu Motojima déclare :

- *Ca n'est pas parce qu'on ne dispose pas de ces matériaux magiques qu'on ne va pas lancer le projet.*

Cette phrase, témoignant d'un aventurisme scientifique et technique nous ramène aux décennies soixante-soixante-dix, quand de nombreux pays du monde (Les USA, l'Angleterre, la France, l'Italie, l'Allemagne, la Pologne, la Chine, etc) se lancent dans une entreprise consistant à essayer de produire de l'électricité, par *conversion directe*, à l'aide de générateurs MHD, dénués de toute pièce mobile, offrant a priori des rendements hors tout de près de 60 % (contre 40 % pour les centrales électriques de l'époque, fonctionnant au fioul). Des sommes colossales sont englouties dans ces projets. Pour rendre les gaz de combustion suffisamment conducteurs de l'électricité, il faut leur adjoindre quelques pour cent de césium, la substance la plus facilement ionisable, mais également porter ce mélange à 3000°C. Avec leur monstrueux générateur U-25, construit à l'Institut Kurchatov des Hautes Températures de Moscou, les Russes garnissent la tuyère d'oxydes de zirconium et montent à jusqu'à 2600°C. Insuffisant.

Un Américain, Kerrebrock, suggère alors d'utiliser comme fluide caloporteur de l'hélium, également mélangé à du césium, l'ensemble étant porté à 1500° C dans des *réacteurs nucléaires à haute température*. Il pense qu'un artifice de physique peut permettre de porter la température du « gaz d'électrons libres » à 3000°C et d'obtenir la conductivité électrique désirée. Mais une terrible instabilité, dite *électrothermique*², ruine tous ces efforts. En France le CEA, l'Institut Français du Pétrole, la Compagnie Générale d'Electricité, pour ne citer que ceux-là, se lancent dans cette aventure. Le CEA construit l'importante installation Typhée, à Fontenay-aux-Roses, et c'est un échec.

Cet exemple montre que l'argent, le nombre des chercheurs et techniciens impliqués (2000 au plus fort de cette entreprise internationale), l'acharnement et le temps peuvent déboucher au final sur un fiasco complet. Des creusets ne sortit point ce matériau magique, tenant à 3000°C. Quant à la seconde formule, elle se heurta au mur des instabilités du plasma.

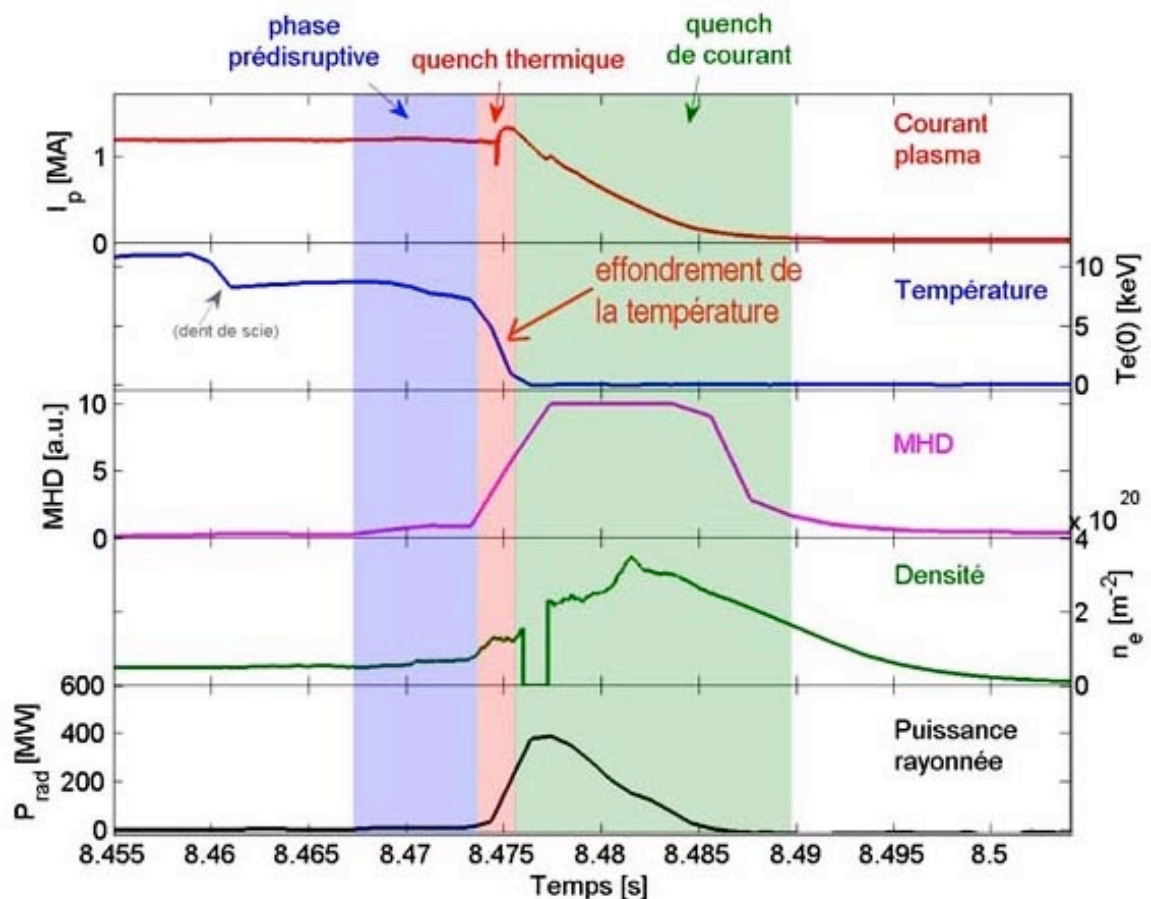
Revenant à ITER, dès que des accords internationaux sont conclus on lance à travers le monde entier des opérations de « communication » en annonçant « qu'on allait mettre le soleil en bouteille et disposer d'une énergie inépuisable ». Sous cet angle, ça n'est pas faux. Dans le JET une température de 150 millions de degrés est maintenue pendant une seconde, alors qu'elle n'est que du dixième de cette valeur au cœur du Soleil. La puissance rayonnée, en watt

² http://fr.wikipedia.org/wiki/Instabilit%C3%A9_%C3%A9lectrothermique

par mètre carré, est aussi du même ordre que pour l'astre solaire. Les deux ingrédients de base, le deutérium et le lithium, existent en quantités virtuellement illimitées sur la planète.

Reste le problème de la bouteille, remis à plus tard, à travers une succession d'actes de foi, de « croyance inébranlable en l'avenir ». Mais subsiste un autre problème, beaucoup plus grave encore, qu'on s'est efforcé de dissimuler au mieux au public, aux politiques et aux décideurs, à tel point que vous le découvrirez sans doute dans ce qui va suivre. Depuis que les tokamaks existent, ces machines s'avèrent terriblement instables. Nous avons vu plus haut que le plasma est parcouru par un intense courant électrique. Plusieurs millions d'ampères dans le JET, quinze millions d'ampères prévus dans ITER. Or, pour une raison qu'on ignore, et qu'on attribue à « une turbulence du plasma », des *disruptions* peuvent se produire, en moins d'un millième de seconde.

Qu'en est-il ? Les courbes qui suivent, extraites d'une thèse soutenue en novembre 2010³, mais qui ne présentent aucun résultat inédit et ne font que reprendre ce que les spécialistes connaissent depuis plus de trois décennies, illustrent le phénomène :



Les instabilités du plasma peuvent être détectées relativement facilement à travers les fluctuations de champ magnétique qui les accompagnent. Près de la paroi, de simples bobines permettent de les détecter (courbe violette, la troisième de la série, en partant du haut). Sur la

³ http://www-fusion-magnetique.cea.fr/en_savoir_plus/articles/disruptions/these_c_reux.pdf

courbe bleue, celle de la température, la seconde, on distingue une phase pré-disruptive, où on note un début d'affaissement de celle-ci. Dans la courbe suivante, en violet, on observe une montée, d'abord progressive, dans la phase prédisruptive, puis très brutale du niveau de turbulence MHD. Dans la phase prédisruptive ceci se traduit par des fluctuations de champ « en dents de scie » de la valeur du champ magnétique. Puis on assiste à *un effondrement extrêmement brutal de la température du plasma*, d'un facteur 10.000. Les théoriciens invoquent alors « une turbulence du plasma » qu'ils ne savent pas modéliser, mais dont on constate l'extension dans la courbe violette. La température peut ainsi passer en moins d'un millième de seconde (700 microsecondes prévu pour ITER) de cent millions de degrés à quelques dizaines de milliers de degrés. A une température aussi basse, le plasma redevient *résistif*. Les collisions entre les électrons et « des objets mal connus », peut être des assemblages d'ions, sont la source d'une puissante perte d'énergie par rayonnement (courbe du bas).

Comme l'effet Joule refait son apparition, le système du *current drive* n'est plus capable d'empêcher l'effondrement du courant plasma (courbe du haut). Cette variation de l'intensité du courant électrique engendre des *courants induits* dans les structures du tokamak qui, se combinant avec le champ magnétique toroïdal de 5 teslas et quelque, produisent des foers de 5000 à 15.000 tonnes dans le bâti d'ITER, en particulier au niveau « des cassettes du divertor ». Ces forces peuvent fausser ces structures. Or on sait que ces cassettes devraient être fréquemment extraites et remplacées, à l'aide d'un bras robotique, puisque des hommes ne pourront plus pénétrer dans la chambre, devenue radioactive.

Il faut rajouter un autre phénomène, non des moindres. Dans la chambre, des instabilités MHD mène le bal, que les théoriciens sont bien loin de maîtriser. La nature des phénomènes qui se déroulent dans la chambre fait encore matière à débat, à hypothèses, nombreuses et variées. Depuis le début des années cinquante, la conduite des tokamaks, partout dans le monde, est fondée sur *un empirisme complet*. En citant un extrait d'un document récemment mis en ligne sur le site du CEA⁴ (le 17 novembre 2007) :

- *En pratique, les spécifications techniques d'un tokamak concernant leur tenue aux disruptions s'appuient sur les « lois », dites « lois-ingénieur » portant sur les énergies et le temps caractéristique mis en jeu dans ce processus.*

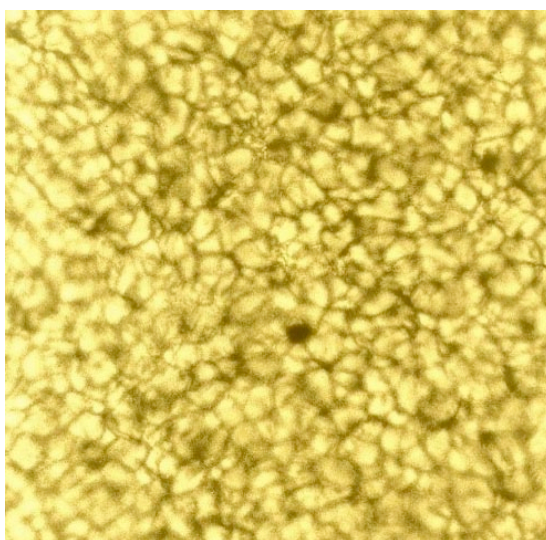
Le mot « loi » semble ici bien prétentieux. L'honnêteté inciterait à remplacer ces « lois-ingénieur » par l'expression plus traditionnelle « recette de cuisine ».

Toujours est-il que suite à une disruption, le champ magnétique devient *chaotique*. L'effondrement de la conductivité électrique du plasma, lié à celle de sa température, fait que celui-ci n'est plus maintenu solidement sur « les rails que constituent les lignes de champ magnétique ». Il n'existe aucun modèle qui expliquerait un effondrement aussi brutal de la température. Il n'y a que des hypothèses, qui font matière à débat depuis des décennies.

⁴ http://www-fusion-magnetique.cea.fr/en_savoir_plus/articles/disruptions/analyse_critiquearticle_petit_nexus_vf.pdf

Le phénomène que nous allons maintenant décrire présente une similitude étroite avec celui des éruptions solaires, comme signalé page 69 de l'audit de 254 pages composé en 2007 par l'Académie des Sciences de Paris, et consacré à l'énergie de fusion⁵.

Le Soleil est une chaudière à symétrie sphérique. Dans un « cœur » se produisent des réactions de fusion, exo-énergétiques. La chaleur produite monte d'abord vers la surface par simple conduction thermique. Puis on trouve, s'étendant jusqu'à la surface, une *couche convective*, comparable au bouillonnement de l'eau dans une casserole chauffée. Quand vous faites cuire une paella et que toute l'eau s'est évaporée, vous retrouvez la trace des *tourbillons de Bénard* qui la peuplaient en notant la présence de petites « cheminées » dans la masse du riz, en lieu et place des colonnes ascendantes, figées par l'évaporation de l'eau. Les photos prises par les astronomes montrent une surface solaire couverte de *grains de riz*, chacun ayant la surface de la France, qui sont autant de *cellules convectives*. Dans les parties claires : des ascendances. Dans le réseau interstitiel, plus sombre, plus froid : des descendances.



Les « grains de riz » à la surface du Soleil

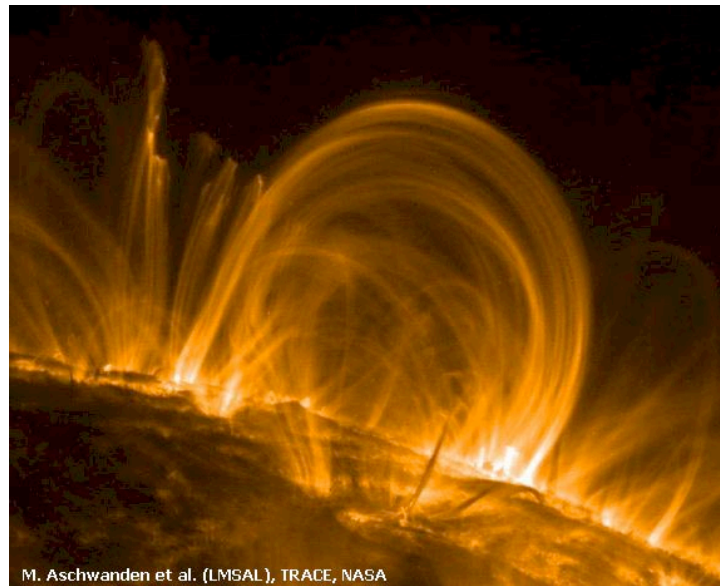
Le météorologue observe des structures nuageuses semblable, qu'il appelle alto-cumulus pommelés.

⁵ <http://www.bibsciences.org/bibsup/acad-sc/common/articles/rapport6.pdf>



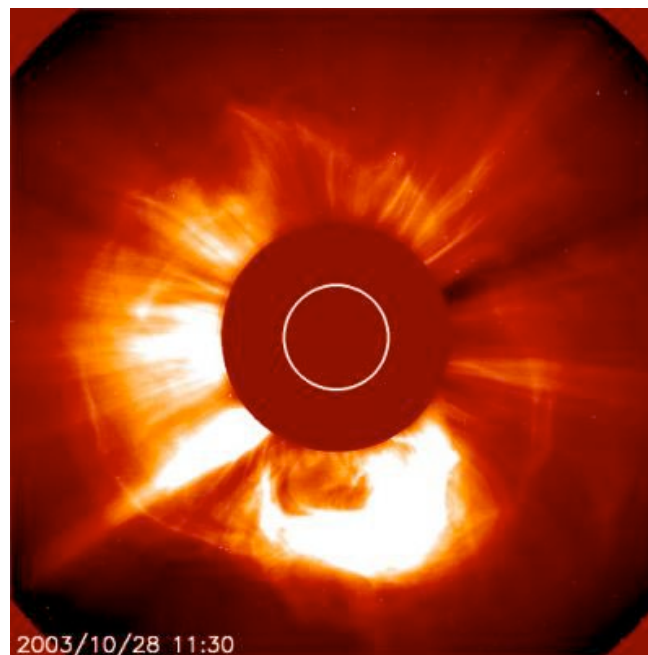
Altocumulus pommelés (en forme de pommes, jointes)

Celui-ci sait également que cette couverture nuageuse est l'annonce d'un violent orage. Grains de riz, tourbillons de Bénard, structure nuageuse ne sont que des phénomènes naturels qui accroissent le *transport d'énergie* depuis les profondeurs jusqu'à la surface. Ce sont des manifestations d'un des phénomènes *dissipatifs* les plus courants dans la nature : *la turbulence*. Il y a différents niveaux de turbulence. Les altocumulus pommelés se distribuent de manière assez uniforme. Mais le transfert d'énergie peut aussi s'opérer de manière plus brutale et expéditive, avec la naissance de cumulonimbus, de trombes, des cyclones, etc. Les éruptions solaires sont des manifestations d'une instabilité dont la raison suffisante est un transfert plus efficace de l'énergie vers l'extérieur de l'astre. Ce sont des *instabilités MHD*. Au sein du Soleil, comme à l'intérieur des tokamaks, deux forces s'opposent : les forces de pression, qui tendent à disperser le plasma, et les forces de *pression magnétique* qui tendent à le contenir. C'est tout à fait comparable à la façon dont les tensions du caoutchouc d'une chambre à air tendent à maintenir enfermé l'air comprimé que celle-ci contient. Si un déséquilibre se manifeste, la chambre produit une hernie. Une éruption solaire naît de la même manière : en quelque endroit, la pression magnétique n'est plus capable de contenir la pression du plasma, et une arche se forme, émerge.



Emergence d'une arche de plasma à la surface du soleil

Au long de cette arche, le champ magnétique décroît depuis ses « pieds » jusqu'au sommet de cette structure. Or on sait qu'un gradient de champ magnétique accélère très efficacement les particules chargées. Celles-ci jaillissent donc de la surface solaire, en escaladant l'arche. En interagissant au sommet de celle-ci, elles transforment l'énergie cinétique acquise en chaleur, donc en pression. L'arche éclate et se mue en deux tubes qui s'évasent et continue d'éjecter un plasma sous un million de degrés, alors que la température superficielle du soleil n'est que de 6000°C.



**Ejection de plasma dans une éruption solaire.
Le soleil, masqué par le cache de ce coronographe, correspond au cercle blanc**

D'où l'explication de la forte température de *la couronne solaire*, restée longtemps inconnue. D'où l'énergie importante des particules constituant le *vent solaire*. La Terre s'en protège grâce à son champ magnétique, en redirigeant de flux vers les pôles (les particules chargées suivent les lignes de force du champ magnétique). Quand le Soleil est éruptif, l'énergie des particules émises est telle que celles-ci parviennent à atteindre les hautes couches atmosphériques, provoquant des aurores boréales. Au passage, ce flux de particules réalimente en permanence le contenu des *ceintures de Van Allen*.

Un phénomène semblable se produit dans un tokamak connaissant une disruption. Comme son gaz est assez raréfié, des électrons, subissant l'effet de quelque gradient de champ magnétique, accélèrent jusqu'à 99 % de la vitesse de la lumière, ce qui leur confère une énergie de 10 à 30 MeV. Un phénomène se surajoute, identifié dès les années soixante-dix, comparable à ce qui se produit dans un simple tube fluorescent. Dans celui-ci le champ électrique accélère de très rares électrons libres. Mais ceux-ci, percutant des électrons liés, leur donnent à leur tour la possibilité de gagner en vitesse. On appelle ce phénomène une *avalanche électronique*. Même chose dans les tokamaks, avec une variante. La collision d'un électron relativiste avec un électron doté d'une vitesse moins vertigineuse, accélère celui-ci. Du coup, du fait de cette vitesse acquise, celui-ci « ne voit plus les ions ». Le voilà qui accélère à son tour dans un milieu devenu pour lui... vide. Ce phénomène se développe de manière *exponentielle*, et crée ce qu'on appelle des *électrons découplés*.

Dans une machine comme Tore Supra, le coefficient d'amplification, lié à cet effet d'avalanche électronique, est de 10.000. Sur ITER on prévoit 10^{16} ! Cette foudre constituée par des électrons de haute énergie (15 millions d'ampères pour ITER) est un des aspects les plus destructeurs qui puissent contrarier l'essor de ces machines. En effet, la forte énergie de ces électrons fait qu'ils ne déposent pas celle-ci en surface, mais en profondeur. Ils pourront ainsi endommager des éléments structuraux, des appareils de mesure et surtout les structures tritigènes de la machine.

ITER sera deux fois plus grand que le JET. Ce simple dessin nous permet de mesurer l'échelle, croissante, de machines, jusqu'à DEMO qui, étant donné le rendement hors tout de celle-ci, ne serait jamais censé de produire que 900 MW, soit la puissance du plus modeste des actuels réacteurs à fission. Tout cela au prix d'une complexité inimaginable, d'un coût pharaonique et d'une sûreté des plus problématique.

ITER is the Next Step Toward a Solution based on Tokamaks



On vante a sûreté foncière de ces réacteurs à fusion, en disant « si la machine est endommagée, les réactions de fusion s'arrêtent d'elles-mêmes, instantanément. Il n'y a pas de criticité ». La députée Européenne Michèle Rivasi a découvert lors d'une visite au site de Cadarache que, fort de cette idée, il n'avait pas été prévu d'assurer ITER⁶ !

L'Anglais Andrew Thornton, dans sa thèse (janvier 2011) écrit :

- *Dans les futurs tokamaks, les disruptions provoqueront des dommages sévères, et sur des tokamaks de puissance, catastrophiques.*

Dans les tokamaks actuels, de tailles relativement modestes, les disruptions ne font qu'un peu de casse, provoquent la fusion des revêtements, tordent comme des fétus des éléments de structure :

⁶ <http://www.enquete-debat.fr/archives/michele-rivasi-et-jean-pierre-petit-a-propos-diter>

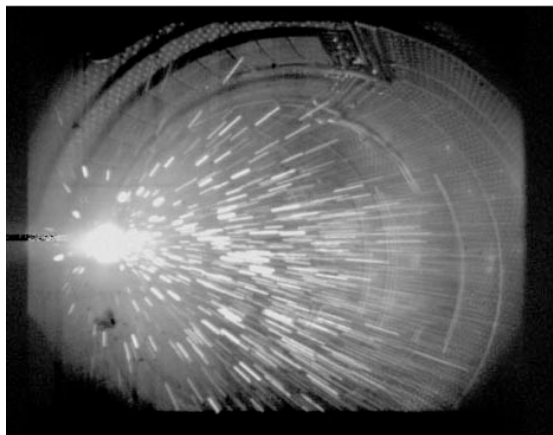
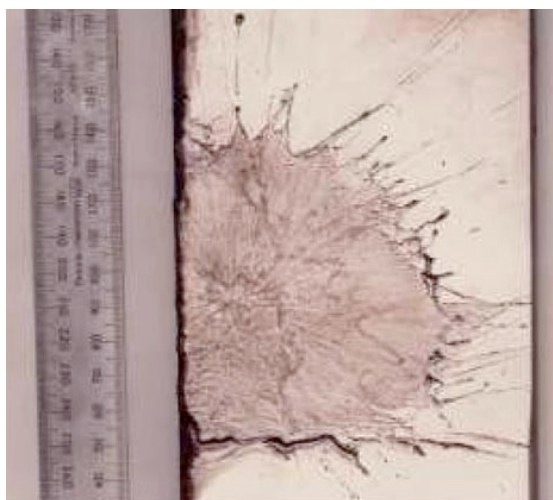


Photo instantanée d'impact d'électrons découplés dans la chambre de Tore Supra



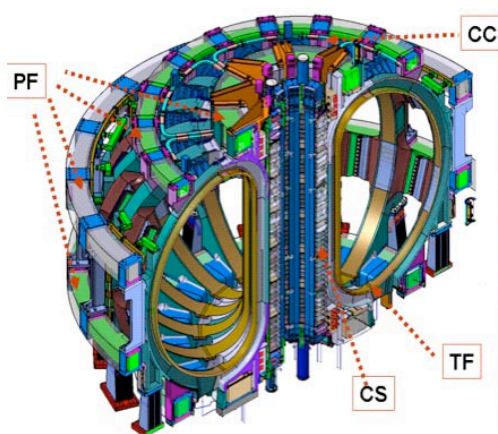
Fusion par électrons découplés sur la paroi du JET



Structure pariétale de Tore Supra tordue par l'effet des courants induits.

Dans les futures machines, même à l'échelle d'ITER, les décharges d'électrons découplés (dix fois celle de la foudre) perforeront la paroi de béryllium d'un centimètre d'épaisseur, volatilissant ce produit hautement toxique et cancérigène, en répandant le contenu gazeux radioactif de la machine. Si les structures tritigènes testées sont basées sur un mélange lithium-plomb refroidi par eau, un incendie pourra se déclarer. Déséquilibrées, les fragiles bobines supraconductrices pourraient exploser, en endommageant la machine. Ci après une image extraite d'un powerpoint diffusé par le CEA, chiffrant l'énergie qu'elles contiennent :

Magnet Energy Comparison



**Superconducting
Magnet Energy:**
~51 GJ



Charles de Gaulle Energy:
~38000 t at ~150 km/hr

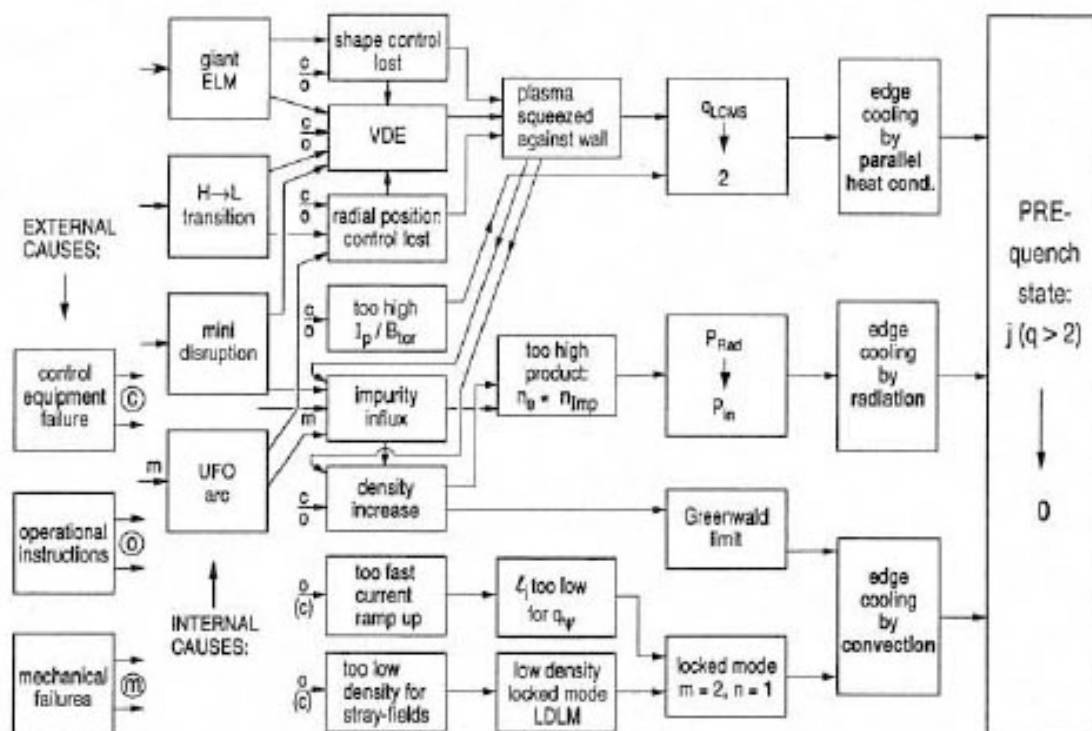


Dans les aimants supraconducteurs d'ITER, l'énergie cinétique du porte avion Charles de Gaulle, lancé à 150 km/h. La destruction d'un tokamak de puissance, évoquée par Thornton, pourrait créer un désastre environnemental et de santé, en dispersant ses polluants, radioactifs et chimiques.

N'existerait-il pas un domaine de fonctionnement sûr à l'intérieur duquel il suffirait de se tenir ? Si on tire comme un imbécile le manche d'un avion, celui-ci finit par décrocher, par partir en vrille et par s'écraser au sol. Les avions ont un domaine de vol à l'intérieur duquel il suffit de se tenir, strictement.

Pour les tokamaks, la situation est toute autre. Les disruptions, *phénomènes dissipatifs*, sont la manifestation d'un phénomène de turbulence MHD du plasma, qui peut être déclenché, de manière irréversible, par des causes diverses et nombreuses. Une fuite, un arrachement de poussières à la paroi, une déformation accidentelle de la géométrie magnétique peuvent déclencher le phénomène (invisageable pour des tokamaks de puissance, du fait de la catastrophe écologique et humaine que ceci provoquerait). Cette table, extraite d'un article

paru dans une revue scientifique, tente de faire le décompte des chaînes causales menant à cette catastrophe :



Chaînes d'événements conduisant à la disruption. [Schuller 95]

Dans une mise au point du 17 novembre 2007, déjà citée, le CEA, on lit :

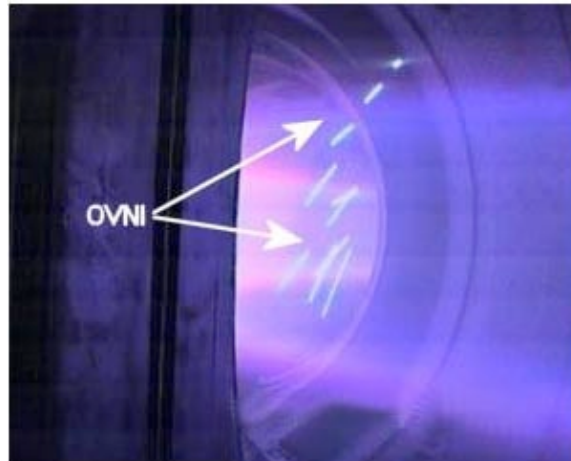
- Une disruption est due à une instabilité parfaitement déterministe.

Etrange point de vue, qui revient à se prononcer avec certitude sur un phénomène dont on ne connaît pas la raison suffisante. Et un peu plus loin :

- Bien évidemment, un des objectifs d'ITER est de mettre au point un scénario stable vis à vis des disruptions. Une fois ce scénario trouvé, il n'y aura aucune raison pour qu'il devienne disruptif spontanément.

Inch Allah...

On constate dans ce tableau la présence d'une case portant l'acronyme UFO (OVNI dans le site du CEA). Ceci se réfère à des objets, de nature variée, pouvait se détacher et parcourir la chambre en laissant une trace sur la caméra :



Extrait du site du CEA⁷. Traces d'objets non identifiés, détachés de la paroi

La susceptibilité d'un tokamak aux disruptions pourrait de plus évoluer avec le temps, du fait de la dégradation de ses structures internes, d'un vieillissement pour lequel on ne dispose d'aucune donnée, de leur encrassement, situations difficiles à contrôler in situ, du fait de la radioactivité de la chambre. Comment se comportera la première paroi en béryllium, sous l'effet du bombardement neutronique, de l'abrasion ? Nul ne le sait. Personne n'avait prévu, par exemple, au moment du démarrage de Tore Supra, que les couvertures en carbone devraient être abandonnées

Serait-il possible de maîtriser une disruption ? Deux procédures ont été envisagées. L'une consiste à noyer la chambre en l'inondant d'un gaz rare froid, l'autre à injecter des « killer pellets », des « glaçons tueurs », d'une taille centimétrique. Les effets recherchés sont les suivants :

- *Le gaz injecté (dix fois le contenu de la chambre) suscite un fort refroidissement radiatif, donc diminue le choc thermique à la paroi.*
- *En augmentant la densité du gaz on cherche à contrarier l'effet d'avalanche électronique, en laissant aux électrons moins de place pour accélérer.*

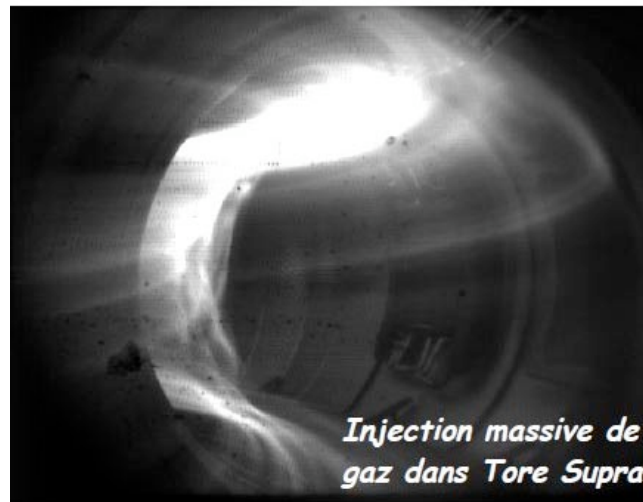
Tout cela est aux essais depuis plus de dix ans. Ces techniques se heurtent à de multiples difficultés.

- Les disruptions « naturelles » se développent avec une rapidité foudroyante : un millième de seconde ». En ajoutant bout à bout le temps de réponse des appareils de mesure, celui de l'ouverture d'une vanne et le temps d'expulsion du gaz on dépasse celui-ci de loin. Donc, quand on agit, il est déjà trop tard.

- Le champ magnétique ambiant s'oppose à la pénétration de particules porteuses de charges électriques. On injecte donc de l'hélium, qui a le potentiel d'ionisation le plus élevé (24 eV, contre 3eV pour le césium). Mais le plasma, tel un être vivant, s'oppose immédiatement à

⁷ http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/physique/une_journee_ordinaire.htm

cette intrusion. Des instabilités MHD, à développement ultra-rapide, naissent en son sein, qui ionisent l'hélium, stoppant sa progression, ce qui peut se lire sur la photo ci-après :



Source : site du CEA

- Le système des glaçons tueurs a pour inconvénient de déclencher l'apparition d'électrons relativistes : impraticable sur ITER.

Il reste enfin un dernier élément, qui contredit les allégations du CEA, sur son site. Les essais réalisés (thèse de Cédric Reux, 2010) ne portent pas sur une réduction des effets liés à une disruption apparue *spontanément* dans le plasma. C'est l'injection de gaz dans un plasma sain qui provoque la disruption (celle-ci est l'équivalent d'une fuite, dont on a vu quelle pouvait être la cause du phénomène). Cela peut être comparé à l'effet d'un extincteur sur un « non-incendie ».

Pour être complet, des études sont menées depuis des années, pour essayer de développer une contre-réaction, vis à vis de la naissance d'instabilités à la paroi, dites instabilités de bords. On débouche ainsi sur l'idée d'une sorte de paroi intelligente. L'image qui vient à l'esprit est celle d'une casserole dont la température, au fond, serait régulée instantanément, en tout point, dès qu'une amorce d'ascendance serait détectée. Ajoutons que les instabilités ne naissent pas qu'aux parois, mais également dans la masse du plasma, et que l'ensemble de ces phénomènes restent extrêmement mal compris.

Espérer faire un jour fonctionner un tokamak sans disruptions est aussi déraisonnable que d'envisager un soleil sans éruptions solaires, une météorologie sans vents ni nuages, une cuisson dans une casserole emplie d'eau, sans tourbillons.

Le pilote d'un tokamak de puissance peut être comparé à un chauffeur face à une chaudière constituée par une enceinte dont la tenue est d'emblée problématique. Il dispose d'un « tiroir à cendre » dont le fonctionnement l'est tout autant. Pour réalimenter sa chaudière, il lui est possible de tirer dans le foyer des glaçons, avec une sarbacane (authentique). L'œil rivé sur ses instruments, il a les mains sur une lance à incendie, qu'il doit être prêt à ouvrir dès qu'un des indicateurs fait mine de passer dans le rouge, si tant est que tout cela lui laisse encore le temps de réagir.

La conclusion est qu'ITER est une chimère qui, outre d'être coûteuse, d'avoir de grandes chances de se solder par un fiasco scientifique et technique, pourrait s'avérer être un engin dangereux pour le voisinage, ce que les riverains ignorent totalement, ne songeant qu'aux juteuses retombées de ce projet pour leur région. En parcourant les pages d'internet et des sites consacrés au projet, vous découvrirez de phrases surprenantes, émanant de « spécialistes ». L'un déclare « que les matériaux d'ITER ont été testés sur le JET » (à travers des expériences ne durant qu'une seconde). L'autre que les jets d'électrons découplés n'altèrent que la partie superficielle de la chambre, aisée à changer. Le troisième nous dira que les expériences seront menées avec toute la progressivité voulue, de manière à commencer par utiliser la machine comme banc d'essai pour les matériaux, en maintenant le courant plasma à un bas niveau.

Vous pouvez comparer cela à la construction d'un avion à vapeur, dont on ne sait si ses ailes seront capables de le porter, et pour lequel on commencera par effectuer pendant dix années de prudents essais de roulage sur piste, en attendant de se risquer à l'envol.