

Réf.04

Chap. IV Le temps et les roches

Pour rappel :

L'enseignement de spécialité en classe de première a permis de découvrir les principaux aspects de la dynamique terrestre en étudiant la structure du globe et quelques caractéristiques de la mobilité horizontale de la lithosphère, permettant d'avoir une compréhension globale de la dynamique terrestre.

Objectifs de ce chapitre :

Comprendre comment un objet géologique, quelles que soient ses dimensions, témoigne d'une histoire que l'on peut reconstituer par l'application de méthodes chronologiques. Ainsi on peut établir une échelle internationale des temps géologiques, montrer que l'histoire de la Terre et l'histoire de la vie sont indissociables, et interpréter les traces de mobilité tectoniques passées.

Comment obtenir des informations sur l'âge des structures géologiques ?

Deux méthodes permettent de dater des événements géologiques : la datation ou chronologie relative qui permet de situer un événement par rapport à un autre (plus ancien que, plus récent que) et la datation ou chronologie absolue qui permet de chiffrer l'âge d'un événement géologique.

I- Datation relative et datation absolue

A- La datation d'une roche sédimentaire

Les couleurs portées sur une carte géologique correspondent chacune, soit à l'âge des roches sédimentaires, soit à la nature des roches magmatiques et métamorphiques qui peuvent être observées en surface. Ainsi, pour une couleur donnée, les roches sont toutes formées à partir de **sédiments** déposés à une même **période**. Réaliser une telle carte suppose de pouvoir **dater les roches sédimentaires les unes par rapport aux autres**, et d'établir des corrélations entre des roches de natures différentes sur de grandes distances. Il s'agit d'une **datation relative**, qui ne permet ni d'attribuer un âge précis à une roche, ni de mesurer la durée d'un phénomène géologique. **La datation relative permet d'ordonner les uns par rapport aux autres des structures (strates, plis, failles, minéraux) et des événements géologiques variés (discordances, sédimentation, intrusion, orogénèse).**

B- La datation d'une roche magmatique ou métamorphique

L'âge des roches d'origine magmatique ou métamorphique est donné en temps absolu, en millions d'années. Leur datation repose sur l'analyse de la teneur en éléments radioactifs de certains de leurs minéraux. Ces méthodes ne peuvent être appliquées aux roches sédimentaires, leurs minéraux ayant été formés, la plupart du temps, avant leur incorporation dans un sédiment.

Sur quels principes fondamentaux repose la datation relative des événements géologiques ?

II- Les principes de la datation relative

A- Les relations géométriques entre objets géologiques : les outils de datation

✓ Le principe de superposition.

Une strate est plus récente que la strate sous-jacente et plus âgée que la strate sus-jacente.

Un affleurement montre que l'accumulation des roches sédimentaires ne s'est pas faite de manière continue, mais par la superposition d'unités d'épaisseur variable, correspondant à des conditions particulières de sédimentation pendant une durée plus ou moins grande. On définit ainsi une **strate**. Lorsque plusieurs strates sont superposées, la strate inférieure est la plus ancienne.

Ce principe concerne les structures géologiques formées par dépôts successifs : les roches sédimentaires, mais aussi les coulées volcaniques.

Il n'est applicable que si la région est restée tectoniquement stable, ou peu instable : il ne peut être appliqué à des terrains déformés, plissés ou faillés. Des déformations tectoniques importantes peuvent même inverser l'ordre normal de superposition.

✓ **Le principe de recoupement.**

Un événement géologique est plus récent que les strates qu'il affecte et plus ancien que les strates non affectées.

Lorsque deux structures se recoupent, la plus récente recoupe la plus ancienne.

Ce principe est valable à différentes échelles :

- **Discordances** : dépôts de séries sédimentaires sur un ensemble plissé ou basculé, plus ou moins érodé.
- **Intrusions** : massifs intrusifs de roches magmatiques (plutoniques ou volcaniques) ou salines recoupant des formations déjà constituées.
- **Failles** : structures de terrains, avec déplacement relatif ou non, des parties fracturées : les failles sont postérieures aux terrains qu'elles affectent.
- **Plis** : le plissement est postérieur à tout terrain affecté par les plis.
- **Minéraux** : tout minéral qui en recoupe un autre a cristallisé en dernier dans la roche

✓ **Le principe de continuité.**

Une strate a le même âge en tous ses points.

Bien que la base soit plus âgée que son sommet, on considère que **l'âge d'une strate est le même sur toute son étendue**. Dans un cadre régional, les caractères physiques et chimiques des roches suffisent souvent pour établir des corrélations à courte distance. Le problème de la corrélation entre deux strates se pose lorsque celles-ci ne sont pas en continuité immédiate. Mais même à deux endroits éloignés géographiquement, si on peut établir, par des indices paléontologiques par exemple, que l'on est en présence d'une même couche, on est conduit à admettre que cette couche a partout le même âge.

Ce principe est vrai même si la nature de la roche de la strate varie d'un affleurement à un autre (en effet, les conditions climatiques et géographiques de dépôt sédimentaire peuvent varier d'un endroit à un autre).

✓ **Le principe d'identité paléontologique.**

Lorsque deux couches, mêmes éloignées à l'échelle régionale, continentale ou mondiale, possèdent les mêmes fossiles stratigraphiques, elles ont le même âge.

✓ **Le principe d'inclusion.**

Tout objet (roche, minéral) inclus dans un autre lui est antérieur.

Il est possible d'observer des inclusions de cristaux plus anciens dans une matrice plus récente : c'est le cas, par exemple, des enclaves de péridotite dans des roches volcaniques, ou des inclusions de zircon dans des biotites.

Comment certains fossiles permettent-ils de dater les roches sédimentaires ?

B- Les fossiles stratigraphiques : des outils de datation relative

Les fossiles sont des restes, traces ou empreintes d'organismes végétaux, animaux ou bactériens conservés dans les sédiments.

Les fossiles utilisés en chronologie relative sont des **fossiles stratigraphiques**.

Ces fossiles peuvent constituer localement des marqueurs du temps. Mais certains d'entre eux permettent également d'établir des corrélations à grande distance. Pour cela il faut disposer de fossiles ayant des qualités particulières : **de « bons » fossiles stratigraphiques doivent avoir une extension limitée dans le temps, une vaste répartition géographique et ont été abondants durant la période considérée**. Il s'agit essentiellement d'espèces marines, dont le mode de vie est indépendant des conditions du milieu et qui se sont renouvelées rapidement au cours de leur évolution.

Exemples :

Les ammonites sont des fossiles stratigraphiques utilisés pour le Jurassique et le Crétacé. D'autres fossiles stratigraphiques sont utilisés pour d'autres périodes des temps géologiques :

- Les trilobites pour le Paléozoïque
- Les foraminifères pour l'ensemble des temps géologiques, et plus spécifiquement le Cénozoïque.

Des corrélations plus fines peuvent être obtenues en faisant appel, non plus à une seule espèce caractéristique, mais à des associations de fossiles qui définissent des **horizons biostratigraphiques**. On regroupe dans un même horizon, ou biozone, des espèces dont les durées d'existence ne coïncident pas entre elles, mais qui se chevauchent au niveau de cet horizon.

Quels sont les principes de la construction de l'échelle stratigraphique ?

C- La construction de l'échelle chronostratigraphique

La datation relative a permis l'établissement d'une échelle stratigraphique des temps géologiques : c'est la division des temps en unités facilement utilisables, sur l'ensemble de la planète.

Les grands événements géologiques et biologiques (crises) ont permis d'établir les grandes séparations à l'échelle des temps géologiques.

L'unité de base de cette échelle de référence est l'étage, caractérisée par un ensemble de fossiles stratigraphiques. Ce terme est défini, et nommé, à partir d'associations de fossiles bien représentés dans une région. Ainsi le Toarcien, étage du Jurassique inférieur caractérisé par plusieurs espèces d'ammonites, vient du nom latin de la ville de Thouars, Toarcium.

Ces étages sont regroupés en systèmes eux-mêmes associés en ères. Les limites entre les différentes ères peuvent correspondre à des crises biologiques majeures ; ainsi, la limite entre le Secondaire et le Tertiaire correspond à la crise qui a conduit à la disparition de nombreux organismes continentaux (les dinosaures) et marins (les ammonites)

Cette échelle stratigraphique est admise par la communauté scientifique, et les divisions et subdivisions ont pu être datées avec précision grâce à la chronologie absolue.

Sur quels principes repose la datation absolue ? Comment déterminer l'âge absolu d'objets ou de structures géologiques ?

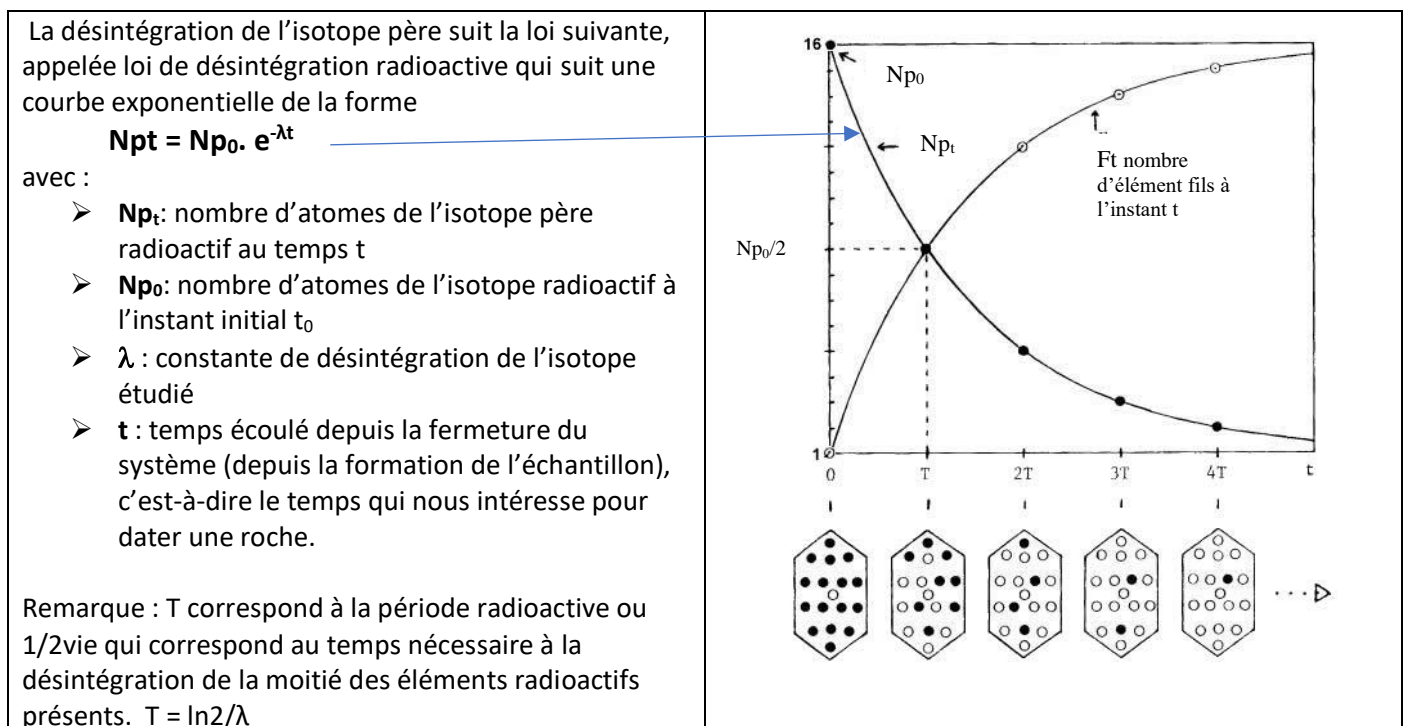
II- La datation absolue

A- Principes de la datation absolue

La datation absolue permet de mesurer des durées de phénomènes géologiques et de situer dans le temps l'échelle relative des temps géologiques.

➤ Pour rappel :

Un élément radioactif, qualifié **d'éléments père (P)**, est constitué par un atome instable. Il se **désintègre** spontanément, donnant naissance à un autre élément, **l'élément fils (F)**, radiogénique. La proportion d'atomes radioactifs qui se désintègrent par unité de temps est une constante immuable, donc une horloge potentielle appelée **constante radioactive (λ exprimé en an^{-1})**.



➤ Application du principe à l'âge des roches :

La datation absolue des roches magmatiques et métamorphiques repose sur la présence d'éléments radioactifs en très faible quantité dans les minéraux des roches.

Les éléments radioactifs ont été incorporés dans les minéraux lors de la formation de la roche (par exemple lors du refroidissement du magma pour une roche magmatique). À partir de ce moment-là, le minéral (ou la roche entière) forme un **système clos**, fermé, ne recevant aucun atome de l'élément radioactif ou de l'élément fils de l'extérieur. Ce qu'on date est le moment de fermeture du système. Pour les roches magmatiques, la fermeture du système correspond à la cristallisation du magma. A la fermeture du système, dans ces minéraux, l'élément radioactif, **l'élément père**, se désintègre en un autre élément, l'élément **radiogénique ou fils**. Le chronomètre est déclenché.

Plusieurs éléments sont utilisés pour les datations. Le principe général est de mesurer la quantité (et donc le nombre d'atomes) de l'élément père et de l'élément fils présents dans le minéral (ou la roche), si l'analyse est faite sur la roche entière.

Remarque : les roches sédimentaires sont difficiles à dater par radiochronologie car elles sont soumises généralement à des échanges avec l'extérieur et elles ne constituent que très rarement des systèmes fermés. L'âge absolu des formations des roches sédimentaires est déterminé indirectement par leur association avec des roches magmatiques.

B- Quelques méthodes de datation

➤ La méthode Rubidium/Strontium (Rb-Sr) :

Au cours de leur formation, certains minéraux des roches magmatiques et métamorphiques **intègrent dans leur réseau cristallin quelques atomes de rubidium**. Or il existe plusieurs isotopes du rubidium, dont l'un, ^{87}Rb , est radioactif et se désintègre en donnant un isotope du strontium, ^{87}Sr , avec une **période suffisamment longue pour permettre la datation des roches les plus anciennes**.

Principe :

On utilise au moins deux minéraux d'une même roche et on prend en compte un autre isotope le strontium 86 (isotope stable).

On mesure les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ dans chaque minéral.

On construit un graphique représentant les rapports isotopiques $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des divers minéraux en fonction de leur $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Les points représentatifs se disposent suivant une **droite dite isochrone** d'équation de type :

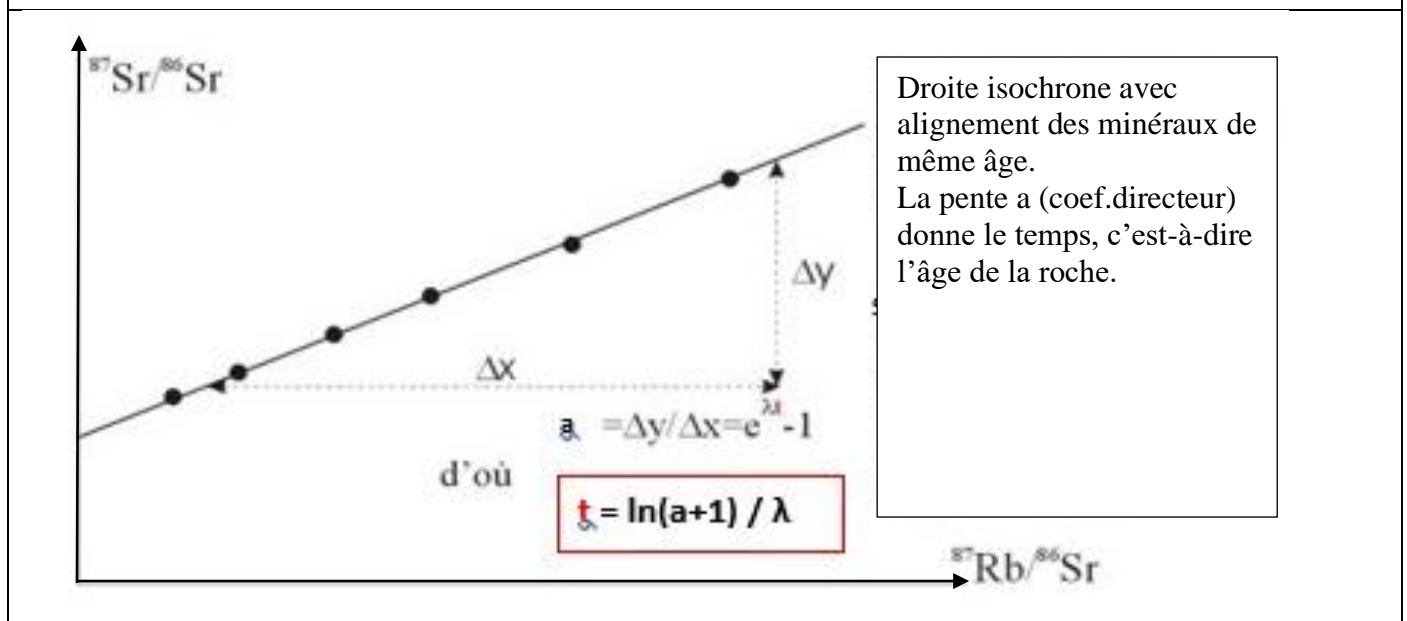
$$y = ax + b \text{ avec } y = ^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \text{ et } x = ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \text{ et } a \text{ est le coefficient directeur (pente de la droite).}$$

La pente de la droite est égale à $(y_B - y_A)/(x_B - x_A)$ avec A et B deux points de la droite.

Par calculs, on détermine que a, le coefficient directeur, est aussi égale à $e^{\lambda t} - 1$ donc on a l'égalité

$$a = e^{\lambda t} - 1 \Leftrightarrow t = \ln(a+1)/\lambda$$

Connaissant la constante de désintégration, on peut trouver l'âge t. **Cette pente est d'autant plus forte que le temps écoulé depuis la formation de la roche est grand. Donc plus a, le coefficient directeur, est important et plus la roche est âgée.**



➤ La méthode Potassium-Argon (K-Ar)

Cette méthode de datation isotopique peut couvrir la quasi-totalité des âges géologiques avec une bonne précision. Elle repose sur la mesure de la quantité d'argon (^{40}Ar) et de potassium 40 (^{40}K) présente dans un échantillon de roche

provenant de la solidification d'un magma entièrement dégazé. Elle permet de dater les minéraux des roches métamorphiques et des roches volcaniques.

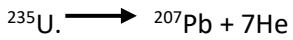
De nombreux minéraux, comme du mica ou certains feldspaths, contiennent du potassium. Ils incorporent donc au moment de leur formation une faible quantité d'un isotope radioactif du potassium, ^{40}K , qui se désintègre en donnant un isotope stable de l'argon ^{40}Ar . Ces minéraux ne contenant pas initialement d'argon, la totalité de ^{40}Ar provient de la désintégration de ^{40}K . Connaissant la constante de désintégration de ^{40}K , on peut donc estimer directement le temps écoulé depuis le début de cette désintégration en utilisant l'équation : $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K} \approx e^{\lambda t} - 1$

➤ **La méthode Uranium/Plomb (U-Pb) :**

L'Uranium 238 se désintègre en Plomb 206 avec une constante de désintégration qu'on appellera λ_{238} .



L'Uranium 235 se désintègre en Plomb 207 : avec une constante de désintégration qu'on appellera λ_{235} .

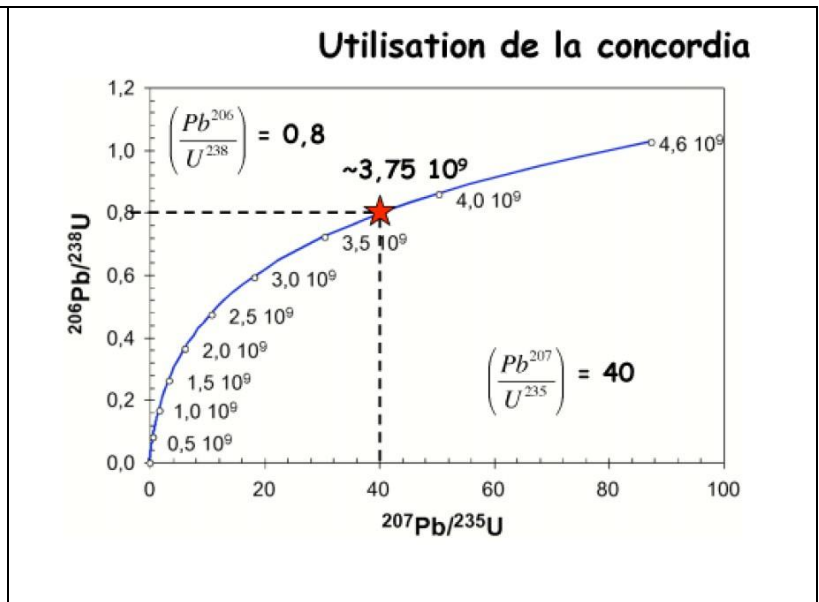


L'utilisation de base est simple puisqu'elle ne nécessite pas de calcul mais seulement une lecture graphique et sa compréhension.

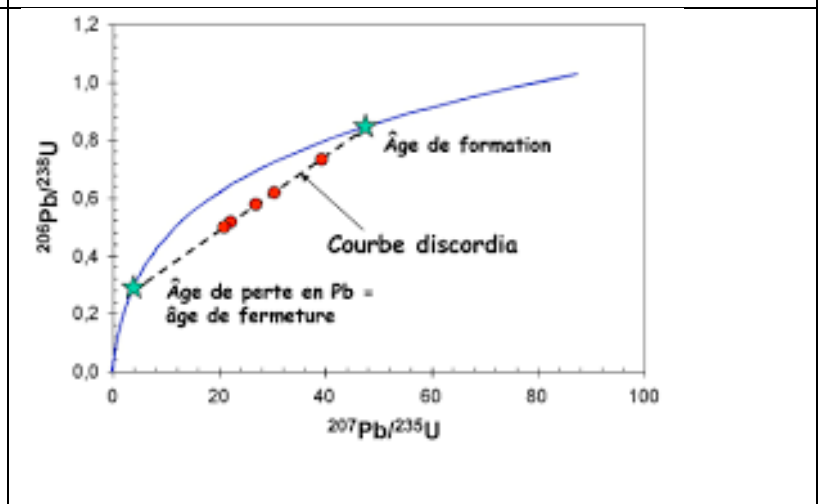
On établit une courbe avec en abscisse la valeur de $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ et pour ordonnée, la valeur de $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Cette courbe est ce qu'on appelle la Concordia.

Tout minéral situé sur la Concordia donne l'âge de cristallisation du minéral, donc du magma.

Par exemple, dans le cas étudié ci-contre, le rapport $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) = 0,8$ et le rapport $(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) = 40$. Les coordonnées concordent avec la courbe et donne un âge de 3,75 milliards d'années.



Lorsque les rapports ne sont pas concordants, les points représentatifs se placent en dehors de la Concordia et sont souvent alignés selon une courbe (parfois même une droite) qui définit la Discordia. Cela signifie alors qu'il y a eu ouverture du système avec perte de plomb. L'intersection supérieure de la Discordia avec la Concordia permet d'obtenir l'âge de la fermeture du système (cristallisation du magma). L'intersection inférieure de la Discordia avec la Concordia date l'ouverture du système (suite par exemple à un événement thermique, telle une phase de métamorphisme).



III- Le couplage des deux méthodes de datation

À partir de l'ensemble de ces principes de datation relative, une échelle de découpage du temps a été réalisée. Les méthodes de datation absolue permettent de situer dans le temps les différentes coupures de l'échelle stratigraphique, obtenues grâce à la datation relative.

Inversement, celle-ci est souvent utilisée pour guider le choix du géochronomètre le plus pertinent.

Lorsqu'il est impossible de pratiquer une datation absolue sur un objet géologique (une strate, un fossile, une surface d'érosion...), les deux méthodes appliquées conjointement (principe de superposition et datation absolue de strates situées de part et d'autre de l'objet) permettent d'estimer son âge. On peut, par exemple, définir la fin du Crétacé par la disparition des ammonites, ou des dinosaures, mais dire aussi que cette période s'est achevée il y a 65 millions d'

Lexique référentiel 04 :

Chronologie absolue : application d'un ensemble de méthodes permettant de donner un âge chiffré à une roche.

Chronologie relative : application d'un ensemble de méthodes et de principes qui consistent à placer chronologiquement des structures et des événements géologiques les uns par rapport aux autres.

Chronomètre géologique : De nombreux éléments chimiques possèdent des isotopes radioactifs qui sont utilisés comme chronomètres géologiques.

Décroissance radioactive : de nombreux éléments chimiques possèdent des isotopes naturels radioactifs qui se désintègrent régulièrement et irréversiblement au cours du temps.

Droite isochrone : droite formée par l'alignement d'échantillons ayant une même composition isotopique et le même âge. La pente de cette droite permet de calculer l'âge de la roche.

Échelle chronostratigraphique : division des temps géologiques fondée sur la coupure entre les strates et leur regroupement en ensembles de plus en plus vastes.

Élément radioactif (ou radiogène) : isotope naturel d'un élément qui se désintègre spontanément en élément radiogénique de masse différente en émettant des rayonnements radioactifs.

Ère : division géochronologique de longue durée. On distingue 4 ères : le précambrien (3,8 Ga à 530 Ma), l'ère primaire ou Paléozoïque (530 Ma à 245 Ma), l'ère secondaire ou Mésozoïque (245 Ma à 65 Ma), l'ère Cénozoïque (-65 à actuel) ; Cette dernière étant divisé en ère tertiaire (65 Ma à 1,8 Ma) et ère quaternaire (encore appelée Anthropozoïque (1,8 Ma à nos jours).

Étage : unité de base de la chronostratigraphie, l'étage est défini par un stratotype, c'est-à-dire un affleurement ayant des caractéristiques lithologiques et paléontologiques spécifiques.

Fermeture du système : arrêt de tout échange en isotopes entre le système analysé et l'environnement.

Fossile stratigraphique : espèce prolifique, ayant eu une grande extension géographique et une existence courte à l'échelle des temps géologiques

Isotope fils radiogénique : isotope issu de la désintégration d'un isotope père radioactif.

Période (ou demi-vie) : temps nécessaire à la désintégration de la moitié des éléments pères radioactifs.

Principe de continuité : une strate a le même âge en tous ses points.

Principe d'identité paléontologique : lorsque deux couches, mêmes éloignées à l'échelle régionale, continentale ou mondiale, possèdent les mêmes fossiles stratigraphiques, elles ont le même âge.

Principe d'inclusion : tout objet (roche, minéral) inclus dans un autre lui est antérieur.

Principe de recoupement : un événement géologique est plus récent que les strates qu'il affecte et plus ancien que les strates non affectées.

Principe de superposition : une strate est plus récente que la strate sous-jacente et plus âgée que la strate sus-jacente.

Capacités et attitudes attendues pour ce chapitre :

- Utiliser les relations géométriques pour établir une succession chronologique d'événements à partir d'observations à différentes échelles et sur différents objets (lames minces observées au microscope, affleurements, cartes géologiques).
- Observer une succession d'associations fossiles différentes dans une formation géologique et comprendre comment est construite une coupure stratigraphique (par exemple par l'étude des successions d'ammonites, de trilobites ou de foraminifères).
- Comprendre les modalités de construction de l'échelle stratigraphique ; discuter les fondements et la validité des différents niveaux de coupures.
- Observer les auréoles liées à la désintégration de l'uranium dans les zircons au sein des biotites.
- Identifier les caractéristiques (demi-vie ; distribution) de quelques chronomètres reposant sur la décroissance radioactive, couramment utilisés dans la datation absolue : Rb/Sr, K/Ar, U/Pb.
- Comprendre le lien, à partir d'un exemple, entre les conditions de fermeture du système (cristallisation d'un magma, ou mort d'un organisme vivant) et l'utilisation de chronomètres différents.
- Extraire des informations à partir de cartes géologiques ; utiliser les apports complémentaires de la chronologie relative et de la chronologie absolue pour reconstituer une histoire géologique.

Références :