

Chapitre 1 : Radioactivité et décroissance radioactive.

Objectifs :

- Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?
- Quels sont les différents types de radioactivité ?
- Comment évolue la radioactivité au cours du temps ?
- Comment dater un évènement grâce à la radioactivité ?
- Quels sont les effets biologiques de la radioactivité ?

Historique :

1896 : BECQUEREL (physicien français) découvre que des sels d'uranium entreposés dans un tiroir fermé impressionnent des plaques photographiques placées au voisinage. Il en déduit que ces sels produisent un rayonnement, c'est la naissance de la radioactivité.

1898 : Pierre et Marie CURIE découvrent deux autres corps ayant les mêmes propriétés (radioactives) : Le polonium et le radium (Prix Nobel de Physique en 1903 partagé avec Henri Becquerel pour la découverte de la radioactivité).

1910 : RUTHERFORD (G.B) découvre la nature de ces rayonnements.

1934 : Irène (fille de Pierre et Marie Curie) et Frédéric JOLLIOT-CURIE découvre la radioactivité artificielle, encore appelée radioactivité provoquée, ce qui leur valut le prix Nobel de chimie en 1935.

I. Qu'est-ce qu'un noyau radioactif ?

1.1. Composition des noyaux atomiques et isotopie

- Le noyau d'un atome est constitué de **nucléons** : les **protons** (chargés positivement) et les **neutrons**.
- Un noyau atomique est représenté par le symbole : $\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}$ où :
 - A est le nombre de nucléons, appelé également **nombre de masse** ($m_{at} \approx A \times m_{neutrons}$)
 - Z est le **numéro atomique** (nombre de protons), appelé également **nombre de charges**.

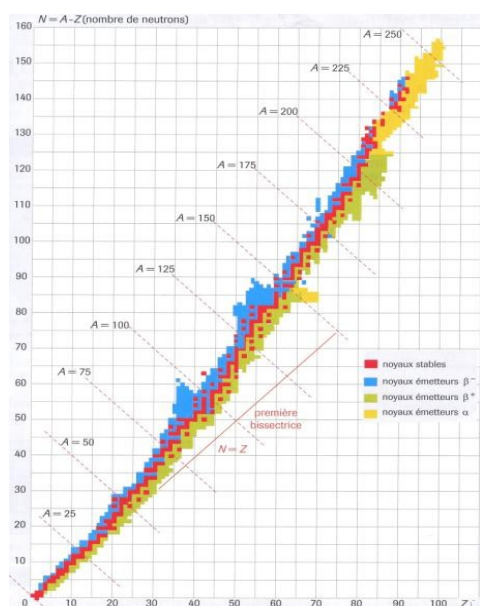
Le noyau comportera donc $(A - Z)$ neutrons.

Tableau de données p 70

- Des noyaux sont **isotopes** s'ils ont le **même nombre de protons** (nombre de charges, Z) mais **pas le même nombre de nucléons** (nombre de masse, A). Ex : **Tableau p 72**

1.2. Stabilité et instabilité des noyaux

- Dans la nature, il existe une centaine d'éléments chimiques. Cependant on connaît environ 1500 noyaux différents dont environ 350 existent à l'état naturel. Parmi ces noyaux certains sont parfaitement stables alors que d'autres **se désintègrent spontanément**.
- Un **noyau radioactif** est un noyau **instable qui se désintègrera spontanément en un noyau différent**, à un **instant t imprévisible** quelles que soient les conditions physiques (P, T, \dots) dans lequel il se trouve.
- Le **diagramme de Segré** (diagramme ($Z ; A - Z$) ou ($Z ; N$)) nous renseigne sur la **stabilité des différents noyaux atomiques** : **Figure 1 p 71**

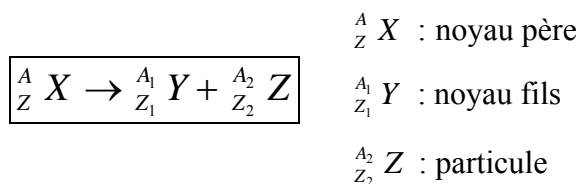


- En abscisse, on a le numéro atomique Z et en ordonnée, le nombre de neutrons $N = A - Z$;
- Il existe 4 zones différentes ;
 - Les noyaux symbolisés en rouges sont les noyaux stables, ils se répartissent le long d'une « courbe » appelée « vallée de stabilité » ;
 - Les autres types de noyaux sont instables (vert, bleu et jaune), ce sont les noyaux radioactifs ;
 - Pour les faibles valeurs de Z ($Z < 20$), les noyaux stables comportent quasiment autant de protons que de neutrons ;
 - A partir de $Z > 20$, les noyaux sont stables s'ils contiennent plus de neutrons que de protons (répulsions électriques entre protons l'emportent sur l'interaction forte qui assure la cohésion du noyau).
- Les noyaux instables vont se désintégrer selon trois types de radioactivités : α, β^+ et β^- .

II. Quels sont les différents types de radioactivité ? Ex 7, 8, 9 et 10 p 82

II.1. Lois de conservation des transformations nucléaires

- La radioactivité correspond à une **transformation nucléaire** dans laquelle un noyau radioactif, appelé « **noyau père** », se désintègre en un noyau différent, appelé « **noyau fils** », avec émission d'une particule.
- On peut modéliser cette transformation nucléaire par une équation de la forme :



Ex : ${}_{83}^{211} \text{Bi} \rightarrow {}_{81}^{207} \text{Tl} + {}_2^4 \text{He}$ où ${}_{83}^{211} \text{Bi}$ est le noyau père, ${}_{81}^{207} \text{Tl}$ est le noyau fils, ${}_2^4 \text{He}$ est la particule.

${}_{6}^{14} \text{C} \rightarrow {}_{7}^{14} \text{N} + {}_{-1}^0 e^{-}$ où ${}_{6}^{14} \text{C}$ est le noyau père, ${}_{7}^{14} \text{N}$ est le noyau fils, ${}_{-1}^0 e^{-}$ est la particule (électron).

- Les réactions nucléaires (naturelles ou forcées) obéissent à des **lois de conservation**, appelées **lois de conservation de Soddy** :

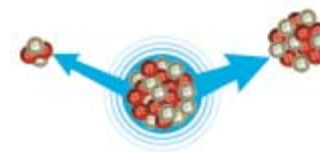
Lors des réactions nucléaires il y a conservation :

- du **nombre de charge**, soit $Z = Z_1 + Z_2$
- du **nombre de masse**, soit $A = A_1 + A_2$

Ex : ${}_{83}^{211} \text{Bi} \rightarrow {}_{81}^{207} \text{Tl} + {}_2^4 \text{He}$ ($211 = 207 + 4$ et $83 = 81 + 2$) ; ${}_{6}^{14} \text{C} \rightarrow {}_{7}^{14} \text{N} + {}_{-1}^0 e^{-}$ ($14 = 14 + 0$ et $6 = 7 + (-1)$)

II.2. La radioactivité α

- Les noyaux très lourds (N et Z grands) ont tendance à se désintégrer en émettant des noyaux d'hélium ${}_2^4 \text{He}$ appelés **particules α** pour se rapprocher de la vallée de stabilité (noyaux stables).



- Lors de la désintégration α , le **noyau fils est plus léger que le noyau père**.

- **L'équation générale** d'une transformation nucléaire de **type α** est : $\boxed{{}_Z^A X \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4} Y + {}_2^4 \text{He}}$

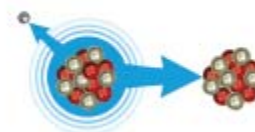
Ex : ${}_{60}^{144} \text{Nd} \rightarrow {}_{58}^{140} \text{Pb} + {}_2^4 \text{He}$

Fig 3 p 73

II.3. La radioactivité β^{-}

- Elle affecte les noyaux qui ont **trop de neutrons par rapport aux protons**.

- La radioactivité β^{-} est une transformation nucléaire au cours de laquelle le **noyau père radioactif se scinde en un noyau fils plus stable** et une **particule** appelée **particule β^{-}** : l'électron symbolisé par ${}_{-1}^0 e^{-}$.



- **L'équation générale** d'une transformation nucléaire de **type β^{-}** est : $\boxed{{}_Z^A X \rightarrow {}_{Z+1}^A Y + {}_{-1}^0 e^{-}}$

Ex : ${}_{6}^{14} \text{C} \rightarrow {}_{7}^{14} \text{N} + {}_{-1}^0 e^{-}$

Fig 4 p 73

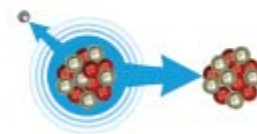
- Les noyaux subissent une désintégration au cours de laquelle **un neutron se transforme en un proton** ; le nombre de nucléons A n'a donc pas changé ($= (A - Z - 1) + (Z + 1) = A$).

- **Remarques** : - l'électron émis lors d'une radioactivité β^{-} n'est pas issu du cortège électronique de l'atome !

- il y a également libération d'une autre particule appelée antineutrino ${}_{0}^{0} \bar{\nu}_e$.

II.4. La radioactivité β^+

- Elle affecte les noyaux qui ont **trop de protons par rapport aux neutrons**.
- La radioactivité β^+ est dite « artificielle », elle ne concerne que des noyaux qui ne se trouvent pas dans la nature.
- La radioactivité β^+ est une transformation nucléaire au cours de laquelle le **noyau père radioactif se scinde en un noyau fils plus stable et une particule** plus petite et chargée positivement : **le positon** (ou **positron**) symbolisé par ${}^0_{+1}e$ (ou ${}^0_{+1}\bar{e}$).



- **L'équation générale** d'une transformation nucléaire de **type β^+** est :
$$\boxed{{}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_{+1} e}$$

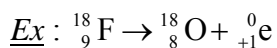
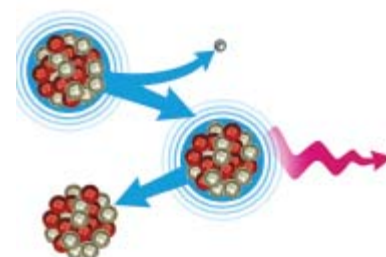


Fig 5 p 73

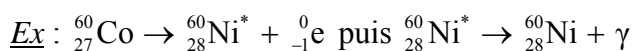
- Les noyaux subissent une désintégration au cours de laquelle **un proton se transforme en un neutron** ; le nombre de nucléons A n'a donc pas changé ($= (A - Z + 1) + (Z - 1) = A$)

II.5. L'émission γ

- Après une désintégration α ou β , le noyau fils produit peut être dans un état plus énergétique que son état fondamental (état le plus stable). On dit que le noyau fils est dans un **état excité**. Il est noté Y^* .
- Le noyau fils revient alors rapidement dans son état fondamental en émettant un rayonnement électromagnétique très énergétique (fréquence très élevée $\approx 10^{18}$ Hz) : le **rayonnement γ** (les photons γ).



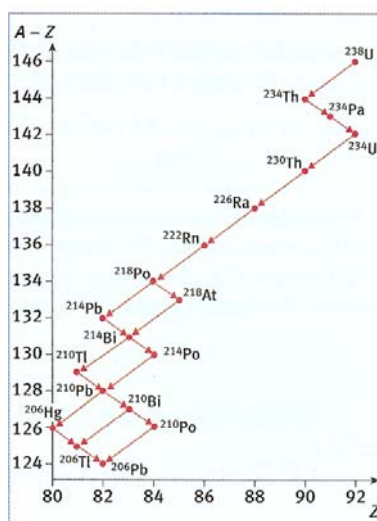
- **L'équation générale** d'une **émission γ** est :
$$\boxed{{}^A_Z Y^* \rightarrow {}^A_Z Y + \gamma}$$



II.6. Famille radioactive

A la suite d'une désintégration d'un noyau père, le noyau fils peut être stable ou radioactif. S'il est radioactif, il va également se désintégrer à son tour en un nouveau noyau... et jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. L'ensemble des noyaux est appelé **famille radioactive** du noyau de départ

Ex : L'uranium 238 :



III. Comment évolue la radioactivité au cours du temps ? Ex 14, 23 p 83 et 87**III.1. Caractère aléatoire d'une désintégration radioactive**

- Dans un échantillon radioactif, **tous les noyaux ont la même probabilité de désintégration**.
- Cette probabilité ne dépend pas des désintégrations qui ont déjà eu lieu, elle ne dépend que du type de noyau considéré. On dit que le noyau « **meurt sans vieillir** ».

Ex : Un noyau de carbone 14 apparu il y a 1000 ans aura la même probabilité de se désintégrer qu'un noyau de carbone 14 formé il y a 5 min !

- La **désintégration d'un noyau n'affecte pas celle d'un noyau voisin**.
- Une **désintégration radioactive est donc un phénomène aléatoire** ; aucun facteur ne peut agir sur ce phénomène.
- On ne peut donc pas prévoir quels noyaux seront désintégrés à une date **t**.
- Cependant, si on considère une **population macroscopique de noyaux radioactifs** alors on pourra connaître l'évolution temporelle de cette population.

III.2. Activité d'un échantillon radioactif

- Soit un échantillon de **N** noyaux radioactifs amenés à se désintégrer spontanément au cours du temps, on a donc **N** qui est une fonction du temps: **N(t)**.

Pendant une durée Δt , en moyenne, il y a **n** noyaux qui se sont désintégrés (on effectue une grande série de mesures et on estime que le nombre de désintégrations **n** pendant Δt s'apparente à une moyenne des mesures).

Ainsi à l'instant **t** il y a **N** noyaux non désintégrés et à l'instant **t + Δt**, l'échantillon contiendra **N - n** noyaux non désintégrés.

La variation du nombre de noyaux radioactifs de l'échantillon vaut : $\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t) = -n$

(ΔN est une valeur négative car le nombre de noyaux non désintégrés diminue !)

- On appelle **activité radioactive** le **nombre moyen de désintégration par unité de temps** ainsi on a :

A : en **Bq**, activité de l'échantillon radioactif (activité moyenne).

n : nombre de noyaux désintégrés (sans unité).

ΔN : variation du nombre de noyaux radioactifs restants dans l'échantillon

Δt : en **s**.

$$A = \frac{n}{\Delta t} = -\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{|\Delta N|}{\Delta t}$$

1 Becquerel (1 Bq) = 1 désintégration par seconde

- Par une équation aux dimensions on s'aperçoit que l'activité est homogène à l'inverse d'un temps :

$$[A] = \frac{1}{[T]} = [T]^{-1}$$

- L'activité d'une source radioactive est mesurée avec un **compteur Geiger**.
Plus A est grand plus la source est dite « active ».

III.3. Constante radioactive

- Soit **p** la probabilité que les « $-\Delta N$ » (car $\Delta N < 0$) noyaux se désintègrent. On définit : $p = \frac{-\Delta N}{N}$.
- Or on admettra que la probabilité de désintégration par unité de temps reste constante d'où :

$$\frac{p}{\Delta t} = \lambda$$

λ étant une constante (c'est la probabilité de désintégration par unité de temps)

- On peut donc écrire que :

$$p = \frac{-\Delta N}{N} = \lambda \times \Delta t \text{ soit } \boxed{A = \frac{-\Delta N}{\Delta t} = \lambda \times N}$$

L'activité radioactive **A** d'un échantillon radioactif est proportionnelle au nombre **N** de noyaux présents dans cet échantillon.

λ est appelée **constante de radioactivité**, elle est **positive** et c'est une **caractéristique du noyau considéré**.

Equation aux dimensions : $[\lambda] = \frac{[T]^{-1}}{1} = [T]^{-1}$: λ est homogène à l'inverse d'un temps et s'exprime en s^{-1} .

- Plus la constante de radioactivité est grande, plus le nombre de désintégration d'un noyau pendant Δt sera grand.
- Cette constante de radioactivité ne dépend pas des conditions initiales !!!

III.4. Loi de décroissance radioactive

- En faisant tendre la durée Δt vers 0, on obtient l'activité instantanée de l'échantillon :

$$A(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(-\frac{\Delta N}{\Delta t} \right) = -\frac{dN(t)}{dt} \text{ or on a vu que } A(t) = \lambda \times N(t) \text{ donc on a :}$$

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

N(t) : nombre de noyaux radioactifs à l'instant **t**.

$\frac{dN(t)}{dt}$: dérivée de **N** par rapport au temps.

λ : en s^{-1} , constante de radioactivité.

- C'est une **équation différentielle**. Sa résolution permet d'obtenir la **loi de décroissance radioactive** qui décrit l'évolution temporelle du nombre de noyaux radioactifs de l'échantillon.
- La solution de cette équation différentielle est une fonction exponentielle du type :

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

N(t) : nombre de noyaux radioactifs à l'instant **t**.

N₀ : nombre de noyaux radioactifs de l'échantillon à l'instant **t = 0**.

λ : en s^{-1} , constante de radioactivité.

- Ainsi on en déduit également l'expression de l'activité radioactive instantanée **A(t)** :

$$A(t) = \lambda \times N(t) \text{ soit } \boxed{A(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}} \text{ avec } A_0 = \lambda \cdot N_0 : \text{activité radioactive initiale (en Bq).}$$

III.5. Constante de temps d'un échantillon radioactif

- La **constante de temps**, notée τ , d'un noyau radioactif est la **durée de vie moyenne de ce noyau avant qu'il ne se désintègre**. Elle vaut :

$$\boxed{\tau = \frac{1}{\lambda}}$$

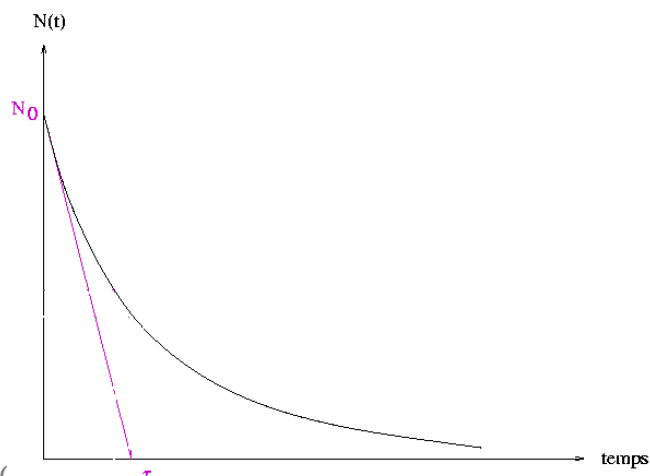
τ : en **s**, constante de temps.

λ : en s^{-1} , constante de radioactivité.

Equation aux dimensions : $[\tau] = \frac{1}{[T]^{-1}} = [T]$, τ est homogène à une durée et s'exprime en **s**.

- L'expression du nombre de noyaux radioactifs au cours

du temps s'écrit encore : $\boxed{N(t) = N_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}$



- A l'instant $t = \tau$, on a $N(\tau) = N_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}} = N_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot N_0$ soit une diminution de 63 % par rapport au nombre initial de noyaux N_0 .

Pour $t = 5 \tau$, 99 % des noyaux initialement présents sont désintégrés.

- La tangente de la courbe $N(t)$ à l'origine (en N_0) coupe l'axe des abscisses à $t = \tau$.

En effet, le nombre dérivé $\frac{dN(t)}{dt}$ à l'instant $t = 0$ s représente la pente de la tangente à la courbe $N(t)$ à cet

instant : $\frac{dN(t)}{dt} = -\frac{N_0}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{1}{\tau} \cdot N(t)$ d'où l'équation de la tangente qui est : $y = -\frac{N_0}{\tau} \cdot t + N_0 = N_0 \cdot (1 - \frac{t}{\tau})$

L'intersection de la tangente à l'origine avec l'axe des abscisses nous donne la valeur de τ (et donc de λ).

Remarque : on procède de même pour déterminer τ partir de la courbe $A(t)$.

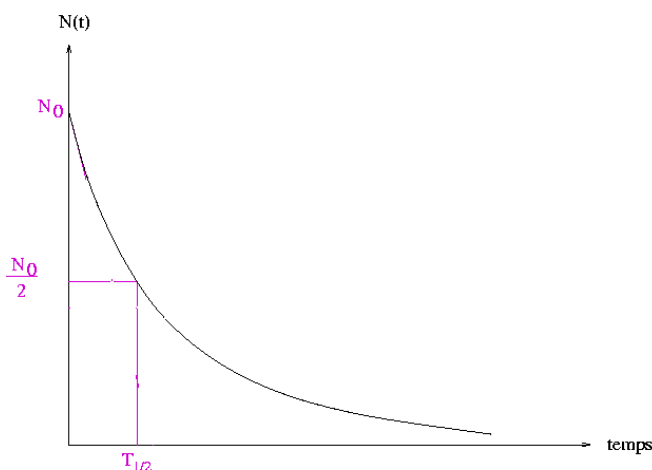
III.6. Temps de demi-vie d'un échantillon radioactif

- Le temps de demi-vie, noté $t_{1/2}$ d'un échantillon radioactif est la durée au bout de laquelle le nombre de noyau (ou l'activité radioactive) est divisée par deux.

➤ Ainsi à $t_{1/2}$ on a $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$ et $A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2}$

et on a $\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\frac{t_{1/2}}{\tau}}$, soit $\frac{1}{2} = e^{-\frac{t_{1/2}}{\tau}}$ soit

$\ln 2 = \frac{t_{1/2}}{\tau} = \lambda \cdot t_{1/2}$ et donc $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$



- Pour $t = 2 \cdot t_{1/2}$ alors il reste $\frac{N_0}{4}$ noyaux radioactifs dans l'échantillon

Pour $t = 3 \cdot t_{1/2}$ alors il reste $\frac{N_0}{8}$ noyaux radioactifs dans l'échantillon...

Pour $t = n \cdot t_{1/2}$ ($n \in \mathbb{N}$) alors il reste $\frac{N_0}{2^n}$ noyaux radioactifs dans l'échantillon !

IV. Comment dater un évènement grâce à la radioactivité ?

IV.1. La datation au Carbone 14

- La méthode de datation au Carbone 14 est une méthode mise au point il y a une cinquantaine d'année. Elle permet de dater les objets de 40 000 ans. Le temps de demi-vie du $^{14}_6\text{C}$ est : $t_{1/2} = 5570 \pm 30$ ans

- Le $^{14}_6\text{C}$ est produit en permanence dans la haute atmosphère par réaction entre des noyaux d'azote et des neutrinos cosmiques : $^{14}_7\text{N} + {}^1_0\nu_e \rightarrow ^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{H}$.

- Tant que l'organisme est vivant, les échanges avec le milieu extérieur maintiennent sa teneur en $^{14}_6\text{C}$ constante. Les rapports $\frac{^{14}_6\text{C}}{^{12}_6\text{C}}$ de l'atmosphère et de l'organisme vivant sont égaux et voisins de 10^{-12} .

- Lorsque l'organisme meurt, il n'y a plus d'échanges avec le milieu extérieur, le $^{14}_6\text{C}$ n'est plus renouvelé. Il se désintègre ($^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + {}^0_{-1}\text{e}$) selon la loi de décroissance radioactive : $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ avec $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$

- Pour dater un échantillon animal ou végétal :

- on mesure l'activité $A(t)$ d'une masse connue de l'échantillon ;
- on mesure l'activité A_0 de la même masse d'un échantillon actuel du même type ;
- l'âge t (en années) de l'échantillon se déduit donc de la manière suivante :

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \text{ soit } \ln \frac{A(t)}{A_0} = -\lambda \cdot t \text{ or } \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \text{ donc } \ln \frac{A(t)}{A_0} = -\frac{\ln 2 \times t}{t_{1/2}} \text{ donc } \boxed{t = -\frac{t_{1/2}}{\ln 2} \times \ln \frac{A(t)}{A_0}}$$

IV.2. La datation par d'autres méthodes

- Pour dater des échantillons plus vieux (comme les roches), on utilise des noyaux de temps de demi-vie plus important.
- C'est le cas de l'Uranium 238 de temps de demi-vie $t_{1/2} = 4,468 \times 10^9$ ans. Il a permis d'estimer l'âge de la Terre à 4,55 milliards d'années.

V. Quelles sont les effets biologiques de la radioactivité ?

V.1. Les dangers : le rayonnement ionisant

- La radioactivité s'accompagne de la libération de particules de haute énergie (électrons, positons...). Ces particules sont capables d'arracher les électrons et donc d'ioniser les atomes rencontrés. Ces atomes ionisés sont très réactifs avec les molécules comme par exemple l'ADN.
- La modification d'une molécule d'ADN peut être à l'origine d'une cellule cancéreuse. L'organisme peut en général « réparer » cette situation si ce genre d'évènements est peu fréquent et répartis dans le temps (cas de la radioactivité naturelle). Dans le cas d'expositions anormales, la réparation est difficile voire impossible.
- On distingue 2 types d'expositions anormales de l'organisme à la radioactivité :
 - L'**irradiation** : cas où l'organisme est soumis à un rayonnement inhabituel pendant une durée limitée (ex : la radiographie). Les effets sur l'organisme dépendent de l'énergie reçu par celui-ci et donc du type de rayonnement émis, de l'activité de la source, de la durée et de la fréquence d'exposition.
 - La **contamination** : cas où l'organisme absorbe un échantillon radioactif. L'organisme est donc soumis au rayonnement ionisant de l'échantillon pendant la durée où il se trouve absorbé et actif. Cette ingestion peut être volontaire (ex : iode radioactif en imagerie médicale) ou accidentel (ex : respiration de poussières radioactives par les pompiers lors de l'incendie de Tchernobyl).
- En résumé, plus l'activité d'une source radioactive est importante, plus les risques encourus sont grands. La nocivité augmente avec la durée d'exposition et la proximité de la source. Elle dépend également du type de radioactivité mis en jeu.

V.2. Les usages médicaux

- Certains noyaux radioactifs sont utilisés comme source de rayonnement pour l'imagerie médicale (scintigraphie, tomographie à émission de positons TEP pour observer certaines zones du cerveau...). Dans le cas de la scintigraphie, on fait ingérer au patient une source radioactive qui migre vers la partie du corps à explorer (pour la thyroïde on utilise l'iode 123). Le noyau radioactif choisi doit avoir un $t_{1/2}$ faible !