

Les mesures de l'extrême dans les plasmas créés par laser

Des conditions extrêmes de température et de pression règnent dans les installations de fusion thermonucléaire par confinement inertiel comme la Ligne d'intégration laser (LIL) et surtout le Laser Mégajoule (LMJ), outils majeurs du programme CEA de défense. Elles nécessitent l'élaboration de dispositifs de mesure particulièrement performants en termes de précision, de dynamique de mesure et de gamme spectrale et capables de fonctionner dans un environnement neutronique et radiatif particulièrement sévère.



Contrôles de diagnostics à l'intérieur de la chambre d'expérience de la Ligne d'intégration laser (LIL), installation prototype du laser Mégajoule (LMJ) constituée d'une chaîne laser élémentaire comportant quatre faisceaux.

Des quatre états de la matière, l'état **plasma** est sans doute le plus riche. Tandis que les solides, les liquides et les gaz sont définis par des conditions de température, de pression ou de densité limitées, les conditions d'existence du plasma sont bien plus étendues, ce qui le rend omniprésent dans notre vie quotidienne (éclairage fluorescent, téléviseurs, éclairages...) et jusqu'aux confins de l'Univers (étoiles, nébuleuses...). Parmi ces conditions d'existence, les plasmas chauds créés par interaction **laser**-matière à des fins de **fusion par confinement inertiel (FCI)** (encadré C, **Le principe de la fusion thermonucléaire**) sont ceux présentant les caractéristiques les plus extrêmes, à l'instar des conditions présentes au cœur des étoiles (figure 1).

Objet de l'expérimentation plasmas chaud

Leur capacité à porter la matière dans des conditions extrêmes de température et de pression (10 millions

de degrés et 100 millions de **bars**) fait des installations laser de haute énergie, telles que la Ligne d'intégration laser (LIL) et le Laser Mégajoule (LMJ), deux installations du centre Cesta du CEA, en Gironde, des outils permettant d'aborder une grande diversité d'expérimentations. Celles-ci concernent en premier lieu le programme Simulation de la Direction des applications militaires (DAM) du CEA (hydrodynamique radiative, comportement de la matière à haute température et/ou haute pression) qui intègre toute la problématique liée à la FCI, mais aussi des études plus fondamentales (**opacités spectrales, équations d'état**, astrophysique).

La FCI consiste à réaliser la **fusion thermonucléaire** d'un mélange de **deutérium** et de **tritium (DT)**, contenu dans une capsule, en le portant à des conditions de température et de pression extrêmes (voir encadré page suivante et sa figure). Atteindre ces conditions constitue un défi qui ne peut être relevé

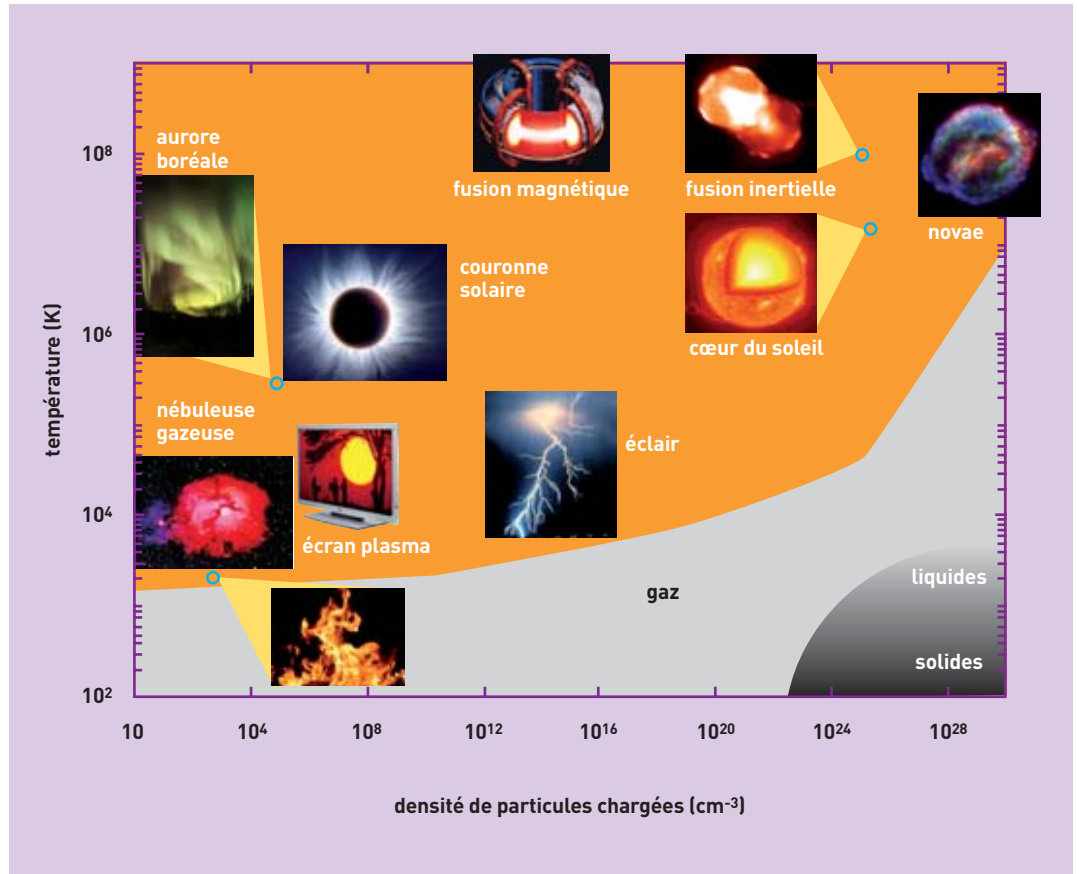


Figure 1. Domaine d'existence des divers plasmas en fonction de la densité et de la température. Les plasmas rencontrés en fusion par confinement inertiel présentent des conditions extrêmes qui se rapprochent de celles rencontrées au cœur des étoiles.

qu'au prix de la maîtrise des multiples processus physiques intervenant dans la mise en condition du combustible thermonucléaire: couplage de l'onde laser avec les ondes ionique et électronique du plasma de l'enceinte (physique de l'interaction); conversion de l'éclairement laser en rayonnement X, hydrodynamique du plasma de l'enceinte, maîtrise de la symétrie d'éclairement de la capsule durant

toute l'impulsion laser (physique de l'enceinte); ablation de la capsule par le flux radiatif, contrôle des instabilités hydrodynamiques, mise en vitesse et combustion (physique de la capsule). Tous ces processus font l'objet de thèmes de recherche qui nécessitent des expérimentations dédiées afin de faire progresser la simulation et la compréhension des phénomènes.

La fusion par confinement inertiel

Pour la **fusion à confinement inertiel (FCI)**, le mélange **deutérium tritium (DT)** qui doit être amené aux conditions voulues (encadré C, *Le principe de la fusion thermonucléaire*) est contenu sous forme solide à -250 °C dans une capsule sphérique millimétrique. Il est porté à des conditions de température et densité de quelque 10 millions de degrés et quelque 100 g/cm³ en vaporisant brutalement (en quelques **nanosecondes**) l'extérieur de la capsule: par conservation de la quantité de mouvement, l'intérieur de celle-ci implose, comprimant et chauffant suffisamment le DT pour provoquer son "inflammation" à partir d'un point chaud et déclencher les réactions de fusion (**ignition**).

Ce chauffage demande une puissance considérable que seuls les lasers peuvent fournir. Il est réalisé en éclairant la capsule par des faisceaux laser intenses

(**attaque directe**) ou en positionnant la capsule dans une enceinte servant à convertir les faisceaux laser en rayonnement thermique (**attaque indirecte**). Dans ce deuxième cas, on réalise un "four à rayonnement X": c'est le rayonnement

produit lors du dépôt d'énergie laser sur les parois de l'enceinte qui chauffe la capsule, dont la partie interne implose à des vitesses d'environ 100 km/s, créant dans le DT les conditions d'inflammation (figure).

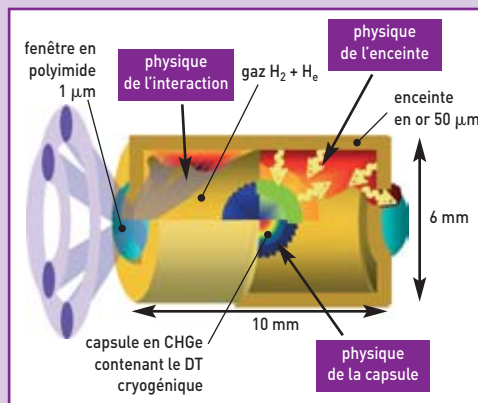


Figure. Cible pour la FCI, constituée d'une enceinte en or remplie d'un mélange gazeux et d'une capsule en plastique dopé au germanium, positionnée au centre, renfermant le mélange fusible sous forme cryogénique. Les faisceaux laser, répartis en plusieurs cônes de part et d'autre de l'enceinte, y pénètrent par deux trous axiaux recouverts de fines membranes de polyimide afin de maintenir le gaz. Les différents processus physiques en jeu relèvent de l'interaction du laser avec le plasma, de l'hydrodynamique radiative de l'enceinte et de l'hydrodynamique de la capsule ainsi que de sa combustion.

Caractéristiques des plasmas de FCI

Dans la cible conçue en vue de la FCI sur le LMJ (figure de l'encadré), les faisceaux laser, répartis selon plusieurs cônes d'irradiation de part et d'autre de l'enceinte cylindrique, entrent par les deux trous et viennent impacter les parois de l'enceinte en or après avoir traversé le gaz (dont la pression freine la détente du plasma de paroi) et la fenêtre en polyimide⁽¹⁾ (qui retient le gaz).

Les principales caractéristiques des plasmas de FCI (tableau 1) définissent le besoin en termes de dynamique de mesures et de **résolution** pour l'étude de ces plasmas.

Les dimensions s'étalent sur quatre ordres de grandeur depuis l'enceinte (centimétrique) jusqu'au point chaud (quelques dizaines de **micromètres** [μm]), ce qui impose des résolutions spatiales micrométriques pour les dispositifs imageurs. Quant aux échelles de temps, elles couvrent trois ordres de grandeurs, de la durée de l'impulsion laser (~20 **nanosecondes**) à la durée de la combustion du DT (quelques dizaines de **picosecondes** [ps]). Les lasers de puissance permettent par ailleurs d'atteindre des niveaux de pression de plusieurs centaines de mégabars, voire d'un gigabar (avec le LMJ).

Les mesures en physique des plasmas

Le contrôle des différents processus physiques requiert la maîtrise des mesures associées, la validation d'une simulation dépendant de la capacité de mesure: les dispositifs de mesure définissent les *observables*, qui sont le point de rencontre entre l'expérience et la simulation, et les performances de ces dispositifs imposent les précisions de mesures, dont va dépendre la précision de validation des **codes** de calcul.

Problématique de la mesure

Bon nombre de mesures, parmi les plus pertinentes pour décrire les conditions de la matière, ne sont pas directement accessibles dans les plasmas. Il en est ainsi de l'énergie, la température, la pression ou la densité... Par ailleurs, dans l'impossibilité de mesurer à l'intérieur ou à proximité du plasma, en raison des conditions extrêmes qui y règnent, les dispositifs de mesures en sont éloignés, à l'exemple, toutes proportions gardées, des mesures en astrophysique.

Les mesures accessibles sont les *dimensions*, à l'aide de systèmes imageurs, l'*évolution temporelle d'un phénomène*, à l'aide d'analyseurs électrique ou optique, la *vitesse*, mesurée par **effet Doppler** ou par la combinaison des précédentes, enfin l'*énergie* et le *nombre de particules émises* (dont les **photons**), qui sont mesu-



P. Stropial/CEA

Chambre d'expérience du LMJ en cours d'assemblage sur le site du Cesta. On distingue sur la sphère les orifices de forme carrée par lesquels pénétreront les 240 faisceaux laser (groupés par 4) et ceux, généralement circulaires, réservés aux multiples dispositifs de mesure.

rés à partir de détecteurs étalonnés, et qui permettent de remonter à la *densité spectrale* ou spectre.

À partir de ces mesures de base, il est possible de déduire les grandeurs les plus pertinentes, parfois à l'aide de **modèles** théoriques: l'énergie ou la température à partir du spectre, la pression à partir de mesures de vitesse et des relations de Rankine-Hugoniot⁽²⁾, la densité par élargissement des **raies d'émission X** (**effet Stark**) ou le profil du **spectre neutronique**...

La plupart des mesures reposent sur les multiples émissions du plasma: **lumière visible** et **UV** (pour le bilan d'énergie laser ou l'émission d'un front de choc...), rayonnement X et **gamma** (de quelque 10 **eV** à quelques **MeV**), particules (**neutrons**, **électrons**, **ions**, **particules alpha**, **protons**). Des exemples de mesures dans les domaines spatial, temporel et spectral sont donnés ci-dessous.

Mesures dimensionnelles dans le domaine X

Les besoins en systèmes d'imagerie dans le domaine X sont assez nombreux, aussi bien pour étudier l'émission propre du plasma que pour observer l'évolu-

(1) Polyimide: polymère technique à hautes performances formé de monomères imides, groupe fonctionnel formé de deux groupes carbonyle et d'une amine primaire.

(2) Relations de Rankine-Hugoniot: relations (au nombre de trois) qui relient les quantités de mouvement et d'énergie avant et après un choc créé dans un fluide comprimé par un piston qui se déplace à vitesse constante, et cela sans prendre en compte l'état thermodynamique du milieu considéré.

	dimensions	énergie stockée	temps	température	autre paramètre
enceinte	1 cm	1 MJ laser	15 ns (impulsion laser)	3 MK	
capsule	1 mm	100 kJ d'X	3 ns (phase d'implosion)	3 MK	vitesse d'implosion ~ 300 km/s
DT avant fusion	100 μm	10 kJ		3 MK	densité maxi ~ 300
point chaud	30 μm	1 kJ		30 MK	densité maxi ~ 100
fusion		10 MJ délivrée	30 ps (durée combustion)	1 000 MK	

Tableau 1. Grandeurs caractéristiques des plasmas de FCI.

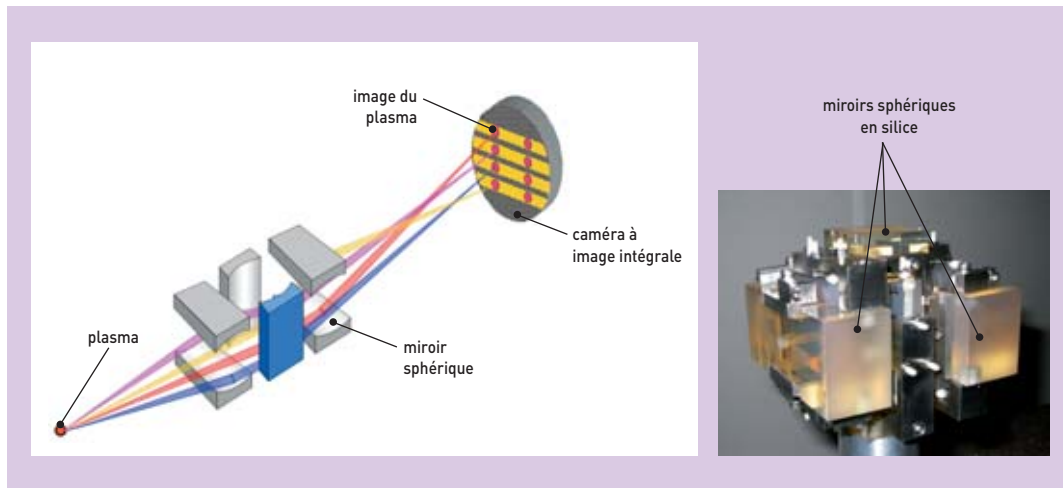


Figure 2. Dispositif multi-imageur pour rayonnement X. L'utilisation de six miroirs sphériques en incidence rasante permet de créer huit images en couplant les miroirs deux par deux (schéma de Kirkpatrick et Baez). La figure montre la formation des quatre images issues des réflexions sur le miroir vertical bleu et les quatre miroirs horizontaux. Les quatre autres images sont issues des réflexions sur l'autre miroir vertical. Les huit images sont acquises à des instants différents à l'aide d'une caméra à image intégrale.

tion de la cible par radiographie. Il existe différents types de dispositifs imageurs fonctionnant par projection, réflexion ou diffraction. Le simple **sténopé** fonctionne par projection : son manque de sensibilité peut être pallié par les ouvertures codées (assemblages de plusieurs sténopés selon des géométries diverses) qui nécessitent toutefois des **algorithmes de déconvolution** pour restituer l'objet. La réflexion est mise en œuvre dans les objectifs à miroirs X en incidence rasante qui peuvent être couplés à une *réflexion de Bragg* (résolution spectrale par miroirs interférentiels multicouches ou par cristaux courbes). La diffraction l'est dans des zones de Fresnel (fentes circulaires de diffraction de pas variable, analogues dans le domaine X des lentilles de Fresnel des phares maritimes dans le domaine visible) pouvant être couplées à des miroirs multicouches. Le système par réflexion présenté dans la figure 2, par exemple, atteint des résolutions micrométriques avec une souplesse d'emploi autorisant de multiples géométries. La configuration de base est le système optique conçu par Kirkpatrick et Baez constitué par deux miroirs sphériques perpendiculaires fonctionnant en incidence rasante. Chaque miroir assurant la focalisation dans une direction, le couplage des deux restituant une image bidimensionnelle. Ce dispositif permet d'obtenir une résolution de 5 μm sur un champ de vision restreint de 100 μm , et de 10 μm sur un champ de 1 mm.

À partir de cette structure de base, un système multi-imageur a été conçu en utilisant six miroirs sphériques dont deux sont perpendiculaires aux autres. En couplant ces miroirs deux par deux, huit images du même

objet sont créées et pourront être enregistrées à différents instants pour analyser l'évolution de l'objet. En changeant la nature du revêtement des miroirs et l'angle d'incidence, il est possible de travailler dans des gammes d'énergies différentes : deux dispositifs ont ainsi été développés (tableau 2).

Mesures temporelles

Les processus extrêmement rapides mis en jeu en physique des plasmas chauds nécessitent, pour leur étude, une analyse temporelle avec une résolution inférieure à 100 ps. Il n'existe pas de dispositif capable d'enregistrer directement une image avec une résolution temporelle aussi faible. La solution de ce problème passe par l'utilisation de systèmes transformant les signaux photoniques en signaux électroniques qu'il est plus aisé de manier pour obtenir les résolutions nécessaires.

Les caméras à images intégrales

Les caméras à images intégrales (CII; figure 3) sont capables de prendre des clichés toutes les 100 ps avec un temps de pose inférieur à 70 ps. Plusieurs images de l'objet à analyser sont simultanément formées sur la face d'entrée d'une galette de microcanaux recouverte de **photocathodes**. Les photons engendrant des électrons par **effet photoélectrique** permettent d'obtenir des images électroniques de faibles intensités. Dans la galette, chaque microcanal de $\sim 10 \mu\text{m}$ de diamètre, définissant la résolution spatiale du système, joue le rôle d'un amplificateur d'électrons dont le déclenchement est réglable. Les images obtenues en face arrière de la galette sont bien plus intenses (jus-

multi-imageur	angle d'incidence	revêtement des miroirs	gamme spectrale	grandissement
X mous	1,8 °	silicium	100 eV - 1keV	4
X durs	0,8 °	platine	1 - 5 keV	8

Tableau 2. Caractéristiques de systèmes multi-imageurs développés sur la Ligne d'intégration-laser (LIL).

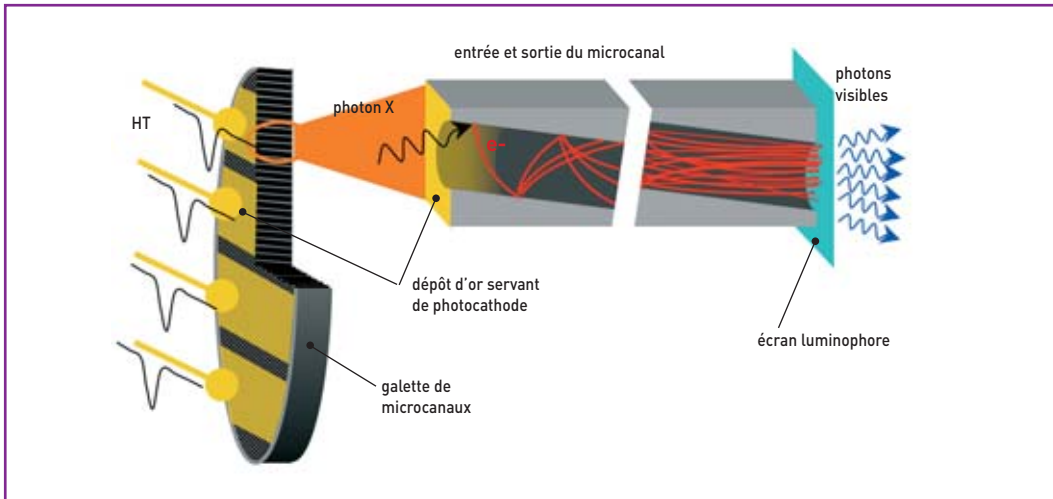
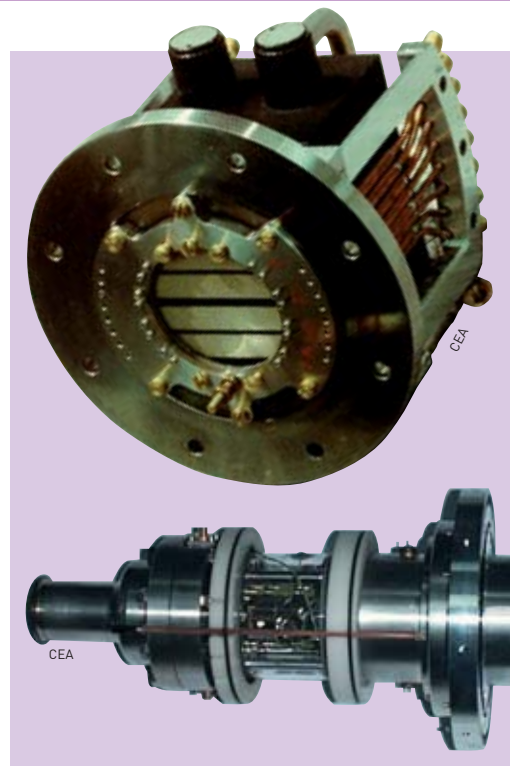


Figure 3. Schéma de fonctionnement d'une galette de microcanaux pulsée dans une caméra à image intégrale (CII). Les photons X génèrent des photoélectrons à l'entrée des microcanaux dont chacun agit comme un amplificateur électronique pendant le court instant que dure l'impulsion haute tension appliquée sur les pistes en or déposées sur la face avant de la galette.

qu'à 10000 fois) et les flux d'électrons sortant des canaux impactent un écran luminaire reformant une image visible "enregistrable" avec les systèmes classiques de prise d'images, films photographiques ou CCD. L'aspect temporel est obtenu en déclenchant les microcanaux à l'aide d'une tension pulsée qui se déplace le long de bandes d'or déposées sur la face avant de la galette jouant le rôle de photocathodes. La vitesse de propagation et la largeur à mi-hauteur de l'impulsion électrique polarisant la galette fixent le temps de pose de chaque image. En utilisant plusieurs bandes d'or déclenchées avec des retards différents, des images à différents instants apparaissent sur l'écran arrière de la CII, duplications des images formées en face avant.



Caméra à image intégrale avec ses quatre pistes en face avant et la connectique haute tension à l'arrière.

Caméra à balayage de fente.

Les caméras à balayage de fente

La caméra à balayage de fente (CBF; figure 4) est un appareil de cinématographie ultrarapide utilisé largement et depuis longtemps, mais dont l'évolution de l'électronique a permis d'améliorer considérablement les performances. Une photocathode, sous forme de fente, convertit le rayonnement en électrons par effet photoélectrique. Ceux-ci sont ensuite accélérés, le faisceau d'électrons étant focalisé par une optique électronique en milieu de tube avant de reformer

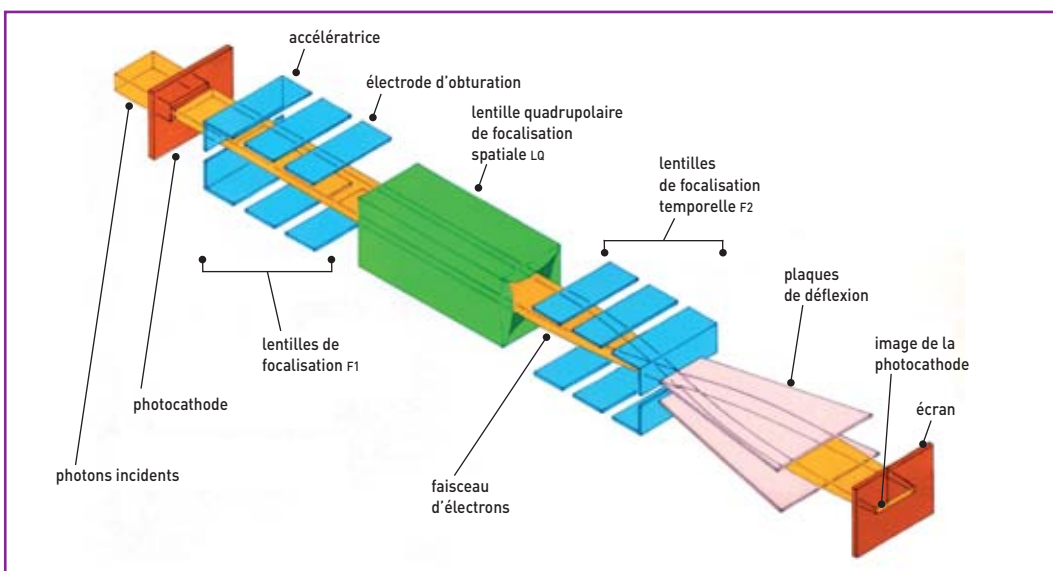


Figure 4. Caméra à balayage de fente (CBF). Le rayonnement X frappant la photocathode est transformé en faisceau d'électrons qui, après mise en forme par une optique électronique, est défléchi au cours du temps par des plaques de déflection avant d'impacter l'écran de sortie qui restitue un signal photonique visible.



mer l'image de la photocathode sur un écran arrière luminescent. Avant d'impacter l'écran, le faisceau traverse un espace entre deux plaques de déflexion. L'application d'une rampe de tension pulsée sur ces plaques permet de défléchir la trajectoire des électrons en fonction du temps, les électrons les plus tardifs (issus des photons eux-mêmes les plus tardifs) étant les plus défléchis. Ainsi se forme une image spatio-temporelle en deux dimensions, représentant l'évolution en fonction du temps (axe des ordonnées) de l'intensité du rayonnement frappant la fente de la photocathode (axe des abscisses) avec une résolution de l'ordre de 10 ps. Cette image est enfin mémorisée sur un film via un intensificateur de luminance ou au moyen d'un détecteur matriciel CCD à très faible bruit de lecture.

Vers des résolutions picosecondes

Les limites actuelles de ces dispositifs sont liées à l'électronique de puissance et à la difficulté de propager des impulsions de haute tension à front de montée raide. Si certains peuvent descendre à des résolutions de l'ordre de la picoseconde voire en dessous, c'est toujours au détriment de la dynamique de mesure : l'analyse n'est plus quantitative.

Si les études de FCI n'ont pas besoin de telles résolutions, les chercheurs peuvent être amenés à utiliser pour des études plus fondamentales des impulsions laser courtes (< 1 ps) qui créent des sources de rayonnements elles-mêmes "sub-ps". La résolution temporelle est alors donnée par la durée de ces sources et non par le dispositif d'analyse.

Mesure de température

Une grande partie des expériences utilise une configuration d'**attaque indirecte** pour laquelle le laser interagit dans une enceinte avec une paroi constituée d'un matériau à **Z** élevé (par exemple, l'or) : l'énergie X créée par le laser est recyclée dans les parois de l'enceinte (absorption-émission) et se **thermalise**. Le rayonnement X dans l'enceinte se rapproche de celui du **corps noir** et peut être alors caractérisé par une température radiative qu'il est nécessaire de mesurer.

Déterminer la température d'un objet de très petites dimensions n'est pas aisé, d'autant plus qu'il ne s'agit pas seulement de mesurer la température maximale atteinte dans la capsule, mais de connaître son

évolution temporelle (avec une résolution de 100 picosecondes).

Plusieurs méthodes sont utilisées, telle la mesure du temps que met le flux radiatif à traverser une feuille d'or (d'où l'on déduit la température à l'aide d'un modèle théorique) ou la mesure du temps que met le choc généré par le flux radiatif pour traverser un matériau dont l'équation d'état est connue, ce qui permet de remonter à la pression générée dans l'échantillon et donc à la température radiative.

Mais la mesure la plus fiable, ne faisant pas appel à des modèles théoriques, reste l'observation du spectre émis par la paroi de l'enceinte à travers un trou. Tout corps chauffé voit sa luminosité croître et son **spectre d'émission** se déplacer vers les courtes longueurs d'onde. À quelques millions de degrés, le maximum d'émissivité est situé dans le domaine des X de faible énergie (100 à 200 eV). La mesure absolue de cette émissivité, avec un **spectromètre** large bande, donne la température de l'enceinte.

Pour cela, une vingtaine de voies de mesures, constituées de filtres, de miroirs sous incidences rasantes et de diodes à vide à géométrie coaxiale (figure 5) sont disposées à une distance de plusieurs mètres. En modifiant la nature du filtre et du miroir de chaque voie, on sélectionne une portion différente du spectre émis entre 50 eV et 20 keV avec une résolution spectrale $1 < E/\Delta E < 6$. Le signal recueilli par chaque diode est enregistré sur oscilloscope⁽³⁾ rapide, de façon à atteindre la résolution temporelle requise (100 ps). Un logiciel spécifique recale les signaux entre eux, reconstruit le spectre de rayonnement issu de l'enceinte (typiquement de 10^{12} à quelque 10^{15} W/sr/cm²) et donne sa température à chaque instant entre 50 eV et 300 eV avec une incertitude inférieure à 5 %.

Un pas de plus dans l'extrême : l'environnement expérimental du LMJ

Les dispositifs présentés ci-dessus sont utilisés sur différentes installations laser lors d'expériences servant à préparer celles qui seront réalisées sur le LMJ pour atteindre l'**ignition**. Bien qu'ils présentent des

(3) Oscilloscope : instrument électronique permettant d'afficher en temps réel la représentation temporelle de signaux qui varient en fonction du temps.

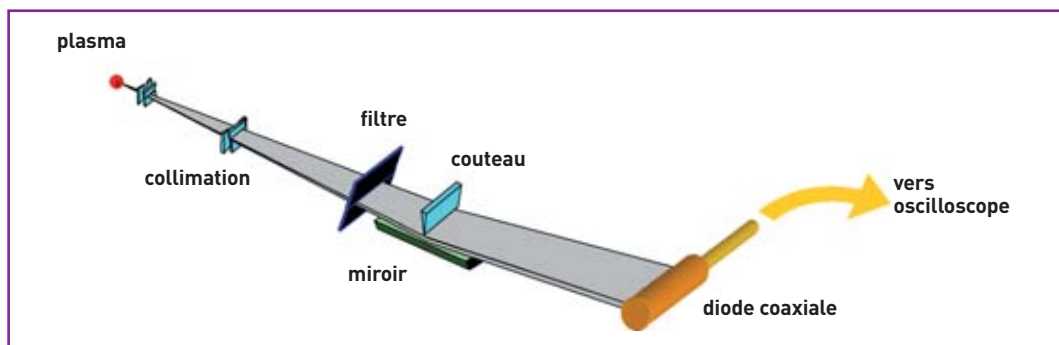


Figure 5. Principe du spectromètre large bande pour la mesure de la température radiative des enceintes. Le spectromètre se compose d'une vingtaine de voies de mesure, elles-mêmes constituées de différents éléments servant à sélectionner spatialement et spectralement une partie du spectre rayonné. La gamme spectrale de la voie de mesure dépend de la nature du filtre, du miroir et de la photocathode de la diode coaxiale. En modifiant judicieusement ces éléments, il est possible de définir différentes gammes spectrales qui échantillonnent le spectre entre 50 eV et 20 keV. Ce dispositif est installé sur l'installation Omega à l'université de Rochester.



Rochester University

Spectromètre large bande pour la mesure de la température radiative des enceintes installé sur l'installation Omega à l'université de Rochester, aux États-Unis.

caractéristiques extrêmes en termes de précision, de dynamique de mesure ou de gamme spectrale, ils n'intègrent pas encore les contraintes liées à l'environnement expérimental du LMJ.

En effet, lors du fonctionnement d'une cible de FCI, l'intense flux de neutrons et de rayonnement gamma qui en découlera produira de sévères perturbations pouvant aller jusqu'à la destruction d'une partie des dispositifs de mesure. Mettre au point des appareils de mesures dans un tel environnement constitue un défi d'autant plus ambitieux que la mise en condition de la matière n'est jamais idéale et que les causes de dysfonctionnement d'une cible FCI doivent

être minutieusement identifiées en mettant en œuvre les mesures appropriées.

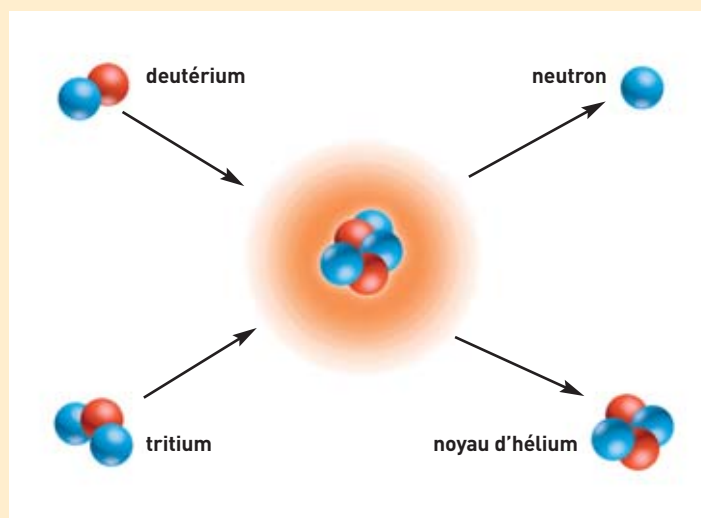
L'étude de systèmes complets, de la détection à l'enregistrement du signal, plus robustes aux rayonnements perturbateurs est un axe de recherche qui a déjà porté des fruits, mais qui reste un vaste champ d'exploration pour les années à venir en attendant les premiers tirs du LMJ.

> **Jean-Luc Miquel, Jean-Yves Boutin**
et **Dominique Gontier**
Direction des applications militaires
CEA DAM Ile-de-France (DIF/DCRE)

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/m³. 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⁻³, 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⁻³ 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**⁽¹⁾ **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⁽²⁾, 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, I₀ l'intensité lumineuse incidente, I l'intensité lumineuse transmise, ϵ le coefficient d'extinction **molaire** caractéristique de la substance étudiée à une longueur d'onde donnée en L mol⁻¹ cm⁻¹, 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.

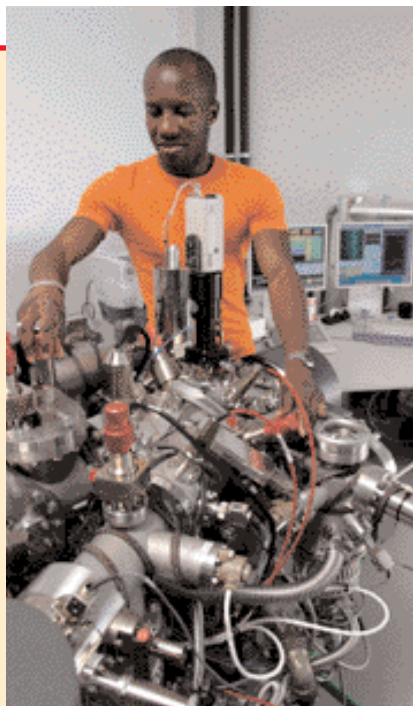
D (suite)

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⁽¹⁾ (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⁽²⁾.

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 β**). 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/c² pour **W^\pm** et 91 GeV/c² pour **Z^0**), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ 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⁽¹⁾ 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 peuvent se déplacer librement		quarks s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. 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.	première famille électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique (ν_e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas (d) sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 4 - 8 MeV/c ²	haut (u) sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4 MeV/c ²
	deuxième famille muon (μ) un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange (s) un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 130 MeV/c ²	charmé (c) un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 - 1,35 GeV/c ²
	troisième famille tau (τ) encore plus lourd masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c ²	neutrino tauique (ν_τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté (b) encore plus lourd masse : 4,1 - 4,4 GeV/c ²	top (t) le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
Boson de Higgs? 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⁻, muon, μ⁻, tau, τ⁻) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) 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, 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 β^- et β^+ 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 ⁽¹⁾.

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>.

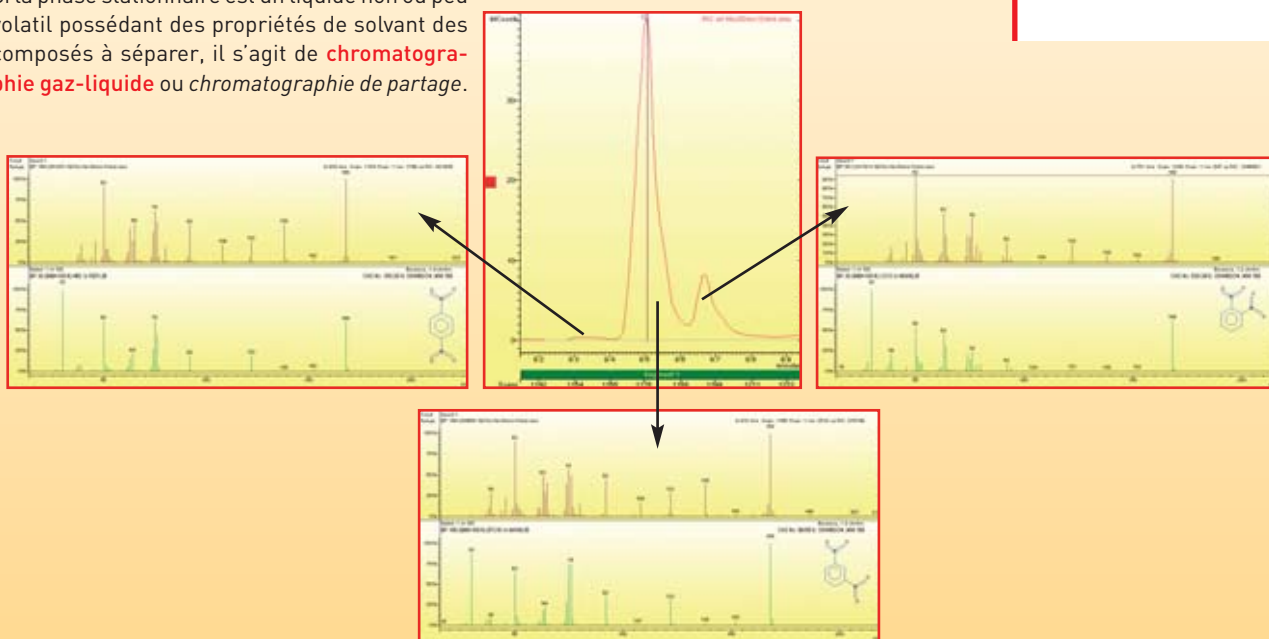


Figure.

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).