

En s'engageant dans la réalisation de deux installations majeures de fusion expérimentale, ITER (à gauche) et le LMJ (à droite), la France et le CEA se trouvent en première ligne dans le développement des deux grandes méthodes de confinement, magnétique d'une part, inertiel de l'autre.

## **II. LE SOLEIL SUR TERRE?**

Si, actuellement, la production d'énergie nucléaire repose sur Terre sur la *fission* des noyaux, phénomène marginal à l'échelle cosmique, les réactions thermonucléaires de *fusion* sont à l'œuvre dans pratiquement toutes les étoiles. En s'engageant dans la réalisation de deux installations majeures de fusion expérimentale, ITER et LMJ, de concepts différents, la France se trouve dans une situation exceptionnelle.

Guère plus de vingt ans après avoir compris les mécanismes de la fusion dans le Soleil, les chercheurs ont entrepris de s'en inspirer pour réaliser sur Terre des réactions de fusion thermonucléaire. Comme le souligne Yanick Sarazin avec l'exemple de la turbulence, phénomène universel extrêmement complexe, de très nombreuses propriétés des plasmas chauds doivent être encore mieux comprises et maîtrisées, démontrant l'importance de la recherche fondamentale dans la progression vers la domestication de l'énergie thermonucléaire. Chaque gramme du plasma du cœur solaire produit environ 2 millionièmes de watt. Il fallait absolument "faire mieux", en faisant appel à un mélange réactif de deutérium et de tritium, inexistant dans le Soleil. La rentabilité de la fusion fixe une valeur minimum (de l'ordre de  $10^{20}$  m<sup>-3</sup>·s) au produit du temps de confinement de l'énergie,  $\tau_{\rm E}$ , et de la densité en nombre de particules *n* par m<sup>3</sup> du plasma. Le confinement gravitationnel étant exclu à notre échelle terrestre, deux modes de confinement et de régime de combustion sont en lice. Le premier est quasi-continu ( $\tau_{\rm F}$  long); un plasma très chaud et très dilué (*n* faible) est contenu par une structure magnétique complexe et de grand volume : c'est la voie de la fusion par confinement magnétique. Michel Chatelier et Philippe Magaud décrivent la progression sur 30 ans de la physique et des techniques des tokamaks, aboutissant à l'étape déterminante de démonstration de la maîtrise du plasma en combustion, qui incombera à ITER. Le second régime est discontinu et répétitif; la fusion, explosive cette fois, est réalisée dans un minuscule volume de plasma, lancé en compression extrêmement rapide ( $\tau_{\rm F}$  court) pour le chauffer et le comprimer très fortement (n élevé), afin de libérer suffisamment d'énergie avant la dispersion du mélange : c'est la voie de la fusion par confinement inertiel. Elle réclame un apport d'énergie de l'ordre d'un mégajoule, confié aux 240 chaînes lasers du LMJ. Guy Schurtz, Claude Rullière, Philippe Baclet et Jacques Tassart décrivent les exigences scientifiques et techniques qui s'enchaînent, du microscopique au macroscopique, pour mener à la fusion dans des plasmas encore plus denses et plus chauds que ceux du cœur du Soleil. L'adaptabilité des lasers, en tant que vecteurs d'énergie pour la production de plasmas, ouvre largement les sciences de la fusion par confinement inertiel sur plusieurs domaines de la physique de la matière dans des conditions extrêmes.

> > Jean-Pierre Chièze la matière - CEA centre de Saclay

Direction des sciences de la matière - CEA centre de Saclay Institut lasers et plasmas - Université de Bordeaux 1



**Maîtriser sur Terre la fusion des noyaux légers tels que le deutérium et le tritium** à des fins de production d'énergie ouvrirait la voie à des ressources quasiment illimitées. C'est l'objectif des recherches engagées par les grandes nations industrielles et, en particulier, par l'Union européenne. L'état de développement de ces recherches doit permettre à la communauté "fusion" de relever aujourd'hui le défi de la construction du dispositif expérimental devant démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion : ITER. Non producteur d'électricité, ITER servira de base à l'étape suivante : un démonstrateur de réacteur électrogène.

# La fusion par **confinement magnétique**



Les installations du réacteur expérimental ITER telles qu'elles se présenteraient sur le site de Cadarache (Bouches-du-Rhône) proposé par l'Union européenne. Au premier plan, l'installation existante construite autour de Tore Supra.

#### Les grands principes de la fusion

Pour obtenir une réaction de **fusion**, il faut rapprocher avec suffisamment de force deux **noyaux** qui, chargés tous deux positivement, ont une tendance naturelle à se repousser (encadré D, *Les réactions de fusion nucléaire*, p. 47). Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière naturelle et arriver dans la zone, très proche du noyau, où se manifestent les forces nucléaires capables de l'emporter.

La fusion exige donc de hautes températures du milieu réactant, typiquement plus de 100 millions de degrés (10 keV), qui permettent d'optimiser la quantité de réactions produites. À de telles températures, les électrons sont détachés des noyaux et la matière entre alors dans son quatrième état, l'état "plasma". Le plasma

existe dans l'univers sous des formes très diverses et avec des caractéristiques en température et densité très variables.

La réaction de fusion la plus accessible en pratique est la réaction impliquant le **deutérium** (D) et le **tritium** (T), deux **isotopes** de l'**hydrogène**, sur laquelle se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée à des fins énergétiques.

## Les conditions nécessaires aux réactions de fusion

En plus de températures élevées, d'autres conditions sont nécessaires pour espérer utiliser la fusion comme source d'énergie. Le plasma chaud subit des pertes thermiques diverses, par rayonnement mais aussi par

## Les réactions de fusion nucléaire

Pour obtenir la fusion de deux noyaux atomiques légers, il faut les rapprocher tout près l'un de l'autre alors qu'ils se repoussent naturellement, portant tous deux une charge électrique positive. Si l'on veut récupérer l'énergie libérée par cette fusion, il faut donc d'abord fournir celle nécessaire pour franchir cette barrière et permettre à chaque noyau d'arriver dans la zone, très proche de l'autre, où se manifestent les forces nucléaires capables de vaincre cette répulsion électrostatique ou barrière coulombienne. Une fois ce résultat obtenu, les réactions les plus énergétiques sont celles qui aboutissent au noyau fusionné dont l'énergie de liaison est la plus élevée. C'est en l'occurrence le cas de l'isotope <sup>4</sup>He de l'hélium, qui possède quatre nucléons (deux protons p et deux neutrons n).

Parmi les réactions de fusion qui produisent de l'énergie en même temps qu'elles génèrent, d'une part, un nouveau noyau, noyau d'**hélium** (He) ou de **tritium** (T), et d'autre part un **nucléon**, quatre sont *a priori* particulièrement intéressantes\*. Les deux premières sont séduisantes parce qu'elles n'impliquent que du **deutérium** (D); l'isotope de l'**hydrogène** le plus abondant sur Terre. Leur maîtrise peut constituer le but ultime de la fusion contrôlée, mais elles sont, de loin, les plus difficiles à réaliser.



 $D + D \rightarrow {}^{3}He + n + 3,27 \text{ MeV}$  $D + D \rightarrow T + p + 4.04 \text{ MeV}$ Les deux suivantes, formant le noyau très stable de l'hélium 4, sont particulièrement énergétiques :  $D + T \rightarrow {}^{4}He + n + 17,58 \text{ MeV}$  $D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + p + 18,34 \text{ MeV}$ La réaction de fusion la plus facile à réaliser, car présentant la section efficace la plus élevée, est celle impliquant un noyau de deutérium (D) et un noyau de tritium (T), fusion qui donne un noyau d'hélium et un neutron dont l'énergie est respectivement de 3,5 MeV et de 14,1 MeV. C'est donc sur elle, appelée D-T, que se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée, aussi bien pour la fusion à confinement inertiel que

pour la fusion à confinement magnétique. La production du tritium nécessaire est assurée par une cinquième réaction mettant en jeu le lithium et... les neutrons de la réaction D-T. <sup>6</sup>Li + n  $\rightarrow$  <sup>4</sup>He + T + 4,78 MeV <sup>7</sup>Li + n  $\rightarrow$  <sup>4</sup>He + T + n - 2,47 MeV Les combustibles primaires, c'est-àdire les véritables matières premières d'un réacteur, sont donc le deutérium

d'un réacteur, sont donc le deutérium et le lithium (Li).

\*Ces réactions sont dites *thermonucléaires* parce que seule une température de l'ordre d'une centaine de millions de degrés, en même temps que d'autres conditions de densité et de temps de confinement (cf. texte principal), permet de les obtenir. Voir en p. 8 le tableau des principales réactions nucléaires qui ont lieu dans le Soleil.

**convection** et par **conduction**. On définit généralement un temps synthétisant l'ensemble de ces pertes appelé *temps de confinement de l'énergie* ( $\tau$ ): c'est le temps que met le plasma à se vider de sa chaleur si l'on coupe brutalement les sources d'énergie qui l'alimentent. D'une certaine façon,  $\tau$  caractérise la qualité de l'isolation thermique du plasma.

Pour que la fusion soit rentable sur le plan énergétique, il faut que l'énergie produite par les réactions de fusion excède largement ces pertes. Cette condition impose une limite inférieure au produit densité  $(n) \times$  temps de confinement de l'énergie, donnée par le critère dit de *Lawson*:  $n\tau > f(Q)$  où Q est le rapport entre la puissance de fusion produite et la puissance extérieure fournie au plasma pour le chauffer. Le facteur Q est souvent appelé facteur d'amplification de l'énergie. Deux valeurs typiques de Q sont l'unité et l'infini. Si Q = 1, la puissance générée par le plasma est égale à la puissance qui lui est couplée de l'extérieur. Cet état connu sous le nom de *breakeven* est approché dans les machines expérimentales actuelles les plus performantes. L'égalité  $Q = \infty$  signifie que la puissance extérieure apportée au plasma est nulle. Le plasma s'auto-entretient; on dit qu'il est en ignition.

Pour un plasma de deutérium et de tritium, la fonction f(Q) vaut environ 1 pour Q = 1 et tend rapidement vers 5 pour les valeurs élevées de Q. Dans ces conditions et pour une température de 10 keV, le critère de Lawson s'écrit:  $n \cdot \tau \approx 10^{20}$  (m<sup>-3</sup>·s).

#### Fusion dans les étoiles... fusion sur Terre

Dans le Soleil et les étoiles, les conditions nécessaires à la fusion en termes de température, densité et temps de confinement sont maintenues grâce à la gravité, solution qu'il est impossible d'utiliser sur Terre. La pression exercée par la gravitation peut y être remplacée par la pression exercée par des champs magnétiques intenses.

### Des boîtes magnétiques pour contenir le plasma

Le plasma est un fluide électriquement conducteur, mais neutre globalement, et dans lequel les **ions** et les électrons se meuvent presque indépendamment les uns des autres. Plongés dans un champ magnétique, ils vont suivre des trajectoires en forme d'hélices qui s'enroulent autour des lignes de champ et y restent "piégés". C'est le principe du confinement magnétique. Le Soleil sur Terre?



Figure 1. Principe du confinement magnétique. Dans un plasma à l'état libre (a), les particules ont une trajectoire aléatoire et vont s'échapper. Si ce plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne (b), les particules s'enroulent autour des lignes de champ et ne peuvent plus atteindre les parois latérales. Afin d'éviter les pertes aux extrémités. la boîte est refermée en tore (c). Pour minimiser encore les fuites de particules, les lignes de champ doivent être hélicoïdales (d).



Les géométries droites (ou cylindriques) d'abord étudiées présentent l'inconvénient de laisser échapper le plasma aux extrémités. Pour éviter cela, le cylindre est refermé sur lui-même afin d'obtenir une configuration torique. Cependant, dans une telle configuration, la courbure (et donc la force centrifuge) et l'inhomogénéité du champ magnétique (plus élevé sur la face intérieure du tore que sur la face extérieure) sont la cause d'une dérive des particules chargées. Ions et électrons ont tendance à se séparer, les uns vers le haut et les autres vers le bas, et ils finissent par sortir du piège magnétique. Pour compenser cet effet de dérive, les lignes de champ sont rendues hélicoïdales (figure 1). Les particules passent alors successivement en haut puis en bas de la configuration magnétique : l'effet de dérive, qui est toujours dans le même sens, est alors en moyenne compensé. Ceci est réalisé en ajoutant au champ torique (dit "toroïdal") initial un autre champ magnétique qui lui est perpendiculaire (le champ "poloïdal"). Dans un "tokamak", machine de conception russe, le champ magnétique poloïdal est créé par un courant axial circulant dans le plasma lui-même, qui devient le secondaire d'un transformateur (les plasmas ainsi créés sont dits "inductifs"). Le tokamak est donc au départ un dispositif impulsionnel. Il peut devenir continu en générant le courant axial de façon "non inductive" par des ondes ou des faisceaux de particules qui transfèrent leur impulsion aux électrons du plasma. Dans un "stellarator", la configuration magnétique repose entièrement sur des courants circulant dans des bobines externes. Cette configu-

ration, naturellement continue mais plus complexe sur le plan des principes et de la géométrie, n'est pas au même niveau de développement que la configuration tokamak. Ses qualités intrinsèques motivent toutefois la poursuite des efforts dans ce domaine. Le plasma se comporte comme un gaz et exerce vers l'extérieur une pression (cinétique) dont la valeur augmente avec la température et la densité. Si l'on veut confiner le plasma, cette pression doit être équilibrée par une pression vers l'intérieur. C'est le rôle de la pression (magnétique) exercée par le champ magnétique. Dans la pratique, on montre que pour éviter l'apparition d'instabilités hydrodynamiques, la pression cinétique doit être très inférieure (d'un facteur 10) à la pression magnétique. On voit donc ici apparaître une limite sur la densité. Avec des valeurs usuelles pour la température (10-20 keV) et le champ magnétique (5-10 teslas), cette densité limite est de l'ordre de 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup>. Ceci fixe aussi la valeur du temps de confinement que doit viser la fusion magnétique: de l'ordre de quelques secondes (critère de Lawson).

#### Comment chauffer le plasma?

D'emblée, le plasma n'a jamais la température requise pour les réactions de fusion. Outre le chauffage par le courant qui circule dans le tokamak (chauffage ohmique), deux méthodes sont possibles pour chauffer un plasma:

- le chauffage par injection de particules neutres de haute énergie consiste à créer et accélérer un faisceau d'ions, en dehors de l'enceinte de confinement. Ce faisceau est ensuite neutralisé avant de pénétrer dans le plasma où les particules sont à nouveau ionisées et confinées par le champ magnétique. Les collisions redistribuent l'énergie et la température du plasma augmente;
- dans le chauffage par ondes électromagnétiques à des fréquences caractéristiques du milieu, l'énergie des ondes est transmise au plasma par des antennes qui tapissent une partie de l'enceinte de confinement. Le choix de la fréquence permet de définir l'espèce de particules (ions ou électrons) qui sera chauffée et la région où se fera l'absorption de l'onde et donc le chauffage.

En plus de chauffer le plasma, ces méthodes permettent de générer du courant de façon permanente et donc d'envisager un fonctionnement continu du tokamak en mode "non inductif".

Dans un réacteur, la température du plasma pourrait être amenée au niveau adéquat par une combinaison de ces méthodes. Lorsque les réactions de fusion seront en nombre important, l'énergie portée par les noyaux d'**hélium** qui restent confinés dans le plasma deviendra alors la méthode de chauffage dominante (Q > 5).

#### Le principe du réacteur

Le principe du réacteur est présenté en figure 2. Le mélange combustible deutérium-tritium est injecté (en 1) dans une chambre où, grâce au système de confinement et de chauffage, il passe à l'état de plasma et brûle de façon continue (2). Le plasma produit des cendres (atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de rayonnement ou de particules chargées (3), qui abandonnent leur énergie dans la "première paroi",

premier élément matériel rencontré au-delà du plasma. L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des **neutrons** est, quant à elle, convertie en chaleur dans la couverture (4), élément situé après la première paroi, à l'intérieur de la chambre à vide. Cette chambre est le composant qui clôt l'espace où a lieu la réaction de fusion. Première paroi, couverture et chambre à vide sont bien évidemment refroidies par un système d'extraction de la chaleur. Cette chaleur est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble turbine et alternateur (5) qui génère finalement l'électricité.

La couverture remplit plusieurs fonctions. Son premier rôle consiste à récupérer l'énergie que les neutrons abandonnent en échauffant les matériaux. Un fluide caloporteur circule dans la structure et évacue la chaleur produite vers les équipements classiques que sont le générateur de vapeur, la turbine et l'alternateur. Son deuxième rôle est de régénérer le tritium nécessaire à la réaction de fusion. Le tritium n'existe en fait qu'en très petite quantité dans la nature. Il sera donc produit *in situ* par bombardement neutronique sur un autre corps, le **lithium**, présent dans la couverture, *via* les réactions suivantes:

> $n + {}^{6}Li \rightarrow T + {}^{4}He + 4,78 \text{ MeV}$  $n + {}^{7}Li \rightarrow T + {}^{4}He + n - 2,47 \text{ MeV}$

On a évidemment intérêt à privilégier la première réaction, qui dégage de l'énergie. Ainsi la couverture est, elle aussi, le siège de réactions productrices d'énergie, intervenant pour 20% dans le bilan du réacteur. Le lithium peut être sous forme solide (céramique) ou liquide (alliage métallique), suivant le concept de couverture.

La couverture doit, enfin, jouer un rôle de protection en réduisant considérablement l'énergie et le flux neutronique afin d'abriter les composants suivants (chambre à vide, système magnétique...).

Pour atteindre un rendement global de l'ordre de 35%, un réacteur devra pouvoir réaliser des facteurs d'amplification de l'énergie Q supérieurs à 25-30. Ceci impose que les réacteurs de fusion seront, nécessairement, des unités de grande taille, typiquement capables de produire 1 000 MW électriques, soit l'ordre de grandeur de la capacité d'un réacteur de fission.

#### Les avantages de la fusion

L'énergie de fusion présente un certain nombre d'avantages importants. Ses combustibles sont abondants et géographiquement également répartis. Le deutérium peut être extrait de façon économique de l'eau de mer (à raison de 33 g par m<sup>3</sup>). Les ressources en deutérium représentent plus de 10 milliards d'années de consommation annuelle mondiale ! Le tritium est fabriqué *in situ* à partir du lithium, que l'on trouve dans l'écorce terrestre. Les ressources en lithium sont estimées à 2 000 ans, limite repoussée à plusieurs millions d'années si l'élément est tiré de l'eau de mer.

La fusion présente des avantages en terme de sûreté. Les conditions d'entretien de la réaction de fusion permettent l'utilisation d'un plasma très peu dense (quelques grammes de combustible dans un volume supérieur à 1 000 m<sup>3</sup>). La quantité de combustible présente dans la chambre de combustion pendant la réaction est donc toujours très faible. Toute perturbation non contrôlée de ce milieu entraîne son refroidissement rapide et l'arrêt des réactions de fusion. L'emballement de la réaction est par conséquent intrinsèquement impossible.

L'énergie de fusion, comme les énergies renouvelables et la fission, ne produit en fonctionnement ni gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique.

Aucun des combustibles de base, le deutérium et le lithium, pas plus que le produit de la réaction, l'hélium (un gaz rare), n'est **radioactif** ou toxique. Le tritium sera entièrement produit sur site. C'est un élément radioactif qui se décompose en hélium par émission d'un rayon **bêta** peu énergétique (5,7 keV) et avec une **période** relativement courte (12,3 ans). Sa **radiotoxicité** est faible. Une conception adéquate du réacteur devra permettre de prendre en compte la **perméation** importante du tritium à travers les matériaux.



Figure 2. Schéma de principe d'un réacteur à fusion électrogène.



Comme dans toute installation soumise à un flux de particules de haute énergie (réacteur à fission, accélérateur), les matériaux constituant la structure du réacteur seront **activés**. Sur le plan de l'impact environnemental, le choix pour ces éléments de matériaux à temps de décroissance rapide devrait permettre de minimiser les quantités de déchets radioactifs. Une centaine d'années après l'arrêt définitif du réacteur, la majorité (voire la totalité) de ces matériaux devrait pouvoir être, soit considérée comme déchet de très faible activité, soit recyclée dans la filière nucléaire.

#### L'évolution des recherches

Les premières expériences de confinement avec des champs magnétiques sont initiées aux États-Unis dès 1938. L'année 1958 marque la déclassification des recherches. Plusieurs configurations magnétiques sont étudiées : décharges<sup>(1)</sup> toroïdales, machines à miroir... Afin de se donner les moyens de relever les défis scientifiques et technologiques posés par la maîtrise de l'énergie de fusion, des collaborations s'organisent à l'échelle internationale. Au niveau européen, ces recherches sont coordonnées par le traité Euratom dès 1957. Cette organisation complètement intégrée, toujours en vigueur, a beaucoup contribué à la position dominante de l'Europe sur le sujet.

En 1968, les scientifiques russes de l'Institut Kurchatov annoncent des performances largement supérieures aux autres expériences avec une configuration magnétique bien particulière : le tokamak, qui va rapidement supplanter les autres configurations. Dès lors, de nombreux tokamaks de taille encore modeste sont

(1) Décharge : terme désignant la présence d'un plasma dans l'enceinte de confinement.



#### Figure 3.

Loi d'échelle sur le confinement (comparaison calcul/expérience). L'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur différentes installations permet de déterminer une loi d'échelle empirique exprimant le temps de confinement à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma. Cette loi d'échelle, qui couvre deux ordres de grandeur de variation des paramètres, est d'une importance primordiale pour extrapoler les performances actuelles à celles d'une machine de prochaine génération.

construits en France, en Allemagne, en Angleterre et en Italie, mais aussi aux États-Unis, en Union soviétique et au Japon. C'est sur ces dispositifs que sont développés les diagnostics ainsi que les moyens de chauffage du plasma qui permettent de progresser rapidement sur la physique des tokamaks.

Les projets de construction de la plupart des grands tokamaks modernes (JET en Europe, JT60 au Japon,

Le JET, Joint European Torus, est actuellement le tokamak le plus puissant pour l'étude de la fusion thermonucléaire contrôlée.

Tore Supra, particulièrement adapté aux décharges longues, préfigure ITER, notamment par ses composants supraconducteurs et ses parois activement refroidies.





TFTR aux États-Unis) sont lancés vers la fin des années 1970. La France, après avoir fait entrer l'Europe dans l'ère des tokamaks avec la machine TFR de Fontenayaux-Roses (machine la plus performante au monde de 1973 à 1976), prépare dès les années 1980 la technologie et la physique du fonctionnement continu pour les réacteurs à fusion, avec la construction d'un grand tokamak à aimant toroïdal supraconducteur, Tore Supra, qui entre en service en 1988.

#### Des principes de base démontrés

Depuis le début de l'ère des tokamaks, à la fin des années 1960, des progrès considérables ont été accomplis dans la compréhension des phénomènes physiques et le développement des technologies mises en œuvre dans la construction des outils expérimentaux.

Ces résultats ont été obtenus sur les nombreuses installations, de tailles très diverses, conçues et exploitées dans les années 1970 à 1990 (tableau, p. 52). Tous les grands problèmes posés par l'énergie de fusion ont été abordés et, pour la plupart d'entre eux, des solutions ont été proposées.

#### Confinement amélioré du plasma

Les nombreuses études expérimentales sur le confinement menées dans les machines à travers le monde ont notamment mis clairement en évidence que le confinement s'améliorait avec la taille de la machine et qu'il se dégradait avec l'augmentation de la puissance de chauffage additionnelle couplée au plasma. Toutefois, sous certaines conditions, un seuil en puissance à partir duquel le confinement s'améliore spontanément est observé: ce régime, dit mode H (pour *High confinement*, par opposition au mode obtenu en dessous du seuil en puissance, dit mode L, pour *Low confinement*), constitue une amélioration du temps de confinement de presque un facteur 2 qui atténue l'effet de dégradation observé par ailleurs. La découverte dans

Dessin d'artiste du projet ITER.





les années 80 du mode H, sur la machine ASDEX, est capitale. Ce mode reste aujourd'hui le scénario de référence pour la machine de prochaine génération, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). L'ensemble des résultats est regroupé dans une base de données à partir de laquelle a été déterminée une loi d'échelle exprimant le temps de confinement à partir des principaux paramètres de la machine et du plasma (figure 3). Bien qu'empirique, cette méthode est d'une importance primordiale pour extrapoler les performances en confinement actuelles à celles d'une machine de prochaine génération, proche des conditions d'un réacteur. La figure souligne l'importance de la machine européenne JET (Joint European Torus), qui est actuellement la plus grande installation expérimentale de fusion avec la machine japonaise JT-60U.

#### Le JET : décharges performantes et technologies associées

Conçu dans les années 1970, JET représentait à l'époque un saut considérable puisque la plus grande machine européenne était alors TFR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses), d'un volume plasma moyen de 1 m<sup>3</sup>, soit environ 100 fois moins que celui de JET. Le JET est toujours actuellement le plus grand tokamak au monde. Son système magnétique, composé de 32 bobines en cuivre entourant l'enceinte de confinement, produit un champ de 3,4 teslas (T) au centre du plasma. Le JET est aussi équipé des technologies nécessaires à la gestion du tritium (stockage, injection dans l'enceinte de confinement, séparation des hydrogènes des gaz extraits, séparation isotopique) et à la télé-manipulation de ses composants internes. Les objectifs du JET sont essentiellement tournés vers la réalisation de décharges performantes et la qualifi-

machine	pays	<b>petit</b> rayon a(m)	<b>grand</b> rayon R(m)	courant plasma I (MA)	champ magnétique B (T)
ITER	international	2	6,2	15	5,3
JET	Union européenne	1	2,96	7	3,5
JT-60U	Japon	0,85	3,2	4,5	4,4
TFTR (fermée)	USA	0,85	2,5	2,7	5,6
Tore Supra	France	0,8	2,4	2	4,2
T-15	Russie	0,7	2,4	2	4
DIII-D	USA	0,67	1,67	3	2,1
ASDEX-U	Allemagne	0,5	1,67	1,4	3,5
TEXTOR-94	Allemagne	0,46	1,75	0,8	2,6
FT-U	Italie	0,31	0,92	1,2	7,5
TCV	Suisse	0,24	0,875	1,2	1,43
C-MOD	USA	0,22	0,67	1,5	8,07
MAST	GB	0,5	0,7	2	0,63
NSTX	USA	0,67	0,85	1	0,6
		4	R	a,	





cation des scénarios de confinement retenus pour la machine de prochaine génération. Les aspects liés au chauffage du plasma par les particules alpha sont aussi abordés. Les 16 MW de puissance de fusion obtenus pendant environ une seconde, en 1997, avec un facteur d'amplification de la puissance Q d'environ 0,65 très proche des conditions du *breakeven* (Q = 1) restent le résultat le plus spectaculaire. La possibilité unique de réaliser des plasmas D-T sur JET s'accompagne évidemment de la maîtrise des technologies associées : la gestion du cycle du tritium et les moyens de télémanipulation. Ce dernier système a permis de remplacer chaque tuile de la première paroi. L'opération a été menée en 1998 sur le divertor (composant gérant l'extraction en continu des cendres de la réaction), qui a été totalement remplacé par télé-manipulation.

## Tore Supra: temps longs, supraconduction et refroidissement actif

Parallèlement aux recherches du JET sur les plasmas performants, la problématique des plasmas de longue durée (plusieurs minutes) est aussi étudiée au sein de l'Union européenne sur le tokamak Tore Supra, implanté sur le site CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Bien qu'ayant un volume de plasma cinq fois inférieur à celui du JET, Tore Supra n'en est pas moins le plus grand tokamak à aimants **supraconducteurs** au monde. Cette caractéristique, associée à la présence de composants face au plasma activement refroidis par circulation d'eau, permet l'étude des plasmas en régime quasi permanent.

Tore Supra est équipé de 18 bobines toroïdales supraconductrices. Le matériau supraconducteur adopté est l'alliage niobium-titane refroidi dans un bain d'hélium superfluide (1,8 K; 1 bar) dont les remarquables propriétés de transfert thermique assurent un refroidissement efficace du supraconducteur sans circulation de fluide. Ces aimants sont exploités sans problème majeur depuis 1989, démontrant du même coup la viabilité de la technologie supraconductrice dans la configuration d'un dispositif de fusion contrôlée. Les composants face au plasma sont activement refroidis, deuxième caractéristique unique de Tore Supra. Ils sont principalement constitués d'un limiteur pompé toroïdal (LPT), capable d'extraire en permanence 15 MW de puissance transférée par les particules du plasma, soit 3 MW/m<sup>2</sup> en moyenne et au moins 10 MW/m<sup>2</sup> en crête en continu (des valeurs très proches de celles du réacteur). Ce limiteur, placé en partie basse de la machine, est constitué d'une structure porteuse en acier inoxydable sur laquelle sont fixées des aiguilles en composite de fibre de carbone (CFC) et cuivre durci (CuCrZr) capables de supporter de forts flux thermiques

Ces technologies ont permis de réaliser des décharges de plusieurs minutes. La décharge record de décembre 2003, d'une durée de 6 minutes et demie, soutenue par une puissance de 3 MW, a permis d'extraire plus de 1 000 mégajoules d'énergie thermique.

#### Des technologies spécifiques pour le réacteur

(plusieurs MW/m<sup>2</sup>) en continu.

Les technologies plus spécifiques au réacteur sont aussi étudiées. Les couvertures **tritigènes** font l'objet d'études spécifiques, tant au niveau conceptuel qu'expérimental



Les composants internes de Tore Supra.

(procédés de fabrication, réalisation de maquettes...). Il a été, par exemple, démontré que la production autosuffisante de tritium était réalisable, et ce, selon divers concepts. L'Europe en étudie deux qui different selon les matériaux tritigènes et le fluide caloporteur employés. Le premier utilise un matériau liquide sous forme d'alliage de plomb (LiPb) refroidi à l'eau sous pression; le second, des céramiques et de l'hélium comme réfrigérant. Plusieurs céramiques font l'objet d'études (Li<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>, Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub>), incluant leur méthode de fabrication, qui en sont à un stade de préindustrialisation. Ces études déboucheront sur la réalisation de modules de couverture complets à tester dans ITER.

La viabilité de la fusion comme future source d'énergie sera en partie déterminée par des facteurs liés à la sûreté et à l'environnement. La fusion peut tirer ici avantage de sa relative jeunesse de développement pour intégrer le plus tôt possible dans la conception les solutions qui impliquent l'utilisation de matériaux de structure dits à basse activation. Ces derniers, qui ont l'avantage de présenter une décroissance rapide de leur activation, sont particulièrement développés en Europe qui a axé ses études sur les aciers martensitiques<sup>(2)</sup>. Une nuance particulière (Eurofer) a été sélectionnée et a déjà donné lieu à des coulées significatives (quelques tonnes) permettant la fabrication d'échantillons soumis à de nombreux tests (comportement sous irradiation, corrosion, soudage...).

Le développement de ces matériaux et la validation de leurs performances sous des flux de neutrons typiques de la fusion (neutrons de 14 MeV) sont d'une importance majeure pour le futur réacteur. Ces matériaux constituent un élément déterminant pour l'efficacité thermique et la durée de vie des composants internes et, par corollaire, ils déterminent en grande partie le rendement global et la disponibilité du réacteur. Une validation complète suppose la disponibilité d'une source de neutrons de 14 MeV dont le développement fait l'objet du programme international IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility).

(2) Acier martensitique (du nom du physicien Martens): acier au carbone à basse teneur en nickel et/ou en manganèse issu de la trempe d'un acier, traitement qui déforme le réseau à structure cubique centrée de façon homogène. Les aciers de ce type constituent le groupe le plus important des aciers inoxydables.

#### ITER, la prochaine étape

Les exemples précédents illustrent les progrès considérables réalisés en physique, en technologie, ou encore sur l'image que l'on peut se faire aujourd'hui d'un réacteur de fusion électrogène. Ces résultats ont été obtenus sur plusieurs installations expérimentales "spécialisées": la physique des plasmas performants sur des temps courts (quelques secondes) sur JET, la problématique des décharges longues (quelques minutes) sur Tore Supra, sans oublier les nombreuses avancées, en particulier sur les principes d'amélioration du confinement, obtenues sur l'ensemble des machines exploitées par la communauté européenne et internationale (tableau). Des réponses à la majorité des interrogations suscitées par les études sont apportées, mais de façon encore indépendante. La prochaine étape doit constituer l'intégration de tous ces résultats au sein d'une même installation : c'est l'un des objectifs du projet international ITER.

#### Les origines du projet

Au cours des années 1980, le succès des expérimentations comme celles menées sur le JET, associé aux



Conception et tests d'éléments supraconducteurs (de haut en bas, le brin, le câble et sa coupe et une connexion) pour ITER.

Le Soleil sur Terre?





Figure 4. Le chemin vers le réacteur : l'objectif devrait être atteint dans la seconde moitié du siècle.

> progrès dans la compréhension du comportement du plasma réalisés dans des installations plus modestes, a amené la communauté scientifique à étudier une installation expérimentale de "prochaine étape" dédiée à l'étude des plasmas proches de ceux d'un réacteur de fusion. Lors du Sommet de Genève en novembre 1985, le président Gorbatchev propose aux présidents Reagan et Mitterrand de construire la prochaine génération de tokamak sur la base d'une collaboration intégrant les quatre partenaires majeurs du programme fusion. En octobre 1986, les États-Unis, l'Europe ainsi que le Japon répondent favorablement : le projet ITER est né. Il regroupe sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) les États-Unis, le Japon, l'Union soviétique et l'Europe associée au Canada. ITER est donc la première installation expérimentale conçue via une collaboration scientifique à l'échelle planétaire. Une première version du projet incluant la réalisation de maquettes à grande échelle des principaux composants est présentée en 1998. Les États-Unis se retirent alors du projet. Les partenaires restants orientent leurs efforts vers la conception d'une installation conservant l'essentiel des objectifs scientifiques tout en ayant un coût réduit. La phase d'ingénierie détaillée de cette nouvelle version s'est achevée en juillet 2001.

#### Les objectifs d'ITER

L'objectif essentiel du programme ITER est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion par confinement magnétique. La machine pourra produire 500 MW de puissance de fusion pendant plus de 400 s avec l'assistance de 50 MW de puissance de chauffage, soit une amplification de l'énergie d'un facteur 10 (Q = 10). Elle permettra donc l'étude des plasmas en combustion, c'est-à-dire des plasmas où le chauffage par les particules alpha créées lors des réactions de fusion est majoritaire. Dépassant 60 %, la part de chauffage due aux particules alpha sera sextuplée par rapport aux meilleures décharges réalisées dans la machine JET. ITER réalisera la synthèse des performances de Tore Supra (plasma de longue durée) et du JET (plasma énergétique).

ITER sera aussi la première machine intégrant la plupart des technologies essentielles au réacteur : aimants supraconducteurs de très grande taille, composants face au plasma refroidis activement, gestion du tritium, maintenance robotisée, tests de modules de couvertures tritigènes.

Avec un grand rayon de 6,2 m (distance axe de la machine - centre du plasma), le volume plasma d'ITER sera environ huit fois supérieur à celui du JET. Le système cryomagnétique, entièrement supraconducteur, est conçu pour délivrer 5,3 T au centre du plasma. À l'intérieur de l'enceinte à vide, les composants internes (cassettes de divertor, limiteurs, modules de couverture...) pourront être entièrement remplacés par maintenance robotisée. Les principaux composants d'ITER ont fait l'objet d'études très détaillées allant jusqu'à la réalisation de maquettes à l'échelle 1, comme pour l'enceinte à vide ou la manipulation du divertor. Les différents câbles supraconducteurs et connexions supraconductrices ont été testés avec succès en 2000 et 2001 sous la forme de bobines modèles (câble à échelle 1, bobine échelle 1/3) permettant également de valider les différentes étapes de la fabrication dans l'industrie.

Le coût du projet est évalué à environ 4,7 milliards d'euros à partager entre les partenaires. Après huit années de construction, la mise en route se fera de façon progressive avec d'abord une phase de plasmas d'hydrogène, qui permettra de tester la machine et de valider les scénarios de confinement pour les phases en deutérium et deutérium-tritium. La durée d'exploitation est évaluée à une vingtaine d'années.

ITER est une expérience scientifique et technologique destinée à démontrer la faisabilité de cette nouvelle option de production d'énergie. Tous les composants

essentiels à un réacteur seront présents, à l'exception de ceux dédiés à la production du tritium et à la génération d'électricité. Ces éléments spécifiques du réacteur électrogène auront la particularité d'être construits avec des matériaux basse activation : ils feront l'objet de tests à petite échelle (module de couverture) dans ITER.

## L'après-ITER : quelles extrapolations pour le réacteur ?

Les options retenues pour le fonctionnement d'un réacteur reposent sur des extrapolations plus ou moins fortes des options retenues pour ITER (figure 4).

Les réacteurs avec des *extrapolations modérées* ne nécessitent pas de sauts technologiques. Ils impliquent cependant un contrôle de la puissance transmise aux éléments de première paroi par une maîtrise du rayonnement du plasma de bord. Les rendements globaux sont les mêmes que ceux rencontrés dans les réacteurs nucléaires classiques (30 - 40%). La taille se situe autour des 9 m de grand rayon.

Les réacteurs avancés supposent des extrapolations fortes par rapport aux connaissances actuelles, tout en restant crédibles. Leur développement serait en général accompagné des mêmes extrapolations au niveau technologique (structure en carbure de silicium, par exemple). La topologie et les paramètres du plasma sont choisis afin de minimiser la puissance recirculante. Les instabilités sont supposées complètement maîtrisées, de même que le rayonnement du plasma de bord où un "manteau" radiatif est établi, sans conséquence sur le confinement et les performances du plasma central. Ceci conduit à des flux de chaleur sur les éléments de première paroi plus faibles que ceux des concepts précédents (d'un facteur deux, moins de 10 MW/m<sup>2</sup>) et une taille de réacteur proche de celle d'ITER (typiquement 6 m). Ces concepts offrent le potentiel de pouvoir fonctionner à très haute température (1000 °C) et donc d'accéder à des rendements dépassant les 60 %. Leur niveau de développement ne permet toutefois pas d'envisager leur utilisation à court terme.

La construction d'un réacteur électrogène (démonstrateur ou prototype) nécessitera des programmes d'accompagnement ayant une vocation plus orientée "réacteur". Sont notamment déjà en cours ceux concernant le développement de matériaux basse activation et des couvertures tritigènes. Ils sont complétés par des études plus globales sur les aspects socio-économiques. Il peut paraître prématuré d'évoquer les coûts de production du kilowattheure d'une source d'énergie qui est encore à plusieurs dizaines d'années de sa commercialisation. Ce type d'étude a pourtant plusieurs intérêts.

Le premier est de mettre en évidence l'impact de telle variable physique ou de telle hypothèse technologique sur les coûts. Ces résultats qui fixent les ordres de grandeurs relatifs et les sens de variation, ont une influence directe sur la stratégie de développement.

Le deuxième intérêt est de vérifier que le dispositif proposé peut correspondre aux exigences du marché. Les modèles économiques employés sont dans le prolongement direct de ceux employés pour la conception, l'optimisation et le calcul des coûts des machines actuelles ou d'ITER. Sous beaucoup d'aspects, ce dernier est



voisin du réacteur. Les coûts de construction ont été directement déterminés par les industriels en Europe, au Japon, en Russie et aux États-Unis. On dispose ainsi d'une base d'évaluation solide. Les incertitudes qui restent, certes importantes, portent plus sur la disponibilité du réacteur que sur le coût direct de ses composants. Les études montrent que, contrairement à ce qui a été parfois avancé, les coûts de l'énergie de fusion ne sont pas de nature à hypothéquer son avenir. En intégrant les impacts environnementaux et des hypothèses conservatrices pour la physique et les options technologiques, le coût du kilowattheure fusion se situe entre 1.5 et

2 fois le coût du kilowattheure nucléaire "fission", entre

#### Préparer l'avenir énergétique

celui de l'éolien et celui du solaire.

Les recherches civiles sur la fusion ont véritablement démarré à la fin des années 1950 avec un effort important de coopération internationale. Les progrès ne se sont depuis jamais démentis. Le bilan énergétique du plasma, mesuré par le produit de la densité, de la température et du temps de confinement de l'énergie, a été multiplié par 1 000 ! Plusieurs mégawatts de puissance fusion ont déjà été produits et des décharges de plusieurs minutes réalisées. Les bases scientifiques sont aujourd'hui suffisamment solides pour envisager la construction d'un appareil validant la faisabilité de l'énergie de fusion : ITER. L'insertion dans l'offre énergétique pourrait avoir lieu dans la seconde partie du siècle, à une époque où l'épuisement des ressources classiques et les conséquences climatiques de notre consommation se feront sentir de façon forte. La fusion présente des avantages qui peuvent contribuer à une production d'énergie respectueuse de notre environnement. Il est très certainement du devoir de la génération actuelle de préparer la base de connaissances permettant aux décideurs de demain d'envisager sereinement toutes les solutions énergétiques possibles.

> > Michel Chatelier et Philippe Magaud Direction des sciences de la matière Association Euratom-CEA CEA centre de Cadarache

Installation d'essai du remplacement robotisé des éléments du divertor d'ITER à Brasimone (Italie). Un prototype à l'échelle 1 du robot de montage des éléments de la protection interne de la chambre à vide a par ailleurs été réalisé au Japon.



Parmi les nombreux domaines d'étude qui s'imposent aux chercheurs dans leur volonté de maîtriser la fusion thermonucléaire par confinement magnétique, la compréhension de la turbulence est essentielle. Sa physique, extrêmement complexe, contrôle en effet une des caractéristiques fondamentales de cette technique : la qualité du confinement.

# La physique de la turbulence, une des clés de la fusion contrôlée par confinement magnétique



Plasma généré dans le JET, pendant une décharge (à droite). À gauche, une partie de l'enceinte à vide de la même machine, à l'arrêt.

> aîtriser sur Terre l'énergie des étoiles est un **M** projet qui, pour être réaliste, n'en est pas moins très ambitieux sur le plan technologique. Le meilleur exemple en est certainement le projet de tokamak international ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) qui requiert la collaboration de plusieurs grandes puissances internationales sur plusieurs décennies. En plus d'offrir une alternative crédible à long terme au problème de l'approvisionnement en énergie de l'humanité, la fusion contrôlée constitue un creuset fascinant pour la recherche en physique fondamentale, intégrant de multiples facettes de cette science. Les domaines d'étude vont de la physique du solide pour l'étude des composants face au plasma ou le développement de supraconducteurs pour le bobinage, à la physique de l'interaction plasma-paroi où rayonnement et recyclage jouent un rôle clef, en passant par l'interaction des ondes électromagnétiques avec le plasma, la stabilité magnétohydrodynamique de celui-ci et enfin la physique de la **turbulence**.

La compréhension de cette dernière est essentielle à la réalisation de la fusion, car elle en contrôle une des caractéristiques fondamentales : la qualité du confinement. C'est elle qui est ici choisie comme exemple représentatif des problèmes de physique fondamentale étudiés en fusion. Les thèmes abordés trouvent des résonances bien au-delà de la "communauté fusion", dans des domaines aussi variés que la mécanique des fluides ou l'astrophysique, dont bien sûr la physique du Soleil. Outre les réactions de fusion, ce projet partage également avec notre étoile la physique des plasmas magnétisés, et de fortes analogies existent, par exemple quant aux phénomènes d'éjection brutale de matière et d'énergie.

#### **Turbulence et transport**

La rentabilité économique de la fusion impose au processus d'être quasiment auto-entretenu : l'énergie dégagée par les réactions de fusion (encadré D, *Les réactions de fusion nucléaire*, p. 47) doit non seulement

servir à chauffer l'eau qui fera tourner des turbines, mais aussi à maintenir le plasma à la température de fusion, entre 100 et 200 millions de degrés. Cette dernière contrainte stipule que l'énergie de fusion doit compenser la puissance perdue par le plasma. Elle se traduit par un critère simple sur la densité des ions et le temps de confinement de l'énergie :  $n_i \tau_E > C^{te}$ .  $\tau_E$  est un paramètre macroscopique qui mesure la qualité du confinement : c'est le temps caractéristique de décroissance de l'énergie interne du plasma en l'absence de chauffage. La voie suivie par la fusion contrôlée par confinement magnétique vise à maximiser  $\tau_{F}$ , et donc à réduire le transport dans la région où se produisent les réactions de fusion. La densité et la constante  $C^{te}$  sont telles que  $\tau_E$  doit être de l'ordre de quelques secondes. À l'inverse, il sera souhaitable de dégrader le confinement du plasma périphérique, afin d'étaler la puissance sortante sur la plus grande surface possible, réduisant ainsi les contraintes thermiques sur les éléments de paroi.

Dans un tokamak, particules et chaleur sont contraintes de se déplacer sur des surfaces virtuelles engendrées par la topologie magnétique. Ces surfaces sont en forme de tores emboîtés (figure 1). La direction parallèle est donnée par les lignes de champ magnétique qui s'enroulent hélicoïdalement autour de ces surfaces. La direction transverse à ces lignes de champ sera par la suite repérée par l'indice "⊥". Si l'on admet que le transport de matière et de chaleur est gouverné par un processus de marche au hasard dans la direction transverse, on peut le représenter par un coefficient de diffusion  $\chi_{\perp}$ , exprimé en m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>. Par ce processus aléatoire, la chaleur met un temps  $\tau_E$  pour parcourir la distance caractéristique sur laquelle le plasma doit être confiné. Cette distance correspond au rayon intérieur du tore a pour les tokamaks, de l'ordre du mètre.  $\tau_E$  est alors donné par:  $\tau_E \approx a^2/\chi_{\perp}$ . Si le transport transverse de l'énergie dans les tokamaks n'était généré que par les collisions coulombiennes binaires, les machines actuelles auraient d'ores et déjà rempli les conditions nécessaires à la fusion.

À ces températures élevées, le libre parcours moyen des particules est en effet de l'ordre de quelques kilomètres. La conduction associée aux collisions, très faible ( $\chi_{\perp coll} < 10^{-1} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ ), conduirait alors à des temps de confinement de plusieurs dizaines de secondes. Les valeurs de  $\tau_E$  mesurées expérimentalement sont bien inférieures, de l'ordre de quelques dixièmes de secondes sur les plus grosses machines existantes. L'essentiel du transport est assuré par la turbulence, excitée par les gradients transverses au champ magnétique de confinement. L'amplitude mesurée des fluctuations de diverses grandeurs (densité, température, etc.) est en effet en accord avec le niveau de transport observé, à savoir  $\chi_{\perp} = 1-10 \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ .

Restent cependant plusieurs questions ouvertes : quelles sont l'origine et les caractéristiques de la turbulence et du transport associé ? Existe-t-il des moyens d'en contrôler l'amplitude et la dynamique ?

#### De la théorie des instabilités...

Les fluctuations turbulentes observées dans les machines à fusion naissent d'*instabilités qui saturent non-linéairement*. Le comportement d'une bille au fond d'une bouteille fournit une bonne image de la



Figure 1.

situation (figure 2c) : posée rigoureusement au centre, la bille sera en équilibre, mais la moindre perturbation d'amplitude même très faible suffira à lui faire dévaler la pente pour se rapprocher des parois. C'est l'instabilité linéaire. Lorsque le déplacement de la bille devient suffisamment grand (régime non-linéaire), ce dernier est alors limité par les parois de la bouteille : c'est la saturation non-linéaire.

La majorité des instabilités excitées dans les plasmas de tokamaks sont des *instabilités d'échange*. Le mécanisme vient de ce que, dans les tokamaks, échanger un *tube de flux*<sup>(1)</sup> de basse pression et un tube de flux de haute pression dégage de l'énergie : ce processus est donc instable, du fait de la propension de tout système physique à rechercher un état de minimum d'énergie. Dans sa version très simplifiée, cette instabilité est analogue à l'instabilité Rayleigh-Bénard en fluide, du nom des deux physiciens qui ont étudié expérimentalement et mis en équation le phénomène<sup>(2)</sup>.

 (1) Tube de flux : volume microscopique virtuel, de forme tubulaire, qui entoure une ligne de champ magnétique.
 (2) C'est également ce type d'instabilité, appelée alors Rayleigh-Taylor, qui perturbe la compression isotrope des billes de combustible en fusion inertielle.



Figure 2.

Schéma de différents régimes de stabilité : (a) stable linéairement (L) et non linéairement (NL), (b) instable L et NL, (c) instable L, stable NL, (d) stable L, instable NL. Schéma de la topologie magnétique d'un tokamak. Particules et chaleur sont libres de se mouvoir le long des lignes de champ. Les collisions et la turbulence génèrent du transport transverse aux surfaces magnétiques. La vue de détail montre que les lignes de champ de deux surfaces magnétiques différentes ont des taux d'enroulement différents.





Les plasmas de fusion ont été étudiés dans toutes sortes de configurations, notamment sphérique, ici dans la machine britannique Start, à Culham.

Considérons un fluide chauffé par le bas. Au fond du récipient, le liquide est plus chaud et donc plus léger que celui en surface. Il aura tendance à monter sous l'effet de la poussée d'Archimède, à la condition cependant que cette force parvienne à vaincre les forces visqueuses qui s'opposent à tout mouvement. S'établissent alors des rouleaux ou *cellules de convection*, qui assurent un transport de la chaleur beaucoup plus efficace que la conduction collisionnelle.

Apparaissent ici deux ingrédients majeurs de l'instabilité : elle repose sur l'existence d'un gradient de température colinéaire à la gravité, et elle présente un seuil en gradient en deçà duquel le transport de la chaleur n'est pas turbulent.

Ces deux caractéristiques se retrouvent dans les tokamaks, à la différence près que la gravité joue un rôle tout à fait négligeable dans le plasma magnétisé : la force de pesanteur s'exerçant sur les ions est typiquement  $10^{14}$  fois plus faible que la force de Lorentz due au champ magnétique *B*. C'est la topologie magnétique, et plus exactement la courbure des lignes de champ et la décroissance du champ *B* de l'axe de symétrie du tore vers l'extérieur, qui joue ici un rôle analogue à la gravité dans l'instabilité Rayleigh-Bénard.

Le gradient de température est quant à lui inhérent au problème: le plasma de cœur avoisine les 100 millions de degrés, tandis que la température tombe à quelques centaines de degrés sur les parois de l'enceinte, à environ un mètre de là. Dans la majorité des cas, ce gradient dépasse le seuil d'instabilité et donne naissance à un transport turbulent. Les cellules de convection ou vortex sont ici les iso-potentielles du potentiel électrique. Elles délimitent les couloirs d'advection de la matière et de la chaleur, de la même manière que les régions de basse et de haute pression gouvernent la force et la direction du vent en météorologie. Les vortex se développent sur une échelle spatiale typique de quelques rayons cyclotroniques(3) dans la direction radiale, soit quelques millimètres pour les ions. On conçoit que le temps de confinement sera d'autant plus grand que cette distance restera petite par rapport à l'échelle de la machine, d'où l'intérêt de développer des tokamaks de grande taille. Ils évoluent en outre sur des fréquences caractéristiques allant du kilohertz à quelques centaines de kHz.

Cette analogie avec Rayleigh-Bénard montre que la turbulence dans les plasmas de tokamak entretient un

lien étroit avec celle des fluides non magnétisés. Cela permet entre autres à la communauté fusion de bénéficier des avancées d'une science déjà ancienne, l'instabilité Rayleigh-Bénard ayant été très étudiée à partir des années 80 en tant que paradigme de la transition vers la turbulence développée selon un schéma analogue à la transition vers le chaos. Mais les plasmas sont également plus complexes que les fluides classiques, ce qui leur confère une richesse supplémentaire.

#### Le "dialogue" électrons-ions

Les plasmas de fusion sont majoritairement constitués de deux sortes de particules : les électrons et les ions de deutérium et de tritium, dont le rapport des masses équivaut à celui entre une balle de ping-pong et un poids de 10 à 15 kg. Leur faible inertie rend les électrons très mobiles. Ces deux espèces explorent alors des régions de l'espace temporel et spatial relativement disjoints: les échelles spatiales des turbulences associées aux ions et aux électrons sont typiquement dans le rapport de la racine carrée des masses (environ 60), tandis que les fréquences y sont inversement proportionnelles. Pour autant, électrons et ions continuent de "se parler" : étant chargés électriquement, ils sont en effet tous deux sensibles au même champ électromagnétique. Aux échelles considérées, les deux espèces assurent entre autres la neutralité électrique du plasma.

#### Le couplage particules-champ

Ce couplage particules-champ est d'ailleurs le fondement de tous les phénomènes de transport dans les plasmas magnétisés. Le processus est non linéaire : les fluctuations de densité et de vitesse des particules plasma génèrent des fluctuations de charge et de courant. Ces dernières contrôlent la structure et l'évolution des champs électrique et magnétique *via* les équations de Maxwell. À leur tour, ces champs fluctuants rétroagissent sur les particules dont ils gouvernent la dynamique. Précisons tout de même que les fluctuations du champ *B* restent de plusieurs ordres de grandeurs plus faibles que le champ magnétique servant au confinement du plasma.

Cette *interaction entre ondes et particules* est *résonnante*: elle est maximale lorsque la vitesse de phase de l'onde est proche de celle des particules. Ce mécanisme, connu sous le nom d'*effet Landau*<sup>(4)</sup>, joue un rôle fondamental en physique des plasmas<sup>(5)</sup>. C'est en transférant de manière résonnante leur énergie aux particules plasma que les ondes, excitées linéairement par le mécanisme de type Rayleigh-Bénard décrit précédemment, parviennent à un régime de saturation non-linéaire. Dans les tokamaks, ces résonances sont en outre localisées

(3) Une particule de charge *e* et de masse *m* immergée dans un champ magnétique *B* a un mouvement de giration autour d'une ligne de champ, dit mouvement cyclotronique, dont le rayon est  $r_c = mv_\perp/eB$ ,  $v_\perp$  étant sa vitesse transverse au champ *B*.

(4) Ce physicien soviétique (1908-1968), surtout connu pour ses travaux sur les transitions de phase (diamagnétisme et antiferromagnétisme, phénomènes de **superfluidité** et de supraconductivité), a reçu le prix Nobel en 1962. Son ouvrage sur l'amortissement des ondes électroniques dans un plasma (effet Landau, 1946) a contribué à l'élaboration de la théorie des plasmas.

(5) Pour une compréhension physique détaillée de ce mécanisme, on pourra en particulier se référer à *Microscopic Dynamics of Plasmas and Chaos*, de Y. Elskens et D. F. Escande (Bristol Institute of Physics Publishing, 2003). autour de surfaces particulières, appelées *surfaces de résonance*, dont la position est gouvernée par la topologie magnétique. Nous verrons par la suite que cette propriété importante peut être mise à profit pour optimiser le transport.

#### ... aux simulations numériques

Plusieurs stratégies physiques s'offrent au chercheur pour étudier la turbulence. L'approche fluide consiste à étudier la dynamique temporelle de grandeurs macroscopiques, appelées moments, telles que la densité, la température ou le moment cinétique, couplées aux équations de Maxwell: c'est le cadre générique de la magnéto-hydrodynamique. L'espace des phases se réduit ici à l'espace physique à trois dimensions (3D). Cette approche souffre cependant de deux faiblesses majeures. D'abord, le nombre de ces moments est infini. Toute troncature s'accompagne alors d'une hypothèse de fermeture, dont il est difficile de garantir la validité dans le régime non linéaire. Ensuite, elle ne permet pas le traitement rigoureux des résonances Landau, pour lesquelles la connaissance de la distribution en vitesse des particules est nécessaire. C'est l'approche gyrocinétique, plus complète, qui permet de traiter ces questions. La fonction de distribution des différentes espèces est alors calculée dans un espace des phases à cinq dimensions. Les deux dimensions supplémentaires sont les vitesses transverse et parallèle aux lignes de champ magnétique. Cette fonction donne le nombre de particules appartenant à un élément de volume infinitésimal de l'espace des phases. Bien que satisfaisante du point de vue physique, cette approche offre cependant l'inconvénient d'être très gourmande en ressources numériques (temps de calcul et mémoire). Le recours au calcul massivement parallèle sur des super-calculateurs est, dans ce cas, nécessaire.



Étude de l'injection de "boulettes" de combustible au sein d'un plasma toroïdal dans la machine ASDEX à Garching (Allemagne).



#### Figure 3.

Carte du flux turbulent de particules issu d'une simulation fluide 2D, en fonction du temps et de la direction du confinement. Le système est excité par une source de particules localisée en x = 0. Un flux positif est dirigé vers l'extérieur du tore; l'amplitude croît du bleu au rouge. Les bouffées intermittentes se caractérisent par des traînées obliques sur le graphe. Le ravon cvclotronique mesure ici environ 0.34 mm.

Les turbulences électronique et ionique couvrent un domaine en fréquence et longueur d'onde très vaste, si bien que les moyens numériques actuels ne permettent pas leur traitement simultané<sup>(6)</sup>. En pratique, chaque étude se concentre alors sur l'une des deux espèces.

Une fois le choix effectué entre ces différentes options, les simulations numériques sont un outil puissant pour étudier la complexité du régime non linéaire qui caractérise la turbulence. Des modèles 1D à 5D, électrostatiques ou électromagnétiques, et intégrant la complexité des plasmas à des niveaux divers, ont entre autres permis de comprendre le mécanisme des instabilités dominantes dans les tokamaks, et de retrouver certains résultats expérimentaux fondamentaux: l'ordre de grandeur de l'amplitude des fluctuations (typiquement inférieures au pour cent) et du niveau de transport de la chaleur,  $\chi_{\perp} \approx 1\text{--}10 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Mais ces études ont également mis en évidence que, loin d'être homogène et régulier, le transport turbulent pouvait être dominé par des bouffées intermittentes se propageant quasi balistiquement sur de grandes échelles spatiales, très au-delà de quelques rayons cyclotroniques (figure 3). Un gros effort est actuellement consacré à la compréhension de ce phénomène. Ces analyses ont profondément modifié notre vision du transport turbulent, jusque-là essentiellement décrit par un processus diffusif. Une partie des travaux présents vise d'ailleurs à proposer des modèles de transport réduits, c'est-à-dire à une dimension spatiale, mieux représentatifs de la dynamique du transport turbulent qu'un coefficient de diffusion effectif  $\chi_{\perp}$ .

(6) Par exemple, couvrir les échelles spatiales allant du rayon cyclotronique électronique au rayon du plasma requerrait pour une simulation 3D une mémoire de l'ordre de la dizaine de téraoctets (1 To =  $10^{12}$  octets), à la limite des capacités des plus gros calculateurs disponibles actuellement.





Figure 4.

Carte instantanée du potentiel électrique selon un plan vertical du tore, provenant de simulations fluides 3D d'une turbulence ionique: (a) cas standard, où la flèche montre une large structure; (b) cas où une vitesse cisaillée est imposée dans l'anneau repéré par les traits pointillés. Cette région correspond également à un minimum de q.

#### Vers un contrôle de la turbulence

#### Les barrières de transport

Un des objectifs des études menées sur la turbulence est de trouver des régimes pour lesquels le transport est réduit. Dans le cas où cette transition est localisée spatialement, elle donne naissance à de forts gradients de température et de vitesse; on parle alors de "barrière de transport". De tels régimes ont été initialement obtenus expérimentalement, et reproduits sur de nombreuses machines. Ils servent même de scénarios de référence pour les plasmas d'ITER. D'un point de vue théorique, plusieurs mécanismes sont invoqués pour expliquer cette transition :

 cisailler le champ de vitesse s'avère très efficace. Le plasma est entraîné dans un mouvement de rotation non uniforme dans une des directions périodiques du tore. Cette inhomogénéité de la vitesse de rotation a pour effet de déchirer les cellules de convection, réduisant ainsi le transport. Le même résultat peut d'ailleurs être obtenu en cisaillant fortement le champ magnétique macroscopique, ce qui change le



Le tokamak Tore Supra, exploité à Cadarache (France) par l'association Euratom-CEA, outil privilégié pour l'étude des décharges de longue durée.

taux d'enroulement des lignes de champ (figure 1). Des travaux récents ont montré que la turbulence elle-même pouvait générer son propre flot cisaillé, qui contribue de manière efficace à sa saturation. Ces écoulements à grande échelle, dits zonaux, sont similaires à ceux observés en turbulence atmosphérique ; ils sont particulièrement visibles sur la planète Jupiter;

• modifier légèrement la topologie magnétique permet de contrôler la position des surfaces de résonance, autour desquelles on rappelle que se concentre la turbulence. Il est en particulier possible d'optimiser la topologie de manière à éloigner ces surfaces de résonance les unes des autres. Dans ce cas, le système peut accéder à un régime où le chaos hamiltonien<sup>(7)</sup> et, donc, le transport turbulent, restent faibles.

Ces mécanismes, souvent complémentaires, ont été confirmés par des simulations numériques (figure 4), et sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Ils ont permis d'expliquer certaines des transitions spontanées du plasma vers des régimes à confinement amélioré, et de proposer des scénarios de réduction du transport. Une troisième voie explorée actuellement s'appuie sur la théorie du chaos. Le principe consiste à appliquer une boucle de rétroaction sur la turbulence: par de petites perturbations bien choisies de l'hamiltonien du système, la forme et la position dans l'espace des phases des tores de KAM<sup>(8)</sup> où des domaines de piégeage peuvent être modifiés astucieusement pour diminuer le transport. Cette technique ne sera cependant utilisable que s'il est montré qu'un contrôle spatialement localisé reste efficace.

(7) La mécanique classique montre qu'il est en principe possible de décrire le comportement de tout système sans dissipation à l'aide d'une fonction H, le hamiltonien, dépendant des coordonnées d'espace et de moment généralisées des *n* particules constituant le système, ainsi qu'éventuellement du temps. Cette fonction H est souvent reliée à l'énergie totale du système. En particulier, tout système dont l'hamiltonien ne dépend pas explicitement du temps évolue à énergie constante.

(8) Du nom de leurs découvreurs (Kolmogorov, Arnold et Moser), ces "tores" définissent le volume occupé dans l'espace des phases par les trajectoires intégrables d'un système dont l'hamiltonien d'équilibre est soumis à des perturbations de faible amplitude.

#### Phénomènes de relaxation brutale

Si les barrières de transport peuvent être générées de diverses manières dans les tokamaks, il apparaît cependant qu'elles ne sont pas toujours pérennes. En particulier, celles qui se développent spontanément aux bords du plasma, sous certaines conditions, sont sujettes à des phénomènes de relaxation brutale. De manière quasipériodique, elles sont transitoirement détruites et laissent alors s'échapper des flux de particules et de chaleur très importants: quelque 10% du contenu énergétique total du plasma peuvent ainsi être perdus en l'espace de quelques centaines de microsecondes. Ces phénomènes sont bien sûr dommageables pour l'énergie confinée qui s'en trouve réduite, mais également du fait des contraintes très fortes qu'ils font peser sur les éléments de paroi chargés d'évacuer la puissance. Certaines simulations de turbulence présentent un comportement analogue (figure 5), et plusieurs modèles ont été proposés pour reproduire ces relaxations.

## Une forte analogie avec les éruptions solaires

Ces événements entretiennent en outre une forte analogie avec les éruptions solaires (encadré A, Toute la *lumière sur le Soleil*, p. 13). Les plus violentes d'entre elles naissent de protubérances, gigantesques arches où un champ magnétique intense maintient le plasma au-dessus de la surface du Soleil. Elles sont caractérisées par l'éjection d'un plasma chaud et l'émission de rayons X durs, bouffées qui emportent dans l'espace jusqu'à 1 % de la puissance totale rayonnée par le Soleil. Le premier point d'analogie vient de ce que, selon de récentes théories, les éruptions solaires pourraient trouver leur origine dans une région équivalente à une barrière de transport solaire: la tachocline. Cette fine couche, à l'interface entre la zone radiative et celle plus externe de convection, est en effet caractérisée par de forts cisaillements de vitesse. C'est là que prendraient naissance, par un effet dynamo<sup>(9)</sup>, le champ magnétique solaire. Le second élément de concordance pourrait être la nature même de l'instabilité à l'origine de ces relaxations brutales: dans les deux cas, tokamaks et Soleil, les conditions sont réunies pour faire de l'instabilité d'échange le candidat désigné. D'autres phénomènes astrophysiques sont également similaires, comme par exemple les sous-orages magnétiques. Dans tous les cas, la compréhension théorique du mécanisme détaillé conduisant à ces relaxations reste encore une gageure pour la communauté scientifique. Ces analogies laissent entrevoir une possible universalité de ces processus de relaxation au sein des barrières de transport.

#### Le temps d'ITER

La physique des plasmas de fusion est une science riche, complexe, et qui partage beaucoup de points communs avec de nombreuses disciplines, dont entre autres la turbulence dans les fluides non magnétisés,



Gigantesque protubérance solaire, observée dans l'ultraviolet extrême le 26 août 1997 par le satellite SOHO. Sa température est d'environ 85 000 °C, et son extension spatiale de l'ordre de 350 000 km.



Figure 5. Carte du flux turbulent de chaleur issu d'une simulation fluide 3D, en fonction du temps et de la direction du confinement. Une source de chaleur est imposée au bord gauche. Le flux, dirigé vers l'extérieur du tore. est d'amplitude croissante du noir au jaune. La barrière de transport, visible dans la région centrale entre les traits pointillés, est transitoirement détruite par une relaxation brutale.

la théorie du chaos et l'astrophysique. Elle s'enrichit de cette communauté de pensée, et participe aux avancées dans tous ces domaines. Les études théoriques ont permis de nombreux progrès, tant du point de vue de la compréhension des résultats expérimentaux que de l'optimisation des scénarios utilisés. Cette physique est en ce sens complémentaire de l'approche d'ingénieur qui s'appuie sur des lois d'échelles pour prédire le niveau de transport, et donc le temps de confinement  $\tau_E$ , dans une machine comme ITER. Elle permet d'étudier l'éventuelle apparition de nouveaux phénomènes dans l'intervalle qui nous sépare des prochaines machines, et de veiller ainsi à l'adéquation entre les objectifs assignés à ITER et les scénarios expérimentaux envisagés.

#### > Yanick Sarazin

Direction des sciences de la matière Association Euratom-CEA CEA centre de Cadarache

<sup>(9)</sup> Les fortes variations de la vitesse du fluide au travers de cette interface seraient susceptibles de tordre les lignes de force du champ magnétique fluctuant, conduisant au final à une augmentation d'amplitude et d'échelle spatiale de ce champ. L'effet dynamo désigne ce mécanisme de conversion d'une partie de l'énergie cinétique du fluide en énergie magnétique.



La fusion par confinement inertiel est une voie de recherche explorée pour obtenir la fusion des éléments légers, parallèlement à la fusion par confinement

**magnétique**. Alors que, dans cette dernière, le confinement maintient le plasma à une très faible densité (10<sup>-5</sup> fois la densité de l'air) pendant des temps de l'ordre de la seconde, la méthode "inertielle" consiste à réaliser des densités beaucoup plus fortes (10<sup>6</sup> fois la densité de l'air) maintenues pendant des temps déterminés par l'inertie du système (typiquement quelques dizaines de picosecondes). Les lasers permettent une très grande concentration de l'énergie dans les temps nécessaires à la fusion par confinement inertiel. Ainsi, le laser Mégajoule (LMJ), construit par le CEA pour les applications de Défense, doit permettre de réaliser l'allumage et la combustion par confinement inertiel au début de la prochaine décennie. Les conditions de température et de pression qu'il permettra d'atteindre rendront aussi possible l'étude des phénomènes thermonucléaires dans les plasmas de type stellaire.

# La fusion par confinement inertiel

## Les principes de base : compression et brièveté

Le processus de la fusion par confinement inertiel peut être comparé à celui d'un moteur Diesel : la compression du mélange – amené à une densité 1000 fois supérieure à celle de l'état liquide – conduit à l'allumage et à l'explosion, dans des temps inférieurs à la centaine de picosecondes.

Quelle que soit la technique employée, la problématique de la fusion nucléaire reste la même : vaincre la répulsion des noyaux de deux éléments légers afin qu'ils mettent en commun leurs nucléons pour constituer un élément plus lourd. La réaction de fusion nucléaire la moins difficile à réaliser est celle qui peut intervenir entre le **deutérium** (D) et le **tritium** (T), deux **isotopes** de l'**hydrogène**. Elle donne naissance à un noyau d'**hélium** 4 (**particule alpha**) doué d'une énergie de 3,52 **MeV** et à un **neutron** de 14,06 MeV.



#### Figure 1.

Dans son état initial (a), la cible conçue pour l'ignition sur le LMJ est constituée d'une coquille de glace de DT, à la température de 17 K, entourée d'un ablateur, plastique ou DT solide. La tension de vapeur saturante de DT remplit la partie centrale. Lorsqu'elle est éclairée par le laser (b), la matière chauffée est éjectée vers l'extérieur par ablation, ce qui induit, par contreréaction, une poussée qui comprime la cible.

Au moment de l'allumage, le rayon de la cible est le quinzième de son rayon initial (c). L'ablateur s'est évaporé et l'essentiel de la masse du combustible est contenu dans une coquille très dense (200 à 500 g/cm<sup>3</sup>). Les réactions thermonucléaires se déclenchent en premier lieu dans la partie centrale, moins dense mais très chaude (environ 100 millions de degrés).



Maquette du laser Mégajoule en cours de construction par le CEA au Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine, au Barp près de Bordeaux. À gauche, une partie des chaînes laser. À droite, la chambre d'expérience (en bleu) où convergent l'ensemble des lignes laser et de nombreux équipements de diagnostic (en blanc).

L'énergie considérable qui doit être donnée aux deux noyaux de deutérium et de tritium sous forme de vitesse relative est fournie par l'agitation thermique. La probabilité maximale d'occurrence de la réaction de fusion dans un **plasma** de DT se situe vers 70 **keV**. Elle atteint un dixième de cette valeur vers 10 keV.

Un critère classique pour la fusion d'un plasma est le *critère de Lawson*: il consiste à assurer que l'énergie de fusion dégagée (*modulo* un rendement d'extraction de 30%) soit supérieure à l'énergie qu'il faut fournir au plasma pour l'amener dans les conditions de combustion. Or l'énergie de fusion dégagée par unité de volume dépend de trois paramètres: la température, la densité (le nombre *n* d'**ions** par unité de volume) et le temps  $\tau$  pendant lequel ces deux conditions sont maintenues. Si l'on considère que les réactions de fusion se produisent efficacement à partir de 10 keV, le critère de Lawson pour un plasma de DT s'écrit:  $n \cdot \tau > 2 \cdot 10^{14}$  (s·cm<sup>-3</sup>).

La fusion par confinement magnétique réalise ce critère en maintenant des densités supérieures à  $10^{14}$  ions par cm<sup>3</sup> pendant des temps sensiblement supérieurs à la seconde. Dans la fusion par **confinement inertiel**, la démarche est complètement différente : on comprime très fortement le plasma jusqu'à des densités de  $10^{26}$  ions par cm<sup>3</sup> (soit 300 g/cm<sup>3</sup>!) mais celles-ci ne sont maintenues que pendant une durée très brève (quelques  $10^{-11}$  s) avant que le plasma ne se détende (explosion). Afin de brûler une fraction suffisante du **combusti**- **ble**, il faut que le phénomène de fusion soit plus rapide que sa détente sous l'effet de sa pression interne. Cette condition est satisfaite si le combustible est suffisamment chaud et dense ou, plus précisément, concentré (c'est le produit  $\rho R$  de la masse volumique par le rayon de la sphère qui caractérise cette propriété). Dans le cas d'une microcible sphérique contenant un mélange de deutérium et de tritium (DT) à la température de 40 keV, par exemple, il sera possible de brûler un tiers du combustible dès que le produit  $\rho R$  excédera 3 g/cm<sup>2</sup>. Pour une masse *M* de DT, ce critère s'écrit aussi :

$$ho_{(g/cc)} \ge \frac{10}{\sqrt{M_{(g)}}}$$
 :

plus la masse à brûler est faible, plus la densité requise, et donc la compression du mélange, est élevée.

Prenant en compte le rendement massique de la fusion du DT (340 MJ/mg), il sera par exemple possible d'obtenir 100 MJ à partir de 1 mg de DT si la densité du mélange atteint environ 300 g/cm<sup>3</sup> (soit plus de mille fois la densité du solide) et sa température 40 keV. Le rayon de la sphère sera alors de cent **micromètres** et le temps imparti à la combustion (*temps de confinement*) d'environ 25 **picosecondes**. Ces conditions expérimentales peuvent théoriquement être atteintes en implosant une coquille sphérique de combustible solide **cryogénique** (figure 1) à l'aide d'un **laser** délivrant une énergie de 1 à 2 mégajoules (MJ). Pour obtenir ce résultat, un certain nombre de paramètres (e)

doivent être maîtrisés, comme cela va être décrit en considérant toujours le même exemple d'un mélange de 1 mg de DT contenu dans une microcible.

#### Allumage par point chaud

Il faut tout d'abord minimiser l'énergie déposée par le laser dans le mélange de DT. La compression demande relativement peu d'énergie: environ 15 à 40 kJ par mg, si elle est conduite de façon efficace. En revanche, atteindre la *température* requise pour initier la combustion nécessiterait une énergie beaucoup plus élevée: 1,1 MJ par mg. Afin de diminuer cette contrainte, seule une faible partie de la masse du combustible (10 à 20  $\mu$ g) est portée à la température d'allumage. Cette "étincelle" à haute température appelée *point chaud*, confinée par le reste du combustible très dense qui l'entoure, pourra initier une combustion autoentretenue, à condition de "recapturer" une fraction sensible de l'énergie de fusion dégagée, essentiellement celle véhiculée par les particules alpha émises.

#### Compression du combustible

Dans ces conditions, l'énergie totale de compression et de chauffage du point chaud s'élève à environ 60 kJ. Cette énergie doit être communiquée au combustible en premier lieu sous forme d'énergie cinétique : la vitesse nécessaire d'implosion, de l'ordre de 400 km/s, nécessite une pression voisine de 100 mégabars (Mbar), soit 10·10<sup>12</sup> pascals. Cette pression et cette vitesse peuvent être obtenues avec un laser de puissance et une cible adéquate faite d'une coquille composée d'une couche externe en plastique et d'une couche interne en DT sous forme de glace (voir Les microcibles cryogéniques, éléments clés des expériences de confinement inertiel sur le LMJ). Lorsqu'un faisceau laser intense interagit avec une cible, un plasma est en effet formé sur sa surface par ablation, puis éjecté vers l'extérieur à grande vitesse. Par contre-réaction, une quantité de mouvement centripète (si la cible est sphérique) est transférée à la partie encore froide, processus que l'on peut appeler, par analogie, effet fusée. La pression engendrée est maximale au voisinage du front d'ablation. Elle est reliée à



#### Figure 2.

Lors de la compression du combustible, la loi de pression est obtenue au moyen d'une mise en forme temporelle de la puissance laser. Un palier initial de 10 térawatts en 4 nanosecondes (ns) crée un premier choc de 8 mégabars. Il est suivi d'une rampe douce qui amène à l'impulsion principale de 9,2 ns. On interrompt le laser et la coquille poursuit son vol jusqu'à la compression finale, obtenue vers 10 ns. l'intensité du laser et à sa longueur d'onde par la loi d'échelle:  $P_{\text{Mbar}} = 40 (I_{\text{PW/cm}^2} / \lambda_{\mu m})^{2/3}$ . Cette loi indique que les courtes longueurs d'onde sont plus efficaces, à éclairement donné, pour induire de fortes pressions : une pression de 100 mégabars peut être obtenue avec un laser d'intensité voisine de 10<sup>15</sup> W/cm<sup>2</sup> pour une longueur d'onde de 0,35 micromètre.

L'énergie laser nécessaire dépend du rendement hydrodynamique de l'implosion induite par l'ablation. Un rendement de 5 % conduit, dans cet exemple, à une énergie de 1,2 MJ. Une mise en forme temporelle adéquate de l'impulsion laser peut permettre d'optimiser le processus de compression (figure 2). D'autres paramètres doivent dans le même temps être optimisés, en premier lieu la symétrie d'éclairement du microballon contenant le mélange de DT.

#### Une symétrie d'éclairement parfaite

L'exemple précédent suppose en effet une symétrie sphérique parfaite de l'échantillon et de son éclairement, car tout écart à la sphéricité diminuerait l'efficacité de la compression jusqu'à empêcher le point chaud d'apparaître.

Le laser utilisé devra donc comporter un grand nombre de faisceaux pour assurer la meilleure symétrie d'éclairement possible. En réalité, des erreurs de pointage, de positionnement de l'échantillon et d'équilibrage d'éclairement sont inévitables. Des spécifications techniques rigoureuses, comme une incertitude de pointage inférieure à 50 micromètres, ont été établies par les spécialistes du CEA afin de maintenir la non-uniformité d'éclairement en dessous de 1%, ce qui permet de réunir les conditions propres à l'ignition.

#### Combattre les instabilités hydrodynamiques

D'autres processus peuvent aussi empêcher d'obtenir les conditions de fusion: les instabilités hydrodynamiques. L'implosion ablative décrite plus haut consiste à accélérer un milieu dense par un milieu moins dense (figure 3). Cette situation est analogue à celle d'un fluide lourd surmontant un fluide léger dans un champ de pesanteur. Cette configuration est par constitution instable (instabilité de Rayleigh-Taylor) et toute perturbation de l'écoulement, relativement à la forme sphérique idéale, est amplifiée au cours du temps. La croissance est d'abord exponentielle, puis, dès que l'amplitude du défaut devient comparable à sa longueur d'onde, une saturation non linéaire de la croissance apparaît. Il faut, enfin, signaler que le phénomène d'ablation, qui est à l'origine du mouvement, tend à en tempérer le caractère instable.

Les perturbations initiales sont dues à la rugosité des interfaces entre milieux et aux non-uniformités d'éclairement. Pour les minimiser, les cibles devront avoir des rugosités externes moyennes de 50 **nanomètres** et des rugosités internes (glace de DT) de 1 micromètre.

#### Les instabilités de l'interaction laser-plasma

D'autres types d'instabilité peuvent également perturber les expériences de fusion. Ce sont les instabilités liées à l'interaction laser-plasma. En effet, comme on l'a vu, dès le début de l'éclairement, un plasma est créé par ablation. Durant toute la durée de l'éclairement ce plasma va interagir avec l'onde laser et pourra ainsi l'absorber. Pour des intensités laser modérées, le taux





#### Figure 3.

En a), état thermodynamique du front d'ablation au moment de l'accélération de la coquille. Dans la zone hachurée, le produit des gradients de densité  $\rho$  et de pression P est négatif (ligne rouge) : cette zone est soumise à l'instabilité de Rayleigh-Taylor. En b), représentation de la modulation de densité obtenue dans une simulation numérique d'implosion où on prend en compte l'empreinte laser. On peut observer le développement non linéaire de l'instabilité.

d'absorption varie de 60 % jusqu'à l'absorption totale, selon le matériau irradié. Aux fortes intensités (au-delà de  $10^{15}$  W/cm<sup>2</sup> pour une longueur d'onde de 0,35 µm), des instabilités plasma peuvent apparaître.

L'instabilité de *filamentation pondéromotrice*, par exemple, est déclenchée par la combinaison de surintensités (spatiales ou temporelles) de l'éclairement et de fluctuations locales de l'indice de réfraction du plasma. Elle conduit à une auto-focalisation de l'onde laser : la lumière se concentre en minces filaments préjudiciables à une uniformité d'éclairement.

De plus, le plasma, milieu compressible et conducteur, est le support d'ondes acoustiques ioniques et d'ondes électroniques. Sous certaines conditions, ces ondes peuvent échanger de l'énergie avec l'onde laser et se coupler de façon résonnante. Il en résulte une rétrodiffusion d'une partie de l'énergie laser (ce sont les *rétrodiffusions stimulées Brillouin* et *Raman*) ainsi qu'une production d'électrons de haute énergie susceptibles de chauffer le combustible avant sa compression.

Ces processus d'instabilité sont préjudiciables à l'absorption de l'énergie laser par la cible, aussi de nombreux travaux théoriques et expérimentaux y

sont-ils consacrés. Ces travaux ont conduit à la conception de cibles robustes vis-à-vis de l'apparition de ces instabilités, ainsi qu'au développement de techniques propres à éviter l'apparition de surintensités laser (*lissage*).

#### Attaque directe ou indirecte?

Dans la description précédente, on a considéré l'interaction directe entre l'onde laser et le microballon contenant le combustible DT: il s'agit du schéma dit d'attaque directe (figure 4a). Un autre schéma existe, qui présente plusieurs avantages mais aussi quelques inconvénients : c'est le schéma dit d'attaque indirecte (figure 4b). Il consiste à diriger les faisceaux lasers sur les parois internes d'une enceinte en or (la cavité) afin d'y produire du rayonnement X. Au centre de l'enceinte est disposé le microballon contenant le combustible de DT. Le rayonnement X créé est confiné dans la cavité comme dans un four et se trouve finalement proche d'un ravonnement de corps noir à une température de l'ordre de 300 eV (ou 3,5 millions de kelvins). Il est capable, au même titre que le rayonnement direct du laser, de produire l'implosion ablative d'un microballon sphérique avec, cette fois, une meilleure uniformité d'éclairement et un rendement hydrodynamique accru. Il induit aussi une vitesse d'ablation plus élevée, ce qui réduit sensiblement la croissance des instabilités hydrodynamiques.

Les physiciens de la Direction des applications militaires du CEA considèrent ce schéma comme le chemin le plus sûr pour obtenir la fusion thermonucléaire avec des gains supérieurs à l'unité. S'il est bien adapté à une utilisation expérimentale, en particulier dans le cadre du programme Simulation, son faible rendement (en termes d'énergie transmise au combustible) le rend peu approprié à une future



#### Figure 4.

Schémas d'attaque directe (a) et indirecte (b). Dans le premier cas, les faisceaux laser interagissent directement avec la cible. Dans le second, ils interagissent avec les parois de la cavité cylindrique contenant le microballon. Les parois émettent un rayonnement X (en jaune) qui interagit à son tour avec ce microballon.





#### Figure 5.

Simulation de l'implosion d'un microballon dans une cavité d'attaque indirecte décrite par un maillage lagrangien bidimensionnel (fin d'implosion). Ce type de simulation a permis de reproduire des expériences de symétrie d'irradiation en cavité.

production d'énergie à partir de laser. Il pourrait devenir compétitif avec d'autres générateurs comme les faisceaux d'ions lourds.

## Les acquis de l'expérience et de la simulation

La fusion par confinement inertiel par laser bénéficie maintenant, en particulier depuis une dizaine d'années, d'un acquis expérimental très important. L'attaque directe a surtout été étudiée aux États-Unis à l'Université de Rochester, qui possède actuellement le laser Omega (60 faisceaux pour 40 kJ délivrés sur cible), et au Japon, à l'Université d'Osaka, qui possède le laser Gekko 12 (12 faisceaux pour 15 kJ délivrés sur cible). L'attaque indirecte a également été beaucoup étudiée aux États-Unis à l'aide des installations du



La chambre d'expériences du laser *National Ignition Facility* (NIF) américain, équivalent du laser Mégajoule français.

laboratoire de Livermore (en particulier avec le laser Nova, qui comportait 10 faisceaux de 3 kJ) et en France avec le laser Phébus du CEA (2 faisceaux de 3 kJ) installé à Limeil.

Tous ces travaux expérimentaux ont permis de reproduire et de mieux comprendre les nombreux phénomènes qui interviennent dans la fusion par confinement inertiel selon l'un ou l'autre schéma: interaction laser plasma, ablation laser ou X, thermalisation du rayonnement en cavité, symétrie d'irradiation, implosion, etc.

Cependant, ces phénomènes, ou du moins plusieurs d'entre eux, ne pourront être expérimentés à l'échelle convenable pour réaliser la fusion qu'avec une installation laser ayant les performances adéquates en énergie, puissance et précision. Deux installations de cette dimension sont actuellement en construction dans le monde : le laser Mégajoule (LMJ) en France au Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine du CEA et le NIF (*National Ignition Facility*) à Livermore aux États-Unis.

Parallèlement à l'expérimentation laser, la simulation numérique permet d'analyser par le calcul le fonctionnement des futures cibles qui permettront de réaliser la fusion par confinement inertiel. Cette simulation a pour base la modélisation mathématique des phénomènes physiques qui entrent en jeu. Ces modèles sont ensuite traduits en algorithmes qui sont couplés entre eux et rassemblés dans de grands "codes" de calcul. Il existe au CEA/DAM-Île de France (à Bruyères-le-Châtel) une expertise dans la simulation des systèmes complexes, acquise depuis de nombreuses années, qui s'appuie sur la puissance de calcul de la machine Tera (5 téraflops crête) installée dans le cadre du programme Simulation. Grâce à ces moyens, les physiciens de ce laboratoire réalisent des simulations d'expériences de fusion inertielle en deux ou trois dimensions d'espace (figure 5). Ces simulations sont intégrées dans la mesure où elles prennent

en compte simultanément tous les mécanismes qui interviennent dans les cibles, depuis l'interaction laser-plasma jusqu'au rendement thermonucléaire du combustible.

#### Que serait un réacteur à fusion inertielle?

Au-delà de l'étape essentielle que constituera la réalisation de l'ignition, il faudra aussi réfléchir à ce que serait un réacteur utilisable et rentable et répondre à des questions clés: produire 1 GW électrique demandera un laser capable de délivrer à chaque seconde dix impulsions de 5 MJ chacune, avec un rendement total, vis-à-vis de l'énergie électrique consommée, meilleur que 10 %. L'énergie des neutrons de 14 MeV produits devra être convertie en électricité avec un rendement supérieur à 30 %. Enfin, sur la base du coût actuel du GWh, les échantillons de DT devront être produits à un coût inférieur à 1 euro chacun. Des défis technologiques importants doivent donc être relevés.

Les premiers neutrons thermonucléaires produits par laser ont été obtenus à la fin des années 1960 par les équipes du CEA, au centre d'études de Limeil-Valenton. Presque cinquante ans plus tard, on projette de réaliser des implosions où, pour la première fois, l'énergie thermonucléaire produite sera supérieure à l'énergie laser investie. Ces résultats ouvriront la voie aux études pour le développement d'un réacteur à fusion inertielle.

## Le laser Mégajoule : l'outil par excellence

La physique de la fusion par confinement inertiel par laser dicte les principales caractéristiques du laser Mégajoule (LMJ), en construction sur le site CEA du Cesta, près de Bordeaux. De nombreux défis technologiques ont dû être relevés.



Maquette montrant l'implantation de la chambre d'expérience et la répartition des faisceaux laser (la moitié d'entre eux) dans le bâtiment LMJ.

T el qu'il est décrit plus haut, le processus d'obtention par laser de la **fusion** d'une microcible de **DT** impose au **laser** des caractéristiques dictées par la physique de la fusion. Il faut ainsi disposer d'une énergie de l'ordre de 1,8 **mégajoule** et d'une puissance de plusieurs centaines de térawatts (TW) à la longueur d'onde de 351 **nanomètres**. De plus, pour assurer un éclairement homogène de la cible, la précision de pointage des faisceaux lasers doit être inférieure à 50 **micromètres** (µm). Autant de caractéristiques que doit prendre en compte le fonctionnement du LMJ (encadré p. 68).

#### Le matériau laser : un choix incontournable

L'expérience accumulée au CEA avec la mise en œuvre des lasers de grande énergie Phébus et Octal ont imposé naturellement le choix du matériau laser pour délivrer l'énergie requise: du verre au phosphate dopé avec des **ions** de néodyme Nd<sup>3+</sup>. C'est le seul matériau que l'on sait fabriquer en grande quantité avec la qualité requise et qui peut délivrer l'énergie laser souhaitée. L'ion Nd<sup>3+</sup>, porté dans un état électronique excité, émet une lumière laser à la longueur



#### Quelques ordres de grandeur

1,8 mégajoule (MJ)	0,5 kilowattheure (kWh) : consommation d'un téléviseur en une soirée			
500 térawatts (TW)	500 000 centrales nucléaires en parallèle			
100 mégabars (Mbar)	100 millions d'atmosphères			
10 nanosecondes (ns), durée de l'impulsion laser et de l'implosion du microballon	temps que la lumière met à parcourir 3 mètres			
400 kilomètres/seconde	Paris-Marseille en 2 secondes			
1 téraflops (Tflops)	mille milliards de multiplications par seconde (une simulation peut durer des dizaines d'heures !)			

d'onde de 1 053 nm qui, par conversion de fréquence, permet d'atteindre la longueur d'onde souhaitée de 351 nm.

L'énergie laser qu'il est possible d'extraire par unité de volume du matériau verre/Nd<sup>3+</sup> (quelques joules/ litre) impose les dimensions des pièces optiques dont il faut maîtriser la fabrication, la mise en œuvre et l'utilisation. De plus, la tenue au flux laser de ces pièces est limitée à quelques joules/cm<sup>2</sup>. Au-delà, elles sont endommagées ou détruites. Les dimensions du faisceau laser, pour une énergie donnée, doivent être fixées en conséquence.

C'est en prenant en compte ces contraintes technologiques et les conditions physiques imposées par le mécanisme de fusion par **confinement inertiel** que le laser LMJ a été conçu. Il est constitué d'un ensemble de 240 faisceaux lasers délivrant chacun une énergie de 7,5 kJ à 351 nm. Cette énergie est répartie uniformément dans un faisceau de section carrée ( $40 \times 40$  cm).

## Deux cent quarante faisceaux pour éclairer la microcible

Pour en simplifier la gestion simultanée, les 240 faisceaux, qui doivent avoir la même énergie et arriver en même temps (à mieux que 15 **picosecondes**) sur l'échantillon, sont transportés et focalisés sur la cible par groupes de quatre (quadruplets).

Dans le bâtiment LMJ, ces lignes sont réparties dans quatre salles disposées de part et d'autre de la chambre d'expérience contenant la microcible. Pour assurer la stabilité de l'ensemble et minimiser les problèmes de vibrations, les murs du bâtiment sont découplés des sols. Les huit faisceaux de chaque ligne laser sont regroupés en deux quadruplets. Chacun de ces quadruplets est dirigé sur l'échantillon à l'aide de miroirs de transport. Les deux trous (diamètre d'environ 300  $\mu$ m) de la cavité cylindrique contenant la microcible laissent chacun passer 120 faisceaux. Pour assurer la symétrie d'éclairement, les quadruplets sont répartis selon une symétrie conique et regroupés par paquets de 10 sur trois cônes d'angles aux sommets différents.

#### De quoi est constitué un faisceau?

Un grand nombre d'éléments optiques est nécessaire pour constituer un faisceau laser délivrant une énergie de 7,5 kJ à 351 nm en un temps de quelques **nanosecondes** (figure 6). Les différents éléments peuvent être regroupés en trois parties qui regroupent trois fonctions essentielles.

#### Mise en forme du faisceau laser

C'est la fonction qui donne au faisceau le profil temporel et la répartition spatiale d'énergie souhaitée. Les expériences prévues nécessitent de fournir des profils temporels extrêmement variés à l'intérieur d'une plage s'étendant de la centaine de picosecondes à environ 25 nanosecondes. De plus, l'énergie doit être répartie uniformément dans une section carrée. Ces profils, spatial et temporel, sont obtenus à l'aide





Les allers et retours du faisceau laser dans la section amplificatrice. Les différentes couleurs visualisent le trajet à chaque passage.

de deux éléments fondamentaux appelés la *source laser* et le *module pré-amplificateur (MPA)* qui constituent le "*pilote*" d'un faisceau laser.

La source laser est un oscillateur laser miniature qui délivre une énergie de 1 **nanojoule**. Cette source utilise les technologies bien éprouvées de télécommunication par fibres optiques. Sa stabilité est le point crucial : la longueur d'onde d'émission est fixée à 1 053 nm à mieux que  $\pm$  5 **picomètres**. C'est dans cette source qu'est effectuée la mise en forme temporelle, ajustable à la demande entre quelques centaines de picosecondes et 25 nanosecondes.

L'impulsion issue de la source laser est injectée dans le module pré-amplificateur pour porter l'énergie disponible à quelques centaines de mJ (soit un facteur d'amplification d'environ  $\approx 10^9$ ). C'est dans ce module qu'est effectuée et contrôlée la répartition d'énergie sur une surface carrée de 4 × 4 cm. Une valve optique adressable (300 × 300 pixels) permet, en chaque point du faisceau, de fixer l'intensité afin d'assurer son uniformité spatiale.

#### Amplification du faisceau

C'est dans la section amplificatrice (SA) qu'est injectée l'énergie issue du MPA pour la porter à 18 kJ. Cette impulsion traversera quatre fois deux ensembles de plaques amplificatrices à verre  $Nd^{3+}$  (40 × 80 × 4 cm). Ces plaques stockent de l'énergie lumineuse fournie par des lampes à éclairs. À chaque traversée, le faisceau laser prend une partie de cette énergie. Le gain en énergie de chaque plaque et à chaque passage est de 1,25. Entre les deux ensembles de plaques, des lentilles focalisatrices associées à un diaphragme (trou de filtrage spatial) éliminent d'éventuels faisceaux parasites. À la suite des deux ensembles de plaques est disposé un miroir réfléchissant (M1) qui rend possible les quatre passages par multiplexage angulaire (figure 7). Ce miroir est du type adaptatif: sa surface est déformable (contrôlée par des pousseurs piézoélectriques) et permet de corriger d'éventuels défauts de la surface d'onde du faisceau.

Une des originalités des faisceaux lasers du LMJ est la possibilité d'effectuer les quatre passages dans une même plaque amplificatrice (figure 7). Cela permet de diminuer le nombre de plaques nécessaires, d'augmenter le rendement global du laser en extrayant le maximum d'énergie stockée dans les plaques et de diminuer les dimensions du bâtiment, en repliant sur lui-même le trajet optique du faisceau.

## Conversion de fréquence et focalisation du faisceau

Le changement de fréquence est assuré par des cristaux de KDP (dihydrogénophosphate de potassium). Ces cristaux biréfringents ont la propriété, dès que l'intensité du laser est importante (on parle de régime non linéaire), de permettre avec une bonne probabilité à des couples de **photons** de fusionner et d'additionner leur énergie pour donner naissance à un seul



La chambre d'expérience de la LIL en cours d'équipement. Les premières expériences sont prévues pour le courant de 2004.



#### La chambre d'expérience

La microcible à étudier sera disposée au centre d'une chambre d'expérience sphérique maintenue sous vide. D'une épaisseur de 10 centimètres, recouverte d'un béton **neutrophage** de 40 cm d'épaisseur et d'un diamètre de 10 mètres pour un poids de 90 tonnes, elle sera abritée dans un bâtiment de 50 mètres de hauteur (35 m hors sol) pouvant contenir l'Arc de triomphe. Des fenêtres transparentes à 351 nm, disposées le long des méridiens, permettent l'entrée des faisceaux. Tout autour de la chambre seront installés les dispositifs de diagnostic qui mesureront et transmettront à un système informatique les données expérimentales obtenues. La cible devra être positionnée au centre de la chambre avec une précision de +/- 5  $\mu$ m et maintenue à moins de 20 K avec une stabilité thermique inférieure au millième de kelvin. C'est incontestablement un défi technologique que relèvera le laser LMJ en assurant une telle précision sur un bâtiment de quelque 300 mètres de long et après un parcours optique des 240 faisceaux laser de plusieurs centaines de mètres.

#### La Ligne d'intégration laser pour prototype

Plutôt que de se lancer directement dans la construction du LMJ et de ses 240 faisceaux, il a été décidé de construire un prototype afin de valider les choix technologiques et optimiser les performances en termes de coût et de maintenance. Sous le nom de LIL, la Ligne d'intégration laser (LIL) reproduira deux des soixante quadruplets du laser LMJ et comportera donc un ensemble de huit faisceaux. Chacune des fonctions nécessaires au LMJ se retrouve dans ce prototype.

Un premier faisceau a été entièrement équipé et a donné les performances prévues et même au-delà, puisque le 4 avril 2003 une énergie de 9 **kilojoules** a été obtenue à 351 nm après conversion de fréquence. Un quadruplet complètement équipé courant 2004 permettra le démarrage des premières expériences. Les autres faisceaux seront progressivement montés.



Coupe du bâtiment abritant la chambre d'expérience du LMJ.

## Les microcibles cryogéniques, éléments clés des expériences de confinement inertiel sur le LMJ

Le contraste est total entre la dimension impressionnante des chaînes lasers du LMJ et la taille minuscule des cibles des expériences de confinement inertiel sur lesquelles elles convergent. Ces microcibles sont également des concentrés de haute technologie.

Les cibles du laser Mégajoule (LMJ) doivent être conçues pour amener une très faible quantité de mélange fusible DT dans des conditions de densité et de température telles que les réactions de fusion thermonucléaire puissent s'amorcer. Leur processus de fabrication prend donc en compte les contraintes associées à l'obtention de ces conditions.

Dans le schéma d'irradiation en attaque indirecte retenu (figure 8), les 240 faisceaux du LMJ seront focalisés sur la paroi interne d'une cavité de conversion cylindrique en or de quelques dizaines de **micromètres** d'épaisseur, pourvue à ses extrémités de deux ouvertures pour le passage des faisceaux laser.

L'interaction laser-matière au niveau de la paroi produit une émission intense de **rayons X** qui vont comprimer et chauffer un microballon en polymère amorphe hydrocarboné (ou **deutéré**) d'environ 2 mm de diamètre et 0,2 mm d'épaisseur. Celui-ci, maintenu au centre géométrique de la cavité, contient le mélange DT fusible, solidifié à très basse température (environ 18 **kelvins**, soit - 255 °C).

La géométrie et les conditions de mise en œuvre sont donc très contraignantes. La précision de réalisation



Préparation de la microcible d'une expérimentation de fusion inertielle.



#### Figure 8.

Principe de fonctionnement d'une cible pour fusion par confinement inertiel en attaque indirecte. En (a), l'ensemble du dispositif de la cavité cryogénique de conversion; en (b), l'édifice cible.





#### Figure 9.

Étapes de la synthèse des microballons par la technique du "mandrin dépolymérisable".

des différentes pièces et des assemblages sont par ailleurs excessivement sévères, de l'ordre du pour mille au pour cent mille en fonction des éléments. Elles imposent donc le développement et la mise en œuvre de technologies très sophistiquées. Depuis 1996, la recherche et le développement ont fait d'énormes avancées dans quatre domaines principaux : le microballon lui-même, les équipements cryogéniques destinés à remplir les cibles, la qualité de la couche de DT solide déposé sur la paroi interne du microballon et l'édifice cible cryogénique dans son ensemble.



Le microballon en CH<sub>x</sub>

Le conteneur du mélange fusible est un microballon en **hydrocarbures** (CH<sub>x</sub>), dopés de manière parfaitement homogène à 0,4 % de germanium. Ses défauts géométriques sont inférieurs à un dix-millième, et sa rugosité interne et externe est inférieure à 50 nm. Pour obtenir un tel résultat, chacune des étapes de la synthèse doit être parfaitement contrôlée.

Les microballons en CH<sub>x</sub> sont élaborés suivant la technique dite du "mandrin dépolymérisable", qui comporte plusieurs étapes (figure 9). Un mandrin sphérique en poly-alpha-méthyl styrène (PAMS) est d'abord réalisé selon des techniques de microencapsulation mettant en œuvre des systèmes d'injecteurs triphasiques. Disposer d'un polymère de départ (le PAMS) dont les caractéristiques physicochimiques sont parfaitement contrôlées est indispensable pour obtenir les spécifications visées lors de la mise en forme par micro-encapsulation. Sur ce mandrin est ensuite réalisé un dépôt GDP (Glow Discharge Polymerization) de polymère plasma à partir de trans-2-butène (T2B) et d'hydrogène ( $H_2$ ). Le mandrin initial est finalement dépolymérisé par traitement thermique sous gaz neutre. Le PAMS, dont la température de décomposition est inférieure à celle du polymère plasma en CH<sub>x</sub>, est éliminé par perméation au travers de la paroi du dépôt GDP. Un microballon en CH<sub>x</sub> autoporté est alors obtenu. À ce jour, l'ensemble de la chaîne technologique a été mise en place. Les études ont permis de synthétiser des objets dont les défauts, inférieurs au %, ne sont

des objets dont les defauts, interieurs au %, ne sont plus décelables avec des moyens optimisés de caractérisation optique ou X. Des outils de caractérisation très précis et basés sur la technologie AFM (microscopie à force atomique) sont devenus nécessaires.

#### Des équipements cryogéniques opérationnels pour remplir les cibles

Les microballons en polymère sont remplis par perméation gazeuse à température ambiante : le mélange de DT diffuse à travers la paroi de polymère et remplit le ballon. Une couche solide de 100  $\mu$ m d'épaisseur doit alors être déposée sur la paroi intérieure, la solidification

du DT s'effectuant à environ 20 K. Le nombre de **moles** de DT permettant d'obtenir, une fois solidifié à 20 K, une couche de 100 µm de DT, correspond à une température ambiante d'environ 500 **bars**. Or, la résistance mécanique des microballons est de l'ordre de quelques dizaines de bars. Il faut donc équilibrer les pressions entre l'extérieur et l'intérieur du microballon en permanence pour éviter l'éclatement du ballon.

La pression de l'enceinte de remplissage est augmentée progressivement pour assurer à chaque instant un équilibre des pressions entre l'intérieur et l'extérieur du microballon jusqu'à atteindre la pression de 500 bars. Le nombre requis de moles de DT à l'intérieur du ballon étant atteint, la température de l'enceinte de remplissage est alors diminuée pour faire chuter la pression et l'enceinte de remplissage progressivement vidée. Au point de solidification du DT à 19,79 K, la pression résiduelle à l'intérieur du ballon est de l'ordre de 200 millibars, correspondant à la pression de vapeur saturante du DT. Le microballon peut alors supporter sans aucun problème une telle différence de pression et être sorti de son enceinte de remplissage. Sa température ne doit cependant pas remonter de plus d'une dizaine de degrés, sous peine d'éclatement. La chaîne du froid ne doit donc plus être rompue jusqu'au moment du tir laser. Les édifices cibles cryogéniques, fabriqués, remplis puis conditionnés sur le site de Valduc (Côte-d'Or) du CEA, seront donc ensuite transportés à température cryogénique sur le site du LMJ, en Gironde, pour l'expérimentation.

#### La conformation de la couche d'isotopes d'hydrogène solide

Après remplissage et congélation, le DT tombe par microgravité au fond du microballon. Il faut qu'il se

redistribue sur les parois internes du ballon sous la forme d'une fine pellicule d'épaisseur parfaitement homogène (figure 8a) pour créer la fine coquille de DT solide nécessaire aux expériences de fusion. Cette redistribution se fait naturellement : c'est le processus de beta-layering qui utilise la chaleur produite par la décroissance radioactive du tritium. Le principe peut être expliqué simplement par une représentation bidimensionnelle où les deux côtés opposés du microballon sont représentés par deux plans parallèles (figure 10). La décroissance du tritium conduit à l'émission d'un électron qui crée une source volumique de chaleur dans le DT solide. Au démarrage du processus, la couche de DT est plus épaisse au fond du microballon, la chaleur dégagée y est donc plus importante. La résolution des équations de diffusion de la chaleur montre que la température à l'interface DT solide/DT gaz y est légèrement plus élevée. Cet écart de température induit un phénomène de sublimation/recondensation au point froid du DT solide. Petit à petit, le DT se dépose sur toute la surface interne du ballon par ce phénomène, à la stricte condition que la température soit homogène sur la surface externe du ballon; l'état d'équilibre thermodynamique correspond alors à une couche de DT d'épaisseur homogène.

Le phénomène de redistribution naturelle permet d'obtenir ainsi des couches d'épaisseur homogène. Cependant, pour éviter le développement d'instabilités hydrodynamiques lors de l'implosion, la rugosité de surface de la couche de DT doit être submicronique (voir plus haut *Combattre les instabilités hydrodynamiques*), ce qui est impossible à obtenir en redistribution naturelle. Pour aider la nature, un flux de chaleur additionnel est délivré par un laser



Prototype du porte-cible cryogénique (PCC) en cours d'exploitation en collaboration entre le CEA/Grenoble (Service des basses températures) et le Cesta (Département des lasers de puissance). Cet équipement livré en 2002 a permis de valider les performances de régulation thermique de la pince cryogénique. Les performances mécaniques (précision de positionnement et chargement d'une cible sous vide, à froid, et en mode entièrement automatique) sont en cours de démonstration.





Bâti d'assemblage des éléments de cibles préparés pour la LIL et le futur LMJ au centre CEA de Valduc. Le collage s'effectue à main levée sous contrôle visuel par loupe binoculaire et deux caméras permettent de le visualiser sur écran.

infrarouge accordable : sa longueur d'onde est fixée sur des bandes d'absorption du mélange DT solide qui absorbe ainsi le rayonnement laser et voit sa température s'élever. Cette chaleur additionnelle permet d'amplifier et de contrôler le phénomène de redistribution du DT et de réduire la rugosité de surface. Les premières couches redistribuées par infrarouge ont été obtenues récemment et les études se poursuivent pour atteindre les spécifications souhaitées.

#### L'édifice cible cryogénique

Pour éviter l'endommagement du porte-cible cryogénique (PCC) par l'énergie dégagée lors d'un tir à gain, il est nécessaire de maintenir la cavité à une distance de 100 mm de son embase par une structure de faible poids en matériau de **numéro atomique** Z faible (figure 8b). Cette fonction est assurée par une tourelle, elle-même solidaire d'une embase permettant, entre autres, la connexion au porte-cible cryogénique.

Concernant l'assemblage de la cavité de conversion, la partie la plus délicate et contraignante consiste à centrer un microballon de 2,4 mm de diamètre au centre d'une cavité cylindrique de 6 mm de diamètre. La cavité est constituée de deux demi-cylindres sur lesquels un film de polymère souple en Formvar® est posé tendu. Un perçage au centre de ces films est réalisé par usinage laser, le diamètre des trous réalisés étant inférieur à celui du microballon. Ce dernier est alors déposé sur le trou d'une des parties de la cavité à l'aide de déplacements micrométriques et d'un système de maintien par aspiration. La deuxième partie de la cavité est ensuite placée au-dessus du microballon, de manière à l'enserrer entre les deux films et à fixer sa position en assemblant les deux parties de la cavité. L'ajustement des diamètres des deux trous et leur centrage permettent de faire le centrage dans les directions x, y et z du microballon. Les tolérances de positionnement requises de  $\pm$  30 µm selon les trois axes ont d'ores et déjà été obtenues.

L'aboutissement de ces différentes études et mises au point sur la conception et la fabrication des échantillons permettra à cet outil exceptionnel qu'est le LMJ de réaliser, à la fin de la décennie, les expériences tant attendues sur l'ignition du DT en laboratoire par fusion inertielle et ses applications.

> > Philippe Baclet<sup>(a)</sup>, Claude Rullière<sup>(b)</sup>, Guy Schurtz<sup>(c)</sup> et Jacques Tassart<sup>(d)</sup> Direction des applications militaires (a) CEA centre de Valduc
>  (b) CEA Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine (Cesta)
>  (c) CEA Cesta et UMR Celia (Centre lasers intenses et applications – CNRS) (d) CEA/DAM-Île de France (DIF)



Partie mobile du porte-cible cryogénique en cours d'études par le CEA/DAM en collaboration avec le Service des basses températures (DSM/DRFMC) à Grenoble, et au bout de laquelle se fixe l'ensemble représenté en figure 8b. On aperçoit l'extrémité de l'enceinte à vide à gauche au premier plan.

# Un outil ouvert à la communauté scientifique *via* l'Institut lasers et plasmas (ILP)

Outils essentiels du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA, le laser Mégajoule (LMJ) et son prototype, la Ligne d'intégration laser (LIL), seront également ouverts à la communauté scientifique pour des expériences sur les lasers de haute énergie et les plasmas, en particulier stellaires.

ès la fin de 2004, le grand instrument scientifique Qu'est la Ligne d'intégration laser (LIL), accompagnée d'une chaîne laser de plusieurs pétawatts, sera ouvert à la recherche académique, comme le sera dans les années 2010 le laser Mégajoule (LMJ). Le CEA, le CNRS, l'École polytechnique et l'université Bordeaux 1 ont signé le 3 mars 2003 la convention-cadre créant l'Institut lasers et plasmas (ILP)<sup>(1)</sup>. Cet institut à vocation nationale a pour mission de coordonner et développer, d'une part, les domaines scientifiques et techniques concernés par les lasers de haute énergie et leurs applications et, d'autre part, la physique des plasmas denses et chauds créés par lasers. Il comprend une fédération de recherche (ILP-Recherche) qui regroupe actuellement plus d'une vingtaine de laboratoires, répartis dans cinq régions. L'ILP a également vocation à stimuler la valorisation et le transfert des technologies issues de la construction des lasers de haute énergie et à participer à la dynamique européenne autour des grandes installations laser. Il a aussi pour mission de construire et exploiter de nouveaux instruments de recherche, avec la possibilité d'en assurer ou d'en déléguer la maîtrise d'œuvre ou la maîtrise d'ouvrage: c'est le cas du laser Multi Pétawatt associé à la Ligne d'intégration laser.

La fédération ILP-Recherche assure une triple mission de recherche, de formation et de service d'accès aux grandes installations lasers. Son programme scientifique s'articule autour des sciences de la fusion par confinement inertiel (FCI), dans la perspective de la production d'énergie, et ménage une large place à l'avancement des sciences de la matière placée dans des conditions extrêmes. Les grandes thématiques se regroupent essentiellement autour :

• de la physique de la fusion par confinement inertiel, qui s'ouvre sur plusieurs domaines de recherche fondamentale et appliquée;

• des diagnostics des plasmas de fusion, où l'accent est porté sur la complémentarité entre les sources de rayonnement X et les sources de particules (radiographie par protons, imagerie neutronique);

 de l'optique et des lasers. Dans ce domaine clef pour l'avenir de la fusion par confinement inertiel, les recherches visent notamment à identifier et surmonter les phénomènes qui limitent les performances des lasers et à accroître leur taux de répétition. Enfin, dans le domaine des lasers de très haute intensité, l'ILP entreprend, avec la région Aquitaine et le CEA/Cesta, d'ouvrir la voie qui conduit du pétawatt (10<sup>15</sup> watts) à l'exawatt (10<sup>18</sup> watts). Quelques exemples empruntés à l'astrophysique



#### Figure.

Représentation du domaine de température (exprimée en kelvins) et de densité (exprimée en nombre d'ions par centimètre cube) couvert lors d'une expérience d'implosion d'une capsule de DT conduisant à l'ignition et à la fusion dans le régime de l'attaque indirecte. Une fois que l'énergie électromagnétique des faisceaux lasers ultraviolets pénètre à l'intérieur de la cavité, où elle est convertie en rayonnement X caractéristique d'une température de quelques millions de degrés, plusieurs types de plasmas de caractéristiques différentes sont produits. L'ablation de l'or du Hohlraum produit le "plasma de cavité", tandis que celle de la coquille de la cible de DT produit un plasma moins dense, lancé en détente violente. C'est naturellement à l'intérieur même de la capsule en implosion que sont produits les plasmas les plus denses et les plus chauds. L'allumage des réactions thermonucléaires élève finalement la température du plasma de fusion à environ un milliard de degrés. Les régions hachurées correspondent au domaine qui pourra être exploré par la Ligne d'intégration laser, prototype du Laser Mégajoule. Sont également portés sur cette figure l'ordre de grandeur du temps de vie des plasmas de chaque domaine caractéristique (ns = nanoseconde, ps = picoseconde), et deux droites d'égale pression (isobares) permettant de situer le domaine de pression compris entre 10 gigabars (Gbar) et 1 térabar (Tbar). Le trait diagonal rouge représente les caractéristiques des plasmas rencontrés dans le Soleil, depuis sa surface (la photosphère) jusqu'au cœur. à noter que les plasmas de fusion par confinement inertiel sont un peu plus denses que le cœur du Soleil et également beaucoup plus chauds.

illustrent, dans le cadre de ce numéro consacré à notre étoile, l'étendue des domaines de recherche liés à la fusion par confinement inertiel. Les dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour maîtriser le confinement inertiel des plasmas sont, par leur principe même, des moyens puissants d'exploration de la physique de la matière placée dans des conditions extrêmes. De plus, le couplage très étroit entre les expériences laser et la simulation numérique intensive est un facteur efficace de développement de la modélisation des objets astrophysiques.

#### Simuler l'univers violent

Le caractère non stationnaire des expériences laser est mis à profit pour simuler un grand nombre de phénomènes violents se déroulant dans l'univers: ondes de choc, explosions de **supernovae**... Cet aspect est propre

<sup>(1)</sup> Contact: Arnold Migus, directeur de l'ILP; arnold.migus@polytechnique.fr



aux plasmas créés par laser, où la grande souplesse dont on dispose vis-à-vis de la nature des cibles permet de générer des chocs de différentes natures, se déplaçant à plus d'une centaine de kilomètres par seconde dans des milieux homogènes ou hétérogènes. La pertinence astrophysique de ces expériences repose en partie sur l'existence de lois de transformation d'échelles qui permettent de ramener à une expérience de laboratoire l'étude d'un phénomène dont les temps et les longueurs caractéristiques relèvent des échelles astronomiques.

#### Vers la physique de l'extrême

Les plasmas rencontrés dans les intérieurs planétaires et stellaires couvrent un très vaste domaine thermodynamique que seuls les lasers de puissance de nouvelle génération permettent d'explorer. Ils ouvrent la voie à la détermination expérimentale de données physiques fondamentales comme les propriétés radiatives des plasmas denses et chauds, pertinentes pour plusieurs types d'objets astrophysiques (intérieurs stellaires, **disques d'accrétion** au voisinage des **trous noirs**...). Ou encore comme l'**équation d'état** de plasmas plus froids, portés à des pressions très élevées (supérieures à 1 **mégabar**), et donc dominés par les interactions coulombiennes entre les particules.

#### Au cœur des planètes...

L'étude expérimentale des propriétés thermodynamiques de la matière dense et chaude est un exemple d'activité transverse, aussi bien liée à la conception des cibles à gain (propriétés de D2, CHBr ou BeCu) qu'à la compréhension de la structure interne des planètes. Depuis plus d'une vingtaine d'années, la description, par des modèles parfois contradictoires, du comportement des fluides dans les conditions qui règnent à l'intérieur des planètes, constitue un problème de physique atomique épineux. Les propriétés sous très haute pression du fer, dans le cœur de la Terre, de l'hydrogène dans Jupiter et Saturne, ou de celles de l'eau dans Neptune et Uranus, sont loin d'être bien comprises. Là règnent des pressions de plusieurs centaines de **gigapascals** et des températures relativement faibles, de quelques dizaines de milliers de degrés. Les lasers de très haute puissance permettent

d'explorer ce domaine particulier : il s'agit bien de créer – pendant quelques **nanosecondes** – de minuscules "cœurs de planète" afin d'en étudier les propriétés thermodynamiques. La courbe de fusion de divers matériaux, leur équation d'état et les transitions de phase solide-liquide-plasma pourront être explorées en faisant varier l'intensité des faisceaux lasers.

#### ... et des étoiles

L'écoulement du rayonnement dans les étoiles et les atmosphères stellaires conditionne leur structure, leur évolution et leur durée de vie. Il est contrôlé par les processus de diffusion, d'absorption et d'émission des photons par les électrons qui cadencent la lente progression du rayonnement X de l'intérieur de l'étoile vers sa surface, d'où l'énergie est enfin rayonnée dans l'espace. C'est dans la gamme spectrale de 0,1 à 1 keV (12,4 à 124 nanomètres) que l'interaction entre les photons et la matière (partiellement ionisée) est la plus intense, mais aussi le plus difficile à calculer! Depuis quelques années, les expériences d'absorption du rayonnement dans les plasmas chauds contribuent à la progression de la modélisation de leur opacité au rayonnement X. Ces avancées en physique atomique, fondamentales pour la maîtrise de la physique de la FCI, ont également permis de mieux maîtriser la modélisation des étoiles pulsantes comme les Céphéides, étalons de l'échelle des distances dans l'univers. Elles contribuent aussi à consolider l'accord entre les modèles de la structure interne du Soleil et les données issues des observations héliosismologiques qui fournissent des indications précises sur les conditions physiques régnant à l'intérieur de notre étoile.

Ainsi, la Ligne d'intégration laser et son successeur le laser Mégajoule, en permettant d'accéder à des conditions de plus en plus proches des plasmas astrophysiques, devraient constituer une étape marquante de l'évolution de la plus ancienne des sciences: l'astronomie.

#### > Jean-Pierre Chièze

Direction des sciences de la matière CEA centre de Saclay Institut lasers et plasmas Université de Bordeaux 1



Image acquise par le satellite d'observation X Chandra, dans la bande spectrale 300 eV-7 keV, du reste de la supernova de type Ia dont l'explosion a été observée par Tycho Brahe en 1572. Ce reste est circonscrit par une onde de choc (qui émet des photons couvrant la bande 2,56 keV-7 keV, codés en bleu), qui se propage dans le milieu interstellaire. Elle est engendrée par l'expansion rapide mais décélérée des matériaux même de la supernova (appelés ejecta) dont on voit la surface externe festonnée, observée entre 0,3 et 2,65 keV. Cette décélération est susceptible d'engendrer le développement d'instabilités de type Rayleigh-Taylor, responsables de l'apparence "spongieuse" de l'interface *ejecta*-milieu interstellaire. Le même type d'instabilité (à gauche) a été reproduit et analysé expérimentalement (expérience Astrolabe I) après le passage d'un choc fort, à l'interface séparant un matériau lourd d'un matériau léger, portés sous choc à l'état de plasma. L'énergie utilisée pour engendrer, dans le matériau lourd (à gauche), l'onde de choc débouchant dans le matériau léger, a été délivrée par un des deux faisceaux du laser Phébus (CEA/DAM). Le second a été utilisé pour produire, par radiographie X latérale, l'image présentée ici de l'interface, déstabilisée par le ralentissement du matériau lourd imprimé par le matériau léger. Ce type d'expérience exploite la capacité des lasers de puissance de porter des plasmas denses et chauds à des vitesses très élevées, supérieures à 100 km/s.