

LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES DANS LES ÉTOILES

Lucien Ransinangue

Objectif Comprendre la notion d'isotope. Différencier une réaction nucléaire d'une réaction physique ou chimique. Apprendre l'écriture symbolique d'une réaction de fusion. Se familiariser avec la notion d'énergie libérée dans une réaction de fusion nucléaire. Appréhender les différentes notions dans le cadre de l'étude sur le Soleil.

2^{de} Physique-Chimie **Constitution et transformation de la matière**

Thème 1 • Modélisation des transformations de la matière et transfert d'énergie.

Partie C • Transformations nucléaires.

Notions et contenus Isotopes.
Écriture symbolique d'une réaction nucléaire.
Aspects énergétiques des transformations nucléaires :
Soleil, centrales nucléaires.

Compétences mobilisées S'approprier **APP**
Analyser / Raisonner **ANA/RAI**
Réaliser **REA**
Valider **VAL**

VIE ET MORT DU SOLEIL

Le Soleil, formidable boule d'énergie, nous transmet la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur notre planète.

Comment notre étoile fait-elle pour fonctionner et produire son énergie ? Comment le Soleil évoluera-t-il dans le futur ? Et pourquoi devons-nous notre existence aux étoiles en général ?

En répondant à ces différentes questions, nous nous familiariserons avec des réactions capables de libérer une importante quantité d'énergie : les réactions nucléaires.



Le Soleil et la terre dont la distance varie au cours de l'année. © Johan Kieken

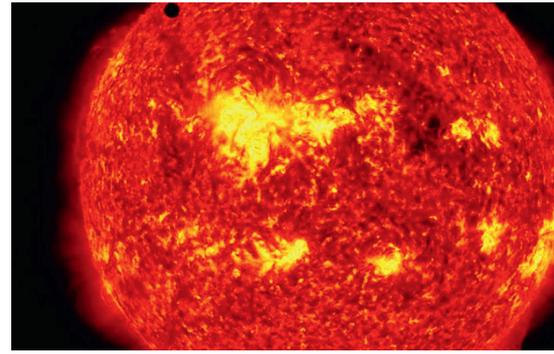
Partie A : LA VIE DU SOLEIL

Le Soleil est apparu il y a 4,6 milliards d'années. Il est depuis stable de par sa taille et l'énergie qu'il délivre.

Les réactions qui ont lieu au cœur du Soleil ne sont ni physiques ni chimiques mais nucléaires.

Qu'est ce qui a permis la naissance du Soleil ?

Qu'est-ce qu'une réaction nucléaire ?



Le Soleil. © Nasa

Document 1 : Naissance du Soleil

En s'effondrant sous l'action de la gravité, une nébuleuse (un amas de gaz) s'échauffe pour atteindre 10 millions de degrés.

Ce gaz est essentiellement constitué d'hydrogène. À cette température extrême, des réactions nucléaires permettent de modifier les noyaux d'hydrogène. Plus précisément, les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former des noyaux d'hélium.

Cette fusion nucléaire est à l'origine de l'énergie fournie par le Soleil.

Document 2 : Différents types de transformations

Lors d'une transformation physique, il y a conservation des espèces chimiques et modification de l'état physique (solide, liquide, gazeux).

Lors d'une transformation chimique, il y a conservation des éléments chimiques et modification des espèces chimiques.

1 **APP** Quel phénomène physique permet l'obtention d'une température nécessaire aux réactions nucléaires ?

.....

2 **APP** Sur l'exemple de la fusion de l'hydrogène, proposez une définition générale de la notion de réaction nucléaire.

.....

3 **ANA/RAI** Les éléments de l'hydrogène et de l'hélium ont des numéros atomiques différents. En quoi la fusion nucléaire n'est-elle ni une réaction physique ni une réaction chimique ?

.....

.....

Document 3 : Création d'isotopes



Vidéo « La fusion au cœur des étoiles »

<https://www.mediachimie.org/ressource/la-fusion-au-cœur-des-étoiles>


Au cœur du Soleil et de toutes les étoiles, se forment, par l'intermédiaire des réactions nucléaires, des isotopes de différents éléments chimiques.

Que sont des isotopes ?

- 4 **APP** Combien y a-t-il de protons et de neutrons dans les noyaux du proton hydrogène et du deutérium ?

.....

.....

.....

- 5 **APP** L'étoile fabrique deux noyaux d'hélium. Donnez pour chacun d'entre eux le nombre de protons et de neutrons qu'ils contiennent.

.....

.....

.....

- 6 **ANA/RAI** Sur le modèle A_ZX , symbolisez les quatre noyaux étudiés précédemment.

.....

.....

- 7 **ANA/RAI** Le proton hydrogène et le deutérium (appelé aussi hydrogène lourd) sont des isotopes. Les atomes d'hélium -3 et d'hélium -4 sont également des isotopes.

En vous aidant de la question précédente, proposez une définition de la notion d'« atomes isotopes ».

.....

.....

.....

La fusion nucléaire est le « moteur » des étoiles.

Qu'est-ce que la fusion nucléaire et comment peut-on symboliser sa réaction ?

Document 4 : La fusion dans les étoiles et sur Terre

Dans des conditions de température extrême (des millions de degrés Celsius), la matière se présente sous forme de plasma : ni solide, ni liquide, ni gazeuse, la matière est comparable à une « soupe » où noyaux et électrons ne sont plus liés, ils circulent librement. Lorsque deux noyaux « légers » se percutent à grande vitesse, ils peuvent fusionner, créant un noyau plus lourd : c'est la fusion nucléaire. Durant l'opération, une partie de l'énergie de liaison des composants du noyau est libérée sous forme de chaleur ou de lumière. Dans le cœur des étoiles, ce sont deux noyaux d'hydrogène, composés uniquement d'un proton, qui fusionnent pour donner un noyau plus lourd : l'hélium dont le noyau contient deux protons et un ou plusieurs neutrons. Dans le Soleil, cette transformation se déroule en plusieurs étapes. Sur Terre, pour récupérer de l'énergie, les scientifiques tentent d'utiliser la fusion de deutérium et de tritium, deux isotopes de l'hydrogène (noyaux contenant un proton et un ou deux neutrons). Cette réaction donne elle aussi naissance à un noyau d'hélium très chaud, et libère un neutron de grande énergie.

Extrait de « La fusion nucléaire »

<https://www.mediachimie.org/ressource/la-fusion-nucleaire>



Document 5 : Équation de fusion nucléaire

La fusion nucléaire est modélisée par une réaction nucléaire à laquelle est associée une équation de réaction de la forme :



${}_{Z_4}^{A_4}X_4$ Une fusion nucléaire peut ne former qu'un seul produit : X_3 . Lorsqu'un deuxième produit se forme (X_4), il s'agit d'une particule comme par exemple le neutron symbolisé par ${}_0^1n$.

Au cours d'une réaction nucléaire, il y a conservation du nombre de nucléons ainsi que du nombre de protons.

8 APP Qu'est-ce que la fusion nucléaire ?

.....

.....

9 REA Dans les étoiles, une des étapes conduisant à un des isotopes de l'hélium est la fusion d'un noyau du proton hydrogène avec celui du deutérium. Il se forme alors un noyau d'hélium-3 (le « 3 » pour trois nucléons). Écrivez l'équation de réaction de fusion nucléaire correspondante.

.....

.....

10 REA Sachant que le noyau du tritium se symbolise par ${}_1^3H$, écrivez l'équation de réaction de fusion nucléaire réalisée sur Terre.

.....

.....

Partie B : MORT DU SOLEIL

Il nous paraît immortel, mais le Soleil aura pourtant une fin.

La fusion de l'hydrogène en hélium au sein du Soleil s'accompagne d'une grande production d'énergie. Lorsque le Soleil aura épuisé sa réserve d'hydrogène, ce sera la fin du Soleil tel que nous le connaissons.

Pendant combien de temps notre planète pourra-t-elle encore bénéficier de l'énergie du Soleil ?

Document 6 : Carte d'identité du Soleil

Masse du Soleil : M_S	$M_S = 2,0 \cdot 10^{30}$ kg
Masse en hydrogène utilisable tout au long de sa vie par le Soleil : M_H	$M_H = 10\% \cdot M_S$
Énergie fournie dans le Soleil par la fusion d'un kilogramme d'hydrogène en hélium : E_1	$E_1 = 6,3 \cdot 10^{14}$ J
Puissance solaire : P_S	$P_S = 3,8 \cdot 10^{26}$ W

Document 7 : Durée de vie du Soleil

En supposant que l'énergie de fusion de l'hydrogène est la seule énergie disponible pour faire « vivre » le Soleil, il est possible de déterminer sa durée de vie, notée D , c'est-à-dire le temps entre sa « naissance » et sa « mort », à l'aide de la relation :

$$P_S = \frac{E_{\text{disponible}}}{D}$$

avec :

P_S qui représente la puissance solaire en Watt (W) ;

D qui représente la durée de vie du Soleil en seconde (s) ;

$E_{\text{disponible}}$ en Joule (J), qui représente l'énergie libérée par la fusion de l'intégralité de l'hydrogène utilisable par le Soleil en hélium. Cette énergie s'obtient en multipliant la masse utilisable d'hydrogène (en kg) avec l'énergie fournie par la fusion d'un kilogramme d'hydrogène.

11 REA Déterminez la masse d'hydrogène dans le Soleil.

.....

.....

.....

.....

12 VAL Montrez que l'énergie disponible du Soleil, telle que définie dans le Document 7, vaut : $E_{\text{disponible}} = 1,3 \cdot 10^{44}$ J.

.....

.....

.....

.....

13 REA En déduire la durée de vie du Soleil.

.....

.....

.....

14 REA Le Soleil s'est formé il y a environ 5 milliards d'années. Avec un raisonnement en ordre de grandeur, déterminez combien de milliards d'années la Terre pourra encore bénéficier du rayonnement du Soleil.

.....

.....

.....

Les supernovas sont des explosions titanesques, qui sont le résultat cataclysmique de la mort de certaines étoiles.

Une fois sa réserve en hydrogène épuisée, que deviendra le Soleil ?

Document 8 : Géante rouge

L'étoile CW Leonis, dans la constellation du Lion, est une étoile évoluée un peu plus massive que le Soleil, mais surtout bien plus vieille : elle ressemble au Soleil comme il sera dans quelque 5 milliards d'années et aura le double de son âge actuel. Après avoir brûlé ses réserves d'hydrogène, le principal composant des étoiles jeunes, CW Leo s'est considérablement dilatée et sa surface s'est refroidie. Elle est devenue une géante rouge.

Extrait de « Molécules dans l'univers. Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? »

<https://www.mediachimie.org/ressource/molécules-dans-l-univers-ou-quand-comment-pourquoi>



Document 9 : Supernova ou naine blanche ?

Une fois la réserve d'hydrogène épuisée, on observe la fusion de l'hélium-4 au sein des étoiles alors appelées géantes rouges. La fusion de l'hélium-4 produit de nouveaux éléments chimiques comme par exemple le béryllium-8 mais également du carbone et de l'oxygène.

L'étoile alors devenue une géante rouge va épuiser l'hélium. Deux cas sont alors possibles :

- si la masse de l'étoile est inférieure à 3.10^{30} kg, les réactions nucléaires s'arrêtent. L'étoile devient de plus en plus petite pour devenir une naine blanche ;
- si la masse de l'étoile est supérieure à 3.10^{30} kg, alors elle explose : on parle de supernova.

15 APP Qu'est-ce qu'une géante rouge ? Quand est-ce qu'une étoile devient-elle une géante rouge ?

.....

.....

- 16 REA L'élément béryllium a pour numéro atomique $Z = 4$. Écrivez l'équation de fusion nucléaire qui permet d'obtenir du béryllium lorsque l'étoile est une géante rouge.

- 17 VAL En supposant que la masse du Soleil sera du même ordre de grandeur que sa masse actuelle lorsqu'il deviendra une géante rouge, notre étoile va-t-elle évoluer en supernova ou en naine blanche ?

Toute la matière de l'univers, nous y compris, est constituée d'éléments chimiques. D'où proviennent ces éléments chimiques ?

Document 10 : La nucléosynthèse stellaire



Vidéo « Le Soleil, une usine à atomes »

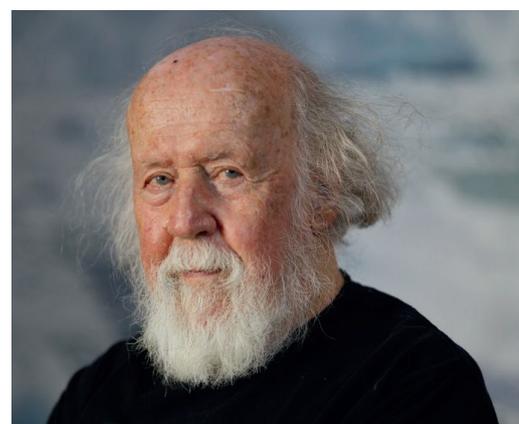
<https://www.mediachimie.org/ressource/le-soleil-une-usine-a-atomes>



- 18 APP Comment sont répartis les éléments chimiques dans une étoile ?

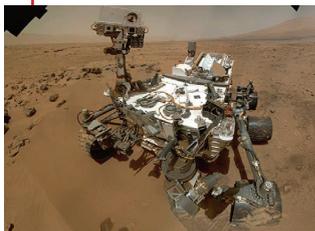
- 19 APP Qu'est-ce que la nucléosynthèse stellaire ?

- 20 ANA/RAI Hubert Reeves, un éminent astrophysicien, explique dans l'un de ses ouvrages que nous sommes tous de la poussière d'étoiles. Pourquoi dit-il cela ?



Hubert Reeves, conteur d'étoiles.
© Mathieu Alexandre - AFP

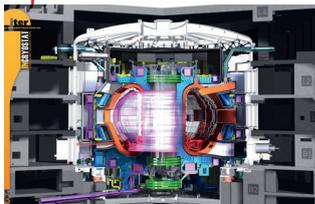
Pour aller plus loin



• **Traces chimiques d'une forme de vie extraterrestre : si près ! si loin !**

Une conférence dressant l'état des connaissances et des techniques actuelles sur la détection d'une forme de vie au sein et en dehors du système solaire.

<https://www.mediachimie.org/ressource/traces-chimiques-d'une-forme-de-vie-extraterrestre-si-pres-si-loin>



• **ITER, c'est quoi ?**

Un article sur le projet ambitieux de fusion nucléaire sur Terre.

<https://www.iter.org/fr/proj/inafewlines>



• **Quête d'une énergie « propre » et inépuisable**

Seule la fusion peut répondre au défi énergétique que l'humanité affronte ! Bernard Bigot, Directeur du projet ITER, Président de la Fondation de la Maison de la Chimie.

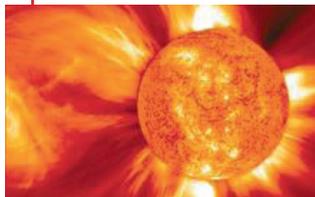
<https://www.mediachimie.org/ressource/seule-la-fusion-peut-repondre-au-defi-energetique-que-l-humanite-affronte>



• **Les éléments chimiques**

Un site Internet de qualité fournissant les propriétés, les caractéristiques ainsi que des informations sur la découverte de tous les éléments chimiques.

<https://www.mediachimie.org/ressource/site-les-éléments-chimiques>



• **Le Soleil**

Un dossier multimédia complet sur le Soleil. Composé de cinq parties, il dresse avec précision l'état des lieux des connaissances actuelles sur notre étoile.

<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/soleil.aspx>



• **Le Big Bang**

Un ensemble de 10 vidéos pédagogiques, sur la création de notre univers, à destination des enseignants pour l'utilisation en classe.

<https://www.lumni.fr/dossier/le-big-bang>

1. Le phénomène physique permettant des températures suffisantes aux réactions nucléaires se nomme la gravitation universelle.

2. Une réaction nucléaire est une réaction qui permet de modifier le noyau des atomes.

3. Les espèces chimiques ne sont donc pas non plus conservées au cours de cette transformation. Par définition, la fusion nucléaire n'est ni une réaction physique ni une réaction chimique.

4. Le noyau du proton hydrogène possède un proton et aucun neutron. Celui du deutérium possède un proton et un neutron.

5. Un noyau d'hélium-3 composé de deux protons et d'un neutron. Un noyau d'hélium-4 composé de deux protons et de deux neutrons.

6. Le noyau du proton hydrogène est symbolisé par ${}^1_1\text{H}$.

Le noyau du deutérium est symbolisé par ${}^2_1\text{H}$.

Le noyau d'hélium-3 est symbolisé par ${}^3_2\text{He}$.

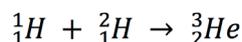
Le noyau d'hélium-4 est symbolisé par ${}^4_2\text{He}$.

7. ${}^1_1\text{H}$ et ${}^2_1\text{H}$ sont des isotopes. ${}^3_2\text{He}$ et ${}^4_2\text{He}$ le sont également.

On peut donc en conclure que des isotopes sont des atomes dont les noyaux possèdent le même nombre de protons (Z) et un nombre de nucléons différents (A).

8. La fusion nucléaire est une transformation où deux noyaux s'assemblent pour former un noyau plus « lourd ».

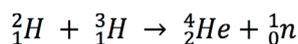
9. L'équation de réaction de fusion est :



10. D'après le document un noyau de deutérium et de tritium fusionnent pour former un noyau d'hélium et un neutron.

Pour qu'il y ait conservation du nombre de nucléons, le noyau d'hélium formé est l'hélium-4.

L'équation de réaction de fusion est :



11. $M_{\text{H}} = 10\% \cdot M_{\text{S}}$

$$M_{\text{H}} = \frac{10 \times 2,0 \cdot 10^{30}}{100}$$

$$M_{\text{H}} = 2,0 \cdot 10^{29} \text{ kg}$$

Le Soleil possède une réserve en hydrogène de masse : $M_{\text{H}} = 2,0 \cdot 10^{29} \text{ kg}$

12. D'après le document 7 :

$$E_{\text{disponible}} = M_{\text{H}} \times E_1$$

$$E_{\text{disponible}} = 2,0 \cdot 10^{29} \times 6,3 \cdot 10^{14}$$

$$E_{\text{disponible}} = 1,3 \cdot 10^{44} \text{ J}$$

On retrouve bien la valeur indiquée dans l'énoncé.

13. D'après le document 7 :

$$P_{\text{S}} = \frac{E_{\text{disponible}}}{D}$$

Donc la relation devient :

$$D = \frac{E_{\text{disponible}}}{P_{\text{S}}}$$

$$D = \frac{1,3 \cdot 10^{44}}{3,8 \cdot 10^{26}}$$

$$D = 3,4 \cdot 10^{17} \text{ s}$$

La durée de vie du Soleil est de $D = 3,4 \cdot 10^{17} \text{ s}$.

14. 1 année = $60 \times 60 \times 24 \times 365$ secondes

Donc :

$$D = \frac{3,4 \cdot 10^{17}}{60 \times 60 \times 24 \times 365}$$

1 milliard = 10^9 donc en ordre de grandeur la durée de vie du Soleil est de 10 milliards d'années.

La Terre pourra donc profiter du Soleil pendant encore 5 milliards d'années.

15. Une géante rouge est une étoile en fin de vie. L'étoile grossit et prend une couleur rouge.

16. Les noyaux d'hélium-4 fusionnent pour donner du béryllium-8



17. Le Soleil a une masse de $2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ soit une masse inférieure à $3,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

Le Soleil n'explosera pas mais deviendra une naine blanche.

18. Dans une étoile les éléments chimiques sont répartis par couches successives comme dans un oignon. De l'extérieur vers l'intérieur, on retrouve les éléments chimiques de plus en plus lourds.

19. La nucléosynthèse stellaire est le processus de fabrication d'éléments chimiques par les étoiles.

20. Les étoiles fabriquent les éléments chimiques qui constituent la matière dans l'univers.

Nous sommes constitués d'éléments chimiques qui sont issus des étoiles, nous sommes donc tous de la poussière d'étoile.