



# L'énergie nucléaire : fusion et fission

---

## chap. 6

*JALLU Laurent*

|      |   |    |
|------|---|----|
| I.   | Introduction.....                         | 2  |
| •    | La source d'énergie nucléaire .....       | 2  |
| II.  | Équivalence masse-énergie .....           | 3  |
|      | Bilan de masse de la désintégration ..... | 4  |
|      | Le postulat d'Einstein.....               | 4  |
|      | L'équivalence masse – énergie .....       | 5  |
| III. | Énergie de liaison .....                  | 6  |
|      | L'énergie de liaison par nucléon .....    | 7  |
|      | La courbe d'Aston.....                    | 7  |
| IV.  | Fusion et fission nucléaires .....        | 8  |
| •    | La fusion thermonucléaire.....            | 8  |
|      | Dans les étoiles.....                     | 8  |
|      | Sur Terre.....                            | 10 |
| •    | La fission .....                          | 11 |



## L'énergie nucléaire : fusion et fission



Parmi les pionniers, on retrouve, de gauche à droite, **Bertrand Goldschmidt**, **Lew Kowarski** et **Frédéric Joliot-Curie**.

### I. Introduction

**L**a matière est constituée d'atomes. En **1912**, le physicien anglais **Ernest Rutherford** (qui avait montré que l'atome avait un noyau), et le physicien danois **Niels Bohr** mettent au point un modèle dans lequel **l'atome est constitué d'un noyau de charge positive entouré d'un cortège d'électrons**. En **1913**, **Rutherford** découvre le **proton** et en **1932**, le physicien anglais **Chadwick** le **neutron**.

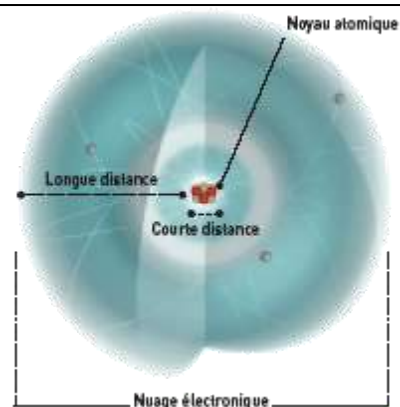
En **1938**, **Hahn** et **Strassmann** découvrent la **fission spontanée** et le physicien français **Frédéric Joliot-Curie**, assisté de **Lew Kowarski** et **Hans Von Halban**, montre, en **1939**, que ce phénomène de cassure des noyaux d'uranium s'accompagne d'un **intense dégagement de chaleur**. La découverte de la réaction en chaîne permettra l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Pendant **la guerre de 1939-1945**, les études sur la fission se sont poursuivies aux États-Unis, avec la participation de physiciens émigrés. Le **projet Manhattan** est lancé, avec pour objectif de doter ce pays d'une **arme nucléaire** (qui a été utilisée à **Hiroshima** et à **Nagasaki** en 1945). Dès la fin de la guerre, les recherches sur l'énergie dégagée par la réaction de fission nucléaire sont poursuivies dans le but d'une utilisation civile. En France, en **1945**, le **CEA** (Commissariat à l'énergie atomique) est créé sous l'impulsion du **général de Gaulle**. Cet organisme public de recherche est chargé de donner à la France la **maîtrise de l'atome** dans les secteurs de la **recherche**, de la **santé**, de **l'énergie**, de **l'industrie**, de la **sûreté** et de la **défense**.

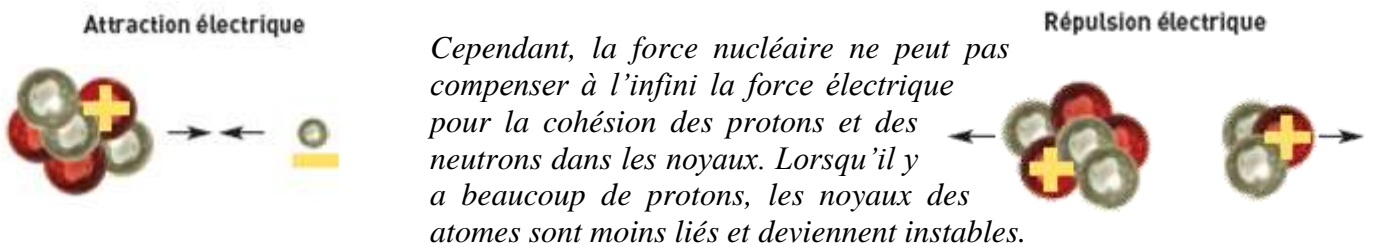
L'énergie nucléaire : fusion et fission : Revue thématique du CEA janvier 2002

- La source d'énergie nucléaire

Le noyau de l'atome est un assemblage de protons et de neutrons concentrés dans un très petit volume et soumis à **deux forces** différentes: « **la force nucléaire forte** » et « **la force électrique** ».



Les protons, tous de même signe, ont tendance à se repousser. Pourtant, **dans le noyau, les protons et les neutrons restent bien associés**. Cette constatation permet de dire que la force nucléaire, qui n'agit qu'à très "courte" distance sur les protons et les neutrons, est plus intense pour ces courtes distances que la force électrique.



Par des techniques très précises, il est possible de mesurer la masse d'un noyau, celle d'un proton isolé ou d'un neutron isolé.

**La masse du noyau est inférieure à la somme des masses de chacun de ses nucléons.**

Qu'est devenue la masse manquante ?

Cette masse ne disparaît pas mais se transforme en énergie. Selon la formule d'Einstein,

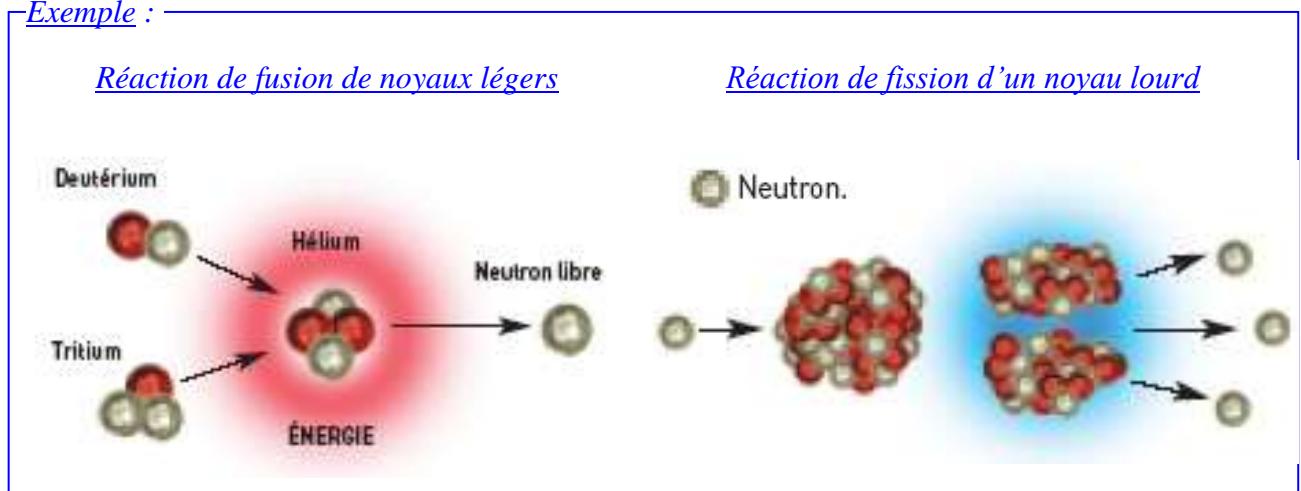
$$E = m.c^2,$$

cette « énergie de liaison » équivalente à la perte de masse sert de ciment pour tenir ensemble les constituants du noyau.

Les atomes les plus liés sont les atomes de masse moyenne. Leur perte de masse est plus grande par nucléon : toutes les transformations de noyaux tendant à produire des noyaux de masse moyenne vont permettre de libérer de l'énergie nucléaire.

**Ces transformations sont appelées réactions nucléaires.**

Exemple :



## II. Équivalence masse-énergie

Exemple de la désintégration  $\alpha$  du radium  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  :





- Le Radon Rn et la particule  $\alpha$  sont émis avec une vitesse ( $\approx 20\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$  pour  ${}^4_2\text{He}$ ) : ils possèdent une énergie cinétique ( $\frac{1}{2}mv^2$ ) !
- Un rayonnement électromagnétique  $\gamma$ , paquet d'énergie ( $E = \frac{h\cdot c}{\lambda}$ ) est émis lors de la désexcitation du fils : très haute énergie puisque la longueur d'onde  $\lambda$  est très petite !

⇒ D'où provient l'énergie ?

☑ Bilan de masse de la désintégration

**Définition :** L'« unité de masse atomique (u) » est en moyenne, la masse d'un nucléon du carbone 12. ( $N_A$  est la constante d'Avogadro  $N_A = 6,02214 \times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$ )

$$1u = \frac{m({}^{12}_6\text{C})}{12} = \frac{M({}^{12}_6\text{C})}{12 \cdot N_A} = 1,66\,054 \times 10^{-27}\text{ kg}$$

D'où bien entendu :

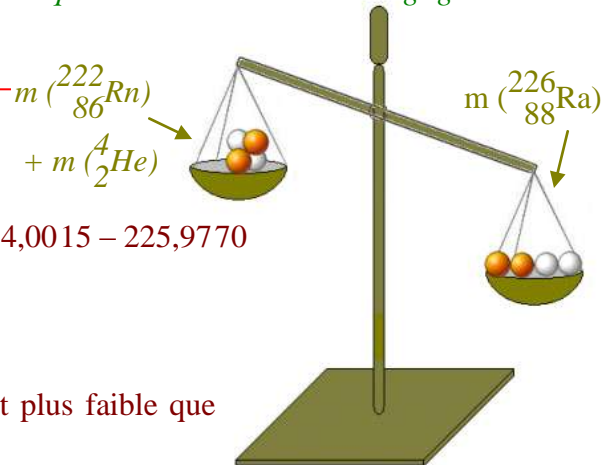
- ☑  $m({}^{12}_6\text{C}) = 12\text{ u}$ , masse d'un atome de carbone 12,
- ☑  $m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 225,9770\text{ u}$ , masse d'un atome de radium,
- ☑  $m({}^{222}_{86}\text{Rn}) = 221,9703\text{ u}$ , masse d'un atome de radon,
- ☑  $m({}^4_2\text{He}) = 4,0015\text{ u}$ , masse d'un atome d'hélium, ...

**(Remarque :** Les électrons  ${}^0_{-1}e$ , sont 1860 fois plus légers que les nucléons et sont négligés dans la masse des atomes).

Il vient alors pour  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma$  :

$$\Delta m = m({}^{222}_{86}\text{Rn}) + m({}^4_2\text{He}) - m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 221,9703 + 4,0015 - 225,9770$$

$$\Delta m = -0,0052\text{ u}.$$



Il y donc au cours de cette réaction nucléaire :

- **perte de masse  $\Delta m$** , la masse des noyaux fils est plus faible que celle du noyau père !
- la perte de masse est de 0,0023 %.  
( $\Delta m / m({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 0,0052 / 225,9770 = 0,000023$ ).
- Cette **perte de masse est à l'origine de l'énergie libérée.**

☑ Le postulat d'Einstein

⇒ 1905 Albert Einstein (25 ans) : Relativité, Espace – temps, équivalence masse – énergie.  
Après l'énergie sous forme de chaleur, de lumière, de vitesse ... voici celle sous forme de masse !

**Postulat** : Un système au repos de masse « m » possède une « énergie de masse ».

$$E = m.c^2. \text{ C'est « l'équivalence masse – énergie ».}$$

Plus précisément, il vaut mieux parler de variation d'énergie  $\Delta E$  d'un système au repos dont la masse varie de  $\Delta m$  :

$$\Delta E = \Delta m.c^2$$

$m^2.s^{-2}$  : carré de la vitesse de la lumière  $c = 2,9979 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .

J ←                      ← kg

Pour  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma$  où  $\Delta m = -0,0052 \text{ u}$  alors :

$$\Delta E = \Delta m.c^2 = -0,0052 \times 1,66054 \times 10^{-27} \times (3,00 \times 10^8)^2 = -777,13 \times 10^{-15} \text{ J par atome de radium } (-4678,3 \times 10^8 \text{ J par mole}).$$

**Définition** : À l'échelle microscopique, on utilise comme unité d'énergie « l'électron volt (eV) » selon la conversion  $1 \text{ eV} = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ J}$ , et ses multiples keV, MeV et GeV.

**(Remarque** :  $[eV] = [Q] \times [U] = [I] \times T \times [U] = [U] \times [I] \times T = [P] \times T = [W]$  il s'agit en effet d'une énergie).

$$\text{Pour } {}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma \text{ où } \Delta E = -777,13 \times 10^{-15} \text{ J} = \frac{-777,13 \times 10^{-15}}{1,6022 \times 10^{-19}}$$

$$\Delta E = -485,04 \times 10^4 \text{ eV} = -4,85 \times 10^6 \text{ eV} = -4,85 \text{ MeV}$$

- Cette énergie libérée, équivalente au défaut de masse lors de la désintégration du radium, est communiquée aux noyaux fils sous forme cinétique ( ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  et  ${}^4_2\text{He}$ ) ainsi que dégagée sous forme de rayonnement électromagnétique de très haute énergie (rayonnement  $\gamma$ ).

### ☑ L'équivalence masse – énergie

Au niveau microscopique, masse et énergie sont confondues. On substitue fréquemment aux masses des particules élémentaires, leurs équivalents énergétiques. On passe des unes aux autres (u en eV), en multipliant la masse par 931,5 MeV :

$$E (1u) = 1,66054 \times 10^{-27} \times (2,9979 \times 10^8)^2 = 14,924 \times 10^{-11} \text{ J}$$

$$E (1u) = \frac{14,924 \times 10^{-11}}{1,6022 \times 10^{-19}}$$

$$E(1u) = 931,5 \text{ MeV}$$

Ainsi :

|                        |       | proton ${}^1_1\text{p}$ | neutron ${}^1_0\text{n}$ | électron ${}^0_{-1}\text{e}$ | Noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$ |
|------------------------|-------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Masse (u)              | 1     | 1,007277                | 1,008665                 | 0,00055                      | 4,001506                         |
| Énergie de masse (MeV) | 931,5 | 938,2785                | 939,5714                 | 0,512325                     | 3727,40                          |

On remarque que proton et neutron sont plus lourds que l'unité de masse !  
Il arrive par ailleurs que la masse soit exprimée en MeV/c<sup>2</sup> : 1 u = 931,5 MeV/c<sup>2</sup>



### III. Énergie de liaison

**Définition :** « L'énergie de liaison  $E_L$  » est l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en ces différents constituants (nucléons).  
Ou encore, l'énergie de liaison correspond à l'énergie que les protons et les neutrons doivent céder pour former un noyau.

*Selon le principe d'équivalence – énergie, le défaut de masse obtenu dans le cas d'un noyau correspond à son énergie de liaison.*

L'énergie de liaison a pour expression générale :

$$E_L = [m_{\text{constituants}} - m_{\text{noyau}}] \cdot c^2 = [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{noyau}}] \cdot c^2$$

*Exemples*

- du radium  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  :

$$E_L ({}^{226}_{88}\text{Ra}) = [88 \times 1,007277 + (226 - 88) \times 1,008665 - 225,9770] \times 931,5$$

$$E_L ({}^{226}_{88}\text{Ra}) = [1,859146] \times 931,5 = 1731,79 \text{ MeV}$$

- du radon  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  :

$$E_L ({}^{222}_{86}\text{Rn}) = [86 \times 1,007277 + (222 - 86) \times 1,008665 - 221,9703] \times 931,5$$

$$E_L ({}^{222}_{86}\text{Rn}) = [1,833962] \times 931,5 = 1708,34 \text{ MeV}$$

- de l'hélium  ${}^4_2\text{He}$  :

$$E_L ({}^4_2\text{He}) = [2 \times 1,007277 + (4 - 2) \times 1,008665 - 4,0015] \times 931,5$$

$$E_L ({}^4_2\text{He}) = [0,030384] \times 931,5 = 28,3027 \text{ MeV.}$$



Application à la désintégration du radium :

Pour  ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He} + \gamma$ ,  $E_{\text{L}}({}^{226}_{88}\text{Ra}) - E_{\text{L}}({}^{222}_{86}\text{Rn}) - E_{\text{L}}({}^4_2\text{He}) = -4,8527 \text{ MeV} = \Delta E$ .

- L'énergie libérée au cours de la désintégration correspond à la perte d'énergie de liaison lors du passage du noyau père aux noyaux fils.
- Comme lors de la formation des atomes à partir des particules séparées, la perte d'énergie correspond à une stabilisation de la matière.

*La formation de l'atome conduit à une organisation stable de la matière.*

Mais comment apprécier la stabilité d'un noyau ?

☑ L'énergie de liaison par nucléon

L'énergie de liaison est désormais rapportée au nombre des nucléons du noyau :  $\frac{E_{\text{L}}}{A}$ .

Exemples

- du radium  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  :

$$\frac{E_{\text{L}}({}^{226}_{88}\text{Ra})}{A} = \frac{1731,79}{226} = 7,6 \text{ MeV/nucléon.}$$

- du radon  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  :

$$\frac{E_{\text{L}}({}^{222}_{86}\text{Rn})}{A} = \frac{1708,34}{222} = 7,7 \text{ MeV/nucléon.}$$

- de l'hélium  ${}^4_2\text{He}$  :

$$\frac{E_{\text{L}}({}^4_2\text{He})}{A} = \frac{28,3027}{4} = 7,08 \text{ MeV/nucléon.}$$

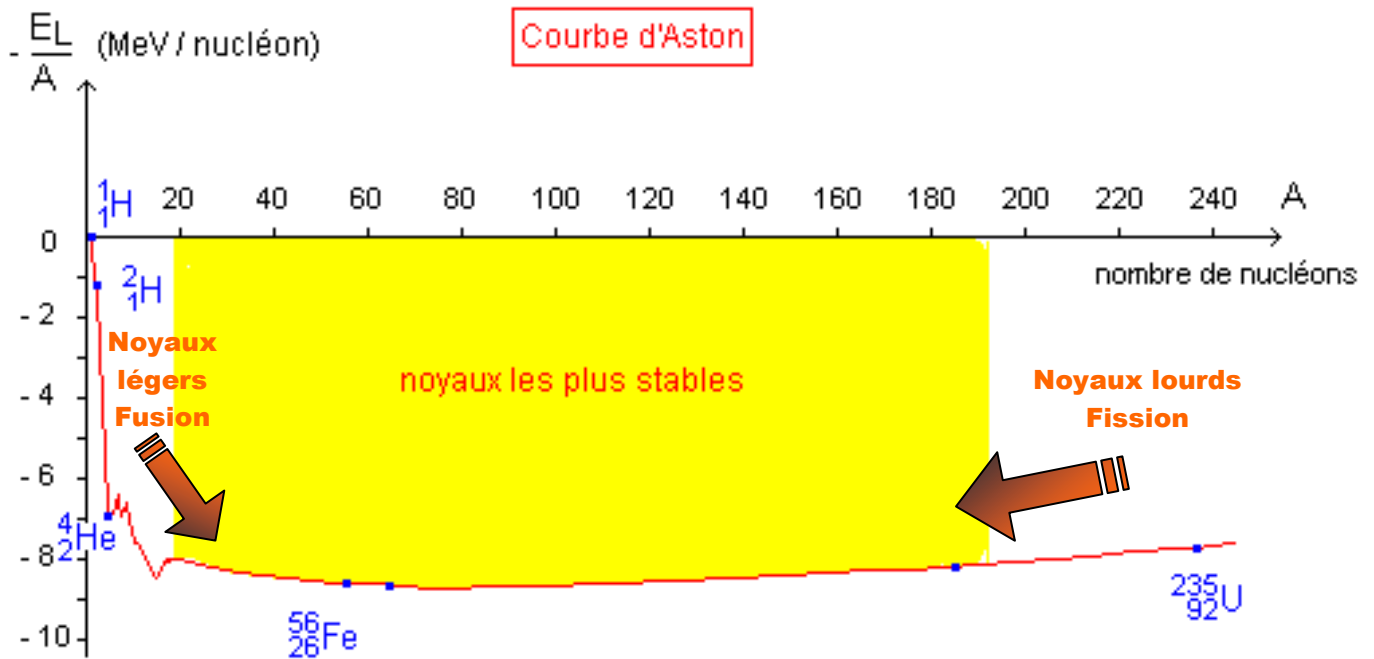
L'énergie de liaison par nucléon «  $\frac{E_{\text{L}}}{A}$  » permet de comparer la stabilité des différents noyaux afin de prévoir la nature d'éventuelles réactions nucléaires. Plus cette énergie est grande et plus le noyau est stable. Elle représente ce « ciment » qui crée la cohésion du noyau de l'atome.

On compare les noyaux à partir de la « courbe d'Aston ».

☑ La courbe d'Aston

Les différents nucléides y figurent par nombre de masse croissant.

En ordonnée, il s'agit de «  $-\frac{E_{\text{L}}}{A}$  » l'opposé de l'énergie de liaison par nucléon pour figurer une « cuvette de la stabilité » vers laquelle tendent les noyaux instables.



- Les noyaux les plus liés sont ceux dont l'énergie de liaison par nucléon est la plus élevée (en valeur absolue). Ils sont situés dans la zone centrale (jaune)
- Le noyau de fer 56 est le plus stable car son énergie de liaison par nucléon est la plus élevée.
- Les noyaux les moins liés sont situés aux extrémités de la courbe d'Aston.
- Les réactions de « **fusion nucléaire** » affecteront les **noyaux les plus légers**.
- Les réactions de « **fission nucléaire** » affecteront les **noyaux les plus lourds**.

#### IV. Fusion et fission nucléaires

- La fusion thermonucléaire

Dans les étoiles







**La fusion est le mariage de noyaux légers qui donne naissance à des noyaux plus lourds** comme l'hélium, par exemple.

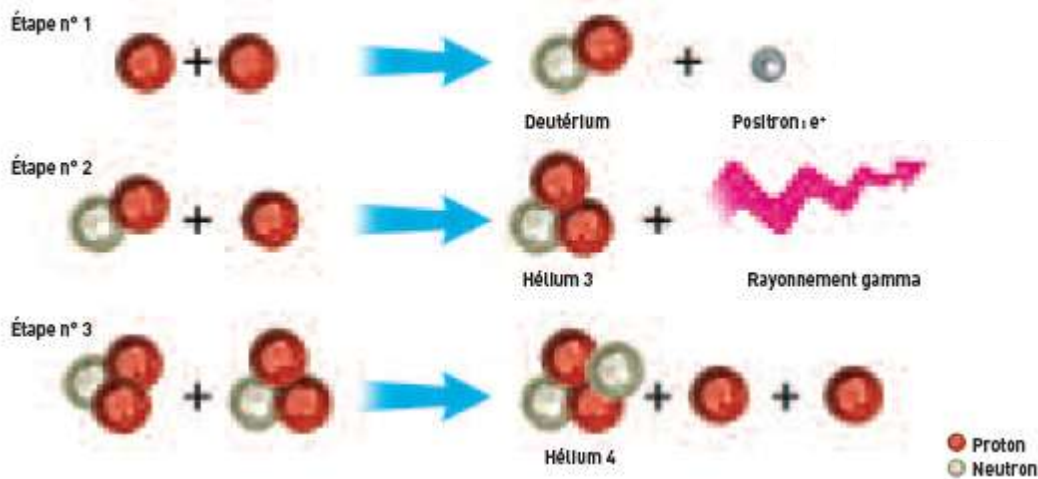
**Elle s'accompagne d'une très forte libération d'énergie.**

Cette réaction est difficile à réaliser car les forces nucléaires qui lient les nucléons n'agissent qu'à très faible distance alors que la force électrique crée une barrière répulsive qui empêche les noyaux des atomes, qui sont chargés positivement, de s'approcher assez près les uns des autres. Pour passer cette barrière, les noyaux doivent se trouver dans un état d'agitation thermique très grand. C'est le cas lorsqu'ils sont portés à très haute température.

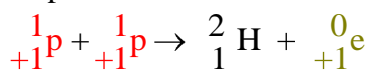
La fusion existe naturellement dans les environnements extrêmement chauds que sont les étoiles comme le Soleil. **Il y a, au cœur du Soleil, une température de l'ordre de plusieurs dizaines de millions de degrés qui permet la fusion de noyaux légers** comme ceux d'hydrogène en hélium. Ces réactions de fusion thermonucléaire libèrent beaucoup d'énergie et expliquent la très haute température de cet astre qui atteint en surface les 5700 °C. Une très petite partie de l'énergie rayonnée par le Soleil atteint la Terre et permet la vie sur celle-ci. Dans des étoiles plus massives que le Soleil, des températures encore plus hautes permettent la fusion de noyaux plus lourds que ceux de l'hydrogène. Ces réactions produisent, entre autres, des noyaux de carbone, d'oxygène et même de fer au cœur des étoiles les plus chaudes.

**L'énergie nucléaire : fusion et fission** : Revue thématique du CEA janvier 2002

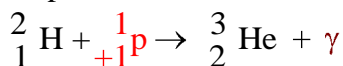
#### Transformation de l'hydrogène en hélium dans le Soleil



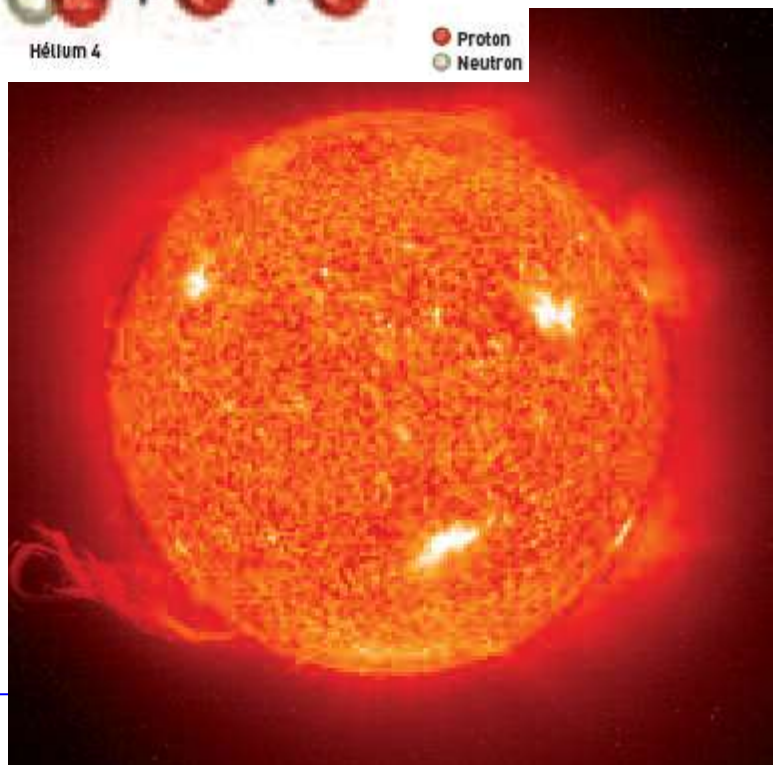
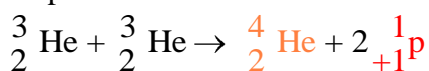
Étape 1 :



Étape 2 :



Étape 3




 Sur Terre

**L'homme cherche à maîtriser les réactions de fusion** pour récupérer cette fabuleuse énergie. Il a réussi à maîtriser celle-ci dans les bombes nucléaires de type H mais pas encore pour produire de l'électricité.

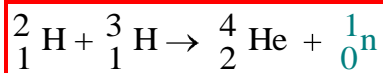
Pour une application civile de la fusion, **la réaction la plus étudiée est la fusion de deux noyaux d'isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium** qui fusionnent pour créer un noyau plus lourd, celui de l'hélium. Pour atteindre des températures très élevées et des densités suffisantes de noyaux et pour augmenter la probabilité qu'ils se rencontrent, l'homme se heurte à de nombreuses difficultés techniques. Deux types d'expériences sont étudiés en laboratoire :

- à faible concentration, le mélange d'isotopes d'hydrogène gazeux (deutérium et tritium) à fusionner peut être renfermé à l'intérieur de parois immatérielles créées par des champs magnétiques. Les noyaux sont portés à plus de 100 millions de degrés dans des machines appelées Tokamak ;
- à forte concentration, le mélange d'isotopes d'hydrogène à fusionner est contenu dans une microbille que l'on irradie très rapidement avec des **faisceaux de lasers très puissants**

**L'énergie nucléaire : fusion et fission** : Revue thématique du CEA janvier 2002



**Projet I.T.E.R.**  
International Thermonuclear  
Experimental Reactor



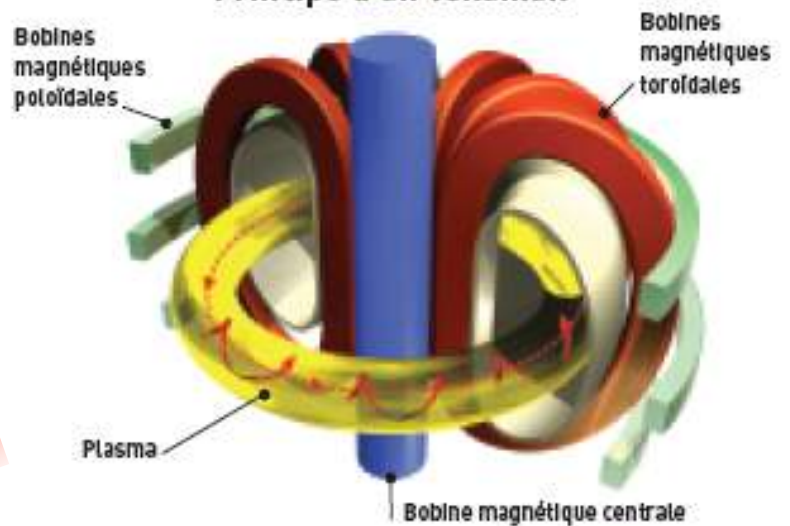
$$\Delta m = -1,889 \times 10^{-2} \text{ u,}$$

$\Delta E = -17,6 \text{ MeV.}$  (4,6 fois celle de la fission de l'uranium 235).

300L d'eau de mer renferment 1 g de Deutérium ; Le Tritium est fabriqué à partir du lithium.

**Non polluante**

### Principe d'un Tokamak



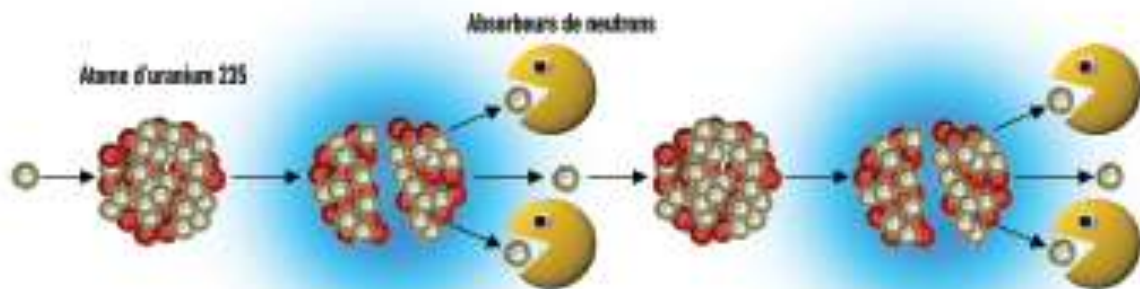
- La fission

**La fission est la rupture d'un gros noyau** (noyau d'uranium 235, par exemple) **qui, sous l'impact d'un neutron, se scinde en deux noyaux plus petits.**

**La fission s'accompagne d'un grand dégagement d'énergie.** Simultanément se produit la libération de deux ou trois neutrons. Les neutrons ainsi libérés peuvent provoquer à leur tour la fission d'autres noyaux et la libération d'autres neutrons, et ainsi de suite... On a une réaction en chaîne puisqu'en induisant une seule fission dans la masse d'uranium, on peut obtenir si on ne contrôle pas les neutrons au moins 2 fissions, qui vont en provoquer 4, puis 8, puis 16, puis 32...

Les deux principales utilisations de la fission sont les **réacteurs nucléaires** et les **bombes nucléaires** de type A. Dans les réacteurs, la réaction en chaîne est stabilisée à un niveau donné, c'est-à-dire qu'une grande partie des neutrons est capturée afin qu'ils ne provoquent pas d'autres fissions. Il suffit seulement qu'un neutron, à chaque fission, provoque une nouvelle fission pour libérer régulièrement de l'énergie. Au contraire, pour la bombe, la réaction en chaîne doit être la plus divergente possible dans le temps le plus court: on favorise sa croissance exponentielle et l'on confine l'énergie le plus longtemps possible. La réalisation d'une bombe nécessite de grandes connaissances technologiques et un matériau fissile très pur.

L'énergie nucléaire : fusion et fission : Revue thématique du CEA janvier 2002



**Déchets radioactifs  
polluants à traiter**

