P7

ENERGIE NUCLEAIRE : REACTIONS SPONTANEES, FISSION ET FUSION

I. LE NOYAU ATOMIQUE

1. Composition du noyau :

1.1 Les nucléons :

Le noyau d'un atome est constitué de particules appelées **nucléons** qui sont de deux sortes : les **protons** et les **neutrons** :

- le proton est une particule de masse m_p sensiblement égale à la masse m_n du neutron :

$$m_p \approx m_n \approx 1,67.10^{-27} kg$$

- le neutron ne porte pas de charge électrique tandis que le proton porte une charge électrique égale à la charge élémentaire e = 1,6.10^{-19} C.

1.2 Nombre de charge et nombre de masse :

Le nombre de charge et nombre de masse sont défit à partir des nombres de protons et de nucléons contenus dans le noyau :

- le **nombre de charge** (ou numéro atomique) d'un atome, noté **Z**, est le nombre de protons contenus dans son noyau.
- le **nombre de masse** d'un atome, noté **A**, est le nombre de nucléons contenus dans son noyau.

1.3 Remarques :

- Le couple **(A, Z)** fixe la composition du noyau ; il signifie que le noyau comporte **A nucléons** dont **Z protons** et **(A-Z) neutrons**.
- Les propriétés nucléaires d'un noyau dépendent uniquement du nombre A et non de Z.

2. Notions fondamentales :

2.1 Elément chimique :

2.1.1 Définition :

Un élément chimique est l'ensemble des atomes qui ont la même valeur de Z.

2.1.2 Exemples :

- l'ensemble des atomes pour lesquels **Z=1** forme l'élément chimique **hydrogène**, de symbole **H**.
- l'ensemble des atomes pour lesquels **Z=6**, forme l'élément chimique **carbone**, de symbole **C**.
- l'ensemble des atomes pour lesquels **Z=92**, forme l'élément chimique **uranium**, de symbole **U**.

2.2 Nucléide :

2.2.1 Définition :

Un nucléide est l'ensemble des atomes dont les noyaux ont la même valeur de Z et même valeur de A. Un nucléide se représente par l'écriture $^{A}_{Z}X$ où X est le symbole de l'élément chimique correspondant au nombre de charge Z.

2.2.2 Exemples :

On connait actuellement 1 525 nucléides dont 325 nucléides stables :

- le nucléide $^{12}_{6}C$ est l'ensemble des noyaux des atomes formés de 6 protons et 6 neutrons.
- le nucléide $^{1}_{1}H$ est l'ensemble des noyaux des atomes formés de 1 proton et 0 neutron.
- autres nucléides : $^{16}_{8}O$; $^{27}_{13}Al$; $^{67}_{30}Zn$; $^{235}_{92}U$.

Harvard Groupe Scolaire

2.3 Isotopes d'un élément chimique :

2.3.1 Définition :

On appelle isotopes d'un élément, les nucléides ayant même valeur de Z, mais des valeurs différentes de A.

2.3.2 Exemples :

- l'élément chimique hydrogène possède trois isotopes que sont le proton $^{1}_{1}H$ (98,985%), le deutérium $^{2}_{1}H$ et le tritium $^{3}_{1}H$.
- l'élément chimique carbone possède trois isotopes que sont le carbone 12 $^{12}_{6}C$ (99,89%), le carbone 13 $^{13}_{6}C$ (1,11%), le carbone 14 $^{12}_{6}C$ (10^{-12}%).

2.4 Exercices d'application :

2.4.1 Exercice 1 :

- Enoncé 1 :

Un atome d'étain, de symbole Sn possède 120 nucléons. La charge de son noyau est $8.10^{-18}C$.

a) Quel est son numéro atomique Z ?

b) Quels sont le nombre de neutrons et le nombre d'électrons d'un atome d'étain ?

c) En déduire la représentation symbolique de son noyau.

- Solution 1 :

a) Numéro atomique Z de l'étain : $Z = \frac{q}{e} = 50$

b) A = 120 et Z = 50 donc A – Z = 70 d'où Sn a 50 électrons et 70 neutrons.

c) Représentation symbolique du noyau d'étain : $^{120}_{50}Sn$

2.4.2 Exercice 2 :

- Enoncé 2 :

a) On considère la représentation symbolique $^{33}_{16}S$.

a.1) Quel est l'élément chimique ainsi symbolisé ?

a.2) Cette représentation est-elle celle d'un noyau, d'un atome ou d'un ion ?

a.3) Que représente le couple de valeurs (33 ; 16) ?

b) On donne les sept représentations suivantes : $^{30}_{14}Si$; $^{32}_{14}Si$; $^{40}_{20}Ca$; $^{30}_{19}Si$; $^{32}_{16}S$; $^{37}_{17}Cl$; $^{27}_{13}Al$

b.1) Expliquer ce que signifie isotope.

b.2) Parmi les sept représentations, indiquer celle(s) qui est (sont) isotope(s) de $^{33}_{16}S$.

b.3) Indiquer ensuite, s'il y en a, celles qui sont isotopes entre elles.

- Solution 2 :

a) Soit la représentation $^{33}_{16}S$.

a.1) L'élément chimique ainsi symbolisé est le soufre.

a.2) La représentation est celle d'un noyau.

a.3) Le couple de valeurs (33 ; 16) est tel que : A = 33 et Z = 16

b) b.1) Isotope : même Z et A différent.

b.2) Parmi les sept représentations seul $^{32}_{16}S$ est isotope de $^{33}_{16}S$.

b.3) $^{30}_{14}Si$ et $^{32}_{14}Si$ sont isotopes.

2.4.3 Exercice 3 :

- Enoncé 3 :

Halwar Groupe Scolaire

L'oxygène naturel contient trois isotopes : ${}^{16}_{8}O$; ${}^{17}_{8}O$; ${}^{18}_{8}O$

a) Définir les isotopes d'un élément.

b) Quelle est la particularité de ces isotopes ?

c) Pourquoi peut-on considérer qu'il s'agit du même élément ?

- Solution 3 :

a) Cours.

b) Ces isotopes appartiennent au même élément.

c) On peut considérer qu'il s'agit du même élément car ils ont le même nombre de protons.

3. Masse et énergie :

3.1 L'unité de masse atomique :

Le kilogramme est inadapté aux masses nucléaires. Ainsi, on utilise une unité plus pratique pour l'étude des noyaux : l'**unité de masse atomique**.

3.1.1 Définition :

L'unité de masse atomique, de symbole **u**, est le douzième de la masse de l'atome isotope 12 du carbone ; elle vaut, en kilogramme : $\mathbf{1\ u = 1,6605402.10^{-27}\ kg}$

3.1.2 Valeurs des masses des nucléons :

$\mathbf{m\left({}^{1}_{1}p\right)}$	$\mathbf{m\left({}^{1}_{0}n\right)}$
$\mathbf{1,007\ 276\ 470\ u = 1,672\ 649.10^{-27}\ kg}$	$\mathbf{1,008\ 665\ 012\ u = 1,674\ 954.10^{-27}\ kg}$

3.2 Défaut de masse :

Des mesures précises montrent que **la masse d'un noyau ${}^{A}_{Z}X$ est toujours inférieure à la somme des masses de ses nucléons**.

Le **défaut de masse** Δm du noyau est la différence entre la somme des masses des nucléons et la masse du noyau : $\mathbf{\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m\left({}^{A}_{Z}X\right)}$

3.3 Equivalence masse-énergie :

En 1905, Albert Einstein postule l'**équivalence** entre **masse et énergie**.

3.3.1 Relation d'Einstein :

Une particule matérielle, même au repos, du seul fait de sa masse **m**, possède une énergie **E** appelée « **énergie de masse** » donnée par la **relation d'Einstein** :

$$\mathbf{E = m.C^2} \quad \begin{cases} m : kg \\ C : ms^{-1} \\ E : J \end{cases}$$

C'est la célérité de la lumière ; sa valeur est C = 3.10^8 m/s et E : énergie de masse

3.3.2 Energie de liaison :

L'énergie de liaison $\mathscr{E}_\ell$ est l'énergie qu'il faut fournir pour séparer les nucléons d'un noyau au repos. D'après le principe de l'équivalence masse-énergie, au défaut de masse Δm correspond une libération d'énergie égale à l'énergie de liaison :

$$\mathscr{E}_\ell = \left\{[Zm_p + (A - Z)m_n] - m\left({}^{A}_{Z}X\right)\right\}.C^2$$

Groupe Scolaire

3.3.3 Unité d'énergie pratique : l'électronvolt

A l'échelle atomique, l'unité d'énergie pratique est l'**électronvolt** (**eV**) et son multiple tel que le **méga électronvolt** (**MeV**) :

1 eV = 1,6.10 $^{-19}$ J

1 MeV = 1,6.10 $^{-13}$ J

Un calcul précis a permis de trouver la valeur de l'équivalence d'énergie correspondant à 1 u : **1 u = 931,5016 MeV / C^2**

Valeurs des énergies de masse correspondant aux nucléons :

3.3.4

	m (u)	Énergie (MeV)	Énergie (J)
Proton	1,007 276	938,2723	1,503 279.10 $^{-10}$
Neutron	1,008 664	939,5656	1,505 351.10 $^{-10}$

Exercice d'application :

- Enoncé :

Calculer l'énergie de liaison du noyau d'hélium ^4_2He dont la masse déduite des indications des tables de valeurs est m = 4,0015 u.

On donne : m_p = 1,007 276 u ; m_n = 1,008 664 u et 1 u = 931,5 MeV/C^2.

- Solution :

- 1ère méthode :

$\mathscr{E}_\ell = \{(2m_p + 2m_n) - m\}.C^2$

$\mathscr{E}_\ell$ en joule : $\mathscr{E}_\ell = \{2(1{,}672\,649 + 1{,}674954).10^{-27} - 4{,}0015 \text{ x } 1{,}6605.10^{-27}\}.C^2$ = 4,54.10 $^{-12}$ J

$\mathscr{E}_\ell$ en MeV : $\mathscr{E}_\ell = \frac{4{,}54.10^{-12}}{1{,}6.10^{-13}} MeV$ = 28,4 MeV

- 2ème méthode :

$\Delta m = (2m_p + 2m_n) - m$ = 0,0303 u = (0,0303 x 931,5016) MeV/C^2 ; soit : $\mathscr{E}_\ell$ = 28,3 MeV

3.4 Energie de liaison et stabilité des noyaux :

3.4.1 Energie de liaison par nucléon :

L'énergie de liaison par nucléon d'un noyau, noté $\mathscr{E}$, est le quotient de son énergie de liaison par le nombre de nucléons A ; soit : $\mathscr{E} = \mathscr{E}_\ell / A$

3.4.2 Stabilité des noyaux :

- Un noyau est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon est plus grande.
- Les **nucléides** les plus **stables** ($50 < A < 75$) correspondent à **$\mathscr{E} > 8$ MeV/nucléon**

3.4.3 Remarque :

Les nucléides instables peuvent évoluer en deux façons :

- deux noyaux « légers » fusionnent pour former un noyau « moyen » plus stable ayant une énergie de liaison par nucléon plus grande que la somme de celles des deux noyaux légers : c'est la fusion nucléaire ;
- un noyau « lourd » se scinde en deux noyaux « moyens » plus stables : c'est la fission nucléaire.

3.4.4 Exercice d'application :

- Enoncé :

a) Le noyau d'uranium 238 se désintègre en émettant une particule α et un noyau de thorium 90 ($_{90}Th$). Ecrire l'équation associée à cette réaction nucléaire.

Halwa Groupe Solaire

b) On considère les trois noyaux suivants : $^{238}_{92}U$; $^{A}_{90}Th$ et $^{206}_{82}Pb$.

b.1) Définir l'énergie de liaison d'un noyau.

b.2) Quelle est, pour chacun d'eux, l'énergie de liaison par nucléon exprimée en MeV/nucléon.

b.3) Indiquer, en le justifiant, lequel de ces trois noyaux est le plus instable.

On donne : m (Pb) = 206,92905 u ; m (Th) = 233,99422 u et m (U) = 238,00031 u.

- Solution :

a) Equation associée à la réaction nucléaire :

$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{A}_{90}Th$ avec : 238 = 4 + A $\Rightarrow$ A = 234 d'où $^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{234}_{90}\mathrm{Th}$

b) b.1) Définition de l'énergie de liaison d'un noyau : (cours)

b.2) Energie de liaison par nucléon de chacun des noyaux :

$\mathscr{E}_\ell/\mathrm{A}$ avec $\mathscr{E}_\ell = \{(Zm_p + (A-Z)m_n) - m(X)\}.C^2$

$\mathscr{E}_U$ = 7,570 MeV/nucléon; $\mathscr{E}_{Th}$ = 7,597 MeV/nucléon; $\mathscr{E}_U$ = 7,877 MeV/nucléon.

b.3) Comme l'énergie de liaison par nucléon de l'uranium 238 est la plus faible donc ce noyau est le plus instable parmi les trois étudiés.

II. REACTIONS NUCLEAIRES SPONTANEES

Les réactions nucléaires spontanées sont des réactions faisant intervenir les noyaux d'un certain nombre d'atomes qui se désintègrent en émettant des particules.

1. Historique :

En 1896, le physicien français **Henry Becquerel** découvrit la radioactivité en constatant que des plaques photographiques, bien protégées, avaient été impressionnées parce que situées à proximité de l'uranium. Les sels d'uranium émettaient donc eux-mêmes « quelque chose » qui traversa le papier noir et impressionna la plaque photographique. Il supposa l'**existence d'un rayonnement émis par les d'uranium**, et donna au phénomène le nom de **radioactivité**.

Deux ans plus tard, **Marie Curie** et son époux **Pierre Curie** constatèrent le même phénomène avec des dérivés du thorium et isolèrent un élément nouveau qu'ils appelèrent le radium (Ra).

En 1919, les anglais Sir Ernest **Rutherford** et F. **Soddy** montrèrent que la radioactivité résulte de **désintégrations** (transformations spontanées) de noyaux atomiques instables en noyaux plus stables avec émission de rayonnement dit **rayonnement radioactif**.

2. Généralités :

2.1 Définition :

La radioactivité est la transformation spontanée d'un noyau atomique instable en en un autre noyau plus stable, accompagné de l'émission d'un rayonnement radioactif.

2.2 Propriétés générales :

- Les transformations radioactives sont indépendantes de la combinaison chimique dont le noyau radioactif fait partie et des paramètres usuels que sont la température et la pression : **la radioactivité est un phénomène essentiellement nucléaire**.
- Rien ne peut influencer sur les transformations radioactives ; elles sont :

- **Spontanées** (elles se réalisent seules) ;
- **Inéluctables** (rien ne peut les empêcher de se réaliser) ;
- **Aléatoires** (elles sont imprévisibles).

2.3 Les émissions radioactives :

Harvar Groupe Scolaire

- L'étude des émissions radioactives (ou rayonnement radioactif) montre, lorsque des noyaux de certains atomes se désintègrent, ils émettent, d'une part des **particules** et d'autre part un rayonnement électromagnétique appelé **rayonnement**.
- Selon les noyaux émetteurs, on distingue trois catégories de particules :

- Les **particules** α qui sont des noyaux d'hélium, de symbole $\mathbf{^4_2He}$.
- Les **particules** β^- qui sont des électrons, de symbole $\mathbf{^0_{-1}e}$.
- Les **particules** β^+ qui sont des positons (leur masse est égale à celle de l'électron et charge opposée), de symbole $\mathbf{^0_{+1}e}$.

Les particules α sont éjectées à grande vitesse, de l'ordre de 20 000 km/s. Elles sont facilement ionisantes (une feuille de papier ou quelques centimètres d'air les arrêtent). Les particules β^- et β^+ sont éjectées avec des vitesses très grandes, de l'ordre de 280 000 km/s. Elles sont plus pénétrantes mais moins ionisantes que les particules α .

3. Les lois d'évolution d'une substance radioactive :

3.1 Les lois de conservation :

- Lors de toute désintégration radioactive d'un nucléide, on peut observer les lois de conservation que sont :

- la loi de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie ;
- les lois de Soddy (conservation du nombre de nucléons et conservation de la charge).

- Pour illustrer les **lois de Soddy**, considérons un nucléide ^A_ZX qui se désintègre pour donner un autre noyau $^{A'}_{Z'}Y$ et une particule ^a_zp : $^A_ZX \rightarrow {}^{A'}_{Z'}Y + {}^a_zp$

Conservation du nombre de nucléons : A = A' + a Conservation de la charge : Z = Z' + z

3.2 Décroissance radioactive :

3.2.1 Loi de décroissance radioactive :

Le nombre d'atomes d'un échantillon diminue en fonction du temps. Ainsi, le nombre **N** d'atomes restant à l'instant t est relié au nombre initial $\mathbf{N_0}$ d'atomes par :

$$\mathbf{N(t) = N_0 e^{-\lambda t}}$$

$\boldsymbol{\lambda}$ est une constante qui dépend du nucléide étudié ; on l'appelle **constante radioactive** ; elle s'exprime en $\mathbf{s^{-1}}$

3.2.2 Période radioactive :

- Définition :

La période radioactive T (ou demi-vie) d'un nucléide est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés.

- Exemples de périodes radioactives :

Nucléide	^{235}U	^{14}C	^{3}H	^{32}P	^{39}Cl	^{128}I
Période	$4{,}5.10^9$ ans	5 570 ans	12,5 ans	14 jours	1 heure	25 minutes

3.2.3 Relations en fonction de la période :

Relation entre constante radioactive et période radioactive :	$\boldsymbol{\lambda = \frac{\ell n 2}{T} = \frac{0,693}{T}}$

Halwar Groupe Scolaire

Relation traduisant la loi de décroissance radioactive au bout du temps de n période (T) :	$\mathbf{N = \frac{N_0}{2^n}}$

3.2.4 Activité :

- Définition :

L'activité A d'une substance radioactive représente le nombre moyen de désintégrations par seconde : $\boldsymbol{A = \lambda N}$

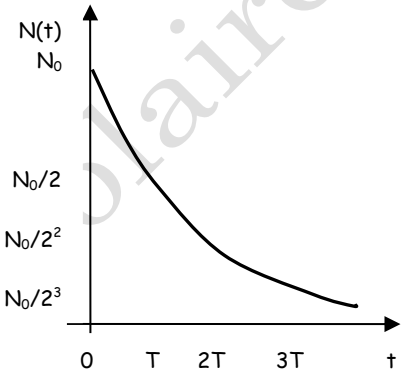
- Symbole :

Dans le système international d'unités, l'activité s'exprime en **becquerel**, de symbole **Bq** :

1 Bq = 1 désintégration par seconde

3.2.4 Courbe de dégénérescence :

A partir de la relation $N = N_0/2^n$, on peut tracer la courbe N = f (t) appelée **courbe de dégénérescence** dont l'allure est ci-contre :



3.2.5 Exercice d'application :

- Enoncé :

Le polonium $^{210}_{84}Po$ a une constante radioactive λ = 5,8.10 $^{-8}$ s^{-1}. Calculer en seconde et en jours, la période radioactive T.

- Solution : $\lambda = 0{,}693/T \Rightarrow T = 0{,}693/\lambda$ A.N : $T = 0{,}12.10^8$ s = 138 jours**4.**

Les différentes désintégrations nucléaires spontanées :

On distingue les différentes désintégrations nucléaires spontanées suivantes : l'émission γ, la radioactivité α, la radioactivité β^- et la radioactivité β^+.

4.1 L'émission γ par désexcitation:

3.1.1 Principe :

Lors d'une désintégration nucléaire, le noyau instable appelé **noyau père** donne un noyau différent, appelé **noyau fils** qui se trouve momentanément instable dans un **état excité**. Le noyau fils devient stable en libérant son excédent d'énergie sous forme de rayonnement γ. On dit qu'il se désexcite ; cette désexcitation accompagne généralement les autres types de réactions nucléaires.

3.1.2 Equation-bilan et exemple :

- Equation-bilan :

Si on note par Y^* le noyau fils excité ; l'équation-bilan de la désexcitation s'écrit :

$$\mathbf{^A_ZY^* \rightarrow {}^A_ZY + \gamma}$$

- Exemple : $^{16}_8O^* \rightarrow {}^{16}_8O + \gamma$

4.2 La radioactivité α :

La radioactivité α est caractéristique des noyaux lourds (A >200 et Z >82) qui comprennent **trop de nucléons** pour être stables.

Hamidou Groupe Scolaire

4.2.1 Définition et équation-bilan :

- Définition :

La radioactivité α correspond à la désintégration spontanée d'un noyau lourd instable qui expulse une particule α et donne un noyau fils plus stable.

- Equation-bilan : $$\mathbf{{}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He}$$

4.2.2 Energie libérée :

- Principe :

La radioactivité α, comme toute réaction nucléaire spontanée, s'accompagne d'une perte de masse ; donc d'une libération d'énergie. D'après la relation d'Einstein, l'énergie libérée est :

$$\mathbf{|\Delta E| = \{m(X) - [m(Y) + m_{\alpha}]\}.C^2}$$

- Exemple :

- Enoncé :

Calculons l'énergie libérée par la désintégration d'un noyau de radium 226 selon l'équation :

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

On donne : m (Ra) = 225,9771 u ; m (Rn) = 221,9704 u ; m (α) = 4,0015 u et 1 u = 6605.10^{-27}kg.

- Solution :

Cette désintégration s'accompagne d'une perte de masse: $|\Delta m| = \{m(Ra) - [m(Rn) + m_{\alpha}]\}$.

A cette perte de masse correspond une énergie : $|\Delta E| = \{m(Ra) - [m(Rn) + m_{\alpha}]\}.C^2$

$$|\Delta E| = 4{,}85 \text{ MeV}$$

4.3 La radioactivité β^- :

La radioactivité β^- est le propre des nucléides trop riches en **neutrons** pour être stables.

4.3.1 Définition et équation-bilan :

- Définition :

La radioactivité β^- correspond à la désintégration d'un noyau avec émission d'un **électron** $\mathbf{{}^{0}_{-1}e}$.

- Equation-bilan :

L'électron est émis en même temps qu'un antineutrino $\mathbf{{}^{0}_{0}\bar{\nu}}$ (particule de masse et de charge nulle) mais on fait abstraction de cette particule dans l'écriture de l'équation-bilan :

$$\mathbf{{}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e}$$

L'électron émis provient du noyau par transformation d'un neutron : $^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$.

4.3.2 Energie libérée :

- Principe :

La radioactivité β^-, comme toute réaction nucléaire spontanée, s'accompagne d'une perte de masse ; donc d'une libération d'énergie.

- Exemple :

- Enoncé :

Calculons l'énergie libérée par la désintégration β^- du césium 137 selon l'équation :

$$^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{137}_{56}Ba + {}^{0}_{-1}e$$

On donne : m (Cs) = 136,8773 u ; m (Ba) = 136,8756 u ; m (e) = 5,5.10^{-4} u et 1u = 6605.10^{-27}kg.

- Solution :

Halwar Groupe Scolaire

Cette désintégration s'accompagne d'une perte de masse: $|\Delta m| = \{m(Cs) - [m(Ba) + m_e]\}$.

A cette perte de masse correspond une énergie : $|\Delta E| = \{m(Cs) - [m(Ba) + m_e]\}.C^2$

$$\underline{|\Delta E| = 1{,}07\ MeV}$$

4.4 La radioactivité β^+ :

La radioactivité β^+ ne s'observe généralement qu'avec les **éléments artificiels** dont les noyaux sont **trop riches en protons**.

3.4.1 Historique :

C'est en 1934 qu'Irène et Frédéric Joliot-Curie produisirent pour la première fois l'isotope 15 du phosphore en bombardant une feuille d'aluminium par des particules α. Cet isotope conduit, par radioactivité β^+, à l'isotope 14 du silicium : $^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + {}^{0}_{1}e + \gamma$

4.3.2 Définition et équation-bilan :

- Définition :

La radioactivité β^+ correspond à la transformation d'un noyau avec émission d'un **positon** $\mathbf{{}^{0}_{+1}e}$.

- Equation-bilan :

Le positon est émis en même temps qu'un neutrino ${}^{0}_{0}\nu$ (antiparticule de l'antineutrino) mais on fait abstraction de cette particule dans l'écriture de l'équation-bilan : $\mathbf{{}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{+1}e}$

Le positon émis provient du noyau par transformation d'un proton : ${}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}e$.

3.4.4 Exemples :

$^{13}_{7}N \rightarrow {}^{13}_{6}C + {}^{0}_{1}e$ et $^{19}_{10}Ne \rightarrow {}^{19}_{9}F + {}^{0}_{1}e$

4.5 Exercices d'application :

4.5.1 Exercice 1 :

Compléter les équations bilan suivantes :

a) noyaux émetteurs α :

$^{210}_{84}Po \rightarrow {}^{\cdots}_{\cdots}Pb + \ldots + \gamma$ $\quad {}^{\cdots}_{\cdots}Th \rightarrow {}^{219}_{88}Ra + \ldots + \cdots$ $\quad {}^{\cdots}_{\cdots}\ldots \rightarrow {}^{230}_{90}Th + {}^{4}_{2}He + \ldots$

b) noyaux émetteurs β^- :

$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{\cdots}_{\cdots}\ldots + {}^{0}_{-1}e + \cdots$ $\quad {}^{\cdots}_{\cdots}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}e + \cdots$ $\quad {}^{137}_{55}Cs \rightarrow {}^{\cdots}_{\cdots}Ba + {}^{0}_{-1}e + \nu$

c) noyaux émetteurs β^+ :

$^{14}_{7}N \rightarrow {}^{\cdots}_{\cdots}C + \cdots + \cdots$ $\quad {}^{\cdots}_{\cdots}Ne \rightarrow {}^{19}_{9}F + {}^{0}_{1}e + \ldots$ $\quad {}^{\cdots}_{27}Co \rightarrow {}^{53}_{\cdots}Fe + {}^{0}_{1}e + \ldots$

4.5.2 Exercice 2 :

Ecrire les équations de désintégration des noyaux radioactifs suivants :

a) noyaux émetteurs α : $^{226}_{88}Ra$ et $^{238}_{94}Pu$ b) noyaux émetteurs β^- : $^{56}_{25}Mn$ et $^{239}_{92}U$

4.5.3 Exercice 3 :

a) L'isotope 210 du polonium $^{210}_{84}Po$ est un élément radioactif de type α.

a.1) Donner la constitution du noyau de cet atome.

a.2) Expliquer en quoi consiste la radioactivité α.

a.3) Ecrire l'équation de désintégration sachant que le noyau fils obtenu est le ${}^{\cdots}_{82}Pb$.

b) Déterminer l'énergie totale libérée par cette désintégration.

Halwar Groupe Scolaire

On donne : m (Po) = 209,9407 u ; m (Pb) = 205,9295 u ; m (α) = 4,0015 u et 1u=1,6605.10^{-27}kg

4.5.4 Exercice 4 :

Le noyau de sodium $^{24}_{11}\mathrm{Na}$ est radioactif et émet des particules β^- suivant la réaction nucléaire : $^{24}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{0}_{-1}\mathrm{e} + {}^{A}_{Z}\mathrm{Mg}$

a) Déterminer les nombres A et Z en précisant les lois de conservation utilisées.

b) La période radioactive ou demi-vie de ce nucléide est T = 15 heures.

b.1) Déterminer la constante radioactive de ce nucléide.

b.2) Si N_0 est le nombre de noyaux à l'instant t = 0, combien en reste-t-il au bout de 15 heures, au bout de 30 heures ?

4.5.5 Exercice 5 :

Le noyau de sodium $^{23}_{11}\mathrm{Na}$ est radioactif et émet des particules β^+.

a) Quelle est la constitution du noyau de l'atome de sodium $^{23}_{11}\mathrm{Na}$?

b) Ecrire l'équation de la réaction nucléaire correspondante en indiquant les lois utilisées et préciser le nom du nucléide X obtenu.

c) Calculer l'énergie libérée par cette réaction sachant que des mesures précises fournissent : m (Na) = 21,9944 u ; m (X) = 21,99138 u ; m (proton) = 5,486.10^{-4} u.

5. Quelques applications radioactives :

5.1 Mesures des âges :

On peut dater des objets vieux de 1 000 à 60 000 ans par dosage du carbone 14 ($^{14}_{6}C$). Le carbone 14 est radioactif β^- ; sa période est de 5 570 ans et sa proportion (10^{-6}) demeure constante depuis les temps géologiques. Cette proportion diminue de moitié tous les 5 570 ans

Ainsi, les dosages du carbone 14 sont fréquemment utilisés pour la datation des tombes anciennes et des fossiles.

5.2 Utilisation des radioéléments artificiels :

5.2.1 Usages des traceurs :

Si, dans une réaction chimique ou biochimique ordinaire par un de ses isotopes radioactifs, on peut suivre, par comptage du rayonnement émis, le comportement de cet élément.

5.2.2 Examens fonctionnels :

Des organes tels que la glande thyroïde, le foie, les reins retiennent certains radioéléments dans leurs tissus qui s'y fixent. La façon dont ils se fixent permet de déterminer si l'organe fonctionne normalement.

5.2.3 La radiothérapie :

Elle consiste à détruire, par action du rayonnement γ, les cellules cancéreuses. On utilise pour cela soit l'irradiation externe, en plaçant le malade près d'une bombe au cobalt, soit l'irradiation interne, en implantant dans la zone malade un radioélément tel que ($^{131}_{53}\mathrm{I}$).

5.2.4 La gammagraphie :

Elle ne diffère en rien, dans son principe, de la radiographie par des rayons X : l'image, recueillie sur une plaque photographique, d'une pièce métallique soumise à un rayonnement γ révèle et décèle les défauts d'un organe.

6. Les effets physiologiques des rayonnements :

Depuis de nombreuses années, l'utilisation de sources de rayonnement dans les applications industrielles et commerciales n'a cessé de se développer à un rythme croissant.

Halwar Groupe Scolaire

L'utilisation actuelle de substances radioactives (médecine, centrales nucléaires, bombes, …) modifie les données du problème. Tous ces rayonnements traversant la matière provoquent des modifications de structures chimiques. En particulier, dans le cas de la matière vivante, l'irradiation des tissus humains peut entraîner des lésions d'organes (**effets somatiques**) et des actions sur la descendance du sujet irradié (**effets génétiques**).

III. REACTIONS NUCLEAIRES PROVOQUEES

1. Historique :

La première réaction nucléaire provoquée fut celle observée, en 1939, par Ernest **Rutherford**, et ce, en bombardant une enceinte remplie d'azote par des particules α issues d'une source de polonium 210 : $^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{16}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$

En 1934 **Irène** et **Frédéric Joliot-Curie** découvrent la radioactivité artificielle en bombardant une feuille d'aluminium avec des particules α .

Ils produisirent, par <u>réaction provoquée</u>, l'isotope 15 du phosphore : $^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{1}_{0}\mathrm{n} + {}^{30}_{15}\mathrm{P}$

Cet isotope conduit, par <u>réaction spontanée</u> β^+, à l'isotope 14 du silicium : $^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{1}\mathrm{e} + \gamma$

Depuis cette date, des milliers d'autres réactions nucléaires provoquées ont permis de créer de nouveaux nucléides (nucléides artificiels).

2. La fission nucléaire :

Dés leur découverte en 1932 par Sir James **Chadwick**, les **neutrons** ont été utilisés, du fait de leur absence de charge électrique, comme **projectiles**, pour bombarder des cibles. En 1938, au cours d'une expérience de ce type, O. **Hahn** et F. **Strassman** observent qu'un noyau d'uranium 235 peut éclater sous l'impact d'un neutron et donner deux noyaux plus légers : c'est la fission nucléaire.

2.1 La réaction de fission :

2.4.1 Définition :

La fission est une réaction nucléaire provoquée, consistant en la cassure d'un noyau lourd en deux noyaux légers sous l'action d'un neutron lent ; une fission produit des neutrons.

2.4.2 Principe de la fission :

Un neutron lent (ou neutron thermique :$\mathrm{v} \approx 2\ \mathrm{km/s}$) heurte avec une énergie convenable un noyau $^{235}_{92}\mathrm{U}$; il est capté et le noyau se scinde en deux fragments plus légers avec 2 ou 3 neutrons rapides ($\mathrm{v} \approx 2.10^4\ \mathrm{km/s}$).

2.4.3 Exemples de réactions de fission :

L'une des réactions les plus fréquentes de fission de l'uranium conduit au strontium 94 et au néon 140 selon l'équation-bilan suivante : $^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2{}^{1}_{0}n + \gamma$

Le nucléide lourd qui subit la fission est dit **fissile**. Actuellement, quatre nucléides fissiles sont utilisés ; ce sont le nucléide naturel ($^{235}_{92}\mathrm{U}$) et les nucléides artificiels ($^{234}_{92}U$; $^{236}_{94}Pu$ et $^{241}_{94}Pu$) .

Le nucléide fissile est engendré, par réaction, par un nucléide dit **fertile** tel que $^{238}_{92}U$.

2.2 L'énergie libérée par fission :

La réaction fission s'accompagne d'une perte de masse ; donc d'une libération d'énergie.

Hawrin Groupe Scolaire

2.2.1 Exemple :

- Enoncé :

Calculons l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235 selon la réaction :

$$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{95}_{38}Sr + {}^{139}_{54}Xe + 2{}^{1}_{0}n$$

On donne : m (U) = 235,120 u ; m (Xe) = 138,955 u ; m (Sr) = 94,945 u ; m ($^{1}_{0}n$) = 1,008 u.

- Solution :

$|\Delta E| = \{[m(n) + m(U)] - [m(Xe) + m(Sr) + 2m(n)]\}.C^2 = 200\ MeV$ ou $|\Delta E| = 1\ MeV/$ nucléon

- Conclusion :

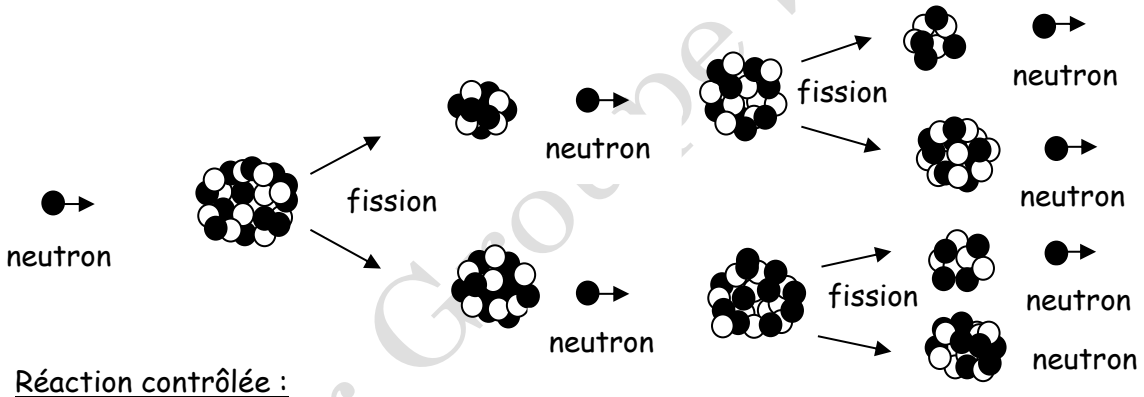
- La fission d'un noyau d'uranium 235 libère une énergie de 1 MeV/nucléon ; ce qui correspond à 8.10^{10} J par gramme d'uranium.

- On peut dire encore qu'une tonne d'uranium 235 a le même pouvoir énergétique que deux millions de tonnes de pétrole.

2.2.2 Remarques :

- Réaction en chaîne :

La fission émet de neutrons susceptibles, à leur tour, d'engendrer d'autres fissions. Il en résulte une réaction en chaîne. L'énergie dégagée devient très vite considérable et peut conduire à une explosion si elle est incontrôlée : on obtient l'effet d'une **bombe A**.



- Réaction contrôlée :

Convenablement maîtrisée dans un réacteur nucléaire, l'énergie de fission est récupérée sous forme de chaleur en constituant la source d'énergie nécessaire au fonctionnement d'une centrale électrique.

3. La fusion nucléaire :

3.1 La réaction de fusion :

3.4.1 Définition :

La fusion nucléaire est l'union de deux noyaux légers qui engendre un noyau lourd.

3.4.2 Principe de la fusion :

Les principales réactions de fusion se font à partir de l'hydrogène et de ses isotopes que sont le deutérium $^{2}_{1}H$ et le tritium $^{3}_{1}H$. La fusion nucléaire se produit naturellement dans le Soleil et les étoiles et artificiellement et d'une manière incontrôlée lors des explosions des **bombes H** ou **thermonucléaires**.

3.4.3 Exemples de réactions de fusion :

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H \qquad {}^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n \qquad {}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

3.2 L'énergie libérée par fusion :

2.2.1 Exemples :

Halwar Groupe scolaire

- Enoncé :

Évaluer l'énergie mise en jeu par la fusion de l'hydrogène qui produit de l'hélium selon l'équation-bilan suivante : ${}_1^2H + {}_1^3H \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n$

On donne : m_d = 2,01355 u ; m_t = 3,01550 u ; m_n = 1,00866 u ; m_α = 4,00150 u

- Solution : $|\Delta E| = \{[m(d) + m(t)] - [m(\alpha) + m(n)]\}.C^2 = 17{,}6\ MeV$ ou $|\Delta E| = 17{,}6\ MeV$

2.2.2 Remarques :

- Pour fusionner deux noyaux, il faut vaincre la répulsion électrostatique par élévation de température de 10^8 K ; c'est la « **température d'ignition** ».

A partir du gaz interstellaire, et sous l'effet de la gravitation, des atomes d'hydrogène se rapprochent, se tassent, créant une température d'une dizaine de millions de degrés kelvin pour que les réactions de fusion deviennent possibles. Pour alimenter les réactions nucléaires, l'étoile consomme ses réserves d'hydrogène pendant environ dix milliard d'années.

- Le Soleil et les étoiles tirent leur énergie (**énergie stellaire**) de réactions de fusion, notamment la fusion de l'hydrogène en hélium : $4\,{}_1^1H \rightarrow {}_2^4He + 2\,{}_1^0e + 2\nu + 2\gamma$.

DOCUMENT : L'ENERGIE NUCLEAIRE

L'énergie nucléaire provient de réactions qui se déroulent dans le **noyau des atomes**. Les atomes sont souvent considérés comme les **« briques » de la matière**. Ils sont formés d'un noyau autour duquel gravitent les **électrons**. Le noyau comprend des **protons** et des **neutrons**.

Un noyau se désintègre difficilement parce que les particules qui le composent sont fortement liées les unes aux autres ; mais lorsque cela arrive, l'énergie libérée est considérable.

Fission nucléaire ou fusion nucléaire ?

Une réaction nucléaire est une réaction qui a lieu dans les noyaux des atomes. Les noyaux peuvent se diviser en plusieurs fragments (c'est la fission nucléaire) ou bien s'associer (c'est la fusion nucléaire).

Les réactions de fusion nucléaire ont lieu en permanence dans le cœur des étoiles : c'est de cette façon que le Soleil éclaire et chauffe la Terre. Pour l'instant, les scientifiques ne sont pas parvenus à reproduire et à contrôler sur Terre ce type de réactions qui alimente en énergie les étoiles.

En revanche, les physiciens allemands **Otto Hahn** et **Fritz Strassmann** ont réussi à recréer la fission nucléaire en laboratoire dès 1938. Pour cela, ils ont bombardé le noyau d'un atome d'uranium avec des neutrons.

Comment fonctionne une centrale nucléaire ?

Il n'existe pas beaucoup d'éléments naturels utilisables dans les centrales nucléaires : le plus courant est l'uranium. Plus précisément, c'est une sorte d'uranium particulier, l'uranium-235, qui permet les réactions de fission nucléaire.

L'uranium est un minerai relativement abondant dans le sous-sol de la Terre, en particulier en Australie, en Amérique du Nord et en Afrique du Sud. Mais l'uranium naturel n'est pas très concentré en uranium-235 (moins de 1 %), aussi doit-il être « enrichi » avant d'être utilisé.

Halwar Groupe Scolaire

L'uranium enrichi est façonné en pastilles, qui sont empilées dans de longs tubes appelés « crayons ». Ces crayons sont placés au cœur du réacteur de la centrale et bombardés avec des neutrons.
Lorsqu'on le bombarde avec des neutrons, le noyau d'un atome d'uranium-235 se décompose : il forme deux noyaux plus légers et libère deux neutrons, ainsi qu'une énorme quantité de chaleur. Les neutrons libérés peuvent à leur tour provoquer la fission d'autres noyaux d'uranium-235 et ainsi de suite : il se produit donc une réaction en chaîne.
Cette réaction peut être rapide et extrêmement violente si elle n'est pas contrôlée : c'est ainsi que fonctionne la bombe atomique.
Dans une centrale nucléaire, la réaction en chaîne est contrôlée à l'aide de barres de contrôle qui absorbent les surplus de neutrons créés. On utilise l'importante chaleur dégagée lors des réactions de fission pour chauffer l'eau contenue dans le réacteur. Cette eau est ensuite transformée en vapeur. La vapeur fait tourner une turbine qui produit de l'électricité.

Quels sont les avantages du nucléaire ?

Le nucléaire n'a cessé de se développer depuis les années 1970. Aujourd'hui, environ 15 % de l'électricité produite dans le monde est d'origine nucléaire. L'énergie nucléaire est économique : les réserves d'uranium sont bien plus importantes que celles des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et le prix de l'uranium est moins sensible à la situation politique internationale que celui du pétrole. De plus, l'énergie nucléaire est très puissante : 1 kg d'uranium peut produire autant d'énergie que 2 500 tonnes de charbon.
Par ailleurs, les centrales nucléaires ne polluent pas l'air comme les centrales qui fonctionnent avec du pétrole, du charbon ou du gaz naturel : elles ne contribuent donc pas à augmenter l'effet de serre, responsable du réchauffement de la planète. Ainsi, à première vue, le nucléaire apparaît comme une source d'énergie relativement propre et économique. Mais le nucléaire présente également de lourds inconvénients écologiques (gestion des déchets nucléaires) et géopolitiques (dissuasion nucléaire et prolifération des armes nucléaires).

Quels sont les dangers du nucléaire ?

Tout d'abord, l'énergie nucléaire est une énergie extrêmement puissante, qui est utilisée depuis sa découverte pour la fabrication d'armes nucléaires. En 1945, le largage des bombes atomiques sur Hiroshima et Nagasaki a entraîné la fin de la guerre du Pacifique entre les États-Unis et le Japon, et précipité la fin de la Seconde Guerre mondiale ; les effets néfastes de ces bombes sur les hommes et la nature sont encore visibles de nos jours (cancers, contamination des sols, de l'eau, etc.). Par ailleurs, bien que les essais nucléaires aient été stoppés dans la majorité des pays et que la production d'armes nucléaires soit extrêmement contrôlée, l'éventualité d'une guerre nucléaire, capable de détruire la Terre entière, reste d'actualité.
Ensuite, l'industrie nucléaire produit d'importantes quantités de déchets nucléaires. Ces déchets sont radioactifs et la radioactivité est très dangereuse pour l'homme : à forte dose, elle tue les cellules et entraîne la mort ; à plus faible dose, elle peut endommager les cellules et causer de graves maladies (cancers, troubles du fonctionnement de la thyroïde, etc.).

Halwar Groupe Scolaire

De plus, une grande partie des déchets nucléaires ne sont pas recyclables et restent radioactifs pendant plusieurs milliers d'années. Ces déchets sont alors conditionnés dans des fûts spéciaux et enfouis sous terre.
Dans les années 1970-1980, le nucléaire apparaissait comme l'énergie du futur. Mais le 26 avril 1986, l'un des réacteurs de la centrale de Tchernobyl (en Ukraine) a explosé, irradiant toute la région et projetant un gigantesque nuage radioactif dans l'atmosphère. Là encore, les conséquences humaines et environnementales de cet accident resteront visibles pendant plusieurs dizaines d'années. Depuis, de nombreux pays ont préféré ralentir, voire stopper, leurs programmes nucléaires.

Document extrait d'Encarta Junior

Halwar Groupe Scolaire