

Tratto dal sito La physique de la fusion (<http://www-drfc.cea.fr/>)

1 - [Introduction: les enjeux](#)

2 - [Que veut-on obtenir ? Un plasma bien confiné, chaud et dense ...](#)

- a) [Bilan de puissance dans un tokamak](#)
- b) [Critère de Lawson](#)

3 - [Comment confiner un plasma : le confinement magnétique](#)

- a) [Trajectoire des particules](#)
- b) [Stabilité du confinement](#)
- c) [Transport des particules et de la chaleur](#)
- d) [Modes de confinement](#)

4 - [Comment chauffer un plasma : chauffage et génération de courant](#)

- a) [Introduction](#)
- b) [Chauffage par injection de particules énergétiques](#)
- c) [Chauffage par onde radio-fréquence](#)
- d) [Le futur : atteindre les sommets avec le projet CINES...](#)

5 - [Comment maîtriser la densité d'un plasma : les interactions plasma/paroi](#)

- a) [Introduction](#)
- b) [Les matériaux](#)
- c) [Les différentes configurations](#)
- d) [Extraction de chaleur et scénarios rayonnants](#)
- e) [Extraction et injection de matière](#)
- f) [Et la paroi dans tout ça ?](#)

6 - [Les décharges longues : une spécialité de Tore Supra](#)

7 - [Comment mesurer ce qu'on ne peut toucher : les diagnostics](#)

8 - [Une journée ordinaire dans la vie de Tore Supra](#)

Mode d'emploi

Les phénomènes physiques mis en jeu dans la fusion thermonucléaire sont exposés dans ce qui suit, à un niveau abordable par toute personne possédant une bonne culture scientifique de base. Cela peut se lire linéairement en commençant [ici](#), et en cliquant sur la flèche  pour passer à la page suivante, ou bien alors en abordant directement le chapitre de votre choix dans la table des matières. Si vous désirez une vision plus synthétique du fonctionnement d'un tokamak, retour aux [principes](#) de base. Et si vous cherchez à capter l'atmosphère d'un grand laboratoire de recherche, allez donc faire un tour en salle de contrôle-commande, vivre la [journée ordinaire](#) d'un physicien de Tore Supra

1) Introduction : les enjeux

C'est à deux physiciens anglais, Tonks et Langmuir, que l'on attribue la paternité du mot "[plasma](#)" pour désigner un gaz ionisé, alors qu'ils travaillaient sur l'étude des décharges dans les gaz dans les années 1920. Depuis, l'intérêt pour cette discipline s'est considérablement accru, au fur et à mesure que l'on découvrait les applications multiples des plasmas, aussi bien en recherche fondamentale (astrophysique) que dans l'industrie (traitement de surface, soudure, écrans plats ...). La physique des plasmas s'est alors développée en intégrant toutes les avancées de la physique moderne. C'est une science complexe, prenant ses racines dans de nombreux concepts utilisés pour décrire les solides, les liquides ou les gaz, mais faisant appel à pratiquement tous les domaines de la physique (électrodynamique, mécanique statistique, mécanique quantique, théorie des collisions, physique atomique et moléculaire, physique nucléaire, théorie cinétique, équations de transport, thermodynamique, propagation des ondes, rayonnement, spectroscopie ...), le tout aboutissant en général à des équations non linéaires couplées, ardues à résoudre même avec les techniques numériques d'aujourd'hui.

Outre de nombreux défis technologiques ([composants](#) capables de supporter de forts flux de chaleur, [aimants supraconducteurs](#), [télémanipulation](#) ...), la fusion thermonucléaire pose donc de vastes problèmes théoriques, et a donné naissance à une branche particulièrement active de la physique des plasmas.

Le but des recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée est de produire de l'énergie, en confinant suffisamment efficacement un plasma suffisamment chaud et suffisamment dense. Commencez donc par découvrir le [critère de Lawson](#) qui fixe les conditions dans lesquelles on peut produire de l'énergie à partir d'un plasma de fusion. Les questions qui en découlent peuvent alors se résumer de la façon suivante :

- ▶ Comment confiner efficacement les particules du plasma ?
C'est tout le problème du [confinement magnétique](#) et du [transport de la chaleur et des particules](#).
- ▶ Comment atteindre les températures requises pour le futur réacteur ?
C'est tout le problème du [chauffage du plasma](#), qui permet aussi de [générer du courant](#) dans la machine.
- ▶ Comment protéger les composants de la chambre à vide du plasma et à son tour, le plasma des impuretés émises par les parois qui l'entourent ?
C'est tout le problème des [interactions plasma/paroi](#) et de l'[extraction des particules](#) et de la [chaleur](#), avec la réponse originale de Tore Supra : le concept du [divertor ergodique](#).

Enfin, impossible de répondre à toutes ces questions sans moyens de mesure adaptés pour analyser ce qui se passe au coeur du tokamak : ce sont les [diagnostics](#).

Tore Supra, seule machine de grande taille au monde capable de travailler en impulsion longue grâce à ses aimants supraconducteurs, offre aux physiciens l'opportunité unique de traiter ces problèmes dans l'optique du fonctionnement en régime stationnaire, indispensable au futur réacteur. C'est la spécialité de Tore Supra : les [décharges longues](#).

2) Bilan énergétique et critère de Lawson (p [1](#) - [2](#))

Comment déclencher en nombre les réactions de fusion ? Il faut arriver à confiner suffisamment efficacement un plasma suffisamment dense et chaud. Pourquoi ? Les explications suivent ...

a) Bilan de puissance du plasma

Comme dans l'exemple d'une marmite, le bilan énergétique du plasma est déterminé par des sources d'énergie qui alimentent le plasma et des pertes d'énergie qui le refroidissent. Pour que le plasma soit stationnaire (c'est à dire qu'il ne change pas au cours du temps), il faut que ce bilan soit équilibré, c'est à dire que les sources compensent les pertes.

▶ **Les sources d'énergie : P_{fusion} et $P_{\text{extérieure}}$**

Puissance fusion P_{fusion} :

La puissance totale produite par la réaction de [fusion D-T](#) P_{fusion} se répartit entre les produits de la réaction, les particules alpha, c'est à dire les noyaux d'hélium (He), et les neutrons. On a donc :

$$P_{\text{fusion}} = P_{\text{alpha}} + P_{\text{neut}}$$



Les neutrons emportent environ 80% de l'énergie, tandis que les particules alpha, plus lourdes, en conservent environ 20%. Mais cette énergie ne finit pas au même endroit :

- P_{alpha} : la principale source d'énergie du plasma provient des particules alpha. En effet, ces particules chargées sont [confinées](#) par le champ magnétique du tokamak, et cèdent leur énergie au [plasma](#) par collisions.
- P_{neut} : au contraire, les neutrons (n) issus de la réaction de fusion ne sont pas sensibles au champ magnétique puisqu'ils n'ont pas de charge, et s'échappent donc rapidement, sans avoir eu le temps de céder leur énergie au plasma. Ils sont arrêtés dans les matériaux

des composants entourant la chambre à vide du tokamak.

Puissance extérieure $P_{\text{extérieure}}$:

Si l'énergie provenant des réactions de fusion n'est pas suffisante pour compenser les pertes, il faut pour maintenir le plasma lui fournir de l'énergie depuis l'extérieur, grâce à un [système de chauffage additionnel](#). C'est la puissance extérieure $P_{\text{extérieure}}$.

Les pertes d'énergie : P_{pertes}

- Le confinement du plasma par le champ magnétique n'est pas parfait : les particules et la chaleur diffusent depuis le centre de la décharge vers l'extérieur. Les pertes associées à ce [transport des particules et de la chaleur](#) sont conséquentes.
- Comme un corps chaud, le plasma se refroidit aussi par rayonnement suivant divers processus. Les électrons émettent un rayonnement de freinage en étant ralenti par les ions ("Bremsstrahlung"). Ils émettent également un rayonnement synchrotron lié à leur [mouvement de giration](#) autour des lignes de champ, qui peut devenir conséquent lorsque le plasma est porté à très haute température. Enfin, les [impuretés](#) émises par la [paroi](#) entourant la chambre à vide produisent un rayonnement de raies lors des différents processus de physique atomique qui ont lieu dans le plasma. Ce terme peut devenir très important si la décharge est fortement polluée, et peut même conduire à une perte brutale du confinement du plasma : c'est ce qu'on appelle une [disruption](#).

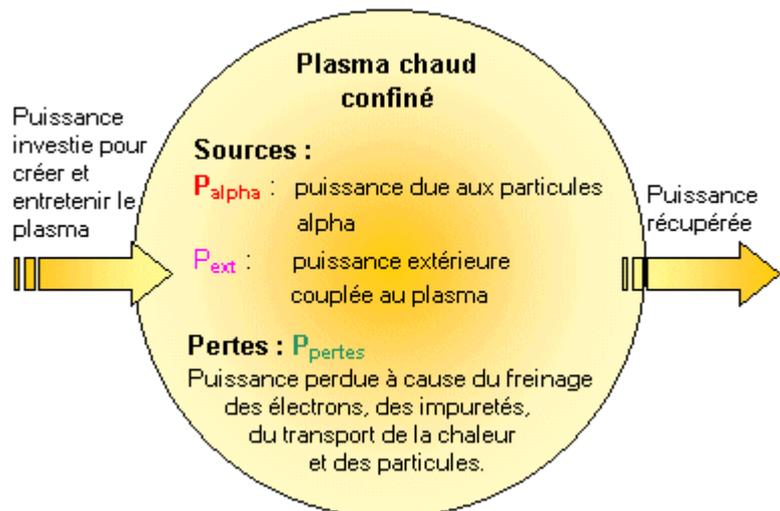
La somme de tous ces termes donnent la puissance totale perdue par le plasma P_{pertes} .

Le bilan

La variation temporelle de l'énergie du plasma W peut donc s'écrire : $dW/dt = P_{\alpha} + P_{\text{extérieure}} - P_{\text{pertes}}$

Rappel : seules les particules alpha cèdent leur énergie au plasma, le reste de la puissance fusion est dissipée dans les composants entourant le plasma.

Si le terme sources est supérieur au terme pertes ($dW/dt > 0$), le plasma gagne de l'énergie, dans le cas contraire ($dW/dt < 0$), il en perd. Si les sources compensent exactement les pertes ($dW/dt = 0$), le plasma est stationnaire. A partir de là, on peut définir plusieurs quantités utiles.



Le temps de confinement de l'énergie τ_E

C'est le temps caractéristique de décroissance de l'énergie du plasma, autrement dit, c'est le temps que met le plasma à se vider de son contenu énergétique si on coupe brutalement les sources qui l'alimentent. On a donc :

$$W / \tau_E = P_{\text{pertes}}$$

Attention : ce temps n'a rien à voir avec la durée de la décharge, qui est elle fixée par les capacités du système magnétique de la machine ou les instabilités du plasma. Par exemple, sur Tore Supra, le temps de confinement de l'énergie est de l'ordre de 200 millisecondes (soit 0,2 seconde) alors que les décharges durent plusieurs dizaines de secondes voire des minutes.

Le facteur d'amplification Q

C'est le rapport entre la puissance par les réactions de fusion et la puissance extérieure fournie au plasma par les systèmes de chauffage :

$$Q = P_{\text{fusion}} / P_{\text{extérieure}}$$

Ce chiffre qualifie donc le bilan énergétique du plasma : si il est supérieur à 1, cela veut dire qu'on a produit plus d'énergie avec les réactions de fusion qu'on a du en fournir pour entretenir le plasma.

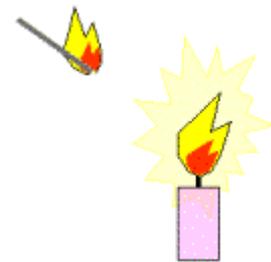
Attention : le facteur Q ne doit pas être confondu avec le rendement global de l'installation.

⇨ Le break even

C'est le stade correspondant à $Q = 1$, c'est à dire le moment où la quantité d'énergie produite par les réactions de fusion est égale à celle qu'on a du fournir pour entretenir le plasma ($P_{\text{fusion}} = P_{\text{extérieure}}$). C'est une étape intéressante du point de vue scientifique, car le chauffage du plasma est alors assuré de façon importante par les particules alpha et non plus quasi uniquement par les chauffages additionnels, ce qui se rapproche de la situation du réacteur.

⇨ L'ignition

C'est le stade où la puissance fournie par les réactions de fusion suffit à elle seule à compenser les pertes ($P_{\text{alpha}} = P_{\text{pertes}}$) et où on peut donc couper la puissance extérieure. Cela correspond à un facteur d'amplification Q infini ($P_{\text{extérieure}} = 0$). Le plasma est alors auto-entretenu, comme la bougie qui une fois enflammée par l'allumette (la puissance extérieure) se consume toute seule.



La plupart des machines expérimentales actuelles, destinées à la recherche et pas encore à la production d'électricité, fonctionnent à $Q < 1$, c'est à dire que le plasma consomme plus d'énergie qu'il n'en fournit. Elles n'utilisent comme combustible que du deutérium, ce qui permet de réaliser les études de physique nécessaires sans utiliser de tritium radioactif, en extrapolant ensuite les résultats obtenus en [fusion D-D](#) à la [fusion D-T](#). Seules 2 machines ont pour le moment expérimenté l'utilisation du tritium : la machine américaine [TFTR](#), maintenant fermée, et la machine européenne [JET](#), qui détient le record mondial de puissance fusion en D-T, avec 16 [Mégawatts](#) produit correspondant à un facteur d'amplification de 0.64.

2) Bilan énergétique et critère de Lawson (p 1 - 2)

Traduisons le bilan énergétique du plasma en terme de paramètres physiques du plasma : c'est le critère de Lawson. Les trois clés de la réussite d'une machine à fusion en découlent : efficacité du confinement, densité et température du plasma.

b) Le critère de Lawson

Reprenons notre [bilan d'énergie](#). A l'état stationnaire ($dW/dt = 0$), on a :

$$P_{\text{alpha}} + P_{\text{extérieure}} = P_{\text{pertes}} = W / \tau_E$$

En remplaçant $P_{\text{extérieure}}$ par P_{fusion} / Q et en utilisant le fait que l'énergie du plasma W et la puissance fusion P_{fusion} dépendent de la densité n (c'est à dire le nombre de particules par unité de volume) et de la température T du plasma, on obtient une relation exprimant les contraintes sur les paramètres du plasma (densité, température et temps de confinement de l'énergie) si on veut obtenir une décharge avec un facteur d'amplification Q donné. C'est ce qu'on appelle le critère de Lawson, qui donne la valeur du produit densité du plasma multipliée par le temps de confinement de l'énergie τ_E à une température du plasma T pour atteindre un facteur d'amplification Q . Une petite démonstration pour les matheux ? [Cliquez ici](#).

En pratique, pour des conditions intéressantes pour un réacteur, on obtient :

$$n \tau_E > 10^{21} \text{ (keV m}^{-3} \text{ s) avec } T \text{ de l'ordre de } 10 \text{ à } 20 \text{ keV}$$

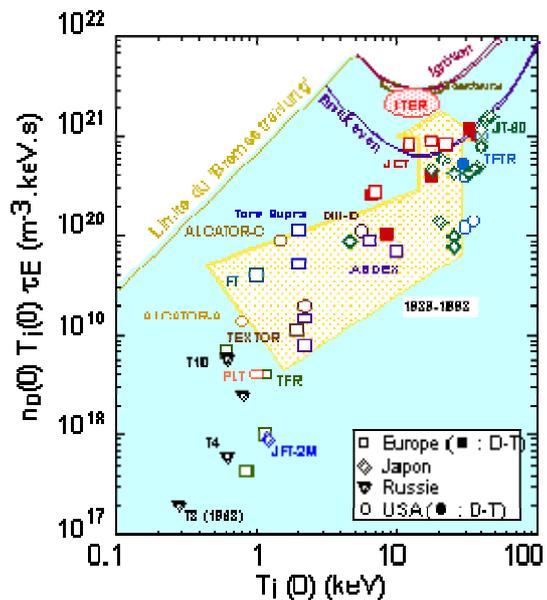
Autrement dit, pour arriver à produire de l'énergie à partir des réactions de fusion, il faut arriver à confiner efficacement (τ_E , à ne pas confondre une fois de plus avec la durée de la décharge) un plasma suffisamment chaud (T) et suffisamment dense (n) * .

* NB : dans la suite, on s'intéresse à la filière de la fusion par confinement magnétique, qui fonctionne avec des densités relativement faibles en s'efforçant d'obtenir des temps de confinement longs. Il existe une autre filière, la filière par confinement inertiel (bombardement d'une cible solide de deutérium et de tritium par des faisceaux laser ou de particules très intenses) qui travaille sur des densités très élevées (matière comprimée par les faisceaux laser ou de particules) avec des temps très courts.

Toute la difficulté réside dans l'obtention des trois paramètres simultanément. En effet, par exemple, lorsqu'on augmente la densité n en injectant du gaz dans la machine ou la température T en couplant au plasma de la puissance additionnelle, le confinement (τ_E) d'un tokamak a tendance à se dégrader.

Dans un tokamak, les densités de plasma, c'est à dire le nombre de particules par unité de volume, réalisables sont de l'ordre de quelques 10^{20} par mètre cube (m^{-3}) : ceci est en fait très faible, bien inférieure à la densité de l'air qui nous entoure par exemple et correspond à des conditions proches de celles du vide. On ne peut guère aller au delà, en raison de l'apparition d'instabilités si on dépasse un seuil en densité, la pression exercée par le plasma devenant supérieure à celle du champ magnétique. L'effort porte donc sur le temps de confinement τ_E , que l'on essaye de porter au delà de la seconde en développant des scénarios de physique complexes (les performances atteintes pour le moment ne dépassent guère 0,8 seconde).

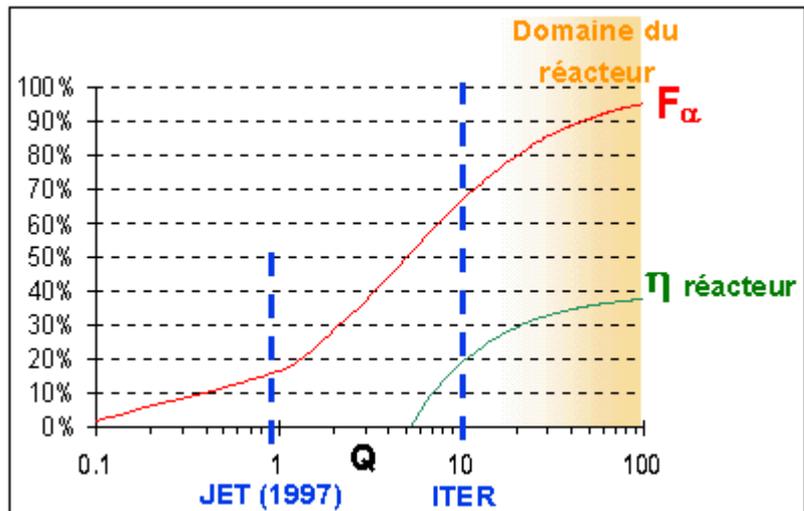
Les progrès des recherches en fusion sont illustrées par l'augmentation du triple produit $n T_E \tau_E$, que l'on voit sur la figure ci-contre et qui a gagné trois ordres de grandeur depuis les premières expériences dans la fin des années 60 jusqu'aux plus grandes machines actuelles (comme JET en Europe, TFTR aux Etats-Unis et JT60U au Japon), qui frôlent la zone du break-even. Il ne reste plus qu'un facteur 10 à gagner pour entrer dans le domaine du réacteur.



La machine de prochaine génération, ITER, destinée à démontrer la faisabilité scientifique et technique de la fusion thermonucléaire contrôlée, est dimensionnée pour atteindre un facteur d'amplification de 10. Il n'est pas exclu qu'elle atteigne l'ignition dans certains scénarios de physique. Ce grand projet international, lancé à la fin des années 80 et réunissant au départ quatre partenaires (Europe, Japon, Etats-Unis et Russie), est entré dans la phase finale de dimensionnement. Rassemblant maintenant trois partenaires (Europe, Japon et Russie), il attend maintenant la décision de construction, avec en particulier le choix d'un site chez l'un des partenaires. Des études sont en cours pour évaluer le potentiel de Cadarache comme site européen candidat.

Il est à noter que le futur réacteur n'a pas besoin d'être à l'ignition (facteur d'amplification Q infini) pour fonctionner, mais simplement d'atteindre un facteur Q suffisant pour que le rendement global η_{reactor} de la centrale soit intéressant, en prenant en compte la conversion de l'énergie thermique en électricité par des moyens conventionnels (turbine etc) et le fait qu'on réutilise une partie de l'énergie produite pour alimenter les systèmes de chauffage additionnels servant à entretenir le plasma.

Les chiffres typiques pour un réacteur sont un facteur d'amplification de l'ordre de quelques dizaines, correspondant à une efficacité globale du réacteur $\eta_{\text{réacteur}}$ de 35 % et à une fraction de chauffage du plasma par les alphas F_{α} de 90% (c'est à dire que 10 % du chauffage restant est assuré par les systèmes de chauffage additionnels).

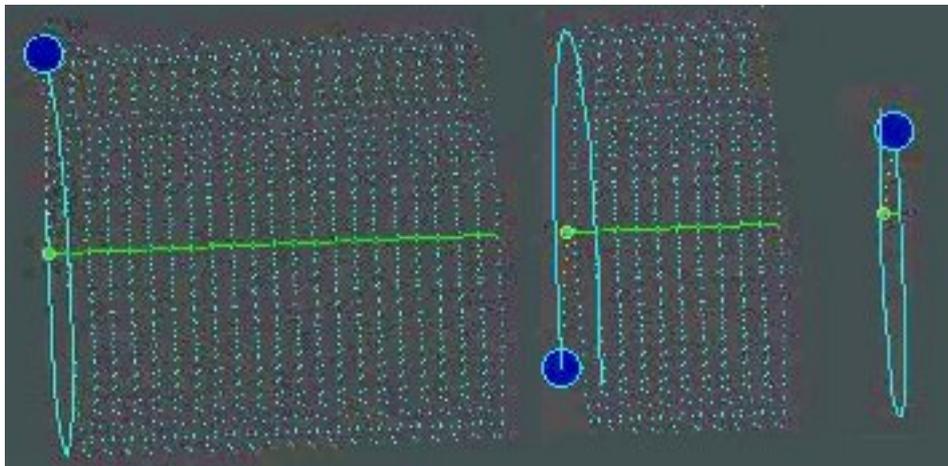


3) - Le confinement magnétique (p [1](#) - [2](#) - [3](#) - [4](#))

Comment rassembler des particules qui n'ont à priori aucune raison de vouloir rester ensemble ? Dans le soleil, la gravité s'en charge. Sur Terre, on utilise des champs magnétiques puissants.

a) les trajectoires des particules

Le confinement du plasma dans un tokamak est basé sur la propriété qu'ont les particules chargées de décrire une trajectoire en hélice autour d'une ligne de champ magnétique. Regardez le mouvement d'une particule chargée autour d'une ligne de champ magnétique droite.

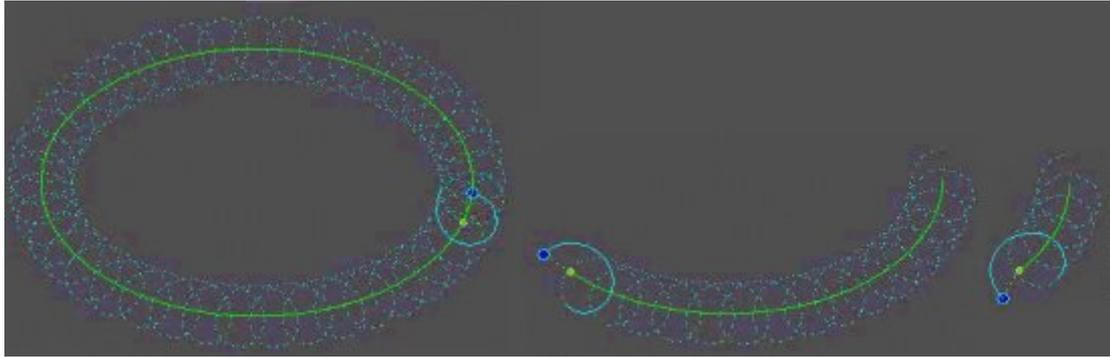


[Voir le film "trajectoire droite" \(mpg, 493 ko\)](#)

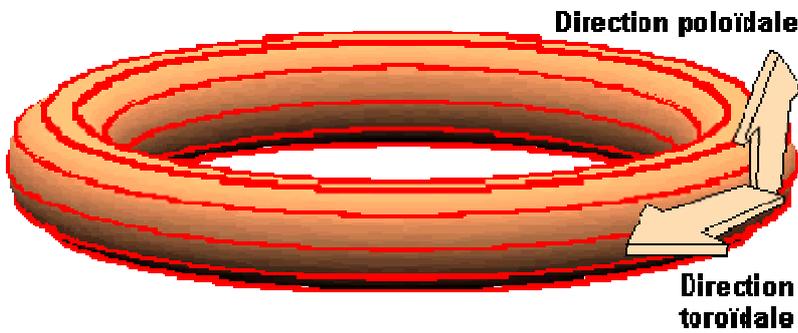
La particule, figurée en bleu, décrit une hélice autour de la ligne de champ, que suit le centre-guide de la trajectoire, matérialisé en vert.

Le rayon de giration de la particule, appelé rayon de Larmor, dépend de l'intensité du champ magnétique, de la masse et la charge de la particule, et de son énergie. Plus le champ magnétique est puissant, plus le rayon de Larmor est faible, la particule restant "scotchée" au voisinage de la ligne de champ. De plus, les électrons, beaucoup plus légers que les ions, ont un rayon de Larmor nettement plus faible à même énergie. Enfin, les particules très énergétiques ont un rayon de Larmor plus élevé que les particules à faible énergie, et sont donc plus difficiles à confiner. Le rayon de Larmor peut varier typiquement entre des millimètres pour des particules peu énergétiques avec un champ magnétique intense et des dizaines de centimètres pour des particules très énergétiques.

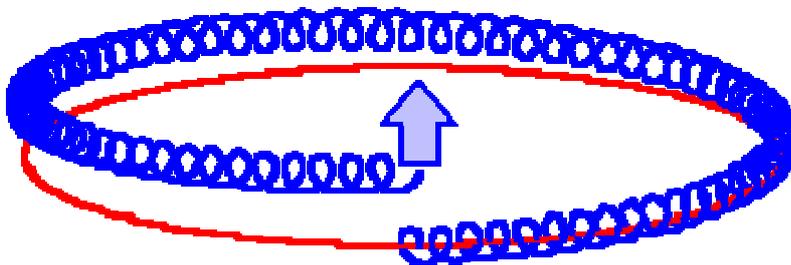
L'astuce consiste alors à refermer la ligne de champ sur elle-même pour piéger la particule, comme vous pouvez le voir ci-dessous.



[Voir le film "trajectoire cylindrique" \(mpg, 750 ko\)](#)

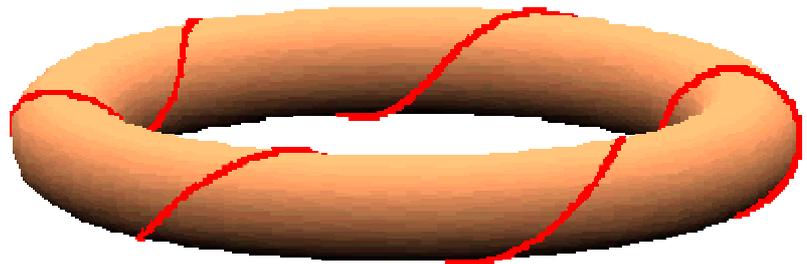


On se trouve alors dans une configuration où la direction du champ magnétique est purement toroïdale.

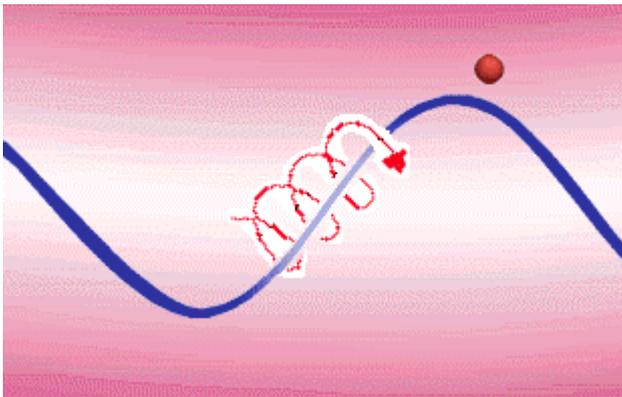
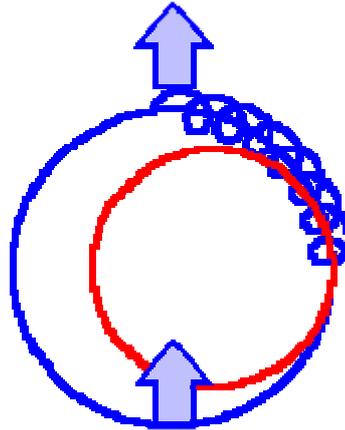


Malheureusement, sur une simple trajectoire circulaire de ce type, la particule subit une lente dérive transverse, liée au gradient de champ magnétique et à la force centrifuge, et dont la direction dépend du signe de sa charge. Par exemple, les ions vont dériver vers le haut (comme illustré sur le schéma ci-contre) et les électrons vers le bas.

Pour compenser cet effet, l'idée est alors de stabiliser la configuration en ajoutant une composante poloïdale au champ magnétique toroïdal. C'est la configuration magnétique utilisée dans les tokamak. Les lignes de champ deviennent des hélices s'enroulant autour de surfaces toriques emboîtées, dites surfaces magnétiques.



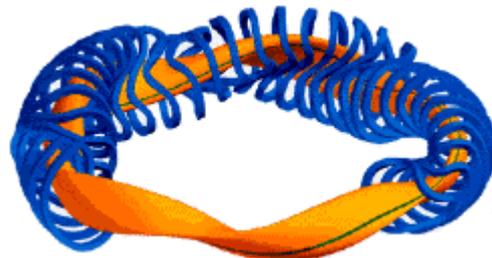
La particule passe alors la moitié de son temps la tête en haut, où la dérive verticale, que l'on suppose vers le haut par exemple comme sur l'exemple ci-dessous, l'éloigne de la surface magnétique, et l'autre moitié la tête en bas, où la dérive verticale la rapproche de la surface magnétique. L'effet de dérive est alors en moyenne compensé.



Particule suivant une ligne de champ en hélice

Dans un tokamak, le champ magnétique toroïdal est engendré par des bobinages extérieurs, tandis que le champ magnétique poloïdal est induit par un courant circulant toroïdalement dans le plasma. Ce courant est lui-même généré par effet transformateur, à partir d'un circuit primaire dont le secondaire est le plasma. Tore Supra possède la particularité d'être équipé d'aimants supraconducteurs, qui lui permettent d'assurer un champ toroïdal permanent (les machines équipées d'aimants classiques sont limitées en durée par l'échauffement des bobines en cuivre). La durée de la décharge est alors limitée par la capacité du circuit primaire générant le courant plasma induisant le champ poloïdal.

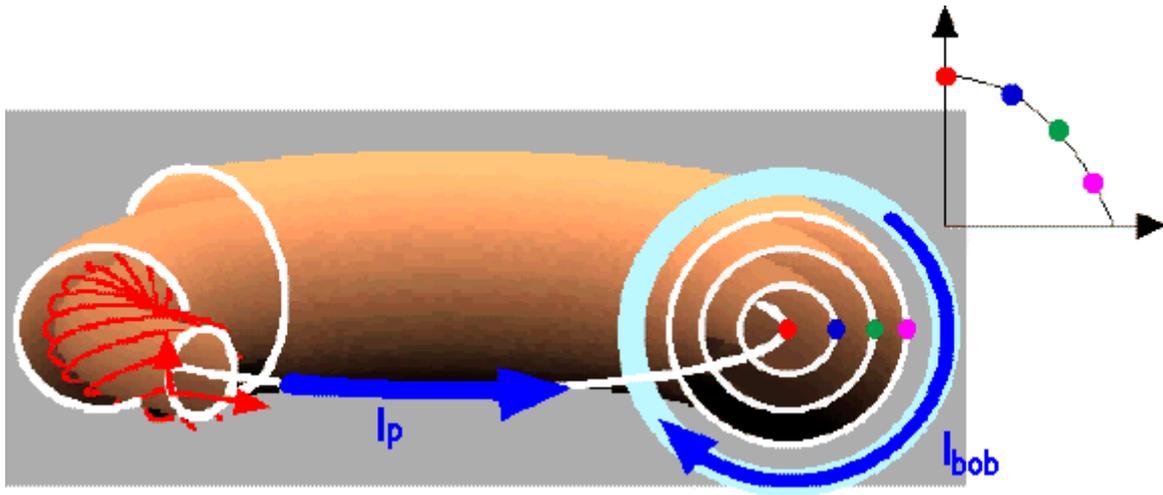
Enfin, il existe une autre configuration, appelée *stellarator* , dans laquelle le champ magnétique est entièrement assuré par des bobinages extérieurs, toroïdal comme poloïdal. Le fait de ne pas avoir de courant intense circulant dans le plasma est un avantage en cas de [disruption](#) du plasma, mais il se paye en terme de complexité du bobinage magnétique nécessaire. On le voit sur ce schéma du stellarator allemand en projet [W7X](#) , où le bobinage est représenté en bleu et le plasma en orange.



Principe du stellarator (source : [Euratom-IPP](#) )

On appelle facteur de sécurité le pas de l'hélice sur chaque surface magnétique (c'est à dire le nombre grands tours toroïdaux nécessaires pour effectuer 1 petit tour poloïdal). Dans une configuration tokamak, ce facteur de sécurité varie typiquement de 1 au centre du plasma à quelques unités au bord. Il est à noter que, dans le cas général, si on suit la ligne de champ, elle va décrire entièrement la surface magnétique autour de laquelle elle s'enroule au fil de ses passages successifs. Ceci est vrai sauf dans le cas d'un facteur de sécurité rationnel (c'est à dire égal au rapport de deux nombres entiers). Dans ce cas particulier, la ligne de champ se referme sur elle-même au bout d'un nombre entier de tours, ce qui confère à la surface magnétique des propriétés spécifiques (modification locale du transport, déclenchement d'[instabilités](#), ...)

Enfin, il est à noter qu'en première approximation, les grandeurs macroscopiques (densité, température, pression ...) sont homogènes sur une surface magnétique. On peut donc les décrire dans une section poloïdale simplement en fonction du rayon du plasma, par exemple en prenant leur valeur sur chaque cercle blanc illustrant une surface magnétique sur le schéma ci-dessous. On parle de profil radial (ne dépendant que du rayon), qui est dans le cas de la densité, de la température et de la pression maximales au centre du plasma et décroissent vers le bord de la décharge, comme illustré sur la figure ci-dessous.



3) - Le confinement magnétique (p 1-2-3-4)

Le piège magnétique qui confine les particules n'est pas si simple à mettre en oeuvre : le plasma n'apprécie pas et cherche à contrer le champ magnétique qui lui est imposé ...

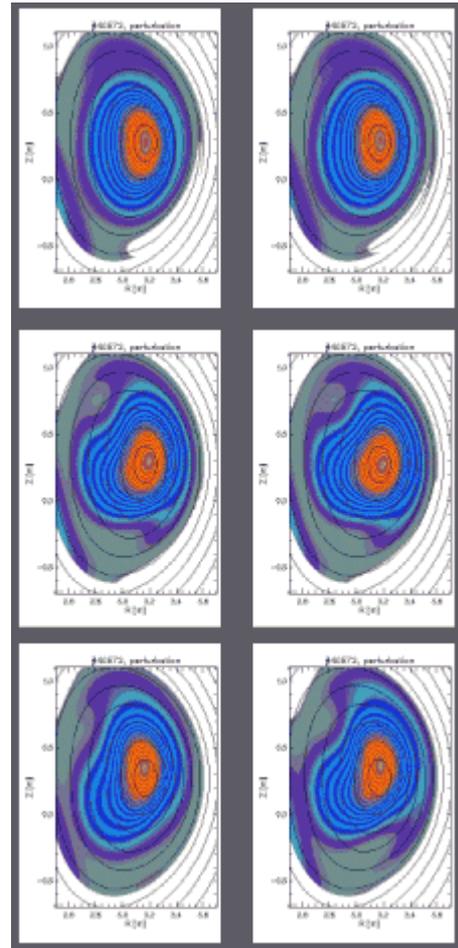
b) Stabilité du confinement

Grâce à la [configuration du tokamak](#), on arrive à confiner les particules, en compensant la pression du plasma, qui cherche à s'étendre comme un gaz, par la pression magnétique. Malheureusement, un tel équilibre, si il est relativement facile à réaliser, peut devenir instable, c'est à dire qu'une petite perturbation est susceptible de croître au cours du temps, et de conduire dans certains cas à la perte complète du confinement : c'est ce qu'on appelle une disruption. Dans d'autres cas, il s'agit seulement d'une perte partielle de confinement, qui n'implique pas l'arrêt brutal de la décharge, mais qui dégrade fortement ses performances.

Par exemple, on voit ici expérimentalement l'image d'une perturbation de l'équilibre magnétique sur [JET](#). Les surfaces de flux vues par imagerie X devraient correspondre aux surfaces de flux théoriques en noir sur la figure, comme c'est le cas au départ de l'animation ci-contre. Mais une instabilité se développe, et vient perturber l'agencement de la configuration magnétique. Cela se terminera par une disruption ...

Les disruptions

Une disruption peut avoir de nombreuses conséquences. Toute diminution brutale de courant et/ou de champ magnétique induit des courants et/ou des champs magnétiques miroirs dans les composants entourant la machine. Ces composants sont du coup soumis à des efforts qui peuvent être considérables. Plus le courant plasma initial est élevé (et on compte souvent en Méga ampères dans les tokamaks) et plus le temps qu'il met à disparaître est court, bref plus la variation de courant est brutale, plus la disruption est sévère. Les tokamaks sont donc dimensionnés pour pouvoir résister à ces événements (on utilise des matériaux non magnétiques, la structure de la machine est très robuste, on isole électriquement les différentes parties en contact, on fixe soigneusement tous les composants à l'intérieur de la chambre). Outre ces efforts mécaniques, toute l'énergie contenue dans le plasma est également déposée en un temps très court sur les composants de la chambre à vide, qui sont donc conçus pour pouvoir résister à ces chocs thermiques extrêmes. Enfin, une disruption a aussi des conséquences sur le programme expérimental : il est généralement difficile de redémarrer directement la machine après une disruption, et il faut souvent avoir recours à des décharges de nettoyage avant de pouvoir reprendre le cours des expériences. Même si les disruptions font pour le moment encore partie de la vie courante des tokamaks actuels, qui en sont au stade d'instruments de recherche, on comprend donc l'intérêt qu'il y a à s'efforcer de les éviter, en particulier en étudiant la stabilité des équilibres magnétiques.

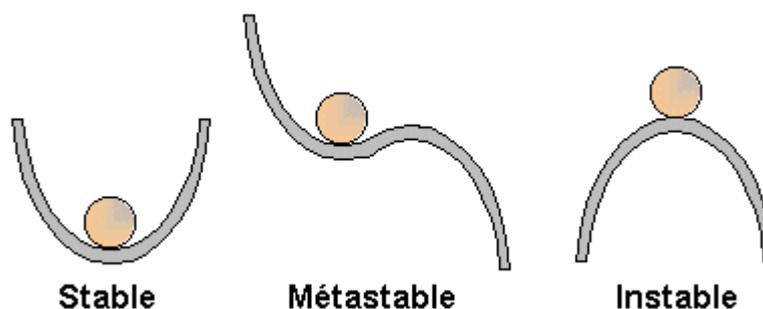


[Voir le film "Instabilités" \(gif, 1600 ko\)](#)

Les instabilités

L'étude de la stabilité des équilibres magnétiques s'appelle la magnétohydrodynamique (MHD pour les intimes). Ce nom compliqué recouvre simplement la notion de fluide (hydro) en mouvement (dynamique) dans un champ magnétique (magnéto), ce qui s'applique très exactement à ce que fait le plasma dans un tokamak. Vouloir confiner un plasma chaud dans une enceinte immatérielle formée par les lignes de champ magnétique, c'est un peu comme vouloir contenir un gaz sous pression dans une chambre à air. Une autre comparaison que l'on entend couramment chez les physiciens pour illustrer la difficulté de la chose est celle de l'anneau de confiture (version imagée du plasma) à confiner en utilisant des bandes de scotch ... Plus sérieusement, en reprenant l'exemple de la chambre à air, la MHD permet d'optimiser les caractéristiques de la chambre (géométrie, épaisseur du caoutchouc ...) pour qu'elle résiste à la pression du gaz sans éclater ni se déformer ou fuir. On appelle β le rapport de la pression cinétique du plasma (proportionnelle à sa densité et à sa température) à la pression magnétique du confinement (proportionnelle à l'intensité du champ magnétique). Pour que la "chambre à air" n'explose pas, il faut que le confinement magnétique soit plus fort que les forces de pression du plasma, c'est à dire que ce rapport soit inférieur à 1. En pratique, on trouve que cette limite en β est bien inférieure à 1, de l'ordre de quelques pourcents, en raison de l'apparition d'instabilités. Ceci limite notamment la densité maximum que l'on peut obtenir, puisque la pression cinétique du plasma lui est proportionnelle.

Pour comprendre la notion de stabilité d'un équilibre, l'analogie la plus simple est celle de la bille qui roule sur une surface ondulée. Suivant la géométrie de la surface, l'équilibre de la bille sera stable, métastable ou instable, comme illustré ci-dessous.



Les mécanismes d'instabilités en physique des plasmas sont presque innombrables ... Certaines instabilités présentent des similitudes avec des exemples empruntés à la mécanique des fluides, comme l'instabilité de Rayleigh Taylor, qui consiste à superposer deux fluides en plaçant le plus lourd sur le dessus. Imaginez par exemple un récipient dans lequel vous versez de l'eau puis, avec précaution, de l'huile par dessus. Le système est alors dans un équilibre métastable. La moindre pichenette va causer un retournement de situation, le fluide le plus lourd passant sous le fluide le plus léger, ce qui correspond à un équilibre stable.

Un autre type d'instabilités sont les instabilités de torsion, qui apparaissent lorsqu'un courant parallèle au champ magnétique introduit une torsion des lignes de champ, rappelant l'effet qu'on obtient si on tord trop fortement une corde : elle se tortille et fait des coques. D'autres instabilités sont vraiment propres à la physique des plasmas et n'ont pas d'équivalent dans d'autres domaines.

3) - Le confinement magnétique (p 1 - 2 - 3 - 4)

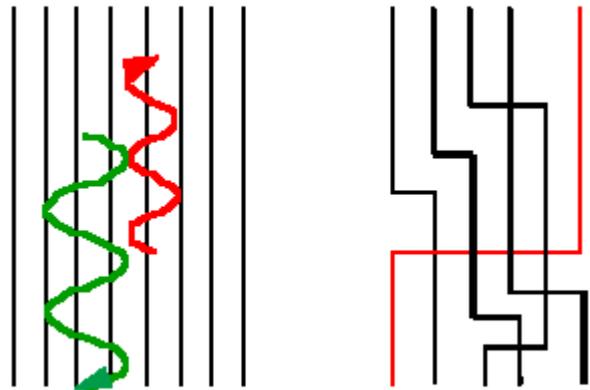
Le piège magnétique qui confine les particules n'est pas parfait : malgré la configuration magnétique, une lente dérive conduit les particules du centre de la décharge vers le bord ... Plus ce phénomène de transport est important, moins le confinement est bon.

c) le transport des particules et de la chaleur

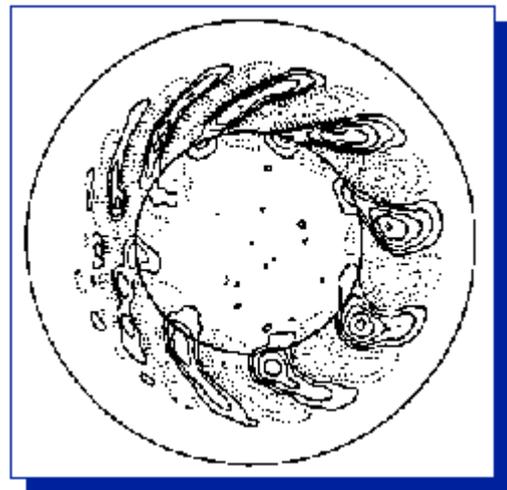
Une fois établi un [équilibre magnétique stable](#), nous avons vu que les particules, lorsqu'on les considère individuellement, [suivent les lignes de champ magnétique](#), au rayon de Larmor et aux mouvements de dérive près. Cependant, elles subissent d'autres phénomènes qui vont modifier cette image simple pour aboutir à des mécanismes de transport plus complexes, que l'on peut classer en deux grandes catégories :

- **transport néoclassique** : les effets des collisions entre particules, qui vont les faire dévier de leur trajectoire initiale en une sorte de marche au hasard, donnant lieu à une diffusion radiale lorsqu'elles qu'elles "sautent" d'une surface magnétique à une autre sous l'effet du choc. C'est le transport dit néoclassique.

On peut alors modifier l'image simple de la particule suivant sa ligne de champ comme sur le schéma de gauche par l'image d'une succession de sauts d'une ligne de champ à l'autre, comme illustré sur le schéma de droite.



- **transport dit "anormal"** : les effets de la [turbulence](#), c'est à dire des fluctuations de champs électrique et magnétique, donnent lieu à la propagation d'ondes dans le plasma. Il en résulte un accroissement du transport de la chaleur et des particules. Ce transport, dit anormal, donne lieu à des développements théoriques importants. Si la théorie linéaire est maintenant bien établie et permet de prédire les conditions dans lesquelles une onde devient instable, elle n'est plus valable lorsque l'onde grossit, et il faut alors passer à des modèles non linéaires plus complexes pour simuler l'évolution de l'instabilité.



Le transport de la chaleur est un phénomène tout à fait analogue au transport des particules. Tout d'abord, les particules qui diffusent transportent leur propre énergie : c'est le phénomène de convection. Ensuite, les collisions permettent aux particules d'échanger de l'énergie : c'est la conduction thermique.

Ce phénomène de diffusion de l'intérieur de la décharge vers l'extérieur a donc tendance à "vider" le plasma de son contenu en particules et en énergie, et détermine les performances en confinement de la machine. La diffusion des particules est caractérisée par un coefficient de proportionnalité, appelé coefficient de diffusion, entre le flux de particules et le gradient de densité. De même, pour la chaleur, le coefficient de

diffusion est défini par le rapport entre le flux de chaleur et le gradient de température. Plus ce coefficient est élevé, plus la diffusion est forte, et moins le confinement est bon.

Expérimentalement, on observe des pertes en énergie bien supérieures (et par conséquent un temps de confinement bien inférieur) à ce que prédirait le transport néoclassique seul : le transport anormal semble donc le terme dominant. De nombreuses études sont en cours afin d'affiner la compréhension des phénomènes pouvant expliquer ce transport anormal. En particulier, on cherche à établir la dépendance du coefficient de diffusion en fonction des paramètres du plasma et de la machine. Deux types de comportement ont été identifiés :

- comportement Bohm : le coefficient de diffusion ne dépend pas de la taille de la machine (et donc on ne gagne pas en passant à un réacteur de grande taille)
- comportement Gyrobohm : le coefficient dépend favorablement de la taille de la machine (et donc on réalise un gain important en passant au réacteur)

Les tendances qui se dégagent des études les plus récentes sont que le comportement est différent selon l'espèce considérée (électrons ou ions) et le mode de confinement :

- les électrons sont de type Gyrobohm quel que soit le mode de confinement
- les ions sont de type Bohm en mode de confinement normal, et deviennent Gyrobohm lorsqu'on passe en [mode de confinement amélioré](#).

3) - Le confinement magnétique (p [1](#) - [2](#) - [3](#) - [4](#))

Puisque le plasma n'y met pas du sien, les physiciens ont mis au point des scénarios où on crée une barrière de transport dans le plasma, pour retenir les particules au centre de la décharge et obtenir un confinement plus efficace.

Aujourd'hui, le mode H, régime à confinement performant, référence pour les machines de prochaine génération, est solidement établi, et les recherches vont bon train sur des scénarios alternatifs dits "tokamaks avancés".

d) Modes de confinement

La compréhension théorique des phénomènes de diffusion radiale restant limitée, de nombreuses études expérimentales sur le confinement ont été menées dans les [principales machines à travers le monde](#). Ceci a permis de réunir une large base de données, à partir de laquelle on a déterminé des lois d'échelle empiriques, exprimant le [temps de confinement](#) à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma, un peu comme on a eu recours à des essais en soufflerie pour établir certaines lois en mécanique des fluides. Ceci est d'une importance primordiale pour pouvoir extrapoler les performances en confinement d'une machine de prochaine génération.

La première loi d'échelle de ce genre, établie en régime ohmique, c'est à dire sans [puissance additionnelle](#), prévoyait en particulier une augmentation du temps de confinement avec le [grand rayon](#) de la machine. Les régimes avec puissance additionnelle, indispensables pour élever la température du plasma vers les [conditions nécessaires](#) pour le futur réacteur, furent ensuite étudiés : on découvrit que le confinement se dégradait par rapport aux valeurs obtenues en ohmique lorsqu'on augmentait la puissance couplée au plasma.

- **Le mode H**

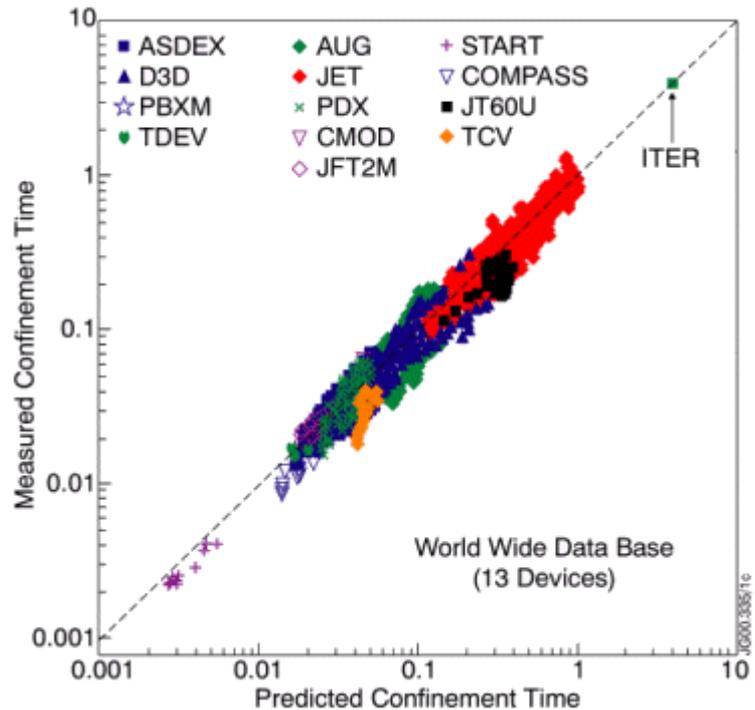
Toutefois, on s'aperçut que sous certaines conditions, il existait un seuil en puissance à partir duquel le confinement est brutalement amélioré (bien que restant habituellement inférieur aux performances en ohmique) : ce régime de confinement amélioré fut appelé mode H (pour "High confinement" ou fort confinement en anglais) par opposition au mode de confinement obtenu en dessous du seuil en puissance, dit mode L (pour "Low confinement", ou faible confinement en anglais). Il permet d'améliorer le temps de confinement pratiquement d'un facteur 2 par rapport au mode L. La découverte de ce mode de confinement amélioré, sur la [machine ASDEX](#) dans les années 80, a été capitale pour la fusion thermonucléaire, et le mode H est encore aujourd'hui le scénario de référence pour la machine de prochaine étape [ITER](#).

Vous voyez ci-contre la base de données ayant servi à établir la loi d'échelle pour le [temps de confinement](#) en mode H, et qui montre le bon accord entre les résultats expérimentaux provenant des différentes machines en ordonnée et le résultat de la loi d'échelle en abscisse.

Cette loi empirique prévoit :

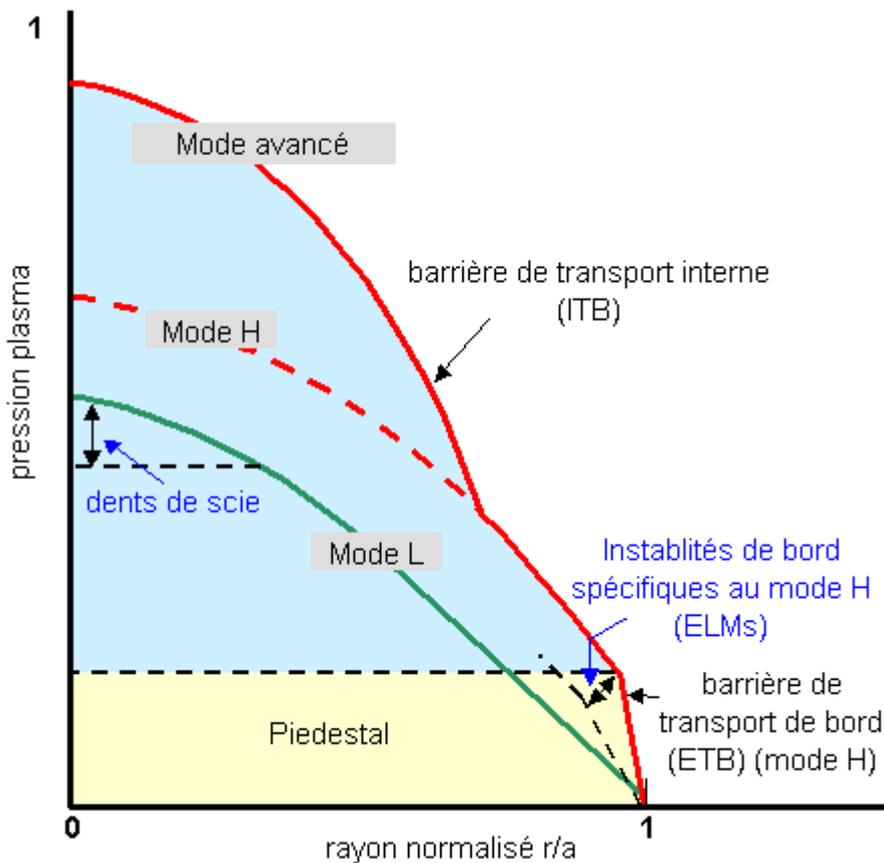
- une augmentation du temps de confinement avec le [grand rayon](#) de la machine et le courant plasma (ce qui explique en partie que JET, la plus grande des machines actuelles, obtienne les meilleures performances)
- une dégradation avec la puissance additionnelle couplée au plasma

Pour le tokamak de prochaine génération [ITER](#), une extrapolation basée sur la loi d'échelle établie à partir des résultats des machines actuelles prédit un temps de confinement de l'ordre de 5s, ce qui permet d'atteindre les objectifs assignés au projet ([facteur d'amplification](#) $Q=10$). Il est à noter que la puissance de seuil à la transition mode L - mode H dépend entre autre de la taille de la machine, ce qui conduit à un chiffre très élevé dans le cas d'ITER.



Les mécanismes stabilisants qui permettent de passer en mode H ne sont toujours pas complètement élucidés, et font l'objet de nombreuses études, tant théoriques qu'expérimentales. Si le mode H a été originellement découvert par hasard, on sait aujourd'hui que la stabilisation de la [turbulence](#), à l'origine de la dégradation du confinement, est obtenue grâce à un différentiel dans la vitesse de rotation poloïdale des différentes surfaces magnétiques (le fait que la vitesse de rotation varie fortement en passant d'une surface à une autre s'appelle un cisaillement de vitesse). En effet, les surfaces magnétiques sont en rotation sous l'effet des champs électriques qui règnent dans le plasma. Une modification de ces champs électriques entraînent un cisaillement de vitesse, qui empêche la turbulence de se développer. Une barrière de transport se crée au bord de la décharge, retenant chaleur et particules dans le coeur du plasma. Le point le plus caractéristique de ces scénarios est l'apparition de forts gradients dans la zone de bord de la décharge, conduisant notamment à l'établissement d'un piédestal en pression du plasma, proportionnelle à sa densité et à sa température : la courbe rouge représentant le mode H sur le schéma ci-dessous est plus raide dans la zone de bord que la courbe verte correspondant au mode L.

Toutefois, il ne faut pas s'imaginer que la situation soit calme : ces gradient très raides au bord donnent naissance à des [instabilités](#) spécifiques au mode H, que l'on appelle des ELMs (pour Edge Localised Modes). Le profil de pression du plasma relaxe périodiquement vers des pentes moins raides (pointillé noir sous la courbe rouge sur le schéma). Puis la barrière se reconstruit, le profil se raidit à nouveau avant de s'effondrer à l'ELM suivant. En conséquence, de grosses bouffées de particules et de chaleur s'échappent du plasma à chaque ELM, ce qui impose de fortes contraintes aux composants de la chambre à vide.



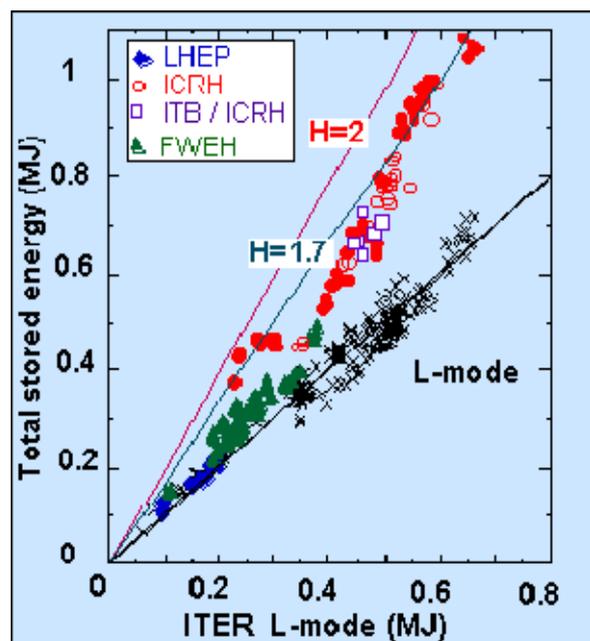
Le mode L n'est pas en reste, avec des instabilités au centre qu'on appelle dents de scie (pointillés sous la courbe verte au centre) : la température centrale s'effondre brutalement lorsqu'elle atteint une valeur limite, avant de remonter progressivement jusqu'à la dent de scie suivante où le phénomène se reproduit. On sait toutefois maintenant éviter les dents de scie suite à de nombreuses études théoriques et expérimentales, en travaillant dans des domaines de paramètres plasma (courant, champ magnétique, puissance additionnelle) où le phénomène ne se déclenche pas. Ce n'est pas encore le cas pour les ELMs du mode H : l'identification des mécanismes qui conduisent à ce phénomène est un domaine de recherche très actif.

• Les autres modes de confinement amélioré

En plus du mode H, il existe d'autres modes de confinement amélioré, et on a vu en particulier dans la fin des années 90 l'essor des scénarios dits "tokamaks avancés", dans lesquels les performances sont obtenues grâce à un contrôle très délicat des profils de courant et de champ électrique dans la décharge, générant des barrières de transport internes (ou ITB pour Internal Transport Barriers en anglais) dans une zone située plus à l'intérieur de la décharge que dans le cas du mode H, comme on le voit sur le schéma ci-dessus. Ces scénarios, prometteurs mais difficiles à mettre en oeuvre en raison de la rétroaction à effectuer sur le profil de courant, sont encore dans la phase exploratoire.

Sur Tore Supra, d'autres modes de confinement amélioré faisant intervenir des barrières de transport internes sont explorés, comme le montre la courbe ci-contre. Ils sont obtenus en utilisant des scénarios de chauffage spécifiques, dont l'action stabilisante sur le plasma diminue les phénomènes de transport. Le temps de confinement peut être ainsi augmenté jusqu'à un facteur 2 par rapport au mode L (voir le paramètre H, qui traduit l'amélioration du confinement par rapport au mode L). On a par exemple les modes LHEP (pour Lower Hybrid Enhanced Performance) obtenus avec le [chauffage à la fréquence hybride](#), et d'autres modes obtenus avec le [chauffage à la fréquence cyclotronique ionique](#), utilisé en mode ICRH (pour Ion Cyclotron Resonant Heating) ou FWEH (pour Fast Wave Electron Heating).

Sur d'autres machines comme Textor en Allemagne, un autre mode de confinement, le mode RI (pour Radiation Improved), a été obtenu en injectant des impuretés bien choisies dans le plasma, pour tirer profit d'un autre effet stabilisant (piquage de la densité). Il permet d'atteindre des performances proches de celles du mode H, tout en présentant l'avantage de [réduire la charge thermique](#) sur les composants face au plasma.



4) - Chauffage et génération de courant (p [1](#) - [2](#) - [3](#) - [4](#) - [5](#) - [6](#) - [7](#))

Comment obtenir des températures de l'ordre de la centaine de millions de degrés, requises pour le bon fonctionnement d'un réacteur à fusion ? C'est simple, il suffit d'allumer le chauffage ...

a) Introduction

Le [critère de Lawson](#), qui exprime les contraintes sur les paramètres du plasma pour produire de l'énergie à partir de la fusion thermonucléaire, impose une température de l'ordre de 10 à 20 [keV](#). Pour atteindre ces températures élevées (plusieurs centaines de millions de degrés), il est nécessaire de chauffer le plasma.

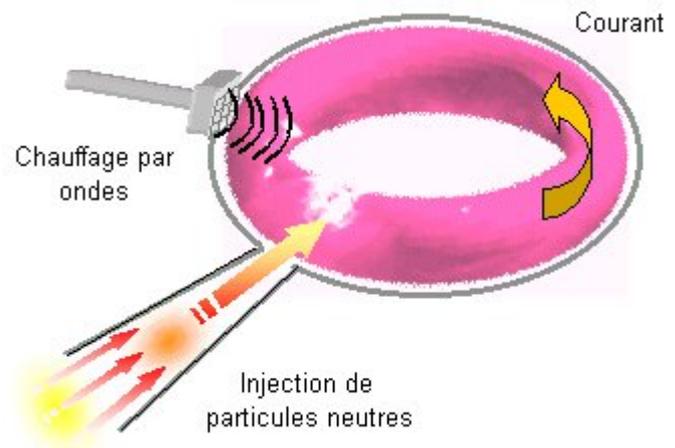
Le régime ohmique

Un premier mécanisme naturel de chauffage est l'effet Joule lié au courant circulant dans le plasma, utilisé pour créer la [configuration magnétique des tokamaks](#). Tout comme le filament d'une ampoule chauffe lorsque le courant passe à travers, le plasma va monter en température sous l'effet du courant intense (de l'ordre du MégaAmpères) qui le traverse. Malheureusement, cet effet, proportionnel à la résistance du plasma qui a tendance à s'écrouler lorsque la température augmente, sature et ne permet d'atteindre que des températures limitées (de l'ordre de 10 millions de degrés). Ce régime en chauffage "naturel" est appelé régime ohmique, en référence à l'unité de mesure d'une résistance électrique, l'ohm.

La chauffage additionnel

Pour atteindre les températures requises, on a donc recours à des systèmes de chauffage additionnels. On les classe en deux grandes familles :

- le [chauffage par injection de particules neutres](#) très énergétiques, qui consiste à chauffer le plasma grâce aux collisions entre les particules très énergétiques injectées et les particules du plasma.
- le [chauffage par ondes radio-fréquences](#), qui consiste à coupler au plasma une onde à une fréquence choisie de manière à être en résonance avec une catégorie de particules du plasma (c'est à dire à la même fréquence) et à leur communiquer de l'énergie, un peu comme un four micro-onde qui réchauffe un plat en agitant les molécules d'eau.



4) - Chauffage et génération de courant (p [1](#) - [2](#) - [3](#) - [4](#) - [5](#) - [6](#) - [7](#))

Comment chauffer un plasma ? Une solution est d'injecter dans la décharge un faisceau de particules très énergétiques qui cèdent leur énergie au plasma par collisions.

b) chauffage par injection de particules énergétiques

Pour obtenir des particules très énergétiques, la méthode est d'utiliser des champs électriques intenses pour accélérer un faisceau de particules chargées (des ions deutérium). Cependant, ces particules chargées ne pourraient pas rentrer telles quelles dans le tokamak, car si la configuration magnétique piège les particules à l'intérieur de la machine, elle empêche aussi les particules venant de l'extérieur d'y entrer. Il faut par conséquent neutraliser le faisceau avant de l'injecter dans la décharge, d'où le nom d'injecteur de neutres donné au système. Un injecteur de neutres est donc composé de trois parties principales :

- une source d'ions
- un accélérateur
- un neutraliseur

Afin de pénétrer jusqu'au centre de la décharge pour y déposer leur énergie, les particules du faisceau doivent être portées à très haute énergie. On peut atteindre jusqu'à 100 [keV](#) avec des ions positifs de deutérium, mais au-delà de cette limite, l'étape de neutralisation devient très délicate, et il faut passer à des ions négatifs de deutérium, plus difficiles à créer au niveau de la source d'ions mais avec une bien meilleure efficacité de neutralisation, pour atteindre le MeV nécessaire à la machine de prochaine génération [ITER](#).

Les injecteurs fonctionnant en ion positif sur les machines actuelles ([JET](#) par exemple) permettent de fournir des puissances importantes au plasma (de l'ordre de 20-30 MW), suffisantes pour passer le seuil permettant d'accéder à un [mode de confinement amélioré \(mode H\)](#). Le tokamak Tore Supra n'est pas équipé d'injection de neutres pour le chauffage du plasma, qui est assuré par d'autres [systèmes à onde radio-fréquence](#). Par contre, un faisceau de neutres servant de [diagnostic](#), utilisant le même principe de base mais moins puissant, est en cours de développement.

L'Association Euratom-CEA possède en outre plusieurs bancs d'essai dédiés au développement du système pour des applications sur les machines de prochaine génération, en particulier dans le domaine des ions négatifs.

4) - Chauffage et génération de courant (p. [1](#)-[2](#)-[3](#)-[4](#)-[5](#)-[6](#)-[7](#))

Les ondes électromagnétiques font partie de notre vie quotidienne, depuis la radio jusqu'au four à micro-ondes. Sur Tore Supra, des fours à micro-ondes d'un nouveau genre assurent le chauffage du plasma ...

c) chauffage par onde radio fréquence

Tout comme dans d'autres fluides comme l'air ou l'eau, des [ondes](#) de toutes sortes peuvent se propager dans un plasma. Cela donne lieu à un vaste domaine de la physique des plasmas, tant la richesse des possibilités suivant la nature de l'onde ([sa fréquence](#), [sa polarisation](#) ...) et les paramètres du plasma (densité, température ...) est grande. On classe en général les ondes par familles suivant leur fréquence et leur direction de propagation par rapport au champ magnétique (parallèle ou perpendiculaire). Suivant les cas, les ondes peuvent être propagatives ou évanescentes, se réfléchir ou changer de polarisation, augmenter en amplitude au cours du temps ou au contraire céder de l'énergie au plasma. C'est ce dernier cas qui nous intéresse ici, et c'est cette propriété que l'on utilise pour chauffer le plasma à l'aide d'ondes électromagnétiques avec des caractéristiques bien choisies.

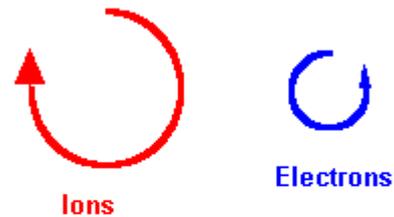
Il existe deux grands mécanismes permettant au plasma de gagner de l'énergie à partir d'une onde : l'absorption de type cyclotronique et l'absorption de type Landau. Dans les deux cas, l'interaction onde/particules est résonante, c'est à dire qu'elles vibrent à la même fréquence.

Dans le cas de l'absorption cyclotronique, il s'agit de coupler au plasma une onde à une fréquence résonante avec la fréquence de rotation d'une espèce (ions ou électrons) dans sa [trajectoire](#) autour des lignes de champ.

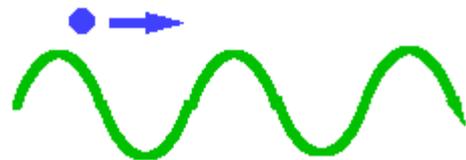
Dans le cas de l'absorption Landau, il s'agit de coupler au plasma une onde en résonance avec une population de particules, de telle façon que onde et particule aient quasiment la même vitesse de propagation. La situation est alors un peu comparable à celle du surfeur, se déplaçant à la même vitesse que la vague, et profitant de son énergie.

Absorptions :

● cyclotronique



● effet Landau



• La génération de courant

En plus de permettre de chauffer le plasma, les ondes permettent aussi de générer du courant. En effet, dans la configuration tokamak, un [courant](#) circulant dans le plasma est utilisé pour créer la composante poléoïdale du champ magnétique de confinement. Ce courant est lui-même induit par effet transformateur dont le plasma serait le secondaire, à partir d'un circuit primaire qui n'a qu'une capacité limitée. Lorsqu'on a vidé le circuit primaire, plus de courant plasma, donc plus de champ magnétique poléoïdal, donc plus de confinement : c'est la fin de la décharge. Sur Tore Supra, dont le champ magnétique toroïdal est assuré par des aimants supraconducteurs, et est donc permanent, c'est l'une des principales limites de la durée de décharge (sur les autres tokamaks où le champ magnétique toroïdal est produit à l'aide d'aimants classiques en cuivre, le système toroïdal est aussi une limite). On voit donc tout l'intérêt de générer le courant plasma par des moyens autres que l'effet transformateur : c'est qu'on appelle génération non inductive de courant. C'est un domaine très activement exploré par Tore Supra, le tokamak spécialiste des [décharges longue durée](#).

Pour passer de l'effet chauffage à l'effet génération de courant, il faut ajouter un effet de directionnalité sur le spectre de l'onde, afin qu'elle n'entre en résonance qu'avec des particules ayant une direction privilégiée. On fait alors un transfert net d'impulsion dans la direction toroïdale, ce qui génère du courant (puisque'il y a "plus" de charges circulant dans un sens que dans l'autre dans la direction toroïdale, la résultante est donc un courant).

NB : on peut aussi obtenir de la génération de courant en utilisant le [chauffage par injection de particules énergétiques](#), en dirigeant correctement le faisceau, pour transmettre de l'impulsion aux particules du plasma dans la direction toroïdale.

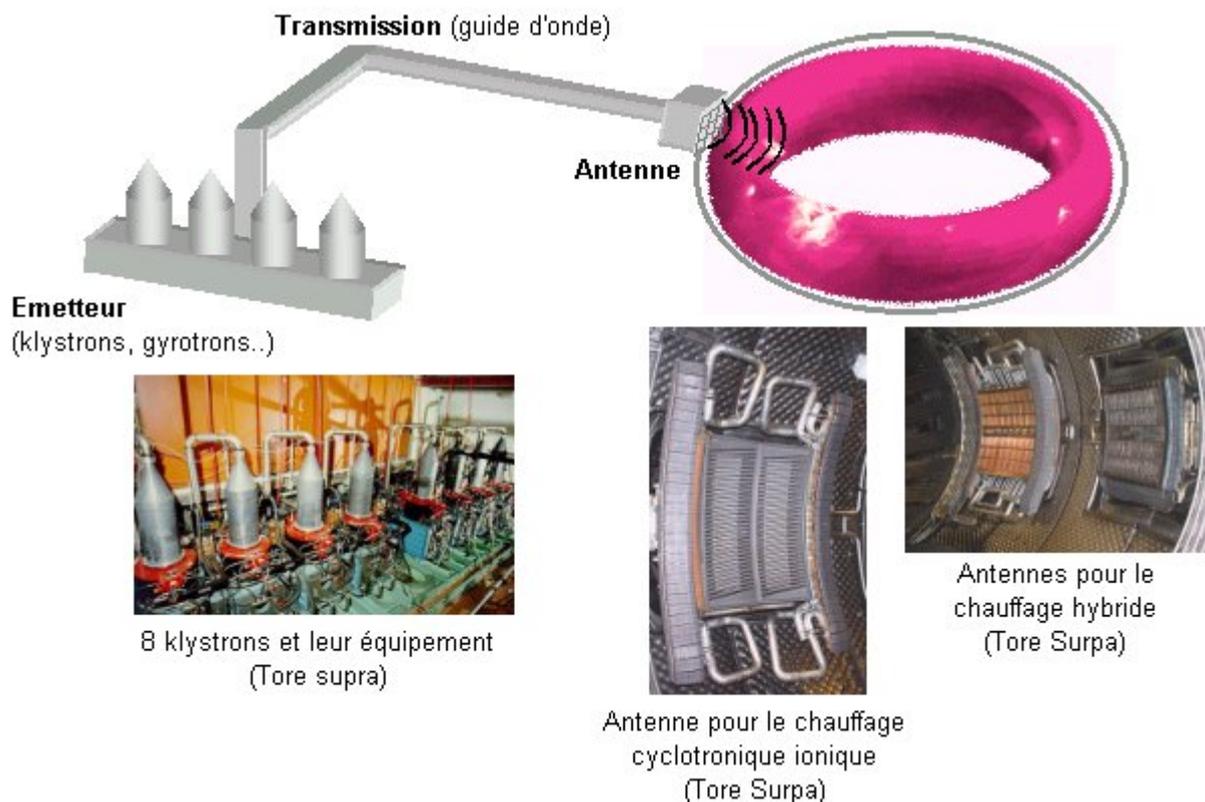
- **Les grandes familles de chauffage radio-fréquence**

Trois grandes familles de chauffage existent, classées suivant leur gamme de fréquence :

- le [chauffage à la fréquence cyclotronique ionique](#) (FCI) : quelques dizaines de MégaHertz (MHz)
- le [chauffage à la fréquence hybride](#) : quelques GigaHertz (GHz)
- le [chauffage à la fréquence cyclotronique électronique](#) (FCE) : la centaine de GHz

Chaque type de chauffage possède ses applications propres, et est capable de fournir différents résultats (chauffage ou génération de courant) suivant la manière dont il est utilisé.

Dans tous les cas, l'onde est générée par des systèmes différents suivant sa fréquence (tétrodes ou diacrodes pour la fréquence cyclotronique ionique, klystrons pour la fréquence hybride, gyrotrons pour la fréquence cyclotronique électronique), puis se propage jusqu'au tokamak par des lignes de transmission (guides d'onde) soigneusement dimensionnées, et enfin se couple au plasma par l'intermédiaire d'une antenne, placée à l'intérieur de la chambre à vide. Outre les problèmes matériels posés par ces systèmes électrotechniques délicats, la difficulté se situe au niveau du couplage de l'onde au plasma, faisant intervenir des processus de physique complexes et demandant un bon contrôle du plasma de bord.



4) - Chauffage et génération de courant (p. [1-2-3-4-5-6-7](#))

L'onde cyclotronique ionique, un outil polyvalent qui permet de jouer sur toute la gamme des scénarios de chauffage

c) chauffage par onde radio fréquence

- **Chauffage à la fréquence cyclotronique ionique (FCI)**

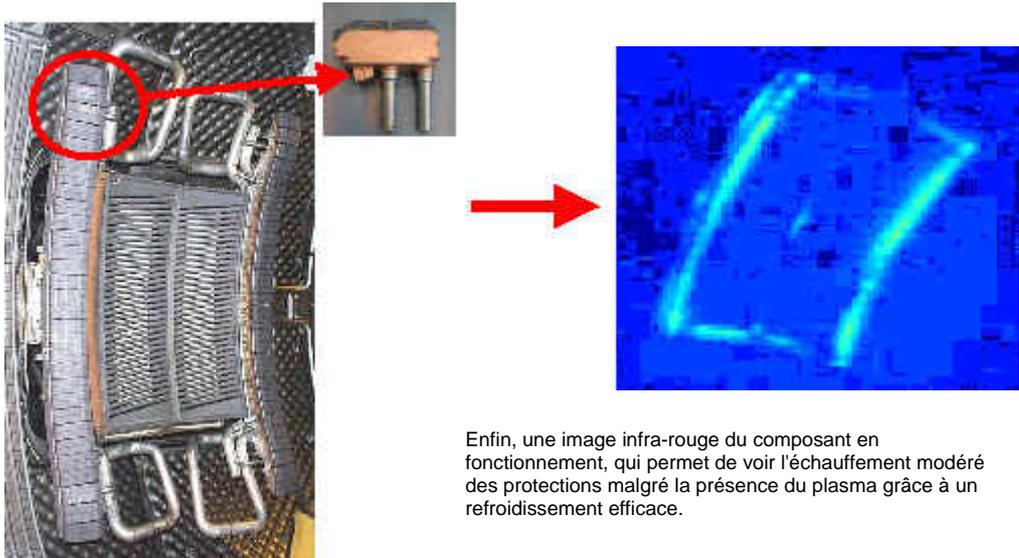
Ce système de chauffage utilise une [onde](#) rapide qui se propage principalement perpendiculairement aux surfaces de champ magnétique à une [fréquence](#) proche de celle de la fréquence de [giration](#) d'une des populations ioniques (de l'ordre de quelques dizaines de [MHz](#), correspondant à des longueurs d'onde décimétriques). La fréquence de giration dépend :

- de la masse de l'ion en question, ce qui permet d'être sélectif dans la population ionique qu'on choisit d'exciter,
- mais aussi du champ magnétique dont l'intensité décroît de l'intérieur vers l'extérieur du tokamak, ce qui permet de localiser l'endroit où on va déposer de l'énergie dans le plasma en réglant la fréquence de l'onde.

Malheureusement, l'absorption cyclotronique résonante n'est pas possible sur un plasma à une seule composante ionique (effet de blindage). On a alors recours à un scénario dit chauffage cyclotronique ionique minoritaire, qui consiste à utiliser un plasma avec une majorité d'ions deutérium et quelques pourcents d'ions hydrogène. On règle alors la fréquence sur l'hydrogène, de masse inférieure à celle du deutérium, et l'onde est fortement absorbée par les ions hydrogènes, qui voient leur énergie augmenter de plusieurs centaines d'eV à chaque passage de leur trajectoire par la zone de résonance. Ils vont ensuite transmettre leur énergie aux électrons par collisions, qui à leur tour vont chauffer les ions deutérium.

Plusieurs variantes existent. On peut choisir de régler la fréquence sur un multiple de la fréquence cyclotronique ionique, on parle alors de chauffage cyclotronique harmonique. En pratique, on utilise le second harmonique. On peut également, lorsqu'aucune espèce d'ions n'est minoritaire, utiliser une résonance dite hybride ion-ion, où l'onde se convertit pour aller chauffer les électrons : on parle alors de chauffage par conversion de mode.

On voit ici une antenne FCI dans la chambre à vide de Tore Supra (partie médiane), entourée par deux protections latérales qui l'abritent du plasma. En zoom, une image du composant de base des protections, capable de résister à la charge thermique du plasma (plusieurs MW/m²). On remarque également les tuyaux d'eau destinés à refroidir l'ensemble et la structure alvéolée de la protection d'enceinte qui recouvre la chambre à vide.



Enfin, une image infra-rouge du composant en fonctionnement, qui permet de voir l'échauffement modéré des protections malgré la présence du plasma grâce à un refroidissement efficace.

Le couplage de l'onde au plasma reste le point délicat : il faut régler finement le système pour obtenir la bonne résonance. L'antenne est un peu comme l'élément résonant dans un circuit électrique de type RLC, reliant la source de puissance et le plasma. La densité du plasma devant l'antenne est un paramètre critique : si elle est trop basse, l'onde ne passe pas. La puissance est alors réfléchie vers l'émetteur au lieu d'être transmise au plasma, ce qui pourrait être dommageable. Un système de sécurité veille donc sur l'ensemble, et coupe la puissance à l'émetteur en cas de mauvais couplage. D'autres systèmes complexes ont été développés pour que l'antenne puisse s'adapter à de petites variations de densité (à cause des fluctuations liées à la turbulence ou d'une perte de contrôle du plasma).

4) - Chauffage et génération de courant (p [1](#) - [2](#) - [3](#) - [4](#) - [5](#) - [6](#) - [7](#))

Le chauffage à la fréquence hybride : le champion de la génération de courant

c) chauffage par onde radio fréquence

- **Chauffage à la fréquence hybride**

En montant la [fréquence](#), on atteint le domaine de la fréquence hybride basse, qui utilise une [onde](#)  dite lente aux alentours de quelques [GHz](#) (correspondant à des longueurs d'onde centimétriques, donc qui deviennent faibles par rapport aux dimensions du plasma). La première utilisation de cette onde a été de se placer dans des conditions où l'onde rencontre, lors de son parcours dans le plasma, la résonance hybride basse. Ce chauffage hybride s'est révélé assez peu efficace et il n'est plus utilisé sur les tokamaks actuels.

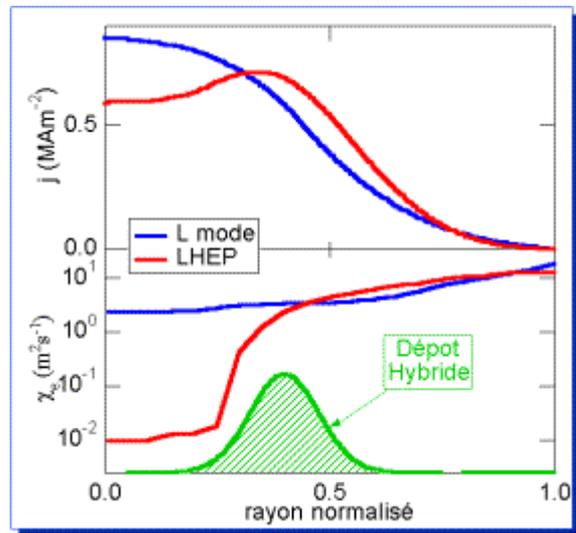
Par contre, l'onde hybride basse possède un [fort champ électrique](#)  parallèle au champ magnétique, ce qui en fait une bonne candidate pour accélérer les électrons par [absorption Landau](#) dans la direction toroïdale. On l'utilise donc en mode [génération de courant](#), en effectuant un phasage entre les différents guides d'onde débouchant dans le tokamak, de façon à générer une onde avec un spectre toroïdal dissymétrique. L'onde se couple alors au mouvement parallèle des électrons, et plus particulièrement des électrons très énergétiques présents en tout petit nombre naturellement dans la décharge. Ces électrons suprathermiques l'absorbent fortement (si fortement que l'onde a parfois du mal à atteindre le coeur de la décharge). L'onde a donc tendance à développer cette population suprathermique : attention aux dégâts sur les [composants face au plasma](#) si elle n'est pas parfaitement contrôlée. Par ailleurs, même si elle n'est pas absorbée trop rapidement, ce type d'onde a du mal à se propager dans les plasmas très denses et très chauds. Pour ces raisons, l'onde hybride est un bon candidat pour générer du courant plutôt dans la partie périphérique des plasmas de type réacteur. Par contre, en raison de l'absorption directe et intense des électrons, l'efficacité de génération de courant (c'est à dire la quantité de courant créée par unité de puissance) de l'onde hybride compte parmi les meilleures.

On voit ici une antenne hybride (que l'on appelle souvent un grill) en cours de maintenance avant installation dans Tore Supra.



Sur Tore Supra, ce système de chauffage est très utilisé pour la génération non inductive de courant dans le cadre du programme [décharges longues](#). C'est avec 2.3 MW d'hybride injectés pendant 2 minutes dans la machine que Tore Supra détient le record mondial d'énergie de 280 MJ. Comme toujours, le point critique est d'assurer un bon couplage de l'onde au plasma. Contrairement au [système FCI](#), qui exige de fonctionner au dessus d'une densité critique, le système hybride est d'autant plus efficace en génération de courant qu'il travaille à basse densité.

En outre, le chauffage hybride est utilisé pour passer en [mode de confinement](#) amélioré, le LHEP (ou Lower Hybrid Enhanced Confinement) en façonnant le profil de courant j à l'intérieur de la décharge. Le courant généré par l'hybride (en vert ici), localisé à mi-rayon du tokamak, vient s'ajouter au courant normal, permettant de passer du profil de courant en bleu du mode L à celui en rouge du mode LHEP. La bosse de courant provoque un effet sur le [transport des particules et de l'énergie](#), comme on le voit sur le coefficient de transport de la chaleur χ_e , qui s'effondre au centre de la décharge en mode LHEP (en rouge) alors qu'il est relativement constant en mode L (en bleu). Ceci correspond à une barrière de transport, et à un confinement amélioré.



4) - Chauffage et génération de courant (p. [1](#)-[2](#)-[3](#)-[4](#)-[5](#)-[6](#)-[7](#))

L'onde cyclotronique électronique : un outil de précision, permettant de déposer de la puissance là où on veut.

c) chauffage par onde radio fréquence

- **Chauffage à la fréquence cyclotronique électronique**

On passe cette fois dans le domaine de la centaine de GHz pour la [fréquence](#), correspondant à des longueurs d'onde millimétriques. Deux modes de propagation sont possibles pour ce type d'[onde](#), qui se propage perpendiculairement aux surfaces magnétiques : le mode O, qui possède un [champ électrique](#) parallèle au champ magnétique du tokamak, et le mode X, qui possède un champ électrique perpendiculaire au champ magnétique du tokamak.

Comme dans le cas du [chauffage cyclotronique ionique](#), l'interaction se fait au moment où l'électron traverse une couche de résonance, fixée par la fréquence utilisée, et dépendant du champ magnétique. On peut également utiliser le chauffage harmonique. L'avantage de ce type de chauffage est de produire des dépôts très localisés, on utilise comme un instrument de précision pour aller apporter de l'énergie en un point bien ciblé du plasma, ce qui peut produire un effet stabilisant sur certaines [instabilités](#). De plus, contrairement aux deux autres, ce mode de chauffage est moins sensible aux conditions de bord au niveau de l'antenne, très simplifiée, ce qui rend le couplage aisé dans une plus large gamme de paramètres plasma (l'onde se propage même dans le vide !). Par contre, le générateur de puissance utilisé (gyrotron) est plus délicat à mettre

en oeuvre, surtout en impulsion longue, et Tore Supra commence juste l'expérimentation avec un nouveau système adapté aux régimes stationnaires.

On voit ici un générateur de puissance du chauffage FCE, en cours de test en laboratoire.



On peut également utiliser ce système pour [générer du courant](#), mais le mécanisme étant indirect, on n'atteint pas l'efficacité obtenue avec le [chauffage hybride](#).

4) - Chauffage et génération de courant (p [1](#)-[2](#)-[3](#)-[4](#)-[5](#)-[6](#)-[7](#))

Non content de détenir le record d'énergie injectée dans un tokamak, Tore Supra se lance dans la course au GigaJoule ...

d) le futur : atteindre les sommets avec le projet CIMES ...

Dans sa poursuite du programme [décharges longues](#), Tore Supra a entamé en 2000 une extension de son système d'injection de puissance avec le projet CIMES ("Composants pour l'Injection de Matière et d'Énergie Stationnaire") après avoir réalisé une amélioration de son système d'extraction de puissance avec le projet [CIEL](#) ("Composants Internes Et Limiteur"). Le projet CIMES, décomposé en plusieurs phases, permettra d'atteindre à terme, vers 2010, près de 20 [MW](#) de puissance couplée au plasma en continu (contre une dizaine de MW sur 30 s possible aujourd'hui au niveau des systèmes de chauffage, mais limitée à 10 s par les capacités d'extraction de la chaleur des composants face au plasma de la machine avant le projet [CIEL](#)). Le projet inclut en outre une amélioration du système d'[alimentation du plasma](#) en matière avec un nouvel injecteur de glaçons de deutérium.

Au delà du record actuel de 280 [MJ](#) d'énergie injectée dans le plasma détenu par Tore Supra (en couplant 2.3 MW de [chauffage hybride](#) venant s'ajouter au [chauffage ohmique](#) pendant 120s), on se propose donc d'atteindre à l'aube des années 2000 l'étape de 1 GJ, puis à terme la vingtaine de GJ, se rapprochant ainsi des 200 GJ envisagés pour la machine de prochaine étape [ITER](#).

Tore Supra offre ici une opportunité unique de tester l'ensemble des composants des différents [systèmes de chauffage](#) (générateurs, lignes de transmission, antennes) sur des impulsions longues, ce qui permettra de guider les choix en la matière pour les machines de prochaine génération.

5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p [1](#)-[2](#)-[3](#)-[4](#)-[5](#)-[6](#)-[7](#))

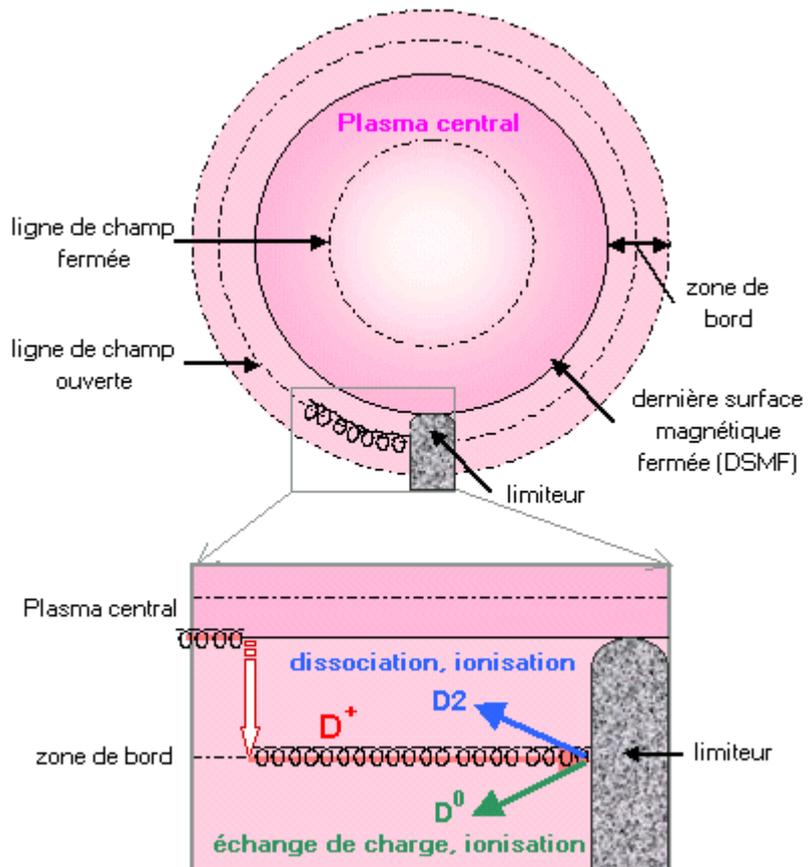
A force de diffuser vers la périphérie du plasma, les particules finissent bien par sortir du piège magnétique : que se passe-t-il lorsqu'elles rencontrent la paroi ? A quoi ressemble le plasma de bord d'un tokamak ?

a) Introduction

Malgré le [piège magnétique](#) de la configuration tokamak, le confinement des particules et de l'énergie dans le plasma n'est pas parfait, et chaleur et matière [diffusent](#) du centre vers l'extérieur de la décharge. Ceci a pour conséquence de conduire des quantités importantes d'énergie et de particules vers le bord de la décharge (avec des flux de chaleur supérieurs à ceux qui règnent dans le soleil !) : c'est alors aux [composants face au plasma](#) de gérer simultanément les deux problèmes ...

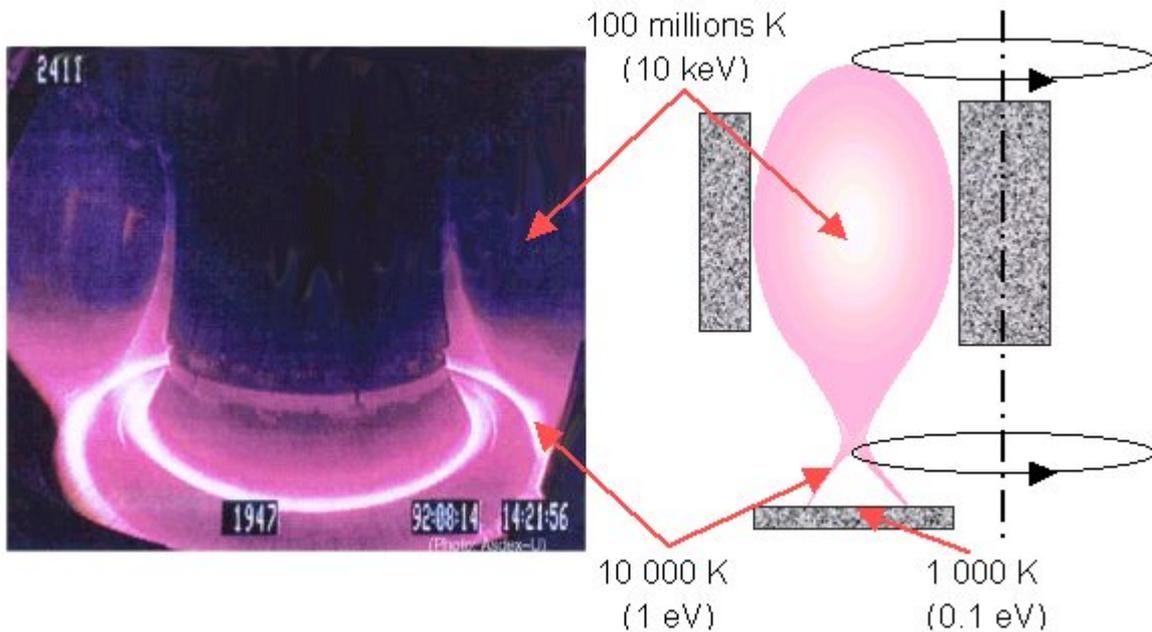
A quoi ressemble la *configuration magnétique dans la zone de bord* ? La différence avec le plasma central, où les lignes de champ sont en circuit fermé, c'est que dans cette zone, les lignes de champ sont ouvertes, interrompues par un obstacle solide (le composant face au plasma). On appelle *Dernière Surface Magnétique Fermée (DSMF)* la surface magnétique frontière entre les deux zones. Cette DSMF est définie par le premier point de contact avec un objet solide, qui limite donc le plasma, d'où le nom de limiteur pour les composants qui font face en première ligne au plasma.

Les particules chargées, qu'elles soient dans la zone centrale ou de bord, [suivent toujours les lignes de champ](#) et vont donc entrer en collision avec le solide : c'est ce qu'on appelle les interactions plasma/paroie. Lors de cette collision, les particules chargées se neutralisent (c'est à dire [redeviennent des atomes ou des molécules](#) en récupérant des électrons) et deviennent alors insensibles au champ magnétique, libres de se déplacer au gré des collisions avec les composants face au plasma ou les autres particules, jusqu'au moment où elles s'ionisent à nouveau par contact avec le plasma. Elles recommencent alors à suivre les lignes de champ, et peuvent soit réalimenter le plasma en particules si elles ont été ionisées dans la zone centrale de la décharge, soit faire à nouveau une collision avec un solide si elles ont été ionisées dans la zone de bord. L'histoire se poursuit ainsi jusqu'à ce que la particule soit extraite du système, en étant absorbée soit [par la paroi](#), soit par le [système de pompage](#) externe. On appelle l'ensemble de ces phénomènes le recyclage.



On assiste donc à une rencontre assez extraordinaire, où le quatrième état de la matière (le plasma) rejoint les 3 autres (la paroi solide, le gaz résultant de l'interaction du plasma avec la paroi, et le liquide, qui circule à quelques centimètres de la surface de la paroi pour la refroidir...). On parcourt également toute une échelle de température, en passant de la centaine de millions de degrés pour le plasma central à 10 000 degrés pour le plasma de bord où se trouvent les molécules et les atomes, et à 1000 degrés pour la température de surface des composants face au plasma.

On distingue ces trois zones de températures sur une image du tokamak [Asdex](#) prise par une caméra travaillant dans le domaine de la lumière [visible](#), où on voit le plasma de bord fortement rayonner, tandis que le plasma central, à très haute température, émet dans une gamme de longueur d'onde différente [vers les rayons X](#) et apparaît comme transparent pour la caméra visible.



5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p 1-2-3-4-5-6-7)

Le plasma agresse la paroi en la soumettant à des flux de particules et de chaleur intenses ; la paroi se venge sur le plasma, en émettant des impuretés qui le polluent. Comment trouver le matériau qui réconciliera les deux parties ?

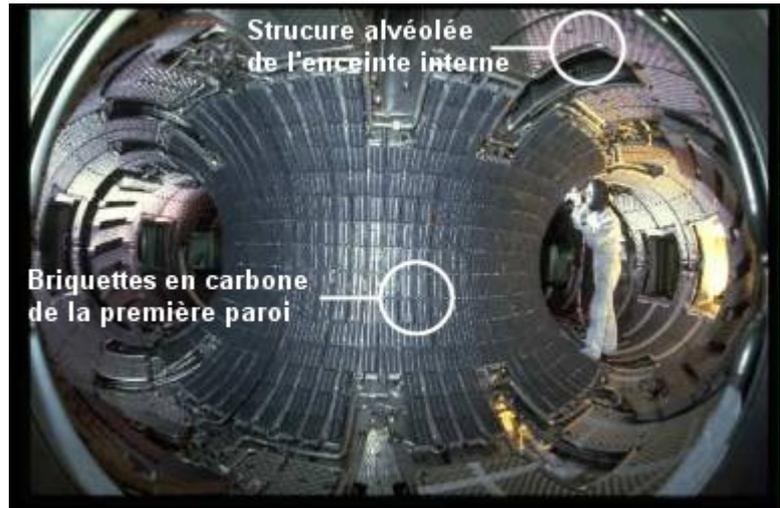
b) Les matériaux

C'est avec l'obtention de plasmas de plus en plus performants qu'on a pris conscience de l'importance des interactions plasma/paroi. En effet, dans les premières expériences, la durée des décharges était trop courte pour qu'on observe un échauffement ou un endommagement significatif des composants face au plasma. C'est avec l'augmentation de la puissance couplée au plasma qu'on s'est aperçu que la paroi, soumise au bombardement des particules, émettait des impuretés, arrachées par érosion, comme l'eau d'une rivière érode petit à petit la roche sur laquelle elle passe. Ces impuretés venaient polluer le plasma central et limiter les performances de la machine en rayonnant l'énergie couplée au plasma, qui est alors perdue au lieu de servir à chauffer la décharge (voir le [bilan énergétique](#) dans un tokamak).

Une première idée a été de changer le matériau de la paroi, et on est passé des premières machines en métal à des composants en matériaux dits légers, comme le carbone ou le béryllium. En effet, en plus de leurs bonnes propriétés thermiques, ces matériaux présentent l'avantage de rayonner moins fortement que les métaux lorsqu'ils sont pulvérisés dans le plasma. Ainsi, le tokamak Tore Supra est équipé en majeure partie de composants en carbone, matériau également utilisé pour les boucliers thermiques dans l'industrie spatiale. Des technologies originales de liaison entre le cuivre (matériau de refroidissement) et le carbone (matériau face au plasma) ont en outre été développées pour les besoins spécifiques de Tore Supra, seul tokamak à fonctionner en [impulsion longue](#) ce qui l'oblige, comme dans le futur réacteur, à utiliser des composants refroidis (c'est à dire parcourus par des circuits d'eau pressurisée). Ces technologies ont été mises en oeuvre pour le projet [CIEL](#), destiné à améliorer la capacité d'extraction de la chaleur de Tore Supra.

NB : le carbone possède par ailleurs d'autres propriétés physico-chimique, en terme de [rétention d'hydrogène et d'érosion](#) en particulier, qui ont de fortes répercussions sur les interactions plasma/paroi. Les problèmes liés à la rétention du tritium radioactif dans une machine de type réacteur font que l'on continue à analyser des matériaux alternatifs, comme le tungstène.

On voit ici, dans la chambre à vide de [Tore Supra](#), un soudeur à l'oeuvre sur la première paroi interne, constituée de centaines de briquettes en carbone. On distingue également la structure alvéolée de l'enceinte interne, qui elle est restée métallique, le plasma n'étant pas directement en appui dessus.



Le tokamak [JET](#) possède, quant à lui, en plus d'éléments à fort flux en carbone, une paroi recouverte de béryllium. Le port d'une combinaison pour intervenir à l'intérieur de la chambre est nécessaire en raison des poussières nocives générées par le béryllium.

5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p. [1-2-3-4-5-6-7](#))

Comment empêcher plasma et paroi de se nuire mutuellement ? Les physiciens ont développé plusieurs configurations pour éloigner le plasma central du lieu d'interaction plasma/paroi.

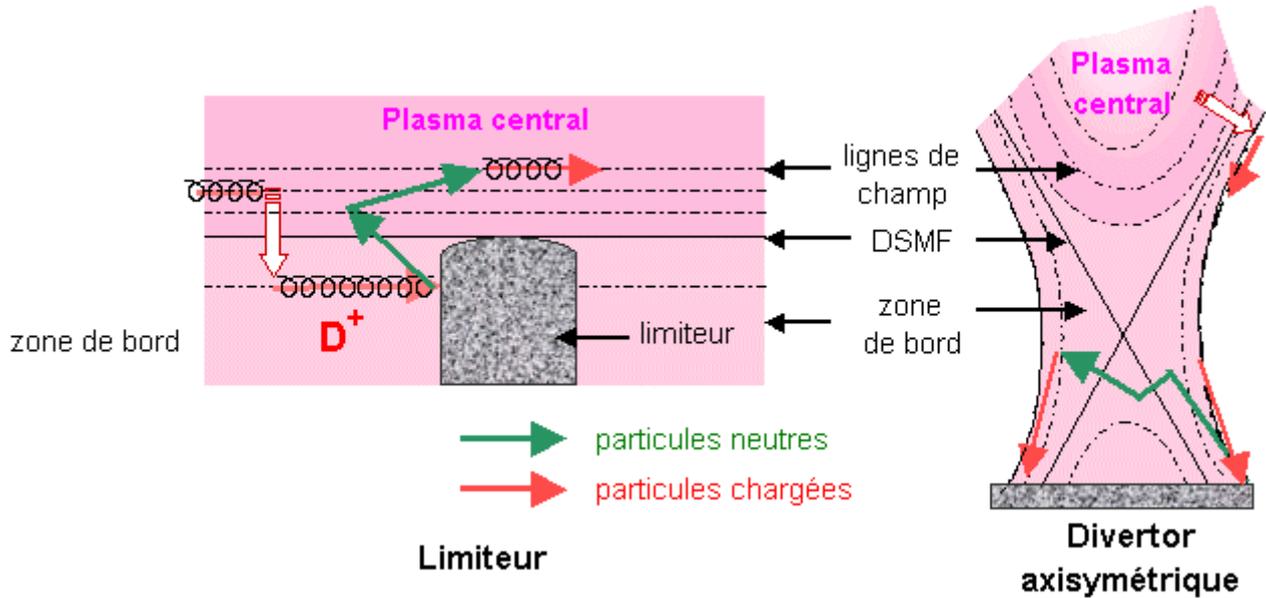
c) Les différentes configurations du plasma de bord

- **divertor axisymétrique**

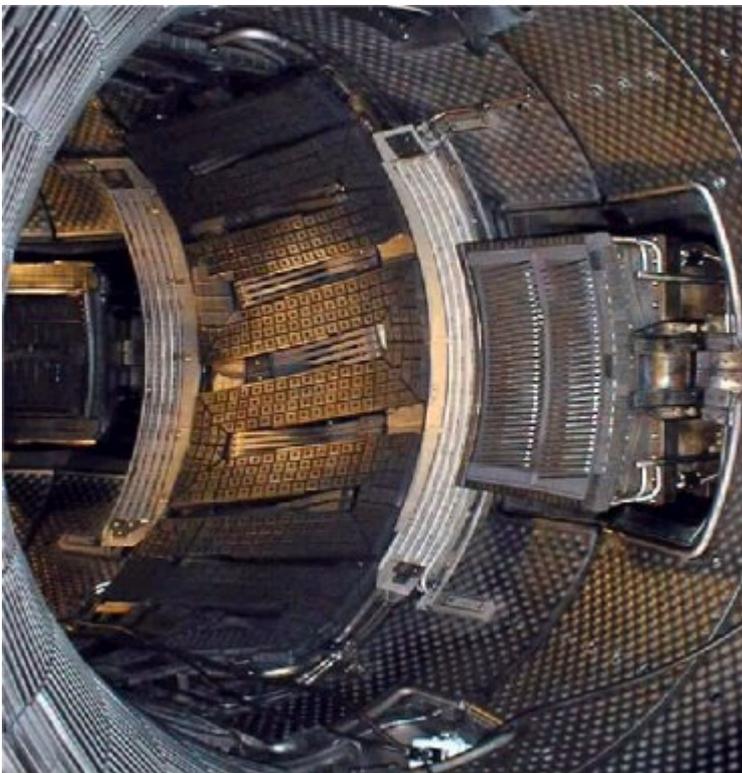
Après l'optimisation des [matériaux](#), une deuxième idée a été d'éloigner la zone où a lieu l'interaction plasma/paroi du plasma central, afin d'éviter que les impuretés émises dans cette zone ne parviennent jusqu'au coeur de la décharge : c'est la configuration divertor axisymétrique, où la [DSMF](#) n'est plus définie par le point de contact avec un solide comme dans le cas de la configuration limiteur, mais par une frontière "magnétique" créée en rajoutant une bobine autour du tokamak.

On comprend l'avantage du système sur le schéma ci-dessous. Le flux de particules sortant du plasma par [diffusion](#) radiale est représenté par la grosse flèche blanche bordée de rouge. Dans la première configuration, à gauche, les particules suivent les lignes de champ et vont rencontrer le limiteur (flèche rouge 1). Elles se neutralisent alors, et peuvent lors de l'impact arracher des impuretés, également sous forme de neutres, à la

paroi. Ces particules neutres ne sont plus astreintes à suivre les lignes de champ (flèche verte 2) et circulent librement jusqu'à ce qu'elles soient à nouveau ionisées par le plasma. Etant donnée la proximité du plasma central, elles ont une forte probabilité de s'ioniser à nouveau au coeur de la décharge (flèche rouge 3). Par contre, dans la configuration divertor, à droite, le flux sortant du plasma est dirigé en suivant les lignes de champ vers des plaques de neutralisation situées loin du plasma central. Les impuretés ont alors plus de chance d'être réionisées dans la zone de bord, où elles suivent les lignes de champ pour être interceptées à nouveau par les plaques de neutralisation. Elles restent alors en circuit fermé sans perturber le coeur de la décharge : on parle d'écrantage des impuretés. C'est en testant cette nouvelle configuration que le [mode de confinement amélioré](#) dit mode H a été découvert sur la machine allemande [Asdex](#) dans les années 80, ce qui a définitivement assuré le succès de ce système. Les plus grandes machines actuelles, comme [JET](#) et [JT60-U](#), sont équipées de ce type de dispositif.



- **Divertor ergodique**

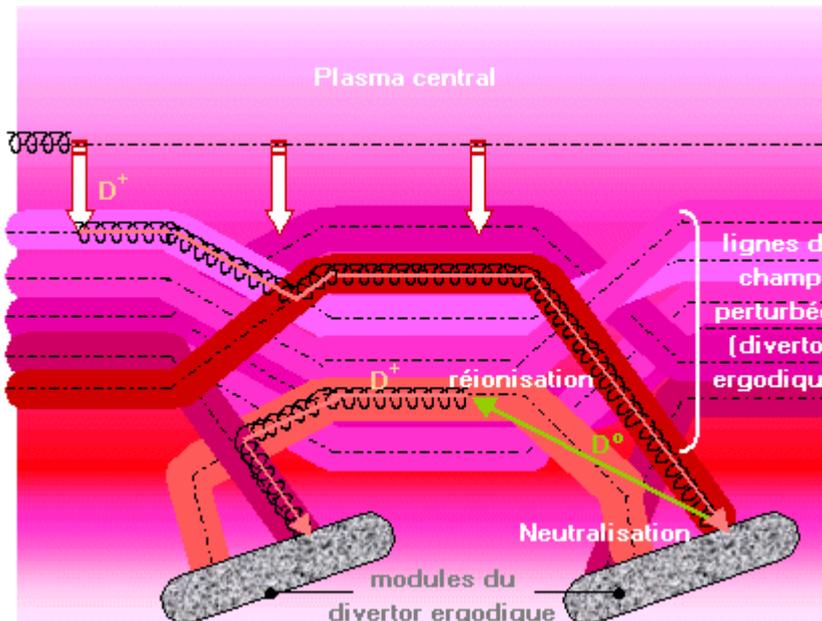
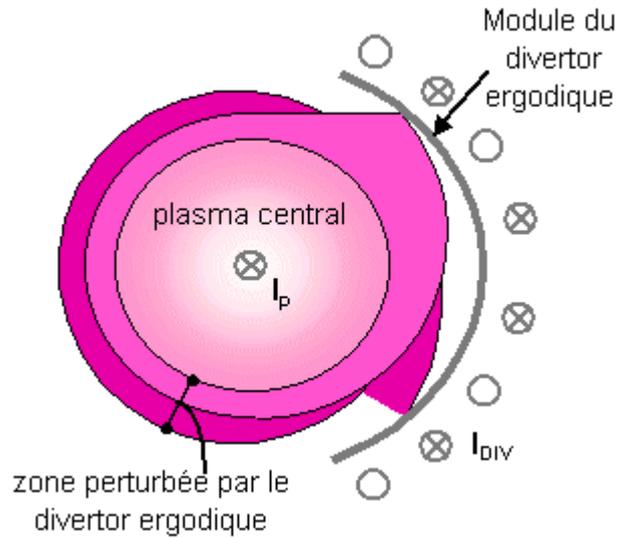


Module de divertor ergodique dans la chambre à vide de Tore Supra

Sur Tore Supra, on a testé une variante de cette configuration, le divertor ergodique, dont l'idée de base reste la même - éloigner la zone d'interaction plasma/paroi du plasma central - mais qui utilise pour ce faire une perturbation magnétique qui "ergodise" les lignes de champ au bord de la machine, c'est à dire qu'au lieu de la structure bien ordonnée en tores emboîtés, on obtient au bord un mélange chaotique des lignes de champ. L'interaction plasma-paroi n'est plus éloignée "géographiquement" mais "magnétiquement" de la zone centrale. On retrouve ici le concept du chaos, domaine de recherche fondamentale en pleine expansion, très en vogue actuellement en physique, mais également en météo ou en économie.

A quoi ressemble cette bête mystérieuse ? A 6 modules placés régulièrement autour de la chambre, dans lesquels on fait circuler un courant pour créer la perturbation.

Le courant servant à créer la perturbation (I_{div}) circule dans les bobinages représentés en noir ci-contre. Les surfaces magnétiques réagissent en se déformant près du module de divertor ergodique, et le plasma vient en contact avec le divertor au niveau des neutraliseurs.



On voit ci-contre une représentation schématisée des lignes de champ (tubes de différentes couleurs) dans la zone de bord en configuration divertor ergodique, dont les modules sont représentés en rouge. Les lignes de champ sont mêlées et en reprenant le schéma de circulation des particules décrit pour les autres configurations, on constate que les particules neutres ont une forte probabilité d'être réionisées sur une ligne de champ qui retourne à l'un des modules, et donc de rester coincée dans la zone de bord où s'exerce la perturbation.

5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p. 1-2-3-4-5-6-7)

Le divertor ergodique : une configuration originale testée par Tore Supra pendant 10 ans.

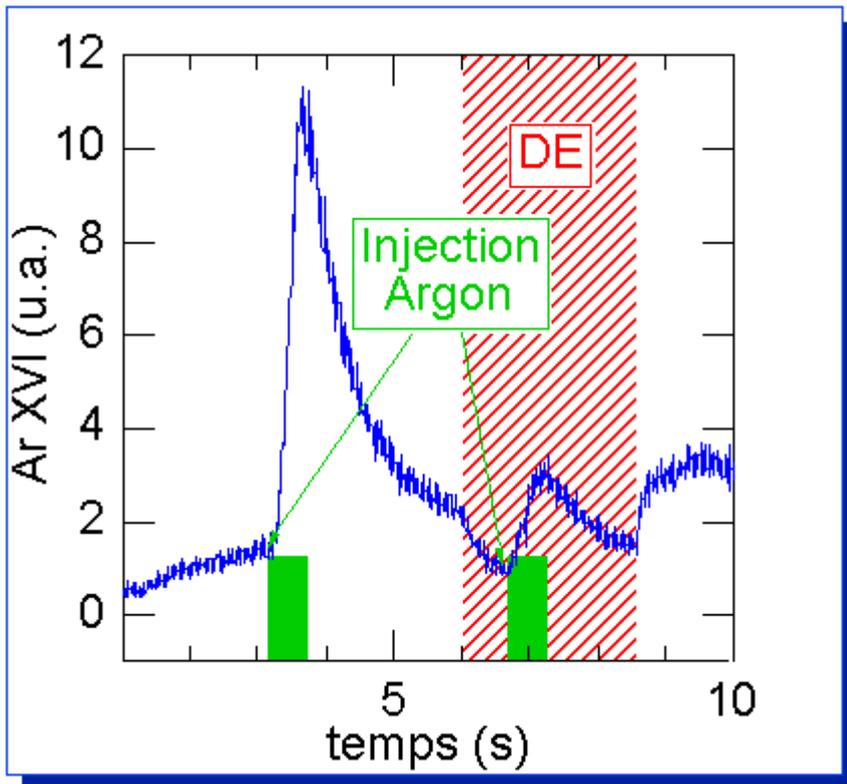
c) Les différentes configurations

- **Le divertor ergodique : les résultats**

Tore Supra a testé intensivement pendant 10 ans les possibilités du divertor ergodique, qui a été démonté en 2000 pour redémarrer la machine en configuration [CIEL](#) avec une capacité d'extraction de chaleur augmentée (incompatibilité entre le divertor ergodique et le composant principal du projet CIEL : le limiteur pompé toroidal).

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- un bon contrôle de la perturbation ergodique
- un écrantage des impuretés efficace
- une forte capacité à rayonner uniformément la puissance



Par exemple, on voit ici l'effet d'écrantage du divertor ergodique sur les impuretés. On effectue successivement deux injections d'argon identiques, symbolisées par les deux crêneaux verts, l'une en configuration limiteur, l'autre avec le divertor ergodique activé. On mesure en bleu l'évolution temporelle du signal d'argon dans le centre de la décharge. Avant l'injection, le signal est quasiment nul, correspondant à des traces d'argon dans la machine. Au moment de l'injection, le signal monte en flèche, puis redescend puisque l'argon diffuse vers le bord de la décharge et est peu à peu éliminé du centre. On constate que pendant la phase avec divertor ergodique, la même injection conduit à un niveau d'argon au centre beaucoup plus faible : c'est l'efficacité d'écrantage du divertor ergodique, qui bloque les impuretés au bord.

Des analyses sont actuellement en cours pour étudier l'adaptation d'un divertor ergodique à une machine de prochaine génération (qu'on imagine pour le moment équipée d'un divertor axisymétrique). En attendant, c'est la machine allemande [Textor](#) qui prendra le relais des études de divertor ergodique, avec l'installation d'un nouveau dispositif pour un redémarrage prévu en 2002.

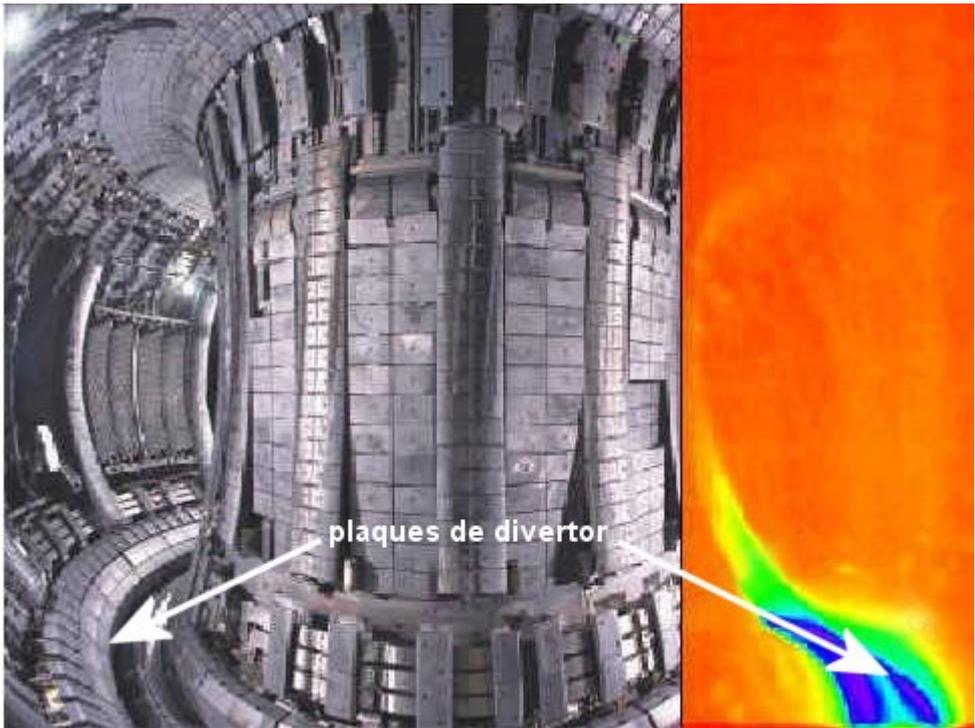
5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p [1-2-3-4-5-6-7](#))

Comment gérer des flux de chaleur supérieurs à ceux qui règnent à la surface du soleil ? En utilisant des technologies de pointe pour les composants de la paroi, et en agissant sur le plasma pour atténuer la charge thermique.

d) Extraction de chaleur et scénarios rayonnants

- **Le plasma de bord fait mal ...**

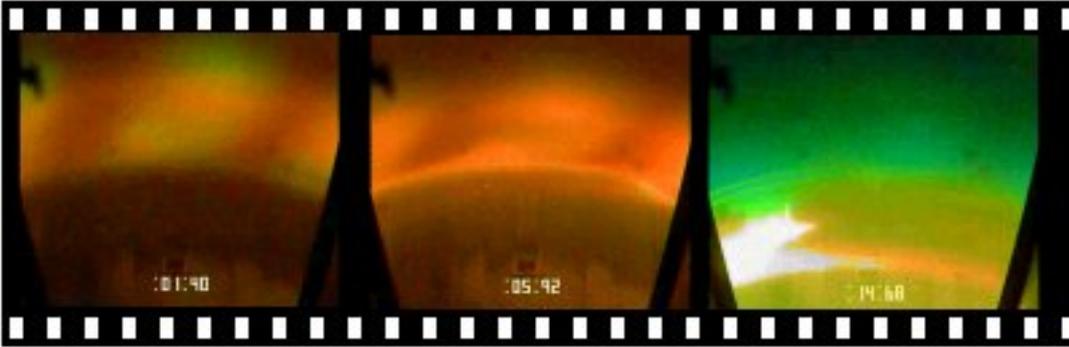
Lorsque les particules du plasma suivent les lignes de champ et interceptent les parois dans la zone de bord, elles y déposent leur énergie, qui, même si elle est bien inférieure à ce qu'on rencontre au coeur du plasma, reste redoutable pour le solide (1 eV, qui correspond à l'ordre de grandeur des énergies de liaison entre atomes). Dans Tore Supra, on peut atteindre des flux thermiques de plusieurs dizaines de MW/m² le long des lignes de champ, du même ordre de grandeur que ceux qui règnent à la surface du soleil (environ 70 MW/m²). Pour donner un ordre de grandeur, 10 MW/m² tombant sur du carbone simple de type graphite non refroidi mènent à une élévation de température de 1000 °C en 1 seconde : autant dire que rien ne résiste bien longtemps à ces conditions !



On voit ici une image infra-rouge du tokamak JET, superposée à une photo de la machine, où on observe clairement le flux thermique concentré sur les plaques de divertor (en bas en bleu).

De même, l'image de droite montre le flux thermique sur la paroi interne de Tore Supra enregistrée par une caméra infra-rouge.

Le film ci-dessous montre la charge thermique du limiteur pompé toroïdal de Tore Supra.



 [Voir le film "charge thermique du limiteur de Tore Supra" \(mpg, 1904 ko\)](#)

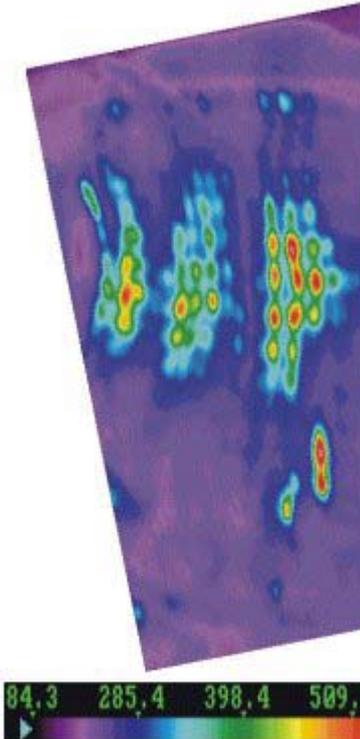
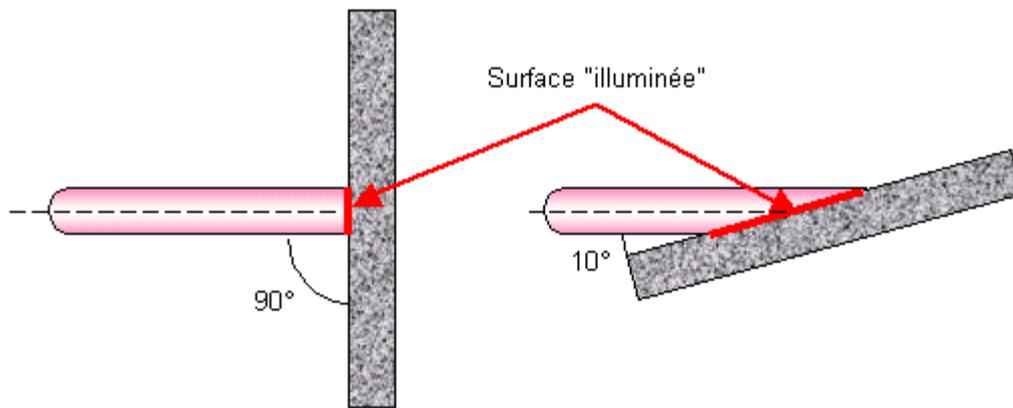


Image infra rouge de la paroi interne de Tore Supra

Une première idée pour alléger la charge thermique est d'optimiser la géométrie des composants face au plasma de façon à intercepter les lignes de champ de manière rasante et d'étaler le flux incident sur une surface la plus large possible. Par exemple, le fait d'intercepter une ligne de champ avec un angle de 10° au lieu de 90° (incidence normale, situation la plus contraignante) permet d'atténuer la charge thermique d'un facteur 6.



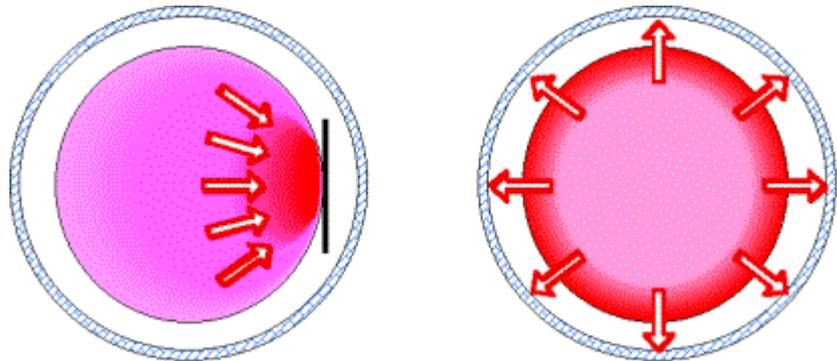
- **Le cas de Tore Supra**

Dans Tore Supra, machine destinée à travailler en [décharges longues](#), un soin tout particulier a été apporté à la conception des [composants face au plasma](#), qui sont refroidis par une circulation d'eau sous pression pour pouvoir résister à des charges thermiques intenses sur des temps longs. Comment dimensionne-t-on ces composants ? Plusieurs critères entrent en jeu. Tout d'abord, le matériau qui fait face au plasma : il faut qu'il résiste bien aux chocs thermiques, qu'il évacue au mieux la chaleur, qu'il ne pollue pas trop le plasma si il est érodé. Le carbone, mais aussi le tungstène ou le béryllium, sont de bons candidats. Ensuite, le matériau de structure, sur lequel le matériau face au plasma est assemblé et qui assure le refroidissement : là, c'est l'évacuation de chaleur qui est privilégiée, et on choisit en général des nuances de cuivre dans lequel sont usinés des canaux de refroidissement où circule de l'eau sous pression. Reste alors à optimiser l'épaisseur du matériau face au plasma. Si on veut minimiser l'élévation de température du composant, il faut le choisir le plus mince possible, afin que la chaleur diffuse le plus rapidement possible dans le matériau de structure. D'un autre côté, il faut quand même lui assurer une certaine solidité, et une durée de vie suffisante face à l'[érosion](#) par le plasma. En pratique, on arrive à un compromis autour d'une épaisseur de 1 cm. Les progrès dans les matériaux utilisés (type composite en fibre de carbone ou CFC, utilisé également dans le domaine de l'industrie spatiale) et dans les techniques des circuits de refroidissement ont ainsi permis d'élaborer des composants capables de résister en continu à 10 MW/m^2 . Tore Supra constitue un banc test idéal pour les technologies et les matériaux développés pour la machine de prochaine génération (la puissance injectée dans le plasma est moindre mais concentrée sur une surface plus réduite puisque la machine est plus petite : les flux de chaleur mis en jeu sont comparables).

- **Une idée rayonnante ...**

Une fois la géométrie des composants face au plasma optimisée, une deuxième idée est d'agir sur le plasma pour réduire la charge thermique : c'est ce qu'on recherche avec les [scénarios rayonnants](#) \oplus , où on essaye d'atténuer le flux thermique concentré sur le premier composant rencontré par le plasma en créant une couche périphérique qui rayonne de la puissance uniformément autour de la machine, ce qui permet de mieux répartir la charge sur l'ensemble des composants.

Par exemple, on voit ici dans le cas d'une configuration limiteur la charge thermique concentrée sur le premier composant face au plasma rencontré par les lignes de champ dans le cas d'un scénario sans rayonnement (à gauche), alors que dans le cas d'un scénario rayonnant (à droite), la puissance est répartie sur l'ensemble des parois de la machine, ce qui conduit à des flux thermiques moindres.



Pour une fois, on cherche donc volontairement à dissiper de la puissance par rayonnement, mais de façon bien contrôlée. On réalise cela soit en utilisant le rayonnement du combustible de la décharge, le deutérium, en le montant à de fortes densités, soit en injectant en faible quantité une impureté bien choisie pour ses propriétés. La difficulté est alors de bien contrôler la couche rayonnante, tant en intensité (il ne faut pas déséquilibrer le [bilan de puissance](#)) qu'en localisation (la couche rayonnante doit rester au bord du plasma sans dégrader les performances du centre) : il faut bien choisir son impureté ! Des études ont été menées sur Tore Supra et d'autres machines, avec des injections d'argon, de néon ou d'azote ...

- **Petite application numérique ...**

Examinons par exemple les ordres de grandeur sur [ITER](#), machine de prochaine génération. 300 MW provenant du coeur de la décharge sont à évacuer (puissance produite par les réactions de fusion et portée par les particules alphas ajoutée à la puissance extérieure couplée au plasma). Sur ces 300 MW, 100 sont rayonnés au centre de la décharge par différents processus (rayonnement Bremsstrahlung et synchrotron). Il en reste donc 200 qui parviennent au bord de la décharge, et seraient concentrés sur les plaques de divertor, qui représentent environ 10 m^2 de surface : sans rayonnement, cela donnerait du 20 MW/m^2 . En s'appuyant sur les études réalisées dans les machines existantes, les scénarios rayonnants appliqués à ITER permettent de rayonner environ 150 MW, ce qui laisse 50 MW pour le divertor (soit 5 MW/m^2 , acceptable d'un point de vue technologique) et conduit à des flux de l'ordre de 0.5 MW/m^2 sur l'ensemble de la paroi de la machine.

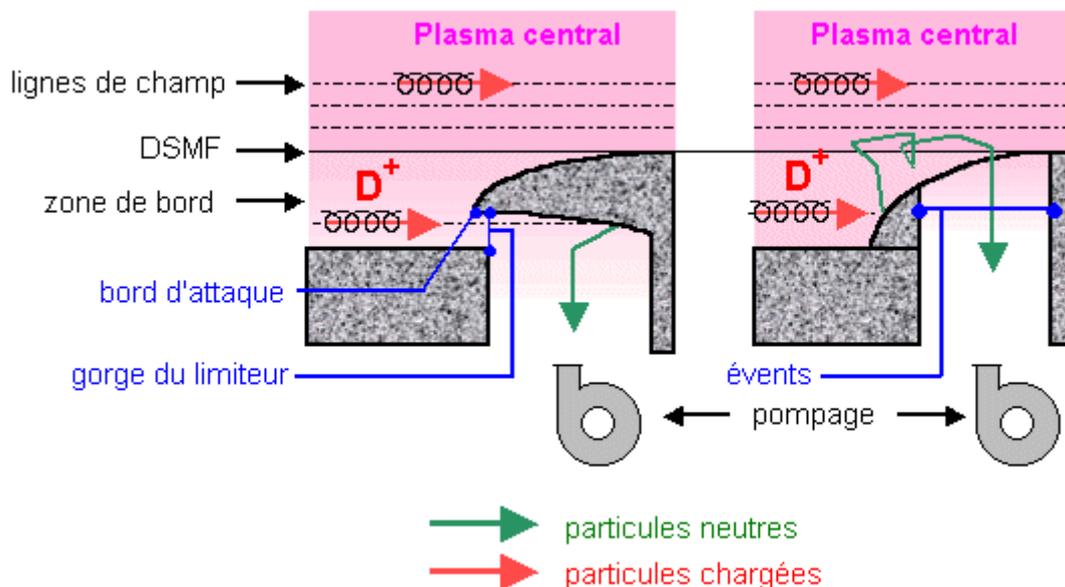
5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p. 1-2-3-4-5-6-7)

Comment faire pour éviter que les particules d'hélium, les cendres de la réaction de fusion, ne s'accumulent dans la décharge et finissent par étouffer le plasma ? Comme les shadoks, il faut pomper ...

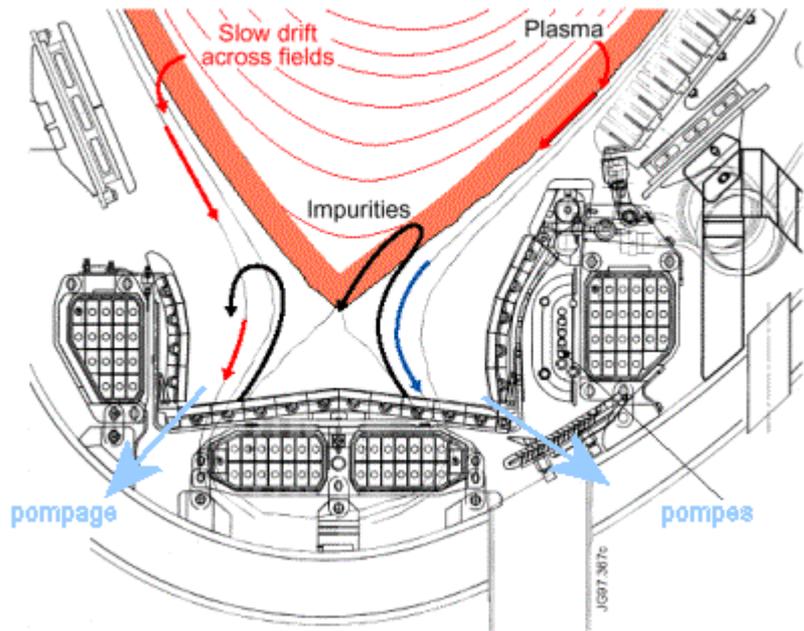
e) Extraction et injection de matière

Les [réactions de fusion D-T](#) produisent des "cendres", les particules d'hélium. Ces particules, créées au centre de la décharge, cèdent une partie de leur énergie au plasma par collisions et servent donc à entretenir le plasma, avant de [diffuser](#) avec les autres particules vers le bord de la décharge. Afin d'éviter qu'elles ne s'accumulent et viennent étouffer la décharge, des dispositifs spéciaux sont prévus sur les composants face au plasma pour les extraire. Ils consistent à recueillir le flux ionique sur des gorges de neutralisation conçues pour diriger le flux de neutres ainsi créé et insensible à l'effet du champ magnétique vers un système de pompage situé à l'écart de la machine.

On voit ici 2 méthodes de pompage expérimentées sur les [limiteurs](#) de Tore Supra. La première méthode consiste à recueillir directement le flux ionique dans des gorges et le diriger vers un système de pompage. L'avantage : une efficacité de pompage importante, l'inconvénient : un flux thermique élevé sur le bord d'attaque, situé au bord de la gorge. Une deuxième méthode consiste à laisser le flux ionique incident se neutraliser à la surface du limiteur, et compter sur les processus de physique atomique pour ramener une partie des neutres ainsi créés vers des fentes, conduisant au système de pompage. L'avantage : plus de problème de bord d'attaque, l'inconvénient : une efficacité de pompage moindre.



On voit ici une coupe du bas du tokamak JET, où le système qui assure l'extraction des particules est représenté : le flux plasma arrive dans la zone de bord, où il se neutralise sur les plaques du divertor. Le flux de neutres est ensuite recueilli à travers des chevrons et dirigé vers une pompe.



La plupart des machines actuelles fonctionnent en deutérium pur (JET est la seule machine en fonctionnement possédant les installations nécessaires pour fonctionner avec du tritium à l'heure actuelle) et extrapolent les résultats obtenus en D-D à la fusion D-T. On étudie le pompage de l'hélium en faisant des injections d'hélium dans la décharge depuis l'extérieur et en observant comment le système de pompage se comporte. Les performances atteintes sont compatibles avec les exigences de fonctionnement d'un futur réacteur (concentration en hélium au centre du plasma inférieure à 10%).

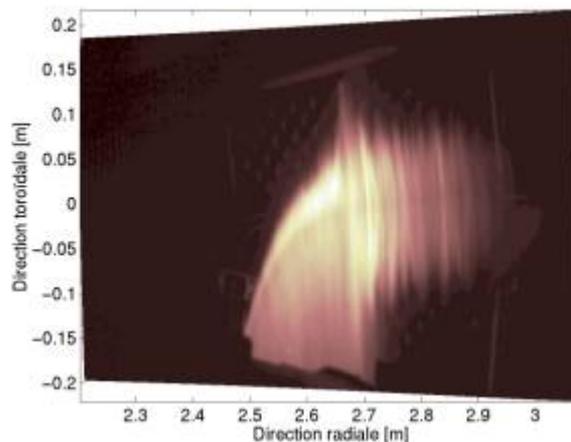
Il est malheureusement difficile d'évacuer préférentiellement l'hélium au bord du plasma : on extrait donc tout ce qui arrive de la décharge, un mélange de combustible (deutérium et tritium), de cendres (hélium) et en faible proportion d'impuretés émises par les parois de la machine. On trie ensuite ce mélange, on supprime l'hélium et les impuretés, et on réinjecte en continu du combustible pour compenser ce qu'on a extrait de la décharge. Le système de pompage est donc destiné non seulement à extraire les cendres dans un futur réacteur mais aussi à contrôler la densité du plasma en combustible dans les machines actuelles, en jouant sur les quantités extraites et réinjectées.

Toutefois, en plus de ces systèmes de pompage dit "actifs", il existe un *pompage dit "passif"* ⚡, exercé par la paroi. En effet, le carbone, matériau très souvent choisi pour les composants face au plasma en raison de sa bonne résistance aux chocs thermiques et de son faible numéro atomique qui limite les problèmes de rayonnement, possède une propriété bien spécifique : c'est une véritable [éponge à hydrogène](#), capable d'absorber une grande partie du flux de particules incidentes, jusqu'à ce que le matériau soit saturé. Il peut alors lui arriver de recracher les particules qu'il a absorbé, en particulier en cas de surchauffe. Il faut donc compter avec la paroi lorsqu'on cherche à contrôler la densité de la décharge.

Côté alimentation du plasma, on dispose de trois moyens d'*injection de combustible* ⚡ dans la décharge :

- l'injection de gaz par un tuyau arrivant dans la chambre à vide. Simple à mettre en oeuvre, cette méthode est assez peu efficace mais très couramment utilisée sur les tokamaks (typiquement 20% des particules injectées pénètrent dans la décharge sur Tore Supra...)
- l'[injection de neutres](#), qui sert aussi de moyen de chauffage. L'efficacité est meilleure, mais les quantités injectées sont assez faibles et ne suffisent pas toujours pour alimenter la décharge.
- l'injection de glaçons, qui consiste à injecter de petites billes de deutérium ou de tritium sous forme de glace. On utilise des systèmes qui ressemblent à des pistolets à air comprimé, capables d'injecter les glaçons de deutérium à plusieurs kilomètres par seconde. Le dispositif est complexe, mais conduit à des efficacités de remplissage du plasma bien meilleures que l'injection de gaz (pouvant atteindre 80% sur Tore Supra). Des développements sont en cours pour adapter les systèmes pulsés actuels au fonctionnement en continu.

L'image ci-contre représente l'injection d'un glaçon dans Tore Supra vue de dessus, telle que la détecte une caméra sensible au rayonnement du deutérium neutre. Le halo correspond au nuage très dense de particules neutres entourant le glaçon, qui "fond" au fur et à mesure de sa course dans le plasma, répandant son contenu qui s'ionise (et devient alors invisible pour la caméra) sur les surfaces magnétiques qu'il traverse.



5) Interaction plasma paroi et extraction des particules et de la chaleur (p [1-2-3-4-5-6-7](#))

Que se passe-t-il lorsque le plasma vient interagir avec la paroi ? Revoyons la scène, cette fois du point de vue de la paroi.

f) Et la paroi dans tout ça ?

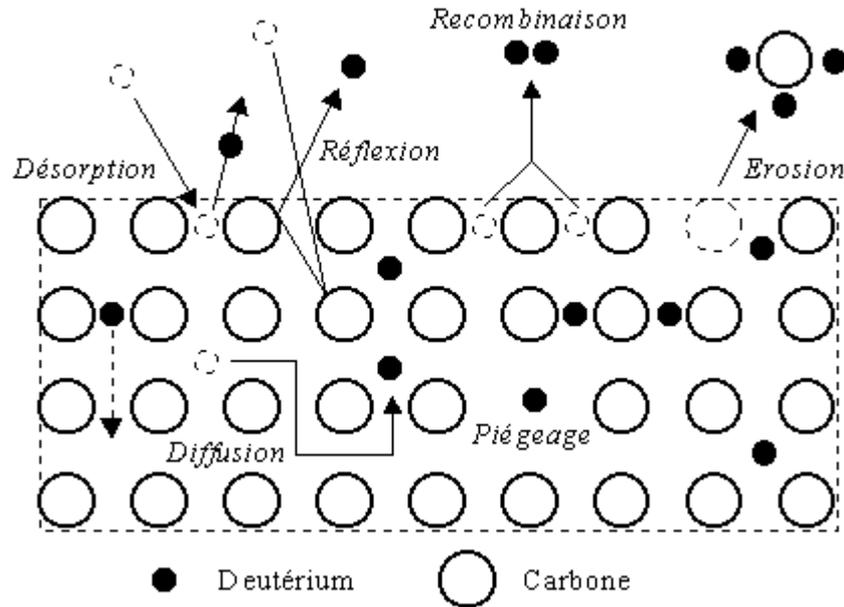
Que se passe-t-il lorsque le plasma vient interagir avec une paroi solide ? Prenons le cas où la paroi est en carbone, matériau très courant dans les tokamaks en raison de sa résistance aux chocs thermiques, et la particule incidente un ion deutérium D⁺. De nombreux phénomènes peuvent se produire ...

- **Réflexion**

Tout d'abord, la particule chargée incidente peut être simplement réfléchiée sous forme de particule neutre (atome D ou molécule D₂ en cas de recombinaison) et repartir vers le plasma, où elle sera à nouveau ionisée. C'est le recyclage.

- **Absorption, rétention**

Ensuite, la particule peut être absorbée par la paroi, car le carbone est une véritable éponge à hydrogène. Cela se produit jusqu'à saturation du carbone en hydrogène, tout comme l'éponge ne peut absorber qu'une certaine quantité d'eau. Sous certaines conditions (surchauffe par exemple), la paroi peut également relâcher les particules qu'elle a piégées, comme l'éponge qu'on presse. Les particules incidentes peuvent également par leur impact dégager des particules piégées (désorption). Cela complique donc le contrôle de la densité du plasma, qui peut être fortement influencée par l'état de saturation de la paroi, énorme réservoir de particules à la durée de remplissage très longue. Cela a été clairement vu sur Tore Supra, en particulier dans le programme [décharges longues](#), où la densité du plasma a tendance à monter en fin de choc, sans doute en raison d'un dégazage de la paroi lointaine, qui n'est pas sollicitée dans les chocs à durée plus courte mais chauffe au fil du temps. La solution : un refroidissement de tous les composants de la paroi, même ceux situés loin du plasma. C'est ce qui a été fait sur Tore Supra dans le cadre du projet [CIEL](#).



Conditionnement dans les tokamaks

En outre, on développe des techniques de *conditionnement* de la chambre à vide, pour pouvoir mieux maîtriser l'état de la paroi. Une première procédure consiste à recouvrir les parois avec un très fin film protecteur aux propriétés intéressantes. Dans Tore Supra, on réalise ainsi périodiquement (environ 1 fois par mois) une boronisation (film de carbure de bore), qui a en outre l'avantage d'être un piège à oxygène, ce qui améliore la pureté du plasma. Entre deux boronisations, on peut également désaturer la paroi à l'aide de décharges lumineuses (c'est à dire qu'on réalise un plasma d'hélium très peu puissant sans le champ magnétique de confinement, qui vient lessiver les parois et en sortir le deutérium piégé par impact des particules d'hélium sur la paroi) effectuées pendant la nuit pour préparer le programme expérimental de la journée suivante. Enfin, en cours de journée expérimentale, on a mis au point des décharges de nettoyage permettant de récupérer une partie des particules piégées et de fonctionner avec une paroi plus ou moins désaturée, même après de nombreux chocs ou une [disruption](#).

Outre le contrôle de la densité du plasma, une autre question qui se pose est la rétention d'hydrogène dans la paroi, qui devient problématique lorsque dans la prochaine étape, on utilisera comme combustible le tritium radioactif. A partir des résultats des tokamaks [JET](#) et [TFTR](#), seules machines à avoir utilisé du tritium à l'heure actuelle, on développe des scénarios permettant de minimiser la rétention par la paroi, ainsi que des techniques de conditionnement pour récupérer le tritium piégé.

- **Erosion**

Enfin, les particules incidentes peuvent arracher des atomes de carbone à la paroi : c'est ce qu'on appelle l'érosion. Une partie de ces atomes d'impuretés peuvent ensuite par une cascade de phénomènes de physique atomique parvenir jusqu'au centre de la décharge et venir dégrader les performances du plasma central en rayonnant une partie de la puissance couplée au plasma. Après des phénomènes de transport complexes, le carbone érodé est éventuellement redéposé sur les parois de la machine, certaines fois bien loin de l'endroit d'où il a été arraché. Mais cette redéposition n'est pas suffisante pour empêcher une lente érosion des composants face au plasma, en particulier aux endroits où se concentre le flux de particules incident : c'est une des préoccupations majeures pour les machines de prochaine génération, où l'on doit assurer aux composants une durée de vie suffisante pour ne pas être obligé de les changer trop fréquemment. De nombreuses études sont menées, tant du point de vue de la paroi (matériaux dopés pour mieux résister à l'érosion, utilisation du tungstène ou du beryllium à la place du carbone) que du plasma (atténuation du flux incident dans les [scénarios rayonnants](#)).

6) Les décharges longues : une spécialité de Tore Supra (p. 1-2)

Les décharges longues : Tore Supra avance sur la route qui mène au futur réacteur

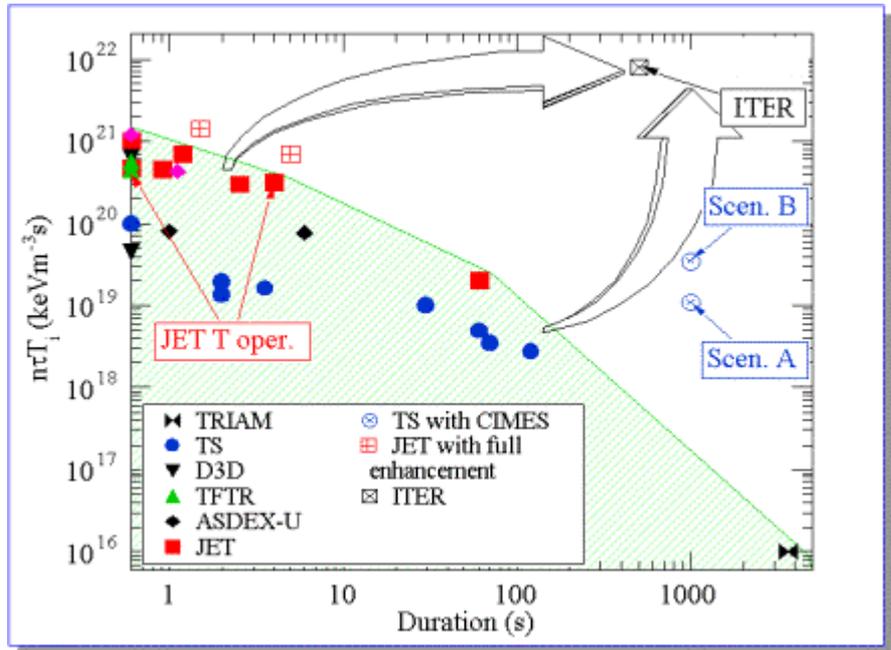
Tore Supra, seule machine de grande taille au monde à être équipée d'aimants supraconducteurs lui assurant un [champ magnétique toroïdal](#) permanent, s'est fait le champion de l'étude des décharges longues, franchissant peu à peu les étapes vers le régime continu, indispensable au réacteur.

En effet, les échelles de temps des différents phénomènes de physique entrant en jeu dans une machine à fusion sont très diverses, allant de moins de la milliseconde pour la stabilité de l'équilibre magnétique ([MHD](#)) à des minutes pour l'[équilibre plasma-paroi](#) voire des heures pour l'[érosion](#)

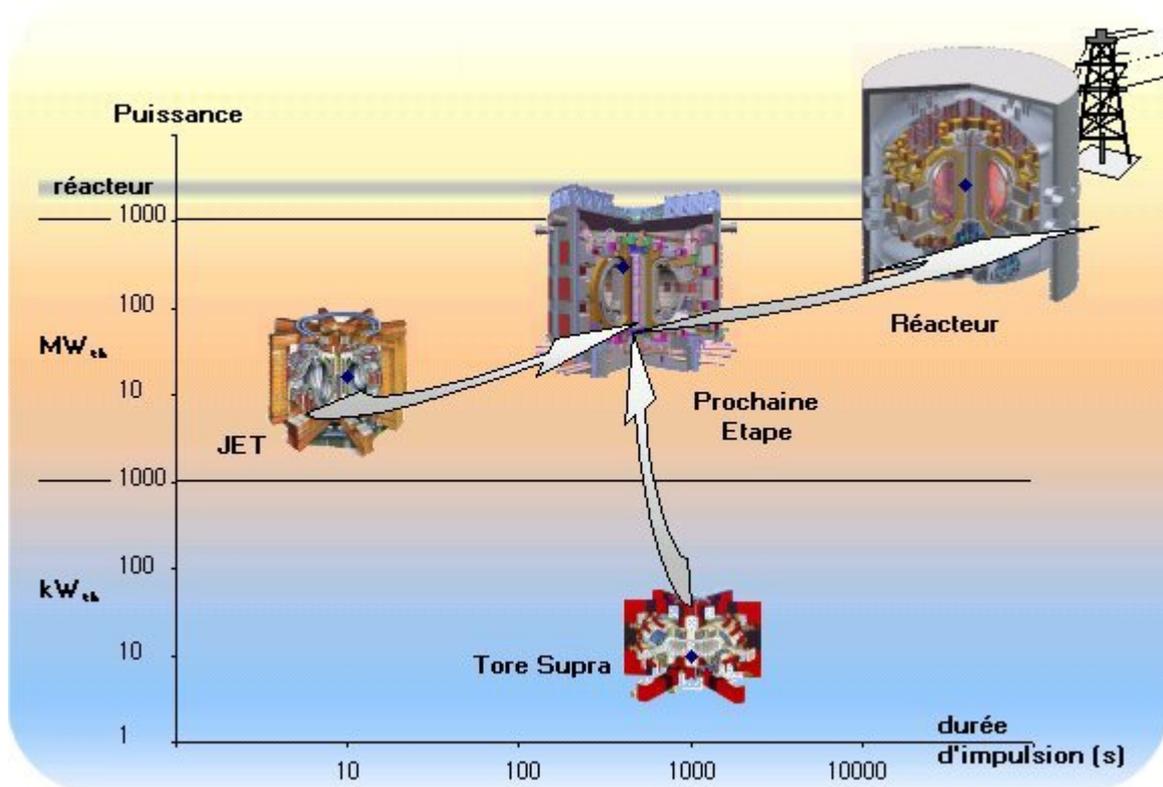


Une machine comme Tore Supra, permettant d'explorer des décharges de plusieurs minutes, est donc complémentaire d'une machine type [JET](#), très performante mais limitée à une durée de décharge de quelques dizaines de secondes.

On le voit sur le diagramme ci-contre, où on a représenté les caractéristiques de la plupart des machines actuelles en terme de performances fusion (le triple produit densité/ temps de confinement/température tel qu'il figure dans le [critère de Lawson](#)) en fonction de la durée de décharge. Les symboles pleins représentent les performances déjà atteintes, les symboles vides les performances attendues pour les machines en projet (comme la prochaine étape [ITER](#)) ou les améliorations de machines existantes (comme Tore Supra avec le projet [CIMES](#) d'extension de son système de chauffage).



JET n'est plus très loin des performances fusion attendues pour la prochaine étape [ITER](#) tandis que Tore Supra (TS pour les intimes) se rapproche des durées de décharge nécessaires. Ainsi, pendant que JET caracole en tête comme un cheval de course, Tore Supra poursuit son travail d'endurance, tout aussi indispensable

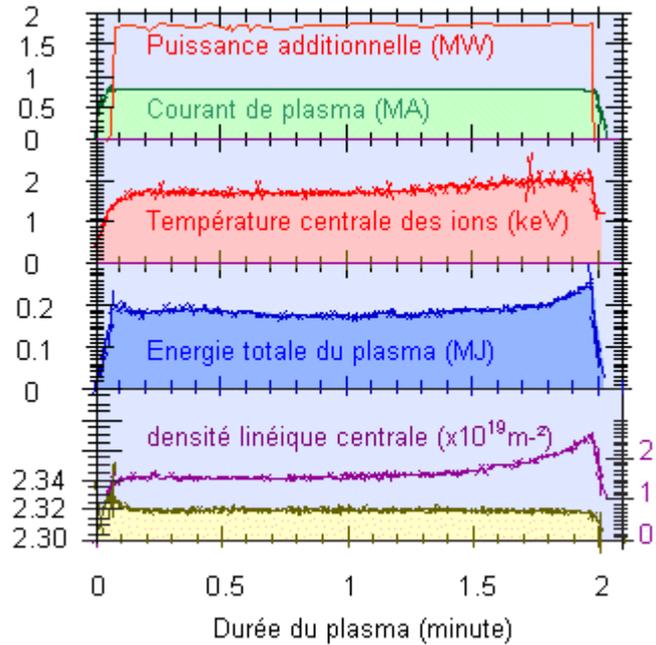


6) Les décharges longues : une spécialité de Tore Supra (p. 1- 2)

Tore Supra ouvre la route vers le régime continu du réacteur, avec son record de décharge de 2 mn. Comment réaliser cette performance ?

Quelle est la recette à suivre pour réaliser une décharge longue ? De nombreux paramètres entrent en jeu ... Tout d'abord, la [configuration magnétique](#) : il faut un système permettant d'assurer le [confinement](#) des particules en continu (aimant supraconducteur pour le champ magnétique toroïdal, [génération non inductive de courant](#) à l'aide du [chauffage à la fréquence hybride](#) pour le champ magnétique poloïdal). Ensuite, l'injection de matière et de puissance : il faut des [systèmes de chauffage](#) et d'[alimentation du plasma en particules](#) fonctionnant sur des temps longs. Et puis bien sûr en corollaire l'extraction de matière et de puissance : il faut des [composants face aux plasma](#) refroidis par une circulation d'eau, capables de supporter des flux de chaleur conséquents en continu sans élévation de température excessive, tout en [évacuant les particules](#). Ensuite, encore faut-il bien choisir les paramètres plasma de la décharge (champ magnétique, courant plasma, densité ...), de façon à ce que l'[équilibre magnétique](#) soit stable, le couplage du chauffage au plasma satisfaisant, l'efficacité de génération de courant optimale, les composants face au plasma loin de la surchauffe, et surveiller tout ça en temps réel grâce à des [diagnostics](#) performants pour pouvoir le cas échéant agir sur les systèmes de contrôle (aimants, chauffages, injection de gaz ...).

L'intégration de technologies de pointe et des progrès les plus récents en physique des plasmas a ainsi permis à Tore Supra de décrocher le record mondial d'énergie injectée dans un tokamak avec 280 MJ sur une décharge de 2 minutes.



Pour aller plus loin et continuer ainsi à enrichir la base de données servant à établir le dimensionnement de la prochaine étape ITER, Tore Supra vise maintenant la performance de 25 MW injectés pendant 1000 secondes (soit 25 GJ). A ce stade, elle ne se situera plus en énergie qu'un ordre de grandeur en dessous d'ITER (prévue pour 200 GJ) et atteindra la même durée de décharge (1000 s). Par ailleurs, si la puissance couplée dans Tore Supra est moindre, la densité de puissance (c'est à dire la puissance divisée par la surface de collection de cette puissance) atteinte sur les composants face au plasma est comparable, la machine étant plus petite. C'est donc l'occasion de tester en situation des technologies destinées à la prochaine étape.

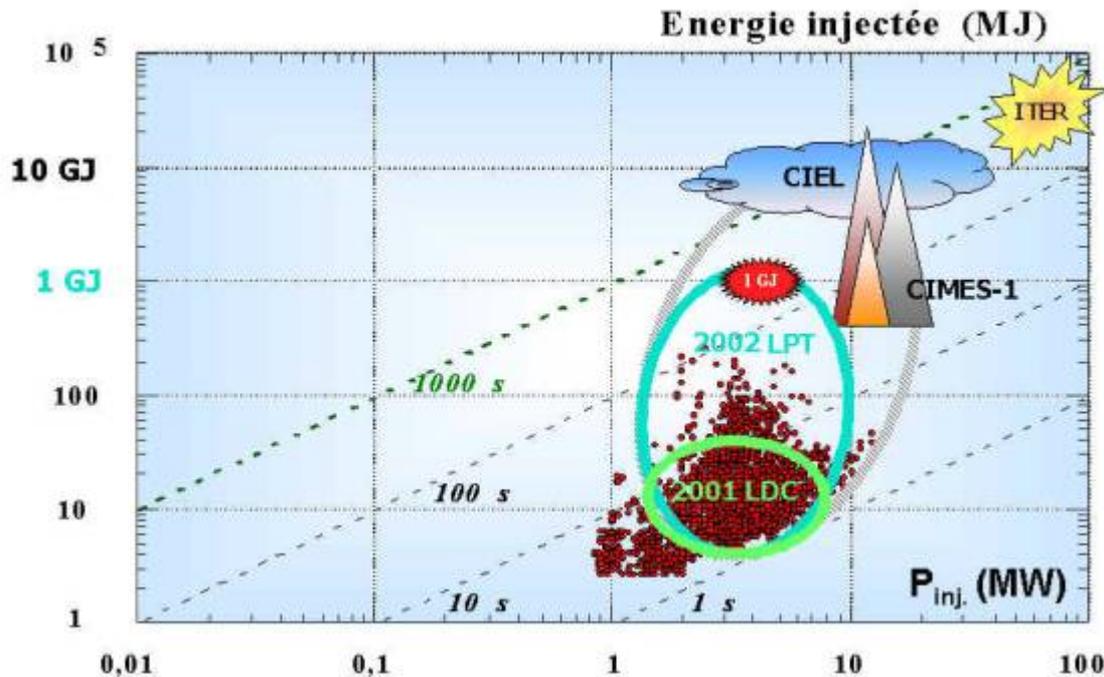
Pour faire face à ces objectifs ambitieux, Tore Supra s'est donc offert une cure de jouvence :

- tout d'abord ses composants face au plasma ont été rénovés, afin d'être capable d'extraire la chaleur et les particules en régime continu à hauteur de 20 MW (projet CIEL pour " Composants Internes Et Limiteur"). Les nouveaux composants ont été installés dans la machine qui a redémarré en août 2001 dans cette configuration (Cf redémarrage de Tore Supra)
- ensuite, ses systèmes de chauffage et d'injection de matière sont en cours d'amélioration, pour être capable d'injecter la puissance voulue dans la machine et d'alimenter en continu le plasma en particules (projet CIMES pour "Composants pour l'Injection de Matière et d'Énergie Stationnaire").



On voit ici les derniers préparatifs pour le redémarrage de Tore Supra dans la configuration CIEL. L'opérateur travaille en combinaison blanche afin de minimiser les impuretés introduites dans la machine. On voit en bas de l'image le principal composant face au plasma, destiné à évacuer la majeure partie de la puissance et à extraire les particules, le limiteur de démarrage CIEL (LDC) en attendant le limiteur définitif (LPT) pour 2002. Au premier plan à gauche se trouvent les anneaux de garde en carbone, posés sur la protection d'enceinte interne en inox. Enfin, on distingue à droite des ouvertures dans la paroi, appelées queusots, permettant l'accès au plasma pour les diagnostics ou l'introduction des antennes de chauffage.

En 2001, Tore Supra redémarre donc dans une configuration toute neuve, avec un limiteur de démarrage CIEL (LDC) permettant de tester la technologie des composants face au plasma. En 2002, c'est l'intégralité du projet CIEL qui est en place, avec le limiteur toroïdal pompé (LPT) : la machine est alors prête à extraire 25 MW en continu, parée à tenter de passer le cap du GJ. En parallèle, les développements des systèmes de chauffage se poursuivent, avec la première étape, CIMES1, permettant avec l'amélioration du système hybride, d'avancer vers des décharges de plus en plus longues.



7 - Les diagnostics

Comment savoir ce qui se passe au coeur du plasma, dans une machine sous vide hermétiquement fermée où règne des températures de plusieurs millions de degrés ? C'est le rôle des diagnostics, ces instruments de mesure aussi variés qu'astucieux, et qui nécessitent le savoir-faire de nombreux spécialistes. Les tokamaks en sont truffés, ils sont indispensables ...

▸ Que veut-on mesurer ?

On peut classer les grandeurs à mesurer en trois grandes catégories :

- les performances

On veut savoir où se place la machine en terme de triple produit densité/ [temps de confinement](#)/température, le facteur de mérite de la fusion basé sur le [critère de Lawson](#).

- le contrôle de la machine

Savoir, souvent en temps réel, ce qui se passe au niveau des paramètres de contrôle de la machine (champ magnétique, courant plasma etc) permet de programmer à l'avance la décharge suivant les exigences des physiciens, voire d'agir en cours de décharge pour corriger un éventuel problème. Ces diagnostics sont vitaux pour le fonctionnement du tokamak.

- la compréhension de la physique

On cherche en permanence à affiner la compréhension des nombreux phénomènes physiques complexes qui régissent un plasma de tokamak. Certains paramètres sont directement accessibles expérimentalement grâce aux diagnostics, d'autres doivent se déduire à partir des mesures en utilisant des modèles plus ou moins raffinés, qui peuvent aller de la simple règle de trois jusqu'au code informatique nécessitant des heures de calcul sur des ordinateurs surpuissants. Par exemple, pour analyser les phénomènes de [transport de la chaleur](#), on peut mesurer ce qu'on a injecté dans la machine (puissance ohmique et puissance additionnelle) et ce qu'on a extrait dans les différents composants instrumentés. On

en déduit la répartition entre les pertes par rayonnement et par conduction/convection, et on remonte aux coefficients de transport grâce à des codes de calcul.

► Comment mesurer ce qu'on ne peut toucher ?

Il est évidemment difficile d'introduire un instrument de mesure dans le plasma, milieu plutôt hostile avec ses millions de degrés, n'en déplaise au lord anglais qui, réagissant à une interrogation d'un de ses collègues lors des débats pour la construction du tokamak JET "Mais quel genre de thermomètre est capable de mesurer des millions de degrés ?", répondit "Un très grand, I presume". On a donc recours à des instruments de mesure qui observent le plasma à distance respectueuse, souvent derrière des hublots spécialement conçus. Impossible d'être exhaustif (Tore Supra compte plus d'une quarantaine de diagnostics) mais on peut en citer quelques uns à titre d'exemple en les classant en différentes catégories suivant le principe de mesure :

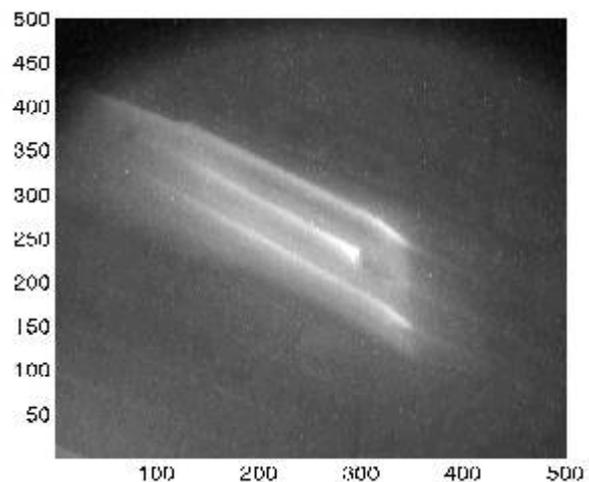
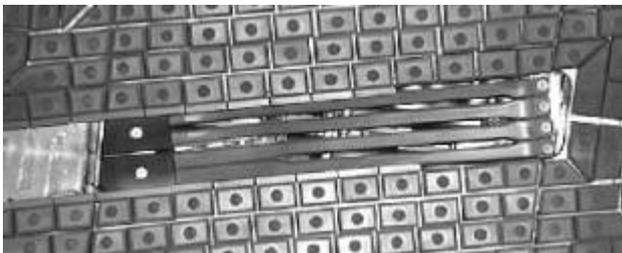
- utiliser l'émission naturelle du plasma dans [toutes les gammes de longueur d'onde](#) 🌐, depuis les rayons X jusqu'à l'infrarouge, en passant par le visible

Les rayons X, mesurés par des caméras équipées de détecteurs spéciaux, sont liés au rayonnement de freinage des électrons très énergétiques, et permettent d'avoir des renseignements sur leur distribution en énergie et donc l'efficacité d'un chauffage par exemple.

Dans l'ultraviolet, des spectromètres mesurent le rayonnement des impuretés lourdes, comme les métaux, ce qui fournit des renseignements sur la pollution du plasma et donne éventuellement l'alarme en cas de surchauffe d'un composant métallique.

Des caméras CCD travaillant dans le visible permettent d'avoir une vue générale de la chambre à vide, avec le halo rose caractéristique de l'interaction plasma/paroi au bord de la décharge.

Toujours dans le visible, des fibres optiques ou des endoscopes installés sur les composants face au plasma donnent des informations locales sur le rayonnement des espèces légères, comme le deutérium, l'hélium ou le carbone. Cela permet de progresser dans la compréhension des interactions plasma/paroi, en particulier au niveau de l'émission d'impuretés par [érosion](#).



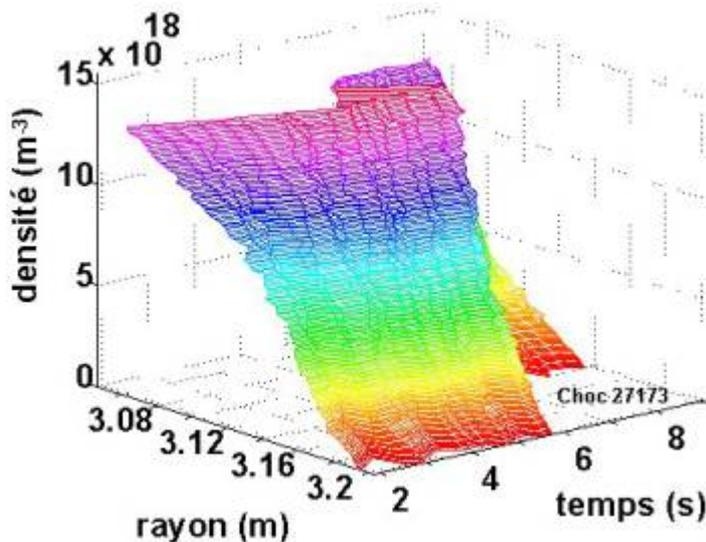
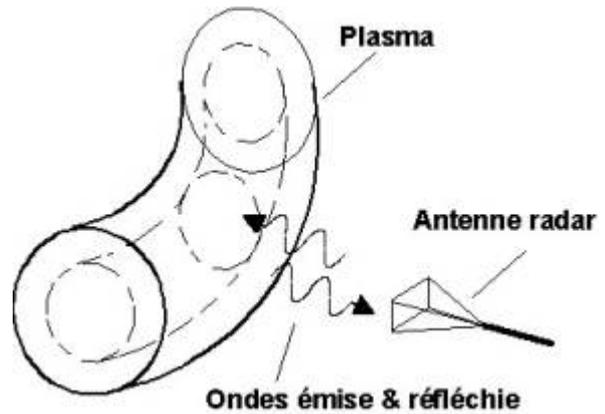
Voici par exemple un gros plan sur un neutraliseur du [divertor ergodique](#) (le plasma repose sur les longues structures au centre de l'image), et le même, vu par un endoscope équipé d'un filtre permettant de sélectionner l'émission d'une molécule d'hydrocarbure, formée entre le carbone érodé et le deutérium du plasma lors de certains processus d'érosion. On voit clairement que l'émission est concentrée autour des surfaces avec lesquelles le plasma est en contact.

Quant au domaine de l'infrarouge, de nombreuses caméras sont elles utilisées pour mesurer l'élévation en température des composants face au plasma, et constituent un élément vital pour la sécurité de la machine. Si on observe un échauffement anormal, on coupe immédiatement la puissance additionnelle, et on arrête le plasma.

- sonder la réponse du plasma à la [propagation d'ondes](#)

Comme dans l'air ou dans l'eau, les ondes peuvent se propager dans un plasma, avec en particulier la possibilité de le [chauffer](#) en lui couplant une onde à une fréquence bien choisie. Mais les ondes sont aussi de précieux instrument de mesure et de nombreux diagnostics sont basés sur des principes proches de celui du radar ou du sonar : on envoie une onde, on détecte la réponse du milieu traversé, on en déduit les paramètres du milieu.

Par exemple, en réflectométrie, on utilise la propriété de réflexion d'une famille d'onde à une fréquence de coupure donnée. Cette fréquence de coupure est liée à la densité du plasma rencontré, et en mesurant le temps que l'onde met pour aller et revenir une fois réfléchi (émetteur et récepteur sont placés au même endroit), on peut en déduire le profil de densité dans la décharge.



On voit ici un profil de densité mesuré par le réflectomètre le long du grand rayon de la machine (3.2 m correspond au bord de la décharge, côté extérieur du tore) et son évolution au cours du temps. Autour de $t = 6s$, on effectue un déplacement du plasma de plusieurs centimètres vers l'intérieur de la machine, nettement enregistré par le réflectomètre.

En interférométrie, on utilise cette fois une onde capable de traverser le plasma (émetteur et récepteur sont placés de part et d'autre de la machine) et on mesure la différence de phase et de polarisation entre l'onde incidente et l'onde recueillie après sa traversée du plasma, ce qui donne des renseignements à la fois sur la densité et le profil du courant. La diffusion Thomson utilise le même genre de technique avec une onde légèrement différente pour en déduire le profil de température. Il existe également des diagnostics capables de mesurer les fluctuations de densité, liées à la [turbulence](#) du plasma.

- introduire un diagnostic dans la chambre

On peut éventuellement introduire une sonde dans le plasma de bord, à condition de la protéger efficacement. Ainsi de nombreux composants dans la chambre sont équipés de sondes de Langmuir, petits éléments robustes en carbone qui recueillent le courant du plasma, permettant de remonter à la densité et à la température locale. Si vous regardez bien la photo du neutraliseur du divertor ergodique ci-contre, vous distinguerez 4 sondes de Langmuir glissées entre les structures du neutraliseur. Tore Supra est également équipé d'une sonde mobile, qui est capable d'aller explorer les premiers centimètres du plasma de bord grâce à un bras qui introduit et retire rapidement le diagnostic, avant que le plasma n'ait eu le temps de l'endommager.



- Et du plus classique ...

Enfin, la machine est également équipée de nombreux diagnostics plus classiques, qui ne sont pas propres aux plasmas, comme par exemple des jauges de pression pour vérifier la qualité du vide dans la machine ou évaluer les performances en pompage, des boucles de mesures magnétiques pour caractériser la configuration magnétique de la décharge et son activité MHD ou des thermocouples pour mesurer les élévations de température des circuits de refroidissement et effectuer un bilan de puissance extraite par la machine.

On mesure également les neutrons produits par les réactions de fusion. Dans le cas de Tore Supra, le seul combustible utilisé est le deutérium. La fusion D-D [produit des neutrons et du tritium](#). Ce tritium peut ensuite réagir avec le deutérium de la décharge pour faire une fusion D-T, qui produit aussi des neutrons. Les neutrons sont ensuite détectés par des capteurs très sensibles.

► Comment utiliser les diagnostics pour contrôler la machine : les asservissements

En plus de leur fonction de mesure, certains diagnostics sont utilisés pour contrôler la décharge. Il est alors nécessaire qu'ils remontent leur données en temps réel, ce qui demande des composants électroniques très performants.

Par exemple, un asservissement couramment utilisé est celui sur l'injection de gaz pour atteindre une densité donnée. En effet, l'injection nécessaire pour obtenir une densité donnée n'est pas facile à déterminer à l'avance : elle dépend du scénario choisi (par exemple, si le [divertor ergodique](#) est activé avec ses propriétés d'écrantage, il faudra une injection beaucoup plus forte qu'en configuration limiteur pour atteindre la même densité) et de l'état de la [paroi](#) (si la paroi est très désaturée, elle retiendra une forte proportion du deutérium injecté et il faudra donc une injection élevée, par contre, si elle est proche de la saturation et commence à relâcher des particules, il faudra une injection très modeste). On programme donc au départ une injection "raisonnable" en fonction de la densité que l'on désire obtenir, puis on utilise les mesures de densité par l'interférométrie pour ouvrir plus ou moins la valve d'injection de gaz au cours du choc : si la mesure est au-dessus de la densité ciblée, on ferme la valve, si elle est en-dessous, on l'ouvre plus grand.

Ces asservissements se sont révélés très utiles, en particulier dans les cas où on explore des régimes délicats, qui ont tendance à mener facilement à la [disruption](#), comme les [scénarios fortement rayonnants](#), le [couplage de forte puissance](#) ou les [décharges longues](#).

8 - Une journée ordinaire dans la vie de Tore Supra

Au delà de l'aspect purement scientifique, la vie de tous les jours autour de Tore Supra est aussi une aventure humaine, comme avec tous les grands instruments de recherche en physique. Venez partager la journée d'un physicien, avec ses joies et ses peines ...

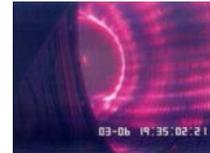
Imaginez que vous êtes un physicien du Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée. Votre spécialité : la mise au point de scénarios permettant de réaliser des [décharges longues](#). Aujourd'hui, vous êtes physicien en charge : c'est à vous de décider du programme de la journée sur le tokamak Tore Supra. Votre mission : battre le record de l'énergie injectée dans la machine, avec des chocs longs et performants. Le but à atteindre : viser les 300 MJ, avec 4-5 MW de puissance sur 60 à 70 secondes de décharge (petit rappel : l'énergie est égale à la puissance multipliée par le temps pendant lequel elle est appliquée, donc il faut arriver à passer beaucoup de MW sur des temps longs).



C'est un programme risqué, il faut pousser la machine à la limite de ses possibilités. Pour vous aider dans votre tâche, vous avez toute une équipe autour de vous. Tout d'abord, le pilote. C'est lui qui est aux commandes de la machine, et qui exécute le programme que vous avez eu soin de définir auparavant. C'est un personnage clé : comme le capitaine d'un navire, c'est le seul maître à bord après Dieu. Puis, l'informaticien en charge : vous pouvez compter sur lui en cas de problème du système de contrôle-commande ou d'acquisition des données. Et oui, tout est informatisé sur Tore Supra (ou presque ...) : c'est le nerf de la guerre. Ensuite viennent tous les responsables des [diagnostics](#) et autres

sous-systèmes dont vous avez besoin pour le bon déroulement de votre journée. Et enfin se tiennent là les autres physiciens intéressés par le programme du jour, chacun dans sa spécialité. Ca en fait du monde en salle de contrôle-commande ...

Il est 8h, la journée commence. La chambre à vide a été [conditionnée](#) par une série de décharges lumineuses pendant la nuit pour que la paroi soit bien désaturée. Les portes lourdes sont fermées sur le hall tore, le champ toroïdal est monté. Après un court briefing avec l'équipe du jour pour s'assurer que tout est prêt, on s'échauffe avec une première décharge de démarrage en ohmique, histoire de tester l'humeur de la machine. Le compte à rebours est lancé. Les écrans s'allument : le plasma est là, tout rose vu par la caméra visible. Bon démarrage, mais la paroi semble chargée malgré le conditionnement : il faut jouer léger sur [l'injection de gaz](#) dans la chambre.



Le plasma en appui sur la première paroi interne, vu par une caméra visible depuis un queusot de la machine. On distingue les briquettes qui forment la paroi, et le halo rose caractéristique du plasma de bord, qui rayonne dans cette longueur d'onde.

Après ce début prometteur, on passe à plus sérieux : on démarre les systèmes de [chauffage additionnel](#). On compte sur l'[hybride](#) pour [générer le courant](#) et allonger la durée de la décharge en prenant le relais du système de transformateur classique, et sur le [chauffage FCI](#) pour injecter de la puissance en complément de l'hybride. Le scénario est délicat : il faut trouver des conditions de fonctionnement qui conviennent aux deux systèmes, qui bien sûr ont des exigences contradictoires ... L'efficacité de génération de courant de l'hybride est d'autant meilleure qu'on se place à basse densité. Par contre, le chauffage FCI ne parvient pas à coupler de la puissance au plasma en dessous d'une certaine densité. D'après les simulations des codes de calcul et l'expérience précédemment acquise, on décide donc de se placer à une densité intermédiaire. Encore faut-il que le système d'injection de gaz arrive à contrôler la situation et à maintenir une densité stable, surtout si la paroi a décidé de jouer des siennes ...

Il faut monter les systèmes en puissance progressivement, pour les conditionner. On teste successivement les deux coupleurs hybride, ainsi que les trois antennes FCI. 0.5 MW, 1 MW, ça passe. A 2 MW, quelques claquages apparaissent mais rien de trop grave. On en profite pour régler finement les systèmes en position et en fréquence. Ces chocs de montée en puissance durent une trentaine de secondes, la vitesse de croisière pour Tore Supra. Entre deux chocs, il faut compter une vingtaine de minutes, le temps que tous les diagnostics remontent leurs résultats dans la base de donnée informatique. Et justement, problème informatique : les données de l'hybride ne remontent pas. L'informaticien en charge s'en occupe. Conclusion : les données du choc effectué sont définitivement perdues, par contre, le système est opérationnel pour le prochain choc. Les antennes FCI fonctionnent bien, le couplage est bon, malgré leur position reculée par rapport au plasma, nécessaire pour ne pas trop les échauffer sur des chocs longs. Par contre, ça se passe moins bien côté hybride : seul un coupleur est utilisable, et on ne peut pas le monter au dessus de 1.8 MW sans avoir de claquages et des émissions de nickel dans le plasma. Il faudra s'en contenter.

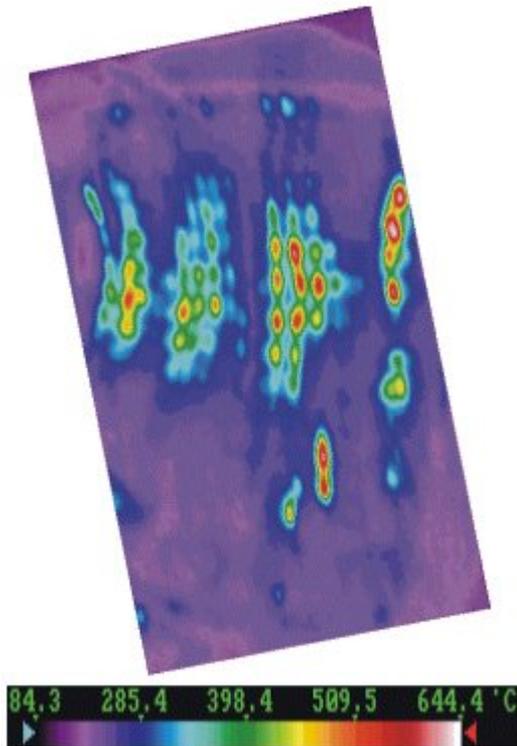
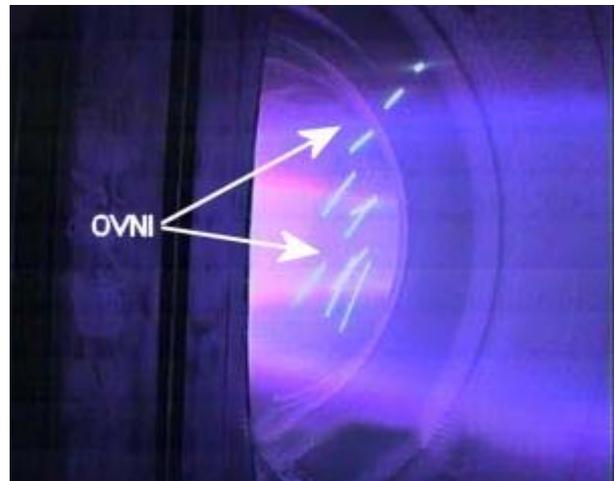


Image infra rouge de la première paroi interne de Tore Supra

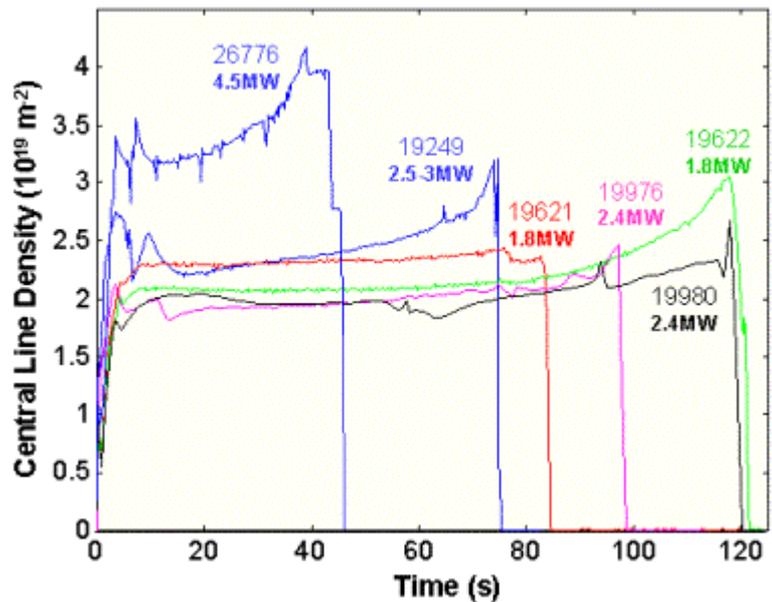
Ah, voilà que ça se gâte : le choc suivant [disrupte](#) sur un défaut du poloïdal. Les équipes chargées de ce sous-système s'affairent pour trouver l'origine de la panne. Pendant ce temps, on lance une décharge de nettoyage, pour récupérer la paroi. Vers 11h30, tout est revenu dans l'ordre, la journée peut poursuivre son cours. Les deux chauffages repartent bravement, 2 MW pour FCI, 1.6 MW pour l'hybride. Le nettoyage semble avoir été efficace : la paroi est plus pompante, et il faut injecter franchement pour atteindre la densité souhaitée. On allonge la durée de la décharge : 35 secondes. La densité a tendance à décoller au bout d'une vingtaine de secondes, mais ça reste acceptable. 38 secondes, 40 secondes, 42 secondes, 46 secondes : la montée en densité semble se calmer. On atteint les 177 MJ, ça commence à être intéressant ...

Au choc suivant, montée d'impuretés à 16s : on disruptive. Un OVNI, comme on les appelle dans le jargon de Tore Supra, est passé devant les caméras visibles. Les spectroscopistes ont détecté du fer, du nickel, du cuivre dans le plasma ... Voilà qui n'est pas bon signe ! Probablement un composant face au plasma en surchauffe. Le plasma est en appui sur la première paroi interne : la caméra infra-rouge n'a pas détecté de problème sur les briquettes en carbone, mais elle ne voit pas l'intégralité de la chambre. Les protections d'antenne sont aussi fortement sollicitées, mais là encore, les caméras infrarouge qui les surveillent n'ont rien détecté d'anormal. Concertation pour décider de la suite du programme. En attendant, on lance des décharges de nettoyage pour récupérer de la disruption. Finalement, avec l'accord du pilote, on repart, en sortant le grand jeu : pour épargner les antennes FCI, on en utilise 2 à la fois sur les 3, et on alterne toutes les 4 secondes, de la haute voltige ... En plus, on rajoute une modulation sur la position verticale du plasma, pour déplacer le point d'impact du plasma sur la paroi et éviter les échauffements excessifs.



On a du mal à redémarrer : les chocs disruptent. On multiplie les décharges de nettoyage. Finalement, on repart : 184 MJ, 194 MJ, 200 MJ. La machine n'est pas facile à piloter, on passe souvent près de la disruption, la densité monte en fin de choc, mais on progresse peu à peu. Le pilote est prudent : il sait qu'une disruption un peu trop forte peut définitivement faire perdre la fin de la journée. A 19h45, on lance le tout pour le tout pour le dernier choc : une décharge d'une minute à 4 MW de puissance. Ça passe !

Bilan de la journée : l'objectif ambitieux de 300 MJ n'a pas pu être atteint, en raison d'un coupleur hybride défaillant qui a limité la puissance injectable dans la machine. Par contre, sur les antennes utilisables, le couplage a été très satisfaisant : le scénario original développé pour ce programme nécessitant simultanément les deux types de chauffages est donc validé. De plus, la modulation en position verticale du plasma s'est révélée efficace. Avec tout ça, un choc d'une minute à 240 MJ a pu être obtenu (le 26776 !), se plaçant tout près du record absolu de la machine (280 MJ avec 2 MW sur deux minutes).



Evolution temporelle de la densité pour plusieurs décharges extraites de la base de données chocs longs de Tore Supra, dont le choc 26776 obtenu ce jour là. On voit bien le problème de montée de la densité sur les temps longs, qui devrait être résolu avec le projet CIEL où l'intégralité de la machine est refroidie. Réponse définitive avec la reprise des expériences dans la configuration CIEL, à l'automne 2001 !



Post-scriptum : on s'apercevra après analyse que les montées d'impuretés sont dues à un tuyau de pompage percé en haut de la machine, hors de vue des caméras, vraisemblablement par un faisceau d'électrons accélérés par l'hybride : rien de grave, il faut juste éviter de faire tomber de la puissance dessus en attendant de pouvoir réparer à la prochaine ouverture de la machine.