

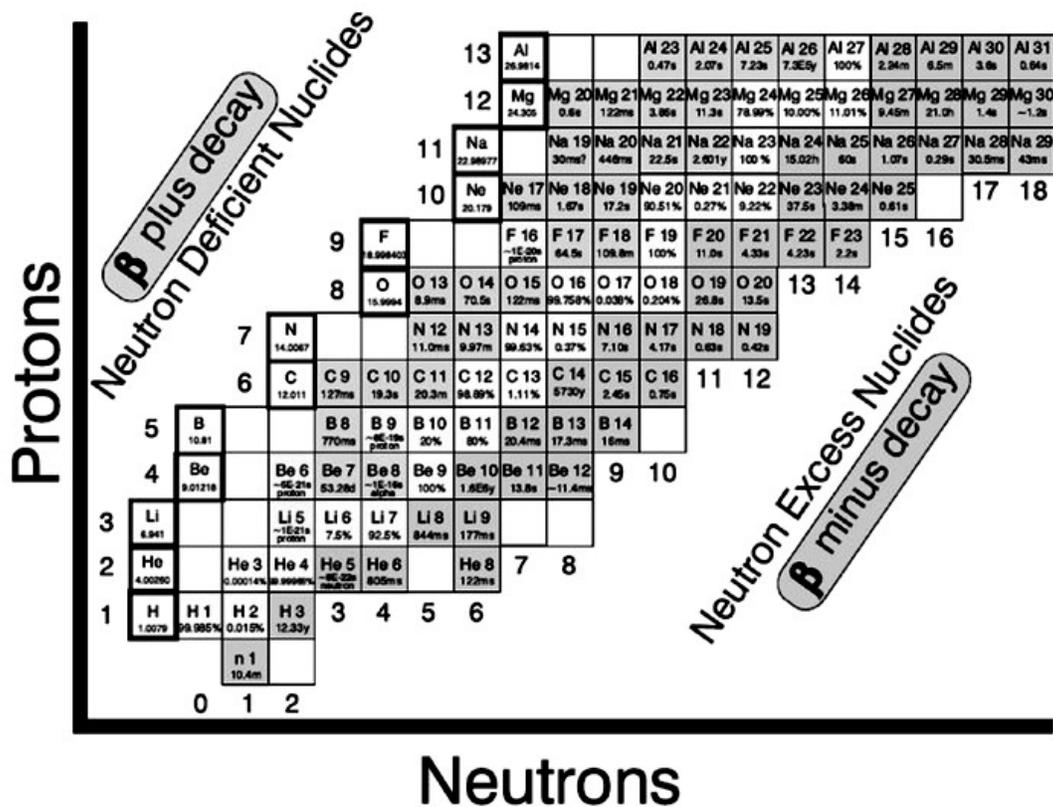
Physique nucléaire & radioactivité

1. INTRODUCTION

La structure des atomes permet de comprendre comment ils peuvent s'unir entre eux afin de former des édifices moléculaires. Nous savons que les propriétés physico-chimiques des éléments dépendent des électrons qui jouent un rôle essentiel dans la réaction chimique. Les noyaux ne subissent aucune transformation structurelle lors processus de transfert d'électrons.

En réalité, les noyaux peuvent aussi subir des changements de structure au cours desquels des énergies considérables sont mises en jeu. L'étude de la structure de l'atome, de ses modifications et de ses conséquences est l'objet de la chimie et de la physique nucléaire. Nous savons que l'homme a déjà utilisé et utilise encore l'énergie nucléaire, pour le meilleur comme pour le pire.

Parmi les 331 types d'atomes naturels (isotopes compris) connus, 284 sont stables, les autres étant radioactifs. Tous les atomes produits artificiellement par des réactions nucléaires sont instables.



2. HISTORIQUE

En 1896, le physicien français **Henri Becquerel** découvre fortuitement la **radioactivité naturelle** en observant qu'un sel d'uranium $U(SO_4)_2$, posé sur une boîte de plaques photographiques emballées de papier noir provoque néanmoins le "voilage" de celles-ci. Il attribue cette "impression" des plaques photographiques à l'émission, par le sel d'uranium, d'un rayonnement analogue aux rayons X découverts par l'allemand **Röntgen** en 1895.

La radioactivité est donc la propriété qu'ont certaines substances d'émettre spontanément des radiations pénétrantes.

En 1897, **Pierre et Marie Curie** révèlent la radioactivité du thorium et, après de longues et pénibles recherches effectuées dans des conditions matérielles difficiles, découvrent deux éléments beaucoup plus radioactifs que l'uranium: le polonium (400 fois plus actif) et le radium (2 million de fois plus actif).

En 1934, **Irène et Frédéric Joliot-Curie** découvre la radioactivité artificielle. En bombardant certains atomes (azote, phosphore, silicium) avec des particules de grande vitesse, ils les transforment en atomes n'existant pas dans la nature et qui ont la propriété d'émettre des rayonnements radioactifs.

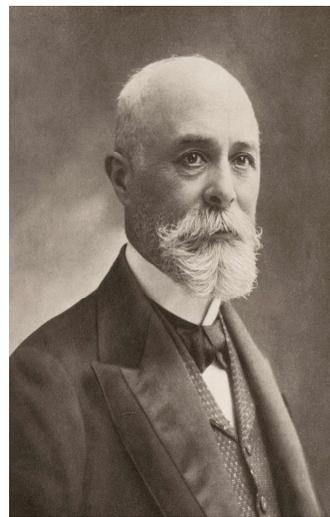
D'autres éléments radioactifs sont apparus plus tard: le neptunium, le plutonium, l'américium, le curium, le berkélium, le californium, l'einsteinium, le fermium, le ménélevium, le nobélium et le lawrencium.



1845-1923
Wilhelm
Roentgen



1872-1919
Anna Bertha
Ludwig



1852-1908
Henri
Becquerel



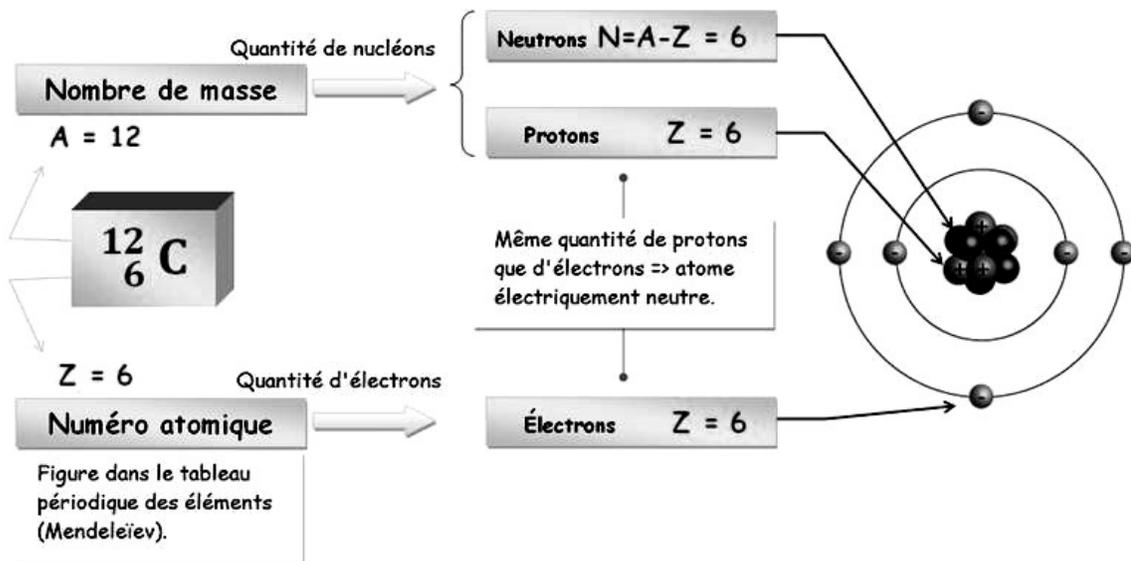
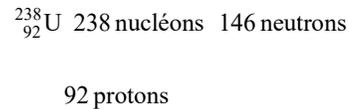
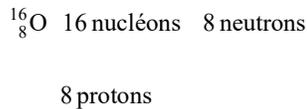
1867-1934
Marie
Curie

3. RAPPEL SUR LA COMPOSITION DU NOYAU ATOMIQUE

- un atome est formé d'un noyau entouré d'un nuage d'électrons.
- un noyau est constitué de nucléons de deux types: les protons et les neutrons.
- dans l'atome neutre, le nombre de protons (Z) est égal au nombre d'électrons.
 Z est appelé le **nombre atomique**.
- le nombre de nucléons (protons + neutrons) est désigné par la lettre A . C'est le **nombre de masse**. Le nombre de neutrons est donc: $N = A - Z$.
- le noyau d'un atome de symbole chimique X se représente par l'écriture suivante :



Exemples :



Application :

Écris sous cette forme le carbone, le manganèse, le calcium, le fluor et le bismuth.

L'électron est désigné par ${}^0_{-1}e$

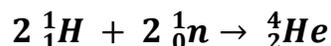
Le neutron est désigné par 1_0n

L'atome d'hydrogène est désigné par 1_1H

4. LA COHESION DU NOYAU

Un nucléide désigne l'ensemble des atomes dotés des noyaux contiennent le même nombre de protons et de neutrons. Ces noyaux sont caractérisés par les mêmes numéros atomiques Z et nombre de masse $A (= Z + N)$.

Si nous considérons le noyau d'hélium, celui-ci est formé à partir de ses nucléons, soient 2 protons et 2 neutrons.



Cette réaction nucléaire s'accompagne d'une perte de masse (« défaut de masse ») puisque la masse du noyau d'hélium est inférieure de 0,0304 u.m.a. par rapport à la somme des masses des protons et neutrons (1 u.m.a. = $1,66 \cdot 10^{-24}$ g).

Si on applique la relation d'Einstein qui relie la masse (m) et l'énergie (E) :

$$E = mc^2$$

Avec c : la vitesse de la lumière (300.000 km/s), on peut calculer qu'au défaut de masse précité, il correspond une énergie libérée de $27 \cdot 10^8$ KJ/mole.

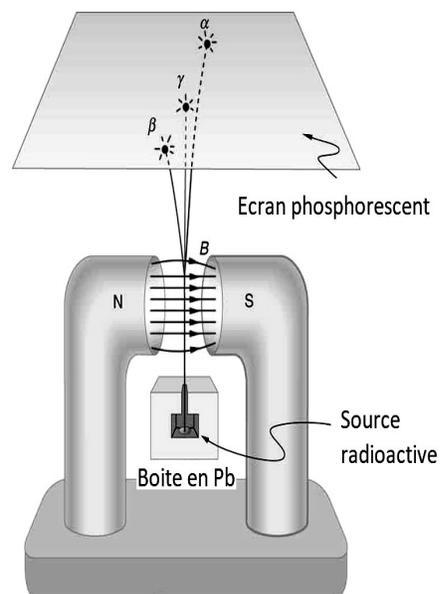
$27 \cdot 10^8$ KJ/mole est aussi l'énergie qu'il faut fournir pour décomposer 1 mole de noyaux d'He en nucléons, c'est donc l'énergie de liaison correspondante. C'est 10 millions de fois plus que l'énergie d'une liaison chimique et ceci permet de comprendre que protons et neutrons adhèrent très fortement les uns aux autres dans le noyau d'He.

L'uranium ($A = 235$) se désintègre en deux petits noyaux. A partir de $A = 210$ (Polonium), tous les nucléides sont radioactifs.

5. NATURES DES RAYONNEMENTS EMIS

Pour analyser le rayonnement nucléaire, les physiciens appliquent une méthode qui leur est familière, à savoir l'étude des trajectoires suivies par un rayonnement lorsqu'il est soumis à l'action d'un champ magnétique.

Une source radioactive (ou radioélément) est placée dans une cavité réalisée dans un bloc de plomb. Elle envoie, dans le vide, un rayonnement qui peut être soumis à l'action d'un champ magnétique perpendiculaire à sa direction de propagation. Ce rayonnement est détecté par les traces qu'il laisse sur une surface photographique sensible.



En l'absence de champ magnétique, on n'observe qu'un seul impact au point O.

En présence du champ magnétique, on peut observer trois impacts.

On peut en conclure que le rayonnement nucléaire se compose de trois types de rayons appelés respectivement α , β , γ (**alpha, bêta et gamma**)

Les rayons α et β sont déviés et ils sont donc chargés électriquement. (on peut retrouver leur signe par la règle des trois doigts de la main droite). Les rayons γ ne sont pas déviés et sont donc neutres.

- **rayons α ou particules α** (énergie de 4 à 10 MeV) : ce sont des noyaux d'hélium ${}^4_2\text{He}$ facilement absorbés (une feuille de papier peut les arrêter). Ils perdent rapidement leur énergie. Ils sont donc très ionisants et donc très nuisibles aux êtres humains (20 fois plus de dégâts que les rayons β et γ). Seules les particules très énergétiques ($> 7,5$ MeV) peuvent traverser la peau humaine.

- **rayons β** (électrons ou positrons, énergie de 0,025 MeV à 3,2 MeV): ils sont plus pénétrants que les α (ils peuvent traverser une plaque d'aluminium de 2 mm d'épaisseur). Ils ne pénètrent pas profondément dans le corps humain (de 1 mm à 2 cm)

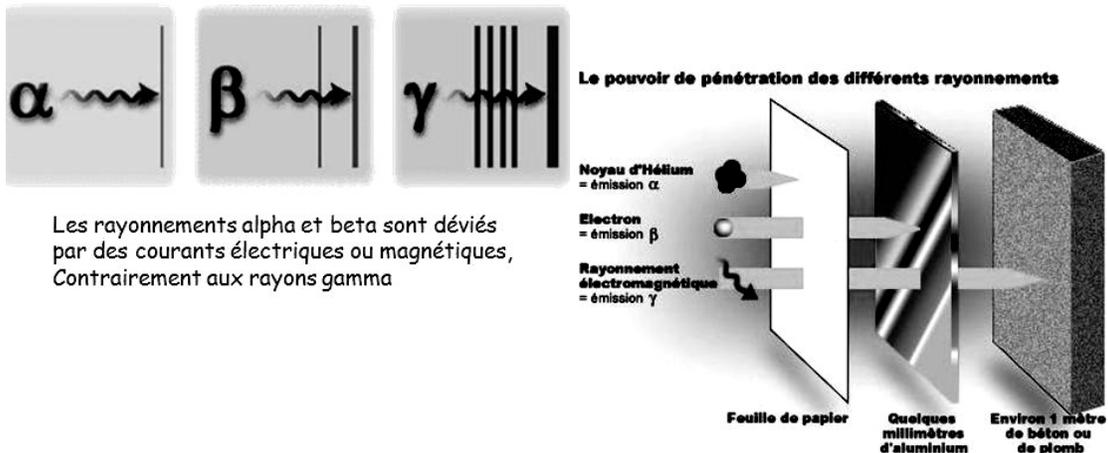
- **rayons γ** (énergie de 0,01 MeV à 10 MeV): ce sont des ondes électromagnétiques (photons) extrêmement pénétrantes. Leur longueur d'onde se situe entre $5 \cdot 10^{-12}$ m et 10^{-13} m. Ils sont absorbés par une épaisseur de 2,8 cm de plomb ou 13,7 cm d'aluminium. Ils traversent facilement le corps humain et détruisent des molécules sur leur chemin.

Les trois types de rayonnements radioactifs

Rayons peu pénétrants
Rayons alpha
Emission d'un noyau d'He
Portée dans l'air = 2,5 à 8,5 cm
Arrêtés par une feuille de papier
Ou la surface externe de la peau

Rayons un peu plus pénétrants
Rayons beta
Emission d'un électron
Portée dans l'air = quelques m
Traverse la couche supérieure
De la peau
Arrêtés par une feuille de Al ou
une vitre

Rayons très pénétrants
Rayons gamma
Nature électromagnétique
Arrêtés seulement par de
Grandes épaisseurs de matériaux
(béton, plomb...)



Remarque : application des rayons α : le détecteur de fumée. Une petite quantité de particules α , provenant d'un émetteur radioactif, ionise l'air entre deux plaques métalliques parallèles. Une différence de potentiel entre ces deux plaques déplace les ions et crée un courant électrique. La présence de fumée coupe le courant et déclenche l'alarme.

L'**électron-volt** est une unité d'énergie qui vaut: $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Question : A combien d'eV une énergie de 10^{-17} J correspond-elle ?

6. LA NOTION D'ISOTOPE

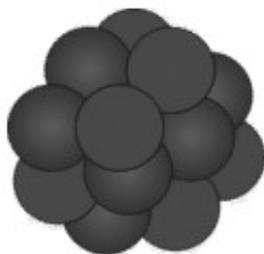
Les isotopes sont les variétés différentes d'un même élément chimique, dont les noyaux ont le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différents, ce qui entraîne des masses différentes.

Exemples :

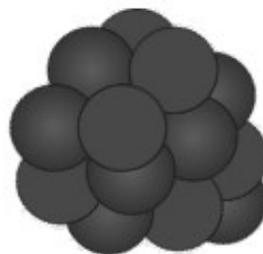


Il existe des isotopes stables comme le ${}^{13}\text{C}$ et le ${}^{12}\text{C}$ mais également de isotopes instables qui se désintègrent spontanément comme ${}^{238}\text{U}$ ou le ${}^{234}\text{Th}$ (isotopes radioactifs).

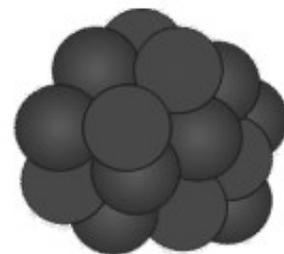
Environ 280 isotopes des éléments naturels sont stables et subsisteront probablement indéfiniment. Environ 1200 autres (naturels ou artificiels) sont radioactifs et éphémères (puisque ils se désintègrent spontanément). Tous les éléments au-delà de l'uranium (de $Z = 93$ à 112) sont produits artificiellement et sont radioactifs. Quelques éléments, comme le xénon et l'iode ont chacun plus d'une douzaine d'isotopes connus. L'iode a seulement un seul isotope stable.



Carbon-12
98.9%
6 protons
6 neutrons



Carbon-13
1.1%
6 protons
7 neutrons

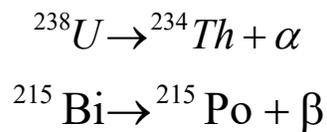


Carbon-14
<0.1%
6 protons
8 neutrons

Question : L'hydrogène possède trois isotopes. Le plus courant, l'hydrogène ordinaire ${}^1_1\text{H}$ est le plus léger et le plus ordinaire (99,985 %). Comment appelle-t-on les deux autres isotopes de l'hydrogène?

7. TRANSMUTATION D'UN ISOTOPE RADIOACTIF

Dès 1903, Rutherford et Soddy montrent que l'émission de rayonnements par l'uranium s'accompagne d'une transformation de celui-ci en un autre élément chimique, à savoir le thorium. Il s'agit d'une **transmutation** et l'atome initial subit une **désintégration radioactive**.



Au cours de la transmutation d'un noyau radioactif, il y a émission de particules α , β ou de rayonnement γ .

Désintégration radioactive

**Lois de
conservations
vérifiées**

Noyau (dit « père ») \rightarrow Noyau (dit « fils ») + d'autre(s) particule(s) éventuelle(s)

Type de radioactivité	particule émise	Équation de réaction du type	
alpha α	noyau d'hélium (particule alpha α)	${}^A_Z\text{X}$	\rightarrow ${}^{A-4}_{Z-2}\text{Y}^* + {}^4_2\text{He}$
bêta + β^+	positon (ou positron) ${}^0_1\text{e}^+$	${}^A_Z\text{X}$	\rightarrow ${}^A_{Z-1}\text{Y}^* + {}^0_1\text{e}^+$
bêta - β^-	électron ${}^0_{-1}\text{e}^-$	${}^A_Z\text{X}$	\rightarrow ${}^A_{Z+1}\text{Y}^* + {}^0_{-1}\text{e}^-$
gamma γ	rayon gamma gamma γ	${}^A_Z\text{Y}^*$	\rightarrow ${}^A_Z\text{Y} + \gamma$

8. LA DEMI-VIE OU LA PERIODE D'UN ISOTOPE RADIOACTIF¹

Les isotopes radioactifs se désintègrent spontanément ou se transmutent.

Si par exemple on prend l'isotope ^{226}Ra , après 1620 ans, les N_0 noyaux de départ se sont désintégrés de moitié et il reste $\frac{N_0}{2}$ noyaux.

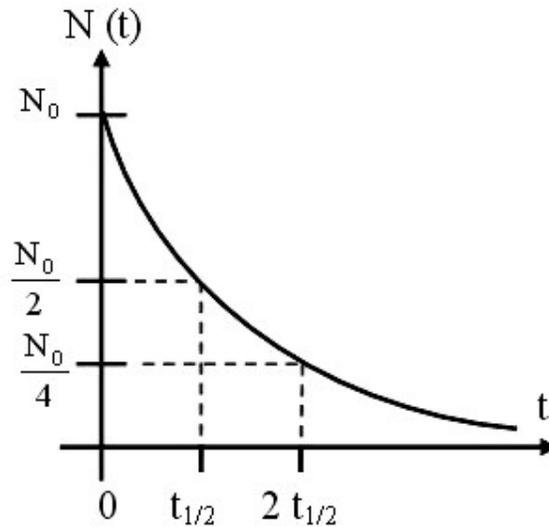
Après 3240 ans (1620×2), il restera $\frac{N_0}{4}$ noyaux.

Après 1620×3 ans, il restera $\frac{N_0}{2^3}$ noyaux.

La demi-vie d'un isotope radioactif $t_{1/2}$ est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux en présence à l'instant initial se soient transmutés.

Après $1620 \times n$ ans, il restera $\frac{N_0}{2^n}$ noyaux et donc après n années, il restera : $\frac{N_0}{2^{\frac{n}{1620}}}$

isotope radioactif	demi-vie
^{238}U	$4,46 \cdot 10^9$ ans
^{40}K	$1,26 \cdot 10^9$ ans
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$ ans
^{242}Pu	$3,75 \cdot 10^5$ ans
^{14}C	5715 ans
^{137}Cs	30,3 ans
^{60}Co	5,27 ans
^{131}I	8,04 jours
^{210}Ti	1,3 min
^{212}Po	0,298 μs



On peut montrer que le nombre d'atomes N restant à l'instant t est : (loi de la désintégration radioactive)

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

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{t_{1/2}}$$

Avec : N , le nombre d'atomes restant à l'instant t

N_0 , le nombre d'atomes en $t = 0$

λ , constante de désintégration (s^{-1})

Cette fonction est **une fonction exponentielle décroissante**. La valeur de λ varie selon les isotopes et plus λ est grand, plus le taux de désintégration est élevé.

Exercices :

- 1) Après 24 h, la radioactivité d'un élément tombe à $1/8^{\text{ème}}$ de sa valeur initiale. Que vaut sa demi-vie ?
- 2) Combien de demi-vies doivent s'écouler pour que l'activité radioactive d'un élément décroisse d'un facteur 256 ?
- 3) Deux sources radioactives R_1 et R_2 contiennent initialement le même nombre d'atomes radioactifs. La source R_1 a une demi-vie T_1 et la source R_2 une demi-vie $T_2 = 2T_1$. Quel sera après un temps $t = 10 T_1$, le rapport N_2/N_1 entre le nombre d'atomes encore actifs dans les sources R_1 et R_2 ?
- 4) Le ^{226}Ra a une constante de désintégration de $1,36 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$. Détermine sa demi-vie en années. Sachant que les Curie avaient environ 200 g de radium en 1898, combien en reste-t-il après 100 ans ? (192 g)

9. FAMILLES RADIOACTIVES

Il arrive fréquemment qu'un atome engendre, par transmutation, un atome lui-même radioactif et ainsi de suite jusqu'à stabilisation (*famille radioactive*²). Dans ce cas le phénomène est simultanément concerné par plusieurs demi-vies.

<i>Emetteur</i>	^{238}U	\rightarrow	^{234}Th	\rightarrow	^{234}Pa	\rightarrow	^{234}U	\rightarrow	^{230}Th	\rightarrow	^{226}Ra
<i>Rayonnement</i>			α		β		β		α		α
<i>Demi-vie</i>			$4,5 \cdot 10^9$ ans		24,1 jours		6,7 h		$2,5 \cdot 10^5$ ans		$8 \cdot 10^4$ ans

10. L'ACTIVITE D'UNE SOURCE RADIOACTIVE

L' **activité A** d'une source radioactive est **le nombre d'atomes qui se désintègrent par unité de temps**. L'unité SI est le **becquerel (Bq)**³ qui correspond à la désintégration d'un atome par seconde.

Exemples :

- l'activité de la quantité d'iode 131 injecté en une seule fois dans l'organisme pour un examen de la thyroïde est de 740 000 Bq.
- l'organisme humain possède une activité naturelle de 12 000 Bq, due par exemple à la présence de potassium 40.
- Une semaine après l'accident du réacteur de Tchernobyl, l'activité de l'air en Belgique était de 60 Bq/m^3 (le seuil dangereux fixé par les normes internationales est de 400 Bq/m^3 d'air)

Exercice : transforme en curie toutes les valeurs en becquerel.

³ on utilise parfois une ancienne unité, le curie (Ci) qui est l'activité correspondant approximativement à celle d'un gramme de radium. $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

11. REACTIONS NUCLEAIRES

Les réactions nucléaires sont des phénomènes au cours desquels il y a modification, transmutation du noyau des atomes. Cette transmutation peut être:

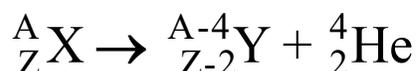
- **spontanée**: un noyau se transforme spontanément en un autre noyau, en expulsant une ou plusieurs particules. C'est la radioactivité naturelle. Le noyau initial était donc instable.
- **provoquée**: par la collision d'une particule incidente (neutron, proton, alpha, ...) sur un noyau. Celui-ci se transforme en un nouveau noyau.

11.1. Désintégration alpha

Pour rappel, une particule α (alpha) est un noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$.

Au cours de la transmutation ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$, le ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ émet une particule α tout en perdant **deux protons et deux neutrons** et il reste un noyau de ${}^{222}_{86}\text{Rn}$.

D'une manière générale, un noyau (nuclide) émettant une particule α se transmute en un autre noyau dont le nombre atomique Z est diminué de 2 et le nombre de masse de 4 :

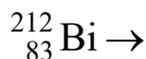


Le nuclide fils précède le nuclide père de 2 cases dans le tableau périodique.

Important : Dans une réaction nucléaire, deux lois de conservation sont observées :

- Il y a toujours autant de nucléons avant et après réaction nucléaire. Autrement dit, la somme des nombres de masse A est conservée.
- La charge électrique totale est conservée. Le numéro atomique Z est lu comme autant de charges positives du noyau.

Exercices (désintégration α)



11.2. Désintégration bêta négative

Considérons le cas où la particule bêta (β) est un électron.

Au cours de la transmutation : ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$, le ${}^{14}_6\text{C}$ émet une particule β .

Un neutron du noyau se transforme en un proton et il y a émission d'un électron pour que la charge électrique soit conservée.

D'une manière générale, un noyau (nuclide) émettant une particule β négative se transmute en un autre noyau dont le nombre atomique Z est augmenté de 1 et le nombre de masse A est inchangé (puisque l'on a un neutron en moins et un proton en plus) :

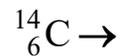
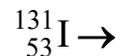


Le nuclide fils suit le nuclide père dans le tableau périodique.



Remarque : dans une désintégration bêta positive, un proton se transforme en un neutron avec émission d'un positron.

Exercices (désintégration β négative)

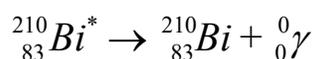
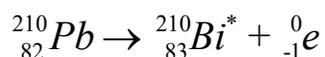


11.3. Emission gamma

Dans la plupart des cas, le noyau résultant d'une désintégration alpha ou bêta est un noyau excité, il se trouve dans un état anormal : il possède plus d'énergie interne que dans son état stable. Ce noyau excité est donc instable: il va retrouver son état fondamental en émettant un rayonnement gamma d'énergie égale à l'excès d'énergie du noyau excité.

Une désintégration gamma n'entraîne donc aucune modification de la composition du noyau.

Exemple:



12. APPLICATIONS DE L'ENERGIE NUCLEAIRE ET DE LA RADIOACTIVITE

Il existe de nombreuses applications de l'énergie nucléaire. Il ne sera donc pas possible d'être exhaustif en la matière.

12.1. Les rayons γ en médecine nucléaire et en stérilisation

On peut, grâce à des techniques basées sur la détection du rayonnement γ , montrer un organe au cours même de son fonctionnement (exemple : le cerveau)

De plus les rayons γ ont un pouvoir bactéricide. La plupart des micro-organismes sont détruits par des doses de 0,5 à 1 Mrad⁴ (lors d'une radiographie, la dose absorbée est de l'ordre de 0,2 rad). Ce traitement très sûr, appliqué à froid, a contribué à l'essor des matériels hospitaliers très bon marché d'usage unique en matière plastique sous emballage léger étanche. D'autres articles stérilisés par rayonnements sont utilisés:

- seringues, pansements, cathéters, sondes, gants, draps d'hôpitaux, tétines, biberons,...
- des organes comme les reins artificiels
- des cosmétiques

12.2. Porosité des sols

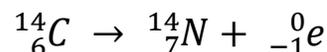
En géologie, lors de la réalisation de forages, on peut déterminer la porosité des sols (en quelque sorte le pourcentage de vide qui se trouve dans le sol) grâce à des techniques basées sur les rayons γ .

12.3. La datation au carbone 14

Le carbone existe dans la nature sous forme des isotopes stables ^{12}C (98,89 %) et ^{13}C (1,11%). Une faible quantité de ^{14}C radioactif est produit dans la haute atmosphère par l'action des rayons cosmiques sur l'azote de l'air :



On sait d'autre part que le ^{14}C se désintègre spontanément selon la réaction :



⁴ Le rad (radiation absorbed dose) est une unité de "dose absorbée". L'unité SI de la dose absorbée est le gray. (1 gray = 100 rad)

La concentration de ^{14}C dans l'atmosphère terrestre **est pratiquement constante** depuis des millénaires, car il se forme, par unité de temps, autant d'atomes de ^{14}C qu'il en disparaît par radioactivité.

Le ^{14}C , tout comme le ^{13}C et le ^{12}C se combine à l'oxygène atmosphérique pour former du gaz carbonique que les végétaux absorbent par photosynthèse, tant qu'ils sont vivants. Comme les animaux se nourrissent de végétaux, finalement, tous les organismes vivants contiennent une proportion identique (très faible, de l'ordre de $1,3 \cdot 10^{-12}$) de ^{14}C par rapport au ^{12}C .

Lorsque l'organisme vivant meurt, il n'y a plus d'absorption de carbone et le ^{14}C radioactif disparaît lentement avec une demi-vie de 5730 ans et donc sa proportion par rapport au ^{12}C dans les restes du corps diminue avec le temps. Une mesure de cette proportion permet alors de dater la mort de cet organisme.

Cette méthode permet d'évaluer l'âge de morceaux de bois, de charbon, d'ossements, de coquillages, ... vieux de 1000 à 25000 ans. Les connaissances acquises par ce procédé ont facilité la reconstitution de certains épisodes historiques. Par exemple, la datation des manuscrits de la mer Morte, découverts en 1947, permet de certifier qu'ils avaient environ 1950 ans.

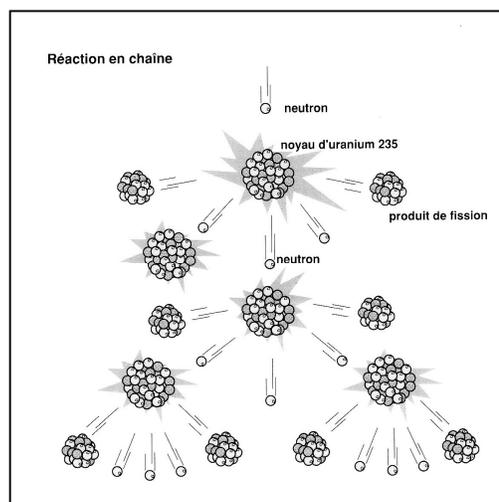
Exemple : si un morceau de charbon d'une cheminée ancienne contient le quart de la proportion initiale de ^{14}C par rapport au ^{12}C , un temps de 11460 ans (2 demi-vies) s'est écoulé depuis la mort de l'arbre.

12.4. Les détecteurs à incendie

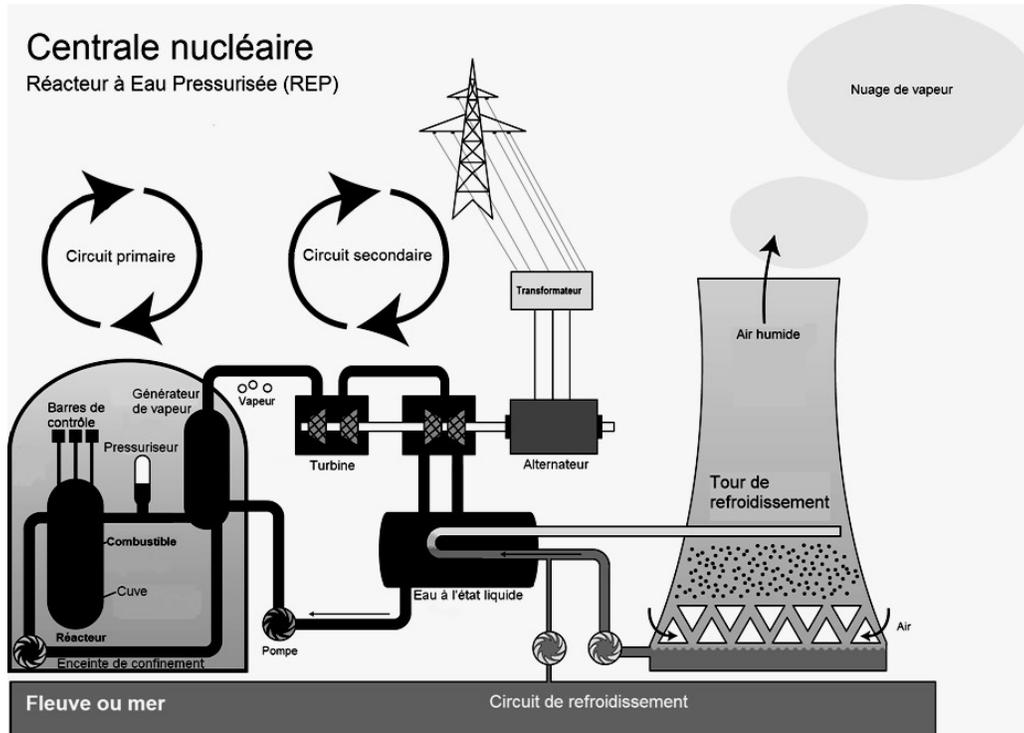
Les détecteurs de fumée utilisent une source d'américium 241 (émetteur α de demi-vie environ 450 ans) dont l'activité est de quelques dizaines de kBq. L'air d'une petite cellule est rendu faiblement conducteur par la présence de la source radioactive; si de la fumée pénètre dans cette chambre, la conductibilité de l'air ionisé diminue, ce qui provoque le déclenchement de l'alarme.

13. LA FISSION NUCLEAIRE

Dans un réacteur nucléaire, on utilise de l'uranium 235 ($^{235}_{92}\text{U}$). Lorsqu'on bombarde un noyau d'uranium 235 avec un neutron animé d'une vitesse convenable, celui-ci se sépare en deux noyaux plus petits (appelés produits de fission) en émettant deux ou trois neutrons. Les nouveaux neutrons peuvent à leur tour provoquer des fissions en rencontrant d'autres noyaux d'uranium 235. On parle de "**réaction en chaîne**". La fission s'accompagne d'un important dégagement de chaleur.



14. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE



Dans une centrale nucléaire, 3 circuits sont nécessaires pour transformer la chaleur en énergie électrique.

Circuit primaire

Dans un circuit fermé, de l'eau est mise en mouvement par des pompes. Cette eau s'échauffe grâce à la chaleur dégagée dans le cœur du réacteur. Elle est maintenue sous pression de sorte que, malgré la température élevée, elle ne se vaporise pas. Elle va ensuite transporter la chaleur issue de la fission jusqu'à l'échangeur de chaleur appelé aussi générateur de vapeur.

Circuit secondaire

L'eau du circuit primaire passe dans l'échangeur de chaleur où elle communique sa chaleur à l'eau d'un deuxième circuit qui va se transformer en vapeur. Cette vapeur actionne la turbine, puis est condensée et refroidie avant d'être envoyée de nouveau dans l'échangeur de chaleur où le cycle recommence.

Circuit tertiaire

Le circuit tertiaire assure la condensation de la vapeur à la sortie de la turbine. L'eau froide qui alimente ce circuit provient généralement d'un fleuve. Cette eau froide va recevoir la partie restante de l'énergie thermique initiale: elle devient tiède. Afin de ne pas rejeter une eau trop chaude dans l'environnement, on va la refroidir à l'aide des tours de réfrigération.