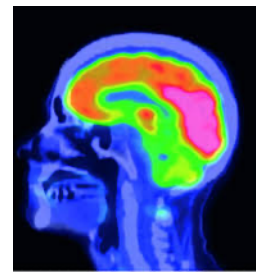
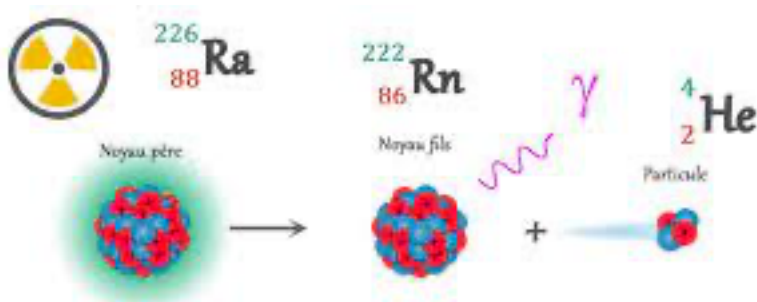




P10

Transformations nucléaires

- I. La désintégration radioactive
- II. La loi de décroissance radioactive
- III. Applications

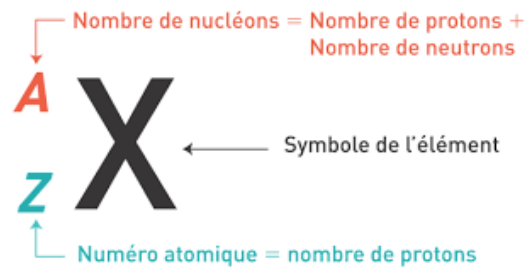
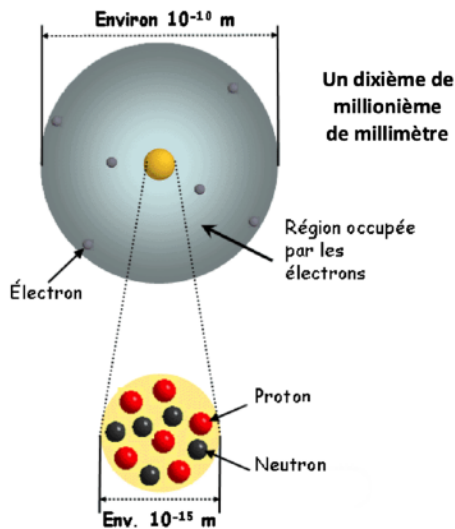


P10 - TRANSFORMATIONS NUCLEAIRES

I. La désintégration radioactive

1. Rappel : Le noyau des atomes

a. Composition des noyaux atomiques



Le noyau est constitué de particules appelées **nucléons** qui regroupent **les protons et les neutrons**.

On appelle **A** le nombre total de nucléons du noyau (ou encore **nombre de masse**).

On appelle **Z** le nombre de **protons** du noyau (ou encore **numéro atomique**).

On appelle **N** le nombre de **neutrons** du noyau, autrement dit, $N = A - Z$.

En physique nucléaire, le noyau d'un élément chimique X comportant A nucléons et Z protons est représenté par la notation ${}^A_Z\text{X}$

Exemple, le noyau ${}^{235}_{92}\text{U}$ contient 235 nucléons dont 92 protons. Il contient par conséquent $235 - 92 = 143$ neutrons

b. Isotopie

On appelle **isotopes** des noyaux possédant le même nombre de protons mais des nombres de neutrons différents.

La relation entre ces noyaux est appelée isotopie.

Exemple : ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ et ${}^3_1\text{H}$ sont trois isotopes de l'hydrogène.

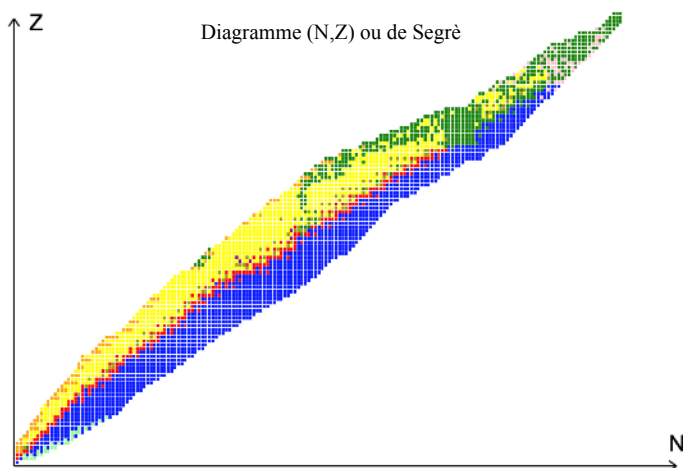
Ces trois noyaux contiennent tous 1 seul proton mais ils contiennent respectivement 0, 1 et 2 neutrons.

c. Vallée de stabilité des noyaux

Au sein des noyaux, deux **interactions fondamentales** sont à l'œuvre : l'**interaction forte** qui est attractive et lie les nucléons entre eux (à très courte portée) et l'**interaction électromagnétique** qui est répulsive entre les protons.

La physique quantique nous apprend en outre que plus un noyau contient de particules du même type, plus il est instable.

Cela nous permet de comprendre la répartition des noyaux stables dans le diagramme (N, Z) ci-après, représentant tous les isotopes de tous les éléments chimiques en fonction de la composition des noyaux



Schématiquement, pour $A < 50$, les noyaux stables comportent à peu près autant de neutrons que de protons.

Pour les noyaux plus lourds, les noyaux stables présentent plus de neutrons que de protons.

Cette [infographie](#) du CEA est particulièrement bien exécutée pour expliquer ce diagramme.

2. La radioactivité

a. Qu'est-ce que la radioactivité ?

Lorsqu'un noyau ${}^A_Z X$ est instable, il subit une transformation **spontanée, aléatoire et inéluctable** aboutissant à la formation d'un nouveau noyau, plus stable ${}^{A'}_{Z'} Y$

Ce phénomène est appelé **radioactivité**.

Une transformation mettant en jeu des noyaux radioactifs est une **réaction nucléaire**.

Les désintégrations radioactives sont aléatoires. Elles ont lieu au hasard et la probabilité qu'un noyau se désintègre pendant une durée donnée est indépendante de l'âge du noyau. On utilise souvent l'expression "un noyau radioactif ne vieillit pas ».

Exemple : Un noyau de ${}^{14}_6 C$ apparu il y a 1000 ans a exactement la même probabilité de se désintégrer dans l'heure qui vient qu'un noyau identique formé il y a seulement 5 minutes.

b. Lois de conservation ou lois de Soddy

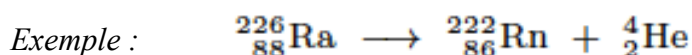
Au cours d'une transformation nucléaire, il y a conservation de la charge électrique totale.

Au cours d'une transformation nucléaire, il y a conservation du nombre total de nucléons.

c. Radioactivité α

La **radioactivité alpha** consiste en une transformation nucléaire accompagnée de l'émission d'une particule ou **noyau d'hélium** de symbole ${}^4_2 He$

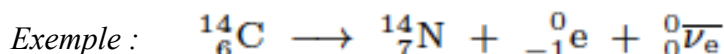
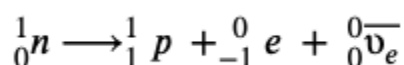
Elle concerne essentiellement des noyaux lourds ayant un excès de nucléons. Ces noyaux perdent deux protons et deux neutrons pour se rapprocher de **la vallée de stabilité**.



d. Radioactivité β^-

La **radioactivité bêta moins** consiste en une transformation nucléaire accompagnée de l'émission d'un **électron** de symbole ${}^0_{-1} e$

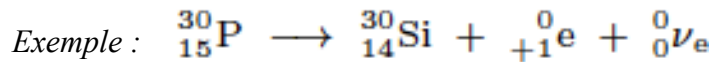
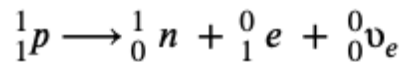
Elle concerne essentiellement des noyaux ayant un excès de neutrons. Dans le noyau, on assiste à la transformation suivante :



e. Radioactivité β^+

La **radioactivité bêta plus** consiste en une transformation nucléaire accompagnée de l'émission d'un **positon** de symbole 0_1e

Elle concerne essentiellement des noyaux ayant un excès de protons. Dans le noyau, on assiste à la transformation suivante :

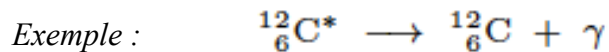


f. Émission γ

Le noyau fils produit lors des réactions nucléaires est souvent produit dans un état instable de haute énergie que l'on appelle état excité et que l'on note à l'aide d'un astérisque : ${}^A_{Z'}Y^*$

Ce noyau fils excité se désexcite pour rejoindre un état plus stable en émettant un rayonnement électromagnétique de très petite longueur d'onde (donc de forte énergie) appelé rayonnement gamma.

L'émission γ correspond donc à la désexcitation d'un noyau, accompagnée de l'émission d'un photon très énergétique appelé photon γ .



II. La loi de décroissance radioactive

1. Expression de la loi

Soit $N(t)$ le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant t dans un échantillon de matière et N_0 le nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant $t = 0$.

La loi de décroissance radioactive s'écrit alors :

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

Dans cette loi, λ est appelée **constante radioactive**.

Il s'agit d'une constante positive, exprimée en s^{-1} .

La constante radioactive est caractéristique du noyau radioactif et du mode de désintégration.

2. Démonstration de la loi

La physique nucléaire nous apprend que, pour un échantillon de matière ne contenant qu'un seul type de noyaux radioactifs :

➔ La variation moyenne $dN(t)$ du nombre de noyaux entre les instants très proches t et $t + dt$ est négative et proportionnelle au nombre de noyaux présents à l'instant t et à la durée infinitésimale dt

➔ Le coefficient de proportionnalité est noté λ et ne dépend que du type de noyaux et du mode de désintégration considéré.

Ainsi, nous avons : $dN(t) = N(t + dt) - N(t) = -\lambda \times N(t) \times dt$

$$\Leftrightarrow \frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \times N(t)$$

Nous obtenons une équation différentielle du premier ordre dont la solution est la loi donnée.

3. Demi-vie

Pour un type de noyaux radioactifs donné, **la demi-vie** $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle la population de noyaux est divisée par deux.

Cela se traduit mathématiquement par : $N(t + t_{1/2}) = \frac{N(t)}{2}$

$$\Leftrightarrow N_0 \times e^{-\lambda \times (t+t_{1/2})} = \frac{N_0 \times e^{-\lambda \times t}}{2}$$

$$\Leftrightarrow N_0 \times e^{-\lambda \times t} \times e^{-\lambda \times t_{1/2}} = \frac{N_0 \times e^{-\lambda \times t}}{2}$$

$$\Leftrightarrow e^{-\lambda \times t_{1/2}} = \frac{1}{2}$$

$$\Leftrightarrow -\lambda \times t_{1/2} = -\ln 2$$

$$\Leftrightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Le temps de demi-vie est indépendant du temps ! Il ne dépend que du type de noyaux radioactifs.

4. Activité

L'activité A(t) d'une quantité donnée d'une substance radioactive mesure le nombre moyen de désintégrations par unité de temps au sein de l'échantillon.

L'activité s'exprime en *becquerels*, de symbole **Bq**, un becquerel correspondant à une désintégration par seconde.

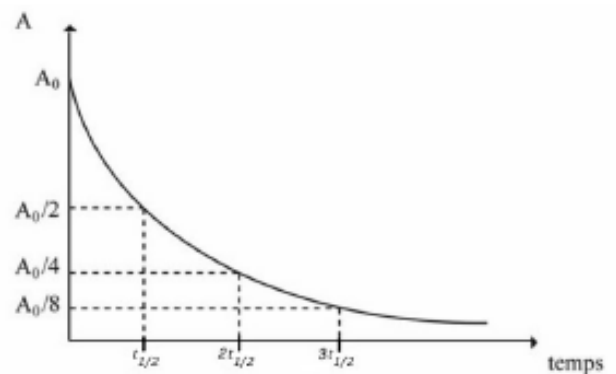
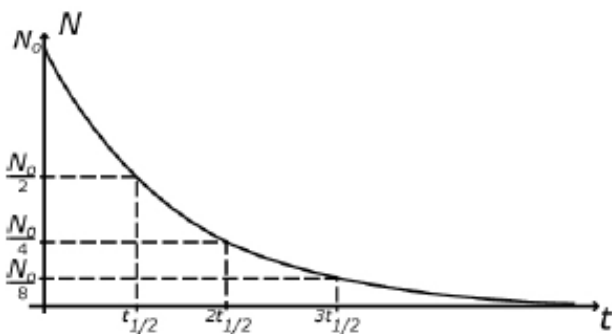
Par définition, on a donc : $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda \times N(t)$

$$A(t) = \lambda \times N(t)$$

A en Bq
λ en s⁻¹

Remarque : $A(t) = \lambda \times N(t) = \lambda \times N_0 \times e^{-\lambda \times t}$

L'activité suit donc également une loi de décroissance exponentielle, au même titre que le nombre de noyaux radioactifs.



III. Applications

1. Radioactivité naturelle

De nombreux radio-isotopes naturels sont présents dans notre environnement.

L'atmosphère contient par exemple du $^{14}_6\text{C}$ ou du $^{222}_{86}\text{Rn}$

La croûte terrestre renferme par exemple $^{238}_{92}\text{U}$, $^{235}_{92}\text{U}$, $^{226}_{88}\text{Ra}$

Dans notre alimentation, on trouve notamment du $^{40}_{19}\text{K}$

Nous sommes plongés dans un bain de radioactivité ambiante, l'ensemble représentant de faibles rayonnements.

Exemples : 1 kg de granite présente une activité de 1000 Bq, un être humain de 70 kg a une activité de 8000 Bq, 1 L de lait possède une activité de 80 Bq, etc...

2. Application à la datation

La quantité de carbone 14 sur Terre est stable car il est produit en permanence dans la haute atmosphère. Cette production compense la perte due à la désintégration.

Le rapport isotopique $\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}}$ reste constant pour le CO_2 atmosphérique.

Ce rapport reste constant dans les tissus vivants.

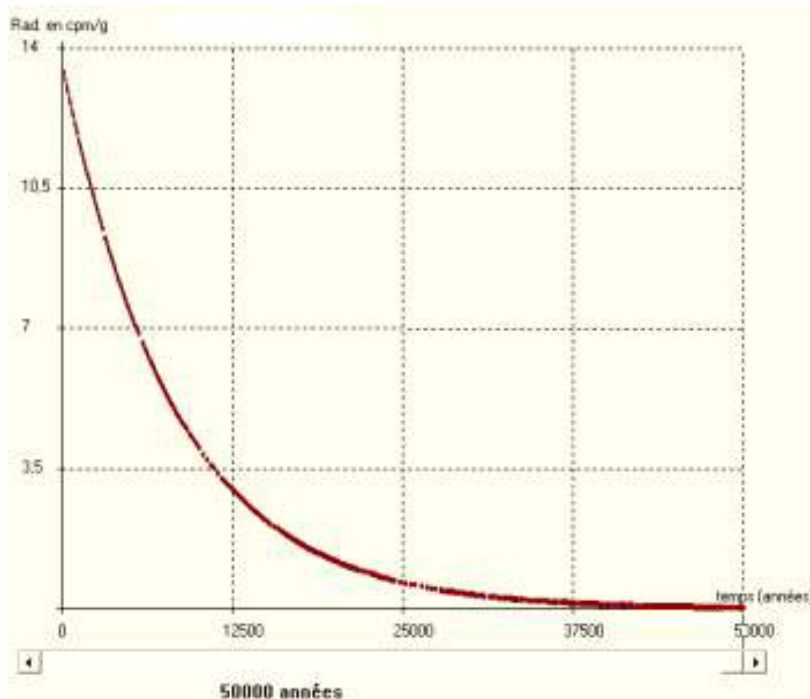
Après la mort, le carbone 14 n'est pas renouvelé et le rapport isotopique décroît.

L'âge est calculée à partir de la mesure de la radioactivité et en utilisant la loi de décroissance radioactive.

Application : Détermination de la date de mort du mammouth

La radioactivité mesurée dans un os du mammouth est égale à 1,301 cpm/g (cpm/g : coups par minute par gramme).

- Déterminer la date de la mort du mammouth à partir du graphique ci-dessous :



Logiciel Radiochronologie

Remarque : Si l'on souhaite dater des éléments à une échelle de temps radicalement différente (comme en géologie), il faut utiliser des populations de noyaux radioactifs présentant un temps de demi-vie adapté.

3. Applications au domaine médical

L'imagerie médicale utilise parfois des espaces radioactives appelées traceurs radioactifs.

Ces traceurs radioactifs doivent présenter de faibles demi-vies afin de ne pas laisser des traces de radioactivité dans le patient une fois l'examen terminé.

Ces traceurs radioactifs permettent de suivre le fonctionnement des cellules ou des organes cibles.

Exemples :

- ➔ *Imagerie médicale (scintigraphie, tomographie par émission de positons ou TEP)*
- ➔ *Radiothérapie*
- ➔ *Voir le site du [CEA](#)*

4. Radioprotection

En traversant la matière (donc les tissus du corps humain), les rayonnements α , β et γ déposent de l'énergie, provoquant des ionisations responsables de certains dégâts tels des destructions cellulaires, des cancers, des mutations, des anomalies génétiques, etc...

Le danger augmente avec l'activité de la source, la proximité de la source, la durée d'exposition et le type de rayonnement.

Pour se protéger des effets néfastes des rayonnements ionisants, il est par exemple possible d'utiliser des écrans, des enceintes confinées ou des vêtements protecteurs.

La protection dépend alors du type de rayonnement, de l'épaisseur de la protection et de la nature du matériau qui la compose.

En effet, si les particules α sont bloquées par quelques centimètres d'air, il faudra environ un centimètre d'épaisseur de plastique pour arrêter les particules β et plusieurs centimètres de plomb pour arrêter les rayonnements γ .

Source radioactive	Pénétration des tissus	Effet sur l'organisme
particules α	arrêtées par la peau	aucun
particules β	traversent l'épiderme	lésions cutanées
rayonnement γ	très pénétrants	tissus ou organes atteints

