

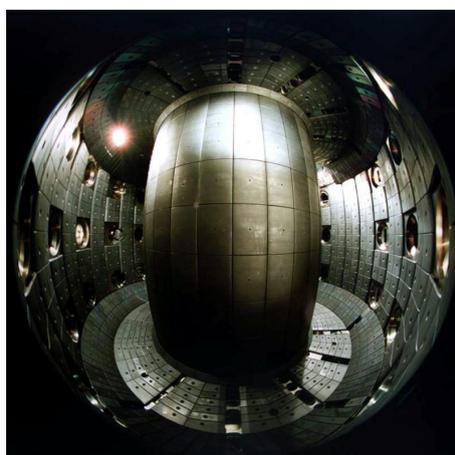
Chapitre 6 - Transformation nucléaire

Introduction

Dans ce chapitre nous intéressons aux transformations nucléaires; telles que la fission ou la fusion nucléaire. Ces dernières sont à différencier des transformations chimiques ou physiques, dans lesquelles les éléments chimiques sont conservés, alors que pour les transformations nucléaires, le noyau est modifié. Nous définirons également ce que sont des isotopes et présenterons les aspects énergétiques des transformations nucléaires, utilisées dans les centrales nucléaires et source de l'énergie solaire rayonnée et reçue par la Terre.

Ce qu'il faut savoir faire

Notion	Ce qu'il faut connaître ou savoir faire	Exercice(s)
Isotopes	Identifier des isotopes.	11 et 20
Écriture symbolique d'une réaction nucléaire	Relier l'énergie convertie dans le Soleil et dans une centrale nucléaire à des réactions nucléaires.	20 et 25
Aspects énergétiques des transformations nucléaires : Soleil, centrales nucléaires.	Identifier la nature physique, chimique ou nucléaire d'une transformation à partir de sa description ou d'une écriture symbolique modélisant la transformation.	14 et 18



Vue intérieure d'un tore d'un tokamak, exploitant la fusion nucléaire en vue de produire de l'électricité.

Cours

I Les isotopes

I.1 Rappel

Écriture conventionnelle ♡

Tout noyau peut être décrit grâce à l'écriture conventionnelle :



- le **numéro atomique** Z est égal au nombre de **protons** présents dans le noyau.
- le **nombre de masse** A est quant à lui égal au nombre de **nucléons**. Ainsi :

$$A = \text{nombre de protons} + \text{nombre de neutrons} = Z + N$$

I.2 Définition

Isotopes ♡

Des atomes sont dit **isotopes** lorsqu'ils ont un même nombre de protons mais un nombre de neutrons donc de nucléons différents.

En conséquence pour deux isotopes, les numéros atomiques Z sont identiques mais les nombres de masse A différents.

Remarque : des isotopes ont des propriétés chimiques identiques mais des propriétés physiques différentes. De même leur abondance (proportion) est différente.

Exemple : Le carbone est un élément chimique pour lequel il existe plusieurs isotopes comme par exemple les isotopes ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{14}_6\text{C}$. Ces isotopes ont uniquement un nombre de masse différent.

→ **Exercice 11 p.153.**

II Transformations nucléaires

II.1 Trois types de transformations

Définition d'une transformation nucléaire

Une **transformation nucléaire** est une transformation au cours de laquelle la structure du noyau atomique est modifiée. Elle met en jeu des noyaux et des particules libres. On peut la représenter grâce à une écriture symbolique associée.

Remarque : Il faut différencier les transformations nucléaires des transformations physique ou chimique.

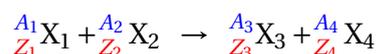
Transformation	Modification observée
Physique	espèces et éléments chimiques non modifiés, pas de nouvelles espèces formées. <u>Exemple</u> : $\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{H}_2\text{O}_{(g)}$ (vaporisation eau)
Chimique	éléments chimiques non modifiés alors que les espèces chimiques sont modifiées pour former de nouvelles espèces. <u>Exemple</u> : $\text{C}_{(s)} + \text{O}_{2(g)} \rightarrow \text{CO}_{2(g)}$ (combustion du carbone)
Nucléaire	modification du noyau atomique : ce sont carrément les éléments chimiques qui sont non conservés.

II.2 Réaction nucléaire : écriture et conservation

II.2.1 Écriture symbolique d'une réaction

Écriture symbolique

On peut écrire une réaction nucléaire, dans laquelle apparaissent des noyaux et des particules libres (particule seule). Une réaction est du type :



Exemples de particules libres : l'électron (${}_{-1}^0\text{e}$), le positon (${}_{+1}^0\text{e}$), un neutron libre (${}_{0}^1\text{n}$) et le proton (${}_{1}^1\text{p}$).

II.2.2 Conservation lors d'une réaction nucléaire

Lors d'une réaction nucléaire, plusieurs grandeurs sont conservées. En effet, il y a :

- conservation du nombre **de masse** (du nombre **de nucléons**) (exemple précédent : $A_1 + A_2 = A_3 + A_4$),
- conservation du nombre global de la **charge électrique** et donc du nombre de protons des deux côtés de la réaction (exemple précédent : $Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4$).

II.3 Réaction de fusion nucléaire

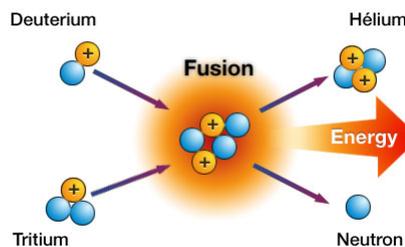
Fusion nucléaire

Lors d'une **réaction de fusion nucléaire** au cours de laquelle **deux** noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus **lourd**.

Remarque : Ces réactions nécessitent de hautes température afin que deux noyaux puissent fusionner ensemble après collision. De ce fait les réactions de fusion nucléaire peuvent avoir naturellement lieu au coeur d'une étoile.

Exercice de cours 1 - Fusion du deutérium avec le tritium

Le deutérium ${}^2_1\text{H}$ et le tritium ${}^3_1\text{H}$ sont deux isotopes de **l'hydrogène** qui peuvent fusionner pour former un noyau d'hélium 4. Grâce au schéma sur la figure de droite, donner une écriture possible de l'équation modélisant la réaction de fusion.



II.4 Réaction de fission nucléaire

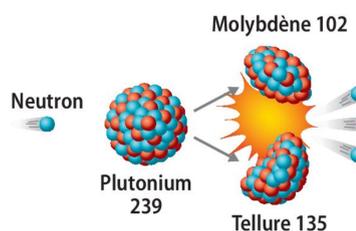
Fission nucléaire

Réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau **lourd** dit **fissile** (qui peut se scinder par fission) se scinde en **deux** noyaux plus **légers**, spontanément, ou après impact avec autre particule.

Remarque : La fission se produit spontanément ou sous l'impact d'un neutron.

Exercice de cours 2 - Fission du plutonium 239

On présente sur le graphe de droite la fission du plutonium 239 (Pu : $Z = 94$) sous l'effet d'un neutron. Lors de cette réaction se forme un noyau de Tellure 135 (Te : $Z = 52$) et de Molybdène 102 (Mo : $Z = 42$). Donner l'équation modélisant la réaction de fission.



→ Exercices 14 et 18 p.153.

III Énergie mise en jeu lors d'une transformation nucléaire

III.1 Énergie libérée

Les réactions nucléaires libèrent de l'énergie; on dit qu'elles sont **exothermiques**.

III.2 Cas d'une fission (Centrale nucléaire)

En France, on compte en 2021 18 réacteurs nucléaires en exploitation permettant la production d'environ 75 % de l'électricité en France. Cette production, bien que sans émission de gaz à effet de serre, nécessite un stockage contrôlé des déchets radioactifs produits.

On peut résumer la réaction de fission nucléaire utilisée dans les centrales nucléaires à la fission de l'uranium 235 en strontium 94 et en xénon 139 :



Animation - Vidéo : Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire



Lien :

<https://www.youtube.com/watch?v=I09DhTubNqE>

Ordre de grandeur : L'utilisation de 1,0 kg d'uranium libère une énergie d'environ $7,3 \times 10^{13}$ J.

III.3 Cas d'une fusion (Soleil)

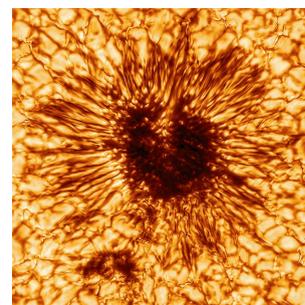
L'énergie rayonnée par le Soleil est la conséquence de réactions de fusion nucléaire, libérant de l'énergie. Elle est libérée par le Soleil principalement suite à la transformation que l'on peut résumer par :



où **quatre** noyaux d'hydrogène fusionnent pour obtenir un noyau **d'hélium 4** et deux **positons**.

L'énergie rayonnée par le soleil pour 1 g d'hydrogène qui réagit est de l'ordre de $E_{\text{Soleil}} = 6 \times 10^{11}$ J.

Cette énergie libérée importante pousse la communauté scientifique à essayer d'utiliser la fusion nucléaire dans le cadre de la production d'énergie électrique (projet ITER à Cadarache, en France). L'énergie libérée durant 600 s est d'environ 3×10^{11} J.



Exercice de cours 3 - Comparaison des modes de production d'électricité en France

En France, la production d'énergie électrique annuelle s'élève à environ $1,9 \times 10^{18}$ J. On donne ci-dessous la quantité d'énergie électrique produite grâce à différents modes de production :

- fusion nucléaire : 1,0 g d'hydrogène libère 3×10^{11} J,
- fission nucléaire : 1,0 kg d'uranium libère une énergie d'environ $7,3 \times 10^{13}$ J,
- centrale thermique à fioul : 1,0 kg de fioul permet de libérer environ $4,3 \times 10^7$ J.

Pour chaque méthode de production d'électricité : déterminer les différentes masses nécessaires pour produire l'énergie électrique produite en un an en France.

Hydrogène (fusion nucléaire) :

$$m_{\text{hydrogene}} = \frac{1,9 \times 10^{18} \text{ J}}{3 \times 10^{11} \text{ J}} = 6,3 \times 10^6 \text{ g} = 6,3 \times 10^3 \text{ kg}$$

Uranium 235 (fission nucléaire) :

$$m_{\text{uranium}} = \frac{1,9 \times 10^{18} \text{ J}}{7,3 \times 10^{13} \text{ J}} = 2,6 \times 10^4 \text{ kg}$$

Fioul (centrale thermique à fioul) :

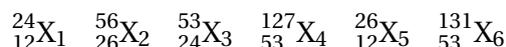
$$m_{\text{uranium}} = \frac{1,9 \times 10^{18} \text{ J}}{4,3 \times 10^7 \text{ J}} = 4,4 \times 10^{10} \text{ kg}$$

→ Exercices 20 p.54 et 25 p.155.

Thème 1 - Constitution et transformations	Chapitre 6 - Transformation nucléaire de la matière	Seconde Physique-chimie
<u>Feuille d'exercice</u>		

Exercice 11 p.153

On donne l'écriture conventionnelle de noyaux inconnus :



Identifier les noyaux isotopes d'un même élément.

Corrigé

On sait que des isotopes d'un même élément ont un numéro atomique Z identique (même nombre de protons) mais des nombres de masse A (nombre de nucléons différent).

Dans le cas de ${}_{12}^{24}\text{X}_1$ et ${}_{12}^{26}\text{X}_5$, les noyaux ont le même numéro atomique ce sont donc des isotopes. De plus on peut dire que $\text{X}_1 = \text{X}_5$

Dans le cas de ${}_{53}^{127}\text{X}_4$ et ${}_{53}^{131}\text{X}_6$, les noyaux ont le même numéro atomique ce sont donc des isotopes. De plus on peut dire que $\text{X}_4 = \text{X}_6$

Exercice 14 p.153

Des transformations sont modélisées par les équations ci-dessous :

- $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_{(g)} + 3 \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2 \text{CO}_{2(g)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(g)}$
- ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$
- ${}^{262}_{110}\text{Ds} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{258}_{108}\text{Hs}$
- $\text{Al}_{(s)} \rightarrow \text{Al}_{(l)}$

Identifier la nature physique, chimique ou nucléaire de ces transformations.

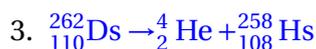
Corrigé

- $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_{(g)} + 3 \text{O}_{2(g)} \rightarrow 2 \text{CO}_{2(g)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(g)}$

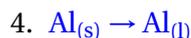
On remarque que les éléments sont conservés (autant de carbone C, hydrogène H et d'oxygène O des deux côtés. Par contre les espèces chimiques sont modifiées : c'est une réaction chimique.

- ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$

Les éléments ne sont pas conservés et de plus ce sont des noyaux qui interviennent dans l'équation de la réaction : il s'agit d'une transformation nucléaire. Ce n'est pas demandé mais on peut ajouter qu'il s'agit d'une réaction de fusion nucléaire car on forme un noyau plus lourd.



Les éléments ne sont pas conservés et de plus ce sont des noyaux qui interviennent dans l'équation de la réaction : il s'agit d'une transformation nucléaire. Ce n'est pas demandé mais on peut ajouter qu'il s'agit d'une réaction de fission nucléaire car à partir d'un noyau on forme deux noyaux plus légers.



Les éléments et espèces chimiques sont conservés : il s'agit d'une transformation physique où seul d'état physique de l'aluminium (Al) change.

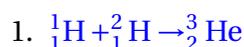
Exercice 18 p.153

Au coeur des étoiles peuvent se produire différentes transformations modélisées par les équations données ci-dessous :

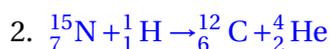
1. ${}_1^1\text{H} + {}_1^2\text{H} \rightarrow {}_2^3\text{He}$
2. ${}_7^{15}\text{N} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_2^4\text{He}$
3. ${}_6^{13}\text{C} + {}_1^1\text{H} \rightarrow {}_7^{14}\text{N}$

Indiquer, en justifiant pour chacune des transformations, s'il s'agit d'une fission ou d'une fusion nucléaire.

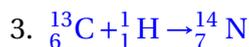
Corrigé



Il s'agit d'une réaction de fusion nucléaire car à partir de deux noyaux légers (ici d'hydrogène ($A = 1$) et de deutérium ($A = 2$)) on forme un noyau d'hélium ($A = 3$) plus lourd (car 3 est plus grand que 2 ou 1).



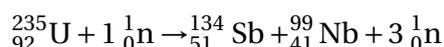
Il s'agit d'une réaction de fission nucléaire car à partir d'un noyau d'azote ${}_7^{15}\text{N}$ de nombre de masse $A = 15$ et sous l'impact d'un noyau d'hydrogène, on forme deux noyaux plus légers, car leurs nombres de masses sont inférieurs à $A = 15$.



Il s'agit d'une réaction de fusion nucléaire car à partir de deux noyaux légers (ici d'hydrogène ($A = 1$) et de carbone ($A = 13$)) on forme un noyau d'azote ($A = 14$) plus lourd (car 3 est plus grand que 2 ou 1).

Exercice 20 p.154

Une des transformations possibles dans une centrale nucléaire est modélisée par l'équation :



Lors de cette transformation, l'énergie libérée par un kilogramme d'uranium 235 est $4,62 \times 10^{14}$ J.

Données :

- L'antimoine $^{121}_{51}\text{Sb}$ et l'antimoine $^{123}_{51}\text{Sb}$ sont présents dans la nature.
- Énergie libérée par la combustion d'un kilogramme de butane : 50 MJ.

1. Que peut-on dire des noyaux d'antimoine formés lors de cette transformation et de ceux présents dans la nature ?
2. Identifier la nature physique, chimique ou nucléaire de cette transformation.
3. Indiquer s'il s'agit d'une fission ou d'une fusion.
4. Comparer l'énergie libérée par la transformation d'un kilogramme d'uranium 235 à celle libérée par la combustion d'un kilogramme de butane.

Corrigé

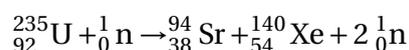
1. On peut dire que les noyaux $^{121}_{51}\text{Sb}$, $^{123}_{51}\text{Sb}$ et $^{134}_{51}\text{Sb}$ sont des **isotopes** car leurs numéros atomiques (nombre de protons) sont identiques alors que leurs nombres de masse (nombre de nucléons) sont différents.
2. Les éléments ne sont pas conservés et de plus ce sont des noyaux qui interviennent dans l'équation de la réaction : il s'agit d'une transformation nucléaire.
3. Il s'agit d'une réaction de fission nucléaire car à partir de d'un noyau lourd d'uranium (ici $A = 235$) on forme un noyau d'antimoine $^{134}_{51}\text{Sb}$ ($A = 134$) et un noyau de niobium $^{99}_{41}\text{Nb}$ ($A = 99$) tous deux plus légers car leurs nombres de masse sont inférieur à celui de l'uranium ($A = 235$).
4. Pour comparer l'énergie libérée par la transformation d'1 kg d'uranium 235 à celle libérée par 1 kg de butane, on peut regarder le rapport :

$$\frac{\text{Energie libérée par 1 kg d'uranium 235}}{\text{Energie libérée par 1 kg de butane}} = \frac{4,62 \times 10^{14} \text{ (J)}}{50 \text{ (MJ)}} = \frac{4,62 \times 10^{14} \text{ (J)}}{50 \times 10^6 \text{ (J)}} = 9,2 \times 10^6$$

L'énergie libérée par la transformation d'un kilogramme d'uranium 235 est environ 10 millions de fois plus importante que celle produite par la combustion d'un kilogramme de butane.

Exercice 25 p.155

Le sous-marin nucléaire français « Le Terrible » utilise l'uranium 235 comme combustible. La fission de l'uranium 235 est modélisée par l'équation :



L'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235 est $E = 2,91 \times 10^{-11} \text{ J}$.

1. Justifier que cette transformation est une fission.
2. Vérifier la conservation du nombre de nucléons et de la charge électrique dans l'équation modélisant cette transformation.
3. (a) Qualifier d'un point de vue énergétique cette transformation.

(b) Le réacteur du sous-marin fournit une puissance moyenne de 150 MW.

Montrer qu'il se produit $5,15 \times 10^{18}$ fissions par seconde.

Corrigé

- Il s'agit d'une réaction de fission nucléaire car à partir de d'un noyau lourd d'uranium (ici $A = 235$) on forme un noyau de strontium ${}_{38}^{94}\text{Sr}$ ($A = 94$) et un noyau de xénon ${}_{54}^{140}\text{Xe}$ ($A = 140$) tous deux plus légers car leurs nombres de masse sont inférieurs à celui de l'uranium ($A = 235$).
- Pour vérifier la conservation du nombre de nucléons, calcule la somme des nucléons des deux côtés de l'équation :

$$A_{\text{gauche}} = 235 + 1 = 236 \text{ (uranium et neutron)}$$

$$A_{\text{droite}} = 94 + 140 + 2 \times 1 = 236 \text{ (Sr, Xe et deux neutrons)}$$

La conservation du nombre de nucléons est bien vérifiée.

- Pour vérifier la conservation de la charge électrique, calcule la somme des charges des deux côtés de l'équation :

$$Z_{\text{gauche}} = 92 + 0 = 92 \text{ (uranium et neutron)}$$

$$Z_{\text{droite}} = 38 + 54 + 2 \times 0 = 92 \text{ (Sr, Xe et deux neutrons)}$$

La conservation de la charge électrique est bien vérifiée.

- Comme la transformation est une transformation nucléaire, on sait que de l'énergie va être libérée lors de la transformation. On la qualifie de transformation **exothermique** (qui libère de l'énergie).
 - Tout d'abord on peut calculer l'énergie moyenne fournie par le réacteur à partir de la puissance :

$$E_{\text{fournie}} = P_{\text{fournie}} \times \Delta t = 150 \times 10^6 \text{ (W)} \times 1 \text{ (s)} = 150 \times 10^6 \text{ J} = 1,50 \times 10^8 \text{ J}$$

Sachant que l'énergie libérée donc fournie par la fission d'un noyau est $E = 2,91 \times 10^{-11} \text{ J}$, pour connaître le nombre N de fissions qui se produisent dans le réacteur par seconde, on divise l'énergie totale fournie par le réacteur par celle fournie par la fusion d'un seul noyau :

$$N = \frac{E_{\text{fournie}}}{E} = \frac{1,50 \times 10^8 \text{ J}}{2,91 \times 10^{-11} \text{ J}} = 5,15 \times 10^8 \text{ fissions par seconde.}$$

On trouve bien $5,15 \times 10^8$ fissions par seconde.