

DS P1 Datation

Les questions sur le temps à l'échelle de la vie et de la terre paraissent aujourd'hui naturelles. Elles ne se sont pourtant posées que lorsque les scientifiques ont abandonné leur vision figée et fixiste de la Terre pour passer à une vision dynamique et évolutive.

Comment les observations et les principes de désintégration radioactive permettent de reconstituer, aujourd'hui encore partiellement, l'histoire de la Terre et de la Vie ?

I. La datation relative.

Chronologie relative à l'échelle d'une région.

Une première approche du temps en géologie consiste à étudier la géométrie entre éléments géologiques (strates, roches, faille, plissement...) afin de dater la mise en place de ces éléments les uns par rapport aux autres: on parle de datation relative.

Comment l'observation des relations géométriques entre structures géologiques renseigne-t-elle sur leur âge relatif ?

L'étude de l'empilement des roches et de leur contenu ou stratigraphie a permis de dégager les principes et d'établir une chronologie relative d'événements géologiques. Il s'agit de reconstruire l'histoire d'une région ou d'un paysage et de positionner des événements les uns par rapport aux autres : l'âge des structures géologiques n'est pas déterminé, mais on détermine l'ordre de leur formation.

La stratigraphie consiste à étudier les couches de roches sédimentaires (strates). Une strate est définie par la nature de la roche qui la constitue ou litho-faciès, mais aussi par l'ensemble des fossiles qu'elle contient ou bio-faciès.

- **Principe de superposition:**

Aujourd'hui évident, il n'a pu être énoncé que lorsque le mode de formation des roches sédimentaires a pu être compris. Dans la mer ou dans un lac, les sédiments se déposent sur le fond recouvrant des sédiments déjà présents et donc plus anciens. En se solidifiant, ils forment une roche sédimentaire et constituent des séries sédimentaires. Le géologue retrouve l'ordre du dépôt en appliquant le principe de superposition: **Dans une série sédimentaire peu ou pas déformée depuis son dépôt, toute strate est plus récente que celle qu'elle recouvre.**

Limites: Des accidents tectoniques peuvent modifier, voire inverser l'empilement initial des strates. Le géologue peut alors rechercher des critères de polarité (fossiles en position de vie, granulométrie) pour être sûr qu'une couche est bien dans sa position d'origine.

- **Principe de recoupement:**

Toute structure est plus récente que celle qu'elle recoupe, et toute déformation (plis, failles) est plus récente que les structures qu'elle affecte.

- **Principe d'inclusion:**

Toute inclusion est plus ancienne que la structure qui l'entoure.

Attention à ne pas utiliser ce principe à la place du principe de recoupement: un pluton granitique (ou un filon) recoupe les strates qu'il traverse, mais il n'est pas inclus dans ces strates !

Chronologie relative entre régions éloignées.

L'étude des dépôts sédimentaires et des roches magmatiques permet d'établir une chronologie à l'échelle locale. Pourtant, il est nécessaire de pouvoir comparer des événements qui se sont produits en des endroits différents, souvent très éloignés.

Comment l'étude des fossiles permet-elle de dater des éléments géologiques éloignés ?

- **Principe d'identité paléontologique:**

Au sein des séries sédimentaires, les géologues ont mis en évidence une variation verticale du contenu paléontologique : les fossiles changent au cours des temps géologiques ; les formes de vie évoluent, et peuvent disparaître brutalement (ex : transition entre le crétacé et l'ère tertiaire ou crise). **Ainsi, deux strates possédant le même contenu paléontologique doivent avoir le même âge.**

Limites: Des fossiles identiques mais non stratigraphiques ne permettent pas de comparer l'âge de 2 strates. Des fossiles stratigraphiques différents peuvent se rencontrer dans des strates de mêmes âges : ils indiquent par exemple des variations climatiques.

- **Fossiles stratigraphiques:**

Tous les fossiles ne peuvent être utilisés pour l'application du principe d'identité paléontologique et être qualifiés de fossiles stratigraphiques. Un bon fossile doit répondre à plusieurs critères : l'espèce doit avoir existé sur Terre pendant une courte période (1 Ma environ ou moins), être représentée par un grand nombre d'individus pour être fréquente dans les sédiments de son époque et avoir présenté une grande extension géographique (espèces marines pélagiques comme les ammonites ou planctoniques comme les foraminifères) ce qui permet d'établir des corrélations entre strates à l'échelle du globe (contrairement aux principes géométriques applicables localement).

- **Principe de continuité:**

L'érosion des roches sédimentaires peut altérer la continuité des strates. Pour comparer dans une région donnée deux strates qui ne sont pas en continuité, le géologue doit observer les strates qui les encadrent: la strate inférieure ou mur et la strate supérieure ou toit. **Lorsque 2 strates sont limitées par le même mur et le même toit, elles correspondent à une seule et unique couche, dont l'âge est identique**

Limites: Principe à appliquer avec prudence en l'absence d'analyse du bio-faciès d'une roche. En effet, une même couche stratigraphique n'a pas nécessairement le même âge en tout point (dépôts sédimentaires liés à l'avancée de la mer sur un continent ou transgression : strate géométriquement continue, mais qui est d'autant plus récente vers le continent). A l'inverse, un changement de nature (litho et bio-faciès) de la roche ne signifie pas nécessairement un âge différent : il peut marquer une transition entre deux milieux sédimentaires différents.

II. La datation absolue.

Au XVIIIe et au XIXe, les géologues posent les fondements de la chronologie relative. Cependant, ils ne possèdent aucun moyen de quantifier le temps écoulé entre un phénomène géologique et la période actuelle, c'est à dire de déterminer l'âge absolu du phénomène. Au cours du XXe siècle, la radio-chronologie permet d'estimer l'âge en années (datation absolue) avec plus ou moins de précision des objets et des événements géologiques et biologiques. La radio-chronologie est basée sur les propriétés de désintégration de certains éléments radioactifs.

Propriétés des atomes radioactifs.

La Terre possède naturellement des atomes radioactifs (élément père: P) qui ont la propriété de se désintégrer en émettant une particule énergétique (électron, photon... à l'origine d'un rayonnement) et en donnant naissance à un autre atome stable (élément fils: F). La réaction est la suivante: **P → F + particule**

La vitesse de cette réaction de désintégration à l'instant t est proportionnelle au nombre P d'éléments pères radioactifs: plus la quantité P est élevée, plus la quantité d'éléments F produits est importante, et inversement. Mathématiquement, cette loi fondamentale de la radioactivité s'écrit: **$dP/dt = -\lambda P$**

dP/dt: la variation de P sur l'intervalle de temps dt (vitesse de désintégration) de signe négatif

λ : le facteur proportionnel ou constante radioactive ($\lambda = \ln 2 / T$)

La fermeture du système correspond au moment (t0) à partir duquel il n'y a plus d'échange entre les éléments chimiques des minéraux d'une roche et le milieu environnant de cette roche. Une fois le système dit « fermé », la quantité d'isotopes radioactifs susceptibles de se désintégrer diminue. Pour les roches magmatiques et métamorphiques, la fermeture du système correspond au moment de la cristallisation de la roche (température en dessous d'un certain seuil). Généralement les roches sédimentaires ne forment pas un système fermé (contamination avec le milieu extérieur à l'échantillon toujours possible).

Le principe de la méthode $^{87}\text{Rb} / ^{87}\text{Sr}$

Au cours de leur formation, certains minéraux des roches magmatiques et métamorphiques intègrent quelques atomes du rubidium. Son isotope 87 (^{87}Rb) qui est radioactif se désintègre en strontium 87 (^{87}Sr): **$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} + \text{énergie}$**

Le ^{87}Sr ayant les mêmes propriétés chimiques que le Ca, il peut se substituer au Ca dans les minéraux qui en incorporent. Le ^{87}Rb ayant quant à lui les mêmes propriétés chimiques que le K (potassium), il peut se substituer au K dans les minéraux qui en incorporent.

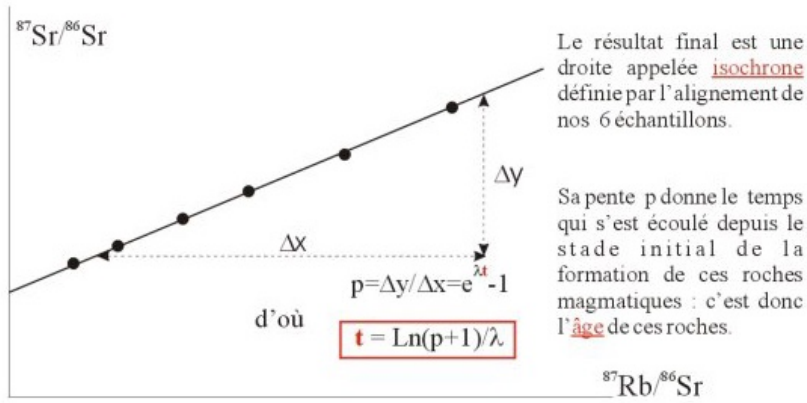
La détermination de l'âge d'une roche par cette méthode est complexe car:

On ne connaît pas la quantité initiale P0 d'élément père ($^{87}\text{Rb}_0$)

On ne connaît pas non plus la quantité d'élément fils (^{87}Sr) provenant uniquement de la désintégration du ^{87}Rb car les minéraux au moment de leur formation incorporent également une certaine quantité de ^{87}Sr non radiogénique (non issu de la désintégration d'un élément père radioactif). La quantité de ^{87}Sr mesurée à l'instant t correspond donc à la quantité initiale de ^{87}Sr non radiogénique plus la quantité de ^{87}Sr issue de la désintégration du ^{87}Rb .

Pour surmonter cette difficulté, il faut des mesures provenant d'au moins deux minéraux d'une même roche (minéraux ayant cristallisé en même temps à partir du même magma = minéraux cogénétiques) et prendre en compte un isotope de référence indispensable pour comparer les mesures des différents échantillons. C'est l'isotope ^{86}Sr qui est stable (comme ^{87}Sr) et qui n'est pas radiogénique (contrairement à ^{87}Sr) qui sert de référence dans ce cas.

Les mesures des rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ réalisées sur différents minéraux cogénétiques de la roche que l'on souhaite dater permettent de tracer une droite dite isochrone de formule: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = (e^{\lambda t} - 1) * ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} + ^{87}\text{Sr}_0/^{86}\text{Sr}$ et dont la pente est fonction du temps écoulé depuis la fermeture du système (âge de la roche) selon la formule: $t = [\ln(a + 1)] / \lambda$



Le principe de la méthode $^{40}\text{K} / ^{40}\text{Ar}$

Le potassium 40 est un isotope instable qui se désintègre:

En argon 40: $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \text{énergie } (\gamma)$, avec $\lambda_{\text{Ar}} = 0,581 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$

En calcium 40: $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + \text{énergie } (\beta^-)$, avec $\lambda_{\text{Ca}} = 4,962 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$

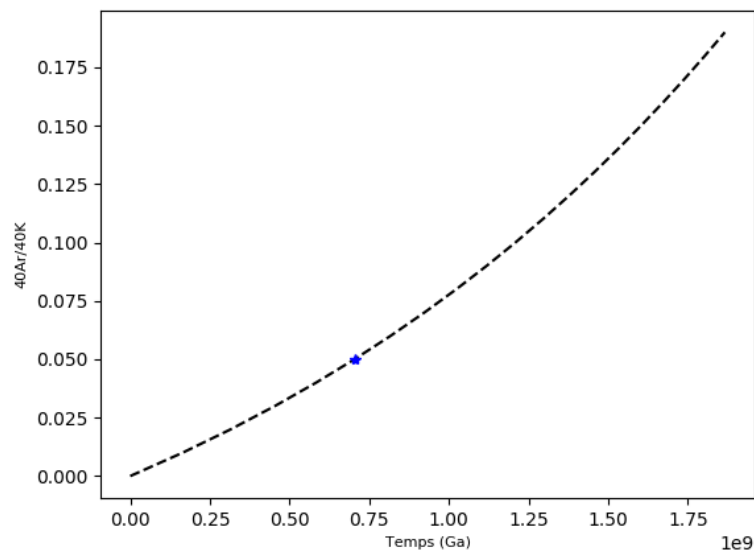
$$\lambda = \lambda_{\text{Ar}} + \lambda_{\text{Ca}} = 5,543 \cdot 10^{-10}$$

Le couple potassium-argon est utilisé pour des roches magmatiques contenant des minéraux riches en K (silicates). De nombreux minéraux contiennent du potassium; ils incorporent donc au moment de leur formation une faible quantité de l'isotope radioactif ^{40}K ; cependant on ne connaît pas la quantité initiale de ^{40}K incorporée: $^{40}\text{K}_0 = \text{inconnue}$. On ne peut donc pas utiliser directement la loi de décroissance radioactive !

L'argon est un gaz qui s'échappe du magma avant sa cristallisation. Ainsi les quantités initiales d'éléments fils sont considérées comme nulles: $^{40}\text{Ar}_0 = 0$. Lorsque le magma a terminé sa cristallisation, tout l'argon formé par désintégration du potassium 40 reste emprisonné dans les minéraux, il n'y a plus d'échanges avec le milieu extérieur, le système est fermé.

A l'instant t , les quantités de ^{40}K et ^{40}Ar peuvent être mesurées dans la roche; le rapport $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}$ est donc connu. A t_0 , le rapport $^{40}\text{Ar}_0 / ^{40}\text{K}_0 = 0$

Au cours du temps, à partir de la fermeture du système, le ^{40}K se désintègre en ^{40}Ar qui reste piégé dans la roche, la quantité de ^{40}K diminue tandis que la quantité de ^{40}Ar augmente. Le rapport $^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}$ augmente donc au cours du temps.



L'âge de la roche peut être déterminé graphiquement ou par la formule suivante: $t = (1/\lambda) * \ln [1 + (^{40}\text{Ar} / ^{40}\text{K}) * (1 + (\lambda_{\text{Ca}} / \lambda_{\text{Ar}}))]$

On multiplie par $(1 + (\lambda_{\text{Ca}} / \lambda_{\text{Ar}}))$ pour tenir compte de la double désintégration de ^{40}K

Le principe de la méthode U / Pb

La datation par la méthode U / Pb est une datation par concordia-discordia. Cette technique graphique permet de dater la fermeture du système (cristallisation roche magmatique) et de dater aussi la réouverture du système (métamorphisme).

L'Uranium 238 se désintègre en Plomb 206 avec une constante de désintégration λ_{238} : $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + \text{énergie}$

L'Uranium 235 se désintègre en Plomb 207 : avec une constante de désintégration λ_{235} : $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb} + \text{énergie}$

Selon le même principe que la méthode Rb/Sr, on utilise un isotope stable (non radioactif) et non radiogénique: le ^{204}Pb pour obtenir les équations des droites isochrones de chacun des deux couples d'isotopes que l'on peut simplifier de la manière suivante:

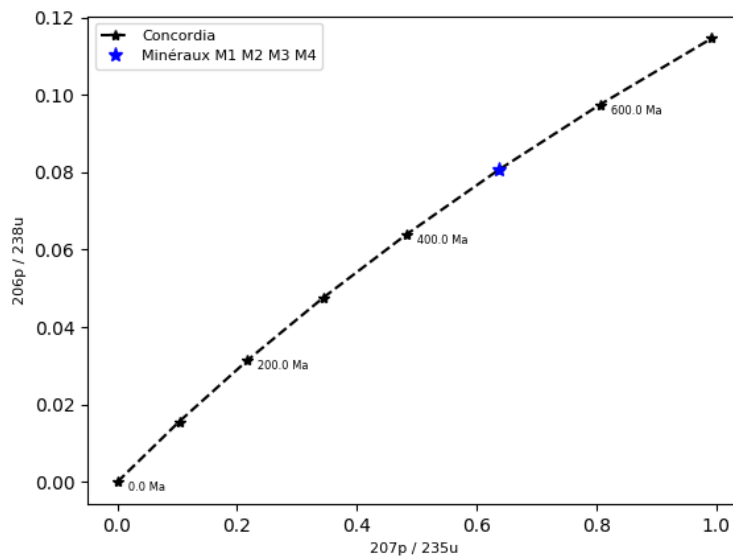
$$(^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U})_t = (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$(^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U})_t = (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

Pour chaque âge (par intervalle de 100 Ma), et pour chaque couple d'isotopes, on calcule avec les formules précédentes la valeur du rapport Pb/U.

On reporte les valeurs dans un graphique $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = f(^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U})$. On obtient une courbe appelée concordia : les âges donnés par les deux couples sont concordants.

Si les mesures des rapports $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ et $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$ effectuées sur les minéraux de la roche se situent sur la concordia, on détermine l'âge graphiquement en observant la position du minéral ayant les rapports les plus élevés sur la concordia:



La roche a ici 500 Ma

Si les mesures des rapports $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ et $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$ effectuées sur les minéraux de la roche ne sont pas situées sur la concordia, on trace une droite de régression linéaire entre les différents minéraux de manière à afficher la discordia qui possède alors deux intercepts avec la concordia :

L'intercept supérieur donne l'âge de la roche (*La roche a ici 600 Ma*)

L'intercept inférieur correspond au temps écoulé depuis la réouverture du système (*Episode métamorphique ayant eu lieu ici il y a 100 Ma*)

