

CH1 – LE TEMPS ET LES ROCHES

La **géologie** est la science qui étudie la Terre et les roches qui la composent. Une partie du travail du géologue consiste à **reconstituer l'histoire de la Terre** et des terrains, ce qui permet de déterminer l'**âge relatif** des événements qui ont affecté une région : c'est la **datation relative**. Cette démarche est complétée par l'**étude des fossiles (paléontologie)** mais aussi par la **datation absolue** des roches grâce à des **méthodes radiochronologiques** (basées sur la radioactivité de certains éléments chimiques contenus dans les roches). L'ensemble de ces méthodes permet de reconstituer l'histoire de la Terre et de construire l'**échelle des temps géologiques**. Celle-ci est enrichie régulièrement par les découvertes de nouveaux fossiles ou de nouveaux affleurements.

Comment reconstituer le plus précisément possible les événements qui ont affecté la Terre?

I – Des outils tirées d'observations de terrain : la chronologie relative

A. Les principes géométriques

La **chronologie relative** permet de situer les événements les uns par rapport aux autres dans le temps/ permet d'ordonner les uns par rapport aux autres des structures (strates, plis, failles, minéraux) et des événements géologiques variés (discordances, sédimentation, intrusion...). Elle s'appuie sur l'observation des **relations géométriques** des différents « objets géologiques » à l'affleurement (une zone où les roches sont en surface et nettement visibles permet de visualiser les strates (ou couches) de roches sédimentaires, les plis, failles et inclusions qui ont pu les affecter.)

Pour cela, les géologues raisonnent en utilisant des « principes » dont le premier a été énoncé en 1669 par Niels Stensen (Nicols Sténon), évêque, géologue et anatomiste danois. La datation relative se base sur 3 principes généraux:

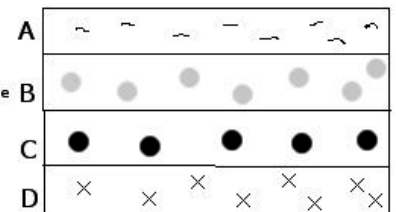
- **Principe de superposition** : les couches les plus récentes recouvrent les plus anciennes (récent en surface, âgé en profondeur).

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 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

Toute couche est plus récente que celle qu'elle recouvre, à une condition, que la région ait été relativement stable.

Ici, âge de $D > C > B > A$.



- Les roches sédimentaires sont formées de particules de petite taille qui se sont déposées et se sont compactées pour former une roche (ex : calcaire, grès...). Connaissant ce mécanisme, les géologues ont défini un **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.** Ainsi, si on retrouve une roche sédimentaire d'une nature particulière (faciès), encadrée par une roche plus ancienne (le mur) et une roche plus récente (le toit) à 2 endroits différents, on pourra dire qu'elles ont le même âge

- **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.

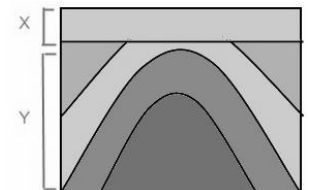
Ex : les failles, les plis, les cheminées volcaniques, plutons qui peuvent recouper des terrains plus anciens.

Ce principe est valable à différentes échelles :

➤ **Discordances** : dépôts de séries sédimentaires sur un ensemble plissé ou basculé, plus ou moins érodé.

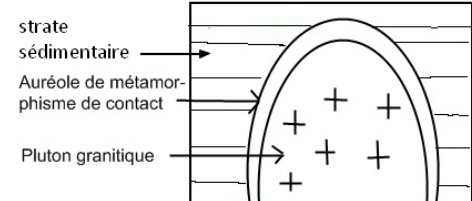
Lorsqu'une strate X repose à l'horizontale sur des strates redressées ou plissées Y, la zone de contact est appelée **discordance**. Elle implique une succession d'évènements géologiques : Dépôt – Plissement – (Régression) – Érosion – (Transgression) – Dépôt.

Ici, on dit que X repose en discordance sur Y.



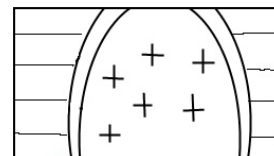
➤ **Intrusions** : massifs intrusifs de roches magmatiques (plutoniques ou volcaniques) recoupant des formations déjà constituées.

Par exemple, une **intrusion de granite** se met en place par cristallisation d'un magma au cours de son ascension et est plus jeune que les roches traversées (= **roches encaissantes**). Celles-ci peuvent être modifiées par la chaleur dissipée par le magma en cours de refroidissement, il se forme alors une **auréole de**



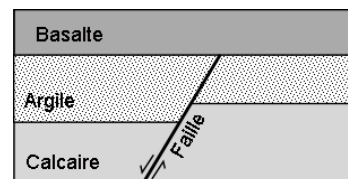
métamorphisme de contact contemporaine à la mise en place du granite et postérieure aux roches sédimentaires qui existaient avant.

Remarque : Si un massif granitique affleure aujourd'hui, alors que sa consolidation à partir d'un magma s'est effectuée à quelques kilomètres de profondeur, cela signifie que les terrains qui le recouvraient ont été enlevés par **l'érosion**. Cette érosion est postérieure à la mise en place du massif granitique



➤ **Failles** (déformations cassantes): **structures de terrains, avec déplacement relatif ou non, des parties fracturées : les failles son postérieures aux terrains qu'elles affectent.**

Ici, la faille affecte les terrains calcaires et argileux mais pas la coulée de basalte. Elle est donc postérieure aux dépôts de calcaire et d'argile mais antérieure à la coulée de basalte



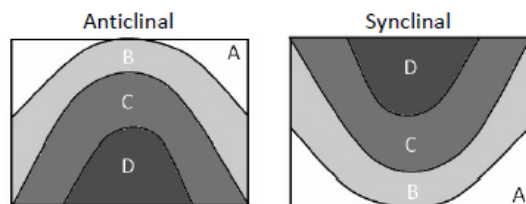
➤ **Plis** (déformations souples)

Parmi les **plis**, on distingue :

L'anticlinal = La strate située la plus à l'intérieur de la courbe (**D**) est la plus ancienne.

Le synclinal = La strate située la plus à l'intérieur de la courbe (**D**) est la plus récente.

Dans les deux sortes de pli, la déformation (le plissement) **affecte** la série sédimentaire, donc par **principe de recoupement** le plissement est **postérieur** à la mise en place de la série



- **Principe d'inclusion**: les inclusions sont des « objets » emprisonnés dans une strate, un échantillon de roche, un minéral, **un élément inclus dans un autre est plus ancien**. On considère que les volcans et plutons (événements magmatiques) correspondent plutôt à des recoupements et non à des inclusions!!

Le pyroxène, la glaucophane, le plagioclase sont des minéraux caractéristiques des métagabbros appelés « schistes bleus ».

Ici, la glaucophane forme une couronne entourant le pyroxène ou autrement dit, le pyroxène est inclus dans la glaucophane. Le pyroxène s'est donc formé avant la glaucophane



Lorsque ces principes ne sont pas respectés sur un affleurement, il faut rechercher les causes des bouleversements observés. Par exemple, lorsque des sédiments anciens reposent sur des sédiments récents, on peut envisager que les terrains ont été déplacés par un chevauchement..

Pour donner un âge relative en géologie, on emploie les préfixes suivant :

- « **anté** » si un événement **c'est passé avant un autre**.
- « **syn** » s'il se déroule **en même temps**.
- « **post** » si un événement **suit un autre**

B. L'utilisation des fossiles comme outil de datation

B.1. L'intérêt des associations de fossiles

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**.

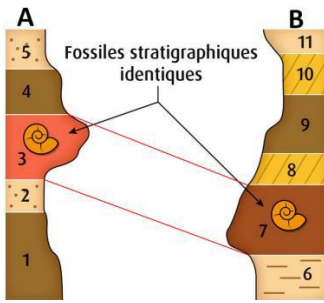
Pour cela il faut disposer de fossiles ayant des qualités particulières : un « **bon** » fossile stratigraphique doit avoir une **extension limitée dans le temps** et une **vaste répartition géographique** et ont été **abondants** durant le période. Il s'agit donc essentiellement d'espèces marines, dont le mode de vie est indépendant des conditions du milieu et qui se sont renouvelées rapidement au cours de leur évolution.

- **Principe d'identité paléontologique**: **des roches sédimentaires de même nature et présentant exactement les mêmes associations de fossiles ont le même âge.**

L'association faunistique trouvée dans une strate géologique est comparable à une ancienne « *photographie de famille* ». On raisonne de la sorte : si les 5 fossiles A, B, C, D, E sont présents dans la même couche et si on connaît la période d'existence de chacun d'eux, on peut déterminer à quelle période s'est déposée cette couche sédimentaire

Dans le cas présent, c'est au Silurien supérieur que les 5 espèces de fossiles ont cohabité

CARBONIFÈRE	Supérieur				
	Inférieur				
DÉVONIEN	Supérieur				
	Moyen				
SILURIEN	Supérieur				
	Inférieur		B	E	
ORDOVICIEN	Supérieur	A			
	Moyen			D	
	inférieur				



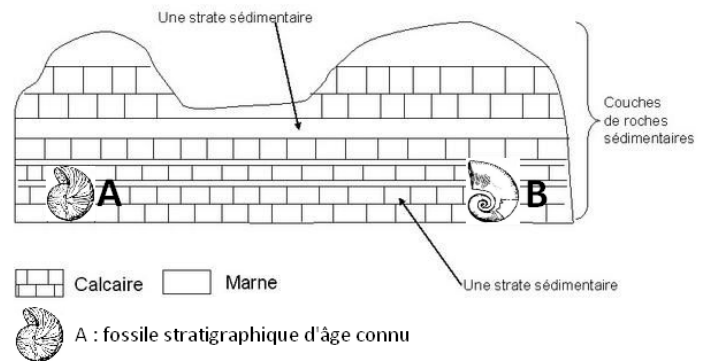
Ici, la strate 3 de la série sédimentaire A et la strate 7 de la série sédimentaire B ont le même âge car elles contiennent les mêmes associations fossilifères

- Le **principe de continuité**: Si un fossile stratigraphique déjà daté de façon absolue se trouve sur une même couche que d'autres fossiles alors ils appartiennent tous à la même époque.

Ici, le fossile A daté permet de dire que le fossile B est du même âge car retrouvé dans la même strate

Exemples :

- Les **ammonites** sont des fossiles stratigraphiques utilisés pour le jurassique et le crétacé.
- Les **trilobites** pour le Paléozoïque
- Les **foraminifères** pour l'ensemble des temps géologiques, et plus spécifiquement le Cénozoïque



II – Des outils tirés de mesures en laboratoire : la chronologie absolue

A. La désintégration radioactive (Le principe de la datation absolue)

La **radiochronologie** permet de dater plus précisément les roches en se basant sur les propriétés de la **désintégration radioactive**. Un **isotope radioactif (élément père)** est instable et se désintègre en **isotope radiogénique (élément fils)** selon un phénomène continu et irréversible et une loi exponentielle décroissante qui s'écrit sous la forme :

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

N = nombre actuel d'atomes de l'élément père

N_0 = nombre initial d'atomes de l'élément père

Cette réaction se déroule à une vitesse qui est propre à l'isotope considéré et correspond à sa **constante de désintégration (λ)**. A partir de cette vitesse, on peut également définir la **demi-vie (T)** qui correspond à la **dégradation de 50% des éléments père**. Ces 2 paramètres sont reliés par la relation suivante : $T = \ln 2 / \lambda$

Le principe : les géophysiciens mesurent les concentrations d'**éléments pères restants** et les concentrations d'**éléments fils formés**. Différents couples de géochronomètres ($^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ – $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ – $^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ – $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$) sont disponibles pour dater les roches terrestres, les restes vivants ou les traces de leurs activités (peintures rupestres) ; chaque couple se distingue par la période de l'élément père. Le choix du géochronomètre dépend de l'âge supposé de l'objet que l'on détermine par chronologie relative.

L'âge obtenu par la mesure correspond à la « **fermeture du système** », c'est-à-dire à l'arrêt de tout échange entre l'objet géologique et son environnement (mort d'un être vivant, cristallisation d'un magma...).

Enfin, le choix de la méthode appliquée dépend de l'âge estimé de l'échantillon (constante de désintégration adaptée) et sa nature chimique : présence de l'élément dans l'échantillon. Par exemple, les granites seront datés par la méthode Rb/Sr alors que les basaltes et gabbros seront datés par la méthode Sm/Nd (même principe mais Rb trop peu présent dans les gabbros). On considère que le résultat obtenu n'est plus fiable au-delà de 10 fois la période de désintégration de l'élément. En effet, au-delà de 10 fois la période de désintégration, la quantité d'éléments père n'est plus suffisante pour effectuer une datation fiable. Par exemple pour la datation au ^{14}C , on considère que la datation n'est plus possible au-delà de 57 300 ans, on utilise donc ce chronomètre pour des périodes plus courtes.

B. Quelques méthodes de datation

La désintégration radioactive est une fonction exponentielle du temps:

$$(1) P = P_0 \cdot e^{-\lambda t} \rightarrow P/P_0 = e^{-\lambda t} \rightarrow P_0 = P \cdot e^{\lambda t}$$

$$(2) F = F_0 + (P_0 - P) \rightarrow F = F_0 + (P \cdot e^{\lambda t} - P) \rightarrow$$

$$(3) F = F_0 + P (e^{\lambda t} - 1)$$

P et F sont déterminés par mesure directe grâce à un spectromètre de masse. Toutefois, dans l'équation (3), il reste deux inconnues : la quantité initiale d'élément fils F_0 qui ne peut pas être déterminée par mesure directe et le temps.

1 ^{er} cas : la quantité initiale est connue : le couple $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	2 ^{ème} cas : la quantité initiale reste inconnue : le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
$F_0 = 0$ car l'argon est un gaz volatile qui s'échappe de l'échantillon particulièrement au moment de la cristallisation d'un magma. $^{40}\text{Ar} = (e^{\lambda t} - 1) \cdot ^{40}\text{K}$ ($y = a \cdot x$) L'âge est déduit directement par mesure des concentrations de ^{40}Ar et ^{40}K .	$^{87}\text{Sr} = (e^{\lambda t} - 1) \cdot ^{87}\text{Rb} + ^{87}\text{Sr}_0$ ($y = ax + b$) La détermination de l'âge passe par une résolution graphique. Les mesures de ^{87}Sr et ^{87}Rb sur plusieurs minéraux permettent de tracer une droite isochrone . La pen te de cette droite dépend du temps écoulé depuis la fermeture du système et permet de connaître l'âge de l'échantillon.
Période radioactive = 1,31 Ga	Période radioactive : 50 Ga
Réservé pour des roches magmatiques métamorphiques	Réservé pour des roches magmatiques métamorphiques plus âgées que 100 Ma.

❑ La méthode Rb/Sr : la méthode des isochrones

Au moment de la cristallisation d'une roche, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont identiques (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du magma). Néanmoins, certains minéraux sont plus riches en ^{87}Rb (cas de la biotite, riche en K) et les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ sont donc différents selon le minéral. Dès que la roche est formée (fermeture du système), le ^{87}Rb se désintègre et le $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ rapport commence à diminuer. Comme ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr , le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ va, au contraire, augmenter.

Les points donnés par les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ restent alignés et forment une droite isochrone. Cette droite présente une pente (coefficient directeur a) d'autant plus importante que le temps est important.

Ainsi, en mesurant la quantité de ^{87}Rb et ^{87}Sr dans les différents minéraux de la roche, on peut reconstituer la droite isochrone et déterminer sa pente afin d'identifier l'âge de la roche en utilisant la formule suivante:

$$t = \ln(a+1) / \lambda$$

t = âge de l'échantillon

a = pente de l'isochrone

λ = constante de désintégration radioactive : $1,42 \cdot 10^{-11}$ pour Rb/Sr

ln : logarithme népérien

Cette méthode donne un âge avec une précision de l'ordre de 10 Ma. Elle est particulièrement adaptée pour la datation des roches de la croûte continentale (granites).

III – L'échelle stratigraphique internationale : une synthèse nécessaire

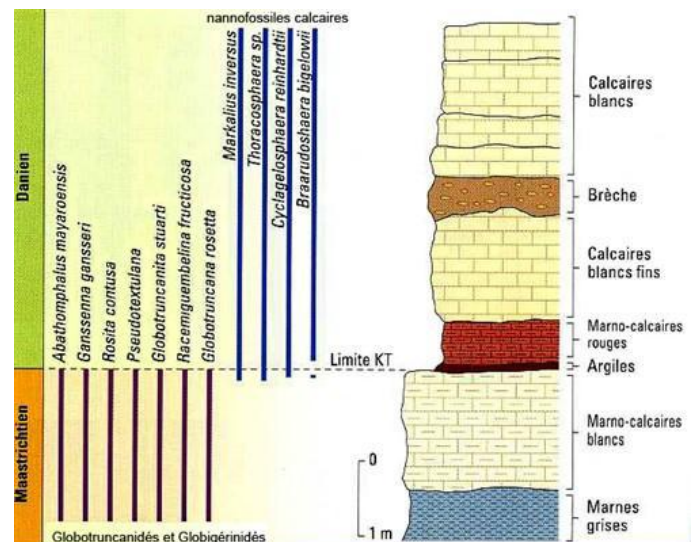
A. De grandes coupures dans l'échelle des temps géologiques

Les limites entre les principales unités ont été établies principalement sur des **changements fauniques** importants (*flèches rouges*) mais également de floristiques.

Ainsi, la limite entre le **Paléozoïque** (litt., *la vie ancienne*) et le **Mésozoïque** (litt., *le milieu de la vie*) correspond à la **grande extinction** de la fin du **Permien** où 95% des espèces sont disparues de la surface du Globe, alors que la limite entre le Mésozoïque et le **Cénozoïque** (litt., *la vie récente*) correspond à la disparition de plusieurs groupes dont les dinosaures. Le Protérozoïque (litt., *antérieurement à la vie*) a été ainsi nommé car on croyait à l'époque que la vie n'avait commencé qu'au Cambrien. Aujourd'hui, on sait qu'elle est beaucoup plus ancienne.

Ici, la limite entre le Maastrichtien (Crétacé sup. – ère secondaire) et le Danien (Paléocène – ère tertiaire) a été déterminé par la disparition d'une faune et l'apparition d'une autre faune.

La limite entre le Crétacé (K) et le Tertiaire (T)



B. L'échelle stratigraphique : un calendrier de référence

Les principes de chronologie relative ont permis d'établir un calendrier couvrant toute l'histoire de la Terre, c'est **l'échelle stratigraphique des temps géologiques**

Au sein de cette échelle, le temps est découpé en **ères**, comportant plusieurs **périodes**, elles-mêmes subdivisées en **étages**.

Chaque étage est défini à partir de son contenu paléontologique, étalonné grâce à un affleurement de référence que l'on appelle le **stratotype**. Par exemple, le **Toarcien** a été déterminé grâce aux associations d'ammonites trouvées dans les strates sédimentaires d'une carrière près de Thouars (Deux-Sèvres – France).

Aujourd'hui, de nouvelles données (anomalies magnétiques, mesures du ^{18}O des sédiments marins ou des glaces polaires) y sont intégrées et permettent d'affiner le découpage temporel, par exemple pour le Quaternaire.

Échelle très détaillée sur le site du BRGM (Bureau de recherche géologique et minière)

http://sigespoc.brgm.fr/IMG/pdf/charte_brgm_de_l_echelle_des_temps_geologiques.pdf