

# DATATIONS- GEOCHRONOLOGIE

Xavier Robert - 02/02/2009

*xavier.robert@ujf-grenoble.fr*

# Programme de l'Aggregation

## 2.2 Géochronologie absolue

### - Radiochronologie

## 2.2 Géochronologie absolue

On présentera le principe de la datation à l'aide du **couple Rb/Sr** et de l'**isotope cosmogénique  $^{14}\text{C}$** . On étudiera notamment la construction et l'exploitation d'une **isochrone Rb/Sr**. On se limitera à la simple utilisation des couples **U/Pb**. La diversité des autres couples utilisés et les raisons de leur choix sont l'objet du programme de spécialité

# Introduction

---

- Géochronologie = Ensemble des méthodes permettant d'assigner un âge aux roches, minéraux, phénomènes,...
- Pourquoi dater ?
- → Terre = objet dynamique !
- Une question importante et ancienne : *Âge de la Terre ?*

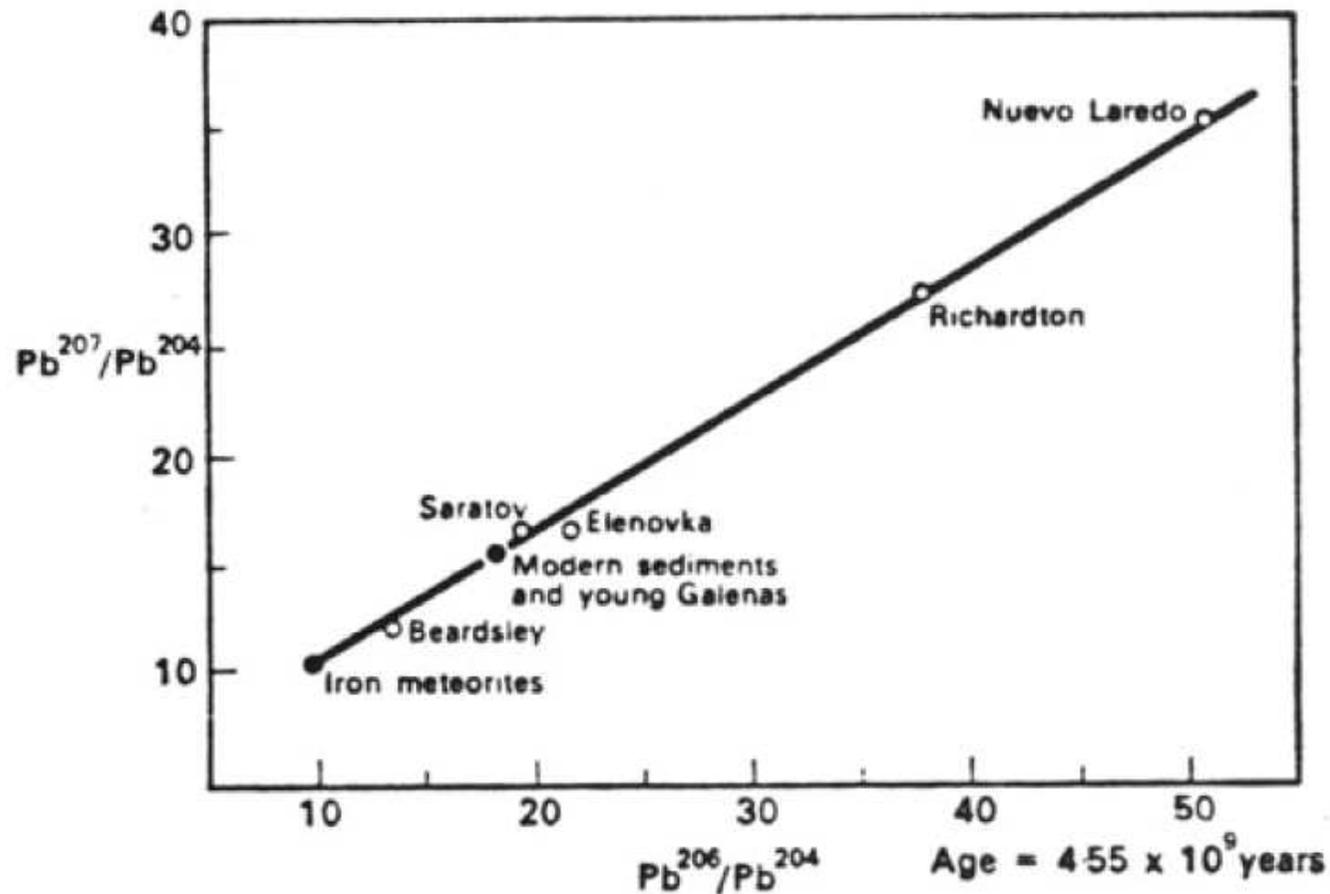
# Introduction : âge de la Terre

---

- Lightfoot (1654) : Genèse + Nb de générations depuis Adam et Eve → 26 *octobre 4004 av. JC !*
- Buffon (1779) : Refroidissement lent → 75000 *ans*
- Thomson – « Lord Kelvin » (1862) : rôle de la conduction → 20 à 40 *Ma*
- Daly (1899) : Sel dans la mer → 80 à 90 *Ma*
- Becquerel puis Curie puis Rutherford (1896) : datation de minéraux en U/Pb → 2.2 *Ga*

# Introduction : âge de la Terre

- Patterson (1950) : Isotopes du plomb, Terre + Chondrites + Achondrites → 4.55 Ga



# Introduction : Comment on date ?

---

- Datations = Difficile !
- Différentes approches :
  - ➔ *Datations par corrélations*
  - ➔ *Datations Relatives*
  - ➔ *Datations absolues*

# Plan du cours

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

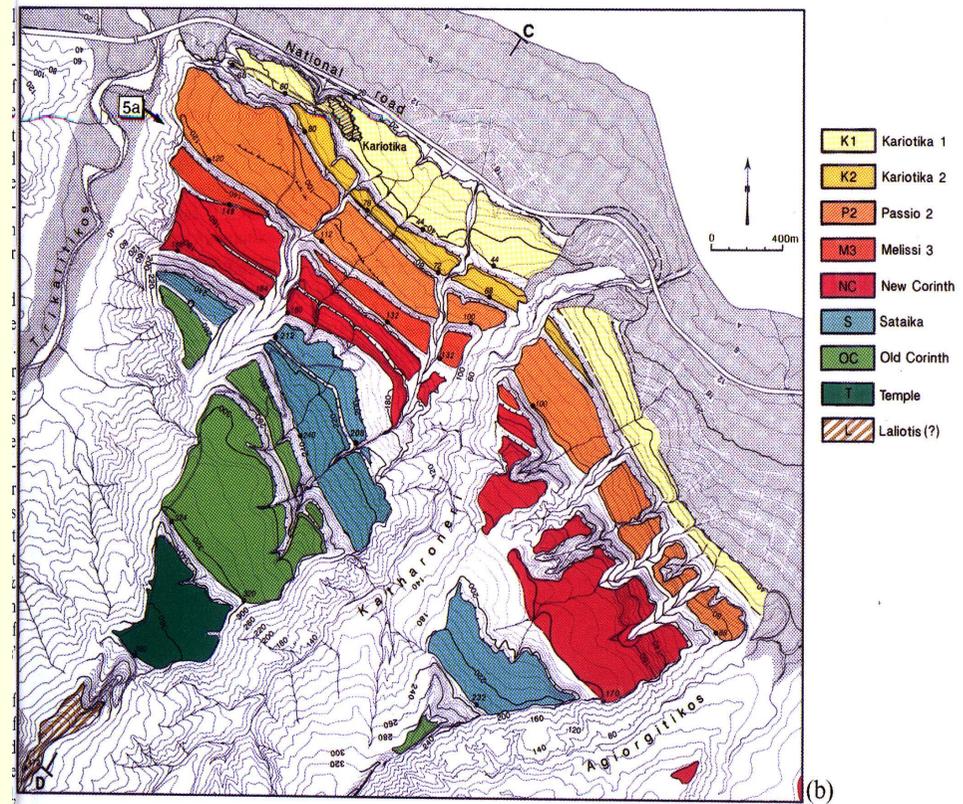
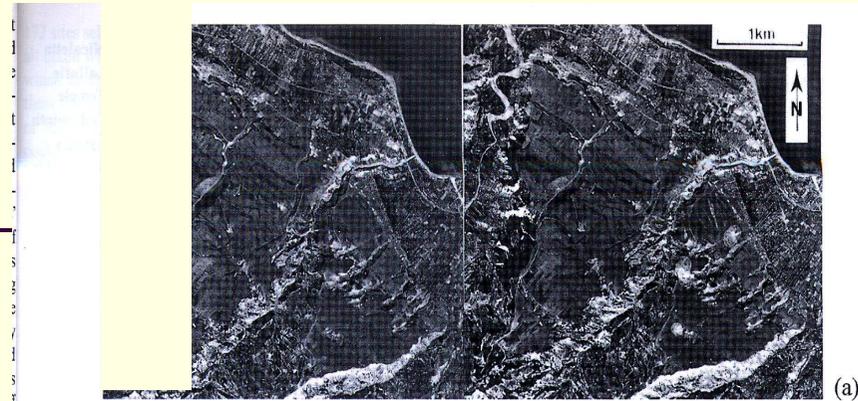
# Datations par corrélations

---

- Ne peut s'effectuer que s'il y a des marqueurs
- Idée = marqueurs géomorphologiques souvent liés à un contrôle paléo-climatique
  - *Terrasses Marines : hauts niveaux marins*
  - *Terrasses Alluviales : apport en sédiments (glaciations ?)*
  - *Moraines : fin des glaciations*
- → “datation” de surfaces par corrélation à des courbes paléoclimatiques / eustatiques
- Approche dangereuse car risques de raisonnements circulaires...

# Datations par corrélations : exemple

Terrasses marines soulevées  
le long d'une faille normale  
(Corinthe, Grèce)

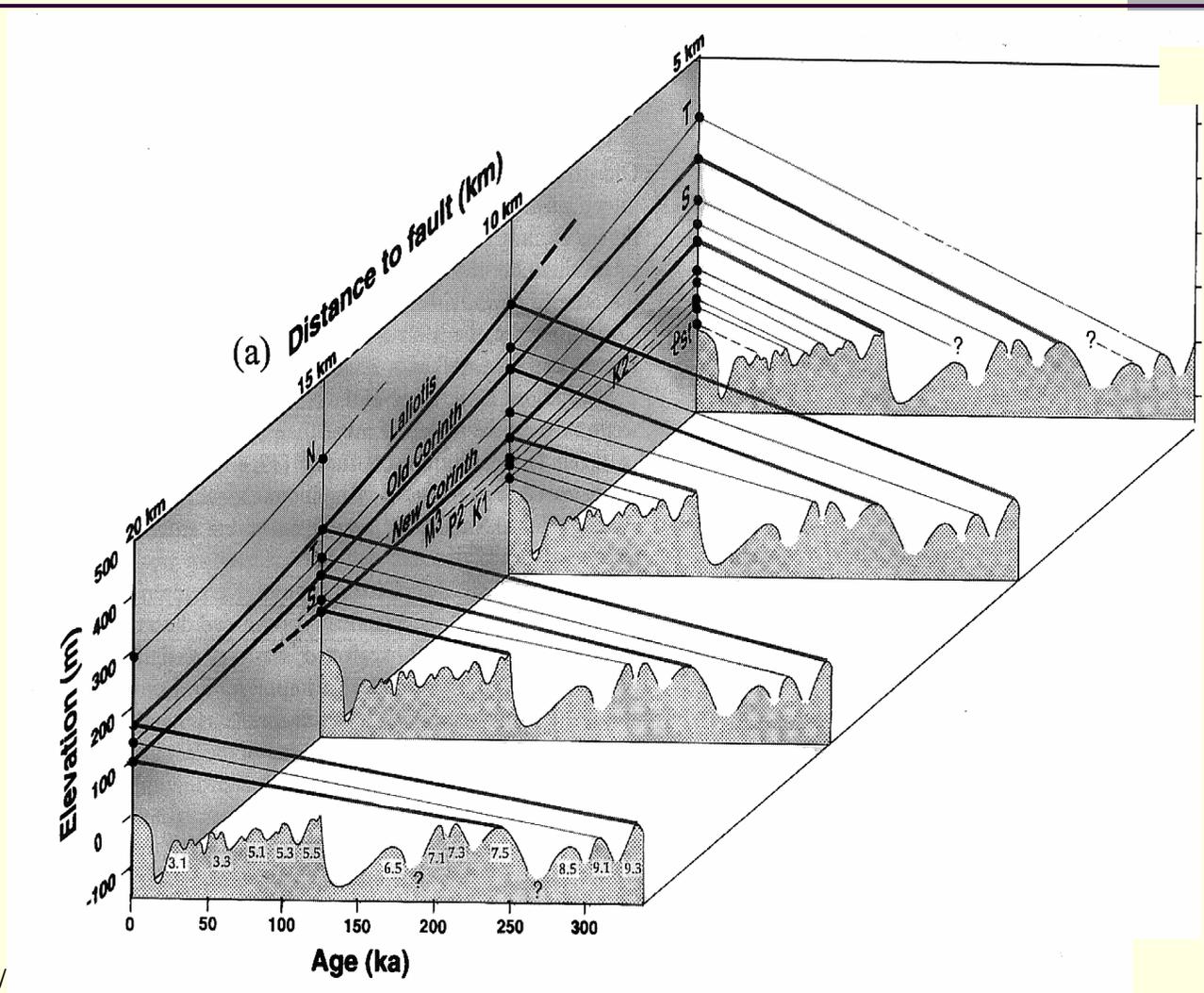


28/01/2009

Datation - X. Robert

Armijo et al.,  
*Geophys. J. Int.*, 1996

# Datation des terrasses marines de Corinthe par corrélation avec la courbe eustatique



# Datations relatives

---

- Idée : utilisation de compteurs dépendant du temps, mais non calés dans l'absolu
- → A lier à des âges absolus en des points de contrôle !

# Datations relatives : méthodes paléontologiques

■ Ex : Datation des sédiments par des fossiles

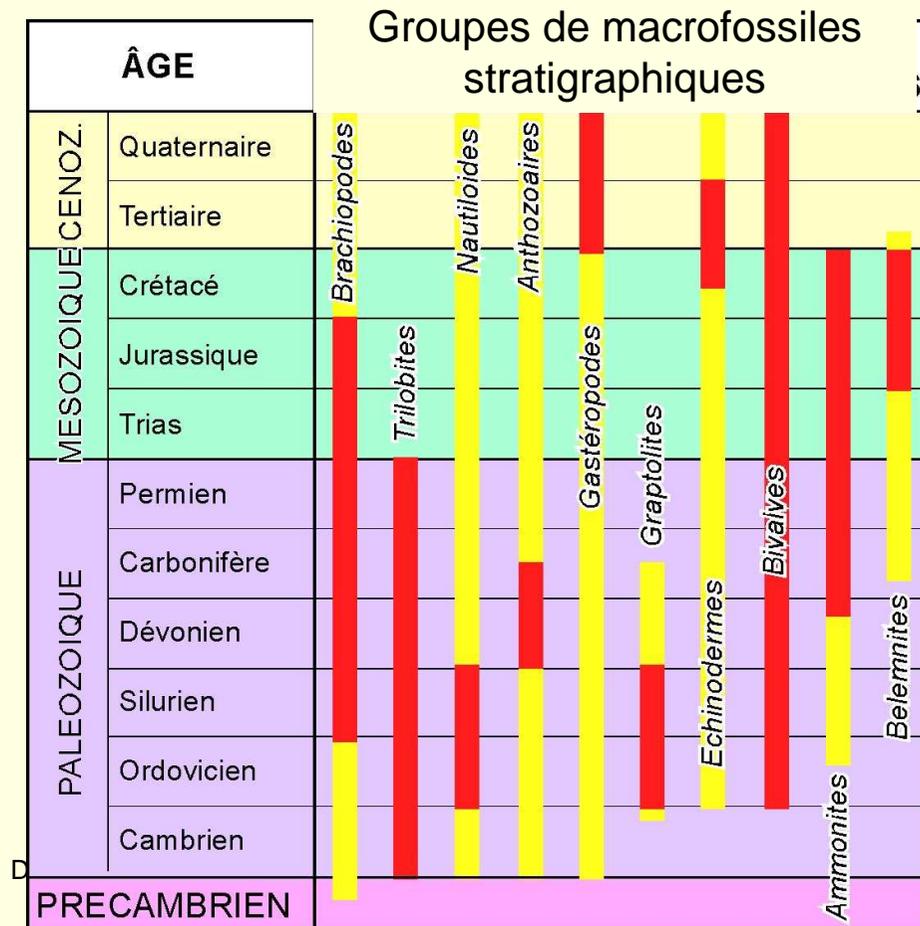
■ Précis

**Principe d'irréversibilité** du mécanisme d'évolution des espèces au cours des temps géologiques → chronologie relative.

**Bon fossile stratigraphique :**

- extension temporelle réduite
- abondant
- large répartition géographique

28/01/2009



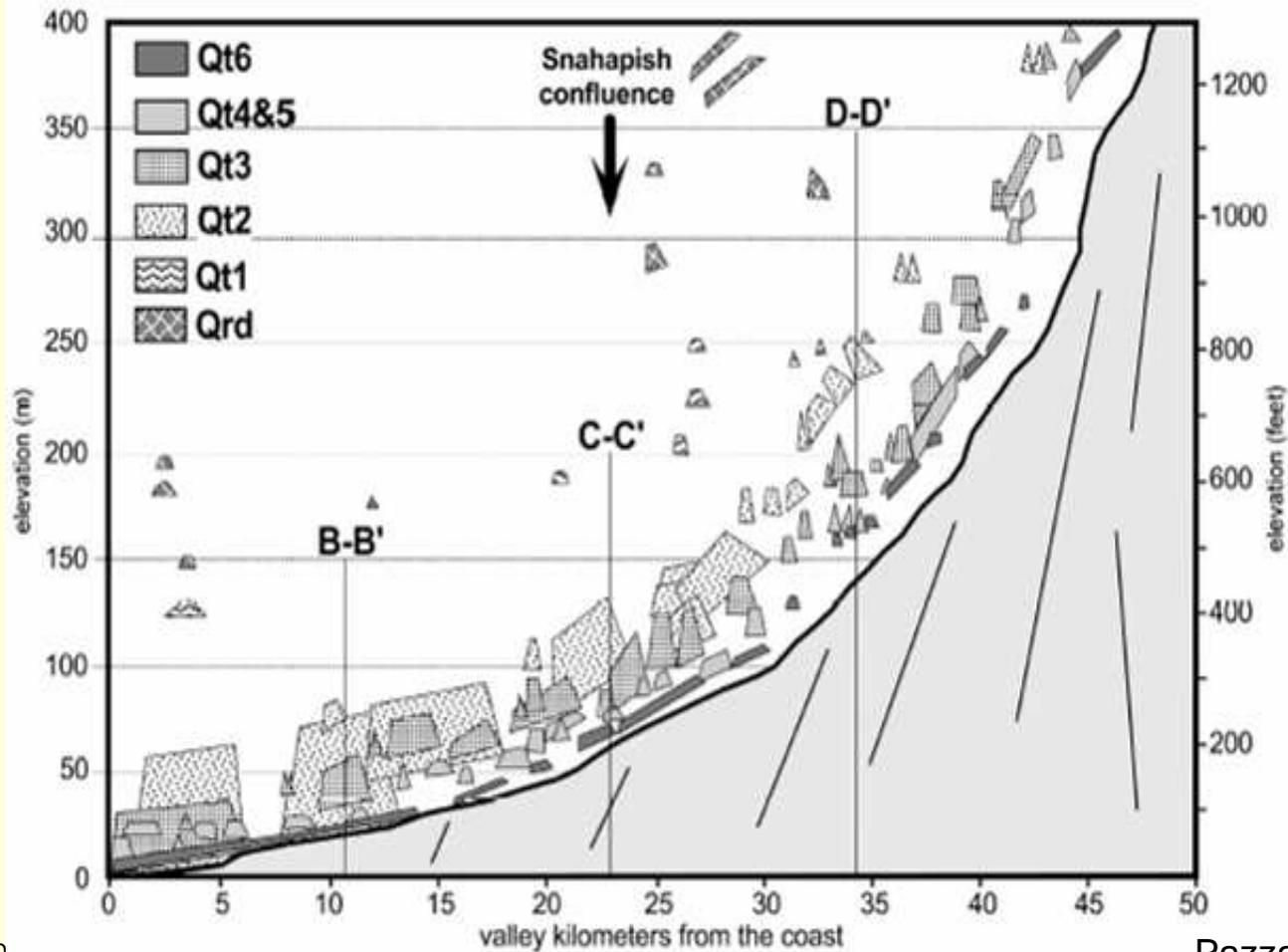
# Méthodes relatives

*Basés sur les processus d'altération / érosion*

Méthode	Période datable	Matériel daté	Types de marqueurs
Franges d'altération	10 Ka – 1 Ma	Galets	Terrasses / Moraines
Lichénométrie	< ~1 Ka	Blocs	Éboulement / Moraines récents
Altération des sols	10 Ka – 1 Ma	Sols	Terrasses / Moraines
Formes d'escarpements	< ~1 Ma	Escarpements	Escarpements

# Datation relative :

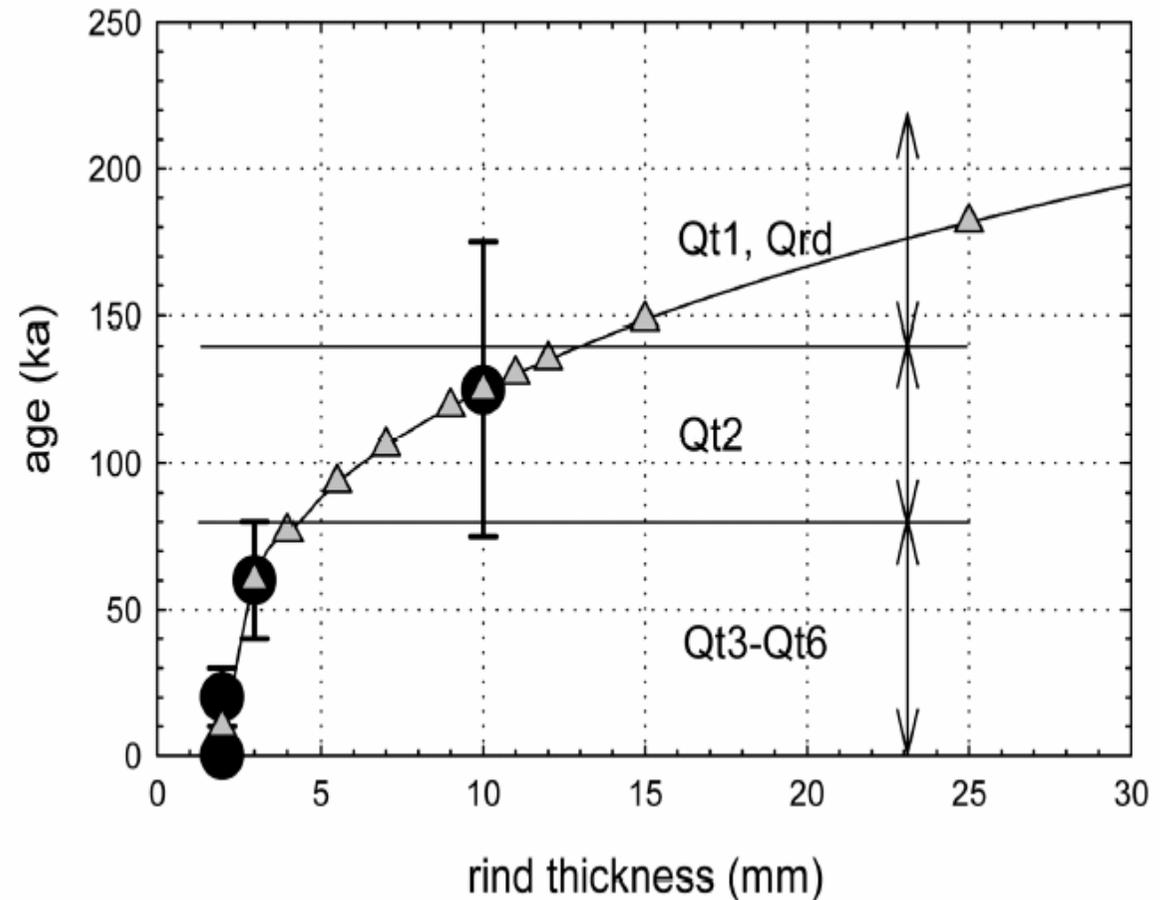
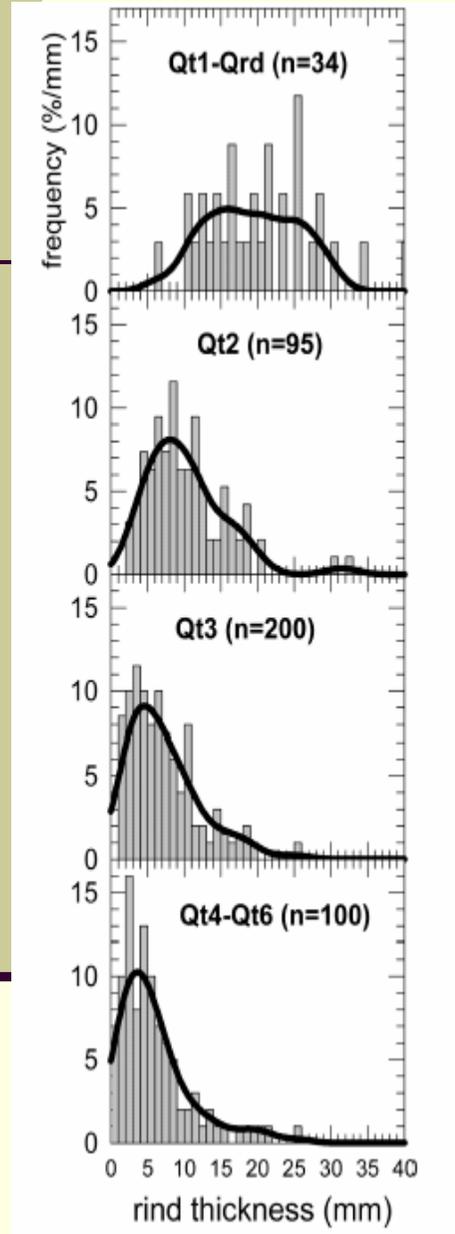
## Datation de terrasses fluviales par les franges d'altération



28/01/20

Pazzaglia & Brandon,  
*Am. J. Sci.*, 2001

# Datation de terrasses fluviales par les franges d'altération



# Méthodes relatives

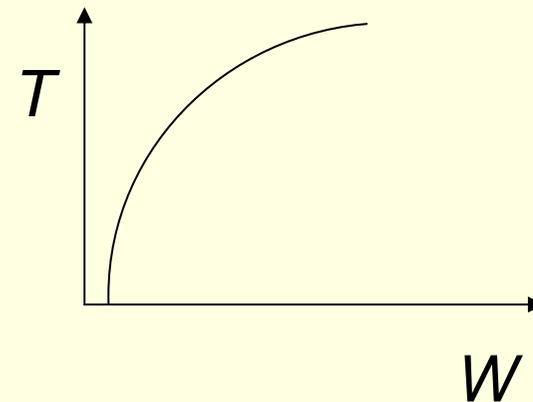
+ Bon marché, rapide, « low-tech »

- Processus non-linéaire:

$$\Delta T_1 / \Delta T_2 > W_1 / W_2$$

- Dépendance du climat / lithologie / exposition etc.

- Corrélation avec datation absolue doit être fait *pour chaque site*



# Plan du cours

---

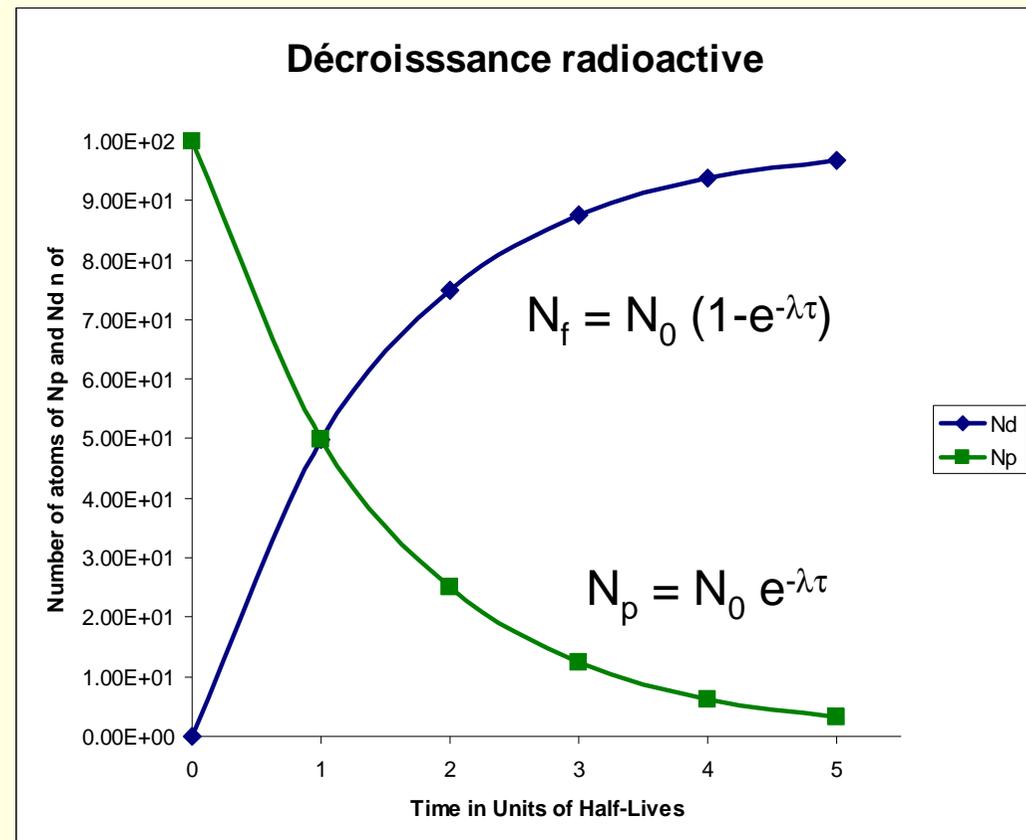
- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Propriétés des éléments : définitions

- *Elément* : Caractérisé par son numéro atomique **Z** (= nombre de protons = particule élémentaire +) et sa masse atomique **A** (égale au nombre de protons et de neutrons)
- *Neutron* : Particule élémentaire neutre
- *Electron* : Particule élémentaire négative
- *Isotopes* : Z identique mais A différentes
- *Radioactivité* : Propriété qu'ont certains éléments de se désintégrer de manière naturelle et spontanée, pour donner un autre élément, en émettant des particules ou rayonnements électromagnétiques.
- *Demi-vie* : temps nécessaire pour qu'un élément radioactif perde la moitié de son activité

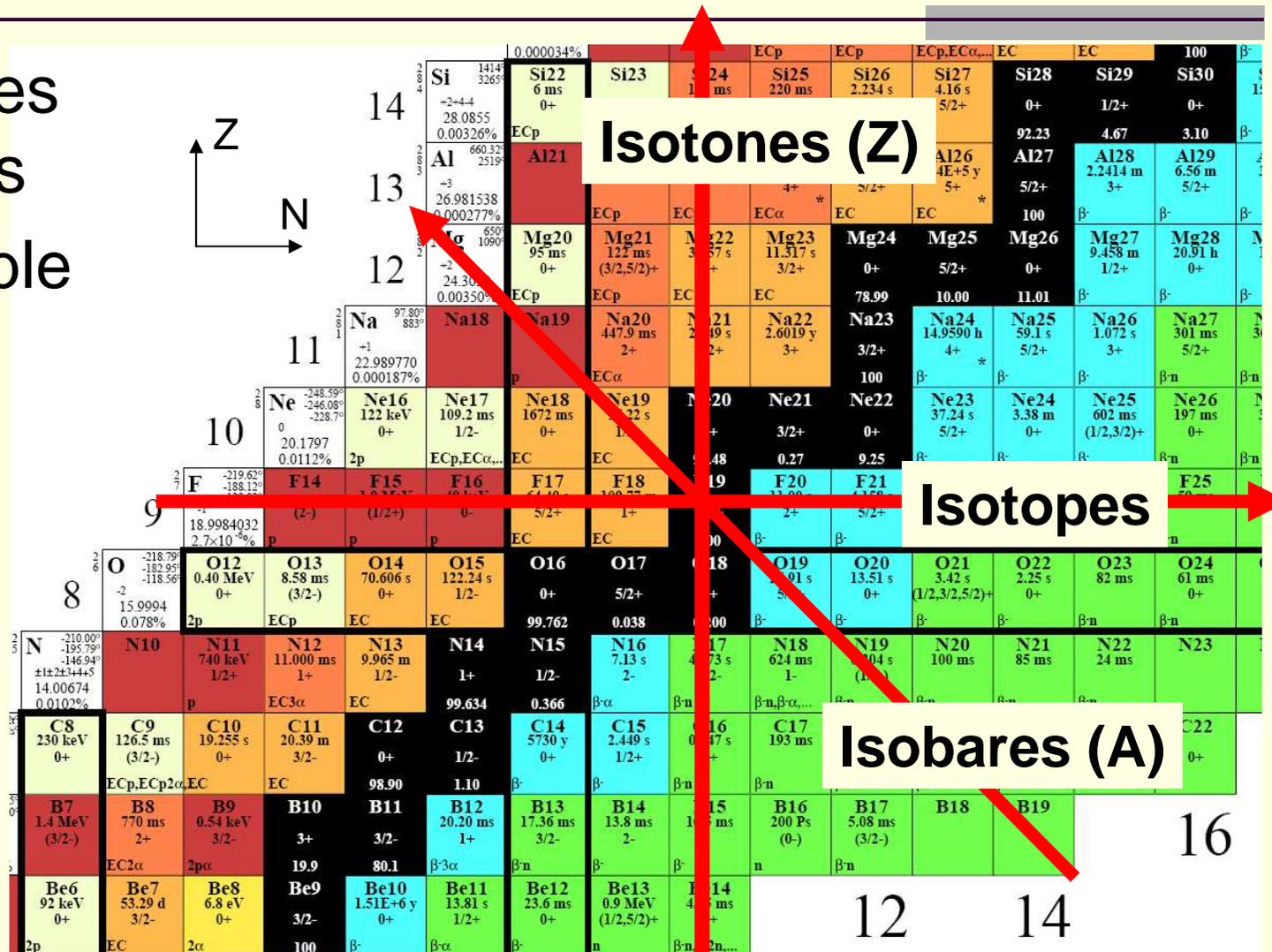
# Propriété des éléments : radioactivité

- Élément père (radioactif, **P**) → Élément fils (radiogénique, **F**)
- + il y a de **P**, + désintégration :  $\frac{dP}{dt} = -\lambda.P$
- $\lambda$  = constante de désintégration = probabilité qu'un **P** se désintègre pendant  $dt$
- Analogie avec un réservoir d'eau cubique →  $\frac{dV}{dt} = -k.V$



# Propriétés des éléments : radioactivité

- Charte des Nucléides
- Noir=stable
- Demi-vie
- Noyau d'origine



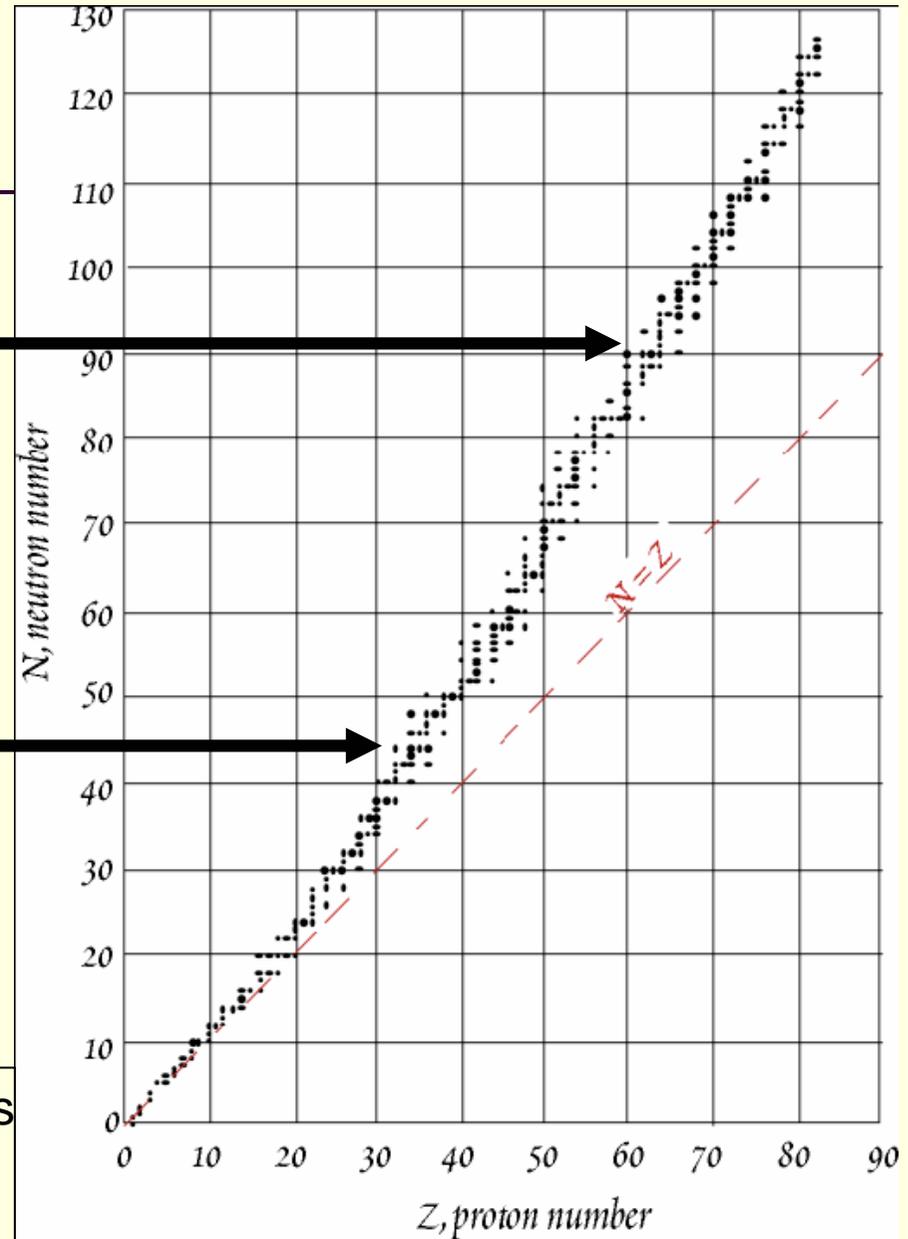
*Le tableau des isotopes stables:*

*La composition isotopique de tous les éléments chimiques a été déterminée.*

Isotopes stables naturels :  
la vallée de stabilité.

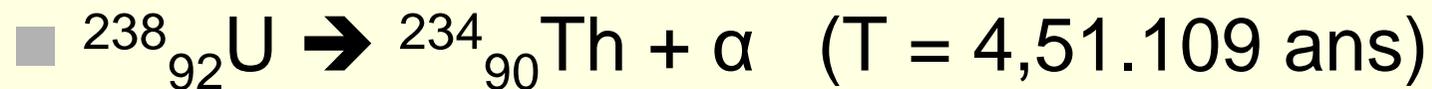
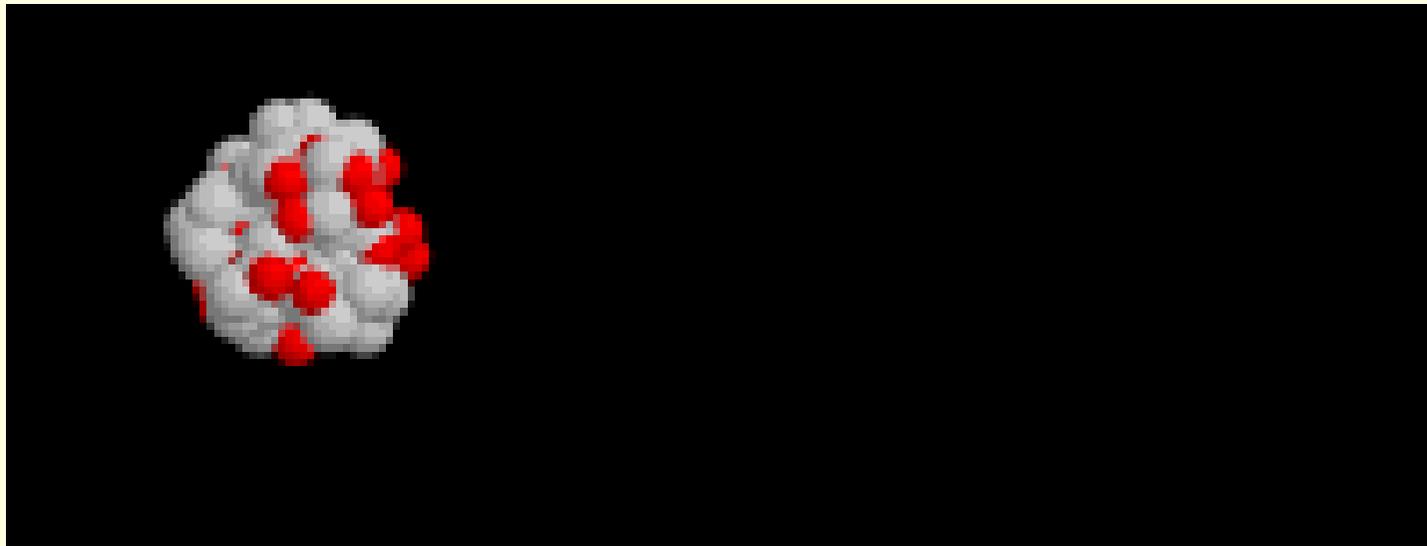
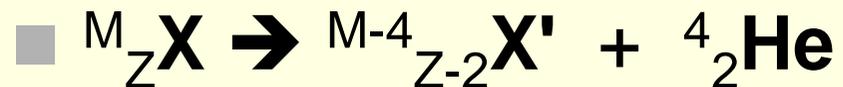
La vallée s'éloigne vers l'excès de neutrons, « empêchant les protons de se repousser et de faire éclater le noyau », i.e. neutralisant les forces de répulsions croissantes entre les protons.

NB : Les éléments à Z pair ont beaucoup plus d'isotopes que ceux pour lesquels Z est impair : loi de Oddo-Harkins.



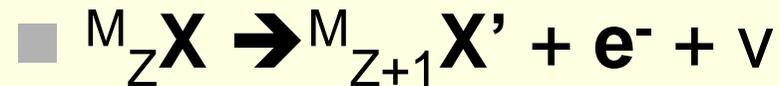
# Processus de désintégration : processus alpha

- Émission d'un noyau d'Hélium

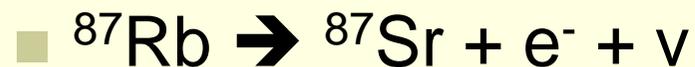


# Processus de désintégration : processus Bêta

- Émission d'un électron (transformation d'un neutron du noyau en proton)



- B minus



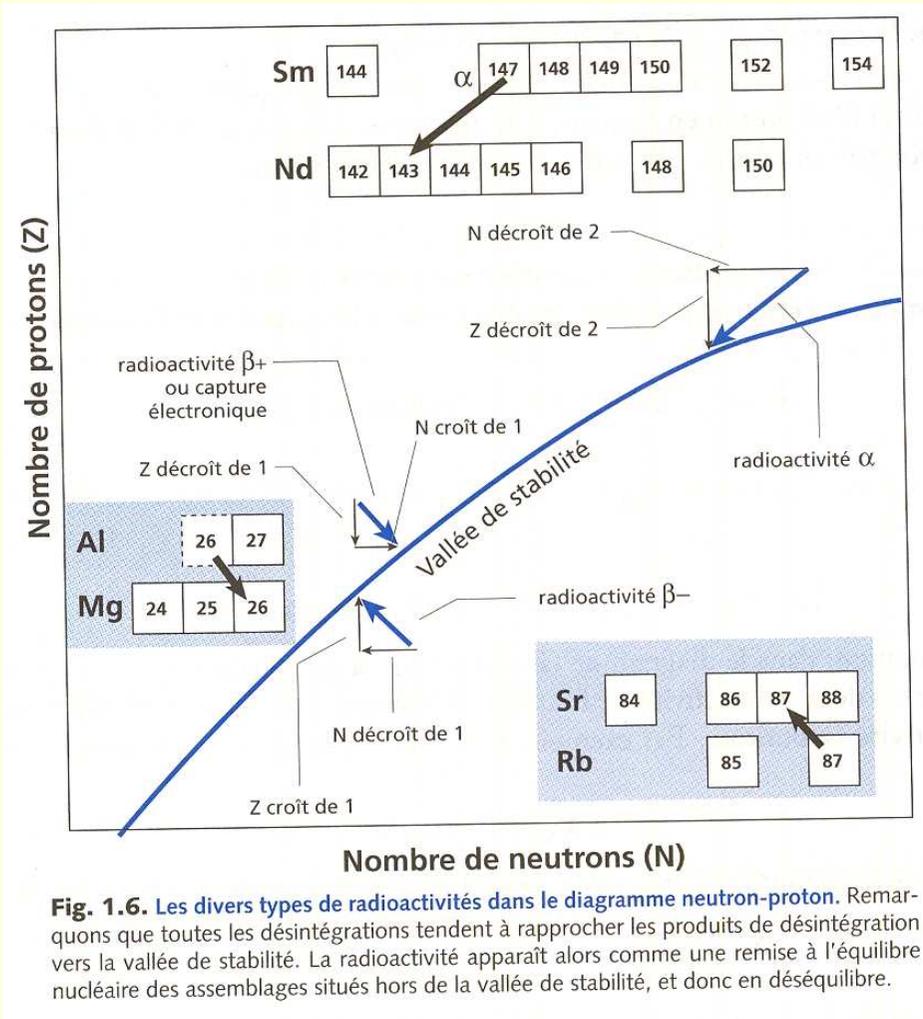
- B plus



# Processus de désintégration : radioactivité gamma

- Capture d'électron de la couche K par un proton du noyau → Émission de positron
- $e^- + p^+ \rightarrow n$
- $M_Z X \rightarrow M_{Z-1} X + \gamma$
  
- ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + \gamma$

# Propriétés des éléments : radioactivité



**Fig. 1.6. Les divers types de radioactivités dans le diagramme neutron-proton.** Remarquons que toutes les désintégrations tendent à rapprocher les produits de désintégration vers la vallée de stabilité. La radioactivité apparaît alors comme une remise à l'équilibre nucléaire des assemblages situés hors de la vallée de stabilité, et donc en déséquilibre.

Allège,  
Géologie isotopique  
(Belin)

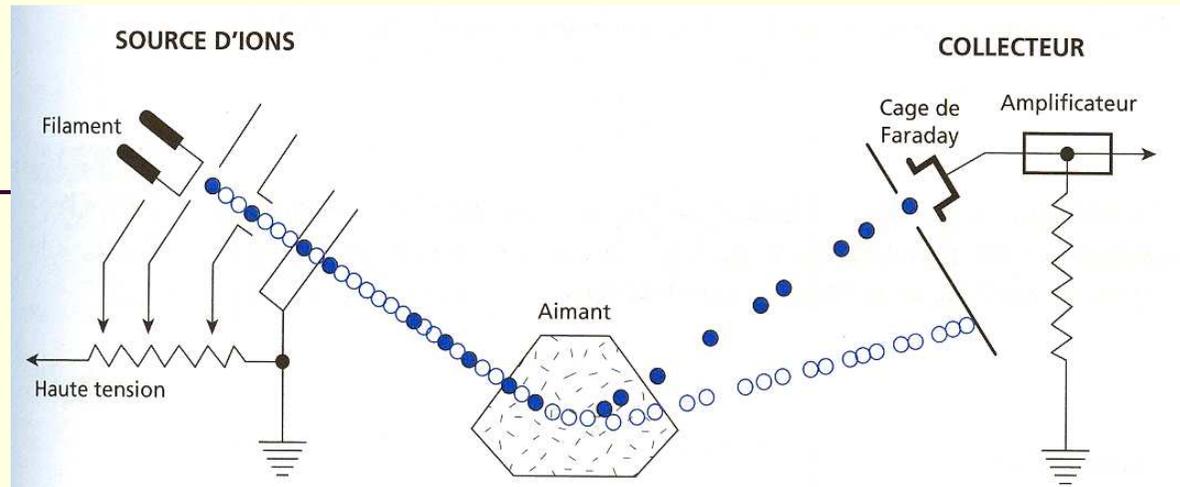
# Désintégration : synthèse

	ECp,ECα,...	EC	EC *	EC	EC *	100
<b>38</b> ms +	<b>Ca39</b> 859.6 ms 3/2+ EC	<b>Ca40</b> 0+ 96.941	<b>Ca41</b> 1.03E+5 y 7/2- EC	<b>Ca42</b> 0+ 0.647	<b>Ca43</b> 7/2- 0.135	<b>Ca44</b> 0+ 2.086
<b>37</b> 16 s 2+	<b>K38</b> 7.636 m 3+ EC *	<b>K39</b> 3/2+ 93.2581	<b>K40</b> 1.277E+9 y 4- EC,β- 0.0117	<b>K41</b> 3/2+ 6.7302	<b>K42</b> 12.360 h 2- β-	<b>K43</b> 22.3 h 3/2+ β-
<b>36</b> +	<b>Ar37</b> 35.04 d 3/2+ EC	<b>Ar38</b> 0+ 0.063	<b>Ar39</b> 269 y 7/2- β-	<b>Ar40</b> 0+ 99.600	<b>Ar41</b> 109.34 m 7/2- β-	<b>Ar42</b> 32.9 y 0+ β-
<b>35</b> 2+	<b>Cl36</b> 3.01E+5 y 2+ EC	<b>Cl37</b> 3/2+ 99.999	<b>Cl38</b> 37.24 m 2- β-	<b>Cl39</b> 55.6 m 3/2+ β-	<b>Cl40</b> 1.35 m 2- β-	<b>Cl41</b> 38.4 s (1/2, 3/2) β-

# Le spectromètre de masse

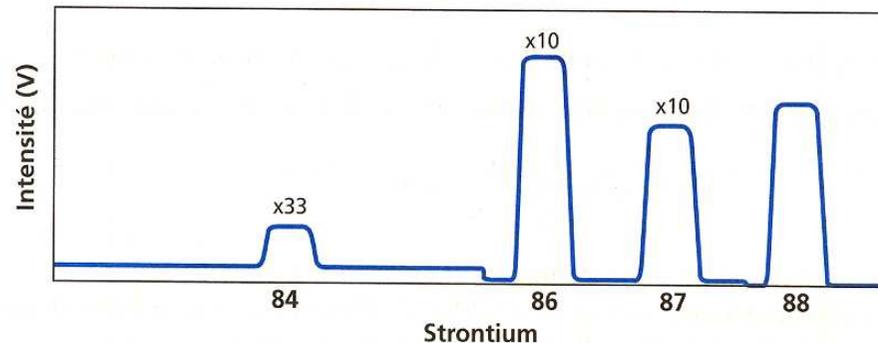
*Permet de déterminer la composition isotopique d'un élément chimique présent dans un minéral ou une roche.*

- 1 : Les atomes sont ionisés dans une chambre à vide.
- 2 : Les ions produits sont accélérés grâce à une différence de potentiel (20 kVolts).
- 3 : Les faisceaux d'ions produisent un courant électrique qui passe dans un champ magnétique.
- 4 : Le champ magnétique dévie les ions en fonction de leur masse.



**La valeur relative des courants électroniques donne l'abondance relative de chaque isotope.**

ISOTOPES DU STRONTIUM



**Fig. 1.1. Un spectromètre de masse à thermoionisation.** Au centre, l'électroaimant dont le champ est perpendiculaire à la figure et dirigé vers le bas puisque le courant d'ions vient de la gauche et que la face est dirigée vers le haut, d'après la règle électromagnétique des trois doigts de la main droite. On peut aussi disposer plusieurs cages de Faraday et mesurer simultanément le courant de chacun des isotopes: c'est la multicollection. On n'a pas représenté sur la figure un élément important du montage: l'ensemble est immergé dans un vide de l'ordre de  $10^{-7}$  à  $10^{-9}$  millimètre de mercure<sup>2</sup>. En bas un spectre de masse de l'élément strontium.

# Methodes radiochronologiques

---

- **Systeme riche** : abondance initiale de l'isotope radiogenique est negligeeable → Mesure directe des isotopes pere et fils actuel → Âge (K/Ar,  $^{14}\text{C}$ , U/Pb)
- **Systeme pauvre** : Abondance initiale de l'isotope radiogenique non negligeeable (Sm/Nd, Rb/Sr)

# Calcul d'isochrones (A connaître !)

- Équation de base de la radioactivité (1) :

$$\frac{dP}{d\theta} = -\lambda P$$

- Intégration de (1) :

$N_0 = N_b$  parent à  $t=0$

$$\int_{N_0}^N \frac{dP}{p} = \int_0^t -\lambda d\theta \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

- Soit (2) :

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

- Calcul de la demie vie :  $t_{1/2} \Leftrightarrow N/N_0 = 1/2$

→

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

# Calcul d'isochrones (A connaître !)

- Nombre d'atomes Fils  $F$  :  $F = N_0 - N$

- Réarrangeons (2)  $\rightarrow F = Ne^{\lambda t} - N = N(e^{\lambda t} - 1)$

- Si à  $t=0$  il y a déjà  $F_0$  fils (3)

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

- L'âge est donné par :

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(1 + \frac{F - F_0}{N}\right)$$

- **Si  $\lambda t \ll 1$**  (développement limité de Taylor de la fonction exponentielle), alors

$$e^{\lambda t} = 1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \frac{(\lambda t)^3}{3!} + 0(t^4)$$

- Soit,

$$F = F_0 + N\lambda t$$

# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Méthode Rb/Sr

- 2 isotopes du  ${}_{37}\text{Rb}$  :  ${}^{85}\text{Rb}$  et  ${}^{87}\text{Rb}$
- ${}^{87}\text{Rb} \rightarrow {}^{87}\text{Sr} + e^- + \nu$  avec  $\lambda = 1.42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$
- Equation (3)  $\rightarrow$  (4)

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

- ${}_{38}\text{Sr}$  : 4 isotopes (84-86-87-88)  $\rightarrow$  seul  ${}^{87}\text{Sr}$  radiogénique
- Dans (4) :  $({}^{87}\text{Sr})$ ,  $({}^{87}\text{Rb})$  mesurables
- $({}^{87}\text{Sr})_0$  *inconnue* !
- Or  $({}^{86}\text{Sr})$  stable, non radiogénique  $\rightarrow ({}^{86}\text{Sr})_0 = ({}^{86}\text{Sr})_t$
- Mesures de rapports beaucoup plus facile et précis !

# Méthode Rb/Sr

- → L'équation devient :

$$\left( \begin{array}{c} {}^{87}\text{Sr} \\ {}^{86}\text{Sr} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} {}^{87}\text{Rb} \\ {}^{86}\text{Sr} \end{array} \right) (e^{\lambda t} - 1) + \left( \begin{array}{c} {}^{87}\text{Sr} \\ {}^{86}\text{Sr} \end{array} \right)_0$$

- De la forme :  $y = ax+b$  → **isochrone**

# Méthode Rb/Sr

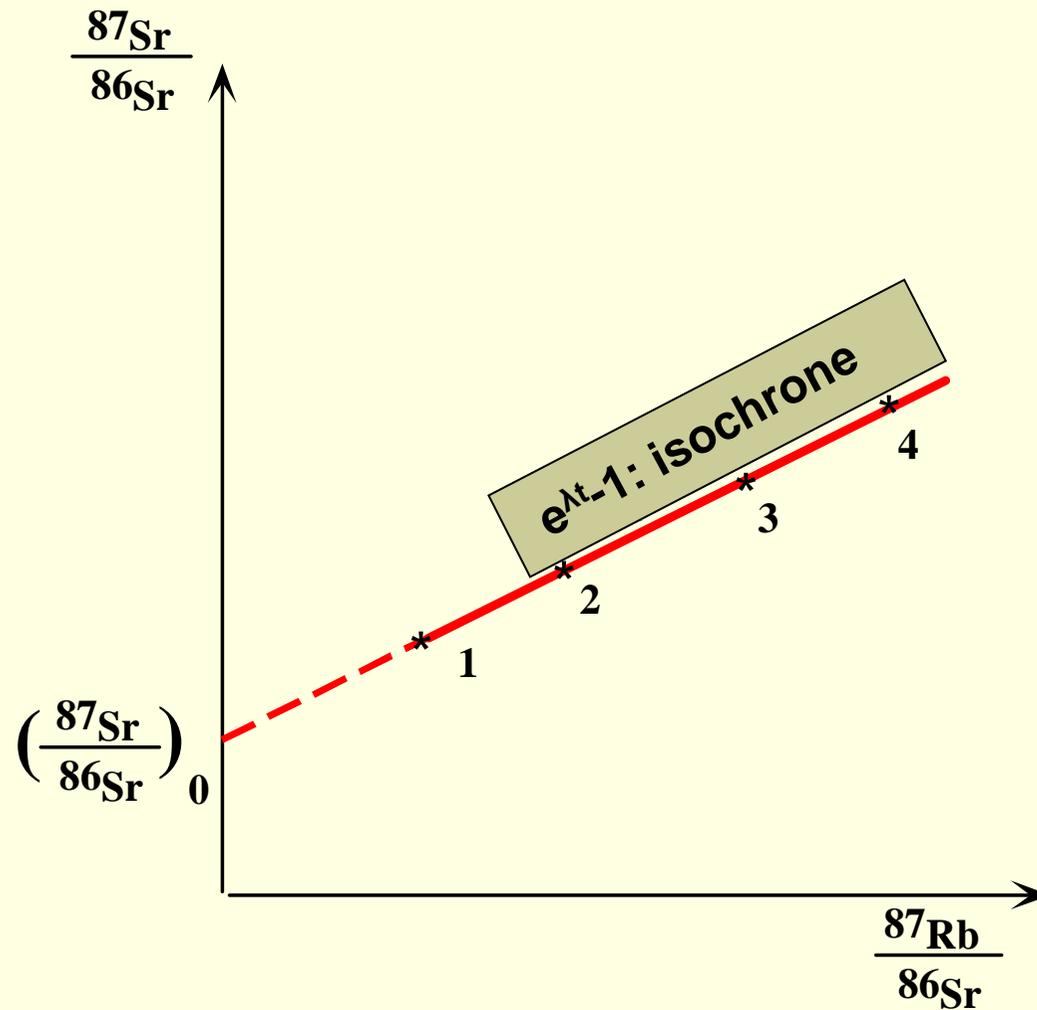
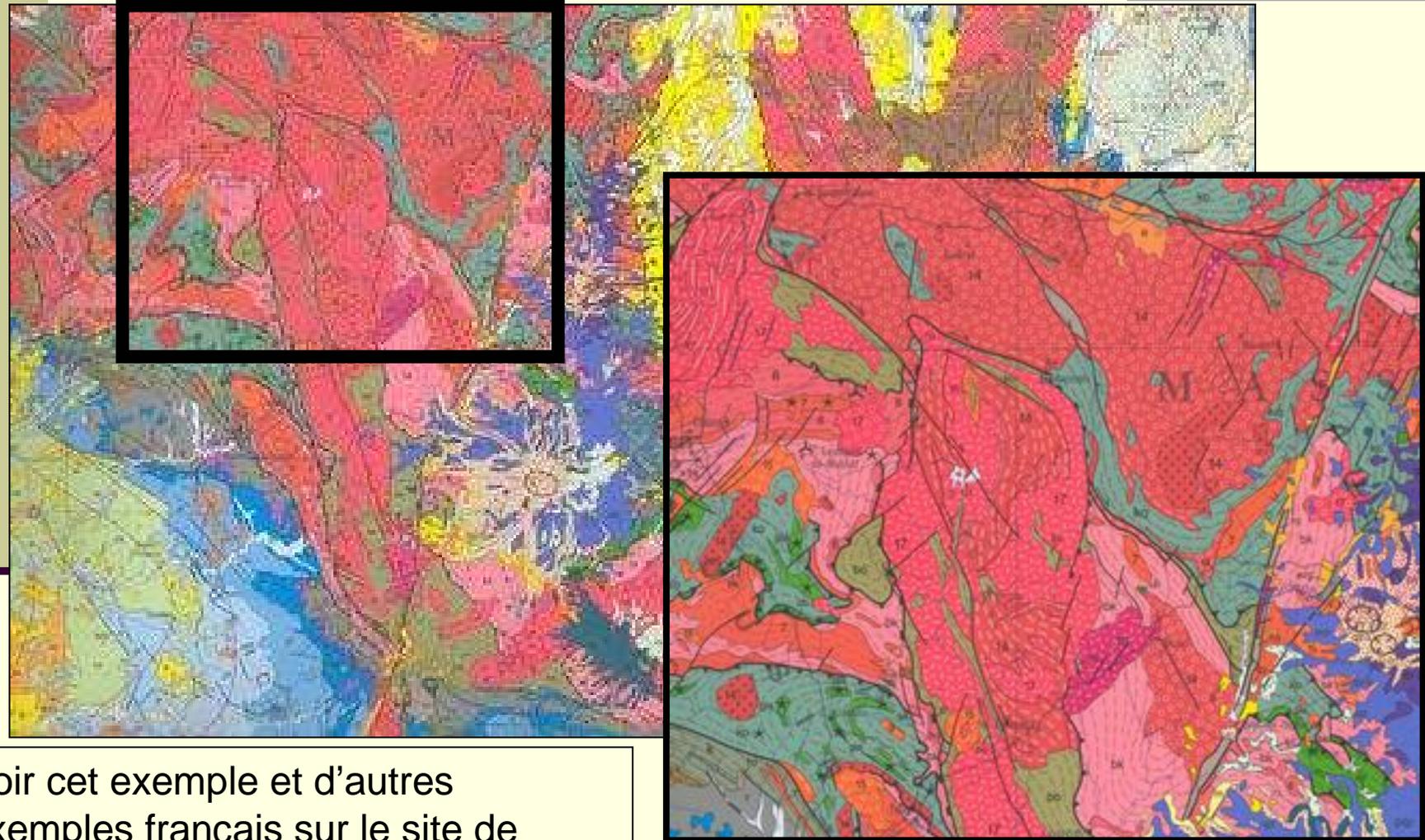


Fig.1 : tracé d'une isochrone dans le système radiochronologique Rb - Sr

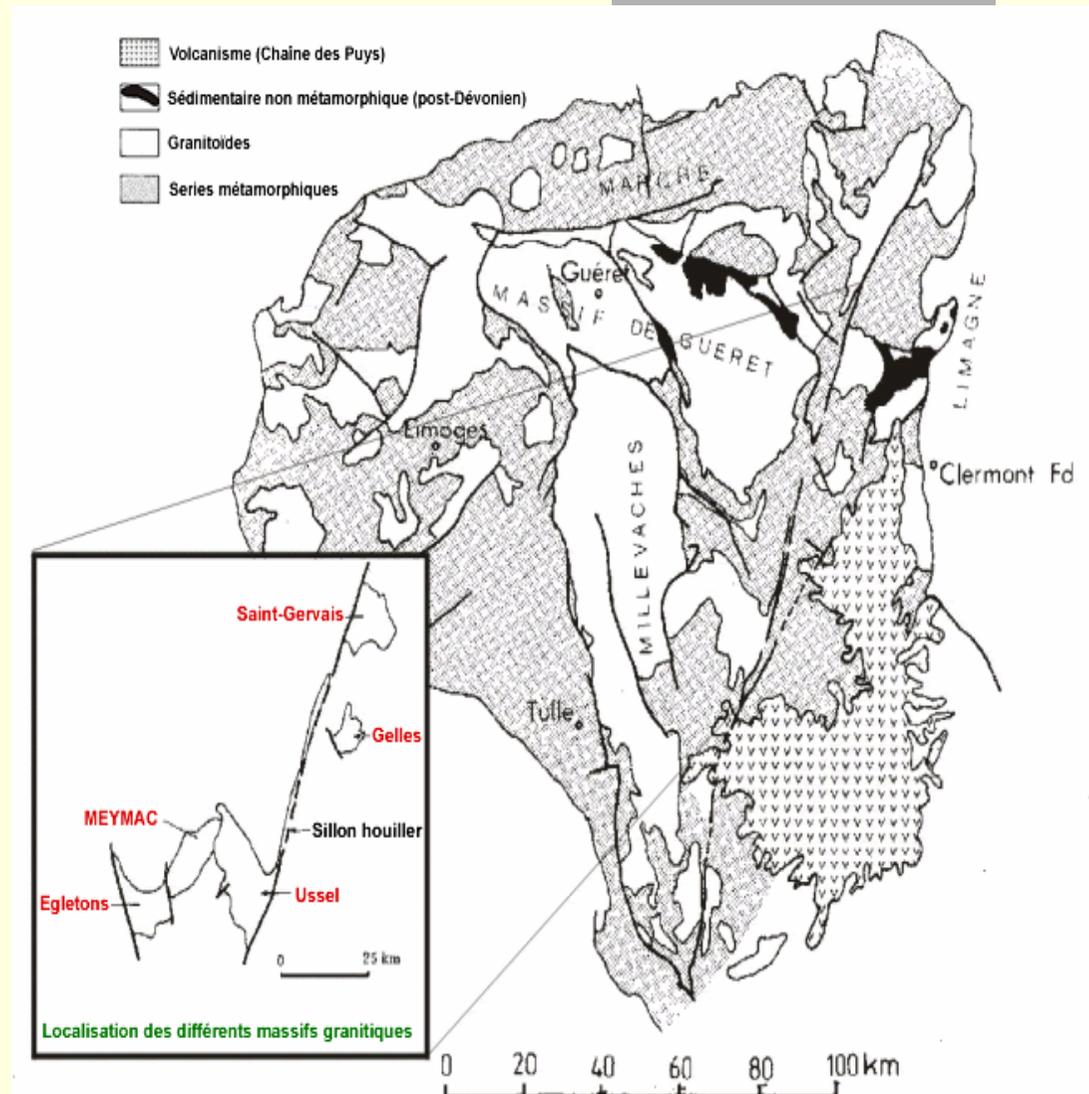
# Application : granite du massif central



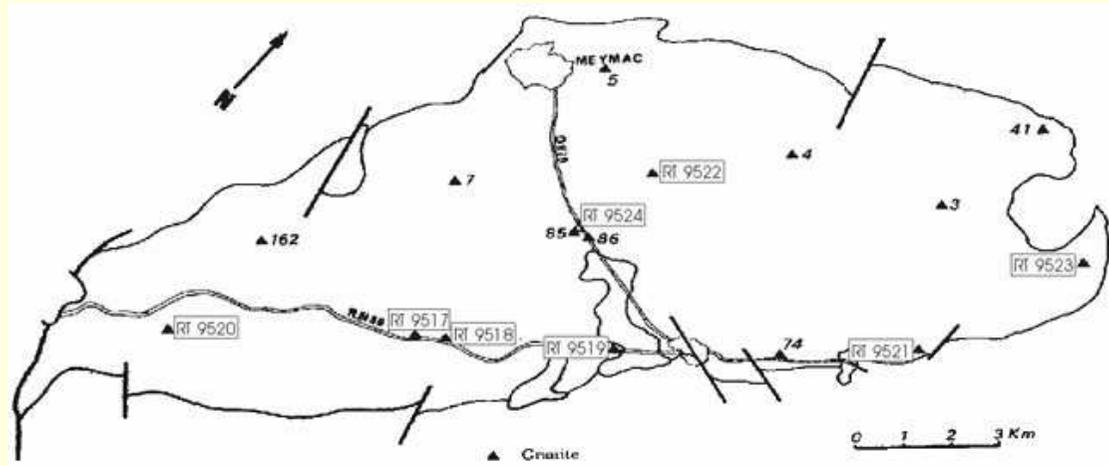
Voir cet exemple et d'autres  
exemples français sur le site de  
*planet-terre*

# Application : granite du massif central

- **Contexte géologique**
- Granite de Meymac = ensemble de trois granites intrusifs dans les formations métamorphiques du plateau corrézien.
- Granite de *Meymac* plus jeune que granite d'*Ussel* qu'il recoupe
- Son contact par faille avec le granite d'*Egletons* ne permet pas de les classer en géochronologie relative.



# Application : granite du massif central



- Echantillonnage
- Feuilles de :
  - Bort-les Orgues
  - Meymac
  - Ussel

# Application : granite du massif central

## Granite de Meymac

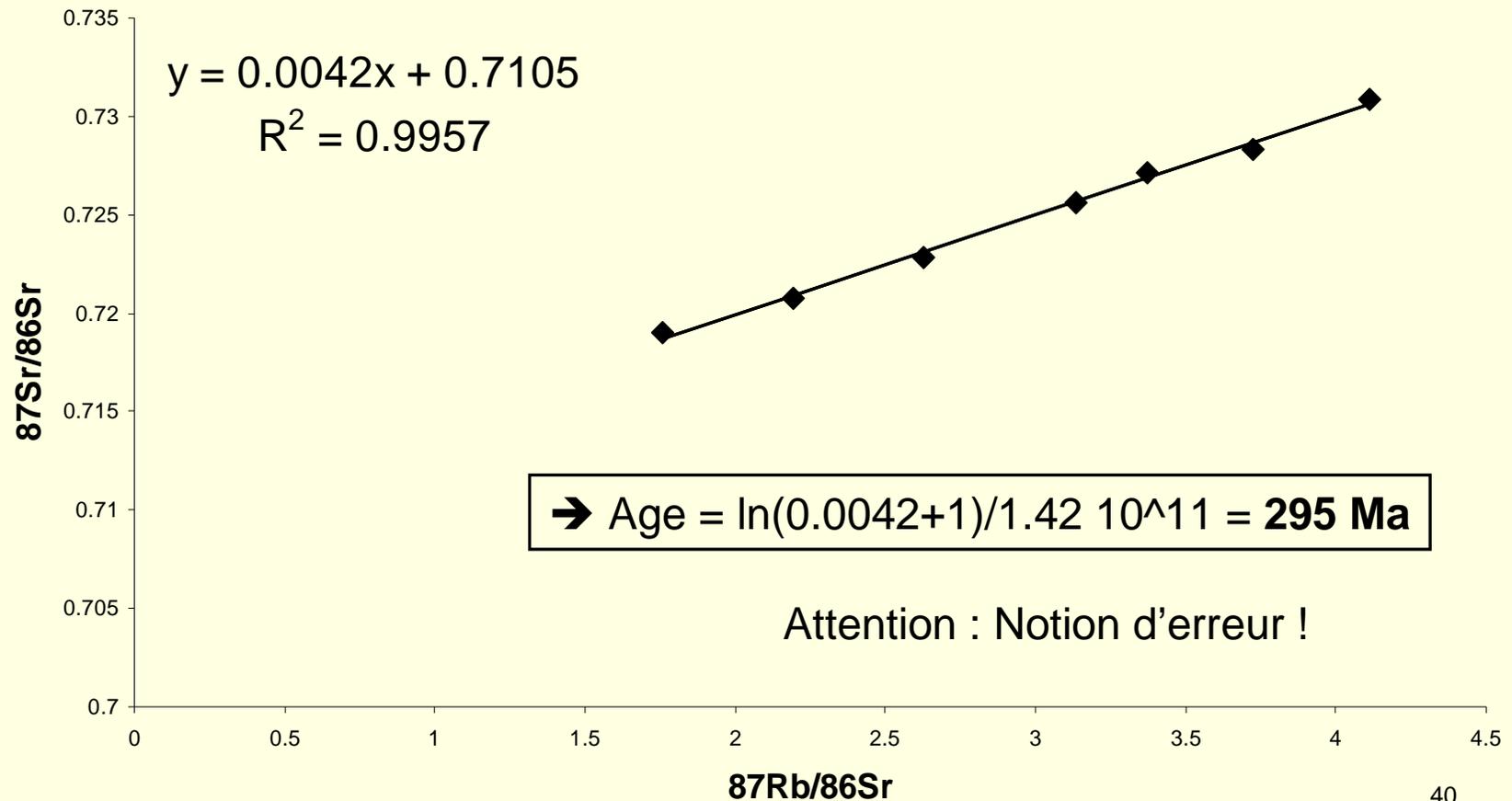
8 échantillons du granite porphyroïde

	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
RT7188	187	308	1,7578	0,71903
RT7189	218	288	2,1926	0,72076
RT7190	230	254	2,6272	0,72279
RT7191	206	191	3,1319	0,72561
RT7192	207	117	3,3737	0,72711
RT7193	216	168	3,7229	0,72833
RT7194	220	165	4,1099	0,73090

→ **Calculez l'âge du granite**

# Application : granite du massif central

## Isochrone Granite de Meymac



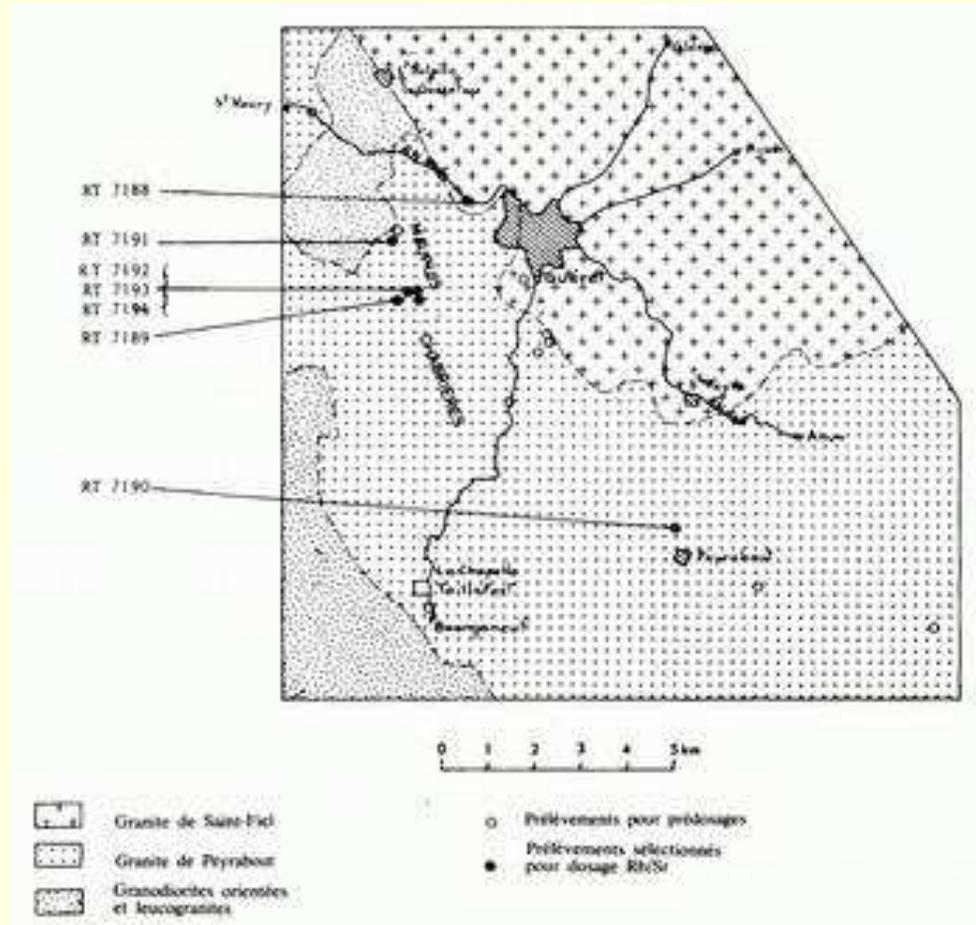
# Application : granite du massif central

---

- Granite de Meymac : Carbonifère supérieur
- → Postérieur aux roches métamorphiques encaissantes (Dévonien inférieur à moyen)
- → Antérieur aux dépôts stéphanien du bassin de Lapeau dans lequel des galets du granite de Meymac ont été signalés

# Application : granite du massif central

## ■ Granite de Guéret

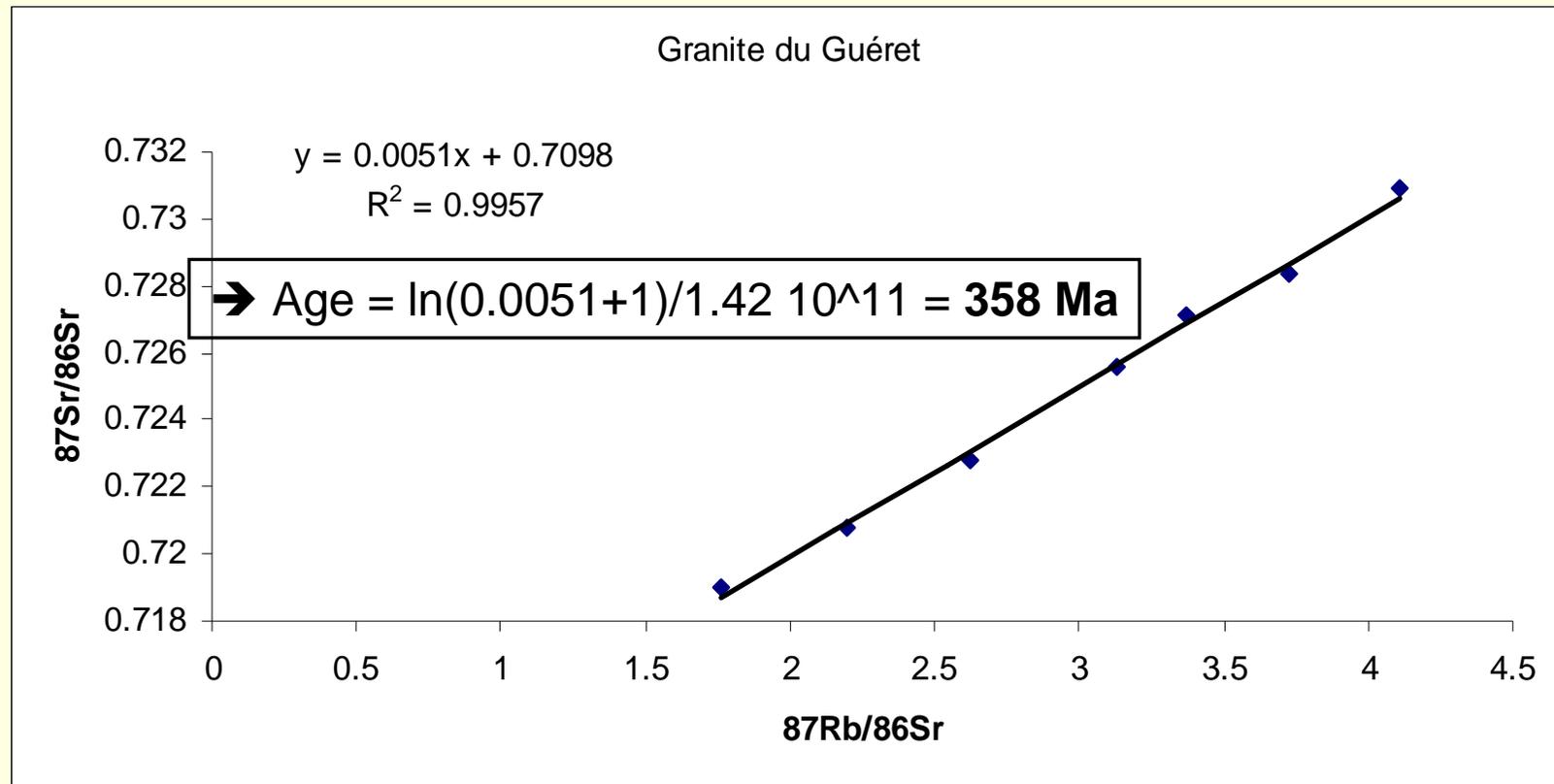


# Application : granite du massif central

## Granite de Guéret (N Limousin)

	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
RT7188	187	308	1,7578	0,71903
RT7189	218	288	2,1926	0,72076
RT7190	230	254	2,6272	0,72279
RT7191	206	191	3,1319	0,72561
RT7192	207	117	3,3737	0,72711
RT7193	216	168	3,7229	0,72833
RT7194	220	165	4,1099	0,73090

# Application : granite du massif central



# Application : granite du massif central

---

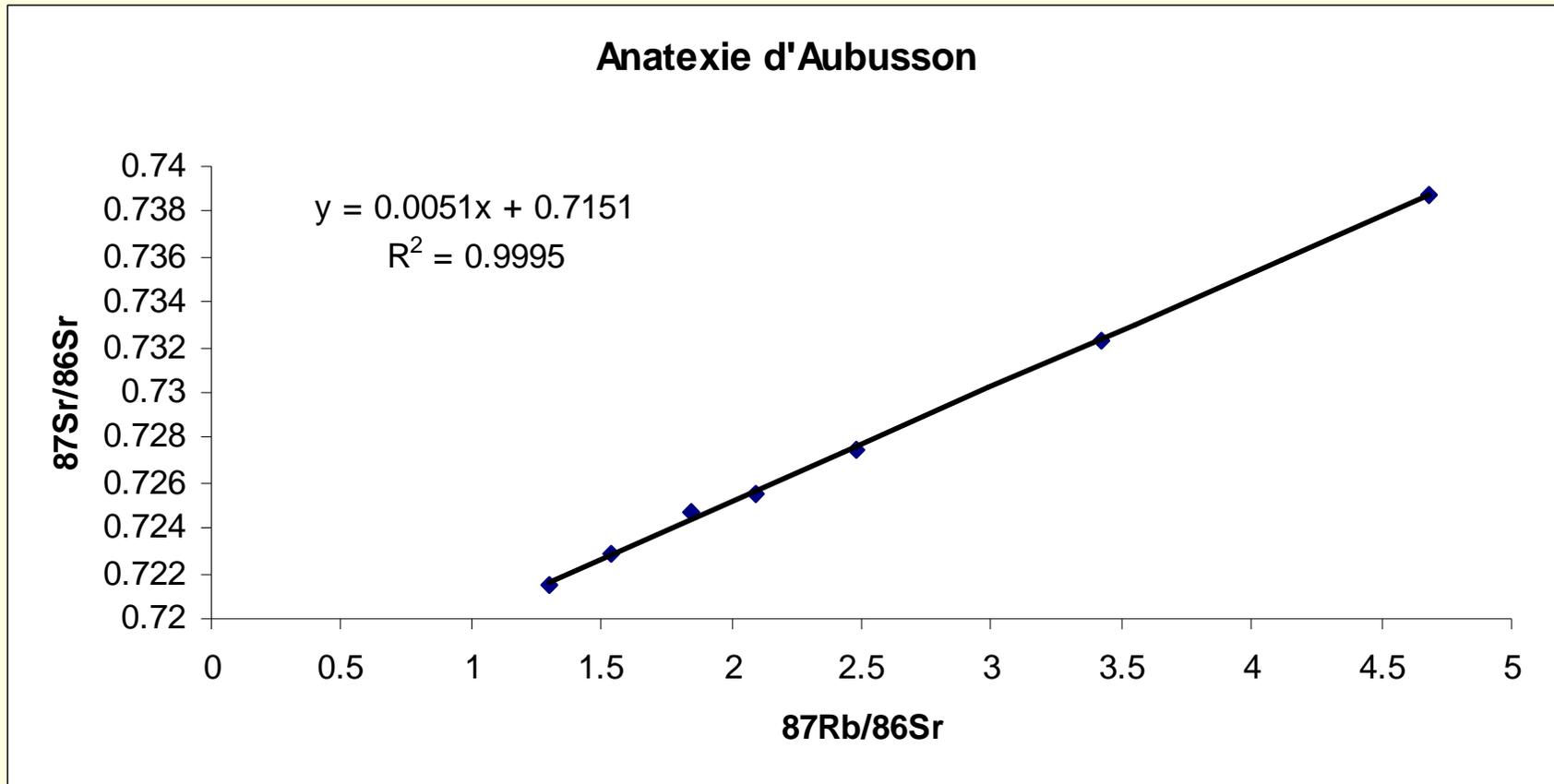
- Granite de Guéret : génération de granite, de type granodiorite et monzogranite, anté-viséen supérieur, présent essentiellement dans la partie Nord du Massif Central avant la phase tectonique majeure de la collision hercynienne.

# Application : granites du Massif Central

## anatexites à cordiérite d'Aubusson

	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
R9287	1,85	0,72469
R9288	1,54	0,72290
R9289	2,09	0,72552
R9290	3,42	0,73232
R9291	2,48	0,72750
R9292	4,68	0,73877
R9293	1,3	0,72155

# Application : granite du massif central



→ Age =  $\ln(0.0051+1)/1.42 \cdot 10^{11} = 358 \text{ Ma}$

# Application : granite du massif central

---

- Anatexies d'Aubusson contemporain de Guéret !
- Mais rapport initiaux différents → magmas parents différents
- Aubusson = anatexie
- → Granite de Guéret ne provient pas de la fusion des anatexies !

# Autres géochronomètres absolus à période de demi-vie élevée

- Quel géochronomètre pour quel âge ?

Table 8.2: LONG-LIVED RADIOACTIVE DECAY SYSTEMS OF GEOCHEMICAL INTEREST

Parent	Decay Mode	$\lambda$	Half-life	Daughter	Ratio
$^{40}\text{K}$	$\beta^+$ , e.c, $\beta^-$	$5.543 \times 10^{-10}\text{y}^{-1}$	$1.28 \times 10^9\text{yr}$	$^{40}\text{Ar}$ , $^{40}\text{Ca}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
$^{87}\text{Rb}$	$\beta^-$	$1.42 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$4.8 \times 10^{10}\text{yr}$	$^{87}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
$^{138}\text{La}$	$\beta^-$	$2.67 \times 10^{-12}\text{y}^{-1}$	$2.59 \times 10^{11}\text{yr}$	$^{138}\text{Ce}$	$^{138}\text{Ce}/^{142}\text{Ce}$ , $^{138}\text{Ce}/^{136}\text{Ce}$
$^{147}\text{Sm}$	$\alpha$	$6.54 \times 10^{-12}\text{y}^{-1}$	$1.06 \times 10^{11}\text{yr}$	$^{143}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$
$^{176}\text{Lu}$	$\beta^-$	$1.94 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$3.6 \times 10^{10}\text{y}$	$^{176}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$
$^{187}\text{Re}$	$\beta^-$	$1.64 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$4.23 \times 10^{10}\text{y}$	$^{187}\text{Os}$	$^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ , $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$
$^{232}\text{Th}$	$\alpha$	$4.948 \times 10^{-11}\text{y}^{-1}$	$1.4 \times 10^{10}\text{y}$	$^{208}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , $^3\text{He}/^4\text{He}$
$^{235}\text{U}$	$\alpha$	$9.849 \times 10^{-10}\text{y}^{-1}$	$7.07 \times 10^8\text{y}$	$^{207}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , $^3\text{He}/^4\text{He}$
$^{238}\text{U}$	$\alpha$	$1.551 \times 10^{-10}\text{y}^{-1}$	$4.47 \times 10^9\text{y}$	$^{206}\text{Pb}$ , $^4\text{He}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , $^3\text{He}/^4\text{He}$

Note: the branching ratio, i.e. ratios of decays to  $^{40}\text{Ar}$  to total decays of  $^{40}\text{K}$  is 0.117. The production of  $^4\text{He}$  from  $^{147}\text{Sm}$  decay is insignificant compared to that produced by decay of U and Th.

# Méthode Sm/Nd

- $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$
- $\Lambda = 6.54 \cdot 10^{-12}$  (approprié pour datation roches archéennes)
- $\rightarrow$  Approximation : pour  $x \ll 1$ ,  $e^x = 1 + x$
- Normalisé à  $^{144}\text{Nd}$

$$\left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_t \approx \left( \frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}} \right)_0 + \lambda \left( \frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}} \right)_t t$$

# Autres géochronomètres absolus à période de demi-vie élevée (U/Pb)

- Exemple de la méthode (U/Pb) concordia / discordia
- Système U – Th – Pb
- Basé sur les concepts précédents
- Zircons :
  - Pb provenant désintégration U
  - Riche en U

$${}^{207}\text{Pb}_m = {}^{235}\text{U}_m (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

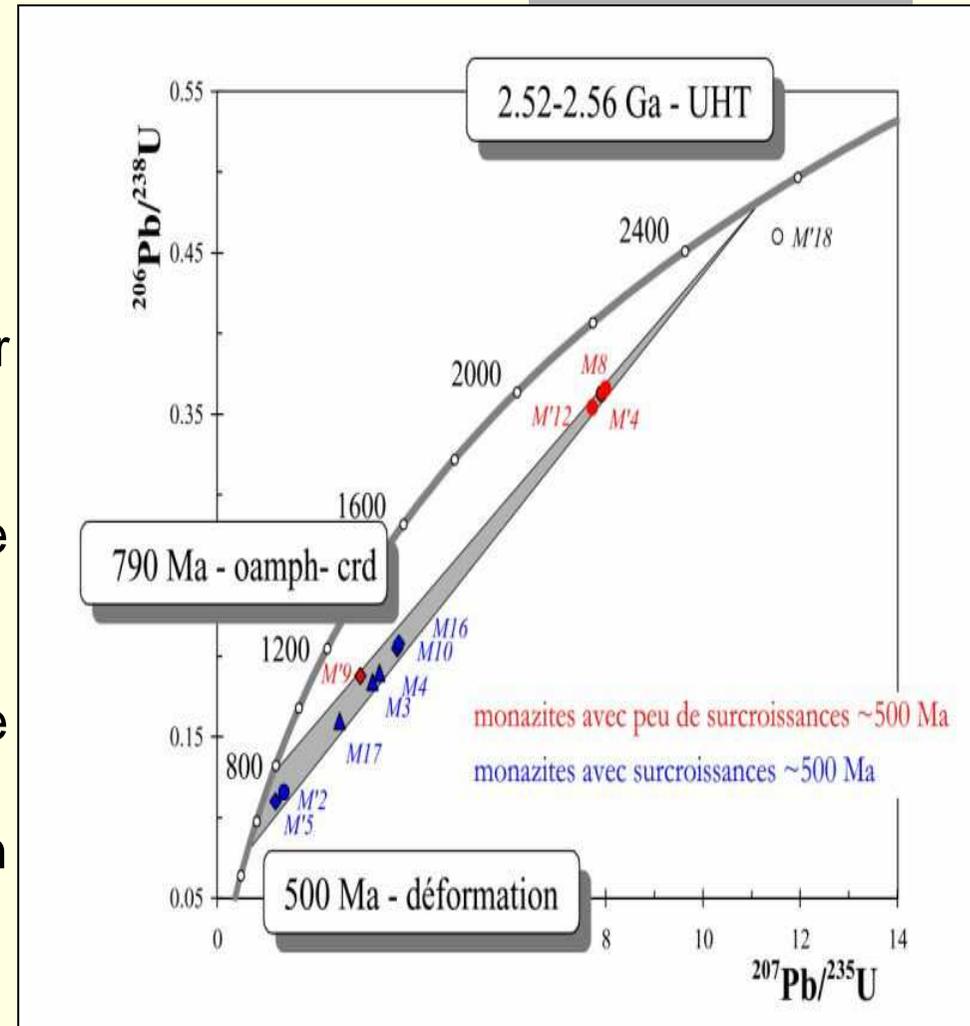
$${}^{206}\text{Pb}_m = {}^{238}\text{U}_m (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

→ Etablissement d'une **courbe théorique** = **Concordia**

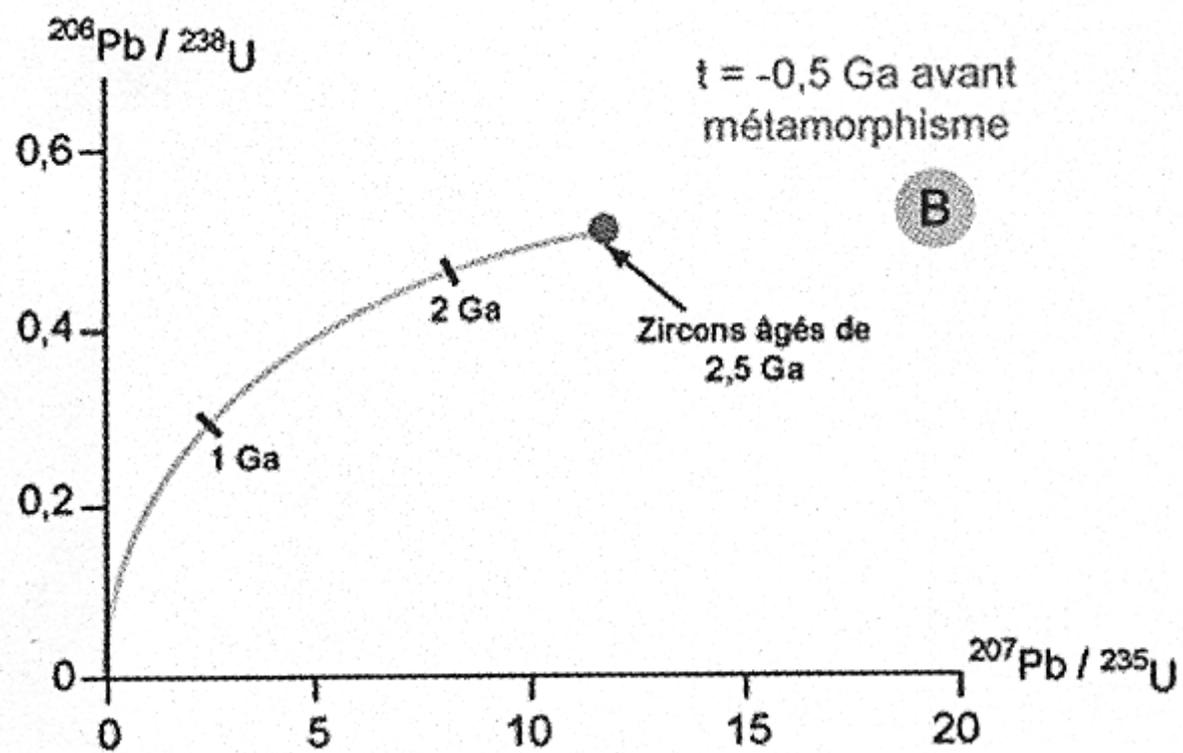
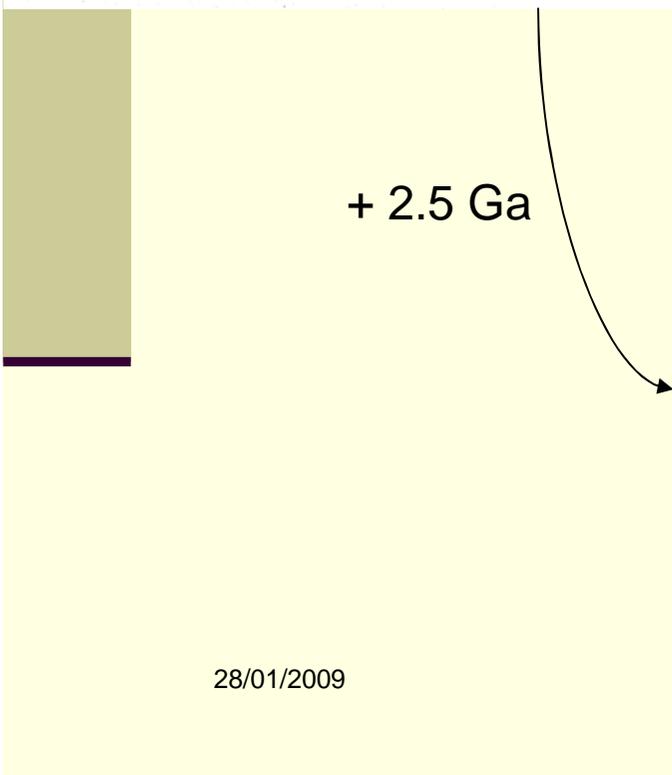
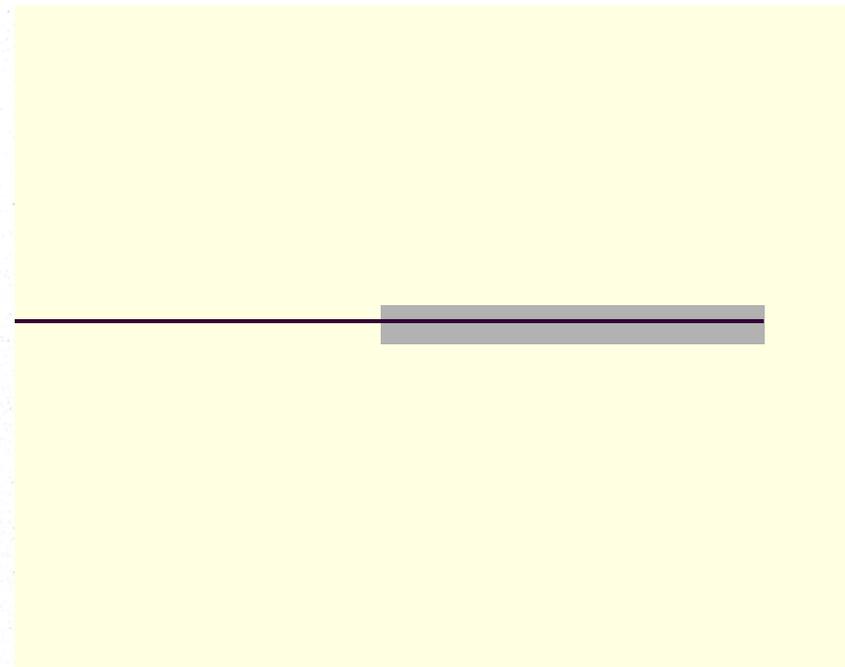
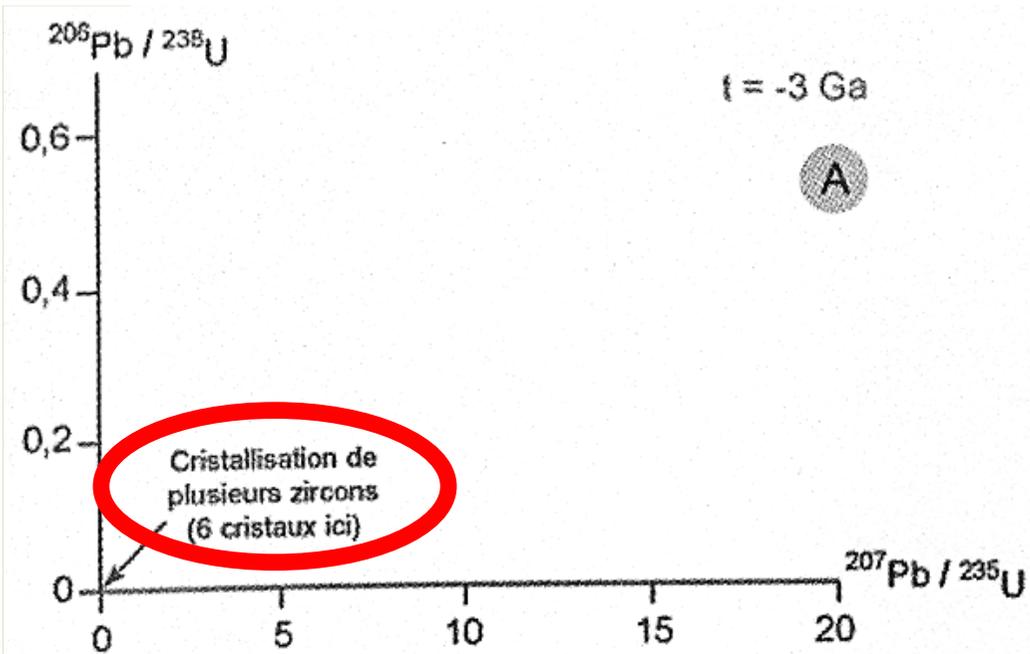
**Concordia** = points dont chaque méthode U-Pb donne âge identique → **âge de cristallisation du minéral**

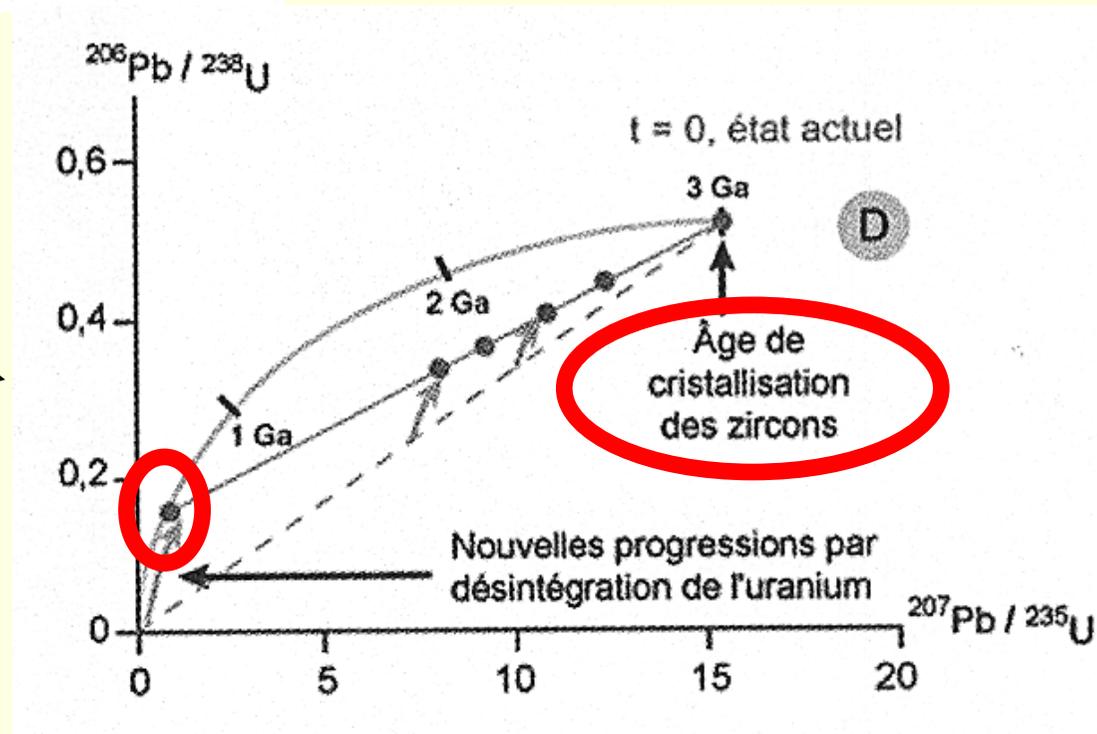
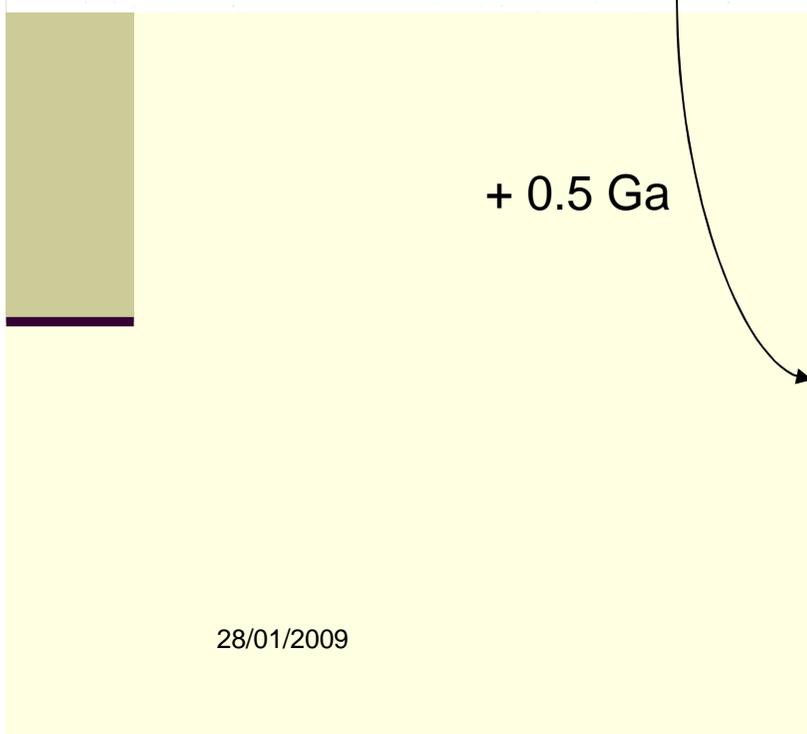
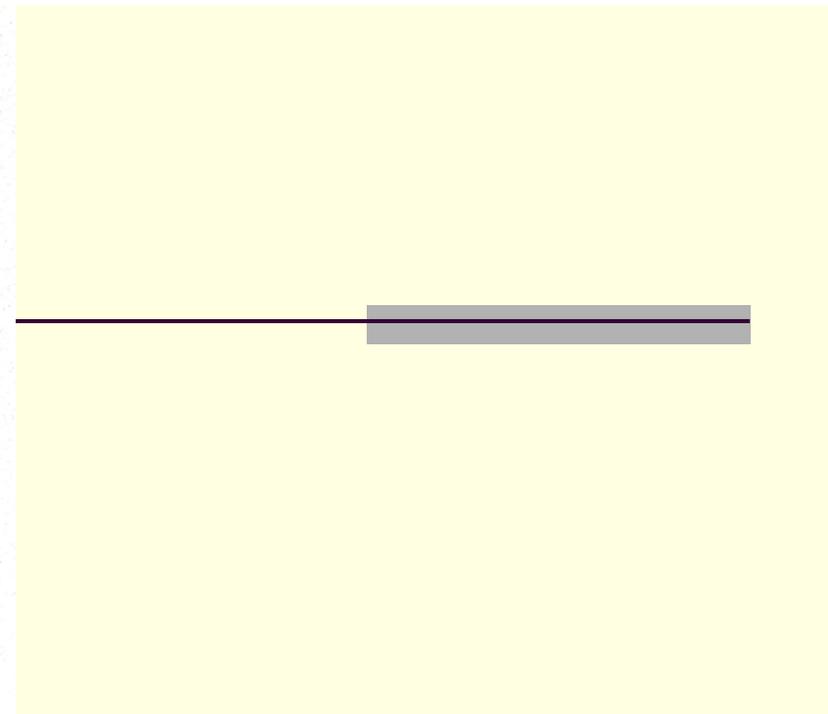
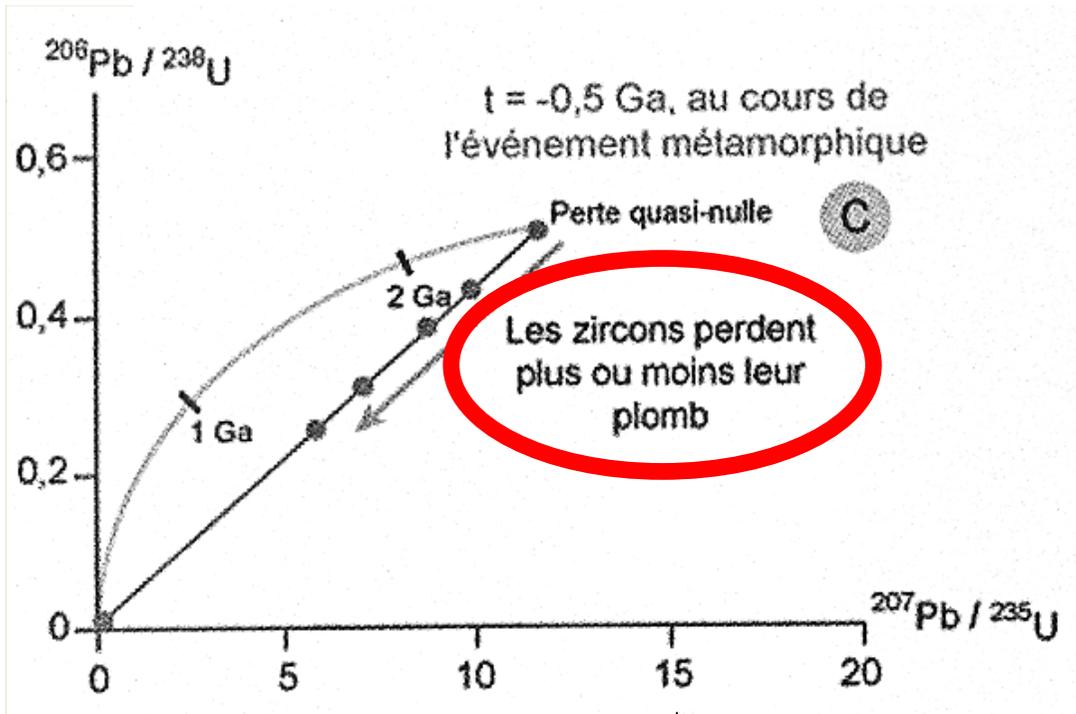
# Autres géochronomètres absolus à période de demi-vie élevée (U/Pb)

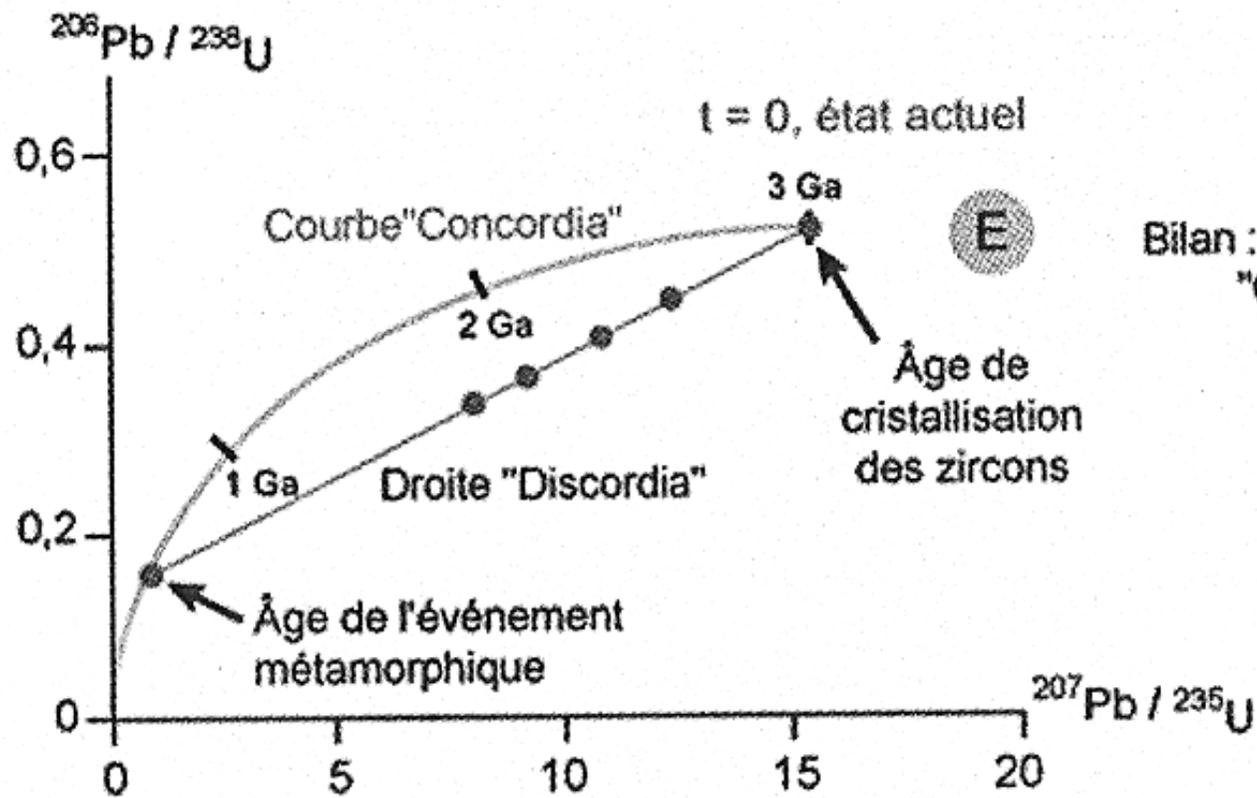
- Si âges ne sont pas concordants → points alignés sur une droite = **Discordia**
- Signification : Perte du plomb dans le système par ouverture du système
- Intersection supérieure concordia/discordia → âge de cristallisation
- Intersection inférieure concordia/discordia → âge d'ouverture
- Concept remis en question (analyse ponctuelle) !



Granulite (Zircons) Madagascar –C. Nicolet)







Bilan : l'utilisation du diagramme "Concordia-Discordia"

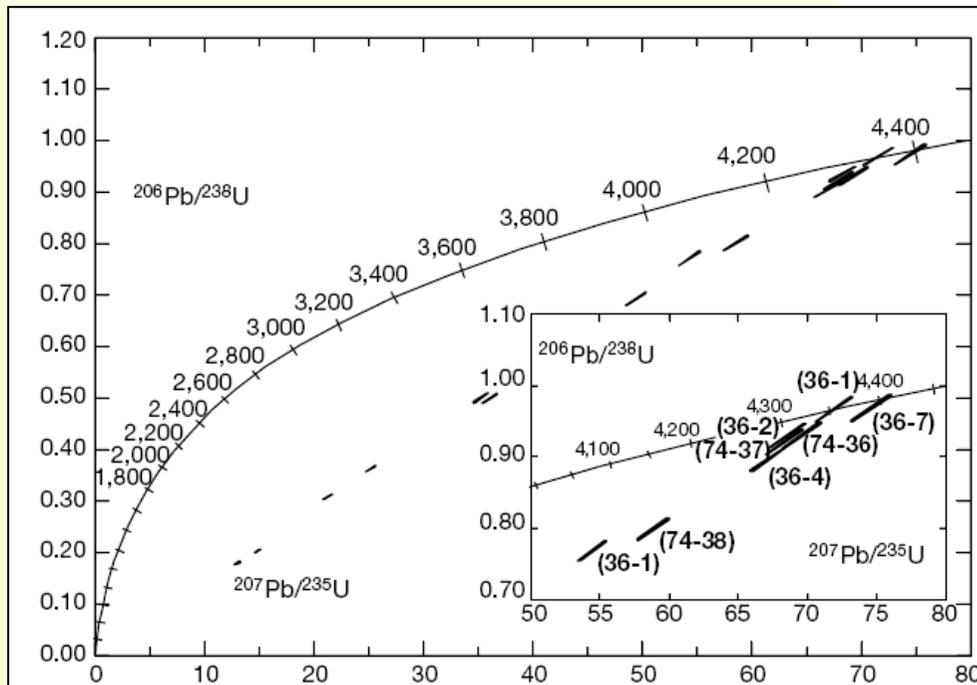
# Autres géochronomètres absolus à période de demi-vie élevée (U/Pb)

■ Les plus vieux zircons !

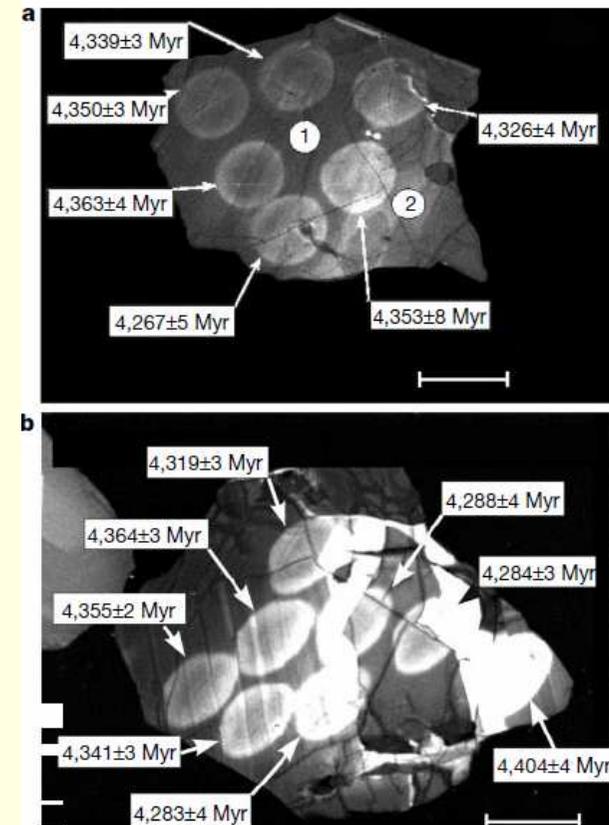
**Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago**

NATURE | VOL 409 | 11 JANUARY 2001 | www.nature.com

Simon A. Wilde\*, John W. Valley†, William H. Peck†† & Colin M. Graham§

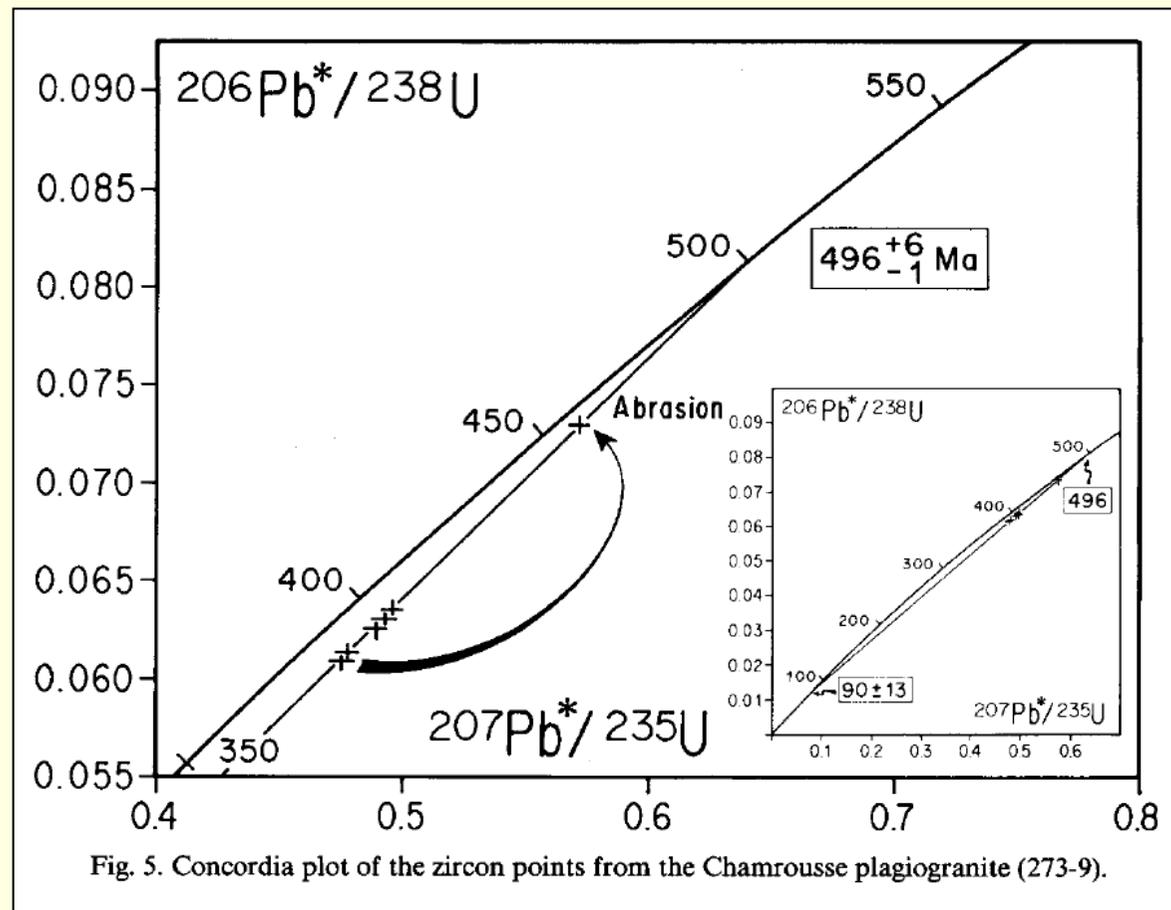


**Figure 2** Combined concordia plot for grain W74/2-36, showing the U-Pb results obtained during the two analytical sessions. The inset shows the most concordant data points together with their analysis number (as in Table 1). Error boxes are shown at  $1\sigma$ .



# Autres géochronomètres absolus à période de demi-vie élevée (U/Pb)

- Chamrousse
- Ménot et al. EPSL, 1988



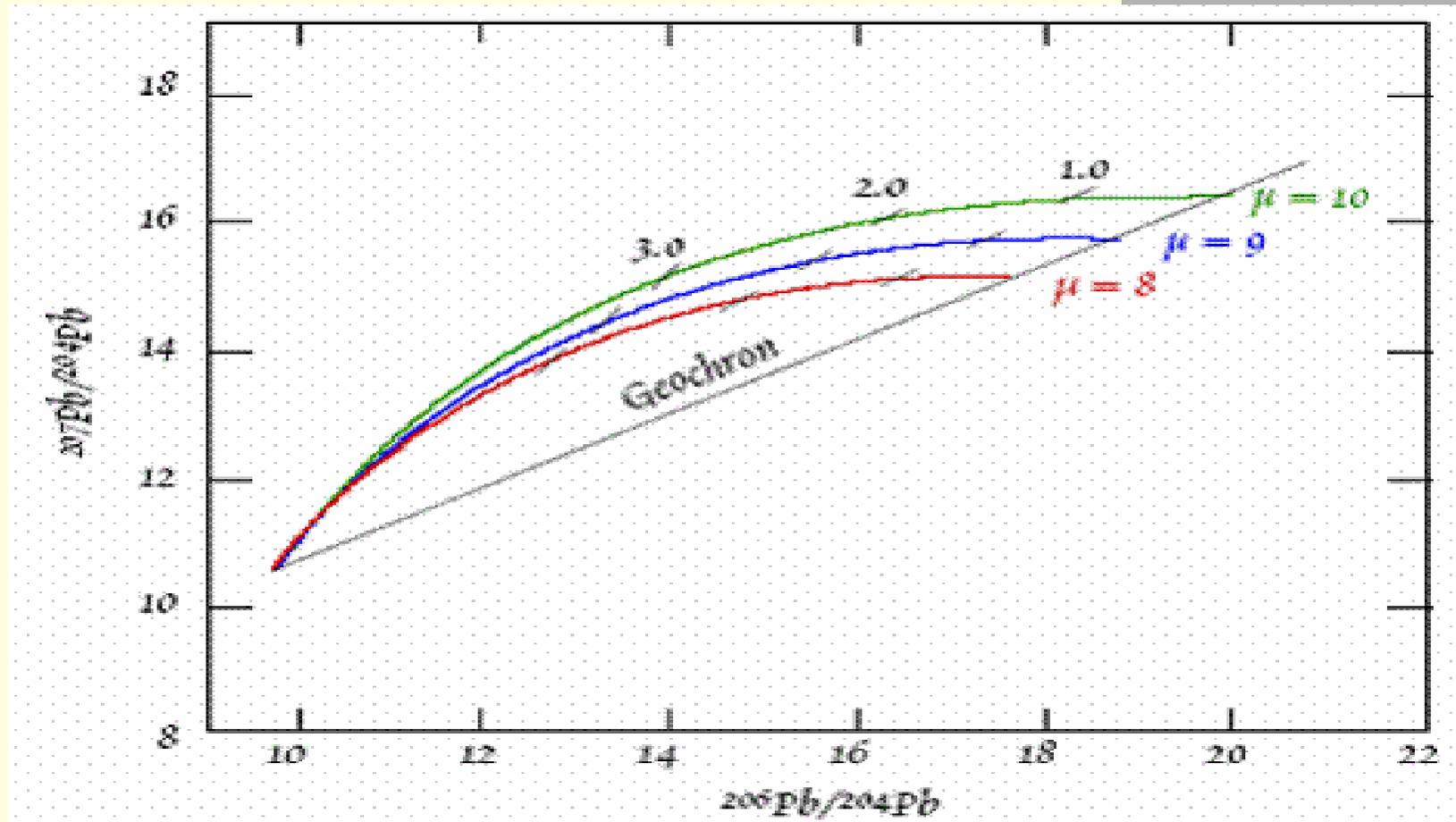
# Methode Pb-Pb

$$\left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_t - \left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 = \left( \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_t (e^{\lambda_{238}t} - 1)$$

$$\left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_t - \left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0 = \left( \frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_t (e^{\lambda_{235}t} - 1)$$

$$\frac{\left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_t - \left( \frac{{}^{207}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0}{\left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_t - \left( \frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}} \right)_0} = \left( \frac{{}^{235}\text{U}}{{}^{238}\text{U}} \right)_t \frac{e^{\lambda_{235}t} - 1}{e^{\lambda_{238}t} - 1}$$

# Methode Pb-Pb



# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Datations $^{14}\text{C}$

- ${}_6\text{C}$  : 3 isotopes :  $^{12}\text{C}$  (98.892 %),  $^{13}\text{C}$  (1.103 %),  $^{14}\text{C}$  (quantité infime)
- $^{14}\text{C}$  produit en permanence dans l'atmosphère par interaction avec radiation cosmique ( $\sim 1,17 \times 10^{-10}$  %) à partir  $^{14}\text{N}$  (Géochronomètres régénérés !)
- Approximation : ***Production constante***
- ***Equilibre avec pertes par radioactivité*** :  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  constant pour  $\text{CO}_2^{\text{atm}}$
- Incorporé dans les organismes par photosynthèse
- Après leur mort:  $^{14}\text{C}$  (non renouvelé)  $\rightarrow ^{14}\text{N} + \beta$

# Datations $^{14}\text{C}$

■ Désintégration nucléaire :

$$\frac{\partial N_p}{\partial t} = -\lambda N_p$$

$$\left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}\right) = \left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}\right)_0 e^{-\lambda_{14\text{C}} t} \quad \Rightarrow \quad t = -\frac{1}{\lambda_{14\text{C}}} \ln \left( \frac{\left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}\right)}{\left(\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}\right)_0} \right)$$

Temps de demi-vie ( $t_{1/2}$ ) :  $N_p = 1/2 (N_p)_0 \rightarrow t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$   
 Pour le système  $^{14}\text{C}$  :  $\lambda = 1,21 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$  ( $t_{1/2} = 5735 \text{ a}$ )

- Datation par comptage de désintégrations (méthode classique)

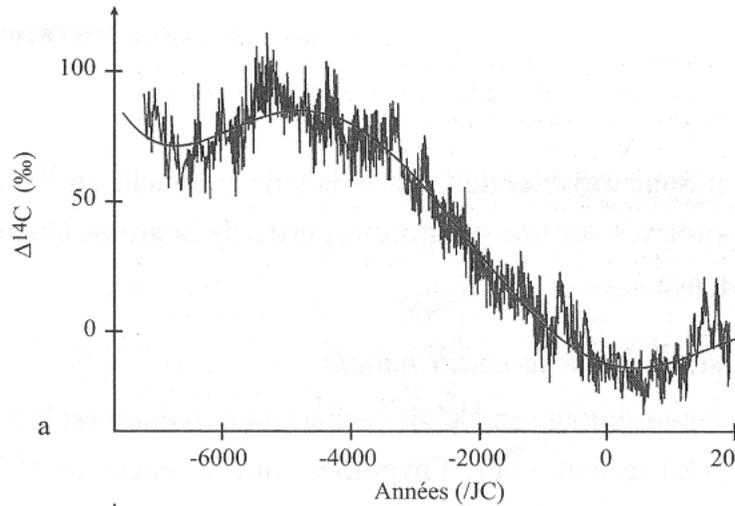
$$\frac{\partial N_p}{\partial t} = -\lambda N_p \quad t = -\frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{(N_p)}{(N_p)_0} \right)$$

- ou détermination directe de  $^{14}\text{C}$  par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA)

# Datations $^{14}\text{C}$

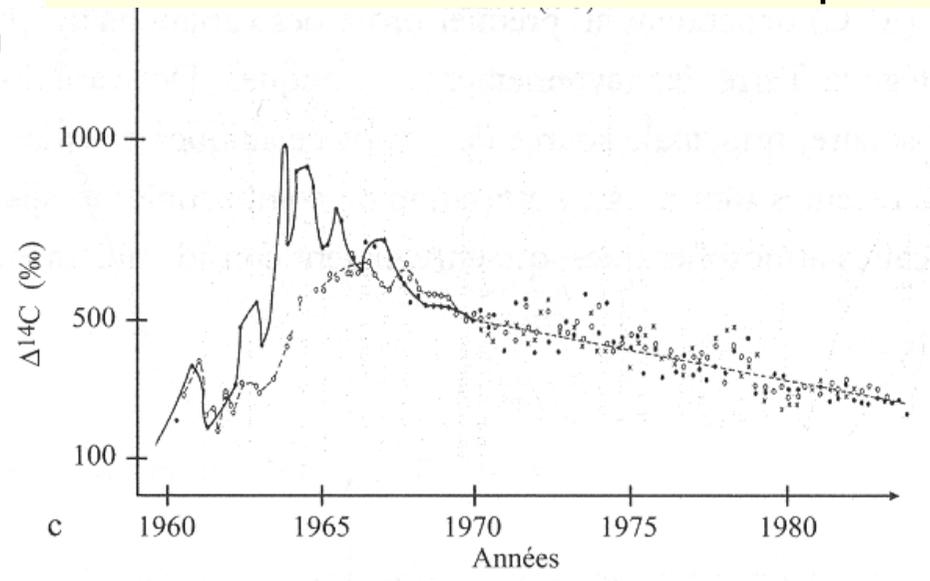
- Matériel: carbone organique (bois, charbon, coquilles)
- Actuel :  $(^{14}\text{C}/^{12}\text{C})_0 = 13.56 \text{ cpm/g}$
- Age max : 40 – 50 Ka ( $\sim 7 \times t_{1/2}$ )
- Problème majeur: quantité initiale de  $^{14}\text{C}$   $(N_p)_0$  inconnue et variable
- Méthode destructive
- Calibration avec d'autres méthodes (dendrochronologie, varves, U/Th)

# Datations $^{14}\text{C}$

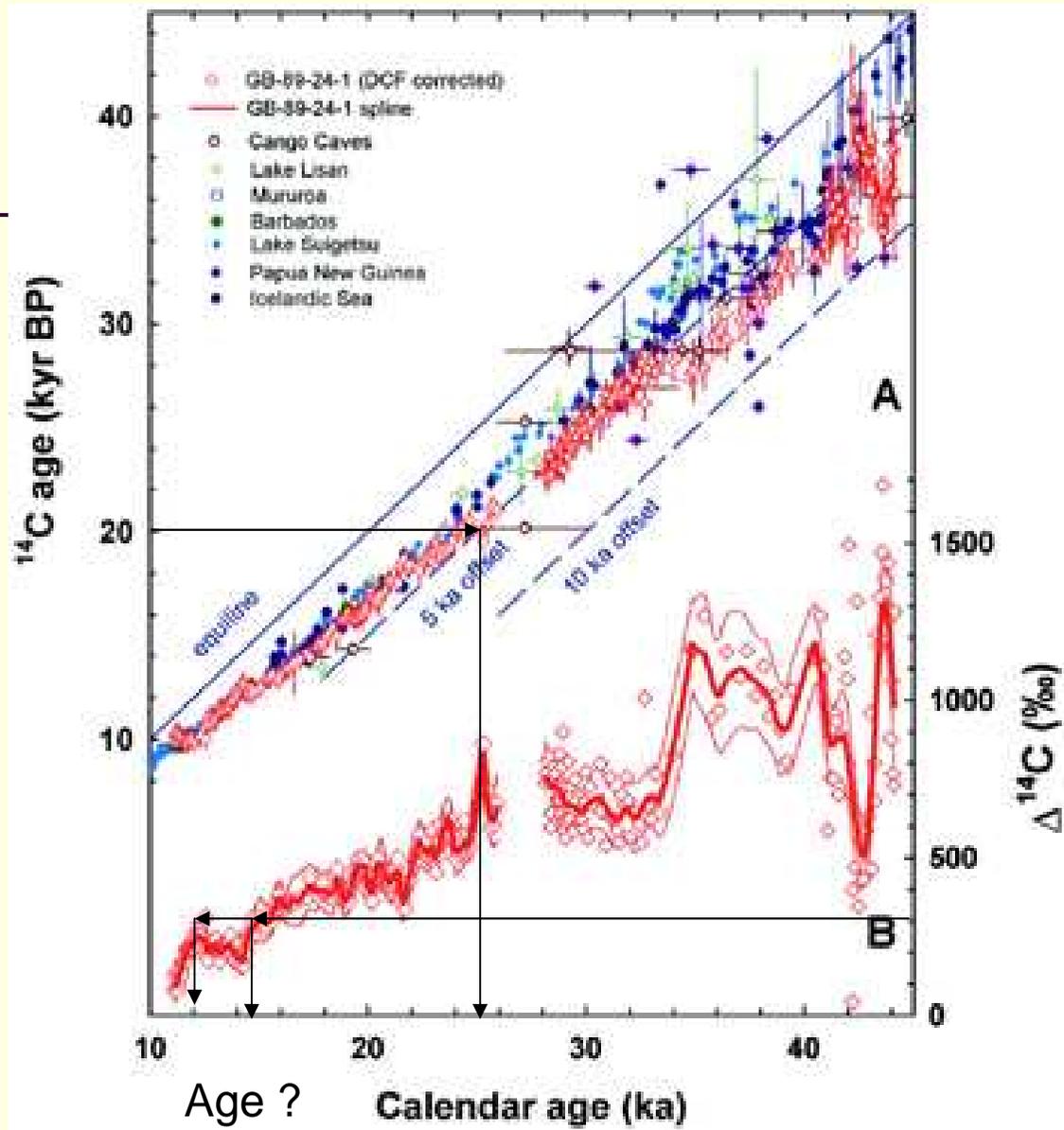


■ Variation  $^{14}\text{C}$  : courbe brute corrélée à l'activité magnétique terrestre

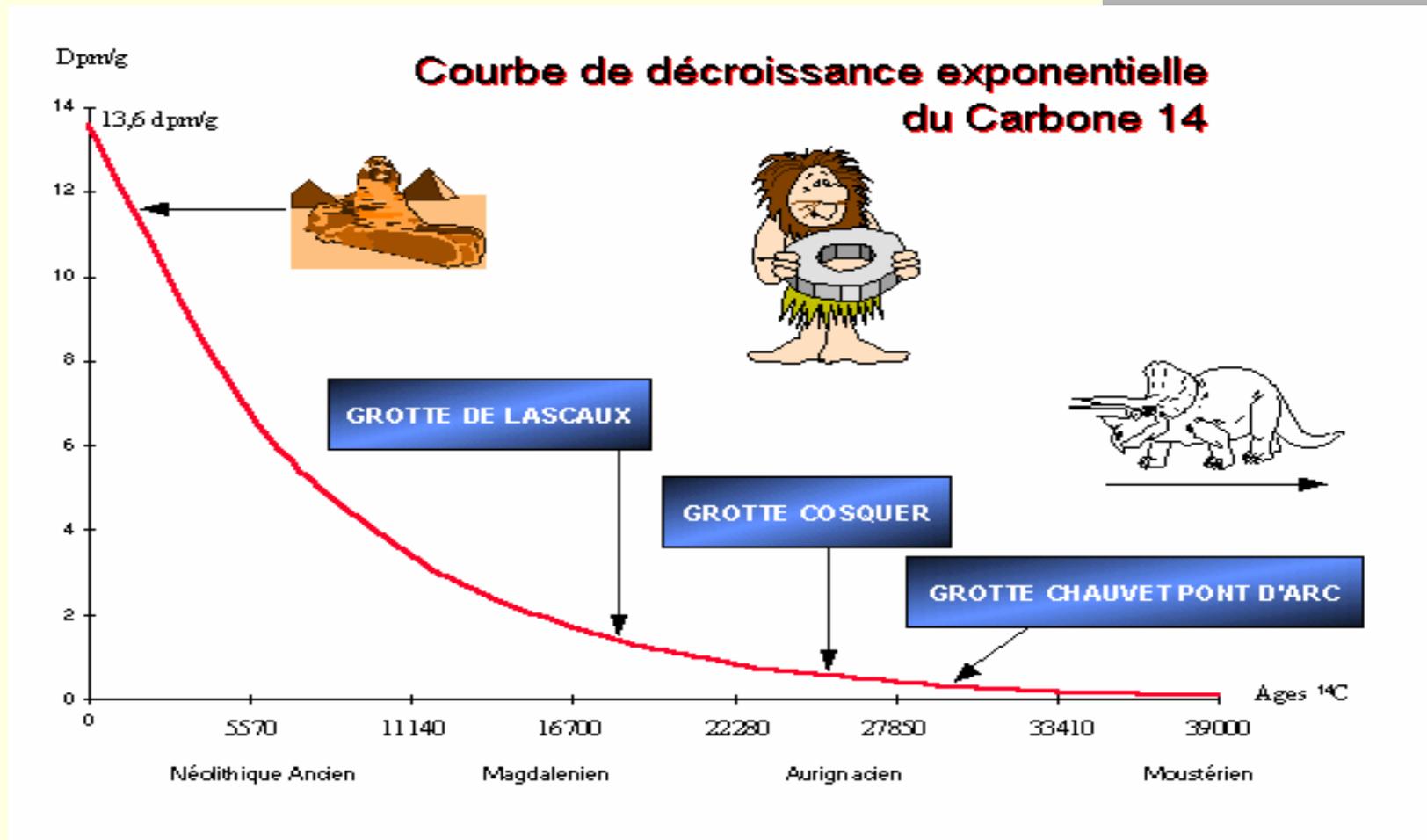
■ Variations récentes :  
décroissance par libération  
du C fossile pauvre en  $^{14}\text{C}$ .  
Variations brutales 1960  
dus aux essais atomiques



# Calibration de la datation $^{14}\text{C}$



# Géochronomètres absolus à petite demi-vie : exemple



# Géochronomètres absolus à petite demi-vie : exercice

- Suaire de Turin : analyses en 1988 montrent que le contenu en  $^{14}\text{C}$  est 0.928 celui d'un échantillon contemporain de C biologique.
  - Estimer son âge !
- Données :
  - $\lambda = 1,21 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$
  
- *Réponse :*
  - $t = -1/\lambda * \ln(C/C_0)$  avec  $C/C_0=0.928$  ;
  - $\rightarrow t = 600 \text{ ans soit } 1388 \text{ ans ap.JC...}$

# Géochronomètres absolus à petite demi-vie : exercice

- Datation d'un fragment de bois
  - La radioactivité du  $^{14}\text{C}$  est : 8.56 cpm/g
  - Âge du fragment ?
- Données :
  - $\lambda = 1,21 \times 10^{-4} \text{ a}^{-1}$
  
- *Réponse :*
  - $t = -1/\lambda * \ln(C/C_0)$  avec  $C = 8.56 \text{ cpm/g}$  ;  $C_0 = 13.56 \text{ cpm/g}$  ;
  - $\rightarrow t = 3763.32 \text{ ans}$

# Géochronomètres absolus à petite demi-vie : exercice

- On veut dater un artéfact égyptien datant approximativement de 2000 ans av. JC
  - Activité de l'artéfact ?
  - Si la méthode permet de mesurer 1 coup par minute, quelle est la masse de l'échantillon nécessaire ?
- Données :
  - $T = 5730$  ans ;  $C_0 = 13.2$  cpm/g
- Réponse :
  - $T \rightarrow \lambda = (\ln 2)/T = 1.209 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ ;
  - 2000 ans av. JC = 4000 ans  $\rightarrow C = C_0 e^{-\lambda t} = 7 \text{ cpm/g}$
  - Pour faire la mesure, il faut :  $1/7 = 0.143$  g

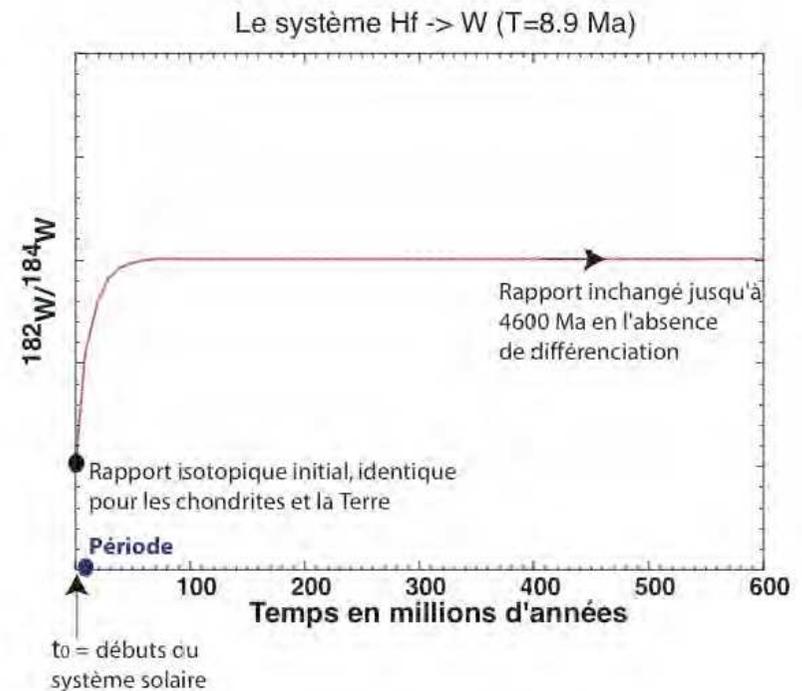
# ATTENTION

---

- Méthodes U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd → Datations par le **FILS**
- Méthodes  $^{14}\text{C}$  → Datations par le **PERE** !

# Radiochronomètres absolus à petite demi-vie non régénérés : Radioactivités éteintes

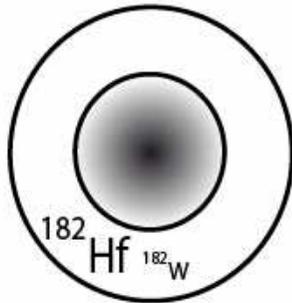
- Datation de la formation du noyau terrestre
- Couple  $^{192}\text{Hf}$  (lithophile)  $\rightarrow$   $^{182}\text{W}$  (sidérophile)
- $T_{1/2} = 9 \text{ Ma}$   $\rightarrow$  aujourd'hui,  $^{192}\text{Hf}$  inexistant !
- Hf et W réfractaires  $\rightarrow [C]_{\text{TG}} = [C]_{\text{chondrites}}$



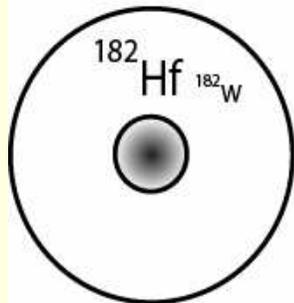
# Radiochronomètres absolus à petite demi-vie non régénérés : Radioactivité éteinte

## *Datation de la formation du noyau terrestre*

**Scénario 1**  
**Différentiation rapide**

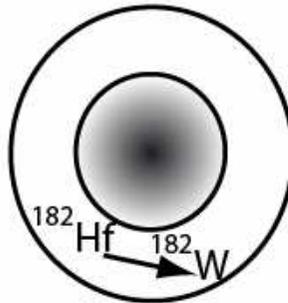


**Scénario 2**  
**Différentiation lente**

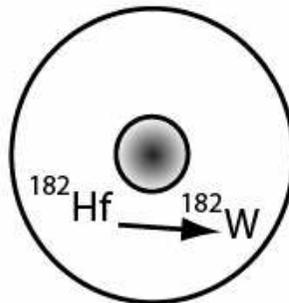


$t = 0+dt \ll 9 \text{ Ma}$

Désintégration après  
la différenciation

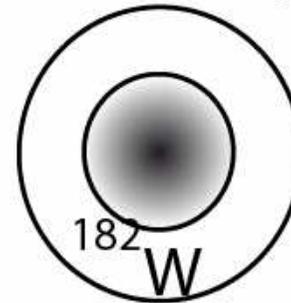


Désintégration en grande  
partie avant la différenciation

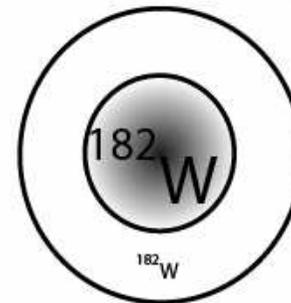


$t < 9 \text{ Ma}$

Concentration élevée en W  
des roches mantelliques

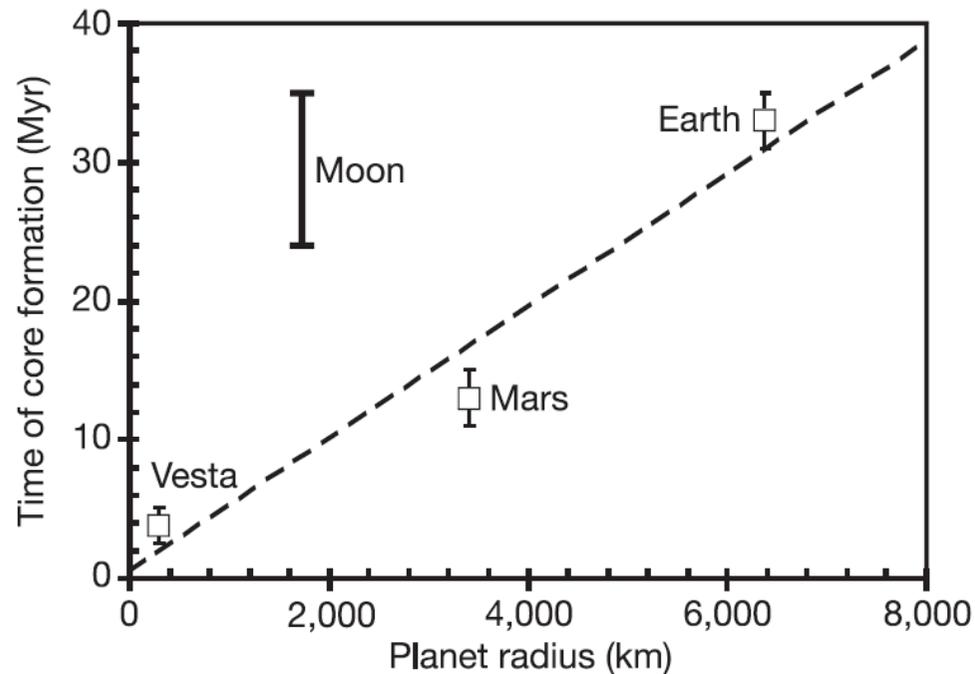


Concentration faible en W  
des roches mantelliques



$t = \text{aujourd'hui}$

# Radiochronomètres absolus à petite demi-vie non régénérés : Radioactivité éteinte

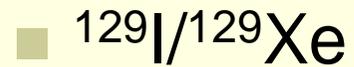


**Figure 3** Time of core formation in Myr after CAI condensation for Vesta, Mars, Earth and Moon versus planet radius as deduced from Hf–W systematics. For the Moon, the two data points refer to the endmember model ages. The Moon plots distinctly to the left of the correlation line defined by Vesta, Mars and Earth, suggesting a different formation process.

# Radiochronomètres absolus à petite demi-vie non régénérés : Radioactivité éteinte

---

- Il existe aussi :



## Autres méthodes de datation absolues

Méthode	Temps	Matériel	
Dendrochronologie	<10 ka	Bois	<i>méthodes stratigraphiques</i>
Comptage de Varves	<~1 Ma	Sédiments lacustres	
$^{14}\text{C}$	<40 ka	Matière organique	
U/Th	10 – 350 ka	Carbonates	
Thermoluminescence / Luminescence optique	0/30 – 300 ka	Quartz (silt)	<i>méthodes isotopiques</i>
Téphrochronologie	0 – 10? Ma	Cendres volcaniques	
Cosmogénique	<~5 Ma	Quartz, roches	
Paléomagnétisme	>700 ka	Sédiments/volcaniques fines	

# Plan du cours

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Quel « t » mesure-t-on ?

---

- Durée qui s'est écoulée depuis que chaque échantillon évolue en **systeme clos**
- Dans le cas d'un géochronomètre, il faut :
  - Abandon des conditions de naissance du minéral
  - ex : cristallisation, fin d'un métamorphisme,...
- **MAIS : on ne date pas les roches sédimentaires, sauf cas particulier !**
- **ATTENTION, on ne date pas les roches altérées**

# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# $N_0$ connu

- $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{14}\text{C} + p$  (p et n produits par rayonnement cosmique)
- $^{14}\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow ^{14}\text{CO}_2$
- Rayonnement cosmique =  $C^{\text{ste}} \rightarrow ^{14}\text{C}_{\text{atm}} = C^{\text{st}}$
- $^{14}\text{C}$  dans biomasse/coquilles calcaires  $\rightarrow$  biomasse +coquille mortes = système clos
- $\rightarrow ^{14}\text{C} = (^{14}\text{C})_0 \cdot e^{-\lambda t}$
- Mesure du  $^{14}\text{C}$  à t suffit !

# $F_0$ connu

---

- Cas du  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  (gaz)
- Lors de la formation des minéraux potassiques :  $\text{K} \gg \gg \gg \text{Ar}$
- $\rightarrow (^{40}\text{Ar})_0 \approx 0$
- $\rightarrow ^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{K}(e^{\lambda t} - 1)$
- Mesure  $^{40}\text{Ar}$  et  $^{40}\text{K}$  à  $t$  suffit !

# $P_0$ et $F_0$ inconnus

- Méthodes Rb/Sr, U/Pb, Sm/Nd,...
- Ex : Rb/Sr aux roches magmatiques
- Rb : alcalin monovalent, se substitue au Na et K
- Sr : divalent, se substitue au Ca ou Mg
- $^{87}\text{Sr} = (^{87}\text{Sr})_0 + ^{87}\text{Rb}(e^{\lambda t} - 1) \rightarrow 2$  inconnues
- Si 2 échantillons  $\rightarrow 3$  inconnues,...
- Dans Minéraux d'une même roche :
  - Minéraux basiques : riches en Sr
  - Minéraux acides/alcalins : pauvres en Sr

# $P_0$ et $F_0$ inconnus

- Or, système clos  $\rightarrow$   $^{86}\text{Sr} = (^{86}\text{Sr})_0$
- $\rightarrow$  Chaque magma :  $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$  donné
- Lors cristallisation, tous les minéraux d'un même magma ont le même rapport = Rapport initial
- Variation de ce rapport :  $\text{Rb} \rightarrow \text{Sr}$ 
  - Alcalins (riche en Rb)  $\rightarrow$  Beaucoup de  $^{87}\text{Sr}$
  - Calo-ferro-mg (pauvre en Rb)  $\rightarrow$  peu de  $^{87}\text{Sr}$
- $\rightarrow$  Rapports isotopiques dans 2 minéraux différents (Rb)  $\rightarrow$  2 équations / 2 inconnues
- n minéraux  $\rightarrow$  n équations / 2 inconnues  $\rightarrow$  régression linéaire  $\rightarrow$  **méthode des isochrones**

# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

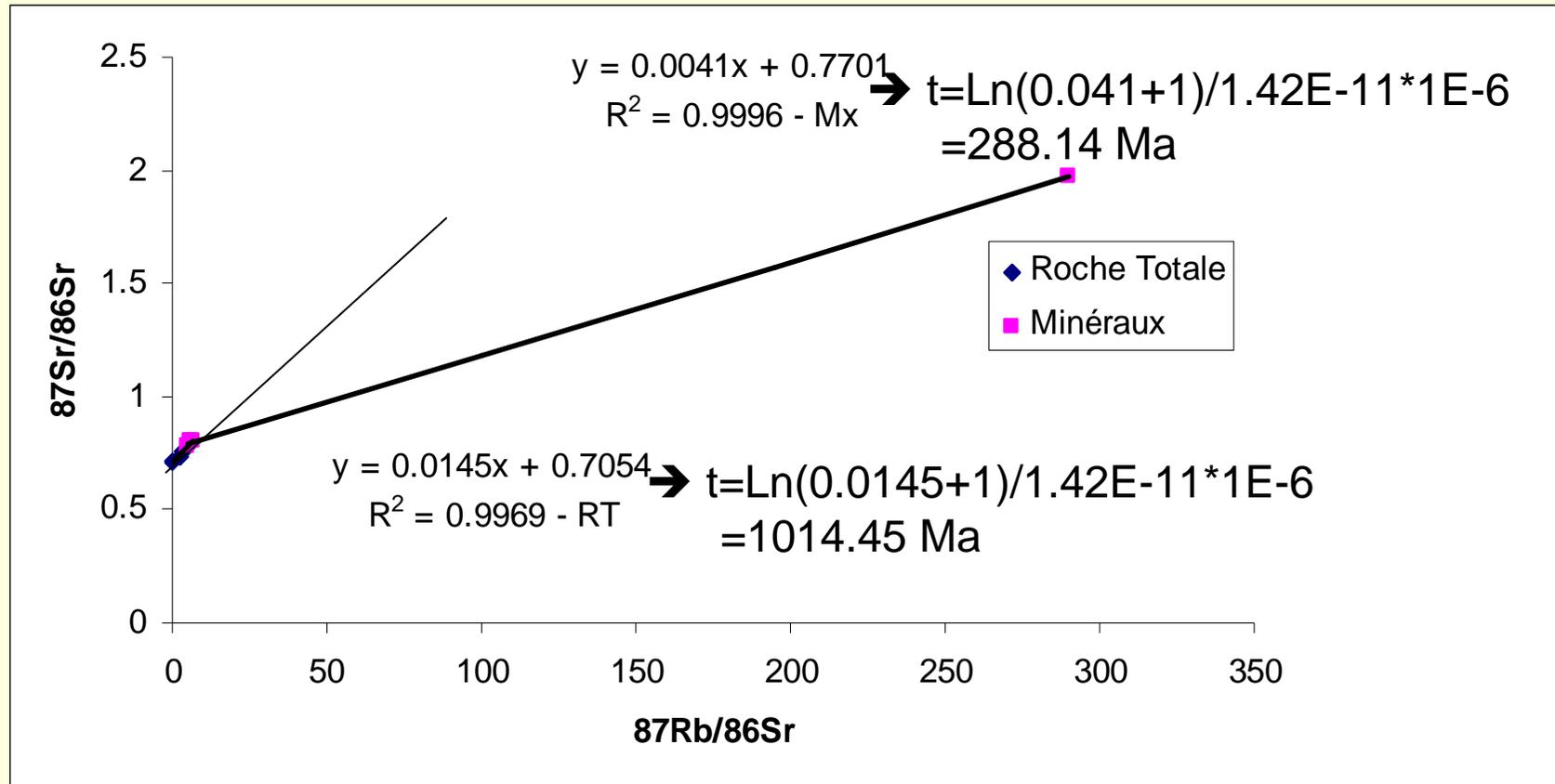
# Datation sur minéraux / roche totale (Baltimore)

	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Gneiss 1	2.244	0.7380
Gneiss 2	3.642	0.7612
Gneiss 3	6.590	0.7992
Gneiss 4	0.231	0.7074
Gneiss 5	3.628	0.7573

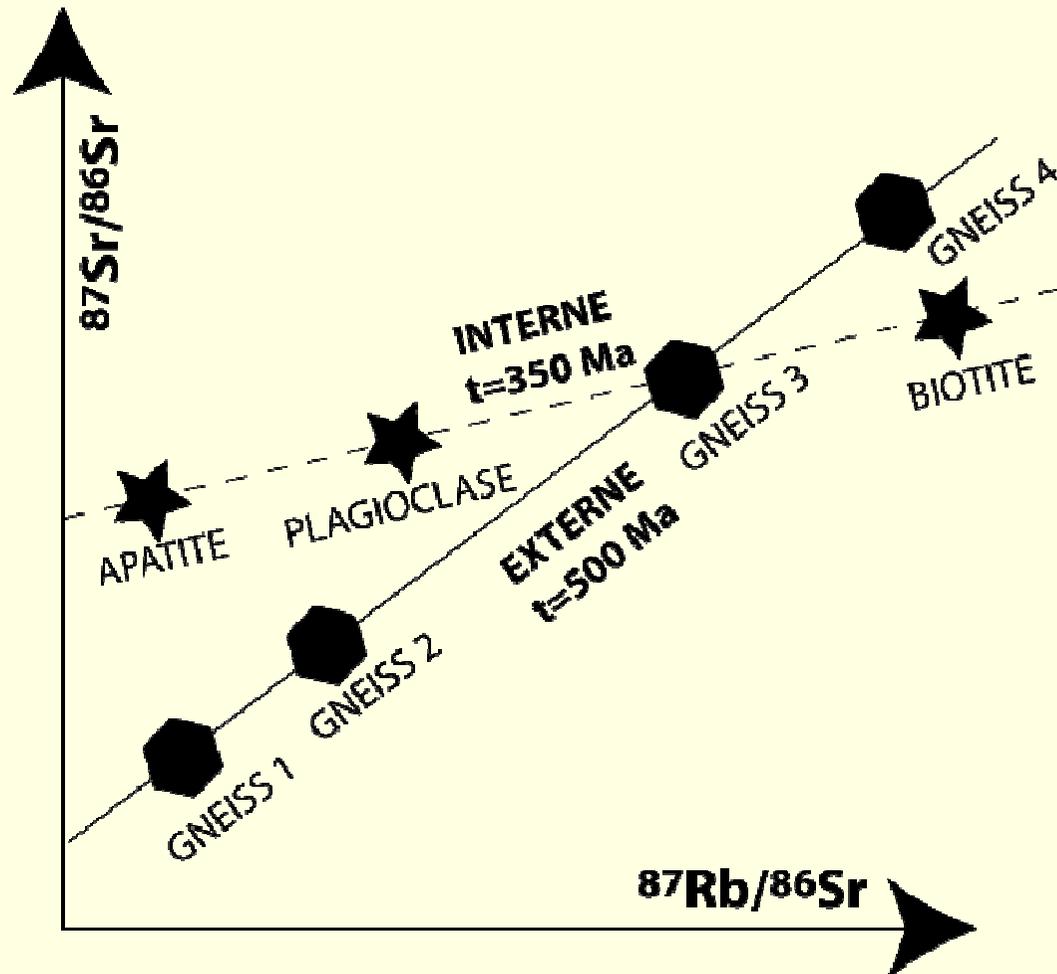
	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Gneiss 3	6.590	0.7992
Fk	5.6	0.807
plagio	0.528	0.7767
biot	289.7	1.969

Isochrones ? Âges ? Interprétation ?

# Datation sur minéraux / roche totale



# Datation sur minéraux / roche totale

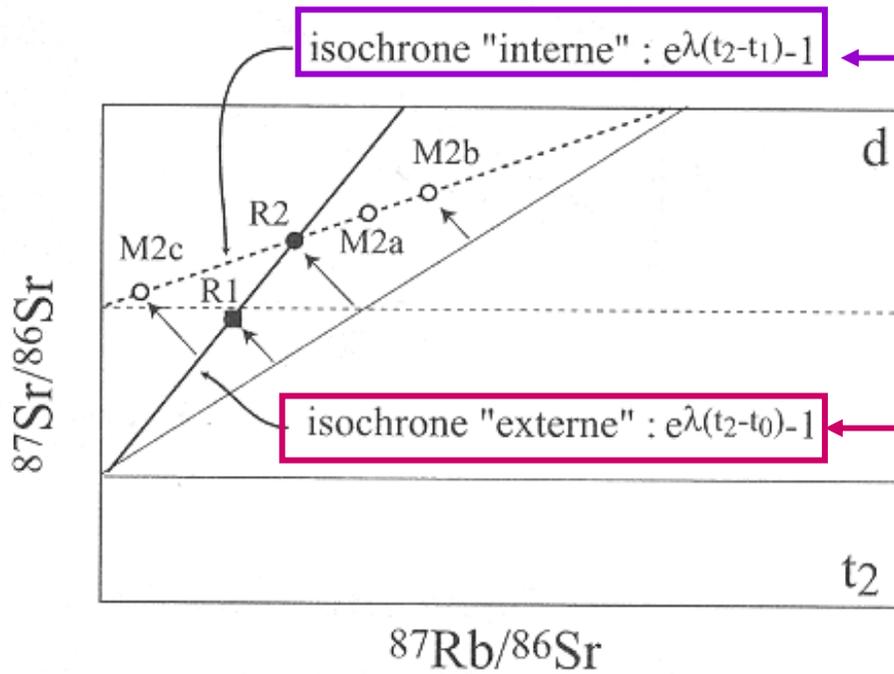
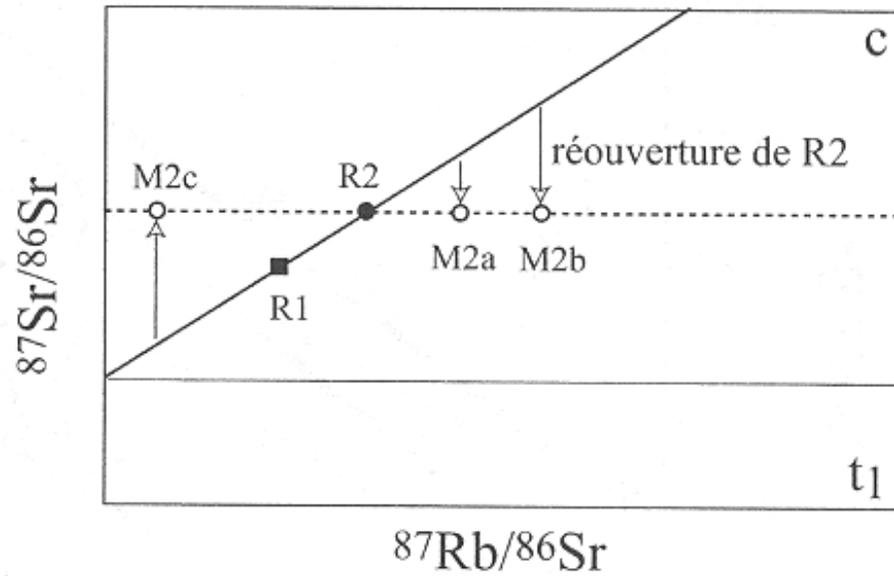


- Cas des orthogneiss du Velay
- Interprétations ??

# Datation sur minéraux / roche totale

---

- Réchauffement ultérieur → Interprétation âge ? (âge de la roche ou dernier événement thermique ?)
- En particulier vrai pour roches ortho-dérivées.
- Analyse minéraux d'une même roche → datation du dernier refroidissement
- Explications : Augmentation T → migration Rb/Sr de quelques cm !
- → Minéraux = système ouvert



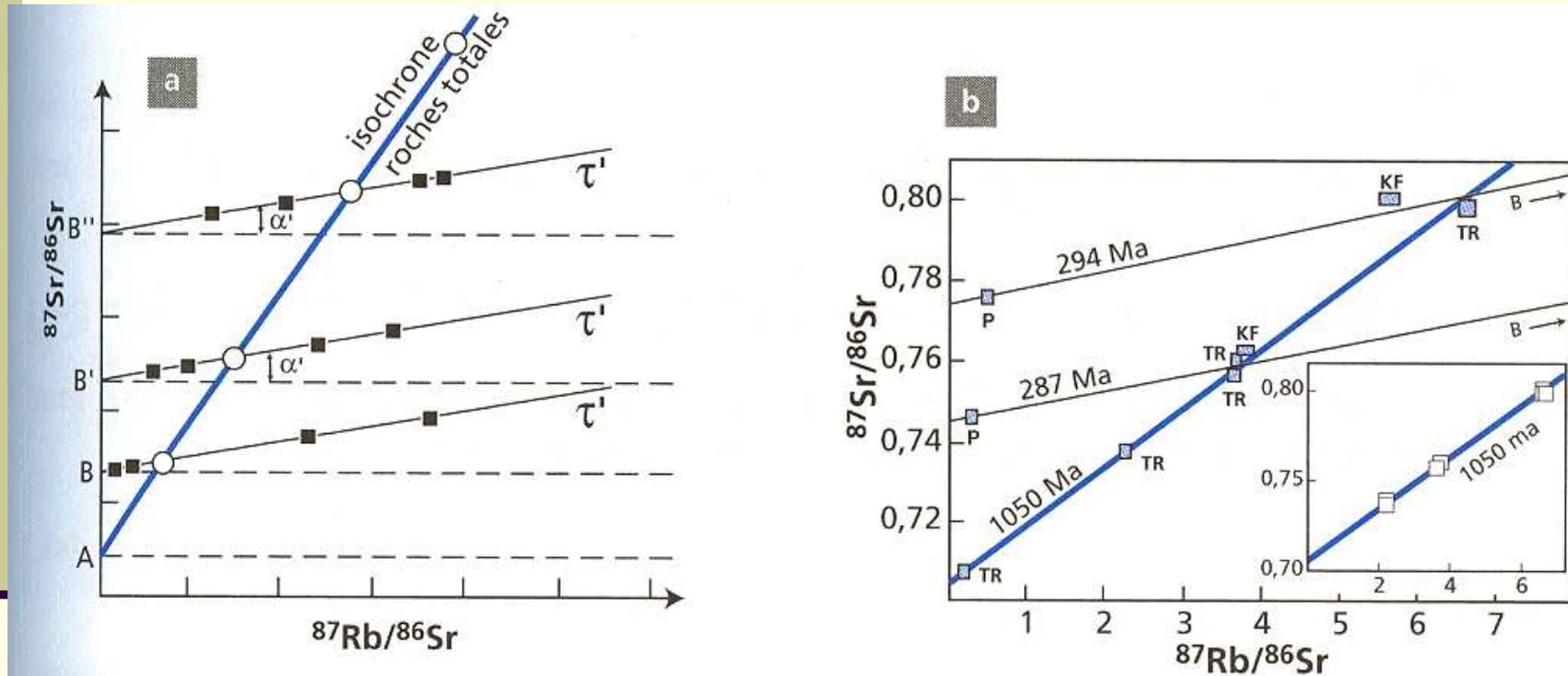
isochrone "interne" :  $e^{\lambda(t_2-t_1)}-1$

Age de la perturbation de la roche.

isochrone "externe" :  $e^{\lambda(t_2-t_0)}-1$

Age de formation des roches

# Exemple historique : Gneiss de Baltimore (USA)



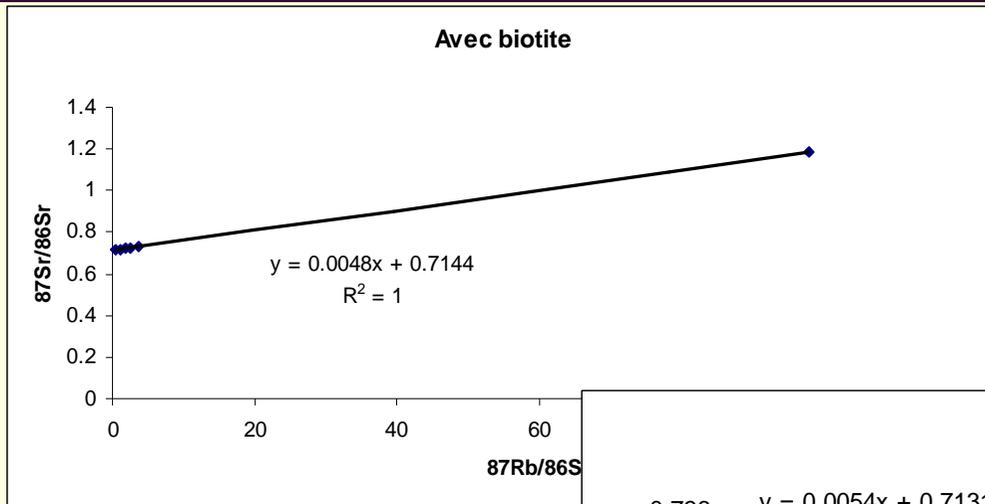
**Fig. 3.16. Exemple de deux types d'isochrones.** a. L'isochrone des roches totales indique l'âge initial, celle des minéraux date l'âge de l'événement perturbateur. b. Exemple classique des gneiss de Baltimore avec l'isochrone des roches totales et les isochrones des minéraux. (D'après G. Wetherill et al. 1968.)

(Allègre)

# EXERCICE

	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
Apatite	0.4	0.71527
Plagio	1.1	0.71903
Sanidine	1.89	0.72332
Biot	97.97	1.18139
Verre	3.73	0.73334
RT	2.64	0.72758

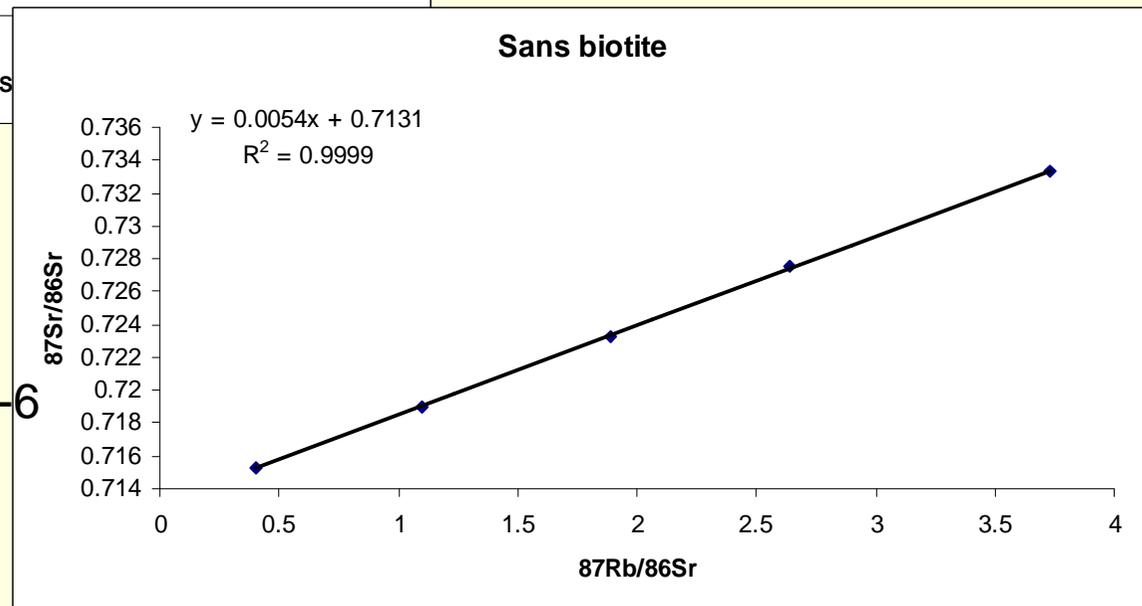
# EXERCICE



$$\rightarrow t = \frac{\ln(0.0048 + 1)}{1.42 \times 10^{-11}} = 358 \text{ Ma}$$

$$\rightarrow t = \frac{\ln(0.0054 + 1)}{1.42 \times 10^{-11}} = 379 \text{ Ma}$$

Interprétation ?



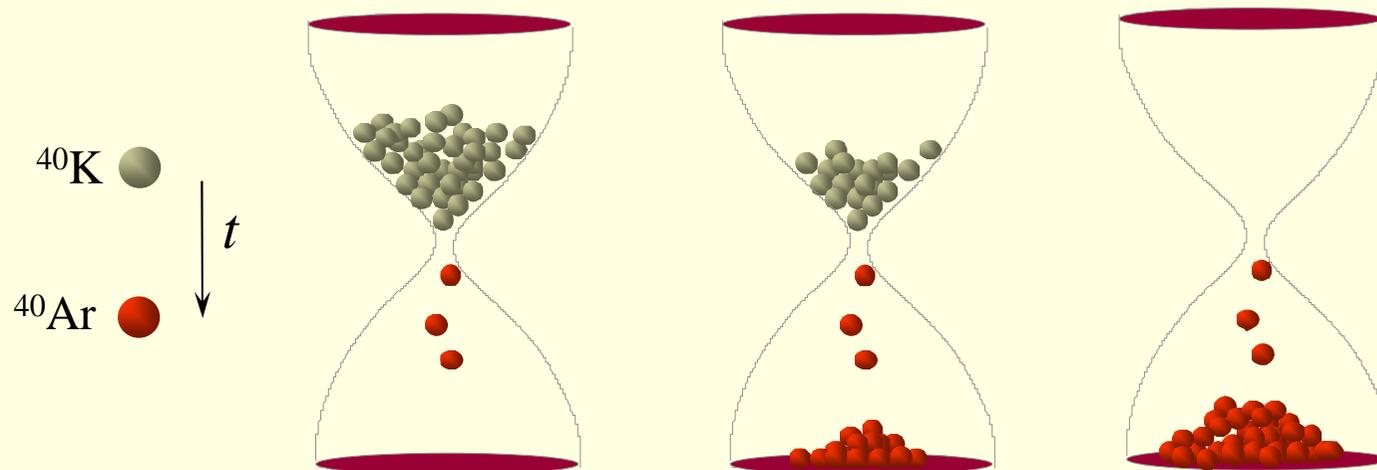
# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Thermochronologie: Température de fermeture

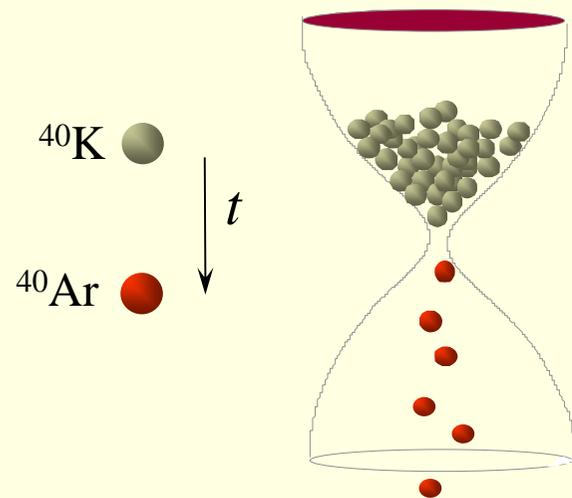
Décroissance radioactive en milieu « fermé » :



*L'élément fils est entièrement préservé dans le réseau minéral « hôte » : A chaque instant (x) la quantité d'éléments produits est fonction du temps écoulé et de la quantité initiale*

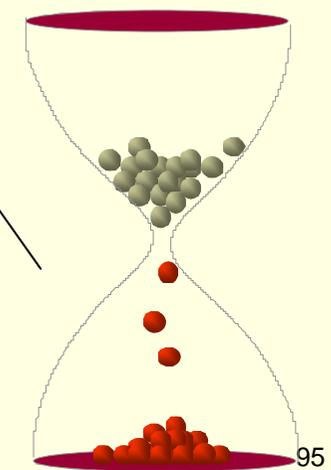
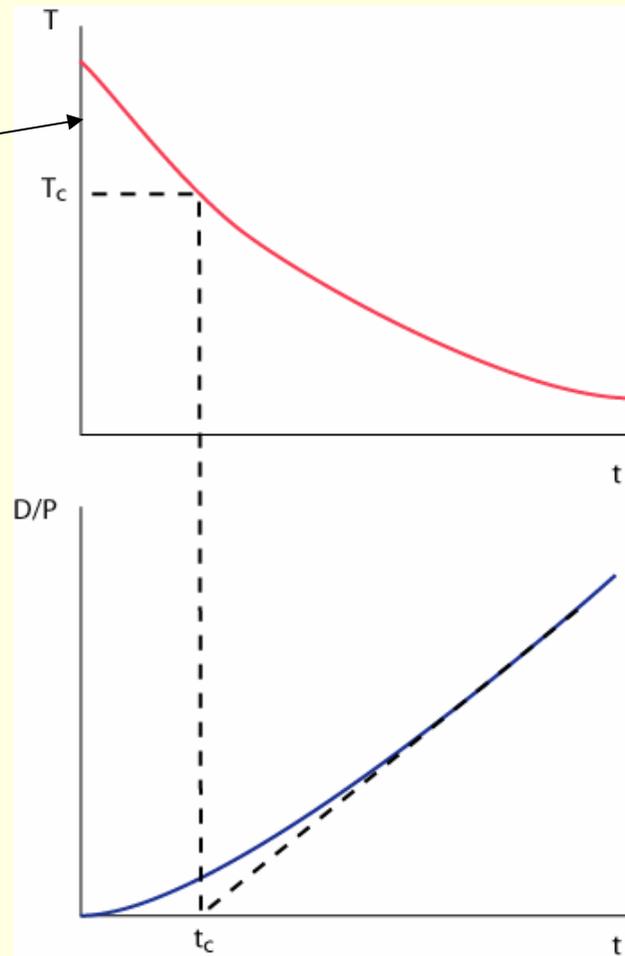
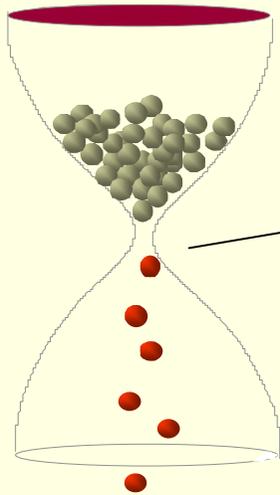
# Thermochronologie: Température de fermeture

Décroissance radioactive en milieu « ouvert » :



*L'élément fils produit diffuse en continu car la température du milieu est trop élevée.*

# Thermochronologie: Température de fermeture

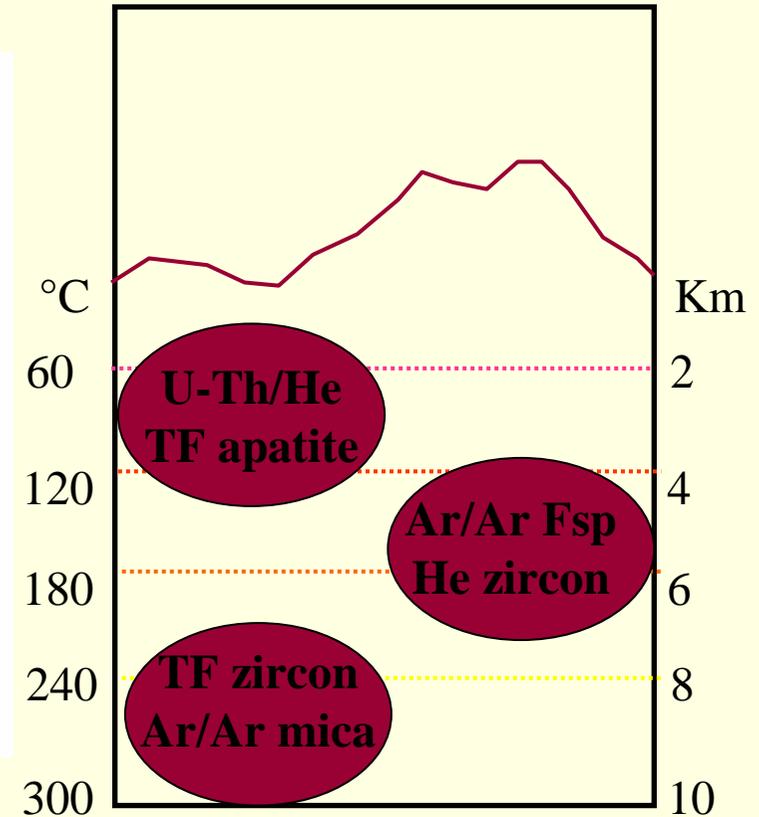
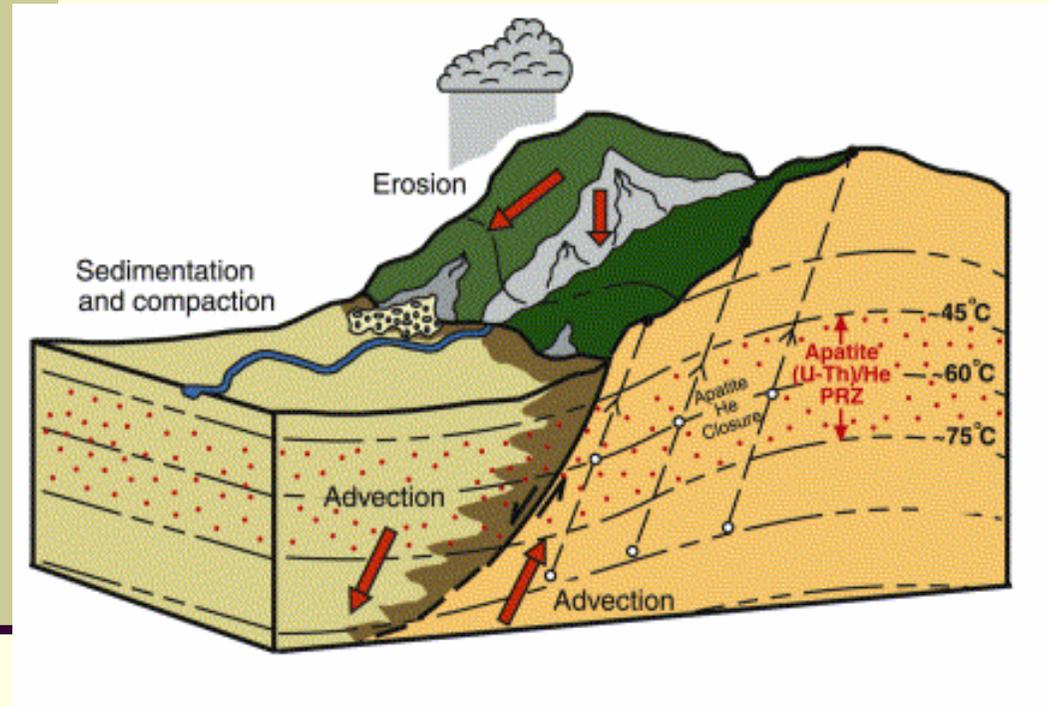


# Thermochronomètres de basse température

Système Isotopique	Minéral	$T_c$ (°C)	Référence
$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	Hornblende	$500 \pm 50$	McDougall & Harrison, 1988. <i>Geochronology and thermochronology by the <math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math> method</i> , Oxford Univ. Press
	Mica Blanc	$350 \pm 50$	
	Biotite	$300 \pm 50$	
	K-Feldspath	150 - 300	
Traces de Fission	Sphène	265 - 310	Wagner & Van den haute, 1992. <i>Fission Track Dating</i> , Kluwer Ac. Publ.
	Zircon	$240 \pm 20$	
	Apatite	$110 \pm 10$	
(U/Th)-He	Zircon	200 - 230	Farley, 2000, <i>J. Geophys. Res.</i> , <b>105</b> , 2903–2914;
	Apatite	$75 \pm 5$	Ehlers & Farley, 2003., <i>Earth Planet. Sci. Lett.</i> <b>206</b> , 1-14

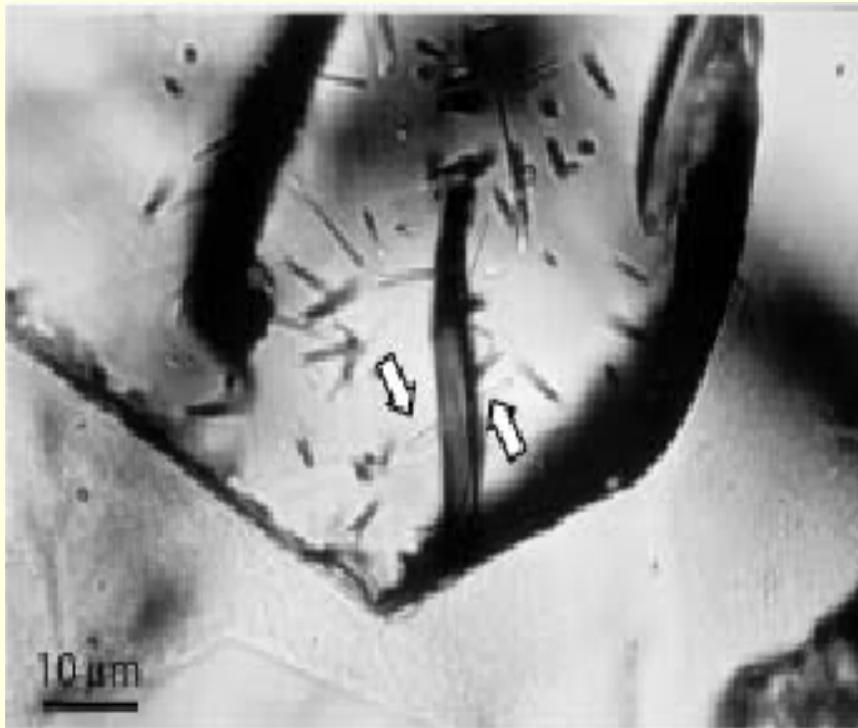
# Qu'est-ce qu'on mesure ?

## Refroidissement → Dénudation / Exhumation



⇒ obligation de connaître / estimer / supposer un géotherme !

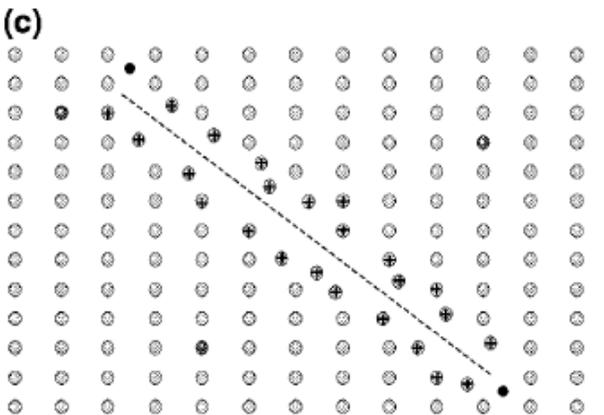
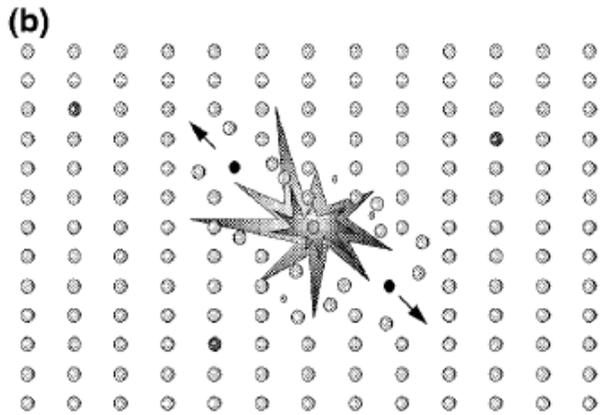
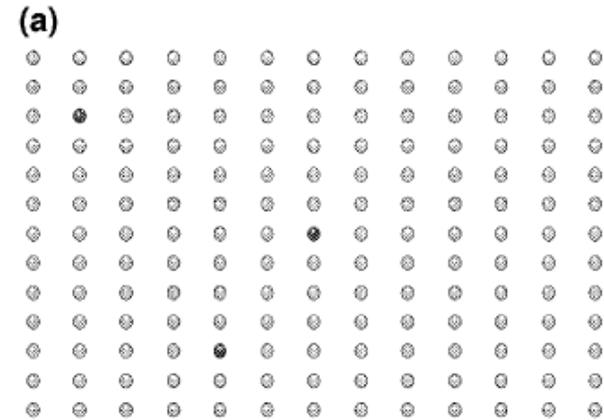
# Traces de fission



- Formées par **fission spontanée** de  $^{238}\text{U}$
- Observable (microscope optique) après attaque chimique
- Formation de traces: fonction  $\sim$ linéaire du temps ( $t_{1/2}$  pour la fission de  $^{238}\text{U} \approx 9 \times 10^{15}$  y, âge d'un échantillon déterminé par la densité de traces et la concentration d'Uranium)

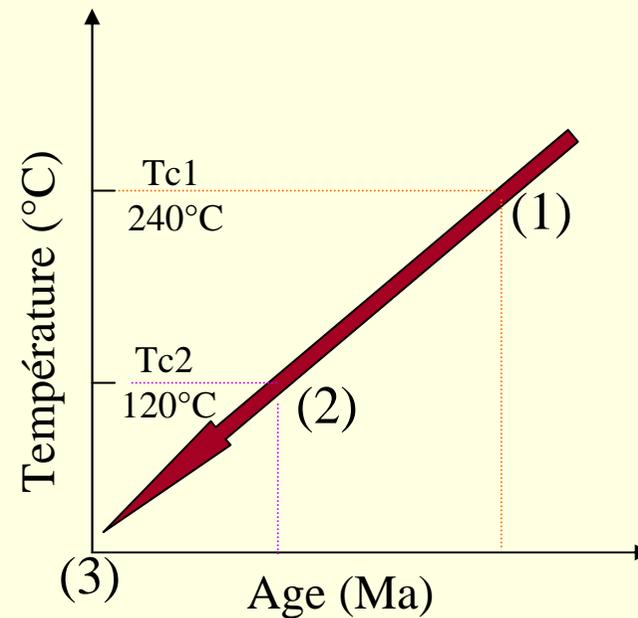
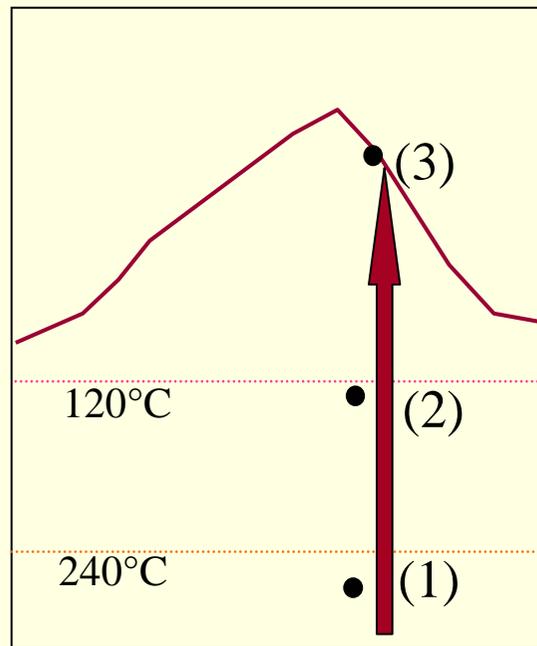
# Traces de fission

- Fission de  $^{238}\text{U} \rightarrow$   
Dommages dans le réseau cristallin
- Dommages visible pour  $T < 110^\circ\text{C}$

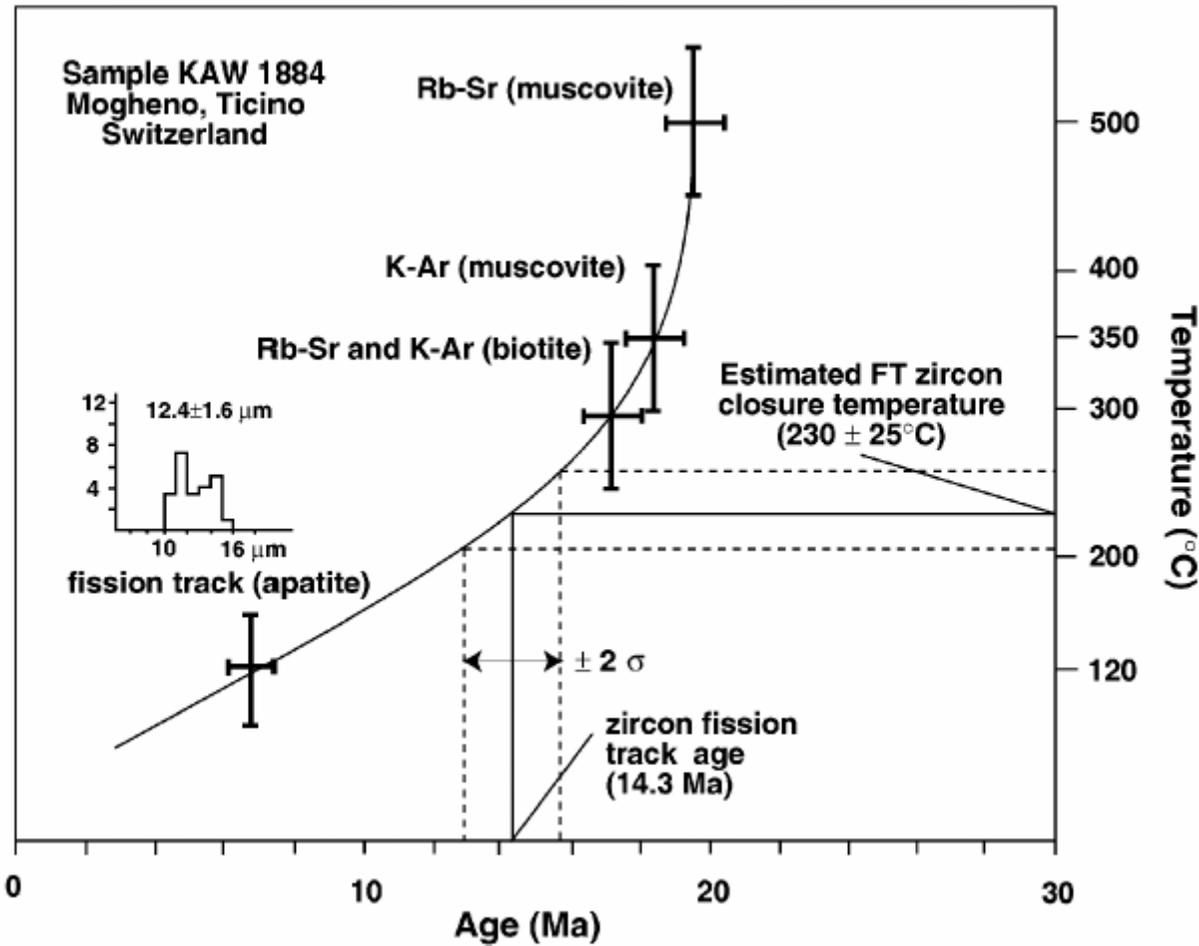


# Applications thermochronologiques: Reconstruction d'histoires de dénudation

1. Avec une paire de minéraux de  $T_c$  différentes  
*reconstruction temps-température*

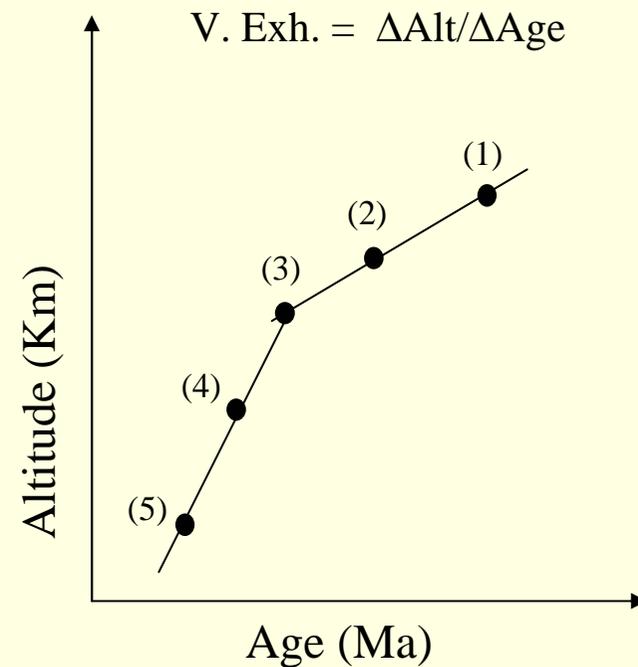
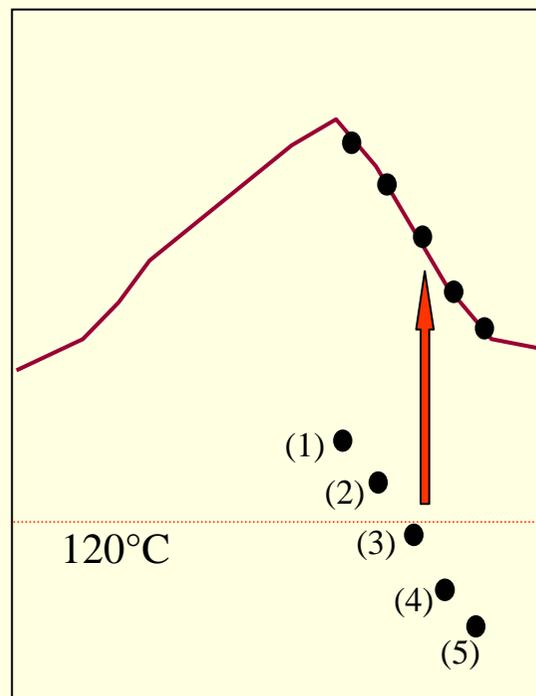


# Un exemple dans les Alpes

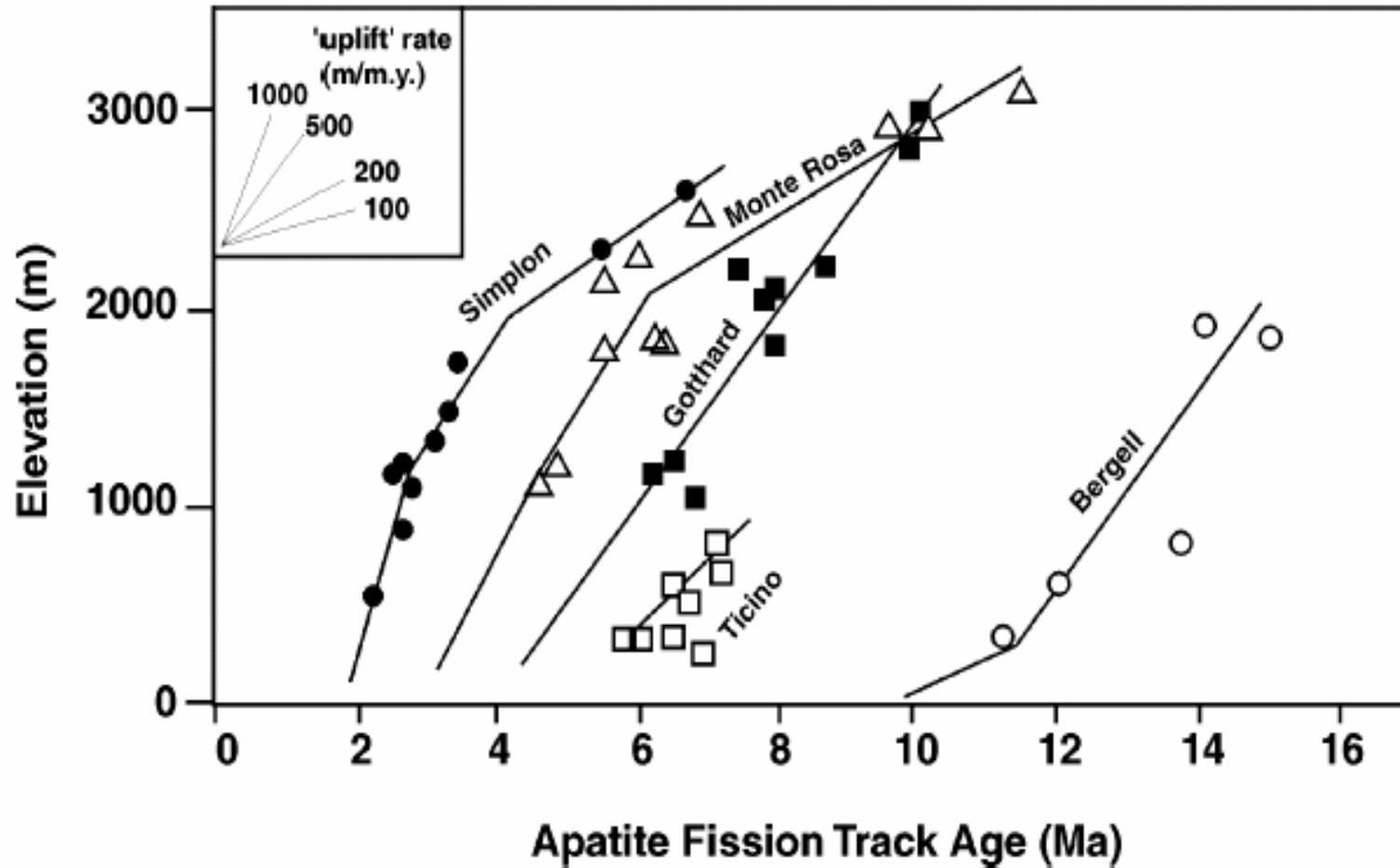


# Application thermochronologiques: Reconstruction d'histoires de dénudation

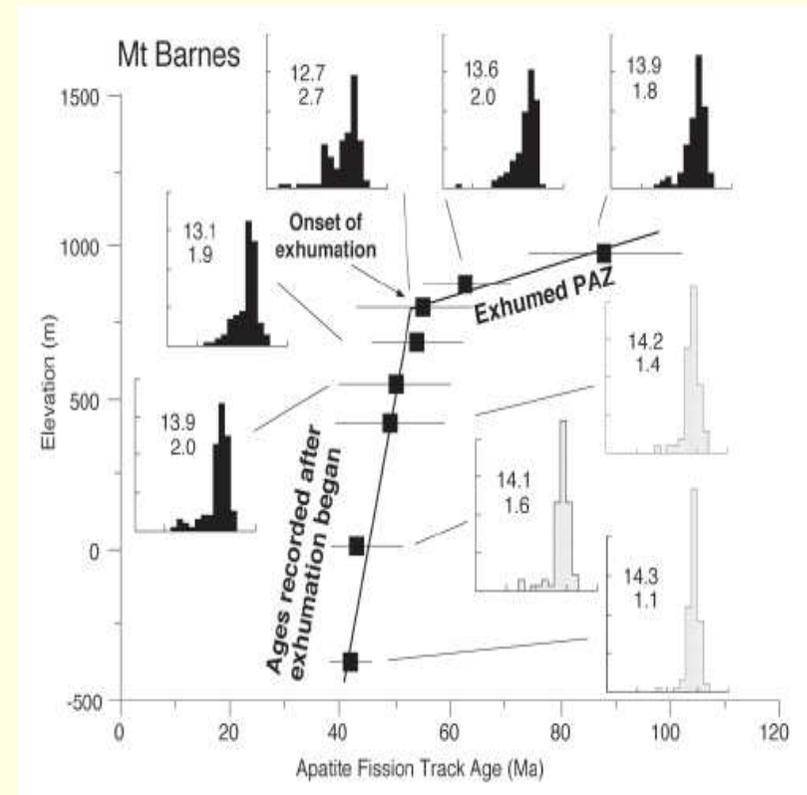
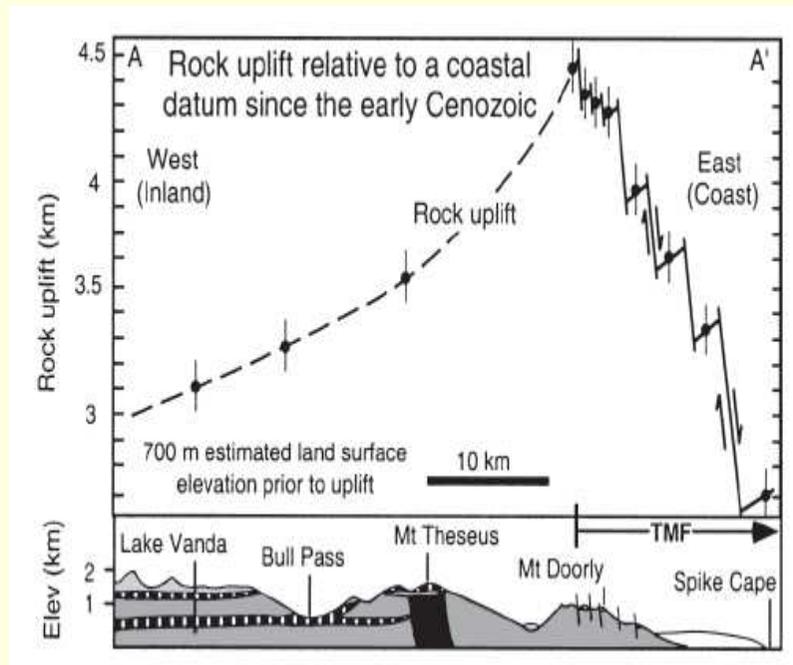
2. Avec le même minéral et une coupe paléostructurale  
*reconstruction altitude-âge*



# Un exemple dans les Alpes



# Transantarctic Mountains



Fitzgerald, 2003

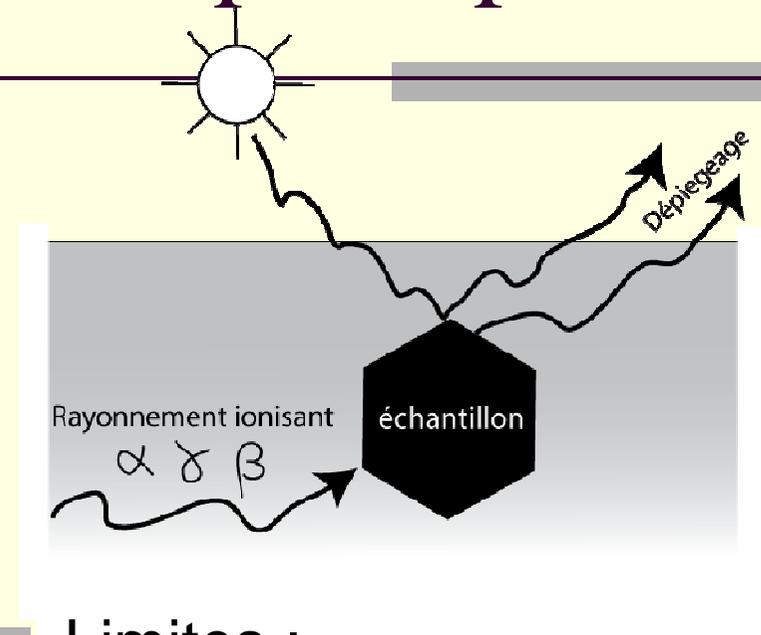
# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Thermoluminescence : principe

- Qz, Fd, Zr : accumulent au cours du temps l'énergie d'irradiation naturelle et cosmique (niveau atomique)
- Soumis à très forte température → Restitution de cette énergie sous forme de photons.
- Datations de céramiques, terre de foyer, fours, laves,...



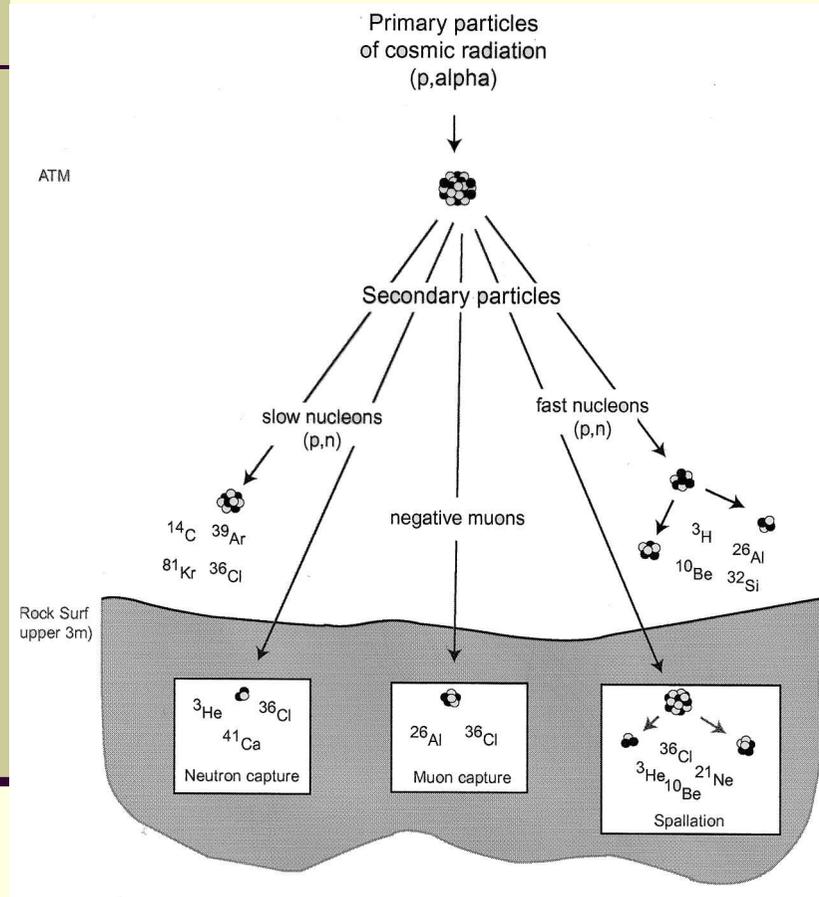
- Limites :
  - Mesure faussée facilement (incendie, exposition à radioactivité...)
  - Limitation de stockage par les cristaux → 700<sub>106</sub> ka max

# Plan du cours

---

- **Datations par corrélations et datations relatives**
- **Datations absolues**
  - Propriétés des éléments et radioactivité
  - Géochronomètres à période de demi-vie élevée
  - Géochronomètres à période de demi-vie faible
- **Questions importantes**
  - Quel « t » mesure-t-on ?
  - Nb d'inconnues / Nb d'équations ?
  - Datation sur minéraux / roche totale
- **Méthodes « péri-radiochronologiques »**
  - Traces de fission
  - Thermoluminescence
  - Isotopes cosmogéniques

# Isotopes Cosmogéniques



Flux cosmique :  $p, \alpha \rightarrow n, \mu$   
(dans l'atmosphère)

Interaction des particules secondaires ( $n, \mu$ ) avec éléments (O, Si, Mg, Al, Fe) dans l'atmosphère et à la surface terrestre (*in-situ*)

Réactions : Spallation, capture de neutrons / muons

Isotopes produits :

$^3\text{He}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{21}\text{Ne}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$

# Isotopes cosmogéniques les plus communs

Isotope	$t_{1/2}$	Taux de Production (atome g <sup>-1</sup> y <sup>-1</sup> )	Cible	Matériel à échantillonner
<sup>3</sup> He	stable	120	O, Mg, Si, Fe	olivine, pyroxène quartz
<sup>10</sup> Be	1.5 Ma	5.1 – 5.8	O, Mg, Si, Fe	quartz
<sup>14</sup> C	5730 a	18	O	quartz, roche entière
<sup>21</sup> Ne	stable	16 – 45	Mg, Al, Si, Fe	olivine, quartz, plagioclase
<sup>26</sup> Al	0.7 Ma	40	Si, Al, Fe	quartz
<sup>36</sup> Cl	0.3 Ma		K, Ca, <sup>35</sup> Cl	roche entière (carbonates, volcaniques)

## Mesurer les concentrations d'isotopes cosmogéniques produits *in-situ*

- Taux de production : typiquement 10-100 atomes/g/an - extrêmement faible
- Concentrations des isotopes instables ( $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ) limitées par décroissance radioactive
- Difficultés de mesures (lourds, hypothèses importantes,...)

## Taux de production (P)

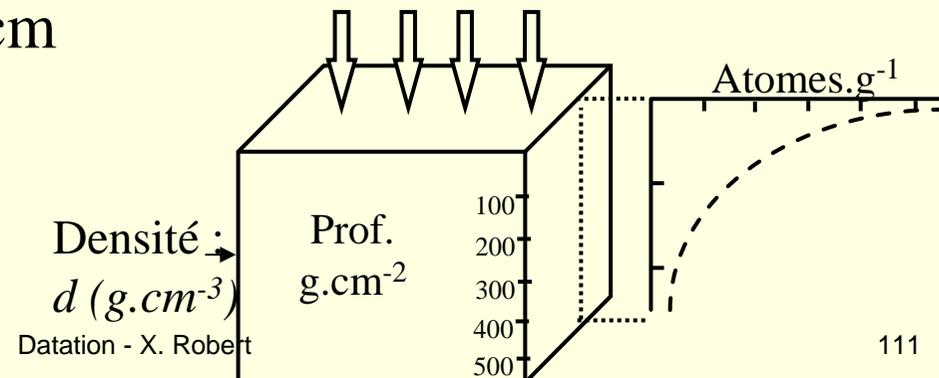
- Varie en fonction du champ magnétique, donc avec latitude, altitude, temps ...
- Influence de la géométrie d'exposition
- Forte dépendance de la profondeur



$$P_x = P_0 e^{-(x \rho / \Lambda)}$$

$\Lambda$  = longueur d'atténuation ( $\sim 150 \text{ g cm}^{-2}$ )

$$P_x = (1 / e) P_0 @ \sim 50 \text{ cm}$$



# Interpretation d'une concentration d'isotopes cosmogéniques mesurée

Concentration : proportionnelle aux temps d'exposition

AGE

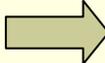


surfaces non-érodées

Taux d'érosion



surfaces en érosion

Temps d'érosion + transport  sédiments de rivières

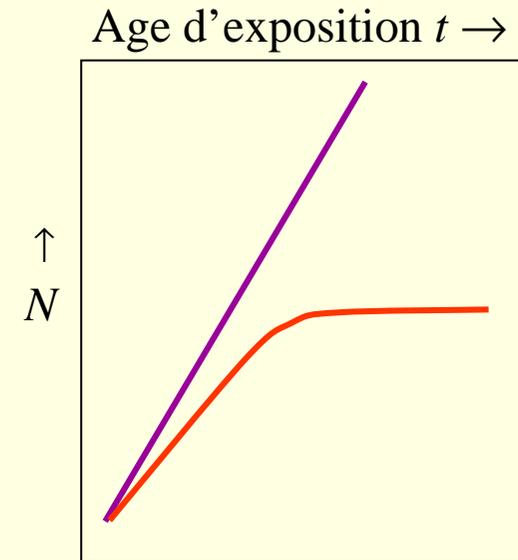
# Interpretation d'une concentration d'isotopes cosmogéniques 1: Age d'exposition

$$\frac{dN_{(x,t)}}{dt} = P_{(x,t)} - N_{(x,t)}\lambda$$

à la surface:  $P_{(x,t)} = P_0$

(P = Production !)

$$\Rightarrow N_{(t)} = \frac{P_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) + N_0 e^{-\lambda t}$$



Pour les isotopes stables, la concentration augmente linéairement avec le temps d'exposition;

Pour les isotopes instables, un équilibre séculaire va être atteint où  $P_0 = \lambda N$  : concentration maximale.

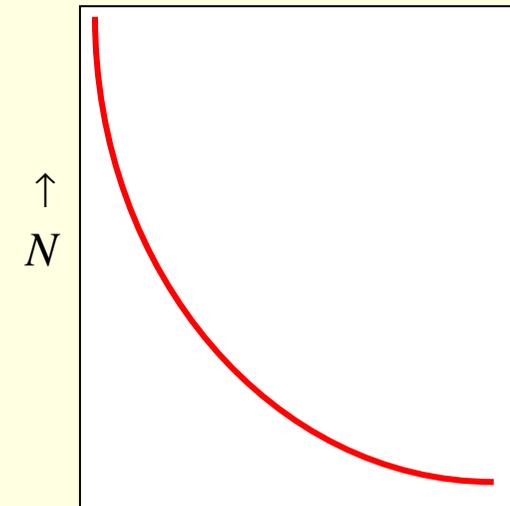
# Interprétation d'une concentration d'isotopes cosmogéniques 2: Taux d'érosion

$$P_{(x)} = P_0 e^{-x\rho/\Lambda}$$

$$\frac{dN_{(x,t)}}{dt} = P_{(x,t)} - N_{(x,t)}\lambda$$

taux d'érosion constant :  $P_t = P_0 e^{(-\varepsilon\rho t/\Lambda)}$

Taux d'érosion  $\varepsilon \rightarrow$



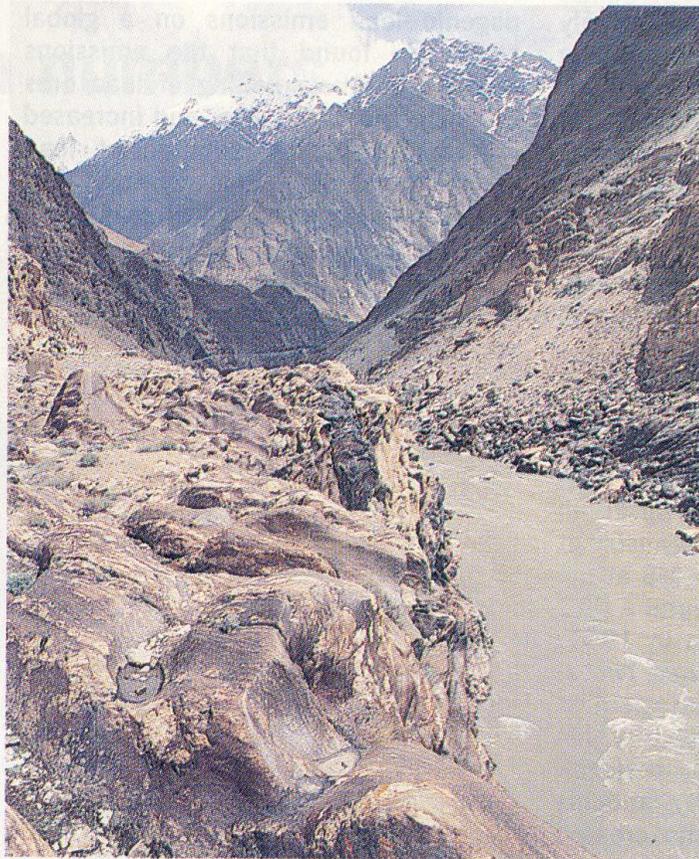
Pour un taux d'érosion constant, la concentration est inversement proportionnelle au taux d'érosion

# Applications

---

- Datation de surfaces d'érosion (ex. terrasses d'abrasion pour déterminer la vitesse d'incision)
- Datation de surfaces « constructives » (terrasses alluviales, cônes de déjection, moraines)
- Détermination de l'âge de surfaces décalées pour déterminer les vitesses tectoniques
- Détermination de taux d'érosion et de recul

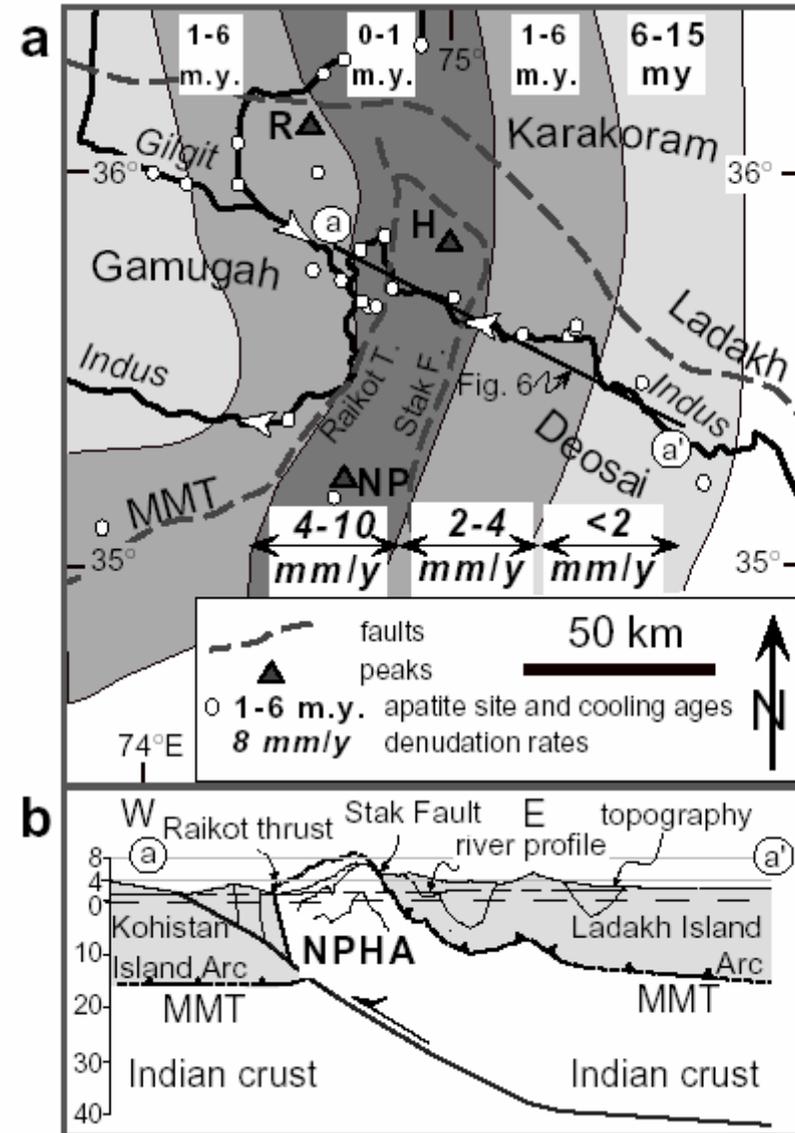
# Datation de terrasses d'abrasion pour déterminer la vitesse d'incision; Rivière Indus, Pakistan



R. S. Anderson

The valley of the Indus River in the northwestern Himalayas

Burbank *et al.*, *Nature*, 1996 ;  
Leland *et al.*, *EPSL*, 1998



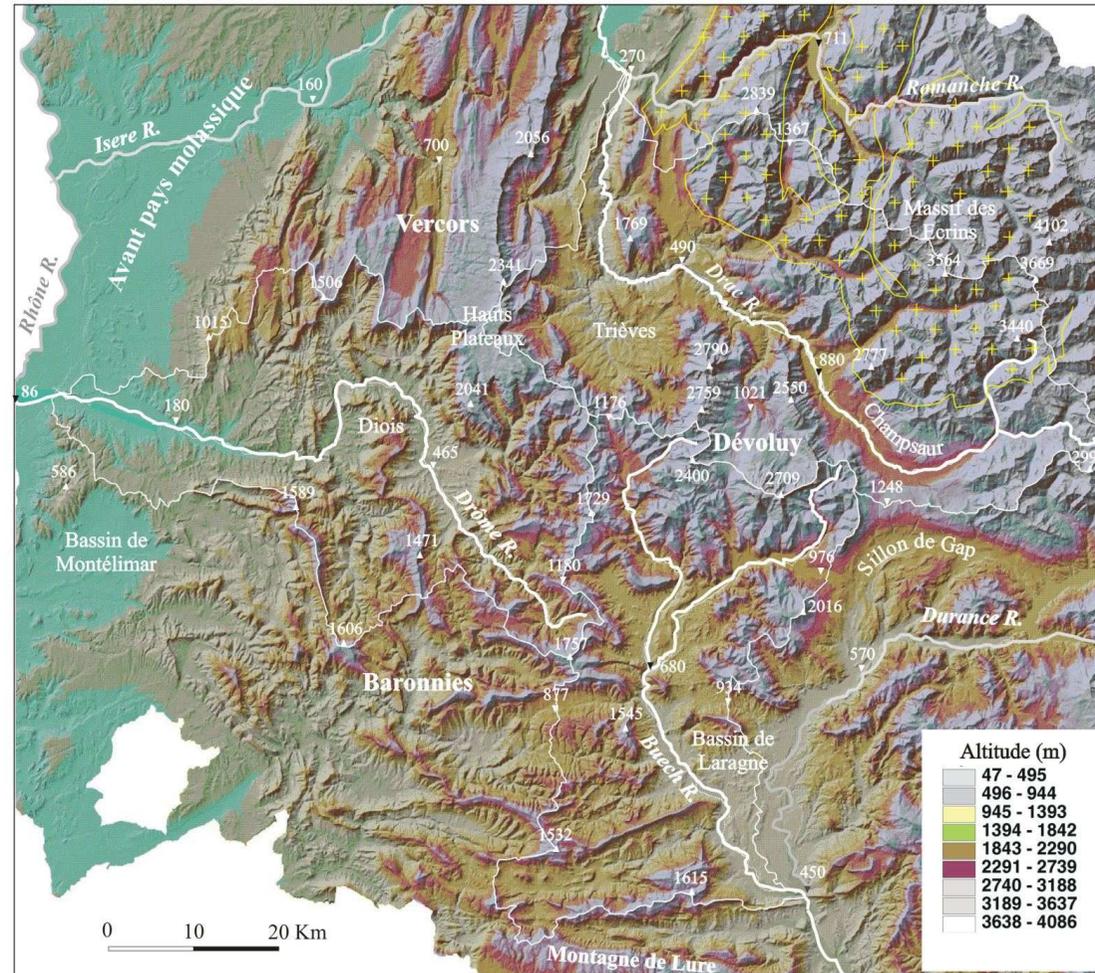
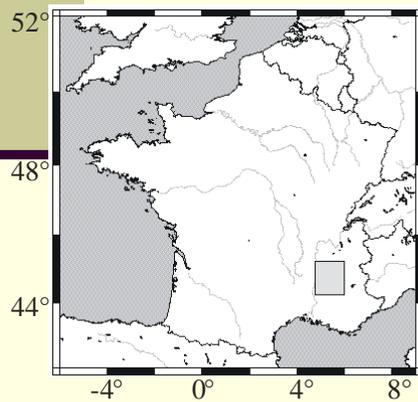
# Datation de surfaces construites

Ex. terrasses alluviales; cônes de déjection, moraines

Pose un nombre de problèmes additionnels:

- Héritage des clastes ?
  - Inflation / Déflation de la terrasse ?
  - Perturbation de la terrasse ?
- 
- Dater un grand nombre de clastes  
OU
  - Échantillonner des profils en profondeur

# Exemple: datation des terrasses alluviales dans les Alpes occidentales

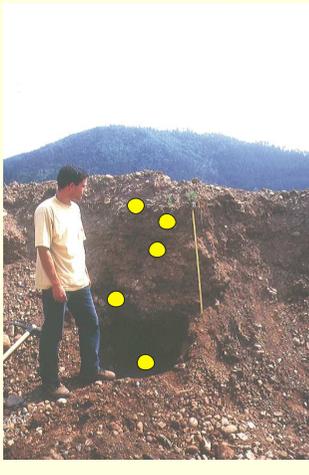


28/01/2009

Datation - X. Robert

118

# Utilisation de profils pour la datation des terrasses alluviales

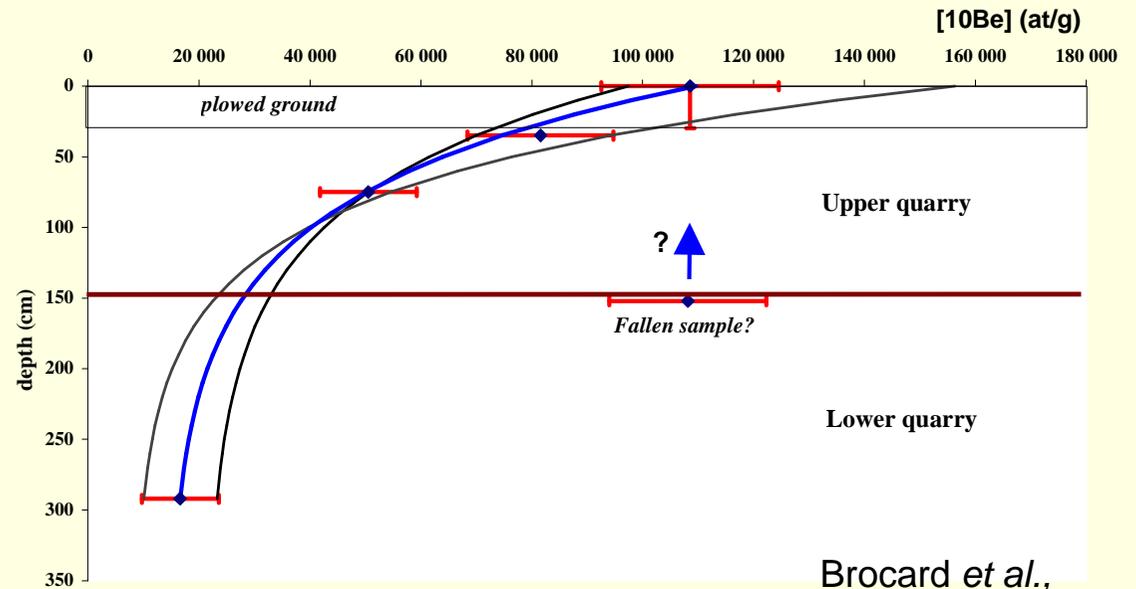


● Echantillon

déblais  
remaniement  
agricole

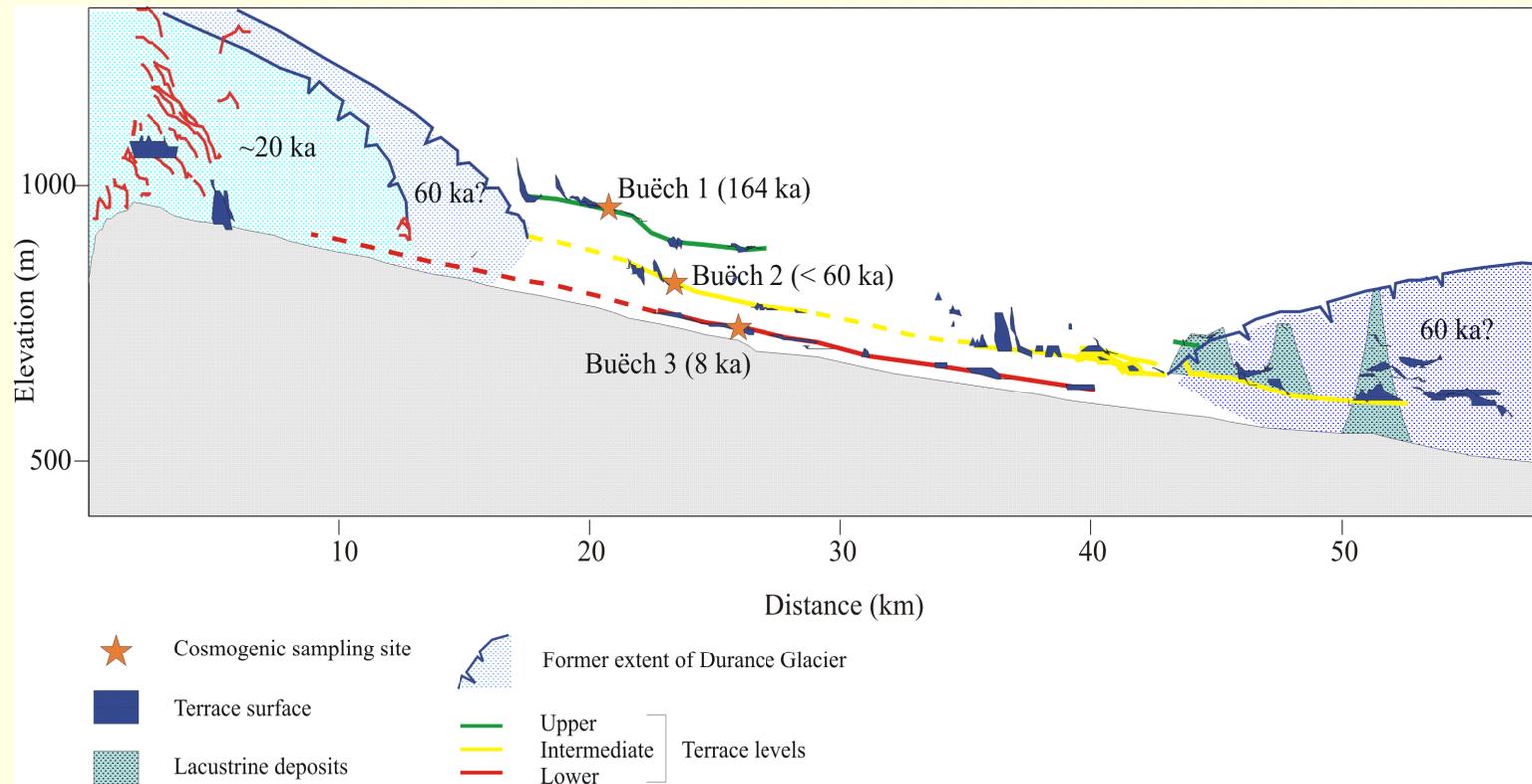
fluviale  
en place

DRAC 1 PROFILE

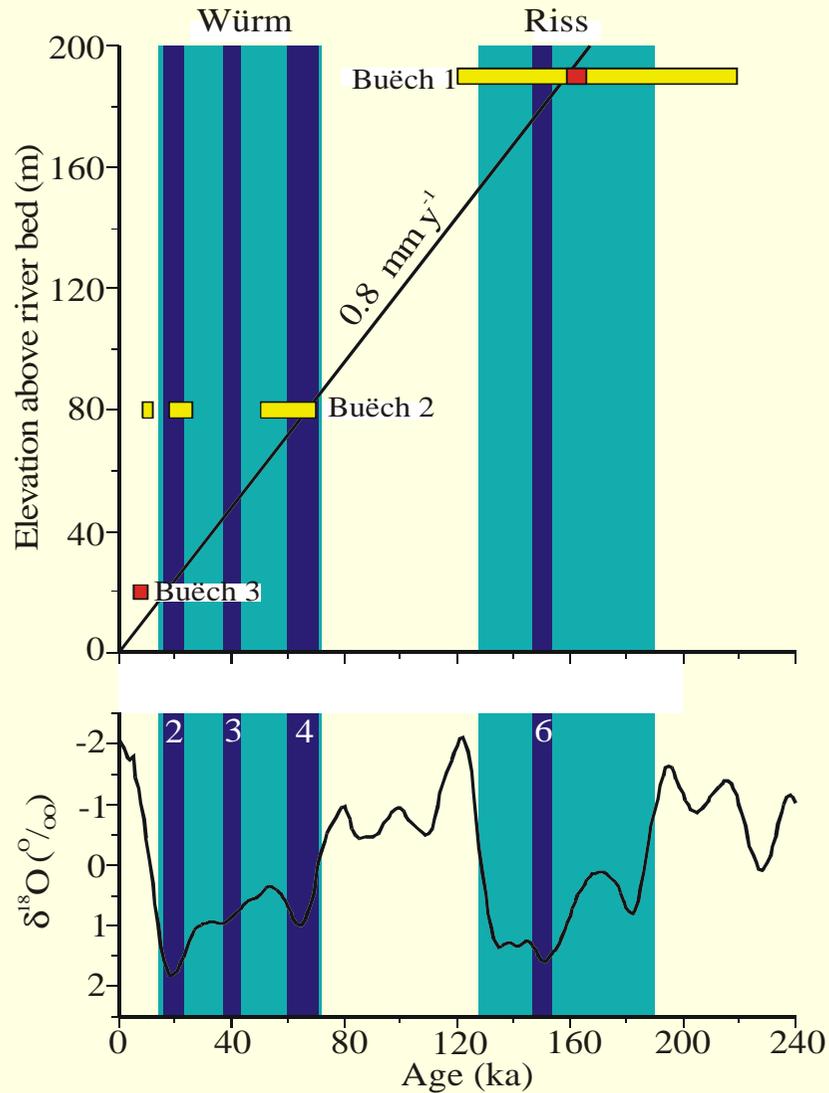


Brocard et al.,  
*Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003

# Datation des Terrasses du Buëch



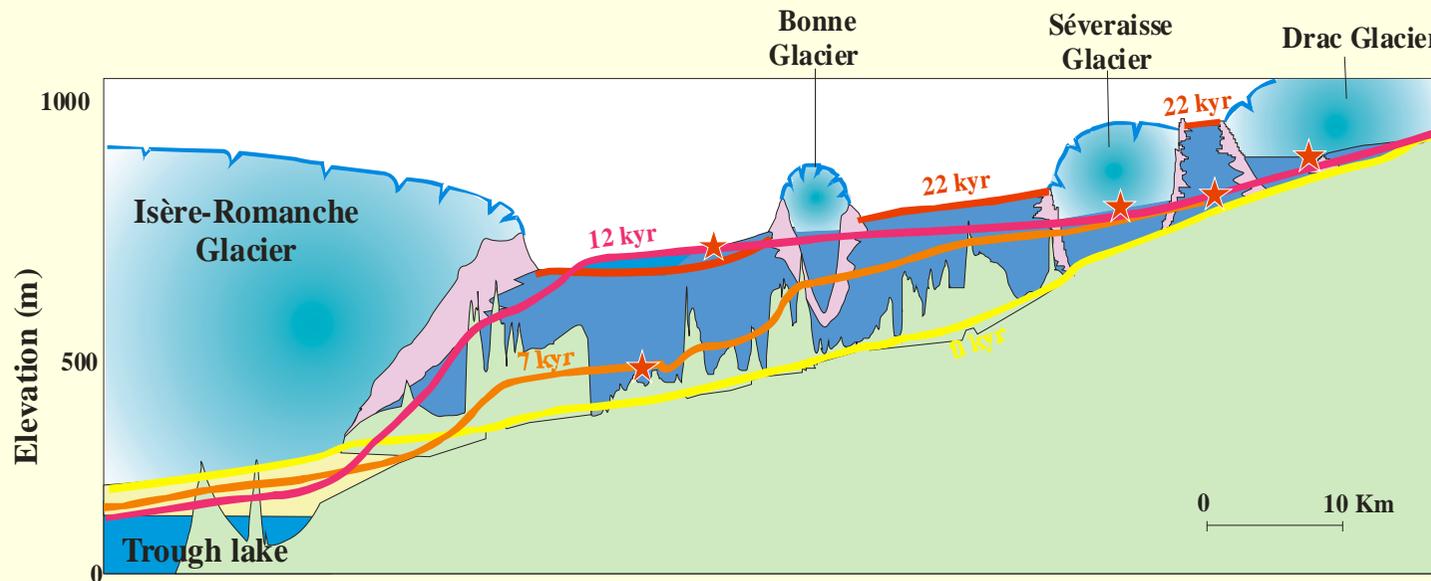
# Taux d'incision dans le Buëch



Vitesse constante  
 $\sim 0.8 \text{ mm/an}$  depuis 200 ka

Brocard *et al.*,  
*Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003

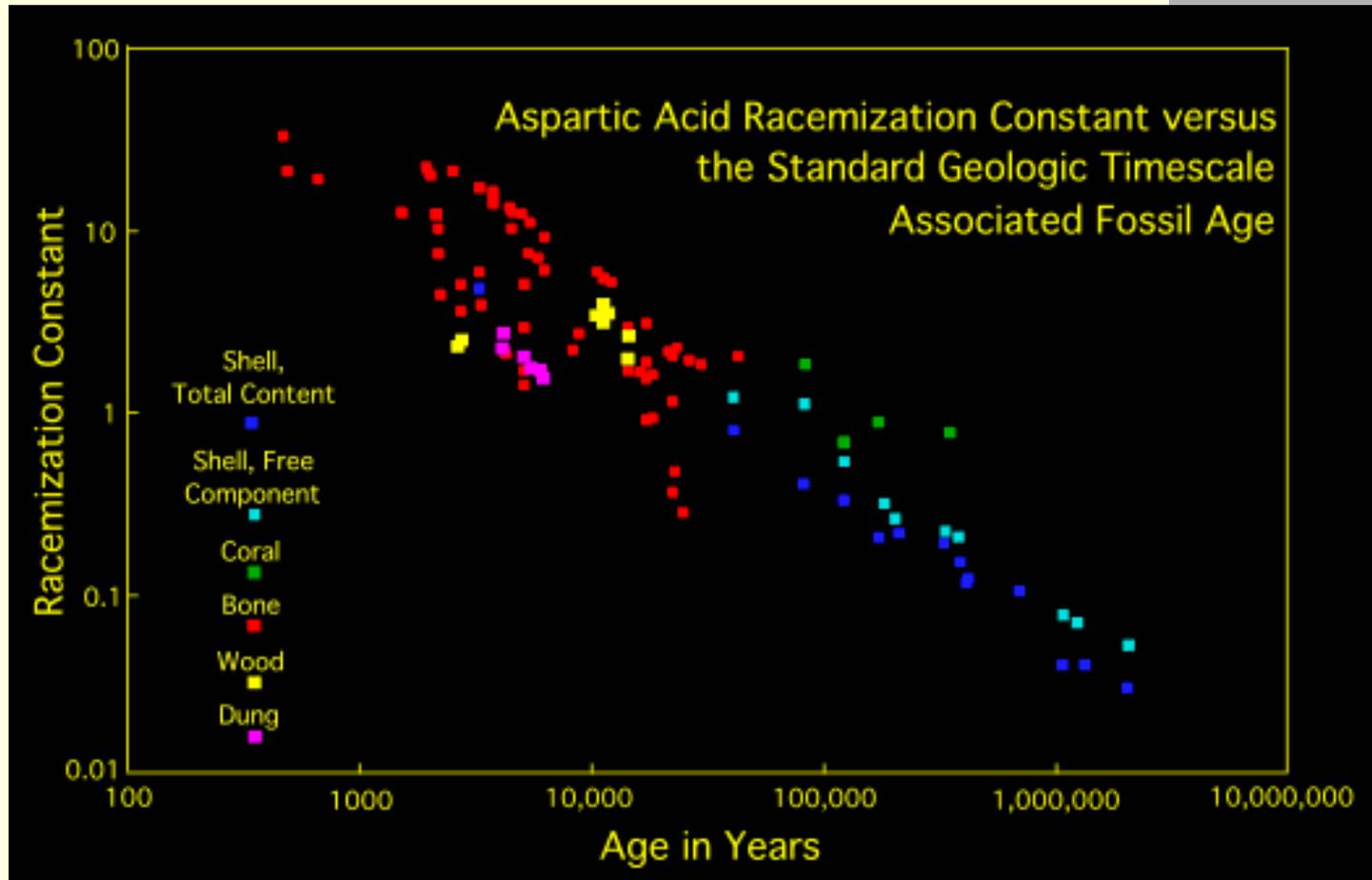
# Datation de terrasses dans le Drac



Drac : retour à l'équilibre après perturbation glaciaire  
par recul d'une rupture de pente;  
Taux d'incision post-glaciaire 4 – 30 mm/an

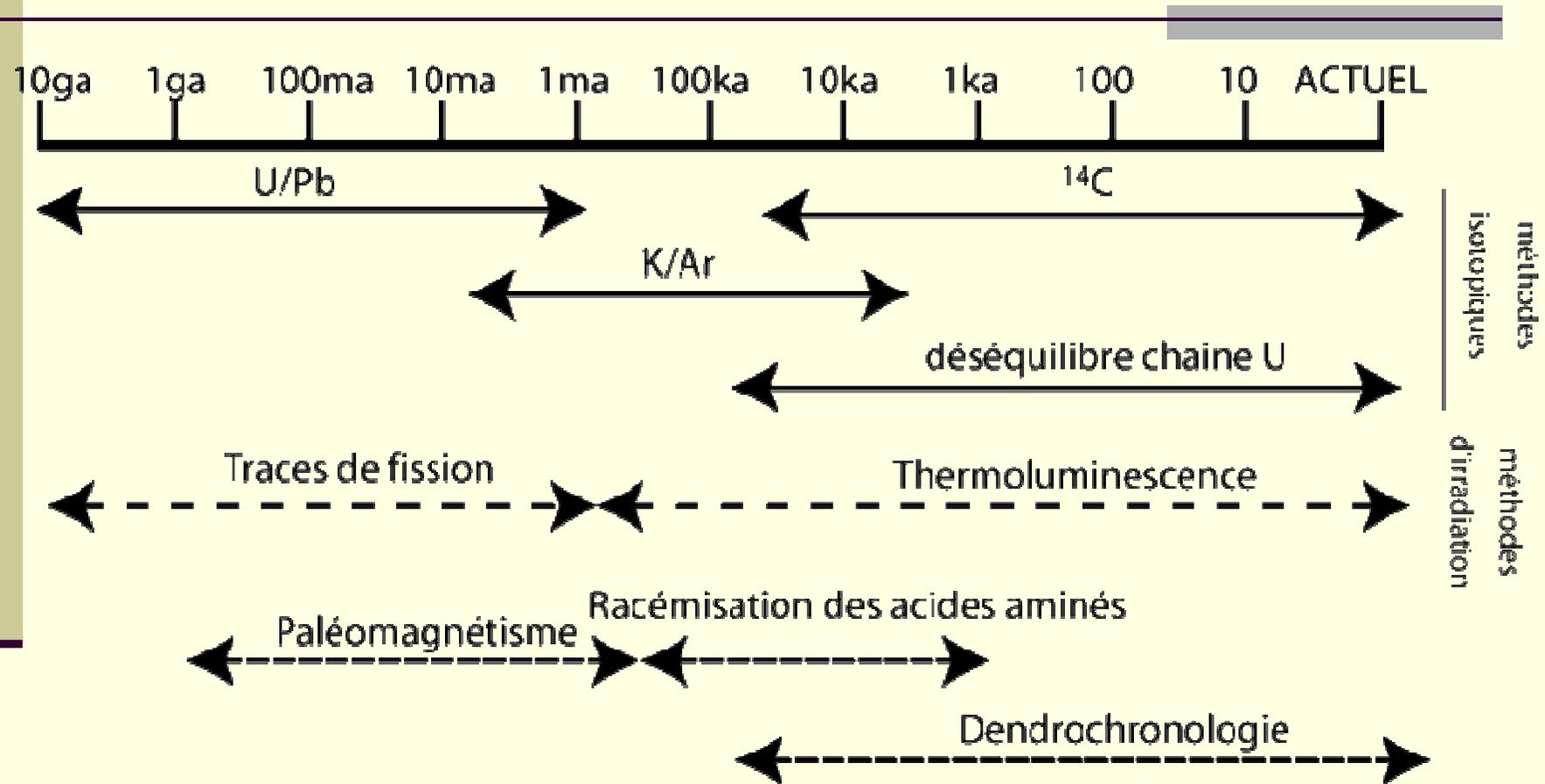
Brocard *et al.*,  
*Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003

# Racémisation des Acides Aminés



- Racémisation de l'acide aspartique en fonction de l'âge

# Synthèse



- Bilan des méthodes et de leurs domaines d'applications

# Bibliographie

---

- Allègre, C.J. (2005). – Géologie isotopique. *Belin ed.*
- Albarède, F. (2001). – La géochimie. *Gordon and Breach Science Publisher éd.*
- Allègre C.J. & Michard, G. (1973). – Introduction à la géochimie. *Presses Universitaires Françaises éd.*
- Treuil, M. & Hagemann, R. (1998). – Introduction à la géochimie et ses applications, tomes 1&2. *CEA/UPMC éd.*
- Dercourt, J. & Paquet, J. (1999). – Géologie : Objets et méthodes. *Dunod éd.*
- Caron, J.M. & coll. (1995). – Comprendre et enseigner la planète Terre. *Ophrys GAP éd.*
- Site planet-terre de l'ENS-Lyon