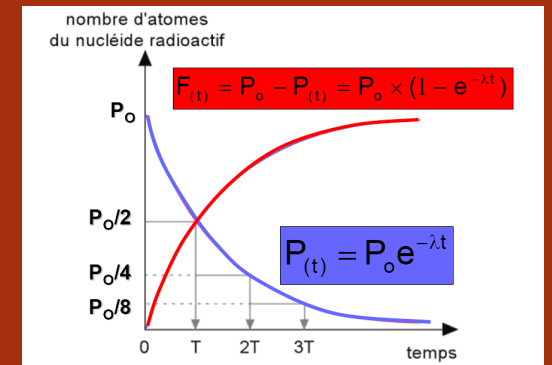
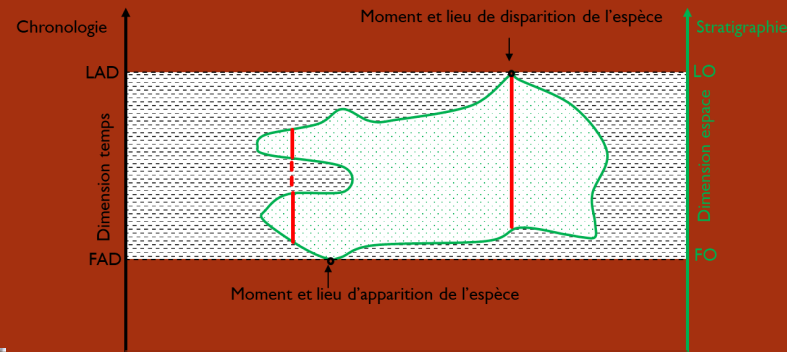


ST-H-LA MESURE DU TEMPS: OUTILS ET MÉTHODES



GÉOLOGIE PARTIE III

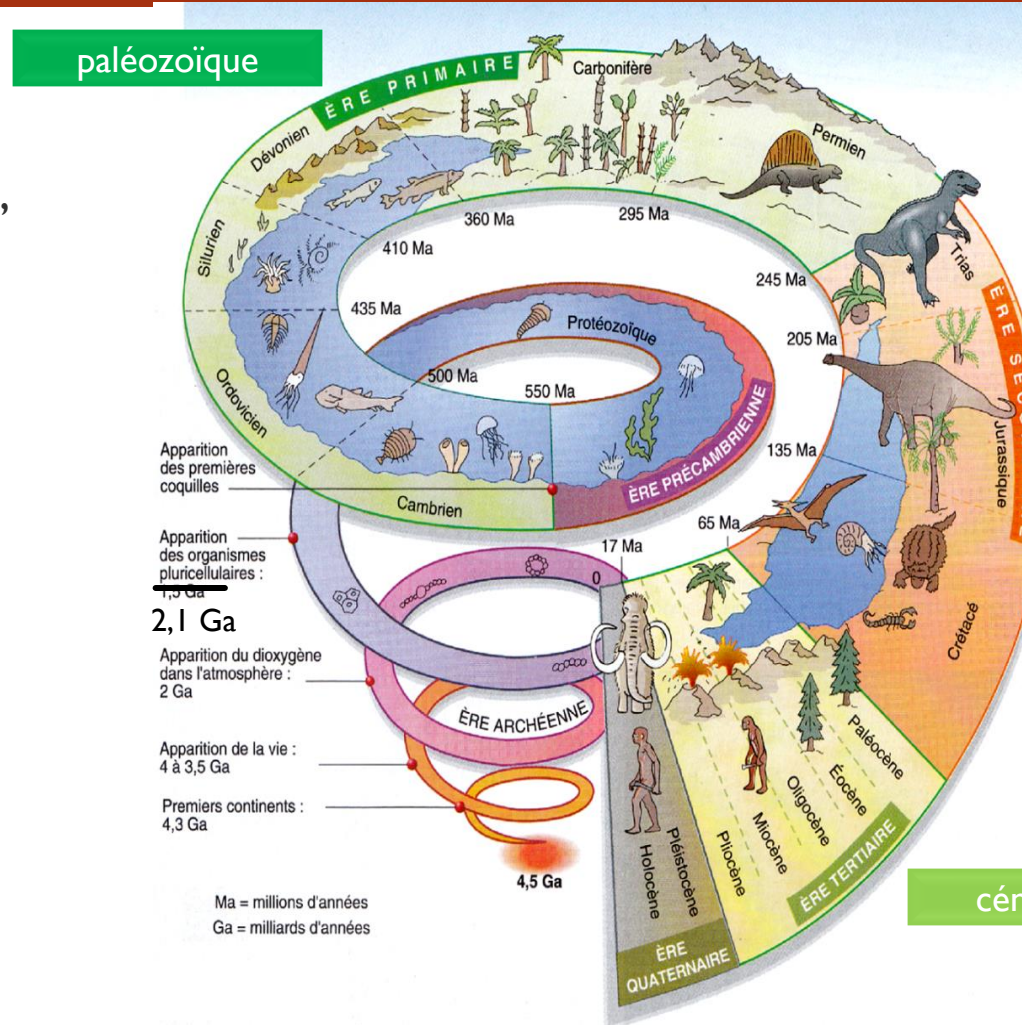
LA GÉOLOGIE UNE SCIENCE HISTORIQUE

- Lorsque la biologie rencontre la géologie, cela donne...
- ... un fossile!

Cf SV-C-2



Les organismes pluricellulaires découverts au Gabon *Gabonionta* : pro ou eucaryotes? 2,1 Ga



mésozoïque

L'histoire de la Terre et celle de la Vie sont étroitement imbriquées. Elles durent depuis près de 4,5 milliards d'années (Ga).

Les géologues ont « découpé » cette très longue période en segments plus ou moins longs.

Les coupures entre ces segments sont généralement identifiées par des événements géologiques et/ou biologiques.

Comment les géologues sont-ils parvenus à reconstituer cette frise de l'histoire de notre planète ?

cénozoïque

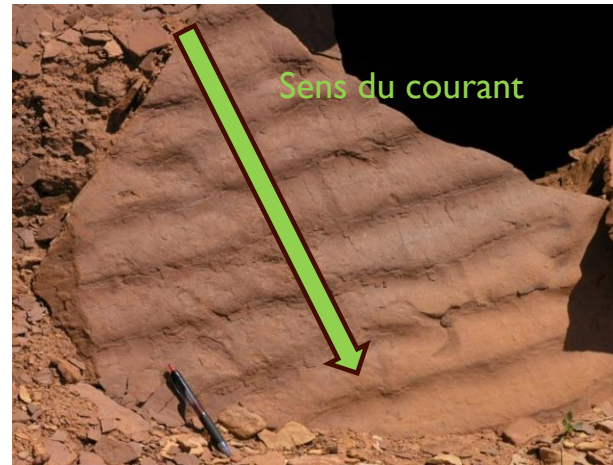
FAUNE D'EDIACARA (-635 À -541 MA) (Illuminations du jardin des plantes)



INTRODUCTION



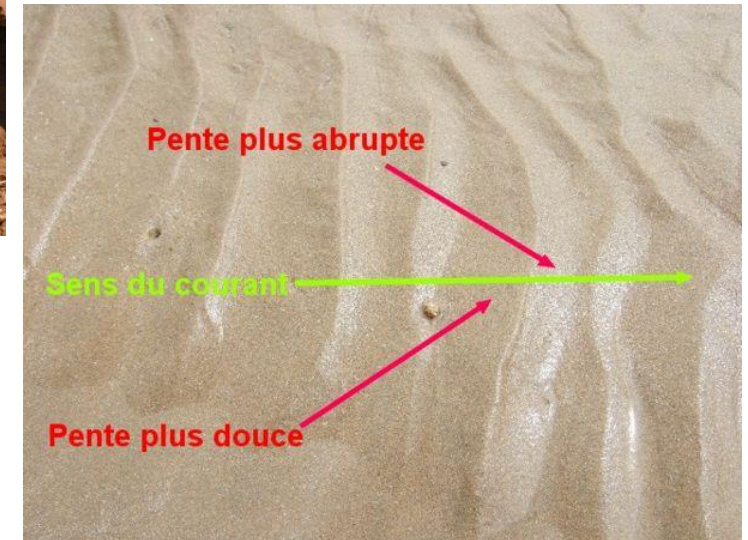
- « Ce qui se passe aujourd'hui s'est passé de la même manière par le passé » = principe d'actualisme
- Ce qui s'est formé dans le passé s'est formé selon les mêmes mécanismes qu'aujourd'hui.
- **Le présent est la clef de compréhension du passé.**
- ⇒ Reconstituer un modèle de **paléoenvironnement**, nécessite de comprendre et d'observer les mécanismes actuels (modalités de dépôts, climat, exigences écologiques des organismes...)



Ripple-marks fossilisés



Rides de courant à marée basse sur une plage de Nouvelle-Écosse au Canada. Wikipédia



Rides de courant asymétriques dans une course. Plage de Sauveterre. Vendée

- **Chaque couche** représente ainsi une **unité de temps plus ou moins longue** et **l'empilement** de ces couches représente un fragment de **l'histoire** de la Terre.
- Retracer l'histoire de la Terre est ainsi envisageable mais suppose de pouvoir **ordonner les strates**, et donc les unités de temps, les unes par rapport aux autres et de déterminer des âges relatifs : c'est l'objet de la **stratigraphie**.
- **Stratigraphie** = retracer une histoire, donc une succession d'évènements, sans indication de durée
 - ⇒ pour ancrer ces évènements dans un temps fini, absolu, il faut associer à cette stratigraphie, une **datation absolue**, permise par les **radio-isotopes**, présents dans **des systèmes fermés**, les roches magmatiques.

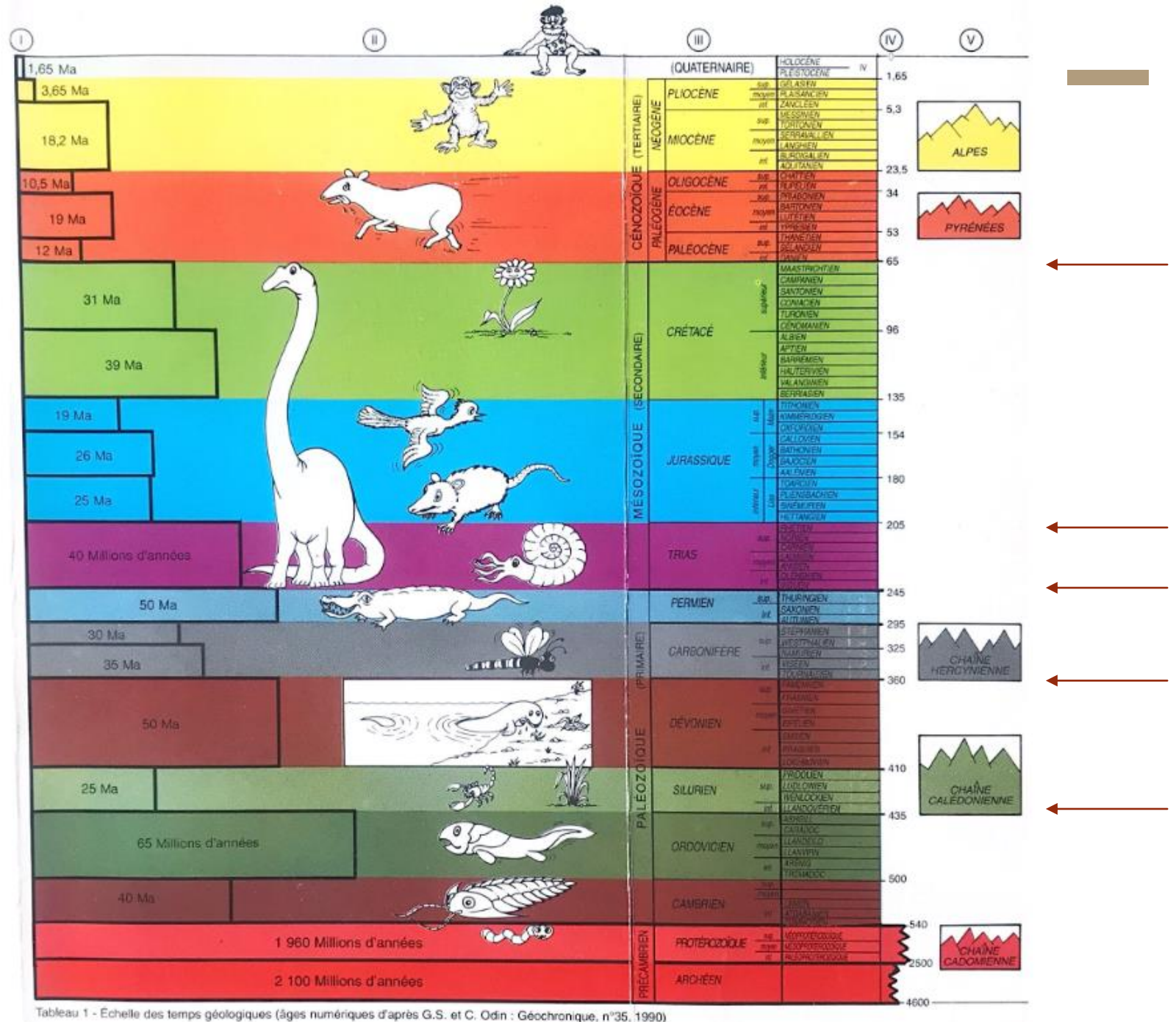


- Pour retracer une histoire, il faut :
 - Une **chronologie relative** basée sur des **principes** (superposition, recoupement inclusion)
 - **Des limites**, des intervalles de temps (quels objets géologiques permettront d'établir des coupures ?)
 - Des **objets repères**, qui justifieront arbitrairement les coupures temporelles
 - Des **temps précis, absolus**



- Connaître la succession :
 - Des ères
 - Des systèmes ou périodes
- Placer les 3 orogénèses
- Identifier des crises biologiques (Permo-Trias, KT, Quaternaire...)

Figure 1 : échelle des temps géologiques (chronostratigraphie validée par de la datation absolue) BRGM



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres

1. Principe de superposition
2. Principe de recoupement
3. Principe d'inclusion
4. Principe de continuité latérale

5. Bilan

B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère

1. La notion de fossiles
2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique

C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique

1. L'étage se définit à partir de son stratotype
2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

A. Principe de la radiochronologie

1. Loi de décroissance radioactive
2. Choix de l'isotope
3. Choix de la méthode

B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

1. La désintégration du ^{40}K
2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
3. Discussion

B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
3. Application (granite du Mont Aigoual)

4. Applications célèbres

C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

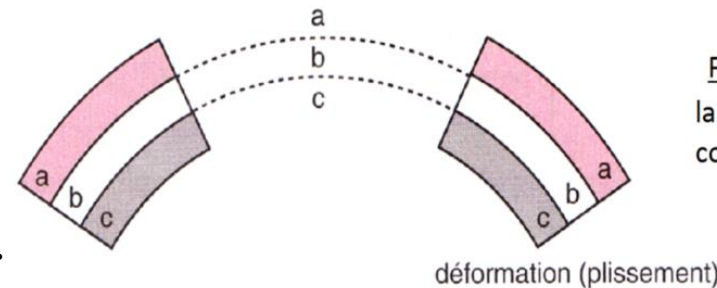
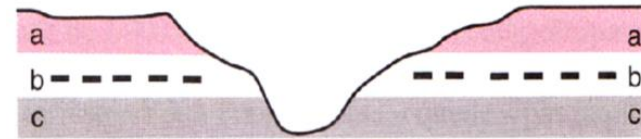
I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

I. Principe de superposition

- **La stratigraphie** étudie les empilements de roches (surtout les roches sédimentaires).
- Ces **roches** sont **caractérisées** par:
 - **contenu lithologique** (la nature des roches)
 - **contenu fossilifère.**
- **Une couche est plus jeune que celles qu'elle recouvre et plus âgée que celles qui la recouvrent.**

} **faciès.**



Principe de la superposition :
la couche a est plus récente que la couche b et c.



A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

I. Principe de superposition

- **Attention**, une lave volcanique peut s'insinuer horizontalement (un **sill**) entre deux couches sédimentaires, elle modifiera la lecture de la succession stratigraphique.
- **Attention**, dans les séries plissées, on peut se trouver sur une **série renversée** si le pli est couché.

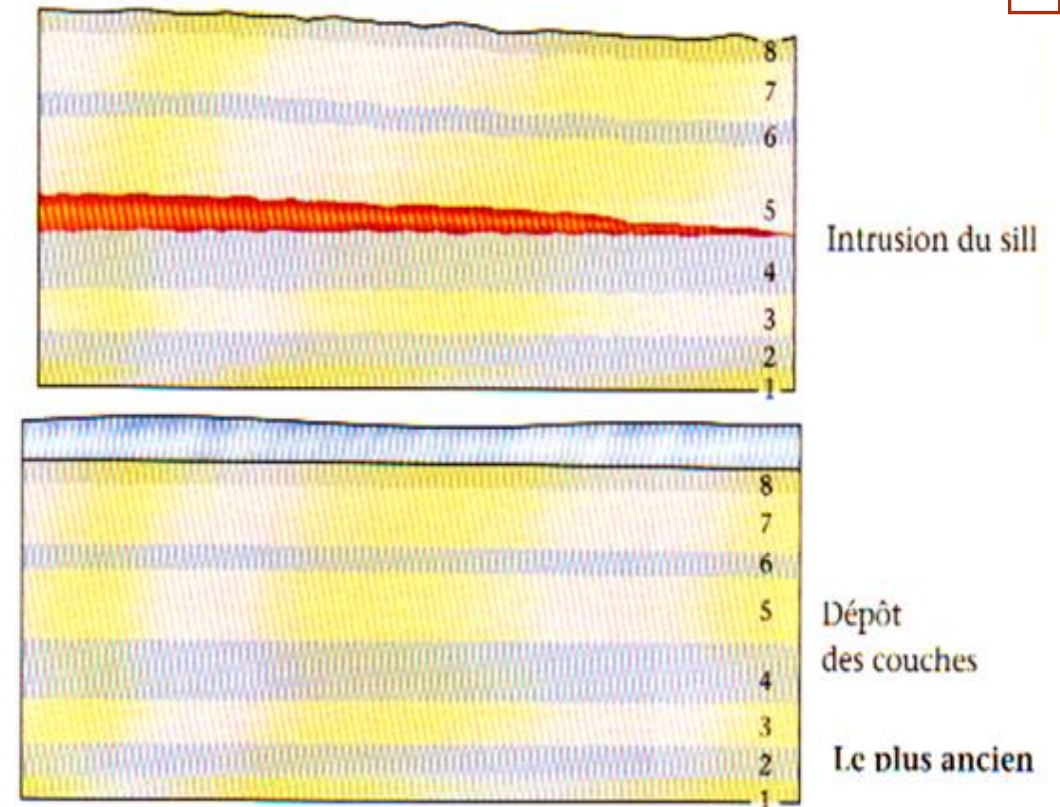


Figure 3 : principe de superposition avec intrusion d'un sill

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

I. Principe de superposition

- **Attention**, dans les séries plissées, on peut se trouver sur une **série renversée** si le pli est couché.

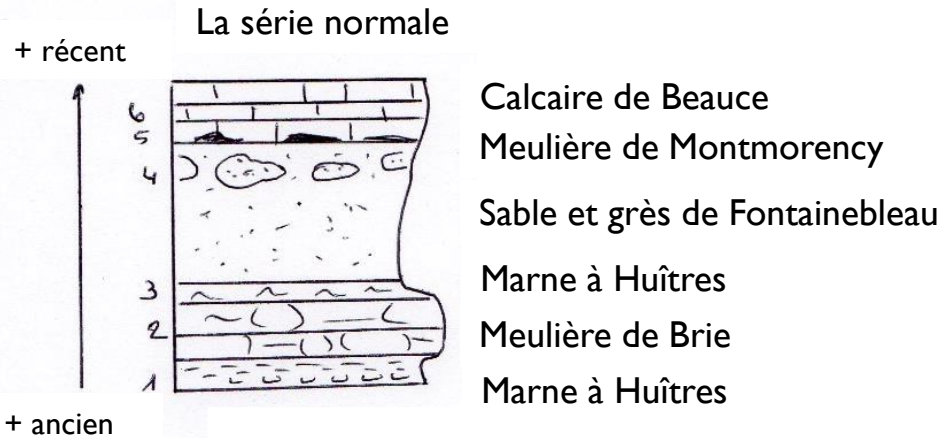
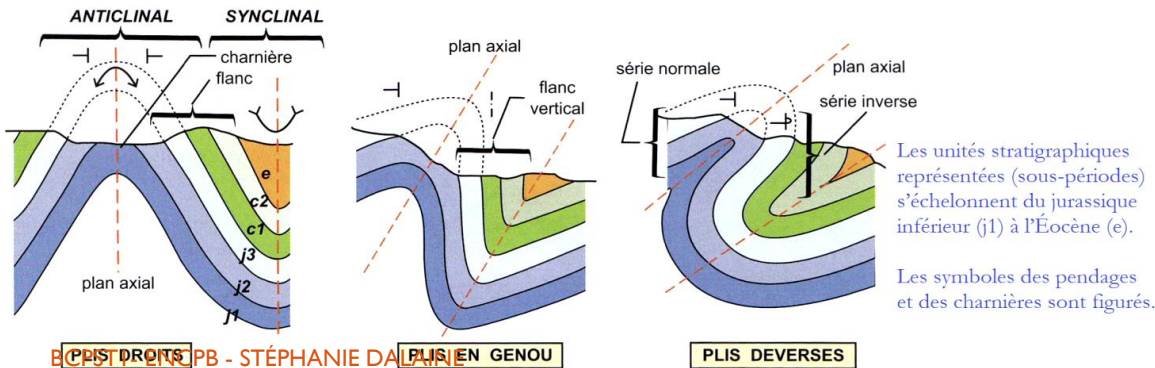
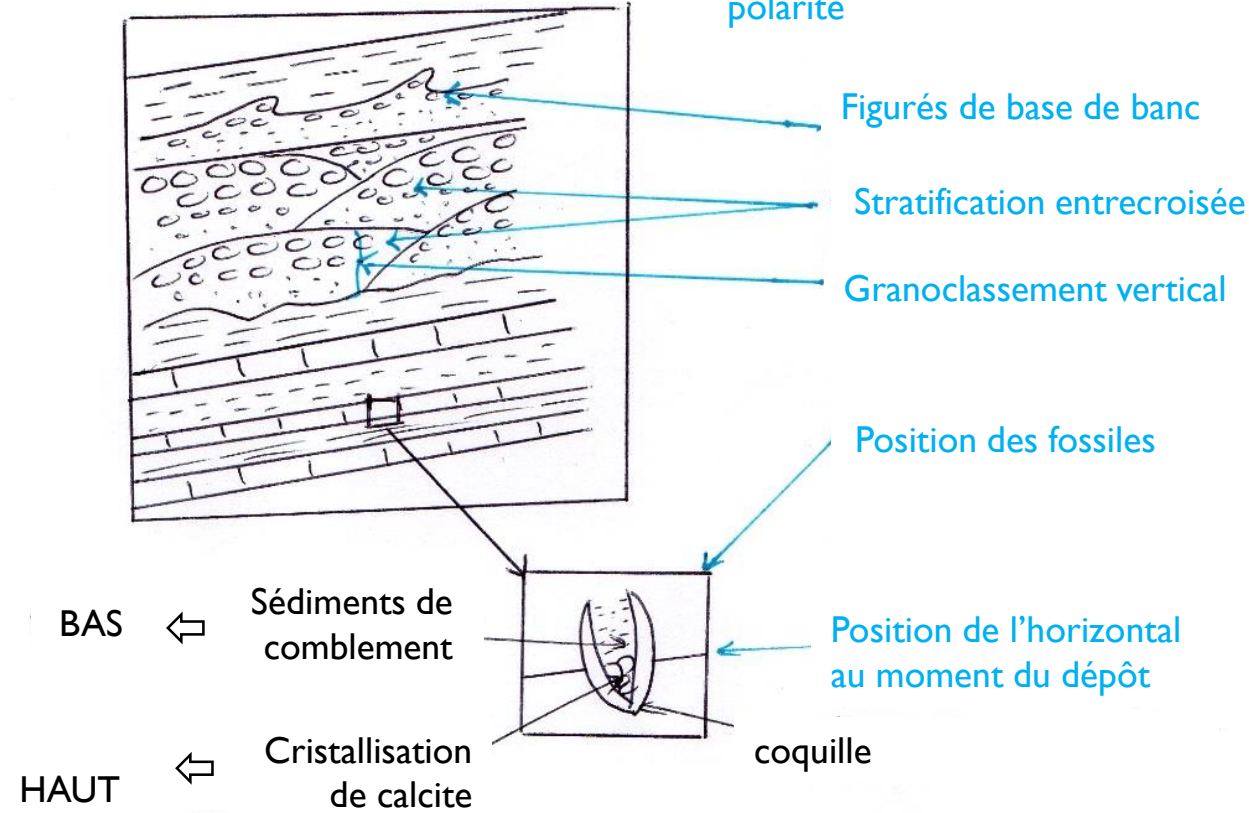


Figure 4 : principe de superposition série normale
Application dans la formation tertiaire du Bassin de Paris



Quelques clés pour retrouver la polarité



⇒ INTERPRÉTATION

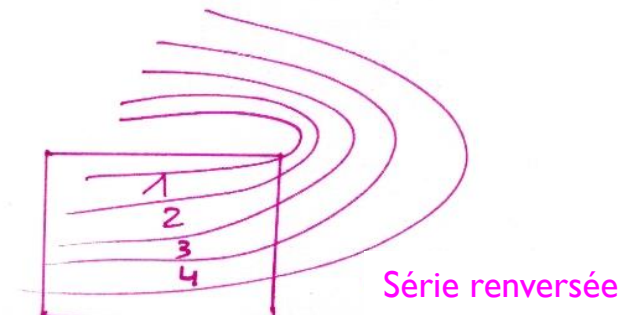


Figure 5 : principe de superposition série sédimentaire renversée

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

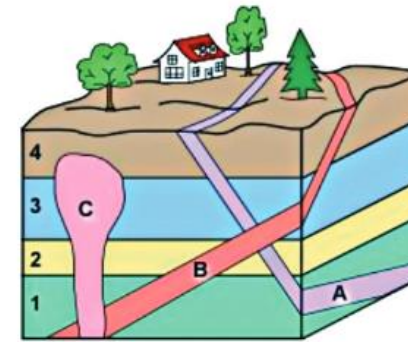
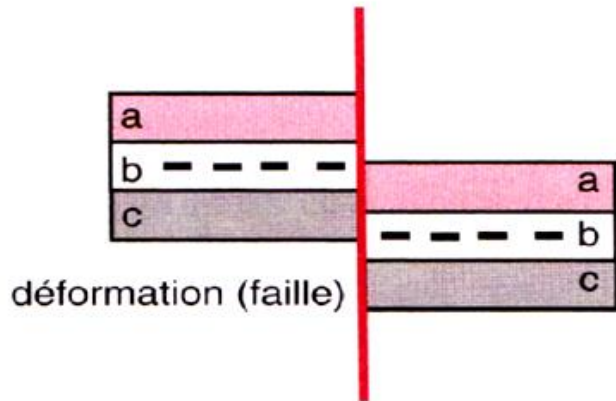
- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

2. Principe de recoupement

- **La stratigraphie** étudie les empilements de roches (surtout les roches sédimentaires).
- Toute **structure recoupant une autre est postérieure** à celle qu'elle recoupe.



Filon d'aplite (granite à grains fins) recoupant un granite et son enclave (sédiments métamorphisés). Le filon est plus jeune que le granite, lui-même plus jeune que l'enclave.

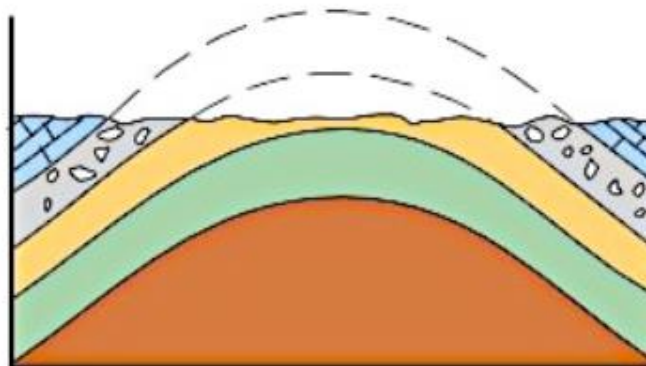


Paysage d'Islande : La route recoupant la coulée de lave du XVe siècle est plus jeune que la coulée de lave. Cette coulée remplissant partiellement la vallée est plus jeune que la formation de la vallée.



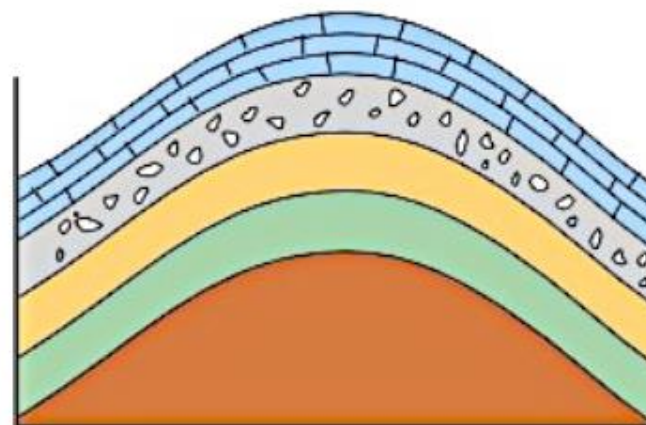


Discordance angulaire



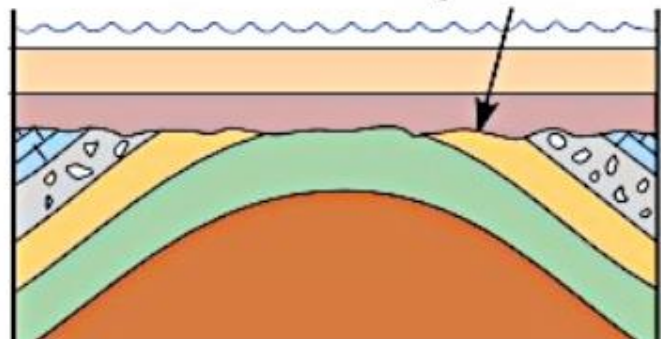
Érosion

Les couches plissées sont subséquemment érodées et les reliefs aplanis



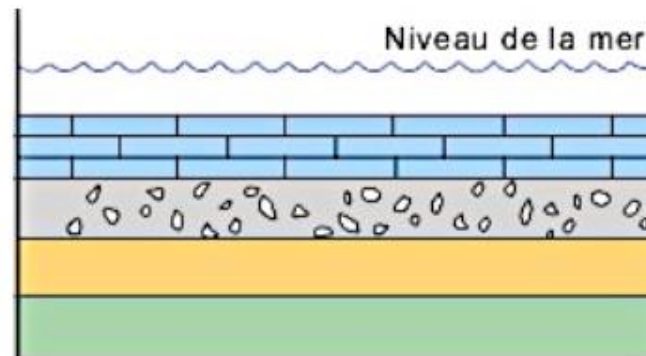
Plissement et soulèvement

Il est fréquent que les forces tectoniques de compression plissent ces couches originellement horizontales



Nouveau dépôt

Si d'autres couches se déposent au-dessus, par exemple à la faveur d'un envahissement par la mer, il en résulte une relation d'angularité entre les deux ensembles. La surface qui sépare les deux ensembles est une discordance angulaire.



Dépôt

Les couches sédimentaires se déposent à l'horizontale

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

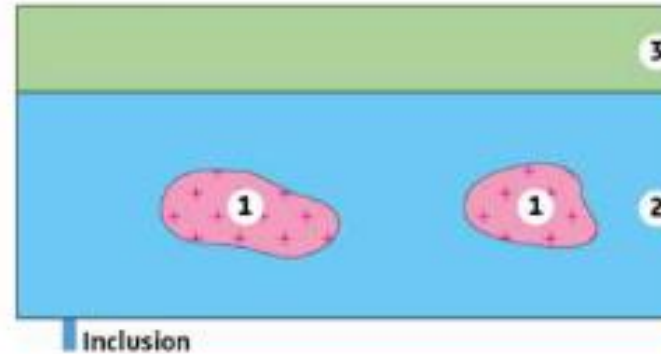
I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES



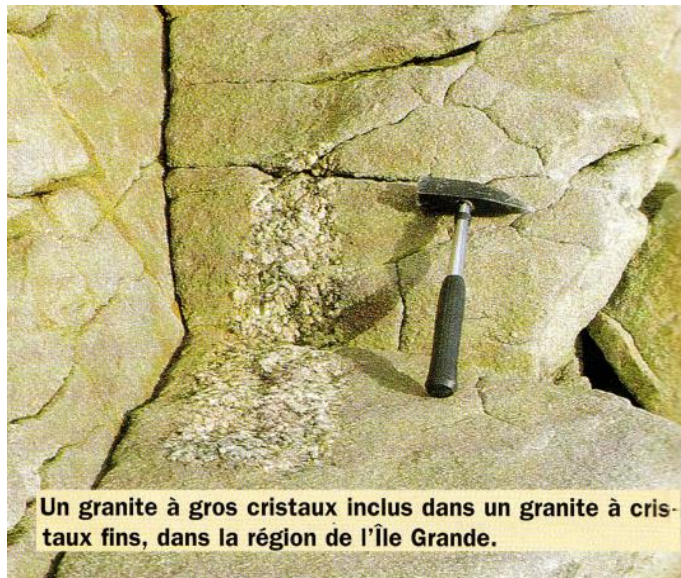
3. Principe d'inclusion

- On entend par **inclusion** un fragment de roche, un minéral **contenu** dans une structure dite **encaissante**.
- **Tout objet inclus dans un autre est antérieur à l'objet l'enveloppant.**
- **Cela ne s'applique pas aux intrusions magmatiques qui recoupent les roches encaissantes.**



Église de San Juan de Parícutin (XVIII^e siècle), Mexique.

L'édifice est englobé dans la coulée de lave du volcan Parícutin, émise lors de l'éruption de février 1943.



Un granite à gros cristaux inclus dans un granite à cristaux fins, dans la région de l'île Grande.

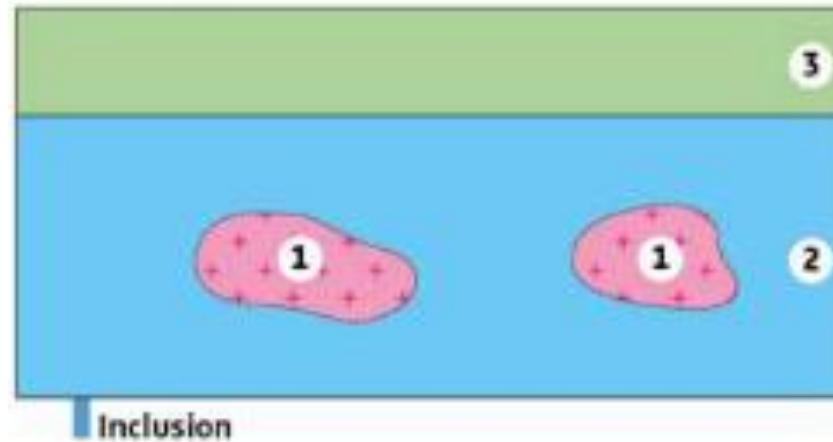


Cette roche sédimentaire est un **conglomérat de rivière**, roche sédimentaire détritique, c'est-à-dire constituée de fragments de roches arrondis (galets), issus de l'érosion d'une roche pré-existante, liés entre eux par une matrice. Les galets sont des inclusions. Ils existaient avant la formation du conglomérat.

PRINCIPE D'INCLUSION: DAVANTAGE POUR LES ROCHES MAGMATIQUES



- Inclusion de nodule de péridotite dans un basalte
- Inclusion de minéraux (zircon) dans une biotite (mica noir). Le **zircon est pratiquement inaltérable** => certains zircons aussi vieux que la Terre (qui a **4,567 Ga**). Le Zr peut contenir de traces d'Uranium, élément radioactif, qui en se désintégrant altère la biotite encaissante (cf auréole brune ou noire). Le **Zr est antérieur à la formation de la biotite par ppe d'inclusion**



Inclusion d'enclaves de péridotites dans du basalte

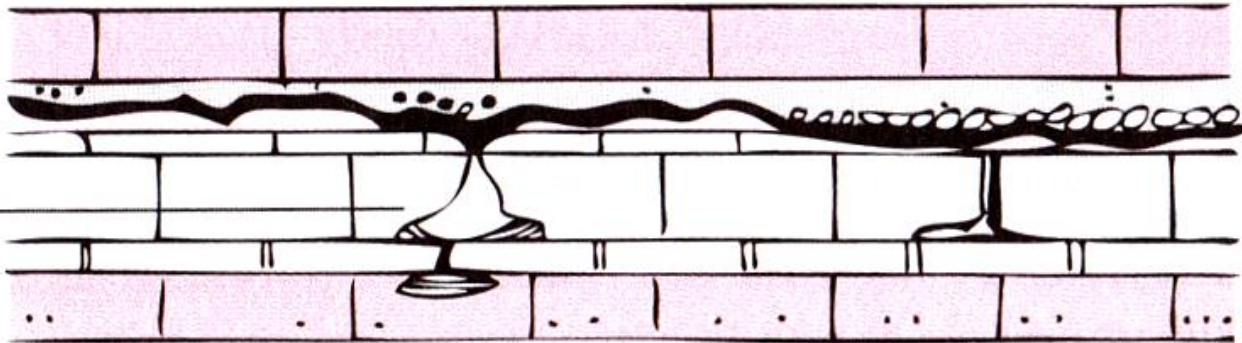


Cristal de biotite contenant des cristaux de zircon (MO en LPNA)

Datation relative et discordances.

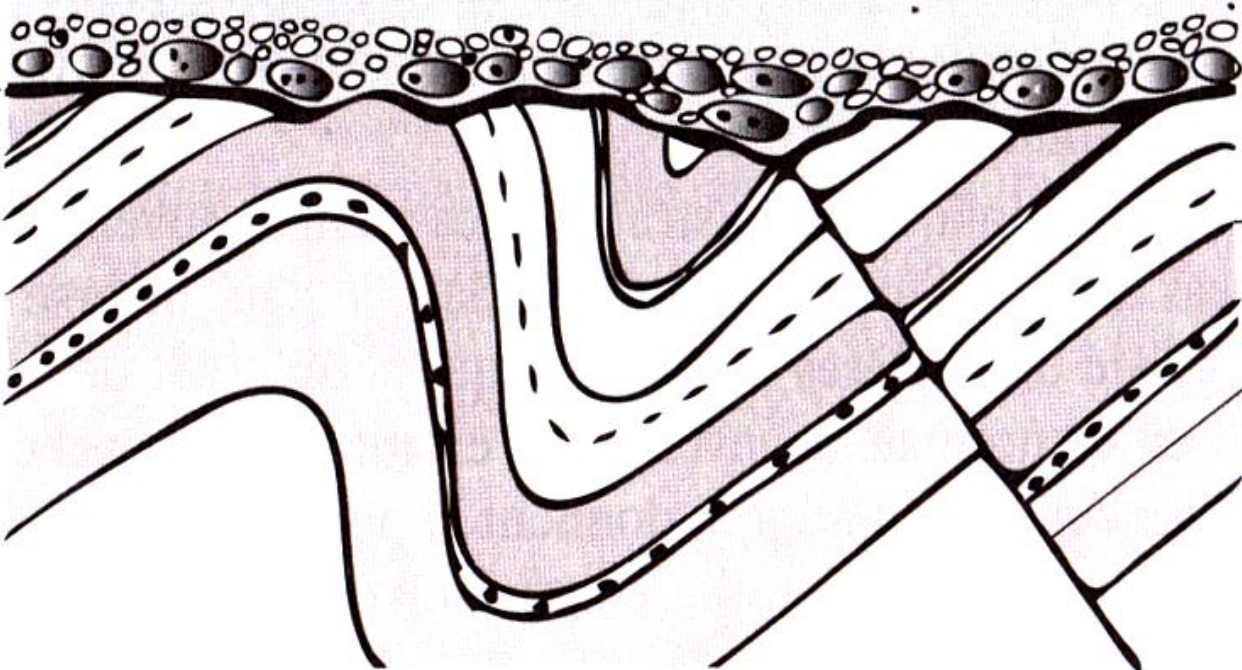


lacune stratigraphique
(concordance des strates)
karstification liée
à l'érosion 2



surface d'érosion 2
lacune de
sédimentation

discordance angulaire
(lacune de sédimentation
discordance des strates)



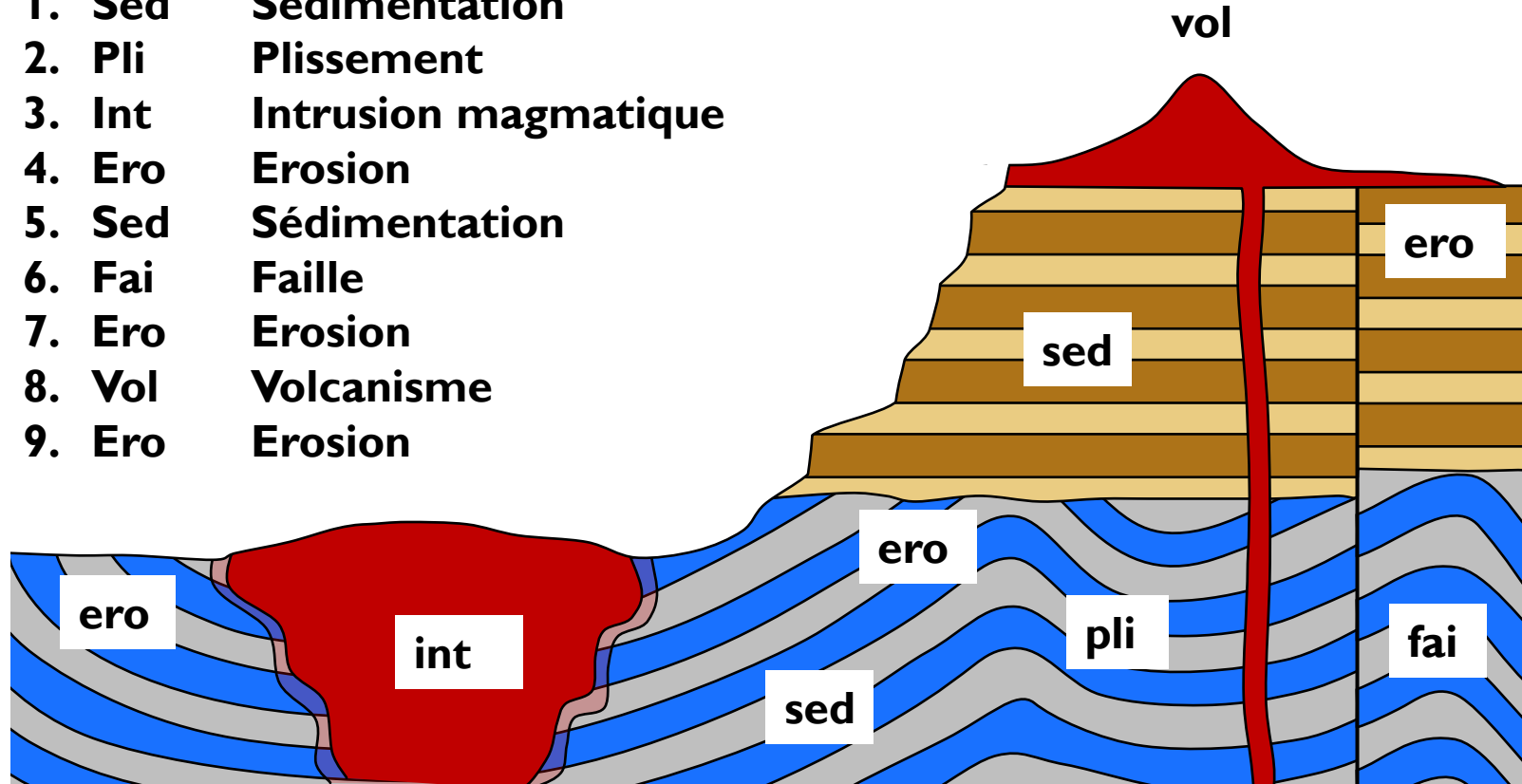
surface d'érosion 1
série plissée
faille normale
postérieure
au plissement

EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



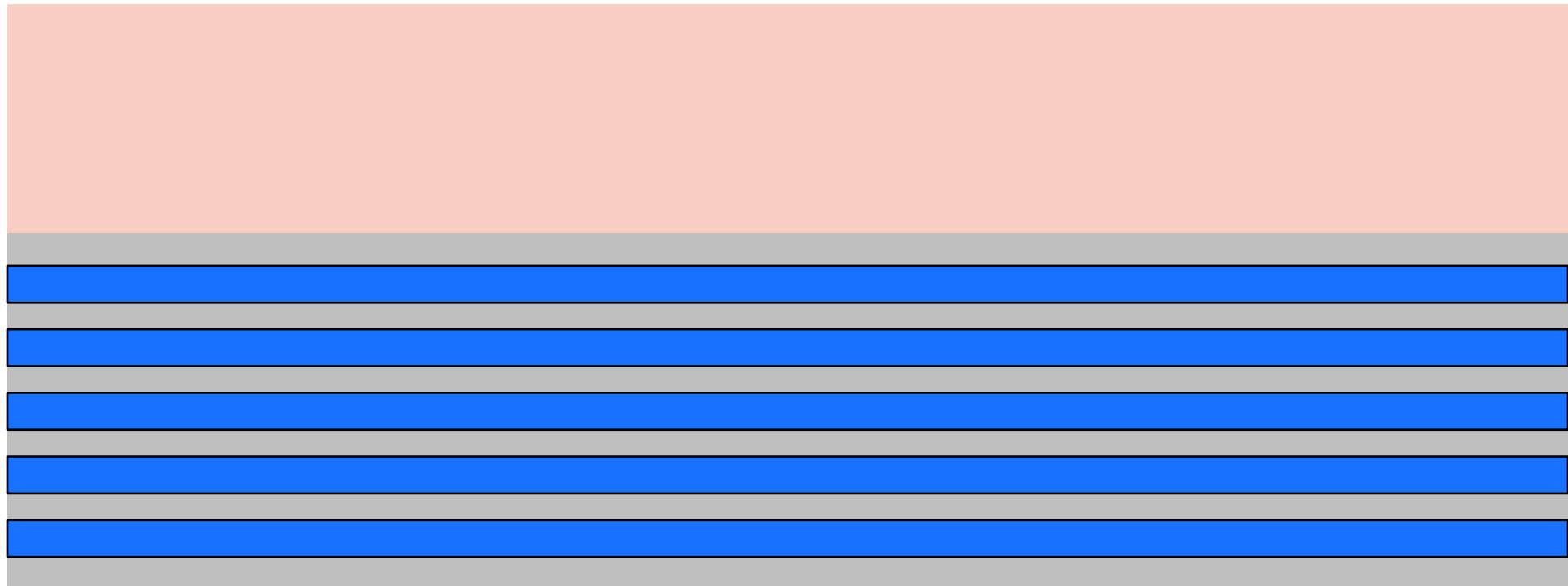
Nommez précisément ces événements et ordonnez-les.

1. Sed Sédimentation
2. Pli Plissement
3. Int Intrusion magmatique
4. Ero Erosion
5. Sed Sédimentation
6. Fai Faille
7. Ero Erosion
8. Vol Volcanisme
9. Ero Erosion



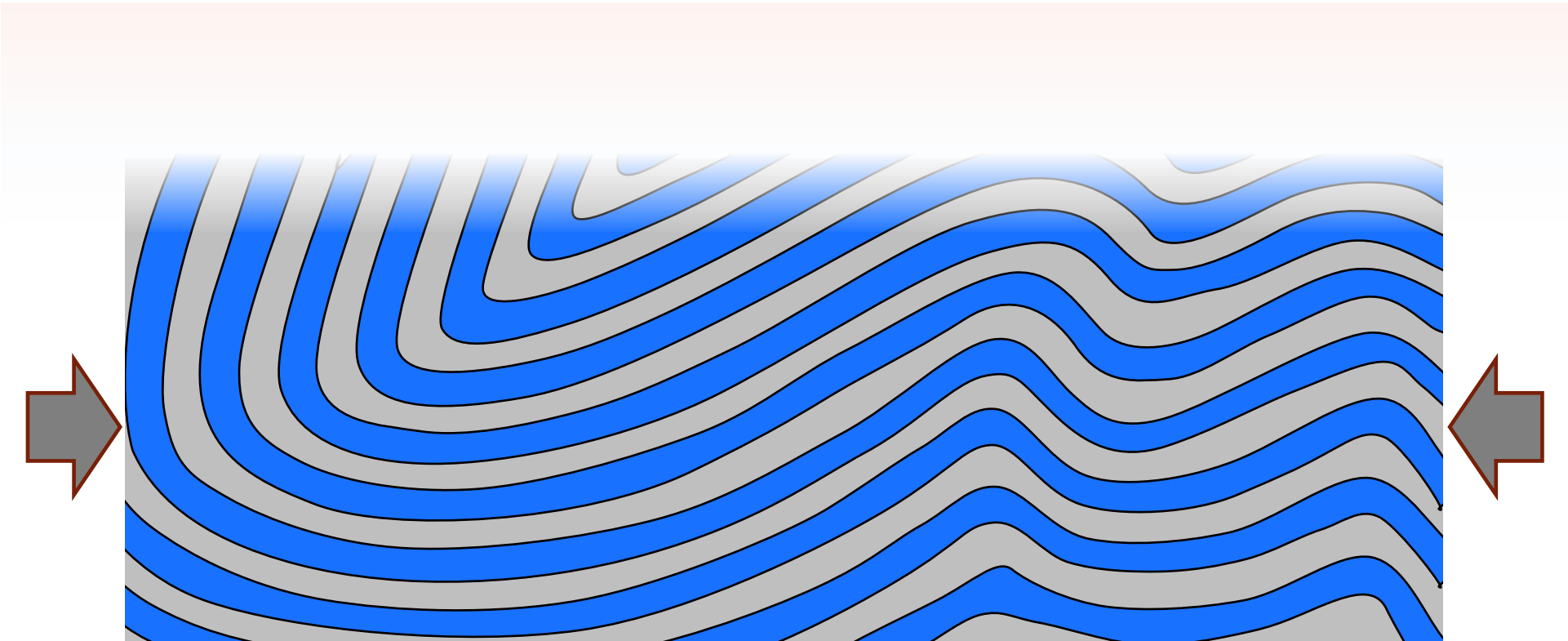


I. Dépôt des couches bleues et grises en milieu marin, enfouissement progressif





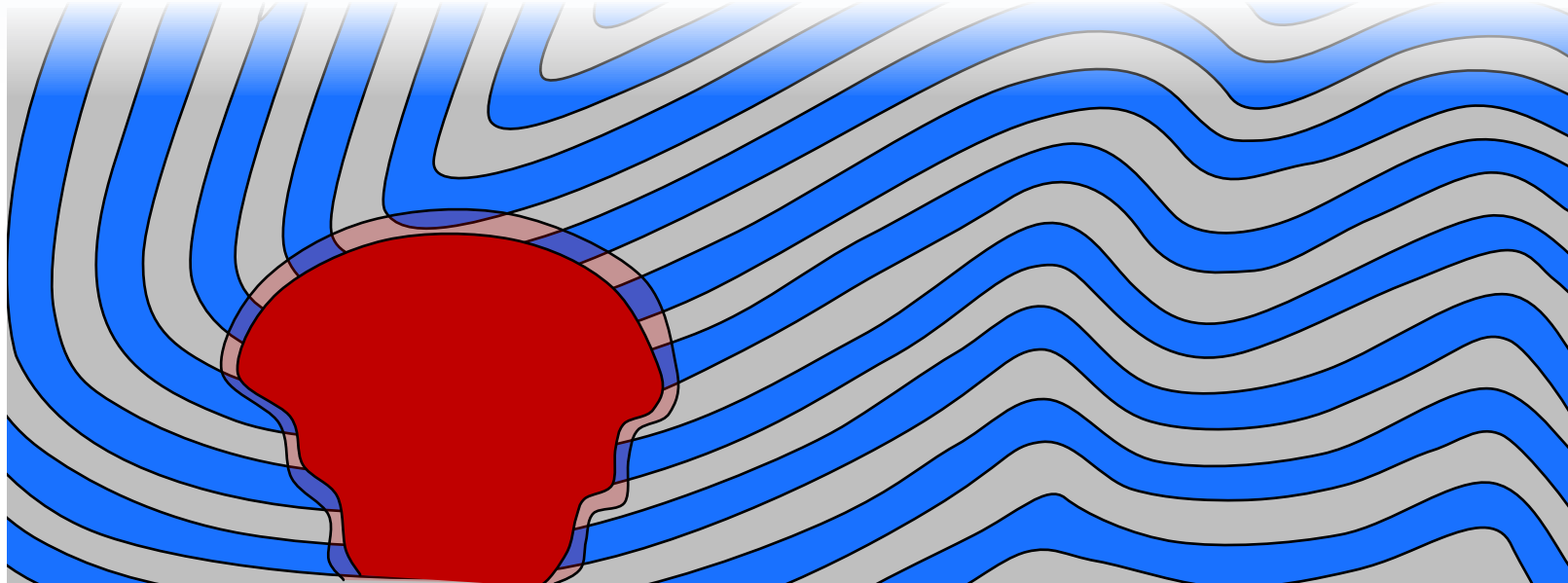
2. En profondeur, plissement des couches lors d'une orogénèse



EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



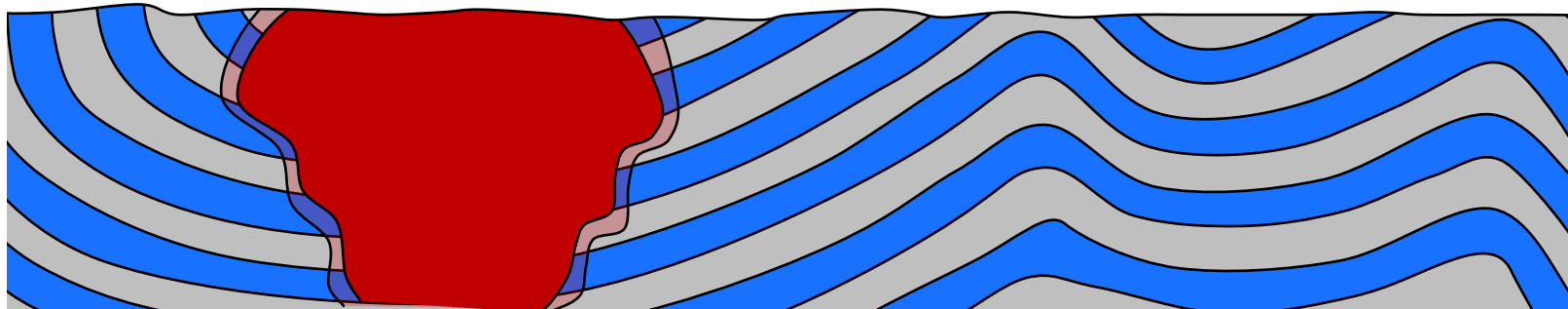
3. En profondeur, intrusion d'un magma granitique formant un pluton (avec auréole de métamorphisme de contact)



EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



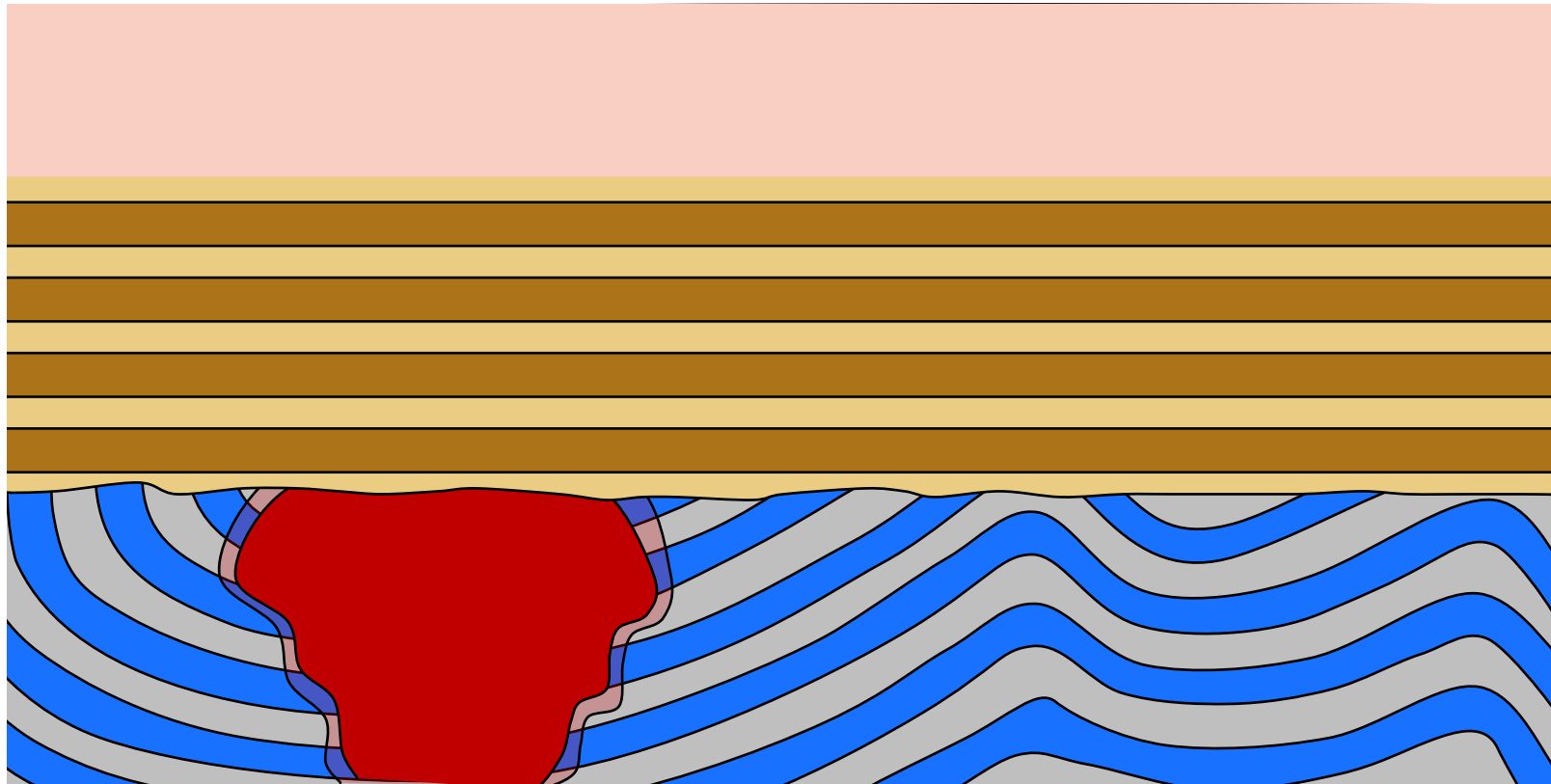
4. Erosion et mise à l'affleurement des terrains plissés et du pluton par réajustement isostatique



EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



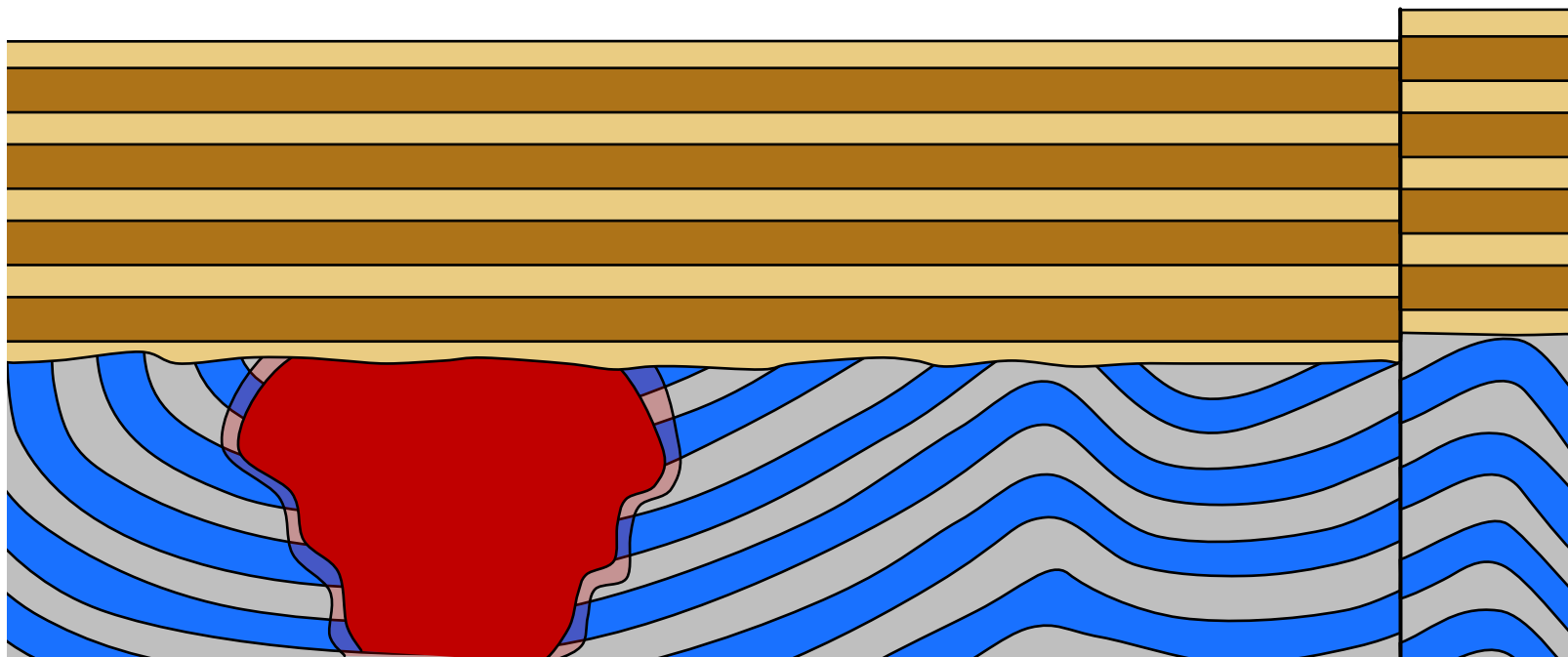
5. Retour de la mer et reprise de la sédimentation : formation d'une discordance angulaire avec les couches bleues et grises.



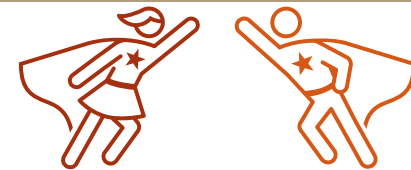
EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



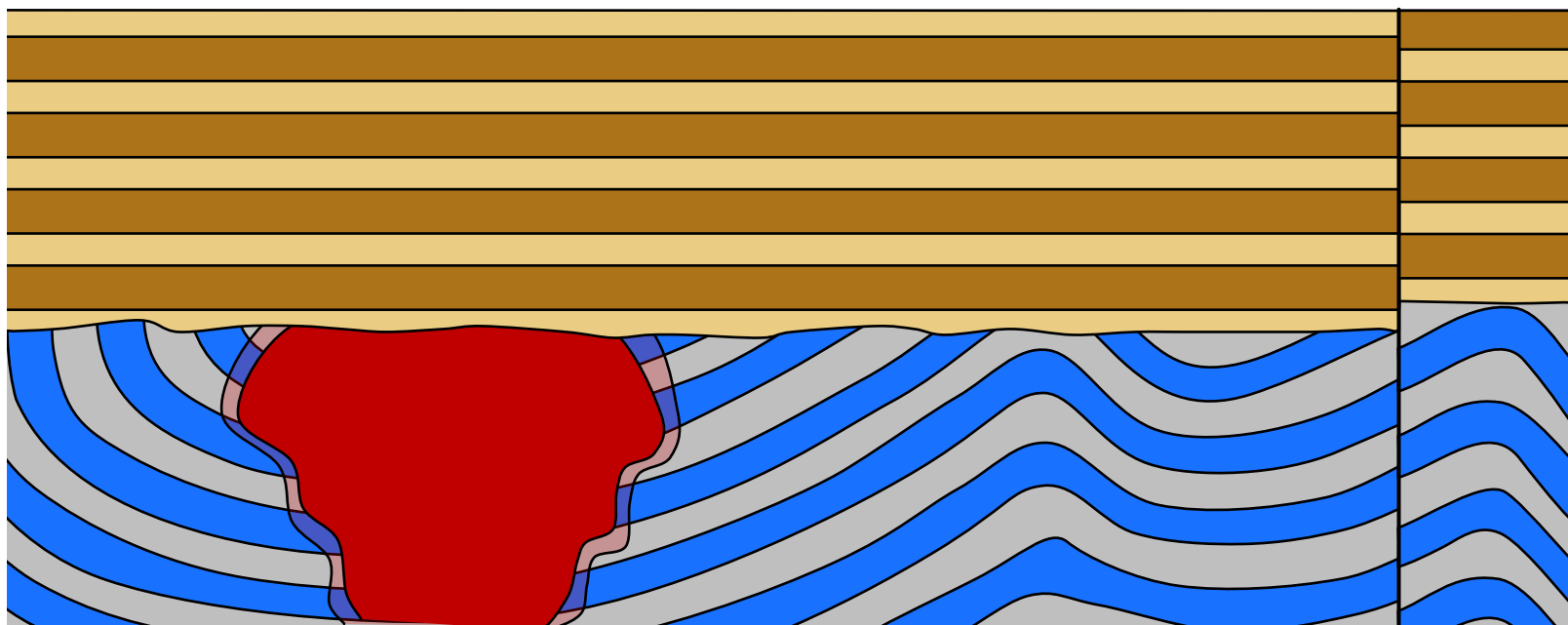
6. Retrait de la mer ; formation ou rejeu d'une faille, décalant les anciens terrains et les nouveaux ; formation d'un escarpement de faille en surface.



EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



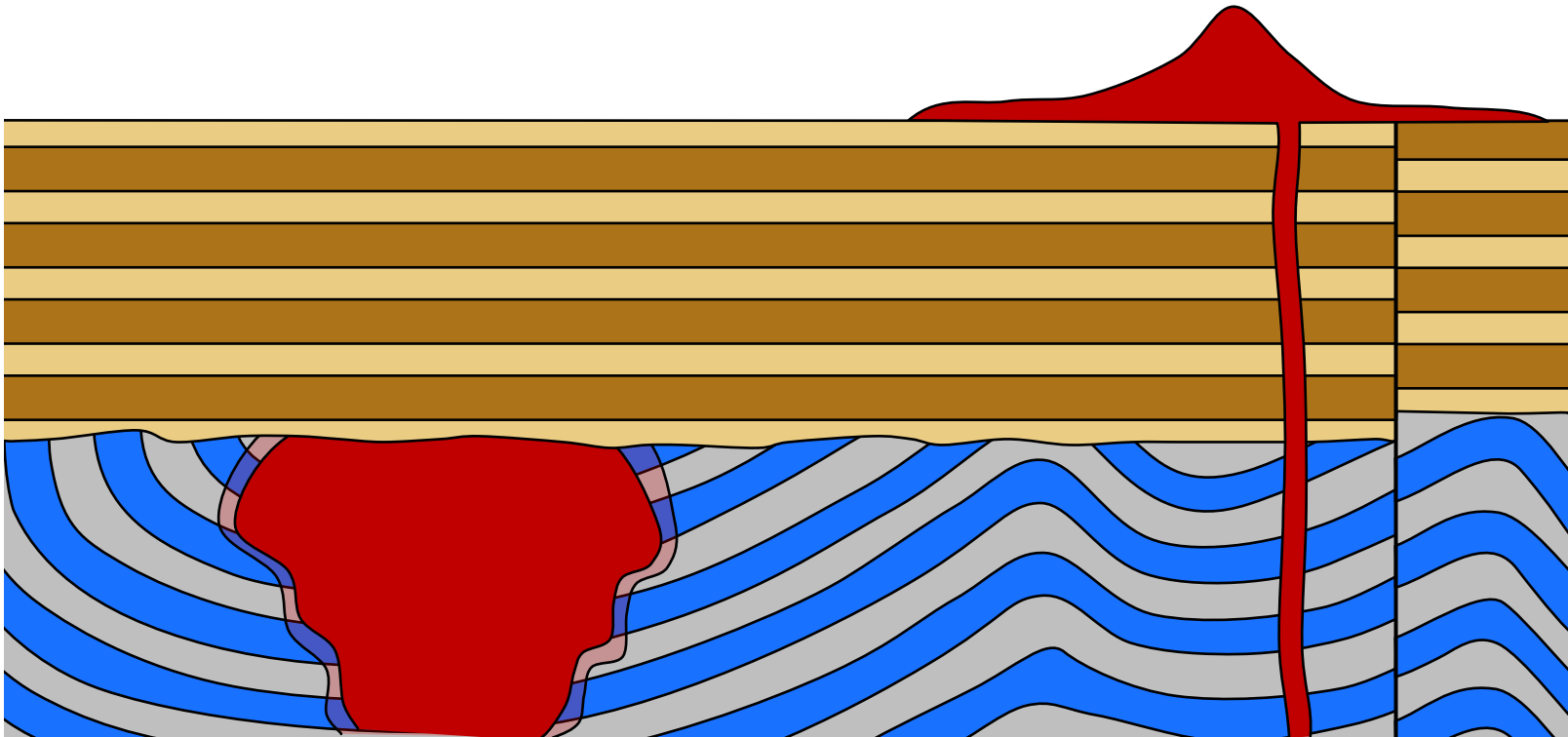
7. Erosion aplanissant l'escarpement de faille



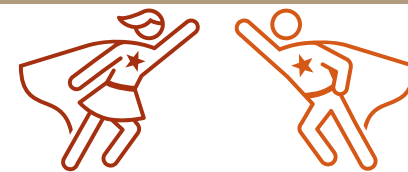
EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



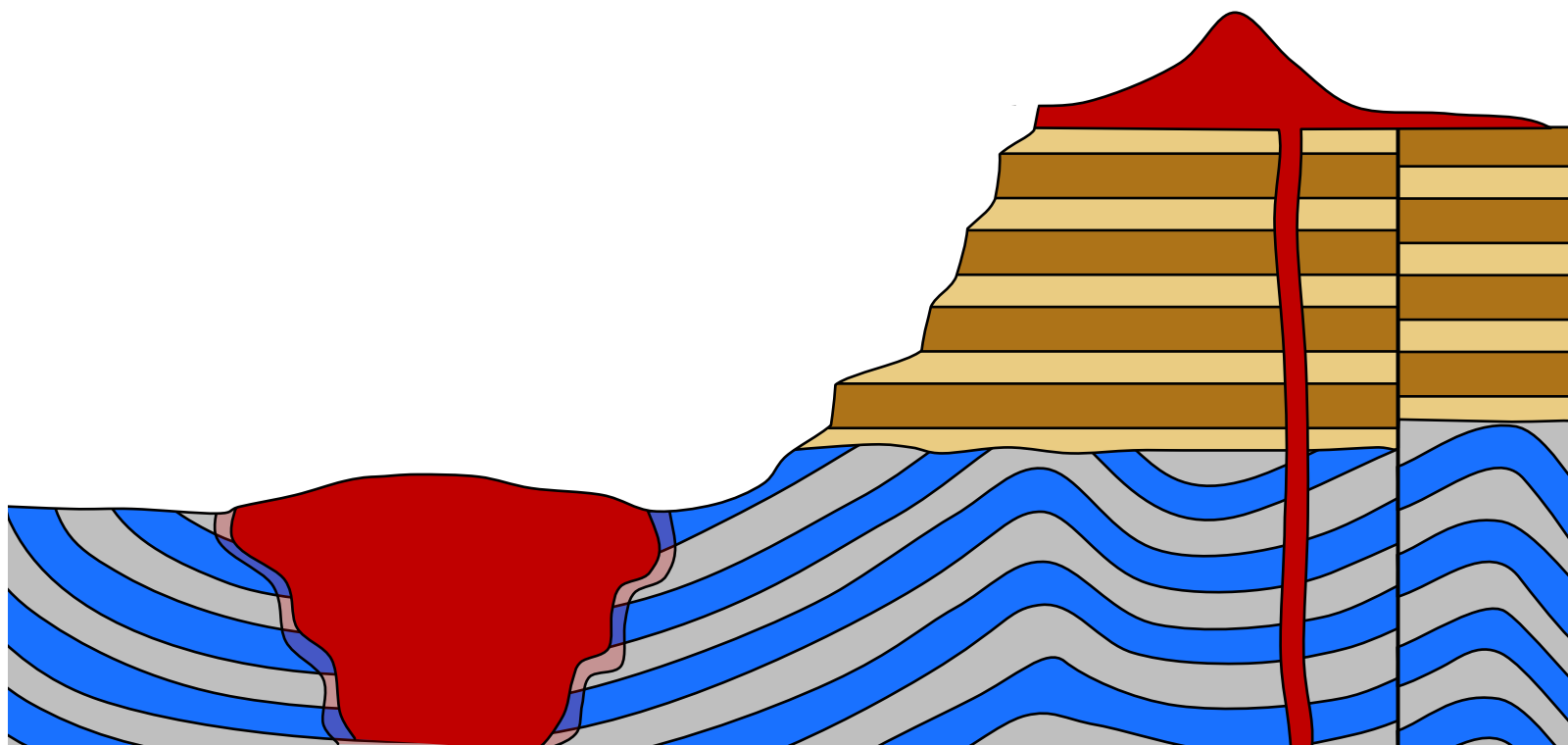
8. Formation d'un volcan avec coulées ; cachetage de la faille par une coulée

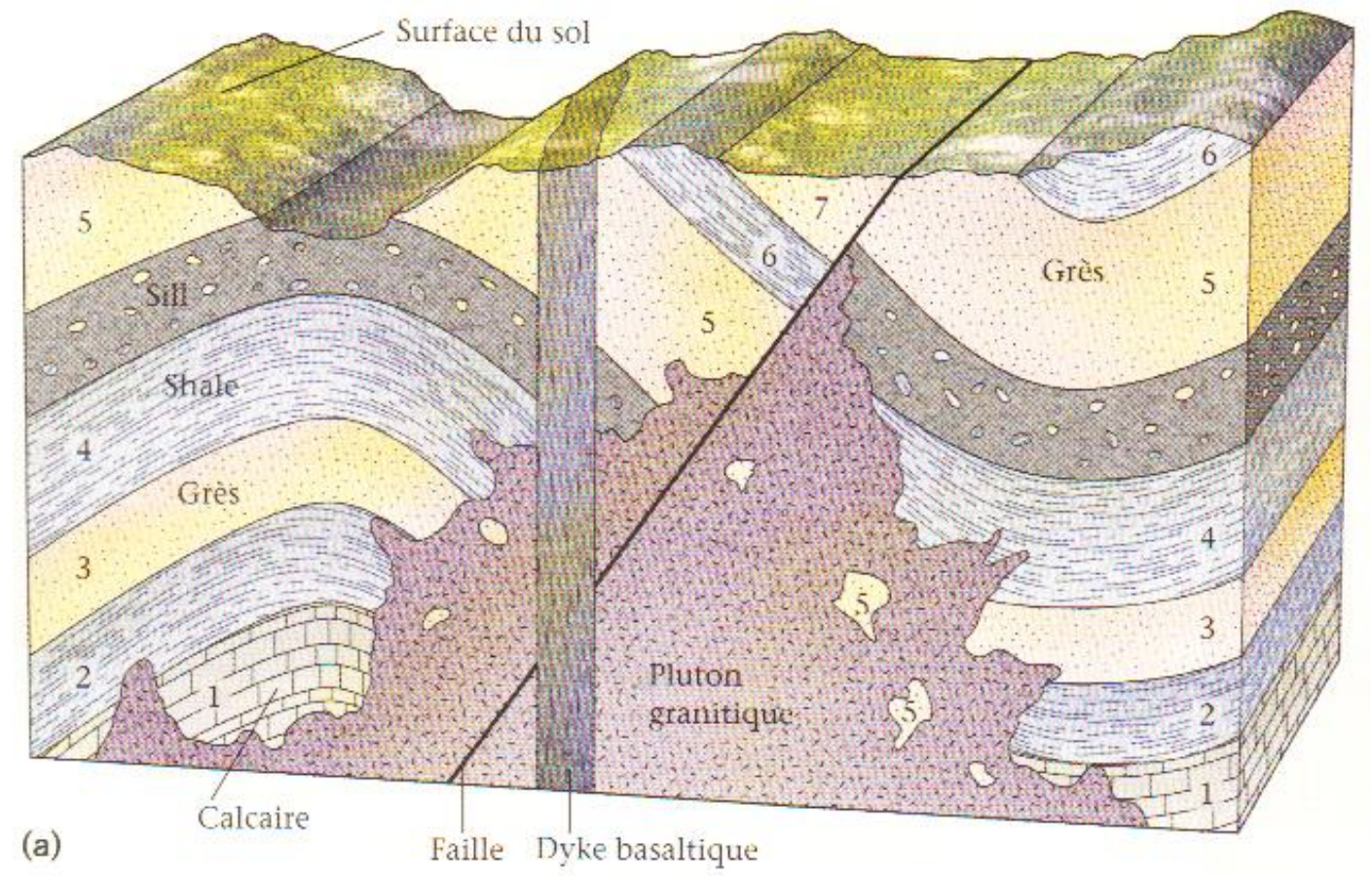
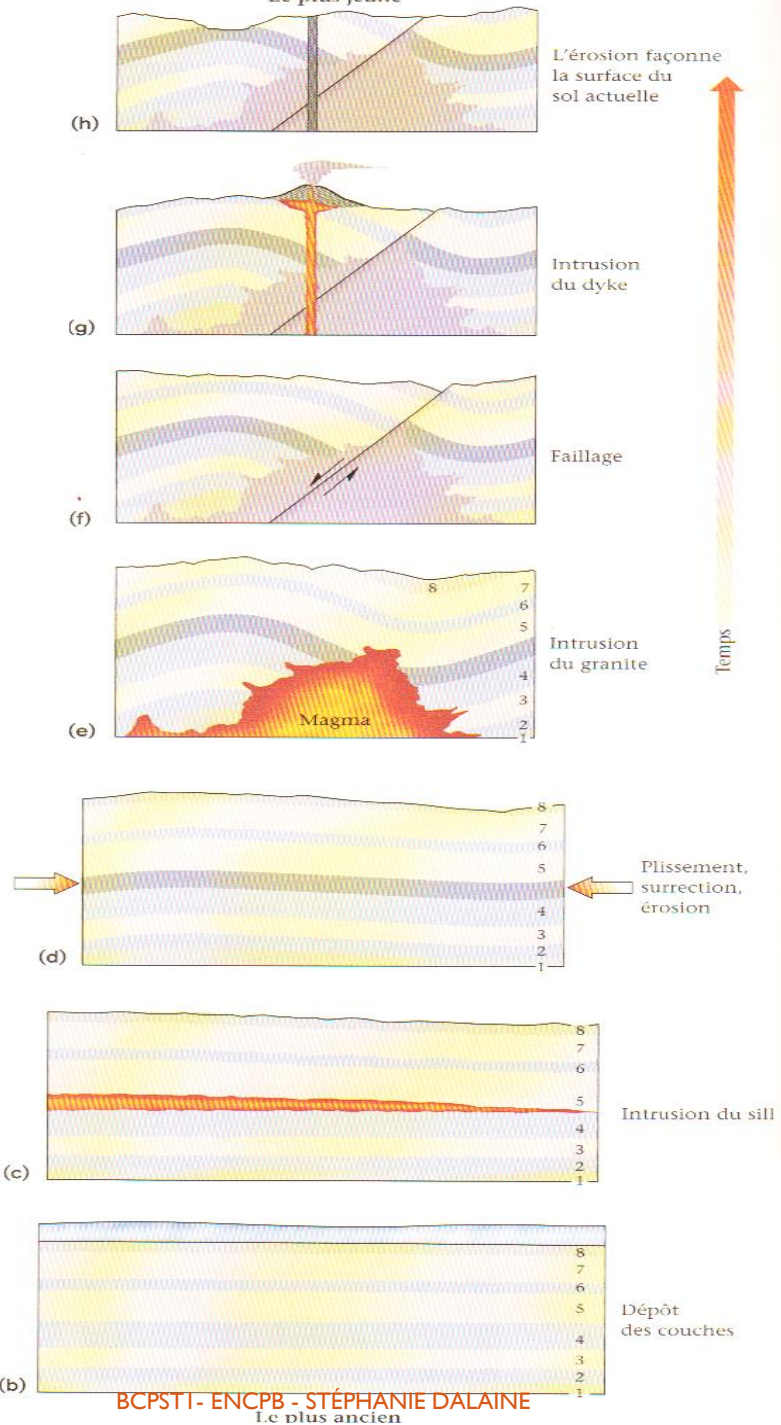


EXERCICE DE CHRONOLOGIE RELATIVE



9. Reprise de l'érosion : incision d'une vallée dans les nouveaux terrains et les anciens.







La photographie ci-contre correspond à une « entaille » récente dans des roches sédimentaires pour faire passer une route.

Établissez la chronologie des événements qui ont laissé une trace dans cet affleurement.





L'échantillon montre de **petits cristaux cubiques jaunes de fluorine**. Ces cristaux sont recouverts et "**emballés**" par des **crystallisations blanches**, en forme de pétales, qui sont des cristallisations de barytine (BaSO_4), qui cristallise dans le système orthorhombique.

La chronologie de la cristallisation de ces deux espèces n'est pas évidente. Mais si on voit parfois des **cristaux de fluorine sous (ou inclus dans) la barytine**, on ne voit jamais de barytine sous (ou incluse dans) la fluorine.

Les règles de la chronologie relative étant universelles, on peut donc proposer que la cristallisation de la barytine a été postérieure à celle de la fluorine. Cet échantillon provient de la mine des Farges (19).

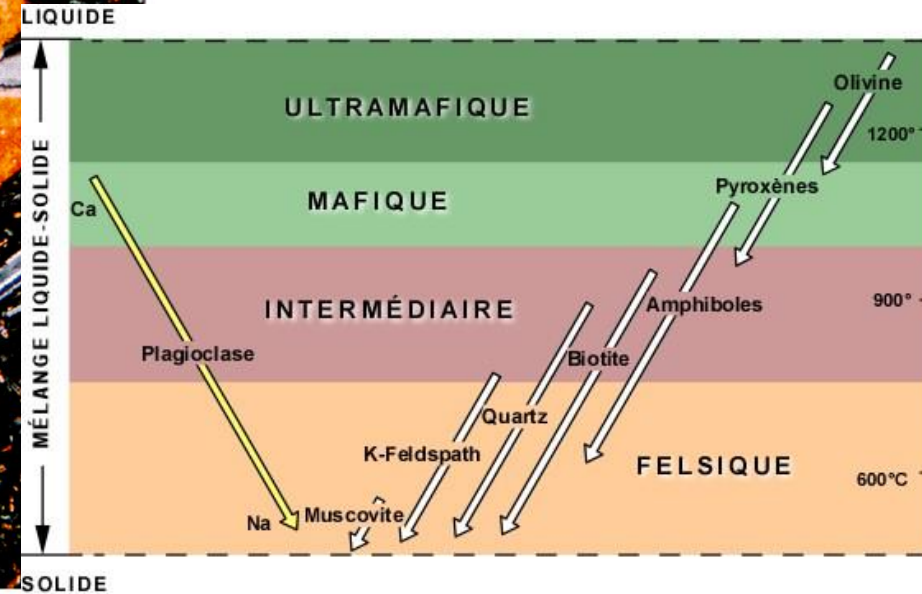
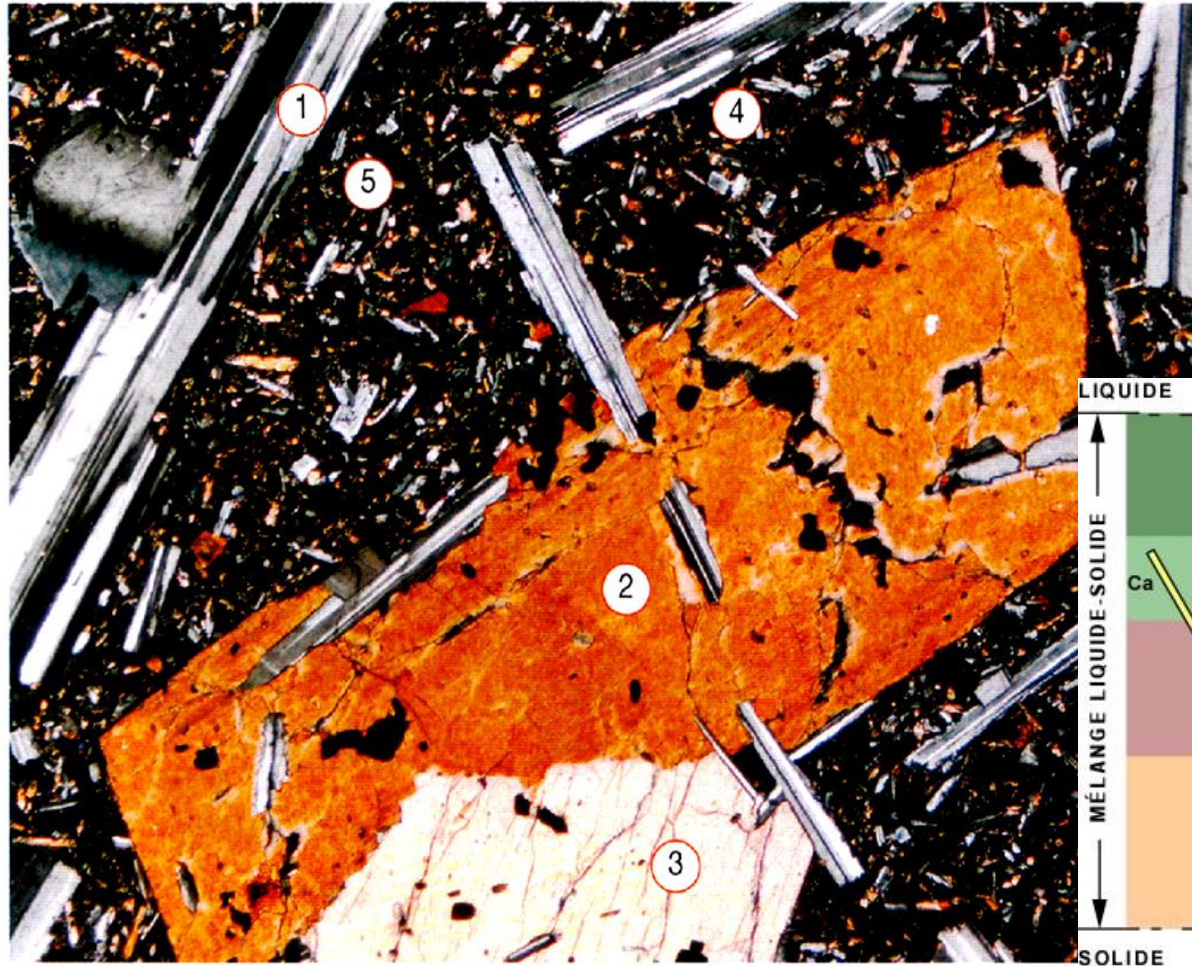
Les cristaux constituant une roche ne se forment pas tous en même temps. La chronologie précise de leur mise en place peut être reconstituée.

Par exemple, la lame mince ci-contre est une lame de basalte observée en lumière polarisée et analysée. On peut identifier les minéraux suivants :

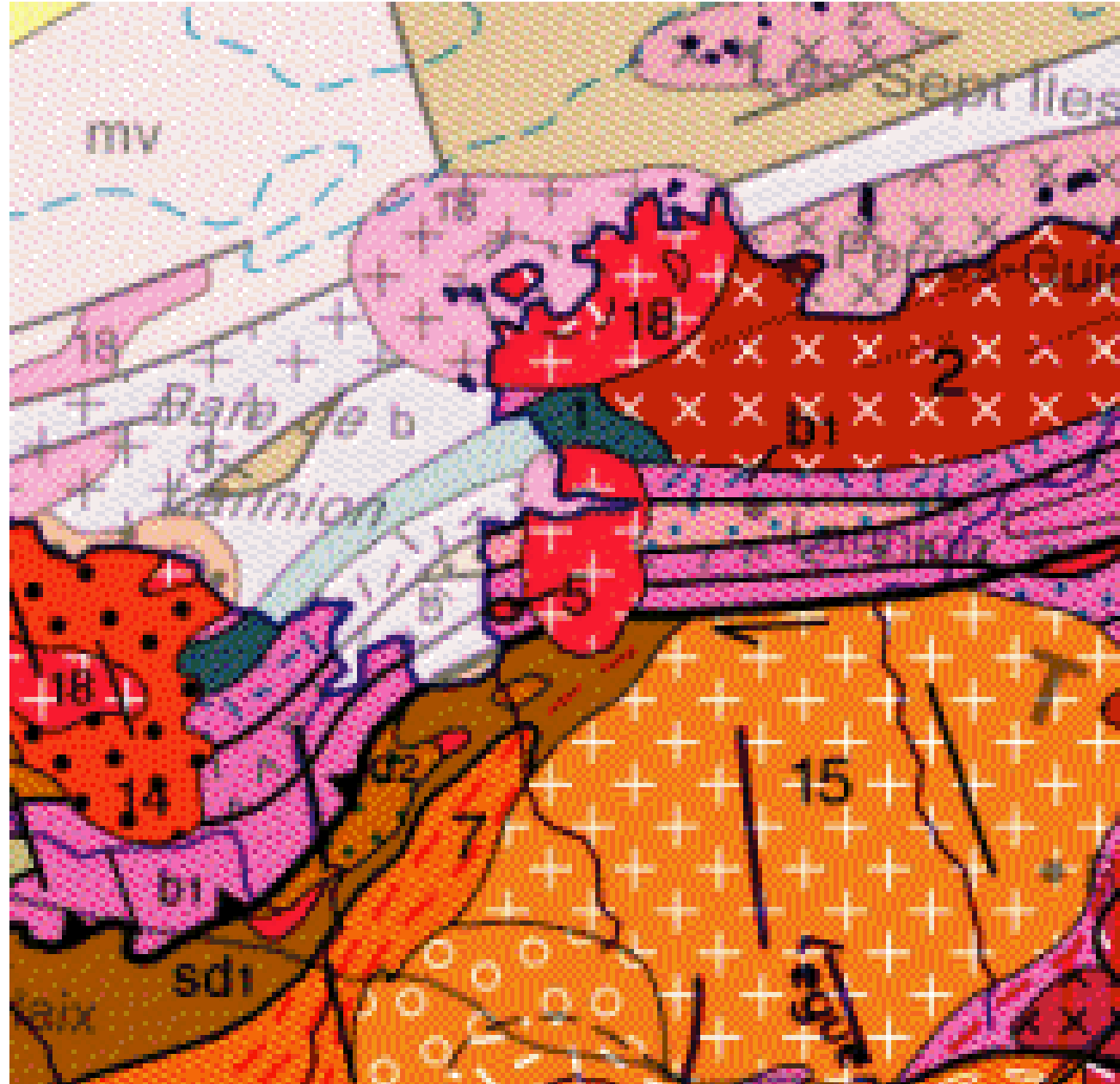
1. Plagioclase ;
2. Pyroxène 1 ;
3. Pyroxène 2 ;
4. Verre ;
5. Microlites.

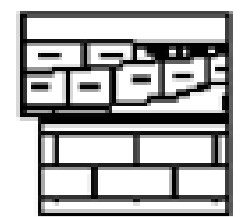
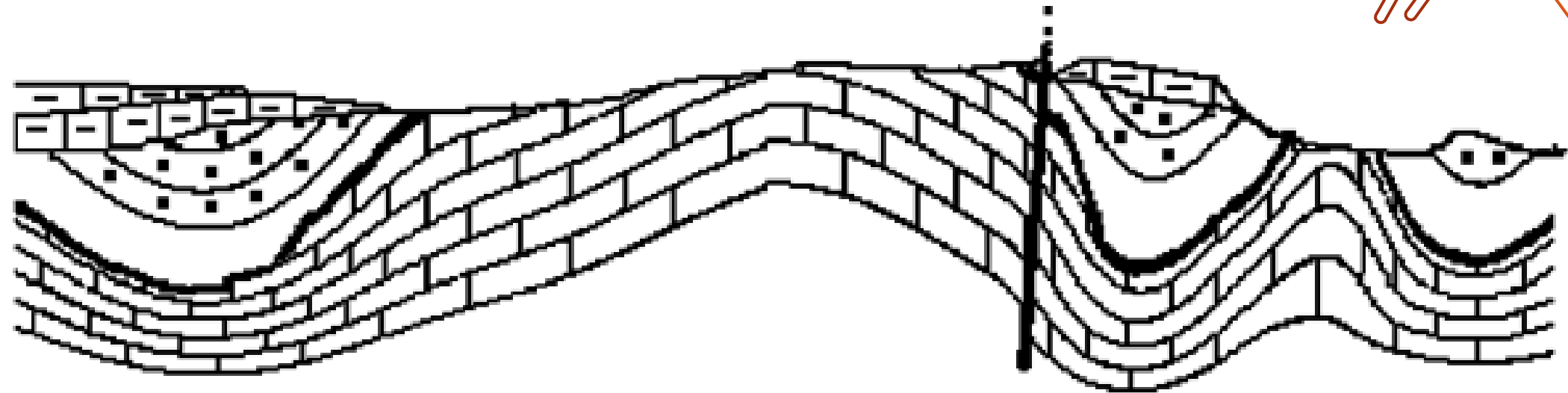
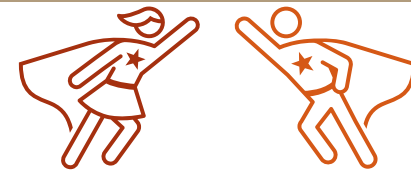
Une information : la formation des cristaux dans un magma

Dans un magma qui refroidit lentement, des cristaux de grande taille se forment avec des formes régulières (phéno-cristaux). Si, au contraire, ce magma se refroidit plus rapidement, il se forme des micro-cristaux (les microlites) aux formes plus irrégulières, noyés dans un verre non cristallisé.

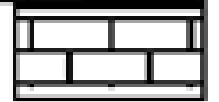


Connaissant les étapes de la mise en place d'une roche volcanique comme le basalte, proposez une chronologie de la mise en place des cristaux visibles.





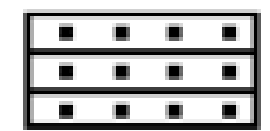
Calcaires et molasses



Calcaire à rudistes



Dépôts fluviolacustres



Calcaires et grès



Surface d'érosion

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES



4. Principe de continuité latérale

- D'après le principe de **continuité latérale** : une couche a le **même âge** sur toute son étendue.
- Ceci est évident lorsque les strates sont continues : qu'en est-il lorsque la strate est discontinue ?
- L'étude de la géométrie des couches sur la carte de l'Isle Adam a montré que la structure est **tabulaire** et que les hauts topographiques correspondent à des **buttes témoins**, issues d'une **érosion différentielle** (le sommet des buttes est protégé par une strate plus résistante formée de meulière).
 - ⇒ La coupe de l'Isle Adam traverse deux buttes témoins : les couches présentes de part et d'autre de la vallée peuvent être prolongées par l'imagination.
 - ⇒ **Ces strates étaient continues avant érosion.** Le principe de continuité latérale peut donc être élargi aux strates discontinues mais qui étaient continues avant érosion.

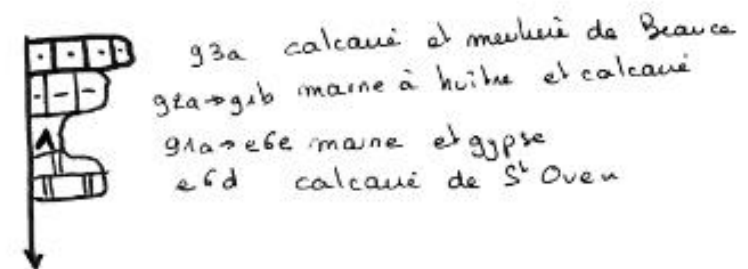
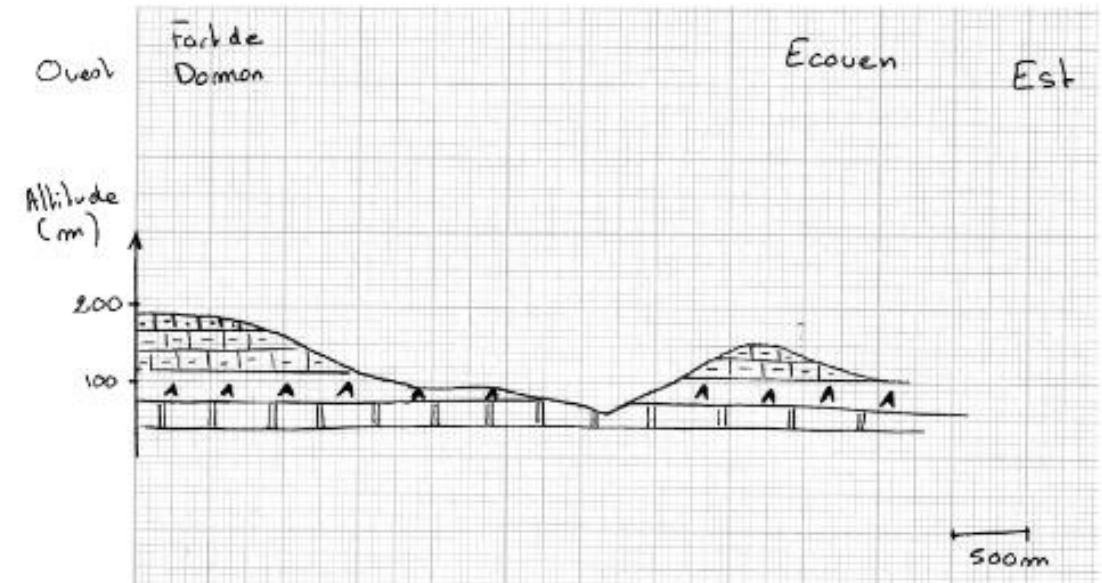


Figure 9 : illustration du principe de continuité latérale : coupe sur la carte de l'Isle Adam (1/50 000^e)

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

4. Principe de continuité latérale

4.2. Limite du concept : la notion de variation latérale de faciès.

Une même couche limitée par un mur et un toit de faciès bien définis est de même âge en tous points.

- Une couche sédimentaire ne présente pas nécessairement la même lithologie, le même faciès en tout point en raison de **variations de la paléogéographie**.
- Définition de **faciès sédimentaire** : le faciès d'une roche sédimentaire correspond à l'ensemble des caractéristiques **pétrologiques, structurales et paléontologiques** (faciès calcaire, marneux, urgonien...), directement liées aux conditions de sédimentation et de diagenèse.
- Ainsi une couche géologique change de faciès selon l'endroit où l'on échantillonne. Mais, si les formations sont encadrées par les mêmes strates à la base (mur) et au sommet (toit), alors elles se sont formées pendant le même intervalle de temps.
- Cette absence de continuité latérale de faciès est liée à une variation du milieu de sédimentation. On appelle ce phénomène **un passage latéral de faciès**.



Alexandre-Théodore Brongniart
1739-1813

Calcaire de Champigny (SE de Marne), vs gypse à Montmartre

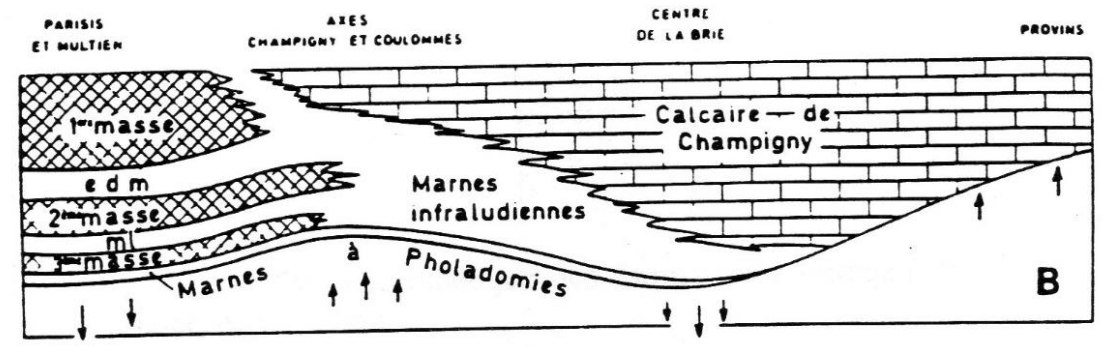
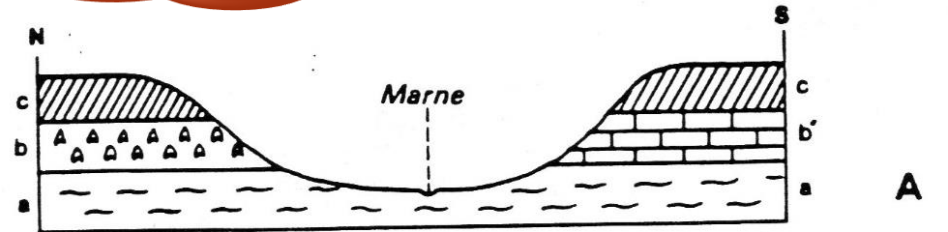
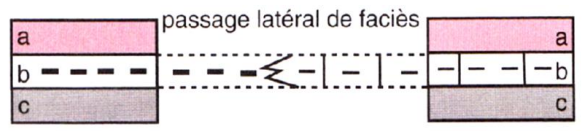
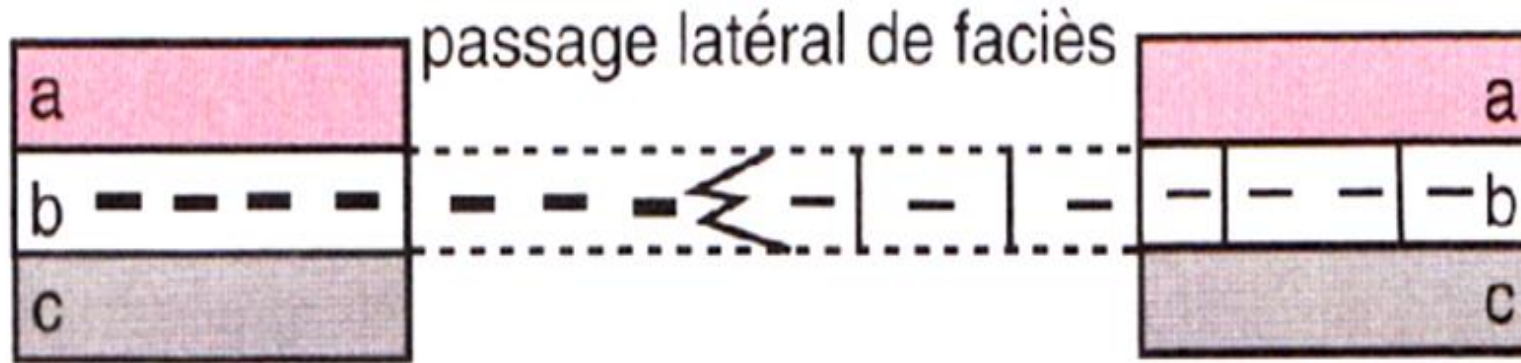


Figure 2. a. Corrélation par continuité. Le gypse au N de la Marne est du même âge que le Calcaire de Champigny au S. Le passage de l'un à l'autre a été effectivement observé par interpénétration du faciès, lors du creusement du tunnel de Chalifert près de Meaux. a : Marnes à *Pholadomya ludensis*; b : Gypse; b' : Calcaire de Champigny; c : Marnes bleues d'Argenteuil.

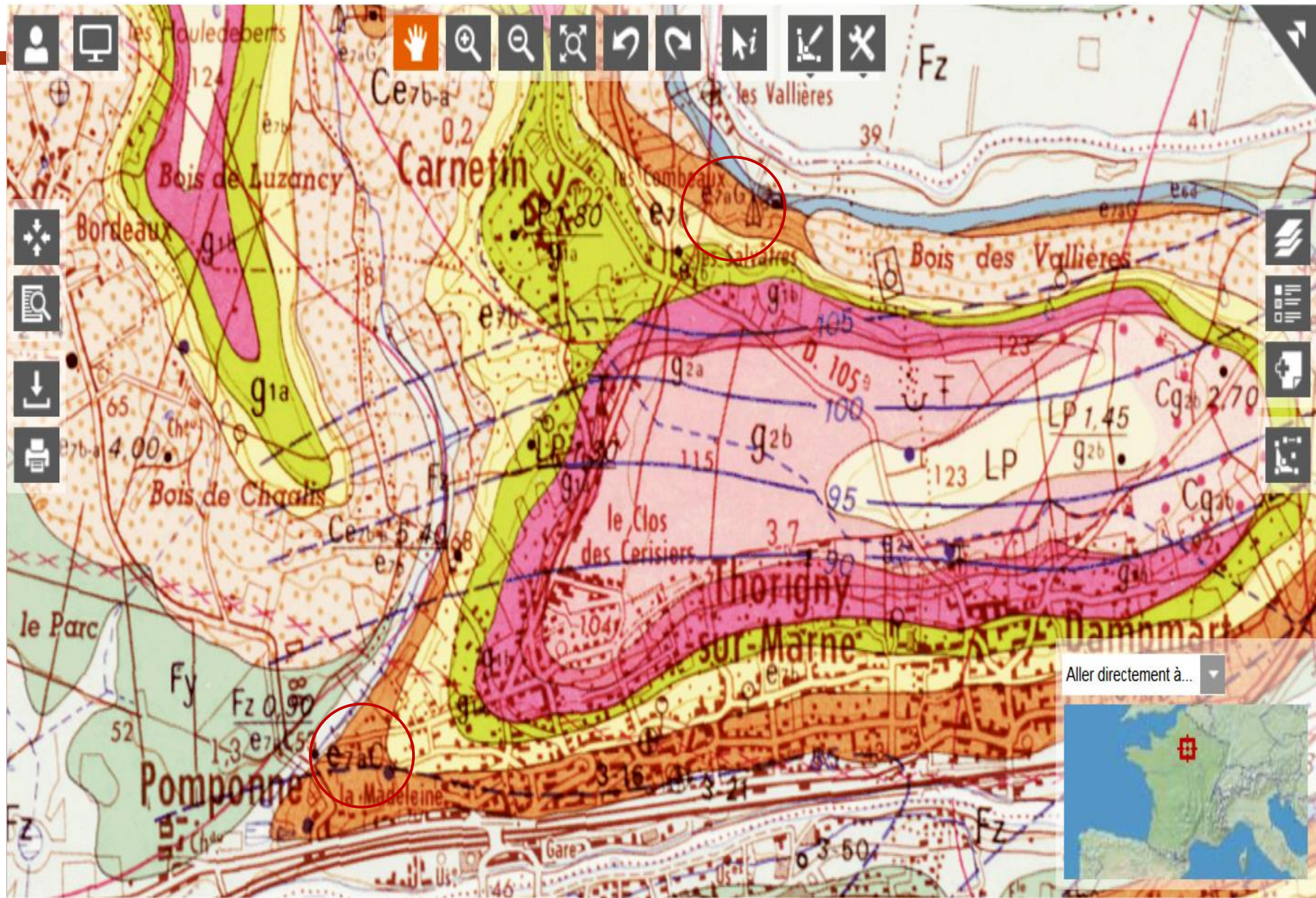
A : Schéma classique; B : Modalités du passage latéral par l'intermédiaire de faciès marneux, en liaison avec la tectonique. ml : Marnes à Lucines; edm : Marnes d'entre deux masses (C. Mégnién, « Le passage latéral du gypse au calcaire de Champigny dans le Nord de la Brie et son interprétation paléogéographique », *Bull. Inf. géol. Bassin de Paris*, n° 41, 1974).



Selon le principe de la continuité, si une couche a le même âge sur toute son étendue, alors la couche b, comprise entre a etc a le même âge, malgré le changement de faciès ou les déformations qu'elle subit.



Selon le principe de la continuité, si une couche a le même âge sur toute son étendue, alors la couche b, comprise entre a etc a le même âge, malgré le changement de faciès ou les déformations qu'elle subit.



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

A. ETUDES DES RELATIONS GEOMETRIQUES : POSITIONNER DES EVENEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

Les principes de la stratigraphie sont résumés dans le tableau suivant.

Principe de continuité	Une couche a le même âge sur toute son étendue.
Principe de la superposition	Les couches les plus basses sont les plus anciennes : si une couche a est sous une couche b, alors a est plus ancienne que b.
Principe de l'horizontalité	Les couches se déposent horizontalement.
Principe du recoupement	Lorsqu'une couche est recoupée par une faille ou un filon, alors cette couche est plus ancienne que la faille ou le filon.
Principe de l'inclusion	Un objet inclus dans une couche est antérieur à cette couche.

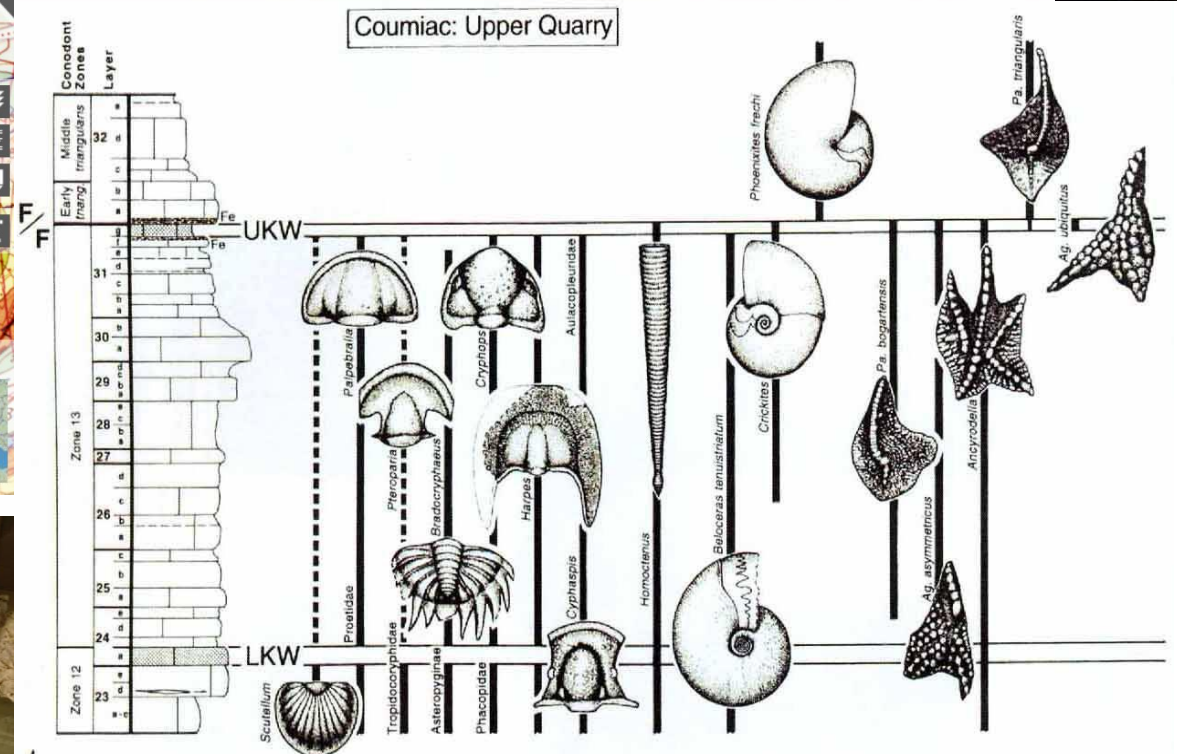
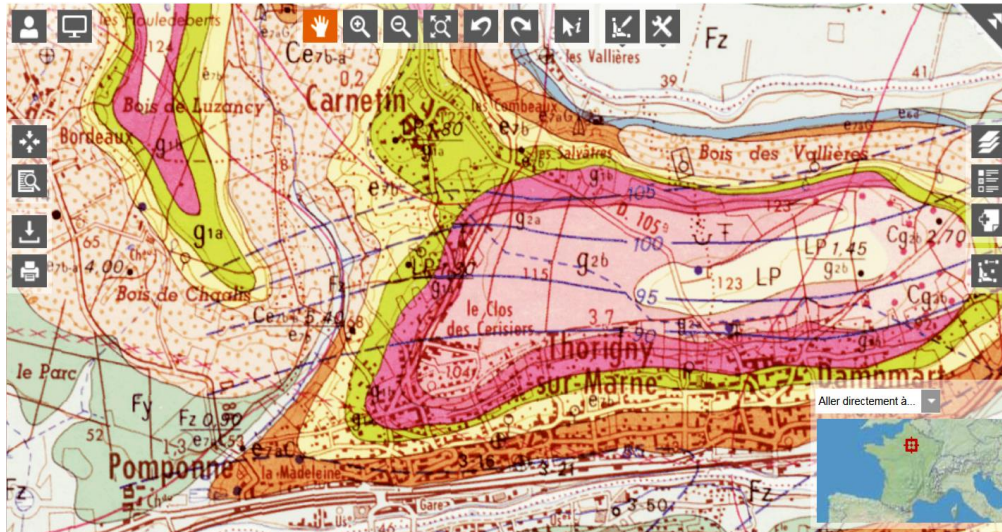
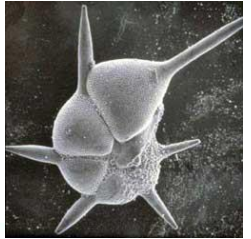
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chronologie-relative.xml>



Chronologie relative à l'échelle **locale**

Du régional au mondial, il n'y a qu'un pas et nous l'avons déjà franchi...

L'analyse biostratigraphique des corps sédimentaires



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

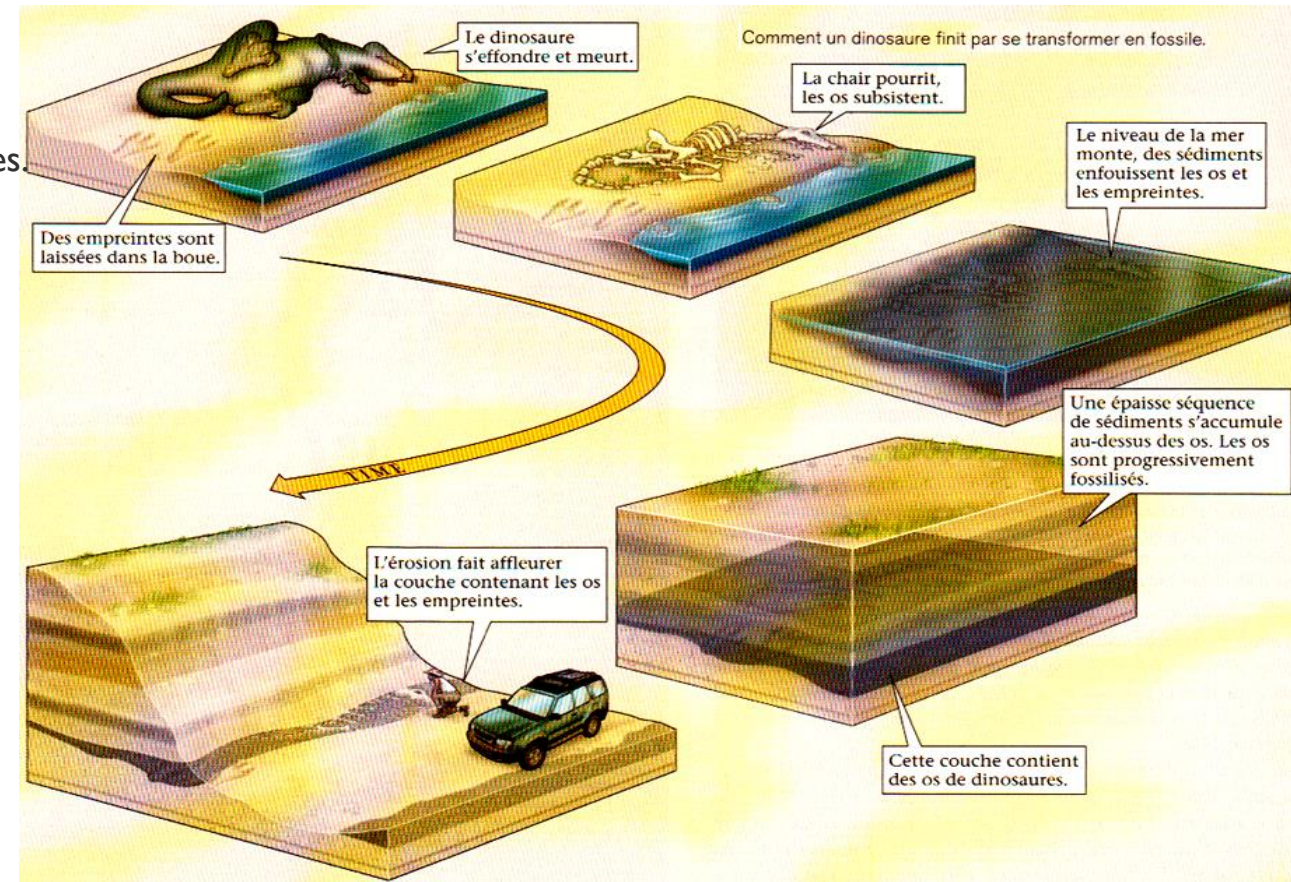
- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFÈRE

I. La notion de fossiles

- Les fossiles sont des **restes** ou des **empreintes** d'êtres vivants.
- Mort des êtres vivants → enfouissement sur place (parfois après un transport) **dans les couches sédimentaires** en formation → fossiles.
- **paléontologie** = étude des fossiles (classification, paléoécologie, paléogéographie, climatologie, évolution, datations...)
- Dans strates si variation de composition en fossiles d'une couche à l'autre → **évolution biologique**.
- **durée de vie de l'espèce** = intervalle de temps entre l'apparition d'une espèce et sa disparition
 - ⇒ **fossiles dits stratigraphiques** dont la durée de vie est bien délimitée.
 - ⇒ Datation **des couches géologiques**
 - ⇒ **échelle chronostratigraphique**. (Échelle des temps géologiques)



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

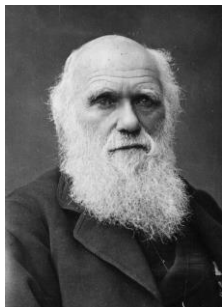
- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFÈRE

2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique

- Bases de la biostratigraphie: **évolution biologique** (Darwin, 19^e s).
- Buffon (18^e s): utilisation de fossiles pour dater des couches géologiques
 - **contenu fossilifère des strates successives était d'autant plus différent que les strates étaient espacées.**
- William Smith (première carte géologique en 1793),
- Cuvier, Alcide d'Orbigny: lien entre stratigraphie et paléontologie (Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphiques, 1849).
- Actuellement, les fossiles toujours très largement utilisés pour dater de façon fiable et peu chère des couches géologiques
 - **principe d'évolution des espèces** = Au cours du temps, des mutations spontanées apparaissent au sein des populations : certaines d'entre elles sont à l'origine de modifications du phénotype des individus. Elles pourront être sélectionnées par l'environnement dans le cas où elles confèrent un avantage sélectif à l'individu.
 - ⇒ Apparition de nouveaux caractères → utiles pour identifier, classer les fossiles préservés dans les roches.



Charles Darwin (1809 -1882), naturaliste anglais, à l'origine de la théorie de l'évolution biologique



Comte de Buffon (1707-1788) : Analogie entre refroidissement de la Terre et celui d'une sphère métallique → 75 000 ans



Georges Cuvier (1769 -1832) anatomiste français, promoteur de l'anatomie comparée et de la paléontologie au XIX^e siècle. Vision fixiste de l'évolution des espèces

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère**
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFERE

3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique

3.1. Énoncé du principe d'identité paléontologique

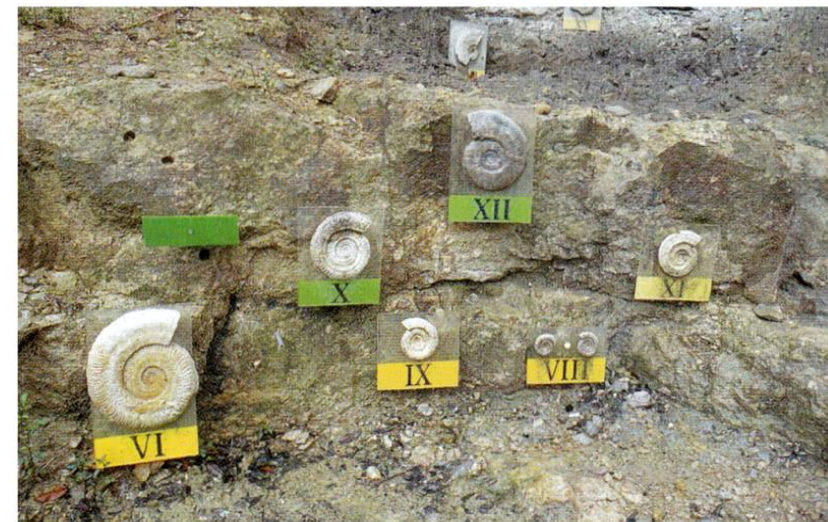
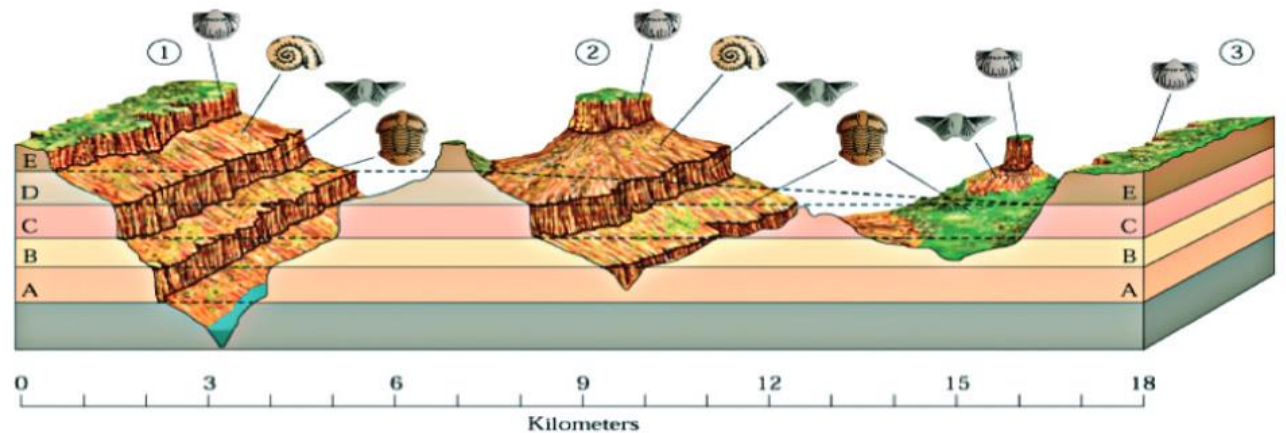
■ Principe d'identité paléontologique:

Deux couches ayant les mêmes fossiles sont considérées comme ayant le même âge

- Dans les roches sédimentaires, le **contenu paléontologique** des couches permet d'établir **des corrélations entre des régions ayant une sédimentation différente**. Buffon (18^e s): utilisation de fossiles pour dater des couches géologiques

■ Remarques :

- l'inverse est faux puisque **deux couches géologiques ayant le même âge n'ont pas nécessairement le même contenu** paléontologique si leur paléogéographie est trop différente.
- ce principe ne peut pas s'appliquer dans le cas où les couches sont remaniées.
- il n'est pas toujours aisé de déterminer si deux fossiles appartiennent à la même espèce : les variations phénotypiques intraspécifiques sont parfois plus importantes que les variations interspécifiques. C'est le cas par exemple des espèces ayant un fort **dimorphisme sexuel**.



I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

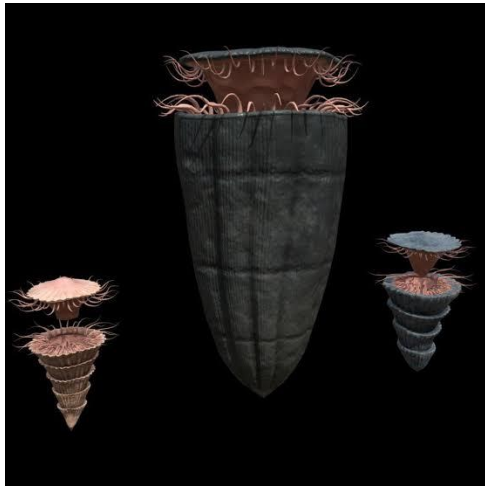
B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFÈRE

3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique

3.1. Énoncé du principe d'identité paléontologique



Principe **d'identité paléontologique**: deux strates de même contenu fossilifère ont le même âge

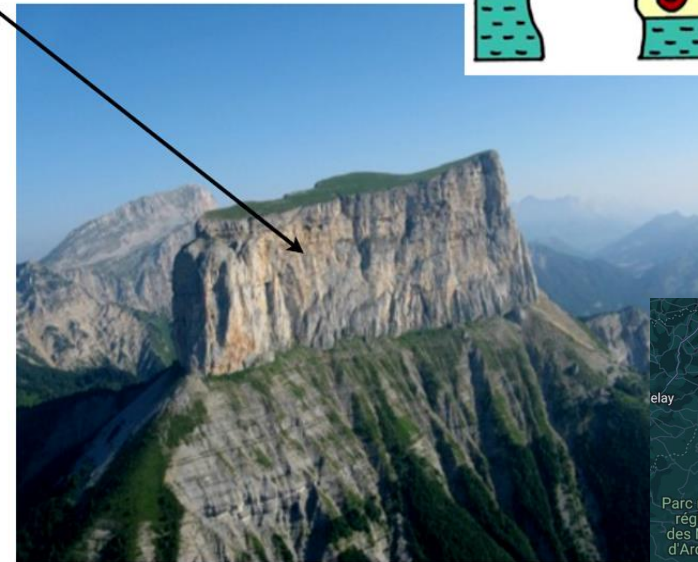
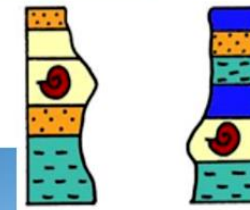


Rudiste (mollusque fixé éteint)



Calanques de Sugiton (vers Cassis)

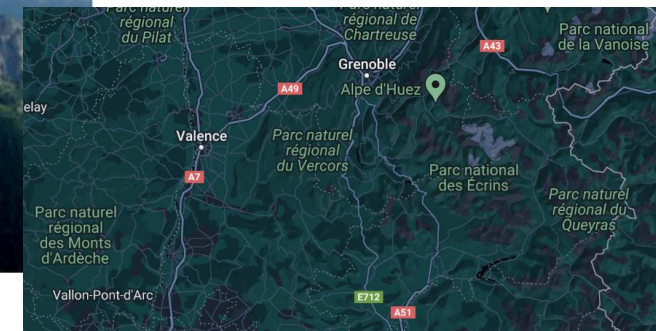
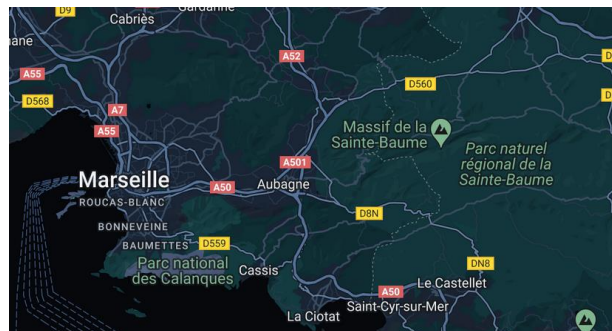
Calcaire urgonien (-130 à -112 MA)
riche en rudistes et orbitolines



Mont Aiguille (Vercors, Isère)



Orbitoline (foraminifère éteint)



I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFERE

3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique

3.2. Notion de fossiles stratigraphiques



- Découpage temporel des strates :
 - ⇒ Chaque strate a un **contenu fossilifère spécifique**
 - ⇒ fossiles utilisés ont une existence relativement courte à l'échelle des temps géologiques = **évolution rapide**
 - ✓ cas de la majorité des organismes unicellulaires (**Foraminifères, Coccolithes**)
- Découper le temps:
 - ⇒ pouvoir faire des **corrélations entre strates**
 - ✓ A. Brongniart (1822): corrélation entre deux strates de lithologie différente mais au même contenu fossilifère (dans couches du Crétacé en Savoie et en Normandie)

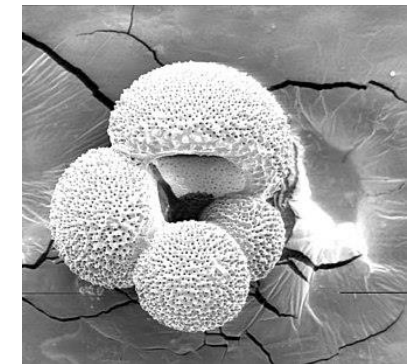


Emiliania
(coccolithophoracées)

1 µm

Coccolithophoridés : algues unicellulaires pélagiques. Ces algues protègent leur unique cellule sous une couche de plaques de calcite appelées coccolithe. La craie est constituée en majeure partie de coccolithophoridés

Craie ⇒ Crétacé



100 µm

Foraminifères: eucaryotes unicellulaires extrêmement abondants depuis plusieurs centaines de millions d'années, benthiques ou pélagiques. Ici genre globigérine

Cénozoïque

I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFÈRE

3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique

3.2. Notion de fossiles stratigraphiques

Il y a le bon fossile, et il y a le mauvais fossile...



■ Un bon **fossile stratigraphique** ou **fossile index**:

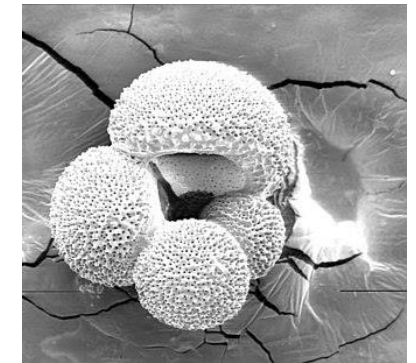
- Faible exigence écologique => ubiquiste
- Évolution rapide de l'espèce => bonne délimitation temporelle
- Espèce abondante avec un grand potentiel de fossilisation
- Marin => la Terre est bleue...
- Eau profonde => peu dépendant des variations locales



Emiliana
(coccolithophoracées)

1 μm

Coccolithophoridés : algues unicellulaires pélagiques. Ces algues protègent leur unique cellule sous une couche de plaques de calcite appelées coccolithe. La craie est constituée en majeure partie de coccolithophoridés



100 μm

Foraminifères: eucaryotes unicellulaires extrêmement abondants depuis plusieurs centaines de millions d'années, benthiques ou pélagiques. Ici genre globigérine

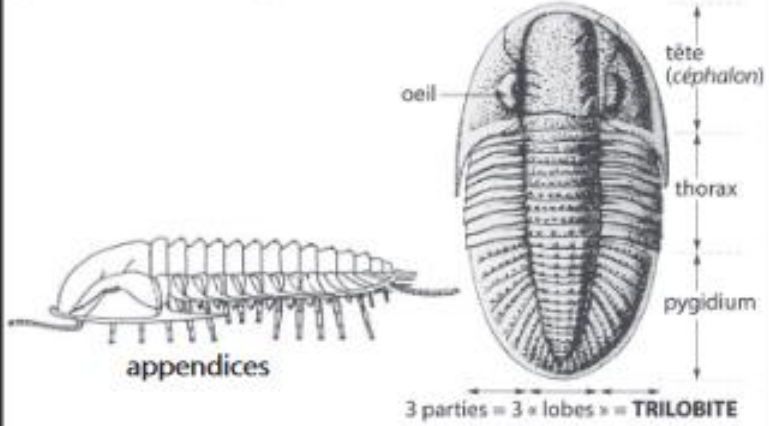

NOM DU GROUPE, CARACTÉRISTIQUES	EXEMPLES DE FOSSILE STRATIGRAPHIQUE ET ÂGE																																																																			
<p>Arthropodes TRILOBITES : corps <i>métamérisé</i> (= découpé en segments portant des <i>appendices</i>) <i>divisé en 3 lobes</i>.</p> 	<p>Cambrien</p> <ul style="list-style-type: none"> • Apparaissent dès le début du phanérozoïque • Disparaissent à la crise PT 	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>foraminifères</th> <th>gastéropodes</th> <th>bivalves</th> <th>ammonites</th> <th>trilobites</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cénozoïque</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Crétacé</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Jurassique</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Trias</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Permien</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Carbonifère</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Dévonien</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Silurien</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ordovicien</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Cambrien</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>■ taxon d'intérêt chronostratigraphique</p>		foraminifères	gastéropodes	bivalves	ammonites	trilobites	Cénozoïque						Crétacé						Jurassique						Trias						Permien						Carbonifère						Dévonien						Silurien						Ordovicien						Cambrien					
	foraminifères		gastéropodes	bivalves	ammonites	trilobites																																																														
Cénozoïque																																																																				
Crétacé																																																																				
Jurassique																																																																				
Trias																																																																				
Permien																																																																				
Carbonifère																																																																				
Dévonien																																																																				
Silurien																																																																				
Ordovicien																																																																				
Cambrien																																																																				
<p>Mollusques GASTÉROPODES : <i>Coquille univalve dorsale torsadée</i></p> <p>Ex : <i>Bigorneau, Escargot, Limnée d'eau douce</i></p> <p>Iers animaux à coquille</p> 	<p>Cénozoïque</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 continental</p>																																																																			

Figure 15 : fossiles stratigraphiques (d'après A. Denis)

Principe d'actualisme avec le Nautilé actuel: mer chaude profonde

Le Nautilé, un animal panchronique (faible variation morphologique, mais pour autant modifications génétiques importantes)
Principe d'actualisme

Mollusque céphalopode

2 espèces actuelles
300 espèces fossiles en 500 MA



Nautilé vivant, actuel (océan indien)

Il y a eu évolution mais les caractères morphologiques pour les reconnaître ont peu changé : ce fossile est donc un marqueur peu utile pour dater une strate



Nautilé de Madagascar (100 MA)

Mollusques BIVALVES

Coquille à 2 valves
(Ex : Moule, Huitre, Pecten...)



→ Panphanérozoïque



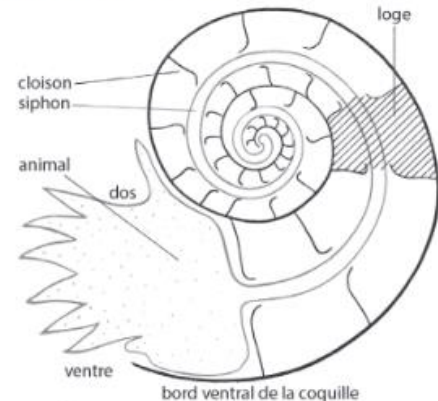
Les Rudistes (= Hippurites), bivalves récifaux asymétriques à coquille épaisse, sont plus des fossiles de faciès témoignant d'un milieu marin chaud peu profond que des fossiles stratigraphiques.

Leur existence s'étale du Jurassique supérieur à la crise Crétacé-Tertiaire qui les voit disparaître avec Ammonites et Dinosaures.



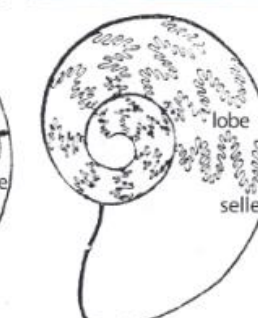
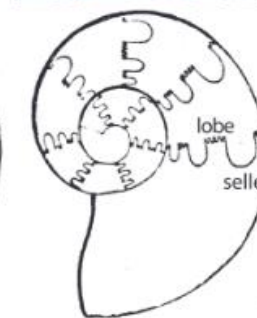
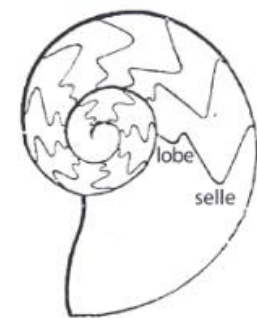
Mésozoïque

Mollusques Céphalopodes AMMONOÏDES
(= AMMONITES au sens large), apparentés aux Nautilés actuels.



- **Goniatites** (gone = angle, ex polygone) 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** (au sens strict) du **Jurassique** et du **Crétacé** : lobes + selles persillées.

Mésozoïque



Goniatites

Cératites

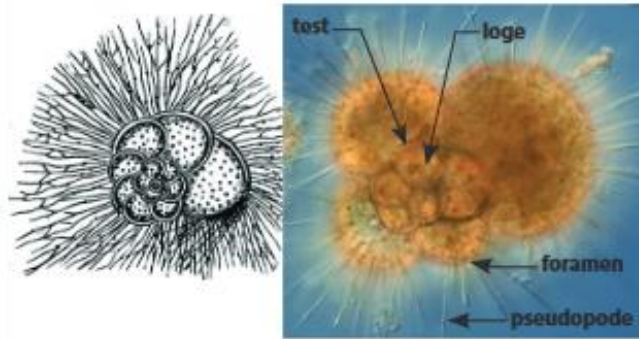
Ammonites

Coquille univalve plus ou moins enroulée dont seule la dernière loge était occupée par l'animal (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.

Foraminifères

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

Globigérine actuelle



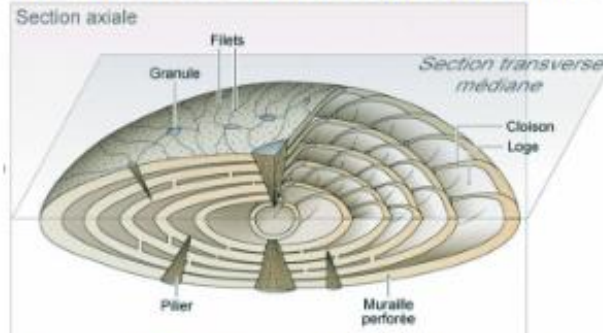
Un **test** diffère d'une coquille car il est en position corticale (ici sous la membrane plasmique) et non extérieure.

Foraminifères ubiquistes; certains benthiques d'autres planctoniques

→ **Panphanérozoïque** mais quelques espèces notables

• **Foraminifères benthiques** = vivant sur le fond (milli à centimétriques)

Ex : *Nummulites* du Paléogène en forme de pièces de monnaie



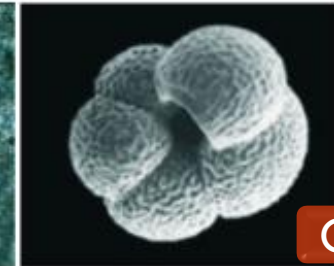
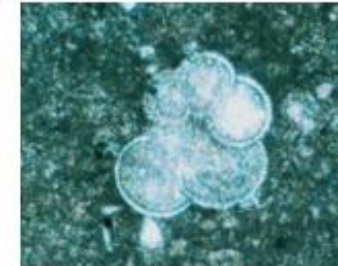
• **Foraminifères planctoniques** = en suspension dans la masse d'eau (< 1mm)

- *Globotruncanidés* à test caréné abondants au Mésozoïque

- *Globigérinidés* à test arrondi abondants au Cénozoïque

Paléocène inférieur

Globigérine (20 µm)
à test arrondi



Cénozoïque

Crétacé supérieur

Globotruncana (500 µm)
à test caréné



Mésozoïque

I. CHRONOLOGIE RELATIVE: SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

B. DÉFINIR DES INTERVALLES DE TEMPS GRACE AU CONTENU FOSSILIFÈRE

3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique

3.3. Notion de biozone et de chronozone

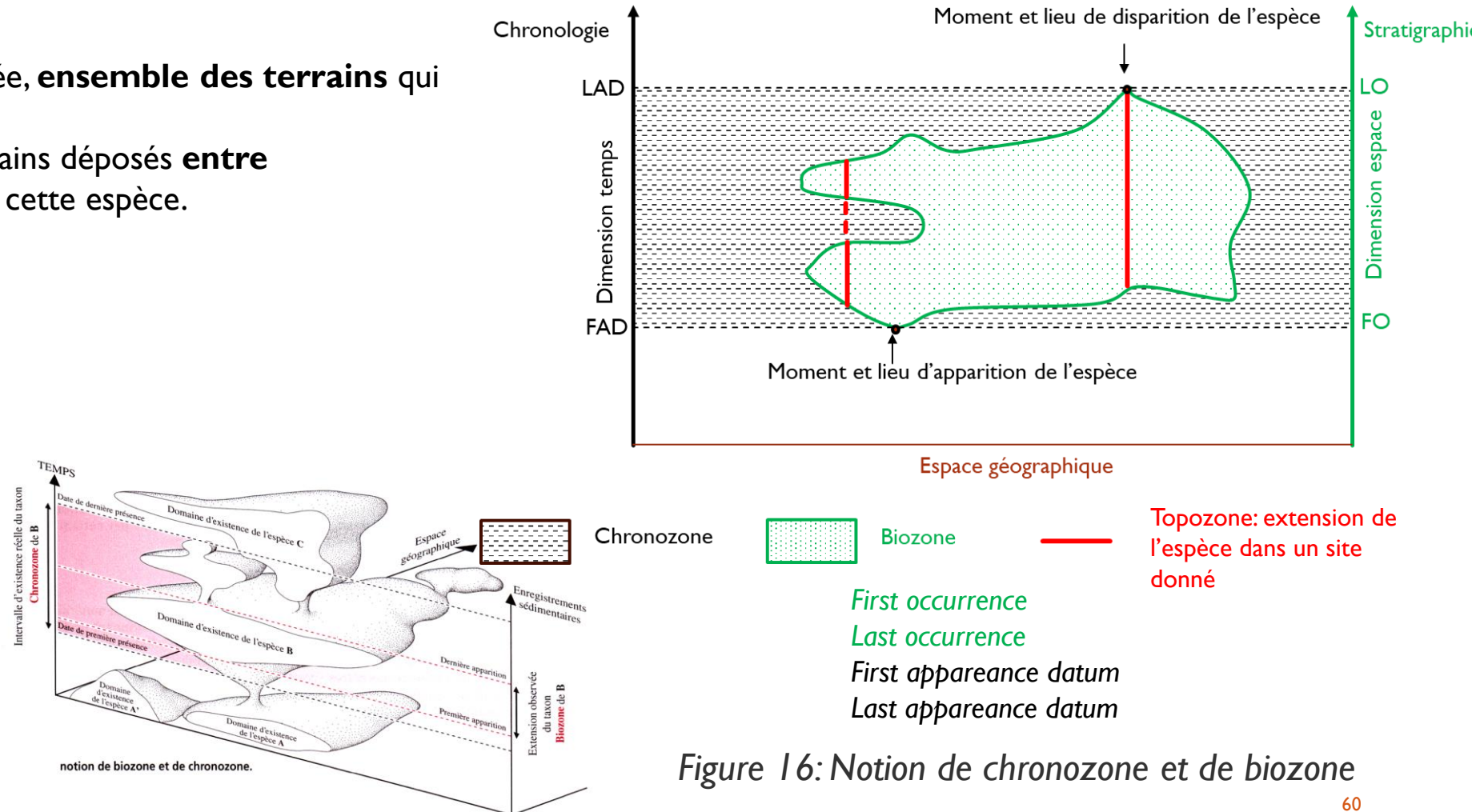


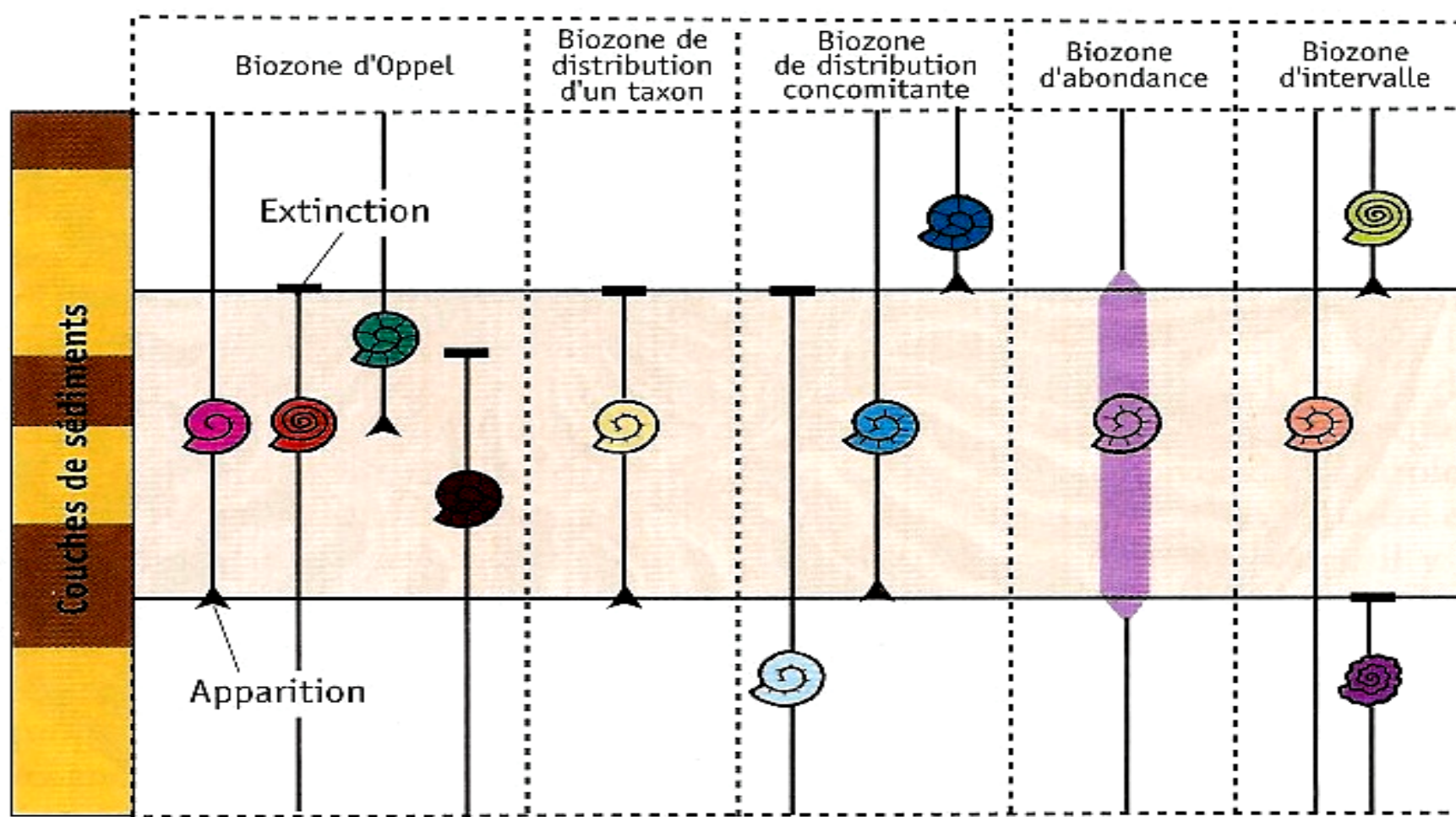
- **Biozone** = pour une espèce donnée, **ensemble des terrains** qui la contiennent.
- **Chronozone** = ensemble des terrains déposés **entre l'apparition et la disparition** de cette espèce.
- Volume des terrains de la biozone < volume des terrains de la chronozone.
Car

➤ espèce n'est jamais fossilisée dans tous les terrains correspondant à sa durée de vie

➤ certains terrains peuvent être érodés (on estime à environ 70% le hiatus dans l'enregistrement sédimentaire)

⇒ problème du choix du lieu utilisé pour des études de biostratigraphie.





2. LES BIOZONES sont des tranches de sédiments caractérisées par leur contenu en fossiles. La biozone dite d'Oppel est définie par une association unique de fossiles que l'on ne retrouve nulle part ailleurs. La biozone de distribution d'un taxon est la zone où une espèce (ou un groupe) donnée est exclusivement présente. La biozone de distribution concomitante est définie, à sa base, par la disparition d'une espèce et, à son sommet, par l'apparition d'une autre. La biozone d'abondance correspond aux sédiments où une espèce est abondante, sans être nécessairement absente au-dessus et en dessous. Enfin, la biozone d'intervalle est limitée par deux événements (d'apparition ou de disparition).

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

Et le temps de chien, vous connaissez?

C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

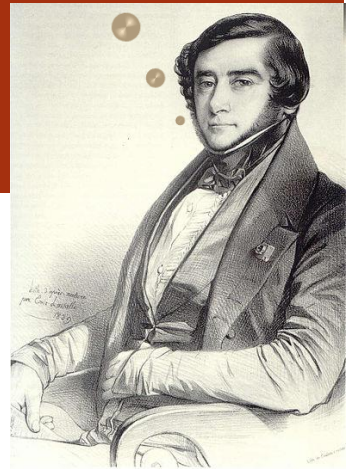
I. L'étage se définit à partir de son stratotype

I.1. Définition d'un stratotype

- Objectif de chronostratigraphie : diviser la succession des couches sédimentaires en unités correspondant à des **unités de temps**
 - ⇒ **unité stratigraphique** de référence = **étage**
 - ⇒ **Stratotype**: lieu présentant la séquence sédimentaire de référence d'un étage
- Alcide d'Orbigny fut le premier à proposer une définition de l'étage :

« Un étage, pour nous, est une époque en tout identique à l'époque actuelle. C'est un état de repos de la nature passée, pendant lequel il existait, comme dans la nature actuelle, des continents et des mers, des plantes et des animaux terrestres, des plantes et des animaux marins; et, dans les mers, des animaux pélagiens et des animaux côtiers à toutes les zones de profondeur. Pour qu'un étage soit complet, il doit montrer un ensemble d'êtres terrestres ou marins, qui puisse représenter une époque tout entière, analogue au développement que nous voyons actuellement sur la terre. »

- Alcide d'Orbigny a ainsi défini **27 étages** dont certains sont toujours conservés dans l'échelle actuelle (Sinémurien, Toarcien, Aptien, Turonien...). Les noms des étages renvoient pour la plupart à une région ou à une ville : en effet, un étage est défini par une séquence de référence appelée stratotype, choisie la plus proche possible de la première séquence historiquement choisie et ayant un contenu fossilifère caractéristique.



Alcide d'Orbigny (1802 -1857)

Les 27 stratotypes définis en France

Quelques exemples d'étages

Nom de l'étage	Auteurs	Origine	Fossile
Aquitanien	Mayer-Eymar, 1858	Aquitaine	Coccolite, foraminifère
Lutétien	De Lapparent, 1883	Lutetia (Paris en latin)	Foraminifère
Campanien	Coquand, 1857	Champagne	Crinoïde
Cénomanién	D'Orbigny, 1847	Le Mans	Foraminifère (globotruncanidé)
Toarcien	D'Orbigny, 1849	Thouars	Ammonite
Sinémurien	D'Orbigny	Semur-en Auxois (Côte d'Or)	Ammonite
Roadien	Furnish, 1973	Road, Texas	Conodonte

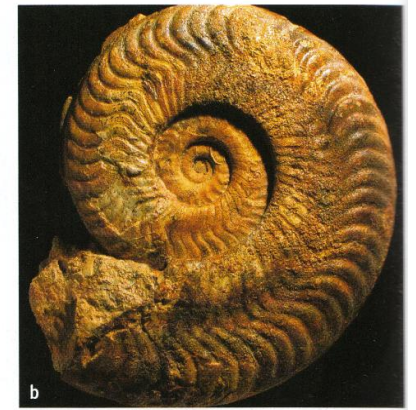
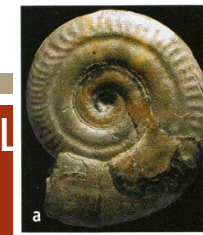
C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

1. L'étage se définit à partir de son stratotype

1.2. Un stratotype : le Toarcien

- **stratotype d'unité** = localité dont le contenu paléontologique et la lithologie en font un **site de référence pour caractériser un étage**.
 - **Thouars** = **stratotype d'unité** du **toarcien** (étage du Jurassique inférieur)
 - Saint Etienne est le stratotype d'unité du stéphanien (ancien étage du Carbonifère)
 - Orgon (petit village provençal) est le stratotype d'unité de l'urgonien (regroupement d'étages du Crétacé inférieur constitué de formations récifales...)
- **Toarcien** = étage du jurassique inférieur (entre -183 Ma et -175 Ma) → différentes carrières de la région de Thouars (près de Poitiers).

- ✓ Ammonites stratigraphiquement intéressantes pour dater des couches géologiques évolution rapide
- ✓ 27 unités biostratigraphiques = horizons (cf chiffre romain)
- ✓ Toarcien qui s'étend sur 8 millions d'années subdivisées verticalement sur 27 horizons → durée moyenne d'un horizon de $8 \text{ Ma} / 27 = 300.000 \text{ ans}$
- ✓ Toarcien = étage dont la biostratigraphie présente un fort pouvoir de résolution.



Deux ammonites du toarcien de la région de Thouars :
 a. *Hildoceras bifrons* (diamètre : 4,5 cm) ;
 b. *Harpoceras falciferum* (diamètre : 13 cm).

Horizons définis à Thouars	Ammonites															
	<i>Hildoceras</i>	<i>H. semipolatum</i>	<i>H. bifrons</i>	<i>H. lusitanicum</i>	<i>H. crassum</i>	<i>H. sublevisioni</i>	<i>Dactyloceras</i>	<i>D. commune</i>	<i>Harpoceras</i>	<i>H. falciferum</i>	<i>H. serpentinum</i>	<i>Harpoceratoides</i>	<i>H. strangewaysi</i>	<i>H. alternatus</i>	<i>H. Kisslingi</i>	<i>Eleganticeras</i>
XIII																
XII																
XI																
X																
IX																
VIII																
VII																
VI																
V																
IV																
III																

Associations d'ammonites dans les horizons du toarcien.

C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

I. L'étage se définit à partir de son stratotype

I.2. Un stratotype : le Toarcien

Réserve Naturelle Nationale du Toarcien



Le stratotype toarcien.

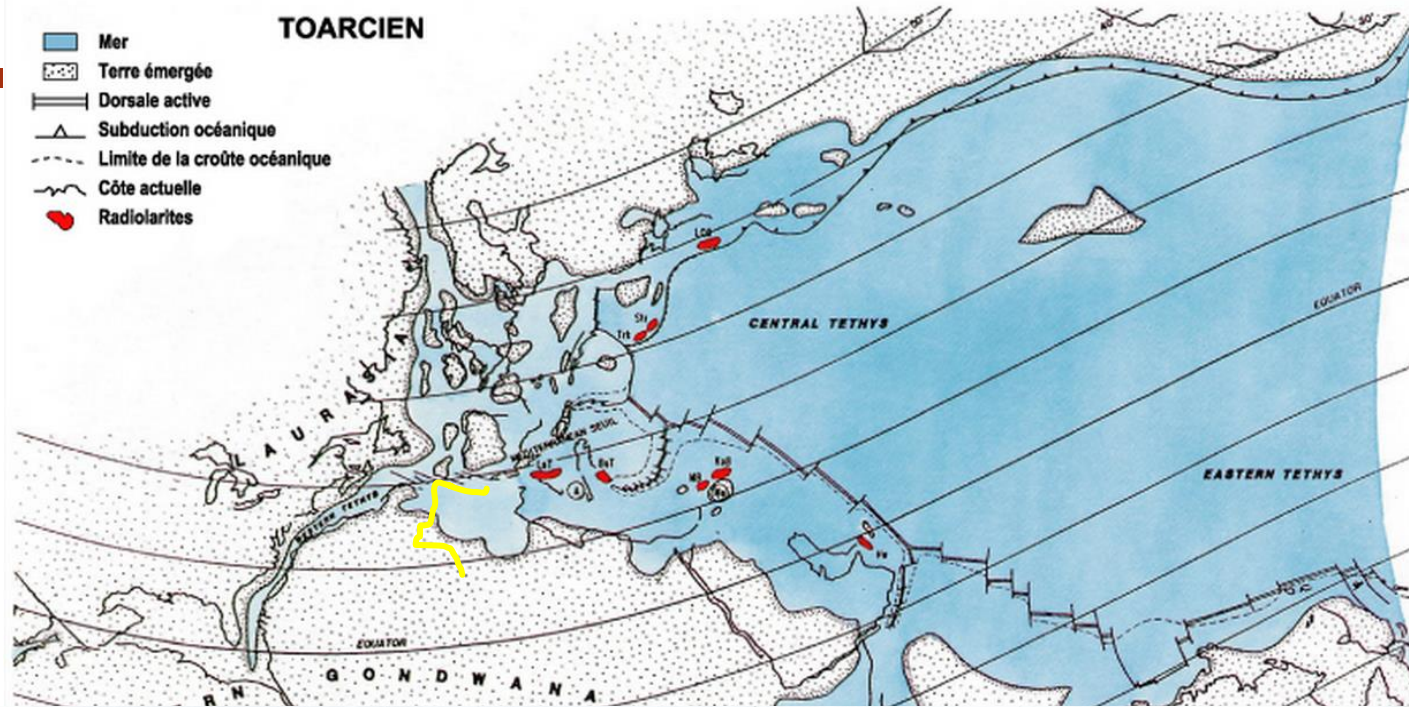


Alcide d'ORBIGNY en 1839

BCPSTI - ENCPB - STÉPHANIE DALAINE

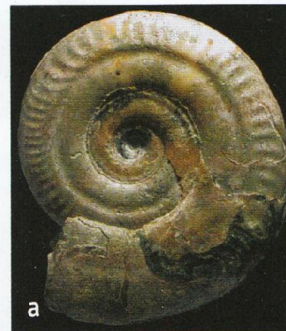


grande diversité d'espèces
d'ammonites chacune
n'ayant existé qu'une
courte période

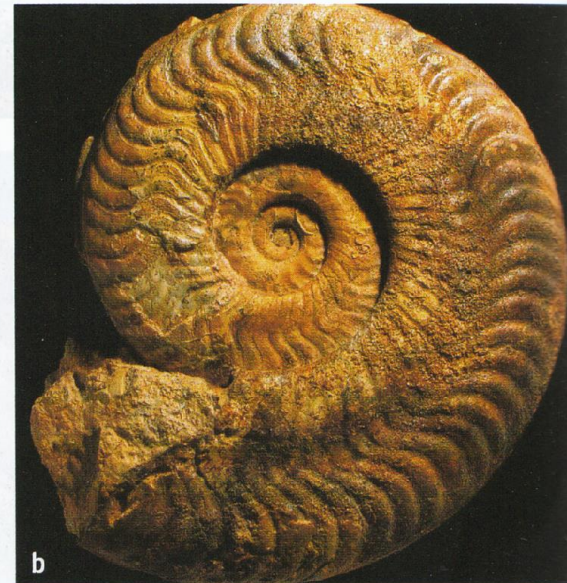


Le **toarcien**, un étage du jurassique inférieur, a été défini à partir d'observations réalisées dans différentes carrières de la région de Thouars (près de Poitiers). Cet étage est particulièrement riche en ammonites.

Les ammonites sont des fossiles intéressants pour dater des couches géologiques car elles ont évolué rapidement au cours du temps. Une espèce donnée présente une faible extension verticale dans les strates sédimentaires : ceci s'explique par le fait que, à l'échelle des temps géologiques, cette espèce est apparue, s'est développée puis a disparu sur une période relativement courte.



Deux ammonites du toarcien de la région de Thouars :
a. *Hildoceras bifrons* (diamètre : 4,5 cm) ;
b. *Harpoceras falciferum* (diamètre : 13 cm).

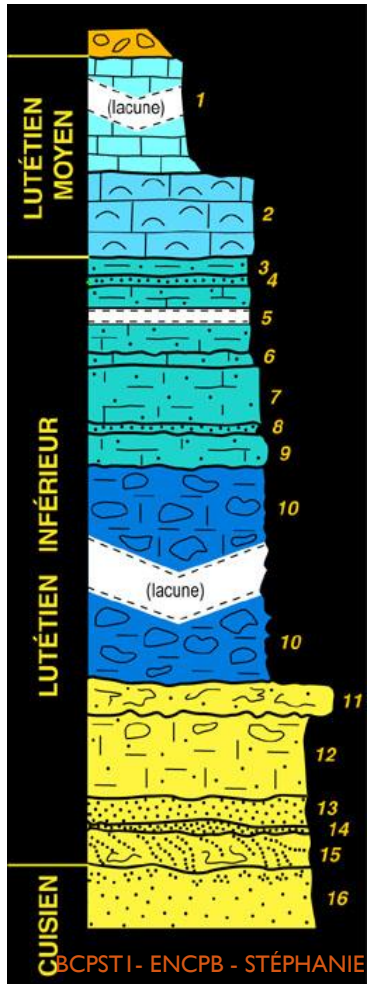


C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

1. L'étage se définit à partir de son stratotype

1.3. Un stratotype d'unité historique et composite : le lutétien

Coupe de Saint Leu



La localité près du site **donne son nom à l'étage** (Lutèce = Paris). Mais le stratotype du Lutétien n'est pas à Paris !

➤ deux sites : un site pour le début (St Leu), un site pour la fin (St Vaast) (car sinon coupes incomplètes) !

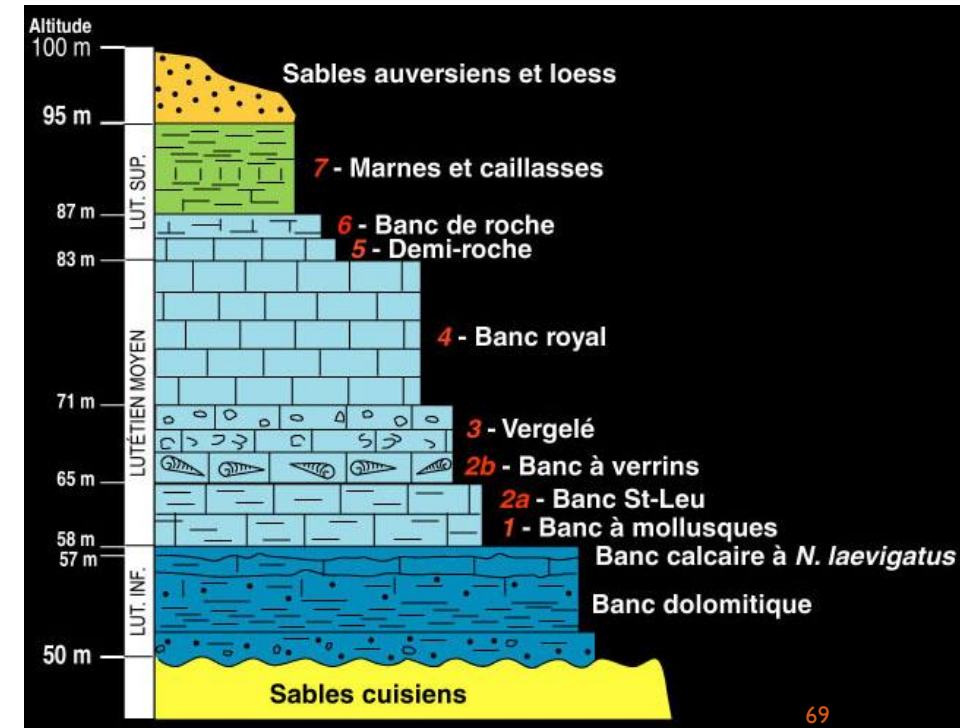
1. Banc Saint-Leu
2. Calcaire grossier jaunâtre peu glauconieux. 1 m
3. Calcaire identique, plus glauconieux. 0,3 m
4. Abondance de *N. laevigatus*
5. Calcaire sableux compact. 1,20 m
6. Sable calcaro-quartzeux grossier. 0,05 à 0,15 m
7. Calcaire sableux. 1,10 m
8. Sable calcaro-quartzeux grossier. 0,02 à 0,05 m
9. Calcaire sableux. 0,50 m
10. Couches calcaro-dolomitiques glauconieuses et quartzes. 7 m environ
11. Calcaire dolomitique gréseux et glauconieux. 0,20 à 0,40 m
12. Sable calcaro-quartzeux, grossier et glauconieux. 0,80 m
13. Sable vert foncé, grossier, très glauconieux. 0,15 à 0,30 m
14. Sable ferugineux, grossier, glauconieux. 0,01 à 0,07 m
15. Sable vert clair, glauconieux. 0,30 à 0,50 m
16. Sable fauve orangé et vert clair, micacé. 2,50 m



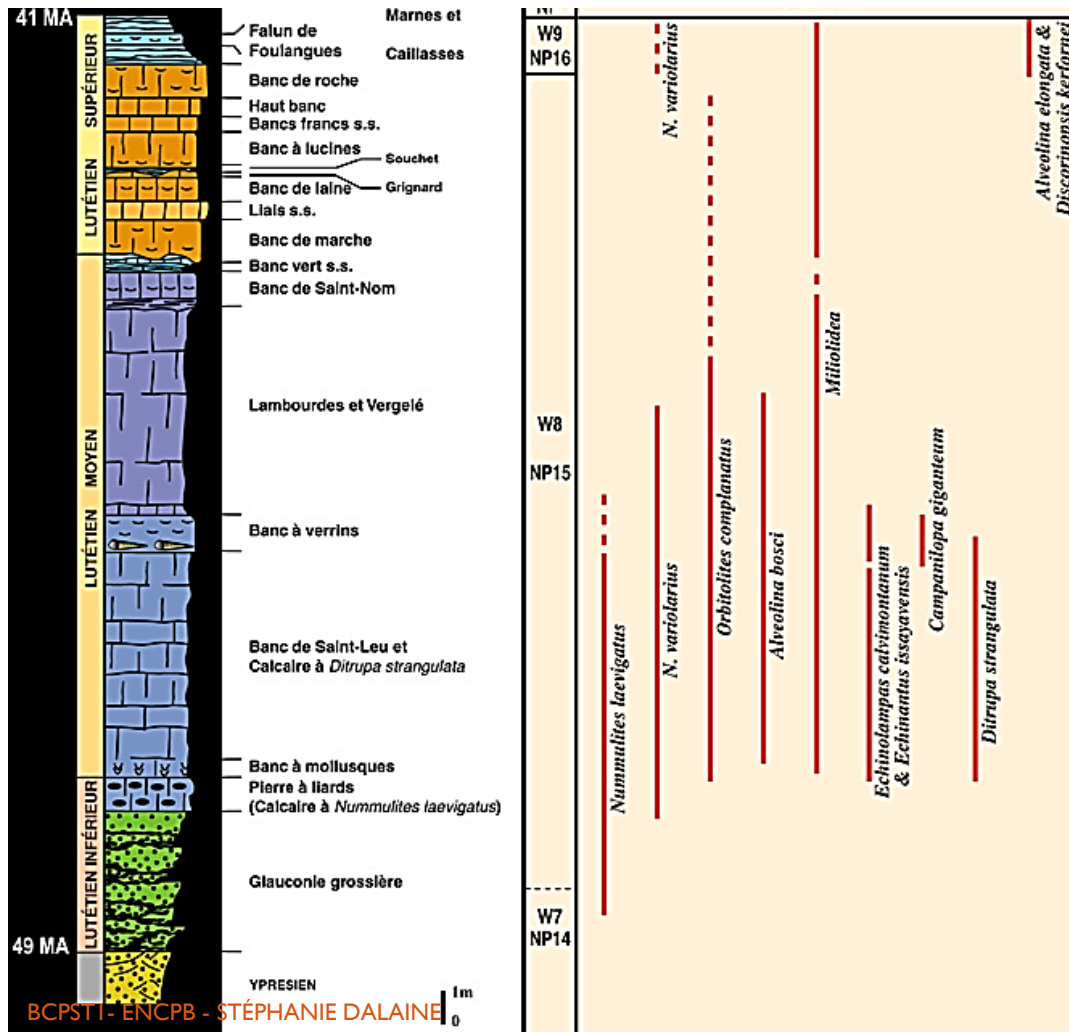
Banc à verrins (*Campanilopa giganteum*)



Coupe de Saint Vaast



Nummulites laevigatus, emblématique du lutétien inférieur et moyen : la pierre à liards



Les **nummulites** sont des grands **foraminifères** (jusqu'à 2 cm), très abondants au Lutétien. Ce sont des êtres vivants unicellulaires qui construisent autour d'eux un **test** (coquille) calcaire à l'allure de pièce de monnaie, d'où leur nom (et le nom de la roche qui les abrite : pierre à liards). En section, le test révèle des loges. Les grandes pyramides sont elles aussi construites en calcaire nummulitique du Lutétien ! (*N. gizehensis*)



C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

I. L'étage se définit à partir de son stratotype

I.4. définition du clou d'or

- Caractériser l'étage non pas par son contenu mais par ses **limites**
 - base de nombreux stratotypes définie par un **niveau repère** appelé **GSSP pour Global Stratigraphic Section and Point = clou d'or (Golden Spike)** sur l'échelle stratigraphique
 - **Un clou d'or correspond toujours à l'apparition d'une espèce.** Actuellement un étage est défini uniquement par sa base avec l'apparition d'un nouveau fossile ou assemblage de fossiles dans ce qui est défini comme un stratotype de limite = clou d'or = GSSP.
 - Clou d'or = **stratotype de limite**
 - Tous les clous d'or n'ont pas été plantés



*Clou d'Or de Coumiac GSSP
Frasnien / Famennien*



*Autre exemple de clou d'or : celui du **Capitanien**, à Nipple Hill, dans les montagnes de Guadalupe, au Texas. Le Capitanien est un étage qui commence à 265.1 ± 0.4 Ma. Il fait partie du Guadalupien, une époque qui fait elle-même partie du Permien...*



IUGS

CHARTRE STRATIGRAPHIQUE INTERNATIONALE

www.stratigraphy.org

International Commission on Stratigraphy



Eon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Age (Ma)	
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène			présent	
				Supérieur		0,0117	
				Moyen		0,126	
				Inférieur		0,781	
						1,806	
		Néogène	Pliocène	Gélasien			2,588
				Plaisancien			3,600
				Zancléen			5,333
				Messinien			7,246
							11,62
	Paléogène	Miocène	Tortonien			13,82	
			Serravallien			15,97	
			Langhien			20,44	
			Burdigalien			23,03	
			Aquitanien			28,1	
		Oligocène	Chattien			33,9	
			Rupélien			38,0	
			Priabonien			41,3	
			Bartonien			47,8	
			Lutétien			56,0	
Paléocène	Yprésien			59,2			
	Thanétien			61,6			
	Sélandien			66,0			
	Danien			72,1 ± 0,2			
				83,6 ± 0,2			
Mésozoïque	Crétacé	Supérieur	Maastrichtien			86,3 ± 0,5	
			Campanien			89,8 ± 0,3	
			Santonien			93,9	
			Coniacien			100,5	
			Turonien			113,0	
		Inférieur	Albien			125,0	
			Aptien			129,4	
			Barrémien			132,9	
			Hauterivien			139,8	
			Valanginien			145,0	

Eon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Age (Ma)	
Phanérozoïque	Mésozoïque	Jurassique	Supérieur	Tithonien			145,0 ± 0,8
					Kimméridgien		152,1 ± 0,9
					Oxfordien		157,3 ± 1,0
			Moyen	Callovien			163,5 ± 1,0
				Bathonien			166,1 ± 1,2
				Bajocien			168,3 ± 1,3
				Aalénien			170,3 ± 1,4
			Inférieur	Toarcien			174,1 ± 1,0
				Pliensbachien			182,7 ± 0,7
				Sinemurien			182,7 ± 0,7
	Paléozoïque	Trias	Supérieur	Rhétien			~ 208,5
				Norien			~ 228
				Carnien			~ 235
				Ladinien			~ 242
				Anisien			247,2
			Moyen	Olénékien			251,2
				Induen			252,2 ± 0,5
				Changhsingien			254,2 ± 0,1
				Wuchiapingien			258,9 ± 0,4
				Capitanien			259,9 ± 0,4
Inférieur	Guadalupien			265,1 ± 0,4			
	Wordien			268,8 ± 0,5			
	Roadien			272,3 ± 0,5			
	Kungurien			278,3 ± 0,6			
	Artinskien			290,1 ± 0,1			
Paléozoïque	Permien	Cisuralien	Sakmarien			295,5 ± 0,4	
			Assélien			298,9 ± 0,2	
						303,7 ± 0,1	
						307,0 ± 0,1	
						315,2 ± 0,2	
		Supérieur	Gzhélien			323,2 ± 0,4	
			Kasimovien			330,9 ± 0,2	
			Moscovien			346,7 ± 0,4	
			Bashkirien			358,9 ± 0,4	
			Serpukhovien			358,9 ± 0,4	
Paléozoïque	Carbonifère	Pennsylvanien	Viséen			346,7 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
		Mississippien	Fortunien			358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	
						358,9 ± 0,4	

Eon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Age (Ma)	
Phanérozoïque	Paléozoïque	Dévonien	Supérieur	Famennien			354,0 ± 0,4
					Frasnien		372,2 ± 1,6
					Givetien		382,7 ± 1,6
			Moyen	Eifélien			387,7 ± 0,8
				Emsien			393,3 ± 1,2
				Praguien			407,6 ± 2,6
				Lochkovien			410,8 ± 2,8
			Inférieur	Pridoli			419,2 ± 3,2
				Ludlow			423,0 ± 2,3
				Wenlock			425,6 ± 0,9
	Phanérozoïque	Silurien	Supérieur	Homérien			427,4 ± 0,5
				Sheinwoodien			430,5 ± 0,7
				Télychien			433,4 ± 0,8
				Aéronien			438,5 ± 1,1
				Rhuddanien			440,8 ± 1,2
			Moyen	Hirnantien			443,4 ± 1,5
				Katien			445,2 ± 1,4
				Sandbien			453,0 ± 0,7
				Darriwilien			458,4 ± 0,9
				Dapingien			467,3 ± 1,1
Phanérozoïque	Ordovicien	Supérieur	Floien			470,0 ± 1,4	
			Trémadocien			477,7 ± 1,4	
						485,4 ± 1,9	
						489,5	
						494	
		Moyen	Étage 10			497	
			Jiangshanién			500,5	
			Paibien			504,5	
			Drumien			504,5	
			Étage 5			509	
Phanérozoïque	Cambrien	Séries 3	Étage 4			514	
			Étage 3			521	
			Étage 2			529	
			Fortunien			541,0 ± 1,0	
						541,0 ± 1,0	

Eon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Age (Ma)	
Phanérozoïque	Protérozoïque	Néo-protérozoïque	Édiacarien			~ 635	
			Cryogénien			~ 541	
			Tonien			850	
			Sténien			1000	
			Ectasien			1200	
		Mésoproterozoïque	Calymmien			1400	
			Stathérien			1600	
			Orosirien			1800	
			Rhyacien			2050	
			Sidérien			2300	
Phanérozoïque	Archéen	Néo-archéen				2500	
						2800	
						3200	
						3600	
						4000	
		Mésoproterozoïque					4600
							4600
							4600
							4600
							4600



Caractérisation d'un niveau type entre deux étages ; à la base de chaque stratotype, un niveau repère est choisi : le Global Stratigraphic Section and Point (GSSP), matérialisé sous la forme d'un « Golden spike » ("clou d'or").

La définition de la limite inférieure de chaque unité formelle par un point précis dans la coupe d'un stratotype de limite globale (GSSP-Global Boundary Stratotype Section and Points) est encore en cours, y compris celle des unités de l'Archéen et du Protérozoïque, auparavant définie par des âges absolus (GSA-Global Standard Stratigraphic Ages).

Les chartes 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 n'ont pas de GSSP ratifiés ou des âges numériques calibrés, un âge numérique approximatif (≈) est indiqué.

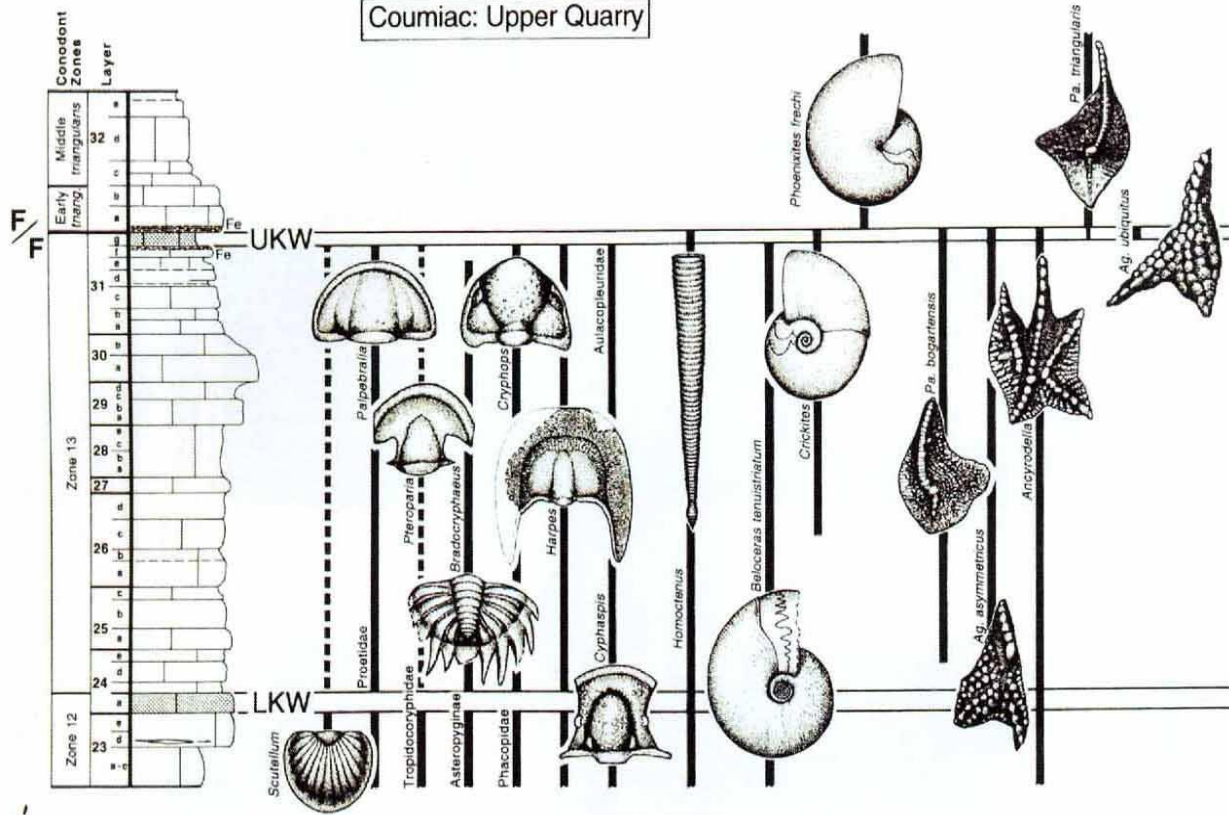
Les âges numériques de tous les systèmes à l'exception du Trias, Crétacé et Précambrien sont tirés du livre "A Geologic Time Scale 2012" par Gradstein et al. (2012) ; ceux du Trias et du Crétacé ont été définis par les subcommissions de l'ICS.



Les couleurs suivent l'usage de la Commission de la Carte Géologique du Monde (CCGM).
<http://www.ccgw.org>

Mai 2012 © International Commission on Stratigraphy
Conception & dessin : K.M. Cohen, S.Finney, P.L. Gibbard

Coumiac: Upper Quarry



Fossiles de Trilobites, Goniatites et Conodontes



UN PSM en France (Coumiac) déterminant la limite Frasnien-Faménnien

Paléozoïque	h	Carbo- Missis- sippien	Dévonien		Age (Ma)	Fossil	Value	Symbol	
			Supérieur	Inférieur					
d	Dévonien	h1-2	Supérieur	Serpukhovien	318.1 ± 1.3	Yellow hammer			
			Moyen	Viséen h2	326.4 ± 1.6	Yellow hammer	325 ± 5	Red star	
			Inférieur	Tournaisien h1	345.3 ± 2.1	Yellow hammer	345	Red star	
		d6-7	Faménnien	d6-7	Frasnien d6	359.2 ± 2.5	Yellow hammer	355 3/5	Red star
					Frasnien d6	374.5 ± 2.6	Yellow hammer	365 ± 5	Red star
					Givetien d5	385.3 ± 2.6	Yellow hammer	375 ± 5	Red star
					Givetien d5	391.8 ± 2.7	Yellow hammer	380	
					Eifelien d4	397.5 ± 2.7	Yellow hammer	390 ± 5	Red star
					Emsien d3	407.0 ± 2.8	Yellow hammer	400	
					Pragien d2	411.2 ± 2.8	Yellow hammer		Red star
Lochkovien d1									

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

2. Établissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques

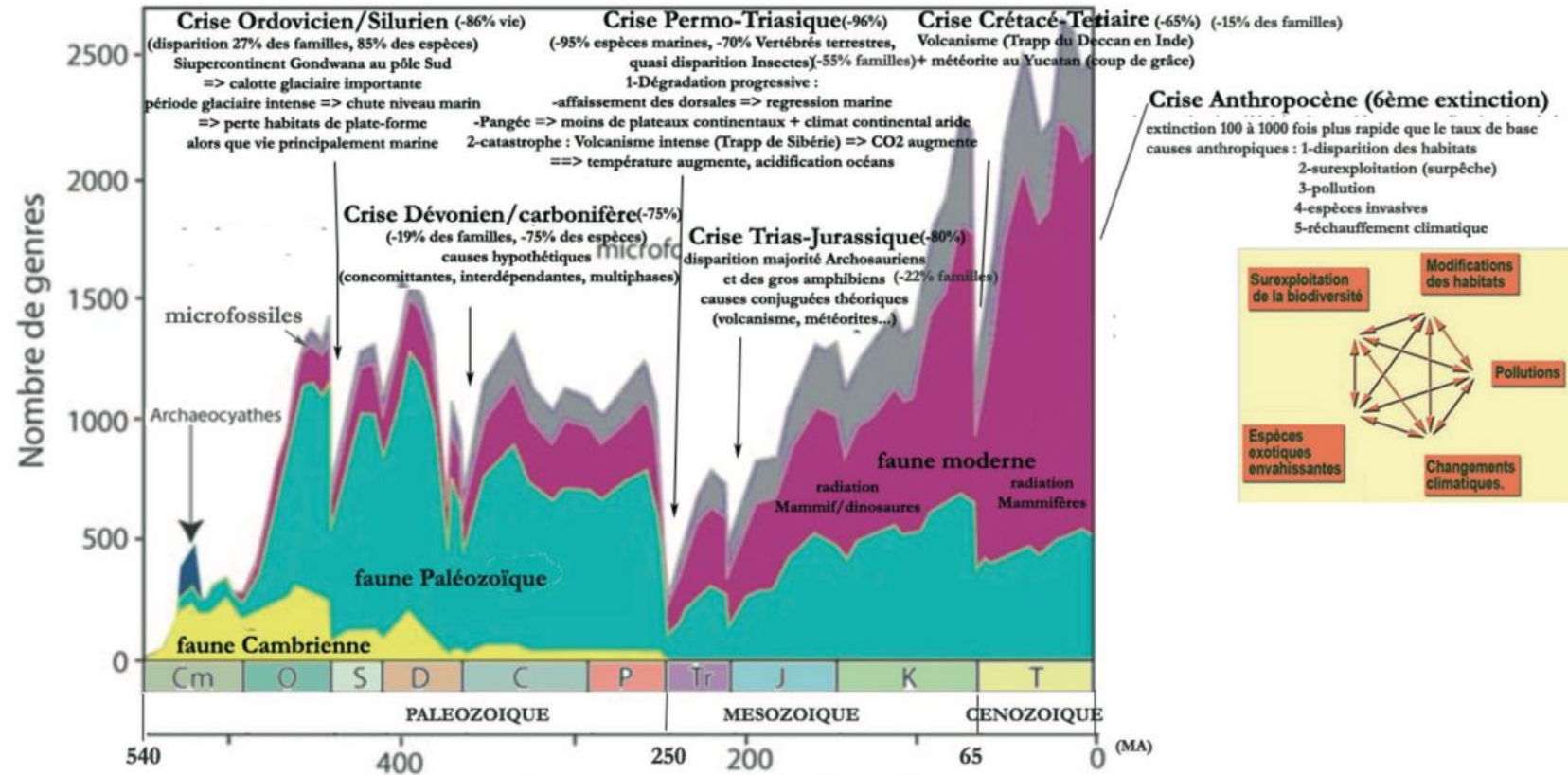
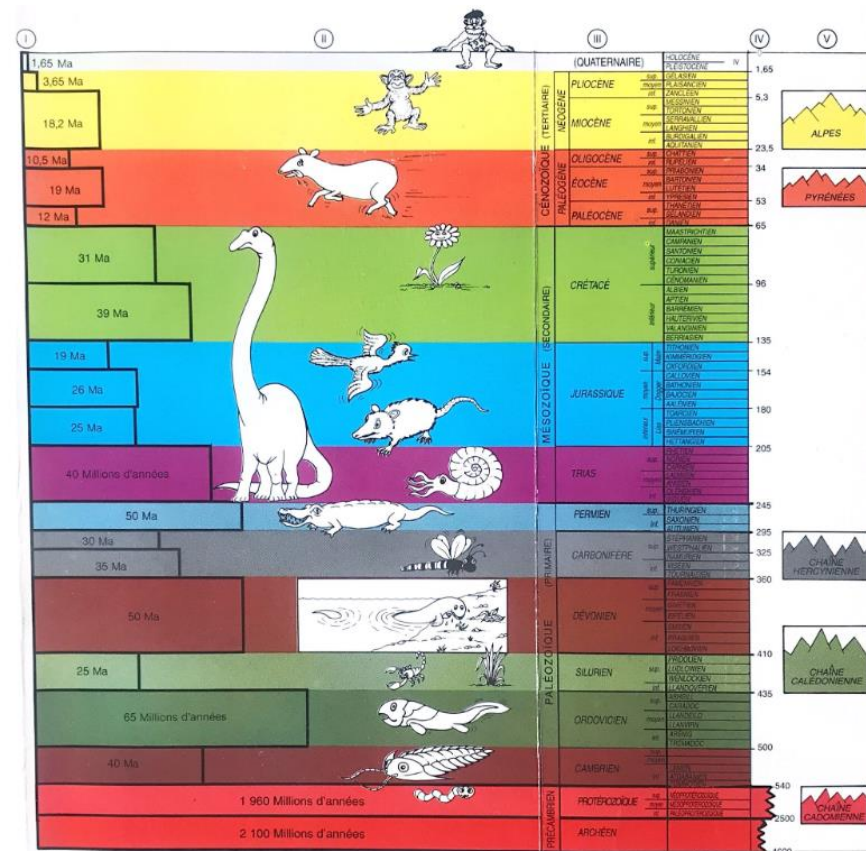


Figure 20 : les 6 crises du vivant du Phanérozoïque (A. Denis)

C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

2. Établissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques

2.1. Des extinctions globales suivies de radiations évolutives

- Crises = **déclins temporaires de la biodiversité**, dus à des **extinctions en masse** avec disparition **géographiquement étendue** de nombreux taxons de rang élevé, pendant un **temps relativement bref**.
- Sans crise: **taux moyen de disparition des espèces : 10 % par million d'années**,
 - disparition compensée par des apparitions d'espèces
 - crise ssi : ce rythme d'extinction augmente brutalement.
- **Six crises** majeures ont marqué l'évolution de la biosphère au cours des temps phanérozoïques.
 - **Crise Permo-Trias** (–250 Ma) la plus importante : 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.
 - Crise Crétacé-Cénozoïque (65 Ma) est moins importante mais très médiatisée du fait de la disparition des Dinosaures non aviens (non oiseaux), et des Ammonites.
- Ces **deux crises** ont été utilisées comme **repère dans l'échelle stratigraphique** et marquent la limite entre des ères :
 - **limite Paléozoïque / Mésozoïque pour la crise Permo-Trias**
 - **limite Mésozoïque / Cénozoïque pour la crise Crétacé-Cénozoïque**
- Chaque crise est suivie par une **radiation évolutive**, c'est-à-dire une diversification des espèces conquérant les niches écologiques laissées vacantes (exemple des Mammifères qui se diversifient après la crise Crétacé-Tertiaire).

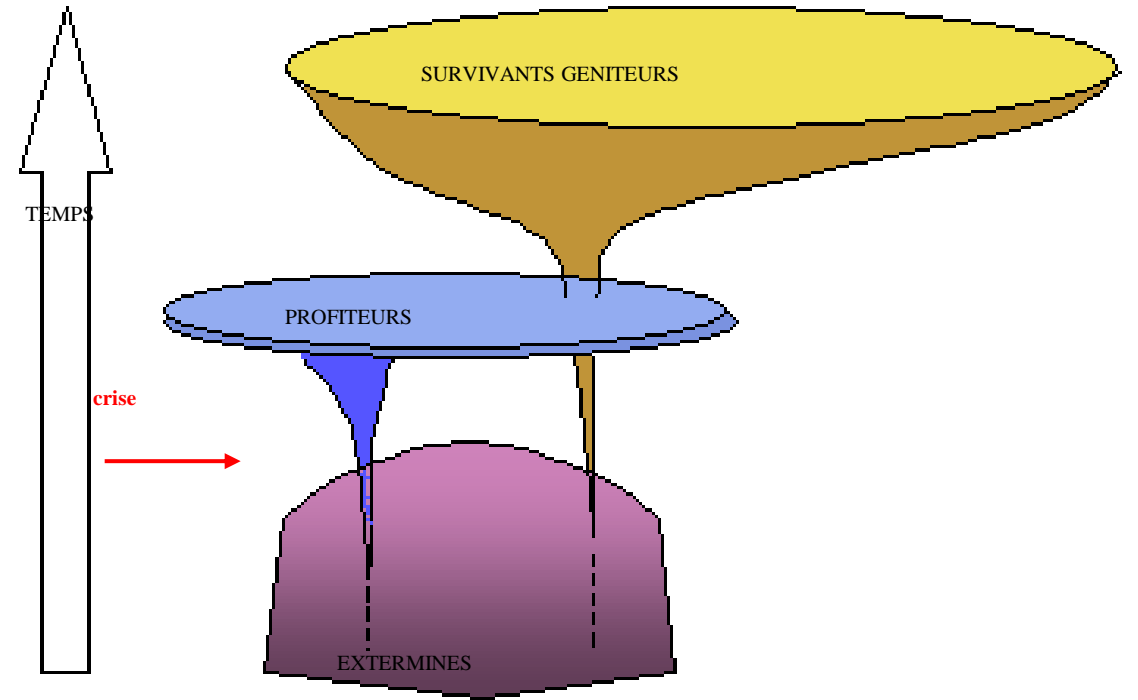
C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

2. Établissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques

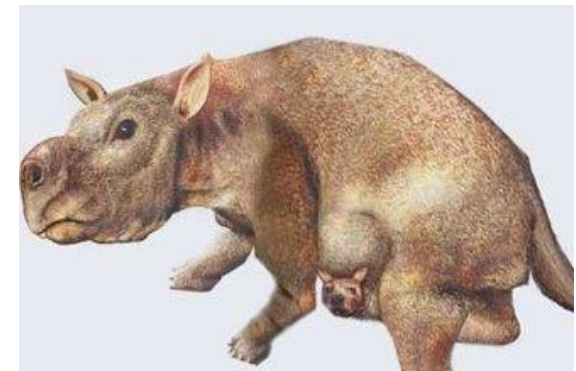
2.1. Des extinctions globales suivies de radiations évolutives

- Fin du Crétacé, les Marsupiaux dominent les Placentaires. La diversité générale est déjà importante, mais pour des animaux ayant des tailles < 50 cm.
- Lors de crise K-T 90 % des Marsupiaux sont touchés, d'où par la suite explosion démographique des Placentaires.
- Un exemple de **radiation évolutive***

=une espèce s'étant rapidement diversifiée à l'origine de nombreuses espèces dont la morphologie, l'écologie et la distribution peuvent varier

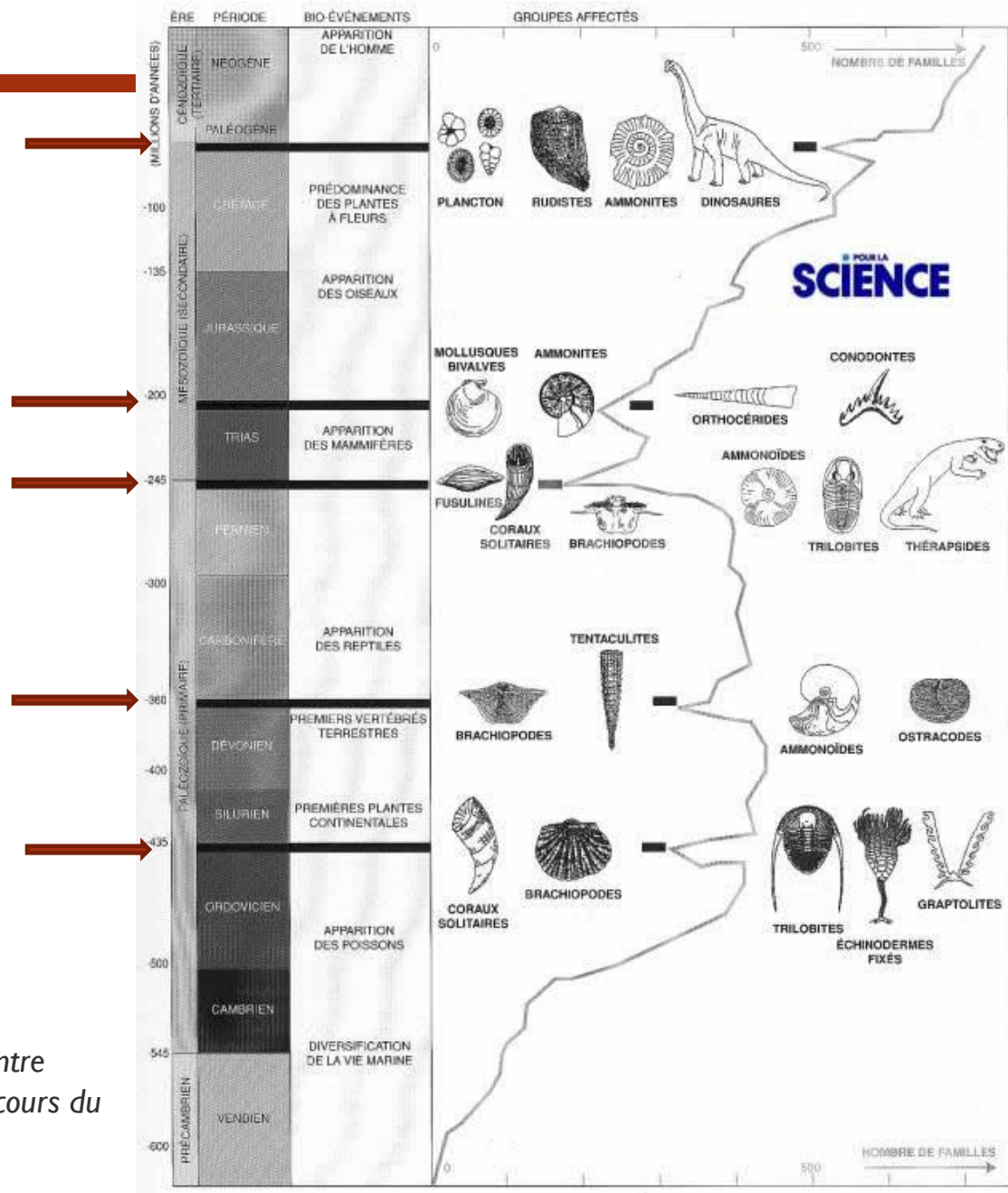


Thylacoleo. Le Livre de la Vie S J Gould



Diprotodon. (Encyclopédie des Dinosauriens Gallimard) 81

L'échelle chronostratigraphique: couplage entre évènements biologiques et géologiques au cours du temps...



Qu'est-ce qu'une crise?

- ✗ Extinction en masse de plusieurs espèces
- ✗ Libération de niches écologiques
- ✗ Survie d'autres espèces
- ✗ Diversification d'espèces opportunistes
- ✗ Évènement biologique mondial, global et ponctuel

On considère que nous vivons depuis 13 000 ans la sixième extinction ou extinction anthropocène. Celle-ci est caractérisée par une vitesse d'extinction plus importante que les autres crises, cependant le pourcentage d'espèce éteintes reste pour le moment inférieur aux autres crises.

C. DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

2. Établissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques

2.2. Des causes souvent multiples

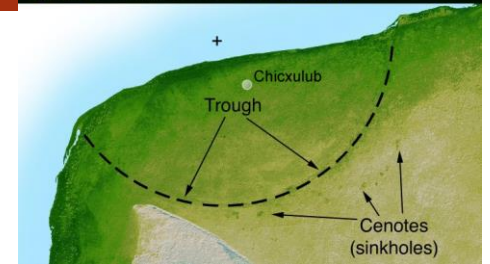


C.DETERMINER DES ETAGES, ETABLIR DES COUPURES ET DEFINIR UNE ECHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE

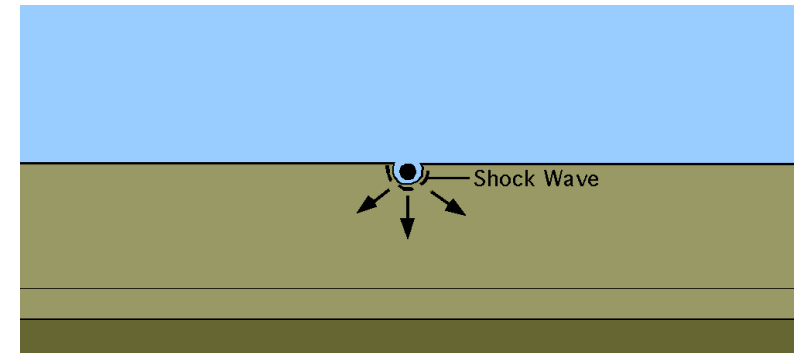
2. Établissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques

2.2. Des causes souvent multiples

- Des événements **externes** comme des impacts de météorites (ex : cratère d'impact au Mexique associé à la crise Crétacé/Tertiaire) ;
- Des événements associés à de la **géodynamique interne** (ex : volcanisme intense en Sibérie et crise Permien/Trias, volcanisme en Inde et crise Crétacé/Tertiaire; variation du niveau marin) ;
- Des **paléogéographies** favorables à des variations **climatiques** importantes (ex : supercontinent Gondwana au pôle Sud favorisant la formation d'une calotte glaciaire à la fin de l'Ordovicien) ;
- Des **innovations évolutives** à l'origine de variations **climatiques** (ex : formation de squelettes calcaires des coraux et séquestration du carbone atmosphérique dans les roches).



Cratère d'impact de Chicxulub (baie du Yucatan)



Trapps du Deccan: 2400 m d'épaisseur, surface ~ France

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des événements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. **Principe de la radiochronologie**
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

A. PRINCIPE DE LA RADIOCHRONOLOGIE

I. Loi de décroissance radioactive



- Quand la datation absolue confirme la chronologie des événements établie qualitativement: la **RADIOCHRONOLOGIE**
- Découverte de la radioactivité: Henri Becquerel (1896) (^{235}U , ^{238}U)
- Appellation de radioactivité par Marie Curie (1898) sur Th, Po, Ra
- Atomes: unité de base des corps simples naturels
 - Un élément chimique est défini par son numéro atomique Z (nombre de protons et donc d'électrons).
 - Un même élément peut présenter plusieurs isotopes, aux **nombre de masse A** (nombre de nucléons : protons + neutrons) différents.



Henri Becquerel
(1852-1908)



Marie Curie
(1867-1934)

$$A = Z + N \quad \begin{matrix} A \\ Z \\ X \end{matrix}$$

- **isotope radioactif** = instable = **élément père (P)** se désintègre en un autre isotope appelé **isotope radiogénique** = **élément fils (F)** (rayonnement: α , β^+ , β^- , γ ,).

Isotopes = même nb de protons mais pas même nb de neutrons $\rightarrow A$ varie

\Rightarrow propriétés chimiques proches (car même nb d'électrons) (néanmoins seule masse varie \Rightarrow légère variation dans les réactions chimiques)

\Rightarrow propriétés nucléaires: isotopes stables (^{39}K , ^{41}K , ^{12}C , ^{13}C) vs isotopes radioactifs (^{40}K , ^{14}C)

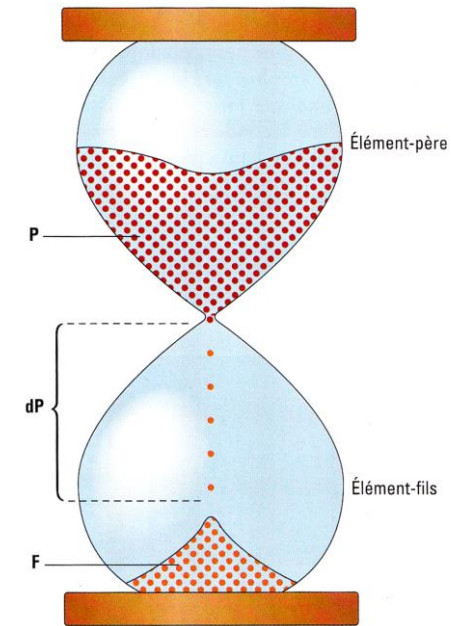
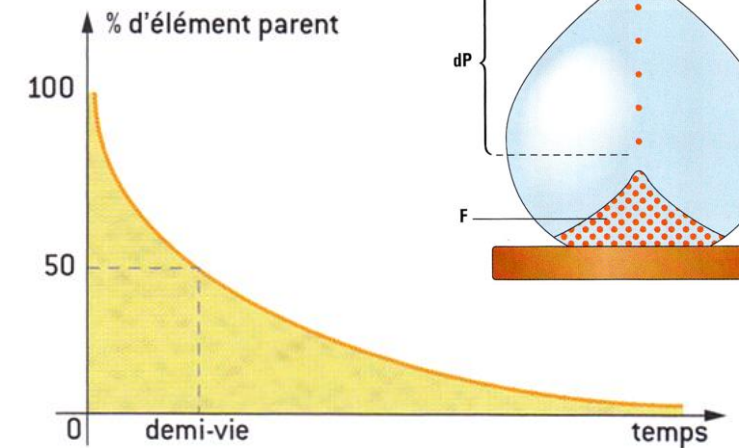
II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

A. PRINCIPE DE LA RADIOCHRONOLOGIE

I. Loi de décroissance radioactive

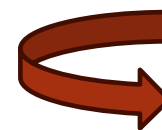


- La géochronologie nucléaire fondée sur le fait que **certains noyaux atomiques sont instables = isotopes radioactifs = radioisotopes**
- Ils se transforment spontanément en un nouvel élément stable (comme l'uranium en plomb) = isotope radiogénique
- Cette transformation spontanée ne dépend que du temps.**



Courbe de désintégration d'un élément radioactif en fonction du temps

$$\begin{array}{c} \lambda \\ P \rightarrow F \\ \frac{dP}{dt} = -\lambda P \\ \frac{dF}{dt} = \lambda P \end{array}$$



Loi de décroissance radioactive
La vitesse de décroissance ne
dépend que du temps

P : nombre d'éléments pères

F : nombre d'éléments fils

λ : constante de désintégration en an^{-1} caractéristique d'un couple père-fils

$\lambda \cdot dt$: probabilité qu'un atome radioactif se désintègre pendant un intervalle de temps dt



- On considère un **système fermé** c'est-à-dire un **système** où la **quantité d'atomes pères et d'atomes fils** est **fixée** à partir d'un **instant initial t_0** .
- **sauf quelques cas particuliers (argiles néoformées), les roches sédimentaires ne se « ferment jamais », il y a sans arrêt des échanges d'éléments ce qui interdit leur datation par les techniques de radiochronologie.**

- Si P_0 est le nombre d'atomes pères présents initialement et P le nombre restant à l'instant t , la résolution de l'équation différentielle donne :

$$P(t) = P_0 e^{-\lambda t} \text{ d'où } P_0 = P(t) e^{\lambda t}$$

- Si F_0 est le nombre d'atomes fils présents initialement dans le minéral, le nombre d'atomes fils présents à **l'instant t , F** , est donné par:

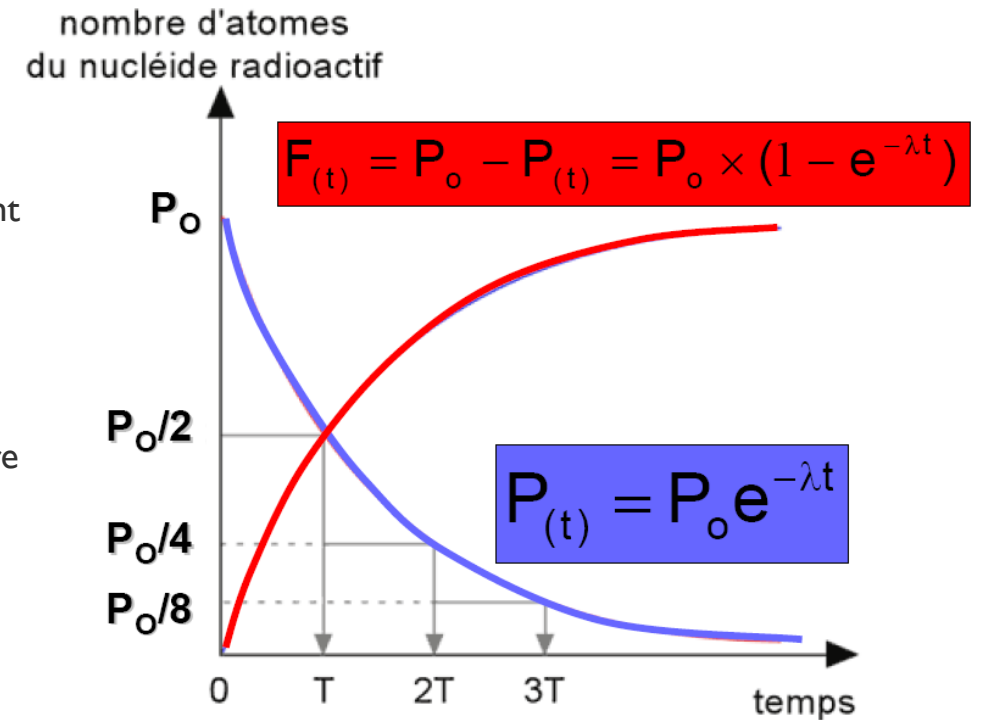
$$F(t) = F_0 + (P_0 - P(t))$$

- Ce qui revient à écrire

$$F(t) = F_0 + (P_0 - P_0 e^{-\lambda t}) = F_0 + P_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t})$$

- Ou encore:

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



D'après Crystèle Vérati, les temps géologiques. Geoazur UMR 7329



- Si P_0 est le nombre d'atomes pères présents initialement et P le nombre restant à l'instant t,

$$P(t) = P_0 e^{-\lambda t} \text{ d'où } P_0 = P(t) \cdot e^{\lambda t}$$

- On introduit la **période ou demi-vie, notée T** : c'est le temps au bout duquel il ne reste plus que la moitié de l'élément père :

➤ $P(T) = P_0 / 2$ soit $T = \ln 2 / \lambda$

- Le tableau ci-contre propose quelques couples utilisés en radiochronologie :

Isotope père	rayonnement	Isotope fils	Période T (an)	λ	Minéraux datés
$^{238}_{92}\text{U}$	$8\alpha \ 6\beta^-$	$^{206}_{92}\text{Pb}$	$4,53 \cdot 10^9$	$1,54 \cdot 10^{-10}$	Minerais de U et Th
$^{235}_{92}\text{U}$	$7\alpha \ 4\beta^-$	$^{207}_{92}\text{Pb}$	$0,73 \cdot 10^9$	$9,72 \cdot 10^{-10}$	Minéraux riches en U et Th: zircons
$^{232}_{92}\text{Th}$	$6\alpha \ 4\beta^-$	$^{208}_{92}\text{Pb}$	$13,9 \cdot 10^9$	$4,99 \cdot 10^{-11}$	
$^{87}_{37}\text{Rb}$	β^-	$^{87}_{38}\text{Sr}$	$47 \cdot 10^9$ $49,9 \cdot 10^9$	$1,39 \cdot 10^{-11}$ $1,47 \cdot 10^{-11}$	Biotite Muscovite
$^{40}_{19}\text{K}$	$+e^- + \gamma$ β^-	$^{40}_{18}\text{Ar}$ $^{40}_{20}\text{Ca}$	$1,27 \cdot 10^9$	$58 \cdot 10^{-10}$ $4,72 \cdot 10^{-10}$	Feldspath Amphibole Pyroxène Glauconite
$^{14}_6\text{C}$	β^-	$^{14}_7\text{N}$	5 730	$1,2 \cdot 10^{-4}$	Bois, os, coquilles ...

Figure 23 : quelques isotopes utilisés en radiochronologie

Fermeture = fin d'apport d'isotopes radioactifs et radiogéniques dans le cristal

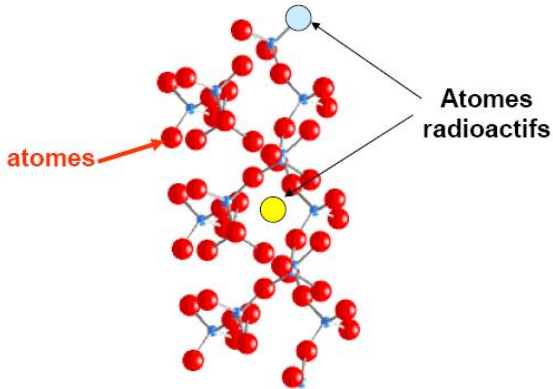


Intégration des éléments radioactifs dans les systèmes cristallins

Comportement en système fermé

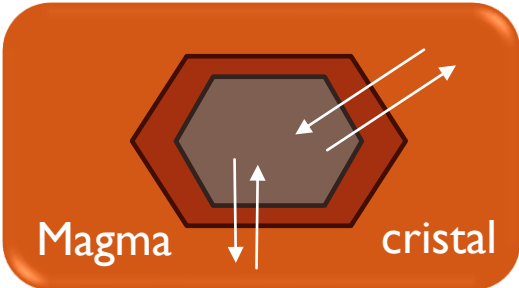


Concentrations dans les minéraux = qq ppm

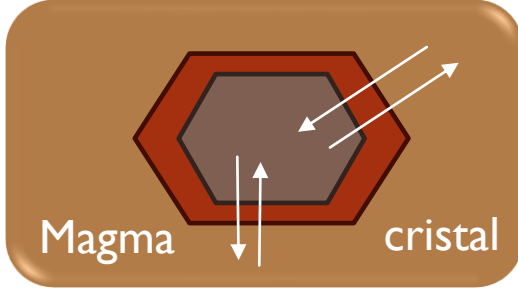


éléments radioactifs en « impuretés » dans les systèmes cristallins (substitution) ou en éléments majeurs

$T^{\circ}C > T^{\circ}C_f$

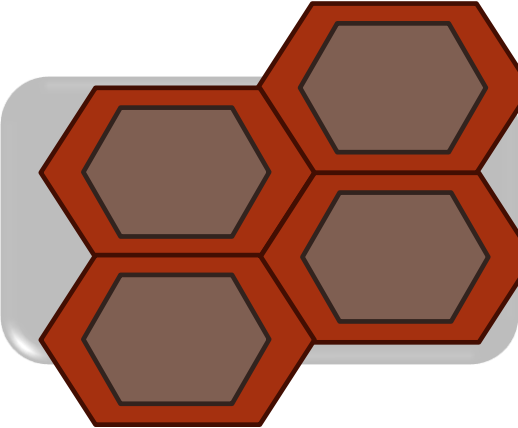


$T^{\circ}C = T^{\circ}C_f$

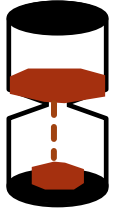
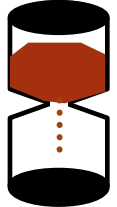
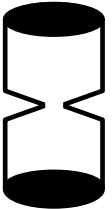


Fermeture du système
⇒ Début de l'horloge

$T^{\circ}C < T^{\circ}C_f$



Fonctionnement de l'horloge
Décroissance radioactive



1 0,1 H Hydrogène																	2 4,0 He Hélium															
3 6,9 Li Lithium	4 9,0 Be Béryllium																	5 10,8 B Bore	6 12,0 C Carbone	7 14,0 N Azote	8 16,0 O Oxygène	9 19,0 F Fluor	10 20,2 Ne Néon									
11 23,0 Na Sodium	12 24,3 Mg Magnésium																	13 27,0 Al Aluminium	14 28,1 Si Silicium	15 31,0 P Phosphore	16 32,1 S Soufre	17 35,5 Cl Chlore	18 39,9 Ar Argon									
19 39,1 K Potassium	20 40,1 Ca Calcium	21 45,0 Sc Scandium	22 47,9 Ti Titane	23 50,9 V Vanadium	24 52,0 Cr Chrome	25 52,9 Mn Manganèse	26 55,8 Fe Fer	27 58,9 Co Cobalt	28 63,5 Ni Nickel	29 65,5 Cu Cuivre	30 63,4 Zn Zinc	31 69,7 Ga Galium	32 72,6 Ge Germanium	33 74,9 As Arsenic	34 79,0 Se Sélénium	35 79,9 Br Brome	36 83,8 Kr Krypton															
37 85,5 Rb Rubidium	38 87,6 Sr Strontium	39 88,9 Y Yttrium	40 91,2 Zr Zirconium	41 92,9 Nb Niobium	42 95,9 Mo Molybdène	43 99 Tc Technétium	44 101,1 Ru Ruthénium	45 102,9 Rh Rhodium	46 106,4 Pd Palladium	47 107,9 Ag Argent	48 112,4 Cd Cadmium	49 114,8 In Indium	50 118,7 Sn Étain	51 121,8 Sb Antimoine	52 127,6 Te Tellure	53 166,9 I Iode	54 131,3 Xe Xénon															
55 132,9 Cs Césium	56 137,3 Ba Baryum		72 178,5 Hf Hafnium	73 180,9 Ta Tantale	74 183,9 W Tungstène	75 186,2 Re Rhénium	76 190,2 Os Osmium	77 192,2 Ir Iridium	78 195,1 Pt Platine	79 197,0 Au Or	80 200,6 Hg Mercure	81 204,4 Tl Thallium	82 207,2 Pb Plomb	83 209,0 Bi Bismuth	84 210 Po Polonium	85 210 At Astate	86 222 Fr Francium															
87 223 Fr Francium	88 226 Ra Radium		104 261 Rf Rutherfordium	105 262 Db Dubnium	106 266 Sg Seaborgium	107 264 Bh Bohrium	108 269 Hs Hassium	109 268 Mt Meitnerium	110 271 Ds Darmstadtium	111 272 Rg Roentgenium	112 285 Uub Ununbium	113 284 Uut Ununtrium	114 289 Uuq Ununquadium	115 288 Uup Ununhexium	116 292 Uuh Ununpentium	117 Uus Ununseptium	118 Uuo Ununoctium															
																		57 138,9 La Lanthane	58 140,1 Ce Cérium	59 140,9 Pr Praséodyme	60 144,2 Nd Néodyme	61 145 Pm Prométhium	62 150,4 Sm Samarium	63 152,0 Eu Europium	64 157,3 Gd Gadolinium	65 158,9 Tb Terbium	66 162,9 Dy Dyprosium	67 164,9 Ho Holmium	68 167,3 Er Erbium	69 168,9 Tm Thulium	70 173,0 Yb Ytterbium	71 175,0 Lu Lutétiun
																		89 227 Ac Actinium	90 232 Th Thorium	91 231 Pa Protactinium	92 238 U Uranium	93 237 Np Neptunium	94 244 Pu Plutonium	95 243 Am Américium	96 247 Cm Curium	97 247 Bk Berkélium	98 251 Cf Californium	99 254 Es Einsteinium	100 253 Fm Fermium	101 256 Md Mendéléviun	102 254 No Nobélium	103 257 Lw Lawrencium

Numéro atomique

Masse atomique

Symbole atomique

Nom

1 0,1 H Hydrogène

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des événements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. **Principe de la radiochronologie**
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS

A. PRINCIPE DE LA RADIOCHRONOLOGIE

2. Choix de l'isotope



- En fonction de la **période T** de l'élément
- En fonction de la **performance du système de dosage** (ce qui fixe le plus petit $N(t)$ dosable)
- En fonction de l'**âge présumé** de l'échantillon à analyser

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. **Principe de la radiochronologie**
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode potassium/argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

A. PRINCIPE DE LA RADIOCHRONOLOGIE

3. Choix de la méthode



- Cas I: la quantité d'éléments pères à la fermeture du système est connue (P_0)

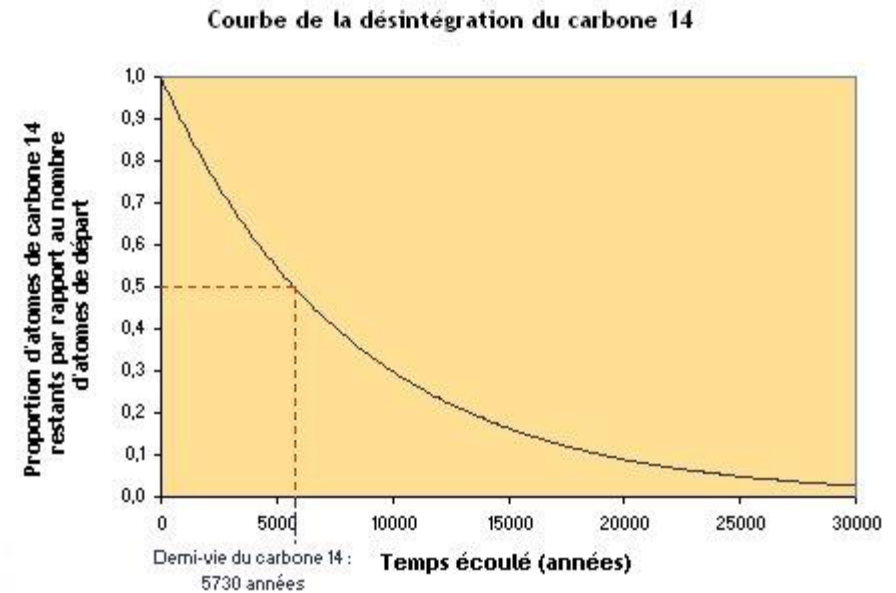
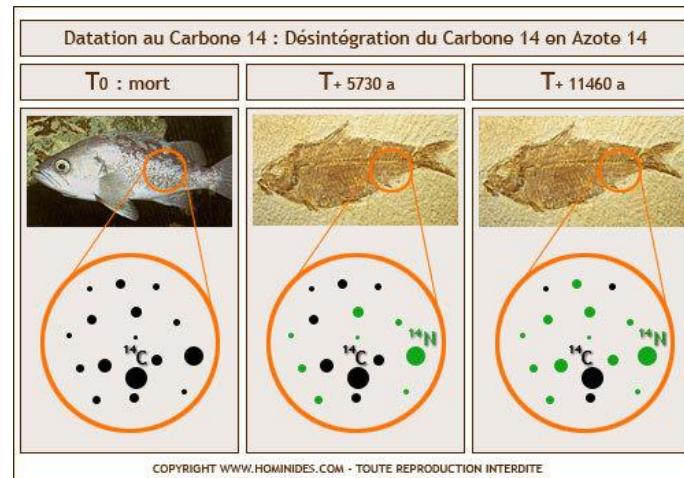
Exemple: principe d'actualisme appliqué au ^{14}C

$$\Rightarrow P(t) = P_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ d'où}$$

$$\Rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln(P_0/P(t))$$

$$\Rightarrow ^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} \text{ avec } T = 5\,730 \text{ ans}$$

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



Le drakkar de Roskilde (973 ans)

A. PRINCIPE DE LA RADIOCHRONOLOGIE

3. Choix de la méthode



- Cas 2: la quantité d'éléments pères à la fermeture du système n'est pas connue (P_0) Ex: méthode K/Ar

$P_0 = P(t) + F(t)$ ssi $F(t)$ n'existe pas à la fermeture du système

Or on sait que $F(t) = F_0 + P(t) \cdot (e^{\lambda t} - 1)$

Avec $F_0 = 0$ car $[^{40}\text{Ar}]_0 = 0$ (l'argon étant un gaz, il s'échappe facilement du réseau cristallin lors de la cristallisation à température élevée).

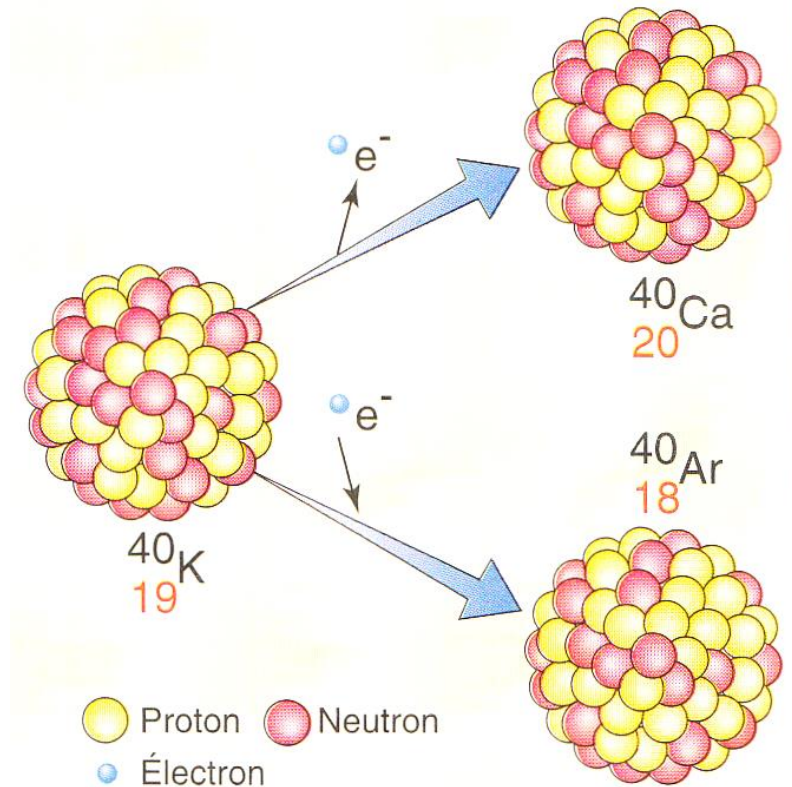
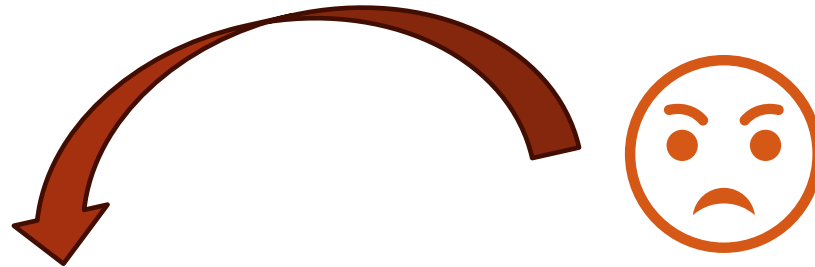
On a $F(t) = P(t) \cdot (e^{\lambda t} - 1)$

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

D'où $\frac{F(t)}{P(t)} + 1 = e^{\lambda t}$

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

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



$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ par désintégration β^+ et $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ par désintégration β^-

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. **Principe de la radiochronologie**
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. **Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$**
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. **méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$**
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

B. METHODE POTASSIUM/ARGON, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

I. La désintégration du ^{40}K

- Lors de leur formation à haute $T^\circ\text{C}$, les minéraux et les roches incorporent des atomes pères et fils.
- Le **potassium** étant un **alcalin**, celui-ci intégrera facilement les feldspaths alcalins ou les micas riches en K. On le trouvera plus facilement et en plus grande abondance dans la **croûte continentale**.
- Avec le **refroidissement**, ceux-ci sont piégés dans le réseau cristallin : le système se **ferme**, le radiochronomètre s'enclenche, les quantités **P_0 et F_0 sont établies**.
- Le potassium 40 (^{40}K) radioactif (élément père) se désintègre en deux éléments fils :
 - Par **désintégration β^-** (transformation d'un neutron en un proton et un électron), le ^{40}K va donner du ^{40}Ca , cette réaction équivaut à 89 % du ^{40}K désintégré.
 - Par **désintégration β^+** (assimilation d'un électron de la couche interne par le noyau et transformation d'un neutron en proton), le ^{40}K va donner du ^{40}Ar , cette réaction équivaut à 11 % du ^{40}K désintégré.

- L'argon 40 (^{40}Ar) est généré avec 1 période de demi-vie de 1,25 milliard d'années (Ga).
- Dans le cas du couple potassium-argon (K/Ar), l'équation de désintégration est alors :

$$F(t) = F_0 + 0,11 \cdot P(t)(e^{\lambda t} - 1)$$

$$(^{40}\text{Ar})(t) = (^{40}\text{Ar})_0 + 0,11 \cdot ^{40}\text{K}(t)(e^{\lambda t} - 1)$$

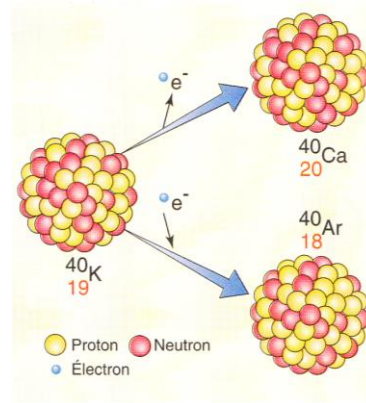
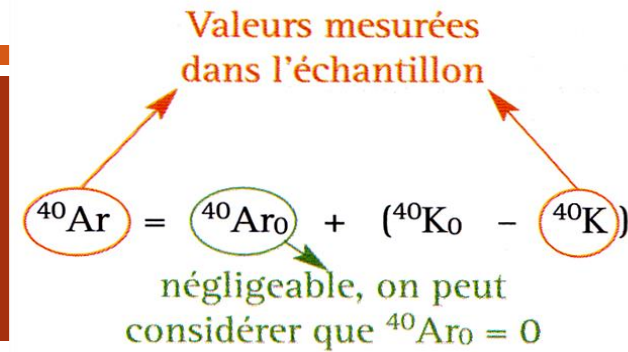
Avec $\lambda = 5,54 \cdot 10^{-10} \text{an}^{-1}$.

- L'argon est un gaz qui s'échappe facilement d'une lave en fusion arrivant en surface.
- La lave ne contient donc plus d'argon: **F_0 est nul** (en première approximation).

L'équation devient: $F(t) = 0,11 \cdot P(t)(e^{\lambda t} - 1)$

D'où $t \sim \frac{1}{\lambda} \ln(1 + 10 \cdot F(t)/P(t))$ avec $\lambda = 5,54 \cdot 10^{-10}$

- Le spectromètre de masse permet la mesure de P et F.
- Il ne reste plus qu'à calculer t.



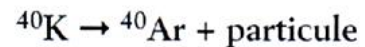
B. METHODE POTASSIUM/ARGON, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

I. La désintégration du ^{40}K



Le chronomètre potassium-argon.

Les lois de la désintégration radioactive fournissent des équations à deux inconnues: le temps écoulé depuis la fermeture du système (variable t , qui intéresse le géologue) et les quantités initiales d'atome père ou d'atome fils (P_0 ou F_0). L'objectif de la radiochronologie est de ne garder qu'une inconnue, le temps. Dans le cas du couple potassium-argon (K-Ar), la réaction de désintégration est :



Le chronomètre K-Ar est utilisé pour dater des roches volcaniques dont les minéraux silicatés sont riches en potassium. L'argon est un gaz qui s'échappe facilement d'une lave en fusion arrivant en surface. Elle ne contient donc plus d'argon: F_0 est nul. L'équation (4) devient :

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

Soit: $10F(t)/P(t)$

$$t = (1/\lambda) \ln (F/P + 1)$$

Le spectromètre de masse permet la mesure de P et F. Il ne reste plus qu'à calculer t.

Quelques données. Le Puy de Sancy représente le point culminant du Massif Central. Le couple potassium-argon a été utilisé pour dater la mise en place des laves qui se trouvent au sommet. Après analyse d'un échantillon au spectromètre de masse, on a mesuré une concentration en ^{40}K de $0,106 \cdot 10^{-6}$ mole/gramme et une concentration en ^{40}Ar de $2,056 \cdot 10^{-12}$ mole/gramme (d'après J.M. Cantagrel).



Les laves refroidies du massif du Sancy.



Dégagement de gaz par une fumerolle du volcan Erebus, en Antarctique.

L'Argon est un gaz qui s'échappe facilement de la lave en fusion

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

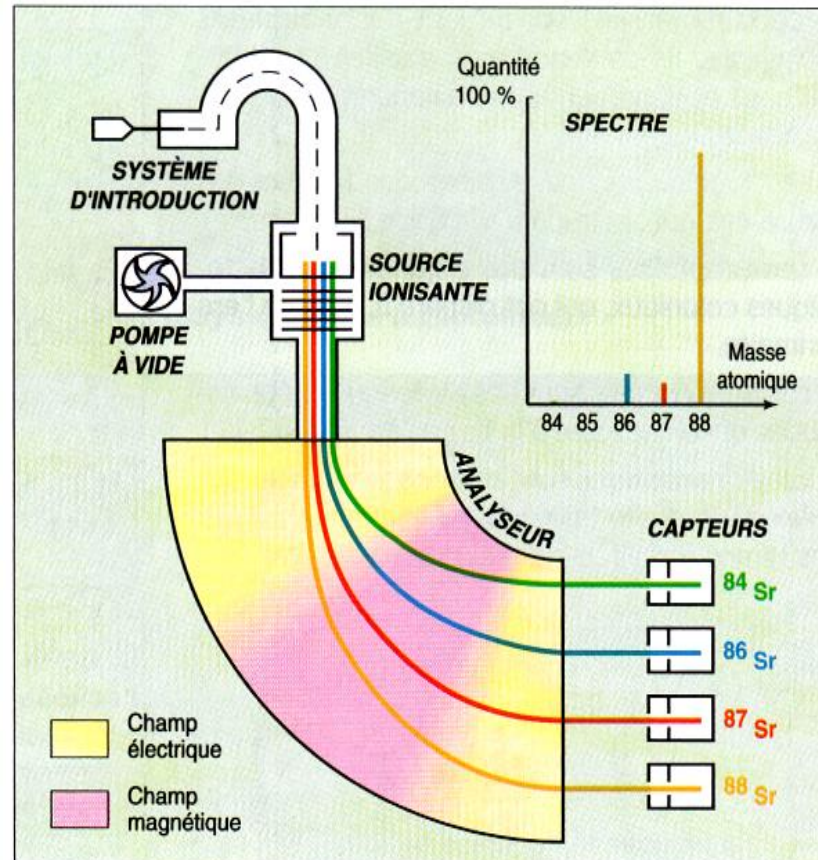
II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. **Principe de la radiochronologie**
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. **Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$**
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. **méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$**
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

B. METHODE POTASSIUM/ARGON, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

2. Mesure des quantités isotopiques par la spectrométrie de masse

- Le spectromètre de masse est un dispositif qui permet de **mesurer la composition isotopique d'un élément chimique**. Il a été inventé par Thomson et Aston (Nobel de chimie 1922).
- Dans une chambre à vide, on dépose le **mélange d'isotopes** sur un **filament** qu'on **chauffe**.
- Le chauffage **ionise** les atomes. (**Source ionisante**)
- Ces ions sont soumis à une **tension électrique** de 3 à 20 kiloVolts, ce qui les met en mouvement et les **accélère** en direction d'un **électroaimant** dont le champ électromagnétique est de direction perpendiculaire à celle du champ électrique. (**Déviateur**=secteur magnétique = analyseur)
- Le champ électromagnétique dévie le courant ionique qui adopte une trajectoire courbe.



Principe d'un spectromètre de masse.



Un spectromètre de masse.

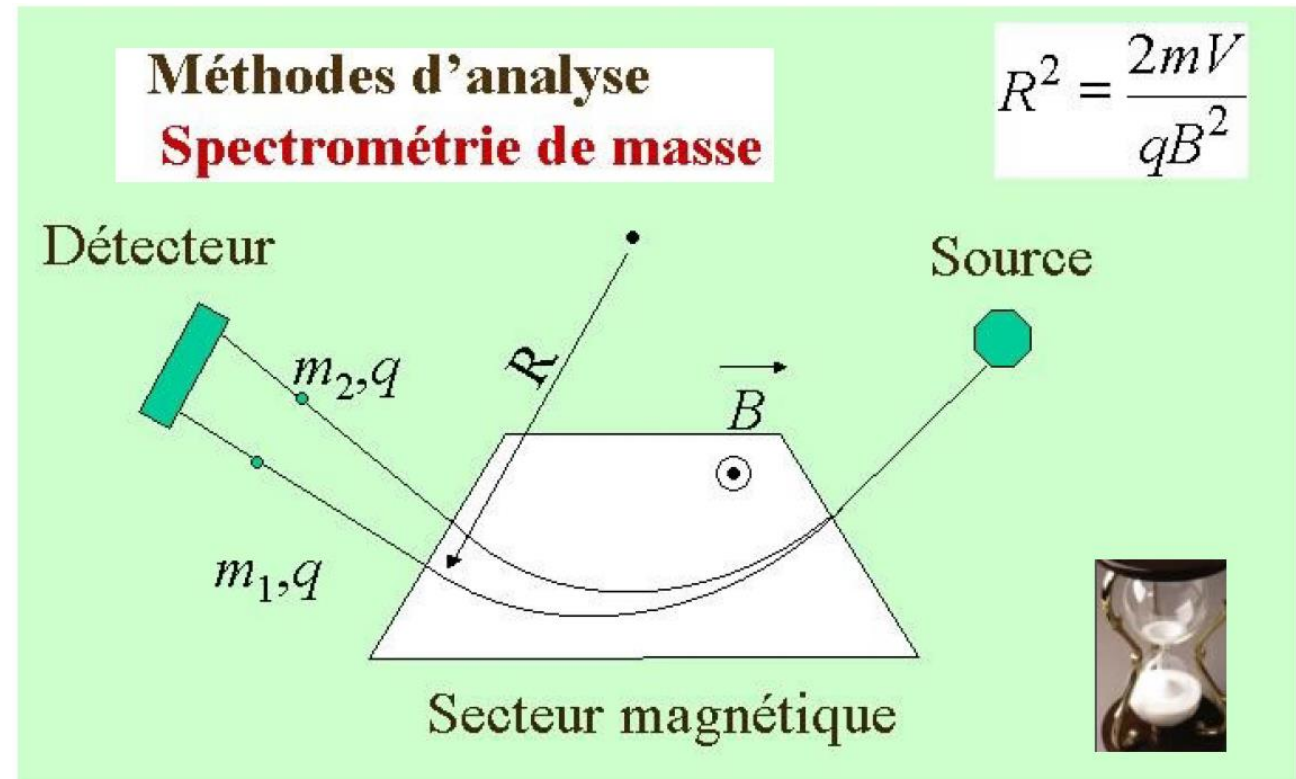


B. METHODE POTASSIUM/ARGON, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

2. Mesure des quantités isotopiques par la spectrométrie de masse



- Les isotopes sont tous déviés par le secteur magnétique, le **rayon de courbure est fonction** de la racine carrée de la tension électrique, de l'intensité du champ magnétique, et **de la masse** de l'isotope. Plus l'isotope est lourd, plus son rayon de courbure est grand.
- Tous les ions de même masse et de même charge, donc les isotopes identiques, arrivent à un même **point de collecte (détecteur= capteur)** qui en mesure la quantité.
- Le résultat est enregistré et présenté par une interface informatique sous la forme d'un **spectre** qui **représente des rapports isotopiques**, c'est-à-dire les teneurs des différents isotopes par rapport à un isotope stable pris comme référence.
- Par exemple on mesure des rapports de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ou encore $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$.



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. **Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique**
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

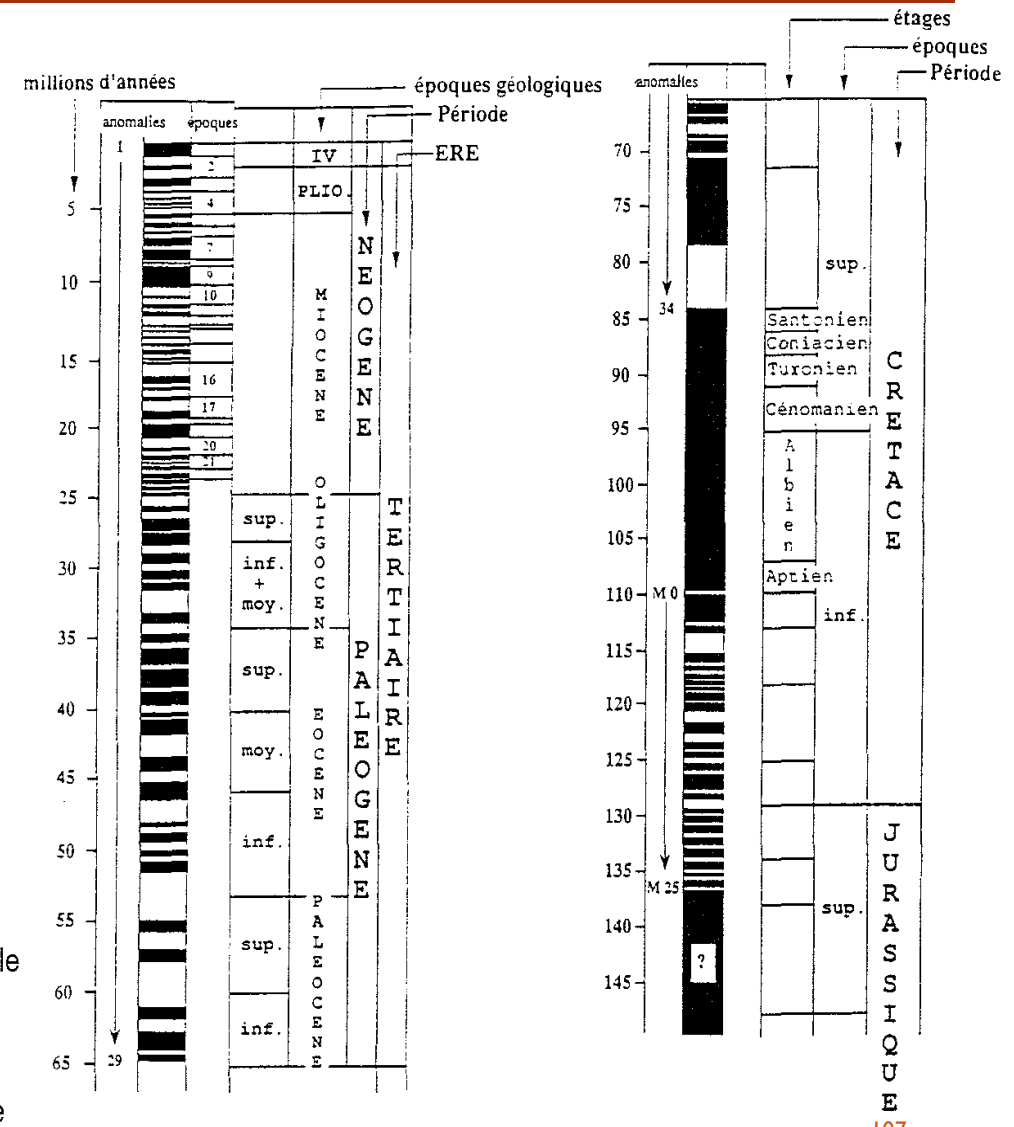
- A. **Principe de la radiochronologie**
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. **Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$**
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- B. méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia



B. METHODE POTASSIUM/ARGON, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$

3. Les limites de la méthode K/Ar

- L'argon est un gaz => diffusion possible => sous-estimation de l'âge réel
- L'argon est un gaz => contamination possible de l'échantillon par Ar de l'air => surestimation de l'âge réel ...
- Le fait de dire qu'il n'y avait **pas d'Argon initial n'est pas exact**, en réalité, il y en a un peu, et des méthodes existent pour évaluer cette teneur initiale.
- **L'argon est gazeux**, on mesure sa teneur par un spectromètre de masse en phase gazeuse, **K est solide**, on mesure sa teneur par un spectromètre de masse en phase solide, il faut donc 2 appareils, et deux échantillons différents, tout cela est source d'erreurs de mesures.
- Cette méthode **ne s'applique pas aux roches sédimentaires**, elle se pratique sur des échantillons (roches ou minéraux) présentant des affinités aux alcalins.
- Aujourd'hui, la méthode K / Ar n'est plus trop utilisée, mais elle a eu son heure de gloire car c'est cette méthode qui a permis de caler des dates absolues à **l'échelle magnétostratigraphique**, cette même échelle qui a permis d'élaborer la théorie de l'expansion océanique.
- Des études sur Hawaii, sur le mont Fuji-Yama, ou en Auvergne ont permis de dater les inversions du champ magnétique terrestre.



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- C. Méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

I. Le couple Rb/Sr

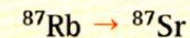


- Cas 3: (P_0) n'est pas connue et il existe des éléments fils à la fermeture du système

Exemple: le couple Rb/Sr

- Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ est fréquemment utilisé pour dater les roches magmatiques ou métamorphiques les plus anciennes.
- Le ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr par désintégration β^-
- La période de demi-vie de **48,8 Ga** autorise des datations d'objets très anciens.
- Méthode inadaptée aux roches plus récentes que 10 Ma puisque la quantité de Sr radiogénique (^{87}Sr) serait trop faible.
- **Rb = alcalin, comme le potassium** ; il intègre préférentiellement les minéraux alcalins comme les **Feldspaths alcalins ou les micas**.
- Le **Sr** est un **alcalinoterreux**, son comportement est proche de celui du **calcium**.

Rubidium et strontium sont des éléments fréquents dans les roches de la croûte continentale. Le strontium présente deux isotopes stables : ^{87}Sr et ^{86}Sr . La quantité initiale de ^{86}Sr reste stable au cours du temps tandis que celle de ^{87}Sr augmente par désintégration du ^{87}Rb .



avec :

demi-vie = $48,8 \cdot 10^9$ ans ;

$\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \cdot \text{an}^{-1}$.

Lors de leur formation, les minéraux incorporent ces trois isotopes, mais pas dans les mêmes proportions, ils ont donc des compositions isotopiques initiales différentes. Au cours du temps, ^{87}Rb diminue, ^{87}Sr augmente et ^{86}Sr reste stable (*tableau ci-contre*).

	Minéral 1	Minéral 2	Minéral 3
t_0			
Actuel			

^{87}Rb

^{87}Sr

^{86}Sr

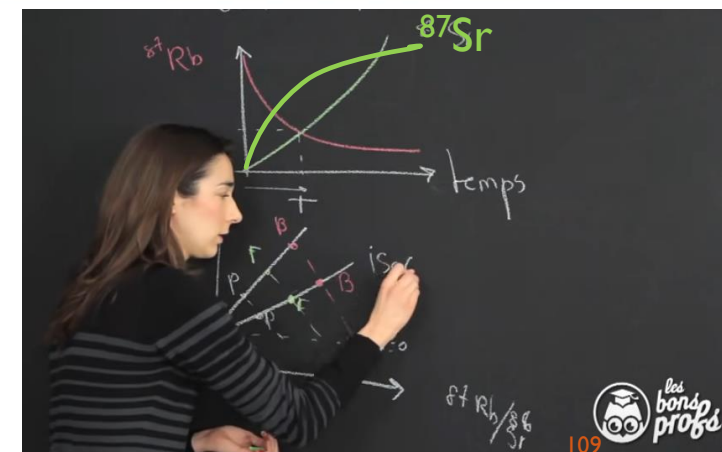
élément désintégré

élément radiogénique

La décroissance de la quantité initiale de ^{87}Rb peut donc s'exprimer ainsi :

$$^{87}\text{Rb} = ^{87}\text{Rb}_0 e^{-\lambda t}$$

Cependant, on ne connaît pas la quantité initiale de $^{87}\text{Rb}_0$ et on ne peut pas la déduire de la quantité de ^{87}Sr car, contrairement au couple K/Ar, $^{87}\text{Sr}_0$ n'est pas nulle.



C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

I. Le couple Rb/Sr



- Ce sont essentiellement les minéraux des roches métamorphiques ou magmatiques qui contiennent ces éléments et peuvent être datés ainsi.
- Lors de la fermeture du système, le **minéral** va incorporer l'élément père ^{87}Rb mais **aussi** une certaine quantité d'élément fils ^{87}Sr déjà présent dans le magma, ces quantités initiales sont inconnues. Quand on mesure au sein du minéral au temps t , c'est-à-dire aujourd'hui, on a :

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

- On a **deux inconnues**, $^{87}\text{Sr}_0$ et l'âge t qu'on cherche à déterminer !

- On divise tout par $^{86}\text{Sr} =$ **normalisation**.
- $^{86}\text{Sr} =$ **stable**, sa quantité initiale est la même au cours du temps.
- On obtient alors :

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

Cette équation équivaut à celle d'une droite de type $y = ax + b$

$$\text{Avec } y = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)(t) \quad b = \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)_0 \quad a = (e^{\lambda t} - 1) \text{ et}$$
$$x = \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)(t)$$

- On peut mesurer par spectrométrie les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ et les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.
- Rappelons que $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ et t sont inconnus.

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- C. Méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

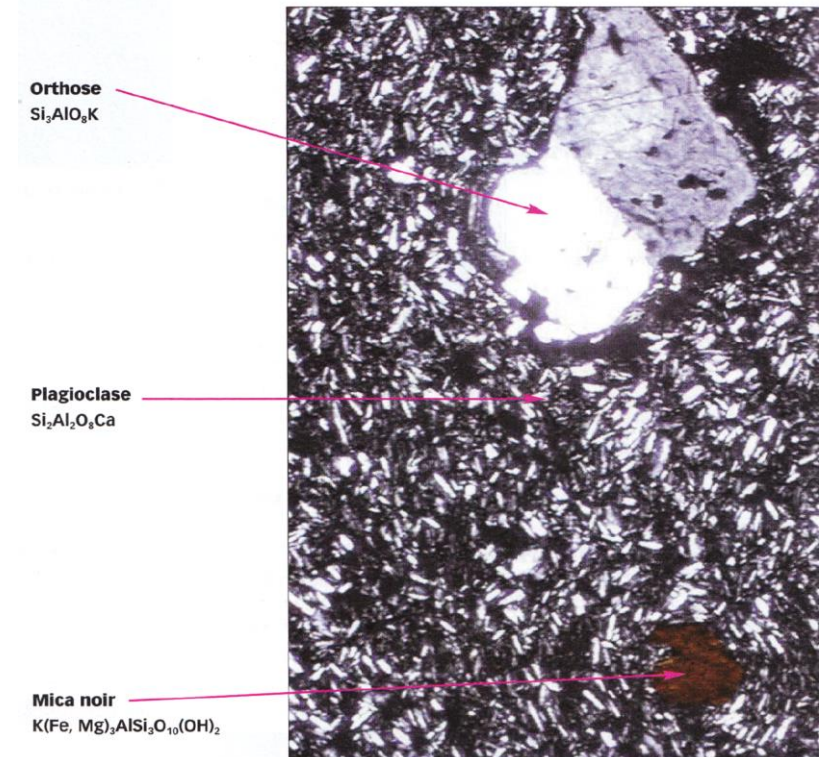
C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone



	Minéral 1	Minéral 2	Minéral 3
t_0			
Actuel			

- Pour dater une roche (magmatique ou métamorphique), on prélève soit des **fragments** de la **même roche**, soit des **minéraux différents de la même roche**, on peut **aussi coupler** les 2 échantillonnages.
- Les minéraux facilement exploitables seront **les micas et les feldspaths**.
- Au temps $t=0$:
 - ^{87}Rb et ^{86}Sr étant deux éléments différents par leur comportement chimique, leur rapport isotopique $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ sera **différent** selon les **espèces minéralogiques**. **Rb** est un alcalin comme K, il est plus **abondant** dans les **micas** que dans les **feldspaths**.
- Par contre, ^{87}Sr et ^{86}Sr sont deux isotopes très **proches en masse** et ont les **mêmes propriétés** chimiques. ^{87}Sr et ^{86}Sr vont intégrer les différentes structures cristallines sans distinction, de la même manière. Il n'y a **pas de fractionnement isotopique** pour ces deux éléments.
- Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est **invariable** quel que soit le minéral ou la roche dans son ensemble.
- **Donc à $t=0$, tous les points** de mesure représentés sur un diagramme $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$ **s'alignent sur une droite horizontale**.
- Dès que le système se ferme, dans chaque minéral, les rapports isotopiques évoluent de la même façon sur des droites de coefficient -1 (donc pente de 45°) si les axes sont orthonormés.
- Si bien qu'aujourd'hui, tous ces points sont alignés sur une droite dite **droite isochrone**, dont la pente n'est autre que $(e^{\lambda t} - 1)$, il suffit donc de mesurer la pente pour en déduire t !



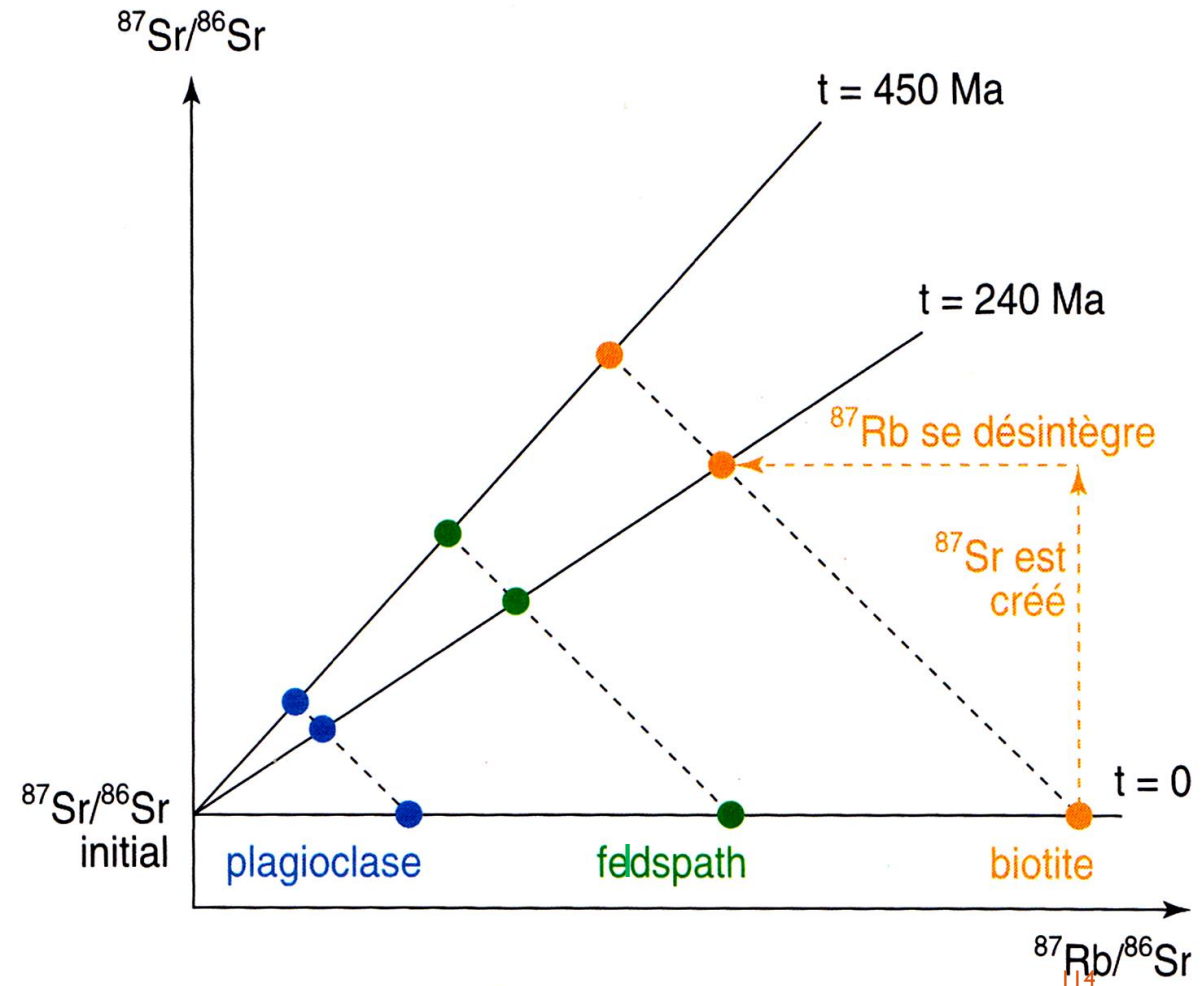
C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone



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

- Au temps $t=0$:
- ^{87}Rb et ^{86}Sr étant deux éléments différents par leur comportement chimique, leur rapport isotopique $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ sera **différent** selon les **espèces minéralogiques**. Rb est un alcalin comme K, il est plus **abondant** dans les **micas** que dans les **feldspaths**.
- Par contre, ^{87}Sr et ^{86}Sr sont deux isotopes très **proches en masse** et ont les **mêmes propriétés** chimiques. ^{87}Sr et ^{86}Sr vont intégrer les différentes structures cristallines sans distinction, de la même manière. Il n'y a **pas de fractionnement isotopique** pour ces deux éléments.
- Le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est **invariable** quel que soit le minéral ou la roche dans son ensemble.
- **Donc à $t=0$, tous les points** de mesure représentés sur un diagramme $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = f(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})$ **s'alignent sur une droite horizontale**.
- Dès que le système se ferme, dans chaque minéral, les rapports isotopiques évoluent de la même façon sur des droites de coefficient -1 (donc pente de 45°) si les axes sont orthonormés.
- Si bien qu'aujourd'hui, tous ces points sont alignés sur une droite dite **droite isochrone**, dont la pente n'est autre que $(e^{\lambda t} - 1)$, il suffit donc de mesurer la pente pour en déduire t !



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- C. Méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

3. Application sur un exemple : le granite du mont Aigoual en Lozère.



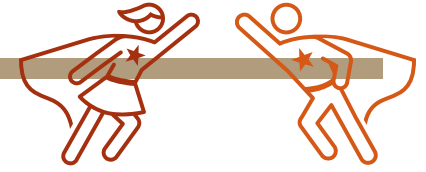
Le granite du mont Aigoual, en Lozère, a été daté par le couple Rubidium-Strontium en 1977 par Vialette et Sabourdy. Les résultats analytiques obtenus sur un échantillon de roche totale et des échantillons de feldspath potassique, de plagioclase et de biotite issus de la même roche sont les suivants :



	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
• Roche totale	2,6	0,7214
• Feldspath K	0,97	0,7143
• Plagioclase	3,05	0,723
• Biotite	9,5	0,752

Reportez ces résultats dans un diagramme isochrone et retrouvez l'âge absolu du granite de l'Aigoual. On donne : $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$

3. Application sur un exemple : le granite du mont Aigoual en Lozère.

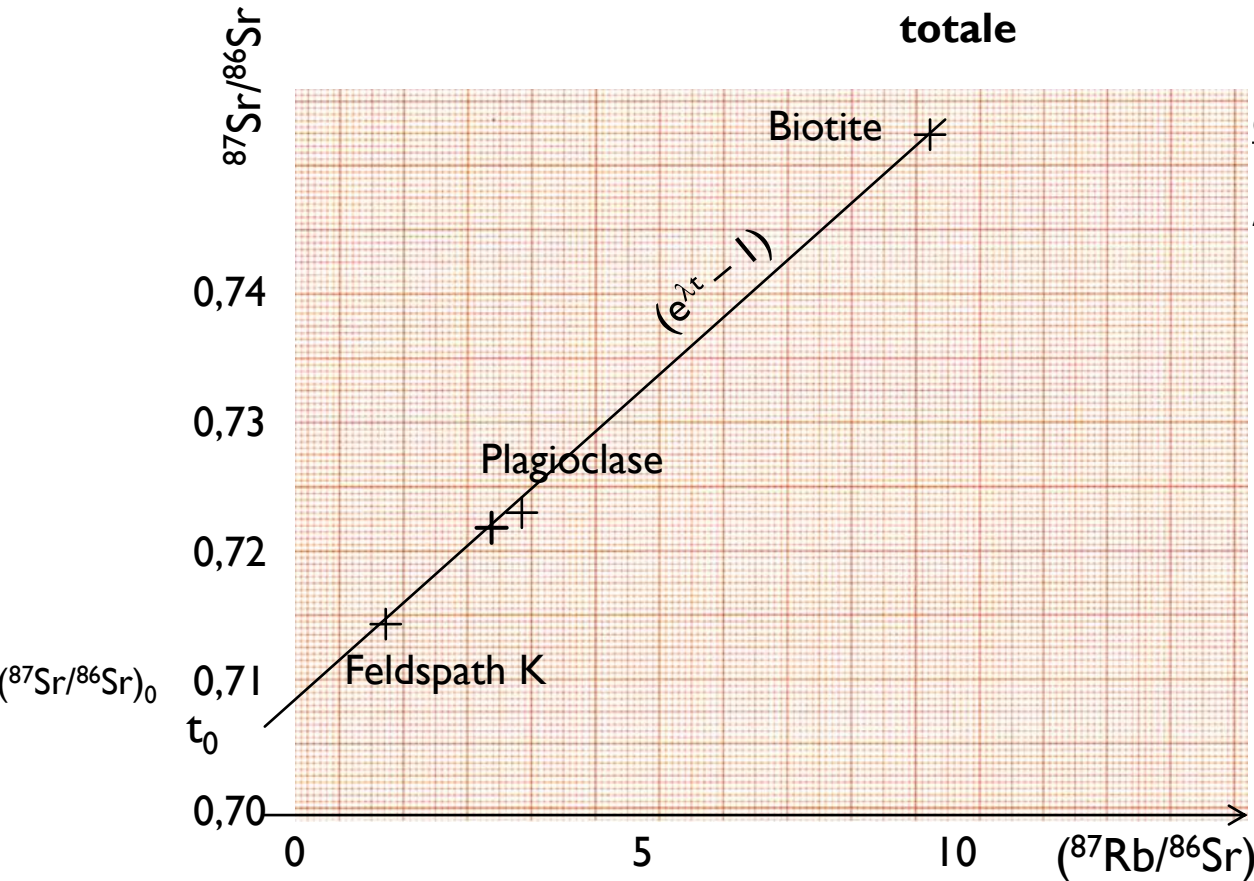


Roche totale

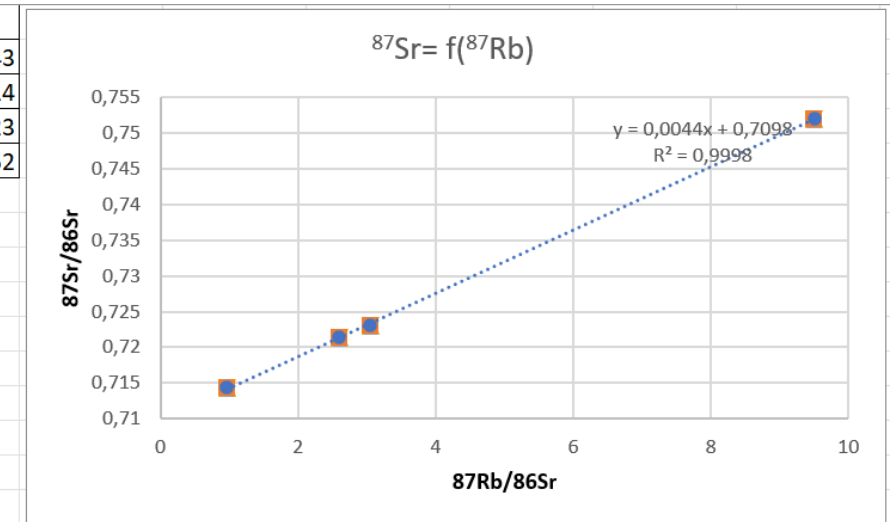
$$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)(t) = \left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)(0) + \left(\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}\right)(t)(e^{\lambda t} - 1)$$

Cette équation équivaut à celle d'une droite de type $y=ax+b$.

Avec $y = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ $b = (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_0$ $a = (e^{\lambda t} - 1)$ et $x = (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_t$



Rb/Sr	Sr/Sr
0,97	0,7143
2,6	0,7214
3,05	0,723
9,5	0,752



On mesure la pente : $(e^{\lambda t} - 1) = 0,0044$ et on connaît $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$

$t = \ln(1,0044) / 1,42 \cdot 10^{-11}$

$t = 309 \text{ Ma}$

PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des événements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

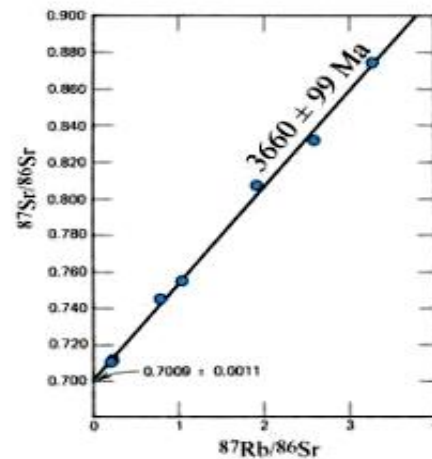
- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- C. Méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- C. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

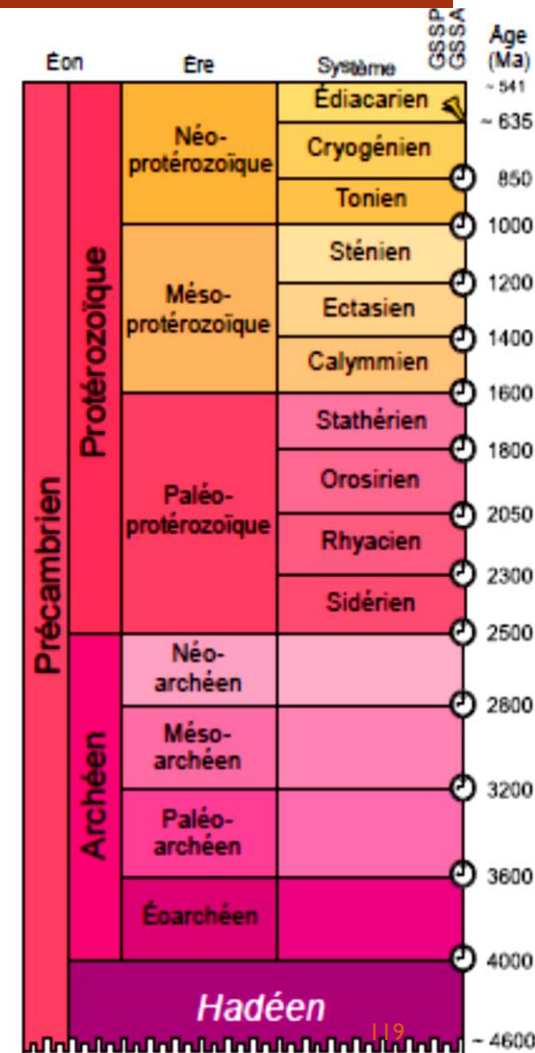
4. Quelques applications célèbres du couple Rb/Sr

- sur l'échelle chronostratigraphique: pas de GSSP *Global Stratigraphic Section and Point* (pas de Golden spike) pour le précambrien...
- ... mais l'échelle est subdivisée radiochronologiquement.
- ⇒ En absence de fossile le découpage de la Terre très ancienne a donc requis l'utilisation notamment du couple Rb/Sr.
- ⇒ Détermination de la limite inférieure de l'Archéen

Les âges Rb/Sr célèbres



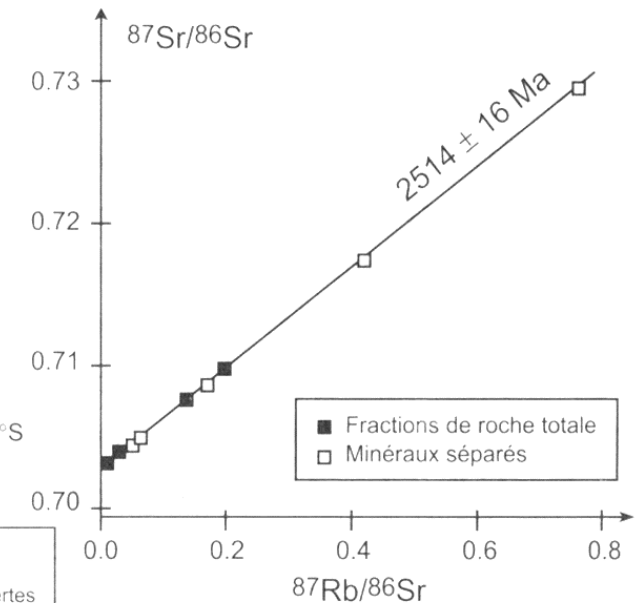
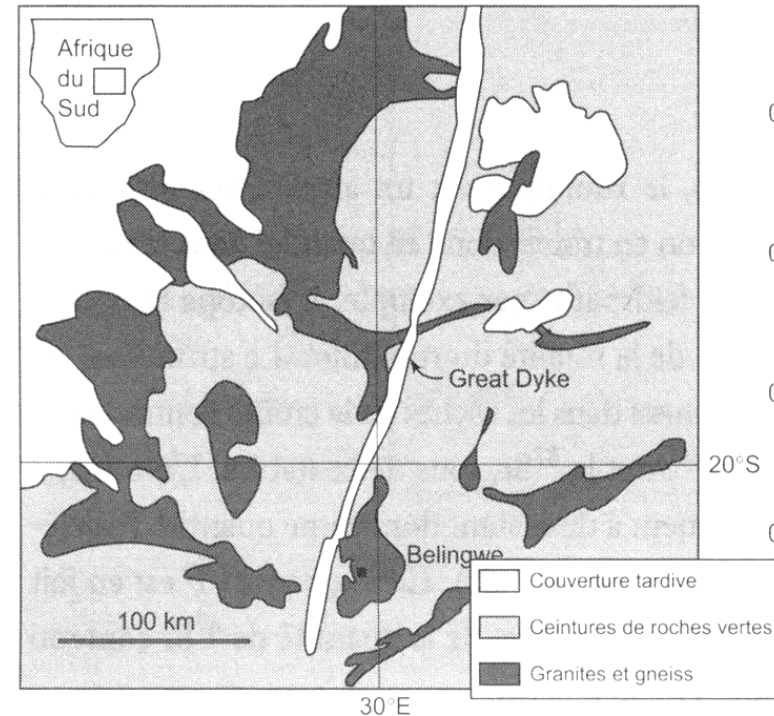
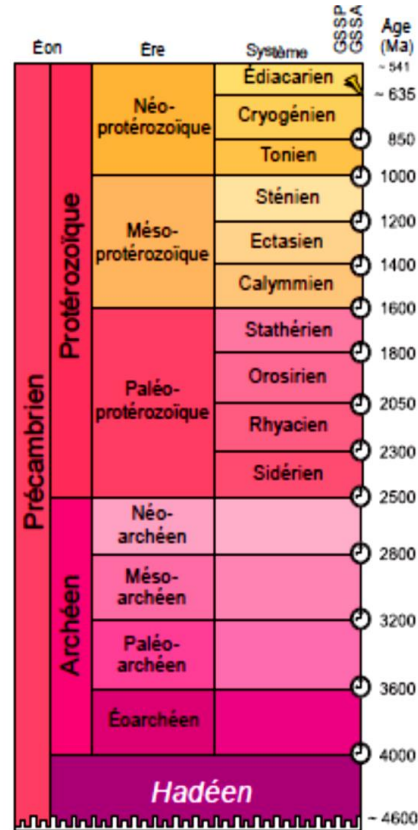
L'âge des gneiss d'Amitsoq a été déterminé par la méthode Rb/Sr sur roche totale !



C. MÉTHODE RUBIDIUM-STRONTIUM, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$

4. Quelques applications célèbres du couple Rb/Sr

- Le grand dyke (filon volcanique) du Zimbabwe a permis par sa datation de délimiter limite supérieure de l'archéen.
- Les points déterminés sur des minéraux isolés s'alignent avec les points déterminés sur des échantillons de la roche totale sur une **même droite isochrone**.
- Sa pente donne un âge de 2,5 milliards d'années.



PLAN

I. CHRONOLOGIE RELATIVE : SITUER LES ÉVÈNEMENTS LES UNS PAR RAPPORT AUX AUTRES

- A. Etudes des relations géométriques : positionner des évènements les uns par rapport aux autres
 - 1. Principe de superposition
 - 2. Principe de recoupement
 - 3. Principe d'inclusion
 - 4. Principe de continuité latérale
 - 5. Bilan
- B. Définir des intervalles de temps grâce au contenu fossilifère
 - 1. La notion de fossiles
 - 2. Fondements de la biostratigraphie : continuité et irréversibilité de l'évolution biologique
 - 3. La biostratigraphie et le principe d'identité paléontologique
- C. Déterminer des étages, établir des coupures et définir une échelle chronostratigraphique
 - 1. L'étage se définit à partir de son stratotype
 - 2. Etablissement de coupures à l'échelle mondiale grâce aux crises biologiques
 - 3. Bilan: l'échelle chronostratigraphique

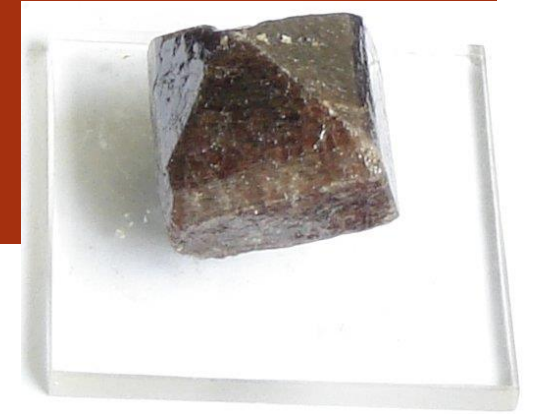
II. DATATION ABSOLUE : EVALUER DES DUREES ET FOURNIR DES AGES ABSOLUS (RADIOCHRONOLOGIE)

- A. Principe de la radiochronologie
 - 1. Loi de décroissance radioactive
 - 2. Choix de l'isotope
 - 3. Choix de la méthode
- B. Méthode Potassium/Argon, $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$
 - 1. La désintégration du ^{40}K
 - 2. Mesure des quantités isotopiques par spectrométrie de masse
 - 3. Discussion
- C. Méthode rubidium-strontium, $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 1. Le couple $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$
 - 2. Datation absolue par construction graphique, la droite isochrone
 - 3. Application (granite du Mont Aigoual)
 - 4. Applications célèbres
- D. La méthode U:Pb: Concordia et Discordia

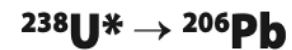
D. LA METHODE U/Pb : CONCORDIA ET DISCORDIA

I. Principe : une concordance d'âges des deux couples U/Pb 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.
- Lors de la cristallisation des zircons, le **Pb initial est négligeable devant l'uranium** ($Pb_0 \ll U(t)$) conduisant à l'hypothèse $F_0 = 0$
- L'équation $F(t) = F_0 + P(t)(e^{\lambda t} - 1)$ devient donc $F(t) = P(t)(e^{\lambda t} - 1)$



Le Zircon est un néosilicate



$$\lambda = \lambda_{238} = 9,8 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

$$T_{238} = 4,5 \text{ Ga}$$

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U} \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

$$t = (1/\lambda) \cdot \ln [1 + (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})]$$



$$\lambda' = \lambda_{235} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

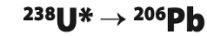
$$T_{235} = 700 \text{ Ma}$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U} \cdot (e^{\lambda' t} - 1)$$

$$t = (1/\lambda') \cdot \ln [1 + (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})]$$

D. LA METHODE U/Pb : CONCORDIA ET DISCORDIA

I. Principe : une concordance d'âges des deux couples U/Pb déterminée par une courbe de référence

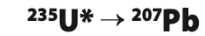


$$\lambda = \lambda_{238} = 9,8 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

$$T_{238} = 4,5 \text{ Ga}$$

$$^{206}\text{Pb} = ^{238}\text{U} \cdot (e^{\lambda t} - 1)$$

$$t = (1/\lambda) \cdot \ln [1 + (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})]$$



$$\lambda' = \lambda_{235} = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ an}^{-1}$$

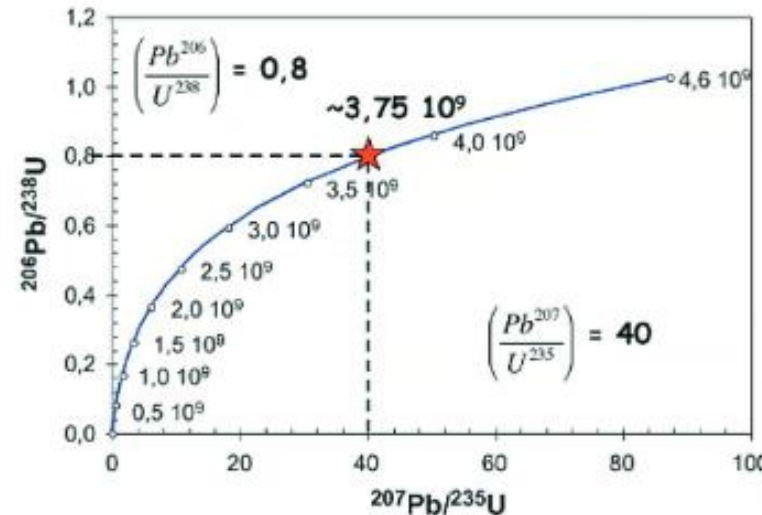
$$T_{235} = 700 \text{ Ma}$$

$$^{207}\text{Pb} = ^{235}\text{U} \cdot (e^{\lambda' t} - 1)$$

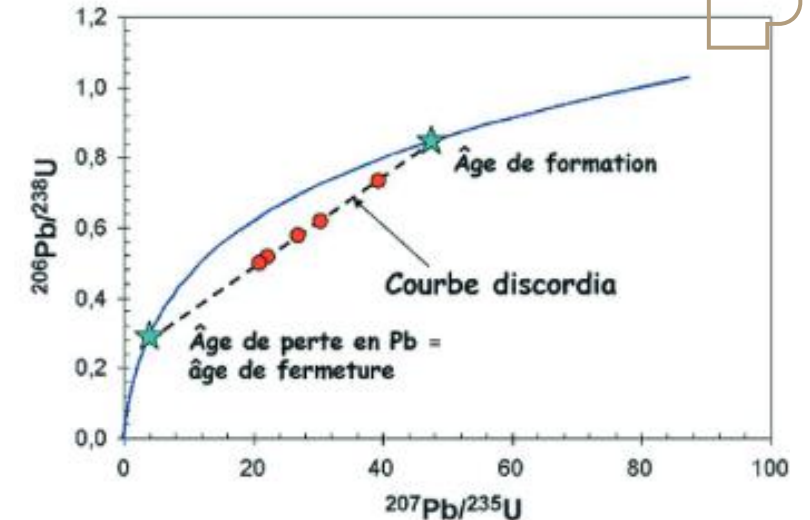
$$t = (1/\lambda') \cdot \ln [1 + (^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U})]$$

- 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 Wetherhill**, comprenant **une courbe nommée Concordia**, représentant :

$$(^{206}\text{Pb}(t)/^{238}\text{U}(t)) = f(^{207}\text{Pb}(t)/^{235}\text{U}(t))$$
- Concordia 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} .
- Courbe Concordia passe nécessairement par l'origine car 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.



Courbe Concordia: Exemple de rapports concordants (donnant le même âge = âge de cristallisation)



Courbe Concordia et courbe Discordia: Exemple de rapports discordants (âges différents) \Rightarrow perte en Pb par réouverture du système \Rightarrow Discordia

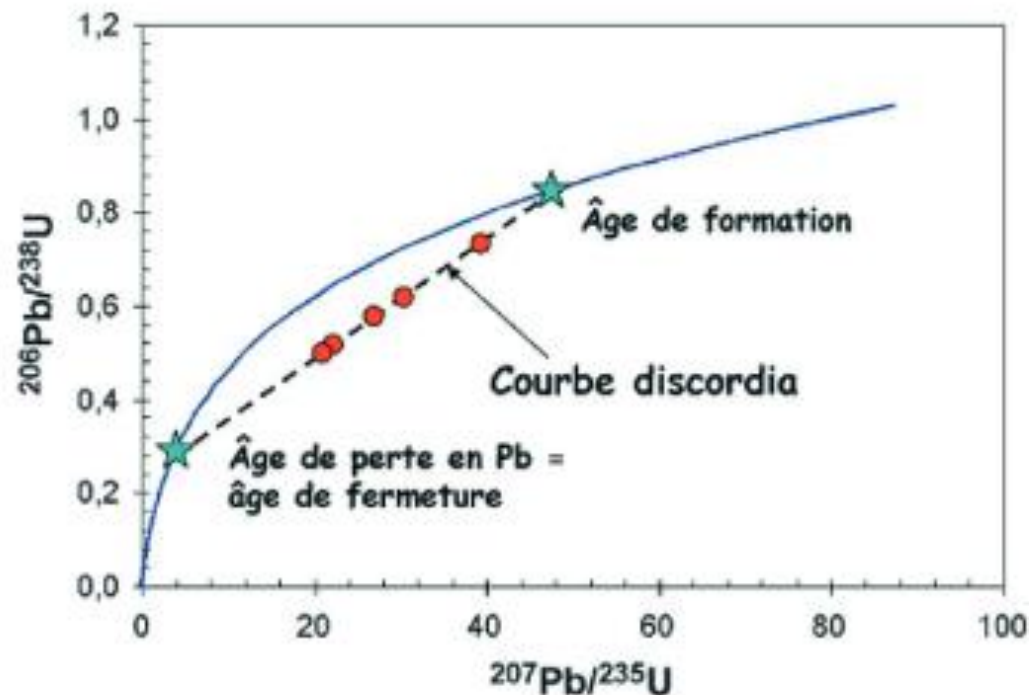
Pour dater un zircon par la méthode U/Pb, il suffit de placer les valeurs des rapports $[^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}]$ et $[^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]$ sur le graphique et d'en déduire l'âge.

D. LA METHODE U/PB : CONCORDIA ET DISCORDIA

2. Signification des discordances



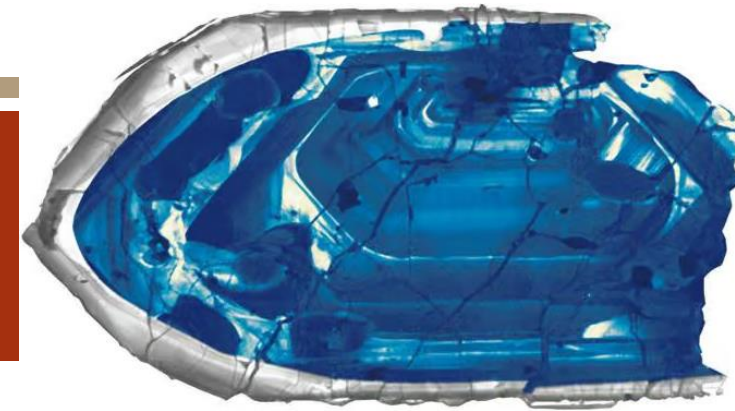
- Une **réouverture** du système par **métamorphisme** entraîne une **diffusion** d'éléments entre un zircon et les minéraux voisins, à l'origine de rapports $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ et $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ discordants. Le point est alors situé en dehors de la Concordia.
- Dans ce cas, divers zircons séparés de la même roche se placent sur une droite nommée Discordia, recoupant la Concordia en deux points :
 - le plus ancien (intercept haut) correspond à l'âge initial
 - le plus jeune (intercept bas) à l'évènement métamorphique ayant provoqué les échanges.



Courbe Concordia et courbe Discordia: Exemple de rapports discordants (âges différents) \Rightarrow perte en Pb par réouverture du système \Rightarrow Discordia

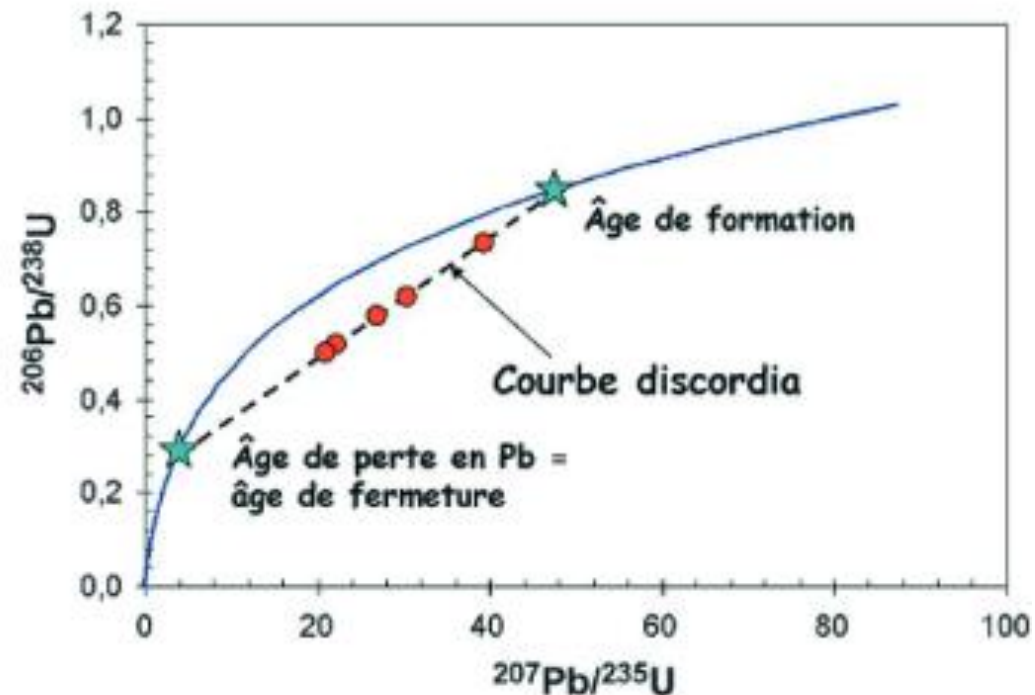
D. LA METHODE U/PB : CONCORDIA ET DISCORDIA

3. Bilan de la méthode de datation U/Pb



Le zircon de Jack Hills avait été estimé à 4,4 milliards d'années, par une méthode de datation jugée imparfaite avec ce type de minéral. Mais ces chiffres viennent d'être confirmés par une nouvelle technique. © John Valley, université du Wisconsin

- Les zircons sont des minéraux riches en U et ne contenant pas de Pb_0 pour lesquels il est possible de faire l'hypothèse $F_0 = 0$.
- 2 couples indépendants $^{235}U/^{207}Pb$ et $^{238}U/^{206}Pb$ aboutissent à des âges concordants s'ils sont placés sur la Concordia, et discordants en cas d'une réouverture du système, souvent par métamorphisme.
- Les roches pouvant être datées par la méthode U/Pb sont les roches contenant des zircons, minéraux extrêmement résistants
- Cette méthode a permis de dater les plus anciennes roches terrestres (zircon de 4,4 Ga en Australie).



Courbe Concordia et courbe Discordia: Exemple de rapports discordants (âges différents) \Rightarrow perte en Pb par réouverture du système \Rightarrow Discordia

Chronologie relative

Chronologie absolue

