

Radioactivité et réactions nucléaires

« Dans chaque atome se cache une énergie énorme, libérée lorsque son noyau est transformé. » Enrico Fermi

I. Objet d'étude

Dans les réactions nucléaires, on s'intéresse :

- aux noyaux des atomes,
- et à certaines particules (comme l'électron, le neutron et le proton,), considérées à ce niveau comme élémentaires (non sécables).

II. Notation symbolique des noyaux et des particules

Contrairement aux réactions chimiques, qui conservent les éléments (les atomes sont simplement réarrangés), les réactions nucléaires modifient la nature même des noyaux : **un noyau peut ainsi se transformer en un autre.**

Pour décrire ces transformations, on utilise une écriture symbolique **commune** aux noyaux et aux particules :

$$\boxed{\begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}} \text{ où } \left\{ \begin{array}{l} Z \text{ est le nombre de charge (charge électrique exprimée en unité élémentaire),} \\ A \text{ est le nombre de masse (lié à la masse de la particule ou du noyau)} \end{array} \right.$$

📌 Exemples :

- Uranium 238 : ${}_{92}^{238}\text{U}$
- L'électron : ${}_{-1}^0\text{e}^-$ (charge -1 unité élémentaire et masse négligeable)

📌 Application 1 : notation symbolique

Les symboles du neutron, du proton et du sodium sont respectivement : n, p et Na.

Le noyau de sodium possède une charge électrique égale à 11 fois la charge élémentaire et une masse environ 23 fois plus grande que celle d'un proton.

Donner la notation symbolique :

- du proton,
- du neutron,
- du noyau d'hydrogène,
- du noyau de sodium,

III. Applications de cette notation symbolique

III.1 Les isotopes

📌 Rappel : les isotopes sont des noyaux d'**un même élément chimique** ayant le même nombre de charge Z, mais des nombres de masse A différents.

👉 Autrement dit : même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

III.2 Les antiparticules

Une antiparticule est une particule ayant la même masse qu'une particule donnée, mais une charge électrique opposée.

👉 Exemple :

- électron : e^-
- positron (antiparticule de l'électron) : e^+

Les antiparticules, comme le positron, peuvent être produites dans des accélérateurs de particules ou lors de certaines désintégrations radioactives. Elles ne peuvent pas être conservées durablement : lorsqu'elles rencontrent une particule de matière correspondante, elles s'annihilent en produisant un rayonnement électromagnétique.

🧩 Application 2 : isotope et antiparticule

1. Donner la notation symbolique de positron.

Dans la nature, on trouve les noyaux suivants en proportions différentes : ${}_{92}^{238}\text{U}$ (99,3 %), ${}_{92}^{235}\text{U}$ ($\approx 0,7\%$) et ${}_{92}^{234}\text{U}$ ($\approx 0,005\%$). Ces noyaux sont radioactifs, donc instables.

2. Justifier que ces trois noyaux sont des isotopes.
3. Donner la composition de chacun de ces noyaux.

IV. Réaction nucléaire

IV.1 Écriture d'une réaction nucléaire

Une réaction nucléaire est représentée par une équation, analogue à une équation de réaction chimique. Elle met en jeu des noyaux et éventuellement des particules.

✓ Écriture générale d'une réaction nucléaire : ${}_{Z_1}^{A_1}\text{X}_1 + {}_{Z_2}^{A_2}\text{X}_2 \rightarrow {}_{Z_3}^{A_3}\text{X}_3 + {}_{Z_4}^{A_4}\text{X}_4$ où :

X_1 et X_2 sont les noyaux ou particules réactifs (présents avant la réaction), et X_3 et X_4 sont les noyaux ou particules produits (formés lors de la réaction).

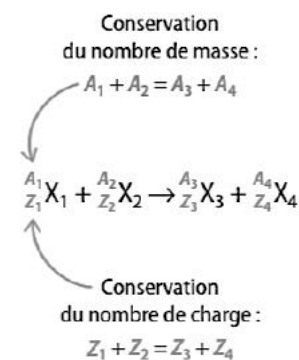
🔍 Autrement dit : Une réaction nucléaire met en jeu des transformations de noyaux, pouvant s'accompagner de l'émission ou de l'absorption de particules.

IV.2 Lois de conservation d'une réaction nucléaire (lois de Soddy)

Lors d'une réaction nucléaire, deux grandeurs se conservent :

- le **nombre de masse** A
- le **nombre de charge** Z

👉 Ces lois permettent d'équilibrer les équations nucléaires.



🧩 Application 3 : exemples de transformation nucléaire

◆ **Fission** : La fission est une réaction nucléaire au cours de laquelle un noyau lourd se scinde en deux noyaux plus légers, avec émission de neutrons et libération d'énergie.

Exemple :

Un neutron est capté par un noyau d'uranium 235 ($Z = 92$). Le noyau formé devient instable et se scinde en deux noyaux plus légers : un noyau de strontium (Symbole : Sr et $Z = 38$, $A = 94$) et un noyau de xénon (Symbole Xe et $Z = 54$, $A = 140$), tout en libérant des neutrons.

Cette réaction libère une grande quantité d'énergie et est exploitée dans les centrales nucléaires.

◆ **Fusion** : la fusion est une réaction nucléaire au cours de laquelle deux noyaux légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd, avec libération d'énergie.

Exemple : deux noyaux légers, le deutérium (${}^2_1\text{H}$) et le tritium (${}^3_1\text{H}$), s'assemblent pour former un noyau d'hélium (${}^4_2\text{He}$), avec émission d'un neutron. Cette réaction se produit au cœur des étoiles par exemple le soleil.

◆ Désintégration radioactive (β^-)

La désintégration radioactive est la transformation spontanée d'un noyau instable en un noyau plus stable, avec émission de particules et/ou de rayonnements.

Exemple : Un noyau de carbone 14 ($Z = 6$) se transforme en un noyau d'azote 14 (Symbole N et $Z = 7$) en émettant un électron. Cette transformation est utilisée pour la datation au carbone 14.

1. Écrire l'équation de la réaction de fission qui se passe dans les centrales nucléaires
2. Écrire l'équation de la réaction de fusion qui se passe au centre du soleil.
3. Écrire l'équation de la désintégration radioactive du carbone 14.
4. Expliquer pourquoi la réaction de fission est qualifiée de **réaction en chaîne**.
5. Compléter l'équation suivante : ${}_{84}^{210}\text{Po} \rightarrow {}_{82}^{206}\text{Pb} + \dots\dots\dots$

V. La radioactivité

📺 Regardez la vidéo " Découverte radioactivité ; démarche scientifique "



<https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/physique-chimie/decouverte-radioactivite.aspx>

V.1 Définition

Un noyau est instable lorsque l'équilibre entre les protons et les neutrons n'est pas respecté.

Il peut alors y avoir :

- trop de protons (répulsion électrique importante),
- trop de neutrons,
- ou un excès des deux pour les noyaux lourds.

Dans ce cas, le noyau se transforme spontanément pour devenir plus stable : c'est la radioactivité.

🔍 Les protons se repoussent (charges \oplus) et les neutrons "stabilisent" le noyau. Il faut donc un bon rapport neutrons / protons

V.2 Propriétés de la radioactivité

- **Spontanée** : aucune action extérieure ne la déclenche
- **Aléatoire** : on ne peut pas prévoir quand un noyau se désintégrera
- **Inéluctable** : tous les noyaux instables finissent par se désintégrer

V.3 Types de radioactivité

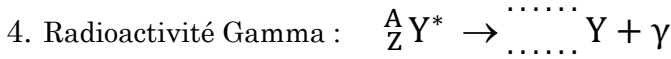
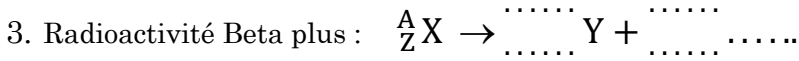
- **Alpha (α)** : émission d'un noyau d'hélium
- **Bêta moins (β^-)** : émission d'un électron
- **Bêta plus (β^+)** : émission d'un positron
- **Gamma (γ)** : émission d'un rayonnement électromagnétique de haute énergie. Pas d'émission de particule

🔗 Application 4 : radioactivité

Compléter les équations génériques des différents types de radioactivité :

1. Radioactivité Alpha : ${}_{Z}^A\text{X} \rightarrow \dots\dots\dots \text{Y} + {}_2^4\text{He}$

2. Radioactivité Beta moins : ${}_{Z}^A\text{X} \rightarrow \dots\dots\dots \text{Y} + \dots\dots\dots$



Lecture pédagogique

- noyau lourd (trop protons et neutrons) ⇒ **Radioactivité α** : perte de 2 protons et 2 neutrons
- trop de neutrons ⇒ **Radioactivité β⁻** : transformation d'un neutron en proton
- trop de protons ⇒ **Radioactivité β⁺** : transformation d'un proton en neutron
- réarrangement nucléaire pour diminuer l'énergie de noyau ⇒ **Radioactivité γ** : désexcitation sans modification de A ni Z

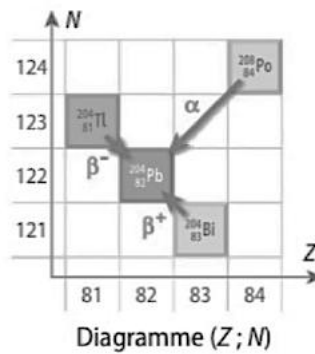


V.4 Diagramme (N, Z)

Regardez la vidéo "Vers la vallée de stabilité" <https://www.youtube.com/watch?v=RuoBXXoeTvg>

Le diagramme (N, Z) représente l'ensemble des noyaux connus (isotopes stables et instables). Il permet de visualiser les transformations menant vers des noyaux plus stables.

[Url vers diagramme \(N ; Z\) interactif](#)



Différents types de radioactivité

- α Noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$
- β⁺ Positron ${}^0_1\text{e}$
- β⁻ Électron ${}^0_{-1}\text{e}$
- Stable

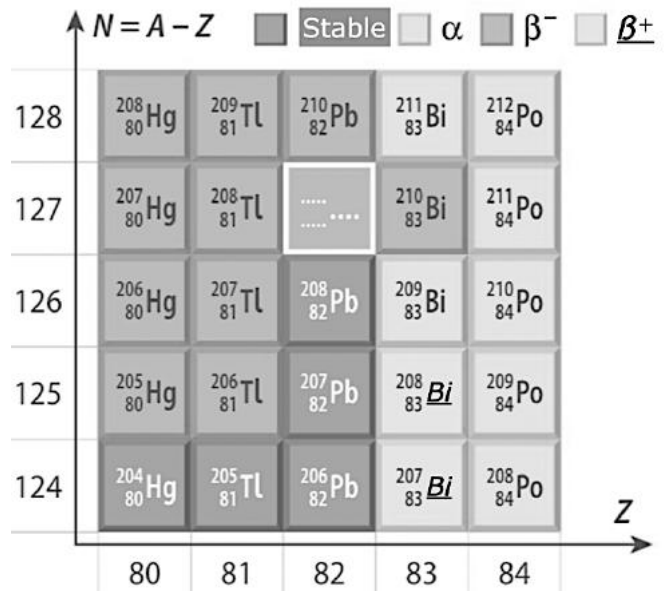
Application 5 : diagramme (N ; Z)

1. Sur le diagramme (N, Z) ci-contre, identifier les noyaux stables et les noyaux radioactifs du plomb.
2. Donner la représentation symbolique du noyau manquant.

Le plomb 207 peut être obtenu à partir de trois désintégrations radioactives différentes.

3. À l'aide des lois de conservation, déterminer les noyaux radioactifs pouvant conduire au plomb 207 pour chacun des types de radioactivité : α, β⁻ et β⁺.
4. Pour chaque cas, écrire l'équation de la désintégration.
5. Écrire les équations des désintégrations successives à partir du plomb 210 conduisant à un noyau stable.
6. Écrire l'équation bilan de cette chaîne de désintégrations.

7. Tracer un diagramme (N, Z) représentant un noyau quelconque ${}^A_Z X$, puis indiquer, à l'aide de flèches, les transformations menant aux noyaux obtenus pour chacun des trois types de radioactivité étudiés. Pour chaque transformation, préciser, en fonction de A et Z, la représentation symbolique du noyau formé.



V.5 Activité d'une source radioactive

◆ L'**activité A(t)** correspond au nombre de désintégrations nucléaires par seconde dans une source radioactive. Elle s'exprime en becquerels (Bq) : $1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration} \cdot \text{s}^{-1}$

L'activité A(t) d'une source radioactive diminue au cours du temps, car les noyaux radioactifs se désintègrent progressivement, ce qui réduit leur nombre N(t).

L'activité est proportionnelle au nombre de noyaux radioactifs de la source N(t) : $A(t) = \lambda \times N(t)$

La constante de proportionnalité λ , appelée **constante radioactive**, dépend uniquement du type de noyaux. Elle s'exprime en s^{-1} .

🔗 Application 6 : exemples d'activité

- une banane : 15 Bq
- 1 L de lait : 80 Bq
- une pomme de terre : $150 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$
- 1 kg de granite : 2000 Bq
- un être humain : 8000 Bq

1. Combien de désintégrations se produisent en 1 minutes dans :

- a) une banane
- b) dans 2 kg de granite
- c) un être humain

2. Deux échantillons ont la même activité. Ont-ils forcément :

- le même nombre de noyaux radioactifs ?
- la même nature de noyaux ?

Justifier.

💡 L'activité ne dépend pas seulement de la nature de la substance, mais aussi de la **quantité de matière** présente.

🔗 Application 7 : activité

On note N(t) le nombre de noyaux radioactifs X présents dans un échantillon à l'instant t. À partir de cet instant et pendant une durée Δt , un compteur mesure le nombre de particules émises.

1. Exprimer l'activité moyenne A_m de l'échantillon en fonction de N(t), N(t+ Δt) et Δt .

2. En déduire que l'activité instantanée vérifie : $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$

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

3. En combinant les relations précédentes, établir l'équation différentielle vérifiée par N(t).

4. Résoudre cette équation différentielle en utilisant la condition initiale N(0) = N₀.

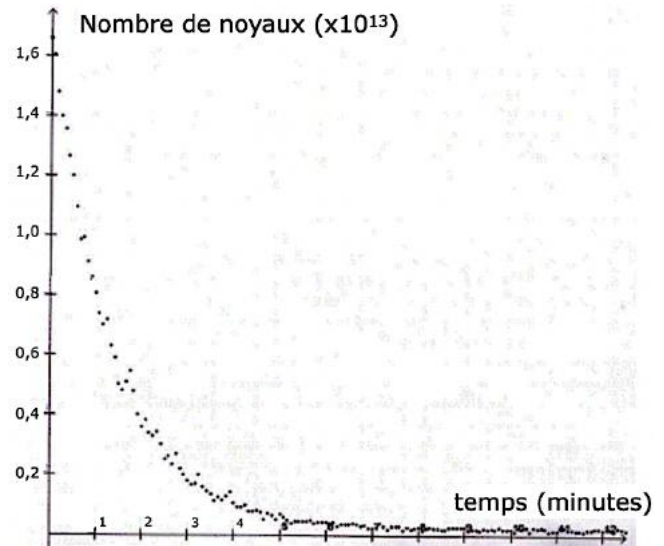
V.6 Demi-vie t_{1/2}

◆ La **demi-vie t_{1/2}** est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans la source se désintègrent.

🔗 Application 8 : demi-vie

1. Montrer que l'expression de la demi-vie t_{1/2} d'une source radioactive, dont les noyaux ont une constante radioactive λ , est : $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$.

2. Déterminer la demi-vie de radon ^{220}Rn à partir du graphique ci-contre



La **demi-vie** $t_{1/2}$ est le temps nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents se désintègrent. Elle est donnée par : $t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$

VI. Protection contre les rayonnements ionisants

VI.1 Émission de rayonnements lors des désintégrations radioactives

Les désintégrations radioactives de type α , β^- et β^+ peuvent s'accompagner de l'émission de photons γ (gamma), très pénétrants dans la matière.

Ces photons γ apparaissent principalement dans deux situations :

- lors de la désexcitation du noyau formé après la désintégration ;
- lors de l'annihilation d'un positron (émis en β^+) avec un électron de la matière.

VI.2 Interaction avec la matière

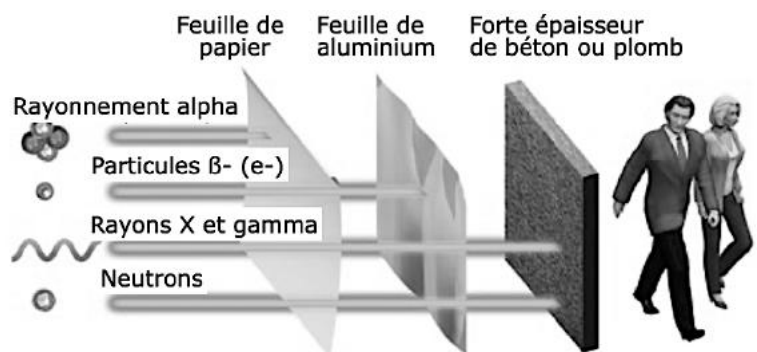
Les particules α , β^- et β^+ sont des particules très énergétiques. Certaines sont chargées électriquement, ce qui favorise leur interaction avec les électrons des atomes. Ainsi les particules α , β^- et β^+ et les photons γ peuvent pénétrer la matière et provoquer des ionisations.

VI.3 Définition des rayonnements ionisants

On appelle rayonnements ionisants les rayonnements capables d'arracher des électrons aux atomes, c'est-à-dire de créer des ions. Ces rayonnements correspondent à des énergies élevées (fréquences généralement supérieures à 10^{15} Hz).

On distingue notamment : les ultraviolets les plus énergétiques, les rayons X et les rayons γ .

Les différents rayonnements ionisants n'ont pas tous la même capacité à pénétrer la matière ni à ioniser. Cela permet de comprendre pourquoi les protections utilisées sont différentes selon le type de rayonnement.



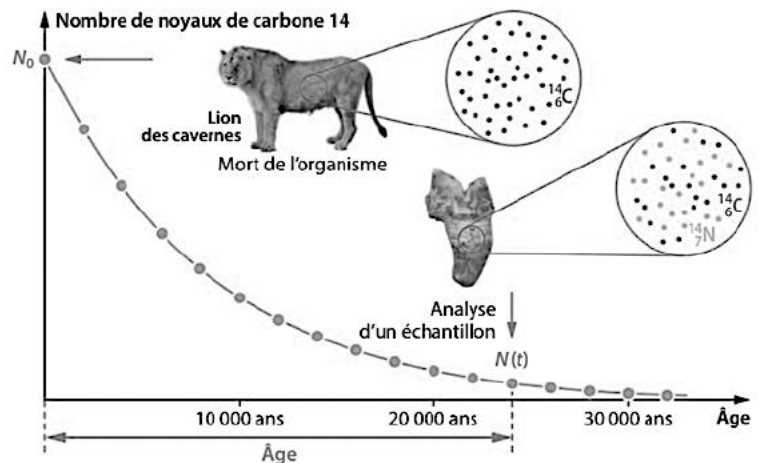
La protection contre les rayonnements ionisants repose sur trois principes : l'utilisation d'écrans protecteurs (tabliers plombés, vitres adaptées) ; la limitation de la durée d'exposition et l'éloignement des sources radioactives.

VII. Applications

VII.1 Datation radioactive

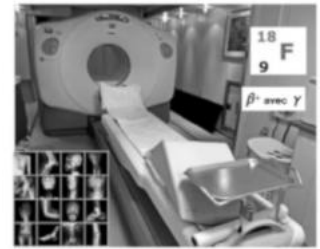
La loi de décroissance radioactive permet de déterminer l'âge d'objets anciens.

Le carbone 14 est notamment utilisé pour dater des échantillons d'origine biologique (ossements, vêtements, bois) jusqu'à environ 50 000 ans.



VII.2 Utilisations médicales

- Imagerie médicale : injection d'un traceur radioactif (émetteur β^+) permettant de localiser certaines cellules ou organes. Exemple : la Tomographie par émission de positons (TEP).
- Radiothérapie : destruction ciblée des cellules cancéreuses grâce à des rayonnements ionisants.



Plan de travail

QCM : <http://www.hatier-clic.fr/pct159>

Exigences et capacités exigibles du Chapitre 15 : Radioactivité et réactions nucléaires	Exercices et Applications	Exercices Hatier
Déterminer les noyaux radioactifs d'un élément à partir d'un diagramme (N ; Z)	Application 5	33 p.164
Écrire une équation de réaction nucléaire en respectant les lois de conservation. Identifier le type de radioactivité.	Applications 3 et 4	30, 32, 33 p.164
Établir l'expression de l'évolution temporelle de la population de noyaux radioactifs (équation différentielles). Exploiter la loi de décroissance radioactive (demi-vie, constante de radioactivité, ...)	Applications 6, 7 et 8	42, 45 p.165
Citer des exemples d'applications de la radioactivité dans le domaine médical. Expliquer le principe de la datation et dater un événement. Radioprotection.	Cours, exercice 1	34, 37 p.164

Exercice : Datation d'une roche

Bac Métropole Jour 1 2025

Les phénomènes de radioactivité permettent, en géologie, la datation des roches. Il est par exemple possible d'utiliser le strontium 87 (^{87}Sr), qui est notamment issu de la désintégration du rubidium 87 (^{87}Rb), lui-même également présent dans une roche.

Les objectifs de cet exercice sont d'étudier le principe de la datation au strontium 87, puis d'utiliser des résultats d'analyse pour déterminer l'âge d'une roche du site de Meymac situé dans le département de la Corrèze, site âgé de plusieurs centaines de millions d'années.

Données :

- temps de demi-vie du noyau de rubidium 87 exprimé en années (a) : $t_{1/2} = 49,2 \times 10^9$ a ;
- constante radioactive du noyau de rubidium 87 : $\lambda = 1,41 \times 10^{-11}$ a $^{-1}$;

- on suppose qu'une datation d'un échantillon de 1 g de roche par le rubidium 87 radioactif est possible tant qu'il reste au moins $N_{\min} = 2,0 \times 10^9$ noyaux de rubidium 87 dans l'échantillon ;

87 Kr 36	88 Rb 37	89 Sr 38
86 Kr 36	87 Rb 37	88 Sr 38
85 Kr 36	86 Rb 37	87 Sr 38

- extrait du diagramme (N,Z) : les cases grises indiquent les éléments stables.
1. Écrire l'équation de la désintégration du rubidium 87 indiquée par la flèche sur l'extrait du diagramme (N,Z).
 2. Préciser à quel type de désintégration correspond cette transformation nucléaire.

On estime qu'un échantillon de 1 g de roche du site de Meymac contenait à sa formation $N_{Rb}(0) = 5,8 \times 10^{20}$ noyaux de rubidium 87. On souhaite déterminer l'âge maximal d'une roche qu'il serait possible de déterminer par une datation au rubidium 87 d'un échantillon de 1 g.

3. Déterminer, en justifiant le résultat, le nombre maximal de demi-vies après lequel il reste suffisamment de rubidium 87 dans l'échantillon pour qu'on puisse le détecter.

On remarquera que le rapport $\frac{5,8 \times 10^{20}}{2,0 \times 10^9}$ est compris entre 2^{38} et 2^{39}

4. Justifier que le rubidium 87 est adapté pour dater un échantillon de 1 g de roche du site de Meymac. La désintégration spontanée des noyaux de rubidium 87 présents dans un échantillon de 1 g de roche suit la loi de décroissance radioactive. Le nombre $N_{Rb}(t)$ de noyaux de rubidium 87 présents dans un échantillon de roche à la date t est solution de l'équation différentielle suivante : $\frac{dN_{Rb}(t)}{dt} = -\lambda \cdot N_{Rb}(t)$

5. Vérifier que $N_{Rb}(t) = N_{Rb}(0) \cdot e^{-\lambda t}$ est solution de l'équation différentielle ci-dessus. On appelle t_f la date à laquelle il reste $N_{\min} = 2,0 \times 10^9$ noyaux de rubidium 87 dans l'échantillon.

6. Déterminer l'expression de t_f en fonction de N_{\min} , $N_{Rb}(0)$ et λ .
7. Calculer la valeur de t_f puis la comparer à la réponse donnée dans la question Q4. Commenter.

On considère que la quantité de strontium 87 formé au cours du temps dans la roche est uniquement issue de la désintégration du rubidium 87. La quantité de strontium 87 présent dans la roche à une date t s'écrit : $N_{Sr}(t) = N_{Sr}(0) + N_{Sr \text{ formé}}(t)$ Équation 1 avec :

- $N_{Sr}(t)$: nombre de noyaux de strontium 87 présents à la date t ;
- $N_{Sr}(0)$: nombre de noyaux de strontium 87 présents à la date t = 0 ;
- $N_{Sr \text{ formé}}(t)$: nombre de noyaux de strontium 87 formés par la désintégration du rubidium 87 à la date t.

8. Donner la relation entre $N_{Sr \text{ formé}}(t)$, $N_{Rb}(0)$ et $N_{Rb}(t)$, sachant que pour un noyau de rubidium 87 qui se désintègre, un noyau de strontium 87 se forme.

9. En déduire l'égalité : $N_{Sr \text{ formé}}(t) = N_{Rb}(0) \cdot (1 - e^{-\lambda t})$ Équation 2

Les équations 1 et 2 permettent enfin d'obtenir l'équation 3 : $\frac{N_{Sr}(t)}{N_{\text{réf}}} = \frac{N_{Sr}(0)}{N_{\text{réf}}} + (e^{-\lambda t} - 1) \frac{N_{Rb}(0)}{N_{\text{réf}}}$ Équation 3

où $N_{\text{réf}}$ représente le nombre de noyaux stables de strontium 86, supposé constant au cours du temps.

On écrit l'équation 3 sous la forme $y = b + (e^{-\lambda t} - 1) x$ avec $y = \frac{N_{Sr}(t)}{N_{\text{réf}}}$, $b = \frac{N_{Sr}(0)}{N_{\text{réf}}}$ et $x = \frac{N_{Rb}(0)}{N_{\text{réf}}}$ dans laquelle :

- y et x sont des grandeurs mesurables par les géologues pour un ensemble d'échantillons prélevés dans une roche donnée ;
- b est une grandeur indépendante de l'échantillon.

Plusieurs échantillons de roche du site de Meymac sont prélevés à la date t_{roche} correspondant à l'âge de la roche. Pour chaque échantillon, on mesure les grandeurs x et y. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1 ci-contre :

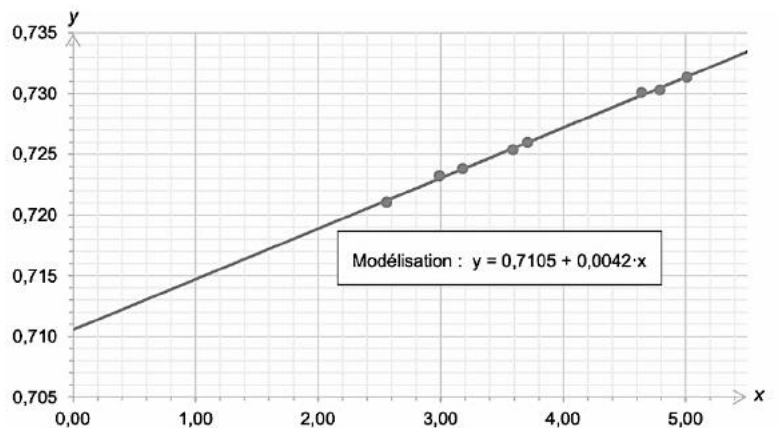


Figure 1. Mesures pour différents échantillons de roche du site de Meymac

10. Déterminer l'âge t_{roche} de la roche du site de Meymac.