



PRODUCTION D'ENERGIE PAR LA FUSION THERMONUCLEAIRE DANS UN PASMA DE TOKAMAK

Naima Ghoutia SABRI¹, Tayeb BENOUAZ²

¹ Dept. Of genie mechanical, university center of Bechar, B.p417 Bechar 08000, Algeria.

² Dept. Of physics, B.p119 university of Tlemcen 13000, Algeria.

E-mail : sabri_nm@yahoo.fr

I- INTRODUCTION

La fusion thermonucléaire par confinement magnétique à pour objectif la production d'énergie en utilisant des réactions similaires à celles qui produisent l'énergie des étoiles, les réactions de fusion ont lieu dans un milieu de 100 à 200 millions de degrés, appelé plasma.

Un objectif crucial des recherches actuelles est la compréhension et la modélisation des mécanismes de transport de l'énergie et des particules au sein du plasma. Pour réaliser la fusion thermonucléaire contrôlée [1], il faut concentrer les efforts sur la recherche d'une configuration qui permette ces réactions c'est le Tokamak.

II- PRINCIPE DE LA FUSION THERMONUCLEAIRE

La fusion nucléaire constitue le mécanisme à l'origine du rayonnement des étoiles et en particulier du Soleil. En effet, au sein des étoiles, les noyaux légers fusionnent et produisent des noyaux plus lourds[1]. Au cours de cette réaction de fusion, la masse du noyau produit est inférieure à la somme des masses des noyaux légers d'origine. La différence de masse est convertie en énergie d'après l'équation suivante (1) :

$$\Delta E = (m_i - m_f)c^2 \quad (1)$$

Où :

ΔE : L'énergie libérée (eV) ;

m_i : Masses des réactifs (kg)

m_f : Masses des produits de la réaction (kg).

C : célérité de lumière (m/s).

Ou bien la célèbre relation d'Einstein [2],

$$E = m.c^2 \quad (2)$$

La différence est alors convertie en énergie et est à l'origine de la chaleur et de la lumière que nous recevons. Bien que l'énergie libérée par la fusion nucléaire soit considérable, les réactions de fusion ne se produisent pas spontanément, du moins dans les conditions de température et de pression auxquelles nous sommes

habités. Ainsi, la probabilité d'observer une réaction de fusion entre deux noyaux d'hydrogène à la surface de la terre est quasiment nulle. En effet, pour fusionner, les noyaux, qui sont chargés positivement, doivent d'abord vaincre leur tendance naturelle à se repousser. Ceci est possible lorsque la matière est dans des conditions extrêmes comme au cœur du Soleil (pression énorme et température de plusieurs millions de degrés). Les principales réactions de fusion sont:

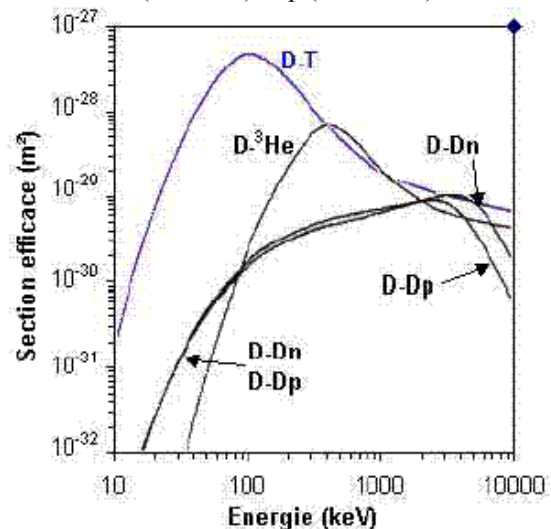
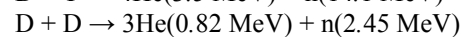


Fig. 1. Section efficace en fonction des différentes réactions de fusion en fonction de l'énergie de deutérium.

Cette figure présente les sections efficaces de différentes réactions de la fusion citées ci-dessus[3]. Parmi celles-ci la réaction D-T (Fig 2) apparaît la plus attrayante puisqu'elle nécessite une moindre énergie entre les réactifs.

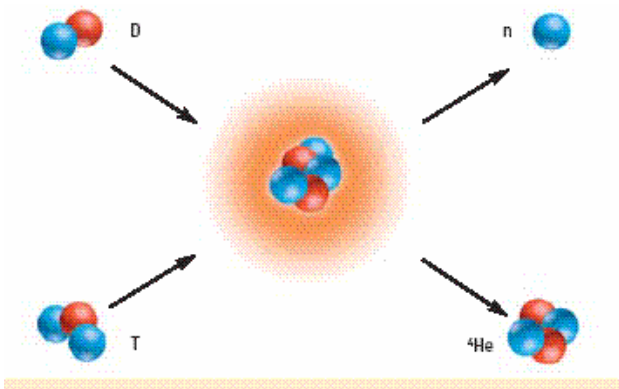


Fig. 2. La réaction de fusion thermonucléaire D-T

La masse du noyau d'hélium est inférieure à celle des deux noyaux dont il est issu, deutérium et tritium. La différence de masse correspond à de la matière qui s'est transformée en énergie selon la relation (2) [2].

Les énergie requises pour une réaction D-T avoisinent les 100KeV^3 .

1. Bilan de Puissance

La puissance de fusion d'un plasma D-T par unité de volume est fonction de la section efficace de la réaction ainsi que des densités volumiques de chacun des réactifs. $\frac{4}{5}$ de cette puissance est portée par les neutrons sous forme d'énergie cinétique, le reste est porté par les particules α .

Comme nous le verrons dans une machine à confinement magnétique les neutrons quittent le plasma tandis que les particules α ; sont confinées par le champ magnétique[3],[4]. Elles vont alors céder leur énergie au milieu et ainsi chauffer le plasma qui reçoit donc une puissance P_α proportionnelle à la puissance de fusion.

Les pertes de toutes origines sont caractérisées un temps de confinement de l'énergie τ_E défini selon

$$P_{\text{perte}} = \frac{W}{\tau_E} \quad (3)$$

Ou

W : désigne l'énergie totale du plasma ;

τ_E : le temps que mette le plasma à se vider de sa chaleur si l'on coupe brutalement la source d'énergie qui l'alimente.

Ainsi si P_{add} la puissance additionnelle appliquée de l'extérieur de plasma pour le chauffer, le bilan énergétique était positif à condition que

$$P_{\text{add}} + P_\alpha \geq P_{\text{pertes}} \quad (4)$$

Si le bilan est nul, les sources sont égales aux pertes et notre plasma ne nous fournit pas d'énergie que nous puissions utiliser.

2. Ignition et critère de Lawson[4],[5]

On définit le facteur d'amplification Q par l'équation (5)

$$Q = \frac{P_{\text{fusion}}}{P_{\text{add}}} \quad (5)$$

Si $Q < 1$, la puissance des réactions de fusion est inférieure à la puissance apportée par les chauffages (additionnelle).

- Si $Q = 1$, la puissance des réactions de fusion est égale à la puissance apportée par les chauffages. Cet état est connu sous le nom de **break even**, c'est le but actuel des recherches. En d'autres termes, le chauffage du plasma est assuré par ses particules α .

- Si $Q > 1$, la puissance des réactions de fusion est supérieure à la puissance apportée par les chauffages. Dans ce cas nous atteindrons l'état d'**ignition** (allumage). La puissance des réactions de fusions compensera seule les pertes. La puissance extérieure n'est plus utile et avons un facteur Q infini. Le plasma est dit « auto-entretenu » et nous aurons notre réacteur de fusion nucléaire.

Dans ces conditions et pour une température de 10KeV le critère de Lawson vérifiant (4) s'écrit

$$n \tau_E = 10^{20} m^{-3} \cdot s \quad (6)$$

Ou n et τ_E sont les densités et le temps de confinement de plasma respectivement.

III- LE CONFINEMENT MAGNETIQUE

Le plasma est un fluide électriquement conducteur, mais neutre globalement, et dans lequel les ions et les électrons se meuvent presque indépendamment les uns des autres. Plongés dans un champ magnétique, ils vont suivre des trajectoires en forme d'hélices qui s'enroulent autour des lignes de champ et y restent "piégés". C'est le principe du confinement magnétique[4].

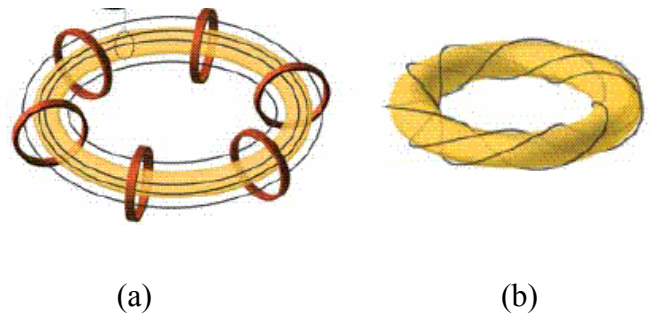


Fig. 3. Principe de confinement magnétique

Le plasma chaud et dense au sein duquel se déroulent les réactions de fusion doit être isolé de l'enceinte le contenant afin d'éviter les impuretés qui peut le refroidir. Donc la figure ci-dessus présente la méthode employée pour piéger les particules du plasma grâce à une configuration magnétique adaptée.

Sachant que les particules chargées s'enroulent autour des lignes le champ donc transversalement au champ magnétique, ces particules sont animées d'un mouvement cyclotronique de pulsation

$$\omega_c = \frac{eB}{m} \quad (7)$$



Ou e la charge électrique des particules ; B le champ magnétique ; m masse de particule.

Leur mouvement le long des lignes de champ reste libre et elles donc peuvent s'évader par les extrémités de la configuration pour cela en refermant la boîte magnétique pour former un tore (a) en appliquant un champ toroïdal. Toutefois ça n'est pas suffisant dans une telle configuration les particules sont animées d'une vitesse de dérive verticale qui laisse fuir le plasma. Pour cela on ajoute un champ magnétique dit poloïdal perpendiculaire au champ toroïdal pour que les lignes de champ doivent être hélicoïdales afin que la dérive soit compensée au cours du mouvement (b).

IV- TOKAMAK

Le Tokamak est un instrument de fusion thermonucléaire d'abord développé en URSS. De grands tokamaks ont été construits et ont fonctionné dans plusieurs pays (France, Japon, Grande Bretagne) et plusieurs nouvelles machines sont en cours de construction. Dans un tokamak[6], comme le montre la figure 5 [4],[3]les particules chargées qui constituent le plasma chaud sont confinées par un champ magnétique à l'intérieur d'un tore. Les forces magnétiques agissant sur les particules en déplacement du plasma empêchent le plasma de toucher les parois de la chambre. Le courant qui génère le champ magnétique est induit dans le plasma lui-même et le chauffe en même temps. Cependant, une réaction thermonucléaire *auto-entretenu* n'a pu encore être obtenue (réaction qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme).

D'après la figure 4, le champ magnétique poloïdal est créé par un courant toroïdal circulant dans le plasma lui-même, qui devient le secondaire d'un transformateur.

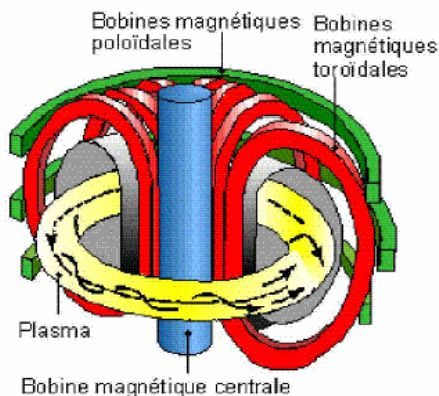


Fig. 4. Configuration du Tokamak

V- PRODUCTION D'ENERGIE ELECTRIQUE

Ce n'est pas la réaction de fusion qui produira directement de l'électricité mais après des étapes qui présentent le principe d'un réacteur[4] schématisé sur la figure 5 :

Le combustible D-T est injecté dans une chambre (1) où par système de confinement et de chauffage, passe à

l'état plasma (2) qui produit des cendres et l'énergie sous forme de rayonnement ou particules chargées(3)[3].

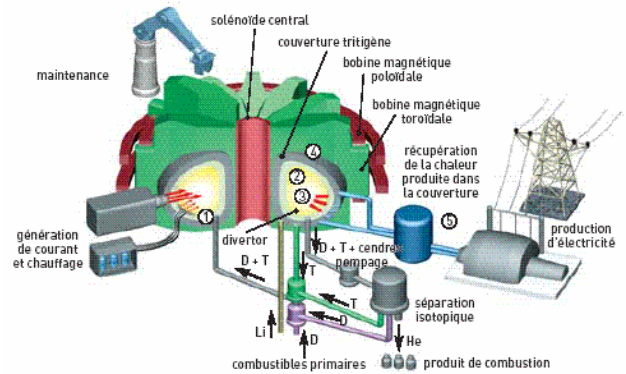


Fig. 5. Schéma de principe d'un réacteur à fusion

L'énergie apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est convertie en chaleur dans la couverture (4) élément situé après la première paroi à l'intérieur de la chambre à vide. Ces éléments sont refroidies par un système d'extraction de la chaleur. Cette chaleur est pour produire la vapeur et alimenter en ensemble turbine et alternateur (5) qui génère finalement l'électricité.

VI- CONCLUSION

Dans le présent article, on conclut que la fusion est conditionnée par le critère de Lawson qui requiert un produit densité- temps de confinement minimal, il présente le Tokamak en tant que dispositif à confinement magnétique le plus prometteur.

A l'heure où les besoins énergétiques d'une population mondiale croissante ne cessent d'augmenter, la recherche de sources d'énergie alternatives s'impose de plus en plus pour satisfaire la demande. C'est dans ce cadre que la fusion thermonucléaire contrôlée apparaît comme étant une solution extrêmement viable à long terme pour la production d'énergie électrique.

Donc à partir de ces réactions la production d'énergie est un enjeu primordial pour l'avenir de l'humanité.

La construction d'un réacteur produisant suffisamment d'énergie environ 500MW est une tâche difficile et coûteuse, ce qui donne naissance à une collaboration internationale du projet ITER entre les Etats unis, le Japon, la Russie et l'Europe qui devrait permettre de cerner les contraintes liées à l'exploitation à grande échelle de l'énergie de fusion. Ce projet consiste en construire une machine « Tokamak » en France, qui devrait constituer le plus grand chantier scientifique de ce siècle.

VII- RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ESCANDE.D.F., « Plasma thermonucléaire confiné magnétiquement ». Laboratoire P2IM, CNRS.Marseille (2004).
- [2] <http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>, « La fusion ». CPEP-Fusion-USA (1997).
- [3] CHATELIER.M et MAGAUD.P., « La fusion par confinement magnétique », Revue CLEPS CEA-N° 49, Printemps (2004).



الملتقى الدولي الثامن حول الفيزياء الطاقوية
8^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique
8th International Meeting on Energetical Physics
Centre Universitaire de Béchar–Algérie, 11 et 12 Novembre 2006



[4] **TRESSET.G**, « Caractérisation, Modélisation et contrôle des scénarios avancés dans le Tokamak JET », Thèse de doctorat, Marseille (2002).

[5] **KEHTARI.S**, « Fusion nucléaire & Tokamak », Présentation PPT, 2003.

[6] **ZABOLOTSKIY.A**, « Particule transport in Tokamak Plasma », Thèse de doctorat, Lausanne (2005).

/