

# ENERGIE SOLAIRE – FUSION NUCLEAIRE

## Comment ça marche ?

Par Michel Grand  
Avril 2013

### Le processus du Soleil :

Il y a maintenant un peu plus d'un siècle, personne ne pouvait expliquer la façon dont le Soleil produit l'énorme quantité d'énergie qu'il libère dans l'espace  
Il fallut attendre la découverte de la radioactivité et l'acceptation de l'incroyable notion que la masse et l'énergie sont interchangeables, selon l'équation  $E=mc^2$ , pour qu'une solution soit en vue.

L'astronome britannique Sir Arthur Eddington, fut le premier à considérer les différentes pièces du puzzle et à imaginer que c'était peut-être la fusion nucléaire, le processus qui crée des éléments plus lourds par fusion des plus légers, qui était responsable de la production d'énergie solaire.

Depuis, nous savons en effet que le Soleil brûle de l'hydrogène, le noyau le plus léger dans l'univers, et le transforme en hélium.

Nous savons même comment :

Il nous faut d'abord identifier trois atomes légers (hydrogène et isotopes de l'hydrogène) :

- L'hydrogène (symbole  ${}^1\text{H}^1$ ) constitué d'un noyau (un proton) et d'un électron (dit périphérique)
- Le deutérium (symbole  ${}^1\text{H}^2$ ) constitué d'un noyau (appelé deuteron ou deuton) comprenant un proton, un neutron) et toujours d'un électron
- L'hélium 3 (symbole  ${}^2\text{H}^3$ ) constitué d'un noyau comprenant deux protons, un neutron et de deux électrons

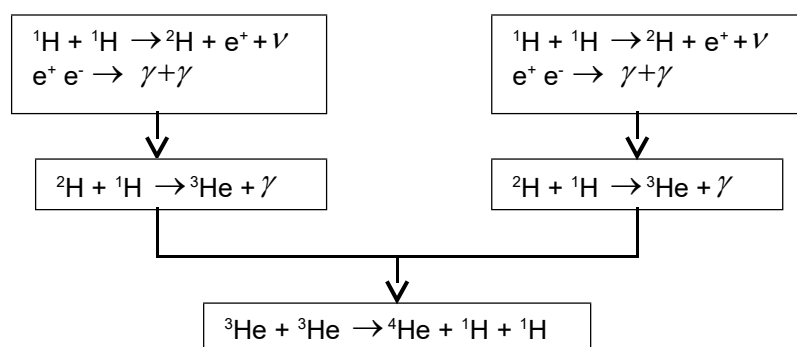
Du fait de la « barrière coulombienne », (*phénomène expliqué dans le dernier chapitre de Pourquoi  $E = mc^2$* ), la réaction nécessite une température considérable ( de l'ordre de quinze millions de kelvins au centre du Soleil) pour obtenir l'énergie cinétique nécessaire

Ainsi au cœur du Soleil (ou ailleurs dans les milliards de milliards d'étoiles qui peuplent l'univers), le cycle commence par la collision de 2 protons ( ${}^1\text{H} + {}^1\text{H}$ ), ce qui donne un assemblage extrêmement instable, (une sorte d'hélium 2 constitué de 2 protons). Du fait de leur charge identique, ils se désintègrent, en principe, en 2 nouveaux protons. Mais parfois, l'un des 2 protons se débarrasse de sa charge électrique pour devenir un neutron et former ainsi un deutérium stable, tout en émettant un anti-électron dit positon de charge ( $e^+$ ) et un neutrino électronique ( $\nu$ ). Le positon rencontre très rapidement un électron libre ( $e^-$ ) et les 2 particules s'annihilent, l'énergie de leur masse se manifestant sous la forme de 2 photons gamma ( $\gamma$ ).

Dès que le deutérium a été produit, il collisionne rapidement avec un autre proton pour former un noyau d'hélium 3 ( ${}^3\text{He}$ ) qui comporte 2 protons et un neutron, en émettant un photon  $\gamma$  de haute énergie.

Si deux de ces noyaux d'hélium 3 se rencontrent, on obtient un nucléon d'hélium 4 stable (appelé aussi particule alpha) constitué de 2 protons et 2 neutrons avec la « restitution » de 2 protons.

Synoptique de la réaction :





assez pour allumer une ampoule électrique. C'est l'énorme taille du Soleil qui fait en sorte que nous avons chaud sur Terre.

Actuellement, le Soleil brûle 600 millions de tonnes d'hydrogène chaque seconde et les transforme en 596 millions de tonnes d'hélium. Où sont passées les quatre millions de tonnes restantes? Elles ont été complètement transformées en énergie. En appliquant  $E=mc^2$  (où  $E$  est l'énergie,  $m$  la masse et  $c$  la vitesse de la lumière), nous trouvons que 4 millions de tonnes de matière égalent 100 000 000 000 000 kilowattheures (100 milliards de milliards) d'énergie, soit environ un million de fois la quantité d'énergie utilisée par le monde entier pendant un an. Et cette énergie est libérée par le Soleil chaque seconde. Impressionnant, non?

Jusqu'à présent, le Soleil a brûlé la moitié de ses réserves d'hydrogène. Il se consume depuis cinq milliards d'années et brûlera encore cinq autres. Et après? La fête sera alors finie. Le Soleil gonflera pour devenir une 'géante rouge', faisant s'évaporer l'atmosphère, l'eau et la vie sur notre planète. Il vaudrait mieux que nous partions bien avant, mais profitons-en tant que ça dure ».

## **Et sur terre, peut-on régler définitivement nos problèmes énergétiques avec la fusion nucléaire ?**

### **Le Tokamak**

Qu'est ce que le Tokamak ? :

Le Tokamak est un instrument de fusion thermonucléaire développé à l'origine dans le milieu du XX<sup>e</sup> siècle en URSS. Plus tard, de grands tokamaks ont été construits et ont fonctionné dans plusieurs pays (France, Japon, Grande Bretagne),.

Dans un tokamak, les particules chargées <sup>+</sup> 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. Il faut savoir cependant, qu'aucune réaction thermonucléaire auto-entretenu n'a pu encore être obtenue (réaction qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme).

En dépit des progrès rapides, des problèmes techniques considérables restent à résoudre et il est probable qu'il faudra attendre 2020 pour voir un réacteur thermonucléaire dans un fonctionnement beaucoup plus long que ceux qui ont été réalisés jusqu'à présent, c'est à dire encore bien loin du stade de production industrielle

Beaucoup d'espoirs ont été mis dans un projet agréé par décret le 9 novembre 2012 pour construire dans la région de Cadarache, un Tokamak capable de produire 500 MW . celui-ci portera le nom de ITER pour International Thermonuclear Experimental Reactor . Ce projet, issu d'une collaboration internationale entre les États-Unis, le Japon, la Russie et l'Europe, devrait permettre de cerner de mieux en mieux les contraintes liées à l'exploitation à grande échelle de l'énergie de fusion.

Fonctionnement d'ITER :

Pour fusionner l'hydrogène, nous avons vu ( *dans le dernier chapitre de  $E = mc^2$* ) que la réaction est très difficile à réaliser, à cause de la barrière coulombienne. Le principe d'ITER consiste à éviter cette réaction, en injectant des atomes de deutérium (1 proton et 1 neutron), et de tritium (1 proton et 2 neutrons). La réaction est la suivante :  $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^5\text{He}$  ; l'atome produit est de l'hélium 5 (2 protons, 3 neutrons). Mais il est très instable. Il se désintègre très vite en hélium 4, en éjectant un neutron :  $^5\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + \text{n}$

Le neutron en question est éjecté violemment, et possède beaucoup d'énergie cinétique. Il vient frapper la paroi, qui absorbe son énergie en se chauffant. Un système de refroidissement transporte cette chaleur vers une chaudière produisant de la vapeur. C'est cette vapeur qui doit produire l'électricité en entraînant une turbine tout à fait classique.

Mais il faut savoir qu'ITER ne produira jamais d'électricité à des fins industrielles. Il sera suivi, s'il donne de bons résultats, (on peut l'espérer) par des modèles d'application.

L'intérêt de ce principe tient dans les caractéristiques suivantes :

- le combustible ne présente aucun danger, c'est l'un des constituants de l'eau ;
- il est présent en faibles quantités dans l'eau de mer, mais le volume des océans nous en assure assez pour des milliards d'années ;
- la réaction est difficile à enclencher, et en cas de panne du réacteur, elle s'arrête spontanément ; aucun risque d'explosion.
- le produit de la réaction est de l'hélium, le gaz le plus inerte qui soit.

### **Conclusion :**

Il serait un peu prématuré de partager l'enthousiasme de ceux qui disent : « avec ITER, la France sera l'Arabie Saoudite de la deuxième moitié du XXI<sup>e</sup> siècle » , car jusqu'aujourd'hui le record de maintien de la réaction n'est que de quelques minutes. D'autre part, avec la technologie actuelle, il faut fournir pratiquement autant d'énergie que le réacteur peut en produire. La route sera sans doute longue, pour autant qu'on y arrive un jour.

### **Petit supplément gratuit : L'effet tunnel**

Nous avons vu que pour vaincre la barrière coulombienne, il fallait atteindre des températures phénoménales. En vérité, ces températures ne sont pas non plus disponibles au cœur du Soleil. La fusion fonctionne grâce à un effet qui appartient au domaine de la physique quantique et que l'on appelle « effet tunnel ».

En physique quantique, on peut dire ( très approximativement) qu' une particule est à la fois une onde et une particule. Dans les cours d'optique ondulatoire, on apprend qu'une onde qui rencontre un dioptre se comporte d'une façon particulière : une partie de l'onde est transmise à travers le dioptre, l'autre partie est réfléchi. Cette particularité est-elle retrouvée dans le comportement d'une particule vu par la physique quantique?

Effectivement! En mécanique classique, si l'énergie cinétique d'une particule est inférieure au potentiel de la barrière coulombienne, la particule ne passe pas. Inutile d'insister ; alors qu' en mécanique quantique, la particule peut « jouer de son comportement » type « onde ». Il est alors possible, avec une probabilité plus ou moins faible, que la particule passe, même si son énergie est plus faible que le potentiel de la barrière. C'est l'analogie de la transmission d'une onde à travers un dioptre et on appelle cela "l'effet tunnel".

Il faut savoir que cette conséquence bizarre de la mécanique quantique et plus précisément de l'équation de Schrödinger, est vérifiée tous les jours! Richard Feynman, (un des plus grands noms de la physique quantique) ne disait-il pas à ses étudiants de première année : « Ne soyez pas effrayés par ce que je vous dis, je n'y comprend rien moi-même »

Une des conséquences nous ramène au sujet développé plus haut. En effet, Gamow a expliqué, en 1928, la radioactivité alpha comme étant la sortie par effet tunnel d'une particule alpha ( $^4\text{He}$ ) d'un noyau lourd. La frontière du noyau forme une barrière de potentiel, que la particule alpha franchit avec une probabilité plus ou moins grande, dépendante du type de noyau. Plus la probabilité est faible, plus la demi-vie du noyau est grande.

# ITER

