

TD 16 - Reproduire l'énergie du Soleil corrigé

L'objectif du projet ITER est de reproduire, à l'échelle des centrales nucléaires, une énergie semblable à celle créée naturellement au cœur du Soleil.

Étude de documents

Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), qui rassemble de nombreux scientifiques à travers le monde, a pour objectif de reproduire les réactions de fusion se déroulant au cœur du Soleil, afin de remplacer la fission de l'uranium dans les centrales nucléaires.

A. La fusion nucléaire

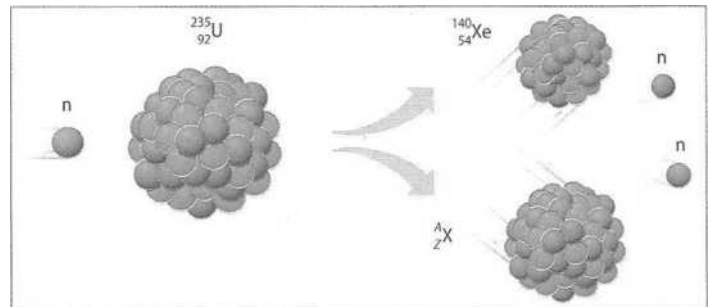
La fusion nucléaire est l'union de deux noyaux légers pour former un noyau plus lourd. Par exemple, un noyau de deutérium (isotope de l'hydrogène de représentation symbolique ${}^2_1\text{H}$) et de tritium isotope de l'hydrogène de représentation symbolique ${}^3_1\text{H}$) peuvent fusionner pour donner un noyau d'hélium, de représentation symbolique ${}^4_2\text{He}$, et un neutron ${}^1_0\text{n}$.

Cette transformation nucléaire s'accompagne d'une perte de masse Δm (en kg), donc d'une libération d'énergie ΔE (en J), selon l'équivalence masse-énergie : $E_{\text{libérée}} = |\Delta E| = |\Delta m|.c^2$

B. La fission nucléaire

Lorsqu'un noyau lourd se scinde pour former deux noyaux plus légers, on parle de fission nucléaire.

Dans le cas de l'uranium 235 (${}^{235}_{92}\text{U}$), utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires, le noyau se scinde en deux autres noyaux sous l'impact d'un neutron : un noyau de xénon (${}^{140}_{54}\text{Xe}$) et un autre noyau, en émettant deux neutrons (Fig. 1).

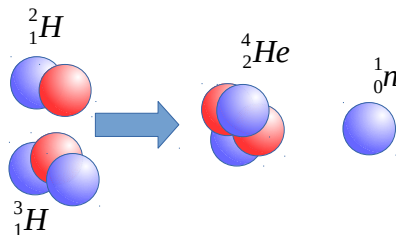


Schématisme de la fission.

Pistes de réflexion

A. La fusion nucléaire

1) a. En utilisant les représentations schématisées du proton (●) et du neutron (●), schématiser la fusion des noyaux de deutérium et de tritium.



b. Qu'est-ce qui reste inchangé, et donc se conserve, lors de cette transformation nucléaire ?

Lors de cette transformation, ce qui reste inchangé sont les nombres Z et A totaux

2) a. Calculer la masse des « produits » de la fusion.

$$M({}^4_2\text{He}) + m({}^1_0\text{n}) = 6,645 \times 10^{-27} \text{ kg} + 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg} = 8,32 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

b. Calculer la masse des « réactifs » de la fusion.

$$m({}^2_1\text{H}) + m({}^3_1\text{H}) = 3,344 \times 10^{-27} \text{ kg} + 5,007 \times 10^{-27} \text{ kg} = 8,351 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

c. Calculer la variation de masse lors de la fusion.

$$\Delta m = 8,351 \times 10^{-27} \text{ kg} - 8,32 \times 10^{-27} \text{ kg} = 0,031 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

3) En utilisant l'équivalence masse-énergie, déterminer l'énergie libérée par la fusion, en J puis en eV.

$$|\Delta E| = |\Delta m|.c^2 = 0,031 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 2,79 \times 10^{-12} \text{ J} = 17,4 \text{ MeV}$$

4) a. Quelle est la charge des deux noyaux qui fusionnent ?

Les noyaux ne contiennent que des neutrons (neutres électriquement) et des protons (positif), leur charge est donc positive.

b. La fusion nécessite un apport d'énergie pour rapprocher les noyaux. Pourquoi ?

Les noyaux ayant des charges de même signe, ils se repoussent : il faut donc apporter de l'énergie sous la forme d'une force pour les rapprocher.

Données : 1 eV = $1,602 \times 10^{-19}$ J ; $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹

$$m({}^2_1\text{H}) = 3,344 \times 10^{-27} \text{ kg} ; m({}^3_1\text{H}) = 5,007 \times 10^{-27} \text{ kg} ;$$

$$m({}_2^4\text{He}) = 6,645 \times 10^{-27} \text{ kg} ; m_{\text{neutron}} = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

B. La fission nucléaire

On peut représenter la fission de l'uranium 235 par une équation ${}_0^1n + {}_{92}^{235}\text{U} \rightarrow {}_{54}^{140}\text{Xe} + {}_Z^A\text{X} + 2{}_0^1n$.

5) En utilisant les lois de conservation mises en évidence à la question 1) b., identifier le second noyau formé ${}_Z^A\text{X}$.

$$\text{Conservation de Z : } 0 + 92 = 54 + Z + 0 \Rightarrow Z = 92 - 54 = 38$$

$$\text{Conservation de A : } 1 + 235 = 140 + A + 2 \times 1 \Rightarrow A = 235 + 1 - 140 - 2 \times 1 = 94$$

X est donc un noyau de strontium ${}_{38}^{94}\text{Sr}$

6) À l'aide des données, calculer la variation de masse lors de la fission.

On fait comme aux questions 2) a.b.c.

$$\text{Masse réactifs : } m({}_0^1n) + m({}_{92}^{235}\text{U}) = 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg} + 390,220 \times 10^{-27} \text{ kg} = 391,895 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

$$\begin{aligned} \text{Masse produits : } m({}_{54}^{140}\text{Xe}) + m({}_Z^A\text{X}) + 2 \times m({}_0^1n) &= 232,298 \times 10^{-27} \text{ kg} + 155,917 \times 10^{-27} \text{ kg} + 2 \times 1,675 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ &= 391,565 \times 10^{-27} \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{La variation de masse } \Delta m = | \text{Masse réactifs} - \text{Masse produits} | = 0,33 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

7) À partir de l'équivalence masse-énergie, déterminer l'énergie libérée lors par la fission, en J puis en eV.

$$|\Delta E| = |\Delta m| \cdot c^2 = 0,33 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 2,97 \times 10^{-11} \text{ J} = 185 \text{ MeV}$$

$$\text{Données : } m({}_{92}^{235}\text{U}) = 390,220 \times 10^{-27} \text{ kg} ; m({}_{54}^{140}\text{Xe}) = 232,298 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

$$\text{Masse du noyau formé : } m({}_Z^A\text{X}) = 155,917 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

Pour conclure

8) Déterminer l'énergie libérée par nucléon lors de la réaction de fission et de la réaction de fusion. Comparer ces valeurs, puis conclure.

$$E_{\text{lib/nucléons}} = \frac{E_{\text{lib}}}{A_{\text{total}}}$$

$$\text{Fusion : } E_{\text{lib/nucléons}} = \frac{E_{\text{lib}}}{A_{\text{total}}} = \frac{17,4 \text{ MeV}}{5} = 3,48 \text{ MeV} \cdot \text{nucléon}^{-1}$$

$$\text{Fission : } E_{\text{lib/nucléons}} = \frac{E_{\text{lib}}}{A_{\text{total}}} = \frac{185 \text{ MeV}}{236} = 0,78 \text{ MeV} \cdot \text{nucléon}^{-1}$$

On constate que l'énergie libérée par nucléon (et donc par quantité de produit) est nettement supérieure dans le cas de la fusion que pour la fission.

9) (B2i) En effectuant éventuellement une recherche sur Internet, donner au moins un avantage et un inconvénient de l'utilisation de la fusion nucléaire pour la production d'électricité dans les centrales nucléaires, comme le projet international ITER souhaite le développer.

La raison pour laquelle la fusion est vue comme une méthode de "production" d'énergie idéale tient à plusieurs facteurs :

- un rendement beaucoup plus grand pour une même quantité de produits
- une disponibilité des réactifs quasi illimitée : le deutérium et le tritium sont disponibles dans l'eau
- il n'y a pas de déchets radioactifs à stocker pendant des millénaires

Mais si aucun réacteur à fusion n'existe, c'est pour une bonne raison : comme on a vu à la question 4), les noyaux se repoussent naturellement, il faut donc des conditions extrêmes pour les rapprocher : dans la nature seules les conditions de température et surtout de pression atteintes au cœur des étoiles le permettent.

Sur Terre, nous n'avons pas à disposition de matériau capable de supporter ces conditions extrêmes : il faut donc confiner les réactifs dans des champs magnétiques extrêmement puissants pour éviter qu'ils n'entrent en contact avec les parois du réacteur qu'ils détruiraient rapidement.

Or ces champs magnétiques consomment presque autant d'énergie que celle libérée par les réaction de fusion, sans compter les neutrons produits qui eux ne sont pas influencés par les champs magnétiques et qui s'échappent donc de l'enceinte...

Le projet ITER vise donc à essayer de surmonter ces problèmes. Il est actuellement en compétition avec un autre projet : le stellarator Wendelstein qui essaie de surmonter les mêmes problèmes, mais par une approche différente (plus prometteuse?)

Voir l'article sur Futura-sciences : <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/fusion-fusion-controllee-stellarator-wendelstein-7-x-demarre-avant-iter-60824/>