

THERMOCHRONOLOGIE QUANTITATIVE

XAVIER ROBERT
XAVIER.ROBERTO1@GMAIL.COM

UQAM 03/02/2011

THERMOCHRONOLOGIE : DÉFINITION

- *Datation* pour une roche du passage à une température dite *température de fermeture*, spécifique d'un système donné

OUTLINE

(1) Qu'est-ce que la thermochronologie ?

- a. Notions de géochronologie
- b. Concept de Température de fermeture
- c. Concept de zone de rétention partielle

(2) Les grands systèmes thermochronologiques

- a. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$
- b. (U-Th)/He
- c. Traces de fission

(3) Quantification ?

NOTIONS DE GÉOCHRONOLOGIE

RAPPELS DE GÉOCHRONOLOGIE

- Datations «absolues» grâce à la radioactivité naturelle

$$N_d = N_{d_0} + N_p(e^{\lambda t} - 1)$$

- N_d Quantité de l'élément fils à t
- N_{d_0} Quantité initiale de l'élément fils $t = 0$
- N_P Quantité d'élément père
- λ Constante de désintégration

Père	Fils
^{87}Rb	^{87}Sr
^{147}Sm	^{143}Nd
$^{235-238}\text{U}$ - ^{232}Th	$^{206-8}\text{Pb} + ^4\text{He}$
^{40}K	^{40}Ar
^{39}Ar	^{40}Ar
^{176}Lu	^{176}Hf

RAPPELS DE GÉOCHRONOLOGIE

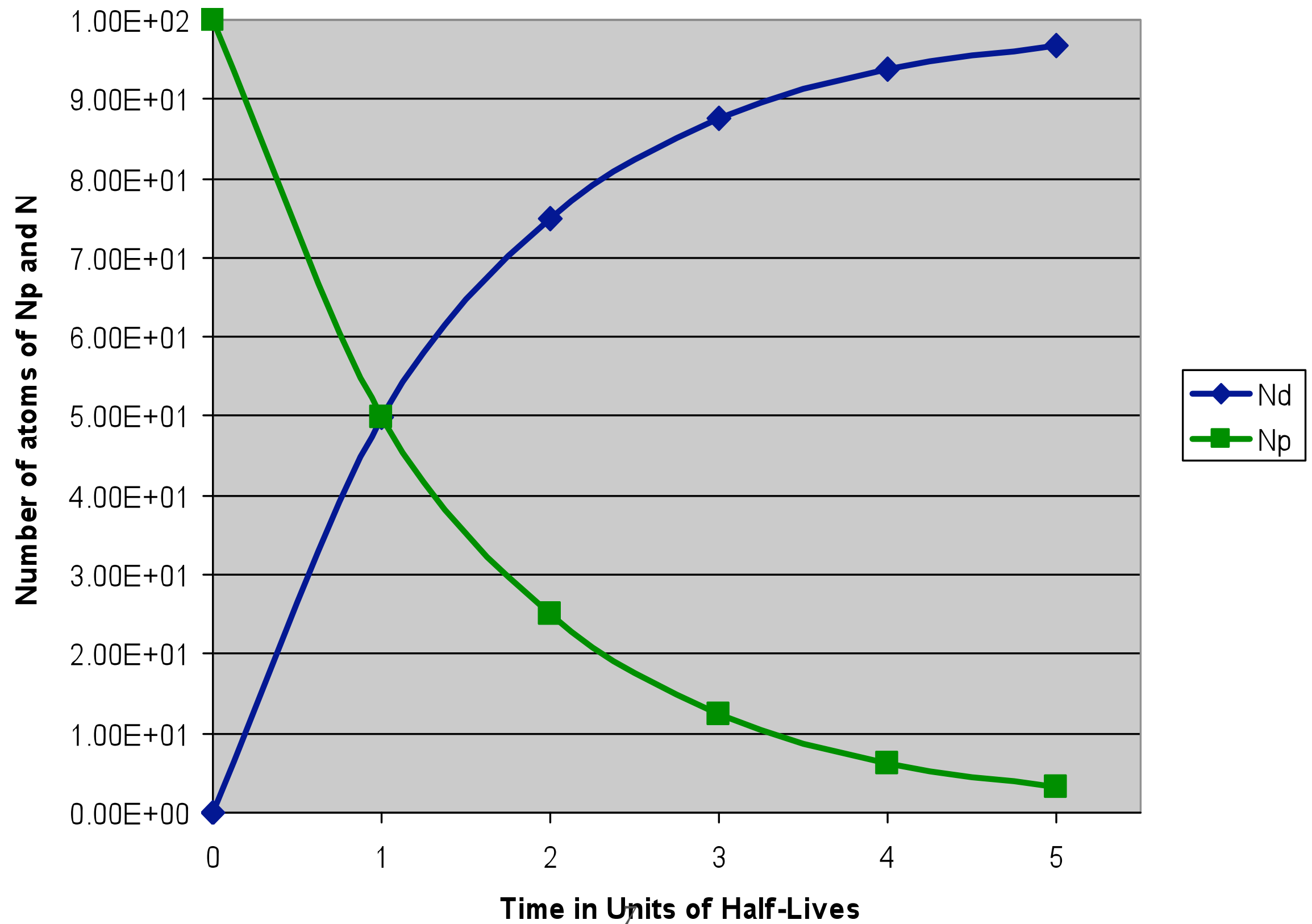
- Datations «absolues» grâce à la radioactivité naturelle

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{N_d - N_{d_0}}{N_p} + 1 \right]$$

- N_d Quantité de l'élément fils à t
- N_{d_0} Quantité initiale de l'élément fils $t = 0$
- N_P Quantité d'élément père
- λ Constante de désintégration

Père	Fils
^{87}Rb	^{87}Sr
^{147}Sm	^{143}Nd
$^{235-238}\text{U}$ - ^{232}Th	$^{206-8}\text{Pb} + ^4\text{He}$
^{40}K	^{40}Ar
^{39}Ar	^{40}Ar
^{176}Lu	^{176}Hf

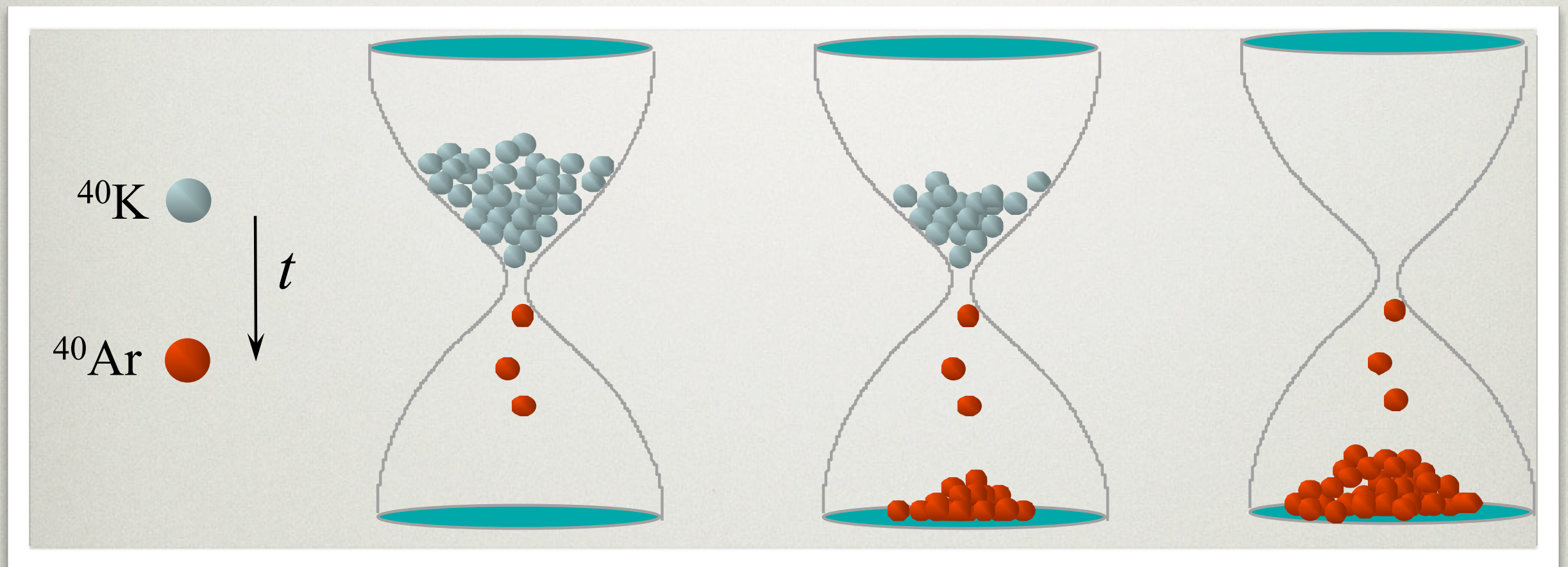
Radioactive decay



CONCEPT DE TEMPÉRATURE DE FERMETURE

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

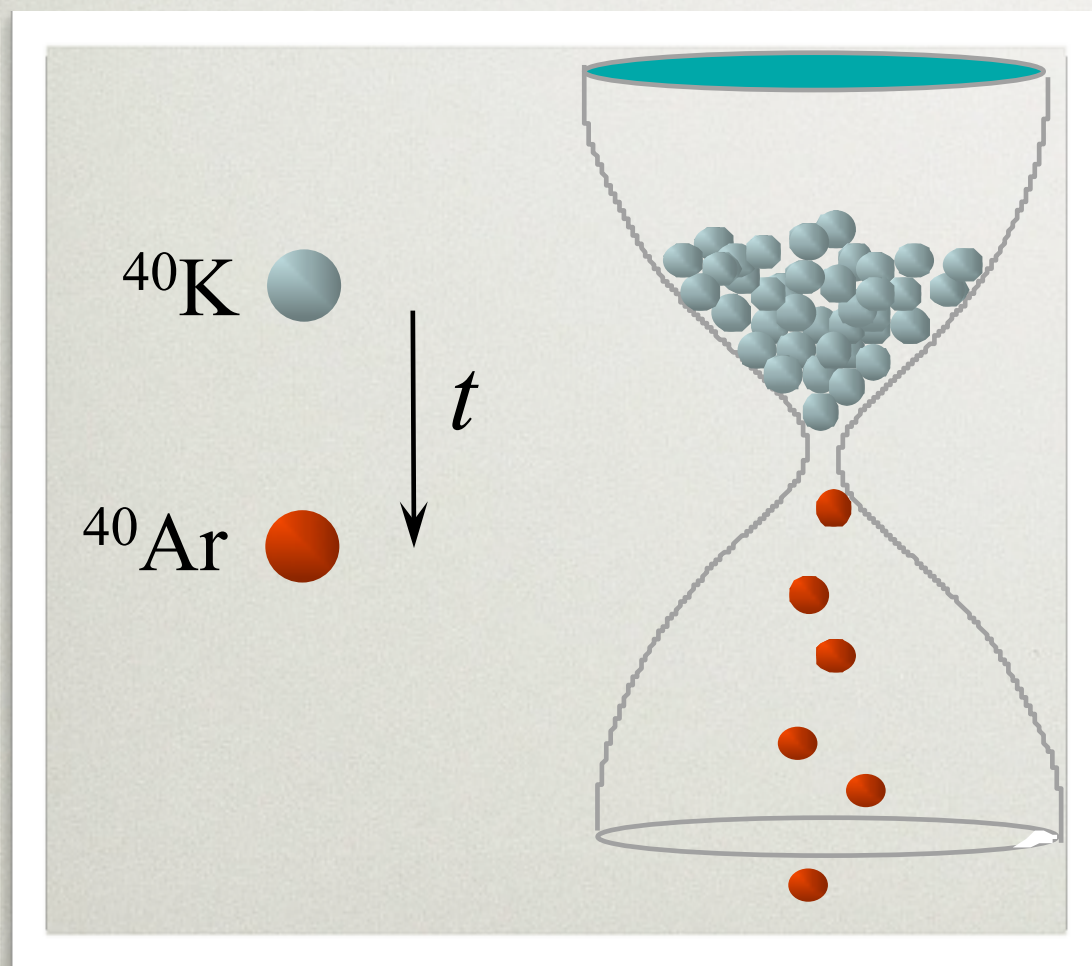
- Décroissance radioactive en milieu *fermé*



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

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

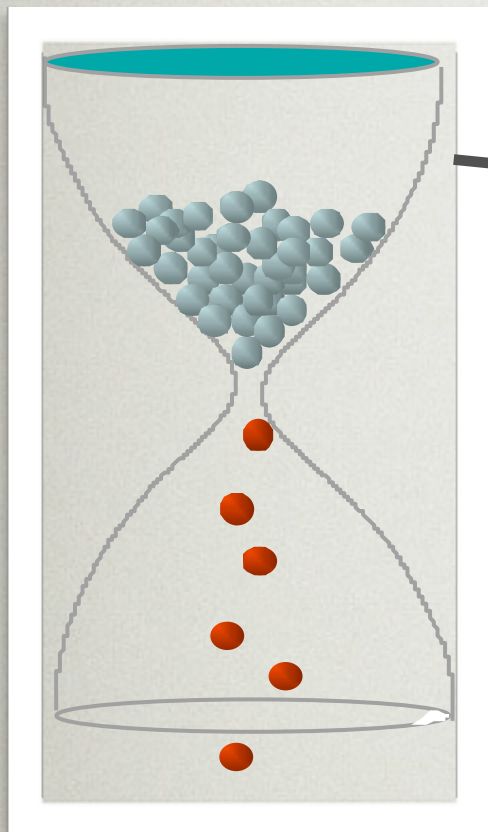
- Décroissance radioactive en milieu *ouvert*



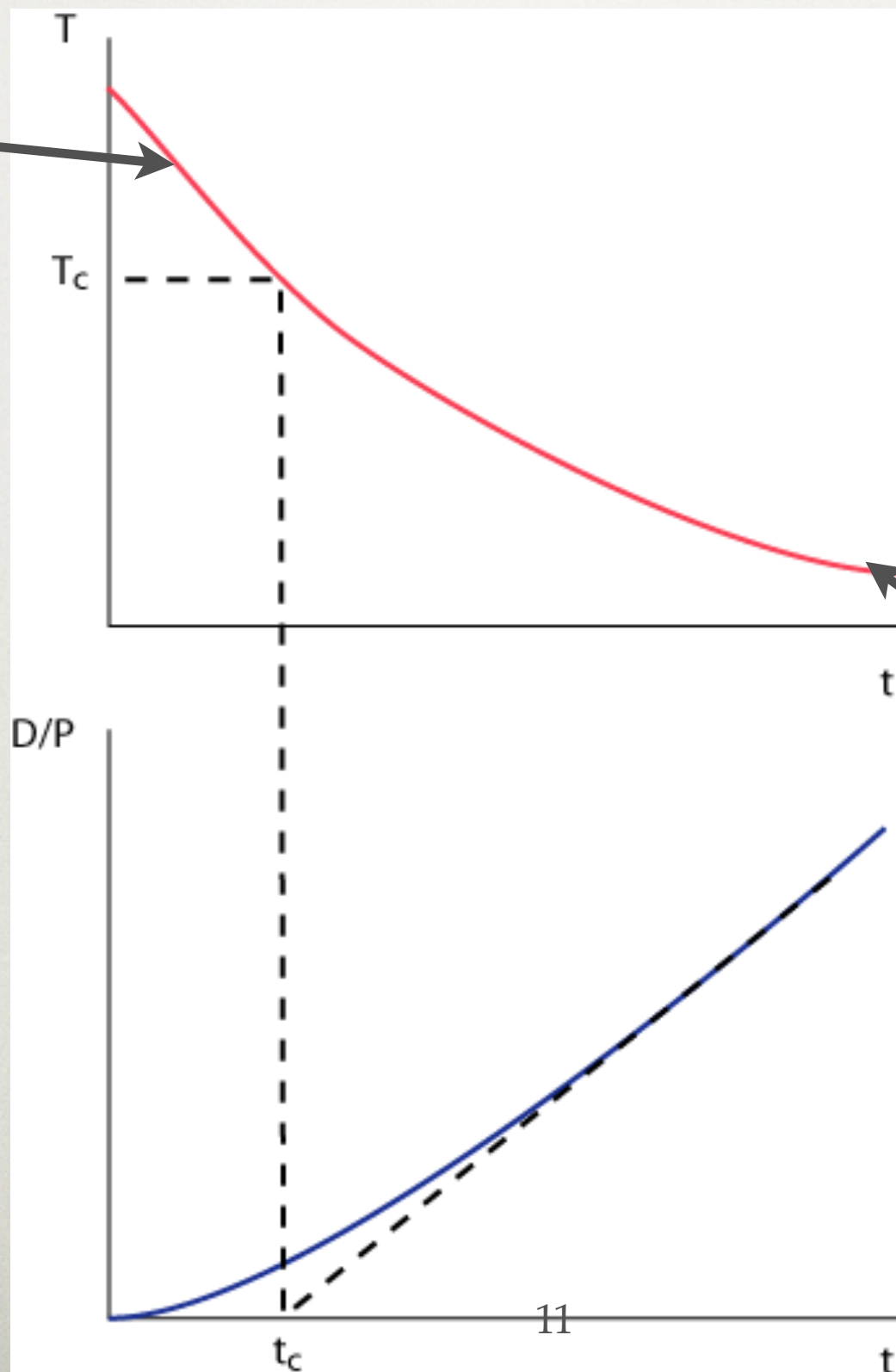
L'élément fils
produit diffuse
en continu...

**==> PAS de
datations possibles !**

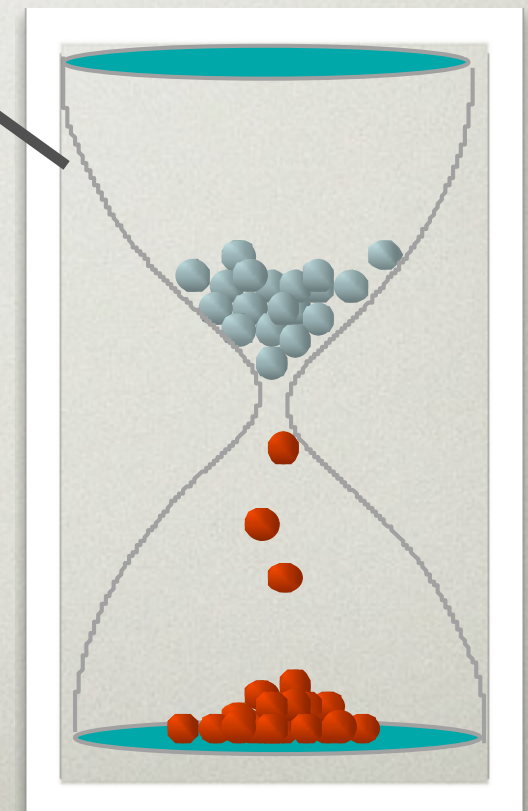
TEMPÉRATURE DE FERMETURE



Système ouvert



Système fermé



TEMPÉRATURE DE FERMETURE

Concentration du fils

$$\frac{\partial N_d}{\partial t}$$

=

$$D_{(T)}$$

$$\nabla^2$$

$$N_d$$

+

$$P$$

Production

Diffusivité

$$D_{(T)}$$

=

$$\frac{D_0}{a^2}$$

$$e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

$$e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

Constante de diffusivité

Energie d'activation

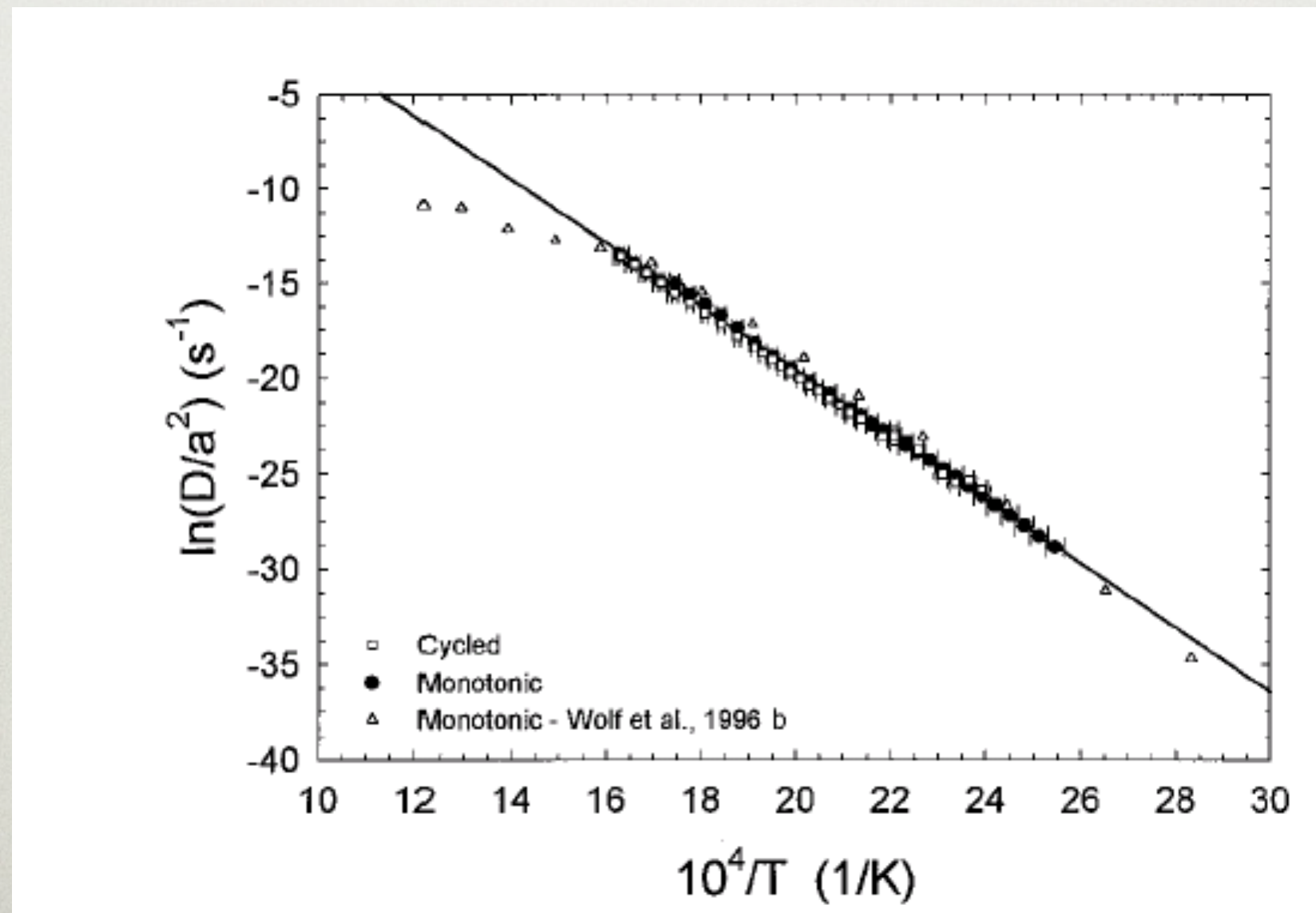
$$D(T) = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Température

Taille du domaine de
diffusion (= taille du
grain)

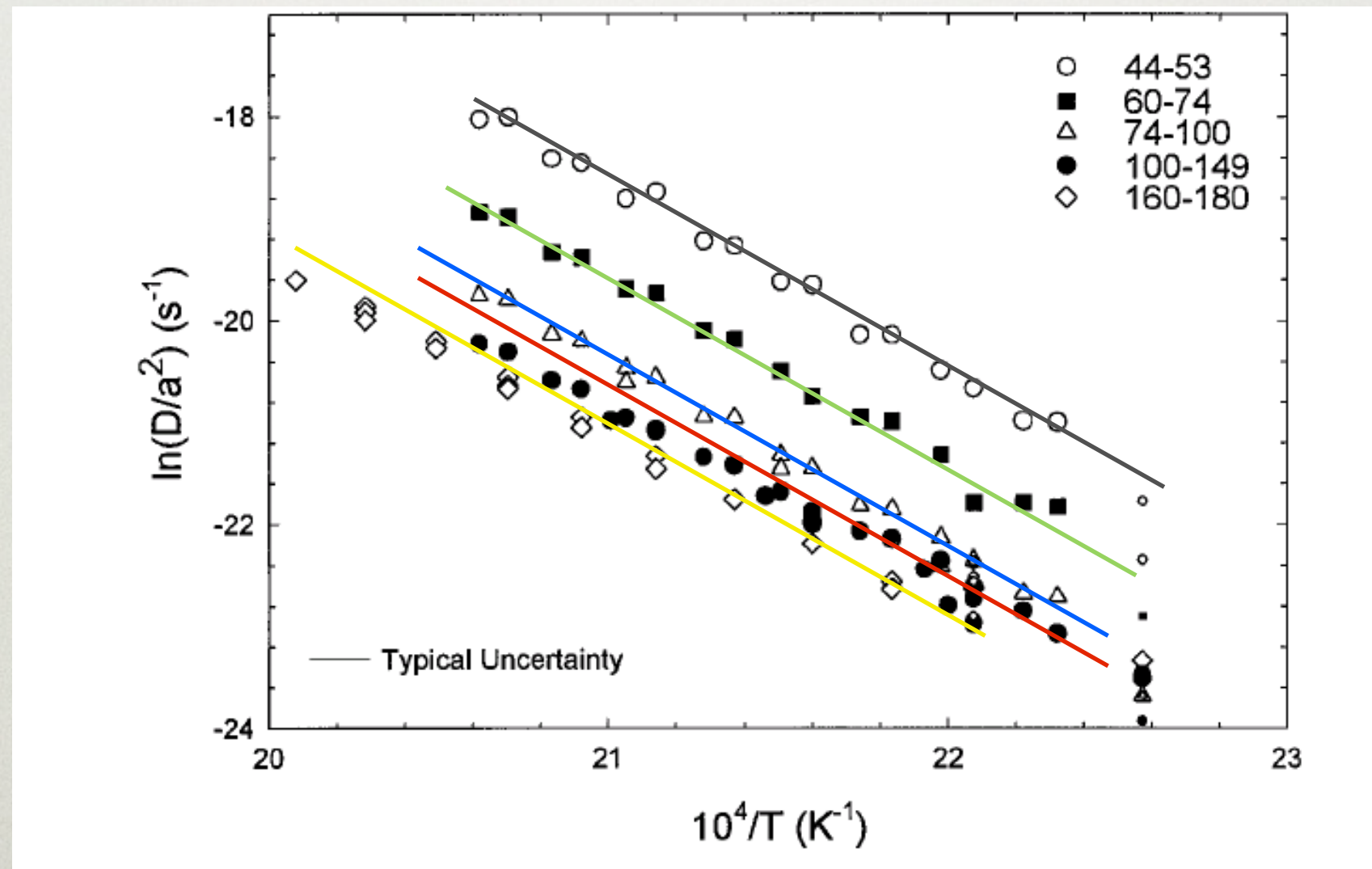
TEMPÉRATURE DE FERMETURE

- Expériences pour déterminer les paramètres de diffusion (D_0 , a , E_a)
- Ex = *Farley, 2000*



TEMPÉRATURE DE FERMETURE

- Dépendance de la taille des grains
- Ex = *Farley, 2000*



TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu,

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau}$$

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau} \quad \text{avec}$$

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = -\frac{RT_c^2}{E_a \frac{\partial T}{\partial t}}$$

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = -\frac{RT_c^2}{E_a \frac{\partial T}{\partial t}}$$

temps caractéristique

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = -\frac{RT_c^2}{E_a \frac{\partial T}{\partial t}}$$

temps caractéristique

Dépend du taux
de refroidissement

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = -\frac{RT_c^2}{E_a \frac{\partial T}{\partial t}}$$

temps caractéristique

Dépend du taux
de refroidissement

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D_{(T)} = \frac{D_0}{a^2} e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

- Si le refroidissement est monotone et continu, $T_{(t)} \sim 1/t$

$$D_{(T)} = D_0 e^{-1/\tau} \quad \text{avec} \quad \tau = -\frac{RT_c^2}{E_a \frac{\partial T}{\partial t}}$$

↑ temps caractéristique
 ↑ Dépend du taux de refroidissement

Dodson, 1973

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

$$D(\tau) = D_0 e^{-1/\tau} \quad \tau = -\frac{RT_c^2}{E_a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

- En combinant avec l'équation de diffusion :

$$T_c = \frac{E_a}{R \ln(A\tau \frac{D_0}{a^2})}$$

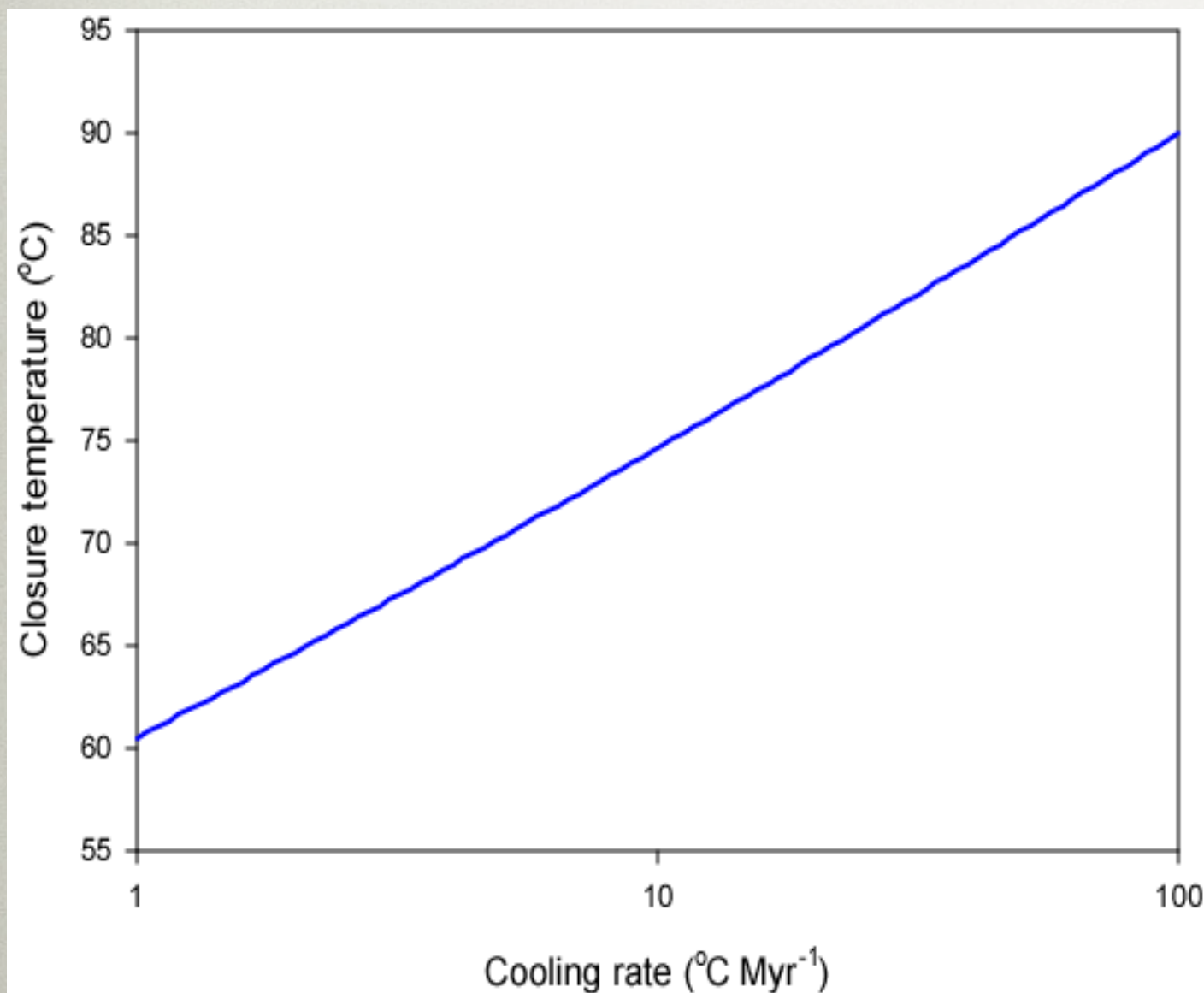
Tc des 2 côtés de l'équation !
==> *Solution itérative*

Dodson, 1973

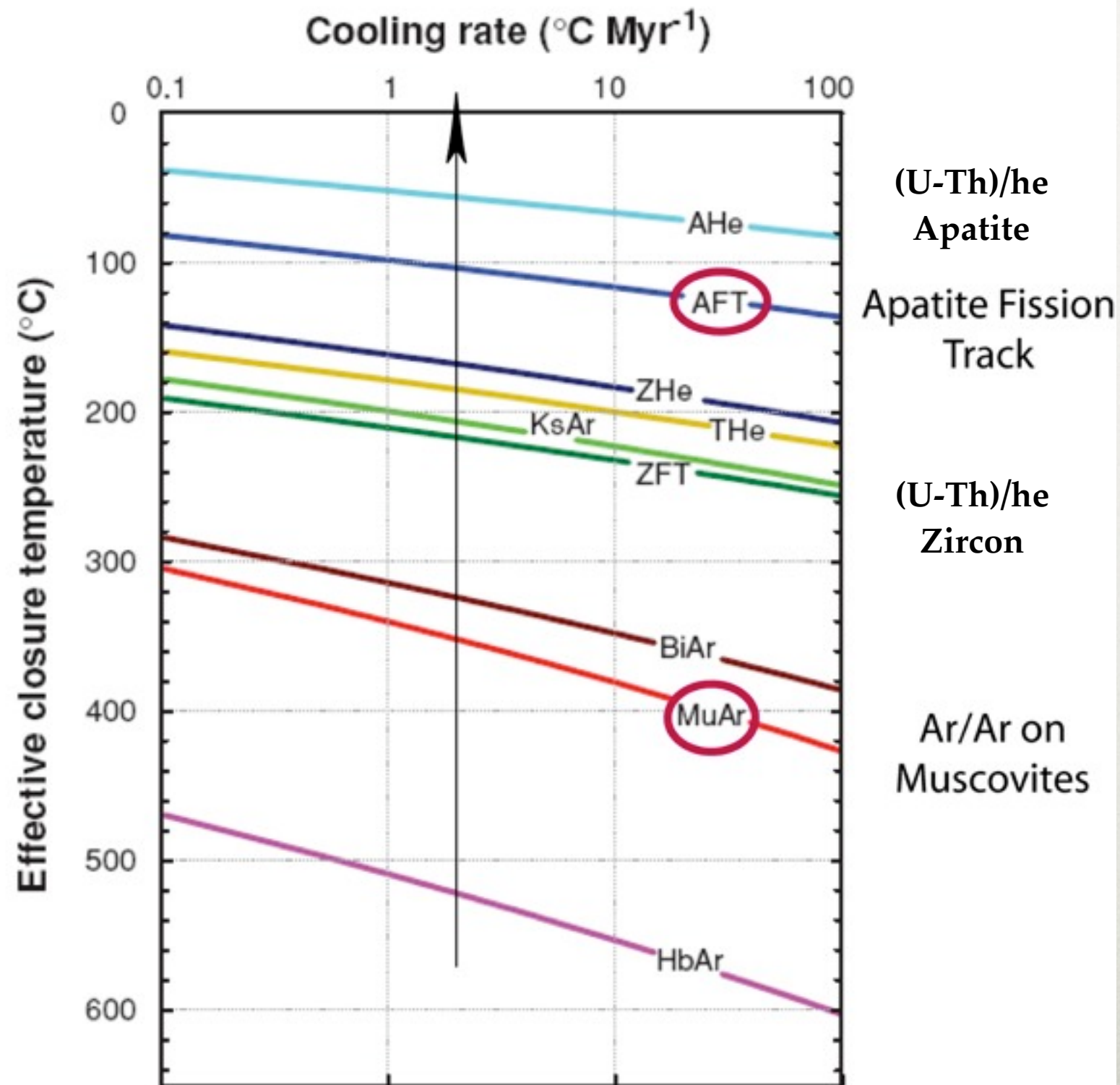
$$T_{(t)} \sim 1/t$$

TEMPÉRATURE DE FERMETURE

- Dépendance de la température de fermeture sur le taux de refroidissement



THERMOCHRONOMÈTRES DE BASSE TEMPÉRATURE



Elhers & Farley, 2003. *EPSL*, 206. 1-14

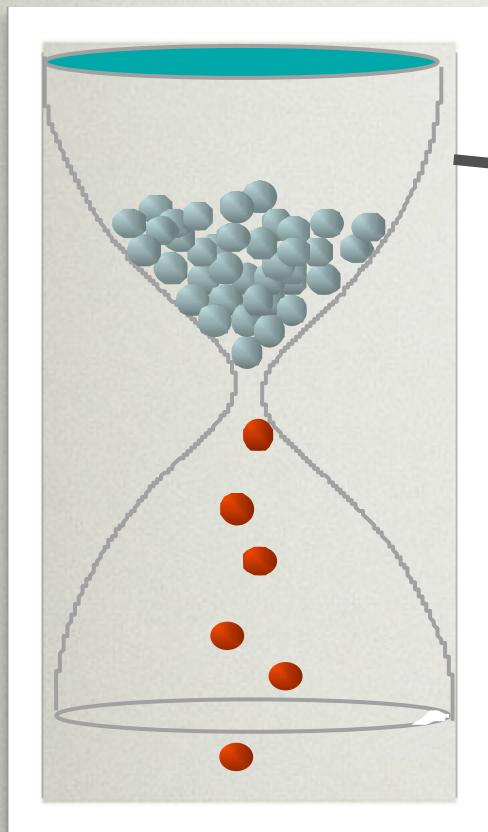
Wagner & Van den haute, 1992. *Fission Track Dating*, Kluwer Ac. Publ,

Farley, 2000. *JGR*, 105. 2903-2914

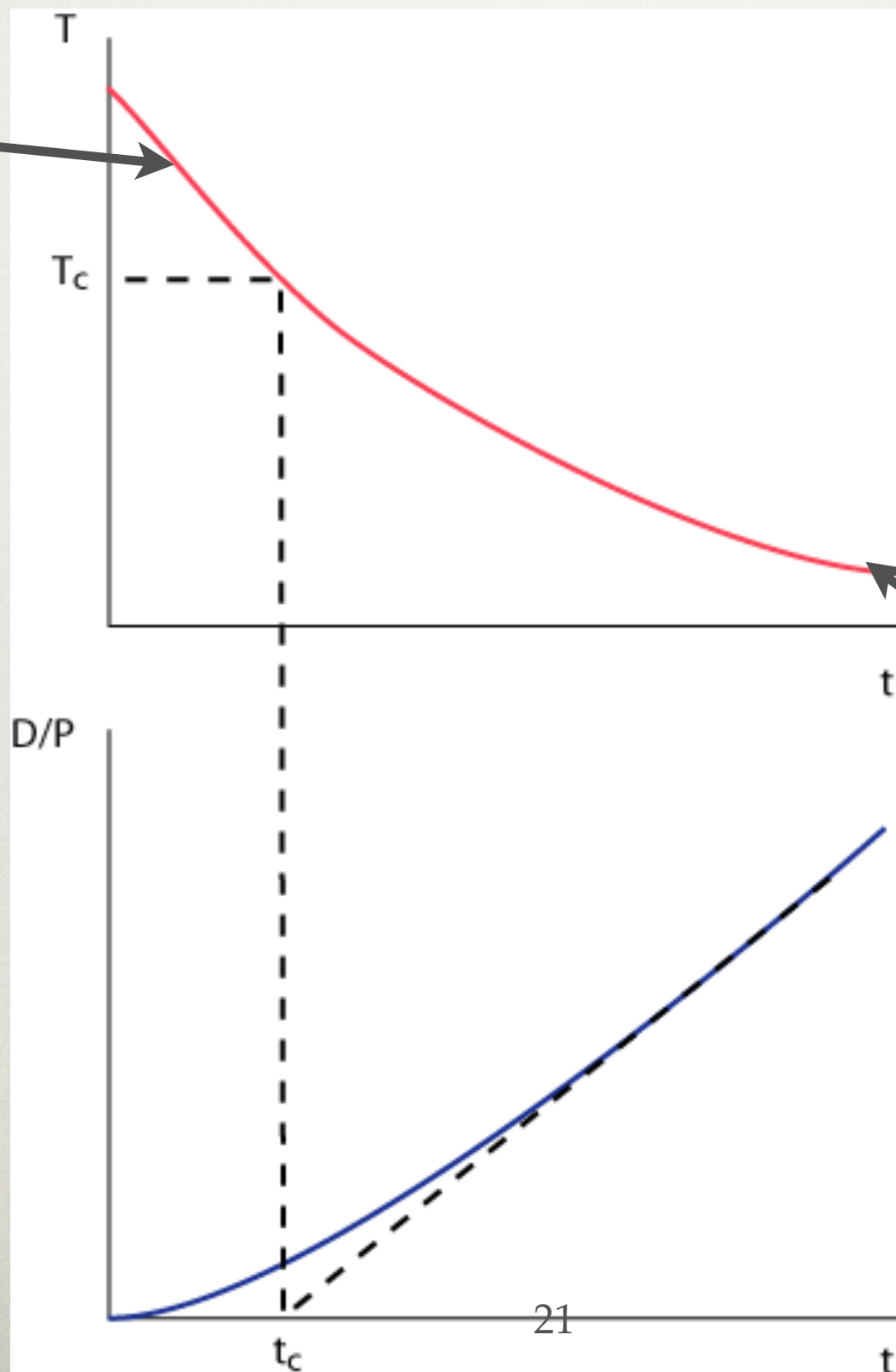
McDougall & Harrison, 1988. *Geochronology and thermochronology by the ⁴⁰Ar/³⁹Ar method*. Oxford Univ. Press

CONCEPT DE ZONE DE RÉTENTION PARTIELLE

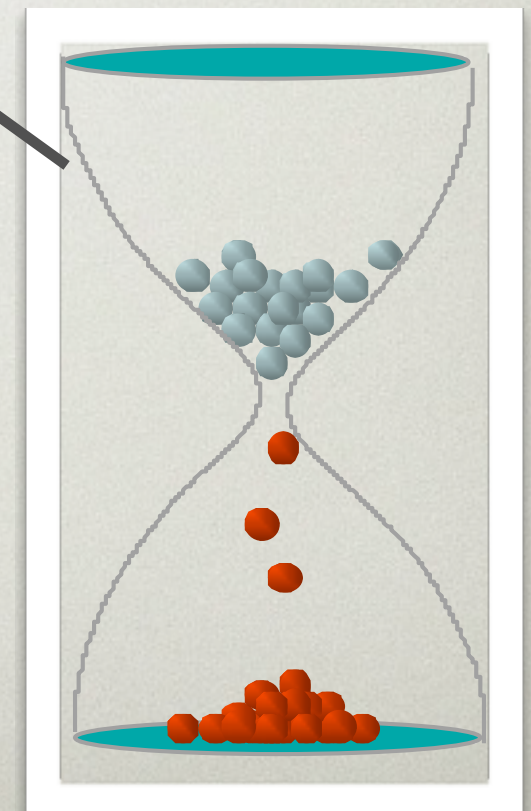
TEMPÉRATURE DE FERMETURE



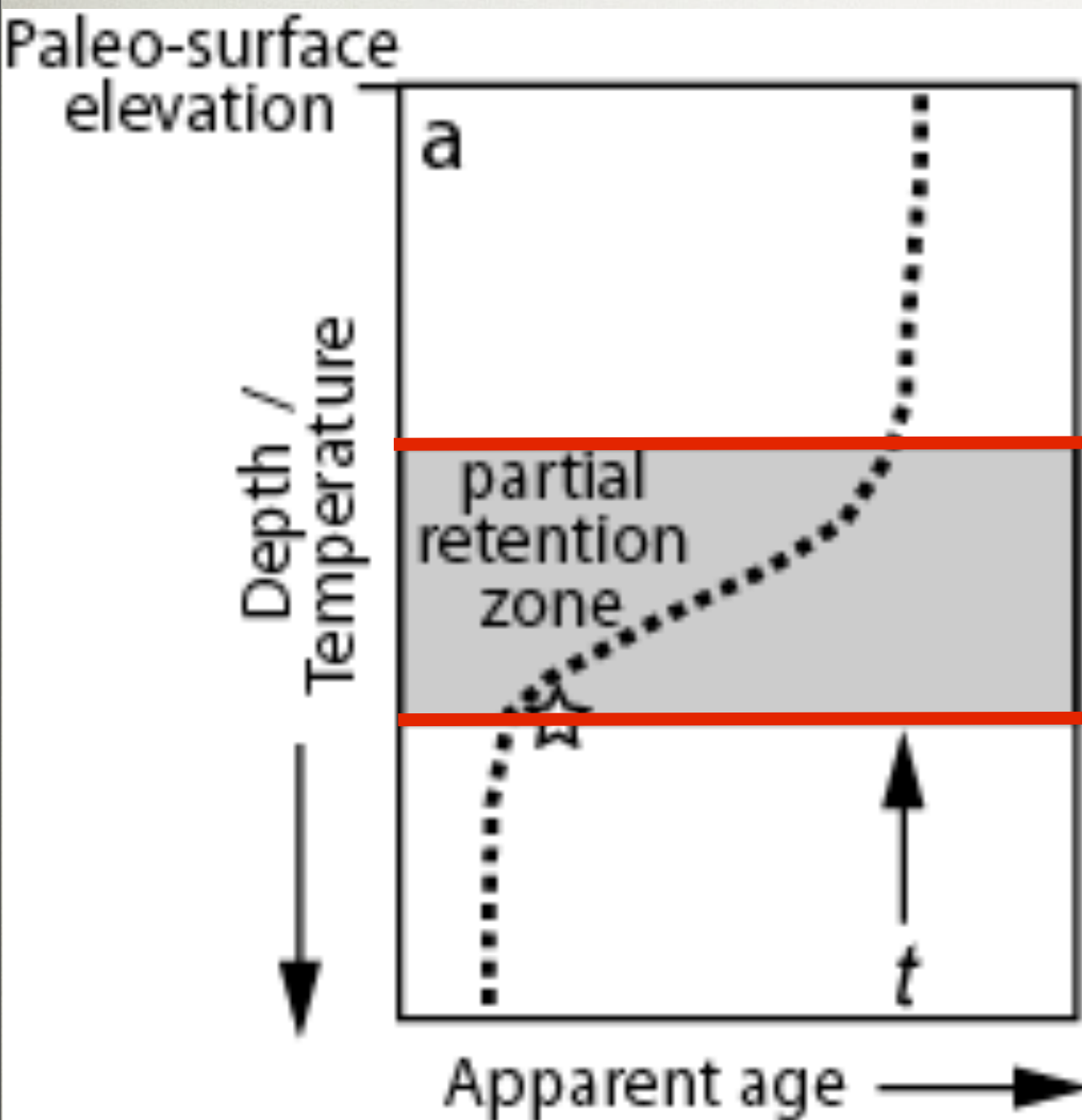
Système ouvert



Système fermé



ZONE DE RÉTENTION PARTIELLE (PAZ)



- Limite sup : 90 % de rétention
- Limite inf : 10 % de rétention

LE SYSTÈME 40AR/39AR

MÉTHODES

ISOTOPIQUES : AR-AR

- **Datation K-Ar ou Ar-Ar :**

$${}^{40}_{19}K \longrightarrow {}^{40}_{18}Ar + \beta^+ \quad (0.001\%)$$

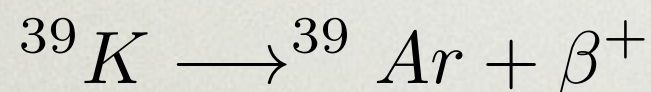
$${}^{40}_{19}K + \beta^- \longrightarrow {}^{40}_{18}Ar \quad (10.3\%)$$

$${}^{40}_{19}K \longrightarrow {}^{40}_{20}Ca + \beta^- \quad (89.7\%)$$

- **Datation K-Ar :** Mesure K par chimie humide, Ar* par spectrometrie de masse

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{{}^{40}Ar}{{}^{40}K} \frac{\lambda_e}{\lambda} - 1 \right]$$

- **Datation Ar-Ar :** Induire la réaction



par irradiation neutronique; mesure du rapport ${}^{40}Ar/{}^{39}Ar$ par spectrométrie de masse

$$\frac{{}^{40}Ar}{{}^{39}Ar} = \frac{\lambda_e}{\lambda} \frac{{}^{40}K}{{}^{39}K} \frac{e^{\lambda t} - 1}{\alpha}$$

MÉTHODES

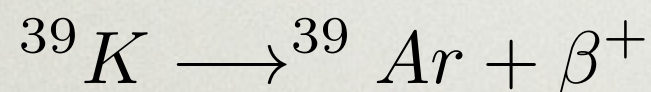
ISOTOPIQUES : AR-AR

- **Datation K-Ar ou Ar-Ar :**

$${}^{40}_{19}\text{K} \longrightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} + \beta^+ \quad (0.001\%)$$

$${}^{40}_{19}\text{K} + \beta^- \longrightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar} \quad (10.3\%)$$
~~$${}^{40}_{19}\text{K} \longrightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca} + \beta^- \quad (89.7\%)$$~~

- **Datation K-Ar :** Mesure K par chimie humide, Ar* par spectrometrie de masse
- **Datation Ar-Ar :** Induire la réaction

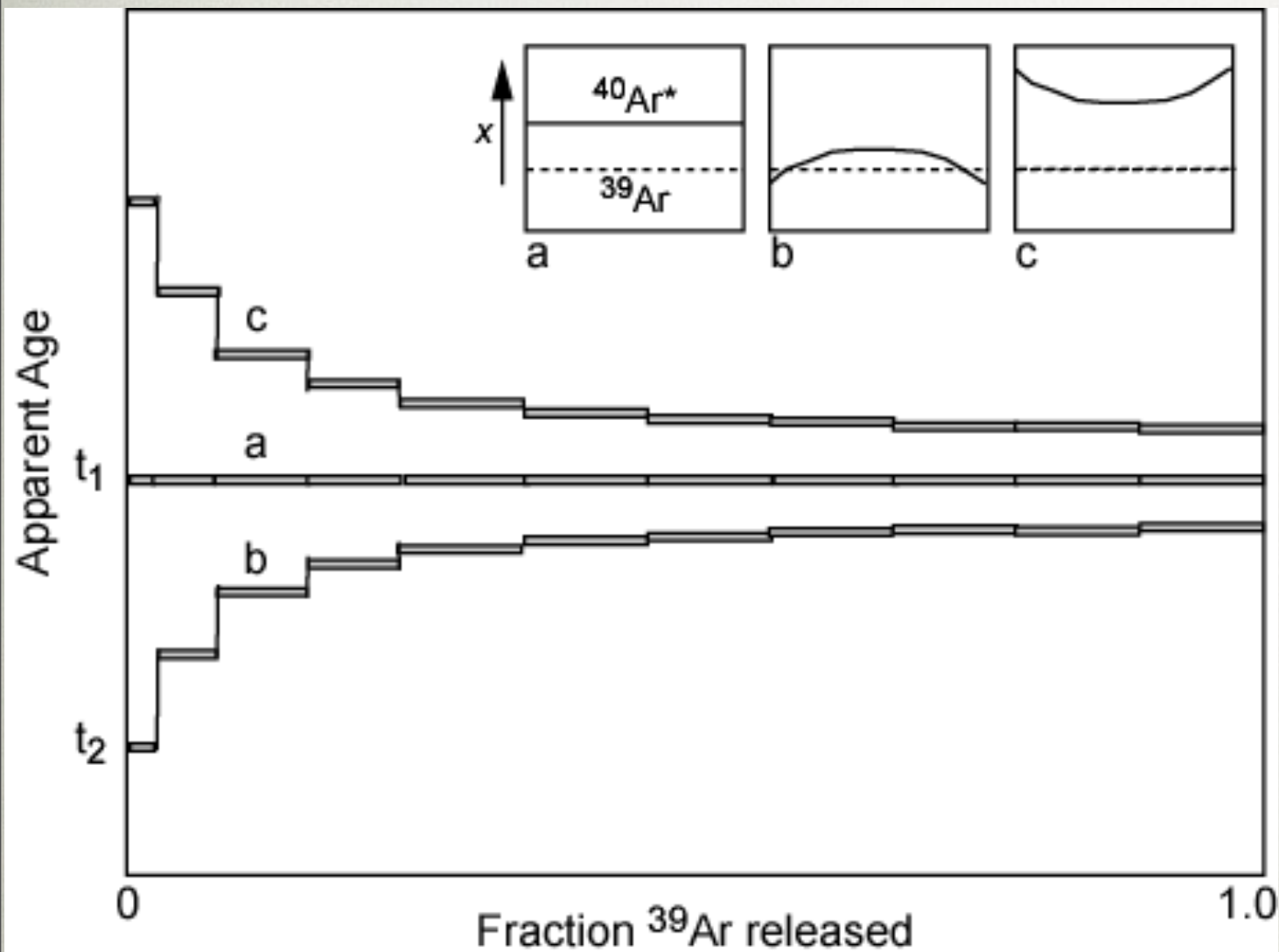


par irradiation neutronique; mesure du rapport ${}^{40}\text{Ar}/{}^{39}\text{Ar}$ par spectrométrie de masse

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{40}\text{K}} \frac{\lambda_e}{\lambda} - 1 \right]$$

$$\frac{{}^{40}\text{Ar}}{{}^{39}\text{Ar}} = \frac{\lambda_e}{{}^{39}\text{K}} \frac{{}^{40}\text{K}}{\lambda} \frac{e^{\lambda t} - 1}{\alpha}$$

AR-AR : CHAUFFAGE PAR PALIERS



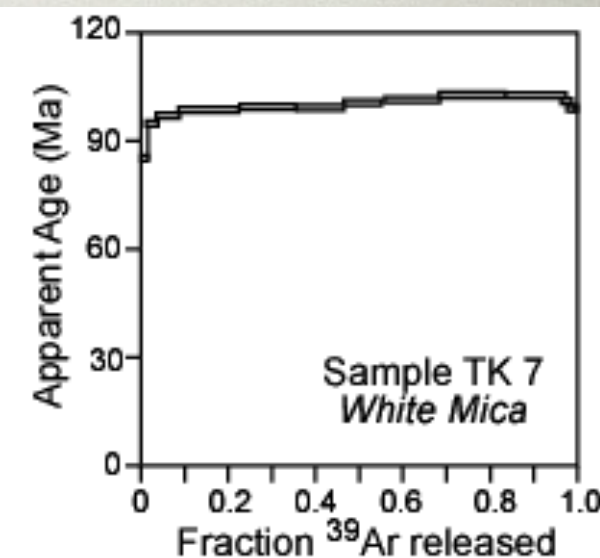
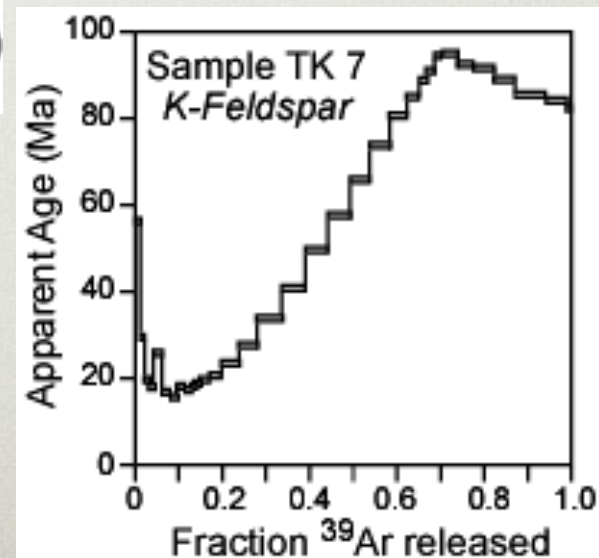
a) âge idéal --> refroidissement rapide à t_1

b) perte d'Ar --> reset partiel à t_2 OU refroidissement lent à t_1

c) Exces d'Ar

230°C

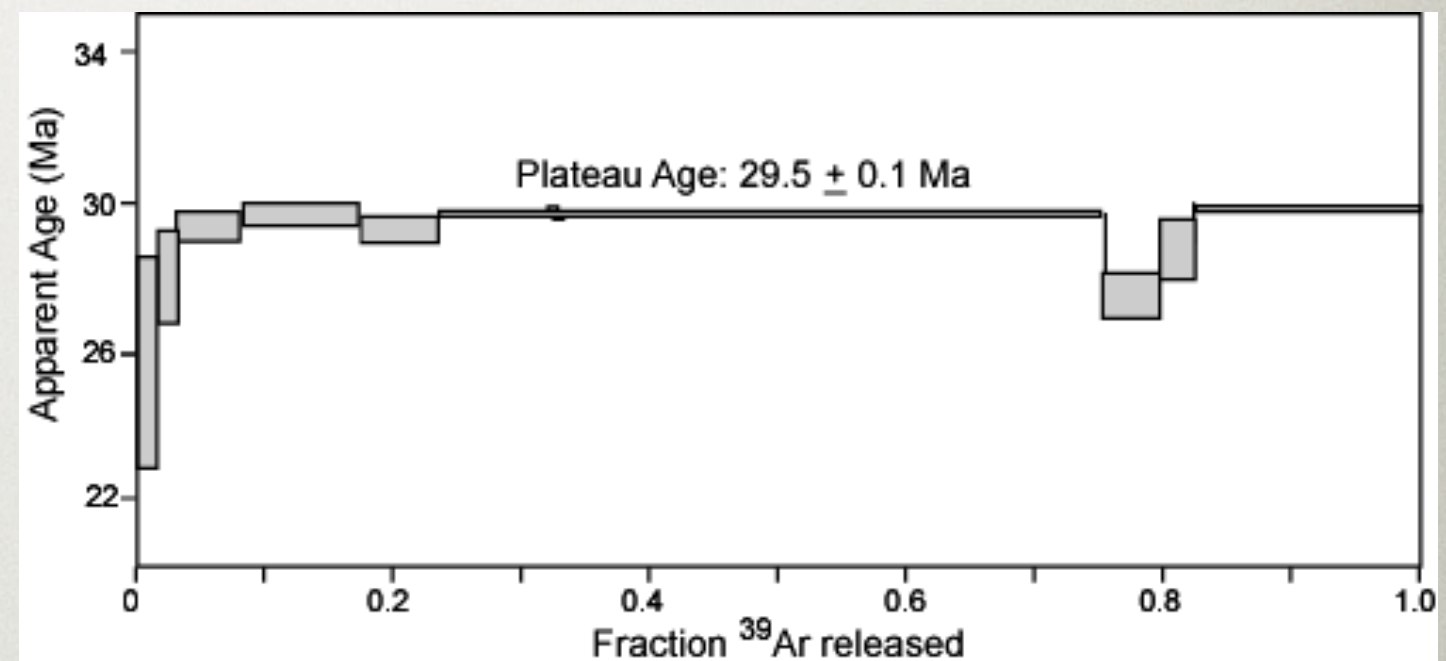
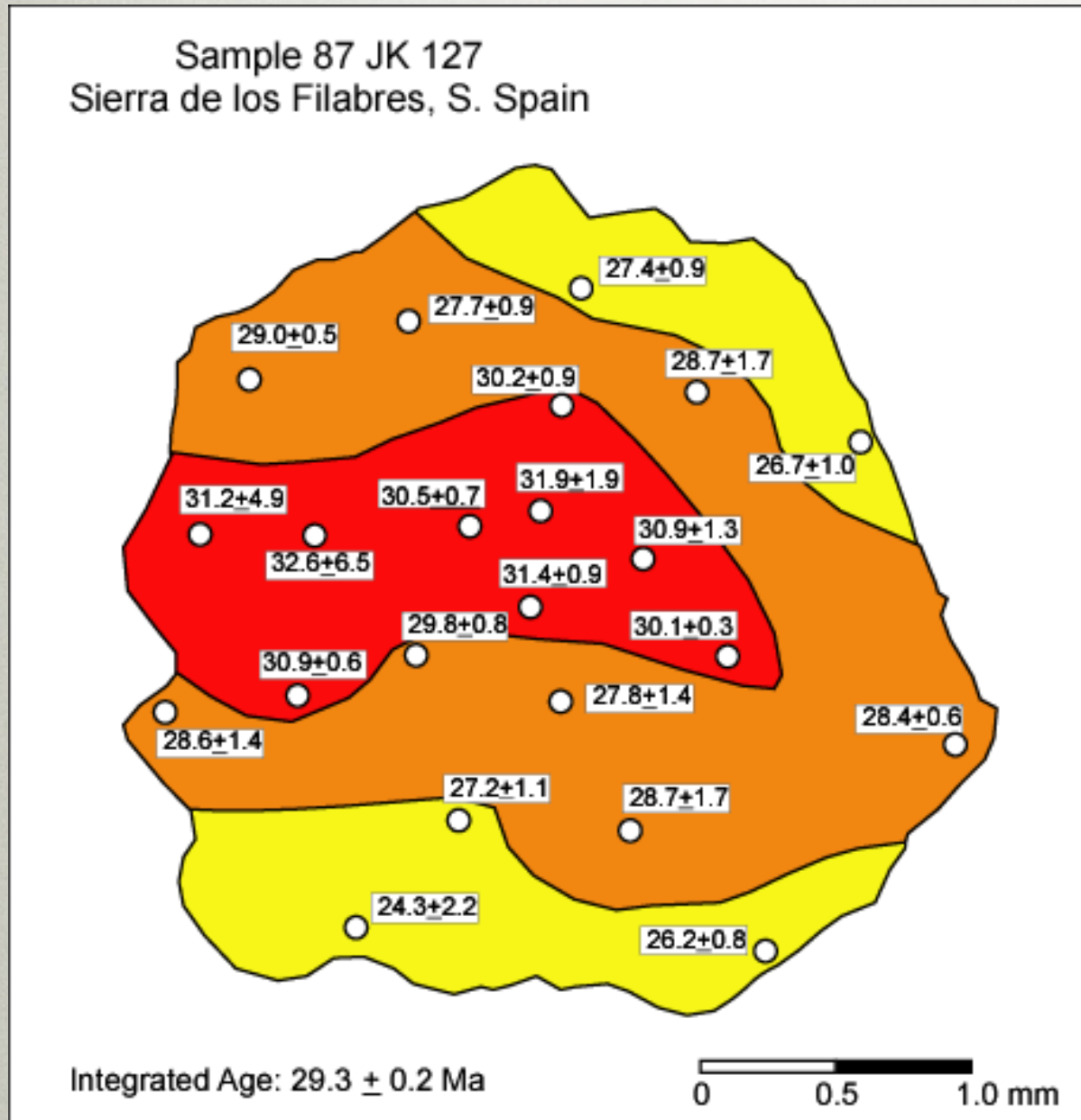
350°C



Hohonu range,
NZ

Batt et al., 2004

AR-AR : FUSION PONCTUELLE (LASER)



De jong et al., 1992

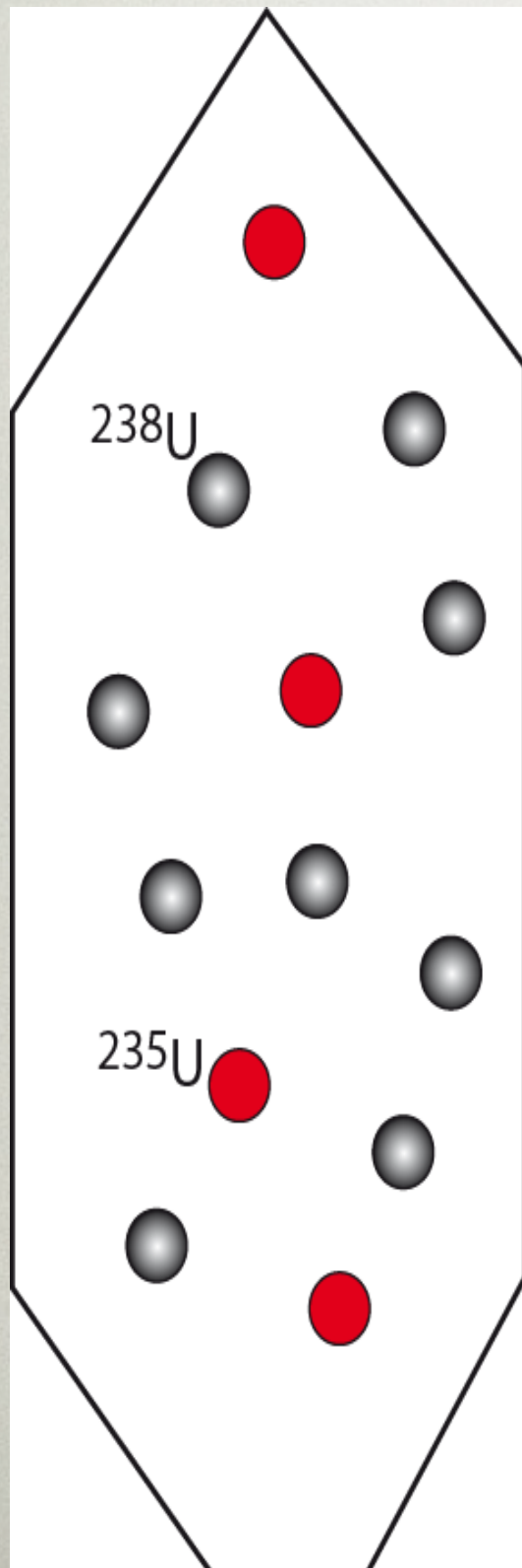
AR-AR, DATATION DES MICAS BLANCS

- Détermination de l'âge de déformation
- Âge de refroidissement
- Taux d'exhumation
- Analyse de provenance



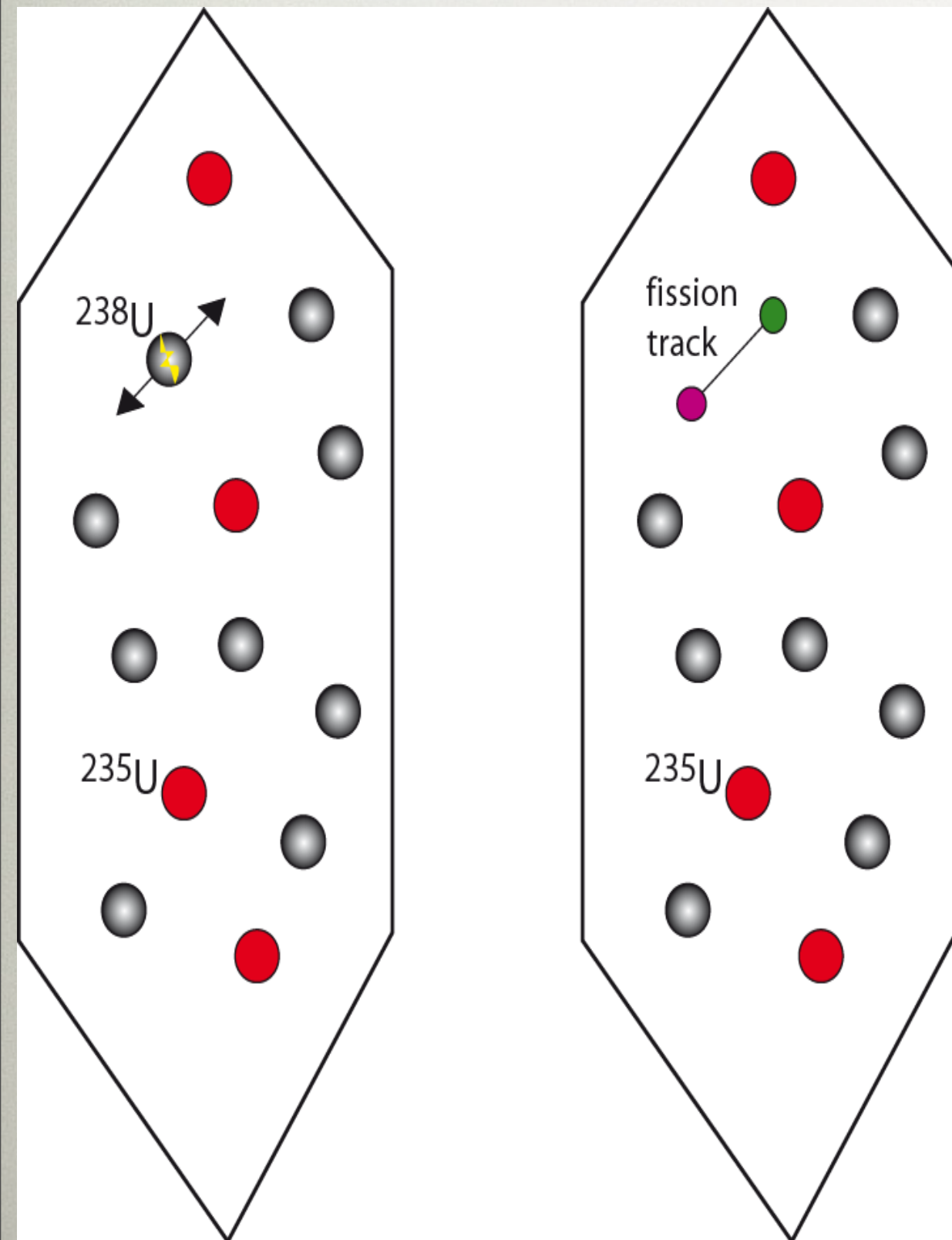
LE SYSTÈME TRACES DE FISSION

TRACES DE FISSION



- Minéraux utilisés :
 - Apatites
 - Zircons
 - Sphenes

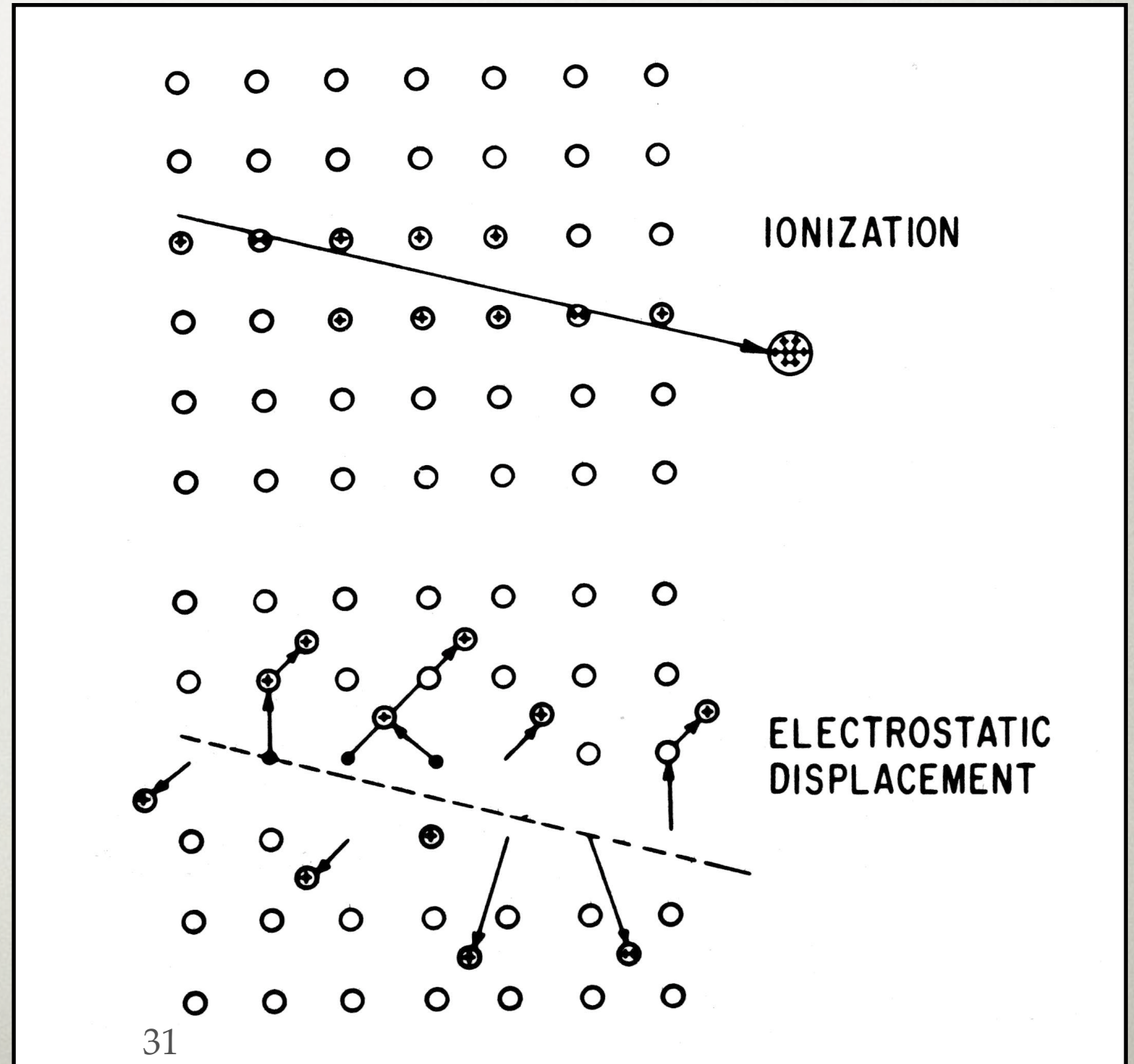
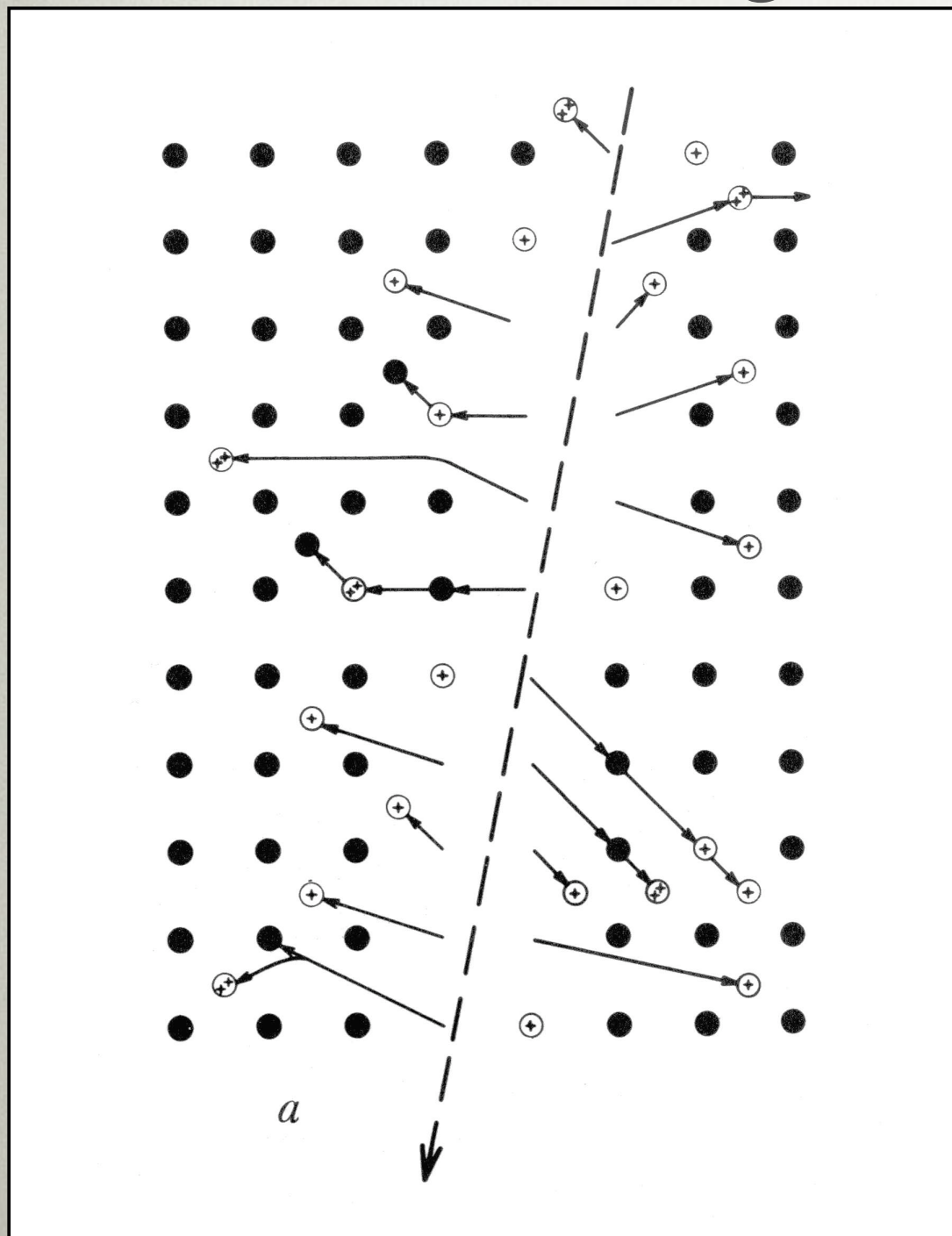
TRACES DE FISSION



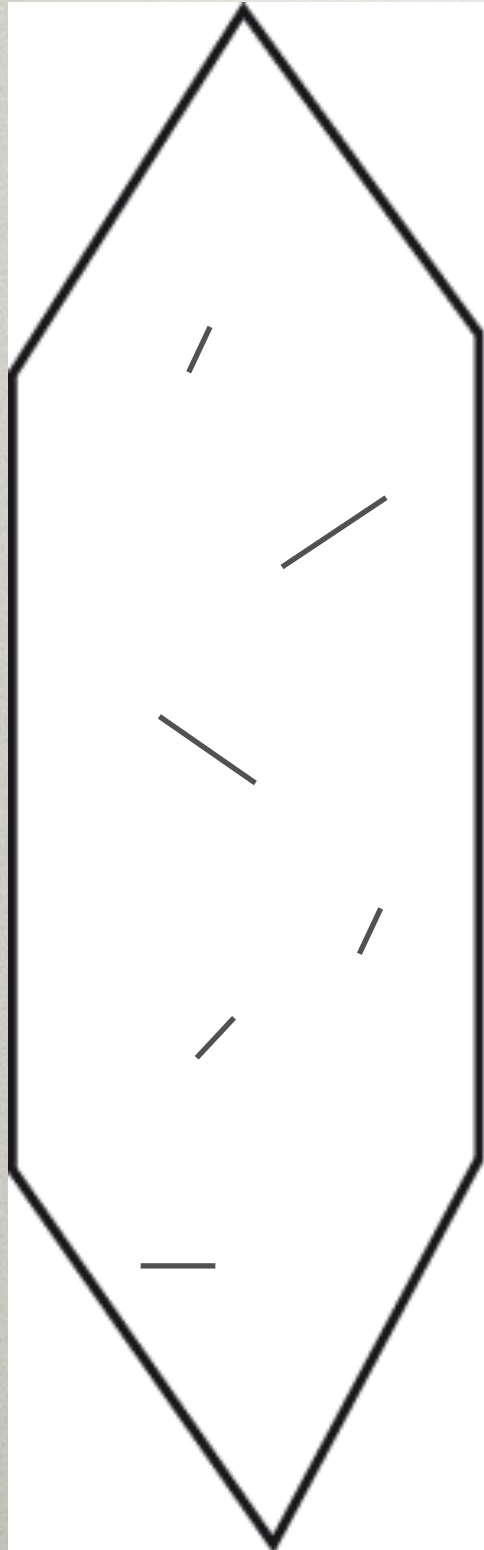
- Formé par fission spontanée de l' ^{238}U

TRACES DE FISSION

- Dommages dans la structure cristalline



TRACES DE FISSION



- Formation de traces :
 - Fonction linéaire du temps ($t_{1/2}$ pour la fission spontanée $^{238}\text{U} \sim 9 \text{ E}15$ an)
 - Age déterminé par la densité de traces et la $[\text{U}]$

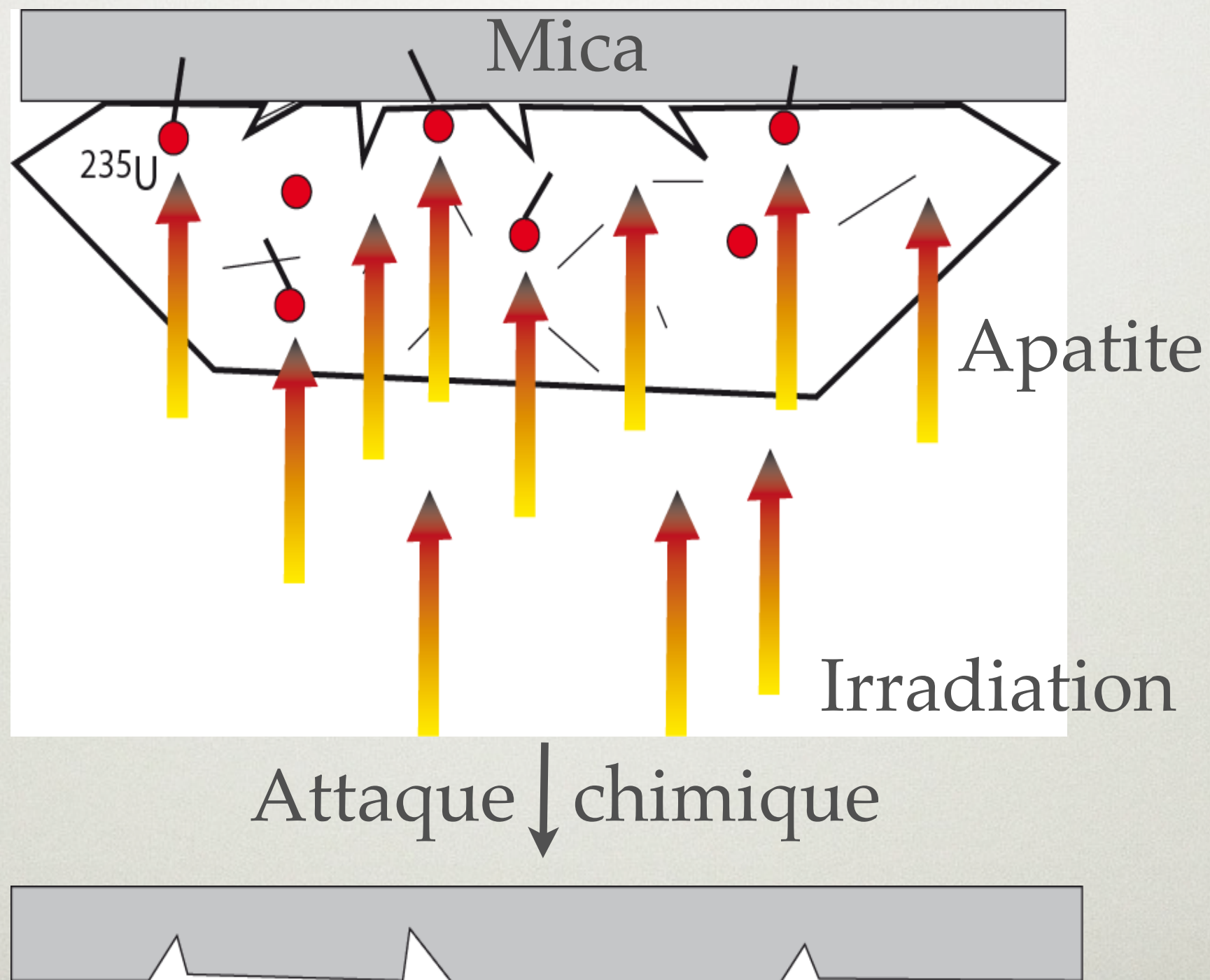
TRACES DE FISSION



- Observable au microscope optique après attaque chimique contrôlée (T, concentration, temps)

MÉTHODE DU DÉTECTEUR EXTERNE

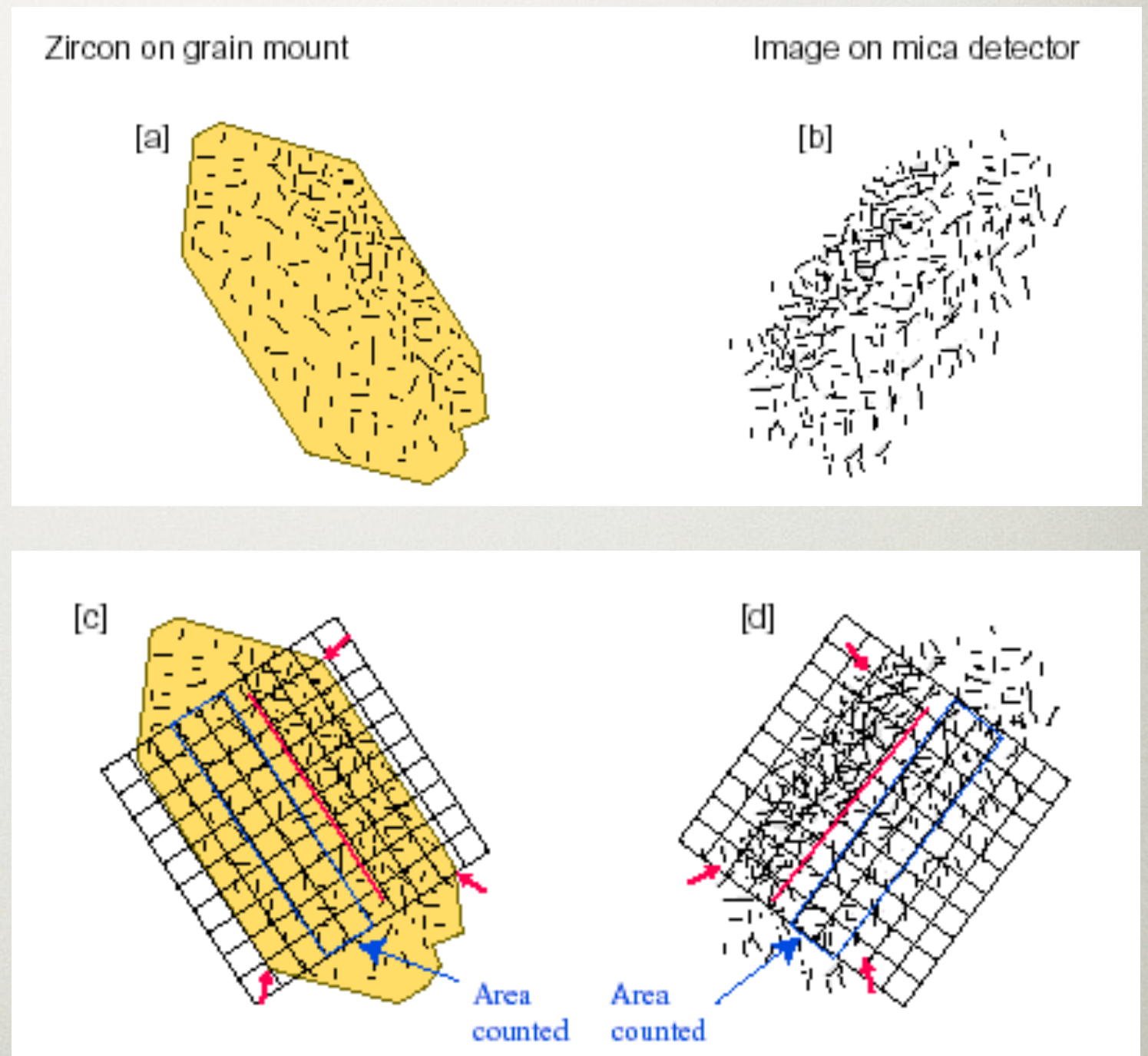
Traces
induites



METHODE DU DETECTEUR EXTERNE

- Comptage traces spontannées (grains) : ρ_s

- Comptage traces induites (mica) : ρ_i



MÉTHODE DU DÉTECTEUR EXTERNE

- Age traces de fission :
$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{\lambda \phi \sigma c I \rho_s}{\lambda_f \rho_i} \right]$$

λ Constante de désintégration totale du ^{238}U

λ_f Constante de désintégration par fission

ϕ Flux neutronique (fluence)

σ Section de capture neutronique

c Constante de géométrie

I Ratio $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$

ρ_s, ρ_i Densités de traces spontanées et induites

MÉTHODE DU DÉTECTEUR EXTERNE

- Age traces de fission : $t = \frac{1}{\lambda} \ln \left[1 + \frac{\lambda \zeta \rho_s c \rho_d}{\rho_i} \right]$
- Facteur de calibration : $\zeta = \frac{\phi \sigma I}{\lambda_f \rho_d}$

λ Constante de désintégration totale du ^{238}U

λ_f Constante de désintégration par fission

ϕ Flux neutronique (fluence)

σ Section de capture neutronique

c Constante de géométrie

I Ratio $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U}$

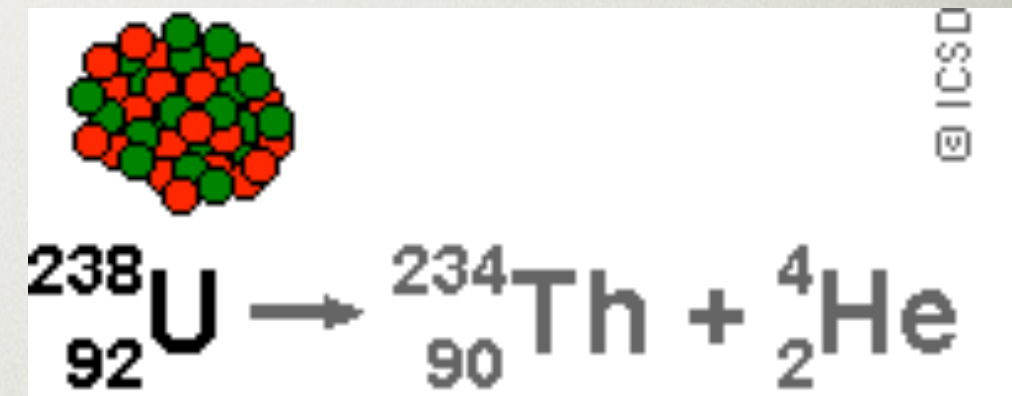
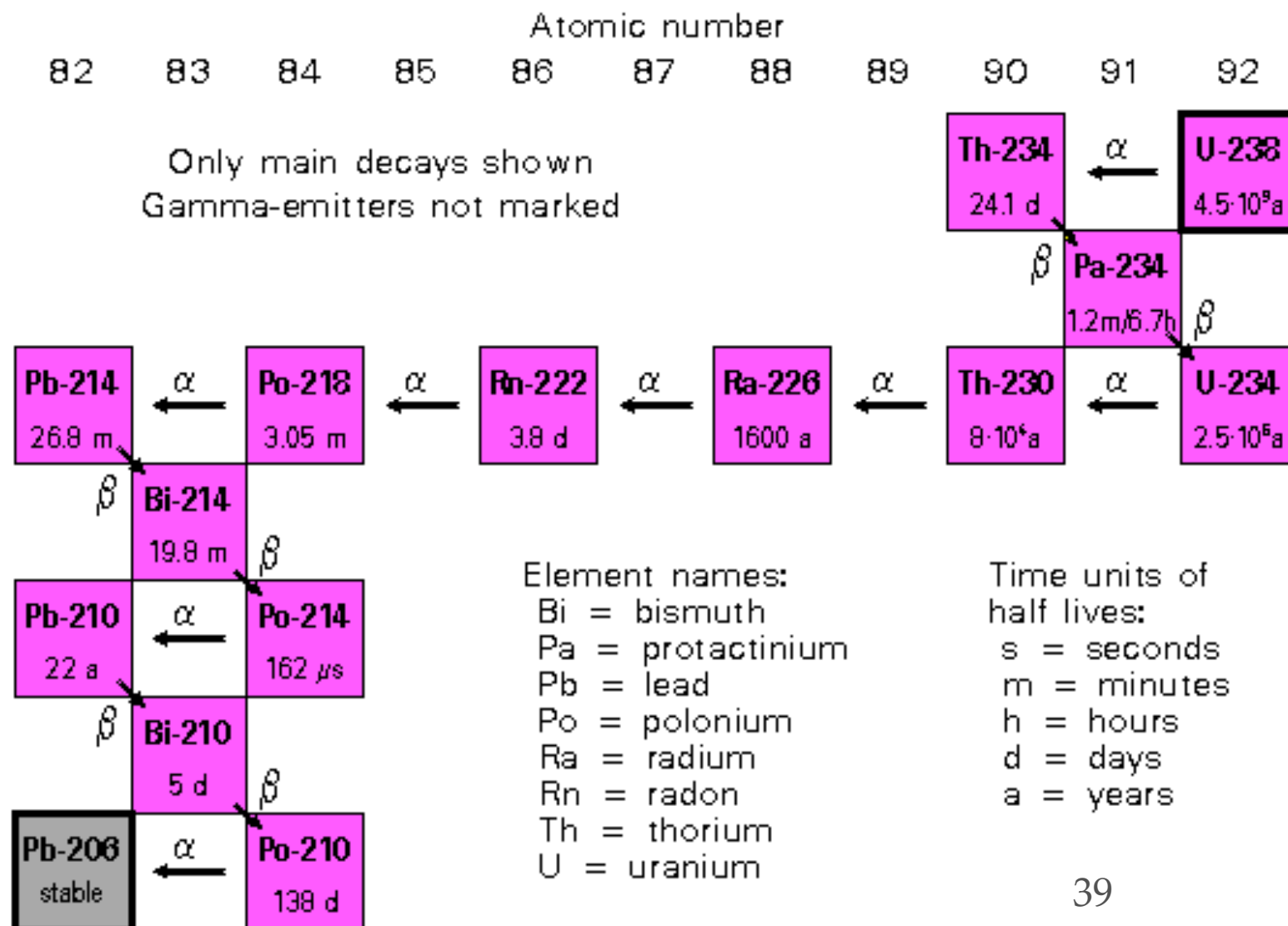
ρ_s, ρ_i Densités de traces spontanées et induites

LE SYSTÈME (U-TH)/HE

THERMOCHRONOLOGIE

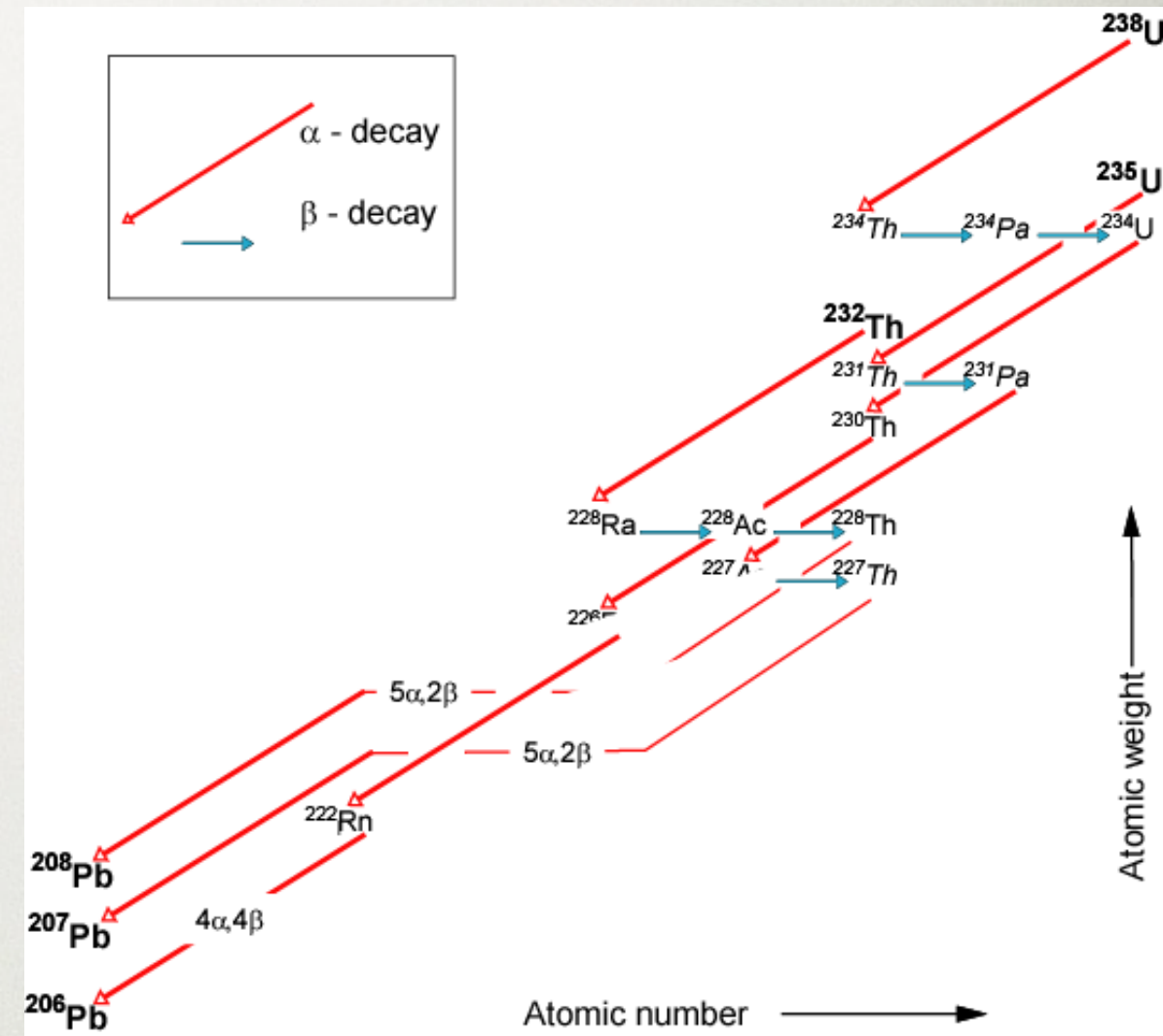
- Série de décroissance radioactive de U et Th --> 4He (particule α)
- 8 émissions α au cours de la série décroissance

The uranium-238 decay chain



(U-Th)/He THERMOCHRONOLOGIE

Isotope	Abondance	λ (/ an)
^{238}U	99.27%	$1.55 \text{ E-}10$
^{235}U	0.72%	$9.85 \text{ E-}10$
^{234}U	0.006%	$2.83 \text{ E-}6$
^{232}Th	100%	$4.85 \text{ E-}11$



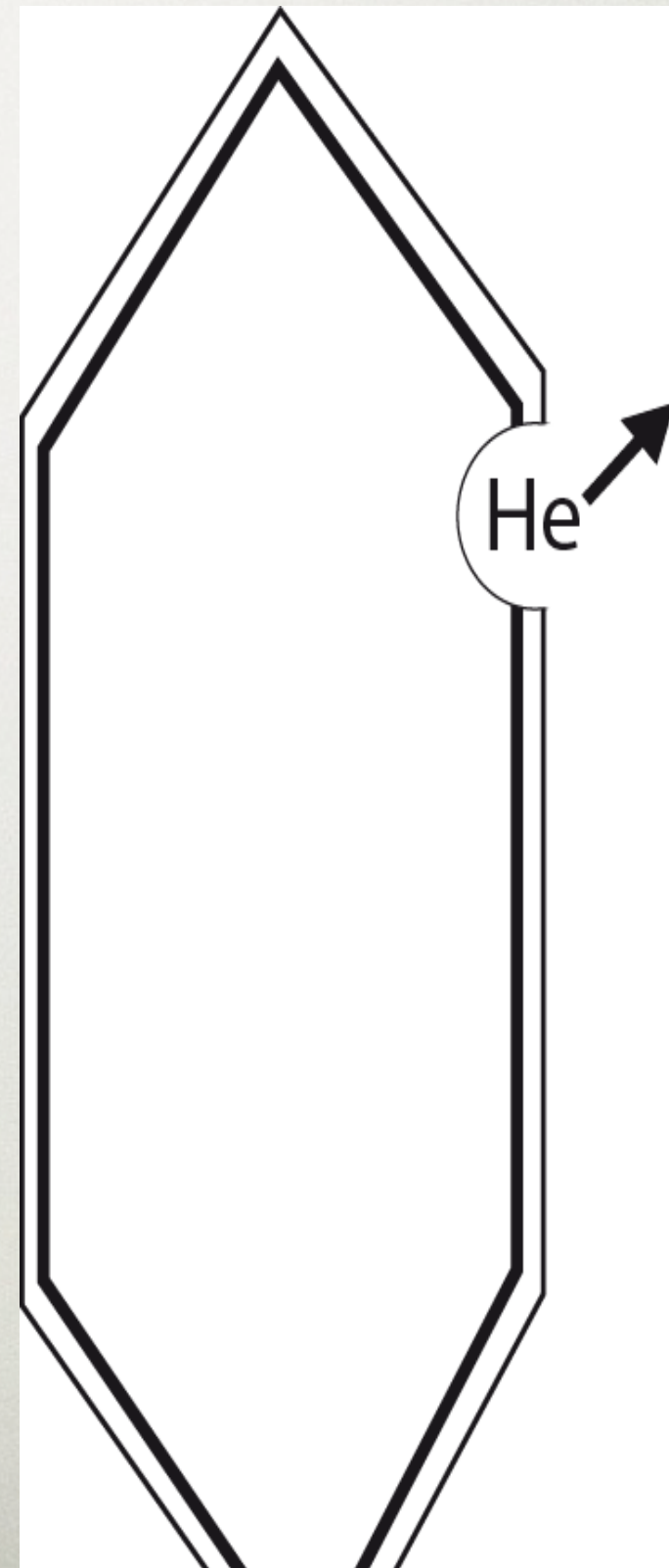
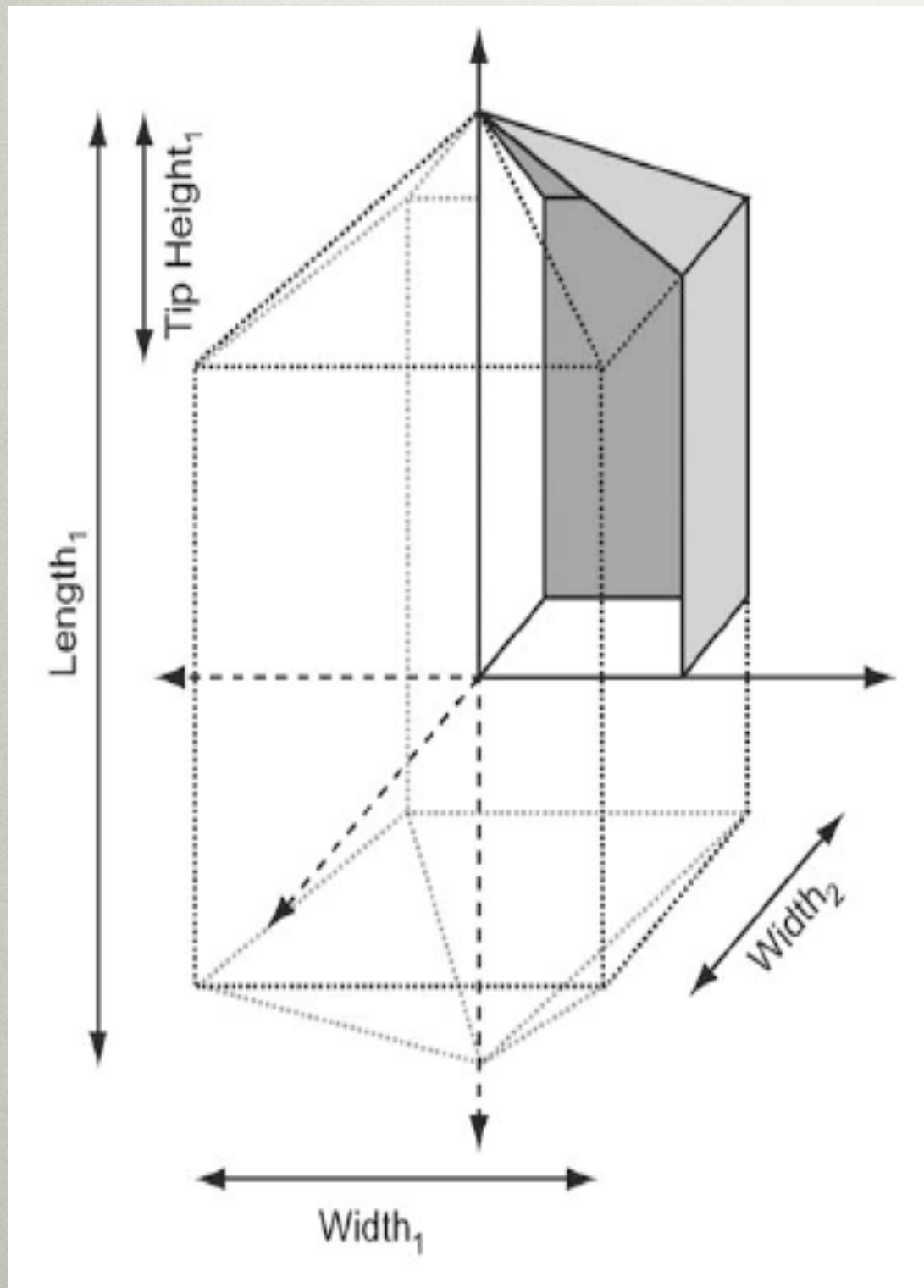
$$^4\text{He} = 8 * ^{238}\text{U}(e^{\lambda_{238}t} - 1) + 7 * \frac{^{238}\text{U}}{137.88} (e^{\lambda_{235}t} - 1) + 6 * ^{232}\text{Th}(e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

40

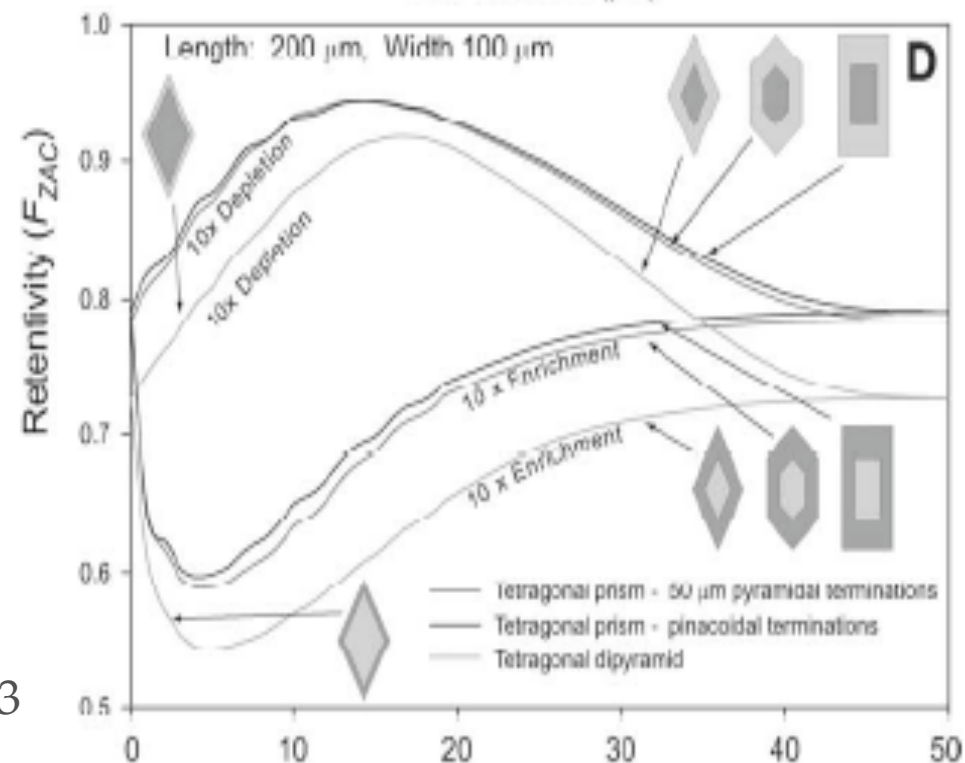
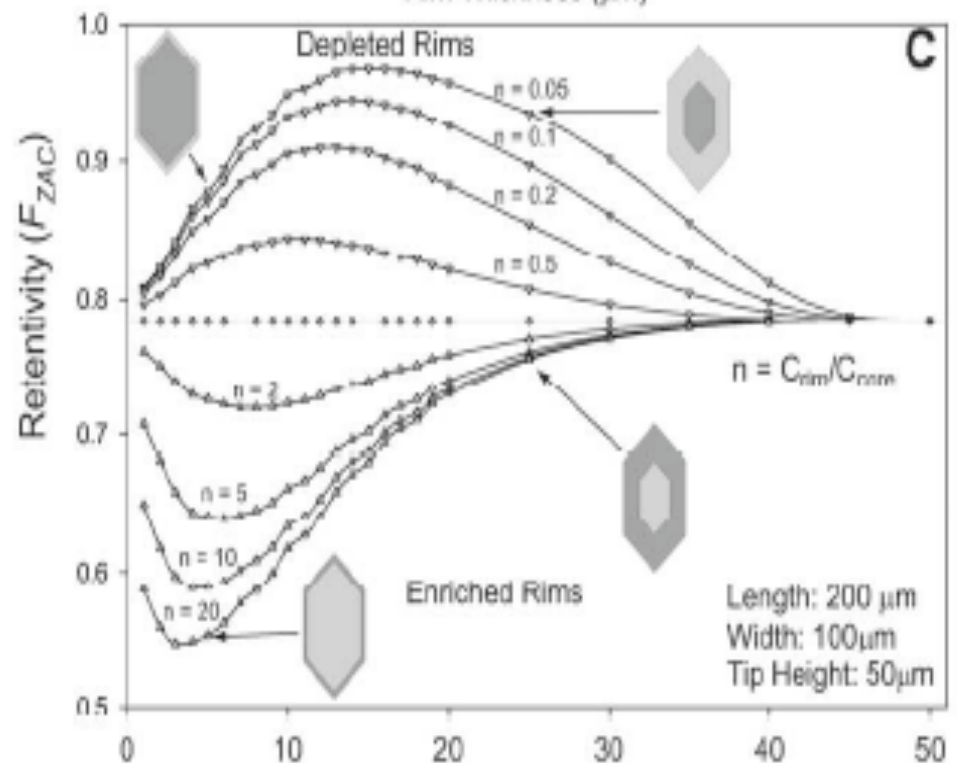
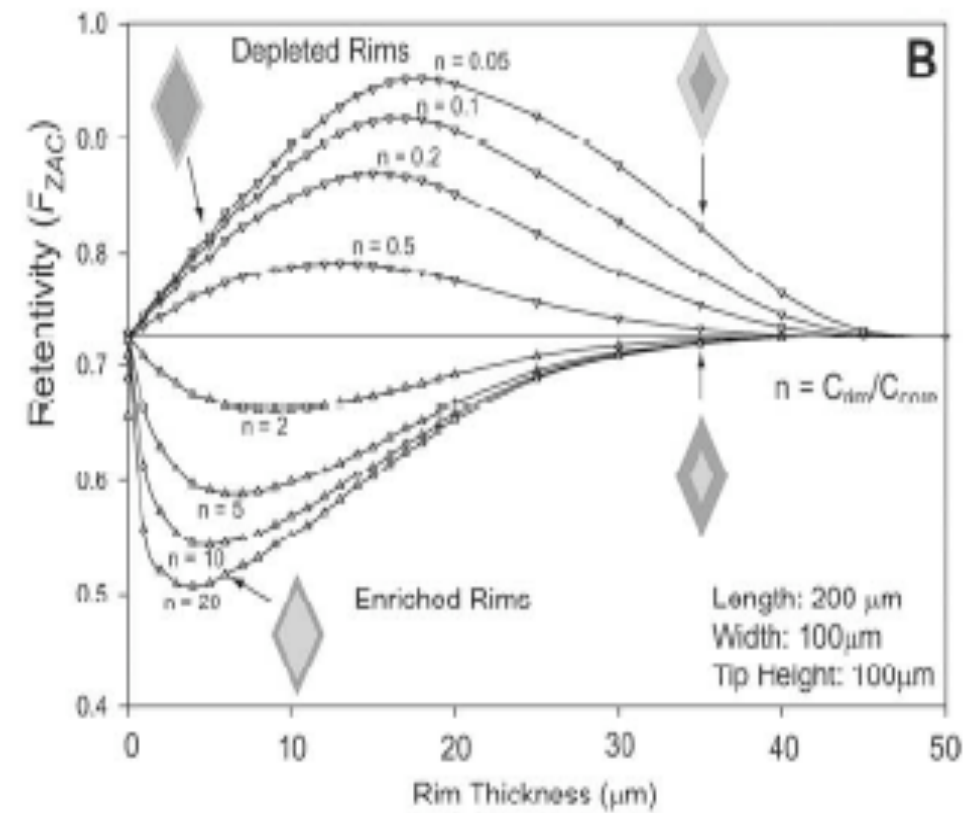
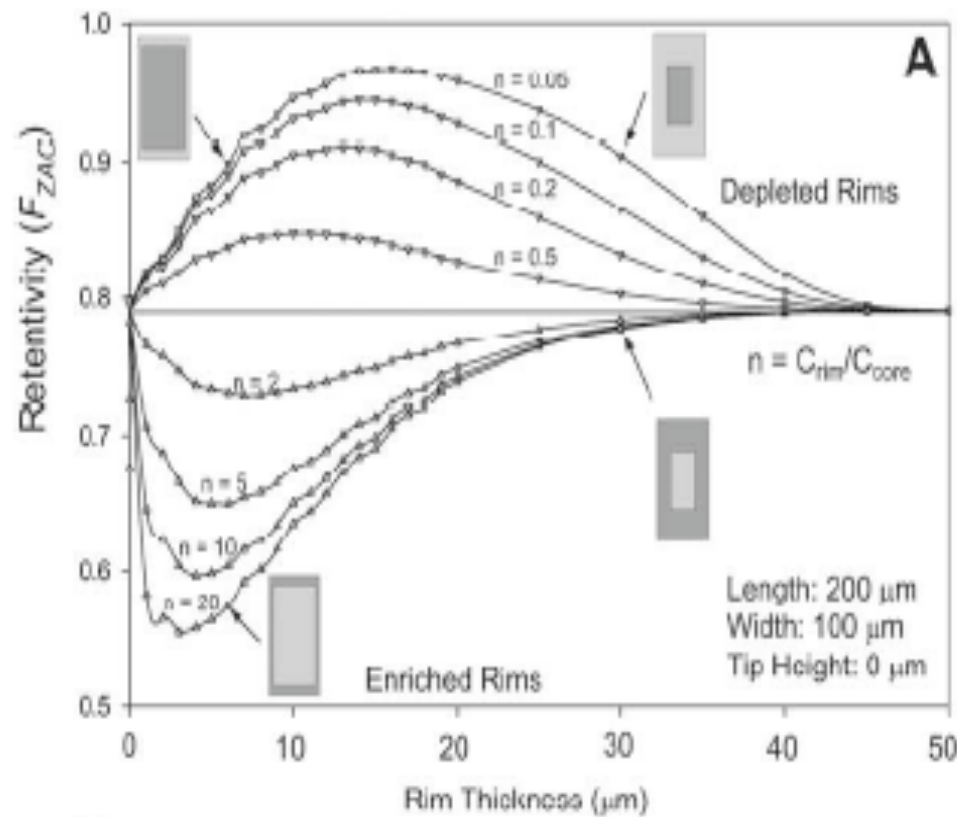
(U-Th)/He THERMOCHRONOLOGIE

- Température de fermeture effective
 - $\sim 70^{\circ}\text{C}$ (Apatites)
 - 160°C - 200°C (Zircon)
 - Dependant du taux de refroidissement et de la taille du minéral
- Mesures d' ^4He , ^{238}U et ^{232}Th
- He **diffuse** dans les apatites pour des $T > 40^{\circ}\text{C}$
- **CORRECTION** : alpha ejection

CORRECTION ALPHA POUR ZIRCONS



CORRECTION ALPHA POUR ZIRCONS



UN PEU DE QUANTIFICATION...

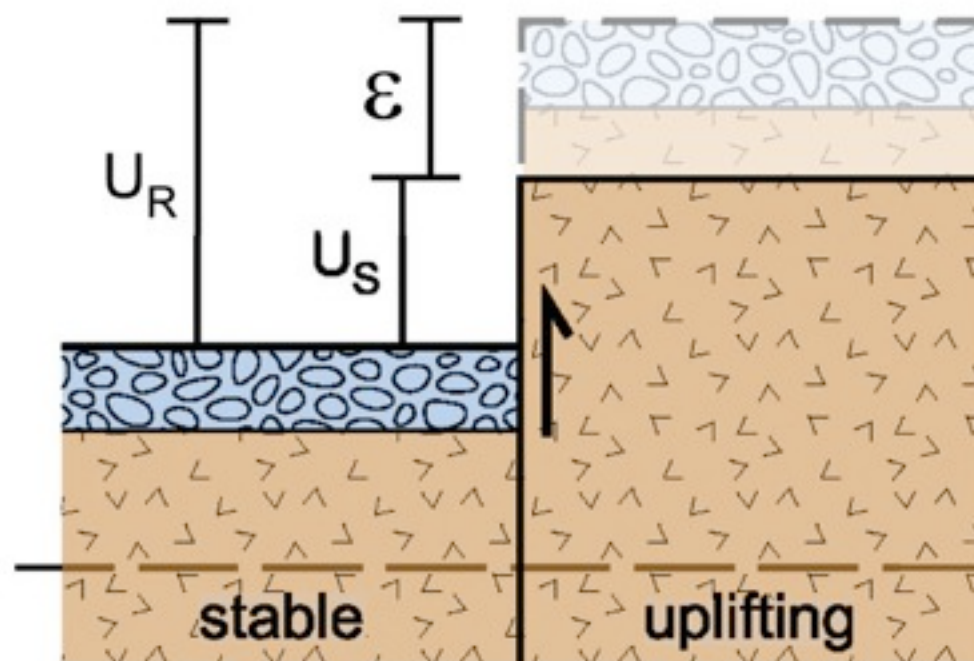
TAUX D'EXHUMATION

- Question à se poser : **Qu'est ce qu'on mesure ?**
- ==> C'est un **taux de Refroidissement !**
- ==> Interprétation en **taux d'Exhumation !**
- Ce n'est pas un **taux de soulèvement (uplift)**
- *Bien faire la différence entre exhumation, surface uplift, rock uplift !*

TAUX D'EXHUMATION

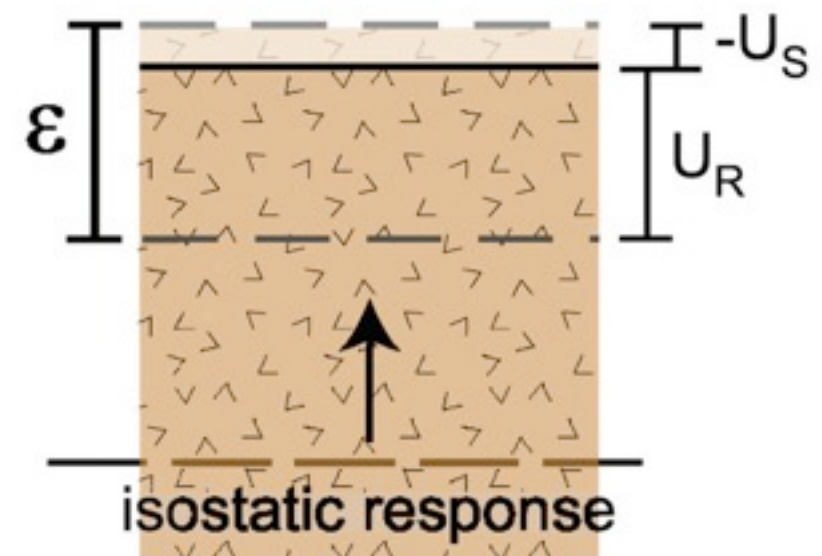
A

"active" rock uplift



B

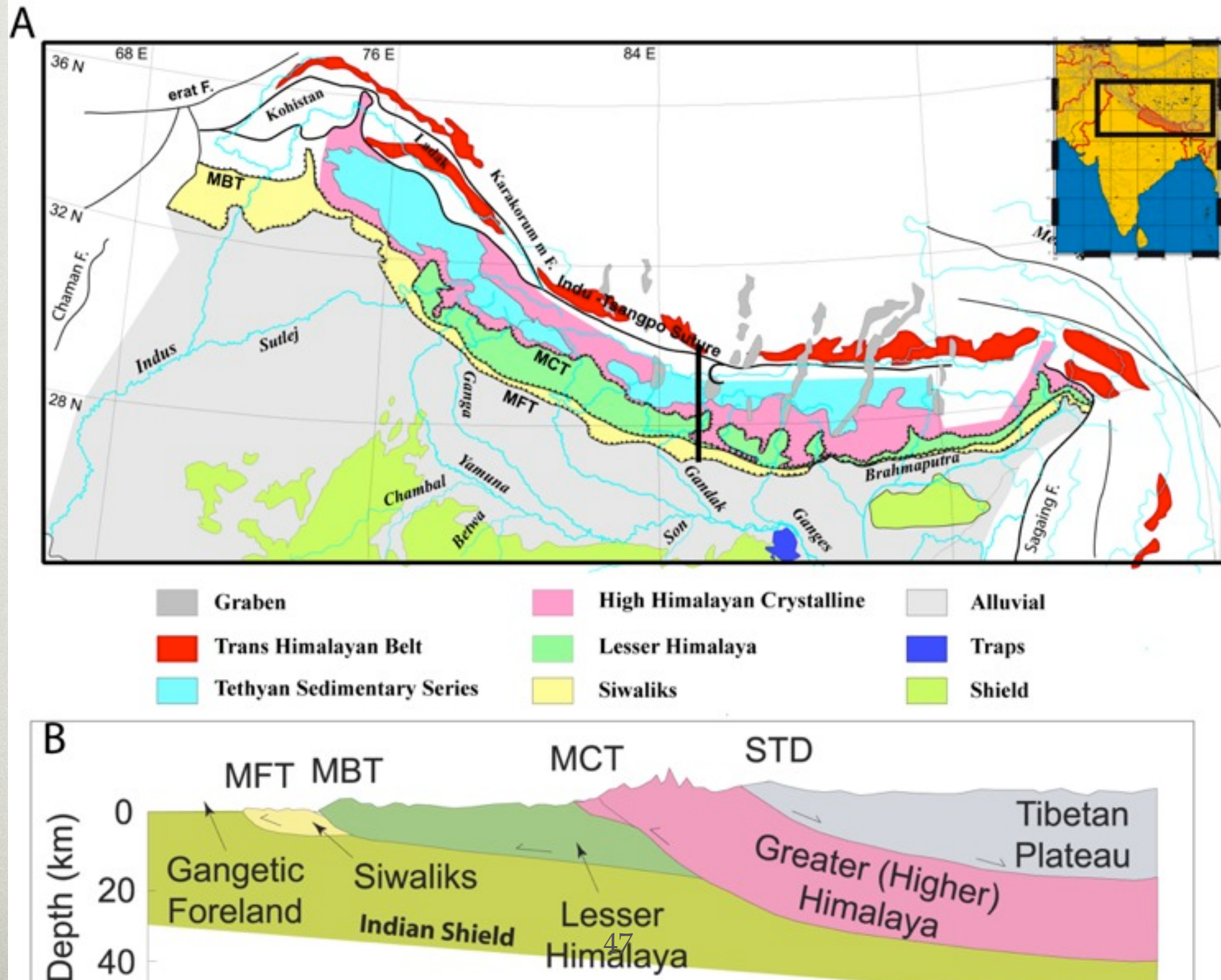
"passive" rock uplift



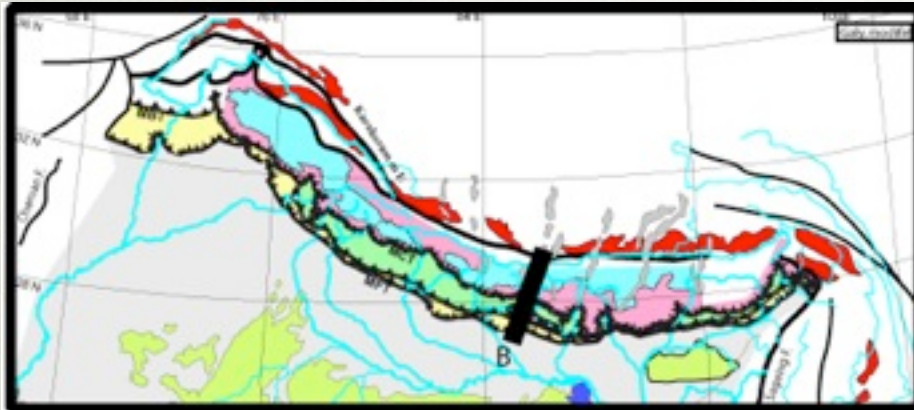
Pederson, 2002

- U_r = rock uplift
- U_s = surface uplift
- ϵ = exhumation

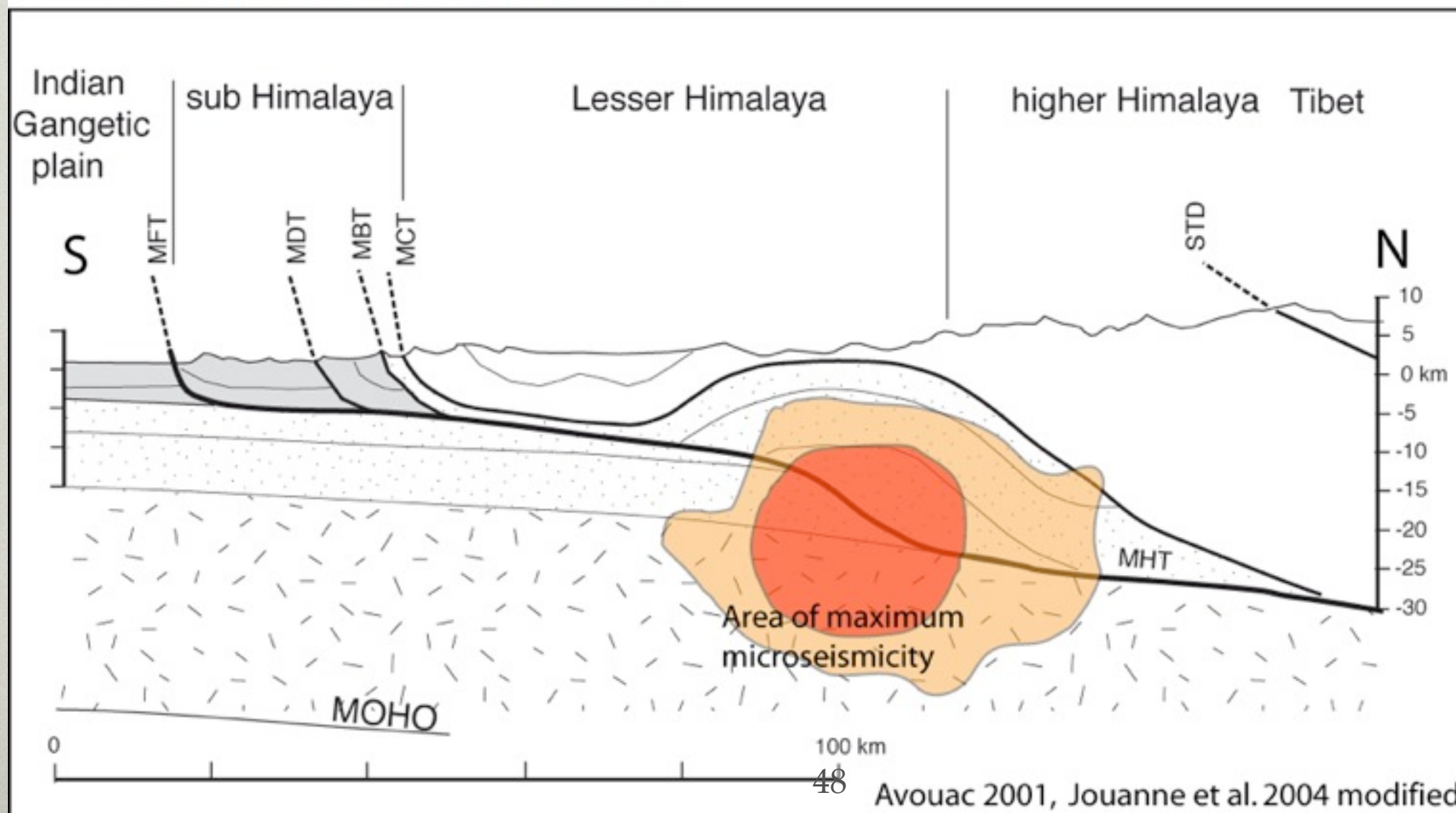
EXAMPLE 1 : HIMALAYA



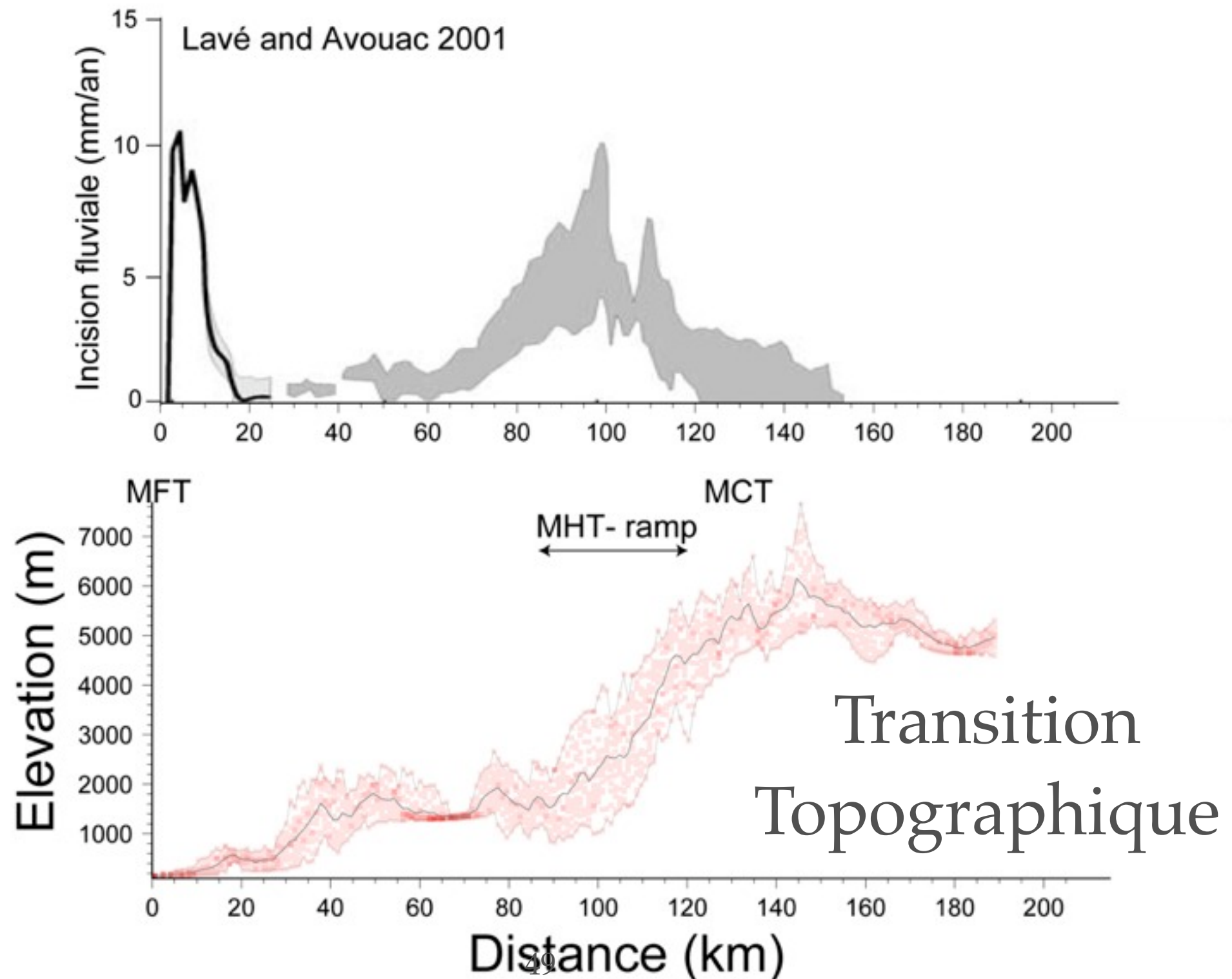
EXAMPLE 1 : HIMALAYA



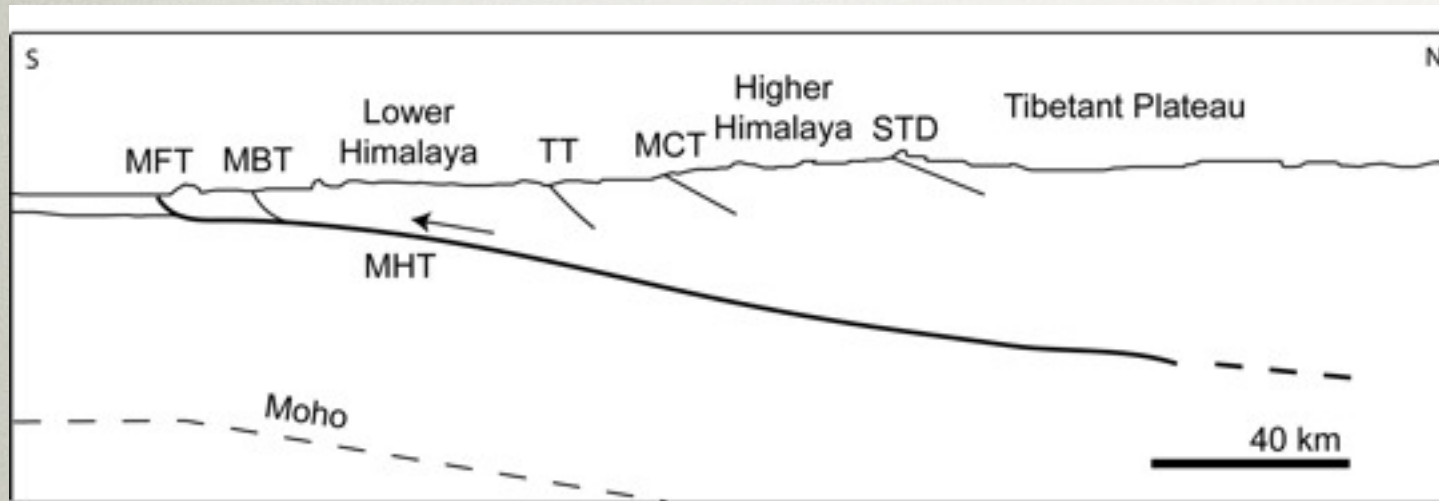
Népal central



EXAMPLE 1 : HIMALAYA, COUPE TOPO

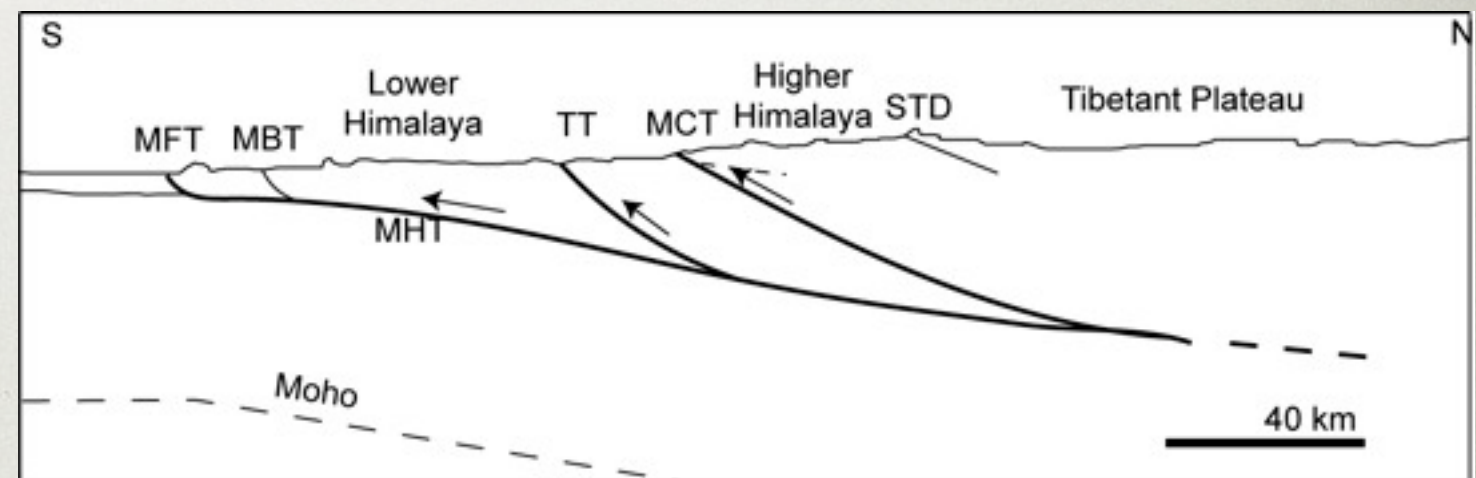


EXEMPLE 1 : HIMALAYA, 2 MODÈLES



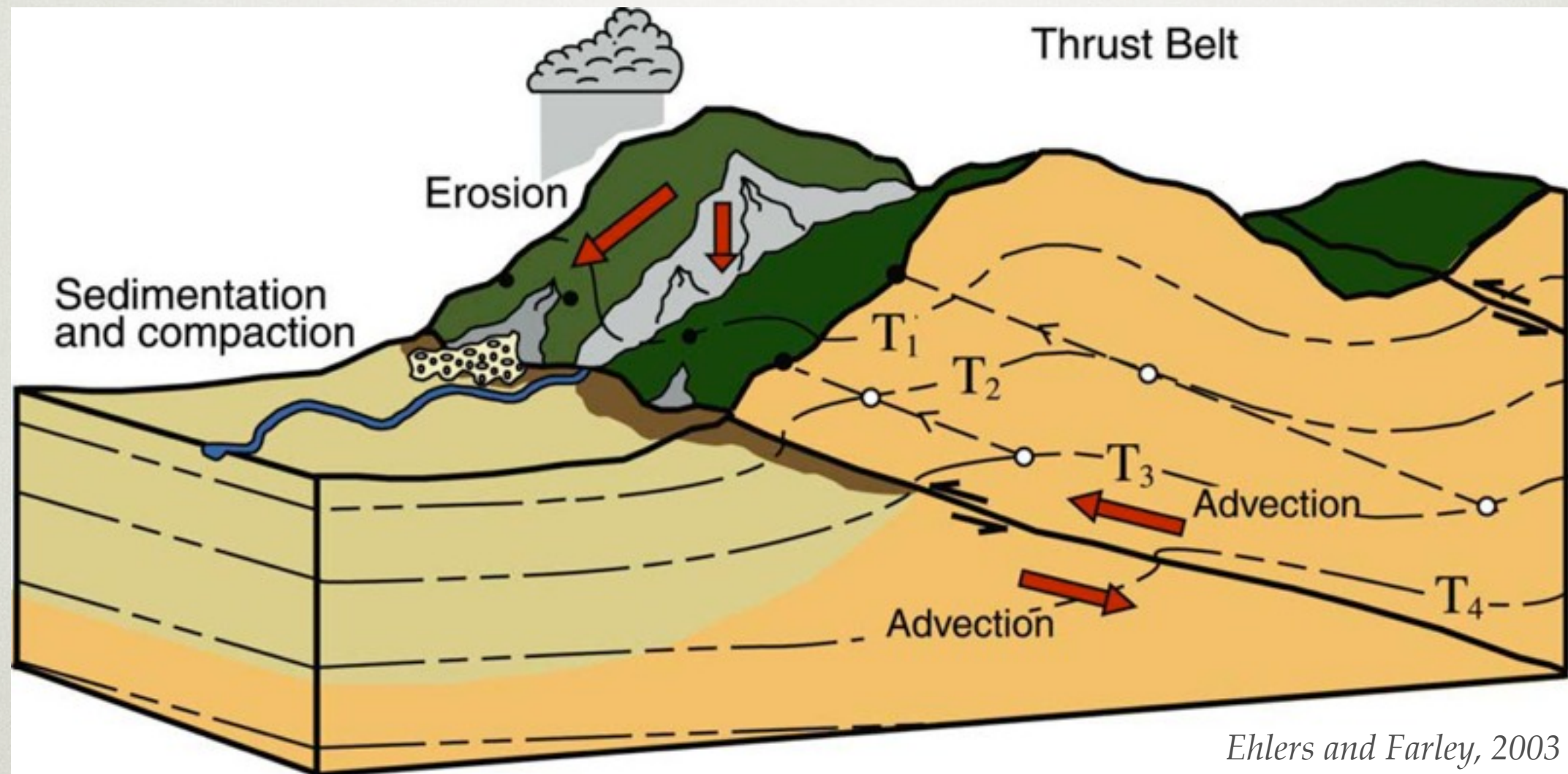
Chevauchement frontal actif (Lave and Avouac, 2001)

Réactivation hors séquence (Hodges et al., 2004)



- Quelle dynamique ?

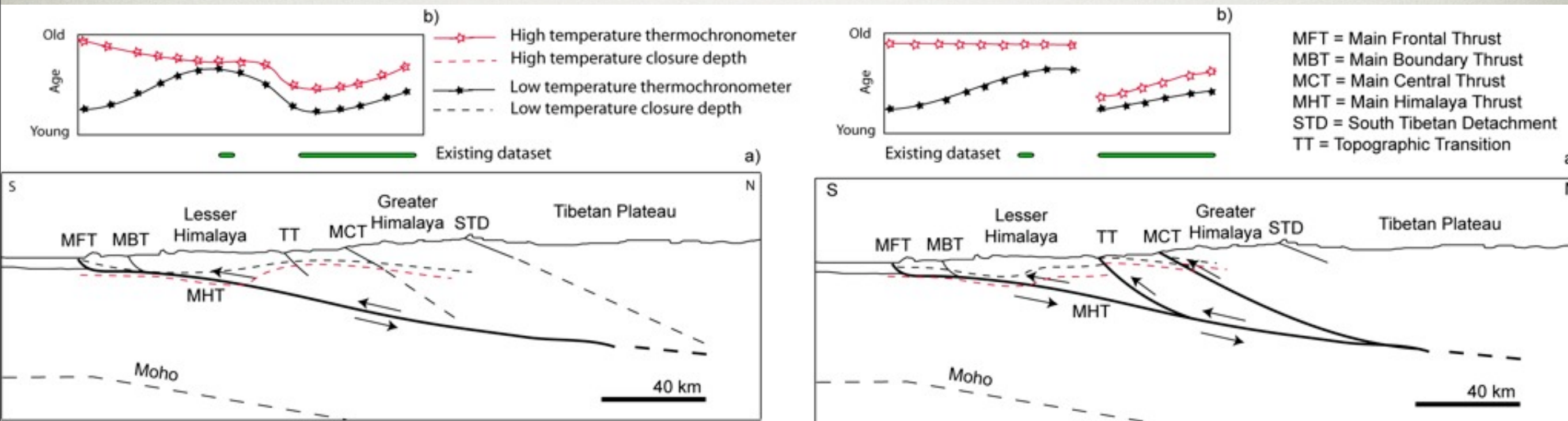
EXAMPLE 1 : HIMALAYA



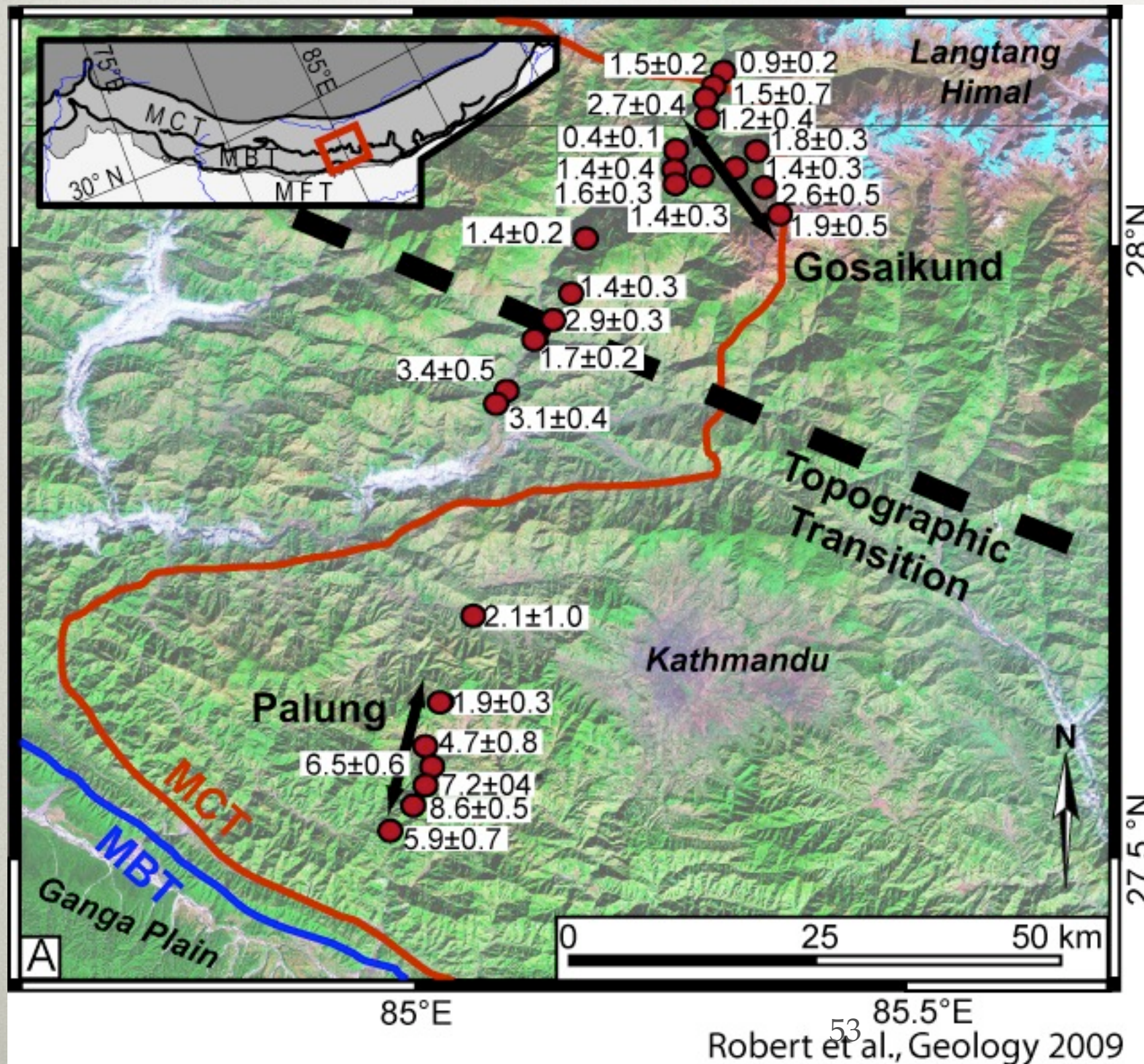
- Trajets Pression- T- Temps

EXAMPLE 1 : HIMALAYA

- Comment résoudre le problème ?

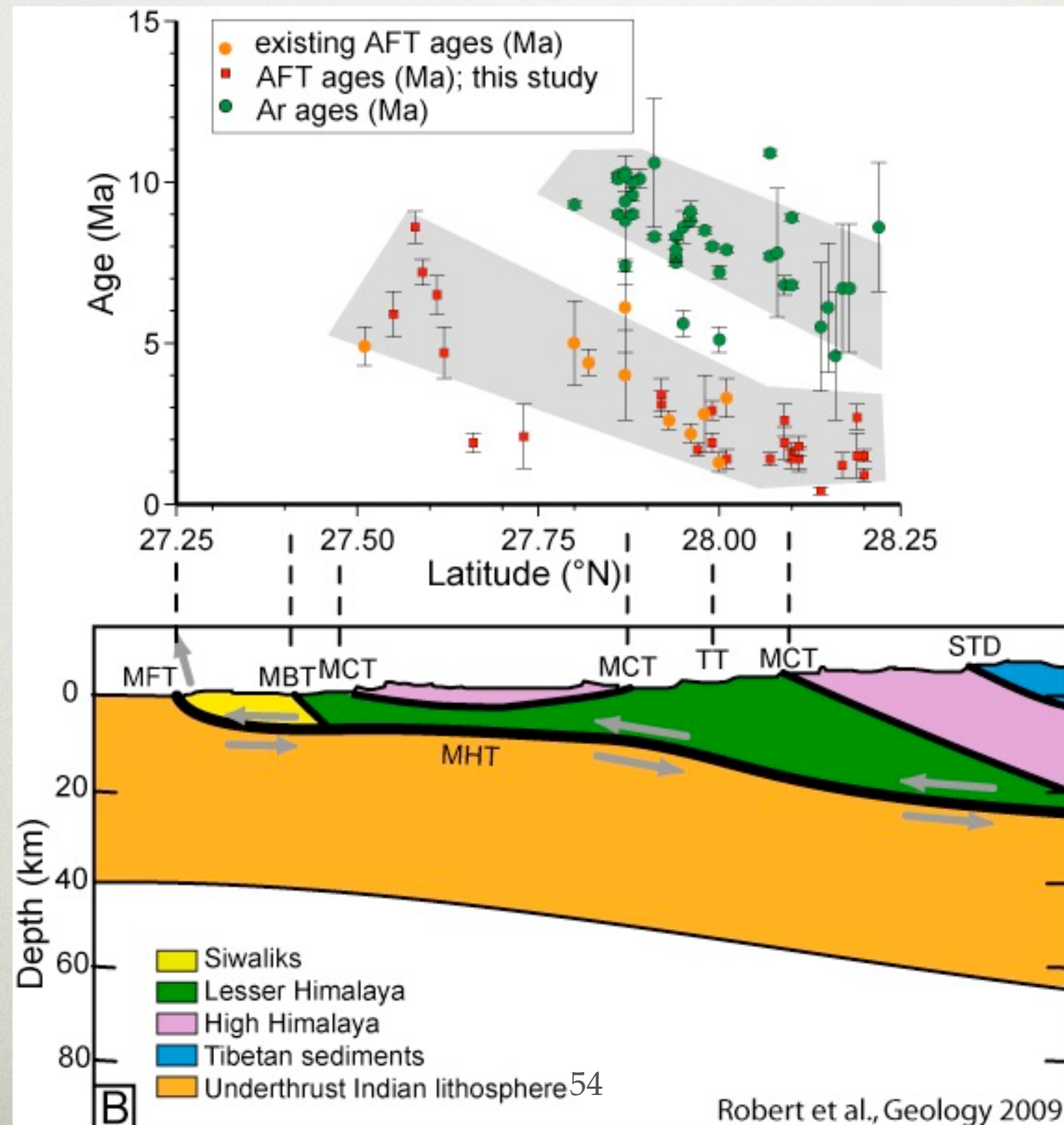


EXAMPLE 1 : HIMALAYA, DONNÉES

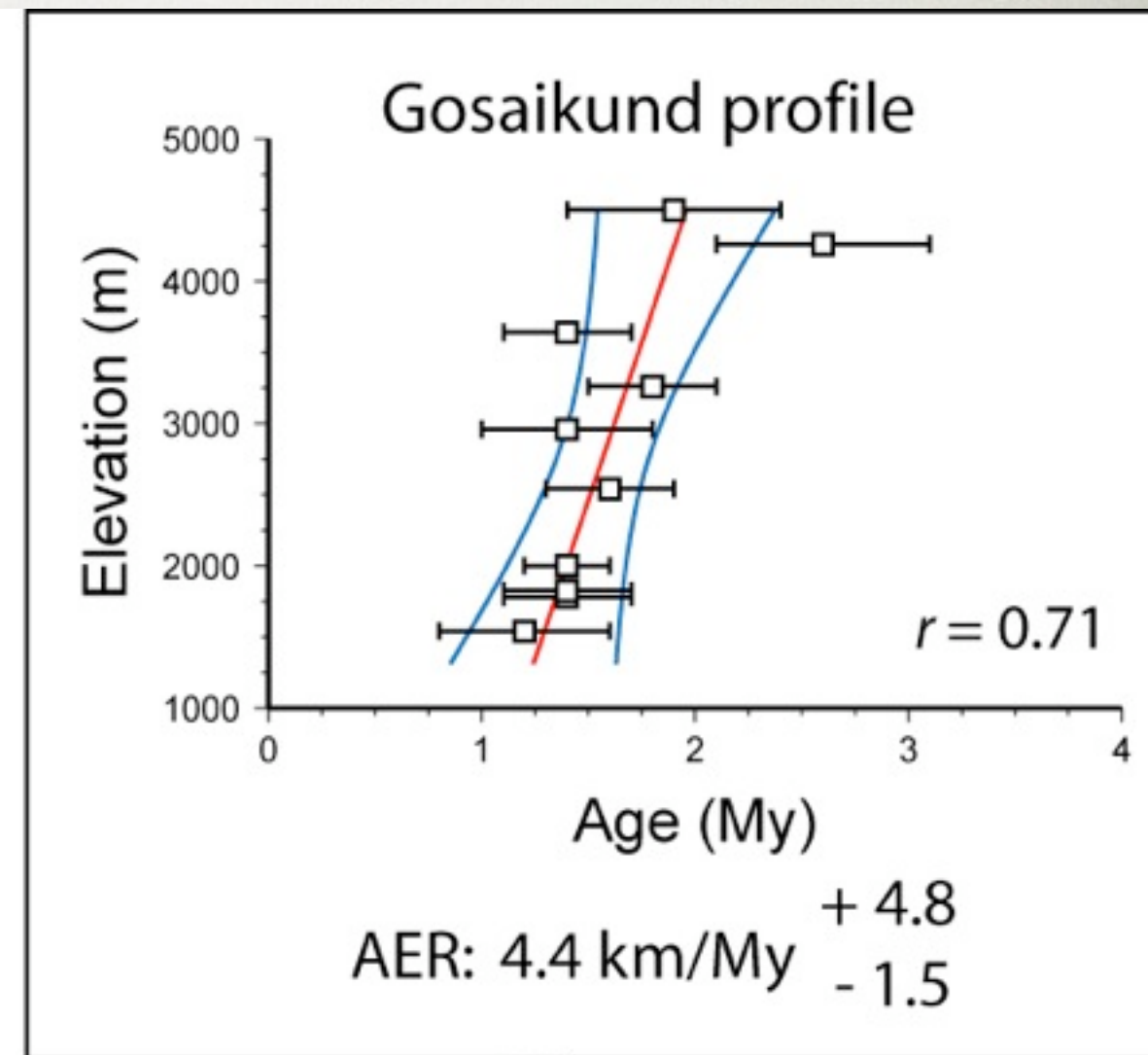
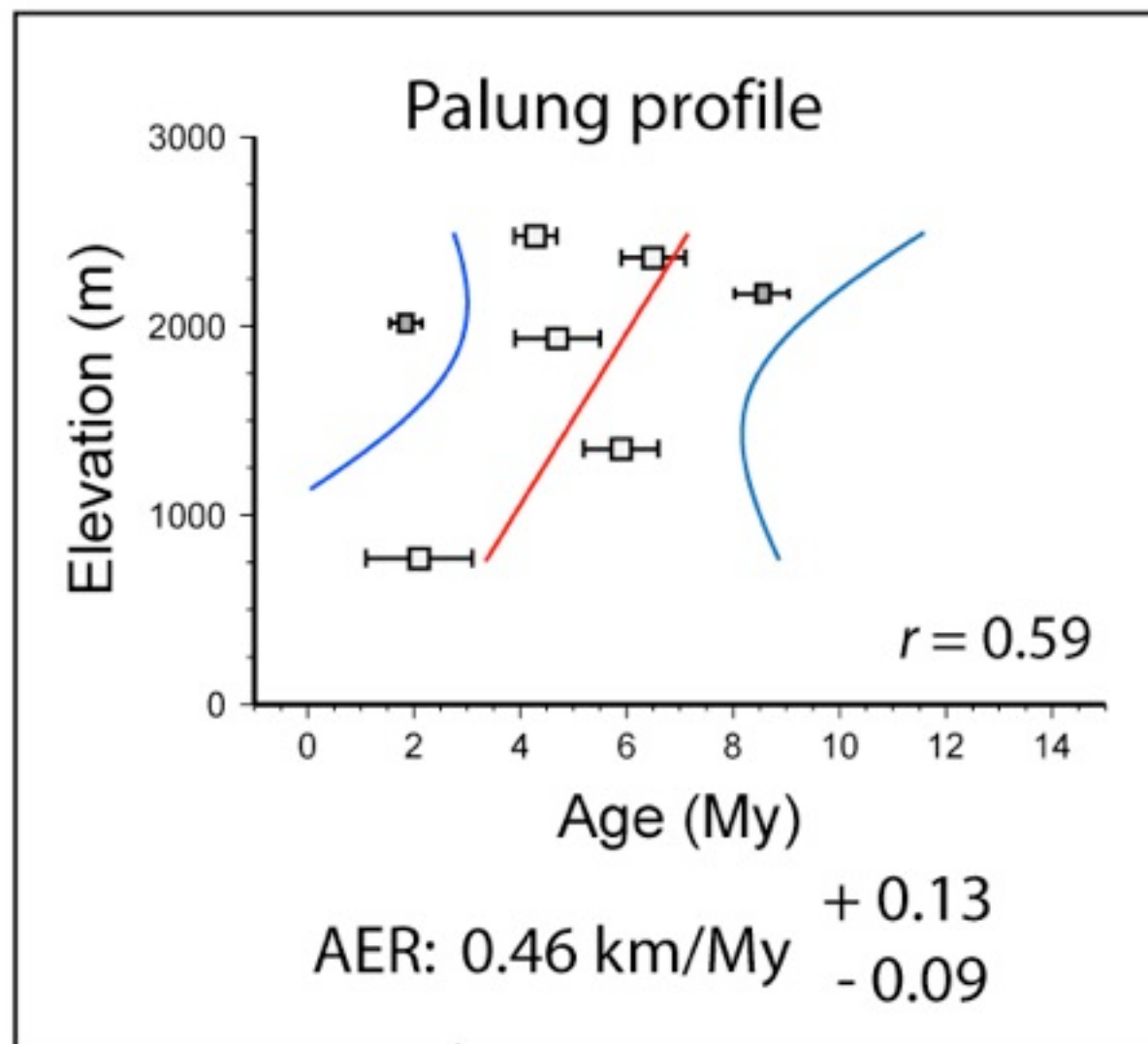


- N : <2Ma
- S : > 2Ma
- 2 profils âges / altitude

EXAMPLE 1 : HIMALAYA

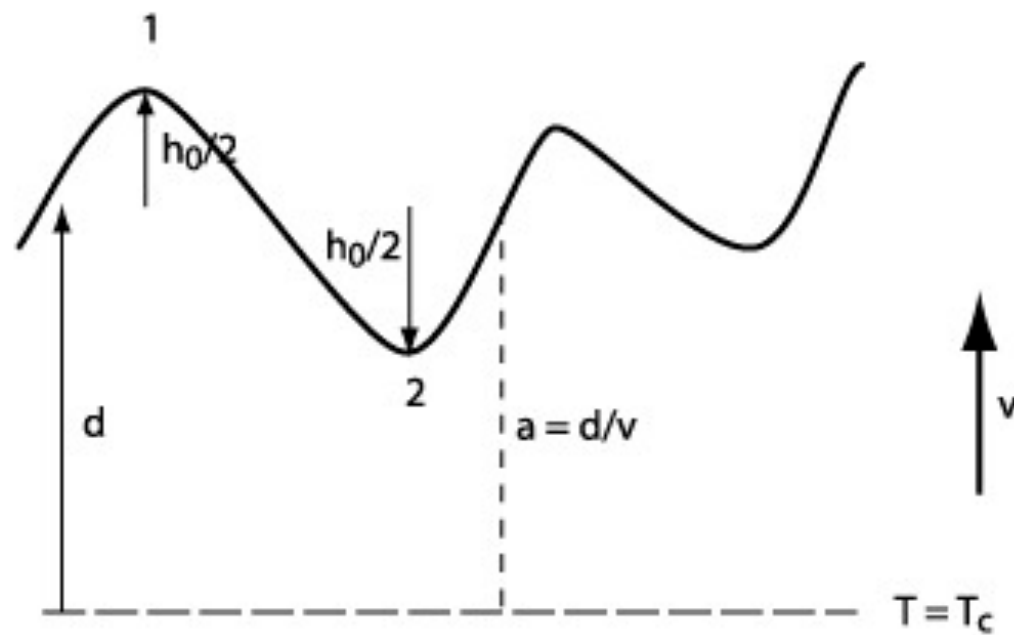


EXAMPLE 1 : HIMALAYA, PROFIL VERTICAL



EXAMPLE 1 : HIMALAYA, PROFIL VERTICAL

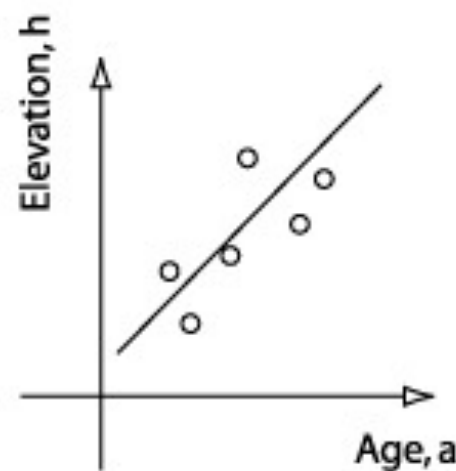
(a) High T_c thermochronometers



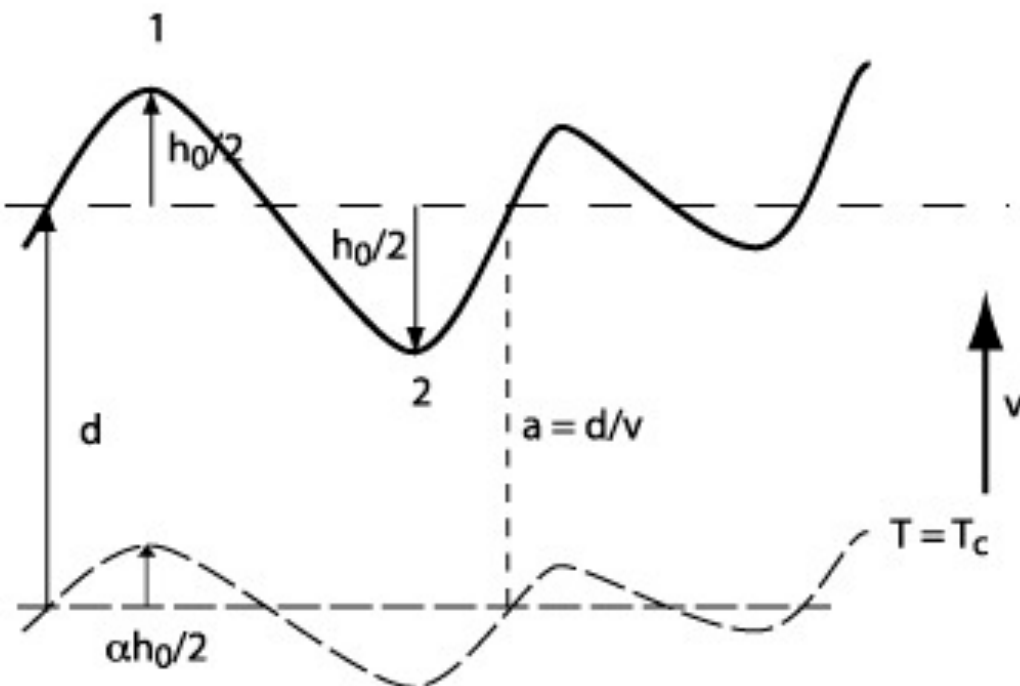
$$\frac{dh}{da} \sim \frac{h_0}{(a_1 - a_2)}$$

$$a_1 = a + h_0/2/v \quad \& \quad a_2 = a - h_0/2/v$$

hence, **$dh/da = v$**



(b) Low T_c thermochronometry

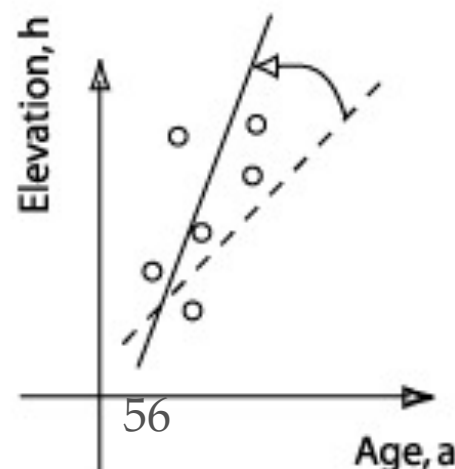


$$\frac{dh}{da} \sim \frac{h_0}{(a_1 - a_2)}$$

$$a_1 = a + h_0(1 - \alpha)/2/v$$

$$a_2 = a - h_0(1 - \alpha)/2/v$$

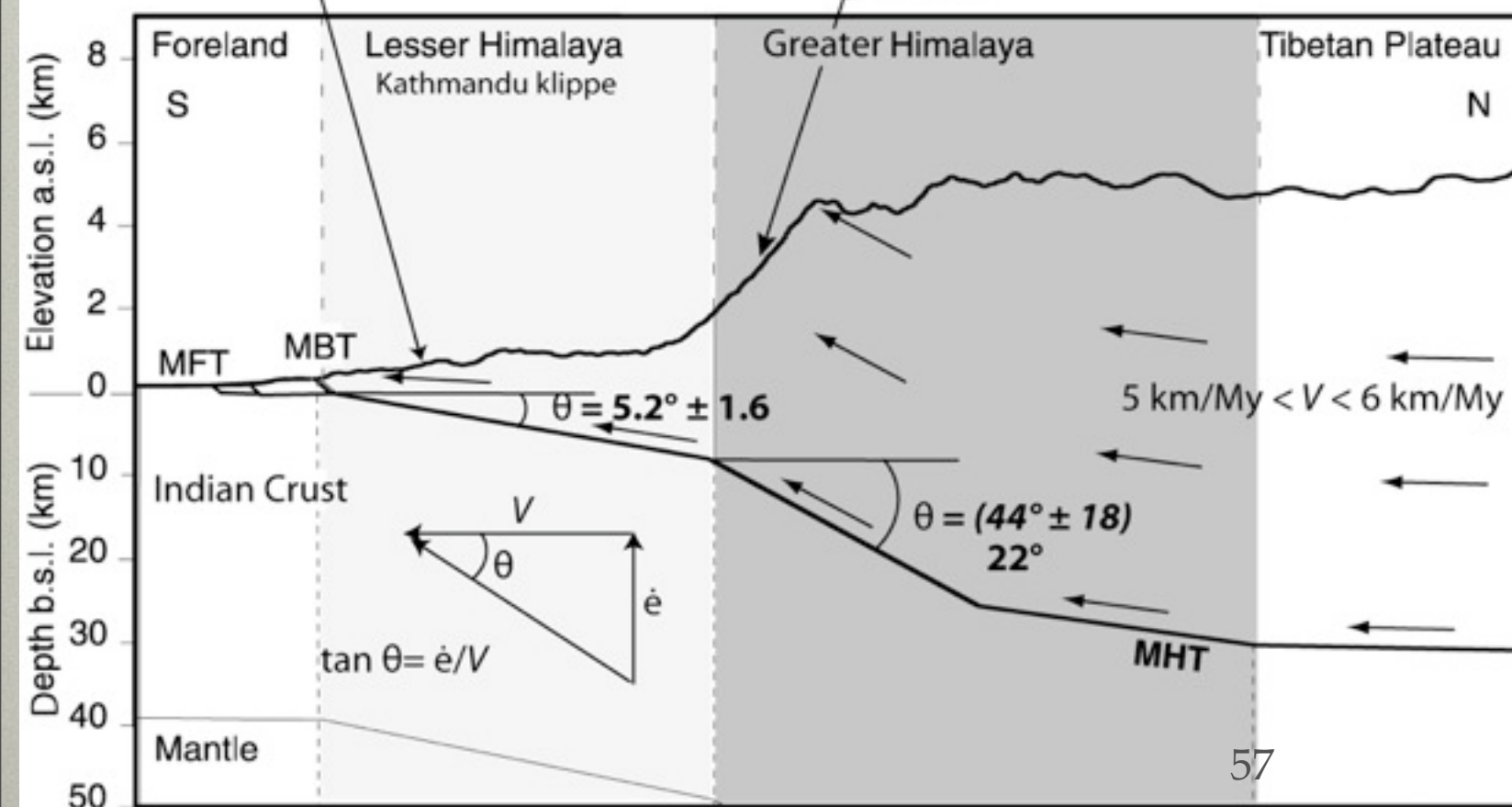
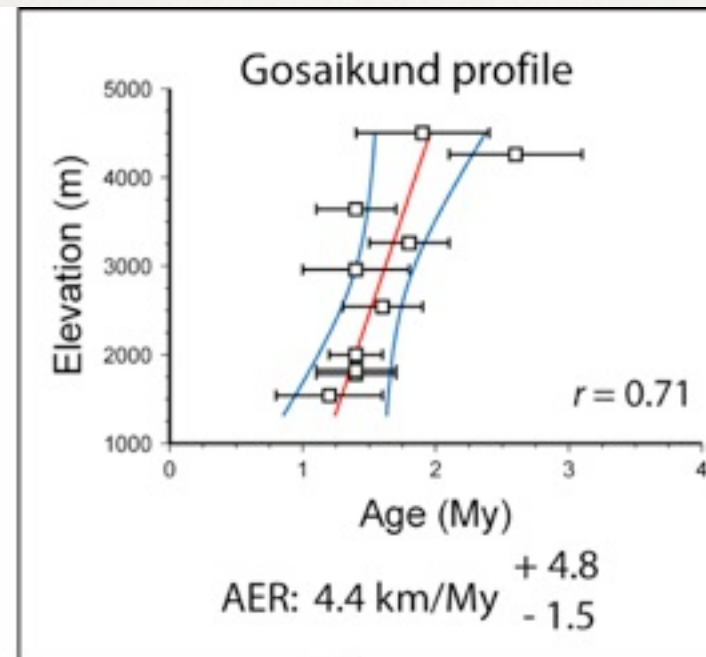
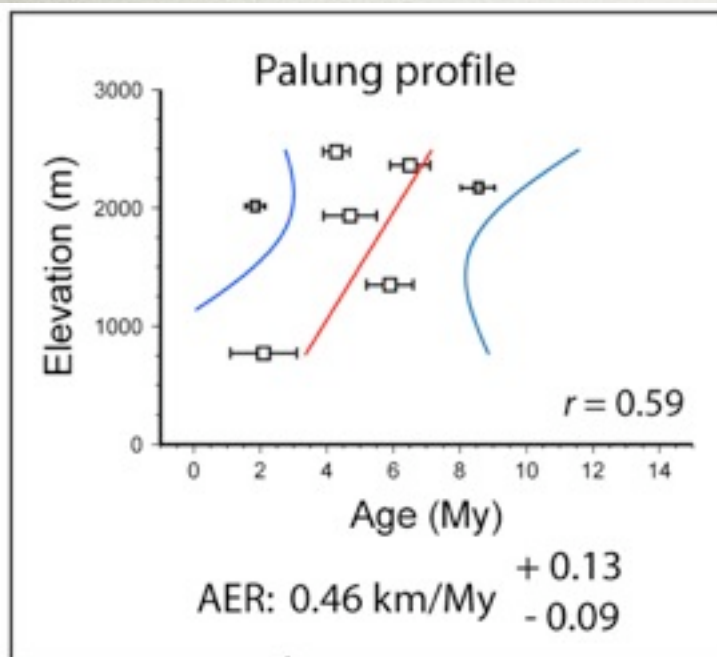
hence, **$dh/da = v/(1 - \alpha)$**



- Profil vertical --> Exhumation
- relief important --> Surestimation !
- ==> Corrections

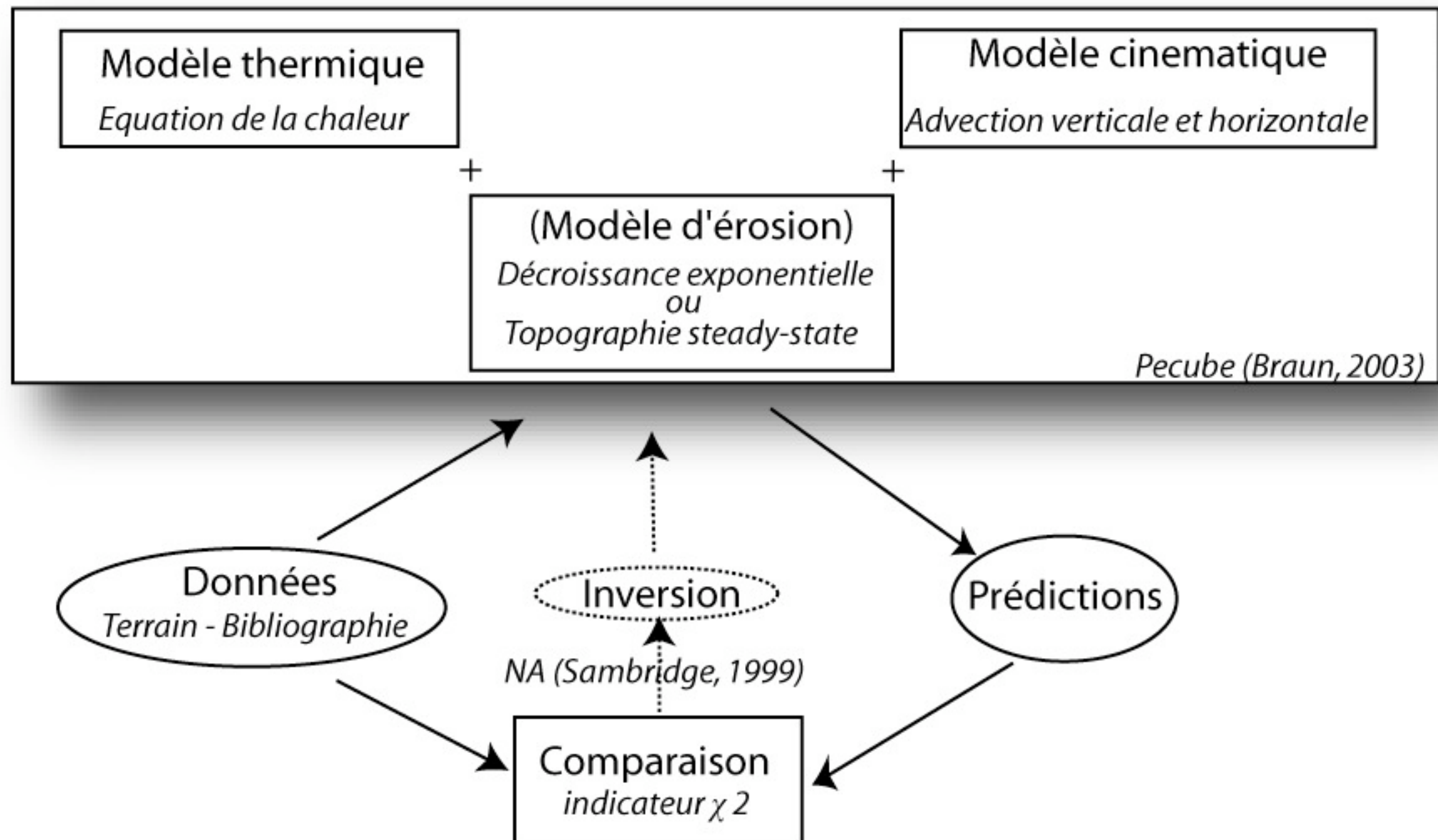
Braun, 2002

EXAMPLE 1 : HIMALAYA, PROFIL VERTICAL



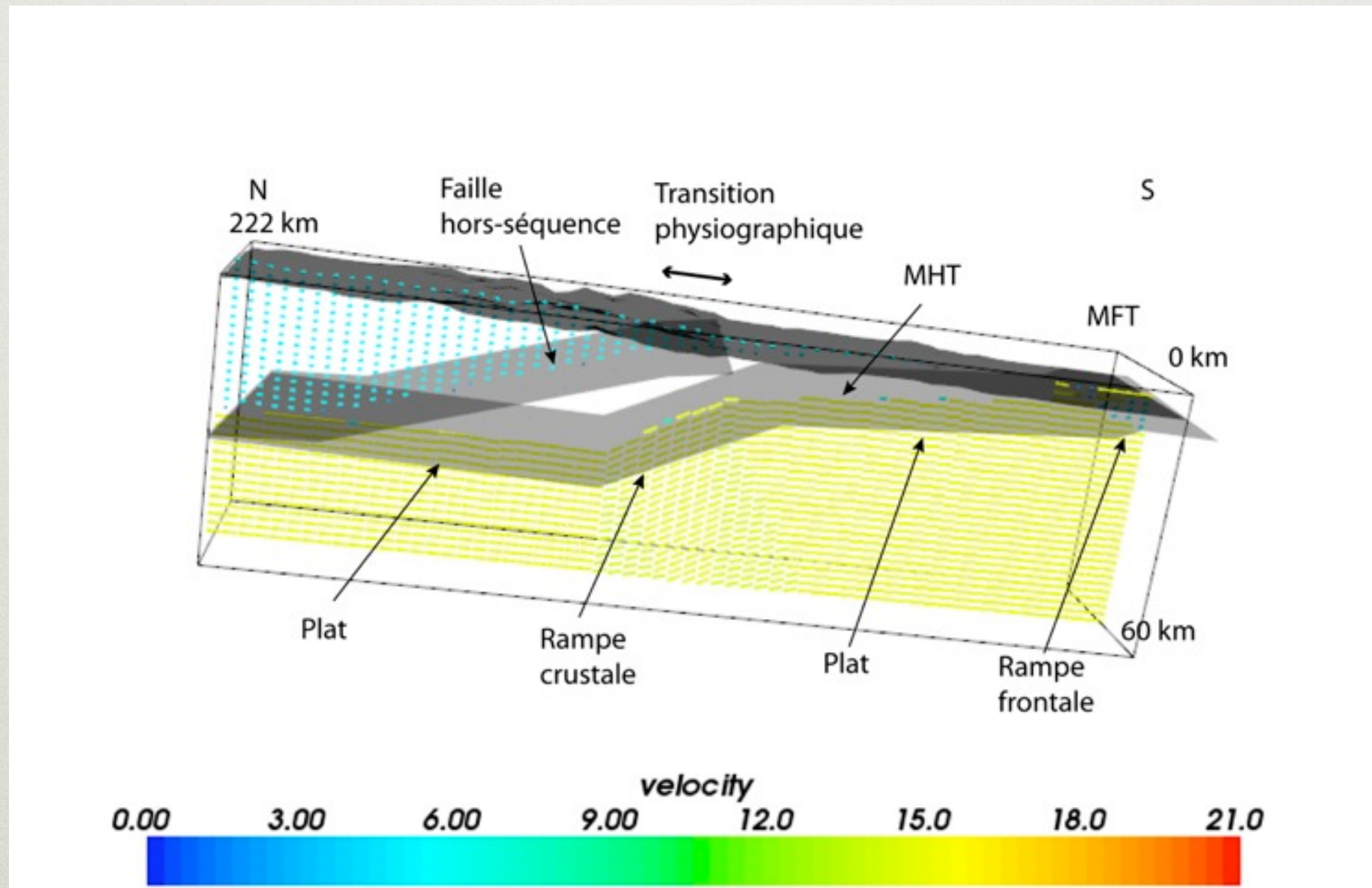
- Exhumation ==> composante verticale de la vitesse
- Pendage de la faille ==> Composante horizontale et verticale
- Hyp : $V_{\text{horiz}} \sim 5/6 \text{ km/Ma}$
- ==> Rampe crustale $\theta = 22^\circ$
- ==> Plat $\theta = 5^\circ$

EXEMPLE 1 : HIMALAYA, MODÉLISATION



Paramètres : Vitesse de hors séquence et géométrie

EXEMPLE 1 : HIMALAYA, MODÉLISATION



- Convergence = 21 km/Ma
- Underthrusting = 15 km/Ma ; overthrusting = 6 km/Ma

EXAMPLE 1 : HIMALAYA, INVERSION

$$misfit = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{O_i - P_i}{\Delta O_i} \right)^2}$$

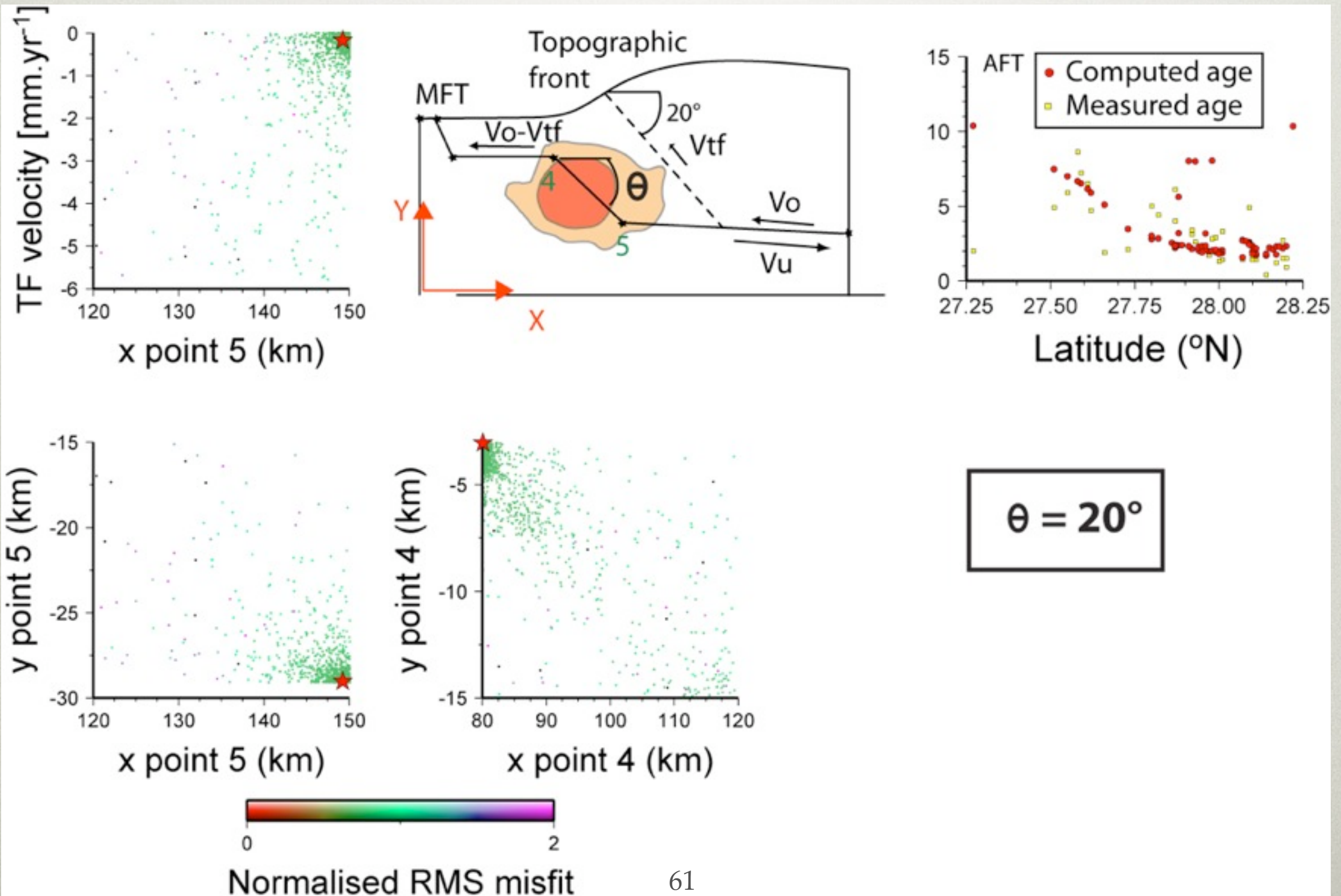
O = vecteur Observations

P = vecteur Prédiction

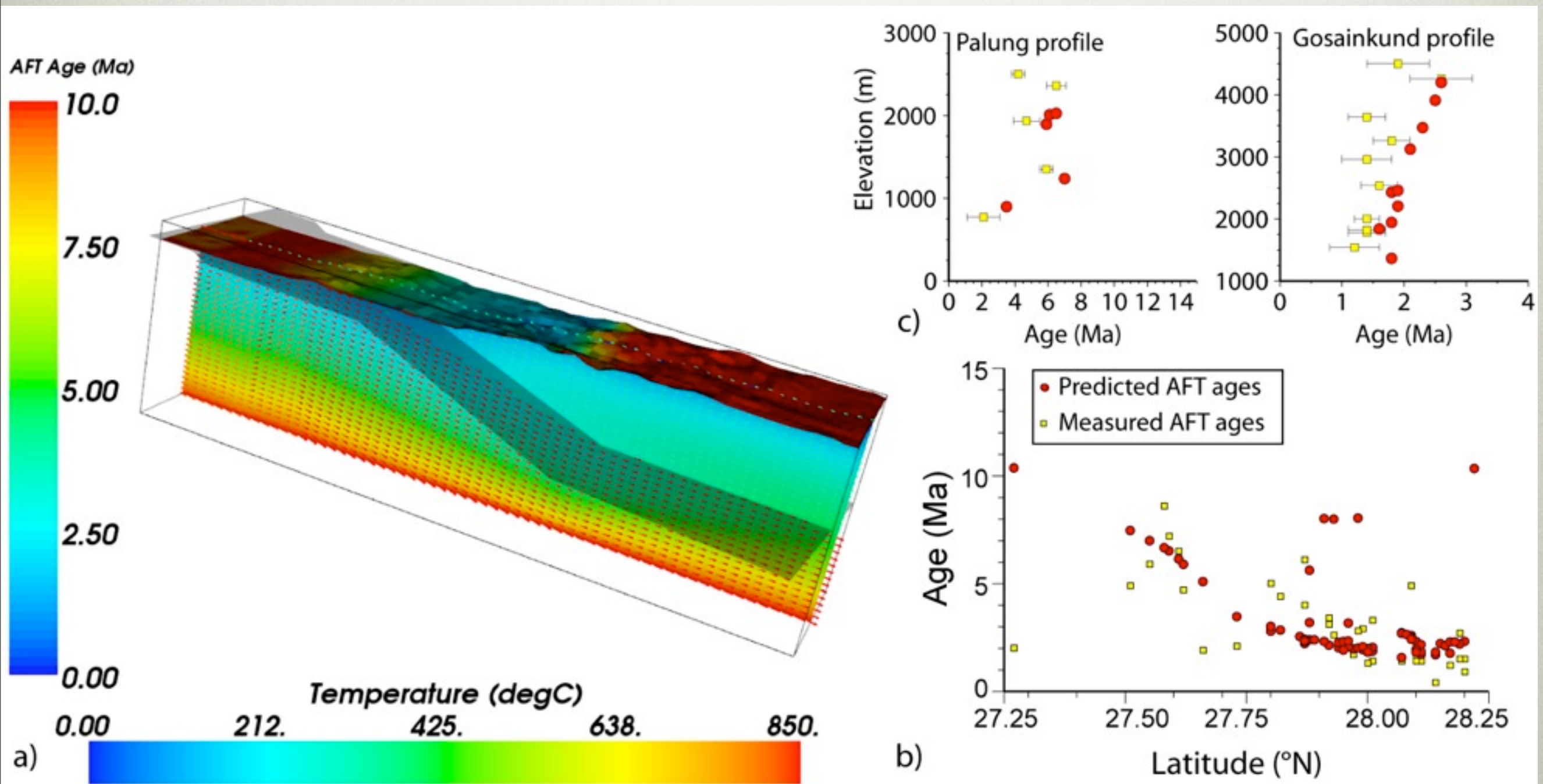
n = dimensions de O , nombre de données

ΔO = vecteur erreurs observées

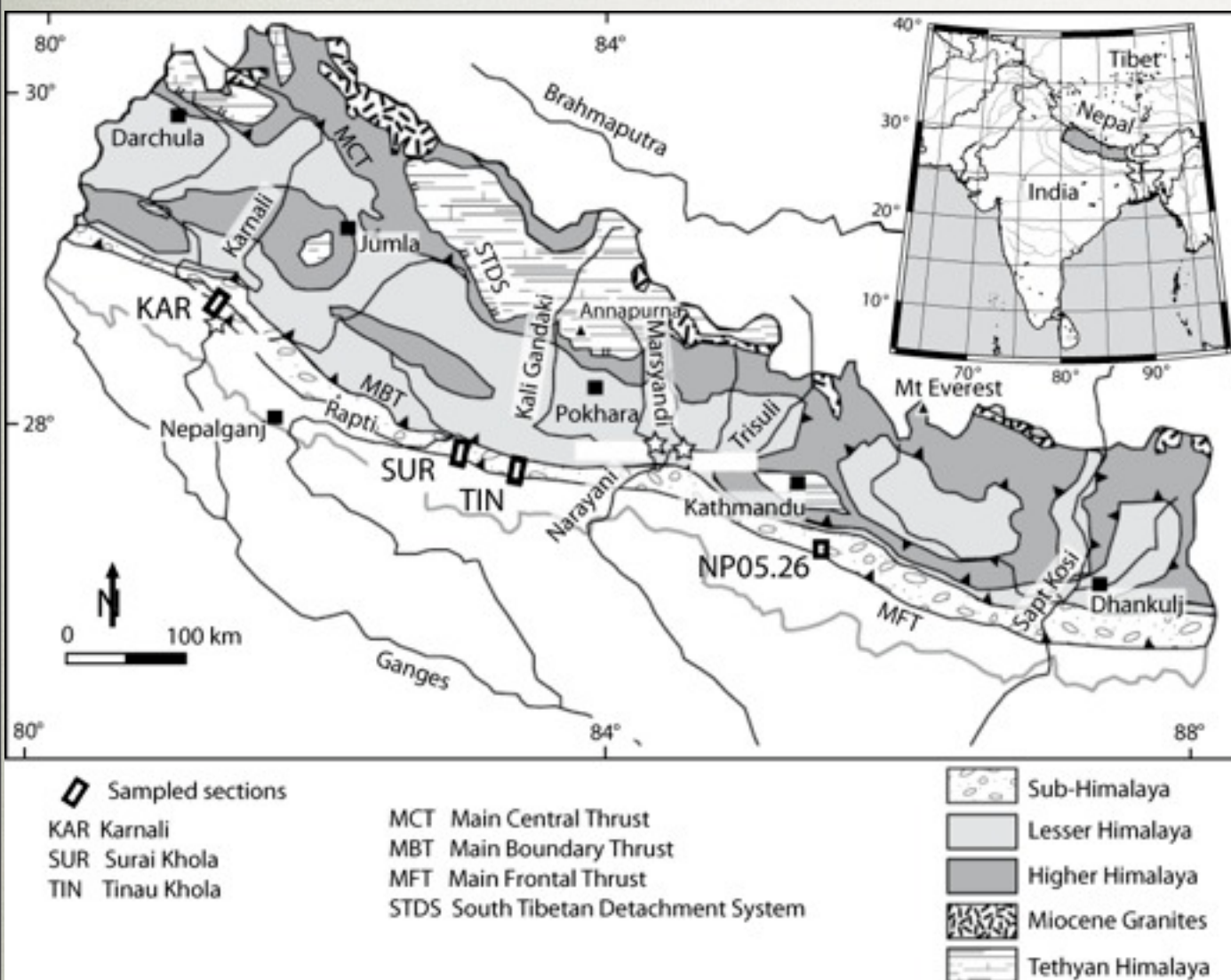
EXAMPLE 1 : HIMALAYA, INVERSIONS



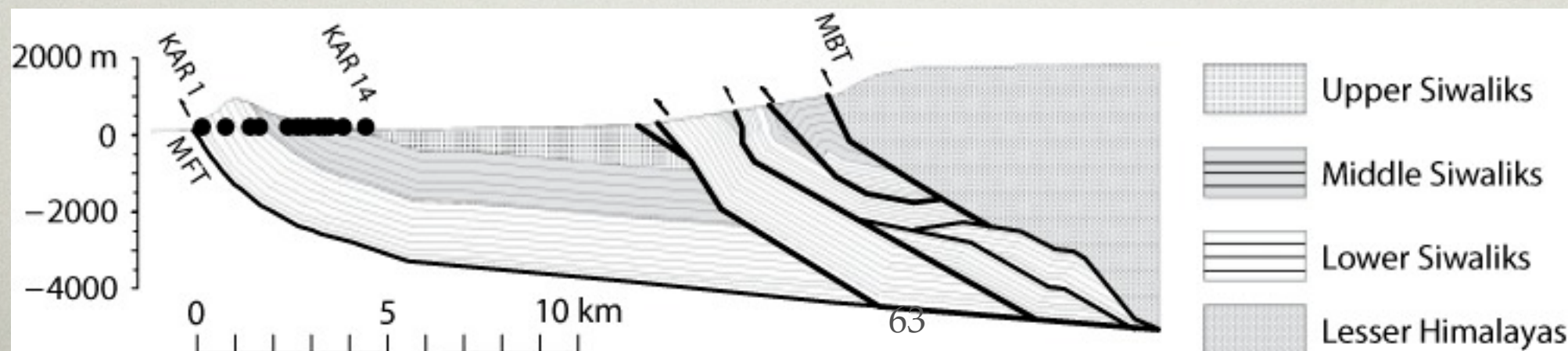
EXAMPLE 1 : HIMALAYA



THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE

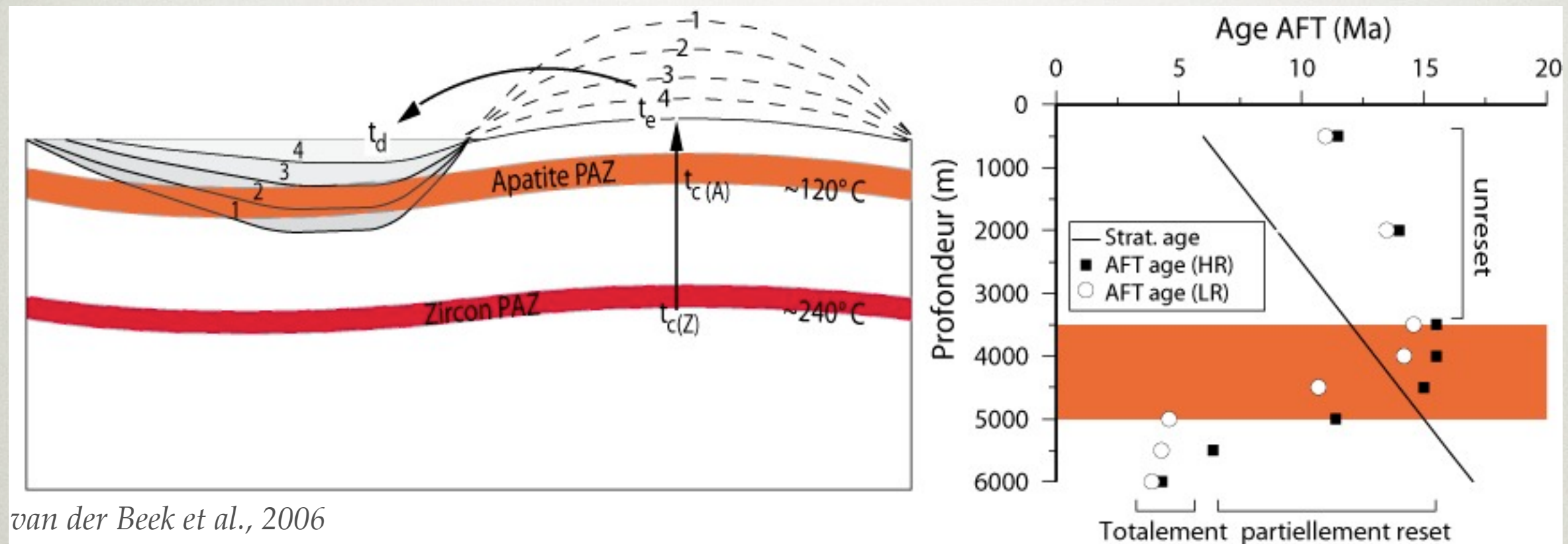


- Karnali River (Siwaliks)
- Coupes équilibrées
- Datation
Magnétostratigraphique



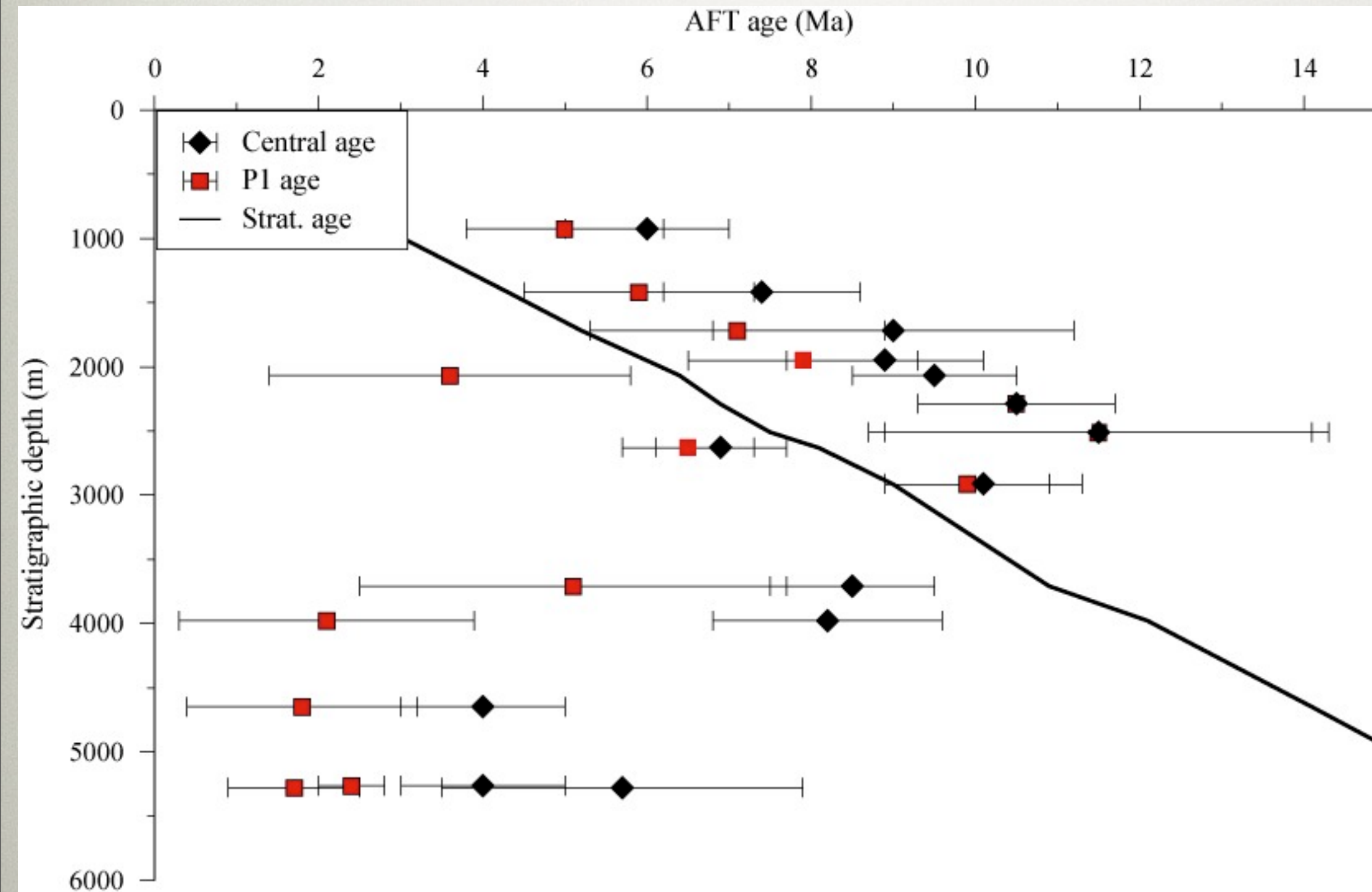
van der Beek et al., 2006

THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE



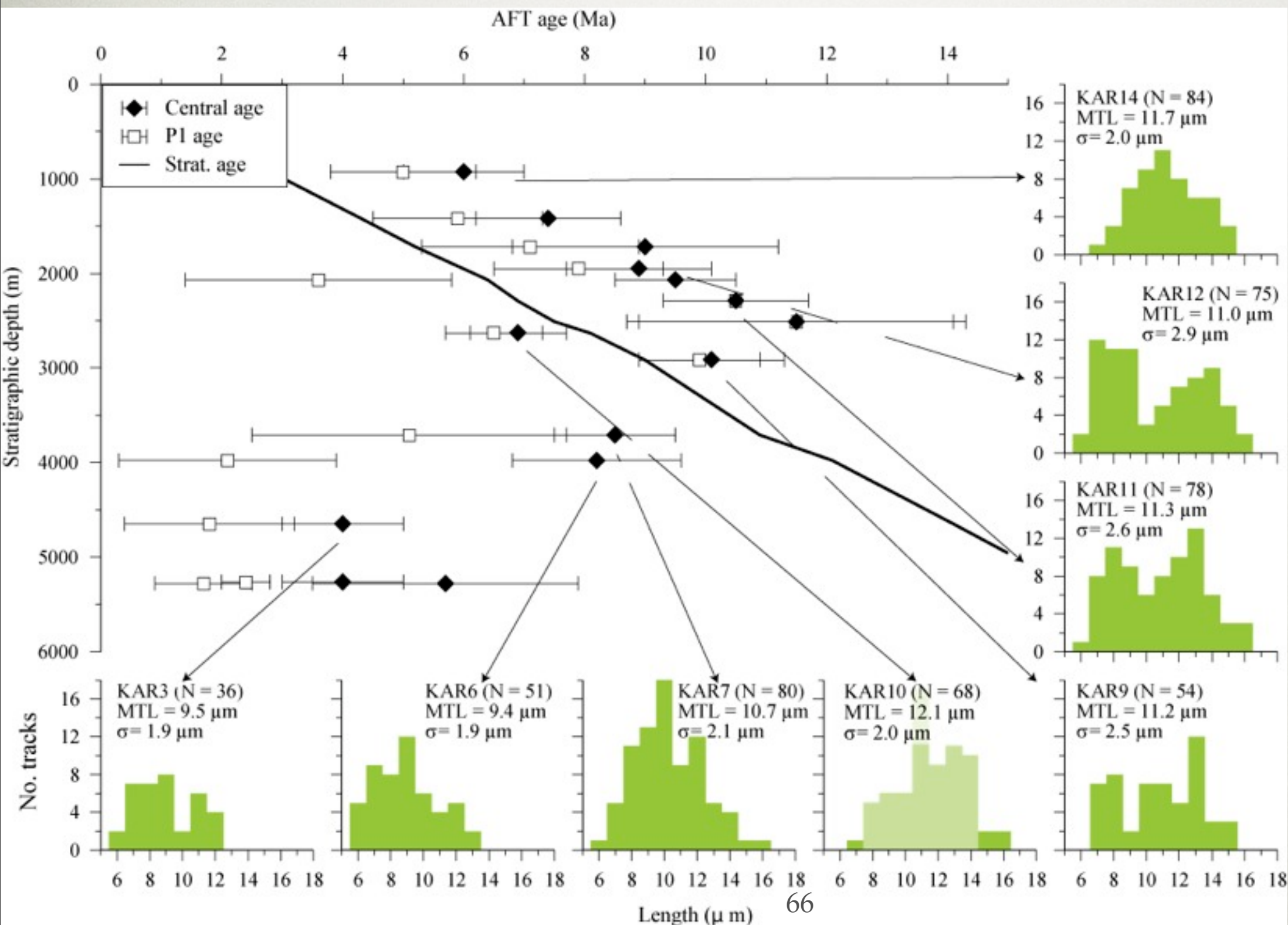
- Exhumation $\Rightarrow$ Age de la source
- Erosion $\Rightarrow$ Dépôt $\Rightarrow$ Recuit
- Cinétiques de recuits différentes $\Rightarrow$
Composante sédimentaire + composante source

THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE



Evenement à 2
Ma

THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE

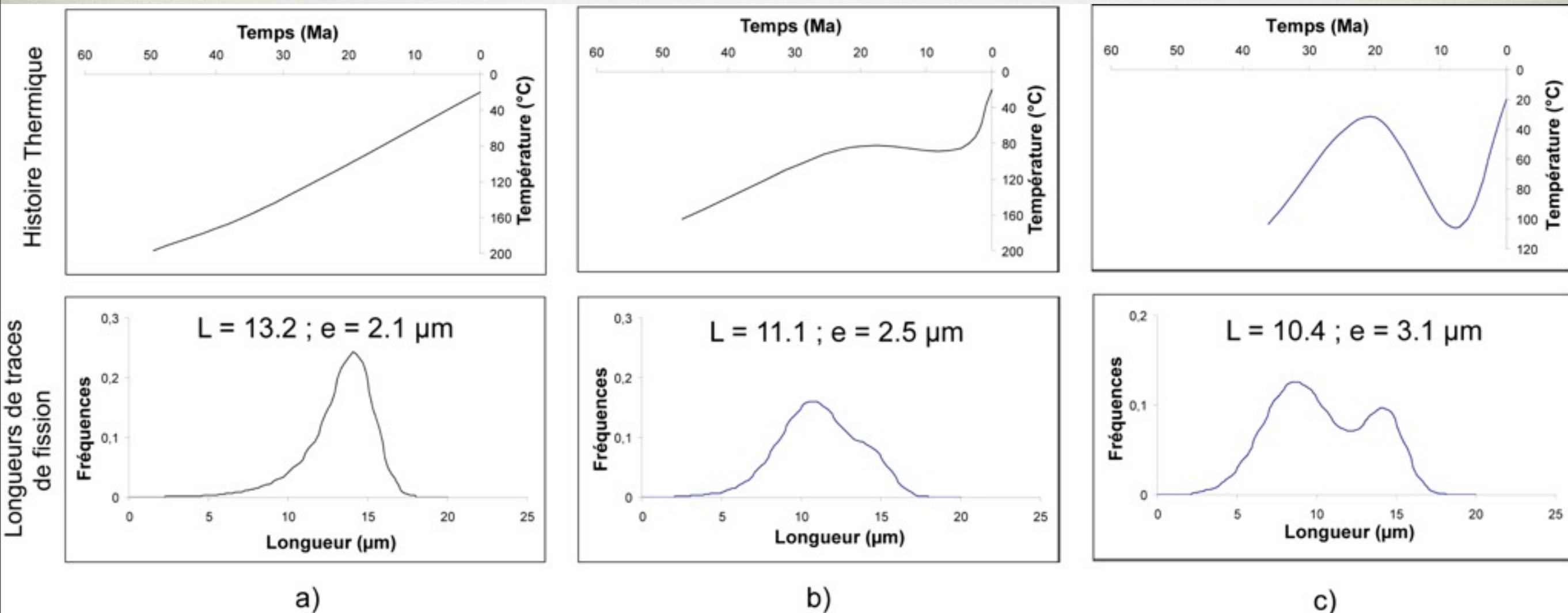


• Longueurs

van der Beek et al., 2006

THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE

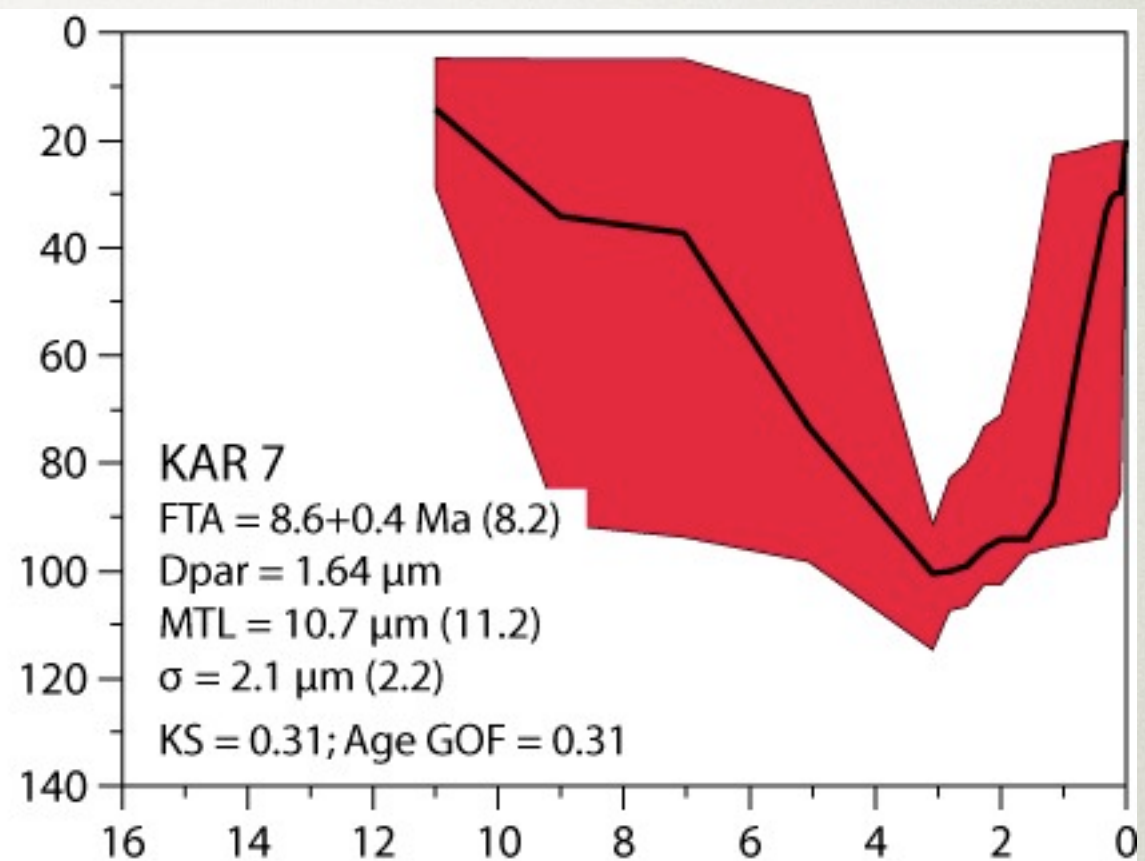
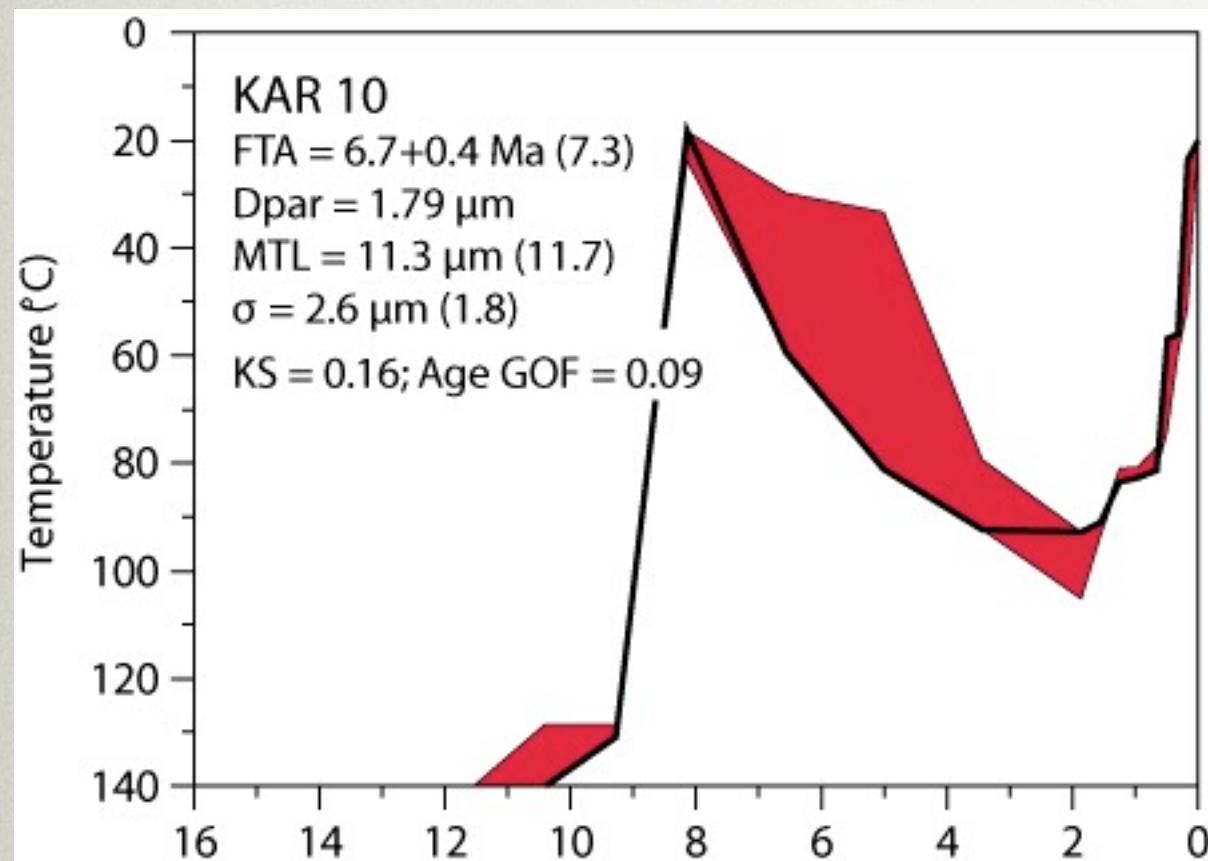
Relation longueurs de traces et histoire thermique



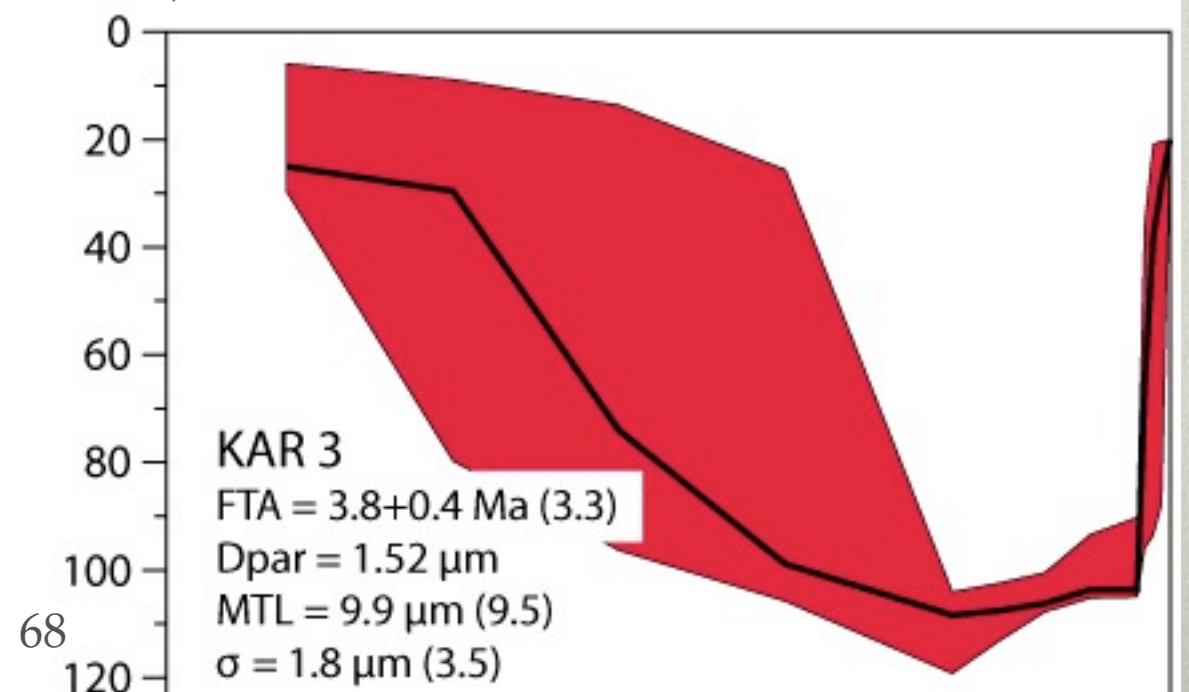
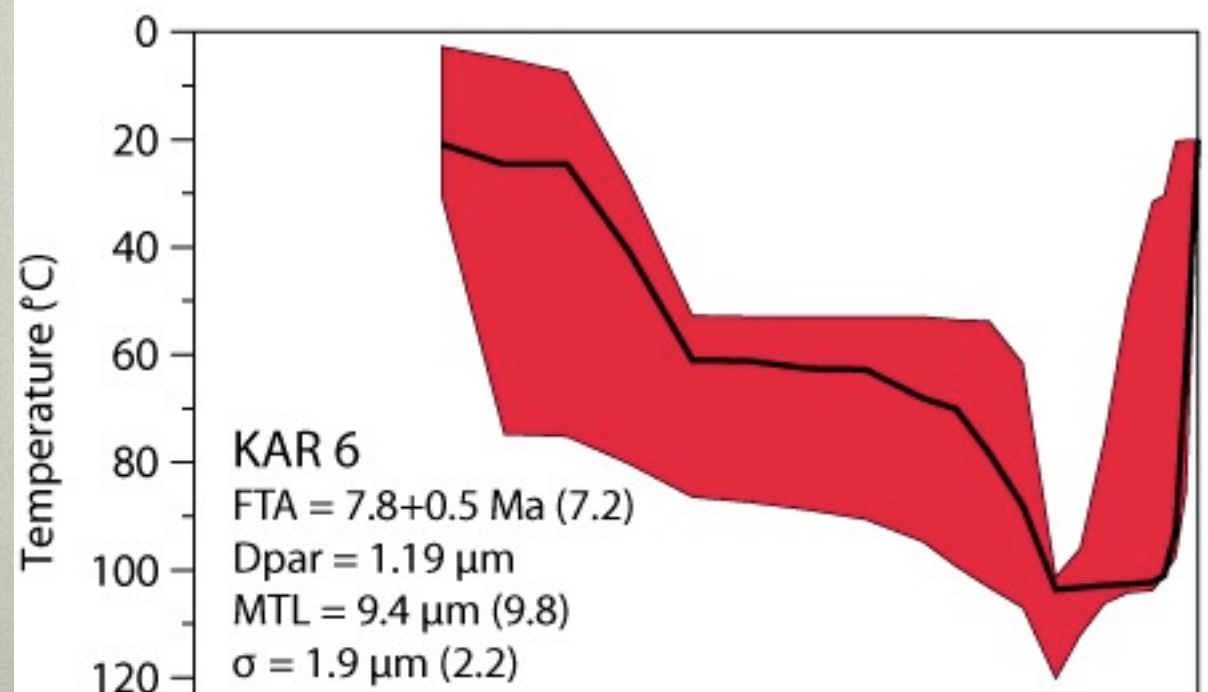
Chaque histoire : AFT=20 Ma

==> **Modélisation !** (Ketcham 2000, AFTsolve)

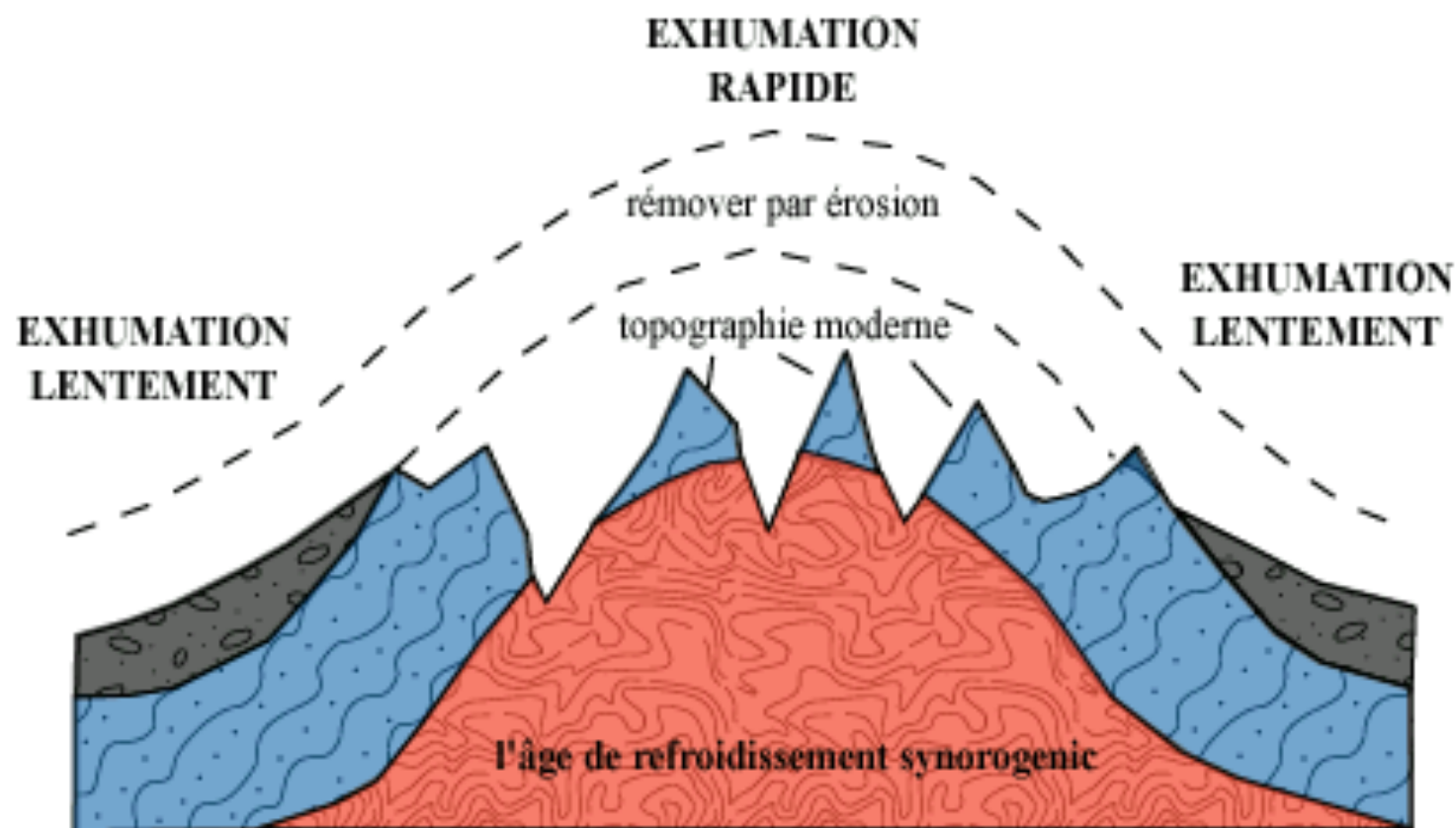
THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE



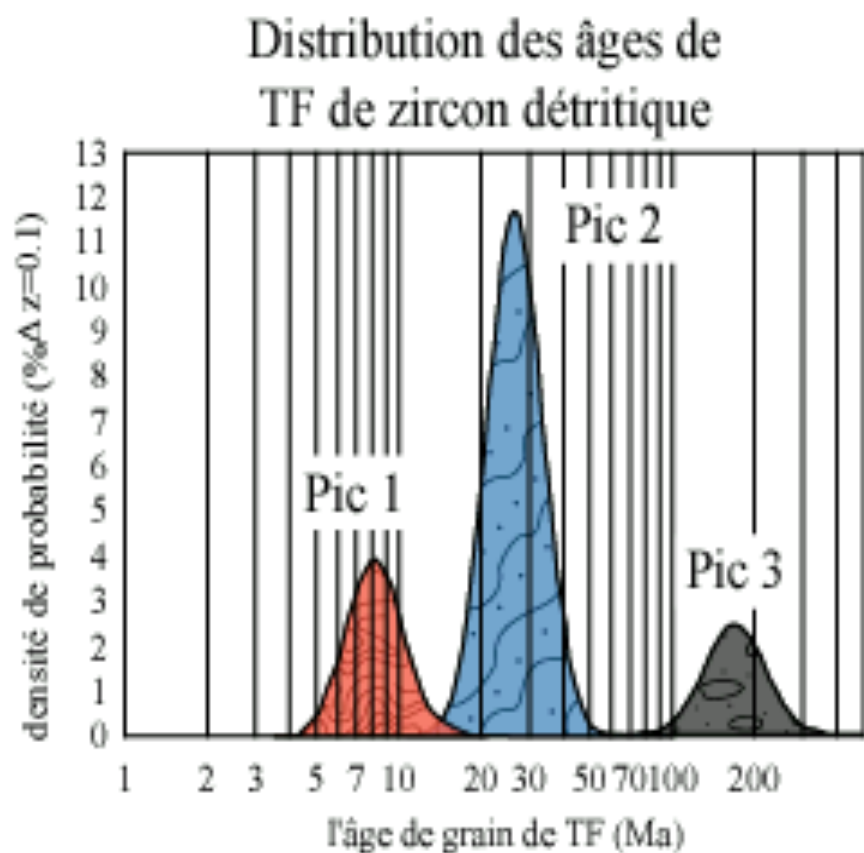
van der Beek et al., 2006



THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE



-  jeune pic d'âge de TF (l'âge de refroidissement syn-orogénique)
-  moyen pic d'âge de TF (remettez à zéro partiellement ou des âges de refroidissement synorogénique jeune)
-  vieux pic d'âge de TF (unité de couverture avec des âges de refroidissement pré-orogéniques)



THERMOCHRONOLOGIE DÉTRITIQUE

- Etude de l'évolution du Relief (*Bernet et al., 2006*)
- Notion de *Lagtime* = âge TF - âge de dépôt
- Double datation U-Pb + ZFT

SYNTHÈSE

SYNTHÈSE

- Outil puissant pour étude de:
 - Evolution du relief
 - Taux d'exhumation
 - Processus (érosion, tectonique,...)
- A coupler avec de la modélisation numérique
 - Pour stratégie d'échantillonnage
 - Pour analyse critique des données
 - Pour quantification
- Comme toute technique, un minimum de **physique** est nécessaire...

BIBLIO CONSEILLÉE

- J. Braun, P. van der Beek and G. Batt : *Quantitative thermochronology: Numerical methods for the interpretation of Thermochronological Data*. Nature Publishing Group, 2006.
- P. Reiners and M. Brandon : *Using Thermochronology to Understand Orogenic Erosion*. Annual Review of Earth Sciences, 34: 419-466, 2006.
- K. Gallagher, R. Brown and C. Johnson : *Fission track analysis and its applications to geological problems*. Annual Review of Earth Sciences, 26: 519-572, 1998.
- T. Elhers and K. Farley : *Apatite (U-Th)/He thermochronometry: methods and applications to problems in tectonic and surface processes*, EPSL, 206: 1-14, 2003.
- P. Reiners : *Zircon (U-Th) Thermochronometry*, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 58: 151-179, 2005.
- P. Reiners, T. Elhers and P. Zeitlers : *Past, Present, and Future of Thermochronology*. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 59: 1-18, 2005.