



* Table des matières

- * **01 - Plasma et Fusion** (p.2)
 - Le principe de la réaction de fusion nucléaire
 - Les avantages de la fusion nucléaire
- * **02 - Historique** (p.5)
- * **03 - Le confinement du Plasma** (p.6)
 - Le Tokamak
 - L'action combinée du champ magnétique toroïdal et poloïdal
 - Le Stellarator
 - Les conditions nécessaires à la réaction de fusion
- * **04 - Le chauffage du plasma** (p.9)
 - Le Chauffage Ohmique
 - Le chauffage par jet neutralisé
 - Le chauffage Radiofréquence
 - Les courant induits par micro-ondes
 - L'auto chauffage du Plasma
- * **05 - L'objectif** (p.10)
 - Le facteur d'amplification Q
 - L'ignition
 - La disruption
- * **06 - Le chauffage Ohmique** (p.12)
- * **07 - Les jets de neutres** (p.13)
- * **08 - Le Plasma et les ondes électromagnétiques** (p.15)
- * **09 - Les 3 Grandes familles de chauffage Radio-Fréquence** (p.16)
 - Le chauffage radio-fréquence cyclotronique ionique
 - Le chauffage radio-fréquence cyclotronique électronique
 - Le chauffage radio-fréquence hybride
- * **10 - Les Composants Face au Plasma** (p.19)
 - Matériaux
 - Empêcher la nuisance mutuelle plasma/paroi
 - L'extraction de chaleur
- * **11 - Les Diagnostics** (p.23)
- * **12 - Vers le réacteur** (p.24)
 - Conclusion

* 01 - Plasma et Fusion

Dans ses premiers instants, l'Univers était sous forme de Plasma. Même à présent, les plasmas sont la forme de la matière la plus répandue dans l'univers.

Qu'est-ce qu'un Plasma ? Certains parlent de gaz chauds... En fait le plasma est une forme particulière de la matière, son 4^{ème} état, de la même manière qu'il nous arrive communément de la trouver sous sa forme liquide, gazeuse ou solide. À la différence des 3 autres états, le plasma est un état intrigant de la matière où les électrons se sont désolidarisés des noyaux atomiques autour desquels ils gravitent normalement. Cela est causé par une agitation thermique car un plasma en fait un état de la matière portée à une température colossale.

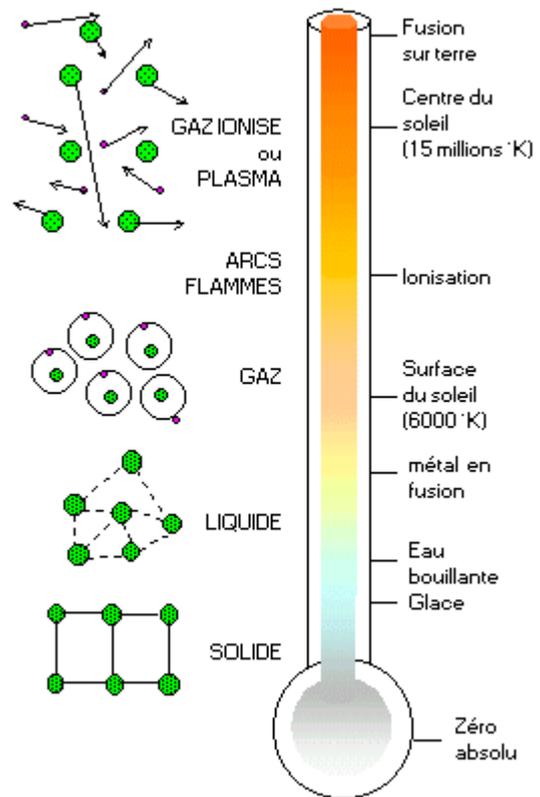
La fusion nucléaire est la réaction qui siège continuellement au cœur des étoiles comme notre soleil. La fusion nucléaire génère de l'énergie et c'est ce qui permet entre autre au soleil à produire chaleur et lumière. Au cœur du soleil, l'Hydrogène, la matière la plus commune dans l'univers, est convertie en Hélium. C'est cette transformation qui permet, entre autre, à la vie sur Terre d'exister !

Pour produire de l'énergie, il faut réaliser une transformation dans laquelle, entre l'état initial et l'état final, un peu de la masse des corps en jeu a disparu. Ce défaut de masse se retrouve alors sous forme d'énergie par la formule bien connue $E=mc^2$ où E est l'énergie produite, m la masse disparue, et c la vitesse de la lumière. Deux grands types de réactions nucléaires faisant baisser la masse et libérant donc de l'énergie sont possibles : Construire des noyaux d'atomes plus lourds à partir d'atomes très légers (Deutérium, Tritium) pour construire des atomes plus lourds : c'est la fusion. Ou bien, à partir d'un atome suffisamment lourd (Uranium) pour en faire de atomes plus légers : c'est la fission.

Pour produire cette énergie sur Terre, différentes réactions de fusion sont possibles. La réaction la plus adaptée est provoquée entre les noyaux des deux versions 'lourdes' de l'Hydrogène (appelés Isotopes de l'Hydrogène) que sont le Deutérium (D) et le Tritium (T). C'est pourquoi on parle de fusion « D-T ». Eventuellement, on peut faire appel à une fusion incluant juste du Deutérium, ou du Deutérium et de l'Hélium (^3He).

À des températures requises pour la réaction de fusion D-T (plus de 100 millions de degrés C°), le carburant passe de l'état gazeux à l'état de PLASMA. Dans un plasma, les électrons ont été séparés de leur noyau atomique (qu'on appelle alors généralement « ions »). La compréhension du Plasma nécessite des développements importants de la physique. De nos jours, les plasmas sont très largement utilisés dans l'industrie, particulièrement pour la fabrication des semi-conducteurs.

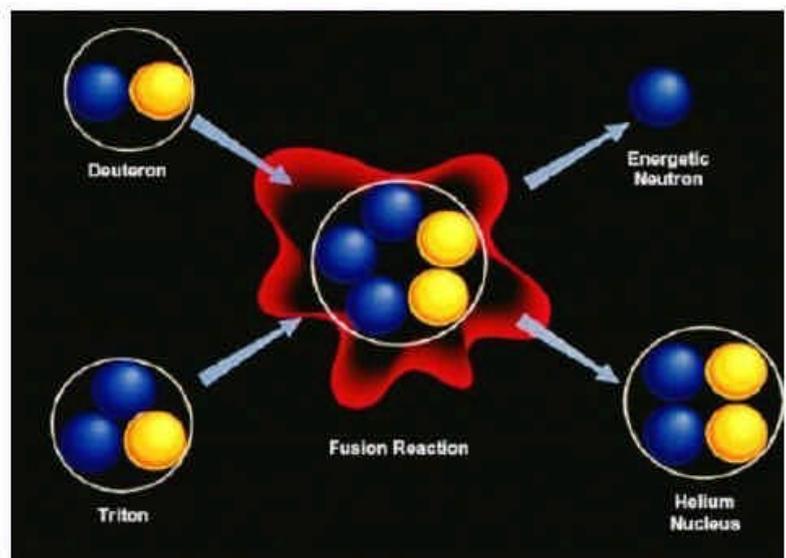
Dans le soleil, la réaction de fusion est contenue par la force de gravité intense. Or sur terre, on ne peut pas travailler dans de telles conditions de pression. Le confinement gravitationnel du plasma tel qu'il règne dans le soleil est impossible à reproduire ici. La technique choisie sur Terre est donc le confinement magnétique.



Le principe de la réaction de fusion nucléaire

Les noyaux de Deutérium et de Tritium se trouvent à l'état de plasma. La fusion de ces deux atomes est très énergétique et les produits de cette fusion sont des noyaux plus lourds d'Hélium 4 accompagnés de Neutrons. Le noyau d'hélium est aussi connu sous le nom de particule alpha.

Pour résumer, deux noyaux isotopes de l'Hydrogène sont fusionnés et cela s'accompagne d'une importante d'énergie et les produits de cette réaction sont des neutrons et des particules alpha.



Les avantages de la fusion nucléaire

C'est une vaste source d'énergie. Les carburants nécessaires sont les plus communs de l'univers, à savoir l'Hydrogène. La fusion est un processus sûr car tout mauvais fonctionnement peut être rapidement interrompu. La fusion ne produit aucune pollution atmosphérique. La radioactivité de la structure du réacteur, causé par les neutrons, décroît très rapidement et peut être minimisés par une sélection judicieuse de matériaux à basse activation. L'entreposage et le stockage de matériaux radioactifs ne sont donc pas nécessaires.

On peut s'attarder quelques instants sur les carburants qui entrent dans la réaction de Fusion. Le Deutérium est abondant puisqu'il peut être extrait des formes ordinaires de l'eau. Si toute l'électricité mondiale actuelle devait être produites par des stations de fusion nucléaire, les ressources fournies par le Deutérium dureraient ainsi pendant des millions d'années.

Le Tritium n'est pas rencontré en tant que tel dans la nature. Il est fabriqué à partir du Lithium. Le Lithium est le métal le plus léger existant. Il est abondant dans la croûte terrestre. De la même façon, uniquement grâce au Deutérium, on pourrait répondre aux besoins de consommation électrique mondiale pendant mille ans. Une fois la réaction de fusion établie, même si elle se déroule entre le Deutérium et le Tritium, les carburants effectifs de la fusion sont essentiellement le Deutérium et le Lithium.

Par exemple, avec 10 grammes de Deutérium qui peuvent être extraits de 500 litres d'eau et 15 grammes de Tritium produits à partir de 30 grammes de Lithium, on pourrait disposer d'assez de carburant pour les besoins en électricité d'une personne comme vous et moi au cours de sa vie entière !



* 02 - Historique

Dans les années 20, Jean Perrin et Arthur Eddington avancèrent les premiers l'idée que des réactions nucléaires de fusion produisent l'énergie qui fait briller les étoiles, tel que notre Soleil. Au cours de la première moitié du 20ème siècle, nous en avons acquis la certitude : les interactions nucléaires sont la principale source d'énergie de l'univers !

Les recherches ont commencé après la seconde guerre mondiale. On s'est proposé de reproduire sur Terre les processus à l'origine de l'énergie du Soleil. Où en est donc le problème de la fusion après ces cinquante dernières années ?

Une loi intégrée dans notre culture fait apparaître que les temps qui séparent les applications et les découvertes fondamentales sont de plus en plus courts. C'est ce qu'on appelle la loi de Moore. Aujourd'hui, passer des dizaines d'années à mettre au point un tel projet est donc assez atypique. Mais il faut se souvenir qu'il a fallu attendre environ un siècle entre les mises en évidence du courant électrique par Galvani (1791) puis des effets magnétiques des courants par Oersted (1820), avant de voir l'utilisation généralisée de l'électricité au début du 20ème siècle. Cela fait prendre conscience de la lenteur de certaines évolutions souhaitées !

Nous sommes passés du charbon aux hydrocarbures et l'ère du pétrole semble atteindre une saturation. L'évolution des gaz combustibles chimiques semble destinée à grandir. L'énergie de fission nucléaire telle qu'on la connaît est consécutive au premier choc pétrolier de 1973. La maintenance du marché pétrolier est en raison due à des raisons de parts de marchés et de bénéfices. Les actuelles centrales nucléaires à fission ne rejettent aucun gaz à effet de serre et donc ne contribuent pas au réchauffement avéré de la planète. Mais la radioactivité et les déchets, font peur. La fusion évite cet inconvénient.

	<u>origine:</u>	<u>réserves:</u>
<u>Charbon:</u>	résidus biologiques	des centaines d'années
<u>Hydrocarbures:</u>	résidus biologiques	des dizaines d'années (récurrent)
<u>Uranium:</u>	nucléosynthèse stellaire	des milliers d'années (surgénérateur)
<u>Deutérium:</u>	primordiale ("big-bang")	des milliards d'années

* 03 - Le confinement du Plasma

Etant donné que le plasma consiste en deux types de particules chargées, les ions (+ve) et les électrons (-ve), des champs magnétiques peuvent être utilisés pour retenir le plasma loin des bords de la chambre torique qui le contient. Dans un champ magnétique, les particules circulent en spirale très facilement le long des lignes de champs mais elles se diffusent lentement au travers ces dernières. Par conséquent, les systèmes de confinement magnétique les plus prometteurs sont toroïdaux, c'est-à-dire en forme d'anneau et, de ces derniers, le plus avancé est le système Tokamak. JET est le plus grand tokamak du monde. Tokamak est un mot d'origine russe qui signifie 'chambre toroïdale'.

Le Tokamak

Le tokamak est une chambre toroïdale métallique étanche dans laquelle siège un vide poussé, où le plasma est chauffé et confiné loin des bords de ce récipient grâce à des champs magnétiques élevés. Ce confinement est assuré par des enroulements ou bobines électriques destinés à créer les champs magnétiques intenses qui empêchent tout contact entre le plasma et les parois de la chambre. Pour ne pas consommer d'énergie, les bobines sont supraconductrices : Un système cryogénique est chargé d'abaisser la température des bobines créant les champs magnétiques à des températures proches du zéro absolu (-269°C). C'est le cas du Tore Supra ce qui retire les inconvénients antécédents de limitation d'utilisation en durée des bobines du cuivre à cause de leur échauffement.

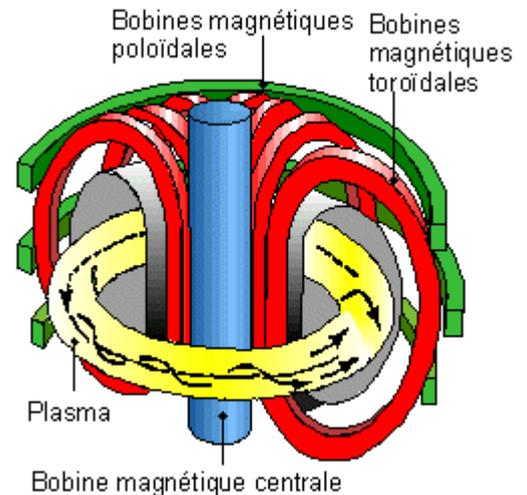
Ainsi pour résumer, les composants basiques du confinement magnétique du système Tokamak sont les suivants :

Un champ toroïdal qui est produit par des bobinages verticaux environnant le vide qui siège dans la chambre.

Un champ poloïdal qui est produit par un courant dans le plasma ; le courant de plasma est induit par l'action d'un transformateur.

Certaines bobines horizontales assurent le guidage du plasma autour de l'axe du tore et d'autres, la stabilité. Elles sont appelées bobines magnétiques poloïdales.

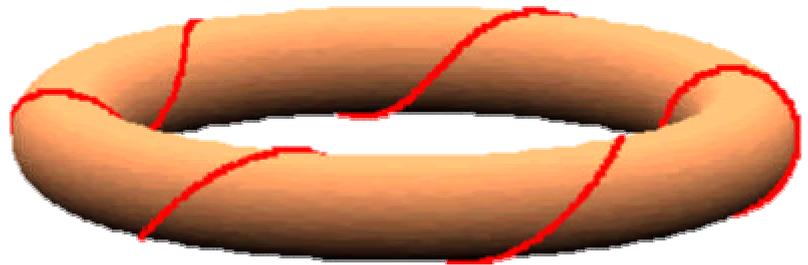
L'action simultanée de ces deux champs magnétiques, l'un toroïdal et l'autre poloïdal, génère une structure hélicoïdale des lignes de champs. C'est actuellement une des voies de recherche parmi les plus étudiées.



L'action combinée du champ magnétique toroïdal et poloïdal

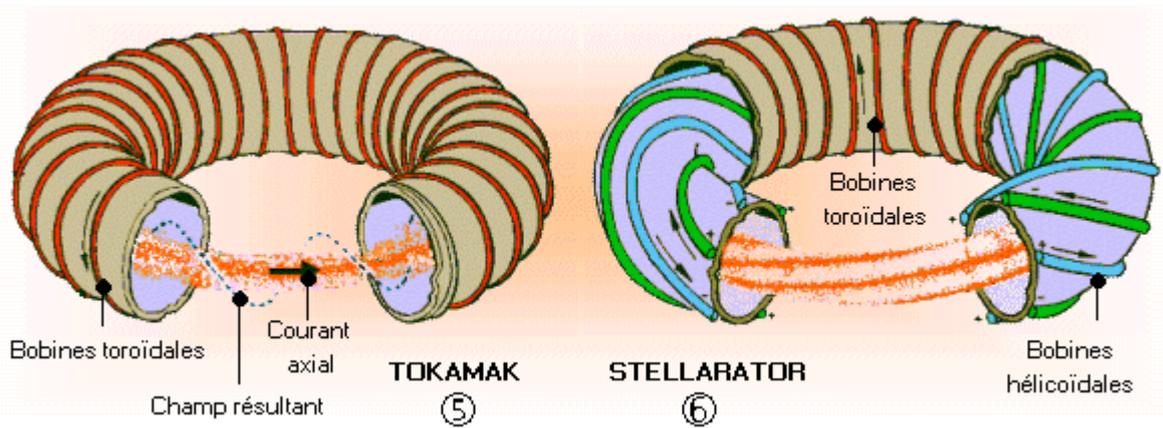
Si l'on se contentait simplement d'un champ magnétique de trajectoire circulaire (direction toroïdale), les particules ionisées et les électrons subiraient une lente dérive transverse liée au gradient du champ magnétique et la force centrifuge. De plus la direction de cette dérive dépendrait de la charge de la particule en jeu : Par exemple les ions dériveraient vers le haut et les électrons vers le bas.

Grâce à l'addition de la composante poloïdale, les lignes de champs magnétiques ne sont plus longitudinales mais hélicoïdales. La dérive moyenne est alors compensée.



Le Stellarator

Il existe une autre configuration de tokamak 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 paie en terme de complexité du bobinage magnétique nécessaire. Je définirai plus loin la signification du terme de disruption.



Les conditions nécessaires à la réaction de Fusion

Les réactions de fusion se produisent à un taux efficace seulement sous l'effet de températures très grandes, c'est-à-dire au-delà de plusieurs millions de degrés C°. Cela est au moins nécessaire pour la réaction entre le Deutérium et le Tritium tandis que d'autres réactions nécessitent des températures plus élevées !

Le plasma chaud doit bien être isolé, loin des parois des matériaux du système, afin d'éviter son refroidissement et la production conséquentes d'impuretés qui contamineraient le plasma et le refroidiraient davantage. Dans le système Tokamak, le plasma est isolé par des champs magnétiques comme on vient de l'indiquer.

L'énergie nécessaire au confinement magnétique est mesurée par ce qu'on appelle le 'temps de confinement d'énergie'. Cela est la caractéristique temporelle du refroidissement du plasma lorsque la source de chaleur est stoppée.

La densité d'ions-carburant doit être suffisamment importante pour que les réactions de fusion s'opèrent au taux désiré. La puissance de la fusion générée est réduite si le carburant est diluée avec des impuretés (atomes) qui se détachent de la surface de matériaux environnant ou bien à cause de l'accumulation de 'cendre' d'Hélium résultant du produit de la réaction de fusion. Ainsi, étant donné que les ions-carburants doivent être 'brûlés' au cours de la réaction de fusion, ils doivent donc être également renouvelés par du carburant neuf tout au long de la réaction, et la 'cendre' d'Hélium doit être soustraite.

Quelques chiffres clé :

La température du Plasma se situe entre 100 et 200 millions de degrés C°.

Le temps de confinement d'énergie est de l'ordre de 1 à 2 secondes.

La densité centrale du plasma est de l'ordre de 2 à 3 x 10²⁰ particules par mètre cube (approximativement 1/1000 gr./m³)

Les conditions requises sont mesurées par le produit de ces trois grandeurs, c'est ce qu'on appelle le 'Produit de Fusion'.

* 04 - Le chauffage du plasma

Parmi une variété de procédés, j'aborde ici l'exemple ceux déployés pour le réacteur JET :

Le Chauffage Ohmique : Des courants allant jusqu'à 7 millions d'ampères circulent dans le plasma et le créditent ainsi une puissance de quelques mégawatts utiles à son chauffage.

Le chauffage par jet neutralisé : Des jets d'ions de Deutérium ou de Tritium sont accélérés par un potentiel de 140 000 volts, puis sont injectés dans le plasma. De manière à pénétrer le champ magnétique confinant, les jets accélérés sont neutralisés. Dans le plasma, les jets deviennent ionisés et les ions rapides cèdent au plasma leur énergie. La puissance maximum disponible est de 21 mégawatts.

Le chauffage Radiofréquence : Les ions du plasma et les électrons tournent dans les lignes de champ magnétique du tokamak. L'énergie est cédée au plasma à une position précise là où les ondes radio résonnent avec la rotation des ions.

Huit antennes dans le vide du récipient diffusent vers le cœur du plasma des ondes à une fréquence dans la gamme 25-55 MHz afin d'augmenter l'énergie des ions.

Cette méthode peut apporter une puissance de chauffage pouvant atteindre 20 mégawatts.

Les courant induits par micro-ondes : 10 mégawatts de micro-ondes à 3.7 GHz accélèrent les électrons du plasma afin de générer un courant dans le plasma de l'ordre de 3 MegaAmpères. Le nom barbare de cette méthode 'LHCD' (Lower Hybrid Current Drive) se réfère aux ondes particulières excitées dans le plasma.

L'auto chauffage du Plasma : Les noyaux d'hélium (particules alpha), produits lorsque le Deutérium et le Tritium fusionnent, demeurent dans le piège magnétique. Leur énergie continue à chauffer le plasma afin de faire perdurer la réaction de fusion.

Lorsque la puissance des particules alpha est efficace pour maintenir la température du plasma, la réaction devient 'auto-chauffante'. C'est une réaction à laquelle on se réfère par le nom d'**allumage**. On parle souvent en français abusivement 'd'**ignition**'.

* 05 - L'objectif

Une des principales préoccupations de la fusion est donc la 'combustion' du Plasma : Un gaz totalement ionisé auto maintenu dans un état extrême par un relâchement d'énergie provenant des réactions de fusion de ses noyaux atomiques. La combustion du plasma produirait ainsi une nouvelle, puissante et sûre source d'énergie.

Tout le problème réside dans la durée de maintien du plasma lorsqu'il est en ignition, c'est-à-dire lorsqu'il s'auto entretient par l'énergie qu'il produit. L'un de record le plus récent un plasma d'une durée de 6 minutes et 30 secondes réalisé dans le Tore Supra à Cadarache en Décembre 2003. Cette durée c'est ce qu'on appelle le 'temps de confinement de l'énergie'. Cette durée est fonction du rayon de la chambre torique dans laquelle le plasma est confiné. Par conséquent, les plasmas les plus performants sont obtenus dans les installations de grande taille. Le projet ITER consiste à s'engager dans l'étape suivante qui est l'objectif principal c'est à dire la combustion entretenue d'un plasma D-T sur des temps longs.

On peut imaginer le but recherché en allumant une bougie. On allume la mèche avec espoir que la flamme reste allumée et s'auto entretienne.

Je peux alors évoquer trois notions :

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

Lorsque ce facteur atteint la valeur 10, on peut enfin parler de réacteur.

L'ignition : C'est le stade où la puissance fournie par les réactions de fusion suffit à elle seul à compenser les pertes et où on peut donc couper la puissance extérieure. Cela correspond au facteur d'amplification Q infini. Le plasma est alors auto entretenu, comme la bougie qui une fois enflammée par l'allumette (la puissance extérieure) se consume toute seule.

La disruption : 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 fait 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.

Pour atteindre l'objectif, on doit se confronter à deux challenges majeurs. Tout d'abord il faut 'allumer' le plasma à des températures de l'ordre de plusieurs centaines de millions de degrés C°. Ensuite, le challenge le plus difficile à surmonter est de maintenir le plasma à ces températures élevées en le confinant et en le contrôlant de façon à maintenir sa densité et s'assurer qu'il ne souffre pas de pertes de chaleur notables. C'est ce qu'on appelle le critère de Lawson.

En fait ce 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. C'est d'ailleurs ce qui explique que le régime ohmique (expliqué plus loin) n'est pas suffisant car il ne permet que d'atteindre une température de l'ordre de 10 millions de degrés C°.

Les tokamaks, qui sont comme on vient de le voir plus tôt une famille d'appareils de recherche sur la fusion (à laquelle l'expérience JET et ITER appartiennent), emploient un ingénieux procédé qui nous renvoient aux deux challenges simultanément : un énorme courant électrique est induit dans le plasma pour le chauffer et pour compléter le champs magnétique confinant. Les courants électriques produisent de la chaleur grâce à l'effet Joule. C'est un phénomène qui nous est familier dans notre vie de tous les jours tels que dans nos fours électriques ou nos ampoules. Dans ces applications domestiques, les courants électriques n'excèdent pas habituellement quelques ampères. Les courants électriques peuvent aussi produire de forts champs magnétiques, un effet qui est justement employé par exemple dans le fonctionnement des moteurs électriques et des grues magnétiques de cimetières de véhicules. Des centaines voire des milliers d'ampères de courant électriques peuvent parcourir les aimants industriels. Toutefois, dans le cas d'un grand Tokamak tel que celui du projet JET, on peut induire dans le plasma un courant de plusieurs millions d'ampères pour le confiner et le chauffer !

* 06 - Le chauffage Ohmique

Le concept de Tokamak est une percée dans la recherche sur les plasmas, mais il ne constitue pas la solution intégrale. A plusieurs et voire même bien au-delà de millions de degrés, le plasma est un excellent conducteur car il offre une résistance moindre, ce qui signifie que l'effet Joule est par conséquent amoindri, car sans résistance, l'effet Joule ne peut plus avoir lieu ! L'unité de résistance électrique est le Ohm, c'est pourquoi les chercheurs disent habituellement que le régime 'ohmique' est inefficace à très hautes températures, où le terme 'hautes' signifie les centaines de millions de degrés qui sont pourtant nécessaires à la 'combustion' du plasma. De manière à atteindre les températures cibles, une sorte de 'chauffage additionnel' est donc requis pour seconder le 'chauffage ohmique' initial (par la même occasion, ce chauffage additionnel devient prépondérant ensuite). Des jets de particules neutres appelés plus simplement 'jets de neutres' (chauffage 'NB' en anglais pour 'Neutral Particules') et la résonance d'ondes électromagnétiques peuvent accomplir ce travail.

Plus encore, les Tokamaks ne peuvent pas maintenir un courant électrique continu dans le plasma et ceci limite le concept d'un champ magnétique complémentaire. Les Tokamaks possèdent un dispositif électrique ayant la forme d'un transformateur comme je l'ai indiqué en début de la présentation. Un transformateur électrique par définition possède deux enroulements. Ainsi puisque le plasma conduit le courant, on peut imaginer ce dispositif comme étant l'enroulement primaire du transformateur, et le plasma en tant qu'enroulement secondaire de ce même transformateur. Malheureusement, par définition, aucun transformateur ne peut transmettre de courant direct et continu. En effet, la transmission d'un courant électrique via un transformateur n'est concevable et n'a de sens qu'en présence de courants alternatifs. Un conducteur de courant additionnel doit être ajouté si on souhaite confiner continuellement le plasma. Un conducteur de courant d'onde électromagnétique offre une solution possible à ce problème.

De nos jours, le rôle du chauffage additionnel et les avantages du conducteur de courant ont été considérablement répandus vu leur fonction initiale. Les injections de neutres et d'ondes électromagnétiques résonnantes sont à présent les outils clés dans l'optimisation de la performance du plasma.

Les caractéristiques spatiales les plus importantes d'un Tokamak sont ses 'profils'. Ils informent des variations de données physiques telles que l'angle de portée du plasma par exemple (depuis le centre du plasma jusqu'à sa couche externe.). On mesure et on étudie le profil de la température du plasma, le profil de la densité du plasma, le profil des champs magnétiques, etc. Aujourd'hui, les injections de neutres de même que les ondes électromagnétiques sont utilisées pour contrôler et modifier les profils du plasma grâce à un ciblage approprié de l'apport d'énergie supplémentaire. Cette technique est parfois appelée 'mise en œuvre du plasma' et s'annonce comme extrêmement efficace pour réussir à obtenir de meilleures performances du plasma. La technique peut aussi créer de nouvelles conditions de régime, par exemple on peut occasionner un phénomène appelé 'transport de barrière interne' qui fournit un confinement plus accru du plasma.

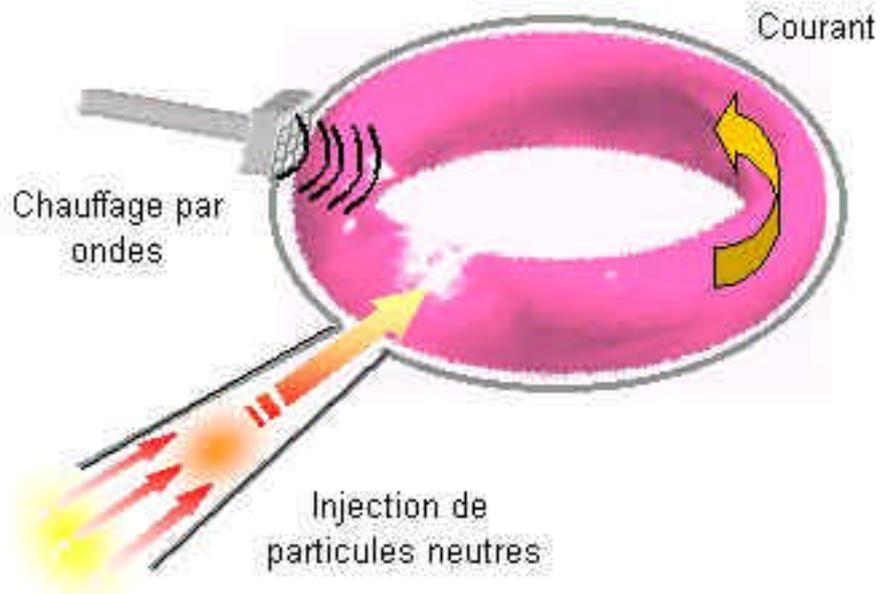
Le chauffage et les avantages de la conduite de courant ont même une mission plus importante lorsqu'ils s'appliquent en tant qu' 'Actuator' (Contraction des mots Acting et Powers en anglais c'est-à-dire Agents de Puissance) dans le contrôle en temps réel du Projet JET. De puissants Actuateurs (le terme français) peuvent être utilisés pour contrecarrer les instabilités du Plasma ou bien pour le protéger contre une variation

indésirable de ses paramètres. Dans cette optique, le chauffage additionnel et la conduite de courant seront très certainement utilisés pour les réacteurs futurs.

* 07 - Les jets de neutres

On la connaît en anglais sous le terme de NBI (Neutral Beam Injection).

Une technique largement répandue du chauffage additionnel de Plasma est basée sur l'injection d'atomes neutres au sein même du plasma pré-chauffé. Ce jet d'atomes apporte une énergie cinétique unidirectionnelle. Dans le plasma, ce jet d'atomes abandonne ses électrons au cours de ses diverses collisions avec d'autres particules. Ces derniers deviennent donc chargés électriquement, c'est-à-dire ionisés. On a tous un jour tenté des expériences électrostatiques en frottant une règle en plastique pour attirer quelques boulettes de papier... Ces atomes ionisés sont par conséquent capturés par les champs magnétiques du Tokamak. Et ces ions sont bien plus rapides que la moyenne des particules du plasma lui-même. Dans une série de collisions ion/ion, ion/électron, et électron/électron, la vitesse de groupe de ce jet d'atomes est ainsi transférée en une vitesse significativement accrue de mouvement chaotique global des particules du plasma. Cette action est similaire à un jeu de billard où l'une des boules engage en chaîne par son mouvement propre celui des autres boules environnantes. Comme nous le savons, et comme je l'ai expliqué au cours d'un exposé sur les trous noirs antérieurement, cette agitation accrue des particules n'est autre qu'une augmentation de température. En d'autres termes, un jet de neutres réchauffe le plasma et c'est bien ce que l'on veut obtenir.



Au cours des expérimentations sur la fusion nucléaire, les jets de neutres sont habituellement constitués par des atomes isotopes de l'Hydrogène (hydrogène, deutérium et même tritium pour le projet JET). Il faut remarquer que l'on parle toujours de 'jets de neutres' et non pas d'atomes. En effet, les jets doivent être constitués d'atomes neutres (par opposition aux ions chargés électriquement), sinon ils ne pourraient pas pénétrer le champ magnétique intense qui confine les plasmas (eux qui sont totalement ionisés par définition). L'énergie du jet de neutres (qui correspond à la vitesse de ses atomes) doit être suffisante pour atteindre le centre du plasma. Si le jet n'est pas assez rapide, les atomes risquent de se ioniser prématurément aux abords du plasma confiné. En même temps, le jet est supposé avoir assez de puissance pour délivrer des quantités significatives d'atomes se déplaçant rapidement au cœur du plasma sans quoi l'effet de chauffage

passerait inaperçu. Dans le cas du projet JET, l'énergie du jet vaut 80 ou 140 keV (Kilo Electron-volt) ce qui correspond, dans le cas du Deutérium, à une vitesse de 2800 à 3600 km/h soit 5 fois la vitesse des ions du plasma de deutérium. La puissance totale du jet de neutres chauffant est aussi élevée que 23 millions de Watts. Avec cette puissance, le nombre des jets d'atomes par seconde correspond approximativement à 10% du nombre total des ions du plasma du projet JET.

Il n'est pas si simple que cela de générer des jets de neutres aussi énergétiques constitués par des atomes se déplaçant si rapidement. La seule manière pour obtenir un jet de neutres est de produire d'abord une grande quantité d'ions, puis de les accélérer par le moyen d'un champ électrique élevé puis de neutraliser le jet ainsi accéléré. Les ions accélérés se neutralisent au cours d'un échange de charges avec un nuage de gaz prévu à cet effet, mais certains peuvent quitter le nuage sans avoir été neutralisés. Cette quantité résiduelle d'ions rapides doit être déviés par un électro-aimant vers une 'trappe' réfrigérée qui peut résister aux bombardements ionisés. Enfin, un puissant pompage sous vide doit assurer que pratiquement aucun atome lent sortant du gaz neutralisant ne puisse se diffuser jusqu'à la chambre du plasma. De cette façon, les atomes neutres rapides ont seul libre accès pour aller se 'crasher' dans le plasma. Cette technique offre de bons résultats mais elle est toujours en cours d'ajustements de façon à augmenter la fiabilité, la pureté et l'efficacité du jet de neutres.

* 08 - Le Plasma et les ondes électromagnétiques

Le plasma est un état de la matière intrigant. Etant constitué de particules chargées (ions et électrons), il est par conséquent sensible aux forces magnétiques et électriques de grande longueur d'onde. Par conséquent, un plasma (et spécifiquement le plasma confiné magnétiquement) peut contenir un riche mélange d'oscillations et d'ondes plasma couvrant le domaine des ondes sonores, des ondes électrostatiques, magnétiques et électromagnétiques. Selon les paramètres locaux du plasma en question, les ondes plasma peuvent se propager, être absorbées, réfléchies ou même converties en d'autres ondes plasma.

De manière générale, les ondes plasma transportent une énergie, de telle sorte que l'absorption d'une telle onde conduit à un transfert d'énergie. L'énergie est alors dans la plupart des cas convertie en une vitesse phénoménale du mouvement chaotique des particules (par exemple dans le cas de très hautes températures du médium absorbant). L'absorption d'onde est extrêmement efficace si la fréquence de l'onde coïncide (résonance) avec certaines des fréquences propres d'oscillation fondamentale du médium. Cependant, un chauffage significatif peut se produire également à des fréquences non résonnantes. Nous en sommes les témoins chaque jour lorsqu'on utilise notre four à micro-ondes : les magnétrons de nos fours produisent des ondes électromagnétiques qui provoquent un chauffage en faisant vibrer les molécules d'eau de notre nourriture plutôt que d'entrer en résonance avec elles.

* 09 - Les 3 Grandes familles de chauffage Radio-Fréquence

- A Fréquence cyclotronique ionique (Qqes dizaines de MHz)
- A fréquence hybride (Qqes GHz)
- A fréquence cyclotronique électronique (100 GHz)

Le chauffage radio-fréquence cyclotronique ionique

Aussi désigné sous le terme de ICRH (Ion Cyclotron Resonant Heating)

Dans des plasmas confinés magnétiquement, des particules (ions et électrons) tournent autour des lignes de champ du champ magnétique avec une période (soit une fréquence) dite 'cyclotron' qui dépend seulement de 3 données : la charge, la masse de la particule et la force du champ magnétique. D'autres paramètres telles que la température ou la densité ne jouent aucun rôle à cette fréquence 'cyclotron'. Par conséquent, si une onde électromagnétique oscillant à la fréquence de résonance cyclotron est dirigée dans le plasma, alors toutes les particules ciblées (définies par une masse et une charge) sont chauffées, en tenant compte du fait que le champ magnétique complémente la condition de résonance. Dans les Tokamaks, le champ magnétique diminue à mesure qu'on s'éloigne de l'axe majeur du Tokamak. Cela restreint la zone de résonance à une couche verticale étroite, ce qui donner ainsi un contrôle simple sur la déposition de l'onde cyclotron résonante.

Pour s'accommoder de ces règles compliquées de propagation d'onde, des multiples de la fréquence cyclotron de base appelées 'harmoniques de rang supérieur' sont mises en pratique. L'effet de ces harmoniques de rang élevé se repose sur les variations de volume avec l'intensité de l'onde, de telle sorte que la résonance soit plus élevée pour les particules ayant des orbites plus grandes. Ceci dit, le chauffage par ces harmoniques est plus significatif pour les particules se déplaçant rapidement que pour les particules lentes. Cela introduit de ce fait des dépendances selon la température de même qu'une désuniformisation de la distribution thermique résultant de ce chauffage.

Cette technique de chauffage ICRH est appliquée de façon routinière dans le projet JET. Il est soit résonant avec la seconde harmonique (soit le double) de la fréquence de giration des ions principaux de son plasma de deutérium ou bien avec la fréquence de giration des espèces minoritaires (Tritium et hélium). Les fréquences de résonance disponibles pour le JET sont situées entre 23 et 57 MHz ce qui correspond à une fréquence d'onde dite 'courte'. Cette gamme de fréquence est cependant très impopulaire (vous viendrait il de préférer écouter votre poste radio en ondes courtes ou bien en FM c'est-à-dire à plus haute fréquence entre 88 et 108MHz !!☺) à cause des multiples atténuations et autres interférences. Au total, la puissance installée du système ICRH du JET est de 32 Mégawatts. En pratique, seulement une partie de ce potentiel est efficace pour les expérimentations JET. C'est une énorme puissance comparée à la diffusion radio ou TV, où un émetteur de 50 kilowatts est déjà considéré comme puissant.

Les chaînes d'amplification de l'ICRH génèrent les ondes électromagnétiques. Chacune d'entre elle est terminée par un étage final à tube tétrode (2Megawatts chacun). Les lignes de transmission qui conduisent les ondes de l'ICRH depuis les générateurs vers le Tokamak JET sont des câbles coaxiaux à faibles pertes. Les câbles coaxiaux consistent en un tube métallique externe conducteur isolé d'un autre conducteur central isolé également. De tels câbles sont en général utilisés dans toute la transmission haute fréquence telles que la télévision aérienne ou le raccordement des paraboles de réception satellite. Cependant,

pour le projet JET, d'énormes puissances sont en jeu et conduisent les câbles de sortie de l'ICRH à ressembler davantage à des sortes d'oléoducs faisant 20cm de diamètre. Plusieurs centaines de mètres de telles lignes de transmissions sont installées dans le JET. Plutôt que de le appeler câble, on parle alors plutôt de 'guides d'onde'. Les lignes de transmissions sont terminées par 4 antennes ICRH qui sont installées dans l'épaisseur même de la chambre) plasma du JET. Chaque antenne comprend 4 conducteurs (armatures), et chacun d'eux est alimenté par un générateur différent. Les ondes électromagnétiques de l'ICRH ne peuvent pas se propager dans la chambre à vide (là où est confiné le plasma) car leur longueur d'onde est trop grande. Par conséquent, les antennes doivent être placées aussi proche que possible du plasma.

Le chauffage radio-fréquence cyclotronique électronique

Il existe une technique similaire appelée ECRH (Electron Cyclotron Resonant Heating) mais elle n'est pas utilisée pour le JET. Le principe est basé sur le fait que les électrons, étant plusieurs milliers de fois plus légers que des ions, possèdent des fréquences cyclotron bien plus élevées que dans le cas de l'ICRH. Dans les plasmas d'un Tokamak, les fréquences requises pour l'ECRH sont de l'ordre de 100GHz) et par conséquent la longueur d'onde est de quelques millimètres seulement. Cela est plus gageur pour la génération et la transmission d'onde. Ces fréquences sont d'ailleurs utilisées dans les applications radar modernes. Cependant, la puissance requise pour l'ECRH est élevée. L'ECRH cible les électrons du plasma seulement, et le transfert de chaleur des électrons vers les ions est relativement lent. Les avantages de l'ECRH sont tels que ces ondes peuvent se propager dans le vide et elles peuvent être conduites avec une haute précision.

L'ECRH est installé sur certains autres tokamaks tels que le JT-60U au Japon, le DIII-D aux USA (connu aussi sous le nom de «doublet 3») ou encore l'ASDEX-U en Allemagne. A l'occasion on peut nommer d'autres tokamaks connus : celui du FTU en Italie, et sans oublier le TORE Supra à Cadarache.

Le chauffage radio-fréquence hybride

Aussi désigné sous le terme de LHCD (Lower Hybrid Current Drive)

Il existe plusieurs autres fréquences de résonance dans les plasmas d'un Tokamak mais les expériences on montré que certaines sont inefficaces voire même peu pratiques alors que d'autre ne peuvent simplement pas pénétrer le bord externe du plasma. Deux fréquences candidates sont dites 'hybrides', ainsi appelées par qu'elles résultent de l'interaction entre les forces des ions et des électrons, tel que leurs fréquences se situe entre les fréquences cyclotron de l'ion et de l'électron. Bien que la plus basse fréquence hybride des deux puisse atteindre le plasma, cette dernière possède un effet chauffant inefficace. Malgré tout, une autre application signification de la plus basse fréquence hybride a évolué : la plus basse onde hybride correspondante peut conduire un courant électrique grâce au fait qu'elle possède une composante électrique parallèle au lignes de champ magnétiques.

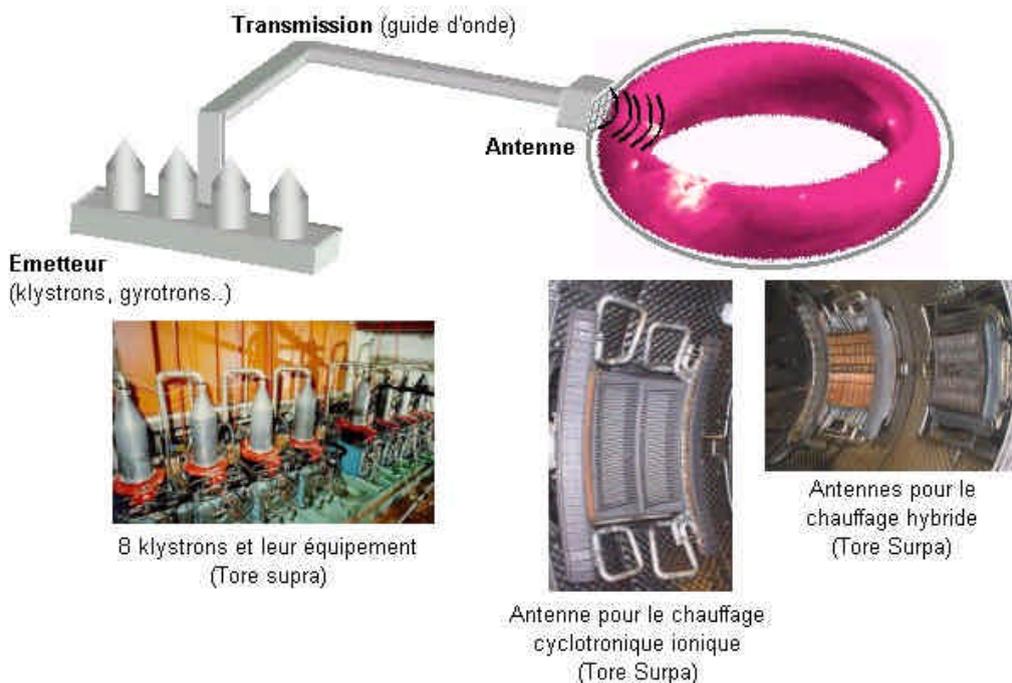
On pourrait s'attendre à ce que la composante électrique alternative très rapide des ondes électromagnétiques ne puisse pas générer une courant électrique constant, mais cela tend à être faux. Les électrons disposant de vitesse thermique légèrement plus basse que la vitesse de propagation de l'onde peuvent en fait « surfer » sur le potentiel électrique croissant et ainsi augmenter leur vitesse dans la direction de l'onde. Il est également vrai que tout électron légèrement plus rapide que l'onde sera ralenti. Cependant, la distribution thermique de vitesses provoque ici une diminution des particules les plus rapides. En conséquence, il y a au final plus d'électrons qui soient

accélérés plutôt que l'inverse. Au bout du compte, un courant électrique apparaît. Bien que l'effet semble soit menu vis-à-vis de la distribution de vitesse de l'électron, en terme de tirage électrique cela reste significatif.

Dans le JET, un système LHCD fonctionne à 3.7GHz ce qui correspond à une longueur d'onde de 10cm dans le vide. La fréquence appartient au domaine de la bande 'L' pour les diffusions pas satellite. La capacité du LHCD installé est de 12 MégaWatts de puissance additionnelle. Grâce à ce système, un courant plusieurs millions d'ampères peut être conduit. L'onde électromagnétique est générée dans des 'klystrons' c'est-à-dire des tubes qui peuvent produire les fréquences de quelques GHz grâce à la résonance de la modulation d'un faisceau d'électrons.

Pour le JET, 24 klystrons sont installés et répartis parmi 6 modules indépendants. L'onde électromagnétique est ensuite transmise à l'antenne du LHCD par un système complexe de guide d'onde. Des guides d'onde sont ici des conducteurs rectangulaires creux dont la section correspond à la longueur d'onde transmise (soit environ 10cm comme on vient de l'indiquer). L'antenne du LHCD est une construction très sophistiquée appelée "grille multi-jonction" de manière à permettre une correction de phase entre l'onde avant qu'elle ne soit lancée dans le plasma. La phase correcte des ondes du LHCD est perturbée par leur propagation dans le vide, il est donc requis que l'antenne soit montée directement à l'intérieur du mur de la chambre de confinement, aussi proche du plasma que possible.

Pour la première expérience de combustion du plasma, ITER, un catalogue de toutes les méthodes de chauffage de plasma efficaces et de conduite de courant sont en phase d'être adoptées, avec une puissance totale de sortie attendue de l'ordre de 100Megawatts. JET est le tokamak le plus proche d'ITER, au vu sa taille et celle du plasma en jeu. Par conséquent, les aménagements pour le chauffage et la conduite de courant du JET sont largement concernés par les expériences menées pour ITER. Les 'scénarios plasma' ITER proposés sont optimisés sur le JET par mise en œuvre de profile précise. En 2004, une nouvelle antenne, semblable à celle de l'ITER a été installée sur JET. Elle a ainsi constitué une amélioration majeure dans le but de valider un nouveau concept d'émission d'onde cyclotron stable robuste et convenable au vu des rudes conditions dans lesquels seront conduites les prochaines combustions de plasmas d'ITER.



* 10 - Les Composants Face au Plasma

Les 'composants face à au plasma' sont une particularité du projet ITER. Ces composants sont prévus pour être activement refroidis par circulation d'eau en particulier, et permettent l'étude des plasmas en régime quasi permanent.

Il convient alors de parler de l'interaction Plasma Paroi : 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.

La 'zone de bord' est la zone intermédiaire entre le plasma lui-même et la surface intérieure du tokamak : Dans le plasma les lignes de champs sont en circuit fermé. Dès lors que le plasma se heurte à un objet, les lignes de champs s'ouvrent à cet endroit. La dernière surface magnétique est dite 'dernière surface magnétique fermée' (DSMF). Entre cette dernière 'surface' magnétique et la surface matérielle intérieure du tokamak se situe donc la 'zone de bord'. Etant donné que cette DSMF est définie par le premier point de contact avec un objet solide, qui limite donc le plasma, on donne le nom de **limiteur** aux composants qui font face en première ligne au plasma.

En conséquence, lorsque les particules de plasma se désolidarisent du circuit magnétique, ces dernières viennent percuter les parois solides du tokamak. C'est ce qu'on appelle les **interactions plasma/paroi**. En percutant les surfaces solides, elles se recombinent avec des électrons et redeviennent neutres 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 elle-même, soit par le **système de pompage externe**. On appelle l'ensemble de ces phénomènes le recyclage.

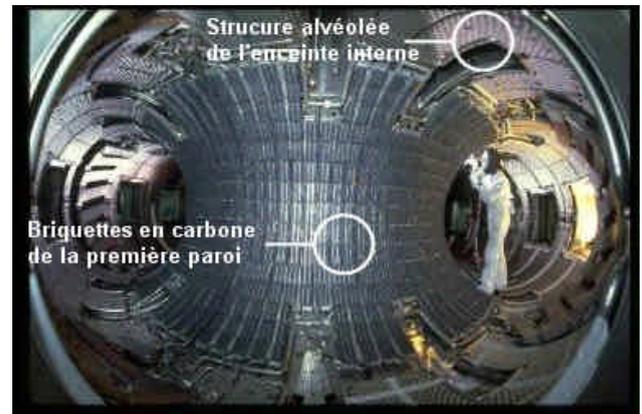
On assiste donc à une rencontre assez extraordinaire, où le quatrième état de la matière (le plasma) rejoint les 3 autres (la paroi solide, le gaz résultant de l'interaction du plasma avec la paroi, et le liquide, qui circule à quelques centimètres de la surface de la paroi pour la refroidir...). On 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.

Matériaux

Auparavant étant donné que les décharges étaient courtes, on n'avait pas le temps de rendre compte de l'importance des interactions plasma/paroi

A présent, au vu des progrès effectués, on s'aperçoit que la paroi est agressée par le plasma, soumise au bombardement des particules, émettant des impuretés, arrachées par érosion, comme l'eau d'une rivière érode petit à petit la roche sur laquelle elle passe. Ces impuretés viennent 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.

On a donc commencé à remplacer le métal par des composants en matériaux dits légers, comme le carbone ou le béryllium, matériaux également utilisés pour les boucliers thermiques dans l'industrie spatiale. On utilise en outre des composants refroidis (c'est à dire parcourus par des circuits d'eau pressurisée).



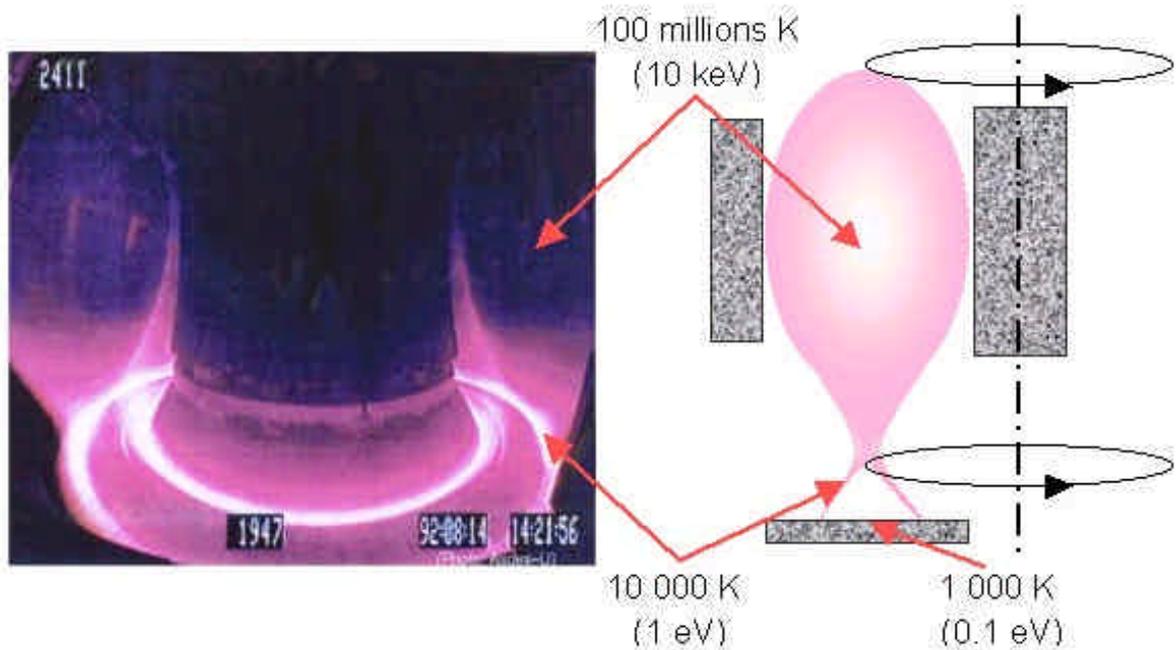
Empêcher la nuisance mutuelle plasma/paroi

La première idée consiste à éloigner la zone d'interaction plasma/paroi, de l'écarter, de créer une sorte de diversion pour l'éloigner autant que possible du centre de décharge du plasma. D'où le nom de la configuration utilisée : le **Divertor axisymétrique**.

Ce système modifie un peu la définition de DSMF qui 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.

Sans Divertor axisymétrique, les particules du plasma qui diffusent radialement et qui percutent le limiteur deviennent neutres, se déplacent alors à leur gré (car elle ne sont plus sensibles au circuit magnétique) et s'ionisent éventuellement à nouveau au contact du plasma, au centre même de la décharge.

Grâce au Divertor, les particules ionisées qui diffusent sont amenées vers des plaques de neutralisations situées loin du plasma central. Si ces dernières s'ionisent à nouveau, elles le feront au contact dans la zone périphérique du plasma uniquement. Elles demeurent ainsi en circuit fermé sans perturber le cœur de la décharge. Il s'agit là d'un **écranage** des impuretés. Les plus grandes machines actuelles, comme JET et JT60-U, sont équipées de ce type de dispositif.



Le concept du chaos est un domaine de recherche fondamentale en pleine expansion, très en vogue actuellement en physique, mais également en météo ou en économie.

Une variante de Divertor est le **Divertor Ergodique** (testé sur le Tore Supra)

Comme son nom l'indique, la 'diversion' magnétique opérée ne respecte plus le système bien ordonné de tores emboîtés mais elle est mise en œuvre par une perturbation magnétique. Cela crée au bord du plasma un mélange chaotique de lignes de champs.

L'interaction plasma/paroi n'est plus éloignée "géographiquement" mais "magnétiquement" de la zone centrale de décharge. Sans rentrer dans les détails, la particularité d'un Divertor ergodique est de mêler les lignes de champs dans son voisinage ; les particules qui diffusent y parvenant sont statistiquement prisonnières des modules du Divertor car elles ont une forte probabilité d'être ré-ionisées sur une ligne de champ qui retourne à l'un des modules, et donc de rester coincées dans la zone de bord où s'exerce la perturbation. Le Divertor ergodique du Tore Supra consiste en 6 modules placés régulièrement autour de la chambre, dans lesquels on fait circuler un courant pour créer la perturbation.

L'extraction de chaleur

Dans Tore Supra, on peut atteindre des flux thermiques de plusieurs dizaines de Mégawatts /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 limiter les effets de la charge thermique, les matériaux sont inclinés pour limiter l'effet d' 'éclairage' (un peu comme si la lumière du soleil était rasante et donc moins chaude). On choisit également des matériaux résistants tels que le carbone, le tungstène et le béryllium. 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 Mégawatts /m².

* 11 - Les Diagnostics

Les diagnostics sont des instruments de mesure variés et très spécifiques. Les Tokamaks en sont truffés. Ils permettent de mesurer les performances, contrôler la machine et obtenir une compréhension des phénomènes physiques en présence.

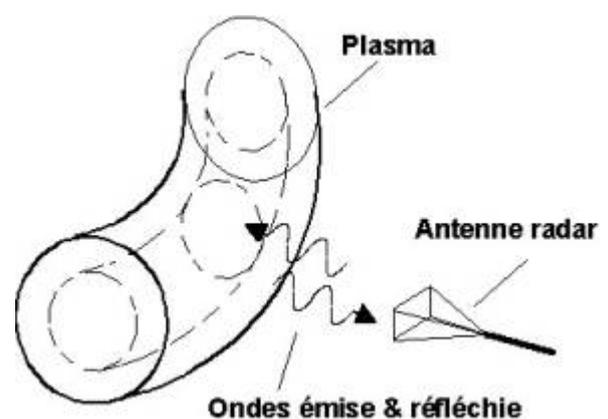
Ces mesures sont effectuées à distance du plasma. On a donc recours à des observations dans différentes longueurs d'onde allant des rayons X jusqu'à l'infrarouge. Les rayons X permettent d'avoir des informations de distribution en énergie des électrons et donc de connaître l'efficacité d'un chauffage. L'ultraviolet permet de mesurer le rayonnement des impuretés lourdes (métaux). Le visible permet d'observer l'ensemble de la chambre et le halo rosé caractéristique des interactions plasma paroi. Des fibres optiques et des endoscopes installés sur les composants face au plasma apportent des informations locales sur le rayonnement du deutérium, l'hélium ou le carbone.

On sonde également le plasma pour connaître sa réponse à la propagation d'ondes.

On utilise à cet effet des sondes radar pour effectuer des réflectométries. Cela permet notamment de mesurer la densité du plasma dans la décharge. L'interférométrie suppose un émetteur et un récepteur radar situés de part et d'autre de la machine. Cela permet d'obtenir des informations sur la densité et le profile du courant, mais aussi le profile de température et la turbulence du plasma.

On peut aussi introduire une sonde dans le plasma périphérique. Une telle sonde est appelée sonde de Langmuir. C'est un petit élément robuste en carbone qui recueille le courant du plasma. Cet élément permet de recueillir des informations dans les premiers centimètres du bord du plasma. Un bras articulé permet de l'introduire brièvement afin de ne pas le détériorer au vu des températures intenses du plasma.

Tous ces diagnostics sont donc utiles pour étudier les plasmas mais ils ont aussi le grand avantage d'en permettre le contrôle, on parle alors d'asservissement et de conduite des programmes.



* 12 - Vers le Réacteur

Le stade véritable de réacteur sera atteint par définition après de longues années d'études et expérimentations. On parlera de réacteur de fusion électrogène.

L'application est de convertir la chaleur en électricité exactement comme pour les réacteurs à fission nucléaire que nous connaissons aujourd'hui.

L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est convertie en chaleur dans la couverture dite **tritigène**. C'est un élément se situant au-delà de la première paroi de la chambre mais néanmoins faisant partie intégrale de la chambre à vide. La chambre à vide elle-même est le composant qui clôt l'espace où a lieu la réaction de fusion. Première paroi, la couverture tritigène et la chambre à vide sont refroidies par un système d'extraction de la chaleur. C'est cette chaleur qui sera utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble classique turbine et alternateur pour produire de l'électricité.

ITER est à deux pas du réacteur car il est exempt de couverture tritigène pour le moment. C'est notamment grâce à l'installation future d'une couverture tritigène que l'on validera la faisabilité de la production d'énergie via la fusion thermonucléaire non seulement au niveau de la physique mais aussi au niveau de la majeure partie des grands composants d'un réacteur (bobines magnétiques supraconductrices de grande taille par exemple). Les performances en terme de confinement plasma demandées à un réacteur électrogène ne sont que 4 à 5 fois supérieures aux performances nominales du projet ITER actuel. On peut raisonnablement estimer que les premiers kW électriques produits par un prototype de réacteur à fusion thermonucléaire puissent voir le jour à l'horizon 2050.

Conclusion

Tout cela nous positionne environ une centaine d'années après le début des recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée. Cent ans d'écart entre la découverte du concept et l'utilisation finale, ce qui n'est pas si inhabituel que cela: la découverte du principe des cellules solaires date de 1839 (Antoine Becquerel) et la découverte du principe de la pile à combustible date de 1839 (William Grove).

On remarque aussi qu'en l'espace de 30 ans qui se sont écoulés depuis le début de l'ère des tokamaks, le bilan énergétique du plasma a été multiplié par 1000. Au début des années 90 on a pu réaliser dans certains tokamaks des bilans énergétiques proches de l'équilibre : c'est-à-dire que l'énergie dégagée par la puissance de fusion entre le deutérium et le tritium étaient de l'ordre de la puissance injectée dans le plasma pour le chauffer. Cette progression fulgurante est comparable (voire supérieure) à la croissance des performances des microprocesseurs (loi de Moore).

