

La mesure du temps en géologie - Datation par le couple Rubidium-Strontium

C'est par cette méthode que sont datés les plus vieilles roches de la Terre et les plus vieux cristaux (zircons âgés de 4 200 millions d'années).

I - Radioactivité

Le rubidium est présent dans la croûte terrestre sous la forme de 2 isotopes $^{85}_{37}\text{Rb}$ (75 %) et $^{87}_{37}\text{Rb}$ (25 %). L'isotope $^{87}_{37}\text{Rb}$ est instable et se désintègre par émission β^- en strontium. Le noyau de strontium formé lors de cette désintégration est stable.

1) Isotopes

- Au niveau de la composition des noyaux, quelle différence y a-t-il entre $^{87}_{37}\text{Rb}$ et $^{85}_{37}\text{Rb}$?

2) Désintégration nucléaire

- Ecrire la réaction nucléaire et donner le schéma de désintégration de $^{87}_{37}\text{Rb}$
- D'après l'énoncé, y a-t-il émission de photons γ lors de cette désintégration ? Justifier votre réponse.

3) Période radioactive

- La période radioactive du $^{87}_{37}\text{Rb}$ est environ : $T = 50$ milliards d'années.
- Quelle est la *définition* de la période radioactive T ?
- La valeur de T vous semble-t-elle compatible avec la présence en quantité non négligeable de l'isotope radioactif $^{87}_{37}\text{Rb}$ dans la croûte terrestre ?
- Rappeler la relation liant la période T à la constante de désintégration λ
- Déterminer la valeur numérique de λ en an^{-1} et en s^{-1} .
- L'activité du $^{87}_{37}\text{Rb}$ dans l'écorce terrestre est : $A = 81 \text{ Bq.kg}^{-1}$
- Déterminer le nombre d'atomes de $^{87}_{37}\text{Rb}$ présents dans un kilogramme et la masse que cela représente.
Nombre d'Avogadro : $N_a = 6,02 \cdot 10^{23}$
- Sur le terrain, quel type de détecteur peut-on utiliser pour constater la radioactivité du sol ?

4) Décroissance radioactive

On considère ici un échantillon de masse m d'une roche à dater.

- Donner l'expression du nombre d'atomes de rubidium présents à l'instant actuel t : $N(^{87}_{37}\text{Rb})_{\text{actuel}}$ en fonction de $N(^{87}_{37}\text{Rb})_{\text{initial}}$, nombre d'atomes présents à l'instant initial de formation de la roche, instant choisi comme origine des temps.
- Prouver que l'expression du nombre d'atomes $N(^{87}\text{Sr})_{\text{actuel}}$ formés depuis l'instant initial est :

$$N(^{87}\text{Sr})_{\text{actuel}} = N(^{87}_{37}\text{Rb})_{\text{initial}} (1 - e^{-\lambda t})$$

- En déduire que l'expression du nombre d'atomes de $N(^{87}\text{Sr})_{\text{actuel}}$ formés depuis l'instant initial en fonction de $N(^{87}_{37}\text{Rb})_{\text{actuel}}$ est :

$$N(^{87}\text{Sr})_{\text{actuel}} = N(^{87}_{37}\text{Rb})_{\text{actuel}} (e^{\lambda t} - 1)$$

- Quel est le *nombre total* d'atomes $N(^{87}\text{Sr})_{\text{actuel}}$ présents à l'instant actuel t , en prenant en compte la contribution du nombre initial (inconnu) $N_0(^{87}\text{Sr})_{\text{initial}}$

4) Méthode de datation

Le problème majeur est dû au fait que l'on ne connaît pas la quantité de rubidium et de strontium piégés dans l'échantillon au moment de la formation de la roche. On travaille donc en mesurant les abondances relatives de ces éléments par rapport à un élément de référence, le ^{86}Sr qui n'est pas radioactif.

Expérimentalement, on mesure les rapports :

$$Y = \frac{N(^{87}\text{Sr})_{\text{actuel}}}{N(^{86}\text{Sr})_{\text{actuel}}} \text{ et } X = \frac{N(^{87}\text{Rb})_{\text{actuel}}}{N(^{86}\text{Sr})_{\text{actuel}}}$$

- Montrer que l'on peut écrire : $Y = aX + b$, en posant : $a = (e^{\lambda t} - 1)$
- Pourquoi le temps t est-il une constante dans l'expression : $a = (e^{\lambda t} - 1)$?
- En déduire que le temps t de formation de la roche est : $t = \frac{\ln(a+1)}{\lambda}$

5) Application

Pour obtenir une datation de roches, on utilise différents échantillons, notés 1,2, ..., issus d'une même roche. Les points (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) donnent accès à la *pente* a de la droite isochrone.

Le granit est composé de différents minéraux cristallisés à peu près simultanément lors de la solidification du magma. L'analyse des minéraux du granit de Châteauponsac en Haute-Vienne a donné les rapports figurant dans le tableau ci-après.

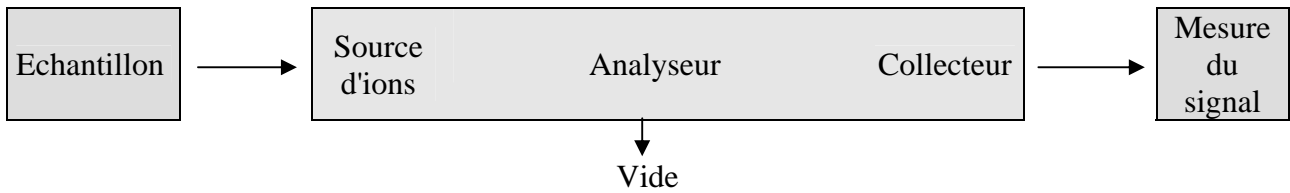
X	15	23	32	43
Y	0,78	0,82	0,87	0,92

- Déterminer la *pente* a de la droite et en déduire l'âge approximatif t de ce granit.

Réponses : $N = 1,84 \cdot 10^{20}$ atomes ; $m = 2,66 \cdot 10^{-2}$ g
 Age du granit : 360 millions d'années

II - Etude de la composition isotopique en strontium d'un granit

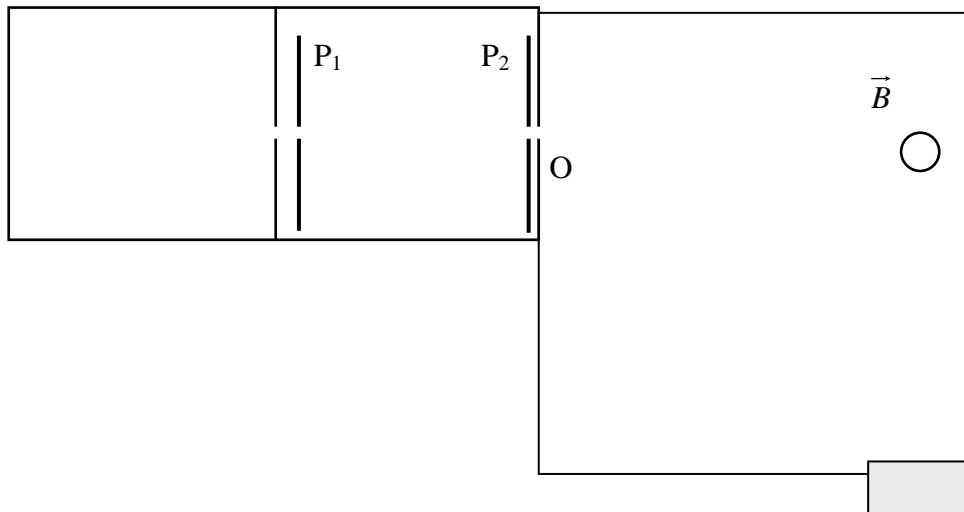
Les spectromètres de masse reposent tous sur le principe suivant :



On néglige le poids des ions devant les autres forces.

$$e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

1) Noter, sur ce schéma, les *différents éléments du spectromètre de masse*.



2) Action du champ électrique \vec{E}

Les ions $^{86}\text{Sr}^+$ de masse m sortent de la chambre d'ionisation avec une vitesse \vec{v}_0 négligeable. Ils sont alors accélérés entre 2 plaques métalliques parallèles P_1 et P_2 .

La tension accélératrice, c'est-à-dire la différence de potentiel entre les 2 plaques, a pour valeur : $U = V_1 - V_2 = 14\,000 \text{ V}$.

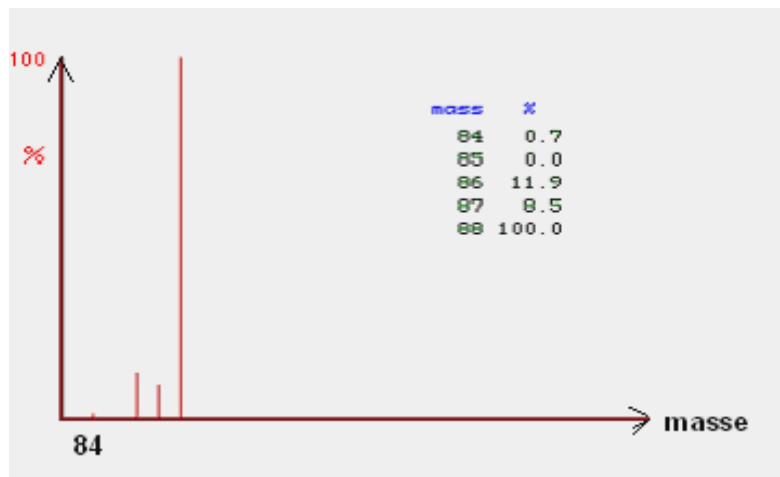
- Tracer en rouge la trajectoire des ions entre les plaques.
- Indiquer le sens de la force électrique \vec{F}_e à laquelle sont soumis les ions pour être accélérés entre les plaques.
- En déduire la direction et le sens du champ électrique \vec{E} entre les plaques ?
- Quelle est la plaque qui doit être portée au potentiel électrique le plus élevé ?
- Quelle est l'énergie cinétique (en eV et en J) des ions à la sortie des plaques ?
- Quelle est leur vitesse v en fonction de e , U et leur masse m ?
 - Application numérique : $m = 1,429 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$ pour les ions $^{86}\text{Sr}^+$

3) Action du champ magnétique \vec{B}

Les ions $^{86}\text{Sr}^+$ pénètrent ensuite dans une région de l'espace où règne un champ magnétique uniforme \vec{B} , d'intensité $B = 0,5 \text{ T}$

- Comment peut-on produire un champ magnétique uniforme et constant au cours du temps ?
- La trajectoire des ions est un quart de cercle de rayon R .
 - Tracer la trajectoire et indiquer, en un point M de la trajectoire :
 - le vecteur vitesse \vec{v}
 - la force magnétique \vec{F}_m
- Indiquer la direction et le sens de \vec{B} pour que les ions décrivent un quart de cercle.
- Prouver que la vitesse des ions est constante et que le rayon de la trajectoire est : $R = \frac{mv}{eB}$
- Etablir l'expression du rayon R de la trajectoire en fonction de la charge e des ions, de leur masse m , du champ magnétique B et de la tension accélératrice U .
 - Calculer numériquement R .
- Tracer la trajectoire d'ions $^{87}\text{Sr}^+$ de masse : $m' = 1,445 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$.
 - Arriveront-ils sur le détecteur qui est une fente très fine ?
 - Montrer que la tension accélératrice doit être : $U' = \frac{m}{m'} U$ pour qu'ils y parviennent ?

4) Spectre de masse

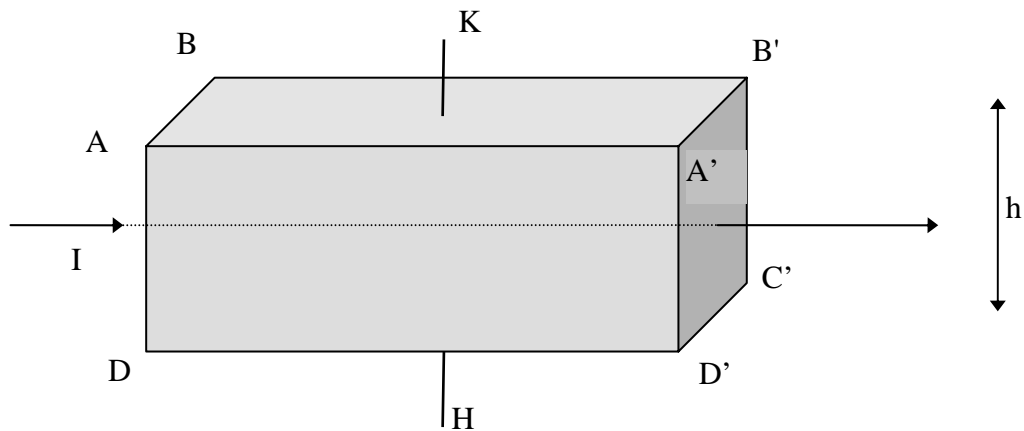


Par convention, l'intensité de l'isotope le plus abondant du strontium est égale à 100 %.

Que vaut, dans le granit étudié, le rapport : $\frac{N(^{87}\text{Sr})}{N(^{86}\text{Sr})}$?

5) Mesure du champ magnétique : sonde à effet Hall

a) Une **sonde à effet Hall** est une plaquette rectangulaire très petite et d'épaisseur d très faible d'un *semi-conducteur de type N*.



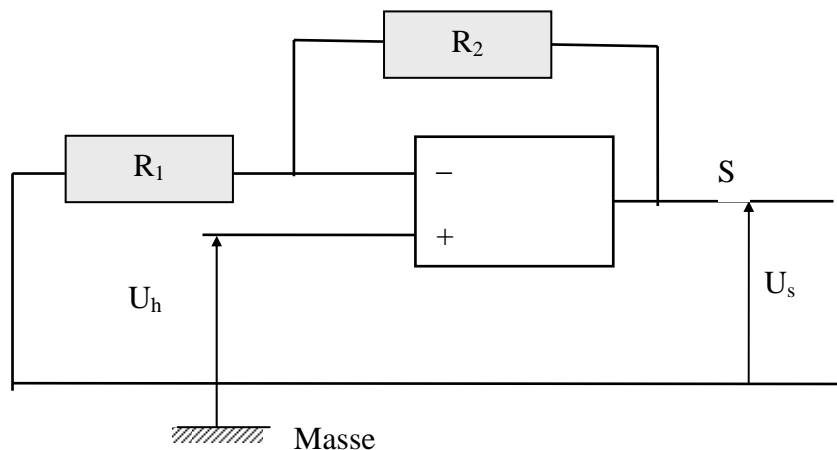
α) La sonde est placée dans le champ magnétique. Si le champ magnétique \vec{B} est parallèle à AB, il apparaît alors une tension : $U_h = V_h - V_k$.

- Pourquoi ?

β) En régime établi, les électrons ont une *trajectoire rectiligne*.

- Quelles sont les 2 forces qui agissent sur les électrons ?
- Etablir la relation : $U_h = k B$
- En déduire U_h si $k = 0,1$

b) Amplification de la tension U_h obtenue à la sortie de la sonde



L'amplificateur opérationnel est considéré comme idéal.

α) Exprimer l'amplification du montage : $A = U_s/U_h$ en fonction des résistances du circuit.

β) Quelle valeur faut-il donner au rapport $\frac{R_2}{R_1}$ pour que la valeur de U_s lue sur un voltmètre à la

sortie du montage soit égale à la valeur de l'intensité du champ magnétique \vec{B} ?

Réponses : $R = 0,316 \text{ m} ; U' = 13\,845 \text{ V}$