

# Réactions nucléaires spontanées : la radioactivité

## I. Les noyaux atomiques :

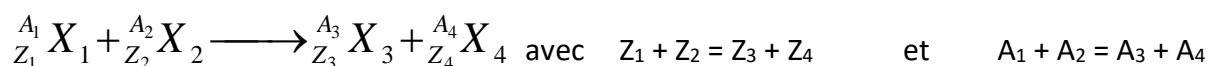
- L'atome est formé d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour. Le noyau est chargé positivement, les électrons négativement. L'atome est électriquement neutre.
- Le noyau est assimilable à une sphère dont le diamètre est de 10000 à 100000 fois plus petit que celui de l'atome, mais il renferme la quasi totalité de la masse de l'atome (plus de 99,9 %).
- Le noyau renferme des protons et des neutrons qui ont des masses très voisines. Un proton porte une charge élémentaire positive. Un neutron ne porte pas de charge électrique.
- Les protons et les neutrons, constituants du noyau, sont appelés les nucléons.
  - La cohésion du noyau est due au fait qu'à très courte distance, l'interaction forte (attractive) entre les nucléons l'emporte sur l'interaction électrostatique (répulsive).
- Z, le numéro atomique, correspond au nombre de protons contenus dans le noyau.  
A, le nombre de masse, correspond au nombre de nucléons contenus dans le noyau.  
Le nombre de neutrons contenus dans le noyau s'obtient en calculant  $N = A - Z$ .

- Un noyau est caractérisé par les deux nombres A et Z. On le note  $\boxed{\begin{matrix} A \\ Z \end{matrix} X}$  où X est le symbole de l'élément correspondant.
- On appelle isotopes, des édifices dont les noyaux ont même Z mais qui diffèrent par leurs valeurs de A.  
Exemple :  ${}^1_6\text{C}$      ${}^{13}_6\text{C}$      ${}^{14}_6\text{C}$   
Deux isotopes ont même nombre de protons, ils diffèrent par leurs nombres de neutrons..

- Constitution et représentation de quelques particules élémentaires :

Nom	Nombre de protons Z = nombre de charge	Nombre de nucléons A	Représentation
Particule $\alpha$ = noyau d'atome d'hélium	2	4	
Proton			
Neutron			
Electron			
Positron = antiparticule de l'électron			

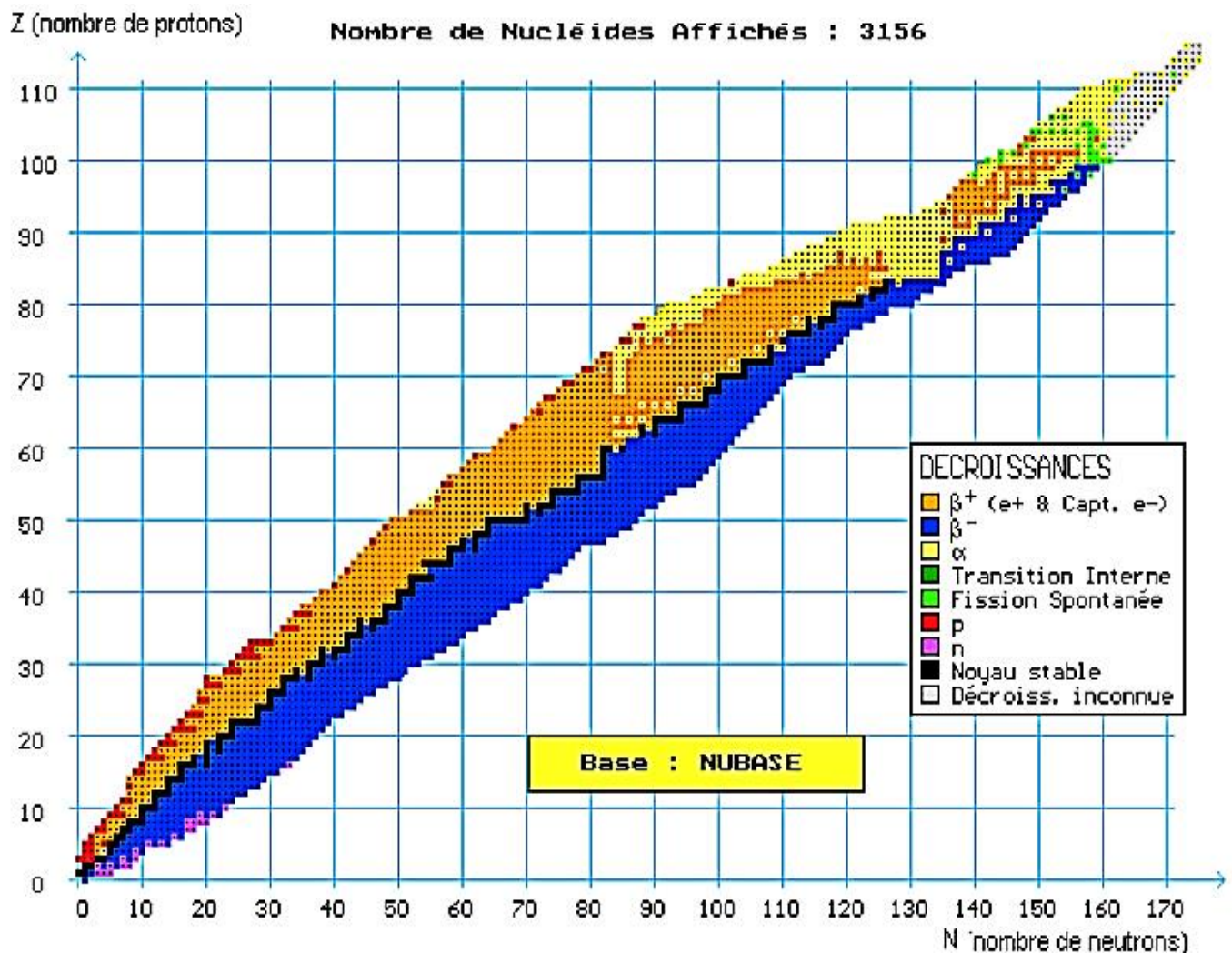
- Lois de Soddy : au cours d'une réaction nucléaire, le nombre de charge et le nombre de masse se conservent :



Contrairement à une réaction chimique, il n'y a plus conservation des éléments, ni de la masse

## II. La radioactivité

- La radioactivité provient de la structure du noyau de l'atome. La plupart du temps, ce noyau constitue un édifice stable. Mais pour certains d'entre eux l'équilibre est imparfait : le noyau se transforme (on dit qu'il se désintègre), en rayonnant de l'énergie et une particule.
- Les éléments constitués d'atomes ayant des noyaux instables sont des éléments **radioactifs** ou radioéléments.
- Pour un élément radioactif, la désintégration est un phénomène :
  - **unique** : chaque noyau ne peut se désintégrer qu'une fois,
  - **spontané** : la désintégration ne nécessite aucune intervention extérieure ,
  - **incontrôlable** : il est impossible d'arrêter une désintégration,
  - **aléatoire** : le moment où débute la désintégration d'un noyau est indéterminé.
- Diagramme de Segré ; vallée de la stabilité  
Le nombre total de noyaux (naturels et artificiels) est d'environ 2000.  
Si l'on reporte sur un graphique le nombre de neutrons (N) en fonction du nombre de protons (Z) déterminant tous les noyaux possible, on obtient le diagramme ci-dessous :



Situer les noyaux radioactifs  $\alpha$ ,  $\beta^-$  et  $\beta^+$  par rapport aux noyaux stables.

<https://www.youtube.com/watch?v=VZHpAwSGYZE>

### III. Les principaux types de radioactivité :

#### 1. Emetteurs $\alpha$ :

- Dans le noyau, à très courte distance, l'interaction forte (attractive) entre les nucléons l'emporte sur l'interaction gravitationnelle et électrostatique (répulsive). Les noyaux ne peuvent donc être trop « gros » sans quoi l'interaction électrostatique répulsive deviendrait plus importante que l'interaction forte.

Ces noyaux « trop gros » sont émetteurs  $\alpha$  : ils éjectent une particule  $\alpha$  de leur noyau :

- Equation générale de la **désintégration  $\alpha$**  :  ${}^A_Z X \rightarrow$
- Exemple : cas du radium 226 ( ${}^{226}_{88} Ra$ ) découvert par Marie Curie et de l'uranium 235 ( ${}^{235}_{92} U$ )

#### 2. Emetteurs $\beta^-$ :

- La physique des particules a montré que les neutrons jouaient un rôle de « ciment » dans la matière et les protons ont le rôle de brique ; on ne peut donc envisager de construire un édifice stable sans utiliser les briques et le ciment dans de bonnes proportions. Les noyaux qui possèdent trop de neutrons par rapport aux protons transforment 1 neutron en proton. Les noyaux qui opèrent cette transmutation sont dits émetteurs  $\beta^-$ .

- Compléter l'équation de cette transmutation :  ${}_0^1 n \rightarrow$

- Ecrire l'équation générale de la **désintégration  $\beta^-$**  :  ${}^A_Z X \rightarrow$

- Exemples : cas du carbone 14 ( ${}^{14}_6 C$ )

#### 3. Emetteurs $\beta^+$ :

- Les noyaux qui possèdent trop de protons par rapport aux neutrons transforment 1 proton en neutron. Les noyaux qui opèrent cette transmutation sont dits émetteurs  $\beta^+$ .

- Compléter l'équation de cette transmutation :  ${}_1^1 p \rightarrow$

- Ecrire l'équation générale de la **désintégration  $\beta^+$**  :  ${}^A_Z X \rightarrow$

- Exemples : cas de l'azote 13 ( ${}^{13}_7 N$ )

#### 4. Rayonnement $\gamma$ :

Le rayonnement gamma ( $\gamma$ ) : Comme les électrons de l'atome, les nucléons occupent des niveaux quantifiés d'énergie dans le noyau. Les noyaux « fils » issus des désintégrations sont souvent créés dans des états excités. Ils reviennent dans leur état fondamental en émettant un rayonnement électromagnétique, de même nature que la lumière, les ondes radios ou les rayons X mais bien plus intense et énergétique : le rayonnement  $\gamma$

Ecriture de la réaction :  ${}^A_Z Y^* \rightarrow {}^A_Z Y + R\gamma$

#### IV. Activité d'une source radioactive :

- L'activité est le nombre de noyaux qui se désintègrent chaque seconde. Elle se mesure en Becquerel (Bq) : 1 Bq correspond à 1 désintégration par seconde.
- L'activité est proportionnelle aux nombres de noyaux radioactifs contenus dans l'échantillon étudié. On a donc la relation suivante :

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

Où  $A(t)$  est l'activité de la source à l'instant  $t$

$N(t)$  est le nombre de noyaux radioactifs à l'instant  $t$

$\lambda$  est la constante radioactive caractéristiques des noyaux constituant la source.

- La constante radioactive  $\lambda$  correspond à la probabilité de désintégration d'un noyau.  
Exemple : Dans une population d'un grand nombre de noyaux de  $^{14}\text{C}$ , 1 sur 8000 va se désintégrer en 1 année. Ceci se note :  $\lambda(^{14}\text{C}) : 1/8000 \text{ an}^{-1}$
- Calculer l'activité en Becquerel de 1,00 g de carbone sachant que la proportion de  $^{14}\text{C}$  dans le carbone naturel est de  $10^{-12}$  et que la masse molaire de carbone est  $M = 12 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ . On rappelle que  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

#### V. Période radioactive :

- La période, ou « demi-vie », est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents se sont désintégrés. Elle se calcule à partir de la constante radioactive :

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

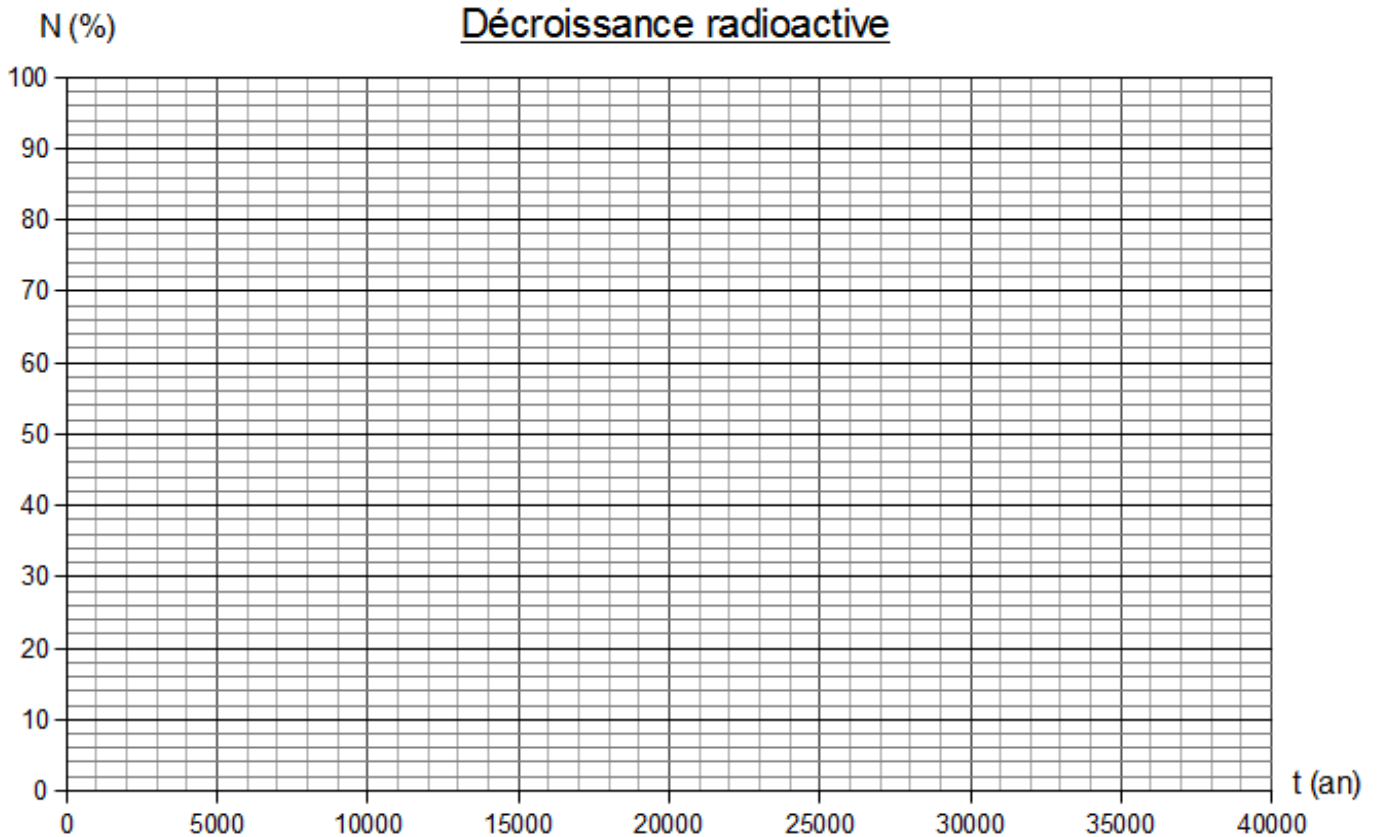
- Calculer la période radioactive du carbone 14 :
- Exemples de périodes : la période radioactive est caractéristique d'un certain type de nucléide :

Radioélément	$^{232}\text{Th}$	$^{235}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{57}\text{Co}$	$^{131}\text{I}$	$^{234}\text{Th}$	$^{212}\text{Po}$
Période	$14 \times 10^9 \text{ ans}$	$4,5 \times 10^9 \text{ ans}$	24300 ans	30 ans	270 jours	8 jours	1,05 s	$3 \times 10^{-7} \text{ s}$

#### VI. Evolution du nombre de noyaux radioactifs au cours du temps :

- En utilisant la période radioactive, tracer sur le graphe ci-dessous l'évolution d'une population de noyaux de  $^{14}\text{C}$  comptant initialement 100% de noyaux.
- Après combien de période peut-on considérer la population comme ayant disparu (inférieure à 1%)

## Décroissance radioactive



### VII. Application : datation

- De toutes les méthodes radio chronologiques (basées sur la loi statistique de Curie-Rutherford-Soddy ou loi de décroissance radioactive), celle de la datation du carbone 14 est la plus connue. Dans la haute atmosphère, sous l'action des rayonnements cosmiques galactiques, des neutrons interagissent avec des noyaux d'azote. Cette réaction forme un isotope du carbone : le fameux carbone 14 :

Immédiatement formé, le carbone 14 s'oxyde en se combinant à l'oxygène pour former du dioxyde de carbone qui se mélange avec le reste de l'atmosphère et est fixé par les plantes lors de la photosynthèse.

Willard Franck Libby (physicien et chimiste américain 1908 - 1980) a montré que la teneur en carbone 14 est constante dans l'atmosphère (comme dans chaque organisme vivant). Cela est dû à un équilibre entre la désintégration et la production de carbone 14.

Lorsqu'un arbre est abattu, le bois cesse de vivre, le processus de photosynthèse s'arrête et il n'y a plus absorption de dioxyde de carbone. Le carbone 14 est alors libre de se désintégrer sans compensation : la population de  $^{14}\text{C}$  diminue et l'activité du bois coupé également.

- Exemple :

On a mesuré l'activité de 2 morceaux de bois déshydraté de même masse :

l'un, "nouveau" (fraîchement coupé d'un arbre), on mesure  $a_1=0,20\text{Bq}$

le second, "ancien" (trouvé dans un tombeau égyptien),  $a_2=0,13\text{Bq}$

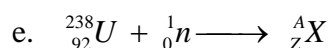
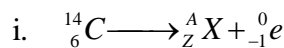
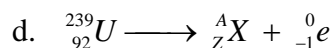
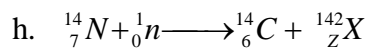
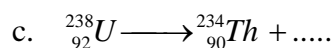
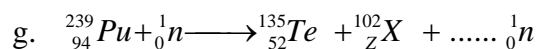
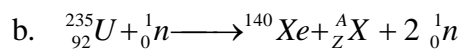
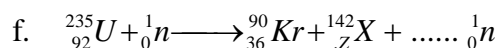
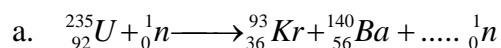
Si on considère que le bois comptait 100% de noyaux radioactifs de carbone 14 au moment où il a été coupé, quel est le pourcentage de noyaux radioactifs restant dans ce bout de bois aujourd'hui ?  
A l'aide du graphe précédemment donné, déterminer l'âge du morceau de bois "ancien".

A quel pharaon a-t-il appartenu ?

## Exercices radioactivité

### 5. Ecriture de réactions nucléaires : Application des lois de Soddy

Compléter les réactions suivantes (préciser X le cas échéant).



### 6. Ecrire les réactions de désintégrations des noyaux suivants :

${}^{217}_{88}\text{Ra}$ ,  ${}^{174}_{72}\text{Hf}$  et  ${}^{213}_{84}\text{Po}$  sachant qu'ils sont émetteurs  $\alpha$

${}^{103}_{42}\text{Mo}$ ,  ${}^{209}_{82}\text{Pb}$  sachant qu'ils sont émetteurs  $\beta^-$

${}^{174}_{73}\text{Ta}$  sachant qu'il est émetteur  $\beta^+$

### 7. Soit $N_0$ le nombre de noyaux radioactifs présents à un instant considéré « initial » d'une population de noyau radioactifs. Soit T la période des noyaux constituant cette population.

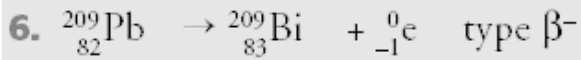
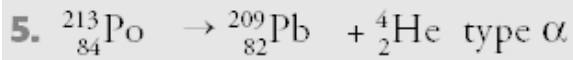
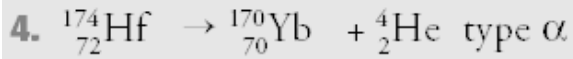
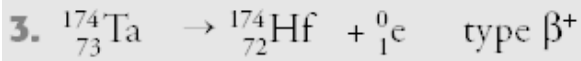
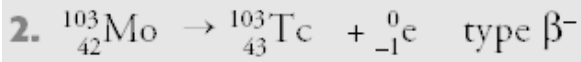
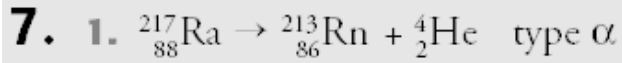
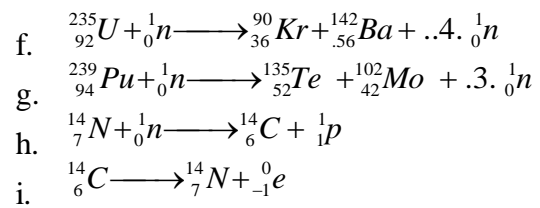
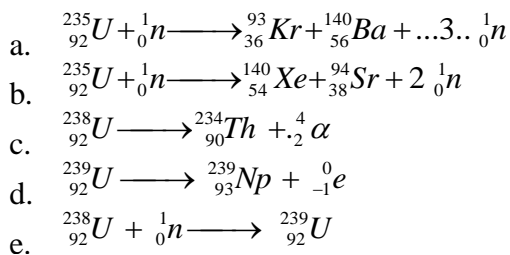
- Exprimer en fonction de  $N_0$  le nombre de noyaux  $N(T)$  qui restent au bout de T.
- Exprimer en fonction de  $N_0$  le nombre de noyaux  $N(2T)$  qui restent au bout de  $2xT$ .
- Exprimer en fonction de  $N_0$  et n le nombre de noyaux  $N(nT)$  qui restent au bout de  $nxT$ .

### 8. Le potassium ${}^{40}_{19}\text{K}$ est radioactif ; il se désintègre pour donner de l'argon ${}^{40}_{18}\text{Ar}$ .

- Ecrire l'équation de désintégration
- Pour déterminer l'âge des cailloux lunaires rapportés par les astronautes d'*Apollo XI*, on a mesuré les quantités relatives de potassium 40 (radioactif) et de son produit de décomposition, l'argon 40, qui est en général retenu par la roche. Un échantillon contenait  $8,2 \times 10^{-3}$  mL d'argon 40 gazeux et  $1,66 \times 10^{-6}$  g de potassium 40. Le volume molaire dans les conditions de la mesure est de 22,4 L/mol.  
Calculer les quantités (en mol) d'argon et de potassium contenus dans l'échantillon rapporté.
- Déterminer la quantité de potassium contenu dans l'échantillon, au moment de la formation de la roche, sachant qu'il n'y avait alors aucune trace d'argon.
- Proposer une méthode permettant de calculer l'âge de ces cailloux sachant que la demi-vie du potassium 40 est  $T_{1/2} = 1,3 \times 10^9$  an.

Aide au calcul :  $\frac{1}{2^{3,3}} \approx 1,02 \cdot 10^{-1}$

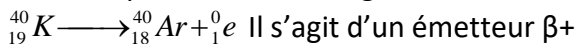
Exercices P 201 n°17, 18, 19, 20, 31, 33



Âge de la Lune :

Le potassium  ${}_{19}^{40}\text{K}$  est radioactif ; il se désintègre pour donner de l'argon  ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ .  
 La période radioactive de potassium 40 est :  $t_{1/2} = 1,25$  milliards d'années

1. Ecrire l'équation de désintégration



Pour déterminer l'âge des cailloux lunaires rapportés par les astronautes d'*Apollo XI*, on a mesuré les quantités relatives de potassium 40 (radioactif) et de son produit de décomposition, l'argon 40, qui est en général retenu par la roche. Un échantillon contenait  $8,2 \cdot 10^{-3}$  mL d'argon 40 et  $1,66 \cdot 10^{-6}$  g de potassium 40 ( $M_K = 40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ). Le volume molaire dans les conditions de la mesure est de 22,4 L/mol.

2. Calculer le nombre d'atomes de potassium  $N_K(t)$  et d'atomes de d'argon  $N_{Ar}(t)$  présents dans l'échantillon à la date  $t$  de l'analyse (qui correspond à aujourd'hui).

$$N_K(t) = \frac{m_K(t)}{M_K} \cdot N_A \quad \text{A.N.} \quad N_K(t) = \frac{1,66 \cdot 10^{-6}}{40} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ noyaux}$$

$$N_{Ar}(t) = \frac{V_K(t)}{V_{mol}} \cdot N_A \quad \text{A.N.} \quad N_K(t) = \frac{8,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{22,4} \times 6,02 \cdot 10^{23} = 2,2 \cdot 10^{17} \text{ noyaux}$$

3. A partir de la question précédente, calculer le nombre d'atomes de potassium 40  $N_K(0)$  présents dans la roche au moment de sa formation.

$N_K(0) = N_K(t) + N_{Ar}(t)$  puisque les noyaux d'argon présents à l'instant  $t$  n'existaient pas à  $t=0$  et sont le résultats de la transformation des noyaux de potassium

A.N.  $N_K(0) = 2,5 \cdot 10^{17}$  noyaux

4. Calculer le rapport  $N(t)/N(0)$ . En déduire l'âge des cailloux.

En utilisant la loi de décroissance sous forme de suite géométrique établie précédemment :

$$N(t) = \frac{N(0)}{2^n} \quad \text{où } n \text{ est le nombre de période radioactive qui s'est écoulé.}$$

On a donc :  $\frac{N(t)}{N(0)} = \frac{1}{2^n}$  or  $\frac{N(t)}{N(0)} = \frac{2,5 \cdot 10^{16}}{2,5 \cdot 10^{17}} = 1,0 \cdot 10^{-1}$

Avec l'aide au calcul :  $\frac{1}{2^{3,3}} \approx 1,02 \cdot 10^{-1}$ , on en déduit que  $n=3,3$ .

Il s'est donc écoulé  $\Delta t = n \times t_{1/2} = 3,3 \times 1,25 = 4,1$  milliards d'années

Rq : ce résultat reste assez peu précis à la vue de la précision des données utilisées.