

BULLETIN N° 261
ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES



Lundi 14 novembre 2022 à 14h30

ASSEMBLÉE GÉNÉRALE ANNUELLE DE L'AEIS

Notre Prochaine séance aura lieu le lundi 5 Décembre 2022 de 15h à 17h

**Salle Annexe Amphi Burg
Institut Curie, 13 rue Lhomond – 75005 Paris**

Elle sera consacrée, à 15h précises à :

Conférence :

« *En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée* »

Par Jean-Louis BOBIN

Membre de l'AEIS

Professeur émérite (Sorbonne Universités ex-Paris 6)

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

PRÉSIDENT : Pr Victor MASTRANGELO
VICE-PRÉSIDENTE : Dr Edith PERRIER
VICE PRÉSIDENT BELGIQUE(Liège): Pr Jean SCHMETS
VICE PRÉSIDENT ITALIE(Rome): Pr Ernesto DI MAURO
VICE PRÉSIDENT Grèce (Athènes):
 Pr. Anastassios METAXAS

SECÉTAIRE GENERAL : Eric CHENIN
SECÉTAIRE GÉNÉRALE adjointe : Irène HERPE-LITWIN
TRÉSORIÈRE GÉNÉRALE : Françoise DUTHEIL

MEMBRES CONSULTATIFS DU CA :
 Gilbert BELAUBRE
 Michel GONDRAN

PRÉSIDENT FONDATEUR : Dr. Lucien LÉVY (†)
PRÉSIDENT D'HONNEUR : Gilbert BELAUBRE

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :
SCIENCES DE LA MATIÈRE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI
SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES : Pr Ernesto DI MAURO

CONSEILLERS SPÉCIAUX :
ÉDITION : Pr Robert FRANCK
RELATIONS EUROPÉENNES : Pr Jean SCHMETS
RELATIONS avec AX : Gilbert BELAUBRE
RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF : Michel GONDRAN et Jean BERBINAU
MOYENS MULTIMÉDIA et UNIVERSITÉS : Pr Victor MASTRANGELO et Éric CHENIN
RECRUTEMENTS : Pr. Sylvie DERENNE, Anne BURBAN, Pr Jean-Pierre FRANÇOISE, Pr Christian GORINI, Pr Jacques PRINTZ, Jean BERBINAU
SYNTHÈSES SCIENTIFIQUES : Jean-Pierre TREUIL, Marie Françoise PASSINI
MECENAT : Pr Jean Félix DURASTANTI, Jean BERBINAU, Anne BURBAN
GRANDS ORGANISMES DE RECHERCHE NATIONAUX ET INTERNATIONAUX : Pr Michel SPIRO
THÈMES ET PROGRAMMES DE COLLOQUES : Pr Jean SCHMETS et Dr Johanna HENRION-LATCHE

SECTION DE NANCY :
PRÉSIDENT : Pr Pierre NABET
SECTION DE REIMS :
PRÉSIDENTE : Dr Johanna HENRION-LATCHE

Novembre 2022

N°261

TABLE DES MATIERES

- p. 03 Séance du 14 novembre 2022 : Assemblée générale annuelle de l'AEIS
- p. 05 Documents
- p. 06 Résumé de la conférence du 5 décembre du Pr Jean-Louis BOBIN
- p. 07 Articles associés

Prochaine séance : lundi 5 décembre 2022 à 15h précises

Conférence :

« En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée »

Par Jean-Louis BOBIN

Membre de l'AEIS

Professeur émérite (Sorbonne Universités ex-Paris 6)

ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

Séance du Lundi 14 novembre 2022

La séance est ouverte à 15h, sous la Présidence de Victor MASTRANGELO

- **Étaient présents physiquement nos Collègues membres titulaires** de Paris Jean BERBINAU, Françoise DUTHEIL, Irène HERPE-LITWIN, Victor MASTRANGELO, Edith PERRIER, Jean SCHMETS et notre Collègue Anastassios METAXAS, Président de la section d'Athènes
- **Étaient excusés physiquement nos Collègues** Gilbert BELAUBRE, Eric CHENIN, Gilles COHEN-TANNOUDJI, Jean-Pierre TREUIL
- **Avaient donné leur procuration pour les élections :**

| | |
|---|----------------------|
| BELAUBRE Gilbert | à MASTRANGELO Victor |
| BLONDEL Bruno | à HERPE-LITWIN Irène |
| BOBIN Jean-Louis | à MASTRANGELO Victor |
| BURBAN Anne | à BERBINAU Jean |
| CHENIN Eric | à HERPE-LITWIN Irène |
| COHEN-TANNOUDJI Gilles | à MASTRANGELO Victor |
| DURASTANTI Jean-Félix | à HERPE-LITWIN Irène |
| FLEURET Jacques | à CHENIN Éric |
| HENRION-LATCHE Johanna | à HERPE-LITWIN Irène |
| MEUNIER Paul-Louis | à HERPE-LITWIN Irène |
| NABET Pierre au titre des membres de l'AEIS NANCY | à MASTRANGELO Victor |
| PUMAIN Denise | à HERPE-LITWIN Irène |
| TREUIL Jean-Pierre | à MASTRANGELO Victor |

I. ASSEMBLÉE GÉNÉRALE DE L'AEIS pour l'Année 2022

Notre Président Victor MASTRANGELO procède à l'ouverture de l'Assemblée générale.

A. Rapports moraux et d'activités des diverses sections

Les sections de NANCY, REIMS et PARIS nous ont communiqué leurs rapports d'activités et moraux. Soumis au vote des Collègues présents et représentés, les rapports sont adoptés à l'unanimité des votants ou représentés. Il en a été de même du rapport financier fourni par notre Collègue Françoise DUTHEIL.

B. Election du nouveau bureau pour l'année 2022-2023

Se présentent comme candidats aux diverses fonctions :

| Fonction | Candidat |
|------------------------------|--------------------|
| Président | Victor MASTRANGELO |
| Vice-Présidente | Édith PERRIER |
| Secrétaire général | Éric CHENIN |
| Secrétaire générale adjointe | Irène HERPE-LITWIN |
| Trésorière générale | Françoise DUTHEIL |
| | |

| | |
|--|---|
| Conseillers spéciaux | |
| Edition | Robert FRANCK |
| Relations européennes | Jean SCHMETS |
| Relations avec l'AX | Gilbert BELAUBRE |
| Ville de Paris et Région IDF | Michel GONDRAN et Jean BERBINAU |
| Moyens Multimédias et Universités | Moyens Multimédia : Eric CHENIN Relations Universités : Victor MASTRANGELO |
| Recrutements | Anne BURBAN, Sylvie DERENNE, Jean BERBINAU, Jean-Pierre FRANÇOISE, Christian GORINI, Jacques PRINTZ |
| Thèmes et Programmes de Colloque | Jean SCHMETS et Johanna HENRION-LATCHÉ |
| Synthèses scientifiques et Publications AEIS | Jean-Pierre TREUIL, Marie-Françoise PASSINI |
| Grands organismes de recherche nationaux et internationaux | Michel SPIRO |
| Mécénat | Jean Félix DURASTANTI, Jean BERBINAU, Anne BURBAN |

Se présentent comme Conseillers scientifiques au titre de l'année 2022-2023

| Disciplines | Candidats |
|------------------------------------|------------------------|
| Sciences de la Matière | Gilles COHEN-TANNOUDJI |
| Sciences de la Vie-Biotechnologies | Ernesto Di MAURO |

L'ensemble des candidatures est adopté à l'unanimité des présents et représentés.

Présidents de section élus (appartenant statutairement au bureau)

| Section | Élu |
|---|------------------------|
| Nancy-Luxembourg | Pierre NABET |
| Reims | Johanna HENRION-LATCHÉ |
| Section associée Athènes (Grèce) | Anastassios METAXAS |

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement Mr Yann TRAN et Mme Annabelle POIRIER de l'Institut Curie pour la qualité de leur accueil.

Documents

Pour illustrer la conférence de notre Collègue Jean-Louis BOBIN nous vous proposons les documents suivants :

p. 06 : Résumés en français et en anglais de la conférence de notre Collègue Jean-Louis BOBIN : « *En quête du Graal : La Fusion nucléaire contrôlée* »

p. 07 : Un article de Jean-Louis BOBIN publié chez EDP Sciences en 2014 intitulé « *LA FUSION CONTROLÉE : ESPOIRS ET DÉCONVENUES* » (15 pages)

p. 22 : Un article intitulé « *ÉNERGIE NUCLÉAIRE : ITER vers une future source d'énergie ?* » publié dans *ÉLÉMENTAIRE*, de l'infiniment grand à l'infiniment petit, Revue d'information scientifique, Éditeur : LAL, CNRS, IN2P3, Université Paris-sud (6 pages)

p. 28 : Un article intitulé « *LA FUSION THERMONUCLÉAIRE PAR LASER* » par Michel DECROISSETTE Conseiller Scientifique au CEA DIAM, publié dans *Reflets de la Physique* n°21, octobre 2010, Éditeur : [Société Française de Physique](#) (4 pages)

Un article supplémentaire, intitulé « *ITER et les recherches sur la fusion par confinement magnétique* » par Jean JACQUINOT, du CEA, publié dans *Reflets de la physique* n°32 jan/fév. 2013, Éditeur : [Société Française de Physique](#) (7 pages), n'est pas inclus dans le bulletin car il est trop volumineux. Cet article, comme les 3 autres, est **disponible sur le site de l'AEIS** dans la rubrique « Actualités ».

En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée

AEIS 5-12-22

Résumé

Après avoir présenté quelques bases physiques de la fusion nucléaire, l'essentiel de l'exposé sera consacré au confinement magnétique et plus précisément aux machines appelées tokamaks. Elles ont fait l'objet de vastes programmes de recherches lancés vers 1970 en même temps que se développaient les lasers multifaisceaux pour le confinement inertiel. On attend vers la fin de la présente décennie les premiers résultats significatifs du projet international ITER, un tokamak, initié en 1985. Après plus d'un demi-siècle de recherches et de développement, la preuve n'est toujours pas apportée d'une énergie de fusion supérieure à l'énergie investie par quelque procédé que ce soit. Il faudra encore de longs délais avant d'envisager une exploitation industrielle : un autre demi-siècle peut être.

Abstract

Some physical basis of nuclear fusion will be presented first. Most of the talk will be devoted to magnetic confinement, more precisely to the devices dubbed tokamaks. Large research programs aiming at bigger and bigger systems started ca 1970 as did the development of multi beam lasers for inertial confinement fusion. Significant results from the international ITER project (initiated in 1985) are expected by the end of the present decade. More than half a century of research and development did not produce any evidence of a fusion energy larger than the invested energy. It is still a long way before considering a commercial reactor. Another fifty years might be needed.

21 - LA FUSION CONTRÔLÉE, ESPOIRS ET DÉCONVENUES

Jean-Louis BOBIN

Au cours des cinquante dernières années, les recherches sur la fusion thermonucléaire contrôlée ont donné lieu à des avancées remarquables, aussi bien dans le domaine du confinement magnétique (filiale Tokamak) que dans celui du confinement inertiel (utilisation des lasers). Mais l'état de l'art ne permet pas d'envisager l'apparition de la fusion sur le marché de l'énergie avant la seconde moitié du XXI^e siècle.

| | |
|--|-----|
| 21.1 Introduction | 449 |
| 21.2 Fusion des noyaux légers | 450 |
| 21.3 La Nature et les décideurs | 453 |
| 21.4 Chaudron magnétique ou micro "big-bang"? | 455 |
| 21.5 30 années de « pensée(s) unique(s) » : is big beautiful ? | 456 |
| 21.6 Succès, certitudes et incertitudes | 461 |

21.1. INTRODUCTION

Vers 1920, Jean PERRIN puis Arthur EDDINGTON avancèrent les premiers l'idée que des réactions nucléaires de fusion fournissent l'énergie qui fait briller les étoiles. Au cours de la première moitié du XX^e siècle, nous avons acquis la certitude que tel est bien le cas. Les interactions nucléaires sont la principale source d'énergie de l'Univers tel qu'il apparaît à notre vue et dans nos instruments.

Les recherches pour utiliser les réactions de fusion au service des hommes qui habitent cette planète ont commencé après la seconde guerre mondiale. On s'est explicitement proposé de reproduire sur Terre les processus à l'origine de l'énergie du Soleil. Mais sauf pour des applications qui n'ont pas leur place sur le marché de l'énergie, cet effort n'a pas encore abouti.

*Où en est donc le problème de la fusion au bout de 50 ans ?
Et où va-t'on ?*

Au passage, une remarque s'impose. Une loi non-écrite, mais intégrée dans notre culture, veut que le temps qui sépare de ses applications une découverte fondamen-

tale soit de plus en plus court. De nos jours, passer des dizaines d'années à un tel transfert étonne. Or, pour s'en tenir à un exemple appartenant au domaine de l'énergie, il a fallu environ un siècle pour aller des mises en évidence du courant électrique par GALVANI (1791), puis des effets magnétiques des courants par OERSTED (1820), à l'utilisation généralisée de l'électricité (début du xx^e siècle). Qu'une activité scientifique finalisée exige un étalement sur une période aussi longue n'a donc *a priori* rien de scandaleux. Cela tout au plus, dérange nos habitudes.

Or il faut bien prendre conscience de la lenteur des évolutions. L'Histoire nous enseigne que la conquête d'une large part du marché de l'énergie n'est jamais instantanée mais s'étale sur des décennies. Telle est la norme dans les sociétés humaines. Une technique n'est jamais du premier coup ni parfaitement au point ni sans risque. Les partisans de l'ordre ancien ont des arguments et convaincre est un art difficile.

L'histoire de l'énergie est d'abord celle des combustibles. Nous disposons pour le siècle et demie écoulé de données à cet égard très significatives. Il est ainsi possible de reconstituer fidèlement l'évolution des parts de marché dévolues aux différentes sources d'énergie : tandis que la part du bois diminuait, celle du charbon, sur une lancée datant de la seconde moitié du $xviii^e$ siècle, devenait prépondérante vers 1880, situation qui devait perdurer jusqu'en 1970. Nous sommes maintenant en plein dans l'ère des hydrocarbures. La part du pétrole atteint la saturation après un siècle de croissance. Celle du gaz, le plus écologique des combustibles chimiques, apparaît destinée à grandir encore.

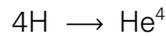
En raison de politiques volontaristes induites par la « crise » consécutive au premier choc pétrolier de 1973, l'énergie nucléaire de fission a connu une croissance exceptionnellement rapide, suivie depuis 15 ans d'une stagnation à un niveau significatif mais encore faible : environ 7% du marché global, 25% de celui de l'électricité. Son extension se heurte à de vives oppositions : l'irrationnel millénariste s'y mêle à la guerre des « lobbies ».

Du point de vue de l'économiste, le xx^e siècle de l'énergie n'est définitivement pas l'ère nucléaire. Cependant, cette forme d'énergie dispose d'un atout de taille : les actuelles centrales nucléaires à fission ne rejettent aucun gaz à effet de serre et ne contribuent donc pas au réchauffement avéré de la planète. Mais la radioactivité associée au processus même de fission, ainsi qu'aux déchets, fait peur. La fusion évite en partie cet inconvénient.

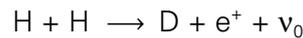
21.2. FUSION DES NOYAUX LÉGERS

Les processus de fusion des noyaux légers sont extrêmement nombreux. Ils tendent tous, de façon plus ou moins complexe, à transformer les noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium. Il existe deux chaînes importantes de telles réactions dont

on sait qu'elles jouent un rôle primordial dans l'énergétique des étoiles. Ce sont la chaîne de WEIZSÄCKER ou « proton-proton », celle du Soleil, et le cycle de BETHE qui fait intervenir à titre de catalyseur actif les noyaux de carbone et d'azote. Dans les deux cas, le bilan est :

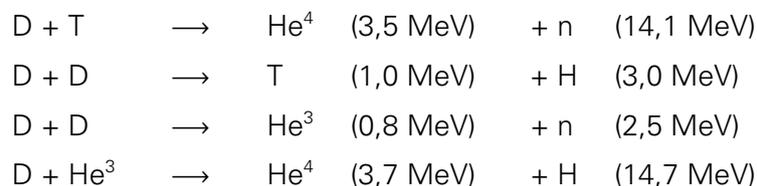


La première réaction de la chaîne de WEIZSÄCKER



est tellement peu probable (c'est une interaction faible) que sa section efficace¹ n'a jamais pu être mesurée au laboratoire, faute d'une instrumentation assez sensible. Cela garantit une évolution non-explosive du milieu où elle se déroule. Extrêmement lentes, ce qui est un avantage pour la stabilité de notre monde solaire, de telles réactions ne sauraient convenir à une source d'énergie terrestre.

Fort heureusement, il existe d'autres réactions de fusion, celles du deutérium, beaucoup plus rapides et fortement exoénergétiques. Stable bien que très peu lié, l'assemblage d'un proton et d'un neutron qui constitue le noyau de deutérium est une curiosité naturelle. Les réactions qu'il provoque avec lui-même, ou avec d'autres noyaux comme le tritium ou encore l'hélium 3, ont, pour de la fusion, des sections efficaces anormalement élevées de l'ordre du barn (10^{-28} m^2), suffisantes pour envisager un dispositif producteur d'énergie. Grâce à une résonance² à 100 keV, la réaction D-T a de très loin les plus grandes sections efficaces. Tous les projets de réacteurs de première génération visent à l'utiliser.



L'exemple des étoiles, faites de gaz ionisé de haute température, nous montre qu'il s'y produit des réactions de fusion de façon stable et génératrice d'énergie dans un régime appelé **thermonucléaire**. Le nombre total de réactions par unité de volume et par seconde y est proportionnel aux concentrations n et N de projectiles et de

1 Section efficace d'une interaction : nombre ayant la dimension d'une surface dont le produit par un flux de projectiles (densité particulière multipliée par une vitesse) donne, pour une particule cible, la probabilité de réaction par unité de temps. La section efficace est symbolisée par la lettre grecque σ , son unité de mesure est le barn : 1 barn vaut 10^{-28} m^2 . L'image, un peu simpliste, que l'on peut se faire de cette quantité est qu'elle mesure la surface d'une particule ou d'un noyau, vue par la particule incidente (projectile), pour une réaction donnée. Cette surface n'est pas constante. Pour une réaction donnée sur un noyau donné, elle varie en fonction de l'énergie du projectile.

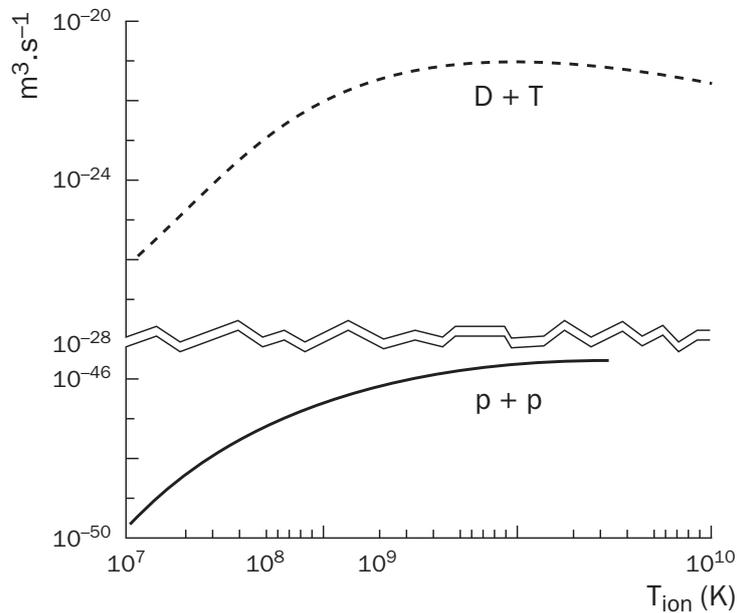
2 Résonance : augmentation brutale de la section efficace d'une interaction, pour une plage d'énergie assez étroite de la particule incidente.

cibles respectivement. Il résulte d'une intégration sur la fonction de distribution des vitesses $f(v)$:

$$\frac{dR}{dt} = nN \int \sigma(v) v f(v) dv = nN \langle \sigma v \rangle$$

La moyenne $\langle \sigma v \rangle$ est souvent appelée **taux de réaction** ou **réactivité**. Ce paramètre caractérise le combustible thermonucléaire. Il convient de noter une propriété intéressante : résultant du produit d'une fonction de distribution en $\exp(-v^2/T)$ rapidement décroissante par une section efficace qui, au contraire, croît très vite avec v , l'intégrand ne prend de valeur importante qu'au voisinage du croisement des courbes $f(v)$ et $\sigma(v)$. C'est du reste ce qui avait permis d'en calculer, avant l'âge informatique, une valeur approchée précise [GAMOW & TELLER, 1938].

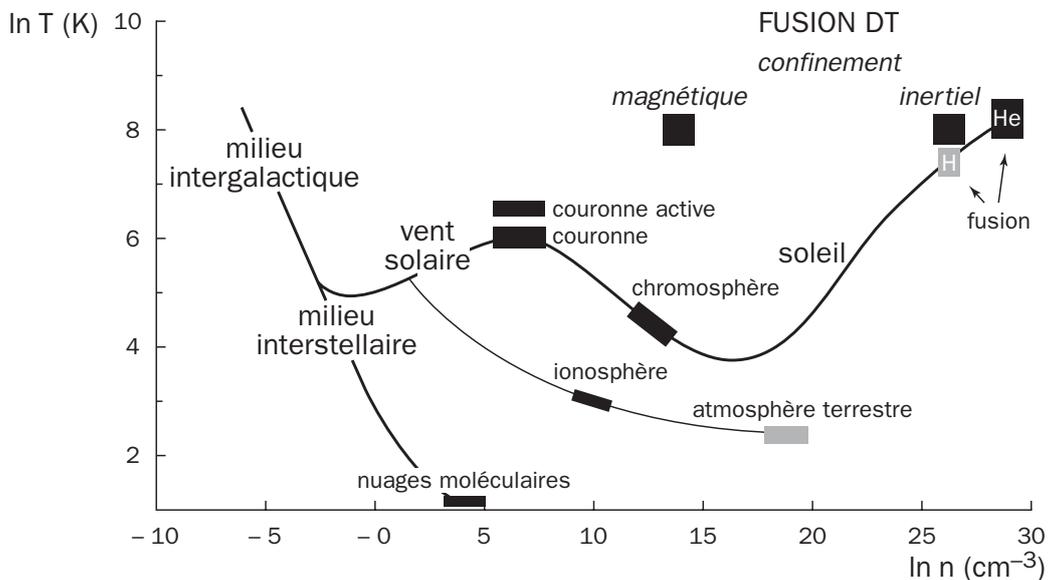
Il est remarquable de constater que l'énergie correspondant au maximum de l'intégrand est notablement supérieure à l'énergie thermique moyenne. Dans un milieu gazeux à l'équilibre thermique, ce sont donc des ions de la queue de distribution aux grandes énergies (constamment renouvelée) qui contribuent à la réaction. Pour le cas de la réaction D-T, $\langle \sigma v \rangle$ varie beaucoup moins vite entre 10 et 100 keV, un facteur 8, que ne le fait la section efficace, plus de trois ordres de grandeur. Son $\langle \sigma v \rangle$ est, comme le montre la **figure 21.1**, de vingt ordres de grandeur supérieur à celui de la réaction proton-proton.



21.1 - Taux de réaction (ordonnées en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) comparés des réactions deutérium-tritium (D-T) et proton-proton (p + p), cette dernière étant le processus primaire intervenant au centre du Soleil

21.3. LA NATURE ET LES DÉCIDEURS

Pour imiter la Nature, il faut commencer par bien la connaître. Dans la perspective qui nous intéresse ici, on peut classer les milieux naturels les uns par rapport aux autres, au moyen d'un diagramme où sont portées, sur des échelles logarithmiques, la densité particulière en abscisses et la température en ordonnées. Les conditions rencontrées dans l'Univers se situent autour d'une sorte de squelette représenté par les courbes continues de la *figure 21.2*.



21.2 - Plasmas naturels et plasmas de fusion

On note que les réactions de fusion thermonucléaire ne se développent que si la température et la densité ont les valeurs régnant au centre du Soleil ou des autres étoiles :

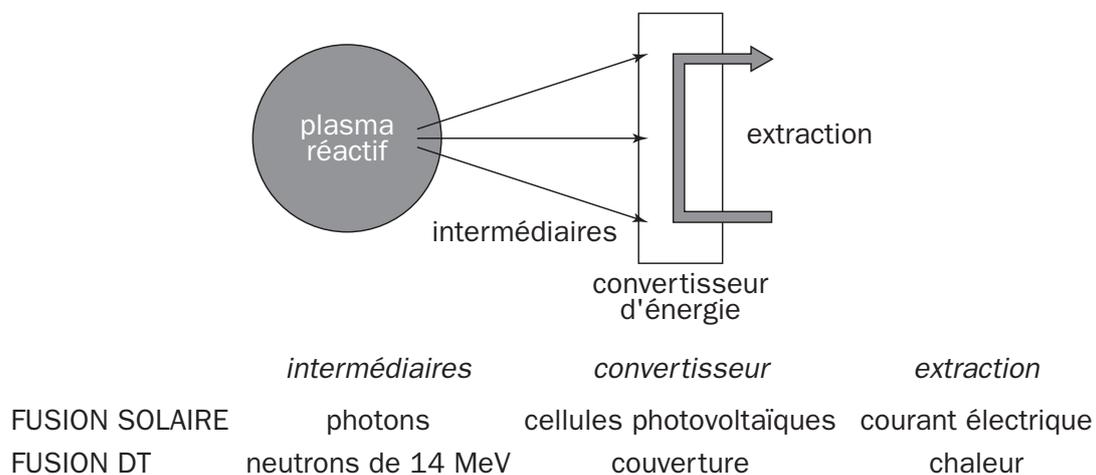
- ▶ température supérieure à 10^7 K permettant l'allumage et l'auto-entretien de la réaction,
- ▶ densité élevée (10^{25} à 10^{30} cm^{-3}).

La pression (hydrostatique) dans ces conditions est supérieure ou égale à 10^{14} Pa (10^9 bars). Elle surpasse, par de nombreux ordres de grandeurs, ce que les matériaux de notre environnement terrestre familier sont capables de supporter. Mais la force de gravitation due à son énorme masse compense la densité de puissance libérée par la transformation d'hydrogène en hélium, prévenant ainsi l'explosion d'un objet comme le Soleil.

Par contre, un Soleil en deutérium au lieu d'hydrogène exploserait à coup sûr !

Alors, pour imiter (partiellement) la Nature, deux voies principales visant toutes les deux à utiliser la réaction deutérium-tritium (D-T) s'ouvrent aux décideurs. Elles seront détaillées au paragraphe suivant. Une première idée consiste à abaisser la densité de façon à obtenir un régime permanent. Le milieu en réaction doit alors être isolé de toute paroi au moyen d'un champ magnétique. L'autre façon est de laisser s'emballer la réaction explosive dont le contrôle se fait en limitant la masse de D-T à une valeur correspondant à une libération d'énergie inoffensive.

Les neutrons servent à transporter l'énergie depuis le milieu en réaction jusqu'à une « couverture » où les 14 MeV de chacune de ces particules sont convertis en chaleur. Comme le montre la **figure 21.3**, le schéma d'extraction de l'énergie est ainsi de même type (séparation de la source et de la récupération) que celui envisagé pour l'énergie solaire, autre énergie de fusion.



21.3 - Schéma de récupération de l'énergie de fusion

Une dernière donnée naturelle importante à prendre en compte est l'état des réserves des différents combustibles chimiques et nucléaires. Dans ce domaine, pour toutes sortes de raisons, les chiffres sont peu fiables. On se contentera de présenter dans le **tableau I** des ordres de grandeurs à peu près consensuels quant au nombre d'années de réserve au rythme de consommation actuel.

Tableau I - Estimations des réserves des combustibles fossiles et nucléaires

| Combustible | Origine | Réserves |
|----------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Charbon | résidus biologiques | des centaines d'années |
| Hydrocarbures | résidus biologiques | des dizaines d'années (récurrent) |
| Uranium | nucléosynthèse stellaire | des milliers d'années (surgénérateur) |
| Deutérium | primordiale (« big-bang ») | des milliards d'années |

Le deutérium a été fabriqué lors de la nucléosynthèse primordiale (« big-bang »), ce qui en fait le moins renouvelable de tous les combustibles ! Mais les réserves, contenues dans l'eau des océans, sont en pratique illimitées : dans un mètre cube d'eau de mer sont en effet dispersés 2 dL (un grand verre) d'eau lourde dont le deutérium pourrait libérer autant d'énergie qu'environ 1000 tonnes de charbon ou de pétrole. C'est dire l'intérêt à long terme présenté par la fusion.

21.4. CHAUDRON MAGNÉTIQUE OU MICRO « BIG-BANG » ?

Si l'on désire obtenir un régime continu à la température élevée nécessaire à l'entretien de la réaction D-T, le nombre de particules par unité de volume doit être restreint à une valeur (basse à notre échelle) compatible avec la nécessité de maintenir la densité d'énergie inférieure à une limite imposée par la tenue des matériaux. Ce milieu doit être isolé de toute paroi au moyen d'un champ magnétique de configuration appropriée. Un tel état de la matière n'existe pas en permanence dans la Nature.

Telle est l'origine profonde des difficultés rencontrées depuis 50 ans dans la voie du confinement magnétique. Elles avaient été largement sous-estimées au départ.

En régime de confinement magnétique, l'allumage a lieu lorsque l'énergie des hélions produits et qui restent dans le plasma compense exactement les pertes par rayonnement et fuites de particules. La réaction auto-entretenu dure autant que la configuration de plasma et de champ magnétique le permet. On définit un temps τ de confinement de l'énergie qui doit satisfaire à la condition de LAWSON (1957) :

$$n\tau \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s} \quad \text{à} \quad T \approx 10^8 \text{ K}$$

où n est la densité particulaire limitée en pratique à 10^{14} cm^{-3} . L'objectif est ainsi de confiner, pendant un temps supérieur à une seconde, un milieu (plasma de deutérium-tritium) dont la température est de 100 millions de degrés.

L'autre possibilité consiste à laisser s'emballer la réaction. Mais il faut alors réduire l'énergie, proportionnelle à la masse de combustible, libérée par chaque explosion de façon à ne rien détruire. On parle alors pudiquement de confinement inertiel. Dans ce domaine aussi, la progression est lente et le chemin semé d'embûches.

En régime explosif, l'opérateur n'a plus à se rendre maître du temps. Le critère pour obtenir une réaction en masse porte sur le produit de la densité (masse volumique) par le rayon d'une boule de D-T soit :

$$\rho r \geq 2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$$

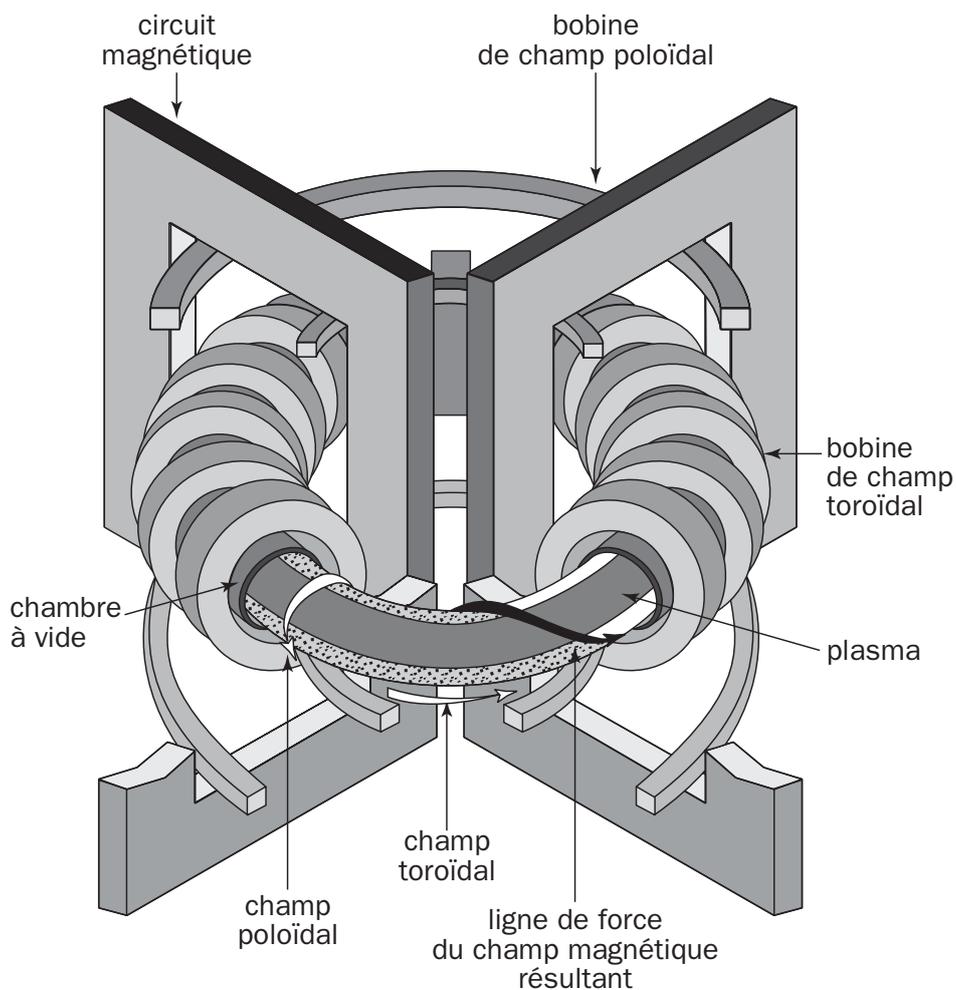
Pour satisfaire cette inégalité, et en même temps limiter l'énergie libérée lors d'une explosion à une valeur non-dangereuse, le D-T doit être à une densité de l'ordre de 1000 à 10 000 fois celle du liquide. Il est donc nécessaire de le comprimer for-

tement et de façon adiabatique. Une telle implosion requiert une source extrêmement puissante (10^{12} W) pour appliquer la pression nécessaire. Certains lasers à verre au néodyme répondent à cette exigence et ont été développés dans ce but.

Il est à noter que l'état de la matière obtenu par implosion en vue de la fusion inertielle est voisin des conditions qui prévalent au centre des étoiles.

Confinement magnétique et confinement inertiel mobilisent l'essentiel des moyens consacrés à la fusion. La catalyse par les muons, bien que prometteuse, représente un effort marginal. Le tapage médiatique du printemps 1989 au sujet de la fusion froide par voie électrolytique s'est rapidement révélé sans objet.

21.5. 30 ANNÉES DE « PENSÉE(S) UNIQUE(S) » : IS BIG BEAUTIFUL ?



21.4 - Schéma de principe d'un Tokamak [source : CEA]

Au cours des années 1950, on a imaginé une foule de configurations magnétiques. Après un processus de décantation assez rapide (10 ans), une seule d'entre elles, le Tokamak (**figure 21.4**) est à l'origine d'une véritable filière. Elle est de loin la plus étudiée et a donné lieu depuis 1968 à des réalisations imposantes. Il s'agit d'un anneau de plasma parcouru par un courant de forte intensité (des mégaampères), placé pour des raisons de stabilité dans un champ magnétique toroïdal créé par un solénoïde torique. Au courant correspond un champ magnétique poloidal qui s'ajoutant au précédent, toroïdal, contribue à la formation de lignes de champ enroulées en hélice sur des surfaces toriques emboîtées : ce sont les « surfaces magnétiques » contenant aussi les lignes de courant et sur lesquelles la pression de plasma est constante.

Des relations d'échelle semi-empiriques montrent que le temps de confinement de l'énergie est d'autant plus long que la machine est plus grosse. On peut voir sur la **figure 21.5** que, du modeste T3 russe (soviétique à l'époque) des années 1960 aux grandes machines de la génération 1980 et 90, les performances en termes de « triple produit » $n\tau$ et de température se sont améliorées d'un nombre respectable d'ordres de grandeur. Au milieu des années 1990, on a presque atteint le stade appelé « *break-even* » dans lequel l'énergie libérée par la réaction de fusion est de l'ordre de celle, thermique, contenue dans le plasma. Mais ce n'est pas encore l'allumage.

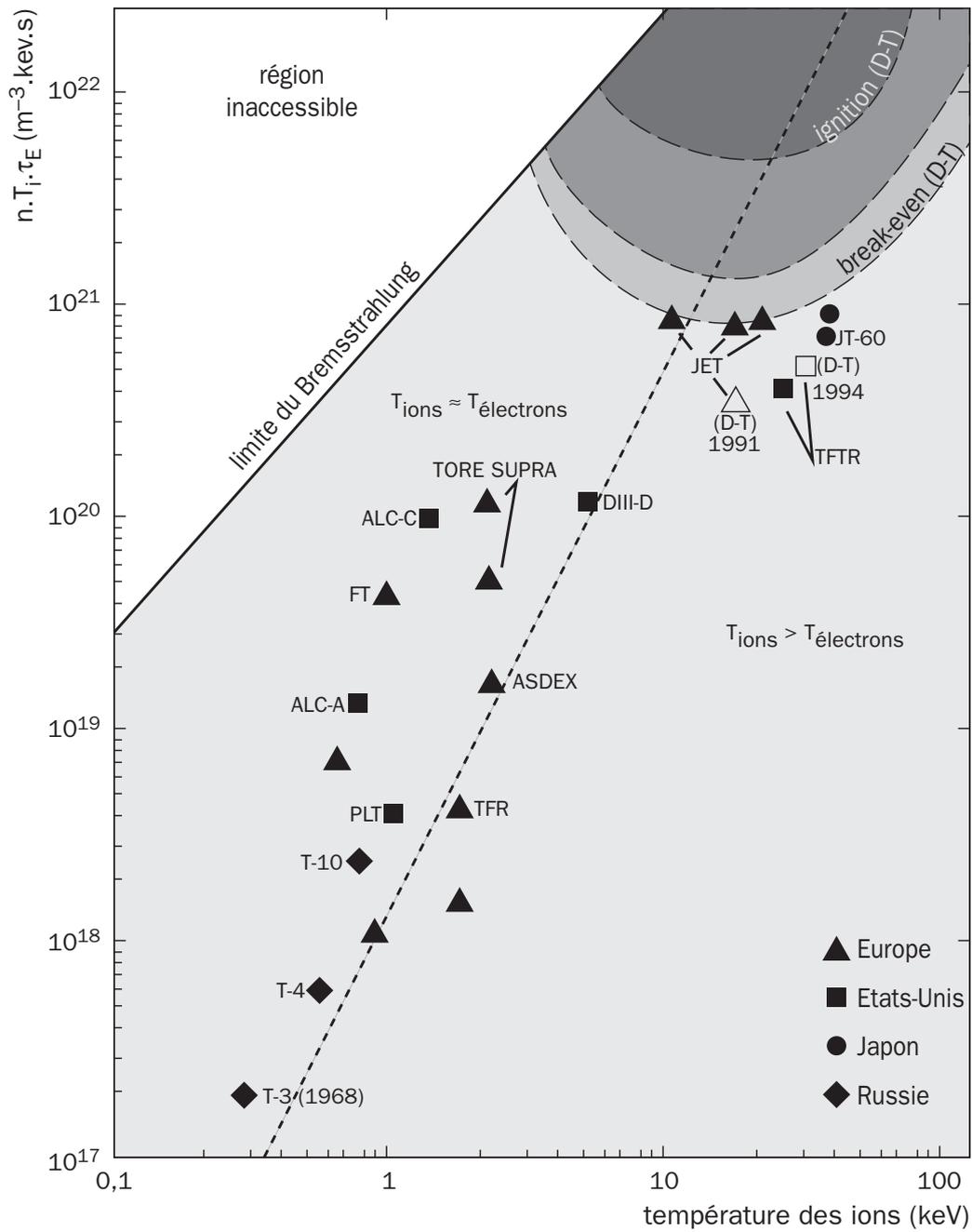
Comme le montre le **tableau II** relatif à la machine JET (*Joint European Tokamak*) mise en œuvre par la communauté européenne, un grand Tokamak représente un projet dont l'étude, la construction et l'exploitation s'étendent sur des décennies, entraînant ainsi de façon tout à fait normale une obligation de pensée unique.

Tableau II - Vie d'un grand Tokamak : le JET

| | |
|----------------|--|
| 1973-75 | Elaboration du projet |
| 1975-77 | Discussions pour le choix du site |
| 1983 | Premier plasma |
| 1991 | Première expérience DT |
| 1997 | P_{fusion} : 16 MW (DT) - énergie : 13 MJ |
| 2000 | Rétrocession à la Grande-Bretagne |

Pour atteindre l'allumage, une machine de la prochaine génération de Tokamaks doit être encore plus grosse. En effet, visant un triple produit $n\tau \geq 3 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K} \cdot \text{s}$, et d'après la loi d'échelle de GOLDSTON (1985) $I^2(\text{MA}) = 1,4 \times 10^{-20} n\tau$, on obtient pour le courant la condition :

$$I \geq 2 \times 10^7 \text{ A}$$



21.5 - Performances de la filière Tokamak [source : CEA]

Sur ces bases, le projet ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) de 1998 prévoyait pour dimensions de l'anneau :

grand rayon du tore : $R \approx 9$ m

petit rayon : $a \approx 3$ m

à comparer à celles du JET,

grand rayon du tore : $R \approx 3 \text{ m}$

petit rayon : $a \approx 1 \text{ m}$.

Ainsi le volume de plasma est multiplié par 30 environ et atteint 2000 m^3 .

La puissance libérée par la réaction DT serait alors de $1,5 \times 10^9 \text{ W}$, comparable à celle d'un réacteur à fission producteur d'énergie. Contrairement à celui-ci, la phase d'allumage (équivalente au franchissement du seuil de criticité) ne peut être atteinte à petite puissance. C'est l'échelle de la centrale électrique ou rien ! Avec cette incidente : s'agissant d'une installation expérimentale d'un coût prévisionnel de 10 milliards de dollars, il ne saurait être question de rentabilité économique. Une telle réalisation n'est envisagée que dans le cadre d'une coopération internationale, prolongement de celle qui est à l'œuvre pour la conception du projet.

La voie du confinement inertiel est également caractérisée par une évolution vers le gigantisme, avec pour corollaire une autre ligne de pensée unique. Après la mise en évidence de réactions de fusion induites par laser et l'élaboration des concepts de micro-explosions, cela se passait à la fin des années 1960, on a construit des générations successives de lasers de plus en plus puissants. Parce que la lumière, dans une gamme spectrale qui en longueur d'onde s'étend de 190 nm à 30 μm , est aisément focalisée au moyen de lentilles ou de miroirs, de très grandes concentrations d'énergie et de puissance sont obtenues à partir de faisceaux laser.

Ainsi, directement ou indirectement par l'intermédiaire d'un rayonnement secondaire (ce mode indirect présenté sur la **figure 21.6** garantit une meilleure uniformité d'éclairement à la surface de la boule à imploser), des impulsions laser permettent de conduire un processus d'implosion sphérique.

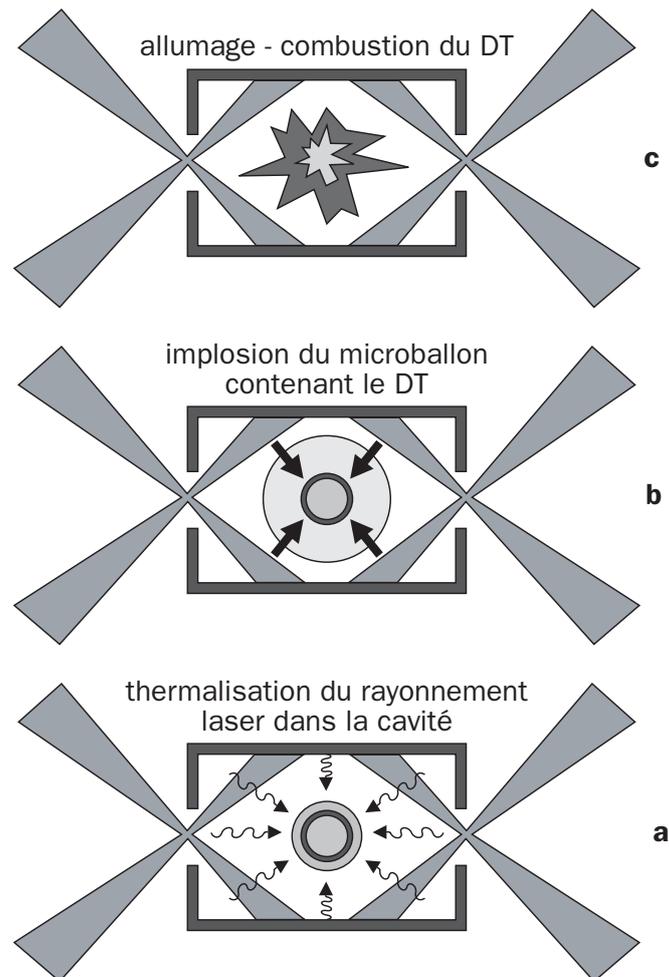
Au stade actuel d'évolution de la technique des lasers, on sait faire passer quelques kilojoules d'énergie lumineuse en une fraction de nanoseconde à travers une section droite d'environ 1 m de diamètre d'un matériau transparent. Pour atteindre les conditions (température et p_r) espérées pour la fusion, il convient d'utiliser de multiples faisceaux en parallèles : de 12 à 24 aujourd'hui, 192 et 240 respectivement dans les projets en cours de réalisation à Livermore (USA) et près de Bordeaux. Les installations correspondantes sont d'une taille et d'un prix (1 milliard de dollars) plus que respectables.

Mais le rendement des lasers de puissance existants est trop faible pour aller au-delà de démonstrations de principe. Pour une source d'énergie, il faudra attendre des générateurs à haut rendement tels que les nouvelles technologies laser ou faisceaux d'ions lourds qui interagiront avec un convertisseur émettant un fort rayonnement secondaire.

Que ce soit pour les Tokamaks ou pour la fusion inertielle induite par laser, l'échelle de temps est la même : 50 ans si tout va bien entre le lancement de la filière et l'obtention d'un bilan d'énergie positif, attendu dans le premier quart du XXI^e siècle.

Il est prématuré aujourd'hui de faire quelque prédiction que ce soit au sujet d'une étape ultérieure vers une exploitation industrielle rentable.

Sortir de la pensée unique permettrait-il d'emprunter des raccourcis et de proposer autre chose qu'une extrapolation à grande constante de temps de ce qui a été avec succès longuement exploité ?

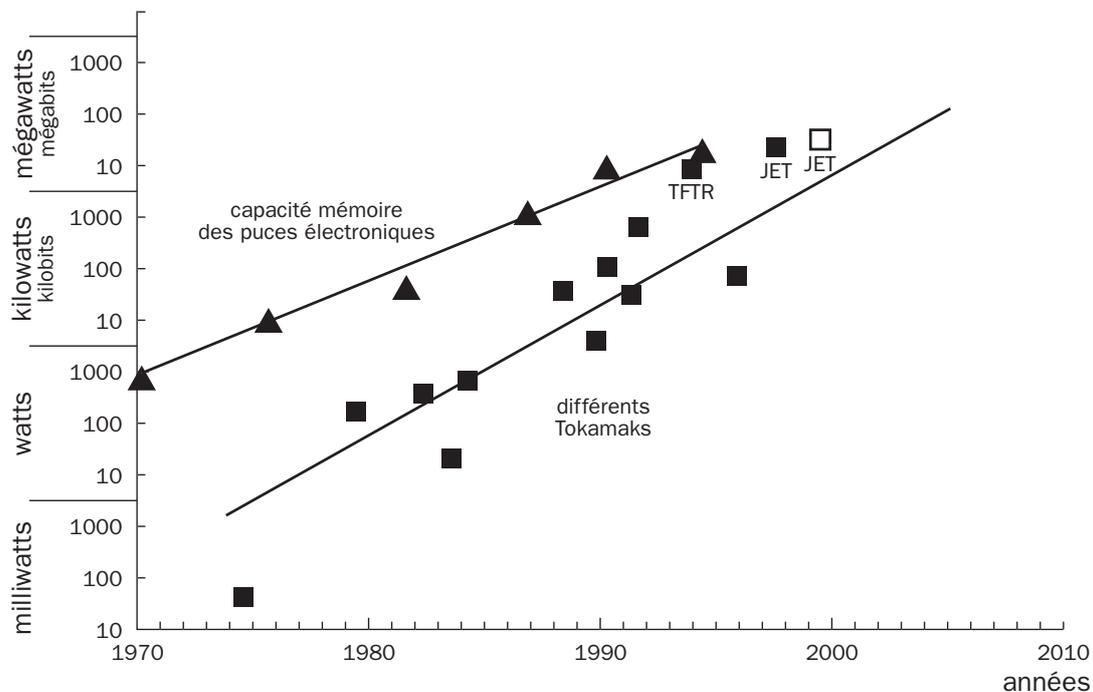


21.6 - Déroulement temporel de la fusion inertielle [source : CEA]

Les trois phases de la méthode indirecte pour impliquer des microballons sont les suivantes : **(a)** interaction des faisceaux laser avec la face interne d'une cavité. Emission d'un rayonnement secondaire thermique - **(b)** interaction du rayonnement secondaire avec la surface externe de la boule centrale conduisant à l'implosion de celle-ci - **(c)** allumage de la réaction thermonucléaire et combustion du DT.

21.6. SUCCÈS, CERTITUDES ET INCERTITUDES

Le mot « succès » a ici tout à fait sa place. Certes on n'a pas réussi à allumer une réaction de fusion thermonucléaire dans les conditions requises, encore moins à créer une nouvelle source d'énergie. Mais il est instructif de comparer sur une période de 25 ans les performances de la filière Tokamak et celles de supports technologiques de l'informatique et de la communication, activités dont la croissance est connue pour être extraordinairement rapide. Ainsi la *figure 21.7* montre que la progression au cours des années de la puissance libérée par la fusion DT se mesure favorablement à l'évolution de la capacité mémoire des puces électroniques. Dans le même temps, autre remarquable exploit technique, la puissance des lasers pour la fusion inertielle était multipliée par 10^9 et leur énergie par 10^6 . Pouvait-on faire mieux ?



21.7 - Evolution de la puissance de fusion DT de différents Tokamaks, comparée à celle de la capacité mémoire des puces électroniques

L'objectif était beaucoup plus lointain et d'accès difficile qu'on ne l'imaginait. Il est peu courant pour des scientifiques occidentaux, physiciens ou ingénieurs, comme pour les décideurs de se lancer dans des projets qui vont au-delà de leur carrière et de leur existence terrestre. On a donc promis et attendu le résultat dans des délais incompatibles avec les obstacles à surmonter. La crédibilité générale de la fusion s'en trouve assez injustement affectée.

Aujourd'hui, en gros, quelle que soit la voie choisie, il semble manquer le dernier facteur 10 pour parvenir au bilan d'énergie positif. Suffit-il d'y mettre le temps et le prix, ce dernier étant aussi sujet à croissance exponentielle ? Probablement, mais il faudra ensuite faire la preuve de la viabilité économique. Là, rien n'est acquis. Dans l'état actuel des connaissances on ne saurait pas le faire. Mais les échéances sont lointaines : deuxième moitié du XXI^e siècle, et la situation énergétique n'est pas telle qu'il faille brûler les étapes. Disposer de beaucoup de temps peut paraître un avantage. Il manquera cette pression de l'urgence qui rend inventif.

La coopération internationale est devenue la règle, du moins pour le confinement magnétique. C'est bon pour la pérennité de l'entreprise. Mais la prise de décision (au plus haut niveau) reflète plus le sens du compromis que celui de l'audace visionnaire. C'est ainsi que pour le JET, la recherche d'un consensus européen rendit le projet un peu court dans ses ambitions. En ce qui concerne le sort du projet ITER, dont le dessin était achevé mi-1998, la communauté des physiciens impliqués dans les programmes de fusion s'avéra elle-même divisée sur le point de le construire. Des scientifiques également respectables ont pris parti, soit pour, soit contre. Les Etats-Unis se sont retirés du projet en 1998 (trop complexe, trop cher). Au Japon, pays industrialisé le plus enthousiaste pour accueillir l'installation d'une telle machine, la crise économique a poussé à la temporisation. Un délai de 3 ans a été accordé aux partenaires du projet (essentiellement le Japon et l'Europe ; la Russie n'ayant plus les moyens) pour préparer les éléments d'une décision retardée d'autant. Une machine plus modeste a été proposée au début de l'an 2000 : avec 800 m³ de plasma seulement pour 500 MW de fusion, l'allumage et l'auto-entretien sont improbables. Mais elle est deux fois moins chère et représente, d'après P.H. REBUT, ce que peut proposer de mieux l'organisation internationale actuelle. La construction, sur un site à choisir en 2003, de ce Tokamak de quatrième génération pourrait être achevée vers 2010-2012.

En raison de connotations militaires, l'avenir à moyen terme du confinement inertiel semble mieux assuré. Les lasers mégajoule en construction aux Etats-Unis (NIF pour *National Ignition Facility*) et en France (LMJ pour Laser MégaJoule) devraient être mis en service entre 2008 et 2010.

En ce début de siècle la question se pose : la fusion peut-elle être une source d'énergie pour un avenir pas trop lointain ? Dans l'état actuel des connaissances et des programmes, tout laisse penser qu'elle ne viendra pas sur le marché de l'énergie, si elle y vient jamais, avant la deuxième moitié du siècle.

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES

ADAM J. –1993– *La fusion nucléaire*. Belin.

BOBIN J.L. –2001– *Les déconvenues de Prométhée*. Atlantica.

ETIEVANT C. –1976– *L'énergie thermonucléaire* 2^e éd. PUF, collection Que sais-je ? (épuisé).

FOWLER T.K. –1997– *The fusion quest*. John Hopkins University Press.

REBUT P.H. –1999– *L'énergie des étoiles*. Odile Jacob.

REVUES

HAWRYLUK R.J. –1998– Results from deuterium-tritium tokamak confinement experiments.
Rev. Mod. Phys. **70**(23), 537.

Points de vue opposés sur I.T.E.R. d'A.M. SESSLER & T.H. STIX d'une part, M.N. ROSENBLUTH
d'autre part. *Phys. Today* **49**(5), 21, 1996.

La fusion nucléaire. *La Recherche* **299**, juin 1997.

Chocs (Revue Scientifique et Technique de la D.A.M., CEA) : les **1** (1991), **13** (1995)
et **22** (1999) concernent la fusion induite par laser.



Énergie nucléaire

ITER vers une future source d'énergie?

Les décisions sont arrêtées. Le chantier est lancé. Le réacteur thermonucléaire ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), implanté à Cadarache, entrera en service en 2015-2016, même si certains physiciens ont contesté l'opportunité de cette entreprise.

ITER (en latin la voie) est une étape sur le chemin de l'autre source d'énergie nucléaire : des réactions de **fusion** de noyaux légers qui comme les réactions de **fission**, fragmentation de noyaux lourds, sont exothermiques. Mais alors que la fission, maîtrisée dans des réacteurs depuis 1942, est passée au stade industriel vers 1970, la fusion en est encore au stade expérimental. Ce long délai est dû à des causes spécifiques : masse de nouvelles connaissances qu'il fallait acquérir, nombreuses techniques d'avant garde à développer, nécessité d'expérimenter sur des installations de grande taille, extrêmement coûteuses.

Fusion thermonucléaire

Par application de la formule $E = mc^2$, la fusion de 4 noyaux d'hydrogène pour former un noyau d'hélium, plus léger que la somme de 4 protons, est depuis 1919 (**Jean-Baptiste Perrin**) reconnue comme la source d'énergie du Soleil et des autres étoiles. La réaction proton-proton est une interaction faible dont la probabilité, excessivement petite, garantit la longue vie du Soleil en même temps qu'elle exclut toute mise en œuvre sur la Terre.

En revanche, les réactions du deutérium, découvertes en 1934 par Rutherford et ses collaborateurs, ont des probabilités (sections efficaces) qui les rendent compatibles avec une source d'énergie terrestre à la condition d'être produites en **régime thermonucléaire** : au sein d'un gaz chaud complètement ionisé (plasma), projectiles et cibles ont une distribution en énergie dont une seule tranche, vraiment active, correspond au maximum de probabilité de la réaction. Située à une énergie très supérieure à la moyenne (température du plasma), elle est constamment renouvelée. Les étoiles et toutes les machines à fusion construites à ce jour fonctionnent sous ce régime. Les températures sont nécessairement élevées : au moins 10^7 K ou en unités d'énergie 1 keV.



Né à Lille, le 30 septembre 1870, **Jean-Baptiste Perrin** fit ses études à l'École Normale Supérieure en 1891 où il resta attaché comme agrégé préparateur.

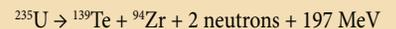
Chargé de créer l'enseignement de la Chimie-Physique à la Sorbonne, Jean Perrin y professa jusqu'en 1940. Il chercha à étayer par des preuves expérimentales certaines l'hypothèse atomique, encore très contestée à l'époque. Il fit, en 1908, la première détermination incontestable du nombre d'Avogadro qui fixe les grandeurs moléculaires.

Ses expériences mémorables, et notamment la vérification de la théorie d'Einstein sur le mouvement brownien, pour lequel lui fut décerné, en 1926, le prix Nobel de Physique, furent exposées en 1913 dans un livre : « Les Atomes ». Jean Perrin s'est beaucoup investi dans la vulgarisation de la science avec, entre autres, la fondation du Palais de la Découverte.

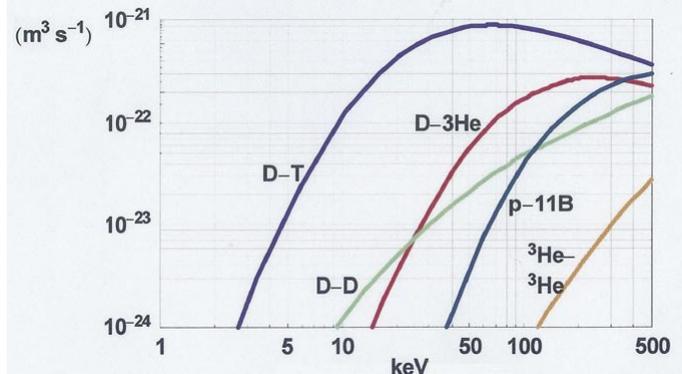
L'astronomie passionnait Jean Perrin qui fut le premier à trouver l'origine du flux d'énergie rayonnée par le soleil en montrant dès 1920 que seule la fusion d'hydrogène en hélium peut en rendre compte.

Fission-Fusion

La fission d'un gros noyau en deux noyaux plus petits produit de l'énergie. C'est la différence de masse des différents constituants qui permet de dégager environ 200 MeV dans la réaction de fission de ^{235}U .



Dans le cas de noyaux légers, il faut au contraire fournir de l'énergie pour pouvoir les scinder. À l'inverse, en réalisant la fusion de ces noyaux, on peut produire de l'énergie. La somme des masses de petits noyaux est plus grande que la masse du noyau issu de leur fusion. C'est ce processus qui est à la base de la production d'énergie des étoiles.



Régime thermonucléaire : Taux de réaction de divers processus de fusion en fonction de la température.



ITER vers une future source d'énergie?



Andreï Sakharov

Né à Moscou le 21 mai 1921, il effectue des recherches sur les armes thermonucléaires et entre à l'Académie des sciences d'URSS en 1953. Il participe à la mise au point de la bombe à hydrogène soviétique mais s'oppose quelques années plus tard à la poursuite des expériences nucléaires. En 1966, il rallie l'intelligentsia dissidente au régime soviétique en place et crée en 1970 le Comité pour la défense des droits de l'homme, ce qui lui vaut le prix Nobel de la paix en 1975. Déchu de ses titres et de ses fonctions, il est assigné à résidence à Gorki et surveillé par le KGB de 1980 à 1986. Une fois réhabilité, il est élu en 1988 au présidium de l'Académie des sciences et en 1989 au Congrès des députés du peuple. Il meurt le 14 décembre 1989 à Moscou... un peu plus d'un mois après la chute du mur de Berlin.



Le premier Tokamak soviétique.

Un demi-siècle de confinement magnétique

Les recherches sur la fusion contrôlée ont vraiment commencé dans les années 50. Elles visaient à provoquer la **réaction de fusion** la plus favorable, celle **entre le deutérium et le tritium** (DT), dans un plasma ténu, chaud et isolé de toute paroi par un champ magnétique de confinement. La température d'allumage, telle que le chauffage par les produits de réaction chargés compense les pertes inévitables de chaleur par rayonnement, est de $4,5 \cdot 10^7$ K. Une température de fonctionnement raisonnable est 10^8 K. Un bilan d'énergie positif est alors obtenu si le plasma est suffisamment dense et stable. On utilise le produit de la densité du plasma par le temps pendant lequel on a pu l'obtenir pour décrire le fonctionnement du réacteur.

Les premières années furent de grande créativité : on essaya nombre de configurations, mais les succès furent modestes. L'horizon s'éclaircit en 1968. Une machine imaginée par **Andreï Sakharov** et depuis longtemps à l'étude à l'Institut Kourchatov de Moscou sous la direction de Lev Artsimovitch, le TOKAMAK (pour TOroidalnaia KAMERA i MAGnetnaia Katouchka, soit chambre torique et bobine magnétique), avait fourni des valeurs apparemment reproductibles de la température électronique (c'est-à-dire celle du plasma) et du temps de confinement (la « durée de vie » du plasma) : 10 millions de Kelvins et 20 millisecondes, respectivement (soit un ordre de grandeur à peine des 10^8 K nécessaires). Confirmés par une équipe britannique dépêchée sur place, ces résultats étaient bien meilleurs que tous ceux qui avaient été obtenus par ailleurs.

Ce fut le point de départ du développement d'une véritable filière. À partir de 1970, des installations de plus en plus grosses et performantes ont été construites et exploitées de par le monde. L'un des buts de ces expériences

Réactions de l'hydrogène et du deutérium

La réaction proton-proton (qui a lieu au cœur du Soleil et des autres étoiles) :



produit un noyau de deutérium ($D = 1$ proton + 1 neutron). Celui-ci est une curiosité naturelle : stable mais peu lié, il entre dans des processus dont les sections efficaces sont les plus grandes des réactions de fusion. Le deutérium agit d'abord sur lui-même selon deux voies également probables :



produisant soit un tritium (T), hydrogène superlourd (un proton et deux neutrons), soit un hélium 3 (${}^3\text{He}$, deux protons et un neutron). Ces noyaux peuvent à leur tour réagir avec le deutérium pour fournir de l'hélium 4 et une grande quantité d'énergie :



La réaction DT est la plus intéressante. Elle est la seule envisagée dans les projets actuels. Le deutérium existe en abondance dans les océans : un verre d'eau lourde (molécule de D_2O contrairement à l'eau normale composée de la molécule de H_2O) par m^3 d'eau de mer. Le tritium, radioactif, doit être produit en bombardant du lithium avec des neutrons. C'est pour cela que la couverture d'un réacteur thermonucléaire doit incorporer du lithium afin de régénérer le tritium, combustible de la réaction.



ITER vers une future source d'énergie?

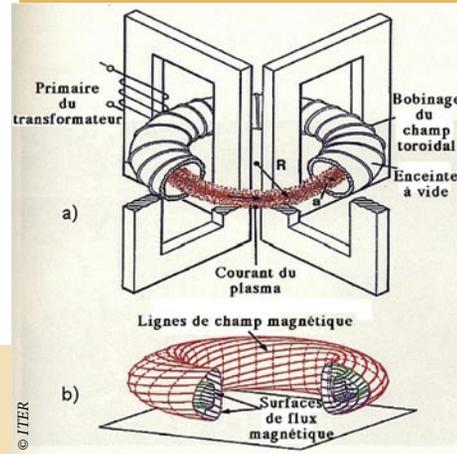
était de trouver les quantités qui régissent le temps de confinement de l'énergie et leurs dépendances. Tous les résultats montrent un effet simple de taille : la machine est d'autant plus performante qu'elle est plus grosse. En trente ans, trois générations de **tokamaks** de taille croissante se sont succédées. En raison du prix de construction et du coût d'exploitation, la troisième génération n'a donné lieu qu'à trois machines : en Europe le JET (Joint European Tokamak), aux États-Unis TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, stoppé en 1997 une fois ses objectifs atteints) et enfin JT-60 au Japon.

L'introduction du tritium dans le plasma s'accompagne de contraintes liées à la radioactivité propre de cet isotope du noyau d'hydrogène et à l'activation de certains matériaux devenant radioactifs après l'absorption des neutrons de 14 MeV produits lors des réactions de fusion. C'est pourquoi cette opération est toujours envisagée avec circonspection et n'a été planifiée que vers la fin des programmes expérimentaux de TFTR et de JET. TFTR a fourni 10 MW de fusion DT en 1993. Cette performance fut dépassée en 1997 par le JET avec un résultat de 16 MW de fusion DT pour 25 MW de chauffage auxiliaire, c'est-à-dire dépensés pour faire fonctionner la machine.

Quel chemin parcouru depuis les débuts ! Deux ordres de grandeur gagnés sur le produit densité-temps et deux autres sur la température. Cependant, les tokamaks construits jusqu'à aujourd'hui consomment toujours plus d'énergie qu'ils n'en produisent.

- 1973-75 **Élaboration du projet**
- 1975-77 **Discussions pour le choix du site**
- 1983 **Premier plasma**
- 1991 **Première expérience DT**
- 1997 **P_{fusion} : 16 MW (DT), Énergie : 13 MJ.**
- 2000 **Rétrocession à la Grande Bretagne**

Les grandes dates de la vie du JET, toujours en service en 2008. Construire puis exploiter un grand Tokamak est une entreprise extrêmement lourde sur tous les plans : scientifique, technique, administratif et bien entendu financier.



*Schéma de principe d'un tokamak :
a) le transformateur et sa cage ;
b) surfaces magnétiques*

Tokamak

La mise en œuvre du Tokamak commence par la réalisation d'un vide extrêmement poussé dans la chambre torique qui contiendra le plasma. Puis on emplit la chambre du gaz désiré pour l'expérience (hydrogène, deutérium ou hélium) à la pression requise (quelques millitorrs, millièmes de la pression atmosphérique). Les bobinages créant un champ magnétique de confinement et le champ de compensation sont alimentés en courant quasi continu. On connecte alors le primaire du transformateur à un générateur d'impulsions. Le champ d'induction est suffisant pour mettre en mouvement les quelques électrons libres toujours présents, les accélérer, puis par un processus d'avalanche provoquer l'ionisation du gaz qui devient ainsi conducteur d'électricité, en obtenant une densité électronique de 10^{19} à 10^{20} m^{-3} .

Pendant la montée du courant, le plasma s'échauffe progressivement par effet Joule. Il devient de plus en plus conducteur au point que dans toutes les machines exploitées à ce jour, lorsque la température électronique atteint environ $2 \cdot 10^7 \text{ K}$, la résistivité du plasma, excessivement faible, se compare à celle des supraconducteurs. L'effet Joule est alors inopérant. Pour atteindre des températures plus élevées, il convient d'injecter de l'énergie dans le plasma. Le tokamak est ainsi accompagné de systèmes de chauffage auxiliaires par arrosage avec des ondes électromagnétiques de haute fréquence ou par injection de particules neutres que nous allons à présent expliquer.

Il a été relativement aisé de développer des générateurs de puissance adaptés aux fréquences en jeu. Il faut en effet que le plasma absorbe plusieurs mégawatts de radiofréquences pour obtenir l'élévation de température désirée. Des antennes alimentées par des circuits haute fréquence ou des guides d'ondes sont disposées à l'intérieur de l'enceinte à vide de façon à irradier le plasma selon les directions les plus favorables au chauffage. Un autre usage des ondes est la génération non inductive de courant permettant de prendre le relais de l'impulsion envoyée dans le transformateur et d'amorcer un régime quasi continu.

Autre procédé de chauffage du plasma : l'injection de particules neutres d'une énergie largement supérieure à l'énergie thermique du milieu dans lequel elles pénètrent (en pratique 100 keV à 1 MeV) peut servir en plus à compenser les pertes de particules. Une bouteille magnétique étant étanche dans les deux sens, il est nécessaire de rendre les ions électriquement neutres pour qu'ils puissent aller jusqu'au cœur du plasma, or on ne sait accélérer que des objets chargés. Un dispositif de formation de faisceaux de particules neutres comporte donc successivement une source d'ions dont le diamètre peut atteindre 1 m, un étage accélérateur, un étage de neutralisation et un dispositif pour l'élimination des ions résiduels. En entrant dans le plasma, les neutres sont d'abord ionisés. Les ions ainsi formés vont céder leur énergie par collisions successives.



ITER vers une future source d'énergie?

Rapport Q

La performance d'un tokamak fonctionnant avec le mélange deutérium-tritium est donnée par le rapport Q de la puissance de fusion à la puissance de chauffage fournie de l'extérieur. Ce rapport s'est rapproché de l'unité dans le JET et devrait atteindre 10 dans ITER pendant un temps court de 400 secondes.

Vers ITER

Mis en service dans les années 80, les Tokamaks de troisième génération ont donné leur pleine mesure dans les années 90. Les résultats obtenus ont été utilisés pour préparer l'étape suivante : ITER.

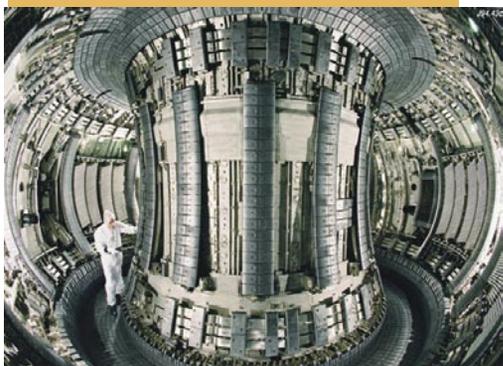
À de rares exceptions près, les recherches sur la fusion ont été menées par de grands organismes nationaux ou au sein de la structure européenne Euratom. L'augmentation de taille des machines entraînant celle de leur coût, le niveau de décision s'est élevé à proportion. Aux U.S.A. les décisions sur le choix de TFTR, sa construction puis sa fermeture ont été prises par le gouvernement fédéral tandis que la communauté européenne prenait à son compte le projet JET.

Plus spectaculaire encore de ce point de vue fut le lancement du projet ITER après la rencontre au sommet, tenue en Islande en 1986, entre Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev. Comment mieux marquer le début d'une ère nouvelle des relations entre l'Est et l'Ouest sinon par une entreprise commune de longue haleine sur un objectif ambitieux – sans être vital à court terme – et impliquant une réelle et permanente coopération ? La fusion magnétique offrait une opportunité idéale.

Mais lorsqu'en 1998, le devis lui a été présenté en même temps que les plans de la machine, le Comité Directeur du projet ITER a reculé devant l'ampleur de la dépense : environ 7 milliards de dollars de l'époque, sans garantie de non-dépassement, pour un allumage incertain. Peut-être l'aurait-il approuvé si la prise de conscience par l'opinion de la menace du changement climatique avait été au niveau actuel. D'un autre côté il ne pouvait être question d'abandonner la filière Tokamak. C'eût été un énorme et immérité constat d'échec, condamnant pour des décennies la voie du confinement magnétique. Les progrès accomplis en 30 ans n'avaient mis à jour aucune raison sérieuse d'agir ainsi. En particulier rien n'était venu contredire le bien fondé des lois d'échelle. Alors, les responsables se sont ralliés à une demi-mesure. Les dimensions d'ITER ont été réduites par rapport au projet initial de sorte que le volume du plasma n'est plus que 800 m³ au lieu de 2 000. De même, la puissance de fusion attendue est abaissée à 500

MW contre 1-500 prévus initialement. L'allumage, qui permet l'auto-entretien de la réaction sans recours à des chauffages auxiliaires, est reporté à des temps meilleurs.

On peut s'interroger sur la pertinence d'une telle démarche. Repartir pour un tour dans ces conditions est-il de bonne politique ? Mais selon Paul-Henri Rebut, directeur du JET et ancien chef de projet d'ITER, les



Intérieur du JET.

| Paramètres | Tore Supra | JET | ITER | DEMO |
|------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Grand rayon du plasma (m) | 2.25 | 3 | 6.21 | 6.5 < R < 8.5 |
| Petit rayon du plasma (m) | 0.7 | 1.25 | 2.0 | 2 < a < 3 |
| Volume du plasma (m ³) | 25 | 155 | 837 | > 1 000 |
| Courant plasma (MA) | 1.7 | 5-7 | 15 | > 20 |
| Champ magnétique (T) | 4.5 | 3.4 | 5.3 | > 5 |
| Durée du plasma | 180 s | 10 s | > 300 s | 1 h |
| Type de Plasma | D-D | D-D / D-T | D-T | D-T |
| Puissance thermonucléaire (Pth) | ~ kW | 50kW/ 16MW | 500 MW | > 2 GW |
| Q = Pth / puissance de chauffage | ~ 0 | ~1 | 10 | > 30 |
| Puissance neutronique au bord | 20 W/m ² | 60 kW/m ² | 0.6 MW/m ² | > 5 MW/m ² |

Tokamakologie comparée : les principaux paramètres de Tore Supra, JET, ITER.



ITER vers une future source d'énergie?

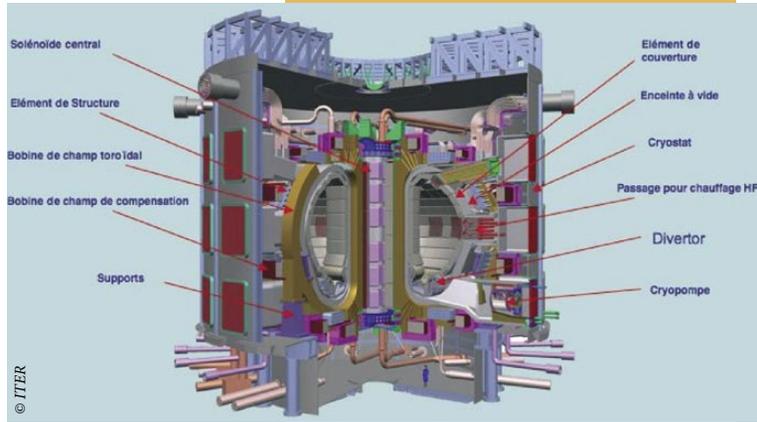
méthodes de travail et l'articulation des équipes étaient mal adaptées à un projet aussi ambitieux. La machine aux objectifs limités, aujourd'hui en construction, est sans doute ce que l'on pouvait concevoir et réaliser de mieux à l'époque.

ITER

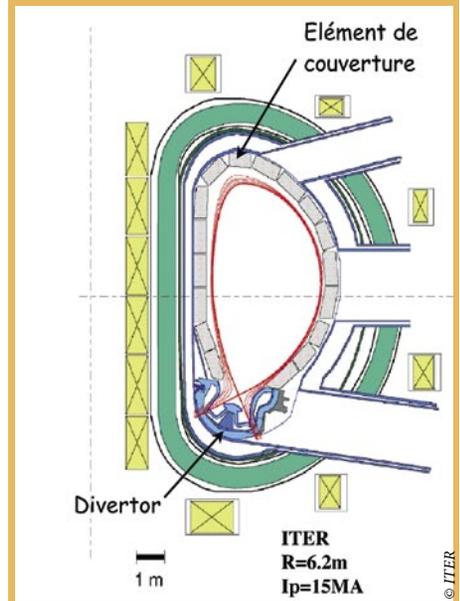
La décision de construire ITER a été prise en 2003. Le site, choisi en 2005 après une recherche menée au niveau mondial, est situé en France en lisière du Centre CEA de Cadarache (dans la vallée de la Durance) où est implanté depuis les années 1980 le tokamak Tore-Supra. Le premier plasma est prévu vers 2016. Puis une dizaine d'années s'écoulera avant d'atteindre le fonctionnement à plein régime sous tritium.

Le projet vise un **rapport Q** (qui mesure le rendement de la machine) de l'ordre de 10 pour une puissance de fusion DT de 500 MW pendant 400 secondes. Ce sera donc un banc d'essai à objectifs multiples avant l'étape décisive de la production d'électricité.

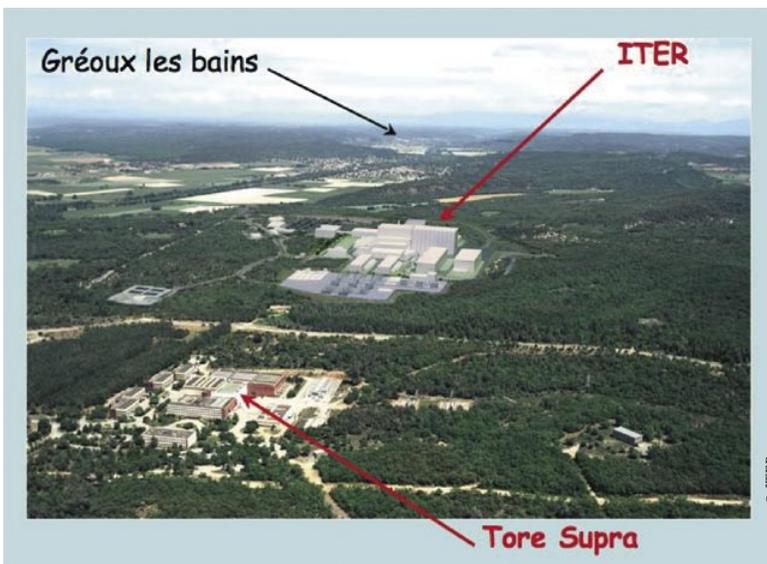
Le dessin d'ITER (voir ci-contre) adopte une section méridienne en forme de D (comme le JET) et intègre trois éléments majeurs : un solénoïde supraconducteur, un divertor destiné à éliminer les produits de réaction ainsi que les impuretés du plasma et enfin un dispositif de récupération de l'énergie de fusion, la couverture. Les deux premiers éléments ont déjà été expérimentés. Les supraconducteurs ont fait leurs preuves sur le Tore-Supra, les divertors sur le JET et JT-60, après des premiers essais sur de petits tokamaks. La couverture sera mise en œuvre pour la première fois. Modulaire, ses éléments sont traversés par un fluide de refroidissement dont la température ne dépassera pas 100 à 150°C en service normal ce qui est insuffisant pour faire tourner une turbine couplée à un générateur



Vue éclatée d'ITER avec, en bleu, la silhouette d'une personne donnant une idée de l'énorme taille de l'ensemble.



Disposition de la couverture et du divertor dans ITER. Les ions indésirables sont guidés jusqu'à des absorbeurs par les lignes de champs des surfaces magnétiques ouvertes.



Le site d'ITER à Cadarache avec les projets des bâtiments de ITER dessinés



ITER vers une future source d'énergie?

Du simple fait qu'il met en œuvre des réactions nucléaires, ITER est source de craintes. Au moindre incident, le plasma très ténu se refroidit immédiatement et la réaction est bloquée net. La crainte d'une explosion est donc totalement infondée. Quant au problème de la radioactivité, il est sans commune mesure avec celui des réacteurs à fission. Le tritium est bien radioactif, mais les quantités manipulées (avec des précautions renforcées par toute l'expérience acquise au JET) se comptent en grammes. Par contre les neutrons de 14 MeV activent les matériaux de structure et cette radioactivité résiduelle perdue après l'arrêt définitif de l'installation qui ne sera donc démantelée qu'au bout de quelques décennies. Le site reviendra alors à son état d'avant le chantier.

électrique. Certains de ces modules comporteront du lithium en vue de la régénération du tritium par réaction des neutrons sur les parois.

Réactualisée, la note à payer par l'ensemble des nations partenaires s'élève à cinq milliards d'euros d'investissements jusqu'à la mise en service. Cinq autres milliards seront nécessaires pour 15 à 20 ans d'exploitation à partir de 2016, suivis du démantèlement de l'installation.

Après ITER ?

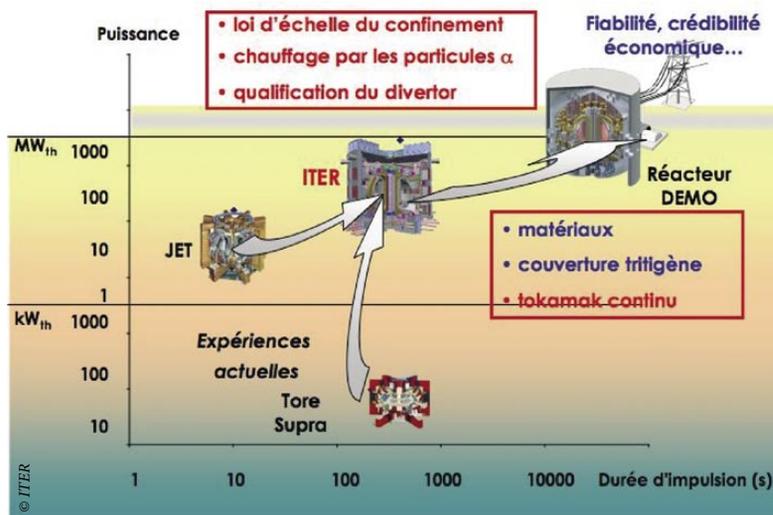
Dans ses ambitions premières, ITER visait, à échéance 2010-2020, la démonstration de l'allumage de la réaction thermonucléaire confinée. Cela aurait constitué l'équivalent de ce que fut pour la fission la divergence de la réaction en chaîne obtenue le 2 décembre 1942 à Chicago par Enrico Fermi. Dans le calendrier actuel, ce pas ne sera franchi qu'après 2030 avec un réacteur de démonstration, DEMO, destiné à produire de l'électricité. Tous les aspects scientifiques et techniques de la filière tokamak auront été mis à l'épreuve sur ITER, sauf un : la tenue des matériaux (notamment ceux de la première paroi) au flux de neutrons de 14 MeV émis par le plasma en

réaction. Dans ITER, celui-ci est comparable à celui rencontré dans un réacteur à fission à haut flux. Il sera 10 fois plus important dans DEMO. Pour cette raison, une installation spécifique, IFMIF (pour International Fusion Material Irradiation Facility), doit être construite au Japon pour un coût de l'ordre de 15% des investissements du programme ITER. Le flux de neutrons y sera créé par l'impact de deutérons accélérés jusqu'à une énergie de 40 MeV sur des cibles de lithium ou de béryllium.

DEMO, contemporain des réacteurs à fission de quatrième génération, devrait donc apporter la preuve expérimentale qui manque toujours : allumer de façon contrôlée les réactions thermonucléaires. Le construire et le faire fonctionner prendra du temps, en plus du délai nécessaire à la prise de décision. Après seulement, il deviendra possible d'envisager le passage au stade industriel, processus

qui, on le sait d'expérience, ne dure jamais moins d'une vingtaine d'années. Encore faudra-t-il que loin dans la seconde moitié du XXI^e siècle, le réacteur à fusion soit compétitif par rapport aux autres sources d'énergie alimentant le réseau électrique.

Sera-ce toujours un tokamak ? Peut-être. Mais si les efforts de recherche sur la fusion ont été concentrés sur cette configuration, c'est parce qu'à la fin des années 1960, elle était supérieure à toutes les autres. Rien ne dit qu'un siècle plus tard il en sera toujours ainsi. D'autres configurations magnétiques, mais aussi la voie inertielle (qui consiste à comprimer et à chauffer une très petite masse de DT jusqu'à 10 000 fois la densité du liquide et à quelques keV de température afin qu'elle explose) ou encore des réacteurs hybrides utilisant la fusion et la fission pourraient représenter l'avenir de cette forme d'énergie nucléaire.



Des tokamaks actuels (Tore Supra et JET) à DEMO, ou comment se dessine l'avenir de la filière. Les encadrés recensent les principaux objectifs de recherche relatifs à chaque étape. La mise en service de DEMO pourrait être contemporaine de la quatrième génération des réacteurs à fission.

La fusion thermonucléaire par laser

Michel Decroisette (michel.decroisette@wanadoo.fr)
Conseiller scientifique au CEA-DAM

La fusion par confinement inertiel est une des deux voies vers la fusion contrôlée ; l'article en rappelle les principes. La démonstration de la combustion d'un mélange de deutérium et de tritium (DT) en laboratoire, mettant en œuvre des lasers de puissance, est attendue dans la décennie, grâce à deux installations en cours de construction aux États-Unis et en France.

L'article décrit les principales caractéristiques du Laser Mégajoule, situé au CEA CESTA, près de Bordeaux.

Les réactions nucléaires permettent de dégager de grandes quantités d'énergie, si l'on choisit bien les noyaux atomiques impliqués.

On peut casser de gros noyaux, cela s'appelle la *fission* : c'est le processus par lequel un noyau lourd et instable, comme l'uranium 235 ou le plutonium 239, se brise en deux noyaux plus légers et plus stables. La masse totale des produits de fission étant inférieure à la masse originelle, cette réaction nucléaire s'accompagne d'un dégagement d'énergie important, selon la célèbre formule d'Albert Einstein : $\Delta E_c = \Delta m \cdot c^2$ (où ΔE_c désigne l'augmentation d'énergie cinétique des particules, Δm la perte de masse, et c la célérité de la lumière).

À l'autre extrémité du tableau périodique des éléments – du côté des atomes légers – se présente une autre possibilité de dégager de l'énergie : la *fusion nucléaire* (le verbe fusionner étant pris dans le sens d'amalgamer). C'est une réaction au cours de laquelle deux atomes légers entrent en

collision et forment un noyau plus lourd, mais de masse inférieure à la somme des masses initiales ; ce défaut de masse se retrouve dans l'énergie cinétique des produits de la réaction (voir encadré).

La fusion nucléaire est toutefois plus difficile à réaliser que la fission, car il faut porter la matière à très haute température (plusieurs dizaines de millions de degrés) où elle est à l'état de plasma (mélange d'ions et d'électrons). Ces conditions se rencontrent dans les étoiles.

Les attraits de la fusion nucléaire comme source d'énergie civile sont incontestables : elle ne produit pas de pollution ni de rejet de gaz à effet de serre, et elle présente un faible impact environnemental en raison de l'absence de déchets radioactifs à vie longue [1]. Le deutérium existe dans l'eau de mer, à une concentration de 33 mg par litre ; le tritium se fabrique aisément à partir du lithium, abondant dans l'écorce terrestre, mais également dans l'eau de mer. On dispose de réserves pour des milliers d'années, et

»»»

► La fusion thermonucléaire

Plusieurs réactions de fusion peuvent être effectuées à partir de noyaux légers. La plus facile à réaliser est la fusion d'un noyau de deutérium (D) et d'un noyau de tritium (T), qui sont des isotopes de l'hydrogène ; on obtient un noyau d'hélium avec une énergie cinétique de 3,5 MeV et un neutron de 14 MeV (emportant donc 80 % de l'énergie libérée). La réaction s'écrit :



La fusion de 1 g de mélange DT dégage 340 GJ, soit ~ 94 000 kWh, c'est-à-dire plus de quatre fois l'énergie par gramme déagée par réaction de fission.

C'est le physicien britannique J.D. Lawson qui, en 1957, établit la condition pour que le bilan d'une réaction de fusion soit positif : le produit de la densité de particules (n) par la durée de la réaction (τ) doit être supérieur à une certaine valeur k (qui est fonction de la température) :

$$n \times \tau \geq k$$

Dans le cas de la réaction citée, k vaut $10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ pour une température de l'ordre de 200 MK. Cette valeur peut être obtenue avec des plasmas très différents :

- des plasmas de faible densité ($n \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$), mais de durée de vie très longue (en pratique, fonctionnant en continu) ; c'est la voie du *confinement magnétique* ;
- des plasmas de très haute densité ($n \sim 10^{24} \text{ cm}^{-3}$) et de durée de vie très courte ($\sim 10^{-9} \text{ s}$) ; c'est la voie du *confinement inertiel*.

>>>

l'exploitation industrielle de la fusion permettrait donc de résoudre les problèmes liés à notre approvisionnement énergétique.

La fusion « contrôlée » fait l'objet de travaux intenses depuis la Seconde Guerre mondiale. Aucune installation industrielle n'a encore été réalisée ; la difficulté de mettre en œuvre les conditions requises explique la lenteur des progrès. De grands projets sont toutefois en cours, empruntant deux voies différentes.

Les deux voies de la fusion thermonucléaire

La première méthode est la *Fusion par Confinement Magnétique*.

Pour augmenter la durée de la réaction, on confine le plasma dans un champ magnétique. Diverses solutions ont été imaginées, mais les plus prometteuses restent celles où les lignes magnétiques sont des hélices d'axe torique qui, après un grand nombre de tours, engendrent des surfaces magnétiques en forme de tores emboîtés ; ce sont en particulier les « Tokamaks ».

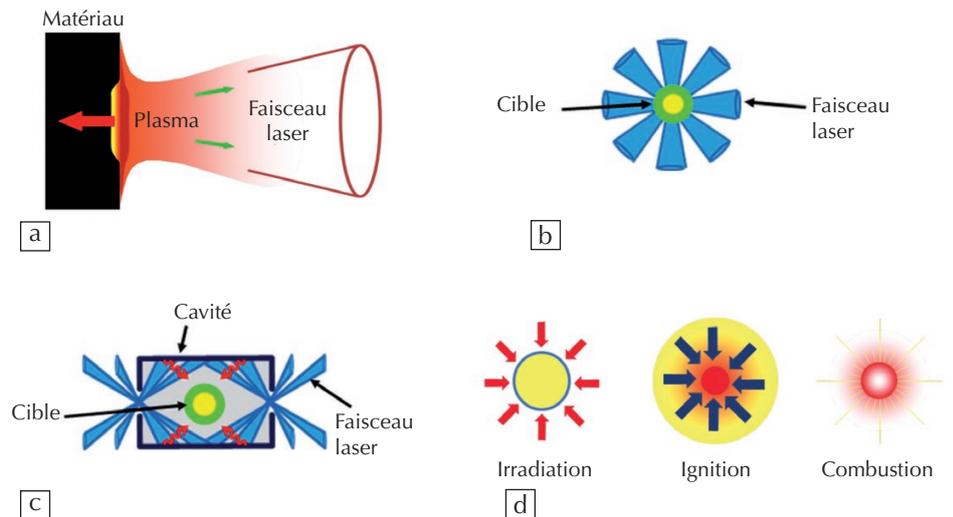
La machine européenne JET (Joint European Torus) est la plus grande, avec le tokamak japonais JT60, des installations de recherche sur la fusion magnétique. Elle est implantée sur le site de Culham, près d'Oxford en Angleterre. En 1997, elle a produit 16 MW de puissance de fusion à partir d'un plasma deutérium-tritium.

La communauté internationale a proposé un projet de très grande envergure, baptisé ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Le site de Cadarache, en France, a été choisi pour la construction de ce réacteur expérimental, dont l'objectif est de parvenir à la maîtrise des mécanismes qui régissent le plasma en régime permanent (dégagement énergétique de 400 à 500 MW pendant quatre cents secondes) [2, 3].

La mise en fonctionnement d'ITER est prévue pour 2019. En 2020, devrait débuter la construction d'une nouvelle machine baptisée DEMO, destinée à mettre au point les procédures d'exploitation industrielle d'un réacteur en régime nominal. Ce n'est qu'au début des années 2050 que la construction d'une première usine de production électrique pourrait débuter.

La seconde méthode est la *Fusion par Confinement Inertiel* [4-7].

L'idée à la base de la Fusion par Confinement Inertiel (FCI) est de faire



1. Principe de la fusion par confinement inertiel par laser. (a) Génération de la surpression. (b) Principe de l'implosion en attaque directe. (c) Principe de l'implosion en attaque indirecte. (d) Principe de l'allumage par point chaud.

imploser une capsule de petite dimension (typiquement ~ 2 mm) contenant un mélange de deutérium et de tritium sous forme cryogénique (en majeure partie solide), en l'irradiant par des faisceaux intenses de rayonnement ou de particules. L'intensité de l'irradiation doit être telle que la densité et la température du mélange comprimé atteignent les valeurs requises par les réactions de fusion, et soient maintenues par inertie le temps que l'énergie thermonucléaire se dégage, avant que la cible se désagrège.

La fusion par confinement inertiel par laser

C'est l'avènement du laser en 1960 qui fit émerger ce concept, car ce rayonnement cohérent est facilement focalisable. Avec des lasers impulsionsnels, on peut atteindre aisément par focalisation du faisceau des densités de puissance très élevées (10^{14} W/cm²).

Le principe de la FCI

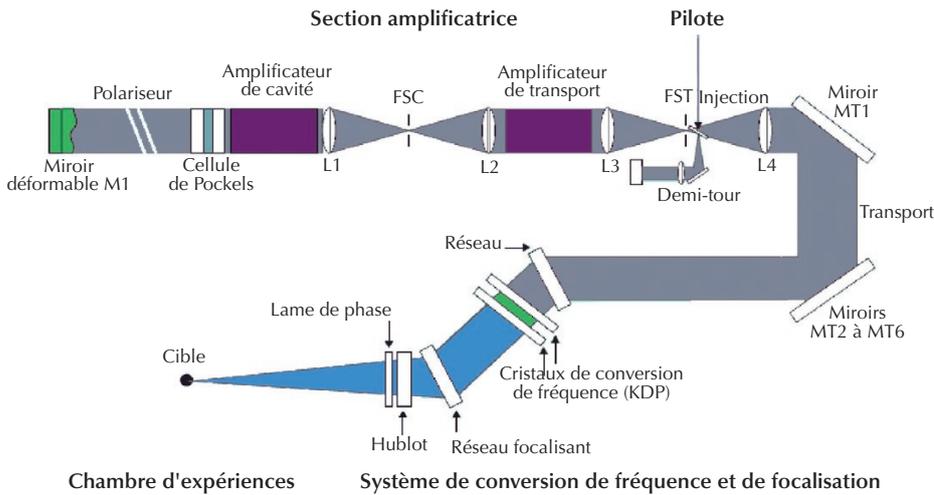
Si l'on irradie un matériau (en noir sur la figure 1a) sous de telles conditions d'éclairage, on crée un plasma (mélange d'ions et d'électrons) dense et de forte température (plusieurs millions de degrés, zone rouge). Sa détente génère une pression très élevée (de l'ordre de plusieurs millions d'atmosphères). Il en résulte une onde de choc (représentée par la zone claire) qui se propage dans le matériau (flèche rouge). Ce mécanisme est similaire à la propulsion d'une fusée par éjection hors

de la tuyère des gaz de combustion. Il peut être exploité pour imploser et comprimer une coquille contenant un mélange fusible. Le principe de l'implosion est illustré sur les figures 1b et 1c.

Dans le schéma dit « en attaque directe », la coquille contenant la cible (de dimension millimétrique) est irradiée par un grand nombre de faisceaux laser dont les impacts sont répartis de sorte que l'interaction soit la plus uniforme possible (fig. 1b).

Dans le schéma en « attaque indirecte », le rayonnement laser est absorbé dans une enceinte renfermant la cible, et converti (par une succession de processus élémentaires d'absorption, de chauffage et de réémission) en un rayonnement X qui réalise l'implosion. La cible est donc immergée dans un conteneur, qui agit comme un « four » émettant un rayonnement dit de « corps noir », auquel on peut associer une température de rayonnement de plusieurs millions de kelvins (fig. 1c). Cette solution est moins intéressante que la précédente sur le plan du transfert d'énergie à la cible, mais assure une meilleure uniformité d'irradiation. C'est l'approche retenue pour l'installation « LMJ » (voir plus loin).

Dans tous les cas, la pression générée entraîne l'implosion de la coquille. Le mélange fusible est porté en son centre à des conditions de densité et de température pour lesquelles la combustion nucléaire se déclenche : ~ 300 g.cm⁻³, ~ 70 MK. Ce mécanisme est nommé « allumage par point chaud » (fig. 1d).



2. Schéma de la structure d'un faisceau LMJ. Le faisceau issu du pilote se propage vers le miroir M1, revient jusqu'au système « demi-tour », qui lui fait faire un nouvel aller-retour dans la section amplificatrice ; il en ressort pour aller vers la section de conversion de fréquence et de focalisation. (Document tiré de la référence [3]).

Quelques difficultés

Atteindre les conditions d'allumage et obtenir la combustion du DT présente des difficultés certaines.

Les travaux théoriques ont montré l'existence d'un seuil (en quantité de DT) à atteindre pour obtenir un gain énergétique (rapport entre l'énergie thermonucléaire dégagée et l'énergie laser déposée sur la cible). Ceci implique une énergie et une puissance minimales du rayonnement laser utilisé pour réaliser l'implosion : il faut disposer de quelques mégajoules délivrés en quelques nanosecondes.

En raison de l'éclairement très élevé auquel on réalise les expériences, des phénomènes non linéaires se développent dans le plasma au cours de l'interaction : ce sont des instabilités qui sont néfastes, car elles s'accompagnent d'une perte d'énergie qui peut être importante, ainsi que de la création d'électrons rapides qui préchauffent le DT, augmentent son entropie et nuisent à la compression.

Des défauts d'éclairement ou de fabrication de la cible pourront induire des instabilités hydrodynamiques qui seront amplifiées, soit pendant la phase d'accélération de la coquille, soit pendant la phase de ralentissement en fin d'implosion, et qui dégraderont l'implosion.

Dans l'optique – lointaine – d'un réacteur, on considère qu'il est nécessaire d'atteindre des gains d'énergie compris entre 30 et 200 pour assurer un fonctionnement satisfaisant au plan économique. L'objectif actuel est de valider le concept en laboratoire dans la prochaine décennie.

Le Laser Mégajoule

C'est depuis les années 60 que la communauté scientifique s'intéresse à la physique de l'interaction entre un rayonnement laser et la matière. On en a maintenant une assez bonne connaissance. Les progrès réalisés un peu partout dans le monde ont incité deux laboratoires, la Direction des applications militaires du CEA en France, et le Lawrence Livermore National Laboratory aux États-Unis, à construire des installations permettant d'atteindre l'allumage et la combustion du DT : le Laser Mégajoule (LMJ) [8-9] et le National Ignition Facility (NIF) [10-11]. En raison d'un accord officiel de collaboration entre le CEA et le DOE (Department of Energy), portant sur la mise au point des technologies nécessaires, les conceptions des deux lasers sont proches. Depuis 1999, leurs constructions se poursuivent en parallèle (celle du NIF étant plus avancée que celle du LMJ).

L'objectif du LMJ est de délivrer 2 MJ en ~ 15 ns. Il a été conçu sur la base du verre dopé au néodyme comme milieu amplificateur, utilisé depuis plus de trente ans au CEA. Pour obtenir les performances visées avec une marge de sécurité raisonnable, deux cent quarante faisceaux laser ont été prévus. Leur section est carrée ; ils sont regroupés en trente chaînes de huit faisceaux.

Le schéma de base des principaux éléments d'un faisceau est présenté sur la figure 2. Il comporte essentiellement trois tronçons.

Un *pilote* génère l'impulsion élémentaire (de longueur d'onde $\lambda = 1\,053$ nm) et fixe toutes les caractéristiques : largeur spectrale, profil temporel, profil spatial de section carrée. Il délivre une énergie ajustable jusqu'à un joule. Un système de miroirs et de lentilles assure le transport jusqu'à la section amplificatrice.

La *section amplificatrice* comporte deux amplificateurs, chacun constitué de neuf modules (plaques laser) en ligne. Ils sont traversés quatre fois par l'impulsion lumineuse, afin d'accroître le rendement d'extraction de l'énergie déposée par les flashes. Un ensemble de miroirs (« demi-tour » + M1) associés à des trous de filtrage (FSC et FST) assure ces allers-retours et la sortie du faisceau lumineux. Un miroir déformable (M1) assure la correction de surface d'onde. Les filtrages spatiaux (trous de faible dimension) ont pour objet de limiter les modulations spatiales. Une cellule de Pockels limite la propagation et l'amplification de la lumière parasite.

Dans chaque chaîne, les huit faisceaux sont regroupés, afin d'utiliser au mieux l'énergie délivrée au verre par les lampes flash. C'est la raison du choix de la section carrée des faisceaux lumineux, alors qu'ils sont traditionnellement de section circulaire. Tous les éléments optiques sont installés dans des structures métalliques qui en assurent le positionnement, tout en maintenant un très haut niveau de propreté.

À la sortie de la section amplificatrice, chaque faisceau lumineux, de dimension transversale $\sim 40 \times 40$ cm², délivre ~ 20 kJ en ~ 15 ns. Une succession de miroirs dirige le faisceau lumineux vers le système de conversion de fréquence et de focalisation dans la chambre d'expérience.

Le *système de conversion de fréquence*, constitué d'un ensemble de deux cristaux de KDP (dihydrogène-phosphate de potassium), convertit la fréquence de la lumière laser en son harmonique 3 ($\lambda = 0,351$ nm) pour les besoins de la physique de l'interaction rayonnement-matière (l'efficacité d'absorption par le plasma est plus grande, et limite le développement d'instabilités paramétriques). À cette longueur d'onde, l'énergie délivrée en ~ 15 ns est de ~ 8 kJ. Enfin, la *focalisation* est réalisée par un réseau de diffraction focalisant. Une lame de phase, qui crée de l'incohérence spatiale, réalise le *lissage* de la tache focale (diamètre caractéristique : ~ 700 μ m).

»»»



3. Photographie aérienne du Laser Mégajoule en construction au CEA-CESTA. © CEA G2I Vertigo

>>>

La conception du LMJ présente de nombreuses innovations, comparées aux schémas classiques (multipassages, regroupement des faisceaux, focalisation par réseau, etc.). Il faut également mentionner l'augmentation de la fluence de sortie des chaînes (densité d'énergie en $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$) par rapport aux limites habituelles de la tenue au flux des matériaux, en particulier pour les éléments optiques travaillant à la fréquence triple du fondamental.

L'énergie totale délivrée au centre de la chambre d'expériences, à la longueur d'onde $\lambda = 0,351 \mu\text{m}$, est de l'ordre de 2 MJ. La chambre en aluminium, de dix mètres de diamètre intérieur, supporte un vide meilleur que 10^{-6} torr. Elle est placée au centre d'une salle, isolée du reste du bâtiment par deux murs de béton d'un mètre d'épaisseur, qui sont destinés à confiner l'émission neutronique (environ 10^{19} neutrons de 14 MeV pour un tir à fort gain). Outre les dispositifs de focalisation et de conversion de fréquence, la chambre reçoit le porte-cible cryogénique (18 K) ainsi que les systèmes d'insertion de diagnostics, dédiés à la qualification de l'interaction rayonnement-matière et aux mesures des performances de l'implosion.

L'ensemble du système laser et de son banc d'énergie (batterie de condensateurs), de la chambre et des diverses servitudes, est intégré dans un bâtiment de 300 m de long, 150 m de large et d'une hauteur maximale de 50 m (fig. 3).

La construction de cette installation a débuté au Centre CEA du CESTA, près de Bordeaux, en 2003. Les premières expériences sont prévues pour fin 2014.

Le LMJ est financé par le ministère de la Défense, dans le cadre du « Programme Simulation » qui fait suite à l'arrêt des essais nucléaires de la France ; l'objectif est la validation des modèles physiques applicables au domaine thermonucléaire. Mais cet objectif coïncide avec l'étape de démonstration d'un programme visant à la production d'énergie à des fins civiles.

Les perspectives

En France, le CEA a décidé de construire en avance de phase par rapport au LMJ un prototype, la Ligne d'Intégration Laser (LIL), dont quatre faisceaux sont opérationnels depuis 2002 [12]. Cette installation a été jusqu'à présent utilisée pour effectuer des travaux destinés à valider le concept des cibles à gain retenu pour le LMJ, et réaliser des expériences de physique des plasmas à haute température, dans le cadre de l'ouverture à des équipes académiques.

Le LMJ et le NIF devraient faire la démonstration de la combustion du DT en laboratoire dans le courant de la décennie. Une fois cette démonstration acquise, la question d'un prototype de réacteur se présentera.

C'est dans cet objectif que le Royaume-Uni a présenté un projet baptisé HiPER (High Power laser Energy Research), susceptible de réaliser la fusion avec une énergie de départ plus faible que celle requise par le principe de l'allumage par point chaud, en mettant en œuvre un processus « d'allumage rapide » nécessitant des faisceaux laser annexes [13] ; sa construction pourrait débuter vers les années 2015.

Quelle que soit la voie choisie, un réacteur à fusion présentera deux attraits fondamentaux : aucun risque d'emballement et absence de déchets radioactifs à vie longue. Par rapport à un réacteur à fusion magnétique, un réacteur à fusion inertielle aura l'avantage d'une construction modulaire intéressante pour la maintenance.

De nombreux projets de réacteurs ont été publiés depuis les années soixante-dix. Leur variété résulte de la possibilité d'associer plusieurs types de chambres aux différents « drivers » (sources d'énergie pour imploser la cible) possibles, d'autres solutions que le laser étant envisageables, par exemple des faisceaux de particules.

Comme pour la voie magnétique, d'importants travaux de recherche et développement sont nécessaires pour disposer des divers composants et, en particulier, des matériaux pour réaliser la chambre. Il est prématuré de proposer une échéance pour la réalisation d'un réacteur de démonstration industrielle qui devrait valider le fonctionnement intégré d'un « driver », de la chambre et du système d'injection des cibles, fonctionnant à une fréquence de quelques hertz. On peut l'espérer pour la seconde moitié du XXI^e siècle. ■

Références

- 1 • *La fusion nucléaire : de la recherche fondamentale à la production d'énergie ?*, Institut de France, Académie des sciences (2007).
- 2 • R. Arnoux et J. Jacquinet, *ITER, Le chemin des étoiles ?* Édisud (2006).
- 3 • Site d'ITER : www.iter.org/fr
- 4 • R. Dautray et J.P. Watteau, *La fusion thermonucléaire inertielle par laser*, Eyrolles (1993).
- 5 • *Energy from inertial fusion*, International Atomic Energy Agency, Vienne (1995).
- 6 • M. Decroisette et al., *L'énergie de fusion inertielle*, Rapport CEA-R-6094 (2005).
- 7 • B. Bigot et al., Topical issue on "Inertial Confinement Science and Applications", *Eur. Phys. J. D* **44** (2007) 203-206.
- 8 • D. Besnard, "The megajoule laser program - ignition at hand", *Eur. Phys. J. D* **44** (2007) 207-213.
- 9 • Site du projet Laser Megajoule : www-lmj.cea.fr
- 10 • E.I. Moses et al., "The national ignition facility : path to ignition in the laboratory", *Eur. Phys. J. D* **44** (2007) 215-218.
- 11 • Site du NIF : <http://lasers.llnl.gov/>
- 12 • « La Ligne d'Intégration Laser », CHOCS - Revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires du CEA, n° 29 (2004).
- 13 • Site du projet HiPER : www.hiper-laser.org