

**La température du cœur du plasma d'un réacteur de fusion magnétique doit être maintenue à plus de 100 millions de degrés, alors que sa périphérie doit rester froide.**

La taille du réacteur est donc contrainte par la capacité de maintenir un gradient de température important dans le plasma avec un apport minimum de puissance externe. La réduction de la taille et donc du coût d'une machine de fusion passe par la minimisation du transport turbulent qui a tendance à relaxer le gradient de température.

Le diagnostic précis de la turbulence est ainsi un enjeu majeur qui permettra d'améliorer la compréhension et la capacité de contrôle du transport. Ce sera une des missions dévolues au *tokamak* Iter qui sera construit sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône).

## À la poursuite des turbulences des plasmas de fusion magnétique

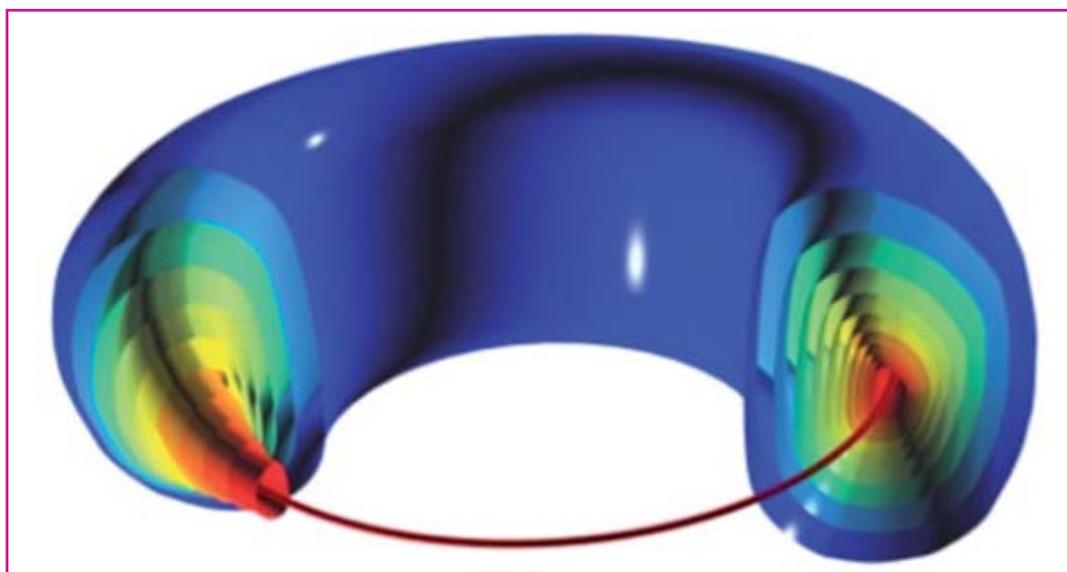
Dans un réacteur de **fusion magnétique** (encadré C, **Le principe de la fusion thermonucléaire**), un anneau de **plasma** de **deutérium** et de **tritium** est confiné par des aimants. C'est au cœur de l'anneau, à une température de plus d'une centaine de millions de degrés et à une pression de quelques atmosphères, que peuvent se produire les réactions de fusion. Le plasma qui entoure le cœur joue le rôle d'isolant; la température y décroît très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cœur. Le bord de l'anneau, au contact des parois, n'est "qu'à" quelques milliers de degrés (figure 1).

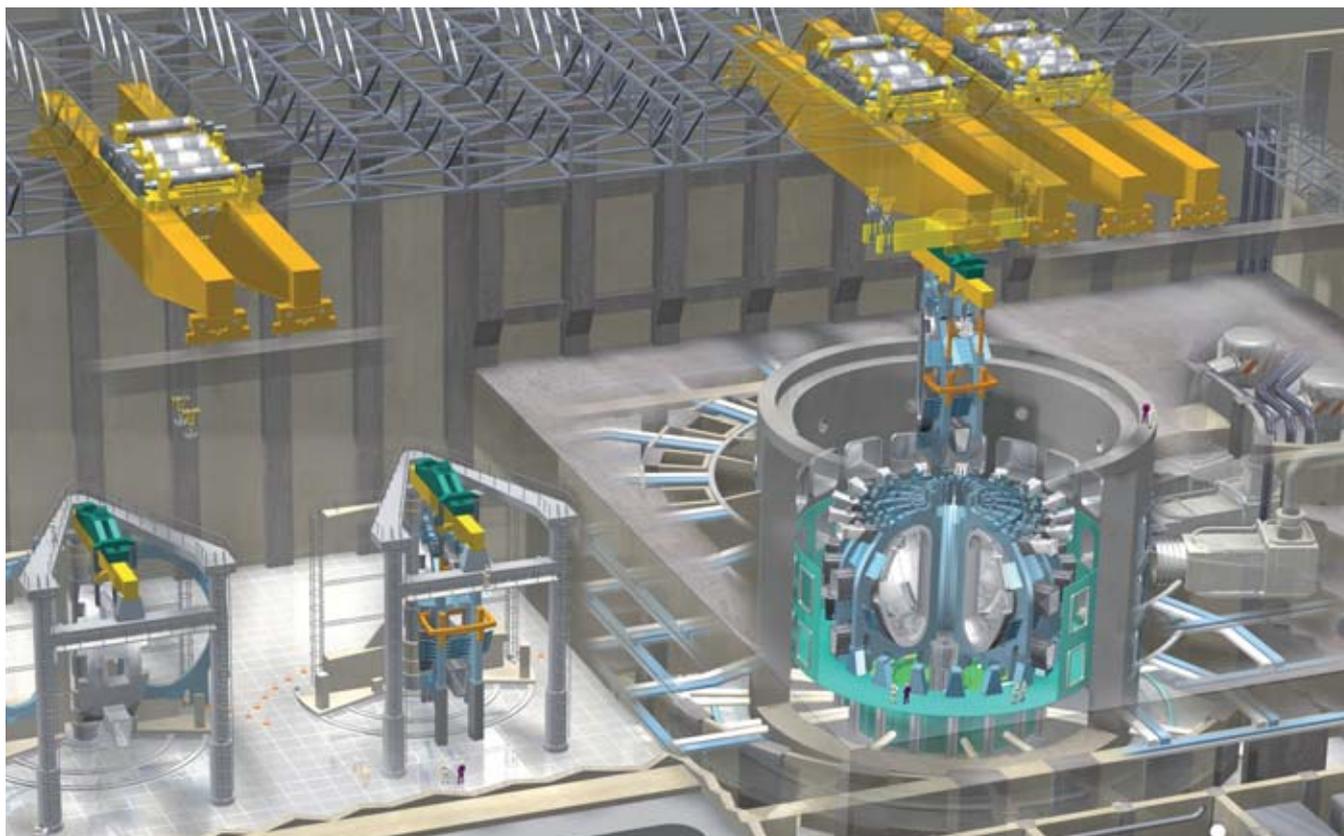
Un enjeu fondamental des recherches sur la fusion est d'assurer une isolation suffisante du cœur du plasma pour qu'il soit quasiment capable de "s'auto-chauffer": 80 à 90 % de la chaleur nécessaire au maintien de sa température doit provenir des réactions de fusion qui s'y produisent. En effet, si la puissance

de chauffage à fournir au cœur pour compléter "l'auto-chauffage" dépassait 10 à 20 %, une part trop importante de la puissance électrique produite par le réacteur serait consommée pour alimenter les systèmes de chauffage.

Si le transport de la chaleur dans le plasma "isolant" était régi par les seules collisions entre particules chargées du plasma, le cœur du plasma serait suffisamment bien isolé dès lors qu'il serait entouré par une centaine de mètres cubes de plasma isolant. Les machines actuelles comme le JET (*Joint European Torus*) en Europe ou JT-60 au Japon permettraient alors de produire de l'électricité. En pratique, la capacité d'isolation thermique du plasma est de 10 à 100 fois plus faible que celle prédite par le modèle collisionnel. La machine expérimentale Iter (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), malgré ses 840 m<sup>3</sup> de plasma, ne devrait être auto-chauffée qu'à 70 %. La raison de

Figure 1.  
Structure de l'anneau de plasma d'un réacteur de fusion par confinement magnétique. En rouge, le cœur de l'anneau, à plus de 100 millions de degrés mais dont la pression ne dépasse pas quelques atmosphères. C'est dans le cœur du plasma qu'on lieue les réactions de fusion. Autour du cœur, le plasma isolant, de plus en plus "froid" au fur et à mesure que l'on s'éloigne du cœur.





© 2006 Eric Verdut, www.kennisinbeeld.nl/ITER

la faible capacité d'isolation thermique est qu'au transport collisionnel se rajoute un transport **turbulent** <sup>(1)</sup> bien plus efficace pour dégrader l'isolation. Ce transport est dû à des turbulences de faible amplitude dont les dimensions caractéristiques peuvent être aussi petites que le millimètre et dont les spectres en fréquence s'étendent jusqu'au million de hertz.

Si les diagnostics des plasmas de fusion sont indispensables pour contrôler le plasma et assurer la protection de la machine, ils jouent de plus en plus un rôle fondamental dans l'étude de la turbulence, encore mal comprise bien que des progrès importants aient été réalisés au cours des dernières années. Idéalement, leurs **résolutions spatiale** et **temporelle** devraient donc être respectivement de l'ordre du millimètre et de la microseconde. Le faible rapport signal sur bruit qu'impliquent ces résolutions montre bien la difficulté de la tâche. Et ce d'autant plus que les signaux, souvent tenus, doivent être extraits du bruit de fond que constituent les particules chargées, les **neutrons** et les **photons** émis par le plasma dans un large spectre d'énergies.

Les caractéristiques des plasmas de fusion magnétique à diagnostiquer, outre leurs températures s'élevant de centaines de millions à quelques milliers de degrés et leurs densités de l'ordre de  $10^{20}$  particules/m<sup>3</sup>, sont une forte magnétisation (typiquement 5 teslas), la présence de champs électriques et de densités de courant élevées, au moins pour la configuration **tokamak**, la plus courante, celle du JET et d'ITER. La complexité de la physique des phénomènes diagnostiqués impose parfois le recours à la **modélisation** pour interpréter les mesures. Il est donc prudent d'utiliser différentes méthodes pour mesurer une même grandeur physique.

■ (1) Voir à ce sujet *Clefs CEA* n°49 (printemps 2004), p. 56.

Les enjeux du diagnostic des plasmas de fusion peuvent être appréciés par le nombre et le coût des dispositifs déployés autour des principales machines de fusion : plusieurs dizaines, d'un coût pouvant atteindre globalement 10 % du prix total de la machine (voir figure 2 p. 57). Loin d'être figé, le domaine des diagnostics des plasmas de fusion est en constante évolution, une évolution dont les moteurs sont les nouvelles questions que posent la découverte de nouveaux régimes de turbulence et le développement des technologies.

Sans entrer dans le détail des techniques de détection et sans vouloir être exhaustif, les principes de quelques diagnostics sont présentés afin d'illustrer la diversité des approches dans les trois catégories existantes : les *diagnostics passifs*, non perturbatifs, où les signaux émis par le plasma sont simplement mesurés, les *diagnostics actifs* où ce sont les signaux dus à l'interaction d'un faisceau d'ondes/particules avec le plasma qui sont mesurés et enfin les sondes, qui sont des objets introduits dans le plasma.

### Les diagnostics passifs, "respectueux" du plasma

La mesure "passive" des caractéristiques des ondes/particules provenant du plasma sur une vaste gamme de fréquence/énergie fournit des informations sur le plasma sans le perturber.

#### Le rayonnement électromagnétique du plasma

Dans les fréquences les plus basses (jusqu'à une centaine de hertz), la mesure du champ électromagnétique lentement variable à la périphérie du plasma permet de déterminer la forme et la position du plasma, le courant total qui y circule ainsi que sa

Le réacteur Iter tel qu'il se présentera à l'intérieur de son bâtiment sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône).



pression. À plus haute fréquence (jusqu'à quelques MHz), les signaux électromagnétiques permettent de caractériser la turbulence qui se développe sur les surfaces magnétiques résonnantes. Le champ magnétique est mesuré par intégration de la tension aux bornes de petites bobines.

La rotation des électrons du plasma autour des lignes de champ magnétique <sup>(2)</sup> produit un rayonnement cyclotronique électronique dont la fréquence, de l'ordre de quelques dizaines de GHz (longueurs d'onde centimétrique), dépend de l'intensité du champ magnétique. La variation spatiale du champ magnétique étant connue, la mesure de la fréquence permet de localiser le point d'émission; la mesure de l'intensité permet de remonter à la température électronique du plasma.

La **spectroscopie** permet d'étudier l'émission du plasma dans le domaine où les techniques optiques sont utilisables, en pratique entre 10 **micromètres** et 1 **picomètre** (de l'**infrarouge** aux **X durs**). La mesure de spectres de **raies** émis par les **ions** du plasma permet de remonter aux températures des ions et des électrons du plasma ainsi qu'à la vitesse de rotation du plasma.

Le **rayonnement de freinage** des électrons sur les ions (*Bremstrahlung*) présente un spectre continu. Sa mesure permet d'accéder au taux d'impuretés dans le plasma, à la température électronique (**X mous**) et aux propriétés des populations d'électrons très énergétiques accélérés par les champs électriques (X durs).

**Les produits de fusion**

Les réactions de fusion qui se produisent au cœur du plasma génèrent des **gammas**, des neutrons et des produits de fusion chargés (**proton**, tritium, **hélium 3**, **hélium 4**...) soit directement soit par réactions secon-

naires avec des impuretés. L'énergie de ces ondes/particules est typiquement comprise entre 0,5 et 14 **MeV**. La mesure du flux de gammas et de neutrons selon différentes lignes de visée permet de cartographier par **tomographie** les taux de réactions de fusion et de caractériser le confinement des **particules alpha** qui chauffent le cœur du plasma.

L'analyse du spectre des neutrons permet d'évaluer la distribution des vitesses des noyaux qui ont fusionné ainsi qu'une éventuelle vitesse de rotation d'ensemble de ces noyaux. Les neutrons sont analysés en transférant leur énergie sur des protons par **collisions élastiques**. Ces protons, chargés, peuvent être analysés dans un champ magnétique.

Très énergétiques, des produits de fusion chargés s'échappent du plasma dans une proportion non négligeable. En exposant des échantillons à leur impact et en les analysant par spectrométrie gamma, il est possible de caractériser ces flux de particules chargées.

**Les particules neutres**

Un grand nombre de particules neutres, arrachées de la paroi, pénètrent dans le plasma et peuvent échanger des électrons avec les ions du plasma. Les ions neutralisés ne sont plus confinés par le champ magnétique et sortent du plasma. Leur analyse permet d'accéder à leurs températures et aux concentrations des différentes espèces ioniques (par exemple proportion deutérium/tritium). Sur les grandes machines, les neutres ne pénètrent pas très profondément dans le plasma avant d'être ionisés: ces mesures sont donc limitées au bord du plasma. Néanmoins, des particules alpha, générées dans le cœur du plasma mais mal confinées, peuvent se neutraliser au bord et être analysées.

**Les diagnostics actifs : localisation plus précise**

Dans un diagnostic actif, un faisceau d'onde/particule est injecté dans le plasma. Les énergies mises en jeu par les faisceaux doivent être suffisamment faibles pour ne pas trop perturber le plasma et cependant suffisamment importantes pour que la réponse de ce dernier puisse être extraite du bruit. La modulation des faisceaux permet d'améliorer le rapport signal sur bruit. La localisation de la zone de mesure peut être meilleure que pour les diagnostics passifs si la propagation du faisceau est bien identifiée.

**Réflectométrie**

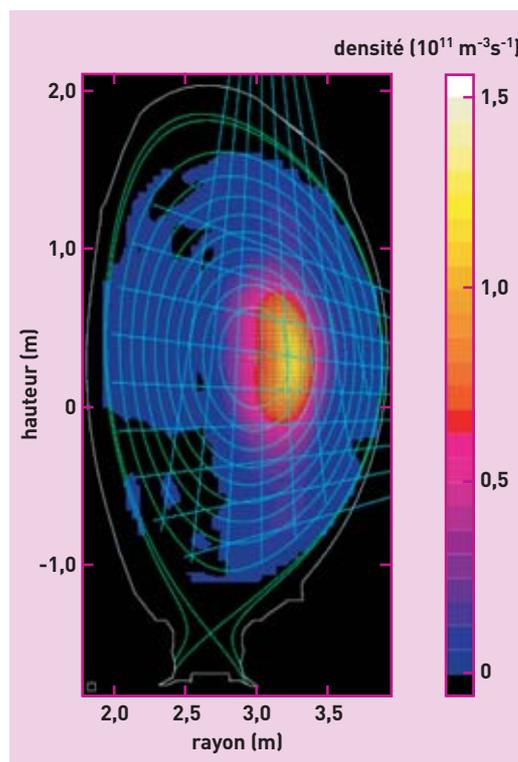
Une onde qui se propage dans un plasma de densité variable est réfléchiée à l'endroit où la densité électronique atteint une valeur critique. En injectant des faisceaux à fréquence variable (20-1 000 GHz) dans le plasma, il est possible de cartographier le profil de densité électronique.

**Interférométrie et polarimétrie**

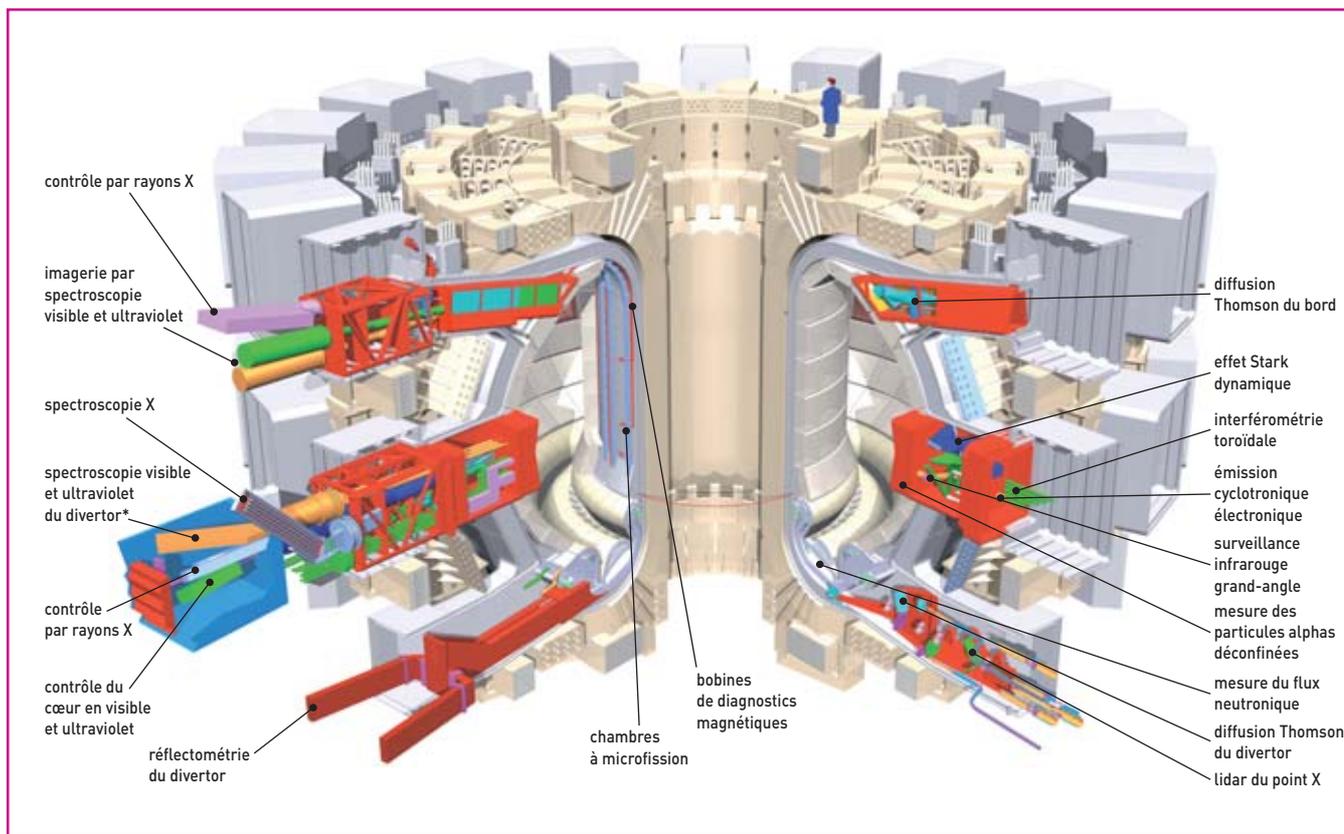
Des faisceaux laser infrarouge/submillimétrique traversent le plasma selon différentes lignes de visée. En interférométrie, le changement de phase est mesuré par rapport à un faisceau de référence qui ne traverse pas le plasma, ce qui permet de déterminer le profil de densité électronique. En polarimétrie, la mesure de la rotation de la polarisation

(2) Les lignes de champ magnétique sont des lignes imaginaires tangentes au champ magnétique autour desquelles s'enroulent les trajectoires des particules chargées du plasma.

Cartographie de la densité de particules alphas d'énergie supérieure à 1,7 MeV dans le JET. Ces particules de haute énergie ont été produites par chauffage. Les lignes bleues correspondent aux lignes de visée des détecteurs de gammas (des scintillateurs liquides). La précision au centre est de l'ordre de 10 cm.



EFDA-JET



\* Divertor : partie basse de la machine où les lignes de champ magnétique ouvertes interceptent la paroi. Le flux de chaleur y est très élevé. C'est aussi dans cette zone qu'aboutissent les conduits de pompage qui permettent d'évacuer le plasma pollué par l'hélium, cendre de la fusion, et les impuretés arrachées à la paroi.

Figure 2. Les lignes de visée des diagnostics d'Iter. Sur les 500 MW de puissance de fusion que devrait produire la machine, 400 MW le seront sous forme de neutrons de 14 MeV. L'utilisation massive de lignes de visée en baïonnette et/ou de miroirs permettra de limiter le flux de neutrons sur les détecteurs.

du faisceau due au champ magnétique fournit le profil de courant dans le plasma.

### Diffusion Thomson

La lumière d'un faisceau laser dans le **visible** ou le proche infrarouge (longueur d'onde micrométrique) est diffusée par les électrons du plasma, un peu comme un rayon de soleil diffuse sur les poussières en suspension. La mesure de l'intensité de la lumière diffusée permet d'accéder à la densité. L'**effet Doppler** dû à la vitesse des électrons décale la longueur d'onde de la lumière diffusée par rapport à celle du faisceau monochromatique du laser. L'analyse du spectre de la lumière diffusée fournit la distribution de vitesse des électrons et donc leur température. En envoyant de très courtes impulsions laser et en suivant la lumière diffusée tout au long du trajet de l'impulsion, il est possible d'obtenir les profils de densité et de température électronique par la mesure du temps de vol (Lidar).

### Spectroscopie par échange de charge

La plupart des impuretés du cœur du plasma ont perdu tous leurs électrons et n'émettent pas de rayonnement de raies. Des faisceaux d'atomes neutres (H, D, <sup>2</sup>Li, C) injectés à grande vitesse dans le plasma peuvent pénétrer jusqu'au cœur où ils peuvent céder un électron aux impuretés du cœur (oxygène, carbone, bore...). Les ions, créés dans un état excité, se dés excitent très rapidement en émettant un ou plusieurs photons; l'émission est donc localisée à l'intersection du faisceau et de la ligne de visée. Les mêmes grandeurs que celles fournies par la spec-

troscopie passive peuvent être obtenues: densité d'impuretés, température et vitesse d'écoulement.

### Spectroscopie par émission de faisceau

Les atomes d'un faisceau de neutres sont excités par interaction avec les ions et les électrons du plasma. Le spectre des photons émis lors de leur relaxation permet de mesurer les propriétés du plasma, en particulier les modulations de la densité électronique.

### Effet Stark dynamique

Des d'atomes d'hydrogène neutres sont injectés à la vitesse  $v$  dans le champ magnétique  $B$  du plasma. Ils subissent les effets d'un champ électrique proportionnel à  $v$  et à  $B$ . Dans ce champ électrique "dynamique", les **raies d'émission** de l'hydrogène sont modifiées par **effet Stark**.

La vitesse des atomes du faisceau de neutres étant connue, il est possible de déterminer le champ magnétique, et donc le profil de courant dans le plasma. L'existence de champs électriques statiques perturbe les mesures.

### Les diagnostics par sondes, les plus intrusifs

Les domaines de températures et de densités des plasmas de fusion interdisent l'utilisation de dispositifs en contact avec le plasma, sauf au bord où des sondes peuvent être introduites dans le "plasma de bord", relativement "froid" et peu dense. Des sondes mobiles introduites pendant un temps très bref permettent de pénétrer un peu plus profondément. La sonde



la plus simple est constituée d'une tige conductrice isolée sur presque toute sa longueur, sauf à son extrémité plongée dans le plasma. En mesurant le courant qui parcourt la sonde lorsque son potentiel varie, il est possible d'en déduire la température électronique du plasma. Des dispositifs plus complexes permettent de mesurer la densité électronique, la température ionique... Il est, en général, nécessaire de corriger les mesures des perturbations dues à l'intrusion de la sonde.

### Les défis d'Iter

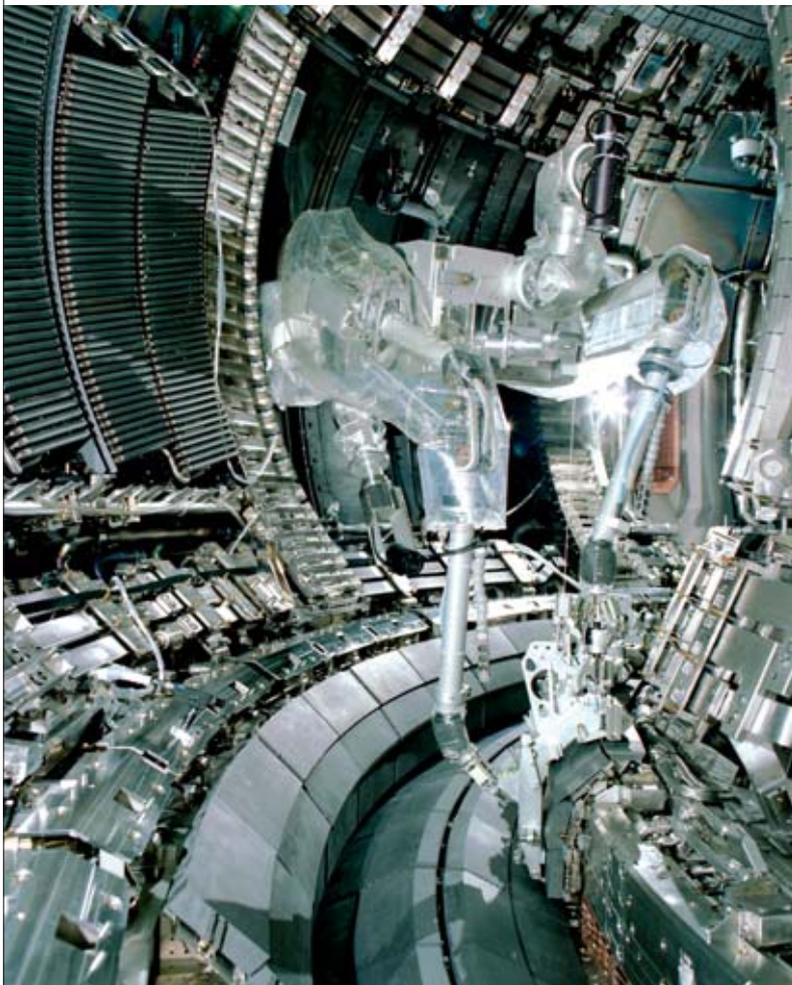
Le plasma d'Iter sera auto-chauffé à 70 % : la puissance disponible pour contrôler le transport sera donc relativement faible par rapport à la puissance totale. Les particules alpha qui chaufferont majoritairement le plasma risquent par ailleurs de déstabiliser de nouveaux modes de turbulence. Il s'agira donc de mettre au point pour Iter des stratégies de contrôle de la turbulence bien plus performantes que celles qui sont utilisées dans les machines actuelles, dans lesquelles les effets des alphas sont au pire marginaux, et où toute la puissance de chauffage est disponible pour le contrôle. Un réacteur de fusion capable de produire de l'énergie devant être auto-chauffé à 80-90 %, une étape restera encore à franchir. Le contrôle à faible puissance de la turbulence suppose une compréhension fine de ses caractéris-

tiques et de sa dynamique. Les exigences sur les résolutions des diagnostics de la turbulence iront donc en s'accroissant, alors même que les conditions de mesure iront en se dégradant.

Il y aura en effet dix mille fois plus de neutrons produits pendant les 20 ans de fonctionnement d'Iter, que pendant 23 ans d'expériences dans le JET, la machine qui a produit le plus de neutrons à ce jour. Les diagnostics doivent donc être conçus pour être télé-manipulables et extrêmement fiables puisqu'il sera rapidement impossible de pénétrer dans la machine. Sur les 500 MW de puissance de fusion que celle-ci devrait produire, 400 MW le seront sous forme de neutrons de 14 MeV. Pour limiter le flux de neutrons sur les détecteurs, il est nécessaire de réaliser des lignes de visée en "baïonnette". Des miroirs devront donc être éventuellement placés en vue directe du plasma. Ils seront soumis au bombardement des particules du plasma échappant au confinement ainsi qu'aux neutrons et aux gammas. Leur réflectivité pourra aussi être dégradée par la redéposition de carbone ou de bore arrachés aux parois par l'érosion du plasma. Des méthodes de remédiation ou de compensation de la dégradation de la réflectivité au cours du temps doivent être mises au point pour maintenir la précision des mesures. Dans l'environnement hostile des zones proches du plasma, les fibres optiques utilisées pour acheminer les signaux optiques risquent de se dégrader et les fenêtres utilisées pour rendre indépendants les vides des lignes de visée et de la chambre à vide de s'opacifier.

Le diagnostic, la compréhension et le contrôle du transport turbulent sont parmi les défis majeurs de la fusion magnétique. À la question "Que demanderiez-vous à Dieu si l'occasion s'en présentait ?", le physicien Heisenberg aurait répondu : "À Dieu, je demanderai : pourquoi la relativité et pourquoi la turbulence ? Et je suis persuadé qu'il ne pourra répondre qu'à ma première question". Sans espérer avoir la réponse au "pourquoi", au-delà de l'objet de la science, les physiciens des plasmas se contenteraient de réponses sur le "comment". En développant la modélisation et des diagnostics de plus en plus précis, ils espèrent même pouvoir y répondre avant que ne se présente pour eux l'occasion d'entendre la réponse...

Il est en effet urgent de mieux comprendre le transport turbulent dans les plasmas. Dans les années 90, des méthodes de contrôle de la turbulence ont déjà permis de trouver des régimes qui permettent d'améliorer les capacités d'isolation thermique du plasma. De la capacité à contrôler la turbulence dans un plasma auto-chauffé dépend la possibilité de construire des réacteurs de fusion relativement compacts et capables de fonctionner en continu. Iter, qui commencera à fonctionner en 2016 à Cadarache (Bouches-du-Rhône), devrait apporter des réponses cruciales dans ce domaine. Il serait alors possible d'espérer produire les premiers watts d'électricité de fusion à la fin des années 2030 et disposer vers 2050 d'une nouvelle source d'énergie qui pourrait apporter sa contribution à la résolution de la double crise énergétique et environnementale qui se profile inexorablement.



Robot de maintenance des éléments les plus exposés de la paroi interne du JET. Iter devra avoir largement recours à la télé-manipulation, notamment pour l'entretien des diagnostics.

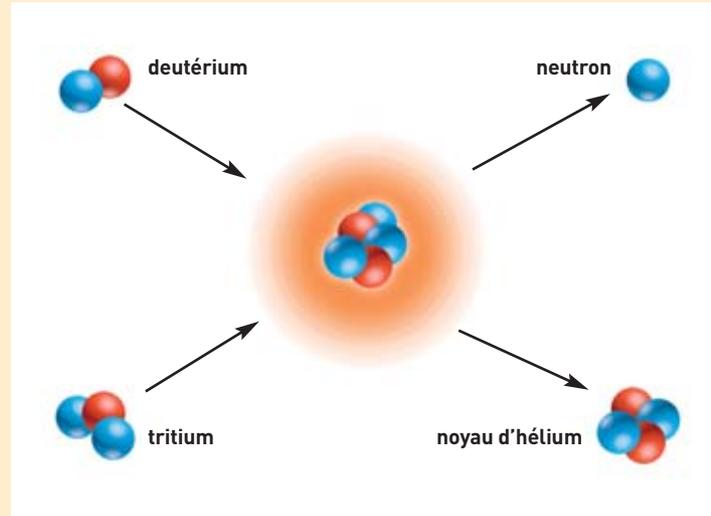
➤ Jean-Marc Ané

Association Euratom-CEA sur la fusion  
CEA Centre de Cadarache

## C Le principe de la fusion thermonucléaire

La réaction de **fusion** la plus facile à réaliser est celle du **deutérium D** et du **tritium T**, deux **isotopes** de **l'hydrogène** (figure) Cette réaction nécessite de porter le mélange DT à une température de 100 millions de degrés et de le confiner pendant un temps répondant au *critère de Lawson*: le produit de la densité par le temps de confinement doit être supérieur à  $10^{20}$  s/m<sup>3</sup>. Pour créer les conditions de la fusion d'un plasma d'**éléments légers**, deux méthodes de confinement ont été développées: le **confinement magnétique** dans les **tokamaks**, régime stationnaire où la densité, de l'ordre de  $10^{20}$  m<sup>-3</sup>, est maintenue pendant plusieurs secondes par un champ magnétique, et le **confinement inertiel** par faisceaux **laser** ou de particules, régime explosif pour lequel la densité atteint  $10^{31}$  m<sup>-3</sup> pendant quelques  $10^{-11}$ s.

*Pour en savoir plus, voir Clefs CEA n°49, p. 45 à 76.*



# D Spectroscopie et spectrométrie

Les méthodes spectrométriques se décomposent globalement en deux grandes catégories, la spectrométrie des rayonnements – qui elle-même regroupe la spectrométrie d'absorption, la spectrométrie d'émission, la spectrométrie de diffusion Raman et la spectrométrie de résonance magnétique nucléaire – et la spectrométrie de masse.

La **spectroscopie** et la **spectrométrie**<sup>(1)</sup> **des rayonnements** regroupent un ensemble de méthodes d'analyse permettant d'accéder à la composition et à la structure de la matière fondées sur l'étude des spectres fournis par l'interaction des **atomes** et des **molécules** avec divers **rayonnements électromagnétiques** qu'ils émettent, **absorbent** ou **diffusent**.

Selon leur énergie, les **photons** interagissent sélectivement avec les différents niveaux électroniques qui composent la structure électronique atomique ou moléculaire. Ce sont les **électrons de cœur** (proches du noyau atomique) pour les rayons X<sup>(2)</sup>, les **électrons périphériques** (éloignés des noyaux et impliqués dans les liaisons chimiques) pour la lumière absorbée ou émise dans le **proche ultraviolet** et dans le **visible**. Dans le domaine des rayonnements **infrarouge**, c'est le saut entre niveaux de **vibration moléculaire** qui intervient, le saut entre niveau de **rotation** des molécules pour les micro-ondes et le **spin** du **noyau atomique** pour la RMN.

## Spectrométrie d'absorption

Celles des méthodes de spectroscopie qui sont fondées sur l'**absorption** utilisent la loi de Beer-Lambert, indiquant la proportionnalité entre l'intensité lumineuse absorbée et la quantité de matière absorbante :

$$A = \log(I_0/I) = \epsilon \cdot C \cdot L$$

où A est l'**absorbance** du milieu traversé par le rayonnement, I<sub>0</sub> l'intensité lumineuse incidente, I l'intensité lumineuse transmise,  $\epsilon$  le coefficient d'extinction **molaire** caractéristique de la substance étudiée à une longueur d'onde donnée en L mol<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>, L l'épaisseur traversée en cm et C la concentration en mole par litre.

(1) Le terme de spectrométrie, initialement réservé à l'enregistrement et à la mesure, tend à devenir synonyme de spectroscopie, l'œil étant remplacé dans l'observation par d'autres récepteurs et instruments, et le domaine visible ne constituant qu'un domaine particulier d'analyse.

(2) À noter par ailleurs que la cristallographie à rayons X n'est pas considérée comme une méthode spectroscopique à proprement parler.

En mesurant l'absorbance du milieu à une longueur d'onde donnée, il est donc possible de déterminer la concentration d'une substance dans un échantillon.

Dans un **spectre d'absorption** enregistré au moyen d'un **spectromètre**, les **pics d'absorption** correspondent aux longueurs d'onde que le milieu peut absorber. De même que le spectre de la lumière solaire est obtenu en la faisant passer par un prisme qui la décompose, les spectromètres analysent la répartition spectrale de l'ensemble des rayonnements électromagnétiques en les séparant par longueur d'onde au moyen d'un réseau de diffraction par réflexion. Les spectres font apparaître des pics correspondant chacun à une longueur d'onde particulière.

Selon le type d'échantillon à analyser et le niveau de performances recherché, on utilise en laboratoire la **spectrométrie d'absorption** soit sur molécules en phase liquide ou gazeuse, soit sur vapeur atomique obtenue en décomposant thermiquement les échantillons liquides ou solides.

La spectroscopie d'absorption moléculaire dans le domaine UV-visible est simple d'emploi mais ne s'applique qu'à des échantillons peu complexes car, du fait de la largeur des **bandes d'absorption moléculaires**, les spectres d'absorption ne permettent généralement pas de distinguer spécifiquement tous les composants d'un mélange complexe.

En **spectrométrie infrarouge (IR)**, l'absorption résulte des phénomènes de vibration et rotation des molécules. Les spectres d'absorption infrarouge permettent donc de déterminer la nature des liaisons chimiques composant une molécule en accédant à la constante de rappel (comme un ressort remonte un poids) de la liaison et donc de confirmer des hypothèses structurales.

Lorsque le nombre d'atomes croît, le spectre devient rapidement complexe et l'interprétation devient très délicate, en particulier, pour les composés organiques.

La spectrométrie d'**absorption atomique** est de ce point de vue plus performante car les atomes absorbent avec des **raies d'absorption** très fines. Des mesures précises sont donc réalisables même lorsque l'échantillon est constitué d'un assemblage complexe d'éléments chimiques. L'absorption atomique est une technique de référence pour l'analyse des éléments à l'état de traces dans une très grande variété d'échantillons, notamment biologiques.

## Spectrométrie d'émission

Les atomes ou molécules portés dans un état excité peuvent se désexciter en émettant un rayonnement appelé **rayonnement d'émission**. Lorsque l'excitation résulte de l'absorption sélective, par les atomes ou les molécules à analyser, d'un rayonnement électromagnétique, il s'agit d'émission de **fluorescence** (ou de phosphorescence selon l'état d'excitation électronique mis en jeu).

Comme pour l'absorption, la fluorescence peut être appliquée dans le domaine des rayonnements UV-visible aux molécules ou aux atomes. La **spectrométrie de fluorescence X** désigne quant à elle le **rayonnement X** émis par les atomes, excités par absorption d'un rayonnement X. Les techniques de fluorescence sont plus complexes à mettre en œuvre que les techniques d'absorption car elles nécessitent que la particule à analyser soit excitée sélectivement par un rayonnement monochromatique. En revanche, comme le rayonnement émis est également spécifique de la particule, la spectrométrie de fluorescence présente une double sélectivité qui lui confère un très faible bruit de fond et la rend ainsi particulièrement bien adaptée à la mesure des très faibles concentrations.

L'émission de rayonnement peut également apparaître lorsque des atomes sont excités thermiquement dans un milieu porté à haute température. La **spectroscopie d'émission** est fondée sur le fait que les atomes ou les molécules excités à de hauts niveaux d'énergie se désexcitent vers des niveaux plus bas en émettant des radiations (émission ou luminescence). Elle se distingue de la spectrométrie de fluorescence par le fait que l'excitation n'est pas apportée de manière sélective, mais au contraire concerne indistinctement toutes les particules qui composent le milieu. Les **raies d'émission** correspondent donc à des rayonnements émis directement par un corps porté à haute température et le **spectre d'émission** permet de déceler et de quantifier tous les atomes ou les molécules présents dans la source d'émission.

## Spectrométrie de diffusion Raman

Les interactions entre la matière et les radiations électromagnétiques conduisent également à des phénomènes de diffusion comme la **diffusion élastique** et la **diffusion inélastique**. La diffusion peut avoir lieu à la rencontre d'une interface entre deux milieux ou à la traversée d'un milieu.

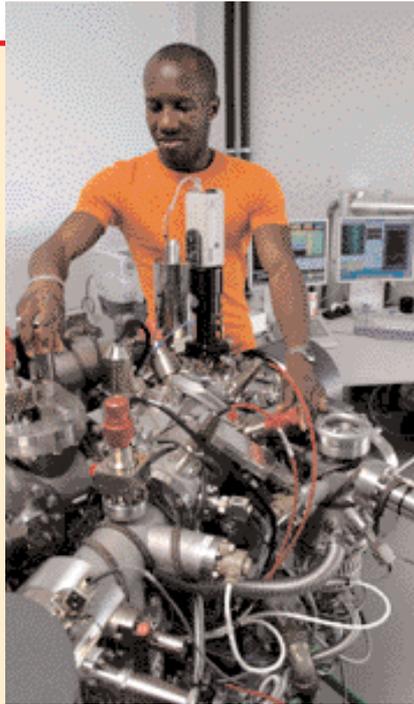
## D (suite)

Ce processus est le plus souvent "élastique", c'est-à-dire qu'il a lieu sans changement de fréquence des rayonnements composant le faisceau. La diffusion élastique du rayonnement solaire par l'atmosphère est, par exemple, responsable de la couleur bleue du ciel qui apparaît lorsque le regard n'est pas dirigé vers le soleil (*effet Tyndall*). L'intensité diffusée est, en effet, d'autant plus forte que la longueur d'onde du rayonnement est courte ce qui, dans le spectre solaire, correspond au bleu.

En spectrométrie, la principale utilisation de la diffusion concerne la *spectrométrie Raman*. Il s'agit de la diffusion inélastique d'un rayonnement incident par les molécules qui composent l'échantillon. L'écart entre la fréquence du rayonnement diffusé et la fréquence du rayonnement incident permet d'identifier les liaisons chimiques mises en jeu. La spectrométrie Raman est une technique très utilisée pour l'analyse structurale en complément de la spectrométrie infrarouge et de la spectrométrie de masse.

### Spectrométrie de résonance magnétique nucléaire

Le principe de la **résonance magnétique nucléaire (RMN)** est basé sur le fait qu'un atome possède un *moment magnétique*, comme une charge qui tourne et agit comme un petit aimant, gouverné par la mécanique quantique, qui s'aligne dans un champ magnétique comme une boussole dans le champ terrestre. Le principe de la RMN consiste à induire et détecter la transition entre le moment magnétique nucléaire du niveau de plus basse énergie à celui de plus grande énergie par absorption d'un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde se situe dans le domaine des radiofréquences : lorsque l'énergie du photon correspond exactement à la différence d'énergie entre les deux niveaux, il y a absorption. Les noyaux dont le nombre de **neutrons** et de **protons** sont tous les deux pairs possèdent un spin nul. Les atomes de carbone 12 et d'oxygène 16 qui sont très répandus dans la nature ont ainsi un spin nucléaire nul. Par contre, l'hydrogène ne possède qu'un seul proton et son moment magnétique nucléaire est égal à 1/2 : il a donc deux états énergétiques possibles correspondant aux deux orientations possibles du spin par rapport au champ magnétique. La mesure de la fréquence de résonance du champ électromagnétique qui permet le passage de l'un à l'autre des états d'énergie permet de faire l'analyse des molécules.



Spectromètre de masse d'ions secondaires utilisé au CEA pour réaliser des mesures isotopiques rapides sur un échantillon par exemple prélevé sur une installation aux activités nucléaires suspectes.

Cette fréquence est fixe mais les différents noyaux d'une molécule ne résonnent pas tous à la même fréquence car leur environnement magnétique est modifié par leur environnement chimique (électronique). De nombreux spectres contiennent plus de pics que la molécule ne contient de protons en raison des interactions de ceux-ci avec leurs voisins. Deux noyaux peuvent interagir au travers de la molécule, éloignés de plusieurs liaisons chimiques, c'est ce qu'on appelle le couplage entre atomes. Cette interaction donne une structure fine au spectre RMN.

### Spectrométrie de masse

La **spectrométrie de masse** est une technique de *détection* et d'*identification* extrêmement sensible qui permet de déterminer les structures moléculaires et donc la composition de l'échantillon. Il ne s'agit pas d'une spectroscopie *stricto sensu*, car elle ne fait pas appel à des niveaux d'énergie discrets. Son principe ? Un composé introduit dans l'appareil est vaporisé puis **ionisé** par une *source* de bombardement électronique (à 70 eV). L'ion ainsi obtenu, appelé ion moléculaire, permet la détermination de la masse molaire du composé. Des ruptures des liaisons chimiques peuvent y former des ions fragments caractéristiques. Ceux-ci sont ensuite triés en fonction de leur rapport masse/charge dans un *analyseur* par

l'application d'un champ magnétique et/ou électrique, puis collectés par un *détecteur* qui amplifie le signal associé aux ions qui arrivent en des temps différents. Un système de traitement des données transforme les informations du détecteur en un **spectre de masse** dont la lecture, par comparaison avec des spectres références, permet d'établir la carte d'identité de la molécule. En utilisant un spectromètre de masse haute résolution, il est possible de déterminer la masse exacte du composé et les pourcentages isotopiques de chaque atome.

Le choix de la méthode d'ionisation est directement lié à la nature de l'échantillon et au type d'analyse. Si la spectrométrie de masse s'est progressivement adaptée aux exigences croissantes des chimistes et des biologistes (séparation de mélanges de plus en plus complexes et de forte polarité et détermination de masses moléculaires de plus en plus élevées sur des échantillons de plus en plus limités), c'est essentiellement grâce aux progrès des *techniques d'ionisation* dont l'émission ionique secondaire sur surface (SIMS), l'ionisation chimique, le thermospray et la source à bombardement d'atomes rapides (FAB), jusqu'à, dans les années 80, la désorption laser assistée par matrice (MALDI, pour *Matrix Assisted Laser Desorption Ionisation*) et l'électrospray (ESI, pour *ElectroSpray Ionisation*), ainsi qu'à ceux des *techniques de détection*, de la mesure du temps de vol (TOF) à la "trappe ionique" (IT) en passant par les quadripôles (MS ou Q). En protéomique, par exemple, seules la MALDI, l'ESI et la SELDI (*Surface Enhanced Laser Desorption/Ionisation*) sont utilisées.

La **spectrométrie de mobilité ionique IMS** (*ion mobility spectrometry*) est une technique d'analyse chimique en phase gazeuse qui consiste à soumettre un gaz à un champ électrique. Les molécules ionisées acquièrent une vitesse caractéristique de l'ion car dépendant de la masse et de la charge. L'arrivée des ions sur une des plaques produisant le champ provoque un courant qui est enregistré. Il est possible de relier le temps au bout duquel un pic se produit avec la nature de l'ion l'ayant provoqué.

Les scientifiques font souvent appel au couplage d'appareils appartenant aux deux grandes familles de techniques d'analyse (encadré E, **Qu'est-ce que la chromatographie ?**), par exemple, d'un chromatographe et d'un spectromètre de masse (ou d'un détecteur à capture d'électrons ECD), notamment pour étudier des mélanges complexes à l'état de traces.

# B Interactions fondamentales et particules élémentaires

Le **modèle standard** de la physique des particules est le cadre théorique de référence qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues (tableau 1) et les **interactions** fondamentales auxquelles ces particules participent (tableau 2). Les constituants élémentaires de la matière, appelés **fermions**, se partagent en deux grandes catégories déterminées par leur participation aux interactions ou forces fondamentales (**gravitationnelle**, **électromagnétique**, **faible** et **forte**) par l'intermédiaire de **bosons vecteurs**, particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature<sup>(1)</sup> (tableau 2). L'appartenance d'une particule à la catégorie des fermions ou à celle des bosons est liée à son **spin** (moment angulaire ou moment de rotation interne intrinsèque), suivant qu'il est de valeur demi-entière (fermion) ou entière (**boson**). À chaque constituant de la matière est par ailleurs associée son **antiparticule**, une particule de même masse mais de charge opposée. Le **positon** est ainsi l'antiparticule de charge positive de l'**électron**, dont la charge est négative.

## Leptons et quarks

Les fermions comportent, d'une part les **leptons**, qui peuvent se déplacer librement et ne participent pas à l'**interaction forte** qui assure la cohésion des **noyaux atomiques** (elle est pour cette raison qualifiée de **nucléaire**), et d'autre part les **quarks**, qui participent à toutes les interactions mais ne sont pas observés individuellement, imbriqués qu'ils sont au sein des **hadrons**, les particules sensibles à l'interaction forte dont ils sont les constituants<sup>(2)</sup>.

Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** participent à l'**interaction électromagnétique** (qui assure la cohésion des **atomes** et des **molécules**) et à l'**interaction faible** (à la base de phénomènes de désintégration et en particulier de la **radioactivité  $\beta$** ). Les **leptons neutres** ou **neutrinos**, pour leur part, ne participent qu'à l'interaction faible. De masse très réduite, il en existe un type pour chaque type de lepton chargé.

Indépendamment de leur participation aux interactions, les constituants élémentaires de la matière sont classés en trois **générations** ou **familles** de particu-

les. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses, chaque famille étant plus lourde que la précédente.

L'**électron**, le quark haut (u pour *up*) et le quark bas (d pour *down*), qui appartiennent à la première génération, sont les particules massives les plus légères et sont stables. Ce sont les constituants exclusifs de la **matière ordinaire**, dite **baryonique** (un **baryon** est un assemblage de quarks) faite de **protons** et de **neutrons** qui ne représente pourtant qu'environ 4 % du contenu énergétique de l'Univers!

Les particules des deux autres familles sont plus lourdes et instables, à l'exception des neutrinos, qui ont cependant une masse non nulle mais qui sont stables. Elles ne peuvent être observées ou détectées que dans les états finals des collisions produites dans les **accélérateurs** ou dans le **rayonnement cosmique** et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.

D'après la **mécanique quantique**, pour qu'il y ait une interaction entre particules de matière ordinaire, il faut qu'au moins une particule élémentaire (un boson) soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le boson **intermédiaire** (ou **vecteur**) de l'interaction électromagnétique, les  **$W^+$** ,  **$W^-$**  et  **$Z$**  sont les bosons intermédiaires de l'interaction faible, et les **gluons** sont ceux de l'interaction forte au niveau des quarks. Quant au **graviton**, vecteur supposé de l'interaction gravitationnelle, il n'a pas été découvert expérimentalement. La **force gravitationnelle**, qui s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse, n'est pas incluse dans le modèle standard, d'autant que la théorie des champs quantiques appliquée à la gravitation n'est pas viable en l'état. Si les effets gravitationnels sont négligeables dans les mesures de physique des particules, ils deviennent dominants aux échelles astronomiques.

## La portée des interactions

Les quarks et les leptons chargés échangent des photons. Le photon ayant une charge électrique nulle, ces particules conservent leur charge électrique après

l'échange. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.

Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés**, où les vecteurs de l'interaction sont  **$W^+$**  et  **$W^-$** , et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est  **$Z^0$** . Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/c<sup>2</sup> pour  **$W^\pm$**  et 91 GeV/c<sup>2</sup> pour  **$Z^0$** ), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10<sup>-18</sup> m. Les bosons  **$W^\pm$**  possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson  **$Z^0$**  étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changeront pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont capables aussi d'échanger un  **$Z^0$** . De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un  **$Z^0$**  avec une autre particule, mais pas un photon.

Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur<sup>(1)</sup> échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes

(1) La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur) ou "nombres quantiques conservés". La charge de couleur, nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes, peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue" (ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles). Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

(2) Exemple des **nucléons** : le proton contient deux quarks haut et un quark bas, le neutron deux quarks bas et un quark haut. Un **méson** n'est composé que de deux quarks (un quark et un antiquark).

# B (suite)

une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluons entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais puisqu'ils sont dotés d'une charge

de couleur, ils peuvent interagir entre eux, ce qui complique grandement le traitement théorique de cette interaction. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de  $10^{-15}$  m.

## La quête de l'unification

Le cadre théorique du modèle standard est la **théorie quantique des champs** qui permet de décrire quantitativement les interactions fondamentales des parti-

|   | leptons<br>peuvent se déplacer librement   |  | quarks<br>s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques                 |   |
|---|--|--|--|---|
| <b>Fermions</b><br>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.<br><br>Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs. | <b>première famille</b><br><b>électron (e)</b><br>responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1<br>masse : 0,511 MeV/c <sup>2</sup> | <b>neutrino électronique (ν<sub>e</sub>)</b><br>sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant | <b>bas (d)</b><br>sa charge électrique est -1/3<br>le proton en contient un, le neutron deux<br>masse : 4 - 8 MeV/c <sup>2</sup>   | <b>haut (u)</b><br>sa charge électrique est +2/3<br>le proton en contient deux, le neutron un<br>masse : 1,5 - 4 MeV/c <sup>2</sup> |
|   | <b>deuxième famille</b><br><b>muon (μ)</b><br>un compagnon plus massif de l'électron<br>masse : 105,658 MeV/c <sup>2</sup>                                     | <b>neutrino muonique (ν<sub>μ</sub>)</b><br>propriétés similaires à celles du neutrino électronique                              | <b>étrange (s)</b><br>un compagnon plus lourd du "bas"<br>masse : 80 - 130 MeV/c <sup>2</sup>                                      | <b>charmé (c)</b><br>un compagnon plus lourd du "haut"<br>masse : 1,15 - 1,35 GeV/c <sup>2</sup>                                    |
|   | <b>troisième famille</b><br><b>tau (τ)</b><br>encore plus lourd<br>masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c <sup>2</sup>   | <b>neutrino tauique (ν<sub>τ</sub>)</b><br>propriétés similaires à celles du neutrino électronique                               | <b>beauté (b)</b><br>encore plus lourd<br>masse : 4,1 - 4,4 GeV/c <sup>2</sup>   | <b>top (t)</b><br>le plus lourd de la famille (observé en 1995)<br>masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c <sup>2</sup>                           |
| <b>Bosons vecteurs</b><br>Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.  | <b>photon</b><br>grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique  | <b>gluon</b><br>porteur de la force forte entre quarks   | <b>W<sup>±</sup>, Z<sup>0</sup></b><br>porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive |   |
| <b>Boson de Higgs?</b> responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"  |  |  |  |   |

Tableau 1.

Table des douze constituants élémentaires de matière dont le modèle standard décrit les interactions. Les trois leptons chargés (électron, e<sup>-</sup>, muon, μ<sup>-</sup>, tau, τ<sup>-</sup>) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν<sub>e</sub>, ν<sub>μ</sub>, ν<sub>τ</sub>) ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les six quarks (up, charm et top - ou u, c, t - de charge 2/3 et down, strange, bottom - ou d, s, b - de charge -1/3) sont sensibles aux trois interactions. Chaque constituant élémentaire possède son antiparticule, de même masse et de nombres quantiques algébriques (comme la charge électrique) de signe inversé.

## B (suite)

cules élémentaires en respectant les principes de la *relativité restreinte* et ceux de la mécanique quantique. D'après cette dernière, pour observer une structure microscopique à haute résolution temporelle et spatiale, il est nécessaire de lui transférer une énergie-impulsion d'autant plus élevée que la résolution souhaitée est fine. Mais d'après la théorie de la relativité, ce transfert d'énergie-impulsion peut se transformer en apparition de particules qui n'étaient pas présentes dans l'état initial : les fermions peuvent être produits ou annihilés par paires particule/antiparticule, les bosons peuvent l'être en nombre arbitraire.

Tous les processus relevant d'une même interaction fondamentale sont reliés les uns aux autres. La démarche de la théorie quantique des champs, dans laquelle les propriétés de **symétrie** jouent un rôle fondamental, vise à décrire l'ensemble des processus relatifs à chaque interaction fondamentale au sein de grandes synthèses théoriques.

L'interaction forte et l'interaction électromagnétique sont respectivement formalisées dans les théories de la **chromodynamique quantique** et de l'**électrodynamique quantique**. L'interaction faible, quant à elle, n'est pas décrite isolément, mais en conjonction avec l'interaction électromagnétique dans le formalisme unifié de la **théorie électrofaible**. Des théories de grande *unification* de toutes les interactions fondamentales existent, mais n'ont pas encore reçu de validation expérimentale.

Toutes les prédictions du modèle standard ont été confirmées par l'expérience, à l'exception jusqu'à présent d'une seule, à l'existence du (des ?) **boson(s) de Higgs**, particule(s) que l'on espère bien découvrir au LHC. Le **mécanisme de Higgs** serait responsable de la masse des particules élémentaires, le boson éponyme permettant de donner une masse aux fermions de masse nulle interagissant avec lui. Il permettrait l'unification, à haute énergie, des interactions électromagnétique et faible au sein de la théorie électrofaible et expliquerait efficacement la **brisure de cette symétrie électrofaible** à basse énergie, qui se traduit par deux interactions qu'on peut distinguer à ce niveau d'énergie (voir

*L'interaction électrofaible d'un accélérateur à l'autre : la feuille de route du LHC à l'aune des mesures du LEP, p.23*).

### Dépasser ou compléter le modèle standard ?

Le modèle standard comporte une série de paramètres (tels que les masses des particules ou les intensités des forces fondamentales) qui sont "calés" sur les résultats expérimentaux. C'est, en tout état de cause, une théorie susceptible d'être améliorée ou approfondie, voire dépassée. Il ne fournit pas d'explication à la classification des constituants de la matière en trois générations de particules, alors que c'est précisément l'existence de ces trois générations qui permet de rendre compte de la **violation de l'invariance CP** charge/parité (qui fait qu'un processus physique impliquant l'interaction faible n'est pas équivalent à son image dans un miroir), violation qui est vraisemblablement à l'origine du déséquilibre matière/**antimatière** au profit de la première dans l'univers primordial. Il ne permet ni le traitement quantique de la gravitation ni ne fournit d'explication complète à la propriété fondamentale du **confinement** qui interdit aux quarks de se propager à l'état libre hors des hadrons.

Pour dépasser ou compléter le modèle standard, les chercheurs explorent principalement deux voies :

– la **supersymétrie** (communément

appelée SUSY) associerait à chaque particule (boson ou fermion) du modèle standard un partenaire, respectivement fermion ou boson. Ces partenaires seraient *a priori* très massifs, le plus léger d'entre eux serait une particule n'interagissant que très faiblement. Elle serait un candidat idéal pour expliquer la **masse cachée** (ou **matière noire**) de l'Univers qui représente quelque 21 % du contenu énergétique de l'univers, le reste (près de 75 %) étant constitué d'une **énergie noire** dont la nature reste également à déterminer. Ces WIMPs (acronyme anglais de Weakly Interacting Massive Particles) sont activement recherchés (voir *Edelweiss II, à la recherche des particules de matière noire*).

– la voie de la **sous-structure** présume qu'il existerait un nouveau niveau d'élémentarité sous-jacent aux particules du modèle standard (ou à certaines d'entre elles). Elle déboucherait sur toute une floraison de nouvelles particules composites, analogues aux hadrons, mais de masses deux à trois mille fois plus élevées.

À noter que si les théories supersymétriques donnent des prédictions en accord avec les mesures de précision faites au LEP, les théories qui proposent des sous-structures (du moins leurs versions les plus simples) n'y parviennent pas. Quant aux versions les plus complexes, elles rencontrent des problèmes au niveau théorique.

| interaction fondamentale      | particules associées (messagers) | actions   |
|-------------------------------|----------------------------------|---|
| gravitation                   | graviton ?                       | de portée infinie, elle est responsable de la force d'attraction de deux masses entre elles et de la chute des corps                            |
| interaction électromagnétique | photon                           | de portée infinie, elle est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules |
| interaction faible            | $W^+$ , $W^-$ , $Z^0$            | elle est responsable des radioactivités $\beta^-$ et $\beta^+$ et de réactions impliquant des particules comme le neutrino                      |
| interaction forte             | gluons (il en existe 8)          | elle assure la cohésion du noyau atomique   |

Tableau 2. Les interactions fondamentales, leurs vecteurs et leurs effets.

# E Qu'est-ce que la chromatographie ?

La chromatographie et les différentes formes de spectroscopie et de spectrométrie (encadré D, *Spectroscopie et spectrométrie*) constituent les deux grandes techniques de base d'analyse, l'une séparative, l'autre *identificatrice* des composants d'un corps.

La **chromatographie** (du grec *chrôma*, couleur et *graphein*, écrire) permet la *séparation* des constituants d'un mélange en phase homogène liquide ou gazeuse, comme un buvard réparti en auréoles concentriques un liquide répandu à sa surface. Un chromatographe est constitué d'un dispositif d'injection de l'échantillon, d'une colonne, d'un détecteur et d'un système d'enregistrement et d'analyse. Son principe repose sur l'équilibre de concentrations des composés entre deux phases en contact : la *phase stationnaire*, dans la colonne, et la *phase mobile*, qui se déplace. La séparation est basée sur l'entraînement différentiel des constituants dans la colonne, qu'ils parcourent en des temps proportionnels à leur taille ou leur structure, ou selon leur affinité avec la phase stationnaire (polarité...). À leur arrivée en bout de colonne, un *détecteur* mesure en continu la quantité de chacun.

La chromatographie la plus courante se fait en **phase gazeuse** sur des échantillons gazeux ou susceptibles d'être vaporisés sans décomposition. La phase mobile est un gaz (**hélium**, azote, argon ou **hydrogène**) qui balaie en permanence la colonne placée dans un four à thermostat. Les détecteurs permettent l'analyse sélective et l'identification de mélanges très complexes.

Si la phase stationnaire est un liquide non ou peu volatil possédant des propriétés de solvant des composés à séparer, il s'agit de **chromatographie gaz-liquide** ou *chromatographie de partage*.

Si la phase stationnaire est un solide adsorbant (silice, alumine, zéolites ou **polymères**), c'est de la **chromatographie gaz-solide**. Dans cette même famille des chromatographies d'**adsorption**, la **chromatographie liquide-solide** se caractérise par sa phase stationnaire qui est un adsorbant solide polaire.

Dans la **chromatographie liquide haute performance (CLHP)**, l'échantillon doit être totalement soluble dans la phase mobile (solvant d'élué). Celui-ci doit être poussé à haute pression (d'où la dénomination alternative de chromatographie liquide *haute pression*) afin d'assurer un débit constant dans la colonne et éviter toute perte de charge. La CLHP fait intervenir des mécanismes d'échange soluté/phase mobile/phase stationnaire, basés sur les coefficients de partage ou d'adsorption selon la nature des phases en présence <sup>(1)</sup>.

Une analyse chromatographique donne un **chromatogramme**, représentation graphique de l'évolution d'un paramètre (intensité du signal du détecteur) lié à la concentration instantanée du soluté en fonction du temps. Il fait apparaître des *pics* émergeant de la *ligne de base*, obtenue en l'absence de composés (figure).

(1) Il existe deux autres types de chromatographie liquide, *ionique* et *d'exclusion*.

N.B. Cet encadré reprend certains passages d'un texte de Pascale Richardin, responsable du groupe Datation au Centre de recherche et de restauration des Musées de France, extrait des pages sur les méthodes d'analyse du site <http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/biblioth/biblioth.htm>.

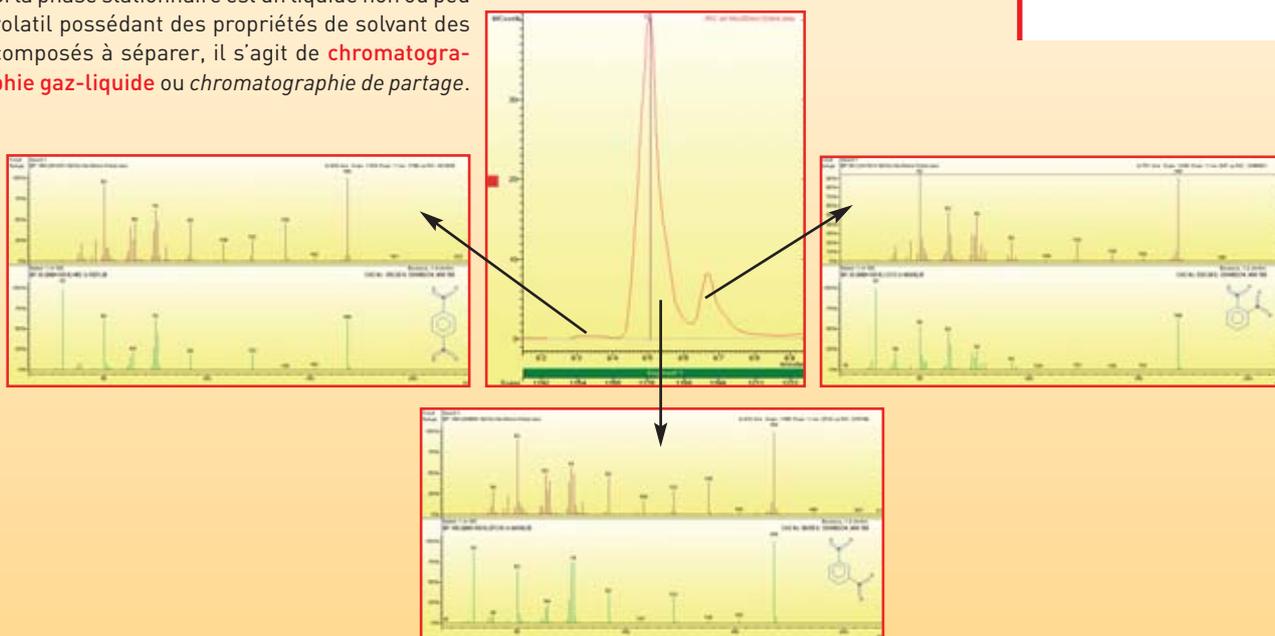


Figure.

Exemple d'utilisation combinée de la spectrométrie de masse et de la chromatographie : séparation des isomères ("molécules sœurs") d'une molécule explosive (le dinitrobenzène DNB) après prélèvements par micro-extraction en phase solide par chromatographie en phase gazeuse et détection par spectrométrie de masse (SPME-GC-MS).