

LRP 666/00

Juin 2000

Plasmas: des étoiles... au quotidien Fusion:... énergie du 21^{ème} siècle

A. Benz, H. Bruhns, P.E.M. Vandenplas,
J. Weisse, Ph. Magaud, G. Marbach,
Ch. Hollenstein, P.J. Paris & M. Q. Tran

Les articles devaient paraître dans la revue “Cahiers de l’électricité” en mars 2000. Celle-ci a malheureusement cessé de paraître cette année du millénaire. Le CRPP a repris la mission d’éditer les articles écrits par des membres de la communauté scientifique de la fusion. Cette publication arrive à point pour être diffusée lors de la conférence “Journée spéciale Fusion” du 20 juin 2000. Les éditeurs remercient chaleureusement Jean-Pierre Bommer, journaliste et rédacteur en chef des “Cahiers de l’électricité”, pour le travail de réécriture qu’il a effectué en ce début d’année.

La conférence “Fusion: énergie du 21^{ème} siècle” a été organisée par le CRPP avec l’aide du CRETE et de l’AISEN. Elle a reçu le soutien du groupe gii de la SIA et également le soutien de la FRE.

*LRP 666
CRPP, Juin 2000*

PLASMAS: DES ÉTOILES... AU QUOTIDIEN

FUSION:... ÉNERGIE DU 21 ÈME SIÈCLE

TABLE DES MATIÈRES

- 5- Avant-propos
Jean-Pierre Bommer, rédacteur (Lausanne, CH)
- 7- Les curieux comportements du plasma dans l'univers
Arnold Benz (ETHZ, Zuerich, CH)
- 13- Une fourgonnette pour approvisionner la Suisse
Hardo Bruhns (Commission européenne, Direction Recherche, Bruxelles, B)
- 17- La fusion; le point sur la recherche
Paul E.M. Vandenplas (Ecole Royale Militaire Belge, Bruxelles, B)
- 24- Journée ordinaire au centre de recherche de l'EPFL
Pierre Jean Paris et Minh Quang Tran (CRPP-EPFL, Lausanne, CH)
- 28- Eviter les déchets de longue durée
Minh Quang Tran (CRPP-EPFL, Lausanne, CH)
- 30- Principes et enjeux d'une centrale à fusion
J. Weisse, Ph. Magaud & G. Marbach (CEA-Cadarache, F)
- 40 - L'imperméabilité des anoraks
Christoph Hollenstein (CRPP-EPFL, Lausanne, CH)



Avant-propos

PARI SUR LA DURÉE

D'abord quelques chiffres pour situer l'enjeu. La Suisse consomme grosso modo 45 milliards de kilowatts-heures d'électricité par année. Ce qui correspond au contenu de 50 supertankers de pétrole, d'un train de charbon de 450 kilomètres, ou à celui de 700 tonnes d'uranium brûlé dans une centrale à fission. Il suffirait en revanche d'injecter moins d'une tonne de combustible dans des réacteurs de fusion pour produire cette même quantité d'énergie.

Or le combustible nécessaire à la fusion est formé des deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, que l'on trouve en abondance dans la nature. S'il est un domaine où l'on peut parler en toute légitimité de développement durable, c'est donc bien celui de la fusion thermonucléaire avec, à la clé, quelques atouts considérables: une sécurité d'exploitation pratiquement intrinsèque, et sans production de déchets radioactifs à vie longue.

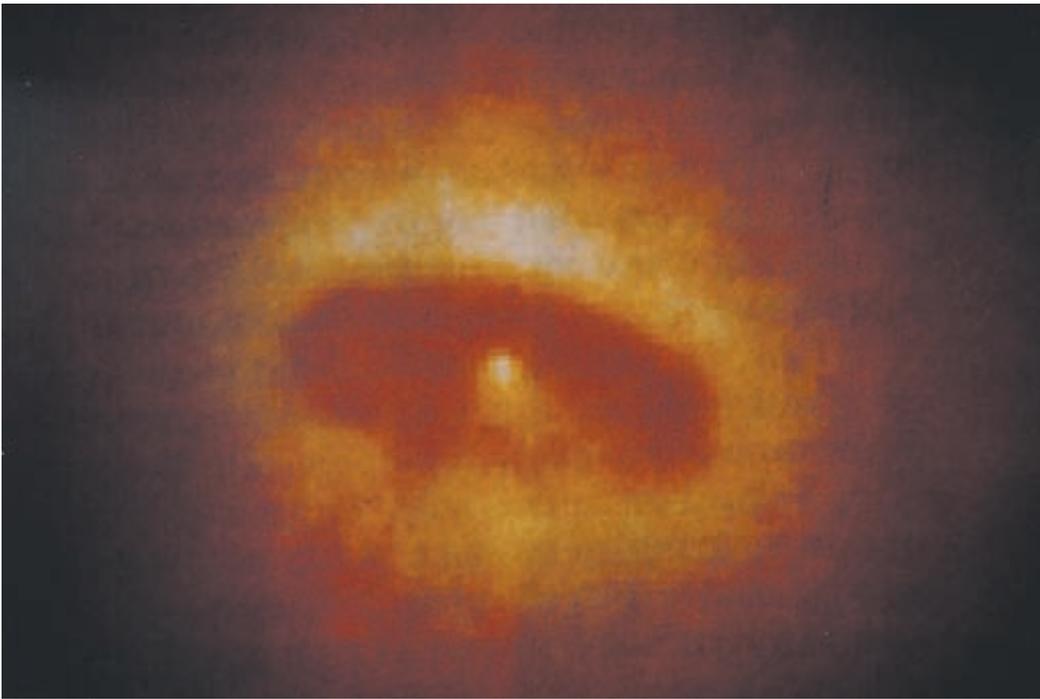
Pourquoi, dès lors, la recherche est-elle, dans ce domaine, si lente et coûteuse? Parce qu'il s'agit de faire "fusionner" des noyaux atomiques à charges positives qui, naturellement, se repoussent les uns les autres. Pour vaincre cette répulsion, il faut produire un plasma au cœur du réacteur et le chauffer à plusieurs centaines de millions de degrés, le temps de lancer les réactions de fusion.

Quelles sont les chances de succès de la recherche? Telle est la question à laquelle les auteurs donnent des éléments de réponse. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux plasmas, cet état de la matière peu connue du grand public, qui constitue néanmoins la quasi totalité de l'univers.

La Suisse joue un rôle en vue dans le domaine de la fusion. C'est ainsi que l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne abrite une machine expérimentale unique au monde: le tokamak à configuration variable. Les travaux qui s'y déroulent auront une importance décisive pour la suite du programme de recherche articulé autour du projet ITER. Cette machine internationale permettra d'effectuer plusieurs démonstrations décisives avant la construction d'un réacteur de démonstration avec production d'électricité.

Le pari est ambitieux. Il suppose la mise en œuvre de forces et de moyens considérables qui passent par un effort collectif des pays industriels les plus avancés. Se lancer dans un tel projet, c'est faire acte de foi dans l'intelligence humaine, c'est affirmer sa confiance dans le progrès scientifique et technique, c'est aussi préparer la relève énergétique des combustibles fossiles, dès le milieu de ce siècle, avant leur épuisement ou le déclenchement de phénomènes climatiques irréversibles.

Jean-Pierre Bommer



Centre de la Galaxie NGC 4261



Nebuleuse Rosette dans Monoceros

Pourquoi la couronne du Soleil est-elle si chaude?

LES CURIEUX COMPORTEMENTS DU PLASMA DANS L'UNIVERS

Arnold Benz, professeur d'astrophysique
à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich

Que s'est-il réellement passé après le big bang? Pour trouver des réponses à d'importantes questions en suspens, des scientifiques vont observer attentivement les activités solaires au cours des deux prochaines années. Et pour cause! La physique des plasmas est loin d'avoir livré tous ses secrets.

La majeure partie de l'univers visible existe sous forme de plasma. Cette affirmation ne vaut pas seulement pour le cœur surchauffé ou l'atmosphère des étoiles. Même dans les nuages interstellaires les plus froids, des particules élémentaires cosmiques arrachent des électrons aux noyaux atomiques, ce qui entraîne une ionisation du gaz.

Cette légère modification de son état suffit pour assujettir un gaz à la physique des plasmas. Dans l'univers, le plasma est la règle. Et les corps solides, comme la Terre, les atmosphères des planètes ou les étoiles à neutrons, constituent l'exception.

L'univers naissant, dès la première seconde qui suivit le big bang, était un plasma très chaud, totalement ionisé. Il se refroidit au cours de l'expansion cosmique générale. Lorsque les électrons et les protons se combinèrent en atomes d'hydrogène, après environ 300 000 ans, l'univers se transforma en un gaz neutre et abandonna provisoirement son état de plasma.

TROUS NOIRS

Cette phase de non-plasma a permis la formation de galaxies à partir du gaz cosmique. Il est probable que les noyaux galactiques se constituèrent selon le même principe. Les petites perturbations dans la densité des gaz provoquèrent par effondrement gravitationnel la formation de gigantesques trous noirs alternant avec les milliards de masses stellaires, conduisant ainsi à la formation de la plupart des galaxies.

Pourquoi les immenses nuages gazeux dans l'espace intersidéral ne se désintègrent-ils plus en de grands trous noirs, et forment plutôt d'innombrables petites étoiles à l'image de notre Soleil? Aujourd'hui encore, ces nuages abritent des millions de masses solaires. Ces masses gazeuses constituent un matériau interstellaire caractérisé par une densité élevée et par des températures relativement basses. La densité des gaz est à peu près équivalente aux valeurs des meilleurs vacuums des laboratoires terrestres.

Les nuages de gaz doivent leur aspect sombre aux infimes particules de poussière qu'ils contiennent et qui, bien qu'espacées les unes des autres d'un kilomètre environ, parviennent néanmoins à absorber la lumière. Le fait que ces particules ne s'effondrent pas totalement par effet gravitationnel s'explique par le comportement du plasma. Les champs magnétiques sont "gelés" dans le plasma. Autrement dit, la matière ne peut se mouvoir à travers le champ magnétique sans l'emporter.

AVANT LES ÉTOILES

Le plasma se comporte comme un fil de caoutchouc qui retient tout mouvement, y compris les contractions. La force magnétique ne neutralise toutefois pas complètement les effets d'une gravitation omniprésente dans les nuages. Ainsi, au lieu d'un effondrement en chute libre, on assiste à une lente diffusion.

Un point essentiel du phénomène réside dans le fait qu'il existe plusieurs centres où se déroulent des concentrations de matière. Ce sont des endroits qui présentent des densités initiales élevées et des champs magnétiques réduits. Ainsi, l'évolution des masses nuageuses se décentralise avec la formation de noyaux dont la masse est suffisante pour former des étoiles, mais pas assez dense pour "collapser" en trous noirs.

Les noyaux des nuages interstellaires ont des diamètres de l'ordre d'une année-lumière. En l'état, ce ne sont pas encore des étoiles. Mais la densité du gaz - et par conséquent la gravitation - y est plus élevée que dans la masse gazeuse environnante. Etant donné que les nuages ne sont pas transparents pour le rayonnement visible, les noyaux ne peuvent être observés que dans le spectre infrarouge. La condensation se développe jusqu'à ce que la gravitation finisse par prédominer. C'est alors que le noyau s'effondre.



Les masses de gaz transparentes et sombres dans la nébuleuse de la Lagune, située à 4300 années lumières, sont des plasmas avec des températures respectives de 10 000°C à -260°C

PIROUETTE

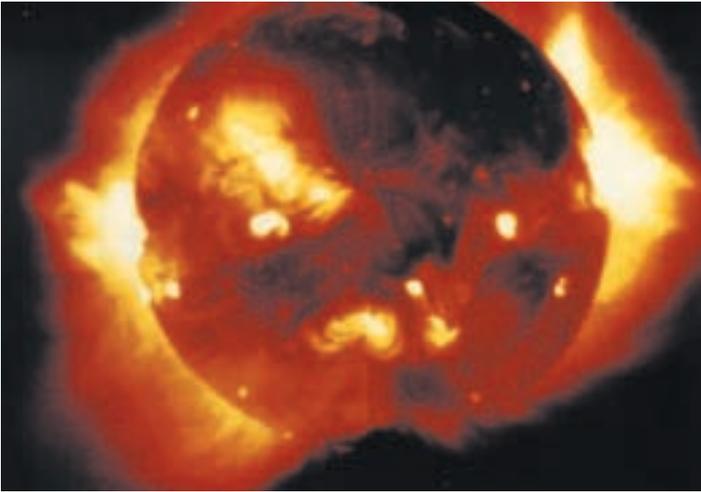
Au cours du processus de chute libre, le moment cinétique reste constant. Si le noyau possède déjà un léger mouvement de rotation (et c'est toujours le cas), l'effondrement gravitationnel provoque une accélération de la rotation de la masse gazeuse à l'image d'une patineuse qui accélère sa pirouette en attirant les bras vers le corps.

La rotation devient en fin de compte suffisamment rapide pour que la force centrifuge égale la force de gravitation. Le processus d'effondrement débouche sur la formation d'un disque dont le gaz pivote autour d'un centre, comme les planètes autour du Soleil. Ces "disques d'accrétion" englobent des espaces dix à vingt fois plus vastes que notre système solaire. Ils apparaissent sous forme de surfaces sombres se détachant sur un fond clair. En revanche, ils émettent dans l'infrarouge et le domaine millimétrique.

Normalement, la rotation d'un disque d'accrétion se déroule en état d'équilibre. Autrement dit, elle devrait se poursuivre indéfiniment, à l'image d'une planète lancée sur son orbite. Mais aucune étoile ne pourrait se former en son centre si le disque n'était pas freiné. Une cause possible de ce processus de freinage réside dans le gel du champ magnétique, le disque étant faiblement ionisé par les particules cosmiques.

TURBULENCES

En mouvement de rotation, un champ magnétique émet des ondes spirales et transmet du moment cinétique à l'espace interstellaire voisin. Ce faisant, les ondes arrachent des masses de plasma hors du disque d'accrétion. Le gaz est éjecté perpendiculairement à la direction de la rotation à une vitesse de l'ordre de cent kilomètres par seconde. Ce processus contribue également au freinage du mouvement du disque. Ces jets gazeux sont caractéristiques d'un disque qui se développe rapidement. Ce dernier se contracte progressivement en une proto-étoile qui accroît sa masse. Il n'existerait pas d'étoile sans les propriétés de plasma du disque d'accrétion.



A la lumière des rayons X, le plasma de la couronne solaire présente des structures allongées formées par des champs magnétiques

A leur surface, les proto-étoiles présentent des températures de l'ordre de dix mille degrés. Ce sont de gigantesques sphères gazeuses, près de dix fois plus volumineuses que notre Soleil. Dans un premier temps, elles sont totalement voilées par les gaz environnants. Leur structure change à partir du moment où la densité critique et la température dans le cœur sont suffisamment élevées pour provoquer une fusion du deutérium - puis de l'hydrogène - en hélium.

Ce phénomène de fusion transforme la proto-étoile en jeune étoile. La chaleur produite au cours de ce processus est diffusée vers l'extérieur par des mouvements turbulents du plasma. Ces mouvements entraînent également, tout en les renforçant, les champs magnétiques présents qui s'étendent alors bien au-delà de la surface de l'étoile.

ENVELOPPE SURCHAUFFÉE

Ces champs magnétiques sont liés à un phénomène stellaire observé sur notre Soleil, mais qui reste inexpliqué à ce jour: la couronne. Il s'agit d'un plasma très mince dont la température atteint plusieurs millions de degrés. C'est l'atmosphère solaire que l'on peut observer lors d'éclipses totales. Dans une proto-étoile, la pression est telle qu'elle produit une espèce de vent stellaire constant qui souffle dans l'espace, éjectant les restes de gaz et de particules de poussières du nuage stellaire originel. La nouvelle étoile devient alors pleinement détectable dans le visible.

Le chauffage de la couronne est un sujet de recherche passionnant en astrophysique. A la surface, la température des étoiles s'étend de quelques milliers à près de dix mille degrés Celsius. Comment une couche plus éloignée peut-elle être alors presque aussi chaude que le cœur de l'étoile?

La densité de la couronne est beaucoup trop faible pour entretenir des réactions de fusion. Sur le Soleil, un accroissement du chauffage de la couronne est constaté au-dessus des taches solaires, où les champs magnétiques sont particulièrement élevés. On estime ainsi que le chauffage de la couronne, d'une puissance de l'ordre du million de milliards de mégawatts (10^{15}), doit être lié aux champs magnétiques et aux courants électriques qui en résultent.

ECHANGES

Des mesures réalisées au moyen du satellite européen SOHO ont révélé qu'une partie du processus de chauffage au moins ne se déroule pas de manière constante. L'énergie est libérée de manière impulsive en l'espace de quelques minutes. Le plasma surchauffé transmet alors des millions de degrés de chaleur à la matière située plus bas. Celle-ci s'évapore, s'élève et injecte un nouveau plasma dans la couronne. Un processus contraire se déroule simultanément: le plasma de la couronne se refroidit et retombe dans les couches inférieures.

Il est vraisemblable que la couche extérieure de l'atmosphère solaire est réchauffée par des phénomènes électromagnétiques. De tels phénomènes supposent la présence de courants électriques dans la couronne. Ces courants ne sont pas encore mesurables, mais leur existence a été établie à sa surface du Soleil - la protosphère. L'intensité du courant dans une tache solaire atteint quelques millièmes d'ampère par mètre carré, ce qui se traduit par des milliards d'ampères pour l'ensemble d'une tache.

Une importante question reste en suspens: comment l'énergie électromagnétique est-elle libérée lors du chauffage de la couronne? Depuis longtemps nous savons que les éruptions sont accompagnées d'émissions de gigantesques quantités d'électricité au dessus des taches solaires. Des masses d'énergie de l'ordre du milliard de milliards de kilowatts-heures (10^{18}) sont injectées en l'espace de quelques minutes dans le plasma de la couronne.

CYCLIQUE

Là où se libère l'énergie, la température monte au-delà de 100 millions de degrés. Certaines particules dans le plasma atteignent des vitesses proches de celle de la lumière. La physique ne parvient toujours pas à expliquer les causes de cette transformation d'un courant électrique en accélération. Il s'agit sans aucun doute d'un phénomène lié à la physique des plasmas, dans lequel les caractéristiques globales d'un circuit électrique plus grand que la Terre pourraient jouer un rôle, tout comme la microphysique d'ondes à hautes fréquences qui modifient localement les qualités du plasma.

Une forte activité cyclique du Soleil est prévue pour 2001, avec un nombre élevé de taches et de multiples éruptions géantes. Au mois de juillet prochain sera lancé le satellite de la NASA "High Energy Solar Spectrometric Imager" (HESSI), avec une participation suisse importante assurée par l'Institut Paul Scherrer et l'EPFZ.

Ce satellite aura pour mission d'observer les rayons X et gamma de particules à haute énergie issues des éruptions. Un télescope fournira pour la première fois des images de ce domaine du spectre de rayonnement. Il permettra aussi de constater à quel endroit les particules subissent une accélération.

ACCÉLÉRATIONS

Il est en fait possible que les mêmes phénomènes qui se déroulent en relation avec les taches lors des éruptions solaires contribuent, quoique dans une moindre mesure, au réchauffement de la corona dans les régions plus tranquilles de la surface du Soleil. Les grandes éruptions offrent de meilleures possibilités d'observation. Les électrons sont accélérés jusqu'à des énergies de l'ordre de 100 MeV, les protons jusqu'à plus de 10 GeV.

Outre les rayonnements à haute énergie, il est possible de mesurer les signaux optiques et les ondes radio. La Suisse dispose à cet effet du grand radio-spectromètre de l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich, à Gränichen (AG), et du télescope optique de Locarno (IRSOL). Une meilleure connaissance des éruptions solaires devrait nous permettre d'en apprendre davantage sur les causes du réchauffement de la couronne et sur l'origine des vents solaires.

On sait aujourd'hui déjà que les courants électriques présents dans la couronne se forment à la suite de l'émergence de nouveaux champs magnétiques à partir de l'intérieur du Soleil. Une couche électrique se forme entre les anciens et les nouveaux champs magnétiques. Une compression de cette couche provoque une augmentation de la densité du courant, jusqu'à ce qu'elle atteigne le seuil de l'instabilité.

INCONNUES

Au cours de ce processus, certaines ondes dans le plasma se renforcent et croissent de manière exponentielle. Cette croissance peut être suffisante pour modifier les caractéristiques du plasma. Le cas échéant, la résistance électrique peut être amenée à croître, entraînant une hausse considérable de la puissance calorifique du courant.

On ignore toutefois comment et où apparaît cette instabilité. On voudrait notamment savoir comment les particules sont accélérées. Les processus physiques essentiels qui sont à l'origine de ces phénomènes ne sont toujours pas connus, à plus forte raison dans leurs détails. Il faudra du temps avant qu'ils puissent être reproduits dans les laboratoires.

Le volume des éjections de masse coronaire est supérieur à celui des éruptions. Ces éjections sont liées au champ magnétique de la couronne, qui se renforce constamment sous l'effet de l'apport de substances en provenance des couches inférieures. Lorsqu'elle est magnétiquement "surchargée", la couronne se déleste d'une partie d'elle-même qui dérive alors dans l'espace.

MENACE

Ce processus s'accompagne souvent d'une grande éruption et d'une accélération de particules. Ces dernières parviennent à une vitesse proche de celle de la lumière à proximité de la Terre, où elles bombardent des satellites en dehors de la magnétosphère protectrice avec une charge de rayonnement accrue qui peut mettre en danger des astronautes sortis de leur navette.

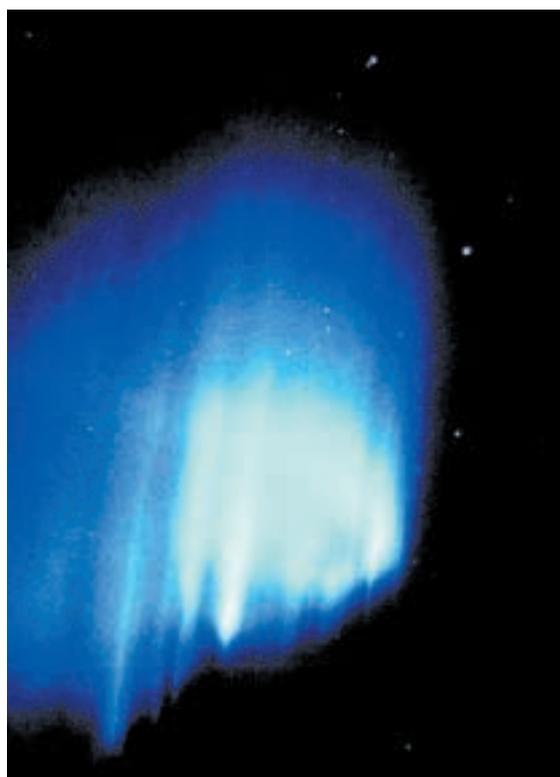
Le matériel coronaire issu des éjections de masse est également précipité dans l'espace interplanétaire. Il progresse à une vitesse de l'ordre de mille kilomètres par seconde à travers le plasma du vent solaire. La collision de ce nuage de plasma avec le champ magnétique terrestre suscite des effets parfaitement mesurables. Elle peut notamment provoquer des pointes de tension, voire des dommages dans les réseaux électriques.

Des phénomènes de plasma comparables aux éruptions solaires se déroulent dans la queue du champ magnétique terrestre du côté opposé au Soleil. Les courants électriques y sont renforcés, deviennent instables et produisent également des accélérations de particules qui pénètrent l'atmosphère terrestre en suivant le champ magnétique.

AUORES POLAIRES

Ces particules produisent des aurores polaires en se heurtant aux atomes et aux molécules de l'atmosphère terrestre. Au cours des prochaines années, lorsque l'activité solaire sera particulièrement élevée, les aurores redoubleront d'intensité et pourront être visibles jusque sous nos latitudes. Elles sont en fait le résultat d'une longue chaîne de phénomènes de physique des plasmas qui s'étalent entre l'intérieur du Soleil et la Terre.

Ces phénomènes relatifs au plasma dans l'univers jouent un rôle déterminant dans l'évolution qui a conduit à notre existence. Parce qu'elles mettent en jeu



Aurore Boréale

des ondes à haute fréquence, des champs magnétiques et des particules énergétiques, ces manifestations complexes restent pour le moment incompréhensibles. L'astrophysique des plasmas est un domaine difficile, qui offre toutefois de passionnantes perspectives de recherche.

Certaines caractéristiques du plasma sont mesurables. Des concepts théoriques peuvent faire l'objet d'expériences dans le proche et le lointain espaces. Ces données pourront être complétées par les résultats des travaux de laboratoire sur les plasmas et sur la fusion. Ce sont en grande partie les mêmes ondes et particules qui déterminent les événements dans l'univers et dans les laboratoires. C'est dire tout l'intérêt que présente la collaboration entre l'astrophysique et les recherches sur la fusion.

La formidable densité de l'énergie de fusion

UNE FOURGONNETTE POUR APPROVISIONNER LA SUISSE (1)

Professeur **Hardo Bruhns**,
direction générale de la recherche, Commission européenne

Le Soleil est le réacteur le plus stable que l'on puisse imaginer. Sans état d'âme, il produit et rayonne son énergie depuis des milliards d'années. L'homme est aujourd'hui prêt à reproduire ce phénomène en laboratoire. C'est la promesse de formidables quantités d'énergie tirée d'un combustible omniprésent dans la nature.

Faute de l'apport constant de chaleur solaire, la Terre serait un désert de glace. C'est la fusion de l'hydrogène en hélium qui entretient, dans le Soleil, ce gigantesque flux de puissance. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent. Imaginez la masse du Cervin au dessus de Zermatt brûler en hélium en 60 secondes.

Le Soleil rayonne depuis plusieurs milliards d'années. Les astrophysiciens nous assurent qu'il s'en écoulera encore des milliards avant que l'astre du jour ait épuisé son combustible primaire, c'est-à-dire l'hydrogène. Un demi pour cent de cette masse d'hydrogène est converti en énergie de rayonnement, puis diffusée dans l'espace. Moins d'un milliardième de cette énergie accède à la surface de la Terre. Cette part infime qui nous revient représente pourtant près de 36 millions de gigawatts de rayonnement électromagnétique. A proximité de l'équateur, cette puissance atteint au zénith 1 kilowatt au mètre carré. Bien que la rotation terrestre répartisse le flux solaire sur toute la circonférence du globe, il se crée un cycle diurne et nocturne. Aux latitudes de l'Europe, la densité moyenne de l'énergie est de 100 à 150 watts par mètre carré, ce qui, en tenant compte du rendement de la conversion photovoltaïque, permet de produire quelques dizaines de watts par mètre carré.

LA FUSION SUR TERRE

Il est impossible de reproduire sur terre les mécanismes exacts mis en œuvre dans le Soleil, du fait, notamment, de la force gravitationnelle de cette étoile qui a une masse 330 000 fois supérieure à celle de la Terre. Mais l'homme peut reproduire le phénomène de fusion en utilisant pour combustible les isotopes lourds de l'hydrogène (le deutérium et le tritium) pour développer une option d'approvisionnement énergétique futur de notre planète, notamment pour générer de l'électricité. Les océans, les lacs et les rivières sont une source pratiquement inépuisable de deutérium. L'autre composant du combustible, le tritium, isotope le plus lourd de l'hydrogène, peut être produit



Le Deutérium, contenu dans l'eau, de quoi alimenter des milliers de centrales électriques pendant des millions d'années

1 Cet article représente l'opinion de son auteur. Ni la Commission Européenne ni aucune personne agissant au nom de la Commission n'est responsable de conséquences suite à l'utilisation d'informations contenues dans cet article.

à partir du lithium, également omniprésent dans l'écorce terrestre et dans l'eau de mer. Les recherches sur l'énergie de fusion ont fait des progrès considérables au cours des dernières décennies. Aujourd'hui on prépare le grand pas pour la démonstration de la faisabilité scientifique et technique de cette source d'énergie.

UNE ALTERNATIVE

La combustion de 1000 tonnes des isotopes d'hydrogène permettrait de couvrir les besoins annuels en énergie de toute l'humanité. La production électrique annuelle de la Suisse pourrait être assurée avec le chargement d'un seul camion des combustibles primaires à fusion, lithium et deutérium, disponibles amplement dans les lacs et dans les roches du pays.

Mais la production d'énergie à partir de la fusion va-t-elle fonctionner dans un réacteur? Depuis quelques décades, les scientifiques apprennent à maîtriser la fusion thermonucléaire dans leurs laboratoires. En 1991, une première production de puissance obtenue par la fusion a été réalisée dans le Joint European Torus (JET), à Culham, près d'Oxford.

Plus récemment, pendant quelques secondes, seize mégawatts de puissance y ont été générés dans ce réacteur expérimental, ce qui équivaut à peu près à la puissance nécessaire pour chauffer le plasma à plusieurs centaines de millions de degrés. Une installation plus performante est toutefois nécessaire pour faire la démonstration scientifique que la fusion peut devenir une source pratique d'énergie.

Les besoins futurs en énergie justifient-ils le formidable effort de développement que nécessitera la mise au point de cette forme de production? La réponse doit être positive si on regarde une échelle de temps plus étendue que quelques décennies, la croissance des besoins d'énergie, l'accumulation des gaz à effet de serre, et la nécessité d'une disponibilité des diverses sources d'énergie indépendantes qui n'imposent pas de risques climatiques ou environnementaux.

CONFINEMENT MAGNÉTIQUE²

En théorie, il est possible de réaliser une réaction de fusion avec la plupart des éléments chimiques légers. Il suffit que les deux particules possèdent suffisamment d'énergie pour surmonter la répulsion électrostatique qui entrave leur fusion en un élément nouveau. La réaction de fusion nucléaire la plus facile est celle de deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, qui se fondent en hélium en émettant un neutron.

Sur terre, le combustible issu de ces isotopes d'hydrogène doit posséder une énergie thermique moyenne de plusieurs centaines de millions de degrés Celsius. (C'est dix fois plus qu'il n'en faut dans le cœur du Soleil, où la gravitation et la densité ambiantes aident à transformer en hélium l'isotope le plus léger de l'hydrogène.) Problème: des gaz aussi chauds et ionisés, appelés "plasma" ne sauraient être mis au contact de parois. La solution réside dans l'utilisation de champs magnétiques assez puissants pour isoler et contenir le plasma chaud éloigné des parois. On parle à cet égard de confinement magnétique¹.



Le plus grand tokamak au monde: JET

² Il existe aussi la possibilité de produire une fusion en faisant exploser de petites capsules remplies de combustible de haute densité, lequel est comprimé et chauffé par des rayons extrêmement forts, de type laser ou de particules. Cette approche est appelée fusion à confinement inertiel, étant donné que le combustible n'est confiné que pendant quelques milliardièmes de seconde, durée au cours de laquelle son inertie résiste à l'expansion thermique.

D'après les études actuelles, une centrale de fusion devrait avoir une puissance d'ordre de 1000 mégawatts électriques. L'utilisation d'un champ magnétique dont les lignes se ferment sur elles mêmes, nécessite la conception d'un réacteur en forme de tore, à l'image d'un beignet avec un trou central.

1,5 MÈTRES POUR 150 MILLIONS DE DEGRÉS

En fait, le tore est un conteneur où règne le vide, et dans lequel le combustible à fusion ne représente qu'un millionième de la densité atmosphérique. Le cœur du réacteur renferme un volume suffisant pour que le combustible, en "brûlant", produise la puissance voulue. On estime qu'un rayon intérieur de 2.5 mètres et un grand rayon d'environ 8 mètres sont suffisants pour produire un gigawatt de puissance. Le volume de plasma dans un réacteur de fusion est alors de l'ordre de 1000 mètres cube. Dans les prototypes actuels les plus avancés qui permettent déjà d'étudier les régimes de la fusion le volume de plasma est de 10 à 100 mètres cubes.

L'optimisation obtenue du pouvoir d'isolation des champs magnétiques est tout simplement stupéfiante. On parvient à maintenir une chute de température de plus d'un million de degrés par centimètre. Autrement dit, un espace d'un mètre et demi suffit pour isoler thermiquement un plasma à 150 millions de degrés des parois à température proche de l'ambiante.

Élément clé du combustible de fusion, le tritium n'existe pratiquement pas à l'état naturel à cause de sa demi-vie très courte (12 ans). Il faut donc le fabriquer à partir du lithium dans le réacteur en utilisant les réactions entre les neutrons émis et le lithium, dans une enveloppe entourant la chambre de combustion. Cette solution présente un avantage important: seul élément radioactif du combustible, le tritium est simultanément produit et consommé dans le réacteur.



Plasma à l'intérieur de JET, forte illumination du diverteur où les particules de la périphérie du plasma sont collectées

ASPECTS INTRINSÈQUES DE SÉCURITÉ

Le deutérium et le lithium, éléments du combustibles non radioactifs, pourront être transportés sans problème jusqu'à la centrale, alors que le hélium, gaz noble non radioactif, est le seul résidu gazeux du cycle de combustion. Autre avantage, les quantités en jeu sont extrêmement petites: deux à trois tonnes de combustible suffisent pour une année de production d'une grande centrale, de l'ordre du gigawatt. Ces chiffres sont à comparer aux 100 tonnes d'uranium enrichi dans les centrales à fission ou aux 2,5 millions de tonnes de charbon nécessaires pour produire une quantité équivalente d'énergie électrique.

Comparée à la fission nucléaire, la fusion contrôlée est un processus beaucoup plus complexe mais selon un principe très simple. Une centrale à fusion est un brûleur. Seule la quantité du combustible suffisante pour les prochaines dizaines de secondes est injectée. Ce qui signifie qu'en cas de dysfonctionnement, la réaction s'interrompt pratiquement immédiatement.

S'il entre en contact avec les parois du réacteur, il suffit alors de vaporiser d'infimes quantités de matière pour refroidir instantanément le plasma et stopper le processus de fusion. Celui-ci s'interrompt aussi automatiquement à la moindre fuite dans la chambre de combustion sous l'effet de la pénétration d'air. Par ailleurs, l'éventualité d'un "melt-down" du noyau de la centrale est quasi nulle et les énergies internes ne seraient pas en mesure de détruire la première barrière de confinement.

D'après les études approfondies des aspects de sécurité et de protection de l'environnement il devrait être possible d'exploiter une centrale à fusion sans risque d'émissions radioactives d'un niveau dommageable pour la nature et les êtres vivants. Aussi, les quantités de tritium qui peuvent être libérées en cas d'accident sont assez faibles pour ne pas devoir envisager l'évacuation des populations voisines. Enfin, sauf le tritium, la centrale à fusion n'a pas besoin d'aucun élément radioactif et surtout pas des actinides d'une activité élevée et de longue durée (et même s'ils seraient introduits, leur présence serait aisément détectable).

QUESTION DE MATÉRIAUX

Un réacteur de fusion ne renferme en son cœur que quelques grammes de gaz – c'est à dire de plasma – pendant la combustion. Les centrales à fusion sont donc par essence fondamentalement sûres. En outre, le plasma de la fusion même ne produit pas de cendre radioactive.

Pendant la réaction, les neutrons frappent les parois de la chambre de combustion et pénètrent dans le manteau de lithium qui tapisse cet espace pour générer du tritium. Ce processus entraîne aussi une activation de la paroi et à la longue une accumulation de résidus radioactifs.

La quantité de ces matériaux activés n'est pas inférieure à celle produite par la fission, mais une différence est toutefois manifeste sur le plan qualitatif. C'est ainsi qu'une centrale à fusion ne produit pratiquement pas de déchets radioactifs gazeux, qui peuvent présenter des risques pour le grand public en cas d'accident ou de retraitement. Les résidus radioactifs dépendront dans une large mesure des matériaux utilisés pour le cœur du réacteur. L'utilisation d'un acier normal exigerait de très longues périodes de décroissance de la radioactivité, due aux composants d'alliage et aux impuretés. Une importante activité de recherche et de développement est donc consacrée à la mise au point d'aciers à basse activation, ainsi qu'une exploration du titane ou les alliages à base de chrome. On fait aussi des études sur des céramiques et des matériaux renforcés de fibres. On peut envisager une radiotoxicité qui atteint après une durée de l'ordre de cent ans des niveaux très bas, bien au dessous de celle des cendres d'une centrale à charbon facilitant le problème de recyclage ou stockage des déchets.

L'AVENIR

En matière de fusion, la recherche et le développement portent sur plusieurs disciplines: physique des plasmas à haute température, des ondes électromagnétiques, des surfaces et des états solides. Des émetteurs RF (radio fréquence) de plusieurs mégawatts de puissance et des systèmes de chauffage avec des accélérateurs sont nécessaires pour porter le plasma à température de combustion. Il faudra définir des méthodes de diagnostic très pointues pour étudier le comportement du plasma.

Le confinement du combustible nécessite des enroulements magnétiques puissants et supraconducteurs. La réussite des projets suppose la mise au point de matériaux à grande résistance et à faible activation. La complexité des disciplines et des technologies nécessaires pour le développement de centrales à énergie par fusion requiert en outre des connaissances de pointe en matière de science et de technique.

Le développement de la fusion est une entreprise à long terme, à grande échelle, et, par conséquence, coûteuse. On entre aujourd'hui dans une phase expérimentale qui devra déboucher sur la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie par fusion. La construction d'un appareil capable de cette démonstration requiert une durée de l'ordre de dix années; l'exploitation et l'optimisation demandent autres dix à quinze années. Ensuite, il reste à tester l'intégration dans un système d'une centrale d'électricité ce qui pourrait prendre environ le même temps. Donc, la fusion pourrait être disponible comme option énergétique vers le milieu de cet siècle. C'est en raison du succès de la recherche sur la fusion et de l'importance de la question d'énergie sûre et acceptable, du point de vue d'environnement et climat, que l'Europe et les grandes nations du monde poursuivent le développement de l'option de l'énergie par fusion.

Le long chemin vers ITER

LA FUSION, LE POINT SUR LA RECHERCHE

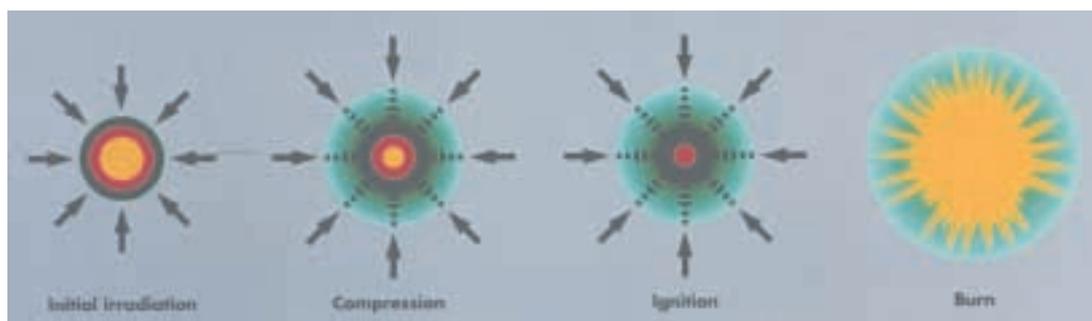
Professeur Emeritus **Paul Vandenplas**, l'Ecole royale militaire de Bruxelles
Directeur de l'Association «Euratom-Etat belge» pour la fusion contrôlée

Dans les chapitres précédents, nous avons vu que pour réaliser la fusion de deux noyaux légers, il convient de leur donner une énergie suffisante pour vaincre la forte répulsion électrique et les amener suffisamment proches pour que la force nucléaire à très courte portée puisse l'emporter et ainsi les "fusionner" avec un dégagement considérable d'énergie. Dans un réacteur à fusion, il faudra donc opérer un grand nombre de telles réactions par unité de temps pour dégager la puissance désirée. En d'autres termes, il faut réaliser un puissant soleil en miniature. Le gaz ionisé, c'est-à-dire le plasma, doit donc être suffisamment chaud (100 à 200 millions de degrés soit dix fois la température au centre du soleil), dense et être adéquatement confiné dans un volume déterminé.

CONFINEMENT INERTIEL

Deux méthodes existent pour ce faire: le *confinement inertiel* et le *confinement magnétique*.

Dans le premier cas, les réactions ont lieu pendant le très court intervalle de temps (quelques milliardièmes de seconde) pendant lequel un minuscule granule de combustible (d'un diamètre de l'ordre du dixième de mm) de deutérium-tritium, irradié de façon homogène par de puissants faisceaux de lasers ou d'ions ou d'électrons, est fortement comprimé et chauffé. Il s'agit donc d'une explosion contrôlée pendant le très court intervalle de temps où la matière est confinée par sa propre *inertie* avant que le plasma ne se dilate et que les réactions de fusion ne s'arrêtent donc. La chaîne d'événements est schématisée ci-dessous.



Séquences successives de la fusion inertielle

Jusqu'ici les expériences en confinement inertiel ont été exécutées à énergie relativement basse pour des études fondamentales ou à haute énergie mais à basse efficacité dans - excepté au Japon - des laboratoires de défense. La récente interdiction d'essais de bombes nucléaires a conduit les USA et la France à entamer la construction d'une grande installation de défense (National Ignition Facility à Livermore avec une énergie laser de 1,8 million de Joules et à Bordeaux avec une énergie d'un million de Joules). Le but est d'allumer un microgranule de D-T pour engendrer une petite explosion de 10 à 20 millions de Joules pour mieux calibrer les codes des bombes à hydrogène. Ceci avec un très bas rendement d'ensemble et à très basse répétition (environ 1 petite explosion par jour). Sans parler des problèmes d'ingénierie liés à l'enceinte et à la couverture destinée à recueillir l'énergie, un beaucoup plus haut rendement et une beaucoup plus haute

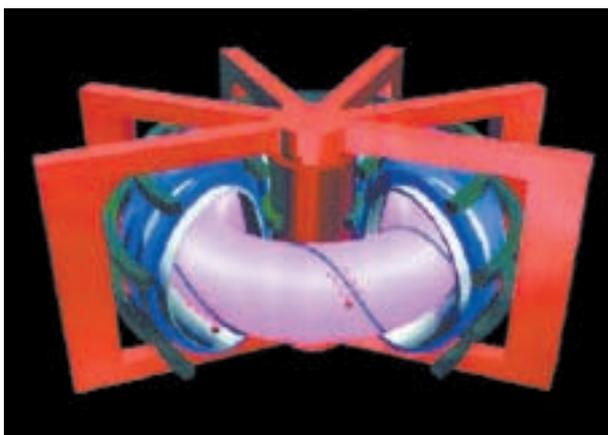
fréquence de répétition (~ 10 explosions par seconde) seraient nécessaires pour un réacteur. Le chemin vers un éventuel réacteur basé sur la fusion inertielle est donc beaucoup plus long que celui conduisant à la fusion magnétique. L'accent militaire de la recherche en confinement inertiel apparaît très net et les applications énergétiques civiles ne sont éventuellement envisagées, du moins en Europe, que dans un futur fort éloigné. C'est la raison pour laquelle le programme de fusion européen ne maintient qu'une petite activité de "contact" (environ 1 à 2 % du budget) avec la physique fondamentale de la fusion inertielle.

LE CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

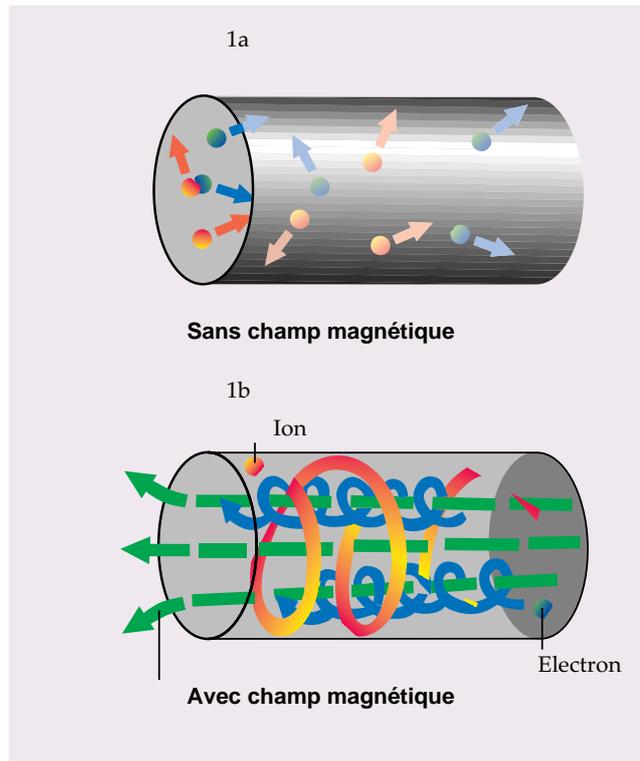
Nous abordons maintenant le confinement magnétique sur lequel la très grande majorité des recherches internationales en fusion contrôlée s'est concentrée. Celles-ci ne sont absolument pas susceptibles d'applications militaires, ainsi que nous le verrons par la suite, et c'est la raison pour laquelle elles ont été rendues publiques dès la conférence de Genève de 1958.

La fig. ci-contre en illustre le principe dans le cas d'un cylindre : les électrons (en bleu) et les ions (en rouge-jaune) beaucoup plus lourds ont des trajectoires en hélice autour des lignes de champ magnétique (en vert) et sont ainsi confinés sauf aux extrémités.

Depuis les années 1950 jusqu'à la fin des années 1960 les recherches ont été effectuées dans de multiples configurations : cylindres terminés par des miroirs magnétiques, dispositifs à différentes strictions (ou pincements) de courant, dispositifs annulaires dits "stellarator" ou dispositifs annulaires à courant axial dits "tokamak" (fig. ci-dessous).



Le champ magnétique toroidal est créé par les bobines. Dans le tokamak, le plasma constitue l'enroulement secondaire d'un transformateur. Une impulsion de courant dans l'enroulement primaire induit un courant dans le plasma, qui lui-même contribue à produire la configuration magnétique hélicoïdale requise pour des raisons d'équilibre et de stabilité.

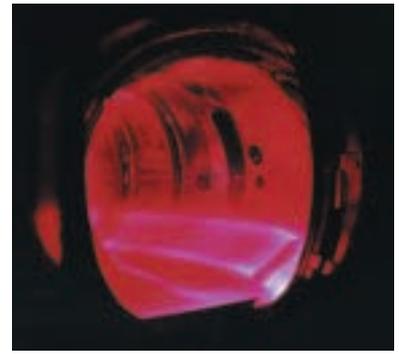


Ces machines "stellarator" ou "tokamak" sont des anneaux ou tores de plasma magnétisés et il s'agit donc de refermer un cylindre du type de la fig. ci-dessus sur lui-même. Tel quel le plasma torique avec seulement un champ magnétique torique est instable et il faut lui adjoindre un autre champ magnétique (dit poloïdal) qui, dans le cas du tokamak, est engendré par un courant torique qui parcourt le plasma. Le champ magnétique résultant est hélicoïdal et ses lignes de champ sont des hélices tapissant l'anneau de plasma qui est ainsi rendu stable. Depuis 1968, les meilleures performances ont été obtenues sur des tokamaks.

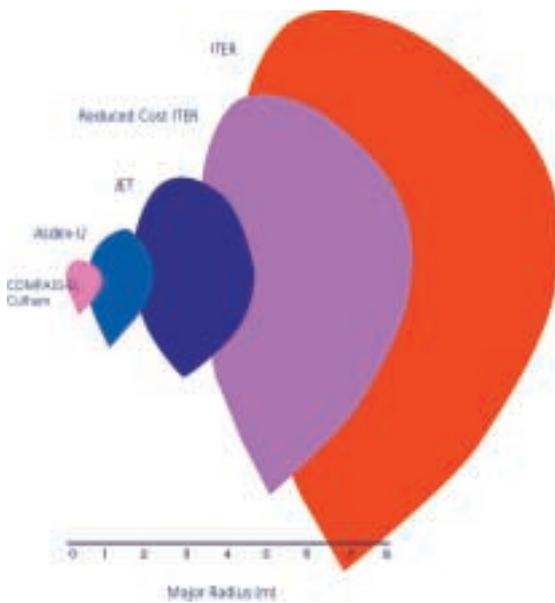
Dans le cas du stellarator, le champ magnétique poloïdal additionnel est engendré par des bobines extérieures. La ligne stellarator a connu une renaissance depuis les années 90 avec l'introduction de concepts "avancés" conduisant théoriquement à des configurations "stellarator" magnétiques plus adaptées. Ces configurations avancées n'ont été rendues

tokamak très performant TEXTOR 94 (voir fig. ci-contre) en associant également les chaires universitaires en physique des plasmas de Belgique, des Pays-Bas et du Land de Rhein-Westphalia.

La nécessité d'avoir des machines spécifiques de tailles différentes pour dégager des lois d'échelle permettant une extrapolation vers le réacteur est illustrée à la fig. ci-dessous où les sections du plasma de tokamaks européens dits à "diverteur" (qui assurent une forme typique de plasma ainsi qu'une évacuation déterminée des particules atteignant le bord) sont représentées. Le tokamak D-III-D (USA), plus grand qu'Asdex-U (RFA), et le JT-60U (Japon), de taille inférieure au JET, se situent sur un tel diagramme et ont également contribué de manière significative à l'établissement



Plasma dans le Tokamak TEXTOR 94



Comparaison des dimensions des tokamaks actuels et des deux versions d'ITER

de ces lois d'échelle. Enfin, on a représenté la section du plasma dans le futur réacteur expérimental (ITER-FEAT*) dont l'étude d'ingénierie détaillée est en phase finale (voir plus loin).

C'est sur le prédécesseur d'Asdex-Upgrade, Asdex, que le mode à haut confinement (mode H) a été découvert en 1982 rendant les machines à "diverteur" ainsi presque deux fois plus performantes qu'auparavant. Le tokamak Tore Supra (France) possède des bobines de champ magnétique toroïdal supraconductrices. Ceci a permis l'étude de longues décharges s'étendant jusqu'à 2 minutes et de préparer ainsi les très longues décharges nécessaires dans l'avenir. Le tokamak FTU (Italie), a pour objet l'étude des plasmas à champ magnétique élevé (jusqu'à 8.000 Gauss).

Nous avons vu que pour obtenir la fusion il fallait amener le plasma à températures de 100 à 200 millions°C, soit dix fois plus que celle du centre du soleil. Dans le cas du tokamak qui est parcouru par un courant important, le plasma est amené à une dizaine de millions°C par l'effet Joule. Il faut donc un puissant chauffage additionnel qui est assuré par:

- Injection de particules neutres très énergétiques d'hydrogène qui s'ionisent dans la machine et chauffent le plasma en lui communiquant leur énergie.
- Par des ondes électromagnétiques à haute puissance à des fréquences bien choisies (ion-cyclotronique, électron-cyclotronique ou hybride) qui agissent en quelque sorte comme dans un four à micro-ondes mais, bien entendu, de manière beaucoup plus subtile et sélective. Il s'agit de techniques maintenant bien éprouvées mais qui font encore l'objet de développements importants afin de pouvoir être utilisées de manière optimale dans des machines comme le futur ITER 2.

LE RÉACTEUR EXPÉRIMENTAL ITER ET PERSPECTIVES GÉNÉRALES AU 21^E SIÈCLE

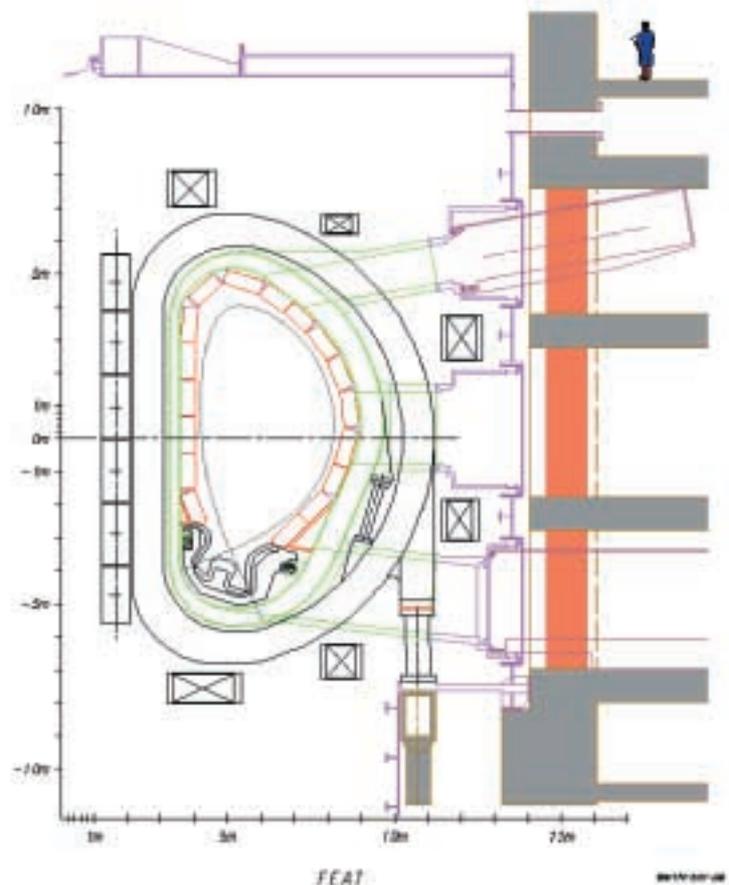
L'ensemble des résultats obtenus sur JET ainsi que sur les grands tokamaks américain, TFTR, et japonais, JT-60U, ont essentiellement démontré que, scientifiquement, la fusion est réalisable. C'est ainsi que sur JET, en opérant avec un mélange deutérium-tritium, on a dégagé une énergie de fusion égale à 2/3 de l'énergie utilisée pour chauffer le plasma. Depuis 1988 l'Europe, le Japon, l'URSS (maintenant la Russie) et les USA ont entamé l'étude et, ensuite, l'ingénierie détaillée du futur International Tokamak Experimental Reactor (ITER) dont le but est de "démontrer la faisabilité scientifique et technique de la fusion à des fins pacifiques".

* FEAT: Fusion Energy Amplification Tokamak

En mi-1998 le rapport final (ITER-FINAL DESIGN REPORT: ITER-FDR) estimait son prix, sur base d'études approfondies des coûts par des firmes industrielles, à 6,6 milliards Euro pour une machine produisant une puissance de fusion de 1.500 millions Watts. Bien que c'était celui initialement prévu en 1992, ce coût fut estimé trop élevé (rappelons, cependant, qu'il n'est que 50 à 75 % de celui d'un porte-avion moderne) compte tenu de la nouvelle situation économique dans les quatre entités. C'est pourquoi les partenaires ont prolongé la phase d'ingénierie approfondie jusqu'en juillet 2001 afin d'avoir un nouvel ITER à objectifs techniques réduits et à coûts réduits (environ 3 à 3.5 milliards) que nous appellerons provisoirement ITER-FEAT (voir dimensions de l'installation expérimentale – fig. ci-après). Au lieu de la puissance de 1.500 Megawatts d'ITER, ITER-FEAT aura une puissance de 400-500 Megawatts. Comme son but est de produire au moins dix fois plus de puissance de fusion que la puissance de chauffage de la machine Q est le rapport de la puissance de fusion sur la puissance de chauffage pendant un temps suffisamment long, ceci permettrait l'étude scientifique et technique d'un plasma fusionnant, c'est-à-dire en combustion, dans des conditions suffisamment proches de celles d'un futur réacteur commercial. Une telle réalisation dans ITER-FEAT fournirait donc l'information minimale nécessaire pour faire le projet de l'étape suivante, à savoir le réacteur de démonstration, DEMO, qui lui produirait de l'électricité. Le succès d'ITER-FEAT permettrait en effet : l'étude de l'interaction de plasmas fusionnant avec les parois de la machine ainsi que l'évacuation de l'énergie thermique et des cendres d'hélium, la démonstration de la sûreté et des caractéristiques environnementales favorables de la fusion ainsi que le développement de l'expertise industrielle et des technologies dans des domaines importants pour la réalisation de la fusion thermonucléaire contrôlée en tant que source d'énergie.

En 1999, les Etats-Unis se sont retirés d'ITER-FEAT pour des raisons financières et intérieures. Le site d'ITER-FEAT n'est pas déterminé : le Japon envisage 2 sites possibles, le Canada - qui participe à ITER par le biais de l'Europe - envisage également 2 sites et aucun pays européen ne s'est encore déclaré candidat. Des décisions importantes devront être prises pendant la période 2000-2002.

Un argument fallacieux souvent invoqué - et particulièrement aux USA - pour freiner le développement de la fusion vers un réacteur économique, et la maintenir au niveau d'un programme uniquement scientifique, réside dans l'actuel approvisionnement abondant et bon marché - encore que les prix viennent de doubler en quelques mois - en pétrole et gaz. Ceci est invoqué pour prédire qu'il n'y aura pas de crise énergétique le siècle prochain et qu'il n'y a donc pas urgence à développer la fusion. Ceci néglige évidemment le fait que la population mondiale aura probablement cru du chiffre actuel de 5 milliards à près de 10 milliards en 2050 et que l'augmentation de la demande énergétique dans les pays en voie de développement qui abritent la majeure partie de l'humanité et qui s'efforcent d'augmenter leur niveau de vie, sera beaucoup plus grande que dans nos pays très développés. La demande en énergie sera donc de deux à trois fois plus élevée en 2050 qu'actuellement et l'on



ITER-FEAT, section verticale

doit, en plus, prendre en compte le fait que la demande en énergie électrique croît plus rapidement que la demande globale en énergie. De plus en plus de géologues attirent notre attention sur le fait que les chiffres récents concernant les réserves pétrolières sont exagérés par de nombreux producteurs pour des raisons politiques afin d'anesthésier les utilisateurs et ces géologues prévoient avec une grande certitude un déclin de la production pétrolière mondiale d'ici vingt ans ou moins. En tout cas, la guerre du Golfe en 1991 nous a fort opportunément rappelé que lorsque les ressources pétrolières étaient en danger, il n'y avait aucune hésitation à réagir de la manière la plus forte et la plus déterminée.

Une préoccupation encore plus immédiate que celle relative à notre approvisionnement énergétique est celle de la pollution et de l'effet de serre. Il y a une nécessité à développer les sources d'énergie qui diminuent le niveau des gaz à effet de serre et des gaz polluants dans l'atmosphère. Toutes les études sérieuses montrent que les économies en énergie et, même, une large introduction des renouvelables ne peut que contribuer partiellement à ce très sérieux problème environnemental. C'est donc notre devoir de rendre le public conscient que les réacteurs à fusion seront intrinsèquement sûrs. En effet, un accident du type Tchernobyl est interdit par les lois de la nature : dès que la "bouteille" magnétique ne fonctionne pas correctement, le plasma chaud n'est plus confiné, s'échappe et vient se refroidir contre les parois arrêtant ainsi instantanément les réactions de fusion. L'un des deux combustibles, le tritium radioactif (à la courte durée de demi-vie de 12,3 ans) sera engendré et consommé sur le site même du réacteur, en une boucle fermée tandis que la radioactivité secondaire des parois et auxiliaires du réacteur causée par les neutrons est de courte durée de vie. C'est ainsi qu'avec un choix adéquat des matériaux structuraux, le stockage rendra ces matériaux recyclables après une période d'environ 50 à 100 ans.

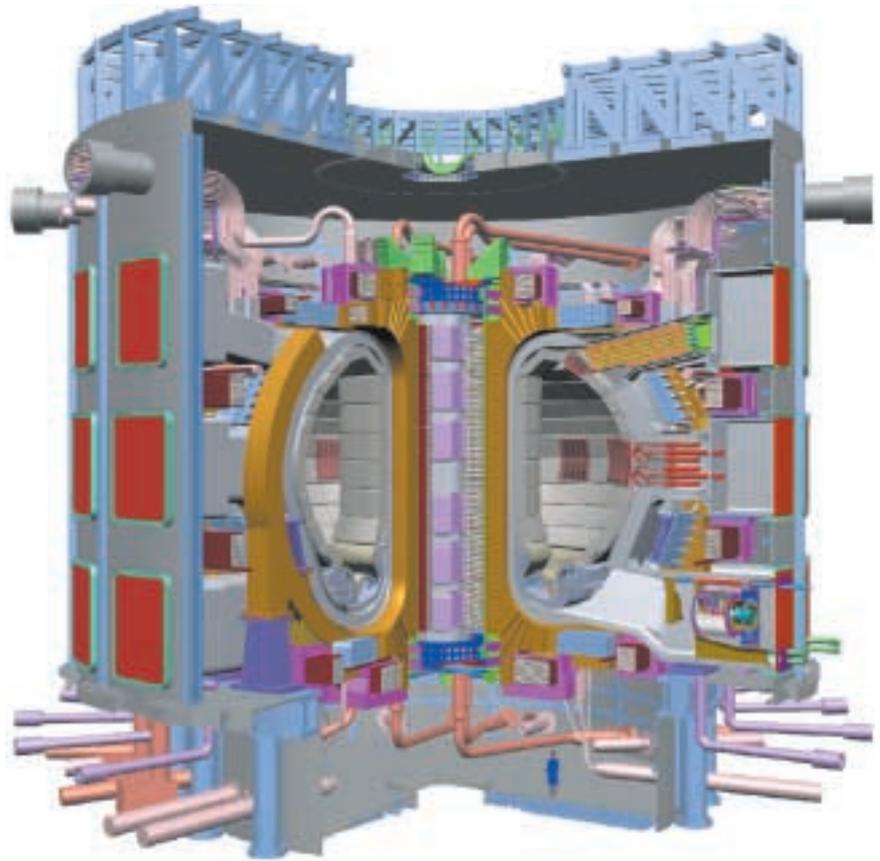
CONCLUSIONS

Au moment de la Conférence de Genève de 1958 pendant laquelle les premiers résultats concernant la fusion thermonucléaire contrôlée obtenus en URSS, aux USA, en Grande Bretagne et en France ont été déclassifiés, l'enthousiasme était grand et beaucoup des difficultés, rencontrées lorsqu'on a voulu dompter un plasma de plus de 100 millions°C, n'ont pas été entrevues. Certains ont émis alors des pronostics exagérément optimistes concernant l'aboutissement rapide de la fusion contrôlée que des savants aussi autorisés et bien informés qu'Artsimovitch (URSS) et Teller (USA) ne partageaient absolument pas. Déjà à la Conférence de Salzbourg en 1961, il apparaissait clairement qu'il s'agissait d'une entreprise de longue haleine. En 1969, les résultats obtenus sur le tokamak T3 à Moscou ont marqué le début d'un progrès continu pendant trois décennies, résultant de travaux scientifiques et techniques approfondis sur plusieurs dizaines de tokamaks en Europe et dans le monde entier. Ceci a permis un progrès de l'ordre de 10.000 des propriétés de confinement et de passer de plasmas de 1 million°C à ceux de 100-200 millions°C requis pour la fusion. En confinement, il reste une marge de 5 à franchir pour réaliser, dans un réacteur expérimental comme ITER-FEAT, les conditions nécessaires à une fusion d'une puissance de centaines de Megawatts, étape essentielle vers un réacteur commercial.

En 1998, le rapport final ITER-FDR nous a fourni les plans détaillés de la machine ainsi que les prototypes correspondants de tous les composants essentiels de celle-ci. Pour des raisons financières, la communauté internationale n'a pas pu prendre la décision de la construction de la machine qui satisfaisait à tous les buts scientifiques et techniques proposés. Elle a cependant pu utiliser l'énorme travail accompli ainsi que la confirmation plus poussée des données scientifiques, obtenues ces dernières années sur les tokamaks, permettant l'extrapolation vers une machine d'une telle taille pour préparer avec conviction et réalisme un ITER-FEAT moins cher, donc plus petit et moins performant, mais qui constituerait néanmoins encore l'unique étape intermédiaire entre JET et DEMO et ce, en accord avec les buts initiaux les plus fondamentaux d'ITER.

L'intérêt évident de construire ITER-FEAT ne doit pas occulter l'importance du rôle que les Associations nationales en fusion doivent continuer à exercer en Europe. En effet, nous avons vu le rôle indispensable qu'ont joué, à côté du vaisseau amiral qu'est le JET, les autres machines, de taille inférieure et plus flexibles,

du programme européen. Ce sont sur elles et leurs consœurs dans le monde qu'une série de découvertes et de mises au point concernant le confinement, le chauffage, le rôle crucial de la zone périphérique du plasma, l'interaction entre plasma et paroi, etc, ont été faites et ensuite appliquées dans JET, TFTR et JT 60-U. Une telle activité restera nécessaire pendant la longue construction d'ITER-FEAT et son opération afin de continuer à découvrir des améliorations et des alternatives ainsi qu'à développer de nouvelles méthodes de diagnostics et à former les scientifiques hautement qualifiés sur un certain nombre de machines flexibles. Bien entendu, le nombre de celles-ci est appelé à diminuer et des regroupements et



ITER-FEAT, CAD Isometric view (version 2000)

collaborations semblables à ceux qui se sont opérés dans le Trilateral Euroregio Cluster (voir plus haut) interviendront probablement sous une forme ou l'autre.

Les chercheurs et technologues ne doivent pas être culpabilisés parce que le développement de la fusion demandera environ un siècle (de 1950 à 2050) pour obtenir les premiers réacteurs commerciaux pour autant qu'en ce début du troisième millénaire, les décideurs ne reculent pas face à leur responsabilité d'aller de l'avant. Récemment, deux extraits de presse démontraient que même dans l'industrie automobile, arrivée depuis longtemps à maturité, les développements significatifs requièrent de 30 à 40 ans: "Depuis 30 ans nous travaillons à la réalisation d'une vision ..." (Mitsubishi, au sujet de l'injection directe d'essence dans les moteurs de voiture) et "Il a suffi de 40 ans pour pouvoir atteindre la production en série ..." (dans un reportage du Süddeutsche Zeitung sur le développement de transmission sans boîte de vitesses dans les voitures par Audi, Fiat, Ford, Honda, Volkswagen, etc.).

L'on peut donc affirmer, sans crainte de se tromper, que réaliser un mini-soleil sur terre dans un volume de quelques milliers de m³ mais à une température dix fois plus élevée que le centre du soleil est un des projets scientifiques et technologiques les plus ambitieux jamais entrepris et le fait, qu'après un peu moins d'un demi-siècle, nous soyons aujourd'hui aussi avancés et à même d'entrevoir clairement le produit final constitue déjà une performance notable.

Cependant, les leçons de l'histoire concernant les échelles de temps des développements industriels montrent qu'il n'y a pas de temps à perdre. Nous avons atteint un niveau significatif et nous possédons les outils pour effectuer un progrès majeur. Nous devons avoir la volonté et le courage de lutter pour cette cause et rester unis afin de développer la fusion magnétique contrôlée en vue du réacteur commercial. Nous devons, avec l'aide de toute la communauté scientifique, convaincre les décideurs politiques.

Nous avons, au surplus, la profonde obligation morale envers nos enfants, nos petits-enfants et les générations futures de l'humanité entière de convaincre l'ensemble du public des énormes promesses qu'offre la fusion magnétique en tant que source d'énergie inépuisable, sûre et écologique ainsi que de sa nécessité et de son urgence.

Attention on tire !

JOURNÉE ORDINAIRE AU CENTRE DE RECHERCHE DE L'EPFL

Pierre Jean Paris, adjoint à la direction du Centre de recherches en physique des plasmas

Professeur **Minh Quang Tran**, directeur du Centre de recherches en physique des plasmas

Il existe plusieurs centres d'excellence dans la recherche sur la fusion. L'un d'eux se trouve à quelques dizaines de mètres du lac Léman, sur le flanc sud du campus de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Il abrite une installation unique au monde par certaines de ses caractéristiques: le tokamak à configuration variable.

“Tir 51 en cours!” La voix du pilote remplit la grande halle du tokamak. Cet avertissement laconique annonce la 16751^e décharge de plasma réalisée dans le cadre du Centre de recherches en physique des plasmas (CRPP). Le physicien du jour est assisté d'un pilote, de plusieurs ingénieurs et “diagnosticiens”. Dans une dizaine de secondes, le plasma sera créé dans l'enceinte du tore, cet anneau métallique au sein duquel se déroule l'opération en cours.



Le Tokamak TCY

Chaque participant poursuit une mission bien précise: contrôler l'état de la machine, surveiller les circuits électriques de puissance, évaluer le fonctionnement des systèmes de mesure. Devant leur écran, des physiciens mettent à profit le temps restant pour affiner les réglages des appareils ou dépouiller les résultats de mesures déjà effectuées.

DEUX SECONDES...

Le plasma ne dure que deux secondes. Puis on attendra une dizaine de minutes avant de procéder à un nouveau tir. Il faut d'abord que la machine tournante - un turbo-générateur - reprenne de la vitesse et emmagasine l'énergie nécessaire à l'alimentation électrique de l'installation, et que les bobinages magnétiques, ainsi que d'autres éléments, aient préalablement retrouvé leurs températures et leurs caractéristiques ordinaires.

Le thème de travail, défini en séance de coordination le vendredi précédent, est présenté le lundi matin dans le cadre du programme de la semaine. Il porte aujourd'hui sur le comportement du plasma soumis à un fort chauffage externe. L'anneau de plasma, allongé et façonné en D, est tout d'abord chauffé par le courant qui y circule. Il reçoit ensuite un apport d'énergie supplémentaire au moyen d'une onde électromagnétique.

Le bruit sourd, épais, vibrant de la machine témoigne de la création du champ magnétique. Les forces ainsi créées investissent les structures et provoquent une déformation de l'ensemble, à l'image d'un étirement élastique. L'aimant suspendu de la salle de commande a pivoté, se réalignant sur le champ magnétique créé par les bobinages du tokamak. Il reprendra sa position initiale après le tir.

120 MILLIONS DE DEGRÉS

Le plasma s'est bien constitué et l'impulsion a duré 2 secondes. Le plasma a été traversé par un courant de 250 kiloampères, et les gyrotrons ont délivré une puissance complémentaire de 1,5 mégawatt environ, injectée dans le plasma. La température électronique atteint finalement 120 millions de degrés.

Le tokamak à configuration variable (TCV) est une installation unique au monde par sa flexibilité. Il permet d'étudier et de contrôler des plasmas de formes très diverses, ainsi que leurs propriétés de confinement. Sur la plate-forme attenante au TCV, six gyrotrons sont installés, qui délivrent 3 mégawatts de puissance à 83 gigahertz. A la fin de l'an 2000, Le CRPP disposera d'une puissance supplémentaire de 1,5 mégawatt à 120 gigahertz. Le système de chauffage cyclotronique électronique du centre sera alors le plus puissant au monde.

L'intérêt des recherches poursuivies à Lausanne réside dans le fait que la forme du plasma est l'un des derniers paramètres qui doit être exploré dans la configuration tokamak. Le projet de réacteur international ITER-FEAT, dont la taille est revue à la baisse, prévoit également d'allonger la forme du tore, ce qui accroît l'importance des études du CRPP dans les domaines du contrôle et du confinement du plasma.

A ce travail expérimental s'ajoute l'exploration par simulation numérique des propriétés de stabilité et de confinement des plasmas par le groupe théorique du centre. Ce groupe de scientifiques a acquis une solide réputation dans le domaine de la simulation numérique. Il a été l'un des moteurs, à l'EPFL, de l'utilisation d'ordinateurs massivement parallèles.

Le chauffage cyclotron-électronique des plasmas de tokamak et de stellérateur nécessite le développement des sources d'ondes électromagnétiques à très hautes fréquences, de l'ordre de 100 gigahertz, ainsi que de grandes puissances unitaires de 0,5 à 1 mégawatt. Ce rôle est dévolu aux gyrotrons. Le CRPP est devenu l'un des centres de compétence dans ce domaine. Il œuvre au développement de gyrotrons de haute capacité, en collaboration avec le Centre de recherche de Karlsruhe (FZK-D), le Centre français d'études atomiques (CEA-F) et l'entreprise Thomson Tubes Électroniques.

SUPRACONDUCTEURS

La Suisse dispose d'un autre centre d'excellence dans ce domaine scientifique: le groupe "Technologie de la fusion" du CRPP, installé dans le cadre de l'Institut Paul Scherrer, à Villigen. Il exploite notamment une installation de tests de supraconducteurs, destinée aux aimants requis par les machines à fusion magnétique. C'est le SULTAN (Supraleiter Testanlage).

Ce dispositif, unique au monde, permet de caractériser et d'étudier des câbles supraconducteurs à basse température, en présence de puissants champs magnétiques statiques et variables. SULTAN dispose d'une installation cryogénique performante et d'une alimentation de courant capable d'alimenter les conducteurs en cours d'essai. Il permet de tester l'ensemble des câbles développés pour le projet ITER.

La supraconductivité à haute température fait également l'objet de recherches en vue d'une utilisation potentielle dans les aménages de courant d'ITER. Ces travaux devraient déboucher sur la mise au point d'un prototype de câble supraconducteur refroidi à une température proche de celle du néon liquide pour le transport d'énergie. L'application spécifique de ces supraconducteurs dans le transport d'énergie électrique va probablement s'intensifier au cours des prochaines décennies.



Installation SULTAN

STOCKAGE COURTE DURÉE

Plus loin, la halle expérimentale de l'accélérateur à protons du PSI... Et l'installation PIREX, sorte d'appendice à l'accélérateur.

Dans un réacteur à fusion, les matériaux de structure s'activent sous le flux des neutrons de fusion. Il est essentiel pour l'aspect environnemental de la fusion de disposer de matériaux structurels dont l'activation résiduelle, à une échelle de temps de quelques dizaines d'années, est suffisamment basse pour pouvoir recycler ces matériaux et éviter ainsi un stockage de longue durée. Le CRPP travaille avec l'industrie suisse (Sulzer, Innotec) et plusieurs partenaires européens et mondiaux sur deux familles de matériaux à faible activation résiduelle: les aciers ferritiques martensitiques et les alliages de titane.

En l'absence de sources de neutrons suffisamment denses, les échantillons provenant de coulées de laboratoire ou industrielles sont irradiés dans le faisceau de protons de l'institut, ainsi que dans d'autres réacteurs européens. L'installation PIREX (Proton Irradiation Experiment) située à l'Institut Paul Scherrer permet de simuler les effets dus aux bombardements des neutrons par des protons, et de former sur place un type de défaut spécifique (par exemple des bulles d'hélium) qui affecte les propriétés mécaniques des matériaux.

On reproduit ainsi une caractéristique importante de l'irradiation dans un réacteur de fusion qui n'apparaît pas dans un réacteur à fission en raison de la différence d'énergie des neutrons. La compréhension de la physique des défauts d'irradiation fait appel à des méthodes de mesure et d'interprétation de physique métallurgique et de technique de microscopie électronique.

APPLICATIONS CONCRÈTES

Revenons à l'EPFL. Le groupe d'applications des procédés industriels par plasmas nous invite à découvrir ses derniers développements. Le CRPP a entrepris depuis une dizaine d'années une diversification dans le domaine des matériaux en utilisant sa compétence en physique des plasmas. Le groupe travaille simultanément dans plusieurs domaines: dépôt de couches de silicium pour les cellules solaires et les écrans, formation de couche décoratrice pour l'industrie horlogère, dépôt de diamant sur des outils, étude de torches à plasma pour la formation de couches minces, fabrication de disques compact.

Ces développements portent également sur la mise au point de diagnostics qui pourront aider l'industrie à contrôler les procédés de fabrication pendant les phases opérationnelles. Par ailleurs, grâce à un travail à la fois expérimental et théorique, la compréhension des phénomènes survenant dans ces plasmas froids aide à la conception et à la réalisation d'appareillages mieux adaptés aux applications industrielles.

Toutes ces études se font en collaboration avec des entreprises industrielles (ASULAB, Balzers, Sulzer Metco, Tetrapak) et des laboratoires européens. Dans ce domaine, seule une recherche de haut niveau et ouverte aux préoccupations du monde industriel peut créer et consolider des liens utiles entre instituts de recherche académiques et secteur privé.

ORIGINALITÉ

L'impact des travaux du CRPP peut être mesuré à l'aune de l'originalité de ses recherches. Le TCV apportera une contribution irremplaçable en matière de contrôle des plasmas allongés (ITER-FEAT) et de confinement en fonction de la forme. Le groupe théorique du CRPP est bien connu pour ses travaux sur la stabilité du confinement magnétique, sur l'interaction ondes-particules et sur la simulation numérique.

Les travaux de ce centre orientés vers la technologie (gyrotron, supraconductivité, matériaux à basse activation) jouissent eux aussi d'une considération internationale et font l'objet de collaborations multiples avec le monde de l'industrie. Le CRPP contribue à l'avancement de la technologie en favorisant la compréhension des phénomènes observés, à commencer par les études sur les gyrotrons, les procédés plasma, la supraconductivité ou sur la fragilisation des matériaux.

VALIDATION

En ce début de siècle, il nous apparaît important de poursuivre avec détermination les “Objectifs 2000-2003” de l’Association Euratom-Confédération suisse. Ce programme inclut l’exploitation des grandes installations existantes (TCV, SULTAN et PIREX). Il comprend également la mise en service, vers la fin de l’année 2000, des derniers éléments du système de chauffage cyclotron-électronique de TCV et la poursuite des études sur les propriétés des plasmas à forme variable dans le tokamak, avec et sans chauffage additionnel.

Autre domaine de recherche: l’étude théorique et numérique de nouvelles configurations magnétiques et de la physique des phénomènes de transport, ainsi que le développement des matériaux à faible activation résiduelle. Ces aspects jouent un rôle stratégique pour la réalisation d’un réacteur à fusion et un axe prioritaire pour le CRPP, qui participe à des travaux internationaux visant à la réalisation d’une source intense de neutrons énergétiques permettant de valider les matériaux en développement.

Enfin, les applications de la supraconductivité dans la physique des plasmas figurent également parmi les objets de la recherche à court et à moyen termes. Le soutien au projet ITER-FEAT est à cet égard prioritaire. Dès cette année, les programmes s’appuyant sur les installations de JET seront confiés aux organisations européennes spécialisées. Le CRPP compte y participer activement dans ses domaines d’excellence. Il prévoit notamment de déléguer certains de ses collaborateurs sur le site de JET pendant les campagnes expérimentales.



Plaque tournante

Fondé en 1961, le Centre de recherche en physique des plasmas (CRPP) est une unité hors département de l’Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Il compte environ cent vingt collaborateurs répartis sur les sites de l’EPFL et de l’Institut Paul Scherrer (PSI). Outre l’enseignement et la recherche propre, le centre conduit des activités scientifiques dans le cadre de l’association Euratom-Confédération suisse. Il s’intéresse notamment au développement et au transfert de technologie dans le domaine des matériaux et des procédés industriels par plasma. Le CRPP assume la responsabilité de l’ensemble des travaux en matière de fusion contrôlée réalisés en Suisse. Il participe aux projets internationaux comme JET et ITER.

Avancée technologique

ÉVITER LES DÉCHETS DE LONGUE DURÉE

*Professeur Minh Quang Tran, directeur du
Centre de recherches en physique des plasmas de l'EPFL*

Comment éviter que le fonctionnement de réacteurs à fusion n'entraîne la production de déchets radioactifs exigeant des stockages de longues durées? Cette question, primordiale pour l'acceptation future de cette technologie par l'opinion publique, fait l'objet d'importants programmes de recherche dans le monde.

Le réacteur à fusion comprend trois éléments essentiels: les aimants supraconducteurs, qui créent un champ magnétique de confinement, les structures mécaniques qui "voient" le plasma et subissent les effets de bombardement neutronique, et la couverture dans laquelle le tritium consommé est régénéré.

Comme pour toute technologie nouvelle, une telle réalisation suppose la mise en œuvre d'un programme de recherches destiné à évaluer, dans un premier temps, les options technologiques potentielles. Une fois celles-ci définies, il faudra les amener à leur maturité technique et industrielle.

CONTRAINTES

Il s'agit d'un processus de longue durée qui s'inscrit dans une stratégie globale de développement. L'effort de la recherche actuelle porte sur les matériaux pour les processus de supraconductivité à basse et à haute températures, destinés à la création des champs de confinement nécessaires, ainsi que sur les structures soumises aux flux de neutrons (matériaux de structure et couverture produisant le tritium).

Les aimants supraconducteurs d'une centrale à fusion se distinguent par leur grande taille. Ceux du réacteur ITER-FEAT pèseront plus de 8700 tonnes. Ils doivent générer des champs magnétiques de grande intensité, pouvant atteindre jusqu'à 12 teslas sur le conducteur. Les câbles supraconducteurs véhiculent un courant de l'ordre de 100 000 ampères. Ils sont soumis, dans les champs magnétiques du réacteur, à des contraintes mécaniques considérables.

CRUCIAL

On a récemment développé de nouvelles configurations de conducteurs placés dans des gaines d'acier susceptibles de résister à ces formidables contraintes dues aux forces électromécaniques. Deux grandes bobines simulant le solénoïde central et une bobine de champ toroïdal font actuellement l'objet de tests au Japon et en Allemagne dans le cadre du projet ITER.

La supraconductivité à haute température, bien qu'elle ne se prête pas encore à la fabrication des aimants mêmes, pourrait jouer un rôle crucial dans les amenées de courant en minimisant les pertes ohmiques et en réduisant la puissance cryogénique nécessaire au fonctionnement d'un réacteur.

Si les supraconducteurs sont indispensables dans le fonctionnement d'un réacteur basé sur le confinement magnétique, ce sont les matériaux à basse activation qui détermineront l'acceptabilité environnementale de la fusion comme source d'énergie électrique. Les réacteurs devront être conçus de manière à ne pas produire des déchets radioactifs nécessitant de longues durées de stockage.

ALLIAGES

En tant que telle, la réaction de fusion ne génère pas de produits radioactifs, l'hélium étant un gaz inerte non radioactif. En revanche, des substances actives résultent de la transmutation induite dans les matériaux soumis aux bombardements par les neutrons porteurs de l'énergie. En combinant les connaissances en matière de métallurgie et de physique nucléaire, il est possible de développer de nouveaux alliages ou composites à basse activation induite par les neutrons.

On procède aujourd'hui à des tests d'aciers ferritiques martensitiques, d'alliages de chrome, de titane ou de vanadium, ainsi que de composites à partir de fibres de carbone de silicium. Il s'agit notamment de déterminer leurs propriétés métallurgiques, mécaniques et physiques avant, après et même pendant l'irradiation.

Du développement en laboratoire à la maîtrise technologique industrielle, ces étapes représentent une œuvre de longue haleine. Toute stratégie intégrée en vue de la réalisation d'un réacteur à fusion doit nécessairement inclure une importante composante dans le domaine des matériaux. À l'image du projet ITER-FEAT, nécessaire pour passer des machines existantes à l'acquisition de nouvelles connaissances pour l'étape suivante, la fabrication d'une source de neutrons est un aspect déterminant en vue de la réalisation d'un futur réacteur.



Tête d'irradiation sur PIREX

SANS RELÂCHEMENT

Le rôle important du projet international "Fusion Material Irradiation Facility" (IFMIF) est reconnu par tous les acteurs de la recherche. Ce projet porte sur la conception d'une source de neutrons ayant la bonne énergie et rassemble des équipes dans plusieurs pays sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie. Il permettra d'accroître les connaissances relatives aux matériaux à basse activation soumis à des doses de neutrons équivalentes à celles reçues par les éléments d'un réacteur au terme de leur vie.

La couverture du réacteur qui génère le tritium - réutilisé par le réacteur lui-même - fait également l'objet de développements. Deux concepts sont à l'étude en Europe. Le premier utilise l'eutectique lithium-plomb refroidi à l'eau, le second est basé sur les billes de céramiques refroidies à l'hélium. Ces travaux visent à développer des modules de couverture qui seront testés dans le cadre du projet ITER-FEAT.

Des connaissances dans la manipulation du tritium radioactif ont été acquises au cours de deux phases d'opération avec un mélange de deutérium et de tritium sur le projet JET. Elles ont permis de tirer un bilan précis de l'inventaire de tritium disponible. Au cours de ces campagnes expérimentales, aucun relâchement de tritium ne s'est produit dans l'environnement.

L'avènement de la fusion comme source d'énergie suppose de nouvelles connaissances de physique des plasmas et des avancées technologiques. Outre les développements fondamentaux évoqués ci-dessus, d'autres travaux ont débouché sur des résultats positifs pour des applications présentes. Citons pour exemple la robotique, qui a démontré son efficacité dans le cadre du projet JET. Elle jouera un rôle primordial dans la maintenance du tokamak.

Vers une centrale électrique

PRINCIPES ET ENJEUX D'UNE CENTRALE À FUSION

J. Weisse, Ph. Magaud & G. Marbach

Collaborateurs scientifiques au CEA (Cadarache, F)

Au sein du soleil, les noyaux légers fusionnent en libérant de formidables quantités d'énergie. Ces réactions sont à l'origine de la chaleur et de la lumière que nous recevons.

Maîtriser sur terre de telles réactions, à des fins de production d'énergie, ouvrirait la voie à des ressources quasiment illimitées puisque chaque litre d'eau de mer sur lequel on prélèverait 3,3 mg de Deutérium deviendrait l'équivalent énergétique de plus de 250 litres de pétrole. On peut ajouter aussi que le produit de ces réactions, l'hélium, est inoffensif chimiquement, radiologiquement, et n'intervient pas dans l'effet de serre. L'intérêt d'une maîtrise de la Fusion est donc grand mais les difficultés à vaincre sont tout aussi grandes.

Dans une étoile, c'est la force gravitationnelle qui maintient température et pression aux niveaux nécessaires à la fusion thermonucléaire.

Deux voies sont étudiées pour reproduire sur Terre ces réactions: porter à très haute pression et haute température un petit volume de matière pendant un temps extrêmement court, on parle alors de confinement inertiel ou piéger et maintenir à très haute température

un plasma. Ce plasma est confiné dans une boîte immatérielle de forme torique créé par des champs magnétiques, on parle alors de confinement magnétique. C'est la voie de recherche la plus prometteuse et la plus étudiée en Europe et nous nous limiterons dans la suite à cette voie dans un but de simplification.

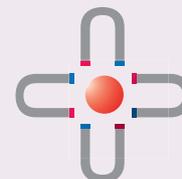
La FUSION par FAISCEAUX (Fusion Inertielle):

- ☞ compression d'une cible millimétrique
- ☞ volume faible
- ☞ densité forte 10^6 fois la densité de l'air
- ☞ temps caractéristiques: 10^{-11} s
- ☞ température élevée (100 millions de °K)



Les BOITES MAGNETIQUES:

- ☞ On s'arrange pour que les particules restent confinées
- ☞ volume important (1000 m^3)
- ☞ densité faible: 10^{-5} fois la densité de l'air
- ☞ temps caractéristiques: 10s
- ☞ température élevée (100 millions de °K)

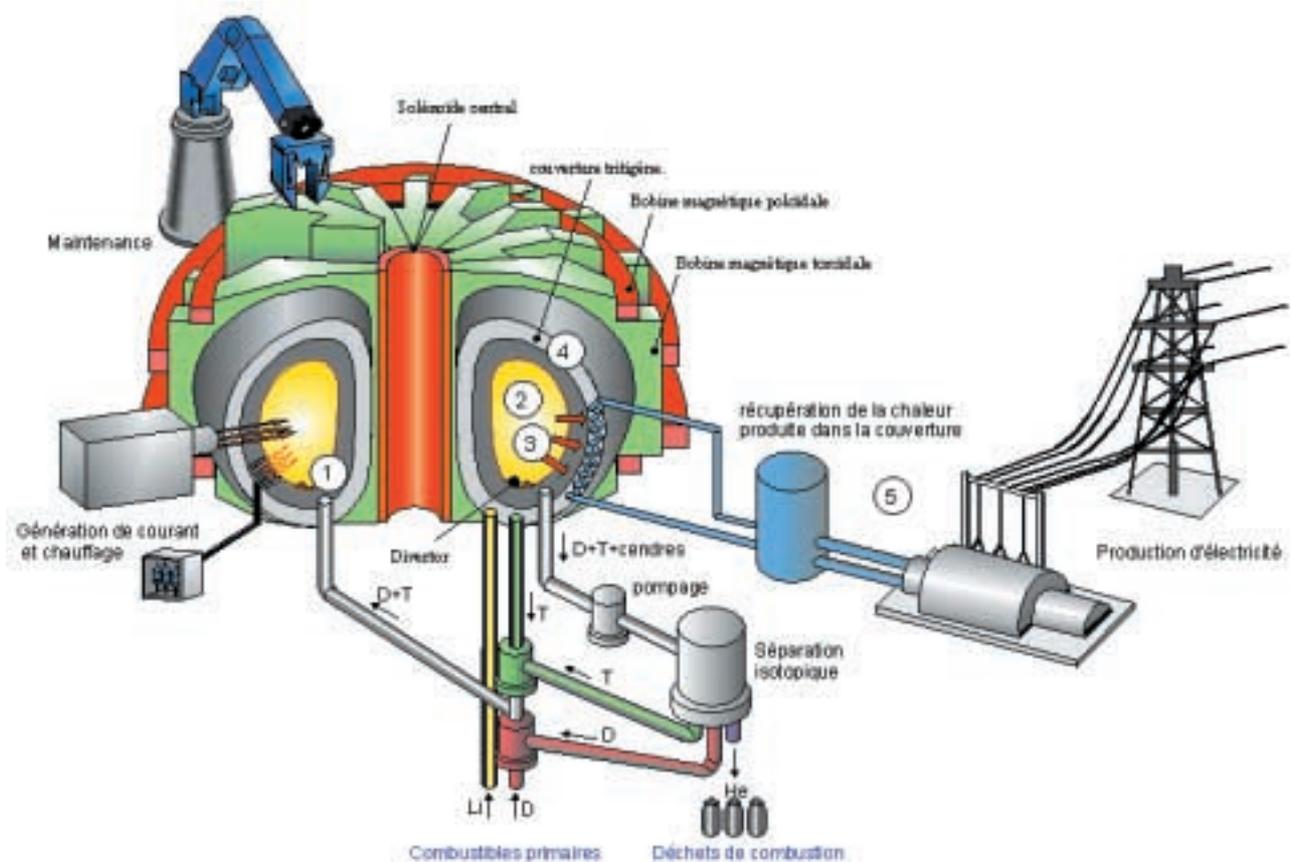


1. LES PRINCIPES DU RÉACTEUR

Depuis longtemps la communauté Fusion a cherché à définir ce que pourrait être le réacteur du futur. On dispose donc d'études, régulièrement remises à jour, qui fixent les contours et parfois les détails de ce que pourrait être un réacteur de Fusion. En plus de ces études prospectives, il faut citer les études d'ingénierie détaillé du projet ITER qui tout en n'étant pas totalement représentatives ont tout de même défini avec précision la majeure partie des grands composants d'un réacteur (bobines magnétiques supraconductrices de grande taille, problématique du divertor,...).

Nous allons examiner tout d'abord le réacteur sous l'angle des concepts les plus généraux en considérant le schéma fonctionnel présenté dans la figure de la page suivante. Le mélange combustible Deutérium-Tritium est injecté ① dans une chambre où, grâce à un système de confinement et il passe à l'état de plasma et brûle ②. Ce faisant, le réacteur produit des cendres (les atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de particules rapides ou de rayonnement ③. L'énergie produite sous forme de particules chargées et de rayonnement, s'absorbe dans un composant particulier, la "première paroi" qui, comme son nom l'indique, est le premier élément matériel rencontré au-delà du plasma.

L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est, quant à elle, convertie en chaleur dans la Couverture ④: élément au-delà de la première paroi, mais néanmoins à l'intérieur 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, Couverture et Chambre à vide sont bien évidemment refroidies par un système d'extraction de la chaleur. La chaleur est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble classique turbine et alternateur producteur d'électricité ⑤.

A proprement parler, on vient de décrire la partie "chaudière" du réacteur de Fusion et cette partie est fonctionnellement voisine d'autres chaudières plus classiques. Décrivons maintenant le circuit du combustible qui lui, est singulier. Le neutron qui quitte le plasma et s'absorbe dans la couverture ne fait pas qu'abandonner son énergie, il provoque aussi une réaction sur le Lithium présent et c'est par cette réaction qu'est produit le Tritium. La couverture dont on a vu plus haut le rôle thermique est aussi le lieu de la production du Tritium ce qui lui vaut le nom de Couverture Tritigène. A l'arrière de la couverture existe donc un système qui assure à la fois, la fourniture de Lithium, l'extraction de la chaleur et l'extraction du Tritium.

La couverture tritigène absorbe, ou au moins ralentit, les neutrons émis par le plasma. A ce titre, elle remplit simultanément trois fonctions: elle est la source de chaleur, elle participe à la protection neutronique et elle génère le Tritium brûlé par le réacteur. Nous allons examiner rapidement les deux premières fonctions qui se rencontrent aussi dans d'autres réacteurs et nous traiterons plus en détail la troisième fonction typique du réacteur à Fusion.

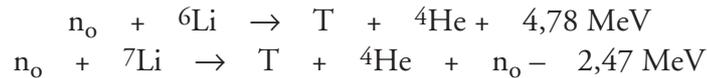
La couverture est source de chaleur puisque les neutrons y abandonnent leur énergie (14 MeV) en échauffant les matériaux. La chaleur elle-même est évacuée en direction des générateurs de vapeur par un fluide caloporteur qui peut être l'eau, un gaz (l'Hélium), un sel fondu ou un métal liquide. La seule singularité provient de la présence des champs magnétiques élevés. La mise en mouvement d'un matériau conducteur (le métal liquide) en présence de champs magnétiques provoque l'apparition de courants induits qui perturbent profondément l'écoulement. On parle d'effets magnétohydrodynamiques (ou MHD). Pour limiter ce genre d'effets, deux voies ont été étudiées: soit le métal liquide circule à une vitesse convenable pour servir aussi de caloporteur et alors les tubes de circulation doivent être recouverts intérieurement de

revêtements isolants, soit le métal ne se déplace que lentement pour l'extraction du Tritium, auquel cas il faut ajouter un autre fluide caloporteur (ex: eau) et l'architecture s'en trouve compliquée.

La deuxième fonction de la couverture est celle de protection neutronique. En réduisant considérablement et l'énergie des neutrons et le flux neutronique la couverture abrite les composants suivants et surtout les aimants supraconducteurs. Cette protection est complétée autour du tore par une protection biologique assurée par une paroi en béton.

Nous pouvons aborder maintenant la troisième fonction de la couverture: *la génération du Tritium*.

La réaction de base qui sert à la production de Tritium est la réaction qui se produit lorsque du lithium est bombardé par des neutrons. Le lithium naturel est un mélange de deux isotopes le ${}^6\text{Li}$ et le ${}^7\text{Li}$; on a donc à la fois les deux réactions suivantes :



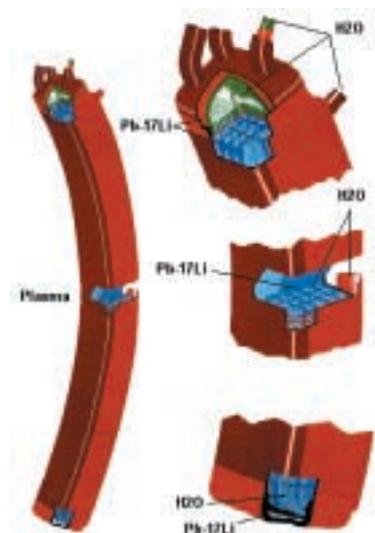
La première réaction est exothermique, la seconde endothermique et de ce fait, suppose des neutrons suffisamment énergétiques : c'est une réaction à seuil. On a évidemment intérêt à privilégier la première réaction, et donc à utiliser du lithium enrichi en ${}^6\text{Li}$. Cette opération d'enrichissement est simple et déjà pratiquée industriellement. Observons aussi au passage, que la couverture est ainsi, elle aussi, le siège de réactions productrices d'énergie qui interviennent à elles toutes, pour 20% dans le bilan du réacteur. Concrètement, le Lithium est utilisé soit sous forme liquide, soit sous forme solide.

Les matériaux tritigènes liquides qui sont étudiés sont: le Lithium métal (liquide à la température d'emploi), un eutectique de Lithium et de Plomb ($\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$) et un sel fondu composé de Lithium de Béryllium et de Fluor, le Flibe (Li_2BeF_4). Tous ces matériaux circulent dans le réacteur et sont soumis à l'extérieur de celui-ci à un traitement visant à extraire le Tritium présent sous forme dissoute. Dans le cas de la Fusion Inertielle, ces liquides sont aussi le fluide caloporteur; dans le cas de la Fusion Magnétique, nous avons vu qu'un autre fluide et un autre circuit sont souhaitables pour assurer le transport de la chaleur.

Les matériaux tritigènes solides (donc sans effet MHD) sont l'oxyde de Lithium (Li_2O) et différents composés ternaires tels que le Silicate ou le Titanate de Lithium. Ces matériaux sont élaborés en pastilles ou en billes et l'extraction du Tritium est faite par la circulation d'un gaz qui vient lécher le matériau et transporte le Tritium à l'extérieur. Un circuit distinct, à fort débit, évacue la chaleur.

La présence d'un matériau tritigène dans le flux neutronique ne suffit pas à elle seule à assurer une production convenable de Tritium. En effet, la réaction d'un atome de Tritium ($\text{D} + \text{T}$) ne produit qu'un neutron et la réaction de ce neutron sur le Lithium ne produit qu'un atome de Tritium; des pertes de neutrons étant inévitables on ne peut, dans ces conditions, produire suffisamment de Tritium. Pour pallier cet inconvénient, on introduit dans la couverture un multiplicateur de neutrons qui par ses réactions $n, 2n$ permet cette fois un bilan convenable, c'est-à-dire légèrement excédentaire. Ce rôle de multiplicateur est joué par le plomb (dans l'eutectique LiPb) ou par le béryllium, que ce dernier soit un constituant du matériau tritigène (Flibe) ou qu'il lui soit associé sous forme de billes ou de plaques dans le cas des matériaux tritigènes solides.

Pour couvrir au mieux un tore, on peut concevoir des éléments adoptant une forme verticale donc relativement étroite et épousant au mieux la circonférence du cercle. Afin de permettre une maintenance verticale, seule une demi-circonférence est couverte par l'objet qui adopte une forme de "banane". Ces objets sont multipliés en nombre suffisant sur la partie interne et externe du tore (à chaque fois deux demi-circonférences) pour le couvrir complètement. On dispose alors d'un ensemble d'éléments de couverture qui sont tels qu'à l'intérieur de chacun d'entre eux circule lentement l'eutectique Lithium-Plomb et circule aussi, dans des tubes appropriés, l'eau de refroidissement. (figure ci-contre)



Pour les couvertures faites avec un matériau tritigène solide, la forme générale est la même mais la disposition du milieu fertile est évidemment différente. On trouvera par exemple des pastilles de matériau fertile empilées avec des blocs de Béryllium, ou des lits de billes mixtes constitués de matériaux tritigène et de Béryllium. Dans tous les cas, il existe dans ces couvertures deux circulations distinctes: une pour le fluide de refroidissement et une pour un gaz de purge qui lèche directement le matériau tritigène afin d'assurer le transport du Tritium.

Tous les grands concepts de couverture évoqués ci-dessus ont fait l'objet d'études ciblées et relativement approfondies. Les calculs neutroniques effectués montrent qu'il est possible dans tous les concepts évoqués de produire une quantité de tritium suffisante c'est à dire légèrement supérieure à celle brûlée par la réaction de fusion.

Le temps de vie des couvertures et de la première paroi est limité, ne serait ce qu'en raison des effets de l'irradiation des structures par les neutrons. Il est donc nécessaire de prévoir le remplacement de ces composants internes au cours de la vie du réacteur. Ces opérations doivent être effectuées en téléopération par des robots.

Des opérations similaires télécommandées de démontage et remontage de composants internes ont déjà été effectuées avec succès sur le JET ce qui en démontre la faisabilité, mais il faut être conscient que l'extrapolation au réacteur va nécessiter des développements importants en raison de la masse des composants et du souhait de minimiser le temps imparti à la maintenance.

2. LES DÉFIS TECHNOLOGIQUES

En parallèle avec les études sur la connaissance et le contrôle du plasma de nombreux progrès technologiques seront nécessaires en vue d'ouvrir la voie à l'énergie de fusion. Comme il est impossible d'en faire une liste exhaustive, il nous a néanmoins semblé intéressant de présenter deux objets qui sont alors tout à la fois caractéristiques et vitaux pour la fusion contrôlée par confinement magnétique: le système d'aimants et le système d'extraction des cendres appelé Divertor.

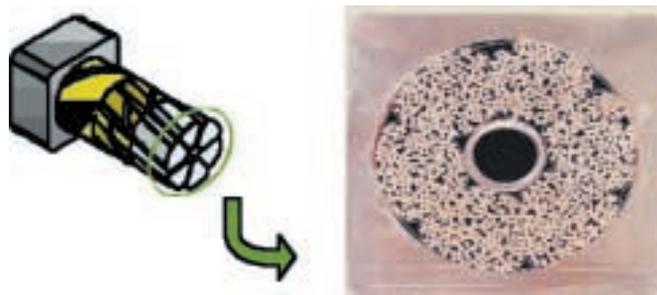
LES AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

Pour créer les champs magnétiques nécessaires au fonctionnement du réacteur, on utilise des bobinages où circule du courant électrique : courant constant pour le bobinage toroïdal et courant variable pour les bobinages poloïdaux. Les courants qui parcourent ces bobinages sont de forte intensité et posent donc un problème de consommation d'énergie électrique. Pour un réacteur en fonctionnement permanent, on peut montrer que l'utilisation de moyens classiques (bobines en cuivre refroidies à l'eau) grève sévèrement le bilan énergétique global : il convient donc d'utiliser des bobinages supraconducteurs. Pour ces bobinages sans perte, la consommation électrique se réduit à celle du réfrigérateur qui maintient les bobinages en froid (4 K). Depuis longtemps, de tels bobinages existent, non seulement au laboratoire mais aussi dans l'industrie (imagerie médicale). En conséquence, nous ne nous attarderons ici que sur les deux grandes spécificités de l'usage de ces bobinages dans le cadre de la Fusion, à savoir, la taille et l'emploi de champs variables.

Examinons tout d'abord les effets de taille et leurs conséquences. En prenant le projet ITER comme base nous disposons d'indications précises sur ce que pourraient être les aimants d'un réacteur. Chacune des 20 bobines de l'aimant toroïdal à la forme d'un "D" de 18 mètres de haut et 12 mètres de large, la partie droite du D étant tournée vers l'axe de la configuration. Ces bobines créent un champ magnétique de 6 Tesla sur un cercle centré sur l'axe de la configuration et ayant un rayon de 8 mètres. De ces quelques chiffres on déduit aisément (Théorème d'Ampère) que le courant total porté par chacune des bobines est de l'ordre de 10 mégaampère (réalisés par 200 tours d'un câble où circulent 60 kA).

Une première constatation résulte de ces quelques données: les efforts s'exerçant sur les bobines vont être tout à fait considérables et s'évaluer en centaines de méganewtons. Pour illustrer ces efforts, on retiendra deux chiffres. Tout d'abord sur chaque bobine s'exerce une résultante centripète (force de centrage) de l'ordre de 700 méganewtons. Par ailleurs, si l'on évalue la force verticale de tension qui s'exerce sur une demi-bobine (bobine coupée par le plan équatorial) on trouve des valeurs aux environs de 400 MN.

Un autre effet directement lié à la valeur du champ magnétique et au volume embrassé par les bobines, est l'énergie ainsi stockée: elle atteint pour l'ensemble de l'aimant toroïdal la valeur de 100 gigajoule. Il est bien évident que des précautions sont prises tout au long de la construction pour assurer la stabilité du bobinage, mais de plus, un système très sûr de protection agit pendant le fonctionnement de l'aimant. Il s'agit là d'éviter la destruction du bobinage lors d'un passage inopiné de l'état supraconducteur à l'état résistif. Ce



Câble supraconducteur 42kA

phénomène s'appelle la "transition" du bobinage, et peut être dû à une surchauffe locale.

Voyons maintenant un peu plus en détail le dessin de ce composant (figure ci après). Le brin élémentaire est essentiellement constitué de filaments (diamètre de quelques microns) de matériau supraconducteur (NbSn_3) noyés dans une matrice de cuivre, le tout ayant un diamètre un peu inférieur au millimètre. A partir de ce brin, on constitue un câble. Un premier ensemble de 3 brins est torsadé puis, suivant l'étage considéré, de 3 à 6 des constituants de l'étage inférieur sont également torsadés pour obtenir les constituants de l'étage en cours. Le procédé est repris sur 5 étages, le câble est donc lui-même composé de plus de 1000 brins élémentaires placés selon une architecture précise. Le câble ainsi obtenu est placé dans une gaine en acier destinée à tenir les efforts mécaniques. De l'hélium liquide circule à l'intérieur de la gaine et baigne le câble et l'ensemble du système magnétique est placé dans un énorme cryostat.

La réalisation du conducteur est relativement complexe et suppose d'autres étapes non décrites ici en vue d'assurer l'obtention des propriétés supraconductrices (traitement thermique) et d'une bonne stabilité (introduction de brins en cuivre). Des études très détaillées ont été effectuées pour le projet ITER, et la faisabilité industrielle est en cours de démonstration via la construction de maquettes représentatives.

LE DIVERTOR

La problématique

Toutes les particules chargées qui sont présentes dans le plasma subissent un effet de confinement dû au champ magnétique. En conséquence, si rien n'est fait, la concentration des ions Hélium au sein du plasma augmente au rythme de la combustion. Cet effet doit être limité, car non seulement on dilue le combustible, mais aussi, on augmente les pertes par rayonnement.

Un dispositif particulier est donc indispensable au bon fonctionnement du confinement magnétique. Ce dispositif appelé Divertor gère l'extraction en continu des cendres de la réaction et, par-là même, maintient leur concentration dans le milieu réactif, à un niveau acceptable.

Le principe

En partant de l'axe magnétique, on a tout d'abord des surfaces magnétiques emboîtées et fermées: c'est là qu'est assuré le confinement. En s'approchant de la paroi, on rencontre une première surface (la séparatrice) qui est ouverte et s'étend en deux branches vers le dispositif physique appelé Divertor. Au-delà de cette séparatrice, toutes les surfaces magnétiques sont ouvertes et atteignent la paroi. Cette configuration magnétique est obtenue par une disposition et une utilisation convenables des bobines poloïdales.

Le principe de fonctionnement est le suivant: une particule tout d'abord confinée près de l'axe magnétique s'éloigne lentement par diffusion pour atteindre la séparatrice ou une surface ouverte qui lui est proche. A partir de ce moment, en très peu de temps, en se déplaçant sur cette surface, elle va rencontrer la paroi du Divertor. Là, elle se neutralise et peut donc être extraite par des pompes qui vident en permanence cette zone.

On peut observer deux conséquences directes de ce principe. En premier lieu, comme le Divertor n'est pas sélectif, il s'agit d'un renouvellement global du plasma. En particulier, l'Hélium sera trié en aval du Divertor et le combustible imbrûlé devra être réinjecté depuis l'extérieur. En second lieu, les particules qui heurtent le Divertor y abandonnent leur énergie; ainsi le Divertor extrait non seulement les particules, mais participe aussi à l'extraction de la chaleur.

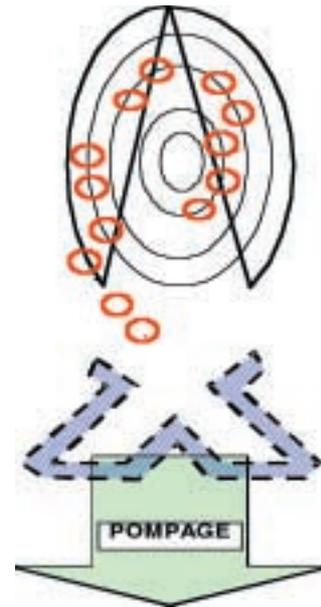


Schéma de principe d'un divertor en coupe méridienne

La réalisation

La réalisation du Divertor pose avant tout un problème d'ordre technologique lié à l'évacuation de la chaleur. Les écoulements de particules le long des deux branches de la séparatrice représentent un véritable dard thermique. Le dépôt d'énergie sur les surfaces rencontrées pourrait atteindre plusieurs dizaines de mégawatt par m^2 si rien d'autre n'était fait. Le Divertor ne se limitera donc pas à la description magnétique qui en a été donnée ci-dessus. Il faut lui adjoindre une injection locale d'impureté (Néon, Argon, etc.) qui, en augmentant le rayonnement dans cette zone, répartira la puissance à extraire sur une surface plus grande sans pour autant perturber le plasma dans la zone de confinement. Cette utilisation du Divertor, évidemment plus complexe, ramène la charge thermique maximale environ 5 MW par m^2 . Cette valeur est importante mais peut être traitée par un choix adéquat de matériaux et de moyens de refroidissement tels que cela a déjà pu être montré sur quelques éléments internes de Tokamaks actuels.

En conclusion, redisons d'abord que le Divertor est un objet d'études. La difficulté de modéliser les phénomènes complexes qui gouvernent le bord du plasma et son rapport à la paroi, implique une expérimentation dans des conditions représentatives. Dans l'optique réacteur il faudra par ailleurs satisfaire des objectifs de durée de vie et de fiabilité bien au delà des conditions présentes.

3. LES ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES

Se voulant une source d'énergie, la Fusion se doit de s'intéresser à la sûreté des réacteurs qui seront construits ainsi qu'au prix des kWh qui seront produits. Ces préoccupations, qui peuvent paraître lointaines, ne motivent pas seulement les laboratoires de Fusion car il y a là des éléments de réflexion qui interviennent dans les décisions, bien actuelles, à propos du soutien à apporter à cette recherche. C'est ainsi que ce

paragraphe s'appuie sur plusieurs études commanditées par la Commission de l'Union Européenne et destinées à évaluer l'intérêt potentiel de la Fusion comme source d'énergie.

Pour illustrer notre propos on se basera essentiellement sur une des images de réacteur étudiées dans le cadre européen (SEAFP: Safety and Environmental Assessment of Fusion Power) qui utilise des couvertures que nous avons déjà présentés comportant de l'acier à activation réduite, de l'alliage Lithium Plomb et de l'eau comme fluide caloporteur.

Examinons tout d'abord les aspects de **sûreté** après quoi nous aborderons les considérations économiques.

Les lignes qui suivent, considèrent évidemment toutes les situations où sont engagées des considérations de sûreté radiologique. Les autres aspects (sûreté électrique etc.) sont sans spécificité particulière dans le domaine de la Fusion.

LE FONCTIONNEMENT NORMAL ET ACCIDENTEL

Dans le fonctionnement normal on considère essentiellement, pour le public et les travailleurs, le confinement des produits toxiques dont l'emploi est indispensable ou inévitable. Les corps concernés pour la Fusion sont les traces de Tritium et les traces de produits radioactifs que l'on trouve dans les liquides et les gaz circulant dans le réacteur (réfrigération, ventilation, caloporteur, etc.). Le Tritium est effectivement un corps très mobile qui diffuse aisément. Les produits résultant de l'activation des différents éléments de structure sont eux mobilisés par les phénomènes de corrosion et entraînés par les différents fluides circulant.

D'une façon assez globale, on peut dire que l'on a déjà une grande expérience de la gestion du tritium. Cette expérience est d'abord une expérience industrielle acquise dans l'exploitation des réacteurs de type CANDU (ces réacteurs sont aussi fournisseurs de tritium). Mais, on dispose également d'une expérience dans le domaine de la Fusion grâce à des installations dédiées à ces études ou à des installations (JET, TFTR) ayant réellement manipulé des plasmas de Tritium. En particulier, tous les éléments de procédé tels que le stockage, la purification, la séparation Hydrogène/Deutérium/Tritium ont été étudiés à des débits typiques du réacteur (expérience TSTA aux USA).

Pour les produits d'activation, une bonne chimie de l'eau est indispensable pour la protection des travailleurs du site. Cette chimie anticorrosion relève de pratiques industrielles connues.

Le fonctionnement normal ne pose donc pas de problèmes particuliers et les normes imposées à tous seront évidemment respectées par la Fusion. Ajoutons que dans l'ensemble de ces études on considère toujours, non pas les normes actuelles, mais des normes plus restrictives telles qu'on peut les imaginer pour le futur.

Si maintenant l'on aborde le traitement des situations accidentelles, deux constatations doivent être faites en guise d'introduction. Tout d'abord on a vu plus haut que parmi les conditions d'entretien des réactions de Fusion figurait une nécessaire pureté du plasma au risque sinon, de voir le milieu réactif se refroidir très rapidement. Ainsi, tout incident qui vaporiserait un corps quelconque dans la chambre de réaction aurait pour effet immédiat d'éteindre les réactions en cours et ce, même si les quantités vaporisées étaient très faibles. Deuxième considération importante: la masse de combustible présente à tout instant, n'autorise pas un fonctionnement du réacteur pendant une durée supérieure à une minute. Là aussi, des raisons intrinsèques limitent singulièrement le réservoir d'énergie susceptible de se disperser.

Des analyses aussi détaillées que possible des inventaires énergétiques, des accidents susceptibles de se produire et des conséquences attendues ont été entreprises. Il résulte de ces travaux qu'il n'y a pas de séquence accidentelle qui puisse mettre en jeu l'intégrité du réacteur. Même en cas d'accident grave, l'évacuation de la population autour du site n'est pas nécessaire.

LES DÉCHETS

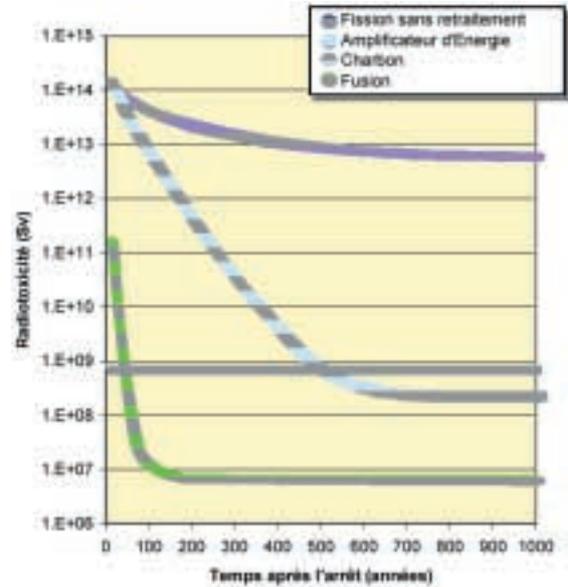
En partant des mêmes images de réacteur que précédemment, on a évalué l'importance des déchets engendrés par le fonctionnement courant de l'installation et par le démantèlement final.

Deux aspects émergent de toutes ces études: la masse des déchets produits est importante et la radiotoxicité globale est faible, à terme.

Pour une puissance donnée, la taille de l'installation et donc les volumes et les masses de béton, d'acier de cuve, etc., sont supérieurs à ceux que l'on trouve pour les réacteurs des sources d'énergie actuelles. Ainsi, la masse totale des déchets actifs (quelle que soit cette activité) se situe entre 60.000 tonnes et 90.000 tonnes; à ces masses de déchets correspondrait un volume de stockage de l'ordre de 40.000 m³.

Avec un choix approprié des matériaux de structure, comme des aciers à faible activation il n'y a pas nécessité d'envisager un stockage profond.

Afin d'illustrer le deuxième aspect important, celui touchant à la radiotoxicité globale, est présenté sur la figure page suivante une comparaison avec une source d'énergie très utilisée, le charbon. En abscisse on trouve le temps après fermeture et en ordonnée la radiotoxicité totale en unité arbitraire. Les résultats sont ceux des deux modèles de la Fusion et d'une centrale à charbon ayant produit le même nombre de kilowatt-heure (les cendres de charbon contiennent de faibles quantités d'Uranium, de Thorium et de leurs descendants). Les deux grandes voies de contamination sont considérées, l'ingestion et l'inhalation. La Fusion bénéficie évidemment ici du fait que sa cendre, l'Hélium, est complètement inerte. Cet avantage est convenablement exploité grâce à l'utilisation de matériaux peu activables. Les hypothèses de tous ces calculs étant plutôt restrictives (exemple: concentration des impuretés dans les matériaux) on peut dire en conclusion que les déchets de la Fusion ne représenteront pas une charge pour les générations futures.



Radiotoxicité comparée de différentes filières énergétiques

LES COÛTS

Il peut paraître tout à fait prématuré d'évoquer les coûts de production du kilowatt-heure d'une source d'énergie qui est encore à plusieurs dizaines d'années de sa commercialisation. On se doit donc de préciser quel est le but pratique de telles études.

Le premier intérêt de ces études est de mettre en évidence l'impact de telle variable physique ou de telle hypothèse de réalisation technologique sur les coûts. Ces résultats qui fixent les ordres de grandeurs relatifs et les sens de variations, ont évidemment une influence directe sur la stratégie de développement. Le deuxième intérêt est, évidemment avec toute la prudence requise, de vérifier que le dispositif proposé n'est pas sans rapport avec le marché.

Avant d'aller plus loin, disons aussi un mot de la validité de ces évaluations. Les modèles économiques employés sont dans le prolongement direct des modèles employés pour la conception, l'optimisation et le calcul des coûts des machines actuelles. Ces modèles sont d'autre part appuyés, pour la Fusion Magnétique, sur les coûts avancés pour le projet ITER. Redisons que, sous beaucoup d'aspects, ce projet est voisin du réacteur mais surtout redisons que les coûts prévus ont été directement déterminés par les industriels concernés en Europe, au Japon, en Russie et aux Etats-Unis. On dispose ainsi d'une base solide d'évaluation

et pour en revenir au kilowatt-heure, les incertitudes qui restent sont certes importantes mais portent plus sur la disponibilité du réacteur que sur le coût direct de ses composants.

STRUCTURE DES COÛTS ET COMPARAISONS ÉLÉMENTAIRES

Avec un prix du Deutérium aux environs de 4000 \$ le kilogramme (le Lithium est beaucoup moins cher) et une consommation quotidienne de 500 g par jour pour un réacteur de 1000 MWe, le coût du combustible intervient pour moins de 1% dans le coût total du kilowatt-heure. Le coût de l'énergie produite par un réacteur à fusion est donc déterminé par la hauteur des investissements initiaux auxquels s'ajoutent les coûts de remplacement régulier des composants vieillis.

Ils le placent entre le coût de l'éolien off-shore et le coût de la production photovoltaïque. Etant entendu que pour ces deux dernières sources, les évaluations sont faites sans prendre en compte le coût du stockage de l'énergie.

On retiendra de ces études deux résultats. Tout d'abord, et contrairement à ce qui a été parfois avancé, les coûts de production de la Fusion ne sont pas de nature à obérer ipso facto son avenir. Enfin, et il s'agit d'un résultat attendu, la Fusion sera une source d'énergie pour laquelle les investissements (et donc la disponibilité de l'installation) auront un poids très important..

IMPACT ÉCOLOGIQUE ET COÛTS EXTERNES

L'étude précédente a examiné les coûts directs (équipements, maintenance, combustible, etc.), de la production d'énergie. Cette étude doit être complétée, comme pour toute forme de production d'énergie, par l'examen et le chiffrage des impacts divers (santé humaine, écosystème, etc.) que l'emploi de cette source peut entraîner. Ces coûts, non pris en compte dans la transaction fournisseur-consommateur, sont appelés coûts externes. Depuis la prise de conscience de phénomènes comme les pluies acides, on s'est appliqué dans tous les pays à inventorier et à chiffrer les impacts de la production d'énergie. En Europe particulièrement une grande étude (étude ExternE) a été conduite de 1991 à 1998 pour évaluer au mieux les coûts externes des différentes sources (charbon, pétrole fission, etc.). Cette étude qui examinait en détail les sources disponibles n'a évidemment pas traité de la Fusion. Par contre, elle a fourni et validé une méthode générale qui permet de procéder pour la Fusion à cette évaluation sur l'ensemble du cycle de vie d'un réacteur. On utilisera aussi les résultats de cette étude comme base de comparaison.

Les grandes hypothèses qui ont été faites pour la Fusion sont les suivantes:

- Le site d'implantation du réacteur est un site à forte densité de population déjà utilisé dans ExternE pour d'autres études (ce qui facilite les comparaisons).
- Les modèles de réacteurs retenus sont les réacteurs déjà cités dans les études de sûreté. Leur construction utilise des sources d'énergie conventionnelles (charbon, etc.) donc relativement polluantes.
- Le Deutérium est tiré de l'eau de mer.
- Les accidents possibles et le démantèlement sont pris en compte.

Le résultat brut est que, rapporté au kilowatt-heure produit, les coûts externes de la Fusion sont de l'ordre de 1 milli-euro. Pour apprécier ce résultat on rappellera trois chiffres :

- Le coût direct de production du kwh est aujourd'hui aux environs de 30 millieuros
- Les coûts externes de la production à partir du charbon se situent au delà de 20 millieuro par kilowatt*heure
- Les coûts externes de la production photovoltaïque hors stockage et hors structure de support dépassent sensiblement 1 millieuro.

Ces études sont relativement complexes et de toutes façons, pour ce qui est de la Fusion, très préliminaires encore; la prudence s'impose donc. Néanmoins, on notera que l'on retrouve bien là sous forme de "coûts externes" l'effet des grandes propriétés de la Fusion qui font l'intérêt particulier de cette source d'énergie.

4. CONCLUSION

Les qualités de l'énergie de Fusion sont nombreuses. C'est une source d'énergie quasiment illimitée, ne produisant ni effet de serre, ni pollution environnementale ni déchet radioactif constituant une charge pour les générations futures et présentant des avantages indéniables en terme de sûreté.

Les recherches sur la Fusion ont atteint aujourd'hui un stade critique. Nos connaissances montrent qu'une expérience physique importante est nécessaire pour assurer la validation du concept et que cette expérience doit être accompagnée par un effort de développement technologique certes important mais loin d'être inaccessible.

La période 1950-2050 sera le siècle d'une consommation sans précédent des ressources énergétiques naturelles; sera-t-elle aussi la période où s'ouvrira pour longtemps une ressource nouvelle abondante et sûre?

Références

Physique des Plasmas (1994); **J.-L. Delcroix et A. Bers**; Inter Edition et CNRS Editions.
La Fusion thermonucléaire Contrôlée par Confinement Magnétique (1987); Collection CEA - MASSON.
Etude ExternE: <http://externe.jrc.es/>

Les plasmas dans notre vie quotidienne

L'IMPERMÉABILITÉ DES ANORAKS

*Christoph Hollenstein, collaborateur scientifique du
Centre de recherches en physique des plasmas*

Si votre anorak vous protège efficacement contre l'humidité, c'est grâce à l'utilisation des plasmas dans l'industrie textile. Tubes néons, écrans d'ordinateurs, carrosseries de voitures, cartons d'emballage: parce qu'ils ont le pouvoir de changer la structure de la matière, les plasmas façonnent notre vie quotidienne.

Le plasma est souvent désigné comme le quatrième état de la matière. Soumise à une source de chaleur, celle-ci commence par se liquéfier, puis elle passe à l'état gazeux et devient finalement un plasma. L'apport d'énergie cinétique aux matières gazeuses conduit dans un premier temps à la dissociation des molécules neutres, avant de provoquer une ionisation des atomes et des molécules. Ce processus aboutit à la formation d'un mélange de molécules neutres, d'atomes, de ions chargés positivement et négativement, et d'électrons. Ce matériau hétéroclite est appelé plasma.

Le plasma est l'état le plus répandu à l'échelle de l'univers. En revanche, il n'apparaît sur Terre que dans de rares états naturels, sous des formes et des intensités très diverses. Les plasmas naturels les plus fréquents et les plus visibles sont les éclairs, tels qu'on les observe pendant les orages, ou les étincelles de décharges électriques. On peut y ajouter les aurores boréales et australes, phénomènes complexes qui se déroulent en altitude aux pôles, ainsi que les flammes.

UTILE

Il est donc possible d'observer les manifestations directes du plasma. On peut aussi utiliser ses effets. C'est le cas des ondes radioélectriques, qui sont réfléchies par le plasma faiblement ionisé présent dans les couches supérieures de l'atmosphère. Mais le type de plasma le plus aisément observable depuis la Terre est le Soleil, notre source d'énergie naturelle.

Cette simple énumération témoigne de la diversité des plasmas naturels. Elle n'en donne toutefois qu'un faible aperçu. Il existe en fait d'innombrables manifestations et formes de plasmas, permettant de multiples usages de ce matériau au profit de l'homme. Les différentes applications peuvent être décrites au moyen de deux grandeurs: le nombre des porteurs de charges positives et négatives par unité de volume dans le plasma d'une part, la température d'autre part. Ce qui correspond à l'énergie cinétique moyenne des différents composants du plasma d'autre part. Ces deux grandeurs peuvent varier de plusieurs puissances dix. Pour s'en convaincre, il suffit de comparer le plasma solaire très chaud et dense avec le plasma froid et ténu des nuages interstellaires.



Padex, expérience de déposition par UHF

ARTIFICIELS

La diversité des plasmas et de leurs particularités physiques et chimiques se reflète dans le grand nombre des méthodes disponibles pour produire de manière artificielle des plasmas destinés à la recherche et à des applications industrielles. La majorité des procédés de fabrication reposent sur les multiples décharges électriques qui se déroulent sous pression atmosphérique réduite (vacuum).

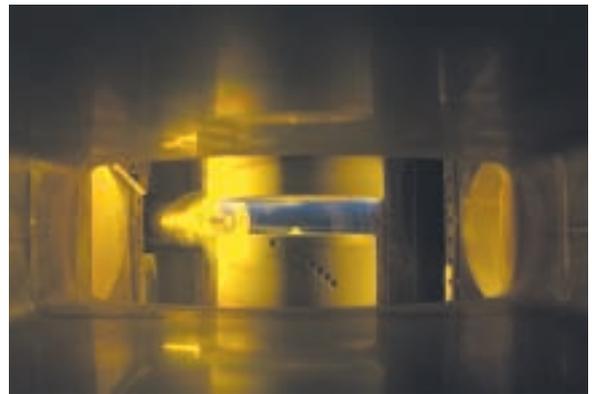
La décharge lumineuse, aussi appelée effluve électrique, constitue la méthode de production de plasmas la plus simple. Il s'agit d'établir une tension continue suffisamment élevée entre deux électrodes métalliques. Un "électron aléatoire", par exemple issu du rayonnement cosmique, est accéléré dans le champ électrique résultant de cette tension et crée des impacts ionisants avec des atomes. Il se produit ainsi une multiplication d'électrons entraînant la formation d'une réaction en chaîne.

Tout ceci conduit finalement à une rupture électrique, au cours de laquelle un courant continu s'établit entre les électrodes. Selon les conditions d'exploitation, on parvient à produire ainsi une décharge lumineuse, un arc à haute intensité ou un plasma. L'art d'utiliser les plasmas résulte essentiellement du choix des formes de décharge, effectué en fonction des particularités des plasmas recherchés.

DOMINANT

Depuis l'introduction des procédés par plasma dans la microélectronique, vers la fin des années 60, les applications se sont étendues à la quasi totalité des technologies importantes, à commencer par le industries automobile, aéronautique et de l'emballage. Près de la moitié des processus dans le domaine des semi-conducteurs utilisent des plasmas. C'est notamment le cas des opérations de gravure, telle l'application des couches résistives de polymères destinées à la lithographie sur les puces, ou le dépôt de différentes couches minces à des fins d'isolation.

L'éventail de ces utilisations permet de mesurer l'importance du marché qui s'ouvre aux technologies à plasma, notamment dans le domaine de l'équipement. Pourrait-on imaginer une société moderne sans les éclairages fluorescents? Les tubes néon sont aujourd'hui omniprésents. Mais on ignore bien souvent qu'un plasma est la source de diffusion de la lumière. Le rayonnement de ces lampes provient des deux lignes de résonance du mercure situées dans les ultraviolets du spectre, et qui sont excitées dans un plasma de néon. Les substances photoluminescentes, en tant que transformateurs de lumière, ont pour tâche d'absorber le plus complètement possible les photons ultraviolets et de les métamorphoser en rayonnement visible.



Décharge dans le silane, dépôt de silicium amorphe et production de poudres

TEXTILES SOUS INFLUENCE

Le traitement des surfaces est au autre domaine d'application des plasmas. Il s'agit de modifier de manière ciblée la composition et la structure de chaînes moléculaires à la surface des matériaux en interaction avec des plasmas. Cette possibilité est largement utilisée pour changer la texture superficielle des textiles et des polymères.

A l'aide de plasmas, il devient possible de conférer un comportement hydrophobe à des fibres textiles, ce qui permet de fabriquer des vêtements qui offrent une protection efficace contre la pluie et l'humidité. En enrichissant la couche marginale du silicium ou du fluor à l'aide de plasmas, on parvient à améliorer l'hydrophobie des textiles.

La modification des surfaces de polymères au moyen de plasmas a débouché sur la création de matériaux qui font également partie de notre vie quotidienne: les polyéthylènes, les PET ou les polyamines, pour n'en citer que les plus connus. Il est possible, à l'aide de plasmas réactifs, de produire des groupes polaires fonctionnels sur les surfaces de polymères qui peuvent entraîner une augmentation considérable de l'énergie de surface libre.

BIOCOMPATIBLES

Il est possible de renforcer l'adhésion entre une couche métallique et un polymère au moyen de plasmas d'air ou oxydant. Ils permettent également d'améliorer la qualité d'impression et des couleurs sur les étoffes. Les efforts de recherche actuels portent notamment sur l'amélioration des biocompatibilités des polymères.

Parmi les autres usages généralisés des plasmas figure le traitement des surfaces des nouveaux pare-chocs de voitures en matières plastiques afin de pouvoir les colorer. Toujours dans l'industrie automobile, les réservoirs à essence en matières synthétiques sont dotés de couches de protection déposées par plasma destinées à réduire, voire à supprimer la perméabilité aux vapeurs d'essence.



Installation d'implantation de couches de diamant

L'implantation par plasma est une autre application importante pour l'industrie. Dans ce domaine, les plasmas permettent de créer des produits de haute technologie, mais aussi des articles de consommation courante. La précipitation de couches dures sur des outils en est un exemple saisissant, à l'exemple des fines couches de diamants artificiels qui permettent d'accroître considérablement la durée de vie d'une perceuse. Il en résulte aussi un avantage pour l'environnement dans la mesure où l'on peut travailler à sec, sans injection d'eau et d'huile pour empêcher les mèches de surchauffer.

LES CD AUSSI

L'industrie de l'emballage recourt également aux plasmas pour améliorer les matériaux. Les polymères compatibles avec l'environnement que l'on pourrait utiliser dans ce secteur sont toutefois perméables aux gaz. Pour réduire cette perméabilité, on recouvre les feuilles de plastique d'une couche de quartz ultra fine (SiO_2) à l'aide de plasmas. Cette opération est réalisée au moyen de réacteurs à plasma qui appliquent une couche de quartz sur de grandes surfaces en un temps réduit.

Le dépôt de silicium amorphe ou microcristallin, la production de matériaux de base pour les cellules photovoltaïques à couche mince ou les écrans d'ordinateur plats, sont d'autres exemples de réalisations rendues possibles par le recours aux plasmas, tout comme la fabrication des compact disques. Pour accroître leur potentiel industriel, les chercheurs s'efforcent aujourd'hui d'optimiser les processus par plasma, en améliorant par exemple la qualité de la déposition et en augmentant simultanément leur pouvoir séparateur.

PULVÉRISATEURS

La projection de couches infimes, de l'ordre du micromètre au millimètre, joue un rôle dans les industries aéronautiques et automobiles. Cette technique se distingue fondamentalement des couchages mentionnés plus haut, caractérisés par une interaction chimique et plasmatique complexe.

On utilise à cet effet des pistolets pulvérisateurs au plasma. Des poudres de l'ordre du micromètre sont ajoutées au plasma injecté. Elles fondent sous l'effet de la chaleur du plasma et finissent par se figer sous forme de couche de protection sur le matériau traité. Cette méthode est notamment utilisée pour l'isolation thermique des chambres de combustion.

Les plasmas ont fait une entrée remarquable dans le secteur médical également. On les utilise pour enduire les implants de substances tolérées par les organismes vivants, en particulier les prothèses osseuses artificielles. En outre, les méthodes de pulvérisation de plasma sont mises en œuvre dans l'industrie aéronautique, notamment pour recouvrir ou réparer les aubes des turbines. Au moins la moitié des réacteurs d'avion en service ont été traités une fois ou l'autre avec des plasmas.



Torche à plasma pour déposition par pulvérisation

NETTOYAGES

L'élimination des CFC pour des raisons de protection de l'environnement offrira de nouvelles opportunités dans le secteur du nettoyage industriel. Les plasmas y sont d'ores et déjà utilisés, comme d'ailleurs dans certaines techniques de destruction de déchets toxiques. Ces applications font actuellement l'objet de recherches et développements particulièrement prometteurs.

La technologie des plasmas est bien implantée en Suisse. Plusieurs entreprises se sont spécialisées dans la production d'objets d'équipement et dans les techniques de pulvérisation de couches minces. L'avenir de ce secteur sera marqué par l'avènement de la simulation numérique et par le développement des méthodes de diagnostic des plasmas.

