

## 1 Fusion dans le Soleil

### 1.1 Le Soleil

*Les premiers scientifiques à s'interroger sur l'origine de l'énergie du Soleil furent W. THOMSON (mieux connu sous le nom de Lord KELVIN) et HELMHOLTZ dans les années 1860.*

*Lord KELVIN et HELMHOLTZ connaissaient la masse du Soleil :  $2,0 \times 10^{30}$  kg. Ils calculèrent que si le Soleil était fait du meilleur combustible connu à l'époque, le charbon, la fin du monde était proche.*

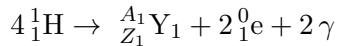
*On ne réussit à sortir de l'impasse qu'en 1905, avec la découverte d'EINSTEIN selon laquelle toute masse est équivalente à une prodigieuse quantité d'énergie.*

*Arthur Stanley EDDINGTON fut le premier, dans un article de 1920, à suggérer que l'énergie des étoiles est d'origine nucléaire.*

*Le constituant principal des étoiles jeunes, notamment le Soleil, est l'hydrogène.*

*Lorsque le coeur de ces étoiles atteint une température de  $10^7$  K, les protons fusionnent. Cette fusion s'effectue selon une série de réactions nucléaires dont on va détailler une étape.*

La première réaction de fusion se produisant dans le Soleil est à l'origine du rayonnement solaire ; elle s'écrit :



1. Dans l'équation de cette fusion, déterminer  $Z_1$  et  $A_1$ , ainsi que le symbole  $Y_1$  de l'élément formé.

2. Calculer la perte de masse  $\Delta m_1$  lors de cette fusion. Toutes les données utiles sont regroupées à la fin du sujet.
3. Déterminer l'énergie libérée  $Q_1$  lors de cette fusion, en MeV.
4. Calculer la masse totale (en u) des réactifs dans cette réaction nucléaire, et en déduire par comparaison avec  $\Delta m_1$  le pourcentage de masse perdue par fusion.
5. En supposant pour simplifier que la totalité de la masse du Soleil  $M_{\text{Soleil}}$  est formée de protons  ${}^1_1\text{H}$ , calculer la masse que pourrait perdre le Soleil si tous fusionnaient.
6. Chaque seconde, le Soleil libère une énergie :

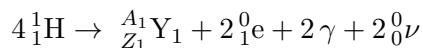
$$Q_{\text{Soleil}} = 3,7 \times 10^{26} \text{ J}$$

En déduire la masse du Soleil perdue par seconde.

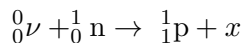
7. L'âge du Soleil est estimé à 4,6 milliards d'années. En supposant que l'énergie libérée est constante depuis sa formation, estimer la masse qu'il a perdue jusqu'à aujourd'hui.
8. Quelle pourcentage de la masse totale du Soleil cette perte de masse représente-t-elle ?
9. Sachant que seulement 10% de la masse du Soleil sont suffisamment chauds pour subir cette réaction, calculer l'espérance de vie du Soleil, en secondes puis en milliards d'années.

## 2 Détection des neutrinos solaires

Il a été découvert récemment que les réactions nucléaires s'accompagnent d'émission de neutrinos  $\nu$ . Ainsi, la réaction précédente s'écrit :

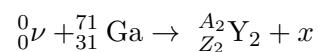


Les neutrinos  $\nu$  formés n'ont pas de charge, et une masse très négligeable, ce qui rends leur détection très ardue. Cette détection se fait selon la réaction élémentaire suivante :



1. Trouver la nature de la particule  $x$  émise.
2. Connaissez-vous un appareil qui puisse détecter la particule  $x$  ?

En pratique, les neutrons utilisés sont ceux d'un bloc de 30 tonnes de gallium ; la réaction de détection est alors :



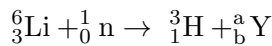
3. Identifier  ${}^{A_2}_{Z_2}\text{Y}_2$ .

### 3 Fusion sur Terre

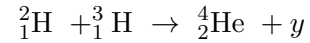
Maîtriser sur Terre la fusion des noyaux légers tels que le deutérium et le tritium à des fins de production d'énergie ouvrirait la voie à des ressources quasiment illimitées. C'est l'objectif des recherches engagées par les grandes nations industrielles et, en particulier, par l'Union Européenne. L'état de développement de ces recherches doit permettre à la communauté scientifique internationale de relever aujourd'hui le défi de la construction du dispositif expérimental devant démontrer la faisabilité scientifique et technologique de l'énergie de fusion : ITER.

La réaction de fusion la plus accessible en pratique est la réaction impliquant le deutérium et le tritium, deux isotopes de l'hydrogène, sur laquelle se concentrent les recherches sur la fusion contrôlée à des fins énergétiques.

Si le deutérium nécessaire peut être extrait de l'eau de mer, le tritium n'existe qu'en très petite quantité dans la nature. Il sera donc produit dans le réacteur, par bombardement neutronique sur le lithium 6 :



1. Écrire l'équation de transformation du lithium 6 ci-dessus, et identifier le noyau Y.
2. De quel type de réaction nucléaire s'agit-il ?
3. La variation d'énergie de masse de cette réaction est de  $-4,78$  MeV. Cette réaction contribue-t-elle à la production d'énergie dans ITER ?
4. L'équation de la réaction de fusion entre le deutérium et le tritium s'écrit :



En utilisant les lois de conservation, identifier la particule  $y$  émise.

5. Calculer la perte de masse  $\Delta m_2$  lors de cette réaction. Toutes les données utiles sont regroupées à la fin du sujet.
6. Déterminer l'énergie libérée  $Q_2$  lors de cette réaction, en MeV. Conclure.

#### Données :

Extrait de la classification périodique :

H hydrogène ( $Z = 1$ ), He hélium ( $Z = 2$ ), Li lithium ( $Z = 3$ )...

Quelques masses :

$$m(e^-) = 0,00055 \text{ u} ; m(\alpha) = 4,00150 \text{ u} ;$$

$$m(p) = 1,00728 \text{ u} ; m(n) = 1,00866 \text{ u} ;$$

$$M_{\text{Soleil}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg.}$$

Nom	Hélium	Hydrogène	Deutérium	Tritium	Positron
Symbole	${}^4_2\text{He}$	${}^1_1\text{H}$	${}^2_1\text{H}$	${}^3_1\text{H}$	${}^0_1\text{e}$
Masse (u)	4,00150	1,00728	2,01355	3,01550	0,00055

$$\text{Unité de masse atomique : } 1 \text{ u} = 1,66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Énergie de l'unité de masse atomique : } 931,494 \text{ MeV.}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\text{Célérité de la lumière dans le vide : } c = 2,998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

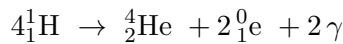
★ ★  
★

## 1 Fusion dans le Soleil

1. Lois de conservation ou lois de Soddy :

$$\begin{cases} 4 \times 1 = A_1 + 2 \times 0 \\ 4 \times 1 = Z_1 + 2 \times 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_1 = 4 \\ Z_1 = 2 \end{cases}$$

L'élément de numéro atomique  $Z_1 = 2$  est l'hélium, de symbole He :



2. Perte de masse :

$$\Delta m_1 = m_{\text{produits}} - m_{\text{réactifs}}$$

$$\Delta m_1 = m({}^4_2\text{He}) + 2m({}^0_1\text{e}) - 4m({}^1_1\text{H})$$

Application numérique :

$$\begin{aligned} \Delta m_1 &= 4,00150 - 2 \times 0,00055 - 4 \times 1,00728 \\ \Delta m_1 &= -0,02652 \text{ u} \end{aligned}$$

3. On en déduit l'énergie dégagée :

$$\begin{aligned} Q_1 &= \Delta m_1 \cdot c^2 \\ Q_1 &= -0,02652 \times 931,494 \\ Q_1 &= -24,71 \text{ MeV} \end{aligned}$$

où l'on a utilisé directement l'équivalent énergétique de l'unité de masse atomique.

4. Masse des réactifs, les quatre protons  ${}^1_1\text{H}$  :

$$m_1 = 4 \times 1,00728 = 4,02912 \text{ u}$$

Pourcentage de masse perdue :

$$\frac{\Delta m_1}{m_1} = \frac{-0,02652}{4,02912} = -0,6582\%$$

5. 0,6582% de la masse des réactifs est perdue ; si la totalité de la masse du Soleil participe à la réaction, sa perte de masse sera :

$$\frac{\Delta m_1}{m_1} M_{\text{Soleil}} = \frac{-0,6582}{100} \times 2 \times 10^{30} = -1 \times 10^{28} \text{ kg}$$

6. Tout d'abord, il faut convertir l'énergie libérée  $Q_1$  en joules :

$$Q_1 = -24,71 \times 1,602 \times 10^{-13} = -3,959 \times 10^{-12} \text{ J}$$

Le Soleil perd  $Q_{\text{Soleil}} = 3,9 \times 10^{26} \text{ J}$  chaque seconde, ce qui correspond à un nombre  $N$  de réactions de fusion tel que :

$$N = \frac{-Q_{\text{Soleil}}}{Q_1} = \frac{-3,9 \times 10^{26}}{-3,959 \times 10^{-12}} = 9,9 \times 10^{37}$$

où on a pris la précaution de rajouter un signe moins à toute énergie perdue par le Soleil, cédée à l'extérieur (convention du banquier ou convention thermodynamique).

Pour calculer la perte de masse, il faut convertir la masse perdue lors d'une réaction en kilogrammes :

$$\begin{aligned} m_1 &= -0,02652 \times 1,66054 \times 10^{-27} \\ m_1 &= -4,404 \times 10^{-29} \text{ kg} \end{aligned}$$

La perte de masse totale par seconde est alors de :

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{Soleil}} &= N \cdot \Delta m_1 \\ \Delta m_{\text{Soleil}} &= 9,9 \times 10^{37} \times (-4,404 \times 10^{-29}) \\ \Delta m_{\text{Soleil}} &= -4,4 \times 10^9 \text{ kg} \end{aligned}$$

7. Convertissons 4,6 milliards d'années en secondes :

$$4,6 \times 10^9 \times 365,25 \times 24 \times 3600 = 1,5 \times 10^{17} \text{ s}$$

On en déduit la perte de masse depuis la création du Soleil :

$$-4,4 \times 10^9 \times 1,5 \times 10^{17} = -6,6 \times 10^{26} \text{ kg}$$

8. La masse du Soleil est actuellement de  $2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$ . La perte de masse représente donc, en pourcentage de la masse actuelle :

$$\frac{-6,6 \times 10^{26}}{2,0 \times 10^{30}} = -0,033\%$$

ce qui ne représente qu'une petite fraction de la masse actuelle.

9. Seulement 10% de la masse totale du Soleil peut participer à la réaction ; par conséquent, le nombre de réactions encore possibles est égal au dixième de la masse du Soleil, divisé par la masse des réactifs. Sans oublier de convertir la masse des réactifs en kilogrammes :

$$\begin{aligned} N_{\text{Soleil}} &= \frac{M_{\text{Soleil}}}{10 \cdot m_1} \\ N_{\text{Soleil}} &= \frac{2 \times 10^{30}}{10 \times 4,02912 \times 1,66054 \times 10^{-27}} \end{aligned}$$

$$N_{\text{Soleil}} = 3 \times 10^{55} \text{ fusions}$$

À raison de  $N = 9,9 \times 10^{37}$  fusions par seconde, il reste donc un temps  $\tau$  égal à :

$$\tau = \frac{N_{\text{Soleil}}}{N} = \frac{3 \times 10^{55}}{9,9 \times 10^{37}} = 3 \times 10^{17} \text{ s}$$

En convertissant en milliards d'années :

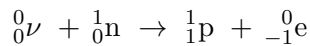
$$\frac{3 \times 10^{17}}{3600 \times 24 \times 365,25 \times 10^9} = 9,5 \text{ milliards d'années}$$

## 2 Détection des neutrinos solaires

1. Lois de conservation ou lois de Soddy :

$$\begin{cases} 0 + 1 = 1 + A \\ 0 + 0 = 1 + Z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 0 \\ Z = -1 \end{cases}$$

La particule de charge négative et sans nucléons est l'électron  ${}_{-1}^0\text{e}$  :

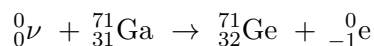


2. Une simple plaque de métal, conductrice du courant, reliée à une borne d'un voltmètre, quand l'autre borne est reliée à la terre, permet de détecter (et stopper) le passage d'électrons.

3. Lois de conservation ou lois de Soddy :

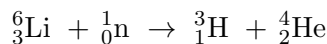
$$\begin{cases} 0 + 71 = A_2 + 0 \\ 0 + 31 = Z_2 - 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A_2 = 71 \\ Z_2 = 32 \end{cases}$$

L'élément fils obtenu est le germanium, de symbole Ge (classification périodique indispensable, qui vous sera gracieusement fournie lors du DS) :



## 3 Fusion sur Terre

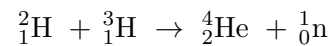
1. Par conservation du numéro atomique et du nombre de charges :



2. Il s'agit d'une réaction de capture d'un neutron, avec émission d'une particule  $\alpha$  (le noyau d'hélium-4). Comme, d'un gros noyau, on fait deux petits, cette réaction est donc une fission.

3.  $\Delta E < 0$  donc la réaction participe à la production d'énergie dans ITER : de l'énergie est perdue par le système, donc libérée et acquise par le milieu extérieur (la forme de la question appelle la réponse inverse, mais il faut rester cohérent sur l'ensemble de votre copie).

4. Équation de la réaction :



Formation de l'isotope 4 de l'hélium.

5. Variation de masse :

$$\Delta m_2 = m_{\text{He}} + m_{\text{n}} - m_{\text{D}} - m_{\text{T}}$$

Application numérique :

$$\begin{aligned} \Delta m_2 &= 4,0151 + 1,00866 - 3,01550 - 2,01355 \\ \Delta m_2 &= -0,01888 \text{ u} \end{aligned}$$

6. Variation d'énergie de masse :

$$Q_2 = \Delta m_2 \cdot c^2$$

En utilisant l'énergie de l'unité de masse atomique :

$$Q_2 = -0,01818 \times 931,494 = -17,59 \text{ MeV}$$

$Q_2 < 0$  donc l'énergie est perdue par le système considéré. Donc il s'agit d'une énergie libérée.

★ ★  
★

**Grille DM5 2011**

- $4_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2_1^0\text{e} + 2\gamma$
- $\Delta m_1 = -0,02652 \text{ u}$
- $Q_1 = -24,71 \text{ MeV}$
- $\Delta m_1/m_1 = -0,6582\%$
- Masse totale perdue de  $-1 \times 10^{28} \text{ kg}$
- $N = 9,9 \times 10^{37}$  fusions par seconde
- Masse perdue par seconde  $\Delta m_{\text{Soleil}} = -4,4 \times 10^9 \text{ kg}$
- Masse perdue jusqu'à aujourd'hui  $-6,6 \times 10^{26} \text{ kg}$
- Pourcentage de masse perdue  $-0,033\%$
- $\tau = 3 \times 10^{17} \text{ s} = 9,5$  milliards d'années
- $x$  : un électron
- Détection : métal + voltmètre
- ${}_{32}^{71}\text{Ge}$
- $Y$  : particule  $\alpha$  (hélium 4)
- Fission
- $Q < 0$  donc oui
- $y$  : un neutron
- $\Delta m_2 = -0,01888 \text{ u}$
- $Q_2 = -17,59 \text{ MeV}$
- $Q_2 < 0$  donc oui

Note

.../20

**Grille DM5 2011**

- $4_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2_1^0\text{e} + 2\gamma$
- $\Delta m_1 = -0,02652 \text{ u}$
- $Q_1 = -24,71 \text{ MeV}$
- $\Delta m_1/m_1 = -0,6582\%$
- Masse totale perdue de  $-1 \times 10^{28} \text{ kg}$
- $N = 9,9 \times 10^{37}$  fusions par seconde
- Masse perdue par seconde  $\Delta m_{\text{Soleil}} = -4,4 \times 10^9 \text{ kg}$
- Masse perdue jusqu'à aujourd'hui  $-6,6 \times 10^{26} \text{ kg}$
- Pourcentage de masse perdue  $-0,033\%$
- $\tau = 3 \times 10^{17} \text{ s} = 9,5$  milliards d'années
- $x$  : un électron
- Détection : métal + voltmètre
- ${}_{32}^{71}\text{Ge}$
- $Y$  : particule  $\alpha$  (hélium 4)
- Fission
- $Q < 0$  donc oui
- $y$  : un neutron
- $\Delta m_2 = -0,01888 \text{ u}$
- $Q_2 = -17,59 \text{ MeV}$
- $Q_2 < 0$  donc oui

Note

.../20

**Grille DM5 2011**

- $4_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2_1^0\text{e} + 2\gamma$
- $\Delta m_1 = -0,02652 \text{ u}$
- $Q_1 = -24,71 \text{ MeV}$
- $\Delta m_1/m_1 = -0,6582\%$
- Masse totale perdue de  $-1 \times 10^{28} \text{ kg}$
- $N = 9,9 \times 10^{37}$  fusions par seconde
- Masse perdue par seconde  $\Delta m_{\text{Soleil}} = -4,4 \times 10^9 \text{ kg}$
- Masse perdue jusqu'à aujourd'hui  $-6,6 \times 10^{26} \text{ kg}$
- Pourcentage de masse perdue  $-0,033\%$
- $\tau = 3 \times 10^{17} \text{ s} = 9,5$  milliards d'années
- $x$  : un électron
- Détection : métal + voltmètre
- ${}_{32}^{71}\text{Ge}$
- $Y$  : particule  $\alpha$  (hélium 4)
- Fission
- $Q < 0$  donc oui
- $y$  : un neutron
- $\Delta m_2 = -0,01888 \text{ u}$
- $Q_2 = -17,59 \text{ MeV}$
- $Q_2 < 0$  donc oui

Note

.../20

**Grille DM5 2011**

- $4_1^1\text{H} \rightarrow {}_2^4\text{He} + 2_1^0\text{e} + 2\gamma$
- $\Delta m_1 = -0,02652 \text{ u}$
- $Q_1 = -24,71 \text{ MeV}$
- $\Delta m_1/m_1 = -0,6582\%$
- Masse totale perdue de  $-1 \times 10^{28} \text{ kg}$
- $N = 9,9 \times 10^{37}$  fusions par seconde
- Masse perdue par seconde  $\Delta m_{\text{Soleil}} = -4,4 \times 10^9 \text{ kg}$
- Masse perdue jusqu'à aujourd'hui  $-6,6 \times 10^{26} \text{ kg}$
- Pourcentage de masse perdue  $-0,033\%$
- $\tau = 3 \times 10^{17} \text{ s} = 9,5$  milliards d'années
- $x$  : un électron
- Détection : métal + voltmètre
- ${}_{32}^{71}\text{Ge}$
- $Y$  : particule  $\alpha$  (hélium 4)
- Fission
- $Q < 0$  donc oui
- $y$  : un neutron
- $\Delta m_2 = -0,01888 \text{ u}$
- $Q_2 = -17,59 \text{ MeV}$
- $Q_2 < 0$  donc oui

Note

.../20