

# Le foyer de plasma nous transporte au cœur de la matière

*La fusion thermonucléaire ne se limite pas aux tokamaks et aux faisceaux d'énergie dirigée (lasers ou faisceaux de particules) mis en œuvre dans le confinement inertiel.*

*D'autres machines, même si elles ne peuvent pas servir à la production d'électricité, offrent des perspectives intéressantes pour des applications spécifiques. C'est le cas de la machine à foyer de plasma, présentée ici.*

**B**ien qu'elle fût simple de conception, modeste en investissement requis et prolifique en résultats, la machine à foyer de plasma est longtemps restée dans les placards. Les grands laboratoires de recherche et développement et les principales autorités en matière de physique des plasmas l'évitaient comme la peste. Ce comportement peu scientifique s'expliquait probablement par la propension du foyer de plasma à produire des résultats bourrés d'anomalies, dont la caractéristique commune est de contredire l'opinion scientifique conventionnelle. En dépit de cette « exclusion » scientifique, le foyer de plasma a continué à progresser régulièrement dans de petits laboratoires de recherche et a atteint une maturité qui l'amène au bord de l'application technologique. Après l'avoir longtemps ignorée avec superbe, de nombreux instituts de recherche s'équipent ou financent des études.

Parmi les applications envisageables, on peut citer la génération de radio-isotopes à vie courte pour le diagnostic médical et biologique. En fait, les capacités démontrées du foyer à plasma sont telles qu'elles pourraient réduire le coût des diagnostics médicaux d'un ordre de grandeur. Cela permettrait de généraliser ce type de diagnostic à tous les grands cen-

**CHARLES STEVENS**

tres de soin, alors qu'ils restent encore aujourd'hui réservés à des institutions spécialisées. Une autre application, militaire, consisterait à engendrer par la machine à foyer de plasma des faisceaux de particules relativistes pour détruire les missiles intercontinentaux ainsi que les têtes nucléaires qu'ils emportent, à des distances de plusieurs milliers de kilomètres. Le troisième domaine d'application est de tester les matériaux et la technologie nécessaires à un réacteur de fusion thermonucléaire. Nous allons passer ici en revue le contexte scientifique général de la machine à foyer de plasma et quelques applications expérimentales. Nous explorerons aussi les premier et troisième domaines mentionnés ci-dessus.

## Le foyer de plasma : un transformateur à compression d'énergie

Ce qui fait la force de la machine à foyer de plasma, c'est sa capacité à fonctionner comme un dispositif idéal de compression et stockage

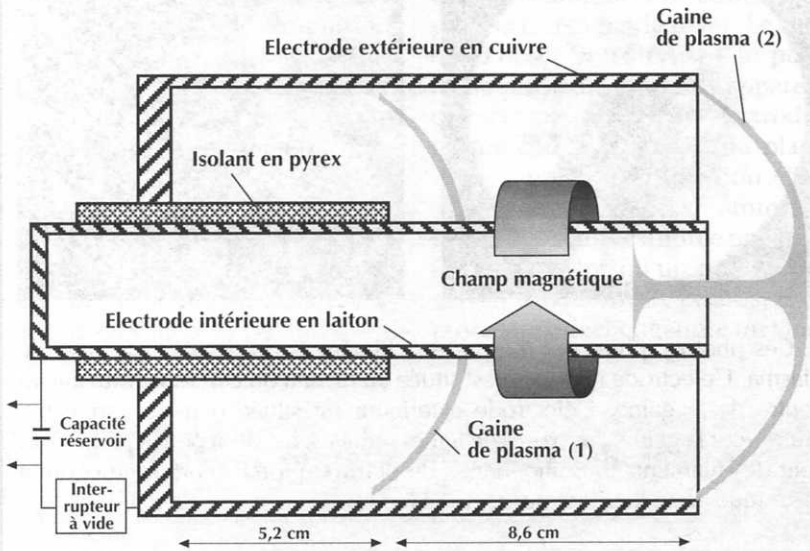
d'énergie, sans parties mobiles, à l'exception du plasma qu'elle engendre. Selon sa configuration initiale, le foyer de plasma peut engendrer des faisceaux à haute intensité énergétique d'amas d'ions, d'électrons, des micro-ondes, des rayons X ou des neutrons.

De façon générale, la compacité et l'adaptabilité du foyer de plasma tiennent à sa capacité à comprimer et à transformer l'énergie. La machine de laboratoire ressemble en peu à un gros tube radio. Elle se compose de deux électrodes en forme de cylindre étroit, l'une placée à l'intérieur de l'autre (**Figure 1**).

La puissance motrice du dispositif est liée à une impulsion de courant délivrée par un banc de condensateurs. Ces condensateurs peuvent être chargés en série sur le secteur. Une fois chargés, ils peuvent se décharger en un temps relativement court grâce à des commutateurs rapides qui reconfigurent le banc de montage série en montage parallèle. L'impulsion de courant compressée qui en résulte est alors délivrée à l'une des électrodes du foyer de plasma.

La chambre à vide dans laquelle sont placées les deux électrodes est généralement remplie de petites quantités d'hydrogène, quoique l'on puisse aussi utiliser des matériaux tels que l'oxygène, l'azote et le carbo-

**Figure 1 - Vue schématique en coupe du foyer de plasma**



Le foyer de plasma se compose de deux électrodes cylindriques, l'une placée à l'intérieur de l'autre. L'électrode extérieure en cuivre et l'électrode intérieure en laiton sont coaxiales, séparées par un isolant pyrex. L'ensemble est placé dans une enceinte à vide qui ne figure pas ici. Le banc de condensateurs délivre une impulsion de courant au foyer de plasma, ce qui entraîne la formation d'une gaine de plasma annulaire, près de la fin de l'isolant en (1). Cette gaine accélère en allant de gauche à droite et forme un pincement de plasma lorsqu'elle arrive au bout ouvert de la machine en (2).

Source : Winston H. Bostick, « The Morphology of the Electron », *International Journal of Fusion Energy*, Vol. 3, n° 1, Jan. 1986, p. 46.

ne. Pendant les quelques milliardièmes de seconde que met l'impulsion de courant pour arriver aux électrodes, il se crée un fort champ électrique entre les deux électrodes. Ce champ entraîne la décomposition du gaz de remplissage. Autrement dit, les électrons libres de ce gaz sont accélérés à des vitesses très élevées et provoquent, par collision, l'ionisation des molécules de gaz. En quelques milliardièmes de seconde, le gaz se transforme en plasma ionisé ; ceci se déroule à la fin du foyer de plasma, là où les deux électrodes sont mécaniquement connectées par l'intermédiaire d'une couche isolante.

## L'état de plasma

On qualifie parfois le plasma de « quatrième état de la matière » — le

solide, le liquide et le gazeux étant les trois premiers. Ces quatre états sont, le plus souvent et macroscopiquement parlant, électriquement neutres. Les plasmas se comportent parfois comme des solides, d'autres fois comme un fluide incompressible et parfois encore comme un gaz compressible. En fait, il serait plus juste de considérer les solides, les liquides et le gaz comme trois variétés particulières de plasma.

En général, les électrons et les noyaux qui composent les atomes et molécules sont séparés dans un plasma : ils sont dans un état ionisé. En d'autres termes, les atomes et les molécules qui sont les constituants élémentaires, relativement isolés du point de vue électromagnétique, d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz, sont cassés. Avec le plasma, les forces électrodynamiques à grande échelle l'emportent sur les liens chimiques à cour-

te distance et les interactions moléculaires qui caractérisent les solides, les liquides et les gaz. Cette interaction électrodynamique à grande échelle est la principale manifestation de l'état de plasma.

La question est donc : quels sont les constituants élémentaires d'un plasma ? La réponse des manuels de classe est d'habitude : des électrons, chargés négativement, et des ions chargés positivement — fragments des atomes et molécules qui étaient présents avant l'éclatement. Cependant, du fait des interactions électrodynamiques à grande échelle, on ne peut pas rendre compte localement de la dynamique et du mouvement de ces électrons et ions individuels. Au lieu des « constituants élémentaires », les plasmas engendrent des structures cohérentes non particulières : différents types d'ondes, de solitons, de vortex et de cellules de circulation. Au lieu des liens chimiques à courte distance et des interactions moléculaires de Van der Waals, les constituants du plasma sont maintenus par les champs électriques et magnétiques à longue portée du plasma.

Bien qu'elle rendit les plasmas beaucoup plus compliqués du point de vue théorique et expérimental, cette interaction à grande échelle dans le plasma le rend aussi plus fort, notamment parce qu'il est capable de supporter des densités énergétiques infiniment plus élevées. Avec les solides, par exemple, la résistance des matériaux est fondamentalement limitée par la résistance du lien chimique à courte distance. Si l'on applique alors un champ magnétique ou électrique (ou un stress mécanique) d'intensité suffisante, ces liens commencent à se détruire et le matériau connaît un effondrement structurel.

Dans le plasma, à l'inverse, ses constituants élémentaires sont tenus ensemble par les champs électrique et magnétique à longue portée. Ainsi, non seulement le plasma peut résister à l'application de champs électromagnétiques intenses mais ces champs peuvent même renforcer encore la force et la rigidité de ses structures. Grâce à ce phénomène, les plasmas sont capables de supporter des densités énergétiques illimitées, au regard de ce que peuvent endurer les solides et liquides ordinaires. Et, comme nous allons le voir avec la machine à foyer de plasma, les

plasmas se configurent naturellement en structures dynamiquement stables lorsqu'on leur applique un champ intense.

### Passer la limite d'Alfvén

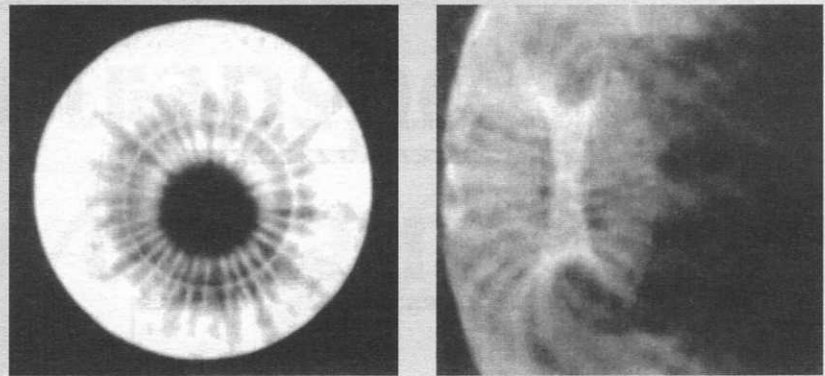
Revenons à la description du foyer de plasma. L'impulsion de courant produite par la décharge des condensateurs crée un champ électrique intense entre les deux électrodes cylindriques, le gaz de remplissage se décompose et forme un plasma au bout isolant du foyer. Ce plasma de décomposition a une forte conductivité électrique et permet donc le passage du courant entre les électrodes, grâce au champ électrique. En fait, comme on le montre en **figure 2**, il se forme une nappe annulaire de plasma conducteur entre les électrodes.

Pour comprendre comment le foyer de plasma comprime, stocke et transforme l'énergie qui lui est fournie, il est essentiel d'examiner cette gaine de plasma et les structures fines et microscopiques qu'elle forme. Il se passe à peu près ceci : le courant passant dans la gaine de plasma interagit avec le champ magnétique ambiant et produit une force qui accélère la gaine, la faisant aller du bout isolant du foyer vers l'autre bout ouvert. (Le champ magnétique ambiant est engendré par les flux de courant latéraux dans les électrodes cylindriques.)

Au fur et à mesure que la gaine de plasma est accélérée vers le bout ouvert, elle recueille davantage de matière en provenance du champ de remplissage. Elle absorbe aussi une partie significative du courant électrique qui passe à travers elle et stocke cette énergie sous forme de champs magnétiques intenses.

Une fois qu'elle atteint le bout ouvert des deux électrodes cylindriques, un pincement stationnaire de plasma est produit. Lorsque ce plasma comprimé se forme, l'énergie stockée sous forme magnétique se transforme en champs électriques intenses et en énergie cinétique des électrons et ions du plasma. De petits nodules de plasma dense se forment à l'intérieur du pincement. Ces nodules ont une densité énergétique des milliards de fois supérieure à celle du banc de condensateurs. D'inten-

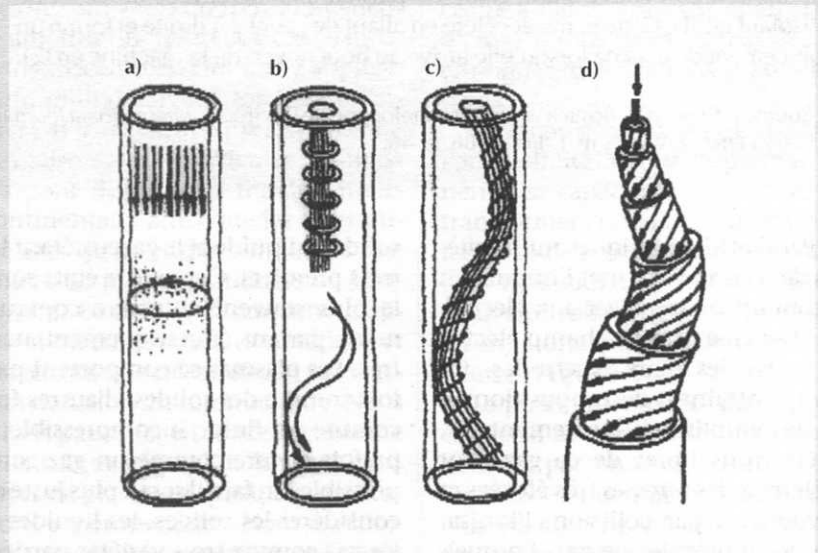
Figure 2 - La gaine de courant du foyer de plasma



Ces photographies ont été prises à l'intérieur du dispositif à foyer de plasma. L'électrode intérieure est située au niveau du cercle se trouvant au centre de la gaine. L'électrode extérieure est située dans le cercle qui circonscrit la gaine. Les paires de lignes radiales, que l'on peut à peine voir, sont des filaments tourbillonnaires de plasma qui transportent le courant électrique entre les électrodes.

Source : Winston Bostick.

Figure 3 - Courant dans une colonne de plasma



Les conditions initiales sont indiquées en a). Les flèches représentent le courant électrique et les points correspondent au gaz de plasma. Le champ magnétique azimuthal généré par le passage du courant électrique est figuré par un cercle et ces cercles (les lignes de champ magnétique) sont présents tout au long de la colonne.

L'effet de pincement est figuré en b), où le champ magnétique azimuthal a comprimé la colonne de plasma. Cette configuration initiale est instable et la colonne de plasma va être agitée par des mouvements magnétohydrodynamiques (c) pour se reconfigurer dans une configuration de Beltrami (d), dans laquelle les lignes de champ magnétique passent d'une direction axiale à une direction azimuthale, comme on l'explique dans la figure 4.

ses faisceaux relativistes d'électrons et d'ions sont engendrés, accompagnés de *bursts* de rayons X. La densité ambiante et la température sont suffisantes pour provoquer des réactions thermonucléaires.

En d'autres termes, le foyer de plasma *concentre* l'énergie de l'impulsion de courant initiale, à la fois dans le temps et dans l'espace. Il transforme cette énergie à des voltages beaucoup plus élevés. C'est l'émergence de structures hautement organisées dans le plasma, pouvant résister à des densités énergétiques des milliards de fois supérieures à celles qui limitent les matériaux ordinaires, qui permet cette concentration.

## Le pincement de plasma

Pour comprendre comment s'opère cette densification d'énergie, il faut examiner dans le détail la géométrie et la dynamique des structures de plasma créées par le foyer. Le mieux est d'observer comment le plasma passe plusieurs barrières apparentes dressées par la théorie électrodynamique conventionnelle du plasma. Par exemple, la conduction électrique par porteurs libres, comme dans le plasma, semble limitée par la limite d'Alfvén : lorsqu'un courant passe dans une colonne de plasma, le courant axial direct engendre un champ

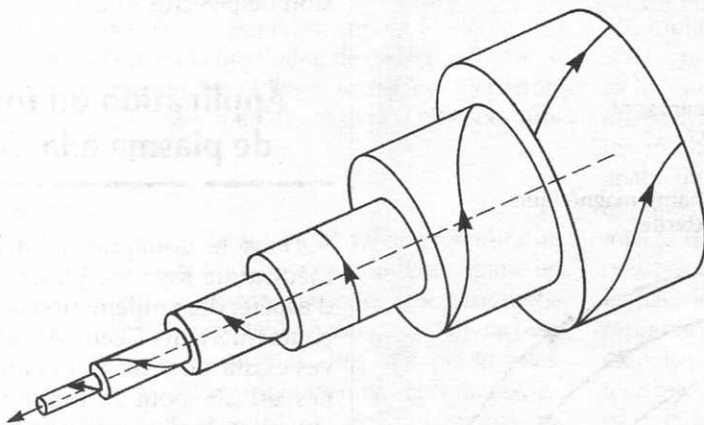
magnétique azimuthal (**Figure 3**).

Ce champ magnétique exerce une pression vers l'intérieur qui contracte la colonne de plasma — c'est le pincement. Ceci diminue le rayon de la colonne, ce qui augmente la densité de courant ; or le champ magnétique azimuthal qui comprime la surface de la colonne de plasma est proportionnel à la densité de courant. Par conséquent, la colonne continue à se pincer et atteint des rayons de plus en plus faibles. On atteint cependant une étape où le champ magnétique devient suffisamment grand pour empêcher la propagation du courant direct. C'est ce que l'on appelle la limite d'Alfvén, à laquelle correspond un courant spécifique, le courant limite d'Alfvén.

Cependant, le foyer de plasma a démontré expérimentalement qu'il pouvait régulièrement passer cette limite. Comment ? Winston Bostick, père du foyer de plasma, a montré avec d'autres que le courant ne suit pas un chemin linéaire dans le cylindre de plasma, parallèlement à l'axe, mais plutôt un chemin en spirale. Il y a une série de chemins en spirale dont les champs magnétiques créés s'annulent, pour ce qui concerne leurs effets sur le mouvement du flux de courant. En fait, tous les champs de force du plasma — le champ électrique, le champ magnétique, le flux de fluide et sa vorticités — suivent localement ces chemins, c'est-à-dire qu'ils sont colinéaires. L'interaction de ces champs « libres » est alors nulle et l'on appelle cette configuration « libre de forces » (**Figure 4**).

La possibilité de ce type de configuration de flux a été évoquée par le mathématicien italien du XIX<sup>e</sup> siècle Eugenio Beltrami. C'était un proche collaborateur du grand mathématicien allemand Bernhard Riemann. Winston Bostick et son élève Dan Wells ont appliqué le travail de Beltrami aux données qu'ils obtenaient sur des expériences telles que le foyer de plasma. Beltrami avait développé ces modèles hydrodynamiques particuliers pour analyser certaines questions fondamentales en électrodynamique, afin de continuer le travail entamé par Riemann dans son fameux écrit *Sur les hypothèses qui servent de base à la géométrie*, article qui fondait le domaine de la géométrie riemannienne, la topologie moderne et qui peut être considéré comme le cadre théorique ayant permis le dé-

**Figure 4 - Configuration tourbillonnaire de Beltrami**



Cette vue d'une colonne de plasma indique les configurations de flux sur les surfaces cylindriques intérieures de la colonne. Chaque flèche indique la pente du flux pour un rayon cylindrique donné. La surface cylindrique de rayon nul a un flux axial, sans déviation. La surface immédiatement supérieure a un flux en spirale de faible pente. Sur chaque surface successive, ces chemins en spirale augmentent leur pente jusqu'à ce que l'on arrive à un point où le flux est purement circulaire (azimutal). Les surfaces cylindriques de rayon supérieur ont des chemins en spirale de pente décroissante, directement opposé aux précédents.

La dynamique des fluides, la densité de courant, le champ électrique, le champ magnétique et la vorticités suivent tous ces mêmes lignes de flux. Du fait de cette géométrie particulière de flux parallèle, cette configuration de Beltrami est dite « libre de forces ». Deux types de bases de tourbillons (vortex) sont possibles : ceux dans lesquels le flux de fluide, les champs électrique et magnétique sont tous orientés dans la même direction et ceux dans lesquels le flux de fluide est dirigé de façon contraire à celle des champs électrique et magnétique.

Source : Winston H. Bostick, « The Morphology of the Electron », *International Journal of Fusion Energy*, Vol. 3, n° 1, Jan. 1986, p. 38.

veloppement de la relativité au  $xx^e$  siècle. Wells a ensuite réussi à appliquer ses développements de la théorie de Beltrami à la construction du premier modèle théorique de la formation du système solaire à partir du plasma.

Les données expérimentales indiquent que la gaine de courant annulaire se compose d'un certain nombre de paires de tourbillons de Beltrami (chaque paire se composant d'un tourbillon « gaucher » et d'un tourbillon « droitier ») faisant la connexion entre les électrodes interne et externe (**Figure 5**).

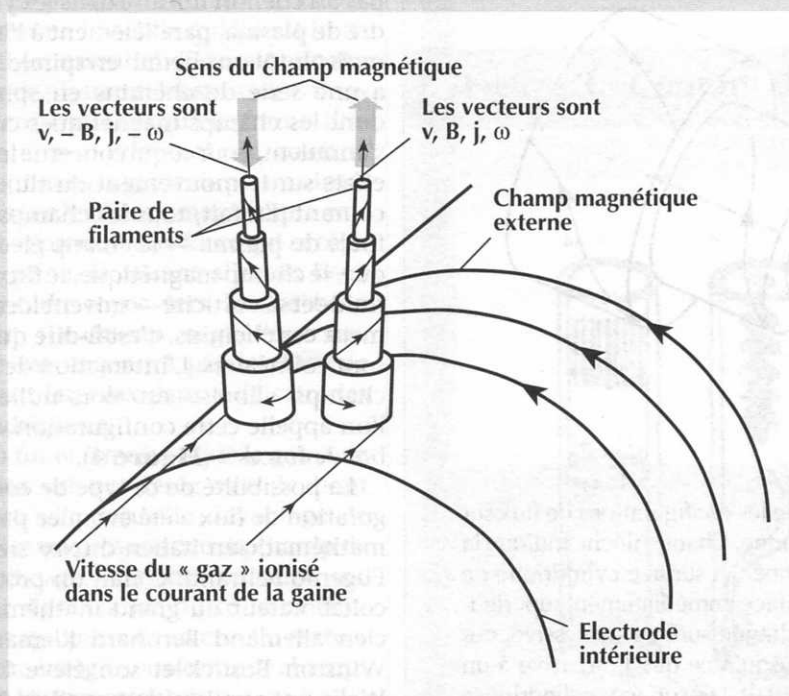
Non seulement ces paires de Beltrami permettent au foyer de plasma de passer la limite d'Alfvén, mais

elles transforment une partie de l'énergie électrique entrante en champs magnétiques. Quand le pincement final se forme au bout du foyer, beaucoup de ces tourbillons de Beltrami se désintègrent en explosant ; ces tourbillons de Beltrami sont des structures métastables hautement dynamiques, dont le maintien exige des conditions de flux précises. Lorsque la gaine de courant est brutalement arrêtée au bout du foyer, ces conditions ne sont plus réunies. L'énergie stockée dans les champs magnétiques de ces tourbillons est soudainement libérée et amène le plasma à de très hautes températures. Quelques-uns de ces tourbillons peuvent néanmoins se reconnecter entre

eux avant de se désintégrer (**Figure 6**). Ces tourbillons reconnectés forment des boucles fermées, de petits tores de plasma. Le flux de plasma turbulent dans la région du pincement crée les conditions permettant de maintenir ces tourbillons comme des structures stables.

Ces tores seraient les modules denses de plasma d'où semblent émerger les faisceaux intenses d'ions et d'électrons, ainsi que les bursts de neutrons dus aux réactions de fusion thermonucléaire. Ce sont ces nodules de plasma dense qui semblent responsables des taux élevés de réactions de fusion thermonucléaire dans le foyer de plasma, lorsque ce dispositif est réalisé à grande échelle. On pense que c'est également dans ces modules que se déroulent les fusions d'ions lourds qui permettent d'engendrer les radio-isotopes à vie courte, comme ceux qui sont utilisés dans les systèmes de diagnostic médical (par exemple, la tomographie à émission de positrons ou TEP).

**Figure 5 - Une paire de tourbillons de plasma dans une gaine de courant en foyer de plasma**



Une paire de filaments tourbillonnaires de Beltrami sont dessinés ici avec une gaine de courant. Celle-ci est en fait constituée d'une douzaine de ces paires tourbillonnaires. Dans chaque paire, un tourbillon a un flux en hélice de type « droitier » (indiqué par les flèches sur les coupes cylindriques de la colonne de plasma composant le tourbillon) tandis que l'autre a un flux hélicoïdal « gaucher ». Ces paires de tourbillons se superposent littéralement entre les deux électrodes de la machine à foyer de plasma.

Les vecteurs sont  $v$ , vitesse ;  $B$ , champ magnétique ;  $j$ , densité de courant ; et  $\omega$ , vorticité.

Source : Winston H. Bostick, « The Morphology of the Electron », *International Journal of Fusion Energy*, Vol. 3, n° 1, Jan. 1986, p. 45.

### Application du foyer de plasma à la TEP

Dans le domaine du diagnostic médical, le foyer de plasma permet d'espérer des rendements élevés à des coûts inférieurs à ceux des alternatives existantes. Ainsi, les radio-isotopes utilisés pour la tomographie à émission de positrons ont des demi-vies de l'ordre de quelques minutes. Il faut donc les créer *in situ* par des réactions nucléaires juste avant de les utiliser. La méthode actuelle consiste à utiliser un petit accélérateur de particules, le cyclotron. Le faisceau d'ions hydrogène à haute énergie qu'il produit est dirigé sur une cible solide, où il produit des réactions nucléaires. On obtient les radio-isotopes désirés en choisissant les éléments adéquats pour la cible.

Ces radio-isotopes sont alors extraits chimiquement de la cible solide et transférés dans un réacteur où l'on produit par chimie gazeuse les molécules désirées. Ce procédé d'extraction prend plusieurs heures. Il faut donc avoir une énorme quantité initiale de radio-isotopes, étant donné que la moitié se désintègre toutes les quelques minutes.

Le foyer de plasma est à la fois

## La tomographie à émission de positrons

La TEP permet d'améliorer la qualité de l'information et du diagnostic en donnant une image dynamique des processus en médecine interne. TEP signifie tomographie à émission de positrons. L'information obtenue avec les techniques traditionnelles d'imagerie à rayons X ne donne qu'une image statique des structures corporelles, basée sur les différentiels de densité. Mais pour comprendre comment le corps fonctionne ou pour détecter les maladies avant qu'elles n'arrivent à un stade avancé, on apprend beaucoup plus de choses en examinant les processus qui impliquent des réactions chimiques dépendant du temps. En effet, la plupart des maladies entraînent des changements caractéristiques dans la biochimie du métabolisme, qui interviennent longtemps avant les changements macroscopiques dans les organes du corps et leur densité. La TEP utilise des composés marqués radioactivement que l'on injecte dans le corps en très faibles quantités pour suivre leur cheminement dans les processus biochimiques. L'utilisation générale de ces traceurs radio-isotopiques en médecine et en sciences biologiques est connue depuis longtemps, puisqu'elle a suivi de très peu la découverte de la radioactivité artificielle. Mais les techniques de tomographie informatisée, disponibles depuis le début des années 80, ont ouvert la possibilité de cartographier activement la distribution des radionucléides, ce qui permet de produire des images spatiales et temporelles des processus biochimiques.

### Les besoins

Les radio-isotopes utilisés en TEP doivent remplir trois critères. D'abord, il faut qu'ils se comportent comme les éléments chimiques intervenant dans les processus métaboliques à étudier. Ensuite, leurs émanations radioactives doivent pouvoir sortir du corps, par des voies prédictibles. Enfin, ils doivent avoir une vie courte (une faible demi-vie). Cela signifie que l'intensité de l'émission radioactive sera suffisamment importante pour pouvoir détecter les très faibles quantités de radio-isotopes présents dans le corps, tout en entraînant une exposition très faible du corps aux rayonnements ionisants — des centaines de fois inférieures à la dose reçue lors d'un scanner.

Les radio-isotopes émettant des positrons — les électrons positifs de l'antimatière — remplissent ces critères. Lorsqu'un positron est émis, il accomplit un trajet microscopique avant d'être annihilé dans une réaction matière-antimatière, en rencontrant un électron. Cette annihilation génère deux photons gamma de 11 keV, allant dans des directions opposées. Du fait de sa faible longueur d'onde, le rayonnement gamma peut traverser beaucoup de matière sans être affecté, beaucoup plus facilement que d'autres

types d'ondes électromagnétiques comme les rayons X.

De façon générale, les meilleurs radio-isotopes pour la TEP sont le carbone 11, l'azote 13, l'oxygène 15 et le fluor 18.

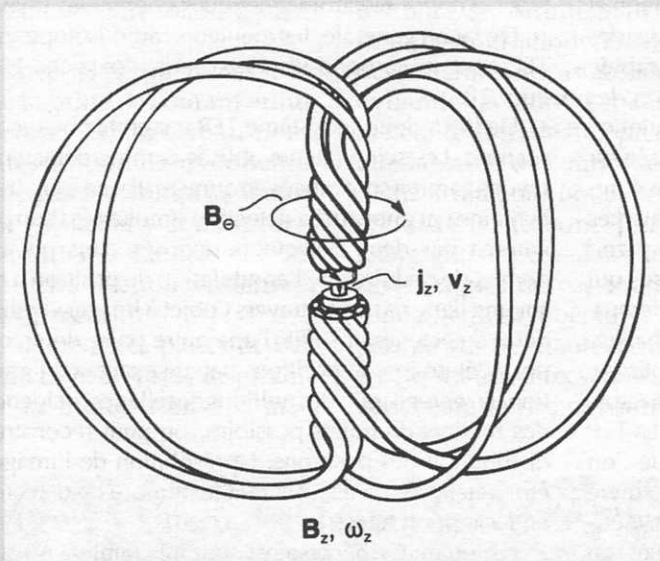
De l'extérieur, le système TEP ressemble beaucoup au scanner. Les scintillateurs utilisés comme détecteurs des rayons gamma sont rangés en anneau. Il y en a environ une centaine par anneau. La détection simultanée d'un photon gamma par deux détecteurs opposés dans un anneau permet de déduire que l'annihilation du positron a eu lieu sur une ligne passant à travers l'objet à imager et reliant les deux détecteurs. Il suffit d'une autre paire de détecteurs pour déterminer la position spatiale exacte de l'annihilation. En enregistrant des millions de telles coïncidences sur des milliers de trajets possibles, on peut reconstruire la distribution des positrons. La résolution de l'image peut être améliorée en augmentant le nombre de détecteurs et en les rapprochant.

Les quantités nécessaires sont très faibles. Ainsi, pour détecter les anomalies dans la contraction du cœur, on utilise du monoxyde de carbone marqué au carbone 11, qui permet d'observer le flux de sang. Il en faut moins de 200 milliards de molécules, moins d'un tiers de picomole.

Le grand avantage de la TEP par rapport aux autres techniques d'imageries radiologiques, c'est d'offrir une image dynamique. C'est dans l'application au cerveau que les résultats sont les plus spectaculaires : on crée un analogue fluoré du glucose, le fluorodésoxyglucose (FDG) marqué avec du fluor 18, émetteur de positrons, que l'on injecte dans le sang. Comme ce composé chimique ne peut pas être métabolisé par le cerveau, il tend à s'accumuler dans les neurones. Cette accumulation est directement proportionnelle à l'activité du cerveau. En détectant et en enregistrant les émissions de positrons du FDG, l'ordinateur peut construire une image biochimique dynamique de l'activité neuronale. On peut notamment observer les étapes précliniques de la maladie de Huntington ainsi que différentes maladies de démences comme Alzheimer. Mais c'est dans l'observation du cerveau en activité normale que les perspectives sont les plus extraordinaires. On peut maintenant voir le cerveau travailler en direct, lorsqu'il s'adonne à une activité créative comme écouter une symphonie ou lire une poésie. Lorsque l'on combine la TEP avec les techniques de cartographies de l'activité électrique du cerveau, on obtient un instrument très puissant d'enquête sur le fonctionnement du cerveau. L'avancée réalisée par cette combinaison par rapport aux techniques précédentes a été comparée par certains chercheurs au saut de la photographie noir et blanc à la caméra couleur.

*Deux erreurs se sont glissées dans la Fusion n° 72. Sur le schéma de la page 5, il faut lire : « Le rayonnement beta correspond à l'émission d'un électron » (et non d'un positon). Dans l'article consacré au HTR, page 34, la description de l'accident de Three Mile Island est ambiguë. Rappelons donc que cet accident a démontré le bien fondé de la « défense par barrières successives », concept appliqué dans les centrales occidentales : malgré la fusion du cœur qui a mis le réacteur définitivement hors service, les enceintes de confinement ont rempli leurs rôles et il n'y a pas eu de relâchement radioactif significatif à l'extérieur.*

**Figure 6 - L'hypothèse de Bostick sur la configuration des nodules de plasma**



Voici la configuration dont Bostick estimait qu'elle s'accordait au mieux pour ses données sur les nodules de plasma dense observés dans le pincement de plasma intervenant au bout du foyer (sur la droite du dispositif lorsque l'on regarde la figure 1). Cette configuration fermée se forme lorsqu'un vortex linéaire appartenant à une gaine de courant se détache des électrodes et se reconnecte sur lui-même pour former une structure toroïdale complexe.

Les vecteurs sont  $B_\phi$ , le champ magnétique azimuthal ;  $j_z$ , la densité de courant axiale ;  $v_z$ , la vitesse axiale ;  $B_z$ , le champ magnétique axial ; et  $\omega_z$ , la vorticité axiale.

Winston Bostick est le père de la machine à foyer de plasma. Il a mis en place des groupes de recherche dans le monde entier sur ce sujet. Bien qu'il soit fondamentalement un expérimentateur, il a également fait d'importantes contributions théoriques dans le développement d'une théorie du champ unifié, grâce aux enseignements qu'il a tiré de l'hydrodynamique du plasma dans une machine à foyer de plasma. On le voit ici en 1979, avec une version primitive du foyer de plasma.



Mort en 1989, ses principaux élèves sont Dan Wells aux Etats-Unis et Vittorio Nardi, en Italie. Ce dernier, après avoir travaillé longtemps à l'Institut technologique Stevens de Hoboken, dans le New Jersey, avec le Pr Bostick, est revenu en Italie où il mène un important programme de développement des applications du foyer de plasma. Il est en contrat avec l'Etat italien, mais aussi avec l'US Air Force (il peut y avoir des applications pour les moteurs spatiaux) et des sociétés privées.

beaucoup plus compact et plus efficace que le cyclotron pour produire les radio-isotopes à vie courte ainsi que, sans doute, d'un coût inférieur. En effet, il produit les radio-isotopes sous forme gazeuse, directement utilisable, et supprime donc l'étape de l'extraction à partir de la cible solide.

Au Stevens Institute, on a déjà produit de l'azote 13 (demi-vie de dix minutes) et de l'oxygène 15 (demi-vie de deux minutes) avec des rendements excellents, supérieurs à 90%. On utilisait des gaz de remplissage comme des mélanges D-C<sub>12</sub> ou D-N<sub>14</sub>.

Il semble que les réactions nucléaires permettant d'engendrer les radio-isotopes se déroulent dans les nodules denses de plasma qui apparaissent dans le pincement. Les champs électriques très intenses qu'ils contiennent y jouent le rôle de micro-accélérateurs. Par ailleurs, les très forts champs magnétiques permettent de piéger les radio-isotopes produits et de les garder dans le gaz présent après un tir de la machine à foyer de plasma.

## Construire des réacteurs de fusion

On sait depuis longtemps qu'il faudra développer des matériaux entièrement nouveaux pour construire des réacteurs de fusion thermonucléaire basés sur la réaction deutérium-tritium. Cette réaction représente un défi considérable du point de vue des matériaux, notamment du fait des neutrons de haute énergie. Bien que l'on puisse modéliser et extrapoler à partir de l'expérience acquise sur les réacteurs à fission, il est clair qu'il faudra effectuer des tests en grandeur réelle, c'est-à-dire soumettre les matériaux à un environnement neutronique similaire à celui qui r gnera dans un réacteur de fusion. Le groupe du Stevens Institute estime que sa machine à foyer de plasma est la mieux placée pour produire un tel environnement, à un prix compétitif. Les promesses sont telles que cela vaudrait un investissement supplémentaire, même dans l'environnement détestable de coupes budgétaires incessantes qui est actuellement celui de la recherche sur la fusion. ■