

CH P9 – Evolution temporelle d'une transformation nucléaire

Thème 1 : Constitution et transformations de la matière

2. Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation

B) Modéliser l'évolution temporelle d'un système, siège d'une transformation nucléaire

Notions et contenus	Capacités exigibles Activités expérimentales support de la formation
<p>Décroissance radioactive Stabilité et instabilité des noyaux : diagramme (N,Z), radioactivité α et β, équation d'une réaction nucléaire, lois de conservation. Radioactivité γ.</p> <p>Évolution temporelle d'une population de noyaux radioactifs ; constante radioactive ; loi de décroissance radioactive ; temps de demi-vie ; activité.</p> <p>Radioactivité naturelle ; applications à la datation. Applications dans le domaine médical ; protection contre les rayonnements ionisants.</p>	<p>Déterminer, à partir d'un diagramme (N,Z), les isotopes radioactifs d'un élément. Utiliser des données et les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire et identifier le type de radioactivité.</p> <p>Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs. Exploiter la loi et une courbe de décroissance radioactive. Capacité mathématique : Résoudre une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants.</p> <p>Expliquer le principe de la datation à l'aide de noyaux radioactifs et dater un événement. Citer quelques applications de la radioactivité dans le domaine médical. Citer des méthodes de protection contre les rayonnements ionisants et des facteurs d'influence de ces protections.</p>

CH P9 – Evolution temporelle d'une transformation nucléaire

1. La radioactivité

De nombreuses notions ont été vues en 2^{nde} en physique et 1^{ère} en enseignement scientifique dont il est certainement nécessaire de faire quelques rappels.

1.1. Noyau et isotopes (rappels)

Un noyau est représenté symboliquement par le symbole A_ZX :

Nombre de nucléons \longrightarrow A X \longleftarrow Symbole de l'élément
 Numéro atomique : nombre de protons \longrightarrow Z

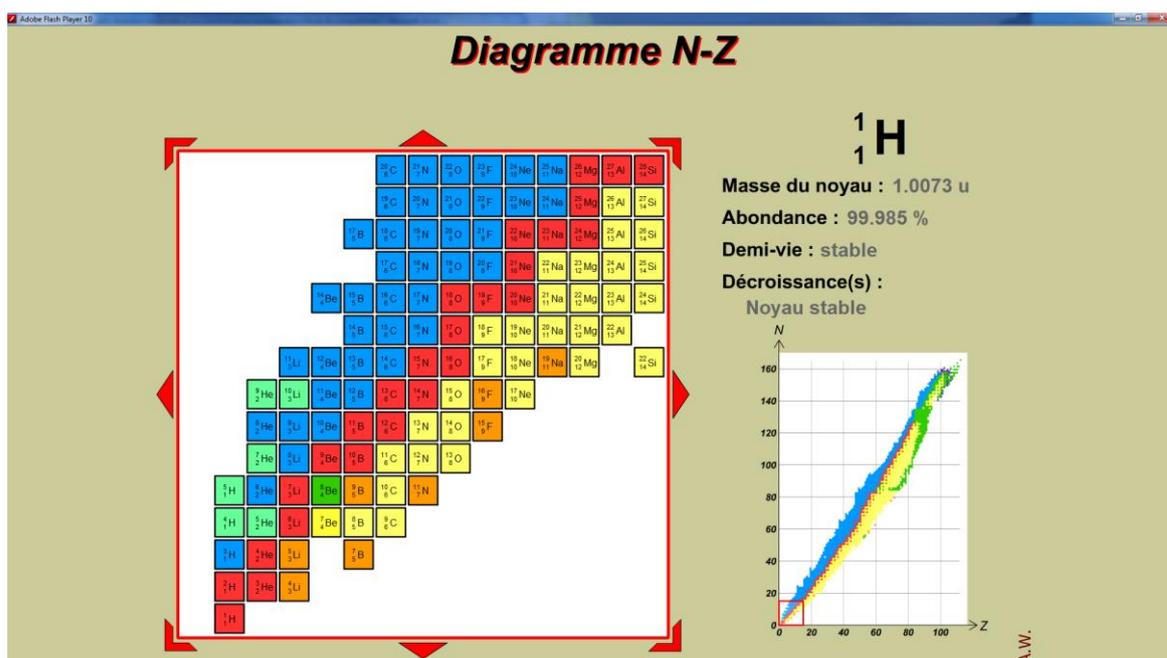
A est également appelé **nombre de masse** et Z est également appelé **nombre de charge**.

Des entités (atomes ou ions) ayant le même nombre de protons (même Z) mais un nombre de neutrons différents (A différents) sont des **isotopes** (${}^{12}_6C$, ${}^{13}_6C$ et ${}^{14}_6C$ sont des isotopes).

1.2. Instabilité des noyaux

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables. Cependant, certains atomes ont des noyaux instables, ce qui est dû soit à un excès de protons ou de neutrons, soit à un excès des deux. Ils sont dits **radioactifs**. La stabilité du noyau dépend donc du nombre de nucléons.

Le diagramme (N, Z) représente l'ensemble des noyaux connus en indiquant leur stabilité.



Animation flash « diagrammeNZ.swf » du site Ostralo.net

Pour $Z \leq 20$ les noyaux stables sont sur la bissectrice $Z = N$ (le symbole A_ZX montre alors que $A = 2 \times Z$). Il n'y a plus de noyaux stables pour $Z > 83$.

1.3. Les réactions nucléaires (rappels)

Un noyau radioactif devient stable en subissant une désintégration. La désintégration est un **phénomène naturel et aléatoire** qui s'accompagne toujours d'un rayonnement. Un noyau père instable va se transformer en un noyau fils plus stable.

Une désintégration respecte la conservation de la charge électrique et du nombre de nucléons.

Il en existe 4 types :

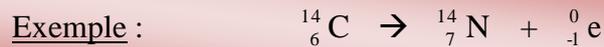
1.3.1. Désintégration α (alpha)

On appelle particule α un noyau d'hélium : ${}^4_2\text{He}$.



1.3.2. Désintégration β^- (béta moins)

Certains noyaux se désintègrent en émettant un électron noté : ${}^0_{-1}\text{e}$.



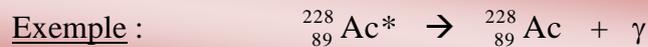
1.3.3. Désintégration β^+ (béta plus)

Certains noyaux se désintègrent en émettant un positron noté : ${}^0_{+1}\text{e}$, une particule identique à l'électron mais de charge opposée.



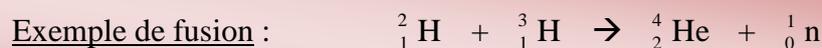
1.3.4. Rayonnement γ (gamma)

Certains noyaux fils sont dans un état excité et deviennent stables en émettant un photon très énergétique noté γ .



1.3.5. Autres réactions nucléaires

Nous avons également vu 2 autres réactions nucléaires mettant en jeu plusieurs noyaux : la fusion et la fission.



2. Loi de décroissance radioactive

2.1. Population de noyaux

Nous avons vu que le phénomène de désintégration est aléatoire, on ne peut donc pas prévoir quand un unique noyau va se désintégrer. Cependant, en considérant un échantillon contenant un grand nombre de noyaux on constate que le nombre de noyaux radioactifs diminue au cours du temps et donc le phénomène peut être modélisé.

Ainsi, on a remarqué que le nombre de noyaux qui se sont désintégrés dN pendant une durée dt est proportionnel au nombre de noyaux N radioactifs et à une constante λ , d'où :

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

Avec : $N(t)$: nombre de noyaux radioactifs à la date t ;
 $dN(t)$: nombre de désintégrations ;
 dt : durée infiniment petite ;
 λ : constante de désintégration ou constante radioactive (en s^{-1}).

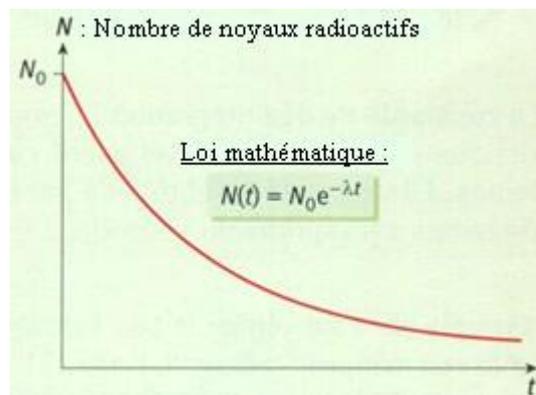
2.2. Loi de décroissance radioactive

L'équation établie correspond à une équation différentielle du 1^{er} ordre sans second membre de type $y' = ay$ et qui admet comme solution générale $y_c(x) = Ce^{ax}$ avec $C \in \mathbb{R}$. Une solution particulière permet de déterminer la constante C .

Résolution : On a : $N' = -\lambda \times N$
 D'où la solution générale : $N_c(t) = Ce^{-\lambda t}$
 En connaissant le nombre de noyaux radioactifs N_0 à l'instant $t=0$ on a :
 $N_0 = Ce^{-\lambda \times 0} = C \times e^0 = C$

Ainsi la solution est : $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$

C'est la **loi de décroissance radioactive**.

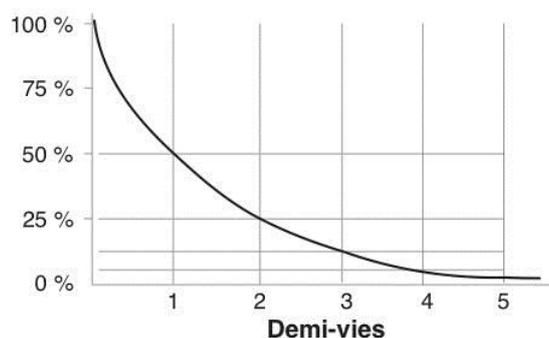


2.3. Temps de demi-vie

On appelle **temps de demi-vie** d'un noyau radioactif (ou période radioactive), le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs initialement présents a disparu.

Comme en cinétique, ce temps de demi-vie est noté $t_{1/2}$.

Selon les atomes radioactifs concernés, cette période est très variable : quelques secondes, quelques heures... plusieurs jours... centaines d'années... ou milliards d'années.



Exemple de demi-vies de quelques noyaux radioactifs :

Noyau	Demi-vie	Commentaire
Technétium 99	6 heures	Radioisotope le plus utile en imagerie médicale nucléaire.
Iode 123	13 heures	Utilisé pour la scintigraphie thyroïdienne (imagerie médicale).
Thallium 201	73 heures	Traceur utilisé principalement en scintigraphie myocardique.
Iode 131	8,2 jours	Traitement de la thyroïde.
Césium 134	2,2 ans	Produit de fission et capteur de neutrons.
Césium 137	30 ans	Produit de fission (déchet nucléaire).
Carbone 14	5 730 ans	Datation de la matière organique.
Uranium 238	4,5 milliards d'années	Combustible pour les surgénérateurs nucléaires.

Lien entre λ et $t_{1/2}$:

On a $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$ à la date $t_{1/2}$ on a : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$

D'où : $\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$ $\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$ $\ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln(e^{-\lambda t_{1/2}})$

$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda t_{1/2}$ $-\ln(2) = -\lambda t_{1/2}$ $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$

2.4. Activité

L'activité A d'une source radioactive correspond à la vitesse de désintégration du matériau radioactif et donc au nombre de désintégration dN par unité de temps dt :

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

L'activité A s'exprime en **Becquerel (Bq)** : 1 Bq = 1 désintégration par seconde.

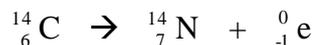
Remarque : L'activité est une grandeur positive puisqu'elle correspond à un nombre de désintégration mais le nombre N de noyaux radioactifs décroît au cours du temps. D'où le signe – puisque la variation est négative (c'est une décroissance).

3. Applications

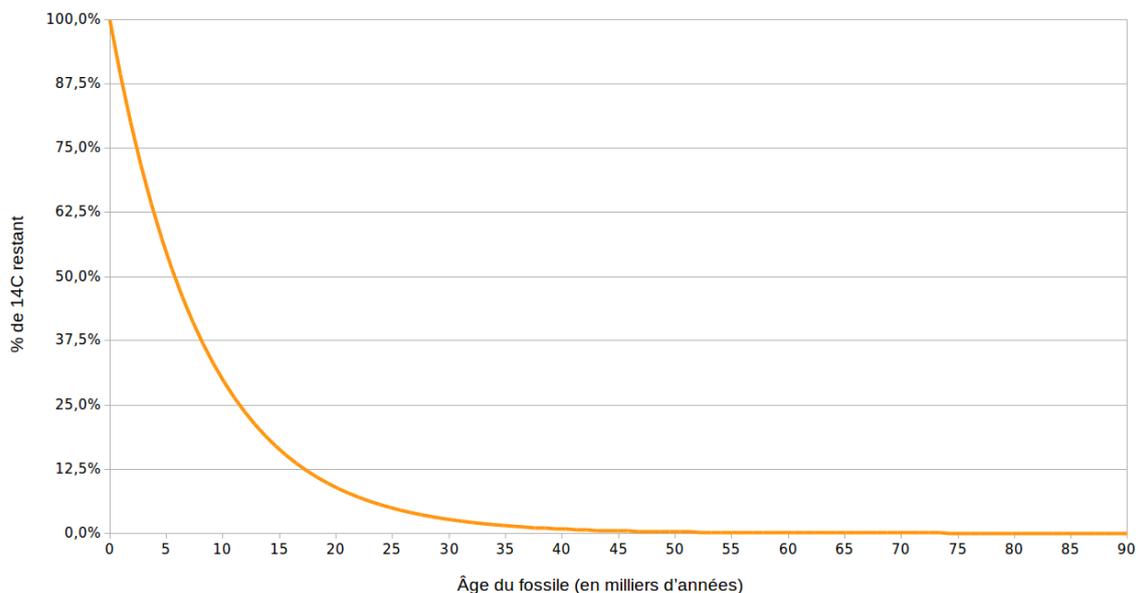
3.1. La datation (rappel)

Dans l'air (celui que les êtres vivants respirent), il existe environ 1 atome de carbone 14 ($^{14}_6\text{C}$) pour mille milliards d'atomes de carbone 12 ($^{12}_6\text{C}$). Cette proportion existe donc dans les êtres vivants et est constante tant qu'il est vivant.

A sa mort, le carbone 14 n'est plus renouvelé et va disparaître au fur et à mesure car le carbone 14 se désintègre **naturellement** et spontanément en émettant un électron :



Sa demi-vie étant de 5 730 années, on obtient la courbe suivante :



En mesurant le taux de carbone 14 dans un fossile on peut donc déterminer à quelle date l'être vivant (végétal ou animal) est mort.

Remarque : La courbe montre qu'au-delà de 50 000 ans la proportion de carbone 14 est insignifiante donc il n'est plus possible de dater un échantillon avec cette méthode. Pour remonter plus loin dans le temps, il faut alors se tourner vers d'autres méthodes (potassium-argon, rubidium-strontium, thermoluminescence, stratigraphie, ...).

3.2. Le domaine médical

La médecine nucléaire est un domaine spécialisé de la médecine dans lequel les substances radioactives sont utilisées dans le but de diagnostiquer ou de soigner un problème de santé. Grâce au nucléaire, le spécialiste accède à une imagerie qui complète efficacement les techniques radiologiques, l'échographie ou l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique).

La scintigraphie par exemple est une technique d'imagerie médicale. Une substance radioactive est administrée au patient (comme par exemple le **technétium-99**) via les vaisseaux, le système digestif ou les voies respiratoires. Cette substance a la particularité de s'accumuler à certains endroits du corps, de produire une lumière très énergétique et de permettre au médecin de détecter les éventuelles anomalies.

D'autres techniques existent comme la **tomographie par émission de positons** (TEP) qui est capable de dépister si des tissus se comportent d'une manière anormale, bien avant que des anomalies soient révélées par un scanner ou une IRM.

La médecine nucléaire soigne également des patients souffrant de tumeurs comme pour la thyroïde avec **l'iode-131**. La molécule qui transporte les rayonnements est choisie en fonction de son affinité avec la tumeur. Les rayonnements ionisants émis détruisent alors les cellules cancéreuses.

3.3. La protection

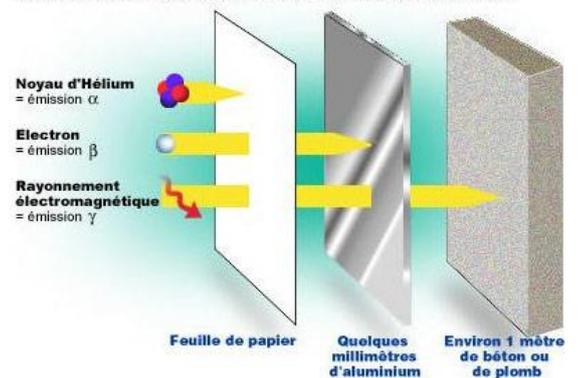
La radioprotection recouvre l'ensemble des mesures prises pour assurer la protection de l'homme et de son environnement contre les effets des rayonnements ionisants.

Une particule α est arrêtée par une simple feuille de papier. Un électron est arrêté par quelques millimètres d'aluminium. Le rayonnement γ quant à lui a besoin d'une grande épaisseur de plomb ou de béton pour être arrêté.

Ainsi, pour se protéger, on combinera plusieurs principes :

- utilisation d'écrans (vitre, tablier de plomb, ...) pour limiter la pénétration ;
- utilisation rapide pour limiter le temps d'exposition ;
- éloignement de la source pour limiter la quantité de rayonnements ...

Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements



De nombreuses normes de sécurité ont ainsi vu le jour instaurant par exemple des valeurs limites d'exposition. Exemple : un travailleur du nucléaire est limité à 20 mSv/an (20 millisievert par an sur 12 mois consécutifs).

Complément : Le **Sievert (Sv)** est une unité de mesure utilisée en radioprotection pour mesurer l'effet d'un rayonnement sur un organisme vivant. Elle permet de comparer l'effet d'une même dose délivrée par des rayonnements de nature différente à des organismes, des organes ou des tissus qui n'ont pas la même sensibilité aux rayonnements. Elle n'est donc utilisée que pour l'exposition humaine. Pour d'autres applications on utilisera le **gray (Gy)** pour mesurer la dose (l'énergie) radioactive absorbée.