COURS ET REPÈRES

Radiochronologie : dater une roche avec un système isotopique fermé

Terminale spécialité · 45 min

Les séries de résultats de ces exercices sont construites pour l'activité et ne proviennent pas d'une étude réelle.

Le principe : une horloge nucléaire

Certains noyaux, dits **radioactifs** (isotopes pères), sont instables et se transforment spontanément en noyaux d'un autre élément (isotopes fils). Pour un noyau isolé, l'instant de la désintégration est imprévisible. Pour un très grand nombre de noyaux, la décroissance suit une loi statistique : $N = N_0\, e^{-\lambda t}$, où λ est la constante radioactive (en an^{-1}). La **demi-vie** $t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux pères présents s'est désintégrée. Elle ne dépend ni de la température, ni de la pression, ni de la combinaison chimique de l'élément : c'est ce qui rend cette horloge fiable.

Système fermé et événement daté

Un minéral ou une roche ne peut être daté que s'il a fonctionné en **système fermé** : depuis l'événement considéré (cristallisation, refroidissement sous la température dite de fermeture), aucun atome père ni fils n'est entré ou sorti. L'âge obtenu correspond alors au temps écoulé depuis cette fermeture. Il ne date pas la formation des atomes eux-mêmes, bien plus anciens. La fermeture du système isotopique (passage sous la température de fermeture) et la cristallisation du minéral ne sont pas forcément simultanées : elles coïncident si le refroidissement est rapide, mais en cas de refroidissement lent la fermeture est plus tardive que la cristallisation.

Équation fondamentale et couple Rb-Sr

Si N est le nombre actuel de noyaux pères, le nombre de noyaux fils vaut $D = D_0 + N\,(e^{\lambda t} - 1)$, D_0 étant la quantité de fils déjà présente à la fermeture. Dans le couple $^{87}Rb \rightarrow {}^{87}Sr$, de constante $\lambda = 1{,}42 \times 10^{-11}\ an^{-1}$ (valeur pédagogique), on divise par l'isotope stable non radiogénique ^{86}Sr, ce qui permet des mesures comparables par spectrométrie de masse :

$$^{87}Sr/^{86}Sr = (^{87}Sr/^{86}Sr)_0 + (^{87}Rb/^{86}Sr) \times (e^{\lambda t} - 1).$$

La méthode de l'isochrone

Des échantillons **cogénétiques** (issus du même magma) partagent le même âge et le même rapport initial, mais ont des rapports Rb/Sr différents. En portant $y = {}^{87}Sr/^{86}Sr$ en fonction de $x = {}^{87}Rb/^{86}Sr$, les points s'alignent sur une droite appelée **isochrone**. Sa pente vaut $a = e^{\lambda t} - 1$, donc $t = \ln(1 + a) / \lambda$. Son ordonnée à l'origine est le rapport initial. Deux avantages : on n'a pas besoin de connaître ce rapport initial, et l'alignement constitue un test de la fermeture du système.

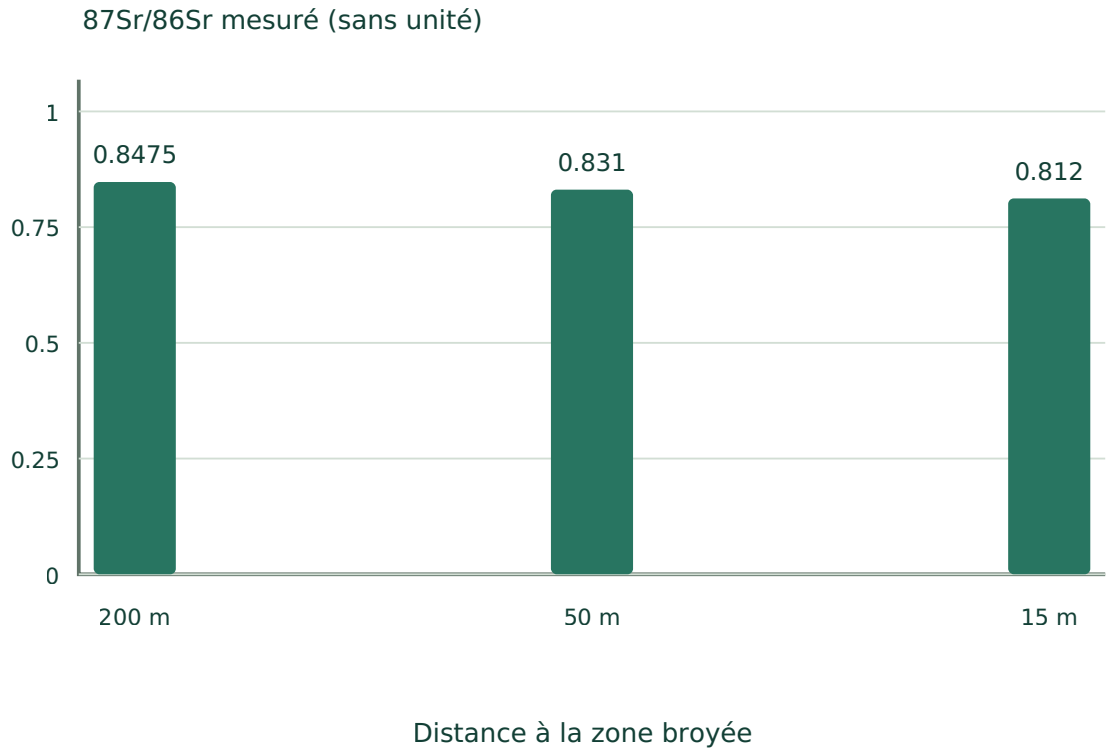
Exemple analysé

Trois échantillons cogénétiques donnent : (x = 0,80 ; y = 0,7074), (x = 2,40 ; y = 0,7143), (x = 4,00 ; y = 0,7212). La pente entre les points extrêmes est a = (0,7212 - 0,7074) / (4,00 - 0,80) = 4,31 × 10^{-3}. Le point intermédiaire est bien sur la droite (0,7074 + 0,00431 × 1,60 = 0,7143). L'ordonnée à l'origine vaut 0,7074 - 0,00431 × 0,80 = 0,7040. L'âge est t = ln(1,00431) / 1,42 × 10^{-11} = 4,30 × 10^{-3} / 1,42 × 10^{-11} ≈ 3,03 × 10^{8} ans, soit environ 303 Ma. Cet âge est celui de la fermeture du système isotopique, c'est-à-dire du passage de la roche sous la température de fermeture. Il coïncide avec l'âge de cristallisation seulement si le refroidissement a été rapide.

Le piège à éviter

Un âge radiochronologique n'est pas automatiquement l'âge de formation de la roche. Si de l'eau chaude, un métamorphisme ou une altération ont rouvert le système et permis des échanges d'atomes, le rapport mesuré ne reflète plus la seule désintégration. Calculer un âge à partir d'un seul minéral perturbé fournit alors un **âge apparent**, sans signification géologique univoque. Il faut aussi choisir un chronomètre dont la demi-vie est adaptée à la durée étudiée : le couple Rb-Sr, de demi-vie proche de 49 Ga, ne produit presque aucun ^{87}Sr en quelques milliers d'années.

Rapport 87Sr/86Sr de biotites selon la distance à la zone broyée



Données fictives construites pour l'activité, non issues d'une étude réelle. Données pédagogiques simplifiées : trois biotites du même granite, de même rapport 87Rb/86Sr (20,0), ont un rapport 87Sr/86Sr mesuré plus faible près de la zone broyée, où la chloritisation augmente. Trois points ne prouvent pas une cause.

Page de la ressource : https://svtlab.fr/ressources/radiochronologie-terminale/

Sources du cadre pédagogique :

Programme et ressources Éduscol : https://eduscol.education.gouv.fr/5835/programmes-et-ressources-en-sciences-de-la-vie-et-de-la-terre-voie-gt