

Principes de la géochronologie

1. INTRODUCTION

Au cours du 19 et du 20^{ème} siècle, trois grands débats mobilisent les spécialistes des sciences de la Terre. Ces interrogations scientifiques ont affirmé le rôle de certaines disciplines de la Géologie:

1) Quel est l'âge de la Terre et des roches ?

↳ **géochimie et pétrologie**

2) Quelle est l'origine de la vie et comment expliquer sa diversité ?

↳ **paléontologie et biologie de l'évolution**

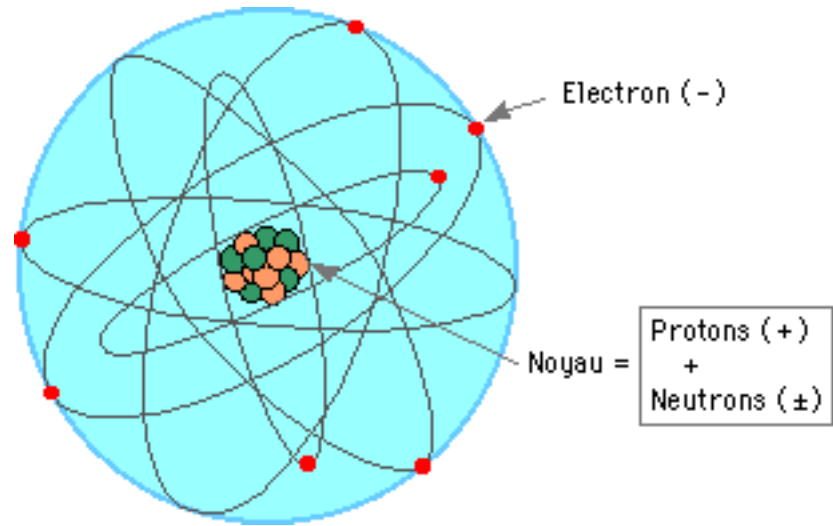
3) Quelle est la structure de la Terre et comment expliquer les chaînes de montagne ?

↳ **géophysique et géologie structurale**

un peu d 'histoire ...

jusqu'au 18^{ème} siècle	La Terre est un sujet théologique et les roches sédimentaires se sont déposés lors du grand Déluge
1650	L'Evêque Ussher situe la création à 4004 avant J.C.
1785	Naissance de la géologie : James Hutton publie "Theory of the Earth"
1897	Le physicien-géologue Lord Kelvin calcule un âge de la Terre entre 20-40 ma
1903	Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie découvre la radioactivité.
1912-1919	Ernest Rutherford et Niels Bohr définissent la notion d'atome et décrivent la structure atomique des éléments chimiques
1914	Frederic Soddy propose la notion d'isotope pour expliquer les masses atomiques similaires d'éléments chimiquement différents
1936-1940	Alfred O. Nier met au point le Spectromètre de masse, il est donne les moyens aux géologues de dater les roches : naissance de la géochronologie

I. Découverte et utilisation de la radioactivité:



Becquerel (1896) découvre de façon fortuite que certaines émanations d'un sel d'uranium sont capables d'impressionner des émulsions photographiques.

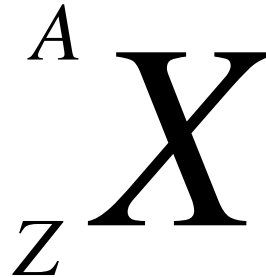
I. a. la stabilité atomique et les radioactivités:

La matière est composée d'atomes différents les uns des autres mais qui présentent tous la structure atomique suivante:

un noyau (neutrons + protons) entouré d'électrons qui gravitent.

le Nombre d 'e⁻ = Nombre de pt⁺

La masse des électrons est négligeable, la masse atomique d'un élément chimique donné est principalement contenue dans le noyau.



A: masse atomique= nombre de nucléons qu'il contient

Z: numéro atomique= nombre de protons

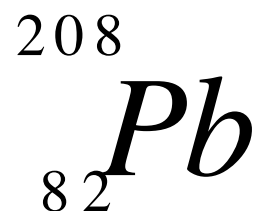
A-Z: nombre de neutrons

La notion d'isotopes ...

Les isotopes d'une espèce chimique présentent tous la même configuration atomistique (même propriété chimique) mais ils diffèrent par le nombre de neutrons.

Exemples:

- le plomb et ses isotopes



82 électrons, 82 protons, 126 neutrons

${}^{204}\text{Pb}$ = 122 neutrons, ${}^{206}\text{Pb}$ = 124 neutrons, ${}^{207}\text{Pb}$ = 125 neutrons, ${}^{208}\text{Pb}$ = 126 neutrons

- l'hydrogène et ses isotopes



1 électron, 1 proton, 0 neutron

${}^1\text{H}$ = hydrogène

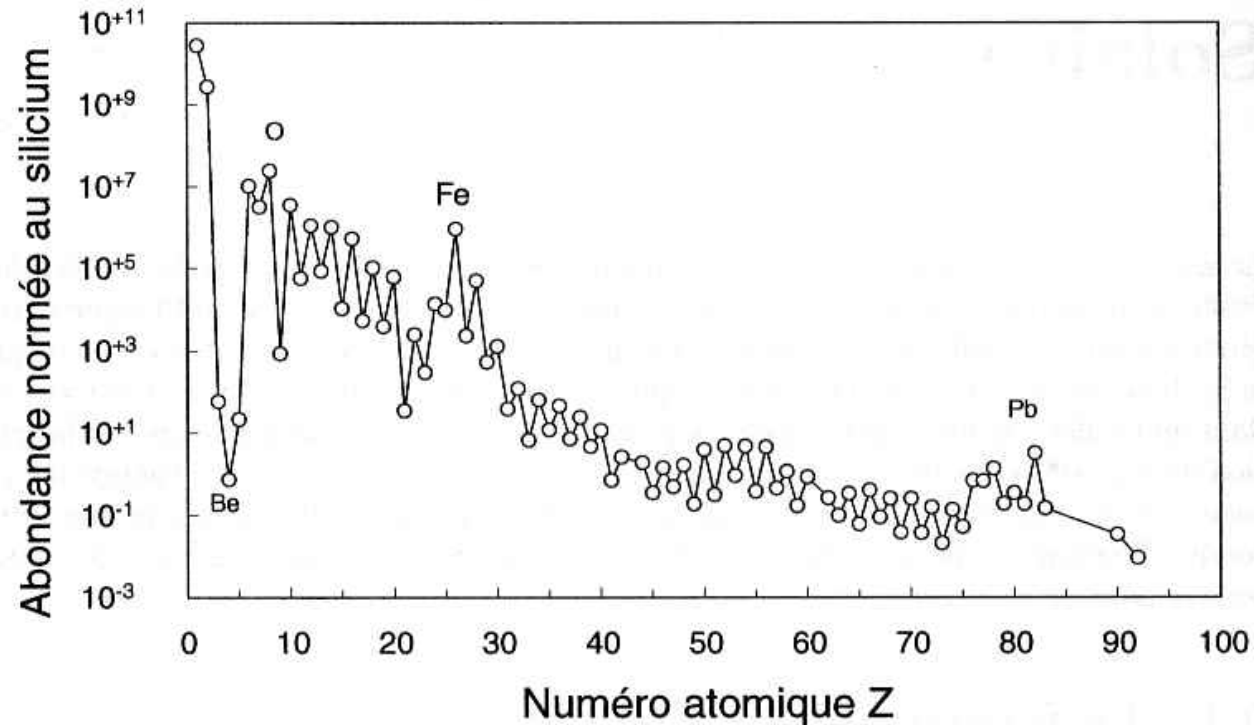
${}^2\text{D}$ = deutérium, ${}^2\text{DO}_2$ (l'eau lourde)

${}^3\text{T}$ = tritium, isotope radioactif artificiel produit dans les réactions nucléaires

I. b. stabilité et instabilité atomique:

a) **les atomes stables** sont caractérisés par un noyau au sein duquel règne un équilibre stable entre les forces répulsives générées par les protons, et les forces attractives, spécifiques des nucléons. Les noyaux stables n'évoluent pas dans le temps et leur stabilité est d'autant plus grande que leur énergie de liaison est élevée.

b) **les atomes instables ou radioactifs** correspondent à des structures atomiques en rupture d'équilibre entre les deux forces précédentes; le noyau devient alors instable et il se désintègre avec l'émission spontanée d'un rayonnement caractéristique. Ce phénomène est désigné sous le terme de **radioactivité naturelle**.

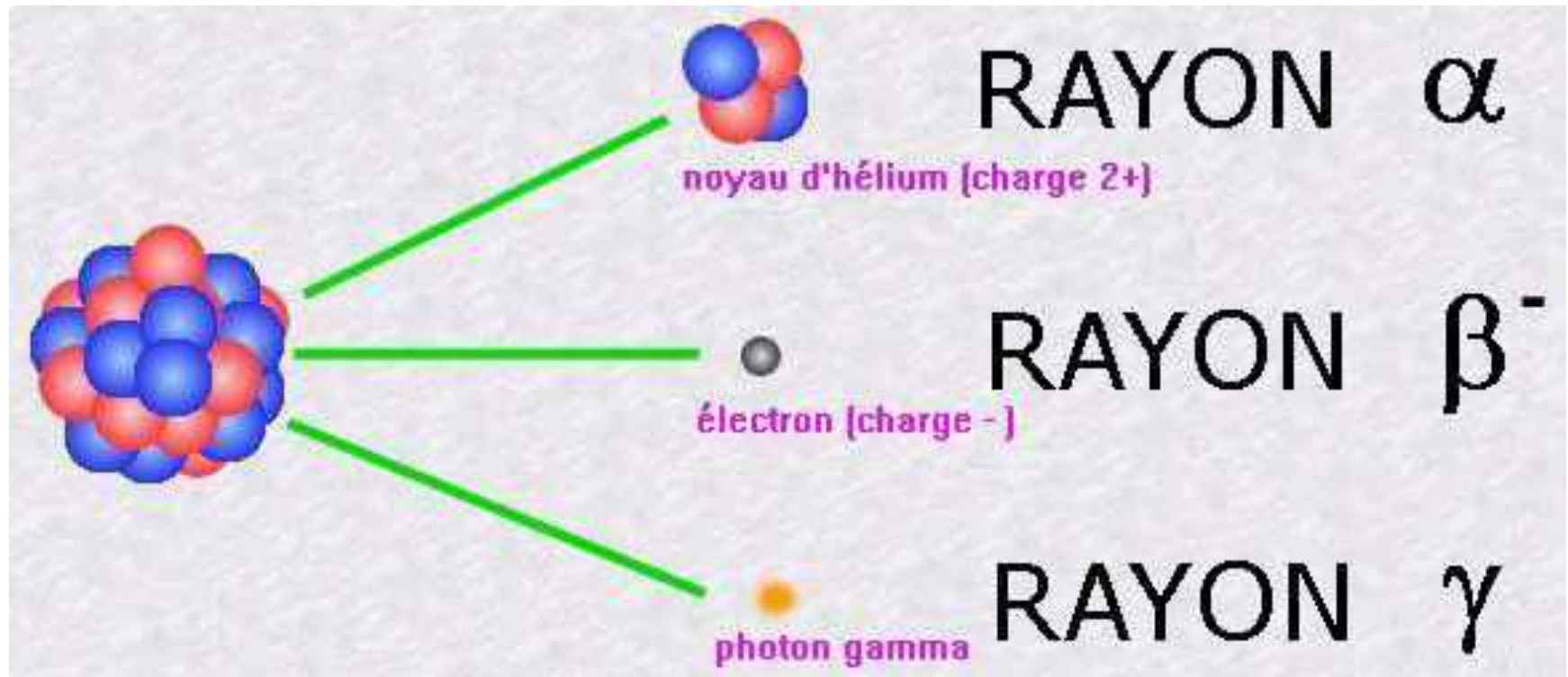


La composition chimique du Système Solaire normée à un million d'atomes de Si. On remarquera les pics des stabilité (par exemple Fe, Pb) et l'abondance plus faible des éléments à numéro atomique impair par rapport à celle de leurs voisins pairs, dont le noyau est plus stable. Le déficit des atomes légers Li, Be, B est dû à la destruction de ces éléments dans le cœur des étoiles.

En géologie, ces deux types de comportement sont utilisés en géochimie:

- la radioactivité naturelle: la géochronologie
- les isotopes stables et le fractionnement: les traceurs isotopiques

une image simple de la radioactivité ...



La radioactivité est une propriété nucléaire indépendante:
du cortège électronique de l'atome,
de la température et de la pression,
de l'environnement chimique et minéralogique de l'élément

...dans le détail

Les processus de désintégration (ou décroissance) sont multiples ...

1. Le processus α (alpha) = émission d'un noyau d'hélium: ${}_2^4\text{He}$
2 protons et 2 neutrons

- condition: Σ masse (Nucléide fils + particule α) $<$ masse Nucléide parent.

- exemple: ${}_{62}^{147}\text{Sm} \rightarrow {}_{60}^{143}\text{Nd} + {}_2^4\text{He}$

2. Le processus β^- (bêta moins) = émission d'un électron

- processus fréquent lorsque le noyau est riche en neutron.

- exemple: ${}_{37}^{87}\text{Rb} \rightarrow {}_{36}^{87}\text{Sr} + \beta^- \text{ (électron)} + \nu \text{ (neutrino)}$.

- le processus symétrique **d'émission de positron β^+** existe: particule de même masse que l'électron mais de charge opposée.

- processus fréquent lorsque le noyau est pauvre en protons.

3. Le rayonnement γ : l'émission des **particules α** et **β** est toujours accompagnée de l'émission d'un **rayonnement γ** électromagnétique.

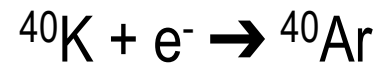
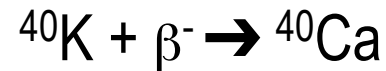
4. La capture électronique d'un électron de la couche K est un processus moins fréquent. Von Weizsacker l'a montré avec l'excès d'argon 40 dans l'atmosphère terrestre, en effet: $^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar}$.

L'effet sur les nucléides de la capture électronique est similaire à celui de l'émission d'un positron.

5. La fission spontanée de quelques atomes lourds comme l'uranium ^{235}U ou le plutonium ^{244}Pu est un processus assez rare et très lent. Il est à la base de la méthode de datation dite des traces de fission.

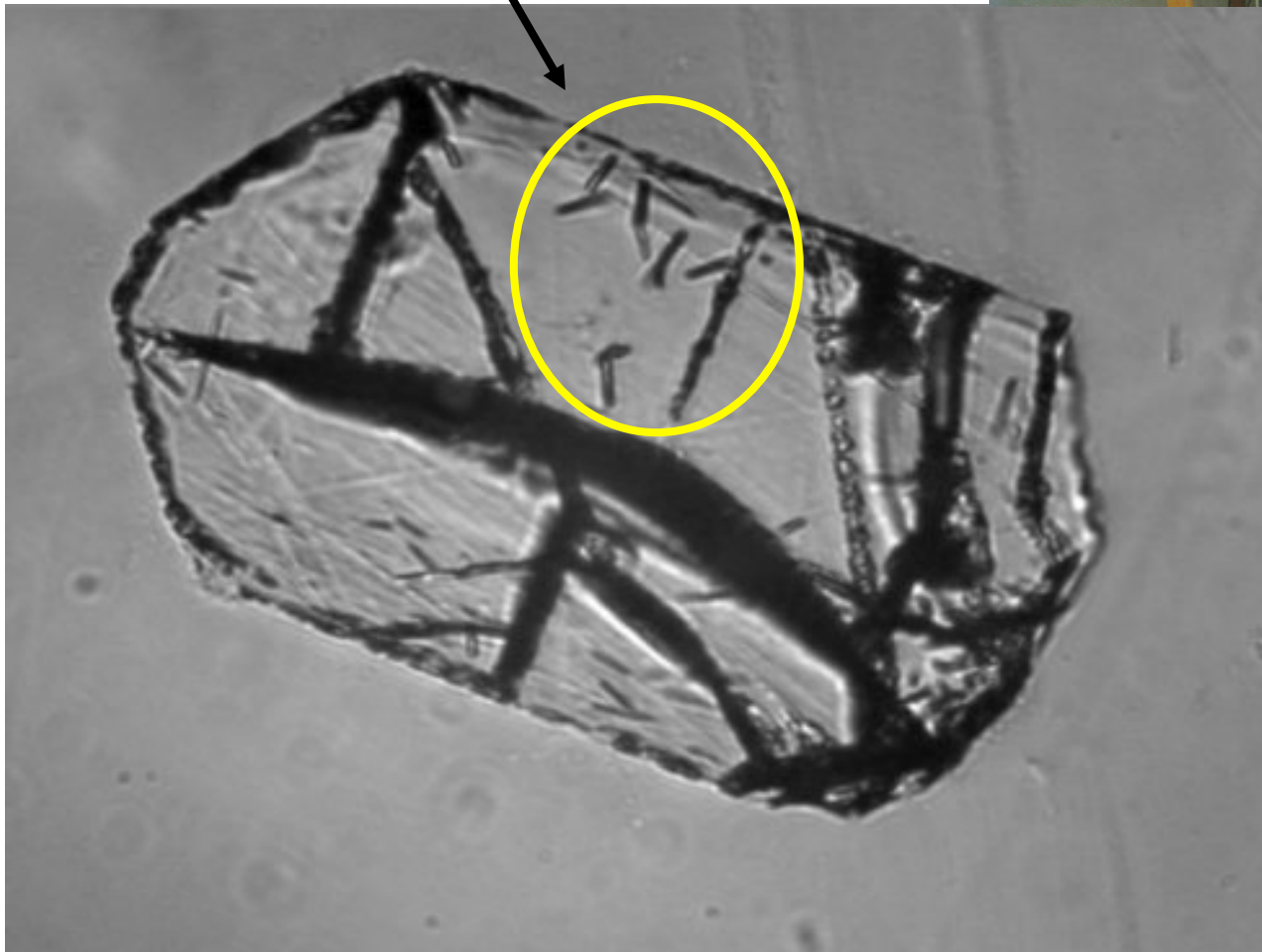
Remarque: 2 processus de désintégration peuvent concerner le même nucléide, ils s'ajoutent:

par exemple, le potassium 40 (^{40}K)



On parle alors d'un branchement de la désintégration radioactive.

Traces de fission dans un cristal de mica



II. GÉOCHRONOLOGIE ET SYSTÈME GÉOCHIMIQUE

La radioactivité est une loi de la probabilité de désintégration d'un nucléide radioactif par unité de temps: la constante de désintégration λ .

La constante de désintégration est spécifique du nucléide radioactif considéré. Des exemples:

$$\lambda^{138}\text{La} = 2,24 \cdot 10^{-12} \text{ an}^{-1} \quad \text{ou} \quad \lambda^{210}\text{Pb}: 3,11 \cdot 10^{-2} \text{ an}^{-1}$$

$^{138}\text{La} \rightarrow ^{138}\text{Ce}$: le plus long géochronomètre

$^{238}\text{U} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$: un des géochronomètres le plus court.

Dans un système donné ou « boîte géochimique »: pas de perte ou gain en radio-nuclide, donc:

1. Perte (Qte) en Nucléide Radioactif (parent) est constante.

2. Proportion en Nucléide Radiogénique (fils) est également constante.

La radioactivité ... quelles conséquences pour la géologie ?

II.a.Définition du géochronomètre:

Un géochronomètre est défini par la loi de désintégration :

Si un isotope radioactif-père (P) se désintègre en un isotope radiogénique-fils F stable :
 $P \Rightarrow F$; exemples : $^{235}\text{U} \Rightarrow ^{207}\text{Pb}$ et $^{238}\text{U} \Rightarrow ^{206}\text{Pb}$

Le nombre d'atomes de P se désintégrant par unité de temps est proportionnel au nombres d'atomes P présents :

$$\frac{dP}{dt} = - \lambda P \quad \text{équation n°1}$$

a. λ est la **constante de désintégration** de l'isotope P: probabilité de désintégration d'un atome par unité de temps.

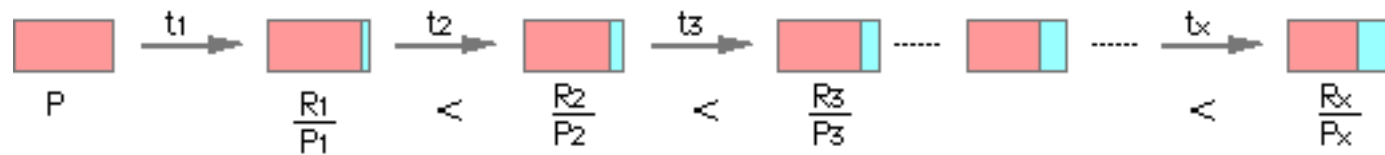
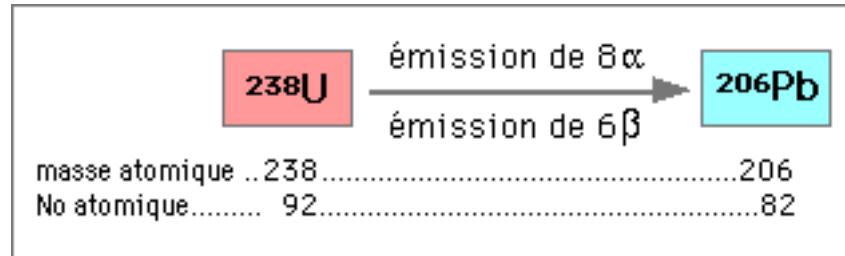
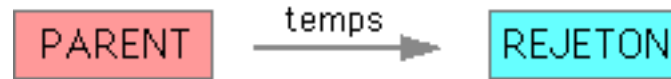
b. λP est **l'activité** de l'isotope P: nombre de désintégrations par unité de temps.

L'activité d'un radio-isotope est mesuré par le **becquerel (Bq)** qui est une unité égale à une désintégration par seconde.

- un litre d'eau de mer possède une activité de 12 Bq: présence de l'isotope 40 du potassium, ^{40}K , et de l'uranium naturellement dissous, ^{238}U et ^{235}U .

- un corps humain contient assez de potassium pour compter quelques centaines de Bq parfaitement naturels.

- un pavé d'un décimètre cube de granite produit normalement à peu près 6000 Bq.

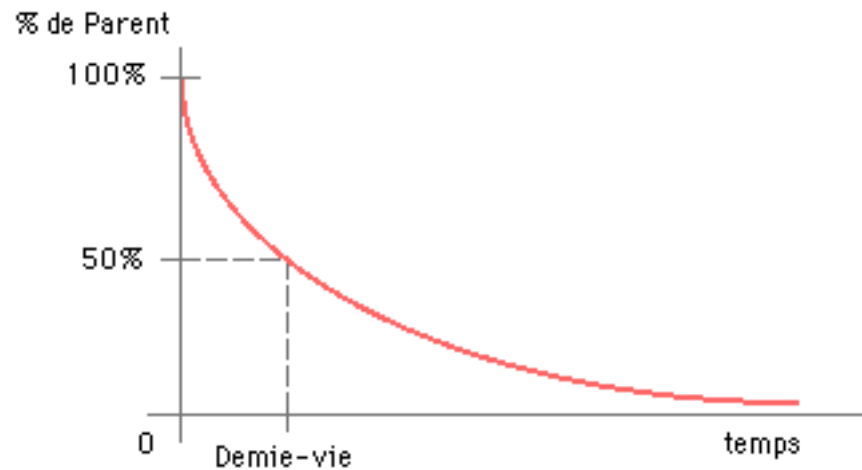


Par intégration dans le temps (t), l'équation (1) devient:

$$P = P_0 e^{-\lambda t} \quad \text{équation n°2}$$

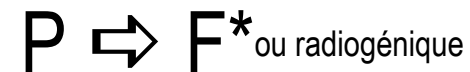
c. **La période T**, est définie comme le temps nécessaire à la désintégration de la moitié des atomes présents au départ.

$$\frac{P_0}{2} = P_0 e^{-\lambda t} \quad , \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



PARENT	REJETON	DEMIE-VIE
238 Uranium	206 Plomb	4,5 milliards d'années
87 Rubidium	87 Strontium	47 milliards d'années
40 Potassium	40 Argon	1,3 milliards d'années
14 Carbone	14 Azote	5730 années

1. Un isotope radioactif-père (P) se désintègre pour donner un isotope radiogénique-fils stable (F*):



$$F^* = P_0 - P$$

2. Dans un système géochimique: le nombre d'atomes F est:

$$F_{\text{actuel}} = F^* + F_{0 \text{ ou initial}}$$

(Rmq: pour tout système moderne qui est en cours de formation: $F = F_0$)

$$F_{\text{actuel}} = (P_0 - P) + F_0$$

3. Rappel:

$$P_{\text{actuel}} = P_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{P_0}{P_{\text{actuel}}} = e^{\lambda t}$$

- mise en facteur de P sur l'équation:

$$F_{\text{actuel}} = (P_0 - P_{\text{actuel}}) + F_0$$

$$F_{\text{actuel}} = (P_0 - P_{\text{actuel}}) + F_0 = P_{\text{actuel}} \left(\frac{P_0}{P_{\text{actuel}}} - 1 \right) + F_0$$

si on intègre **l'équation n°2**, alors on obtient l'équation générale d'un géochronomètre:

$$F_{\text{actuel}} = P_{\text{actuel}} \left(e^{\lambda t} - 1 \right) + F_0$$

Dans cette équation, deux parties: géochronomètre et traceur isotopique

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

Au cours de l'évolution de la Terre des enrichissements chimiques qui à long terme conduisent à des enrichissements isotopiques.

Exemple: la croûte terrestre continentale ou CC

1. réservoir supérieur des enveloppes terrestres: noyau-manteau-croûte
2. par rapport au Manteau (système primitif \pm initial), la CC présente un enrichissement important éléments dits lithophiles (E_{lith} ou EL).
3. parmi les EL, on trouve beaucoup d'éléments radioactifs: U, Th, Rb, ...
4. l'enrichissement en $E_{\text{radioactifs}}$ conduit à l'accumulation dans la CC des produits de désintégration: les isotopes radiogéniques F et F_0

Au cours de l'évolution de la Terre:

Les enrichissements chimiques (lithophiles radioactifs) conduisent à long terme à des enrichissements isotopiques (éléments radiogéniques)

Processus responsable: la radioactivité naturelle

Deux possibilités:

1. Présence de systèmes riches en radioactifs: datation absolue des roches
2. Présence de systèmes riches en radiogéniques: traçage (tracing) ou signatures géochimiques de cycles géologiques majeurs :

____ - cycles géologiques profonds: magmatisme et tectonique

- cycles géologiques superficiels: altération et sédimentation.

Le géochronomètre parfait existe-il ?

Oui, si le système ne contient pas d'isotope-fils radiogénique à sa fermeture :

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

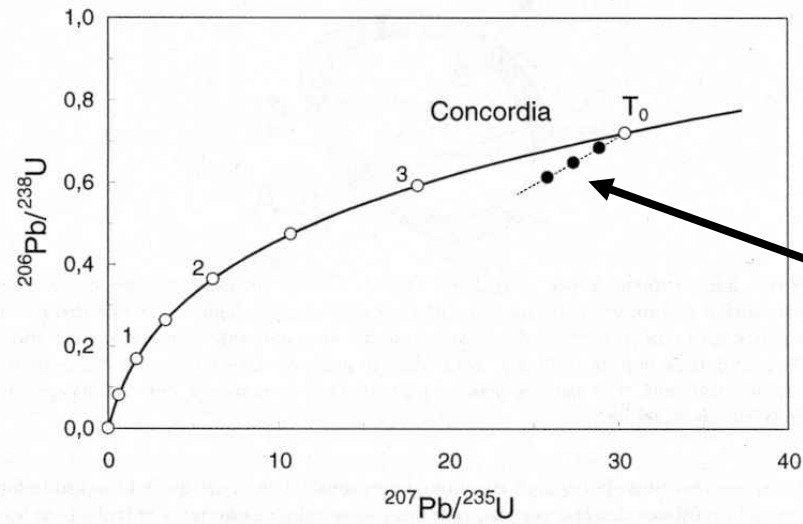
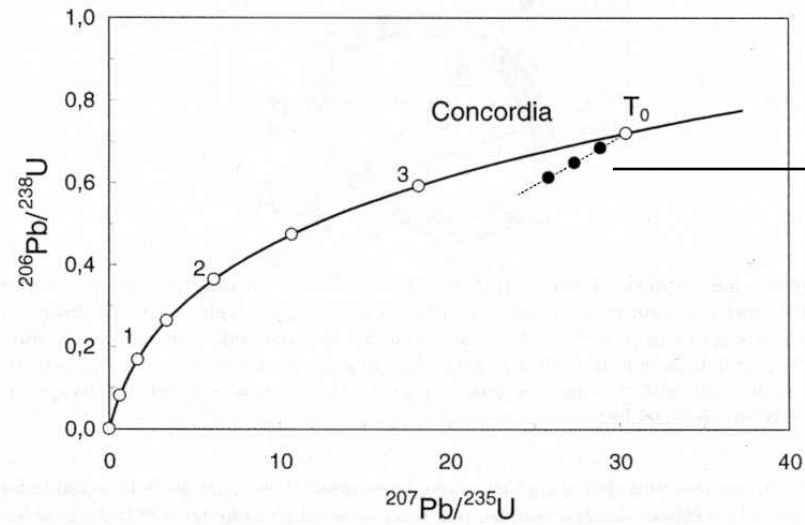


Photo de zircon (63 μ)

La courbe Concordia est le lieu des points dont l'ordonnée et l'abscisse donnent des âges identiques par chacune des méthodes $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$. Elle est ici paramétrée en âge géologique. Les zircons issus d'un même échantillon et représentés par les cercles pleins indiquent un âge de cristallisation de 3,5 milliards d'années.



La courbe Concordia est le lieu des points dont l'ordonnée et l'abscisse donnent des âges identiques par chacune des méthodes $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ et $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$. Elle est ici paramétrée en âge géologique. Les zircons issus d'un même échantillon et représentés par les cercles pleins indiquent un âge de cristallisation de 3,5 milliards d'années.

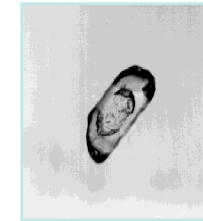


Photo de zircon (63 μ)

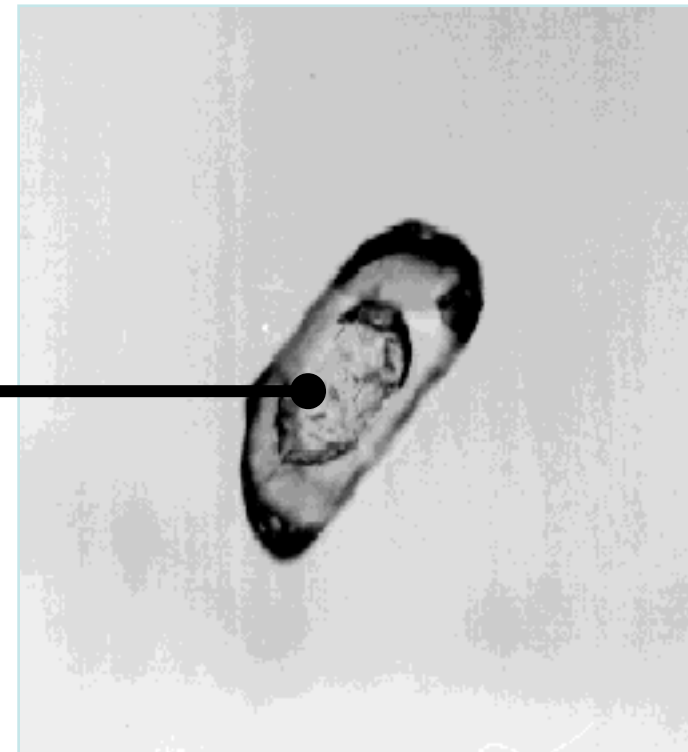
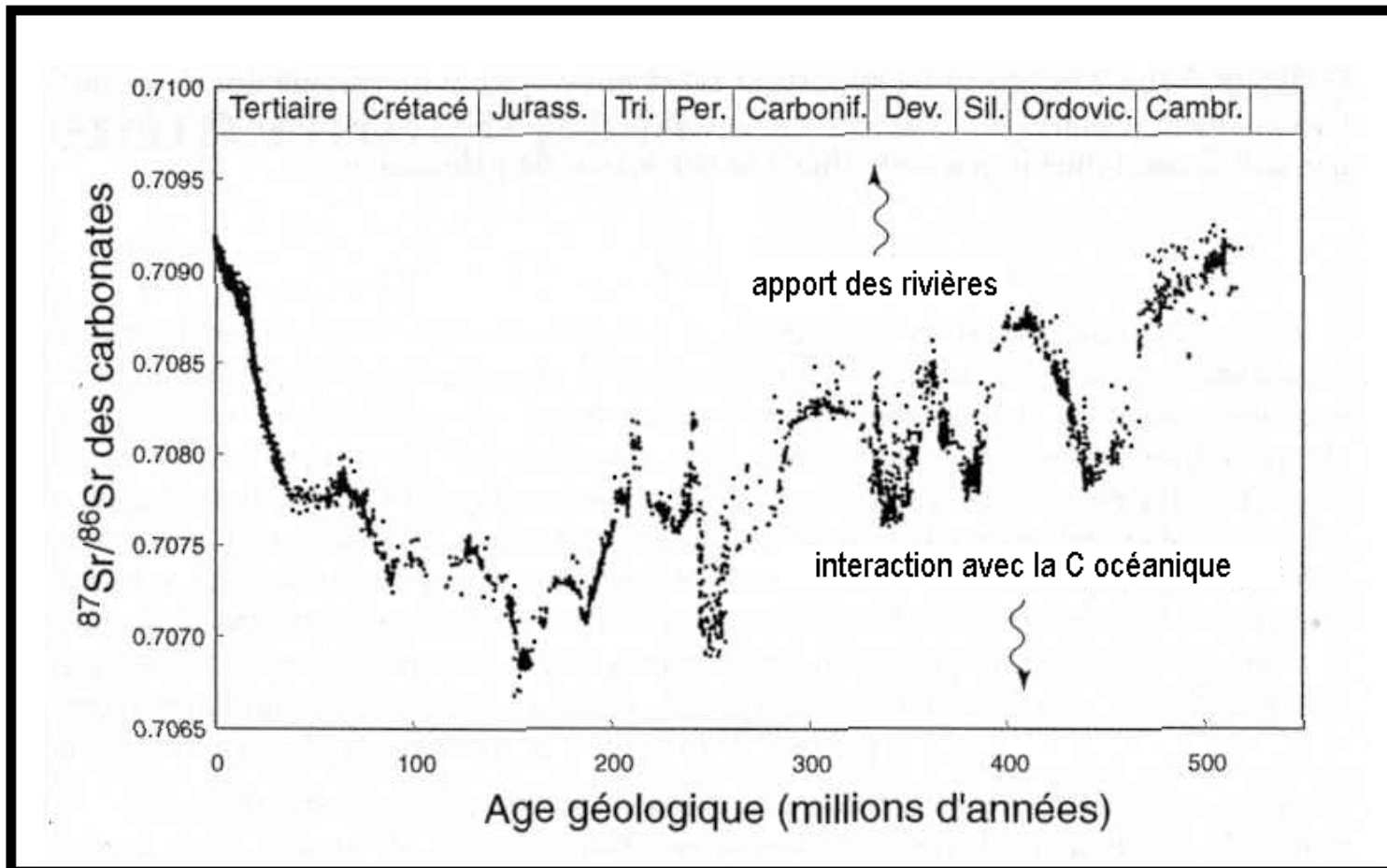


Photo de « coeur hérité » dans un mono-cristal de zircon

La mémoire isotopique parfaite existe-elle ?

Oui, si le système ne contient jamais ou très peu d'isotope-fils radioactif à sa fermeture et si ce système n'est jamais perturbé par la suite :

$$F = F_0$$



Une liste importante: les principaux géochronomètres ...

*Constantes de désintégration des principaux systèmes radioactifs :
l'isotope-fils est indiqué quand il est utilisé pour la datation.*

Système	λ (an ⁻¹)	Système	λ (an ⁻¹)	Système	λ (an ⁻¹)
¹³⁸ La- ¹³⁸ Ce	2,24 10 ⁻¹²	⁴⁰ K- ⁴⁰ Ca	4,96 10 ⁻¹⁰	²⁶ Al	9,80 10 ⁻⁷
¹⁴⁷ Sm- ¹⁴³ Nd	6,54 10 ⁻¹²	²³⁵ U- ²⁰⁷ Pb	9,85 10 ⁻¹⁰	³⁶ Cl	2,30 10 ⁻⁶
⁸⁷ Rb- ⁸⁷ Sr	1,42 10 ⁻¹¹	¹⁴⁶ Sm- ¹⁴² Nd	6,73 10 ⁻⁹	²³⁰ Th	9,20 10 ⁻⁶
¹⁸⁷ Re- ¹⁸⁷ Os	1,64 10 ⁻¹¹	²³⁴ U	2,83 10 ⁻⁶	²³¹ Pa	2,11 10 ⁻⁵
¹⁷⁶ Lu- ¹⁷⁶ Hf	1,93 10 ⁻¹¹	²⁴⁴ Pu	8,66 10 ⁻⁹	¹⁴ C	1,21 10 ⁻⁴
²³² Th- ²⁰⁸ Pb	4,95 10 ⁻¹¹	²³⁶ U	2,96 10 ⁻⁸	²²⁶ Ra	4,33 10 ⁻⁴
⁴⁰ K- ⁴⁰ Ar	5,81 10 ⁻¹¹	¹²⁹ I- ¹²⁹ Xe	4,30 10 ⁻⁸	²¹⁰ Pb	3,11 10 ⁻²
²³⁸ U- ²⁰⁶ Pb	1,55 10 ⁻¹⁰	¹⁰ Be	4,62 10 ⁻⁷		