



Que nous apprennent les méthodes de datation des roches ?

Cécile Gautheron

cecile.gautheron@univ-grenoble-alpes.fr

Evolution de la surface terrestre dans les zones montagneuses



- ⇒ Comment quantifier la formation d'un tel objet géologique?
- ⇒ Quels sont les processus responsables de sa formation et évolution?

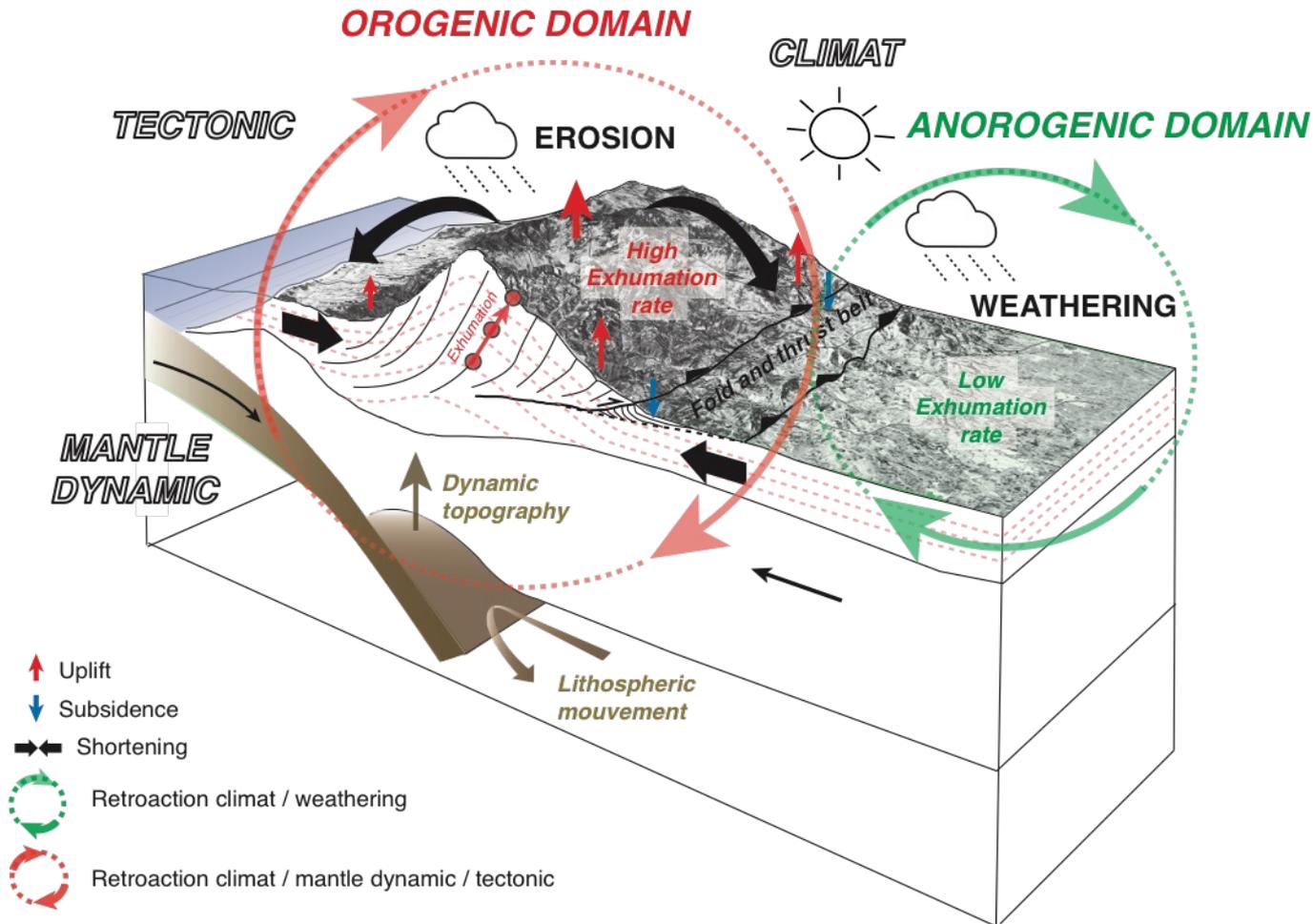
Evolution de la surface terrestre dans les zones à faible relief



Roraima mountains (Venezuela)

- ⇒ Depuis quand ce paysage est identique?
- ⇒ Quels sont les processus responsables de sa formation et évolution?

La Terre: histoire géologique longue et complexe



- L'évolution du paysage terrestre et de sa géomorphologie résulte de la compétition entre les processus d'altération et d'érosion physique

Les méthodes de datation relatives

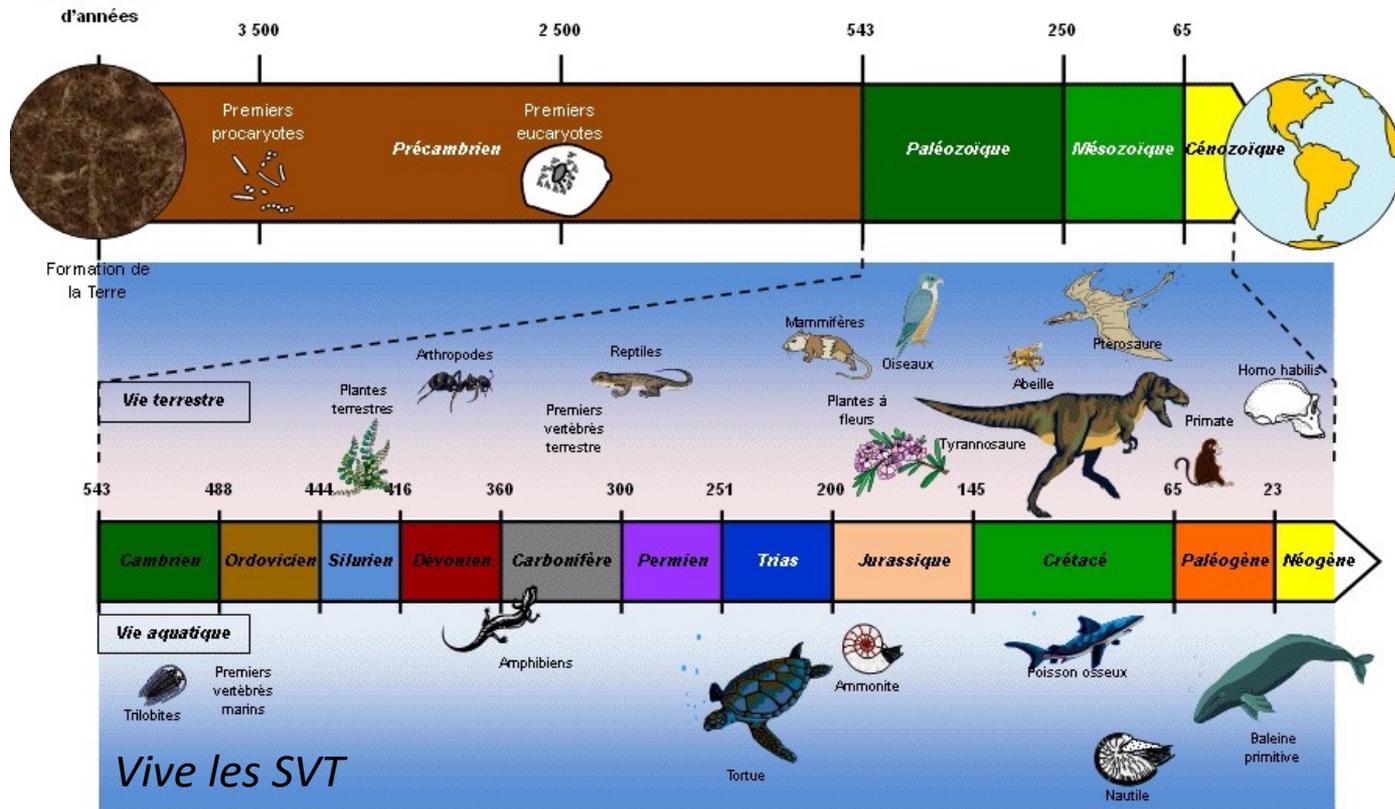


Grand Canyon (USA)

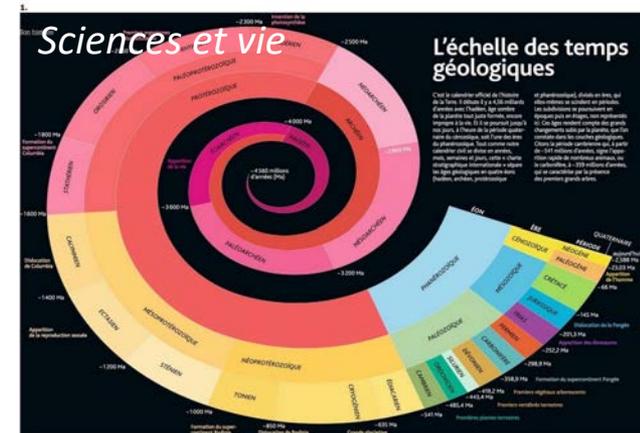
⇒ Le 1ere méthodologie de datation utilise les grands principes :

- D'horizontalité
- De superposition
- De continuité latérale
- De recoupement

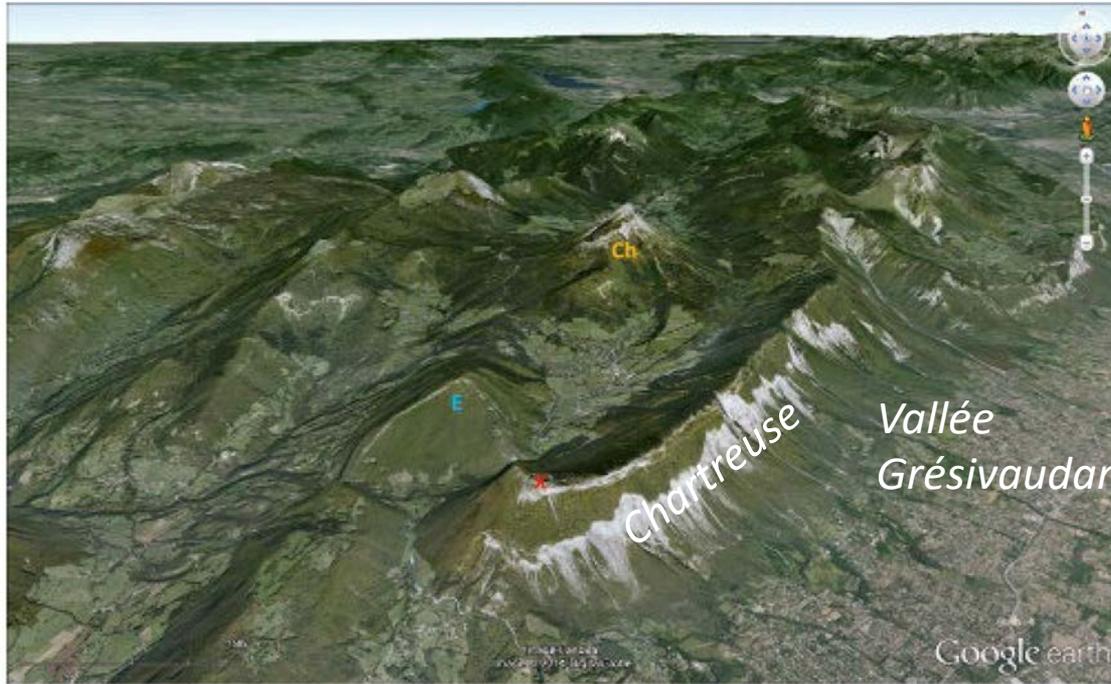
Bio et chronostratigraphie



- ⇒ Réalisation d'une charte temporelle en fonction de la présence de différents fossiles
- ⇒ Valable que pour les roches sédimentaires
- ⇒ Accès à une période de temps limitée



Bio et chronostratigraphie



=> Application de la carte géologique sur un modèle numérique

Thomas (2014)

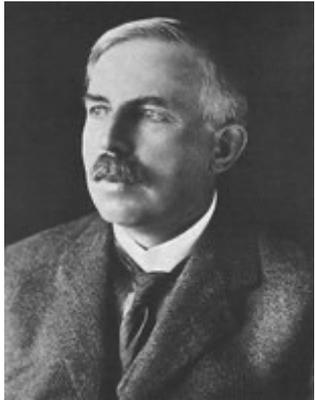
=> Principe de stratigraphie et d'âge valable pour les roches sédimentaires

=> Accès à une partie de l'histoire géologique relative



La radioactivité: une découverte essentielle pour les Géosciences

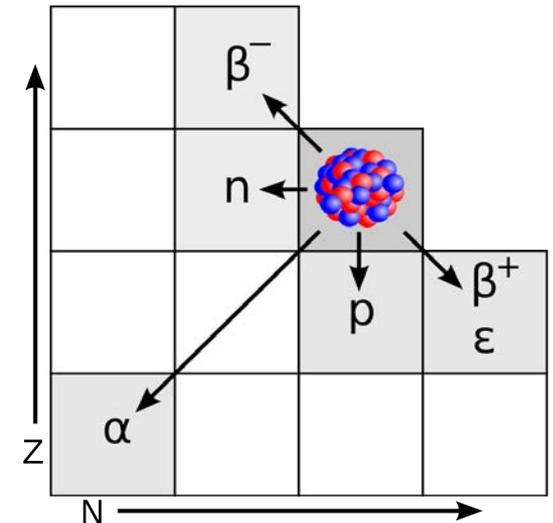
⇒ Découverte de la radioactivité au début du 19^{ème} ouvre de nouvelle perspective



⇒ **Ernest Rutherford** en 1904 propose le 1^{er} âge radioisotopique utilisant le système (U–He)

⇒ Propose que l'âge de la Terre à 40 Ma, révisé en 1905 à 140 Ma, puis en 1906 à 500 Ma

Isotope père -> isotope fils + rayonnement



Principe de la radioactivité

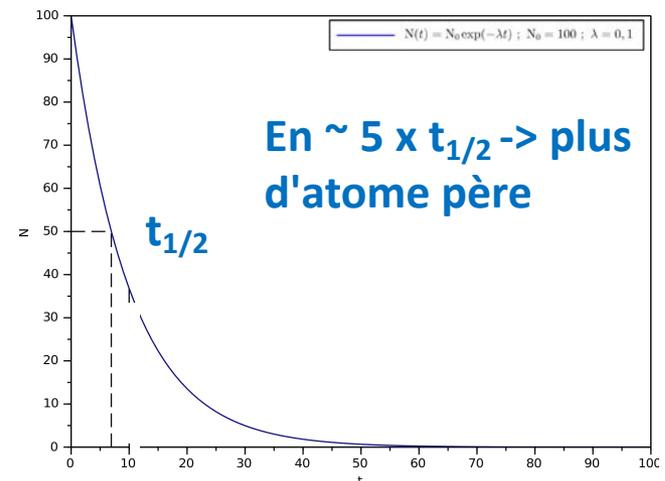
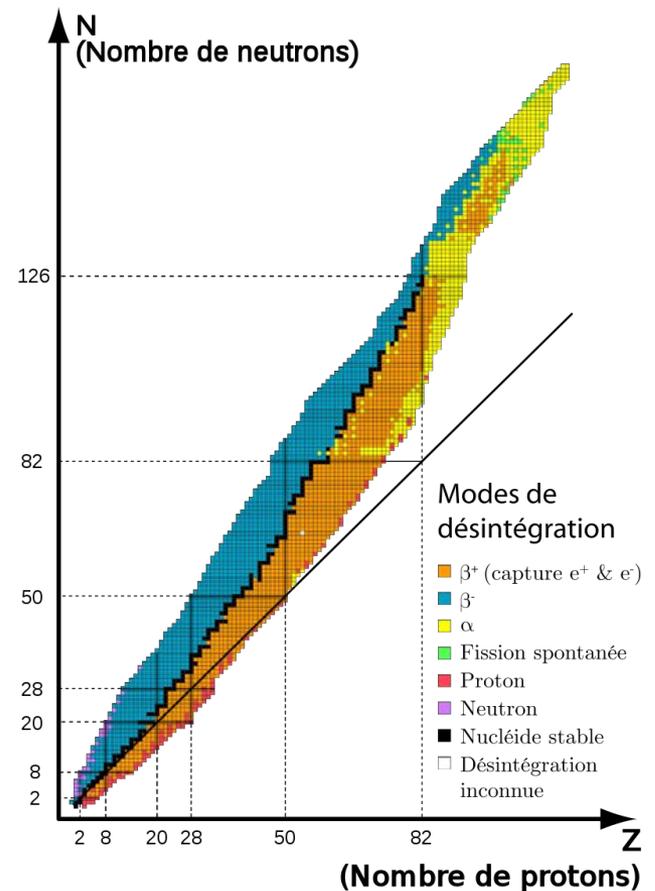
$N \rightarrow Y + \text{rayonnement}$

$$N_{(t)} = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$$

$$\text{Demi-vie } t_{1/2} = \ln(2) / \lambda$$

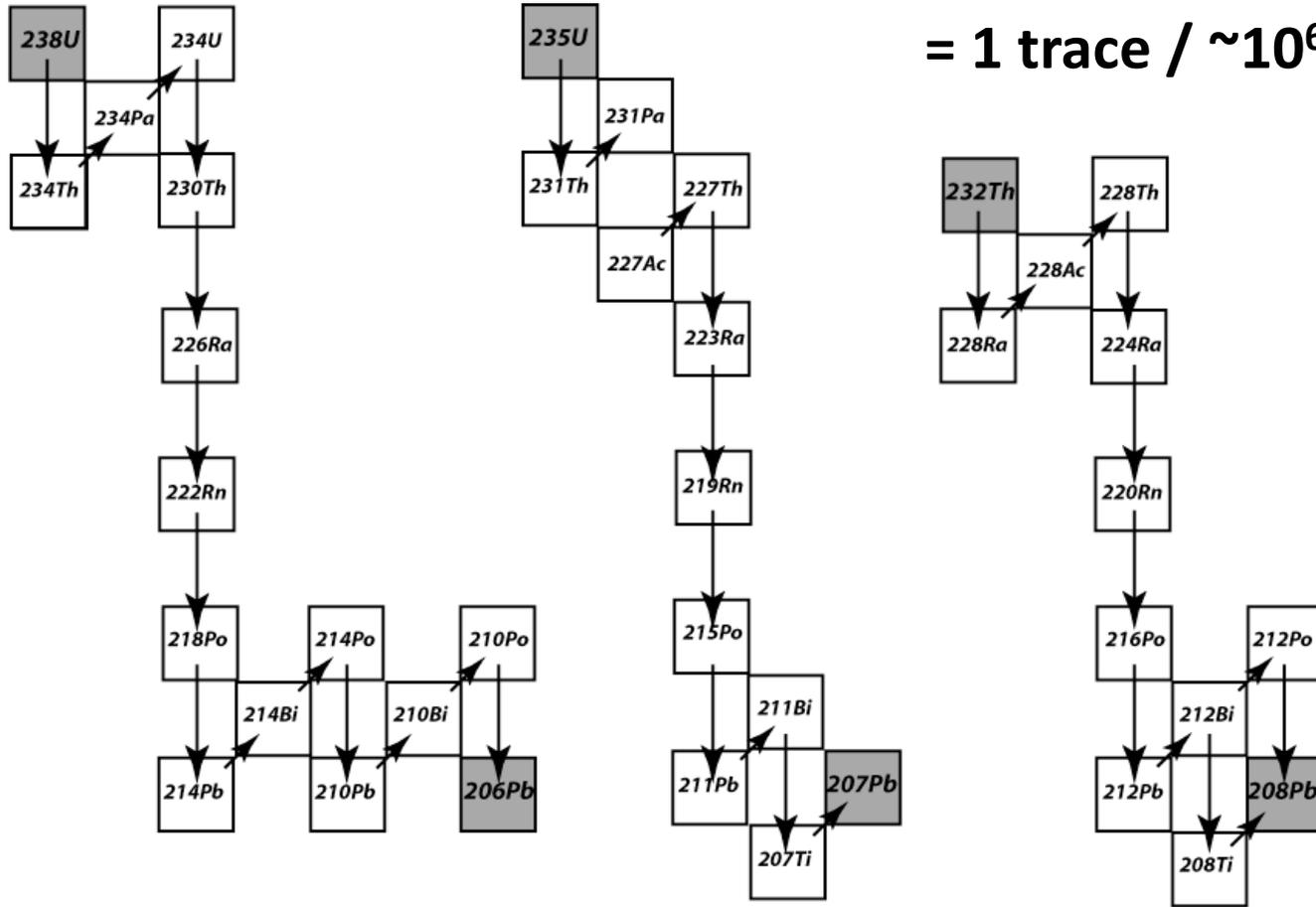
$t_{1/2}$: durée au bout de laquelle la moitié de la concentration de N est désintégrée

Accès à différents outils de géochronologie et de temps (a, ka, Ma à Ga)



L'exemple des chaînes radioactives U-Th

U
Pa
Th
Ac
Ra
Fr
Rn
At
Po
Bi
Pb
Ti



^{238}U fission naturelle
= 1 trace / $\sim 10^6$ alphas

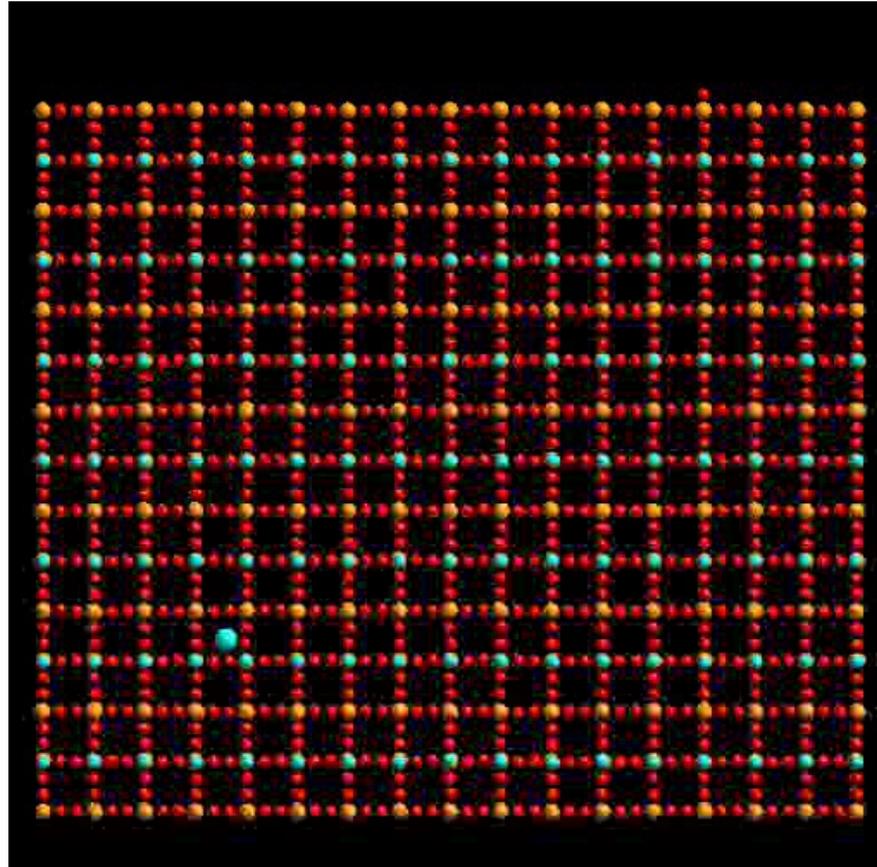
➤ $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U} = 99.99\% \text{ U}$; $^{232}\text{Th} = 100\% \text{ Th}$ et $^{147}\text{Sm} = 0.15\% \text{ Sm}$

Les chaînes radioactives U-Th

Père		Fils	Nb. α particles	$t_{1/2}$ (Ga)
^{238}U	->	^{206}Pb	+ 8 α	(4.4683)
^{235}U	->	^{207}Pb	+ 7 α	(0.7038)
^{232}Th	->	^{208}Pb	+ 6 α	(14.05)

- Demi-vie de l' ^{235}U , ^{238}U et ^{232}Th sont très longue => histoire de la Terre depuis 4.56 Ga

Radioactivité et dommages alpha



Trachenko (2003)

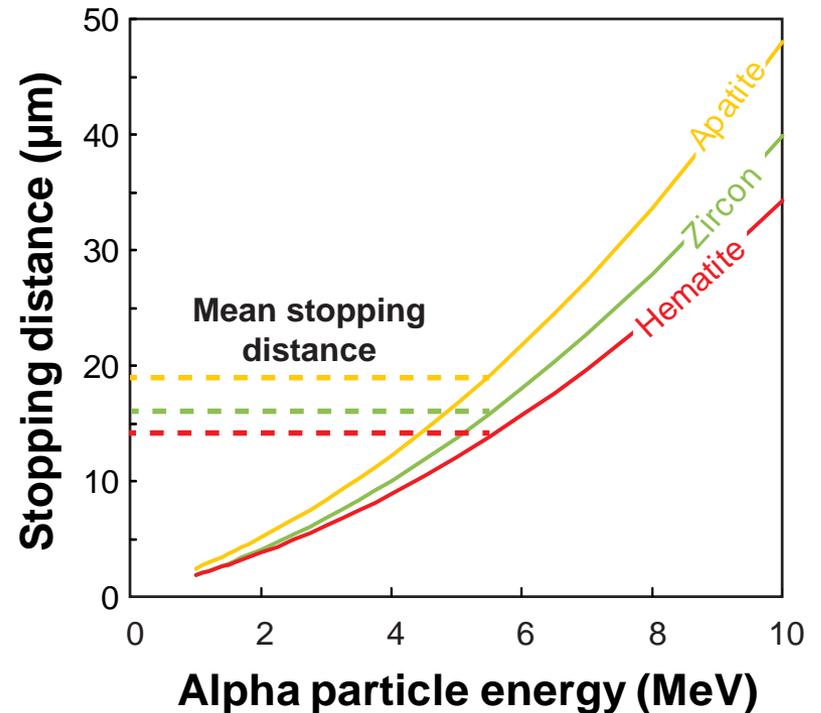
- Lors de la désintégration alpha de l'U et Th, des défauts cristallins

Production de particules alpha

SRIM; Ziegler (2008); Ketcham et al. (2011)



Alpha halo in biotite

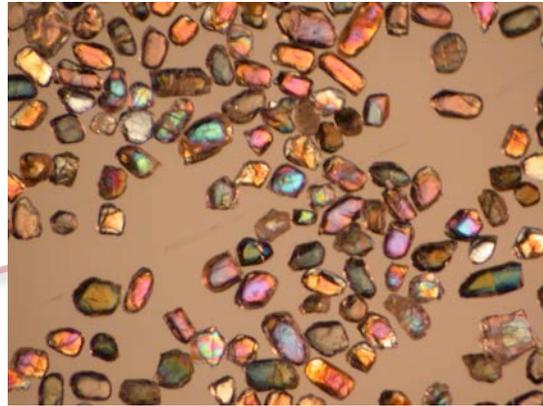


Energie cinétique des particules α importantes (MeV),

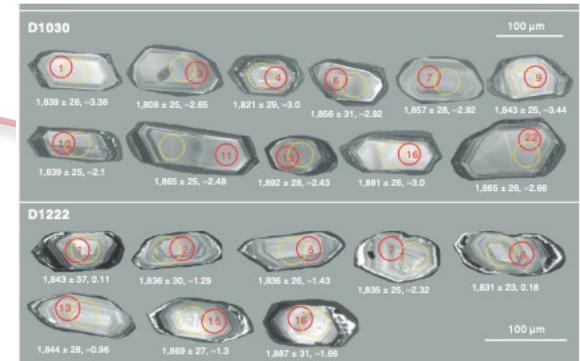
α -----> ^4He (après avoir pris des é)

Les atomes d'He s'arrêtent avec une distance moyenne dépendant de l'énergie cinétique, de la densité, chimie et Th/U

La méthode U/Pb



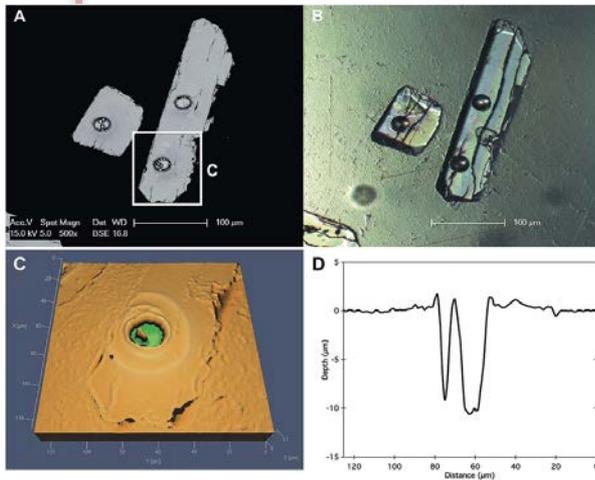
⇒Picking



⇒Selection

U/Pb ± 1σ (Ma)

Yang et al. (2021)



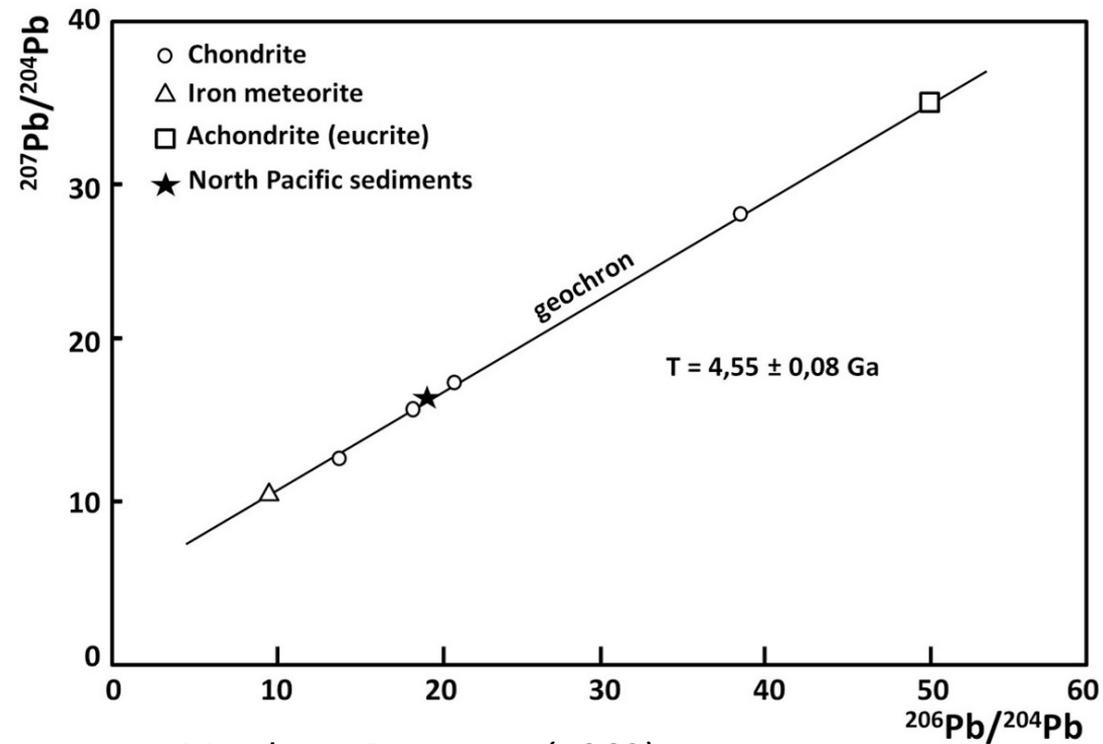
Danisk et al. (2017)



⇒U-Th-Pb analysis by LA-ICPMS

Datation de l'âge de la Terre par méthode Pb/Pb

- 1^{er} exemple: datation de l'âge de la Terre avec le système Pb/Pb sur météorites et sédiments

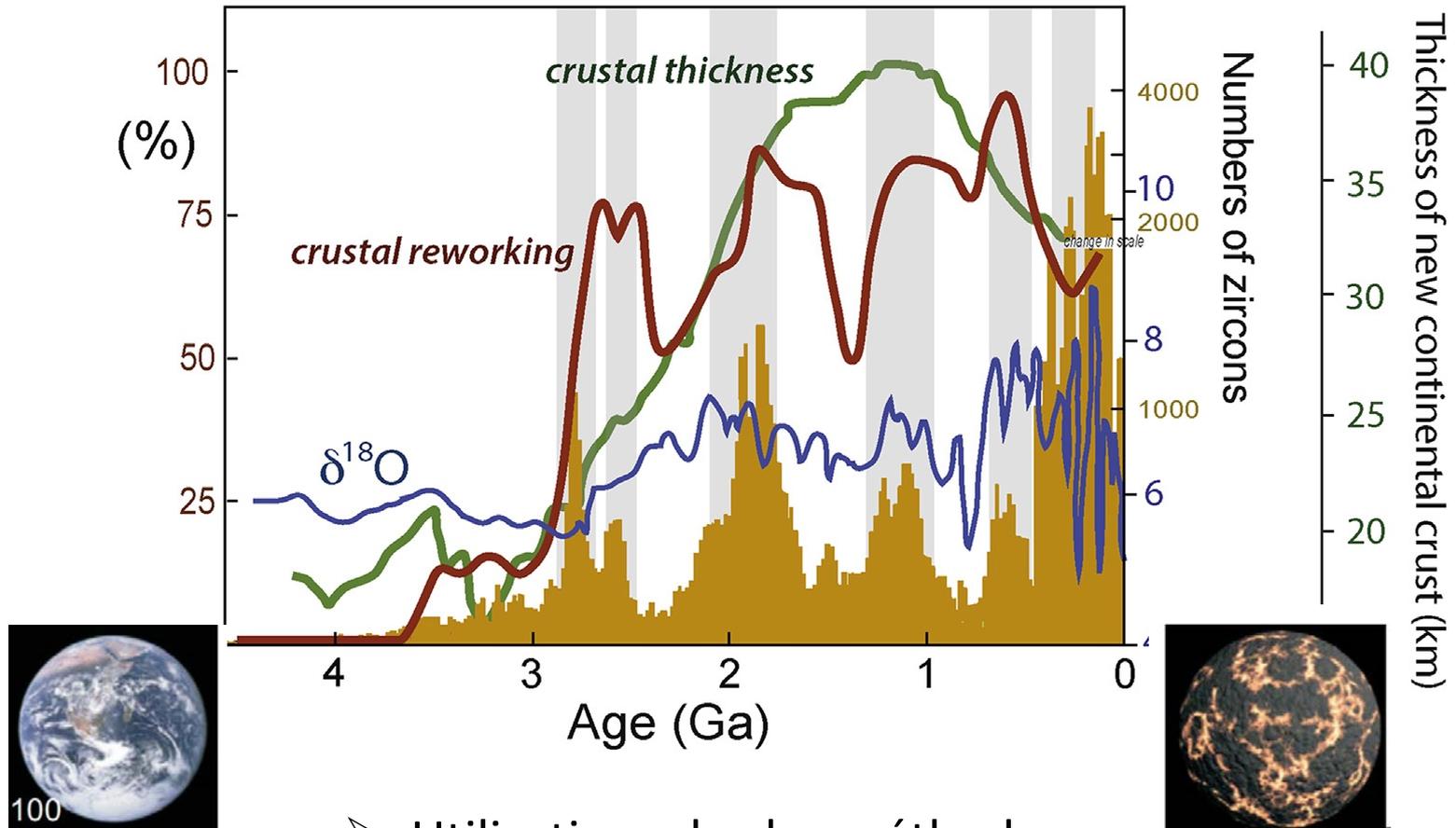


Murthy et Patterson (1962)

$$\frac{(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{207}\text{Pb}_0/^{204}\text{Pb}_0)}{(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}_0/^{204}\text{Pb}_0)} = \text{Pente}$$

$$\text{Pente} = ^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \times (\exp(\lambda_{235}t) - 1) / (\exp(\lambda_{238}t) - 1)$$

Modèle de formation de la croûte continentale Terrestre

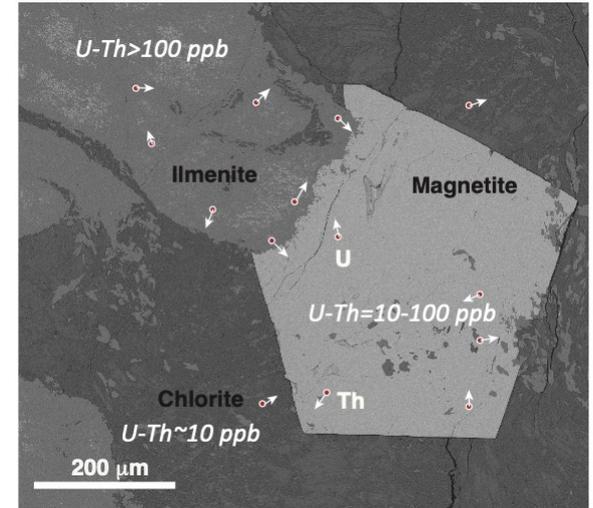


➤ Utilisation de la méthode U/Pb sur zircon

Hawkesworth et al. (2019)

Méthode (U-Th)/He: un outil au multiple application

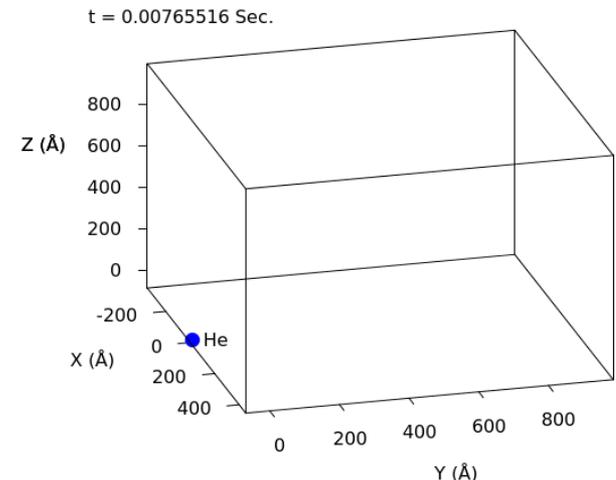
- Production de particule alpha à partir des isotopes ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th
- Ejection de la particule $\alpha \rightarrow \sim 16 \mu\text{m} \rightarrow ^4\text{He}$



Strutt (1909); Zeitler et al. (1987)

- Diffusion de l'He en fonction de la température et du minéral => perte d'He

$$\frac{D}{a^2} = \frac{D_0}{a^2} \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)$$



Balout et al. (2017)

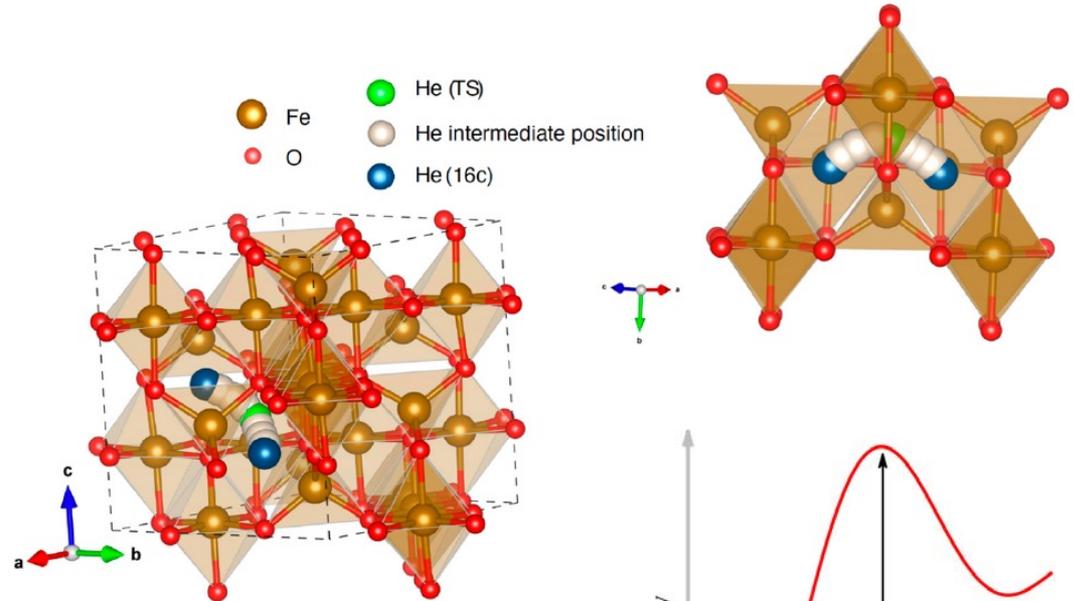
(He diffusion hematite) ¹⁷

Diffusion de l'He comprise par des approches pluridisciplinaires

- Utilisation de calcul quantique pour simuler la diffusion de l'He dans un cristal



IPN cluster for High Performance calculation

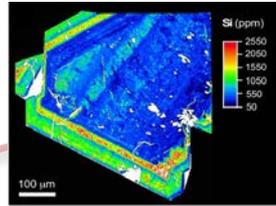


Bassal et al. (2022)

- Algorithmes de diffusion de l'He pour différentes phases minérales

La méthode (U-Th)/He

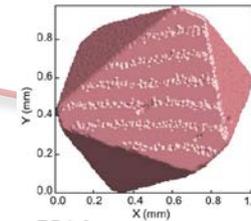
⇒ Petrology



⇒ Selection



⇒ CT-scan



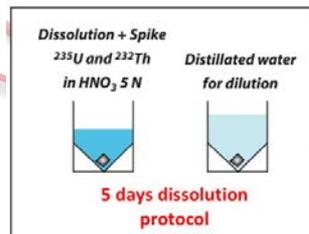
(U-Th)/He age $\pm 1\sigma$
(Ma)



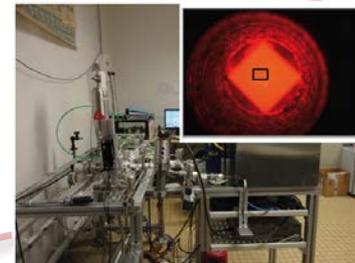
- ⇒ U-Th-Sm analysis by ICP-MS
- ⇒ U-Th-Sm analysis by LA-ICPMS



⇒ Packing

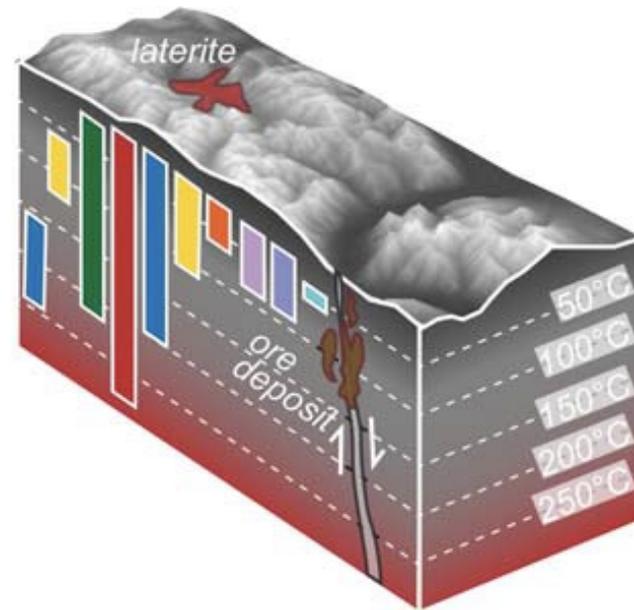
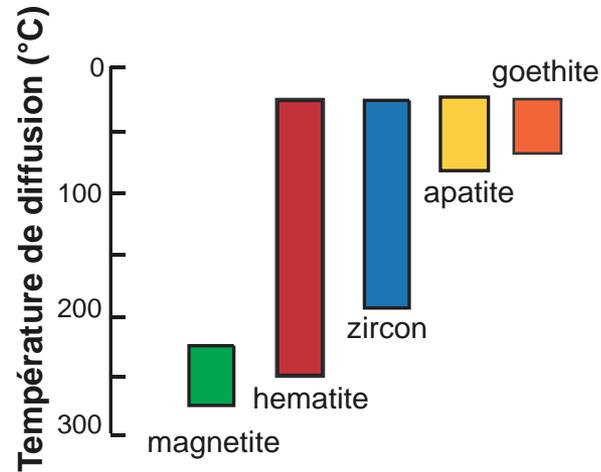


⇒ Chemical dissolution



⇒ He extraction and analysis line

Application de la méthode (U-Th)/He

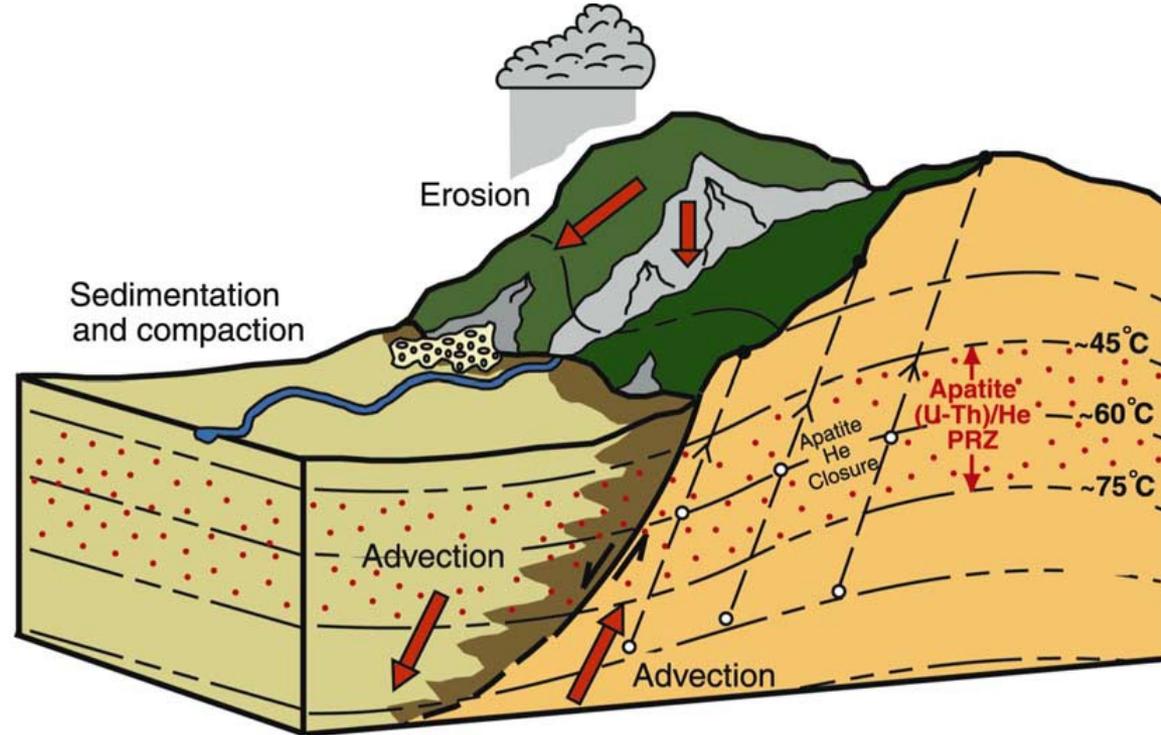


Ault et al. (2019)

Utilisation de la diffusion de l'He dans un minéral :

- ✓ Thermochronomètre (perte d'He par diffusion)
- ✓ Géochronomètre (retenu total de l'He)

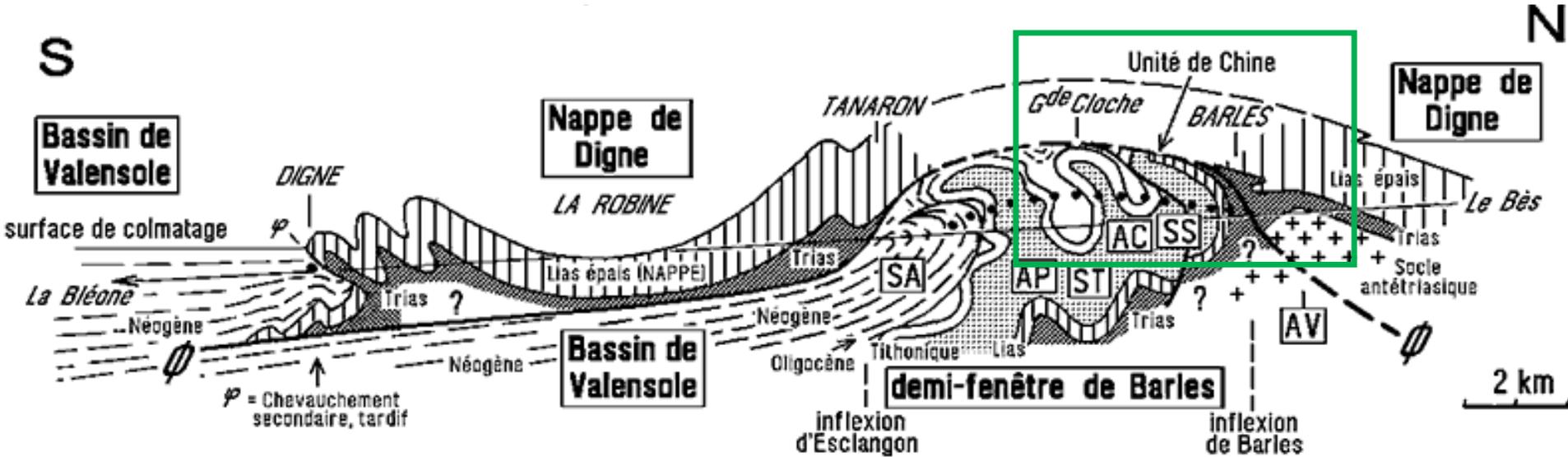
Thermochronomètre : quantification de l'histoire géologique



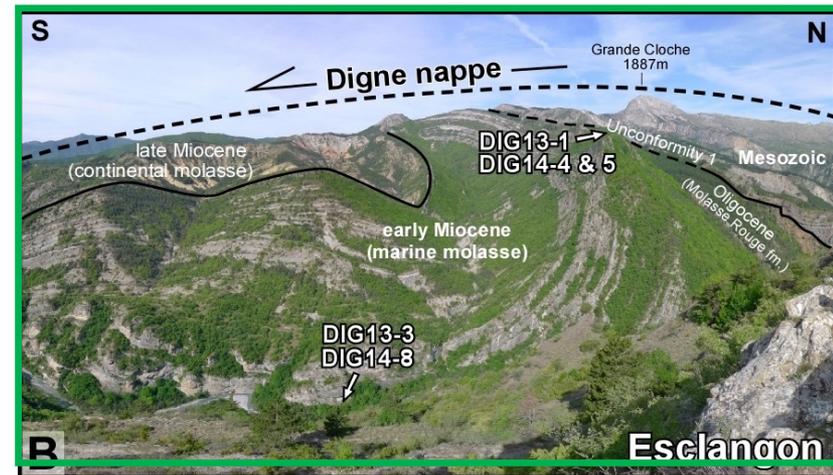
Modifié d'après Ehlers et al. (2003)

- La rétention de l'He dans le cristal va dépendre de la température et de la taille du domaine de diffusion

Nappe de Digne

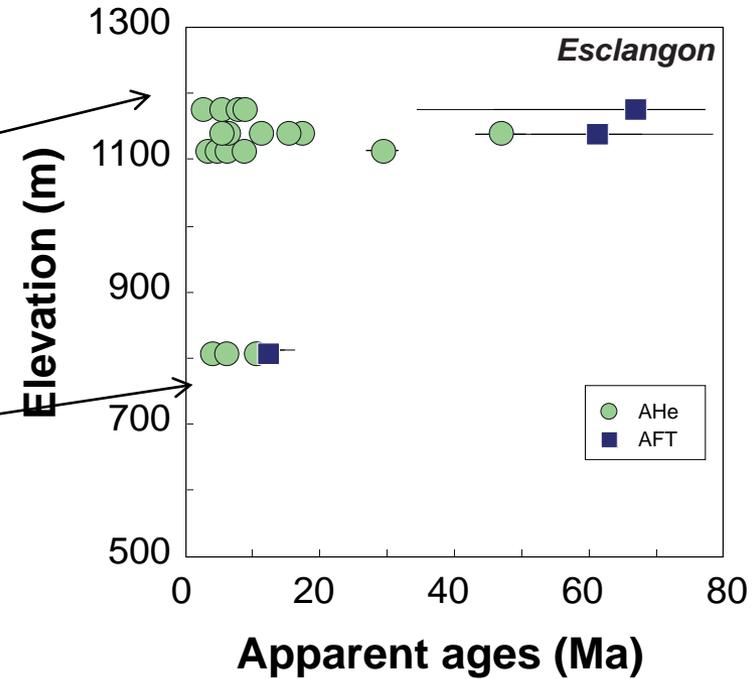
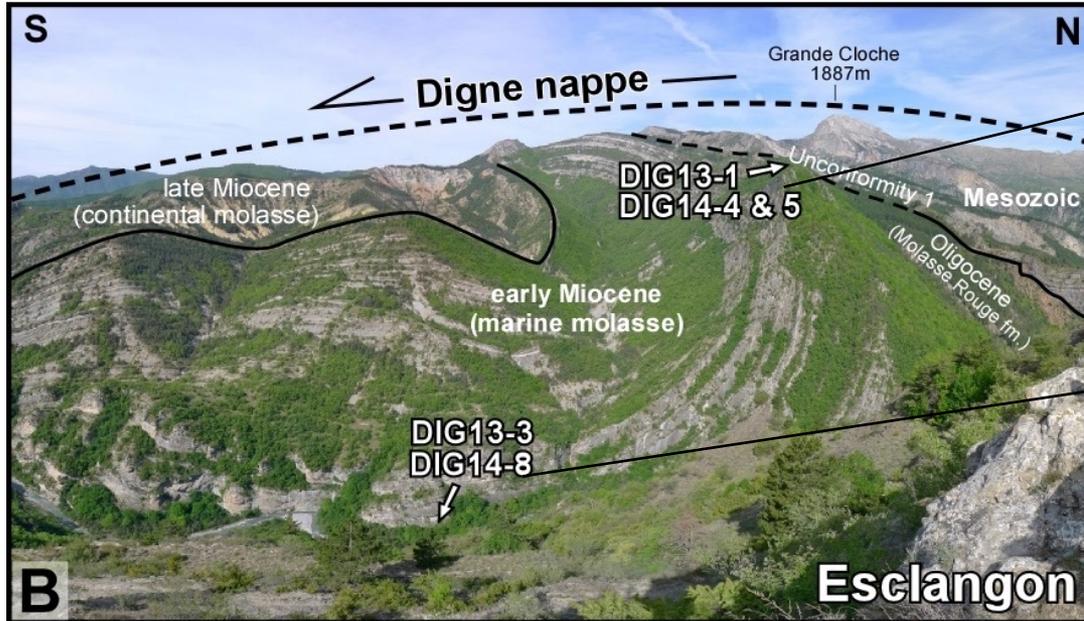


- Géoparc de Digne présente un objet géologique unique : le Vélodrôme
- Quel est l'âge de la mise en place de la nappe et son épaisseur ?



Schwartz et al. (2017)

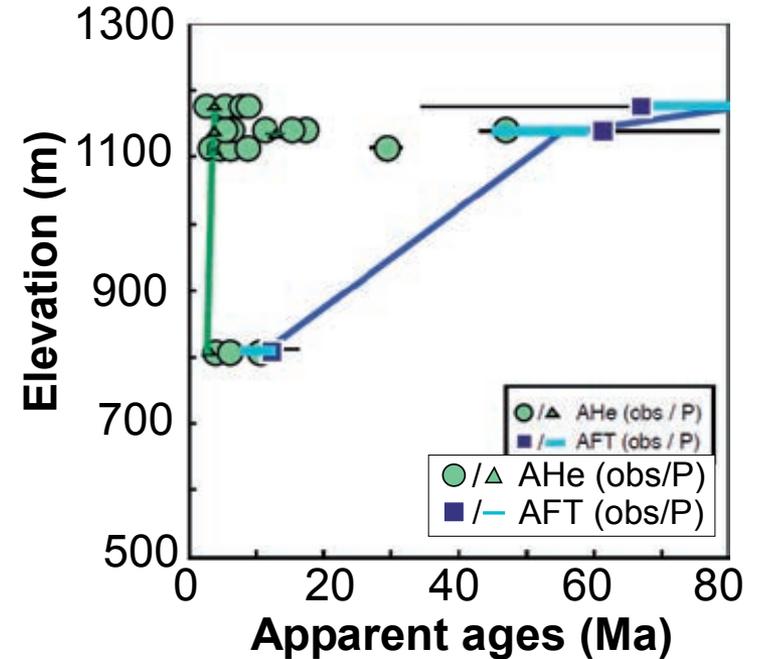
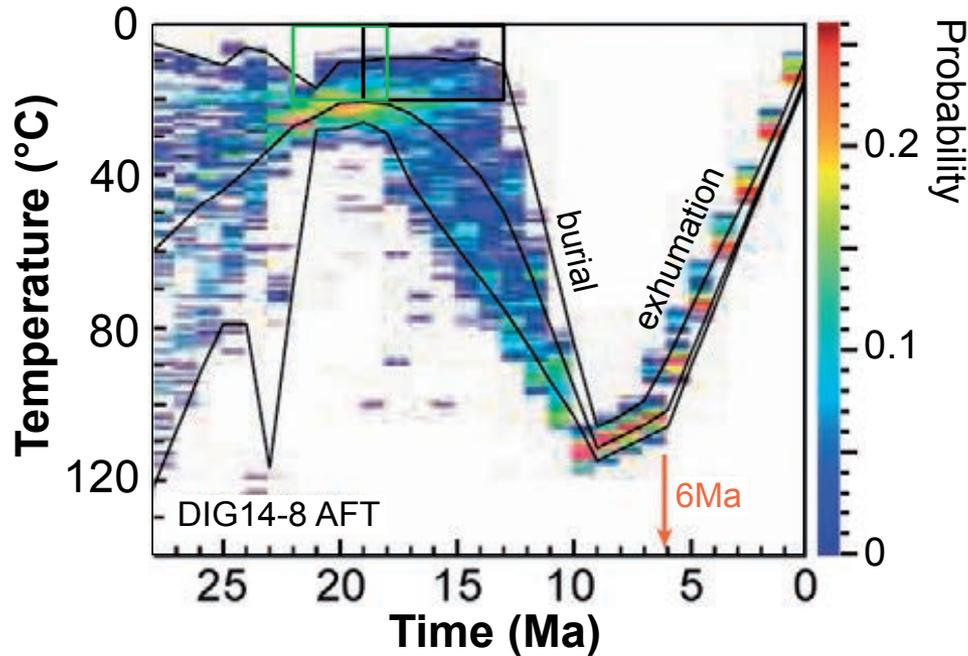
Quantification de l'histoire géologique d'une roche



Schwartz et al. (2017)

- Utilisation de la méthode (U-Th)/He sur apatite ($T_{\text{fermeture}} = 60-100^{\circ}\text{C}$)

Utilisation de code d'inversion des données (U-Th)/He

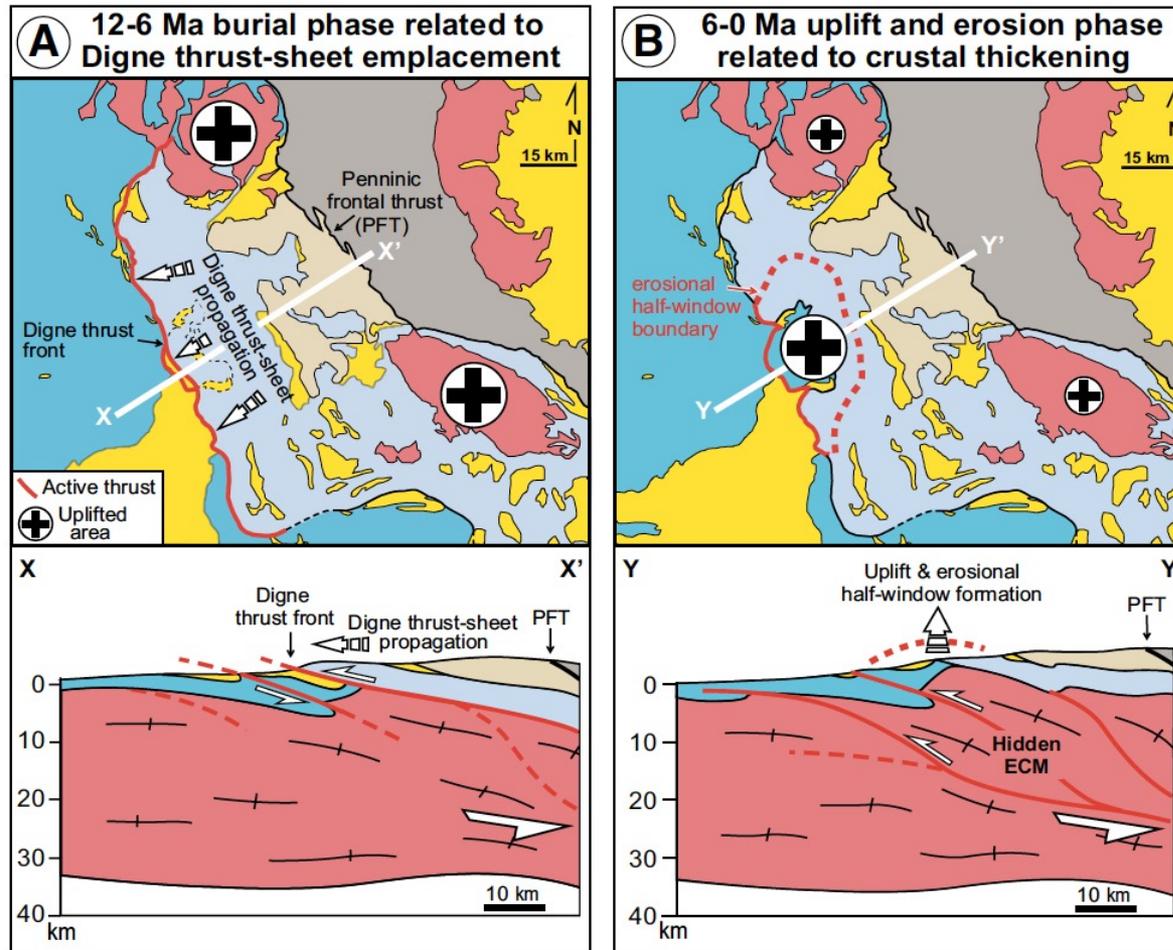


Schwartz et al. (2017)

Simulation QTQt (Gallagher, 2012), avec le code de Flowers et al. (2009)

- Nappe de Digne se met en place vers 12-13 Ma avec un épaisseur de ~3,5 km, puis est érodé à partir de 6 Ma

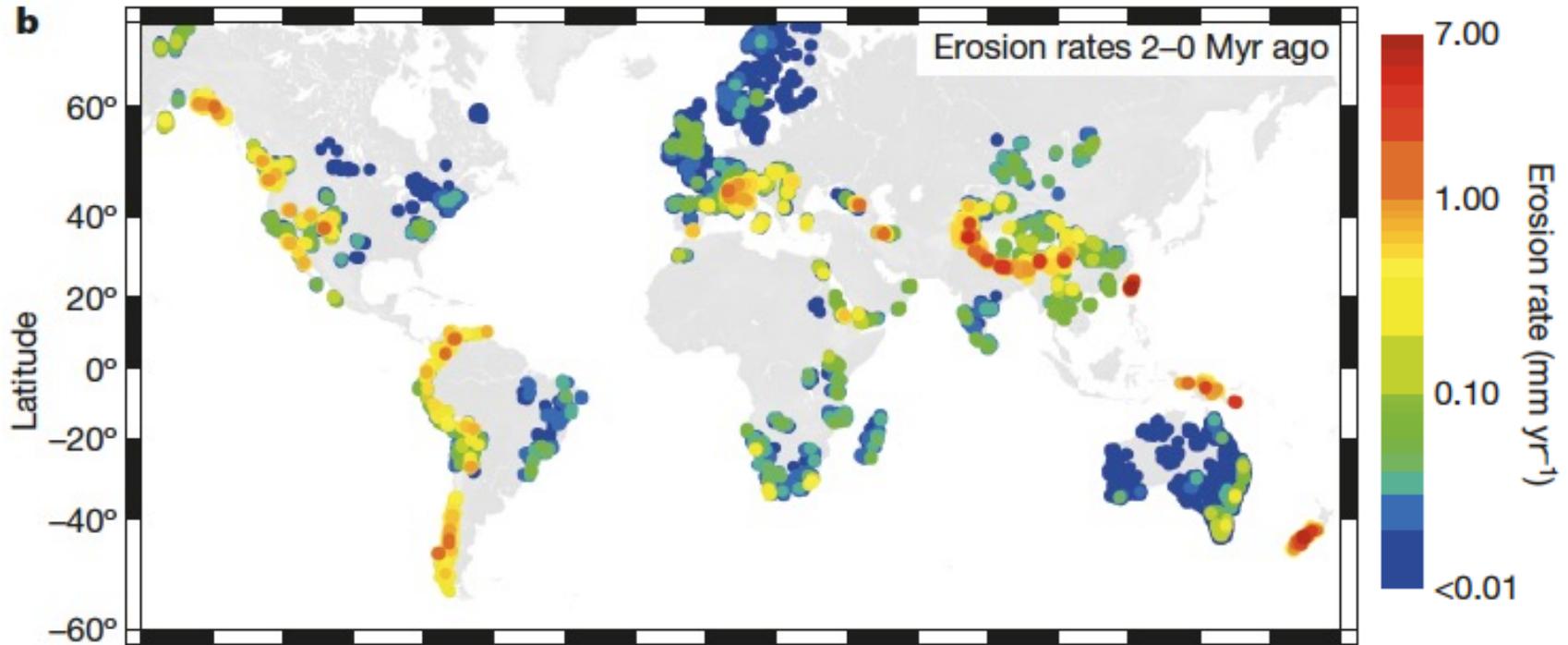
Reconstitution de l'histoire géologique du bassin d'avant-pays



Schwartz et al. (2020)

- Les données permettent de reconstituer une histoire géologique grande échelle depuis 12 Ma

Les données thermochronologiques mondiales



Herman et al. (2003)

- La compilation des données thermochronologiques à l'échelle mondiale, permet de reconstituer les zones où les taux d'érosion sont les plus forts

Conclusions

- Le Géosciences s'appuient sur des compétences pluridisciplinaires, de la physique, chimie à la biologie
- Pour comprendre l'évolution de notre Terre, des méthodes de datation relatives puis absolues ont été inventées
- il existe autant de méthodes de datation, que de processus géologiques à caractériser...
- La datation des roches et des minéraux permet de dater
 - Cristallisation des minéraux des roches : **géochronologie.**
 - Histoire thermique des roches : **thermochronologie.**

