

Leçon 22: La radioactivité



Introduction historique

La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme. C'est un phénomène naturel qui a été découvert à la fin du XIX^e siècle. En 1896, le physicien français **Henri Becquerel** cherchait à savoir si les rayons qu'émettaient les sels fluorescents d'uranium étaient les mêmes que les rayons X découverts en 1895 par **Wilhelm Roentgen**, physicien allemand. Il pensait que les sels d'uranium, après avoir été excités par la lumière, émettaient ces rayons X. Quelle ne fut pas sa surprise lorsqu'à Paris, en mars 1896, il découvrit que le film photographique avait été impressionné sans avoir été exposé à la lumière du soleil! Il en conclut que l'uranium émettait spontanément et sans s'épuiser des rayonnements invisibles, différents des rayons X. Le phénomène découvert est appelé **radioactivité** (du latin radius : rayon). À la suite des travaux d'Henri Becquerel, **Pierre et Marie Curie** isolèrent en 1898 le polonium et le radium, des éléments radioactifs inconnus présents dans le minerai d'uranium.

Dans la nature, il existe des noyaux stables et de noyaux instables ou radioactifs. Un noyau est instable (radioactif), quand les forces de répulsion entre les nucléons sont supérieures aux forces de cohésion.

Cours de Mme Selaimia Ferdjani

- a. Comment la radioactivité fut-elle découverte? Par qui?
- b. Différencier la radioactivité naturelle de la radioactivité artificielle.
- c. Donner la définition de la radioactivité.
- d. Quels sont les éléments caractéristiques de la radioactivité?

Objectifs

- Mettre en évidence et interpréter l'émission spontanée des particules par des noyaux radioactifs.
- Connaître les applications de la radioactivité ainsi que ses inconvénients liés à son utilisation.

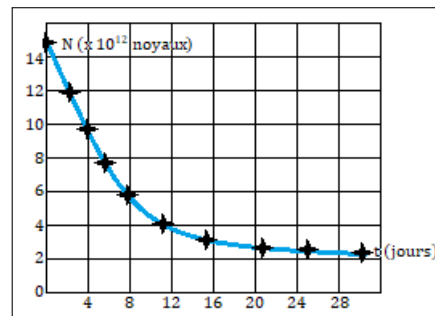
Séance 1

8.1 Radioactivité et Effets de l'exposition au rayonnement nucléaire

Activité N° 1

La courbe ci-contre donne les variations du nombre de noyaux N restant d'un échantillon d'iode 131 en fonction du temps.

- Écrire la loi de décroissance radioactive.
- Définir "période radioactive" puis, déterminer graphiquement celle de l'iode 131.
- Partir des données du graphe, calculer l'activité initiale A_0 (en becquerels) de l'iode 131.



Objectifs

- Définir : radioactivité ; période radioactive ; activité radioactive ; unité de masse atomique.
- Connaître les différentes émissions radioactives.
- Définir et calculer le bilan énergétique de désintégration.
- Définir et déterminer l'activité d'une source radioactive.
- Donner les effets du rayonnement dans l'organisme.
- Donner la différence entre irradiation et contamination.

Définitions

- Un **élément chimique** représente l'ensemble des atomes ayant le même numéro atomique Z .
- La **radioactivité** est l'émission spontanée des rayonnements ou des particules par certains noyaux.
Selon le Professeur Elie Younang de l'université de Yaoundé I, « la **radioactivité** la radioactivité est un phénomène par lequel, les noyaux atomiques instables évoluent vers des noyaux stables en émettant des rayonnements. »
- Un **nucléide** émettant spontanément (naturellement) des particules est appelé **radionucléide** ou **radioactif**.
- Un **nucléide** est un ensemble d'atomes ayant des noyaux identiques (même A , même Z et donc même N). C'est le cas par exemple du nucléide $^{12}_6\text{C}$

8.1.1. Le noyau atomique, rappels

a. Composition du noyau

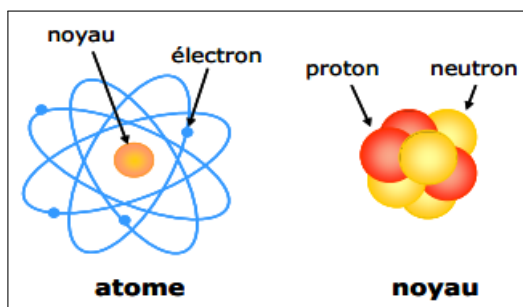


Figure 23.1 : Structure de l'atome et du noyau atomique

- Le noyau d'un atome est formé des particules appelées **nucléons** : **protons** et **neutrons**.



- Les protons sont caractérisés par : une masse $m_P = 1,67492 \times 10^{-27}$ kg et une charge $q_P = 1,6 \times 10^{-19}$ C.
- Les neutrons sont caractérisés par : une masse $m_N = 1,67492 \times 10^{-27}$ kg et une charge $q_n = 0$ C.
- Proton et neutron ont sensiblement la même masse : $m_P \approx m_N$.
- Le symbole ${}_Z^AX$ est celui de l'atome **X** ou celui du noyau de cet atome :
 - **Z** est le nombre de protons ou nombre de charge ou numéro atomique de l'atome **X**
 - **A** est le nombre de masse ou de nucléons
 - **N** est le nombre de neutrons.

$$A = N + Z \quad (23.1)$$

- Le nombre d'Avogadro $\mathcal{N}_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ constitue le nombre d'entités contenues dans une mole de quantité de matière.
- La masse m_0 d'un atome de masse molaire **M** est :

$$m_0 = \frac{M}{\mathcal{N}_A} \quad (23.2)$$

- Le nombre d'atomes dans un échantillon de masse m est donné par :

$$N = \frac{m_0}{m} = \frac{m}{M} \times \mathcal{N}_A \quad (20.3)$$

b. Isotopie

- On appelle **isotope** d'un élément, les nucléides ayant même **Z** mais de **A** différents.
- Les **isobares** sont des noyaux de même **A** mais de **Z** différents.
- Les **isotones** sont des nucléides de même **N**, mais de **A** et **Z** différents.

c. Défaut de masse-énergie de cohésion d'un atome

- La masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses des éléments constitutifs.

Soit ${}_Z^AX$ un nucléide. Posons :

- $m_X = m({}_Z^AX)$, la masse du noyau. On a :

$$m_X < Zm_P + (A - Z)m_N \quad (23.4)$$

- le défaut de masse

$$\Delta m = [Zm_P + (A - Z)m_N] - m_X \quad (23.5)$$

- L'énergie correspondant au défaut de masse est appelée **énergie de cohésion** ou **énergie de liaison** et vaut : (*Relation d'Einstein*)

$$\Delta E = \Delta m.c^2 \quad (23.6)$$

Définition : L'**énergie de liaison** est l'énergie que doit dégager le noyau pour maintenir la cohésion entre les nucléides. C'est aussi l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour séparer les nucléons qui le constituent.

- On en déduit aussi l'énergie de liaison par nucléon $E_{\ell/A}$:

$$E_{\ell/A} = \frac{\Delta E}{A} \quad (23.7)$$

qui caractérise la stabilité du noyau. Ainsi, plus cette énergie est élevée, plus le noyau est stable.

d. Système d'unités

En radioactivité, certaines unités usuelles (kg et le joule J) ne sont pas appropriées. On utilise pour cela :



- L'unité de masse atomique uma ou u qui est le douzième d'un atome de carbone 12, pour définir l'unité de la masse atomique :

$$1 u = \frac{1}{N_A}(g) = \frac{10^{-3}}{6,0221367 \cdot 10^{23}}(kg) = 1,6605402 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

- L'électron-volt (eV) pour définir l'énergie de l'unité atomique.

Définition. Un **électronvolt** est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré depuis le repos par une ddp d'un volt.

On utilise aussi bien les multiples et les sous-multiples de l'électronvolt pour dimensionner l'énergie atomique :

- un électronvolt (1 eV) = $1,6 \times 10^{-19}$ J
- Un mégaelectronvolt (1 MeV) = 10^6 eV = $1,6 \times 10^{-13}$ J qui est l'unité la plus utilisée.

Remarque.

À tout défaut de masse correspond une énergie :

► L'énergie de masse d'un noyau, est son énergie au repos : $E_0 = m_0 c^2$ (23.8) où m_0 est la masse du noyau au repos.

► Une particule est dite relativiste si $\frac{E_C}{E_0} > 10^{-2}$ ou si $\frac{v}{c} > 0,014$

► La quantité de mouvement $P = m \cdot v$ (23.9), s'exprime en MeV/c car la masse m s'exprime en MeV/c^2 et de plus, $1 u = 931,5 \text{ MeV}/c^2$

Exemple 23.1

On donne ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ et la masse de son noyau 225,9977 u.

- Déterminer la composition de ce noyau.
- Calculer en u son défaut de masse.
- Calculer en joules, et en MeV, son énergie de liaison.

$$m_p = 1,007 \text{ u} ; m_n = 1,009 \text{ u}.$$

Solution 23.1

$$m_{\text{noyau}} = 225,9977 \text{ u}.$$

- Composition du noyau :

- $A = 226$, nombre de masse
- $Z = 88$, nombre de charge
- $N = A - Z = 138$, nombre de neutrons.

- Calculons en U, son défaut de masse Δm

$$\Delta m = (Zm_p + Nm_n) - m_{\text{noyau}}$$

$$\Delta m = 88 \times 1,007 + 138 \times 1,009 - 225,9977$$

$$\Delta m = 1,8603 \text{ u}.$$

- Calculons en J et en MeV son énergie de liaison E_l .

$$E_l = \Delta m \cdot c^2 = 1,8603 \cdot c^2 = 1,8603 \times 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2} \cdot c^2 = 1732,87 \text{ MeV}.$$

$$E_l = 1732,87 \text{ MeV} = 3292,453 \cdot 10^{-13} \text{ J}.$$



8.1.2. Composition d'un rayonnement radioactif

Lorsqu'on émet un rayonnement émis par un mélange de substance radioactive à un champ électrique (fig. 23.2. a) ou magnétique (fig. 23.2.b), on lit sur l'écran d'observation quatre impacts.

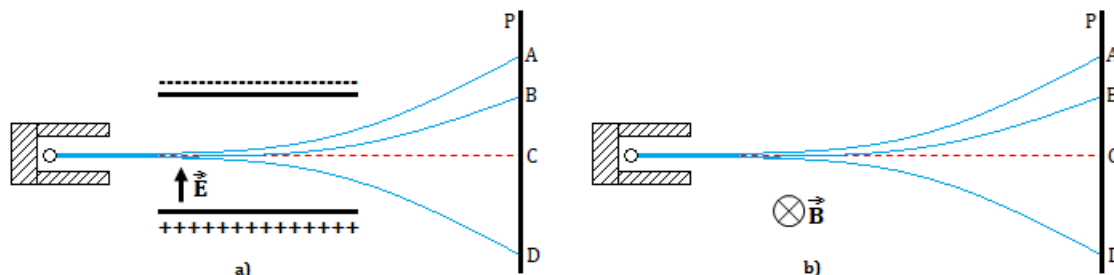


Figure 23.2 : Dispositif expérimental



En l'absence de champ, l'impact du rayonnement se fait en C (dans l'axe de la cavité). En présence d'un champ électrique ou d'un champ magnétique, la plaque photographique montre quatre impacts : A, B, C et D.

Les champs électrique et magnétique séparent donc les rayonnements en quatre parties : trois déviées par les champs α , β^- , β^+ et une γ non déviées.

8.1.3. Mécanisme des transformations radioactives

- Certains noyaux radioactifs (noyaux pères ${}^A_ZX$), émettent des particules en se transformant en d'autres noyaux appelés noyaux fils ${}^{A'}_{Z'}Y$.
- Lors d'une désintégration radioactive, il y a :
 - conservation du nombre de masse A
 - conservation du nombre de charge Z
 - conservation d'énergie

On parle alors de **lois de conservation**.

a. Radioactivité α

- La radioactivité α est l'émission des noyaux d'hélium ${}^4_2He^+$ que l'on notera simplement ${}^4_2He$
- L'équation traduisant cette désintégration est la suivante :



$$\begin{cases} \text{loi de conservation du nombre de masse : } A' = A - 4 \\ \text{loi de conservation du nombre de charge : } Z' = Z - 2 \end{cases} \quad (23.9)$$

(23.9) dans (23.8), on conduit à :



Exemple : ${}^{238}_{92}U \longrightarrow {}^4_2He + {}^{234}_{90}Th$ (Th = Thorium)

- L'énergie libérée au cours de la désintégration α est :

$$\Delta E = |m_Y + m_{He} - m_X|.c^2 \quad (23.11)$$

Cette énergie se conserve sous forme cinétique par les particule α et les noyaux fils.

Remarque.

► La quantité $\Delta m = |\sum m_{\text{produits}} - \sum m_{\text{réactifs}}|$ (23.12)

représente la perte de masse lors d'une désintégration radioactive.

► On montre que les particules α emportent la presque totalité de cette énergie (*énergie libérée*) car leur masse est très faible par rapport à celle du noyau fils.

b. Radioactivité β^-

- Dans le cas de la radioactivité β^- , le noyau émet un électron ${}^0_{-1}e$ qui la particule β^- .
- L'équation de cette désintégration est la suivante :



- Les électrons émis au cours de cette désintégration sont des particules relativistes car sont animées de très grande vitesse.
- On constate qu'il n'y a pas conservation d'énergie totale du système d'où l'hypothèse de l'existence d'une troisième particule sans charge, ni masse qui accompagne l'émission de l'électron. Cette particule est appelée **antineutrino** ${}^0_0\bar{\nu}$, on alors l'équation générale suivante :





- L'électron, n'étant pas présent dans le noyau, provient de la transformation d'un neutron ${}^1_0n$ en proton ${}^1_1P$ selon l'équation :



c. Radioactivité β^+

- C'est une radioactivité artificielle (*provoquée* i.e. qu'elle n'est pas spontanée).
- Le noyau père émet un proton encore appelé **anti-électron** ${}^0_1e$, les particules β^+ sont donc des **positons**.
- L'équation de cette désintégration est la suivante :

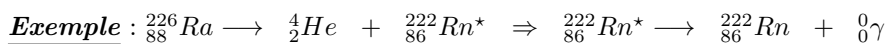


- Le positon, n'étant pas présent dans le noyau, provient de la transformation d'un proton ${}^1_1P$ en neutron ${}^1_0n$ selon l'équation :



d. Radioactivité γ

- Lorsqu'un noyau subit la désintégration α , β^- ou β^+ , il donne un noyau fils dans un état excité ${}^{A'}_{Z'}Y^*$. Le passage de l'état excité Y^* à l'état fondamental (état stable) s'accompagne d'un photon γ (*qui a une charge électrique et une masse nulle*) selon l'équation :



8.1.4. Décroissance radioactive

a. Activité d'un radionucléide

- L'**activité A** (en becquerels Bq) d'un élément radioactif, est le nombre de désintégration d'un échantillon de cet élément par unité de temps :

$$A = -\frac{dN(t)}{dt} \quad (23.19)$$

où $N(t)$ est le nombre de noyaux présents à l'instant t .

- Le nombre de désintégration **A** est proportionnel au nombre de noyaux **N** présents à l'instant t :

$$A = \lambda N \quad (23.20)$$

où λ (en s^{-1}), est la **constante radioactive**.

- En comparant (23.20) et (23.19), on obtient une équation de premier ordre : $-\lambda N = \frac{dN(t)}{dt}$, de solution générale :

$$N = Ce^{-\lambda t} \quad (23.21)$$

où C est constante d'intégration à déterminer avec les conditions initiales.

À $t = 0$, $N(0) = C = N_0$ = nombre de noyaux à l'instant initial (à $t = 0$), ce qui conduit à :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (23.22)$$

- L'équation (23.22) caractérise la **loi de décroissance radioactive**.
- Le nombre de noyaux ayant disparu est :

$$N' = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}) \quad (23.23)$$

- Si m désigne la masse (respectivement la quantité de matière n) de l'échantillon à l'instant t et m_0 (resp. n_0) sa masse initiale (resp. sa quantité de matière initiale), on aura :

$$\begin{cases} m = m_0 e^{-\lambda t} \\ n = n_0 e^{-\lambda t} \end{cases} \quad (23.24)$$



- On en déduit la relation liant le nombre de noyaux N à l'instant t , le nombre de mole n et la constante d'Avogadro $\mathcal{N}_A$ par :

$$\begin{cases} N = n \times \mathcal{N}_A \\ n = \frac{m}{M} \end{cases} \quad (23.25)$$

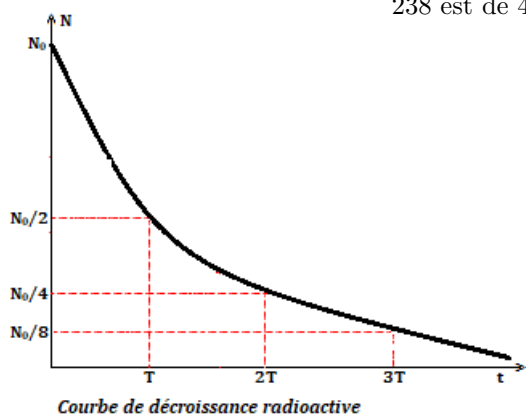
b. Période ou demi-vie radioactive

- La **période ou demi-vie** radioactive d'un radionucléide, est la durée T nécessaire pour que la moitié des noyaux, initialement présents se désintègrent.
- On a : $N = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t}$, soit :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (23.26)$$

$$\begin{cases} N = \frac{N_0}{2} \\ n = \frac{t}{T} \end{cases} \quad (23.27)$$

La période varie considérablement d'un radionucléide à l'autre, comme l'indique le tableau ci-dessous. Ainsi, celle de l'uranium 238 est de $4,5 \cdot 10^9$ ans, celle du bismuth 215 de 8 min !



Nucléide	Période
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$ ans
^{232}Th	10^8 ans
^{215}Bi	8 min
^{210}Po	140 jours
^{14}C	5 600 ans
Période de quelques radioanucléides	

- Détermination expérimentale de N_0 et λ .

La courbe $\ln(N) = f(t)$ est une droite affine de la forme $\ln(N) = -\lambda t + \ln(N_0) = at + b$, on a donc :

$$\begin{cases} \lambda = -a = -\frac{\Delta \ln(N)}{\Delta t} \\ N_0 = e^b \end{cases} \quad (23.28)$$

Exemple 23.2

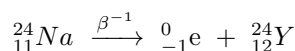
Le sodium Na ($A = 24$; $Z = 11$) est radioactif β^- et de période $T = 15$ h.

- Écrire l'équation-bilan de la désintégration radioactive de ce nucléide.
- Nommer le noyau formé sachant que les numéros atomique du néon et du magnésium sont respectivement 10 et 12.
- On dispose initialement de 10^{20} noyaux de sodium. Combien de noyaux en reste-t-il après

15 h ? 30 h ?

Solution 23.2

- Équation bilan de désintégration :



- Le noyau formé Y est le magnésium car $Z_{Mg} = 12$: $^{24}_{12}\text{Mg}$.
- On a : $N_0 = 10^{20}$ noyaux ; déterminons le



nombre N de noyaux restant.

On sait : $N = \frac{N_0}{2^n}$ et $n = \frac{t}{T}$.

– À $t = 15$ h, $n = 1$, il reste alors que $N =$

5.10^{19} noyaux.

– À $t = 30$ h, $n = 2$, il reste alors que $N =$
 25.10^{18} noyaux

8.1.5. Familles radioactives

Au cours d'une désintégration radioactive, un nucléide se transforme en un autre. Si ce dernier est radioactif, il donne naissance à un nouveau nucléide et ainsi de suite, jusqu'à obtention d'un **isotope stable**.

Une **famille radioactive** se compose du noyau-père et de tous ses descendants.

Les éléments radioactifs naturels sont classés en quatre familles : neptunium, uranium-radium, actinium et thorium.

8.1.6. Effets de l'exposition au rayonnement nucléaire

L'homme a, de tout temps été exposé à des rayonnements naturels (*rayons cosmiques, radioactivité du sol, ...*) sans danger pour sa santé.

L'utilisation actuelle de substances radioactives (*médecine, centrales nucléaires, bombes, ...*) modifie les données du problème. En effet, l'**irradiation** - qui est l'atteinte à distance par des radiations nucléaires - des tissus humains peut entraîner des effets somatiques (lésions d'organes) et génétiques (action sur la descendance du sujet irradié). Une irradiation massive peut entraîner la mort.

Il convient donc de définir dans quelles conditions des précautions doivent être prises. On appelle **dose absorbée**, l'énergie cédée au tissu par le rayonnement par unité de masse. Elle s'exprime en **gray** (1 J/kg) ou en **rad** (0,01 J/kg).

Les effets des différents rayonnements ne sont pas identiques, à énergie égale. On définit donc l'**équivalent-dose** qui est égale à la dose multipliée par un facteur de qualité qui dépend du rayonnement reçu. L'équivalent-dose s'exprime en **rem**.

Les effets des radiations sont cumulatifs. Un homme qui reçoit moins de 100 rems, ne présentera aucun trouble. Celui qui en reçoit plus de 900 mourra à plus ou moins longue échéance.

Une personne habitant au voisinage d'une centrale nucléaire reçoit environ 3 mrem/an. S'il vit jusqu'à 80 ans, il aura reçu 240 mrem = 0,24 rem, à peu près la même dose que celui qui porte constamment une montre à cadran lumineux, ce qui est infime.

En revanche, les travailleurs qui sont en permanence en contact (**contamination**) avec les substances radioactives (*dans le cas d'une centrale nucléaire*) doivent contrôler régulièrement leur irradiation afin qu'elle ne dépasse pas les limites permises.

On appelle **contamination**, l'atteinte directe par contact des produits radioactifs.

Dans les centrales nucléaires, les substances radioactives sont isolées par des parois de plomb très épaisses qui arrêtent les rayonnements.

Bilingual Game

Expression française	English expression	Expression française	English expression
Radioactivité	Radioactivity	Contamination	Contamination
Demi-période	Half period	Énergie de masse	Mass energy



Séance 2

8.2 Les réactions nucléaires provoquées et méthodes de radioprotection

Activité N°2

Document 1

L'uranium 235 est le seul atome à l'état naturel dont le noyau se brise en deux noyaux plus petits sous l'effet d'un bombardement de neutronique. On dit également que l'uranium 235 est **fissile**. Cette transformation est une réaction nucléaire que l'on appelle **réaction de fission**.

Document 2

On se propose de commenter un extrait d'article du dossier hors série de la revue « *Pour la science* » de janvier 2001. « ...La phase de fusion (ou combustion) de l'hydrogène est la plus longue de la vie des étoiles. Si la masse stellaire est comparable ou inférieure à celle du Soleil, la température centrale est inférieure à une vingtaine de millions de degrés. Dans ces conditions, la fusion de deux noyaux d'hydrogène (ou protons) produit un noyau de Deutérium qui capture un autre proton et forme un noyau d'hélium 3 ... Finalement, deux noyaux d'hélium 3 fusionnent en un noyau d'hélium 4 ... L'ensemble de ces réactions constitue la première des chaînes proton - proton ou chaîne p-p, la plus importante dans le cas du Soleil ... ».

À l'aide des documents ci-dessus et de vos connaissances ; répondez aux questions suivantes :

- a. De quoi parle chacun de ces documents ?
- b. Présenter brièvement les phénomènes nucléaires décrits.
- c. Quel nom commun donne-t-on aux phénomènes des documents 1 et 2 ?
- d. Définir alors : transmutation - fission - fusion.

Objectifs

- Définir : transmutation, fission, fusion, coefficient d'atténuation linéique.
- Présenter les différents types de réaction nucléaire provoquée : définition et équation bilan dans les cas simples.
- Donner la relation entre N_0 , nombre de photons, $N(x)$ nombre de photons n'ayant subi aucune interaction dans un matériau d'épaisseur x et le coefficient d'atténuation μ .
- Citer quelques domaines d'application de la radioactivité.

Introduction

Jusqu'ici nous n'avons étudié que des réactions nucléaires **spontanées**, i.e. celles se produisant sans aucune action extérieure : naturellement.

Les physiciens ont découvert qu'il était possible de provoquer des réactions nucléaires, en bombardant des noyaux appelés **noyaux-cibles**, à l'aide de particules. Selon la nature des noyaux-cibles et des particules, ainsi que l'énergie de ces dernières, on obtient différents types de réactions.

8.2.1. Les transmutations

Lorsqu'une particule neutre en collision avec un noyau, il peut apparaître un noyau nouveau.

La première transmutation provoquée a été réalisée par **Frédéric et Irène Joliot-Curie** qui bom-



bardèrent une feuille d'aluminium à l'aide de particule α . Le phosphore 30 obtenu au cours de la réaction



est radioactif β^+ . Ce fut la découverte de la **radioactivité artificielle**.

Le plus souvent, les particules utilisées pour provoquer des transmutations sont des neutrons.

La plupart des radionucléides utilisés dans le traitement des cancers ou comme traceurs radioactifs, sont obtenus par transmutation provoquée.

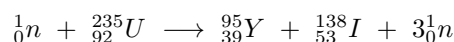
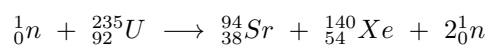
On distingue de types de transmutation : la fusion et la fission.

8.2.2. Les fissions nucléaires

Une **fission** est la rupture d'un noyau sous l'action d'un neutron de faible énergie cinétique (*de l'ordre de 0,1 eV*). Elle se rencontre chez les nucléides lourds, dits **fissiles**, car les noyaux peuvent éclater sous l'action des neutrons. On définit alors la **fission** comme étant une réaction au cours de laquelle, il y a rupture d'un noyau lourd sous l'action d'un neutron (*projectile*) pour donner un noyau plus léger.

Un seul nucléide naturel est fissile : c'est l'uranium 235. Parmi les nucléides artificiels, on peut citer le polonium 239.

Exemples



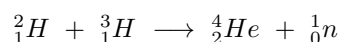
Les noyaux formés sont généralement radioactifs β^- . Les réactions de fission libèrent de grande quantité d'énergie. Les neutrons émis au cours de la fission peuvent, à leur tour, provoquer la fission d'autres noyaux : on obtient alors une **réaction en chaîne**.

Si la réaction en chaîne n'est pas contrôlée, une énergie énorme est libérée en quelques secondes : il y a explosion brutale. C'est ce qui se passe dans la **bombe A** ou bombe atomique.

On peut contrôler la réaction en ralentissant les neutrons émis, par l'eau, le graphite,... de sorte qu'un nombre déterminé de neutrons sert à produire une nouvelles fission. *Les réactions en chaîne contrôlées ont lieu dans les réacteurs nucléaires.*

8.2.3. La fusion nucléaire

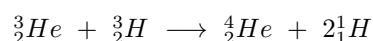
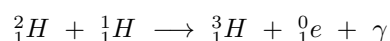
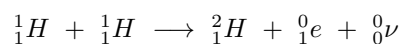
Une **réaction de fusion** est une réaction au cours de laquelle deux noyaux légers fusionnent pour donner un noyau plus lourd. C'est l'exemple de la fusion du deutérium et du tritium qui fusionne pour donner le noyau d'hélium :



La réaction de fusion est difficile à réaliser car elle implique le rapprochement de deux noyaux, donc de deux particules positives. Il faut donc à ces noyaux, une très grande énergie (d'ordre environ 200 keV), d'où la nécessité d'une température de l'ordre de 10^8 K ! C'est pourquoi les réactions de fusion sont appelées **réactions thermonucléaires**. À cette température, la matière est sous forme de **plasma**, gaz ionisé formé de noyaux et d'électrons.

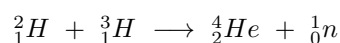
Les réactions de fusion libèrent des énergies considérables. Ainsi l'énergie libérée par le Soleil et, d'une façon générale, par les étoiles, provient des réactions de fusion nucléaire.

Comme exemples de réactions produites dans le Soleil, nous avons :



Ce processus s'appelle le **cycle du Soleil**.

Dans les bombes H (bombe à hydrogène), il y a fusion entre le deutérium et le tritium



Pour porter le mélange à haute température, on utilise une petite bombe A.

Des études sont entreprises pour contrôler la fusion utilisée dans la bombe H ; ce qui permettrait d'alimenter des réacteurs. Pour cela il faut **confiner** = **piéger** le plasma dans l'espace prévu pour la réaction. Deux méthodes sont à cet effet en étude :



- le **confinement magnétique** : le plasma est confiné dans un espace grâce à des champs magnétiques
- le **confinement inertiel** : les particules sont chauffées et comprimées grâce à des faisceaux lasers.

8.2.4. Méthodes de radioprotection - coefficient d'atténuation

Après une désintégration alpha ou bêta, le nouveau noyau n'est pas toujours dans un état d'équilibre énergétique, il possède encore "un trop plein d'énergie", on dit qu'il est **excité**.

- Le rayonnement gamma (γ), qui suit généralement une émission alpha ou bêta, est issu du noyau de l'atome et correspond à une **désexcitation** de ce dernier.
- Pour se « débarrasser » de cet excédent en énergie, il va émettre un ou plusieurs rayonnements γ d'énergie déterminée et caractéristique du noyau et donc de l'atome en présence.

Ces résultats donnent lieu à deux phénomènes : l'effet photoélectrique et l'effet Compton.

a. L'effet photoélectrique

- En considérant l'effet photoélectrique, le rayon γ , d'énergie

$$E = h\nu \quad (23.29)$$

interagit avec un électron fortement lié au noyau.

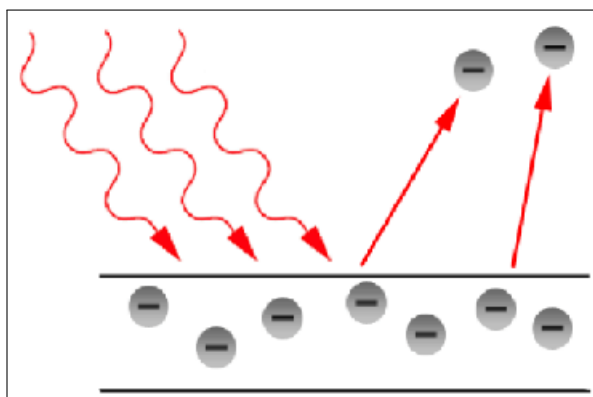
- $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Js = constante de Planck
- $\nu = \frac{c}{\lambda}$ = fréquence

- L'électron recevra une énergie

$$E' = h\nu - W \quad (23.30)$$

où W représente l'énergie nécessaire à arracher l'électron du nuage électronique et E' l'énergie cinétique reçue par l'électron.

- Dans tous les cas, l'énergie $h\nu$ (de l'ordre du MeV) est très supérieure à l'énergie W (de l'ordre du keV)



- L'électron est expulsé, comme dans le cas d'une conversion interne, mais avec une probabilité et une énergie différentes.
- Le mécanisme photoélectrique est différent de la Conversion Interne.
- La conversion interne est un transfert direct d'énergie, tandis que l'effet photoélectrique implique un photon intermédiaire

b. L'effet Compton

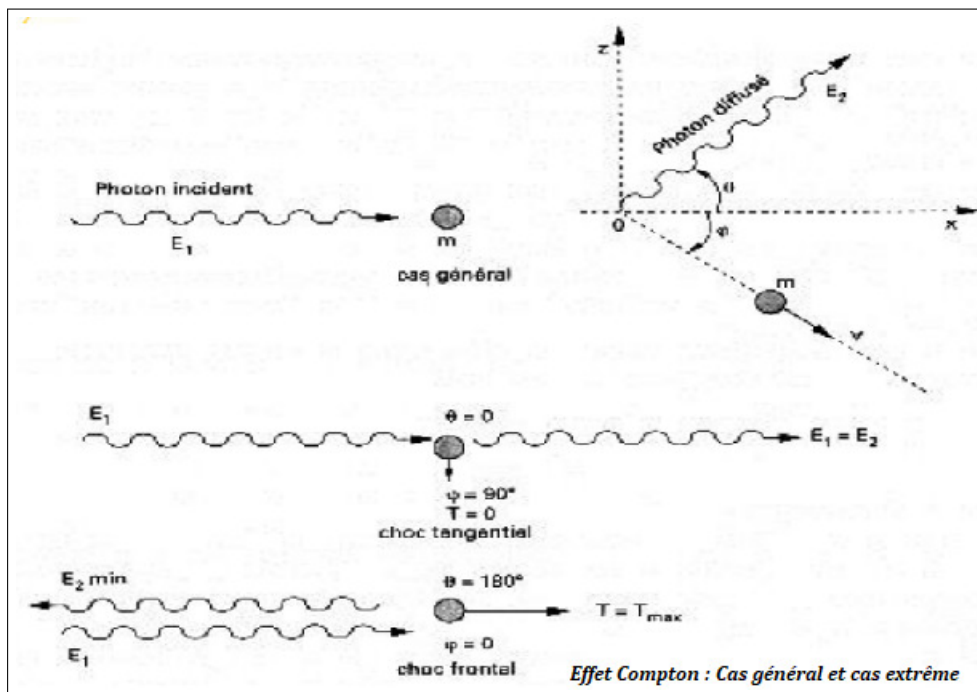
Dans ce type d'interaction, le rayon γ interagit avec un électron dit "libre" c'est-à-dire très périphérique dans le cortège électronique. Le photon incident disparaît et il en résulte :

- l'apparition d'un rayonnement γ' (dit "diffusé Compton") partant avec un certain angle (τ) par rapport à la trajectoire du photon incident γ .

l'électron quant à lui reçoit une certaine quantité d'énergie et est éjecté avec un angle ϕ .



- L'énergie $h\nu$ se répartit donc entre l'électron cible et le diffusé Compton. Cette répartition dépend de la valeur de l'angle τ .
- Dans tous les cas, l'énergie emportée par le diffusé n'est jamais nulle, en effet quel que soit l'angle τ , l'électron ne reçoit jamais toute l'énergie du photon incident.



- L'interaction du photon γ se fait avec le noyau de l'atome cible.
- Il en résulte l'apparition d'une **paire d'électrons**, un électron négatif et un électron positif (positon).
- Cela nécessite que l'énergie du photon incident soit au moins égale à l'énergie nécessaire à la création de cette paire, c'est-à-dire au double de la masse d'un électron $2m_e c^2$ soit 1.02 MeV.
- Si cette énergie est supérieure à cette valeur, le « surplus » sera communiqué aux deux électrons sous forme d'énergie cinétique.

- La probabilité d'interaction par effet Compton est à peu près indépendante du numéro atomique de la cible.
- En revanche, celle par effet photoélectrique et production de paires lui sont proportionnelles.
- Donc le domaine d'énergie dans lequel l'effet Compton est dominant est d'autant plus important que le numéro atomique de la cible est plus faible.
- Ainsi, dans les applications usuelles des rayons X et des radionucléides émetteurs γ (dont les énergies se situent entre 50 keV et quelques MeV) l'effet Compton est prédominant.
- Au contraire des particules chargées qui cèdent progressivement leur énergie à la matière, les rayonnements électromagnétiques disparaissent brutalement à la suite d'une interaction.
- On ne peut plus parler de ralentissement, il faut introduire la notion d'atténuation en nombre.

c. Loi d'atténuation

- Dans le cas d'un faisceau monochromatique parallèle de rayons X ou γ , le nombre de rayons émergent (I) n'ayant subi aucune interaction dans la traversée d'un écran d'épaisseur x est lié au nombre de rayons incidents (I_0) par la relation :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad (23.30)$$

- μ est le **coefficient linéique global d'atténuation** dont l'unité est cm^{-1}
- μ dépend de l'énergie des photons incidents et de la nature du matériau.

- Ce coefficient est fonction de :



- la nature du matériau
- l'état physique du matériau (eau $\neq$ vapeur)
- L'énergie des photons
- C'est pourquoi, il y a 2 coefficients :
 - le **coefficient d'atténuation linéique** μ
 - le **coefficient d'atténuation massique** μ_m

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (23.31)$$

- Le coefficient d'atténuation massique μ_m permet de traduire l'état physique du matériau écran :

$$\mu_m (cm^2/g) = \frac{\mu (cm^{-1})}{\rho (g/cm^3)} \quad (23.32)$$

- Ainsi, les épaisseurs d'écran sont souvent traduites en $cm^2.g^{-1}$.
- Les rayonnements sont atténués dans l'écran :
 - $N(x)$: nombre de photons n'ayant subi aucune interaction dans un matériau d'épaisseur x
 - N_0 : nombre de photons initial
 - μ : coefficient linéique d'atténuation
 - μ_m : coefficient massique d'atténuation
 - x : épaisseur du matériau de l'écran

$$\begin{cases} N = N_0 \cdot e^{-\mu x} \\ N = N_0 \cdot e^{-(\mu_m \rho) \cdot x} \end{cases} \quad (23.33)$$

8.2.5. Quelques domaines d'utilisation des radionucléides

L'application de la radioactivité se fait dans plusieurs domaines notamment :

- En chimie : elle permet d'étudier l'évolution de certaines réactions ;
- Dans l'industrie : l'utilisation des rayons γ (*gammapgraphie*) pour explorer les corps opaques, permet par exemple de vérifier les points d'usure, les soudures des pièces métalliques et de détecter les fuites dans les canalisations souterraines telles que les pipelines.
- En imagerie médicale ; l'utilisation des rayonnements permet de traiter les cancers (*curiethérapie*) ; permet aussi d'étudier le fonctionnement de la thyroïde (*radiothérapie*) ; la destruction des micro-organismes tels que les bactéries, les champignons (*radio-stérilisation*) ;
- En agriculture, elle permet d'obtenir des organismes mieux adaptés aux parasites : on parle d'organismes génétiquement modifiés (OGM) ;
- La **datation au carbone 14** qui permet de connaître l'âge des fossiles.

Pour dater un échantillon contenant du carbone, on compare son activité à celle d'un échantillon de bois frais de même masse. Moins il reste de carbone dans le fossile à dater, plus la mort est ancienne.