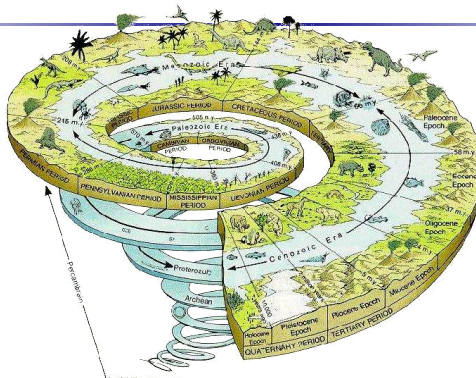


Le temps en géologie

Laurie BOUGEois

ST3 - Polytech' Paris UPMC

28 novembre 2014



1. Introduction

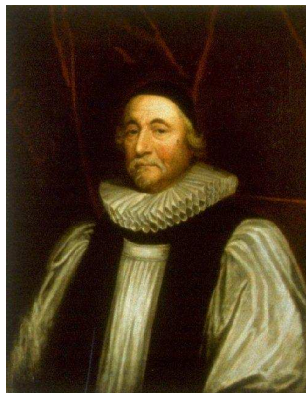
2. Réaliser des chronologie relatives

3. Réaliser des chronologie absolues

Estimation de l'âge de la Terre

Archevêque James Ussher
(1581-1656)

- D'après la Bible : la Terre est née en 4004 avant JC



Estimation de l'âge de la Terre

Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon (1707-1788)

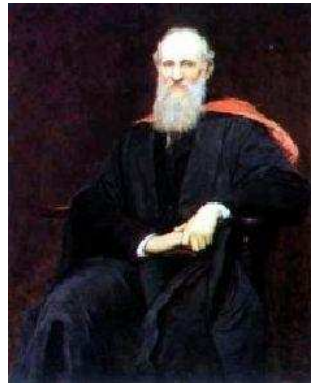
- ▶ Analogie entre le refroidissement de la Terre, et celui d'une sphère métallique
 - ↪ Age supposé de **75 000 ans**
(voire 10 Ma...)
- ▶ Conflit avec les enseignements de l'Église



Estimation de l'âge de la Terre

Lord Kelvin (1824-1907)

- ▶ Calcul du temps de refroidissement d'une Terre formée de roche en fusion à l'aide de la loi de Fourier
 - ↪ Age compris entre **20 et 400 Ma**
- ▶ Ne prends pas en compte la chaleur radioactive



Estimation de l'âge de la Terre

John Joly (1857-1933)

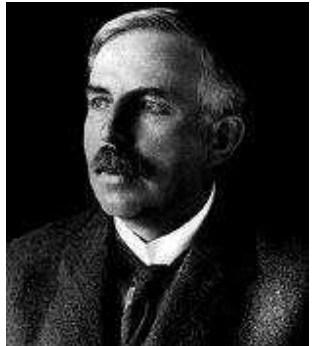
- Calcul du temps nécessaire aux océans pour atteindre leur salinité actuelle à partir des flux des fleuves
 - ~> Age des océans estimé à **90 Ma**



Estimation de l'âge de la Terre

Ernest Rutherford (1871-1937)

- ▶ Prix Nobel de chimie (1908), la radioactivité est le résultat de la désintégration spontanée des atomes
- ▶ Notion de demi-vie, utilisation de la radioactivité comme une horloge



Estimation de l'âge de la Terre

**Clair Cameron Patterson
(1922-1995)**

- Mise au point de la méthode Pb-Pb
 - ↪ Datation de la Terre à
 $4,55 \text{ Ga} \pm 70 \text{ Ma}$



Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Meteor Crater, Arizona
Cratère d'impact
météoritique
(il y a 25 000 ans)

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer quelques dixièmes de secondes



Meteor Crater, Arizona
Cratère d'impact
météoritique
(il y a 25 000 ans)

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Séisme de Chichi, Taiwan (1999)

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Séisme de Chichi, Taiwan (1999)

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer quelques secondes



Séisme de Chichi, Taiwan (1999)

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer quelques secondes



Séisme de Landers, Californie

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Faille de Lastros, Crète

accumulation de séismes sur une seule faille $\Rightarrow$ décalages importants

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer quelques centaines d'années



Faille de Lastros, Crète

accumulation de séismes sur une seule faille $\Rightarrow$ décalages importants

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Creusement d'une gorge par une **rivière des Corbières**

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer quelques milliers d'années



Creusement d'une gorge par une **rivière des Corbières**

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Formation d'un synclinal perché dans le **Massif des Bauges**

Le temps en géologie

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer quelques millions d'années



Formation d'un synclinal perché dans le **Massif des Bauges**

Le temps en géologie

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Le **Mont Viso** dans les Alpes

Notion de temps en géologie

Les événements géologiques peuvent durer



Le **Mont Éverest** en Himalaya

Notion de temps en géologie

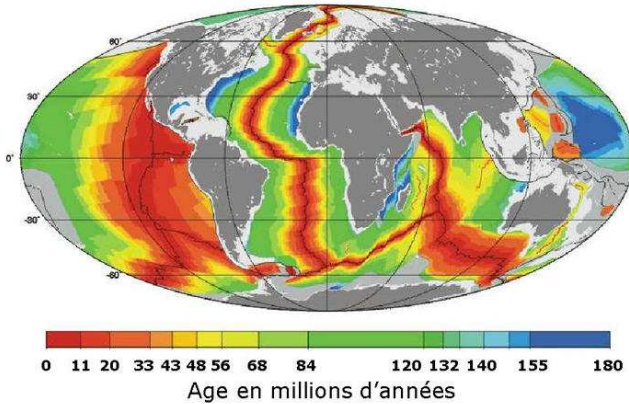
Les événements géologiques peuvent durer des dizaines de millions d'années



Le **Mont Éverest** en Himalaya

Notion de temps en géologie

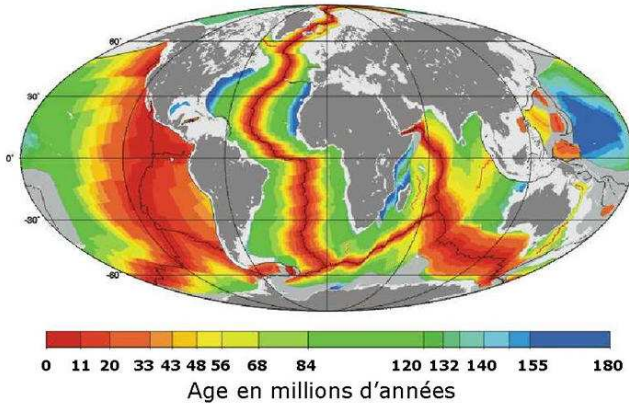
Les événements géologiques peuvent durer



L'ouverture des océans

Notion de temps en géologie

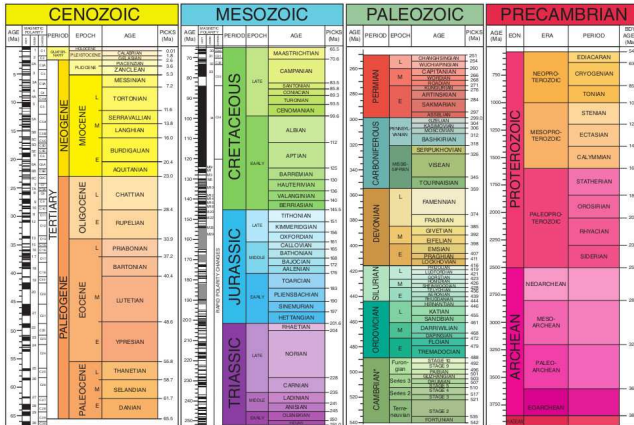
Les événements géologiques peuvent durer plus de 100 millions d'années



L'ouverture des océans

Le temps en géologie

L'histoire de la Terre est divisée
en époques successives depuis 4.5 Ga
Comment a-t-on établi ce calendrier ?



Deux méthodes pour dater les événements géologiques

- ▶ **Chronologie relative**
(fossiles, structures sédimentaires et/ou tectoniques)
~> *Je suis plus jeune que toi*
- ▶ **Chronologie absolue**
(isotopique, anneaux de croissance des arbres, etc.)
~> *J'ai 22 ans*

1. Introduction
2. Réaliser des chronologie relatives
3. Réaliser des chronologie absolues

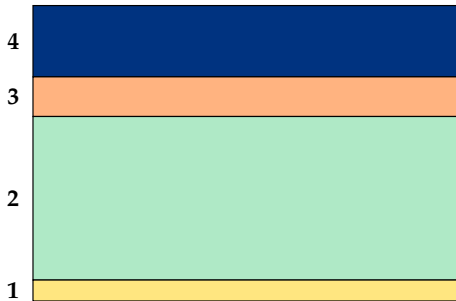
Lois de lithostratigraphie

► Principe d'horizontalité originelle

~> Les couches se déposent d'abord à l'horizontale

► Principe de superposition

~> Quand deux couches sont superposées, la couche inférieure est la plus ancienne et la couche supérieure la plus récente

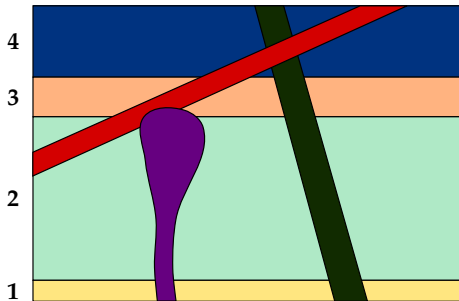


**Valable pour les roches
sédimentaires et
volcaniques**

Lois de lithostratigraphie

► Principe de recoupement

↪ Un événement ou objet qui affecte un autre événement ou un autre objet est postérieur à ce dernier

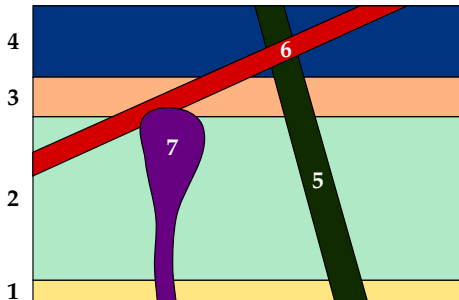


Valable à toutes les échelles (cratères, lames minces...)

Lois de lithostratigraphie

► Principe de recoupement

↪ Un événement ou objet qui affecte un autre événement ou un autre objet est postérieur à ce dernier



Valable à toutes les échelles (cratères, lames minces...)

Lois de lithostratigraphie

► Principe de recoupement

↪ Un événement ou objet qui affecte un autre événement ou un autre objet est postérieur à ce dernier



Dyke recoupant une
série sédimentaire

Lois de lithostratigraphie

► Principe de recoupement

- ↪ Un événement ou objet qui affecte un autre événement ou un autre objet est postérieur à ce dernier

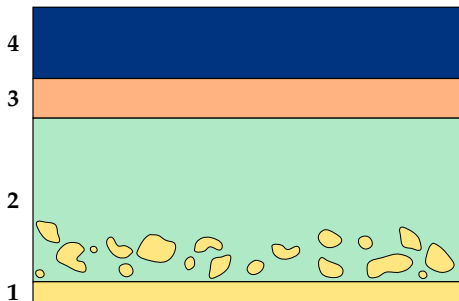


Faille recoupant une
série sédimentaire

Lois de lithostratigraphie

► Principe d'inclusion

↪ Tout objet contenu dans un autre est antérieur à celui-ci



Valable à toutes les échelles (cratères, lames minces...)



Lois de lithostratigraphie

► Principe d'inclusion

→ Tout objet contenu dans un autre est antérieur à celui-ci



Valable à toutes les échelles (cratères, lames minces...)



Lois de lithostratigraphie

► Principe de continuité latérale

- ~> Sur toute son étendue, un même banc a partout le même âge, c'est à dire qu'il s'est déposé ou formé dans un même intervalle de temps

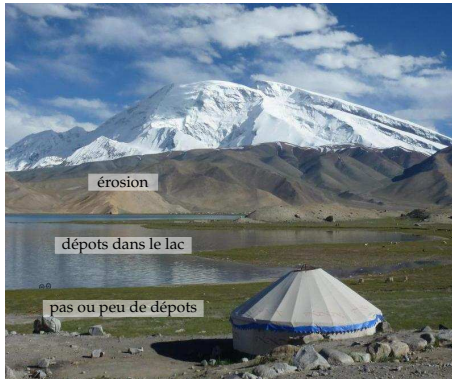


**Attention aux
variations latérales
de faciès**

Lois de lithostratigraphie

► Lacune sédimentaire

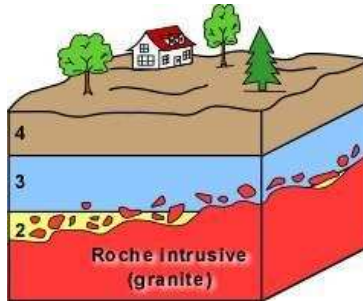
- ↪ Intervalle de temps manquant dans l'enchaînement sédimentaire
- soit par absence de sédimentation
 - soit par érosion



Lois de lithostratigraphie

► Discordance d'érosion

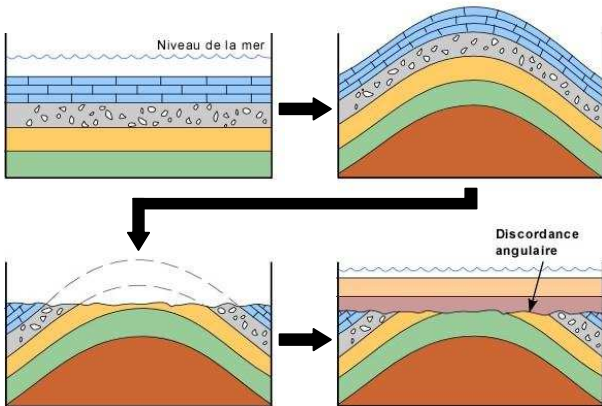
↪ Lacune marquée par un ravinement du substratum par les couches sus-jacentes.



Lois de lithostratigraphie

► Discordance angulaire

↪ Discordance entre deux séries sédimentaires dont les pendages sont différents de part et d'autre de la surface de discordance.



Lithostratigraphie

► Avantages

- ~> Local
- ~> Reconstitutions fines
- ~> Carte de Faciès

► Inconvénients

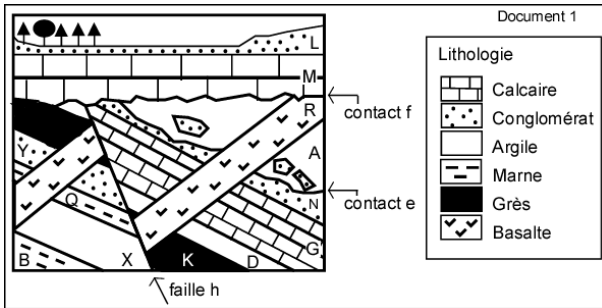
- ~> Variations latérales de faciès
- ~> Pas global
- ~> Pas d'âges chiffrés

Lithostratigraphie

Exercice

Donner :

- ▶ L'ordre chronologique des événements
- ▶ La nature des contacts e et f
- ▶ Le type de faille de « h »



Biostratigraphie

Définition - Biostratigraphie

Étude des fossiles dans le but de découper les temps géologiques

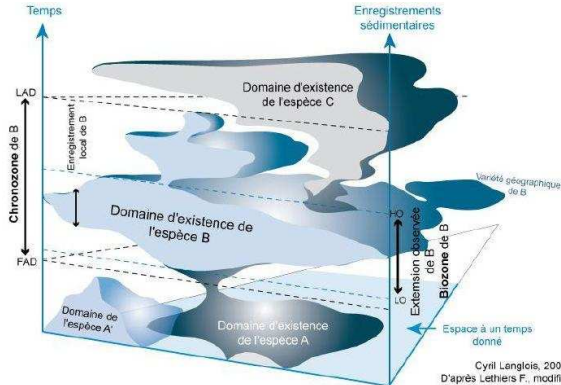
- ▶ repose sur quelques principes simples globalement liés aux processus d'évolution
- ▶ ne donne pas d'âge chiffré mais permet de donner un âge relatif (plus jeune ou plus vieux que...)
- ▶ découpage temporel peut s'avérer extrêmement précis



Biostratigraphie

Biozone

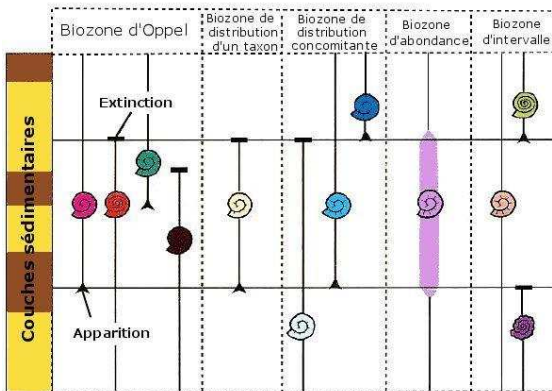
- ▶ Ensemble des strates contenant une espèce fossile ou une association caractéristique d'espèces fossiles
- ▶ Limites inférieures et supérieure utilisées comme des isochrones



Biostratigraphie

Biozone

- ▶ Ensemble des strates contenant une espèce fossile ou une association caractéristique d'espèces fossiles
- ▶ Limites inférieures et supérieure utilisées comme des isochrones



Biostratigraphie

Qualités d'un bon fossile stratigraphique

- ▶ Évolution rapide
- ▶ Large répartition géographique ($\sim$ organismes marins)
- ▶ Grand nombre d'individus
- ▶ Peu sensible aux variations du milieu
- ▶ Bonne conservation

Biostratigraphie

Quelques grandes biozones

Paléozoïque : premiers fossiles à coquilles dures jusqu'à la première extinction massive (Trilobites, Graptolites)

Mésozoïque : de la première extinction massive à la deuxième extinction massive (Bélemnites, Ammonites, Dinosaures)

Cénozoïque : de la deuxième extinction massive à l'actuel



Biostratigraphie

► Avantages

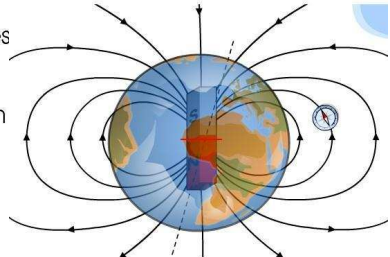
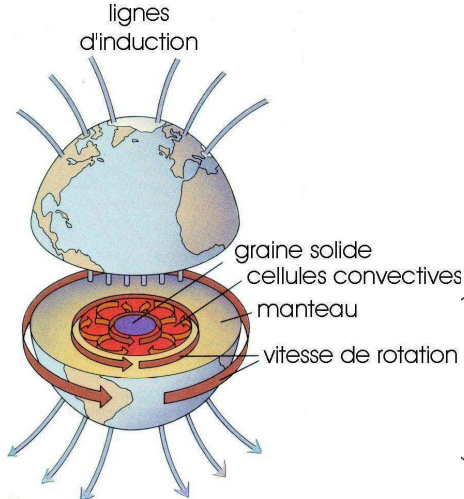
- ~> Peu coûteux
- ~> Rapide
- ~> Précis
- ~> Potentiellement globale
- ~> Univoque

► Inconvénients

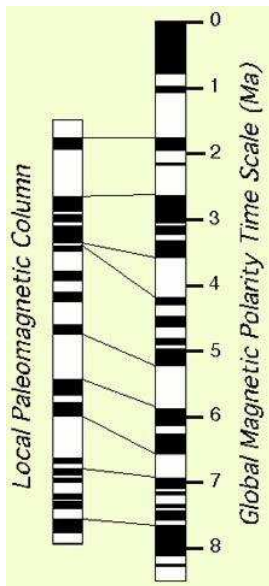
- ~> Limité au Phanérozoïque
- ~> Remaniements
- ~> Intercalibrations entre biozones pour un aspect global
- ~> Evolue sans cesse
- ~> Age chiffré indirect

Magnétostratigraphie

Champs magnétique terrestre



Magnétostratigraphie



Conditions actuelles dîtes de
polarité normale

⇒ bandes noires

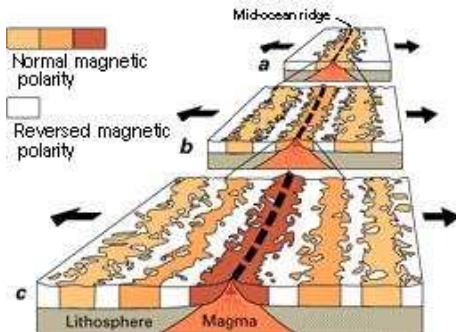
Conditions dîtes de
polarité inverse

⇒ bandes blanches

Magnétostratigraphie

► Enregistrement du géomagnétisme

- ↪ dans les roches magmatiques (cf aimantation thermique rémanente)
- ↪ dans les roches sédimentaires (cf aimantation chimique rémanente ou détritique rémanente)



Magnétostratigraphie

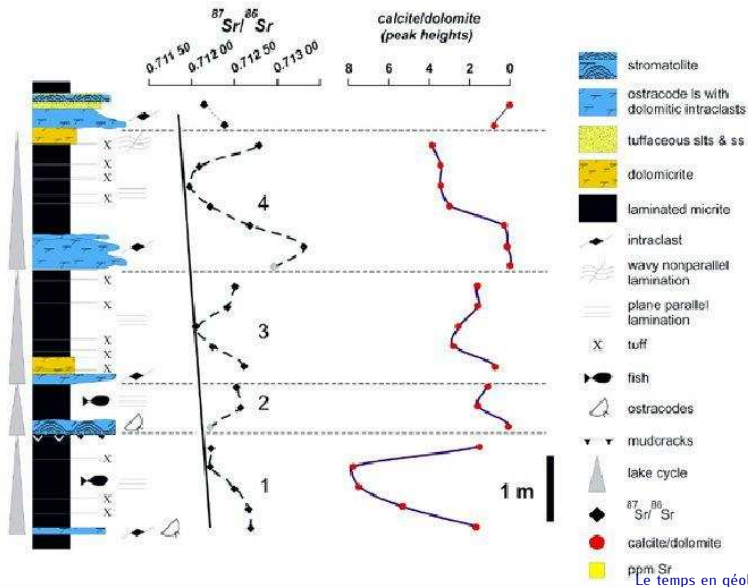
► Avantages

- ↪ Précis
- ↪ Global
- ↪ Applicable à l'ancien et au récent
- ↪ Indépendante de la bio et lithostratigraphie

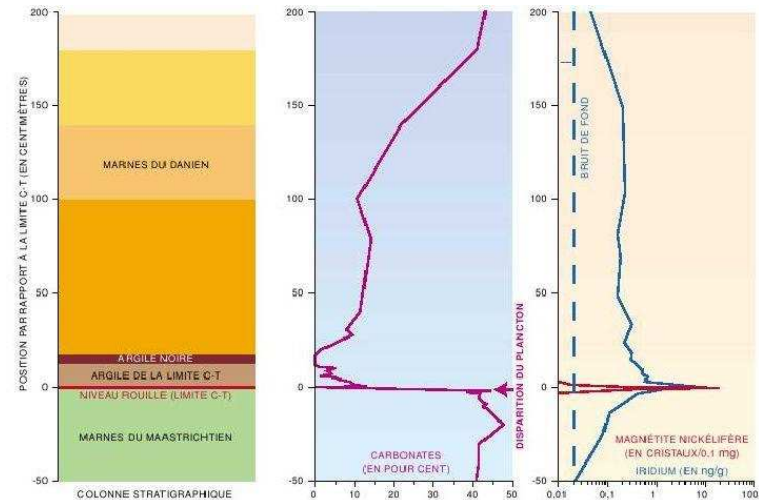
► Inconvénients

- ↪ Nécessite un à priori
- ↪ Ne donne que des détails
- ↪ Ne donne que des corrélations
- ↪ Sédiments non réaimantés
- ↪ Bonne connaissance de l'enregistreur

Chimiostratigraphie



Chimiostratigraphie



Chimiostratigraphie

► Avantages

- ↪ Peut être globale

► Inconvénients

- ↪ Valable si absence de diagenèse
- ↪ Ne date pas
- ↪ Nécessite de connaître les lacunes
- ↪ Non univoque
- ↪ Lourd

Divisions stratigraphiques internationales

► Formations lithostratigraphiques

- ↪ premiers ensembles distingués par les géologues au début du 19^{ème} siècle.
- ↪ ensemble de strates présentant des caractères lithologiques identiques et les mêmes associations paléontologiques
- ↪ ne permettent que des coupures régionales

► Étage

- ↪ ensemble de strates contenues entre deux limites (souvent biostratigraphiques) choisies par une commission internationale.
- ↪ **stratotype** : coupe-référence dont le nom dérive de sa localité-type (ex. Lutèce–Lutétien, Thoars–Toarcien, Oxford–Oxfordien, Cognac–Coniacien...)

Divisions stratigraphiques internationales

Stratotype d'unité

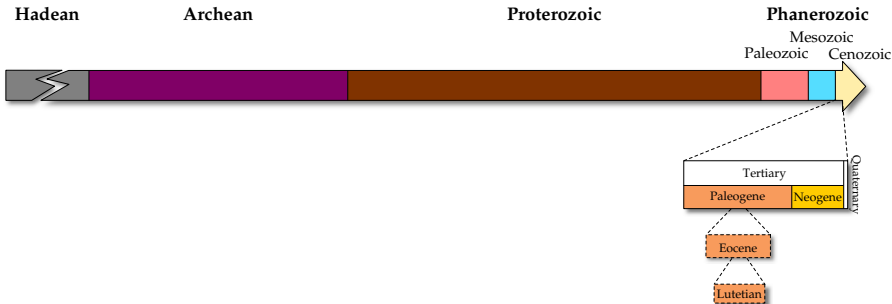
Coupe référence sur un affleurement réel permettant de définir un étage de l'échelle des temps géologiques, délimité par des coupures franches (supposées associées à des événements catastrophiques ou modifications écologiques)

Stratotype de limite

Coupe de référence sur laquelle la limite inférieure d'une unité est la plus nette et la plus documentée possible.

Divisions stratigraphiques internationales

Division	Exemple
Éonothème	Phanérozoïque
Érathème	Cénozoïque
Système	Paléogène
Série	Éocène
Étage	Lutétien



**Nécessité d'ancrer ces chronologies
relatives avec des chiffres**

1. Introduction
2. Réaliser des chronologie relatives
- 3. Réaliser des chronologie absolues**

Radiochronologie

Différents types de désintégrations

- ▶ α ($\rightarrow$ ${}^4\text{He}$)

ex. ${}^{238}\text{U}/{}^{234}\text{Th}$

- ▶ β^- ($\rightarrow$ e^-)

ex. ${}^{14}\text{C}/{}^{14}\text{N}$, ${}^{87}\text{Rb}/{}^{87}\text{Sr}$

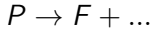
- ▶ β^+ ($\rightarrow$ e^+)

ex. ${}^{18}\text{F}/{}^{18}\text{O}$

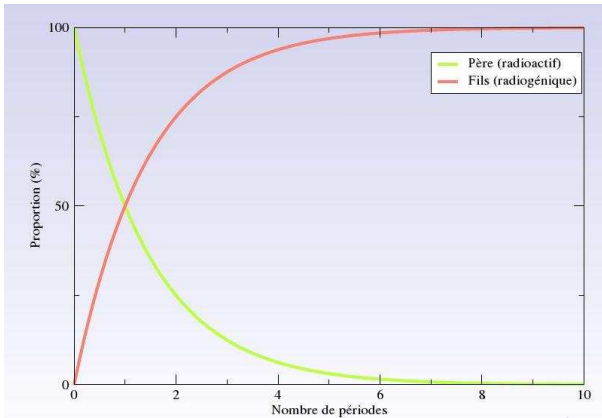
- ▶ fission nucléaire (+ neutrons)

ex. ${}^{235}\text{U}/{}^{238}\text{U}$

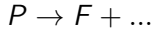
Radiochronologie



$$\frac{dP}{dt} = -\lambda P \text{ avec } \lambda : \text{constante de désintégration}$$

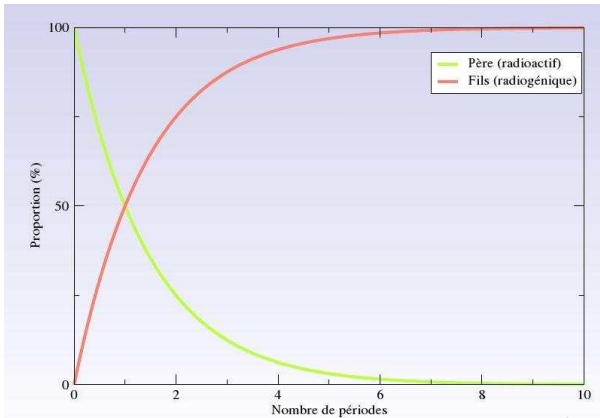


Radiochronologie



$$\frac{dP}{dt} = -\lambda P \text{ avec } \lambda : \text{constante de désintégration}$$

$$P_t = P_0 \times e^{-\lambda t} \quad \text{ou} \quad F_t = F_0 + P_t \times (e^{\lambda t} - 1)$$



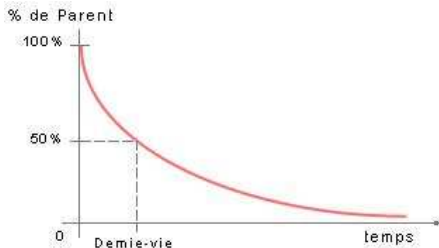
Radiochronologie

Temps de demi-vie : temps nécessaire pour que la moitié de l'élément père se soit transformée en élément fils.

$$P_{\tau_{1/2}} = \frac{P_0}{2} \quad \Rightarrow \quad \tau_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Radioactivité éteinte : temps au bout duquel la quantité initiale de l'élément père a été divisée par cent.

$$P_{\tau_c} = \frac{P_0}{100} \quad \Rightarrow \quad \tau_c = 6.6 \times \tau_{1/2}$$



Radiochronologie

Exemple du couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

1	IA																										18	VIIIA																							
1	H HYDROGÈNE																										2	He 4.0026																							
2	Li 3 6.941 LITHIUM		Be 4 9.0122 BERYLLIUM														B 5 10.811 BORE		C 6 12.011 CARBONE		N 7 14.007 AZOTE		O 8 15.999 OXYGÈNE		F 9 18.998 FLUOR		Ne 10 20.180 NÉON																								
3	Na 11 22.990 SODIUM		Mg 12 24.305 MAGNÉSIE		Al 13 26.982 ALUMINUM		Si 14 28.086 SILICIUM		P 15 30.974 PHOSPHORE		S 16 32.065 SOUFRE		Cl 17 35.453 CHLORE		Ar 18 39.948 ARGON																																				
4	K 19 39.098 POTASSIUM		Ca 20 40.078 CALCIUM		Sc 21 44.956 SCANDIUM		Ti 22 47.867 TITANE		V 23 50.942 VANADIUM		Cr 24 51.996 CHROME		Mn 25 54.938 MANGANESE		Fe 26 55.845 FER		Co 27 58.933 COBALT		Ni 28 58.693 NICKEL		Cu 29 63.546 CUIVRE		Zn 30 65.38 ZINC		Ga 31 69.723 GALLIUM		Ge 32 72.64 GERMANIUM		As 33 74.922 ARSENIQUE		Se 34 78.96 SÉLÉNIUM		Br 35 79.904 BROME		Kr 36 83.798 KRYPTON																
5	Rb 37 85.468 RUBIDIUM		Sr 38 87.62 STRONTIUM		Y 39 88.906 YTTRIUM		Zr 40 91.224 ZIRCONIUM		Nb 41 92.906 NIOBIUM		Mo 42 95.96 MOLYBDÈNE		Tc 43 (98) TECHNETIUM		Ru 44 101.07 RUTHÈNIUM		Rh 45 102.91 RHODIUM		Pd 46 106.42 PALLADIUM		Ag 47 107.87 ARGENT		Cd 48 112.41 CADMIUM		In 49 114.82 INDIUM		Sn 50 118.71 ÉTAIN		Sb 51 121.76 ANTIMOINE		Te 52 127.60 TELLURE		I 53 126.90 IODE		Xe 54 131.29 XÉNON																
6	Cs 55 132.91 CÉSURIUM		Ba 56 137.33 BARYUM		La-Lu 57-71 Lanthanides		Hf 72 178.49 HAFNIUM		Ta 73 180.95 TANTALE		W 74 183.84 WOLFRÈME		Re 75 186.21 RÈNÉMIUM		Os 76 190.23 OSMIUM		Ir 77 192.22 IRIDIUM		Pt 78 195.08 PLATINE		Au 79 196.97 OR		Hg 80 200.59 MERCURE		Tl 81 204.38 THALLIUM		Pb 82 207.2 PLOMB		Bi 83 208.98 BISMUTH		Po 84 (209) POLONIUM		At 85 (210) ASTATE		Rn 86 (222) RADON																
7	Fr 87 (223) FRANCIUM		Ra 88 (226) RADIUM		Ac-Lr 89-103 Actinides		Rf 104 (267) RUTHÉRIUM		Db 105 (268) DUBNIUM		Sg 106 (271) SEABORGIUM		Bh 107 (272) BOHRMIUM		Hs 108 (277) HASSIUM		Mt 109 (278) MEITNERIUM		Ds 110 (281) DARMSTADTIUM		Rg 111 (280) ROENTGIUM		Cn 112 (285) COPERNICIUM																												
LANTHANIDES																																																			
57		58		59		60		61		(145)		62		50 136.3		63		51 151.96		64		52 157.25		65		53 158.93		66		54 162.50		67		55 164.93		68		56 167.26		69		57 168.93		70		58 173.05		71		59 174.97	
La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu																							
LANTANE		CÉRIUM		PRASEODYME		NÉODYME		PROMÉTHIUM		SAMARIUM		EUROPÉIUM		GADOLINIUM		TERBIUM		DYSPROSIUM		HOLMIUM		ÉRBIUM		THULIUM		YTTÉRIUM		LUTÉTIUM																							
ACTINIDES																																																			
89		90		91		92		93		(237)		94		(244)		95		(243)		96		(247)		97		(247)		98		(251)		99		(252)		100		(257)		101		(258)		102		(259)		103		(262)	
Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr																							
ACTINIUM		THORIUM		PROTACTINIUM		URANIUM		NEPTUNIUM		PLUTONIUM		AMÉRICIUM		CURIUM		BERKÉLIUM		CALIFORNIUM		ENSTÉNIUM		FERMIUM		VÉNÉDÉLIUM		NOBÉLIUM		LAWRENCIUM																							

Radiochronologie

Exemple du couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

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

$$^{87}\text{Sr}_t = ^{87}\text{Sr}_0 + ^{87}\text{Rb}_t \times (e^{\lambda t} - 1)$$

$$^{86}\text{Sr}_0 = \text{inconnu mais } ^{86}\text{Sr} \text{ non radiogénique mesurable} \\ \Rightarrow ^{86}\text{Sr}_0 = ^{86}\text{Sr}_t$$

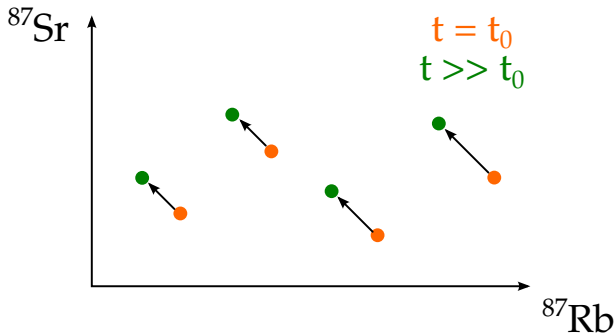
$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}(t) = \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}(0) + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}(t) \times (e^{\lambda t} - 1)$$

$$Y = B + Ax$$

Radiochronologie

Exemple du couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

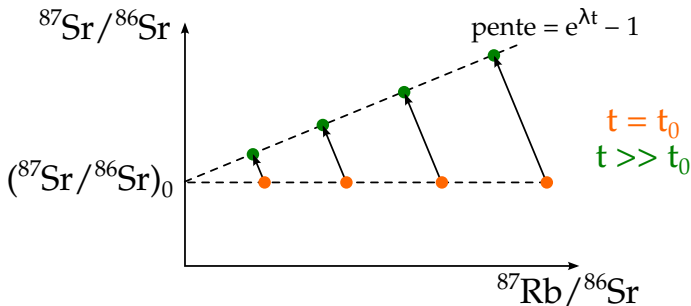
Pourquoi normaliser ? Méthode de l'isochrone.



Radiochronologie

Exemple du couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

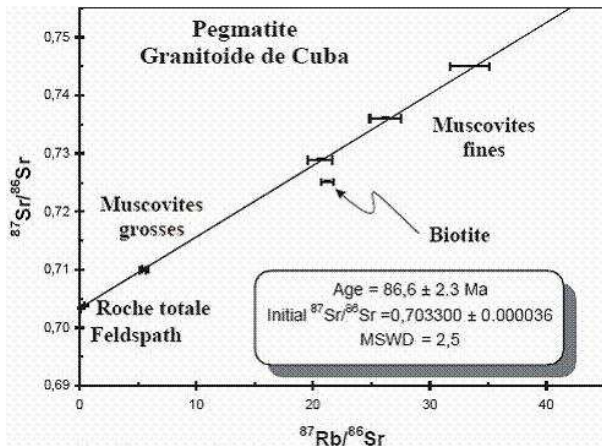
Pourquoi normaliser ? Méthode de l'isochrone.



Radiochronologie

Exemple du couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

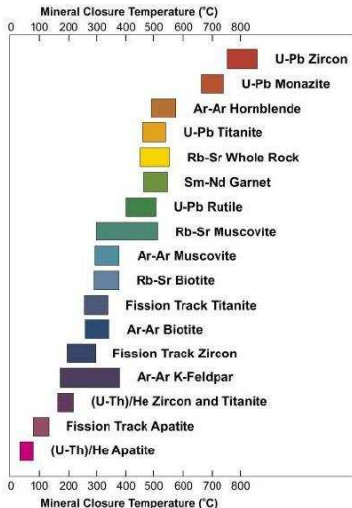
Pourquoi normaliser ? Méthode de l'isochrone.



Radiochronologie

- **Isochrone roche totale** : datation de la cristallisation de la roche
- **Isochrone sur minéraux** : datation de différents événements

Température de
fermeture du
système



Radiochronologie

Exemple de la datation ^{14}C

Willard Libby

- ▶ prix Nobel de chimie en 1960
- ▶ Mesure l'activité du ^{14}C dans la matière organique actuelle
- ▶ Date des bois de tombes égyptienne à 4600 ans



Radiochronologie

Exemple de la datation ^{14}C

► Les isotopes du carbone

↪ ^{12}C : stable 98.89%

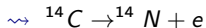
↪ ^{13}C : stable 1.11%

↪ ^{14}C : instable $10^{-10}\%$

► Production dans la haute atmosphère



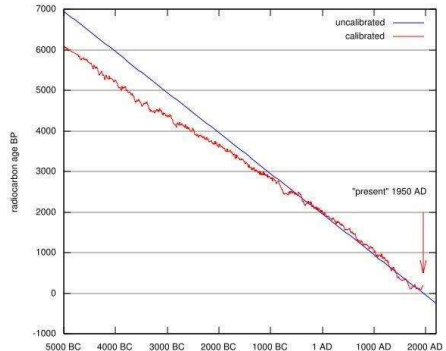
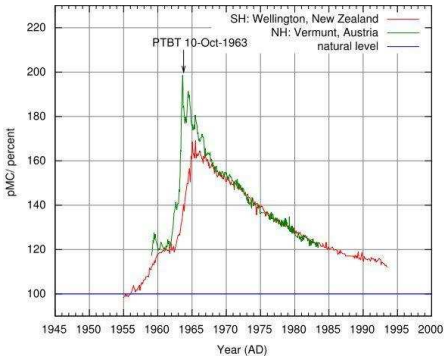
► Désintégration $\tau_{1/2} \simeq 5600 - 5700$ ans



Radiochronologie

Exemple de la datation ^{14}C

- Concentration en ^{14}C de l'atm. = identique en tout lieu du globe
- Concentration en ^{14}C de l'atm. = restée constante au cours du temps $[^{14}\text{C}]_{\text{actuel}} = [^{14}\text{C}]_0$



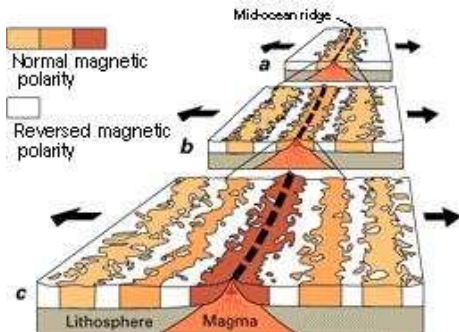
Radiochronologie

Exemple de la datation ^{14}C

- ▶ Concentration en ^{14}C de l'atm. = identique en tout lieu du globe
- ▶ Concentration en ^{14}C de l'atm. = restée constante au cours du temps $[^{14}\text{C}]_{\text{actuel}} = [^{14}\text{C}]_0$
- ▶ Applications :
 - ↪ en archéologie, géologie, hydrologie, océanographie
 - ↪ beaucoup de matériaux : bois, charbon, os, cuir, coquilles, pollens, graines etc...

Radiochronologie

Radiochronologie et magnétostratigraphie



Radiochronologie

► Avantages

- ↪ Chiffres
- ↪ Grande gamme d'applications

► Inconvénients

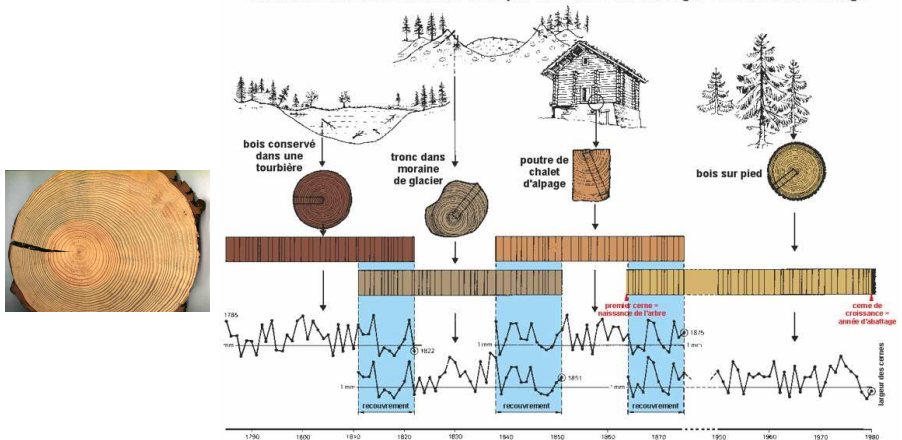
- ↪ Mesure des rapports et non des ages
- ↪ Interprétation (cristallisation, métamorphisme...)
- ↪ Méthode lourde

Dendrochronologie

Définition

Dénombrement des cernes de croissance des arbres

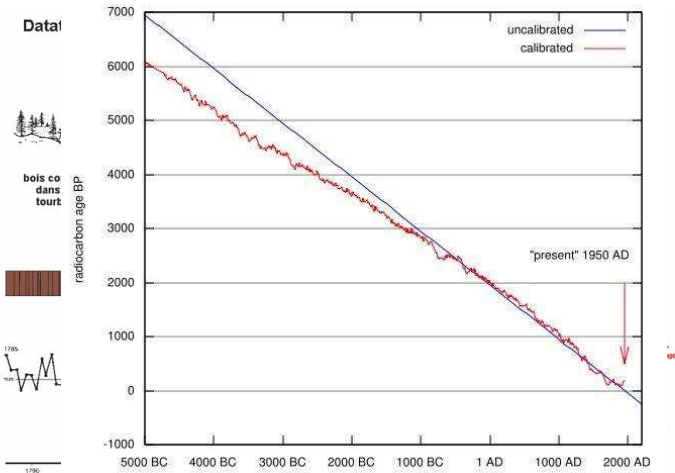
Datation d'un échantillon de bois par la dendrochronologie : méthode de calage



Dendrochronologie

Définition

Dénombrement des cernes de croissance des arbres



Dendrochronologie

► Avantages

- ~> Chiffres
- ~> Calibrage de ^{14}C
- ~> Peu coûteux
- ~> Haute résolution
- ~> Indicateur climatique

► Inconvénients

- ~> Datation sur des petites gammes de temps
- ~> Maximum $\sim 10\,000$ ans

Autres méthodes de datation

- ▶ Thermoluminescence
- ▶ Racémisation des acides aminés
- ▶ Cyclostratigraphie

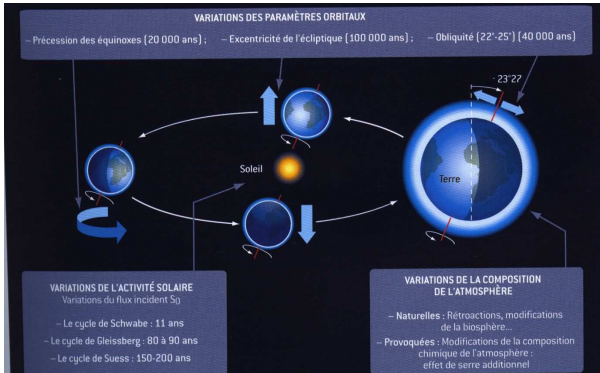


← Dépôt clair
= été

← Dépôt sombre
= hiver

Autres méthodes de datation

- ▶ Thermoluminescence
- ▶ Racémisation des acides aminés
- ▶ Cyclostratigraphie



Autres méthodes de datation

- ▶ Thermoluminescence
- ▶ Racémisation des acides aminés
- ▶ Cyclostratigraphie



[illegible]

Ancrage de l'échelle stratigraphique

Stratigraphique	Chronologique	Exemple
Éonothème	Éon	Phanérozoïque
Érathème	Ère	Cénozoïque
Système	Période	Paléogène
Série	Époque	Éocène
Étage	Âge	Lutétien

