

ST-H La mesure du temps : outils et méthodes (BCPST 1)	
<p>On ne peut comprendre l'histoire de la Terre, des paysages et des ressources qui nous entourent qu'à condition de situer les différents éléments qui composent cette histoire dans le temps. En particulier, une des spécificités des sciences de la Terre est l'appréhension du temps long. La prise en compte de cette dimension temporelle se fait par différentes méthodes complémentaires dont la synthèse intégrative correspond à l'échelle chronostratigraphique. Cette partie remobilise fortement les savoirs et les capacités développés en terminale.</p>	
Savoirs visés	Capacités exigibles
ST-H-1 L'échelle stratigraphique	
<p>La définition d'une unité stratigraphique se traduit par le choix d'une référence appelée stratotype. Les crises biologiques correspondent à des repères dans l'histoire de la Terre, permettant de définir des coupures à l'échelle mondiale. Elles affectent la diversité du monde vivant à l'échelle globale et sont toujours suivies de radiations évolutives. Les causes de ces extinctions sont souvent multiples et peuvent résulter d'un couplage entre l'activité interne de la Terre et de la surface.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Exploiter les principes de la stratigraphie pour réaliser une datation relative de deux événements géologiques. - Exploiter les informations qu'apportent les fossiles pour dater (fossiles stratigraphiques) ou reconstituer un paléoenvironnement (fossiles de faciès). - Exploiter les données d'une crise biologique pour justifier le découpage stratigraphique.
<p>Précisions et limites : <i>La connaissance des fossiles se limite à la détermination des caractéristiques principales des Trilobites, Ammonoïdés, Bivalves, Gastéropodes, Foraminifères benthiques (Nummulitidés) et planctoniques (Globotruncanidés, Globigérinidés). Aucune étude systématique détaillée n'est exigible.</i> <i>La connaissance des différents types de stratotype est hors programme.</i> <i>Les différentes coupures de l'échelle stratigraphique sont définies et exploitées, mais la connaissance de leur nom se limite à celle des périodes.</i></p>	
ST-H-2 Datation absolue	
<p>La datation absolue, fondée essentiellement sur la radiochronologie, donne accès à l'âge absolu et étalonne l'échelle stratigraphique.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Expliquer le principe de la datation radiochronologique à partir des méthodes : U/Pb, K/Ar et ¹⁴C. - Justifier l'utilisation de différentes méthodes de radiochronologie en s'appuyant sur la comparaison des méthodes et de leurs domaines d'application.
<p>Précisions et limites : <i>On insiste sur les mécanismes de remise à zéro par diffusion ou dissolution-précipitation, traités uniquement de façon qualitative. On se limite à la datation à partir de minéraux isolés. Les datations s'appuient sur ce qui a été vu en lycée (enseignement scientifique en première et spécialité SVT en terminale). Seuls les âges des limites d'ères du Phanérozoïque doivent être connus. Pour U/Pb, on se limite à la Concordia dans le diagramme de Wetherhill et les significations possibles de la discordance.</i></p>	
ST-H-3 Synthèse stratigraphique	
<p>L'échelle chronostratigraphique résulte de la mise en cohérence entre les données issues de la chronologie relative et de la chronologie absolue. On associe des âges absolus à des successions d'intervalles de temps.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Appliquer les différentes techniques de datation relative et absolue sur des exemples divers.
<p>Liens : Climat et variabilité climatique (BG-C-3) La carte géologique (ST-A) Le phénomène sédimentaire (ST-E) Le magmatisme (ST-F) Le métamorphisme (ST-G) Activités de terrain</p>	

Introduction

On ne peut comprendre l'histoire de la Terre, des paysages et des ressources qui nous entourent qu'à condition de situer les différents éléments qui composent cette histoire dans le temps. En particulier, une des spécificités des sciences de la Terre est l'appréhension du temps long. La prise en compte de cette dimension temporelle se fait par différentes méthodes complémentaires :

- CHRONOLOGIE RELATIVE = Datation relative = approche **qualitative** → on cherche à ordonner chronologiquement les structures entre elles.
- CHRONOLOGIE ABSOLUE = Datation absolue = une datation **quantitative** → on cherche à donner une valeur chiffrée de l'âge de la structure : roche, fossile, minéral... exprimé en unité de temps (ans)

Ces deux types de chronologie sont complémentaires. Ces études visent à construire le cadre temporel dans lequel s'inscrivent tous les phénomènes géologiques et dont l'expression la plus commune est l'échelle chronostratigraphique.

➔ Quelles sont les méthodes qui fondent chronologies relative et absolue ?

➔ Comment conduisent-elles à l'établissement de l'échelle chronostratigraphique ?

I. La chronologie relative ou chronostratigraphie, ordonner les événements les uns par rapport aux autres

A. Les relations géométriques permettent de reconstituer la chronologie relative de structures ou d'événement géologiques

1. Le principe de superposition.
2. Le principe de recoupement et de déformation
3. Le principe d'inclusion
4. Le principe de continuité latérale

B. Corrélations temporelles entre terrains sédimentaires éloignés

1. Corrélations temporelles et lithostratigraphie
2. Corrélations temporelles et biostratigraphie
 - 2.1. Les fossiles stratigraphiques et les fossiles de faciès
 - 2.2. Le principe d'identité paléontologique

C. Établir des coupures temporelles

1. Établir des coupures temporelles à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques.
2. Définir les étages de l'échelle des temps géologiques grâce aux stratotypes

II. La chronologie absolue

A. Le principe de la radiochronologie

B. Datation de la fermeture du système

C. Choix de l'isotope

D. La méthode de datation au carbone 14

E. La méthode de datation au Potassium – Argon

1. Si l'on considère la seule désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar
2. Si l'on considère les désintégrations du ^{40}K en ^{40}Ar et du ^{40}K en ^{40}Ca

3.

F. La méthode U/Pb : Concordia et Discordia

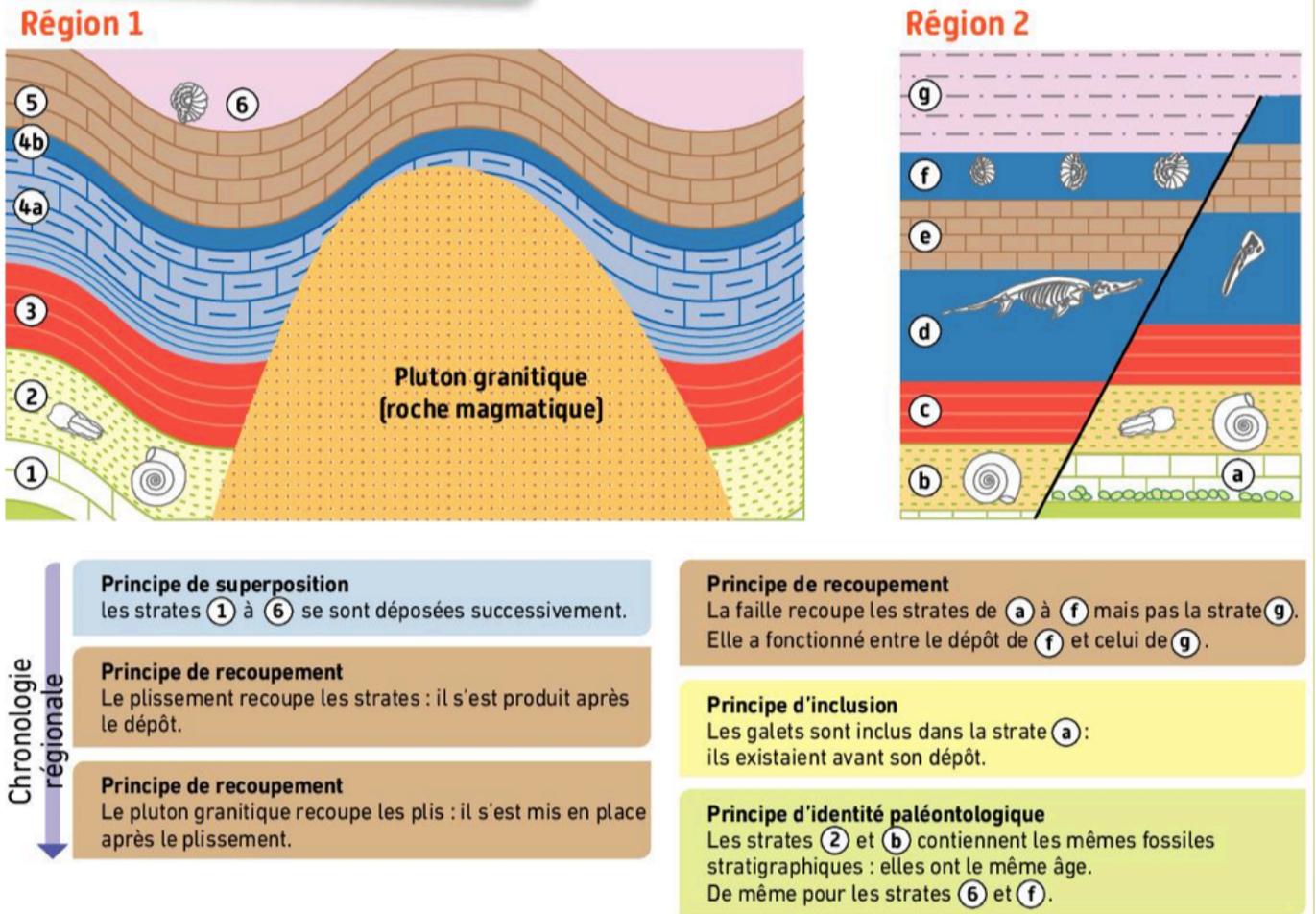
1. Principe : une concordance d'âges des deux couples U/Pb déterminée par une couche de référence
2. Ouverture possible du système par métamorphisme à l'origine d'une courbe Discordia

III. L'échelle chronostratigraphique établit une synthèse des différentes approches

I. La chronologie relative ou chronostratigraphie, ordonner les événements les uns par rapport aux autres

Programme terminal :
 « Les relations géométriques (superposition, recoupement, inclusion) permettent de reconstituer la chronologie relative de structures ou d'événements géologiques de différentes natures et à différentes échelles d'observation. »

Illustration – Terminale spécialité SVT- Bordas



A. Les relations géométriques permettent de reconstituer la chronologie relative de structures ou d'événement géologiques

1. Le principe de superposition.

En l'absence de déformation, **toute couche qui en recouvre une autre lui est postérieure.**
 Valable pour les terrains sédimentaires, pour les coulées volcaniques.

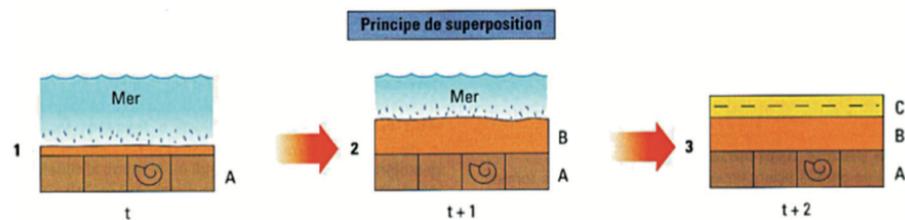
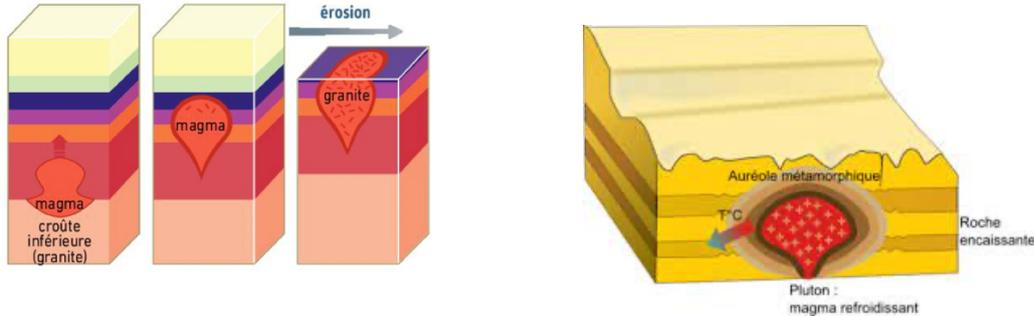


Illustration du principe de superposition.

2. Le principe de recoupement et de déformation

**Une structure qui en recoupe une autre lui est postérieure.
Une déformation (une faille ou un pli) est postérieure aux terrains qu'elle affecte.**

Ce principe s'applique aux intrusions plutoniques. *Illustration mise en place d'un pluton granitique par intrusion dans des roches encaissantes. L'encaissant au contact du pluton granitique chaud subit des réactions métamorphiques → une auréole de métamorphisme de contact se met en place. L'encaissant était là avant la mise en place du granite. L'intrusion du granite et le métamorphisme de contact sont postérieurs à la mise en place de l'encaissant.*



Ce principe s'applique aux failles.

La faille recoupe les terrains sédimentaires plissés, elle est postérieure aux terrains qu'elle recoupe

Ce principe s'applique aux plis,

Une phase de plissement est postérieure aux terrains plissés les plus jeunes et la phase de plissement est antérieure aux terrains les plus anciens non plissés.

3. Le principe d'inclusion

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

4. Le principe de continuité latérale

Une même couche de roches sédimentaires est de même âge sur toute son étendue.

B. Corrélations temporelles entre terrains sédimentaires éloignés

1. Corrélations temporelles et lithostratigraphie

Dans une région donnée, l'enregistrement du temps peut être incomplète

- Absence de sédimentation pendant un laps de temps => lacune sédimentaire
- Érosion et non conservation d'une strate sédimentaire => lacune sédimentaire

Les corrélations temporelles des terrains sédimentaires éloignés visent à étudier les enregistrements sédimentaires sur des temps longs et à construire une échelle des temps géologiques.

Chaque roche sédimentaire est caractérisée par **son faciès**.

Faciès = l'ensemble de ses caractères lithologiques (minéralogie, couleur, dureté, taille des grains, composition ...) et paléontologiques (contenu fossilifères).

L'analyse des faciès permet de reconstituer les environnements de formation des roches sédimentaires, les paléoenvironnements (faciès marin pélagique, marin littoral, lagunaire, lacustre ou continental) et de suivre leur évolution au cours du temps. C'est ainsi que sont identifiées par exemple transgressions et régressions.

Transgression marine = élévation du niveau de la mer

Régression marine = baisse du niveau de la mer

L'étude du faciès des roches sédimentaires permette de réaliser des corrélations à distance.

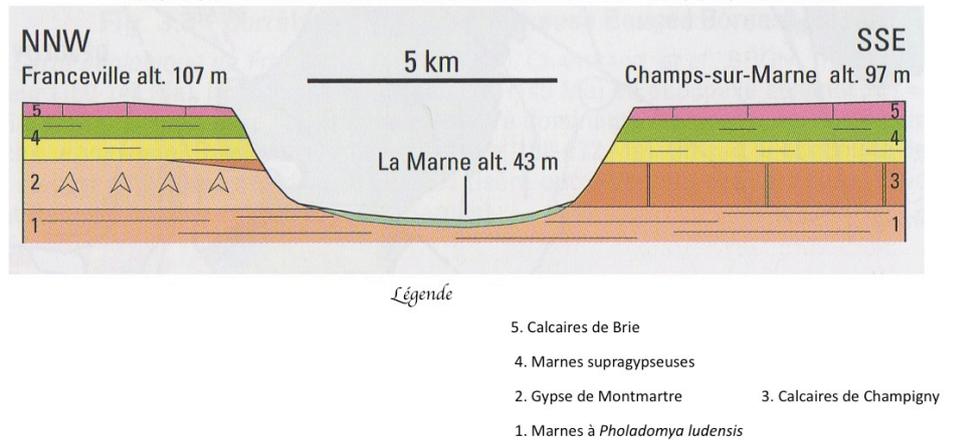
- L'étude de la lithologie des roches : Les variations lithologiques marquent des intervalles de temps différents et sont utilisées dans la construction d'une échelle des temps géologiques. C'est la **lithostratigraphie**.
- L'étude du contenu paléontologique des roches : approche **biostratigraphique**.

Difficultés des corrélations temporelles :

- **Passage latéral de faciès** : pour une même époque, des environnements sédimentaires peuvent différer d'une région à l'autre, générant des dépôts de nature différente et par suite difficiles à corrélés.

Coupe géologique à travers la vallée de la Marne (d'après la carte au 1/50 000 de Lagny, région parisienne)

Illustration : Coupe dans la vallée de la Marne montrant un passage latéral de faciès.
D'après Mascle



- **Variation d'épaisseur** : si la vitesse de sédimentation varie d'une région à l'autre, un même intervalle de temps peut être représenté par des couches de différentes épaisseurs selon les régions.
- **Les lacunes sédimentaires** : absence de certaines couches sédimentaires (absence de dépôt ou érosion).

⇒ Certains niveaux lithologiques serviront de repères.

⇒ Certains contenus fossilifères seront de bons marqueurs de temps, les fossiles sont alors qualifiés de fossiles stratigraphiques.

2. Corrélations temporelles et biostratigraphie

Définition : fossiles → traces d'organismes ou organismes enfouis puis conservés dans la roche.

2.1. Les fossiles stratigraphiques et les fossiles de faciès

- **Les fossiles stratigraphiques**

C'est un fossile qui est un **bon marqueur du temps** :

- Fossile qui correspond à une espèce ayant existée sur Terre pendant un **court laps de temps** (de l'ordre du million d'années)
- Espèces ayant eu une évolution rapide donc une extension temporelle courte.
- Espèce **largement répandue sur terre** = grande extension géographique
- Espèces exclusivement marines étant donné que les océans recouvrent 70% de la surface terrestre.
- Espèce représentée par un **grand nombre d'individus**
- Abondance des individus et bonne fossilisation, fossiles fréquents dans les sédiments.

Pour définir un intervalle de temps à l'aide de fossiles stratigraphiques (BIOSTRATIGRAPHIE), on utilise une association de fossiles et non pas un seul type de fossile.

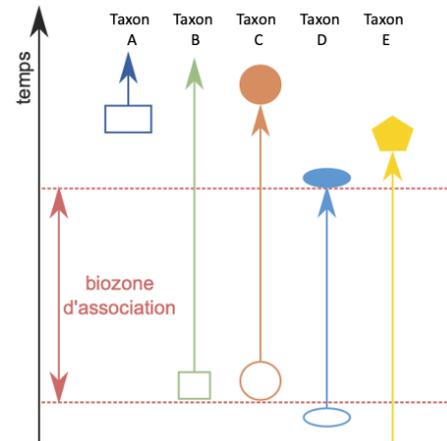
Une association de fossiles caractéristiques définit une biozone d'association. Temporellement la base et le sommet d'une biozone sont marqués par **des modifications dans l'association de fossiles** (apparition et disparition d'espèces ou de groupes d'espèces = taxon).

La biostratigraphie est l'un des éléments-clés permettant d'établir une échelle mondiale des temps géologiques, **l'échelle chronostratigraphique**.

Illustration : Un exemple de biozone, définie par une association donnée de fossiles. D'après Dunod 2021- Beaux

Le moment d'apparition d'un taxon est indiqué par un symbole vide ; sa disparition par un symbole plein.

L'association de fossiles stratigraphiques B+C+D+E définit une biozone d'association qui elle-même définit un intervalle de temps dans l'histoire de la Terre.



○ **Les fossiles de faciès sont typiques d'un environnement = paléoenvironnement**

On distingue les faciès : marin pélagique, marin littoral, lagunaire, lacustre ou continental.

On s'appuie sur les connaissances des environnements actuels et des êtres vivants qui y vivent.

Les fossiles de faciès correspondent à des espèces vivant dans des écosystèmes précis :

- ils sont typiques d'un milieu donné de sédimentation (continental, bord de mer, mer profonde...)
- s'ils ont une évolution lente, cela permet de les utiliser peu importe l'âge des terrains.

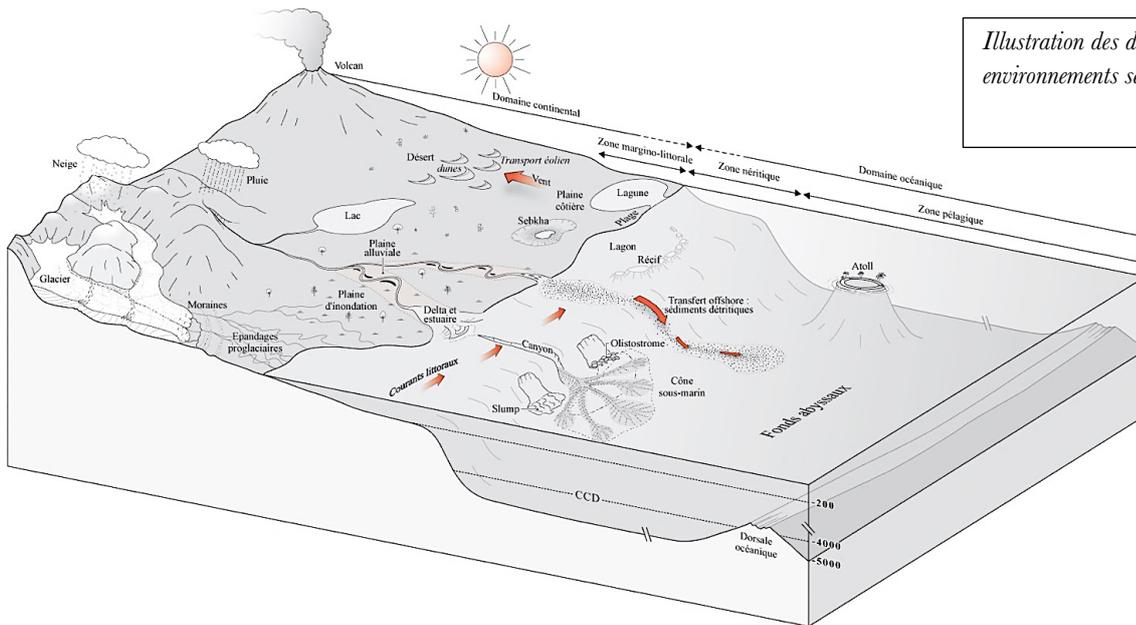
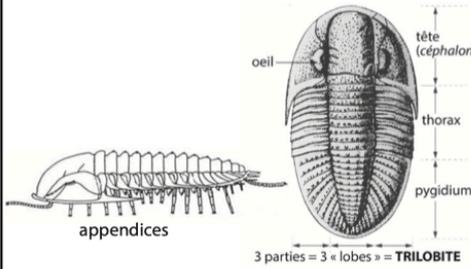
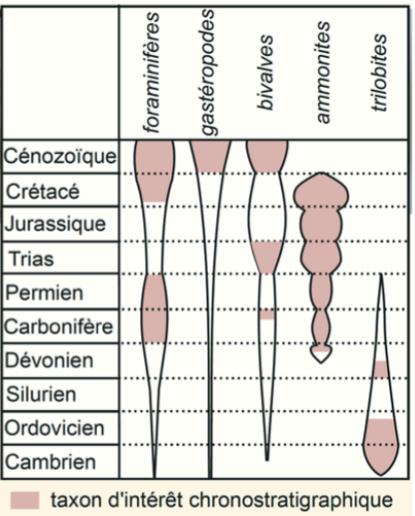
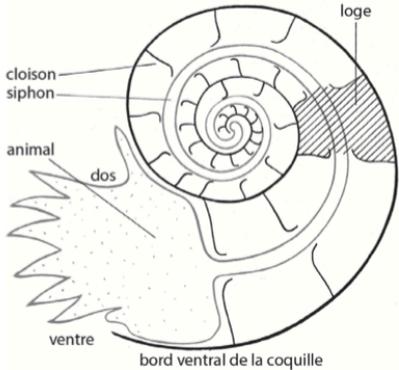
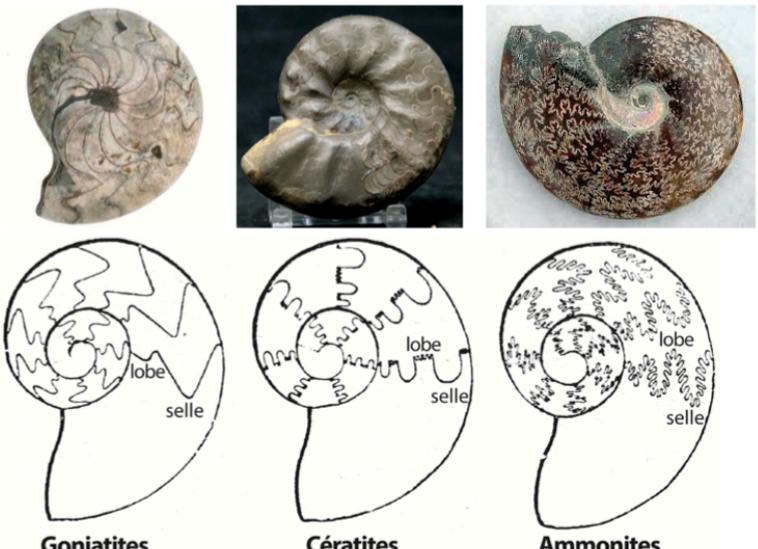


Illustration des différents environnements sédimentaires

Quelques fossiles stratigraphiques à connaître

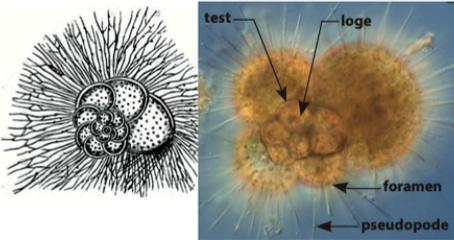
Planches illustratives construites par A. DENIS, M-A LE BARS, L. GERAT- Lycée Thiers Marseille

NOM DU GROUPE, CARACTÉRISTIQUES	EXEMPLES DE FOSSILE STRATIGRAPHIQUE ET ÂGE	
<p>Arthropodes TRILOBITES : corps <u>métamérisé</u> (= découpé en segment portant des <u>appendices</u>) <u>divisé en 3 lobes</u>.</p> 	<p>⇒ Panpaléozoïque</p> <ul style="list-style-type: none"> • Apparaissent dès le début du phanérozoïque • Disparaissent à la crise PT 	
<p>Mollusques GASTÉROPODES : <u>Coquille univalve dorsale torsadée</u></p> <p>Ex : <i>Bigorneau, Escargot, Limnée d'eau douce</i></p> 	<p>⇒ Panphanérozoïque</p> <ul style="list-style-type: none"> • Peu de fossiles stratigraphiques • Nombreux fossiles de faciès <p>Ex : <i>Planorbes + Limnées</i> → eau douce <i>Escargot</i> → milieu continent</p>	<p>taxon d'intérêt chronostratigraphique</p>
<p>Mollusques BIVALVES <u>Coquille à 2 valves</u> (Ex : <i>Moule, Huitre, Pecten...</i>)</p> 	<p>⇒ Panphanérozoïque</p> <p>Les Rudistes (= <i>Hippurites</i>), bivalves récifaux asymétriques à coquille épaisse, sont plus des fossiles de faciès témoignant d'un milieu marin chaud peu profond que des fossiles stratigraphiques.</p> <p>Leur existence s'étale du Jurassique supérieur à la crise KT qui les voit disparaître avec Ammonites et Dinosaures.</p> 	
<p>Mollusques Céphalopodes AMMONOÏDES (= AMMONITES au sens large), apparentés aux Nautilus actuels.</p>  <p><u>Coquille univalve plus ou moins enroulée dont seule la dernière loge était occupée par l'animal</u> (les autres assuraient la flottaison), les sutures (prolongements externes des cloisons entre les loges) montrent une géométrie qui se complique avec le temps et renforce la coquille.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Goniatites (<i>gone = angle, ex polygone</i>) du Paléozoïque : sutures droites ou courbes nommées selles (vers l'avant) et lobes (vers l'arrière), • Cératites du Trias : suture à selles non divisés et lobes divisés, • Ammonites (<i>au sens strict</i>) du Jurassique et du Crétacé : lobes + selles persillées.  <p style="text-align: center;">Goniatites Cératites Ammonites</p>	

Foraminifères

Unicellulaires marins caractérisés par un test à plusieurs loges percé de nombreuses perforation (= foramen) d'où sortent des expansions cellulaires nommées pseudopodes à rôle variés (phagocytose, suspension...)

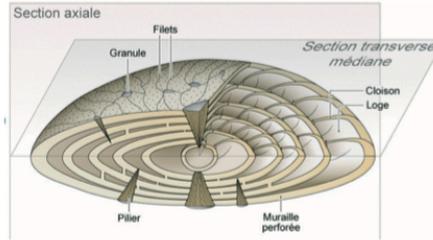
Globigérine actuelle



Un test diffère d'une coquille car il est en position corticale (ici sous la membrane plasmique) et non extérieure.

⇒ Panphanérozoïque mais quelques espèces notables

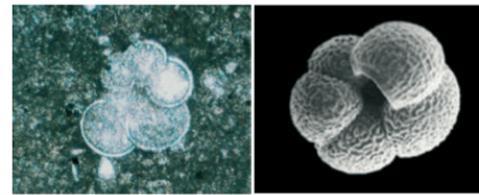
- **Foraminifères benthiques** = vivant sur le fond (milli à centimétriques)
Ex : Nummulites du Paléogène en forme de pièces de monnaie



- **Foraminifères planctoniques** = en suspension dans la masse d'eau (< 1mm)
 - Globotruncanidés à test caréné abondants au Mésozoïque
 - Globigérinidés à test arrondi abondants au Cénozoïque

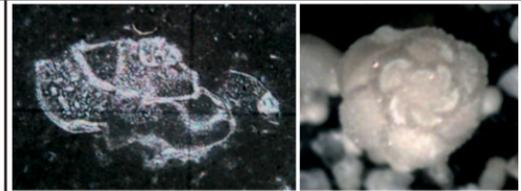
Paléocène inférieur

Globigérine (20 µm)
à test arrondi



Crétacé supérieur

Globotruncana (500 µm)
à test caréné



2.2. Le principe d'identité paléontologique

La biostratigraphie est fondée sur le principe **d'évolution irréversible des espèces.**

Programme de terminale :

« Les associations de fossiles stratigraphiques, fossiles ayant évolué rapidement et présentant une grande extension géographique, sont utilisées pour caractériser des intervalles de temps. L'identification d'associations fossiles identiques dans des régions géographiquement éloignées permet l'établissement de corrélations temporelles entre formations géologiques. »

Si les roches sédimentaires de régions géographiques éloignées contiennent les mêmes fossiles stratigraphiques alors elles sont de même âge.

2.3 Les stratotypes, des affleurements qui servent de référence mondiale

Lorsqu'un affleurement présente un enregistrement sédimentaire complet où les biozones ont été bien décrites, il sert de référence mondiale → **c'est le stratotype d'unité.**

Lorsqu'un affleurement présente un enregistrement sédimentaire d'un changement majeur dans la lithologie et la paléontologie (apparition ou disparition de fossiles stratigraphiques clés), il sert de référence mondiale → **c'est le stratotype de limite.**

Les stratotypes servent à la définition des **étages** dans l'échelle des temps géologique.

C. Établir des coupures temporelles

1. Établir des coupures temporelles à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques.

Les coupures dans le temps constituent les repères de l'échelle stratigraphique définis à plusieurs niveaux : étages, époques, périodes et ères.

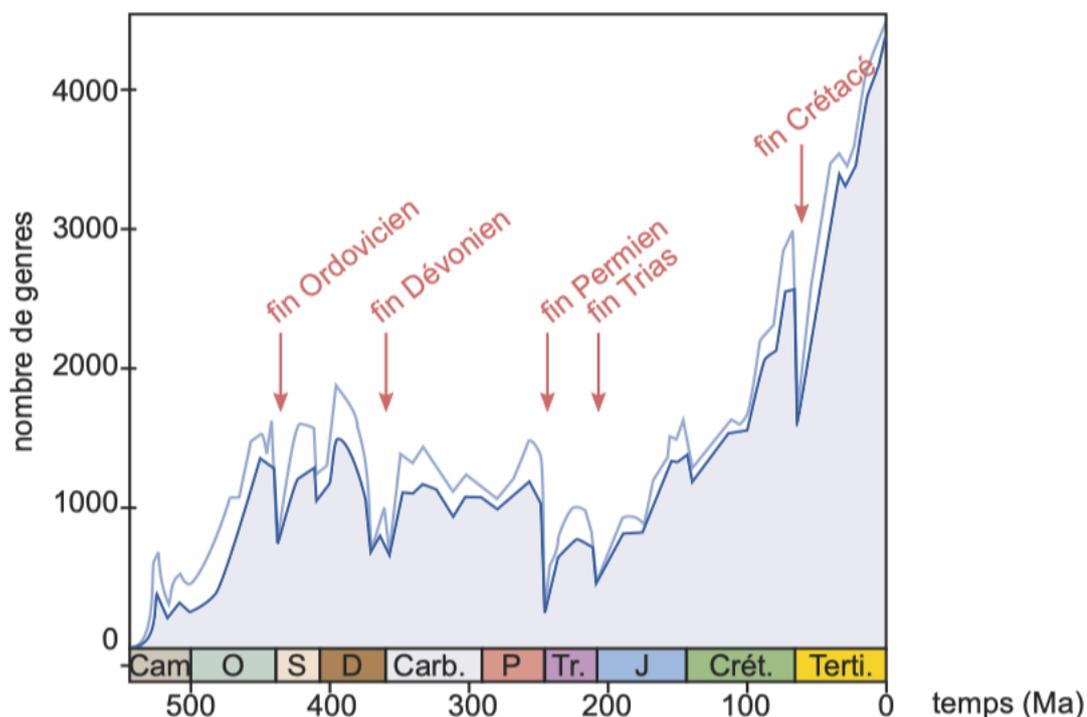
Les principales coupures sont d'ordre paléontologique.

Dans ces évolutions paléontologiques, certains niveaux se distinguent par des modifications importantes des communautés fossiles, ce qui a conduit à la définition de coupures majeures parfois interprétées comme des crises.

Les crises biologiques correspondent à des déclin temporels de la biodiversité :

- Extinctions en masse
- Disparition de nombreux taxons à l'échelle mondiale
- Évènement brutal sur un temps relativement bref.

Illustration : Diversité des genres d'animaux marins. Le graphique est construit sur 84 intervalles de calculs. La courbe du haut prend en compte tous les genres recensés (33 180), la courbe du bas est limitée aux 18 130 genres qui durent au moins deux intervalles de calculs. Extrait de Sepkoski J.J. in Walliser O.H (1996). D'après Beaux-Dunod-2021



Cinq crises majeures ont marqué l'évolution de la biosphère au cours des temps phanérozoïques :

- Ordovicien terminal, = limite Ordovicien- Silurien
- Dévonien supérieur, = limite Dévonien-Carbonifère
- limite Permien-Trias

La crise Permo-Trias (-250 Ma) est la plus importante : elle affecte à la fois les organismes marins et terrestres. On estime que la moitié des familles, les 3/4 des genres et 96 % des espèces marines disparaissent, dont pratiquement tous les coraux ainsi que certains groupes comme les Trilobites.

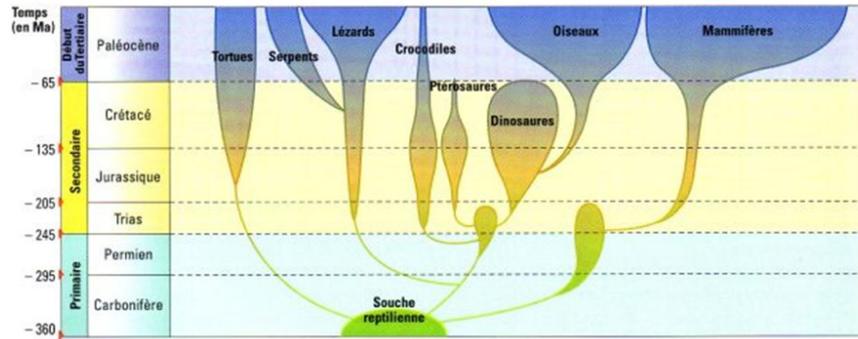
- limite Trias-Jurassique,
- limite Crétacé-Tertiaire = crise K/T

La crise Crétacé-Tertiaire (65 Ma) est moins importante mais très médiatisée du fait de la disparition des Dinosauriens non aviens, et des Ammonites.

Parmi les formes planctoniques, les Foraminifères Globotruncanidés ont permis une biostratigraphie fine du Crétacé supérieur, avant de disparaître.

Les crises biologiques affectent la diversité du monde vivant à l'échelle globale et sont toujours suivies de radiations.

Les radiations évolutives sont des moments de diversification des espèces conquérant les niches écologiques laissées vacantes (exemple des Mammifères qui se diversifient après la crise Crétacé-Tertiaire).



Evolution des Amniotes depuis 360 millions d'années.
Copyright : Éditions Belin

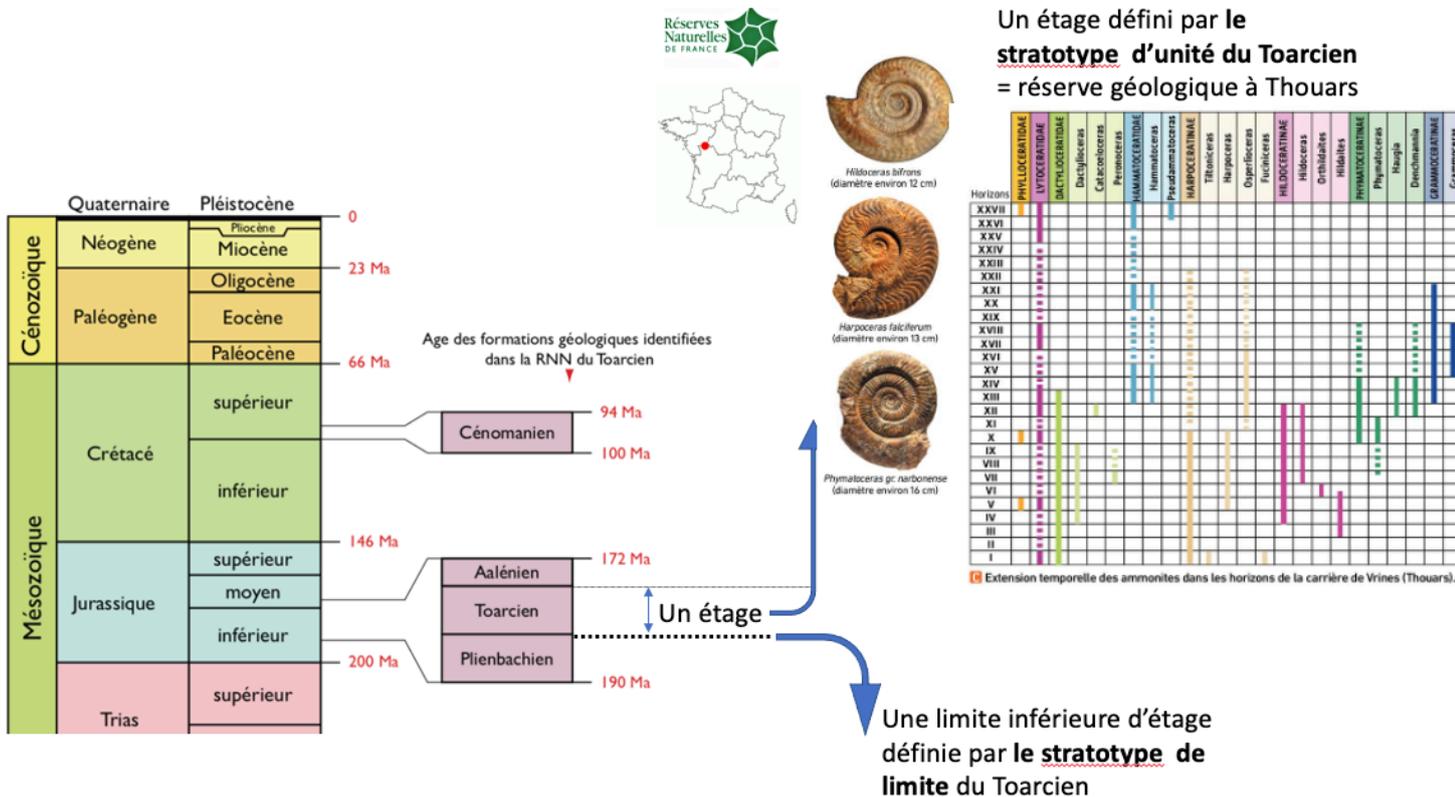
Les causes des crises biologiques sont souvent multiples et peuvent résulter d'un couplage entre

- La dynamique des enveloppes internes de la Terre
 - volcanismes – mise en place de grandes provinces magmatiques = Trapps
 - La dynamique des enveloppes externes.
 - des baisses du niveau marin faisant disparaître des écosystèmes (observées pour toutes les crises),
 - des variations climatiques (refroidissement ou réchauffement),
 - des variations de salinité ou de concentration d'oxygène
 - Impacts météoritiques

2. Définir les étages de l'échelle des temps géologiques grâce aux stratotypes

Les étages sont les plus petits intervalles de temps de l'échelle chronostratigraphique. Ils sont définis grâce aux stratotypes.

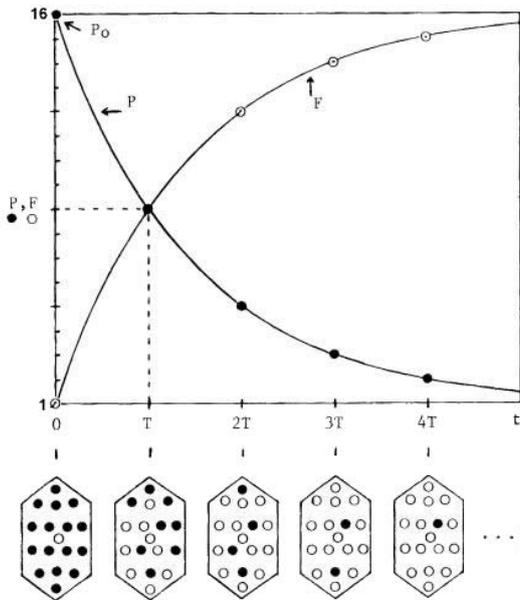
Illustration : exemple de la définition de l'étage du Toarcien. D'après Bordas-Terminal Spé SVT



II. La chronologie absolue = radiochronologie

La datation absolue est une datation **quantitative** (on cherche à donner une valeur de l'âge de la structure : roche fossile, minérale...). La désintégration radioactive, découverte par Becquerel (1896) est un phénomène qui se déroule à vitesse constante : appliquée aux objets géologiques elle peut donc servir à en donner leur âge.

A. Le principe de la radiochronologie



L'élément radioactif (= élément père) = atome à noyau instable, il se désintègre spontanément en donnant un élément stable (= élément fils) + émission de particules à haute énergie (alpha, bêta, gamma).

La proportion d'atomes radioactifs qui se désintègre au cours du temps est une constante = λ (unité de temps⁻¹)

Le temps de demi-vie (ou période T) = temps nécessaire à la désintégration de la moitié des éléments radioactifs présents.

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

La désintégration radioactive correspond à une fonction mathématique de **décroissance exponentielle fonction du temps**.

Soit un isotope père P, radioactif, qui se désintègre en un isotope fils F, radiogénique, noté F*.
 $P \rightarrow F^*$

La variation du nombre d'isotopes P est une fonction du temps obéissant à la loi :
 $dP/dt = -\lambda P$ ou encore $dP/P = -\lambda dt$

Cette équation s'intègre en fonction du temps en $\ln P = -\lambda t + k$ avec k une constante déterminée pour t=0.

S'il y a P_0 isotopes au temps t = 0 : $P = P_0 e^{-\lambda t}$

Ainsi, le nombre d'isotopes P diminue en fonction du temps tandis que le nombre d'isotopes fils produit augmente.

Ainsi, pour dater un minéral ou une roche, on peut :

- 1) Mesurer le nombre d'isotopes P qui restent dans le système si on connaît P_0 : ce n'est pas très facile car on mesure des quantités de plus en plus faibles d'un atome qui disparaît...
- 2) Mesurer la quantité d'isotopes F présents dans le système. Dans ce cas, il faut tenir compte du fait que des isotopes F peuvent exister au départ (F_0) dans la roche indépendamment de la radioactivité de P.

On a alors $F = F_0 + F^*$

Si F^* est produit par la désintégration de P,

on a $F^* = P_0 - P$

or $P = P_0 e^{-\lambda t}$; $P_0 = P e^{\lambda t}$

donc

$$F^* = P (e^{\lambda t} - 1)$$

Il vient alors que

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

B. Datation de la fermeture du système

L'âge obtenu est l'âge à partir duquel la roche ou le minéral datés ne réalisent plus aucun échange avec leur environnement : c'est l'âge de fermeture du système isotopique considéré.

Cas des roches magmatiques et métamorphiques :

La fermeture du système est en générale due à **une baisse de température**. En dessous d'un certain seuil de température les échanges ne sont plus possibles.

Les transferts des atomes dans les matériaux solides s'effectuent par diffusion et sont dépendants de la température. Le refroidissement d'un magma et sa cristallisation entraînent ainsi la fermeture du système représenté par la roche.

Une phase de métamorphisme accompagnée de recristallisations provoque l'ouverture du système minéraux, sans que la composition de la roche totale soit nécessairement modifiée puis une refermeture du système lorsque la température diminue à nouveau.

Dans le cas d'un granite ultérieurement métamorphisé en gneiss, il est ainsi possible de dater :

- L'âge de mise en place du granite (datation sur la roche totale)
- L'âge du métamorphisme (datation sur les minéraux néoformés).

L'altération, les phénomènes de dissolution suivis de précipitation correspondent à d'autres mécanismes d'ouverture des systèmes et de remise à zéro des compteurs isotopiques.

Cas des fossiles :

La fermeture du système correspond à la mort et à l'enfouissement d'un organisme.

Cas des roches sédimentaires : sauf exception ce sont des systèmes qui restent ouverts et que l'on ne peut pas dater de manière absolue.

C. Choix des isotopes

La datation absolue requiert la présence de l'élément père et de l'élément fils. Il importe alors de considérer la période des couples utilisés en fonction de l'âge que l'on souhaite estimer.

De manière générale, l'âge maximal susceptible d'être estimé pour une méthode n'excède pas dix fois la durée de la période.

Élément père → Élément fils	Période (années)	Domaine de datation (Ma : millions d'années)	Échantillons datés
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	$4,53 \cdot 10^9$	De 10 à 4 500 Ma	Minéraux riches en uranium (Ex : zircon)
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$1,31 \cdot 10^9$	De 1 à 4 500 Ma	Feldspaths potassiques Amphiboles Pyroxènes Muscovite Biotite Zircon
$^{39}\text{Ar} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$1,25 \cdot 10^9$	De 1 à 4 500 Ma	
$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	$49,9 \cdot 10^9$	De 10 à 4 500 Ma	
$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$	$106 \cdot 10^9$	> 200 Ma	
$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$	5 730	< 40 000 ans	Os, bois et autres matières organiques

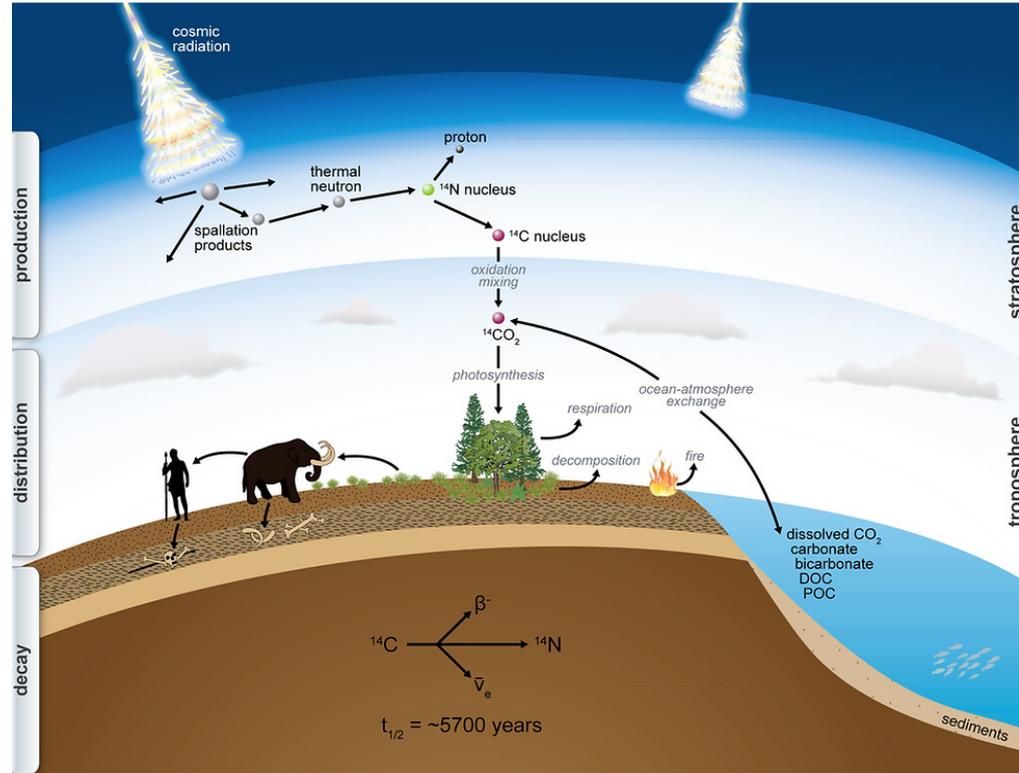
B Quelques chronomètres classiquement utilisés en géologie.

Illustration Bordas Terminale spé

D. La méthode de datation au carbone 14

Il existe trois isotopes du carbone : ^{12}C (majoritaire), ^{13}C , ^{14}C **radioactif**

Le ^{14}C est fabriqué en permanence dans la haute atmosphère par le rayonnement cosmique à partir de ^{14}N : il est ensuite oxydé en dioxyde de carbone $^{14}\text{CO}_2$. Cette production est régulière on peut donc estimer que $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{atmo}} = \text{constante} = 10^{-12}$



Tant qu'un individu est en vie, il échange du Carbone avec le milieu (fermentation, respiration, alimentation, photosynthèse...) y compris du carbone 14. A sa mort les échanges s'arrêtent. On peut considérer que l'être vivant était en équilibre avec l'atmosphère ainsi, à la fermeture du système, le rapport initial $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_0 = (^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{atmo}} = 10^{-12}$

La quantité de ^{14}C commence à diminuer : le chronomètre est déclenché et la quantité initiale est connue. On a ainsi accès à P_0 .

Le carbone 14 se désintègre en azote ^{14}N

$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$ émission bêta $t_{1/2} = 5730 \text{ ans} \pm 40 \text{ ans}$. Au-delà de 50 000 ans la quantité de ^{14}C restant dans l'échantillon n'est plus suffisante pour que les mesures soient fiables

$$P = P_0 e^{-\lambda t}$$

$$^{14}\text{C}_t = ^{14}\text{C}_0 e^{-\lambda t}$$

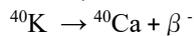
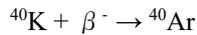
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{^{14}\text{C}_0}{^{14}\text{C}_t} \right) \Leftrightarrow t = (1/\lambda) \cdot \ln \left(\frac{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_0}{(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_t} \right)$$

Attention, le rapport atmosphérique $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{atmo}}$ peut malgré tout présenter des variations au cours du temps notamment avec l'augmentation de la quantité de CO_2 dû aux émissions humaines.

Il est nécessaire de calibrer régulièrement la valeur du rapport initial ou d'appliquer des corrections aux datations obtenues.

E. La méthode de datation au Potassium - Argon

Le ^{40}K , est l'élément père, l'isotope radioactif, il se désintègre en deux produits différents :



L'argon 40 et le calcium 40 sont des éléments fils, des isotopes radiogéniques.

Classiquement utilisé pour dater les roches volcaniques dont les minéraux sont riches en K (Biotite= mica noir, muscovite= mica blanc, feldspaths K)

L'argon est un gaz qui s'échappe facilement des laves en fusion arrivant à la surface.

Elle ne contient donc plus d'argon : $F_0 = 0$

Le minéraux ou échantillons datés grâce au couple K/Ar sont considérés comme **des systèmes riches**, riches en éléments fils (^{40}Ar) issus de la désintégration radioactive des éléments pères (^{40}K).

1) Si l'on considère la seule désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar

Extrait du concours G2E – session 2017

La désintégration de l'élément père P (^{40}K), en élément fils F (^{40}Ar), suit la relation :

$$F_t = F_0 + P_t \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

La période de demi-vie liée à la constante de désintégration λ , est : $T = 1,2 \cdot 10^{10}$ années.

La quantité d' ^{40}Ar est négligeable au moment de la fermeture du système. Par ailleurs, étant donné les temps géologiques considérés, on s'intéresse uniquement à la désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar . Les autres désintégrations ne sont pas prises en compte.

Question : En assimilant la transformation de ^{40}K à une simple désintégration, on demande d'exprimer le temps t à partir de la relation $F_t = F_0 + P_t \cdot (e^{\lambda t} - 1)$.

$$F_t = F_0 + P_t \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{F_t}{P_t} + 1 \right)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} + 1 \right)$$

2) Si l'on considère les désintégrations du ^{40}K en ^{40}Ar et du ^{40}K en ^{40}Ca

On considère les deux désintégrations du ^{40}K . Il faut donc tenir compte de la désintégration du ^{40}K en ^{40}Ca et la désintégration du ^{40}K en ^{40}Ar .

La constante de désintégration est $\lambda = \lambda_{\text{Ca}} + \lambda_{\text{Ar}}$

Le Temps $t_{1/2} = 1,25 \cdot 10^9 \rightarrow$ domaine d'utilisation 10^5 à 10^9 ans
Le temps t se calcule avec

$$t = \frac{1}{\lambda_{\text{K}} + \lambda_{\text{ca}}} \ln \left(\frac{\lambda_{\text{K}} + \lambda_{\text{ca}}}{\lambda_{\text{K}}} \cdot \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} + 1 \right)$$

Soit par approximation mathématique : où t est exprimé en années.

Remarque importante : ^{40}Ar existe dans des proportions non négligeables dans l'atmosphère et dans certain fluide circulant, l'échantillon peut donc être facilement contaminé ce qui conduit à des datations erronées.

F. La méthode U/Pb : Concordia et I

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(10 \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} + 1 \right)$$

1) Principe : une concordance d'âges des deux couples U/P déterminée par une courbe de référence

Les zircons sont des minéraux très riches en U, permettant d'utiliser simultanément les 2 couples : $^{238}\text{U}^*/^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U}^*/^{207}\text{Pb}$ pour déterminer un âge :

$$\begin{aligned}
 &^{238}\text{U}^* \rightarrow ^{206}\text{Pb} \\
 &\lambda = \lambda_{238} = 9,8 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1} \\
 &T_{238} = 4,5 \text{ Ga} \\
 &^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U} \cdot (e^{\lambda t} - 1) \\
 &t = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}\right)\right]
 \end{aligned}$$

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

$$\text{Or } F_0 = 0$$

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

$$t = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{F}{P}\right)\right]$$

$$\begin{aligned}
 &^{235}\text{U}^* \rightarrow ^{207}\text{Pb} \\
 &\lambda' = \lambda_{235} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1} \\
 &T_{235} = 700 \text{ Ma} \\
 &^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U} \cdot (e^{\lambda' t} - 1) \\
 &t = \left(\frac{1}{\lambda'}\right) \cdot \ln\left[1 + \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}\right)\right]
 \end{aligned}$$

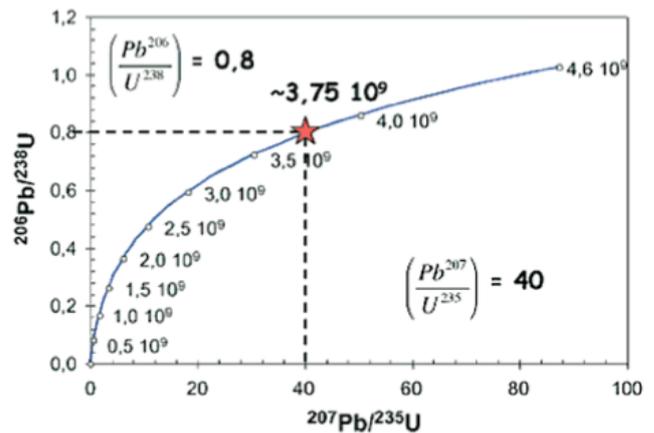
Si le système est resté clos, sans apport ni perte, alors les âges déterminés indépendamment par les 2 méthodes doivent être les mêmes. S'ils ne coïncident pas, c'est que le système s'est ouvert à un moment donné.

Pour déterminer la validité d'une datation avec la méthode U/Pb on utilise le diagramme de Wetherill, comprenant une courbe nommée Concordia, représentant $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) = f(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})$.

Cette Concordia est obtenue en calculant les rapports isotopiques théoriquement obtenus pour des âges variés (0 Ga, 1 Ga, 2 Ga...) à partir des équations précédentes et des constantes λ_{238} et λ_{235} . Elle passe nécessairement par l'origine du fait qu'il n'y a ni ^{206}Pb ni ^{207}Pb dans le zircon initial.

Tout zircon qui donne par les 2 méthodes le même âge est donc situé sur la courbe Concordia au point correspondant à l'âge de la roche (3,75 Ga ici).

Pour dater un zircon par la méthode U/P, il suffit de placer les valeurs des rapports $[^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}]$ et $[^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$ sur le graphique et d'en déduire l'âge.



2. Ouverture possible du système par métamorphisme à l'origine d'une courbe Discordia

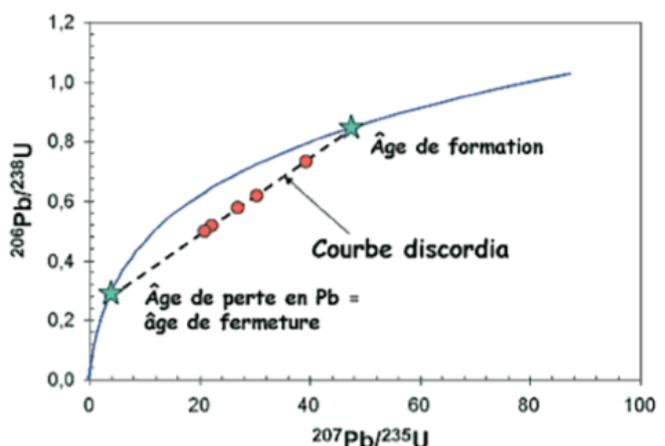
Une réouverture du système, le plus souvent par métamorphisme entraîne une diffusion d'éléments entre un zircon et les minéraux voisins, à l'origine de rapports $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ et $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ discordants. Le point est alors situé en dehors de la Concordia. Dans ce cas, divers zircons séparés de la même roche se placent sur une droite nommée Discordia, recoupant la Concordia en deux points :

- le plus ancien (intersection haute) correspond à l'âge initial,
- le plus jeune (intersection basse) à l'évènement métamorphique ayant provoqué les échanges.

✧ les zircons restés sur la concordia n'ont pas subi de réouverture du système et ont enregistré l'âge de cristallisation de la roche (intersection haute).

✧ les zircons ayant subi une ouverture plus ou moins importante du système ont subi une perte apparente de Pb

✧ les zircons ayant subi une réouverture complète du système suivent la concordia depuis cette réouverture et donnent l'âge du métamorphisme (intersection basse).



III. L'échelle chronostratigraphique établit une synthèse des différentes approches

L'échelle chronostratigraphique résulte de la mise en cohérence entre les données issues de la chronologie relative et de la chronologie absolue.

On associe des âges absolus à des successions d'intervalles de temps.

Les deux types de datation, relative et absolue, se révèlent complémentaires. Les méthodes de datation absolue permettent de situer dans le temps des coupures de l'échelle stratigraphique, obtenues grâce à la datation relative. Lorsque un âge absolu a été établi sur un stratotype de limite et est reconnu par la communauté internationale alors on appose un clou d'or = point GSSP = Global Standard Section and Point ou point stratigraphique global. Cette limite est fixée dans l'échelle des temps géologiques.



Exemple de marquage sur le terrain d'un « clou d'or » (GSSP). Limite entre deux étages (Sélandien-Thanétien ; Paléocène) sur la côte basque espagnole.

Les âges absolus des limites d'ères du Phanérozoïque doivent être connus.
Le nom des différentes périodes et leur succession doivent être connus.

Il y a 4 ÉONS, les 3 premiers regroupés sous le terme précambrien

- **Hadéen** de 4,6 à 4 Ga : bombardement météoritique, aucune roche terrestre n'a cet âge (seuls des zircons isolés).
- **Archéen** 4 à 2,5 Ga : Terre ultrachaud tectonique hyperactive de miniplaques
- **Protéozoïque** de 2,5 Ga à 540 Ma : macrofossiles très rares (vie primitive)

- **PHANÉROZOÏQUE** à partir de 540 Ma découpé en 3 ères selon les types de fossiles qu'on trouve dans les terrains :
 - Paléozoïque (ancienne ère I) (Trilobites et Goniatites) divisé en 6 périodes :
 - Cambrien
 - Ordovicien
 - Silurien
 - Dévonien (sortie des eaux)
 - Carbonifère (forêts de fougères arborescentes)
 - Permien

 - Mésozoïque (ancienne ère II) (Cératites, Ammonites, Dinosaures non aviens, Globotruncanidés) divisé en 3 périodes
 - Trias
 - Jurassique
 - Crétacé

 - Cénozoïque (anciennes ères III + IV) (Globigérines) comprenant 3 périodes
 - Paléogène
 - Néogène
 - Quaternaire (débutant à 2,5 Ma avec l'apparition du genre Homo).

Cependant pour le Cénozoïque se sont souvent les systèmes (séries) qui sont utilisées (notamment en cartographie).

Le Cénozoïque comprend 7 systèmes :

Paléocène, Eocène, Oligocène, Miocène, Pliocène, Pleistocène, Holocène (débutant au dernier maximum glaciaire (Wurm) il y a 11.700 ans).



CHARTe CHRONOSTRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE

www.stratigraphy.org

Commission Internationale de Stratigraphie

v 2021/05



IUGS

Éonothème / Ère	Système / Période	Séries / Époque	Étage / Âge	Âge (Ma)	Éonothème / Ère	Système / Période	Séries / Époque	Étage / Âge	Âge (Ma)
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène	0.00012 - présent	Phanérozoïque	Paléozoïque	Mésozoïque	Tithonien	152,1 ± 0,9
			Messinien	0,532				Kimméridgien	157,3 ± 1,0
			Néogène	0,0117				Oxfordien	163,5 ± 1,0
		Pliocène	0,129	Callovien				166,1 ± 1,2	
			0,774	Bathonien				168,3 ± 1,3	
		Miocène	1,80	Bajocien				170,3 ± 1,4	
			2,58	Aalénien				174,1 ± 1,0	
			3,600	Toarcien				182,7 ± 0,7	
		Oligocène	5,333	Pléistocène				190,8 ± 1,0	
			7,246	Serravallien				199,3 ± 0,3	
11,63	Burdigalien		201,3 ± 0,2						
Éocène	13,82	Chattien	~ 208,5						
	15,97	Rupélien	~ 237						
	20,44	Prabonien	~ 242						
Paléogène	23,03	Bartonien	247,2						
	27,82	Lutétien	251,2						
	33,9	Yprésien	251,902 ± 0,024						
Supérieur	37,71	Thanétien	254,14 ± 0,07						
	41,2	Sélandien	259,1 ± 0,5						
	47,8	Danien	265,1 ± 0,4						
Moyen	56,0	Maastrichtien	268,8 ± 0,5						
	59,2	Campanien	272,95 ± 0,11						
	61,6	Santonien	283,5 ± 0,6						
Inférieur	66,0	Coniacien	290,1 ± 0,26						
	72,1 ± 0,2	Turonien	293,52 ± 0,17						
	83,6 ± 0,2	Cénomarien	296,9 ± 0,15						
Cambrien	Paléozoïque	Ordovicien	Albien	303,7 ± 0,1					
			86,3 ± 0,5	Supérieur	307,0 ± 0,1				
			88,8 ± 0,3	Moyen	315,2 ± 0,2				
			93,9	Inférieur	323,2 ± 0,4				
			100,5	Supérieur	330,9 ± 0,2				
			~ 113,0	Moyen	346,7 ± 0,4				
			~ 125,0	Inférieur	358,9 ± 0,4				
			~ 129,4	Fortunien					
			~ 132,6						
			~ 139,8						
~ 145,0									
Archeen	Archeen	Archeen	Trémadocien	477,7 ± 1,4					
			485,4 ± 1,9	Étage 10					
			~ 489,5	Jiangshanién					
			~ 494	Paléien					
			~ 497	Guzhangien					
			~ 500,5	Drumien					
			~ 504,5	Wuliuen					
			~ 509	Étage 4					
			~ 514	Étage 3					
			~ 521	Étage 2					
~ 529	Fortunien								
Archeen	Archeen	Archeen	Famennien	372,2 ± 1,6					
			382,7 ± 1,6	Frasnien					
			387,7 ± 0,8	Givétien					
			393,3 ± 1,2	Eifélien					
			407,6 ± 2,6	Emsien					
			410,8 ± 2,8	Pragien					
			419,2 ± 3,2	Lochkovien					
			423,0 ± 2,3	Ludfordien					
			425,6 ± 0,9	Gorstien					
			427,4 ± 0,5	Homérien					
430,5 ± 0,7	Wenlock								
433,4 ± 0,8	Steinwoodien								
438,5 ± 1,1	Télychien								
440,8 ± 1,2	Aéronien								
443,8 ± 1,5	Rhuddanien								
445,2 ± 1,4	Himantien								
453,0 ± 0,7	Kaitien								
458,4 ± 0,9	Sandbien								
467,3 ± 1,1	Darriwilien								
470,0 ± 1,4	Dapingjien								
477,7 ± 1,4	Floïen								
~ 4600	Trémadocien								

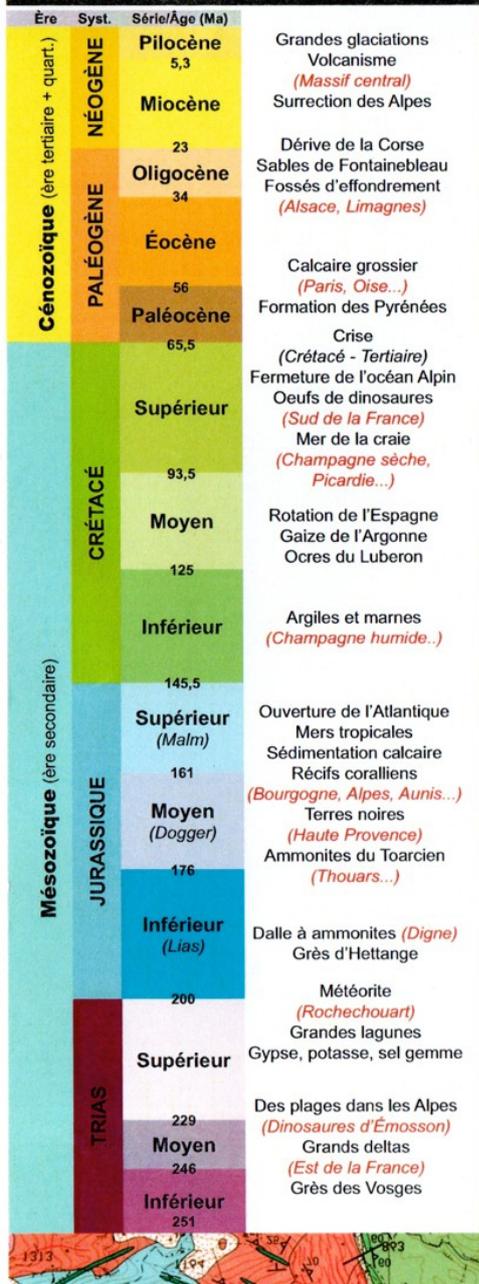
La définition de la limite inférieure de chaque unité formelle par un point global (GSSP) est un principe fondamental de la Stratigraphie Internationale (ICS) et est encadrée par le Boudoir Stratigraphique et du Protérozoïque, auparavant définie par des âges absolus (GSSA-Global Standard Stratigraphic Ages). Les noms en italique indiquent des unités informelles et l'espace pour des unités à nommer. Les chaînes et des informations plus détaillées sur les GSSP sont disponibles sur le site web de l'International Commission on Stratigraphy (ICS) www.stratigraphy.org.

Les âges numériques sont sujets à révision et ne définissent pas les unités du Phanérozoïque et de l'Édiacarien; seuls les GSSP le font. Pour les limites du Phanérozoïque qui font pas de GSSP, les âges numériques ou des âges numériques sont utilisés pour les unités informelles. Les sous-divisiones des unités informelles sont abrégées par S (Supérieur), M (Moyen) et I (Inférieur). Les âges numériques de tous les systèmes à l'exception du Quaternaire, Paléogène supérieur, Crétacé, Trias, Permien et Pré-cambrien sont tirés du livre "A Geologic Time Scale 2012 par Gradstein et al. (2012)"; ceux du Quaternaire, Paléogène supérieur, Crétacé, Trias, Permien et Pré-cambrien ont été définis par les sous-commissions de l'ICS.



Les auteurs suivent les recommandations de la Commission de la Carte Géologique du Monde (www.cgm.org) Chart faite par K.M. Cohen, D.A.T. Harper, P.L. Gibbard, J.X. Fan (c) Commission Internationale de Stratigraphie, Mai 2021
 Citation: Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L. & Fan, J.X. (2013) (updated) The ICS International Chronostratigraphic Chart. Episodes 36: 189-204.
 URL: <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2021-05French.pdf>

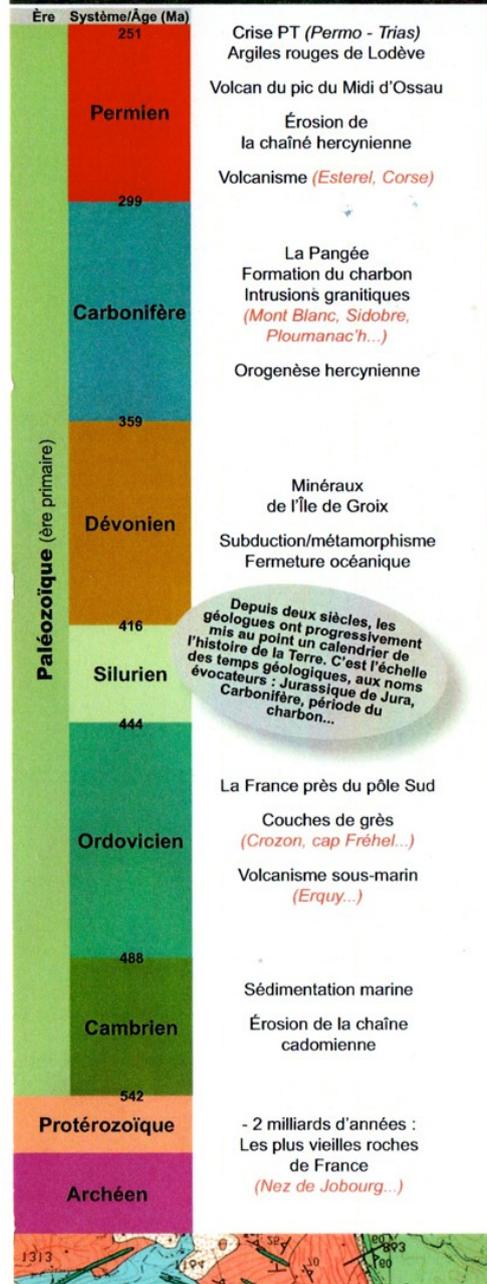
Échelle des temps géologiques



3, avenue C. Guillemin - BP 36009
45060 Orléans Cedex 2
Tél. 02 38 64 30 28

www.brgm.fr/editions.jsp

Échelle des temps géologiques



3, avenue C. Guillemin - BP 36009
45060 Orléans Cedex 2
Tél. 02 38 64 30 28

www.brgm.fr/editions.jsp