

**ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA  
GROUPE ARGUMENTAIRE SUR LE NUCLÉAIRE**

**La fusion par confinement inertiel**

**Marc NOVARO**

## 1. LIMINAIRE

Cet article a été rédigé en s'appuyant sur un rapport préparé par l'Académie des Sciences, sur demande du Conseil Interministériel de la Recherche, intitulé "La Fusion Nucléaire, de la recherche fondamentale à la production d'énergie", qui a été publié en 2007.

## 2. INTRODUCTION

La production d'énergie est au cœur des préoccupations de tous les États avec d'une part, le coût des ressources naturelles comme le gaz naturel et le pétrole et d'autre part, les effets des émissions de gaz carbonique qui pourraient bouleverser le climat trop rapidement pour que l'humanité ne puisse s'y adapter dans de bonnes conditions.

Le monde, et les scientifiques en particulier, se trouvent donc face à un défi majeur :

- soit permettre à tous d'accéder à l'énergie selon les modalités existantes
- soit inventer un nouveau mode de production énergétique indispensable au développement

A son avantage, les ressources en combustibles de fusion sont facilement accessibles et pratiquement inépuisables et les déchets radioactifs ne posent pas de problème environnemental insupportable. Par contre, pour que la fusion contribue massivement un jour à la production d'électricité, le chemin reste long et escarpé car de très nombreux défis tant scientifiques que technologiques sont encore à lever.

Si l'énergie issue de la fission d'éléments lourds est maîtrisée depuis un demi-siècle, il en va différemment de l'énergie issue de la fusion des éléments légers (hydrogène, deutérium et tritium). En effet, cette fusion ne peut intervenir qu'à des températures très élevées (plusieurs millions de degrés) et pose des problèmes inédits tels que par exemple la mise en œuvre de matériaux résistants à des flux très élevés de neutrons et de photons.

Au plan international, les recherches sur l'énergie de fusion se structurent aujourd'hui autour de trois grands projets expérimentaux :

- d'une part, la machine ITER (le « chemin » en latin) pour la fusion dite « magnétique », fruit d'une coopération internationale et qui est implantée à Cadarache (voir fiche GASN N°16).
- d'autre part, les Laser Mégajoule (LMJ) et National Ignition Facility (NIF) pour la fusion « inertielle », qui sont installés respectivement à Bordeaux et à Livermore (États-Unis). Un projet Hiper (High Power laser Energy Research) en phase de faisabilité est lancé dans le cadre de la Communauté Européenne.

L'Europe est très présente autour de la voie du confinement inertiel avec le programme LMJ financé entièrement par la France et HIPER financé par l'Europe. Le projet Hiper s'est donné un objectif ambitieux, au-delà des programmes LMJ et NIF, de développer les technologies nécessaires à la conception un réacteur de fusion (en Anglais : Inertial Fusion Energy IFE) qui produirait de l'énergie.

## 3. LE PHÉNOMÈNE DE FUSION

La fusion se produit lorsqu'on crée les conditions pour que la collision de deux noyaux d'atomes légers entraîne la création d'un noyau plus lourd avec diminution de la masse totale du système. La masse perdue se retrouve dans l'énergie cinétique des produits de la réaction, comme le prédit la relativité et par là libère une grande quantité d'énergie.

La réaction la plus facile à réaliser est la fusion des noyaux de deutérium (D) et de tritium (T), les deux isotopes de l'hydrogène. Au cours d'une fusion sont créés un noyau d'Hélium 4 de très grande énergie cinétique et un neutron contenant à lui tout seul 80 % de l'énergie produite par la réaction. Ce phénomène est celui qui est la source d'énergie dans notre étoile solaire.

Pour atteindre cela il faut chauffer le mélange de gaz à des températures supérieures à 100 millions de degrés. Cette réaction très exothermique présente l'intérêt supplémentaire de n'impliquer que des produits abondants et bon marché. En effet, le deutérium existe dans l'eau de mer à une concentration de 33 mg par litre et le tritium se fabrique à partir du lithium, élément bon marché et présent en grande quantité dans l'écorce terrestre.

La fusion complète d'un gramme de mélange DT équimoléculaire libère environ 94 MWh, soit l'équivalent de la combustion d'une dizaine de tonnes de charbon.

#### 4. L'IMPLOSION PAR EFFET FUSÉE

L'idée à la base de la fusion par confinement inertiel (FCI) est de faire imploser une capsule sphérique (également appelée cible) contenant un mélange de deutérium (D) et de tritium (T) gelé à des températures très basses (à - 230 degrés Celsius).

On place cette cible dans le vide et on l'attaque par des faisceaux laser très intenses et de courtes durées (quelques milliardième de seconde). Sa paroi externe absorbe le rayonnement laser et est transformée en plasma très dense sous l'effet de l'élévation de température. Celui-ci se détend rapidement vers le vide ce qui, par effet fusée, entraîne l'implosion de la capsule et la compression du mélange D-T fusible.

Sous certaines conditions (par l'effet de la coalescence d'ondes de choc) la densité, la température et la pression atteignent simultanément, au centre de la cible comprimée, les valeurs requises pour que démarrent les réactions de fusion :

- température de l'ordre de 100 millions de degrés Celsius,
- densité de la matière comprimée de l'ordre de  $100 \text{ g/cm}^3$ , soit environ 100 fois la densité de l'eau,
- pression de l'ordre d'une centaine de milliard de bars.

On dit que l'on a créé un point chaud. Tant que cette situation se maintient, c'est-à-dire avant que la cible se désagrège, l'énergie thermonucléaire se dégage (d'où le terme de confinement inertiel).

L'objectif est donc de maintenir ces conditions le plus longtemps possible pour « brûler » tout le combustible D-T contenu dans la cible. Pour que le rapport entre l'énergie thermonucléaire dégagée et l'énergie initialement délivrée à la cible (gain thermonucléaire) puisse être supérieur à l'unité, il est souhaitable de ne porter aux conditions d'allumage qu'une partie du combustible pour permettre au reste de brûler et donc de fournir de l'énergie. C'est le concept d'allumage par point chaud, sorte d'allumette à partir de laquelle le reste de la cible s'enflamme.

Les installations LMJ et NIF visent justement à atteindre ce seuil de rentabilité (gain unitaire ou break-even en anglais), voire le dépasser d'un ordre de grandeur.

#### Comment atteindre 100 millions de degrés avec le confinement inertiel ?

Deux voies sont actuellement testées :

- La méthode traditionnelle par la création d'un point chaud central dans la cible :  
Le point chaud se forme au centre de la cible et le laser doit assurer simultanément la compression du combustible cryogénique en créant le minimum de pertes dans la cible (minimum d'entropie) et le chauffage du point central aux températures requises.
- L'ignition rapide avec la création d'un point chaud par un laser annexe :  
Une variante récente et innovante consiste à utiliser deux types de laser, l'un pour comprimer la matière comme dans la méthode traditionnelle, l'autre, très intense dans le domaine des pétawatts ( $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ watts}$ ), pour créer un point chaud en fin de compression de la cible. L'avantage essentiel de cette méthode réside dans la dissociation des phases de compression et de chauffage ce qui permettrait d'augmenter le rendement des réactions d'un ordre de grandeur et par là réduire d'autant la puissance des lasers à mettre en œuvre.

## 5. LE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION LASER

Une installation pour le confinement inertiel comporte deux parties principales :

### 5.1. LE LASER IMPULSIONNEL

Alimenté par son banc d'énergie, il est chargé d'apporter l'énergie requise pour imploser la cible. Dans le cas d'une installation visant d'obtenir le break-even, il doit pouvoir délivrer des impulsions ayant les caractéristiques suivantes :

- Energie laser : quelques MJ (millions de joules)
- Intensité lumineuse sur cible : quelques centaines de  $\text{PW}/\text{cm}^2$
- Durée de l'impulsion laser très courte : quelques 10 ns (milliardièmes de seconde)
- Rendement : quelques millièmes
- Cadence de tir : 1 à quelques tirs par jour

Pour passer d'une installation de démonstration (telle que le LMJ ou le NIF) à un réacteur visant à produire de l'énergie, il faudra améliorer le rendement du laser jusqu'à 10% et porter la cadence de tir à 1 à 10 tirs par seconde. Pour ce faire, le verre dopé au néodyme, qui constitue à ce jour le matériau amplificateur le plus efficace, pourrait laisser la place à des cristaux dopés.

### 5.2. LA CHAMBRE DE RÉACTION

De forme sphérique (d'un diamètre de 10 m et pesant 140 tonnes), en son centre ont lieu les micro-implosions produisant l'énergie de fusion thermonucléaire. Elle assure en outre, une triple fonction :

- Elle permet de maintenir un vide suffisant autour de la cible pour que l'énergie du laser puisse se propager jusqu'à la cible
- Elle constitue la première barrière de confinement nucléaire entre le foyer thermonucléaire et son environnement (protection contre les bouffées très rapides de quelques dizaines de picosecondes, des rayonnements émis : neutrons, rayonnement X, particule  $\alpha$ ...)
- Elle maintient les équipements de mesure qui permettent de qualifier la performance des micro-explosions.

À ces unités de base il faut ajouter des unités de maintenance et de production des cibles ainsi qu'un ensemble informatique puissant pour commander et enregistrer les résultats des tirs.

## 6. LE PROJET MÉGAJOULE

Le LMJ est conçu pour obtenir l'ignition et la combustion d'un mélange de deutérium-tritium avec un gain supérieur à un. Le laser a été dimensionné pour délivrer une énergie de 1 à 2 MJ en sortie du laser. Pour l'obtenir, avec une marge de sécurité raisonnable, 240 faisceaux laser ont été prévus. Le verre dopé au néodyme a été conservé comme milieu actif, pour ses qualités de stockage d'énergie et parce que sa technologie est maîtrisée et bien développée.

Les 192 faisceaux du LMJ sont constitués en fait de 24 chaînes comportant chacune huit faisceaux. Ces chaînes sont implantées dans deux halls laser situés de chaque côté de la salle d'expériences contenant la chambre de réactions.

La réalisation du bâtiment de 320 m par 100 m est à ce jour terminée et la chambre de réaction est en place au centre d'une salle d'expérience. Les chaînes lasers, dont la conception a été validée en grandeur réelle en construisant, par avance, un prototype industriel appelé la ligne d'intégration laser (LIL), sont en cours de construction et devront commencer fonctionner à pleine puissance en début 2014.



**Laser LMJ** : A droite, vue générale du bâtiment qui est organisé autour de deux halls laser et d'une salle de réaction centrale. A gauche, vue du centre de cette salle, qui comporte la chambre de réaction de 10 m de diamètre et les assemblages externes qui supporteront les systèmes de focalisation des 192 faisceaux laser et les équipements de mesure.

## 7. LES ATTRAITS DE LA FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL

L'extrapolation des moyens mis en place actuellement pour construire un réacteur basé sur cette filière permet de mettre en avant des avantages sérieux. Tout d'abord, comme nous l'avons déjà noté, le combustible potentiel n'est pas limité.

Le plus remarquable est aussi qu'au plan de la sécurité nucléaire, il n'y a aucun risque d'emballement comme dans les réacteurs à fission, car en cas d'incident, l'interruption de l'alimentation en cibles ou l'arrêt du laser stoppe le fonctionnement de l'installation. De plus, le fonctionnement de ces installations n'induirait pas de transports de matières radioactives (déchets en particuliers).

La construction modulaire présente l'avantage de limiter la présence de matériaux sensibles à la chambre de réactions et à l'unité de traitement des matériaux et de fabrication de cibles. C'est une facilité pour la maintenance du laser ou même sa modification pour tenir compte d'avancées technologiques.

Ensuite, la quantité de matière nucléaire présente dans le réacteur est très faible. Il s'agit du tritium localisé essentiellement dans les cibles (quelques milliardième de gramme de tritium par cible).

Malgré ces avantages, il faut noter qu'à ce jour :

- Les travaux sur le confinement inertiel n'ont pas encore débouché sur la démonstration expérimentale d'un gain thermonucléaire supérieur à 1 (le programme expérimental du NIF mené depuis début 2012 n'a pas encore abouti à l'obtention du break-even)
- Si les défis tant scientifiques que technologiques sont actuellement bien cernés, ils sont loin d'être résolus

Les réflexions actuelles sur les prototypes de réacteurs industriels sont principalement centrées autour :

- De nouveaux schémas de laser comme moyen d'imploser une cible. En effet le rayonnement laser remplit les conditions de souplesse et de précision demandées par l'implosion d'une cible, mais le taux de répétition comme le rendement doivent être considérablement améliorés.
- De la mise en œuvre de matériaux résistants à des flux très élevés de neutrons et de photons tels que les optiques transparentes aux longueurs d'onde laser, les matériaux constituant la chambre de réaction.
- Des processus de transformation de l'énergie produite par l'implosion d'une cible, sous forme de neutrons rapides, en chaleur, pour alimenter un alternateur,

La démonstration expérimentale de l'obtention d'un gain de fusion par la voie laser est pour bientôt (durant la prochaine décennie avec le NIF et le LMJ), mais, même si le chemin est bien tracé pour aboutir à un concept de réacteur utilisant la fusion inertielle, de très nombreux défis scientifiques et technologiques sont encore à lever.