

Plasma thermonucléaire confiné magnétiquement : un système complexe

Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) a popularisé les recherches sur la fusion thermonucléaire par confinement magnétique. Le caractère mondial du projet et son gigantisme sont à la mesure de l'objectif poursuivi : une source d'énergie abondante et peu polluante. Ces mêmes caractéristiques ont eu tendance à occulter la physique sous-jacente aux recherches sur la fusion magnétique, et tout spécialement son aspect « recherche fondamentale ». C'est cette carence que cet article se propose de combler, en indiquant quelques aspects saillants de cette recherche.

Pour réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée (voir encadré 1), il faut confiner assez longtemps une densité assez forte d'isotopes d'hydrogène à fusionner et les chauffer. Cet article décrit la physique sous-jacente au confinement par un champ magnétique de ces isotopes.

Diversité des configurations de confinement magnétique

Un champ magnétique ouvert confine les particules chargées perpendiculairement à ses lignes de champ, mais non parallèlement. Pour obtenir un confinement dans les trois dimensions de l'espace à l'aide d'un champ magnétique, il faut considérer des configurations de confinement toroïdales où ces lignes s'enroulent sur des surfaces toroïdales. On appellera dans la suite « surface magnétique » la surface délimitée dans l'espace par l'enroulement de lignes de champ. Trois grands types de configuration toroïdales existent actuellement. Dans l'ordre d'auto-organisation croissante du plasma il s'agit du stellarator, du tokamak, et du reversed field pinch. Le tokamak est le plus facile à comprendre, et c'est donc lui qui sera décrit en premier. C'est la configuration la plus avancée, d'où son choix pour le projet ITER.

Tokamak

Dans le tokamak, le confinement magnétique des particules est assuré par la combinaison de deux champs magnétiques. Un champ toroïdal intense (5,3 tesla pour ITER) est produit par des bobines entourant le petit rayon du tore. S'y

ajoute un champ poloïdal (le long d'un petit cercle du tore), typiquement un ordre de grandeur plus faible, produit par un courant toroïdal, principalement électronique, circulant dans le plasma (figure 1).

Ce courant, de 15 MA pour ITER, peut être créé de façon pulsée en induisant un champ magnétique au travers de l'anneau de plasma qui a un volume de 800 m³ pour ITER. Il peut aussi être produit de façon continue en transférant de l'impulsion au plasma par des ondes électromagnétiques. C'est ainsi que le tokamak français Tore Supra (plasma de 24 m³) a atteint le record d'une durée de 6 minutes pour des plasmas sans courant induit, dans le cadre du programme fusion EURATOM. Le champ électrique toroïdal d'induc-

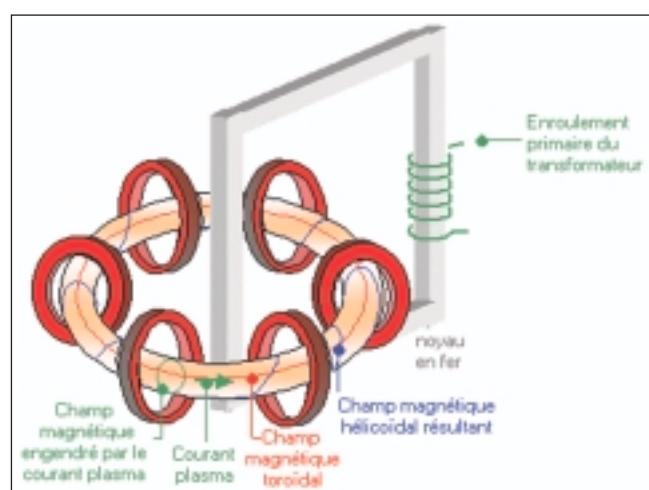


Figure 1 - Schéma de principe du tokamak.

Article proposé par :

Dominique Franck Escande, escande@up.univ-mrs.fr, Laboratoire de physique des interactions ioniques et moléculaires (P2IM), CNRS/Université Aix-Marseille 1.

Encadré 1

Principe de la fusion thermonucléaire contrôlée

La réaction la plus favorable actuellement pour un réacteur est celle qui fait fusionner deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium (${}_1H^2$) et le tritium (${}_1H^3$), pour produire une particule α (${}_2He^4$, avec une énergie de 3,52 MeV) et un neutron (avec une énergie de 14,06 MeV). Dans un réacteur commercial, le tritium sera produit in situ par le bombardement d'une couverture de lithium par les neutrons de fusion. En conséquence le combustible fourni au réacteur sera non radioactif, et la cendre (hélium) non plus. L'irradiation des structures du réacteur sera donc la seule source de radioactivité. Ceci et la très faible radio-toxicité du tritium signifient que l'accident le plus grave pouvant survenir au réacteur ne nécessiterait pas l'évacuation de la population environnante. L'abondance du combustible (40 mg de deutérium par litre d'eau) ouvre la perspective de faire fonctionner mille centrales de 1 GW électrique pendant mille ans. Ces caractéristiques rendent la fusion thermonucléaire contrôlée très attrayante, mais sa réalisation est ardue, car il faut dominer un milieu extrême et complexe, le plasma chaud globalement neutre constitué d'ions et d'électrons. Pour que le plasma libère plus de puissance par fusion qu'il n'en perd vers l'extérieur, il faut que la densité n et le temps de confinement de l'énergie τ_E vérifient le critère de Lawson $n\tau_E > 1,5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$ pour une température de 20 à 30 keV,

soit plus de 200 millions de degrés Kelvin, nécessaire pour que les ions puissent vaincre leur répulsion coulombienne. Deux approches sont envisageables pour satisfaire cette condition en évitant le contact d'un milieu si chaud avec des parois matérielles. L'une est la fusion inertielle qui fait « brûler » instantanément un micro-ballon de combustible solide par irradiation laser (projet Laser Mégajoule) ou de faisceaux de particules. L'autre est la fusion par confinement magnétique (appelée « fusion magnétique » par la suite) de plasmas ayant une densité d'environ 10^{20} m^{-3} . Elle utilise la propriété des particules chargées d'avoir un mouvement circulaire perpendiculairement à un champ magnétique (mouvement cyclotronique). Les avancées dans cette deuxième voie ont justifié la conception du projet ITER.

Un réacteur à fusion sera donc composé d'un « cœur » où se produira la réaction nucléaire, entouré d'une enveloppe ou « couverture » destinée à la production du tritium et aussi à la récupération de l'énergie produite, sous forme d'énergie thermique. Cet ensemble doit être enfermé dans une enceinte de protection pour confiner la radioactivité. L'énergie thermique produite pourra être transformée ensuite en électricité selon un processus classique.

tion permet ainsi l'allumage du plasma, et également son chauffage, jusqu'au dixième de la température nécessaire pour les réactions de fusion ; il faut un chauffage additionnel (ondes ou faisceaux de particules rapides) pour atteindre les températures thermonucléaires (40 MW sont prévus pour ITER), où les réactions de fusion compensent les pertes collisionnelles et turbulentes.

Dans la configuration tokamak idéale, une ligne de champ magnétique est une hélice qui s'enroule sur une surface torique. Cette surface se réduit à un cercle (axe magnétique) sur l'axe secondaire du tore de plasma (figure 2a). Les surfaces magnétiques s'emboîtent les unes dans les autres. Le taux d'enroulement q d'une ligne de champ sur sa surface magnétique est défini comme le rapport entre les nombres de tours toroïdaux et poloïdaux que fait la ligne quand on la suit sur une très longue distance. Dans un tokamak, q varie typiquement de 1 au centre à 3 au bord du plasma.

En fait des instabilités ou des perturbations extérieures conduisent les plasmas des tokamaks réels à s'écartez de la configuration idéale. Une surface magnétique ayant un paramètre q prenant une valeur rationnelle q_0 peut se transformer en une structure appelée îlot magnétique, surtout quand q_0 est entier ou rapport de deux petits entiers. Cette structure se décrit le plus facilement pour $q_0 = 1$ où un tour toroïdal correspond à un tour poloïdal. Sa section poloïdale (figure 2b) prend une allure de croissant. A l'intérieur du croissant, les lignes de champ s'enroulent autour d'une ligne hélicoïdale du cas non perturbé qui fait un grand tour du tore pour chacun de ses petits tours, et qui joue le rôle d'axe

magnétique secondaire. A l'extérieur du croissant, les lignes magnétiques conservent leur topologie précédente, mais sont déformées par la présence de l'îlot ; en particulier l'axe magnétique du cas non perturbé reste l'axe magnétique principal. Le croissant fait un tour complet autour de cet axe en un tour toroïdal. Pour un q_0 rationnel plus général la section poloïdale des lignes magnétiques fait apparaître une chaîne de tels îlots au lieu d'un seul. L'intérieur d'un îlot peut être vu comme une configuration magnétique à l'intérieur de la configuration principale. L'îlot $q = 1$ est très généralement présent dans les tokamaks, et résulte de l'auto-organisation magnétique du système.

Le plasma d'un tokamak est susceptible de développer une instabilité magnétohydrodynamique (MHD) où il se tortille si la densité de courant dans la décharge dépasse un

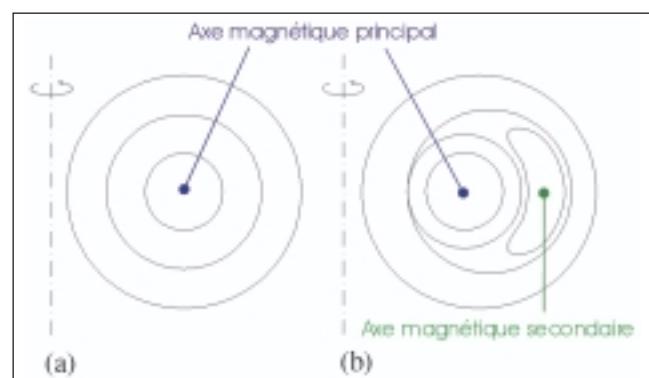


Figure 2 - Section poloïdale de surfaces magnétiques d'un tokamak.

seuil, dit de Kruskal-Shafranov (KS), proportionnel au champ toroïdal. Le plasma touche alors la paroi, s'y refroidit et force son courant à y circuler. Ce phénomène s'appelle disruption. Dans ITER il conduirait à ce que des mégampères circulent perpendiculairement à des champs de l'ordre du Tesla, ce qui signifierait de fortes contraintes sur la paroi entourant le plasma. Le dimensionnement de la machine autorise de tels avatars à condition qu'ils soient rares. Une cause importante de disruption est l'élévation de la densité du plasma au-dessus d'une valeur, appelée limite de Greenwald. Alors un rayonnement excessif du plasma de bord y fait baisser la température, ce qui en augmente la résistivité. Ceci transfert au centre du plasma le courant qui y circule, et la limite de KS est atteinte. Comme le taux de réactions nucléaires est proportionnel au carré de la densité du plasma, la limite de Greenwald bride les performances d'un tokamak de taille donnée.

Stellarator

Dans le stellarator, la composante poloïdale du champ magnétique n'est pas créée par un courant circulant dans le plasma, mais par des bobinages extérieurs. Le stellarator correspond à différentes configurations magnétiques, et l'une d'entre elles peut être vue comme l'intérieur d'un îlot magnétique d'un tokamak dont les courants du plasma seraient produits par des bobinages. Le plasma est créé et chauffé par une décharge micro-onde.

Pourquoi donc s'intéresser à une configuration de confinement magnétique plus compliquée que celle du tokamak ? Parce que, vu l'absence de courant toroïdal, un plasma de stellarator n'est pas sujet à disruption. La limite de Greenwald, qui est proportionnelle au courant toroïdal, n'y existe pas, et des régimes à fort confinement ont même été observés à haute densité dans la machine allemande Wendelstein AS (1 m³ de plasma) dans le cadre du programme fusion EURATOM. Pour autant si la densité croît suffisamment, le plasma rayonne plus de puissance qu'il n'en reçoit, et s'éteint.

Des stellarators de plus en plus grands sont réalisés (plasma de 20 à 30 m³) qui utilisent un bobinage supraconducteur (champ de 3 à 4 tesla) : l'un d'entre eux fonctionne au Japon, et l'Allemagne en construit un autre dans le cadre du programme fusion EURATOM. Ces développements sont surprenants quand on sait que le stellarator avait été abandonné en 1964 comme configuration crédible pour la fusion magnétique ! A l'époque il confinait très mal les ions rapides. Sa résurrection a eu lieu quand la preuve a été apportée que diverses optimisations de son champ magnétique utilisant la mécanique rationnelle moderne pouvaient supprimer la dérive de ces ions.

Reversed Field Pinch

Le reversed field pinch (RFP) peut être vu comme un tokamak qui fonctionne au-delà du seuil de Kruskal-Shafranov. Comment est-ce possible ? En asservissant les bobines toroïdales pour qu'elles jouent le rôle de conservateur de

flux magnétique toroïdal. Quand l'instabilité de KS se déclenche, le courant circulant dans le plasma y suit un circuit hélicoïdal. Il forme donc un solénoïde qui augmente le flux magnétique toroïdal dans la partie centrale du plasma. La conservation du flux magnétique toroïdal total force alors les bobines toroïdales à baisser, puis à inverser leur champ. Cette inversion signifie aussi celle du courant dans les bobines, et l'orientation de ce courant le fait repousser la composante poloïdale du courant hélicoïdal circulant dans le plasma et stabiliser la déformation du plasma. Ainsi la torsion ne peut pas aboutir à une disruption. Le plasma du RFP se trouve donc dans un état d'auto-organisation magnétique non trivial dû à la saturation non linéaire d'une instabilité de torsion : le champ magnétique toroïdal s'inverse légèrement vers l'extérieur du plasma (d'où le « reversed field » de « RFP »). Dans sa version la plus simple cette saturation fait apparaître un îlot magnétique. Le paramètre q d'un RFP varie typiquement de 0,1 à – 0,03 du centre vers le bord.

Historiquement la configuration RFP a été découverte empiriquement, et le principe physique de son fonctionnement n'a été compris que récemment. Pendant longtemps les expériences ont indiqué que l'auto-organisation du plasma s'accompagnait d'une forte turbulence magnétique qui rend chaotiques les lignes de champ magnétique dans la partie centrale du plasma, ce qui détériore le confinement. Durant la dernière décennie les expériences ont révélé l'existence d'états du plasma dits à hélicité unique, très peu turbulents et proches de ceux révélés par les simulations numériques où la modulation du champ magnétique axisymétrique est statique, et donne au plasma une forme hélicoïdale régulière parente de celle présente dans certains stellarators. Du point de vue de la dynamique non linéaire, ces états correspondent à un autre bassin pour l'auto-organisation du système. La réalisation expérimentale d'un tel état pourrait rendre crédible le RFP comme configuration de confinement magnétique pour un réacteur.

Si son confinement s'améliore, le RFP a de nombreux avantages par rapport au tokamak et au stellarator : le courant du plasma produit l'essentiel du champ magnétique de confinement, ce qui permet que les bobines entourant le plasma ne créent qu'un champ faible, et ne soient pas supraconductrices. La pression du plasma est supportée avec un champ magnétique plus faible. Vu son parcours hélicoïdal, le courant du plasma y dissipe plus d'énergie que dans le tokamak, ce qui devrait permettre d'atteindre les températures thermonucléaires sans chauffage additionnel. La configuration RFP est relativement compacte, ce qui conduit à une forte puissance massique. Ces caractéristiques conduisent à une machine plus simple et moins coûteuse, ce qui est souhaitable pour une installation industrielle. Cependant, par rapport au stellarator, le RFP souffre de la même limite de Greenwald que le tokamak. Le fait que cette limite soit la même dans deux configurations aussi différentes est une contrainte sévère pour sa description théorique qui reste à faire. Actuellement le plus gros RFP est la machine RFX qui fonctionne en Italie dans le cadre du pro-

gramme fusion EURATOM. Elle peut produire un plasma de 10 m^3 dans un champ magnétique maximum de 1 tesla (courant plasma de 2 MA).

Universalité de la physique dans les diverses configurations

Comme la limite de Greenwald vient de l'illustrer, la variété des configurations, qui s'enrichit elle-même de sous-variétés, fait apparaître une universalité de la problématique physique du confinement magnétique. Nous considérons maintenant quelques aspects supplémentaires de cette problématique : l'auto-organisation magnétique du plasma, la turbulence et le transport de l'énergie et des particules, les lois d'échelle, et la description théorique.

Auto-organisation magnétique

L'existence d'instabilités qui se saturent par formation d'îlot magnétique ou par auto-renversement du champ magnétique signe une auto-organisation magnétique des plasmas de fusion qui reste souvent mystérieuse. La compréhension de l'îlot magnétique $q = 1$ du tokamak n'est encore que partielle, de même que le mécanisme de relaxation qui le fait pulser. Cet îlot est un cousin de celui qui existe dans les états à hélicité unique du RFP dont la description théorique est encore à faire. D'autres fluctuations magnétiques demeurent inexpliquées, en particulier au bord des plasmas de tokamak et de RFP. En revanche de grands progrès ont été accomplis dans la compréhension et le contrôle des îlots magnétiques $q > 1$ du tokamak. Par ailleurs l'auto-renversement du champ magnétique au bord du plasma du RFP, longtemps mystérieux, est désormais bien compris.

Les règles régissant les lignes de champ magnétique montrent que la présence d'un îlot magnétique est dû à une fluctuation magnétique ayant le même taux d'enroulement q . Une autre fluctuation magnétique donnera un autre îlot dans le plasma si la valeur de q qui lui est associée se situe dans le domaine de valeurs de q du plasma. Si deux fluctuations sont présentes, leurs îlots individuels apparaîtront s'ils ne se recouvrent pas. Sinon du chaos magnétique surgira dans leur zone de recouvrement. C'est ce qui se produit dans l'état turbulent du RFP, ou dans un stellarator non optimisé, et c'est ce que l'on provoque par un bobinage supplémentaire dans la partie externe du plasma de certains tokamaks pour y adoucir l'interaction plasma-paroi. Si le chaos du champ magnétique est bien compris, son impact sur les écoulements dans le plasma, ou la fixation de l'amplitude des fluctuations magnétiques qui lui sont sous-jacentes sont des sujets de recherche actuels.

Turbulence et transport

Dans les trois configurations de confinement considérées ici, l'existence de gradients de densité et de température

entre le centre et le bord du plasma est à l'origine d'instabilités cousins des instabilités de convection dans les fluides. Ces instabilités donnent lieu à une turbulence où existent des écoulements macroscopiques intermittents qui peuvent augmenter le transport de l'énergie vers l'extérieur d'un à deux ordres de grandeur par rapport à celui dû aux collisions coulombiennes de particules en mouvement cyclotronique. C'est ce phénomène qui aboutit au dimensionnement de machines aussi grosses qu'ITER (grand rayon 6,2 m, petit rayon 2 m) pour arriver au confinement nécessaire pour un réacteur. Heureusement expériences et simulations numériques ont mis en évidence des régimes de confinement amélioré liés à l'apparition de « barrières de transport » qui sont des zones où cette turbulence est absente, et où les gradients de température sont plus forts [*Images de la Physique 2003-2004*]. Le cisaillement du champ magnétique (gradient radial de q) et celui des écoulements auto-générés du plasma en sont l'origine, mais ces mécanismes sont encore l'objet de discussions, et les modèles prédictifs fiables sont absents. De fait, le dimensionnement d'ITER est très largement empirique. Simulations numériques et expériences révèlent l'existence au sein de la turbulence de structures intermittentes qui sont activement étudiées. Du centre au bord du plasma divers mécanismes physiques sont successivement dominants. La physique atomique devient très importante au voisinage de la paroi des trois configurations. La physique du plasma de bord justifie une conférence internationale biennale à elle seule.

Ondes dans les plasmas

Une très grande variété d'ondes électromagnétiques dispersives peuvent se propager dans les plasmas magnétisés. L'indice du plasma pour une telle onde peut varier dans de grandes proportions au cours de sa propagation, ce qui rend possible des phénomènes de résonance avec les particules, ou de réflexion comme le ferait un métal. Une onde qui se réfléchit peut voir une fraction importante de son énergie aller au-delà de la zone de réflexion par effet tunnel et se convertir en un autre type d'onde qui se propage dans le plasma. Ce changement d'onde peut permettre de faire passer le couplage de la puissance des ions vers les électrons. Des particules chargées voyageant en quasi-synchronie avec une onde d'un plasma ont un échange d'énergie important avec celle-ci, ce qui peut conduire à son amortissement ou à son instabilité (Landau 1946). Dans le cas du chauffage ou de la génération de courant par ondes, les puissances à coupler au plasma se comptent en mégawatts. La question des antennes est donc un sujet d'étude très actif. L'énergie des ondes se couple avec les particules en excitant leur mouvement cyclotronique. Le mouvement des particules parallèlement au champ magnétique crée un effet Doppler. Ceci fait que l'absorption de l'énergie de l'onde dépend de la vitesse des particules, ce qui réintroduit l'effet Landau mentionné plus haut. Cet effet peut aussi transférer de l'impulsion aux particules parallèlement au champ magnétique, ce qui crée

un courant. Le couplage des ondes électromagnétiques aux ions pourrait permettre de jouer sur la réactivité thermonucléaire du plasma et de rendre le critère de Lawson (qui fixe les conditions de temps de confinement, densité et température du plasma nécessaires pour réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée) moins contraignant.

De nombreux diagnostics actifs ou passifs s'appuient sur les ondes électromagnétiques susceptibles de se propager dans les plasmas. La détection des ondes émises spontanément par le plasma apporte des informations sur diverses de ses caractéristiques, et l'interprétation des résultats n'est pas sans rappeler la spectroscopie atomique des plasmas. La réflexion d'ondes électromagnétiques par le plasma apporte des informations tant sur les profils de densité, que sur la turbulence.

Lois d'échelle

Il faut beaucoup plus de nombres sans dimension pour décrire un plasma de fusion qu'un fluide neutre. Heureusement dans les tokamaks trois d'entre eux semblent avoir un impact dominant sur le confinement de la chaleur du plasma qui fixe le temps de confinement. Ceci a permis de comparer le confinement de tokamaks de taille différente dans des régimes de plasma identiques, et de valider certains éléments des lois d'échelle empiriques utilisées pour le dimensionnement d'ITER. On retrouve ici l'équivalent des expériences en soufflerie de l'aéronautique. Pour ITER l'un de ces trois paramètres prendra une valeur 2 à 3 fois plus grande que celle atteinte dans les machines actuelles : il

s'agit du rapport du rayon de la machine au rayon cyclotronique ionique. C'est l'une des raisons qui fait qu'ITER est une expérience de physique, et non seulement un gros projet technologique. Une autre inconnue physique d'ITER est que la chaleur sera apportée majoritairement au plasma par les réactions de fusion, et non par des chauffages extérieurs, ce qui va impliquer de nouvelles formes d'auto-organisation du système. Dans le cadre du programme fusion d'EURATOM, le tokamak JET (plasma de 150 m^3) situé en Angleterre a réussi son objectif de produire presque autant de puissance de fusion que son plasma n'en recevait de l'extérieur, mais sa taille ne lui permettra pas d'aller plus loin au vu des connaissances actuelles. De plus cette puissance n'a été produite que sur des temps de l'ordre de la seconde, alors qu'ITER le fera sur des durées semblables à celles des décharges longues de Tore Supra à Cadarache (environ 400 s).

Description théorique

La description théorique des plasmas de fusion magnétique, même quand elle se consacre à une configuration particulière, aboutit au développement de concepts et d'outils qui servent à toutes. Nous l'avons illustré en décrivant leur structure magnétique. L'ensemble plasma-machine est un système complexe dont l'auto-organisation résulte de sa dynamique non linéaire, dont sa turbulence. La description théorique de tels systèmes est donc ardue. Elle oblige à combiner analytiquement et numériquement une grande variété de modèles approximatifs qui vont de la MHD à la

Encadré 2

Matériaux pour la fusion thermonucléaire contrôlée

ITER peut être réalisé avec les matériaux actuels, mais des progrès sont souhaitables pour un futur réacteur électrogène quelle que soit sa configuration. Ceci motive des recherches approfondies sur les matériaux. Il faut mentionner tout spécialement les matériaux de structure faiblement activables et les matériaux face au plasma. Les recherches sur les matériaux faiblement activables visent à obtenir un matériau de structure du réacteur dont l'activité décroisse assez vite pour qu'il puisse être recyclé pour un usage grand public au bout d'environ cent ans. Les recherches portent tout particulièrement sur les aciers ferritiques ou martensitiques (surtout du fer allié avec les éléments Cr, Ti, W, V et Ta), les alliages de vanadium (surtout du vanadium allié avec les éléments Cr, Ti et Si), et les composites SiC/SiC où le carbure de silicium est utilisé à la fois pour les fibres et pour la matrice du composite. Un aspect important de leur sélection sera leur résilience au gonflement par l'hélium produit par le bombardement des noyaux par les neutrons de 14 MeV produits par les réactions de fusion. La mise au point de ces matériaux nécessitera leur irradiation par des flux élevés de neutrons de 14 MeV. Ceci exigera la construction d'un source d'irradiation importante (projet IFMIF). L'interaction du plasma avec la paroi érode celle-ci, et les produits de cette érosion deviennent des ions multichargés dans le

plasma. Ceux-ci ont deux impacts négatifs. D'une part ils ont un poids important dans la densité électronique du plasma, ce qui dilue les isotopes de l'hydrogène, et baisse la réactivité thermonucléaire (par exemple il faut moins de 10^{-4} de tungstène dans ITER). D'autre part la présence de ces ions induit un rayonnement de freinage qui crée un canal de perte énergétique supplémentaire vers l'extérieur. Pour éviter ces difficultés, on s'est peu à peu orienté vers des matériaux face au plasma de faible numéro atomique, le carbone tout spécialement. Cependant dans certaines zones de la paroi d'ITER l'érosion du carbone par le plasma serait trop importante et il faut y recourir au tungstène. De plus le carbone a une forte rétention des isotopes de l'hydrogène, ce qui pourrait produire des accumulations importantes de tritium dans la machine. Ce phénomène est d'autant plus important que l'érosion produit des poussières de carbone qui se déposent en divers endroits de la machine et augmentent sa capacité de rétention du tritium. C'est pourquoi des recherches sont faites actuellement pour revenir à des métaux (tungstène ou molybdène) face au plasma, en mitigeant l'interaction plasma-paroi par différentes techniques, dont la stimulation du rayonnement du bord du plasma par des gaz nobles.

description du plasma en termes de particules, dans des géométries réalistes ou fortement simplifiées.

Les modèles MHD sont souvent utilisés parce que commodes d'emploi, mais le caractère faiblement collisionnel des plasmas de fusion fait qu'il n'est pas possible de les justifier à partir d'une description cinétique comme on le fait pour l'équation de Navier-Stokes en mécanique des fluides. De fait ces modèles omettent des phénomènes de base de la physique des plasmas qui peuvent s'avérer fort importants. Nous en signalerons trois. Le premier est que le rayon de gyration cyclotronique (rayon de Larmor) fini d'une particule fait que les fluctuations d'une échelle spatiale inférieure ou égale à ce rayon sont moyennées, ce qui les rend inopérantes. Le second est l'effet Landau mentionné plus haut. Le troisième est un phénomène de miroir magnétique semblable à celui créant les ceintures de radiation dans le dipôle magnétique terrestre. En effet l'intensité du champ magnétique varie le long des lignes de champ dans les configurations toroïdales de confinement, comme dans ce dipôle. Ces remarques montrent que l'on ne peut pas oublier que le plasma est formé de particules en interaction. Cette situation confère une importance cruciale à la dynamique hamiltonienne. D'ailleurs les physiciens des plasmas ont apporté une contribution décisive à la compréhension du chaos de cette dynamique. Toutefois les modèles MHD permettent la description d'un nombre très important de phénomènes des plasmas de fusion, dont les états d'équilibre, les instabilités les plus dangereuses, et toute une famille d'ondes qui s'y propagent. Il y a un accord raisonnable entre domaine opérationnel et diagramme de stabilité MHD.

Les simulations numériques sont une source irremplaçable de savoir théorique sur la fusion, mais on est encore très loin de pouvoir simuler correctement l'ensemble de la physique de l'une des trois configurations : il faut actuellement 10 jours de calcul à 1 024 processeurs parallèles performants pour simuler un temps de confinement de l'énergie pour un certain type de turbulence du tokamak dans sa description cinétique. On est donc très loin d'une situation où une théorie idéale pourrait être faite qui n'attendrait plus que le savoir-faire expérimental pour être vérifiée ! Un

effort théorique ne se justifie que s'il a rapidement un impact sur les expériences. Il doit s'appuyer sur un fort savoir expérimental, ce qui motive un développement continu des capacités de mesure des plasmas de fusion, tout spécialement en matière de fluctuations et de MHD. Les caractéristiques extrêmes des plasmas de fusion font du développement de nouveaux diagnostics un problème compliqué qui justifie une conférence internationale biennale à lui seul.

Conclusion

Nous avons vu quelques aspects de la problématique de la physique du confinement magnétique. L'universalité de cette problématique est présente dans d'autres sujets que cet article concis ne permet pas d'aborder : l'évacuation de la chaleur et des cendres (helium), les diagnostics des plasmas chauds, etc... Là aussi, les grands progrès accomplis dans la compréhension et le savoir-faire sont des points d'appui pour les recherches en cours. Nous avons vu que le confinement magnétique n'est pas l'apanage du tokamak. Cette configuration magnétique est celle qui a été jusqu'ici la plus performante, ce qui a justifié son choix pour le projet ITER. En revanche des recherches sont poursuivies activement sur d'autres configurations de confinement, tout spécialement le stellarator et le reversed field pinch. Personne ne peut dire aujourd'hui quelle sera la configuration magnétique d'un réacteur commercial à fusion magnétique : elle pourrait même différer de celles répertoriées actuellement ! Le développement parallèle de plusieurs configurations de confinement produit des connaissances dont l'analyse comparative permet à la physique et à la technologie de la fusion magnétique de progresser globalement en direction du réacteur électrogène. Au cœur de ces connaissances, la physique des plasmas chauds magnétisés continue à s'édifier par confrontation des divers résultats théoriques et expérimentaux, et par fertilisation croisée avec des disciplines voisines. Cette physique est une science de la complexité dont beaucoup de concepts restent à construire.

Pour en savoir plus

Sur le tokamak et ITER :

ITER physics basis, Nuclear Fusion 39, 2137-2664 (1999)

WEISSE (J.), *La fusion nucléaire*, Presses Universitaires de France (2003), www.iter.org/

Sur le stellarator :

BOOZER (A.H.), What is a stellarator ?, *Physics of Plasmas* 5, 1647-1655 (1998),
<http://www.ornl.gov/sci/fed/stelnews/stelnews.html>

Sur le RFP :

<http://www.igi.pd.cnr.it/wwwexp/index.html>