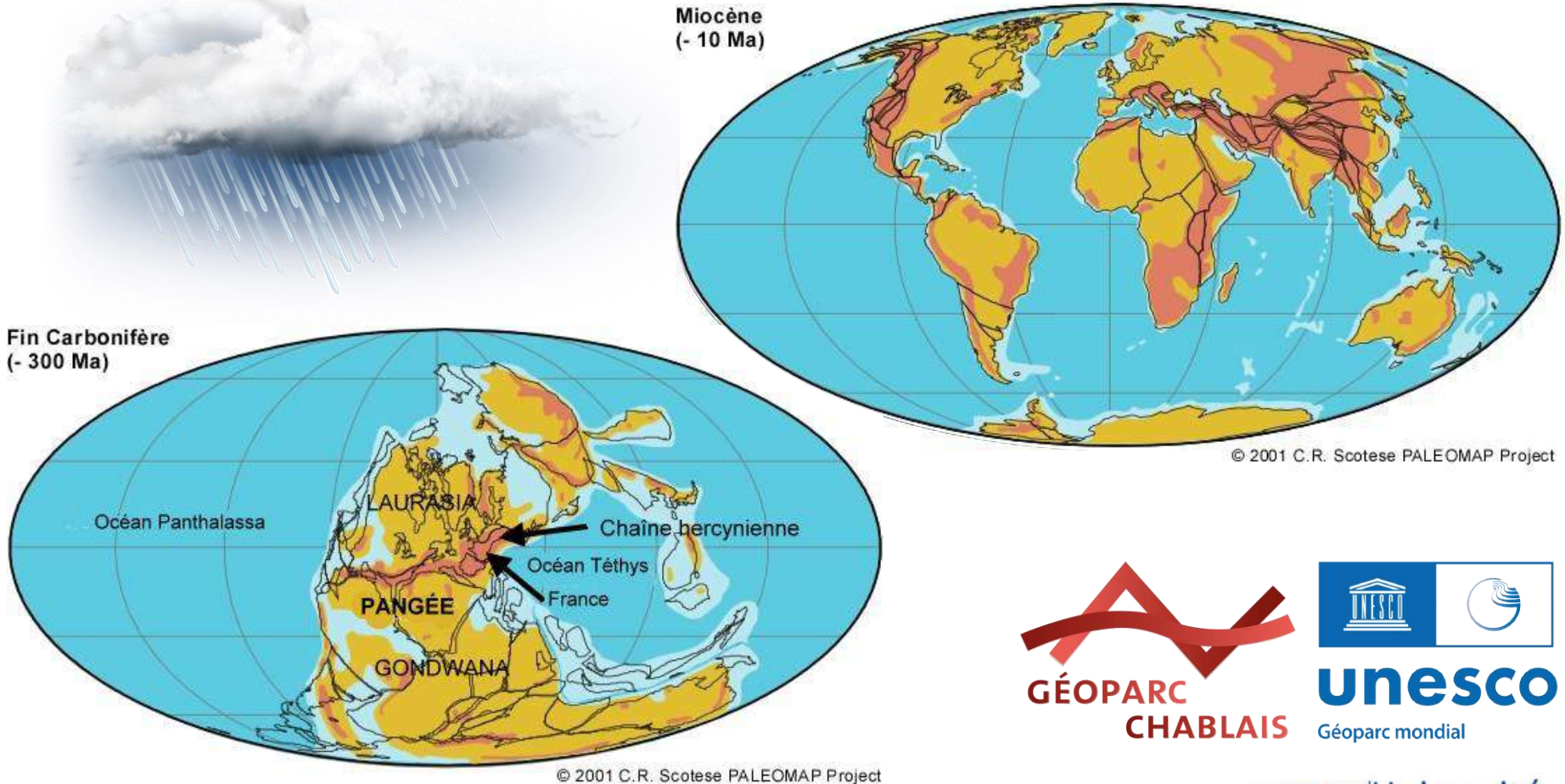
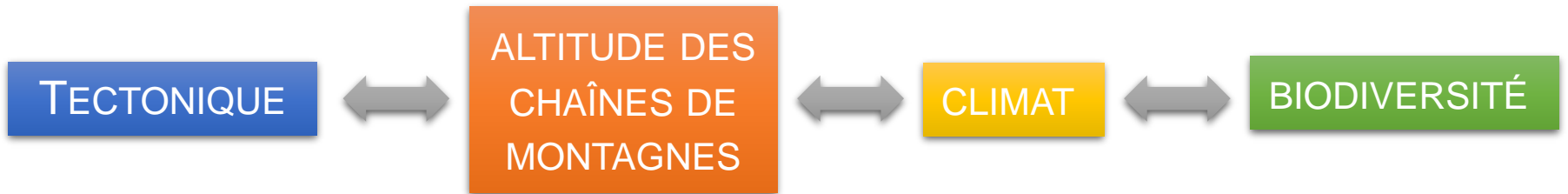


Comment des gouttes de pluie nous informent-elles sur la vie il y a des millions d'années ?

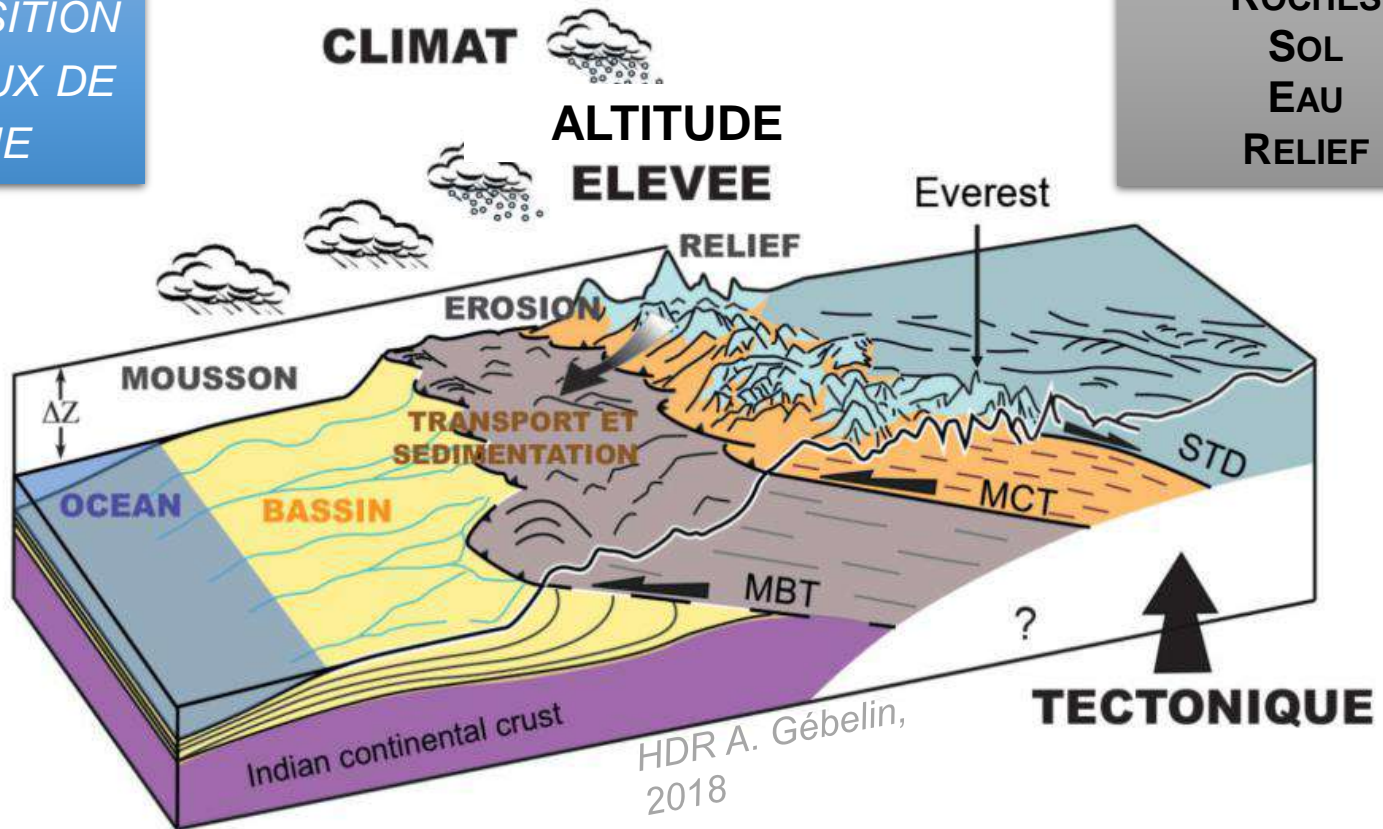


Pourquoi s'intéresser à l'altitude des chaînes de montagnes ?



COMPOSITION
DES EAUX DE
PLUIE

GEODIVERSITÉ
ROCHES
SOL
EAU
RELIEF



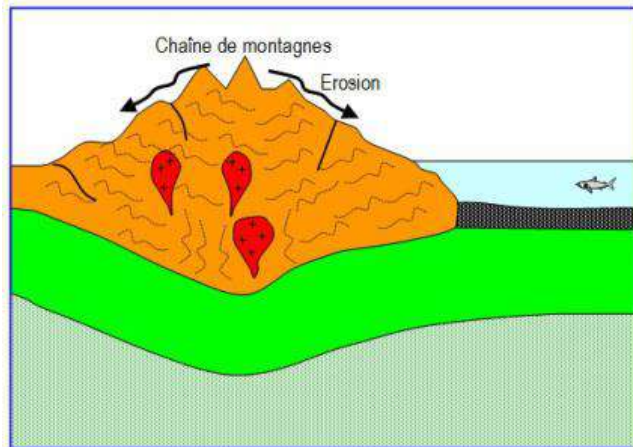
HDR A. Gébelin,
2018

Pourquoi s'intéresser à l'altitude des chaînes de montagnes ?

TECTONIQUE

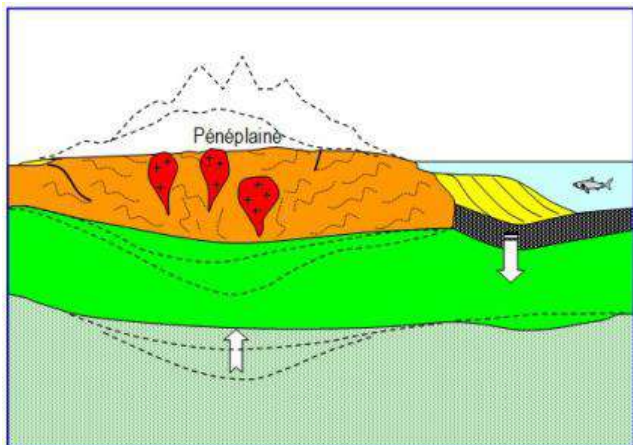


ALTITUDE DES
CHAÎNES DE
MONTAGNES

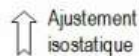


Lithosphère

Asthénosphère



Subsidence



Ajustement
isostatique



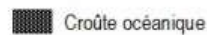
Sédiments



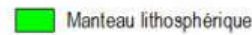
Croûte continentale



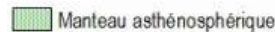
Roches plutoniques : granites, ...



Croûte océanique

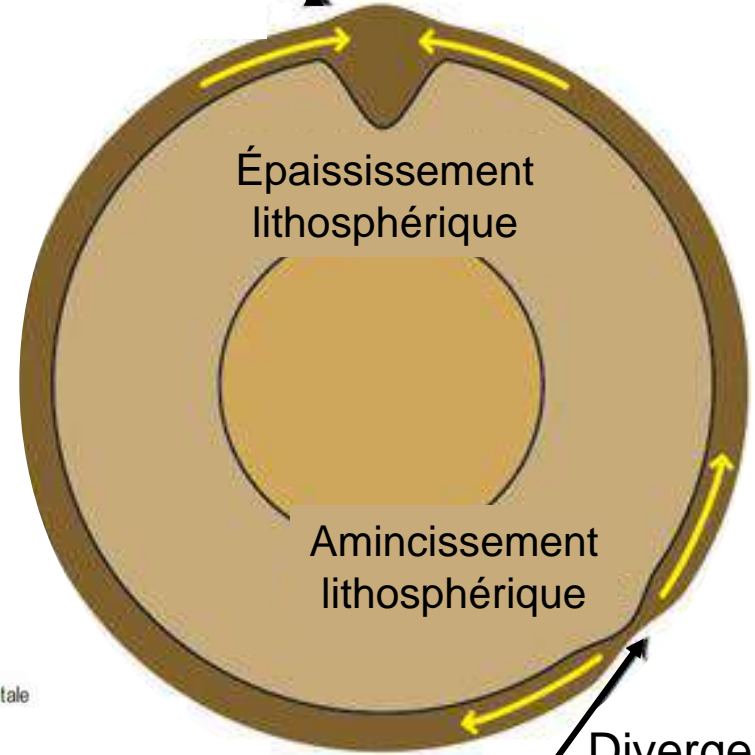


Manteau lithosphérique



Manteau asthénosphérique

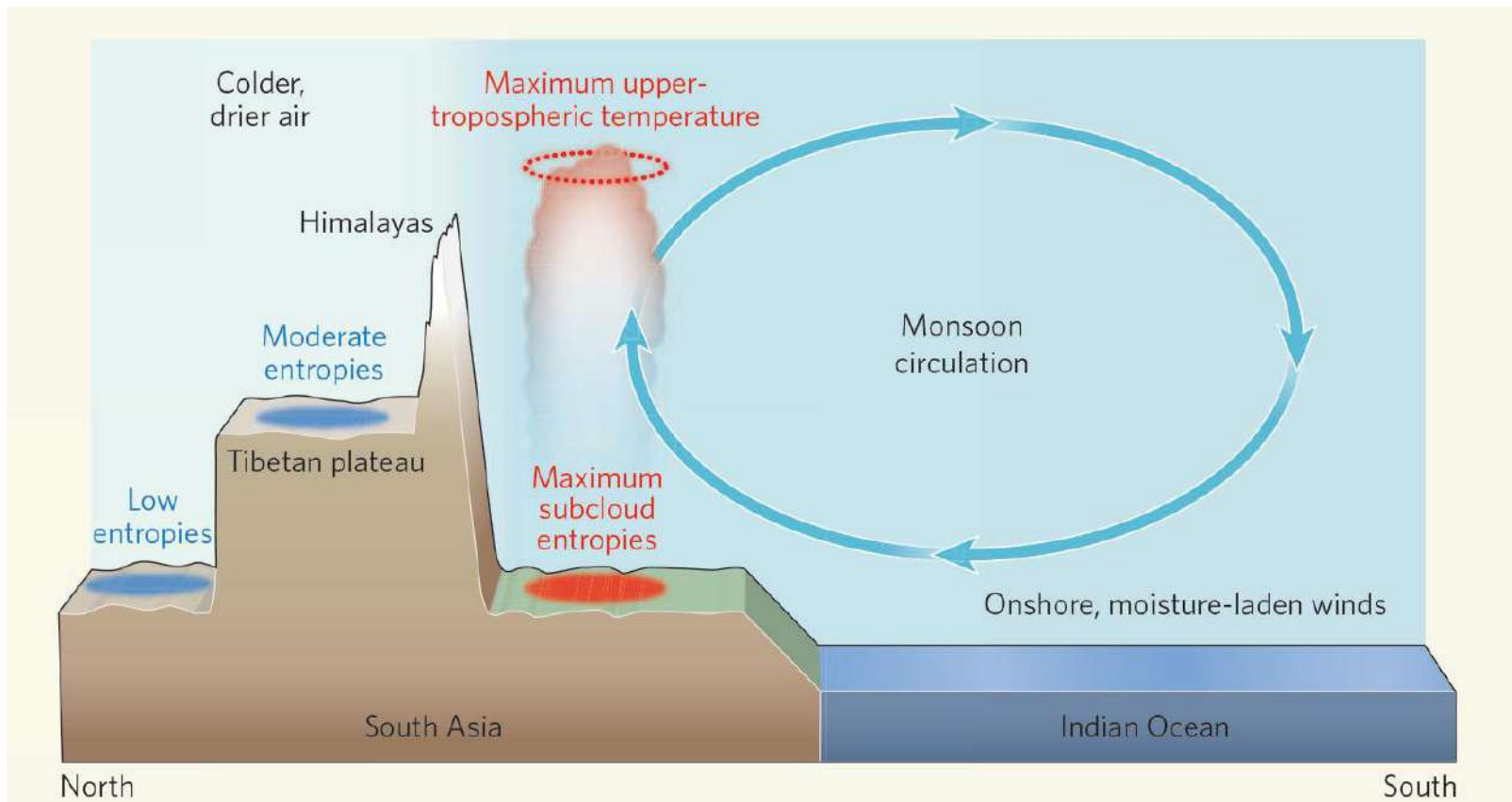
Convergence de plaques
lithosphériques
*Topographie
positive*



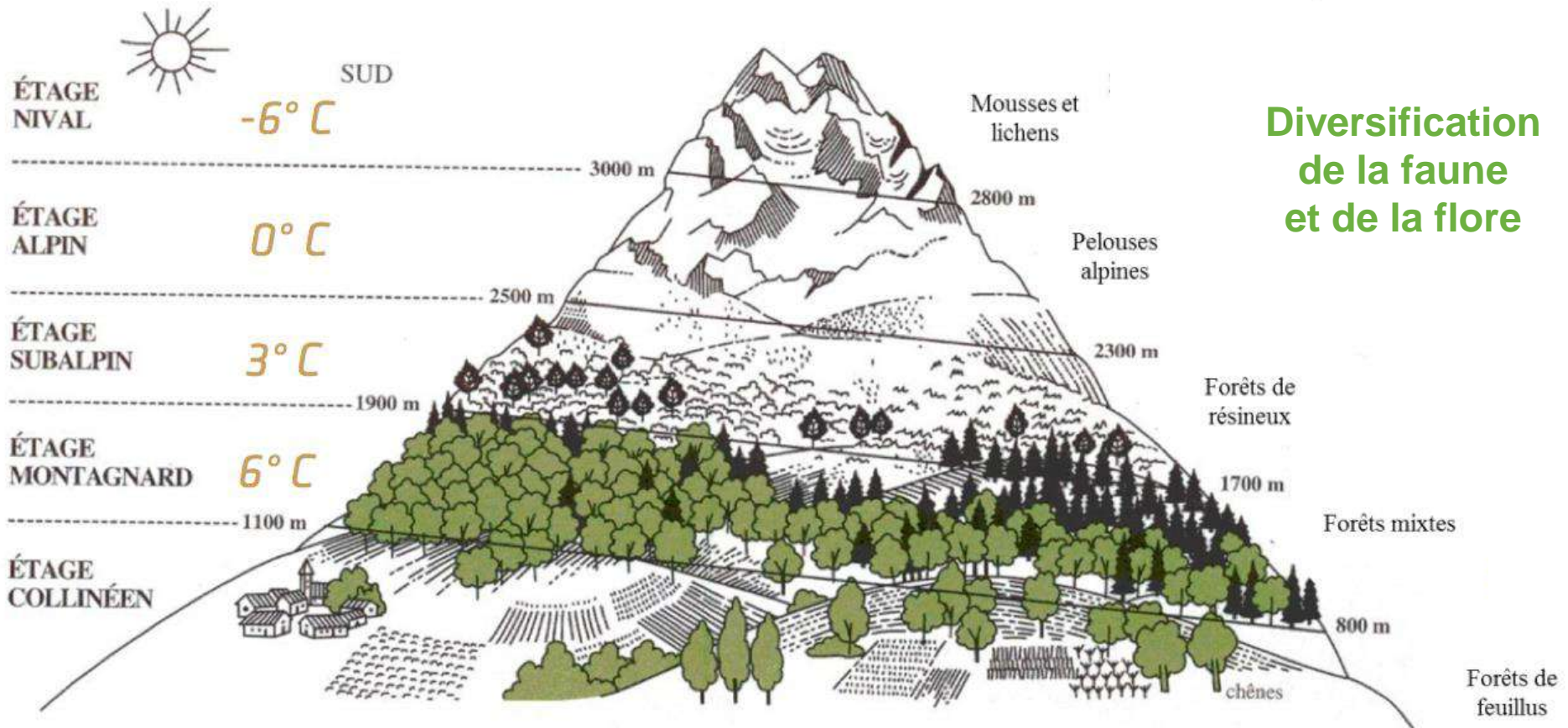
Divergence
de plaques

*Topographie
négative*

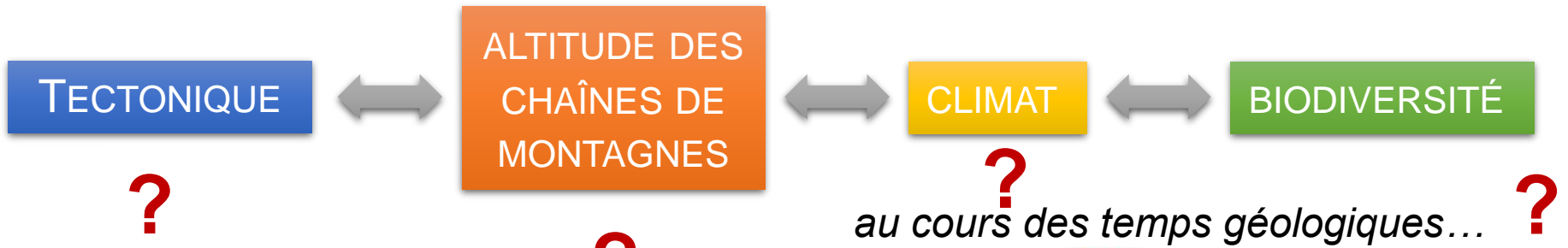
Pourquoi s'intéresser à l'altitude des chaînes de montagnes ?



Pourquoi s'intéresser à l'altitude des chaînes de montagnes ?



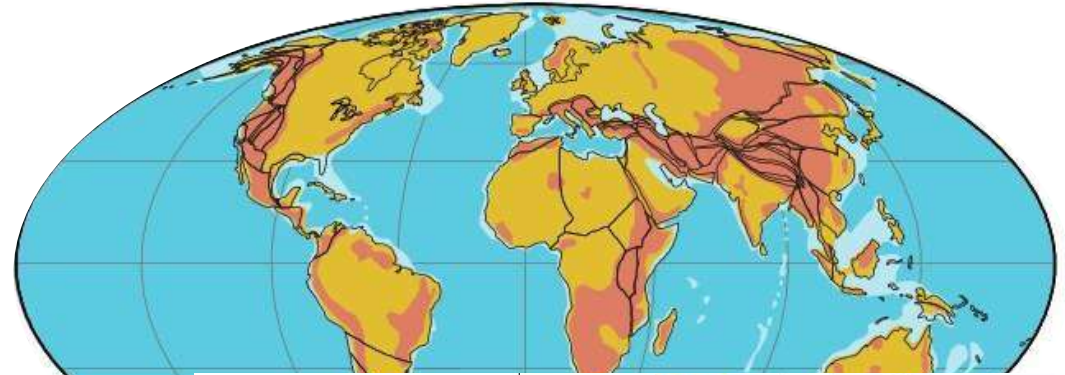
Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?



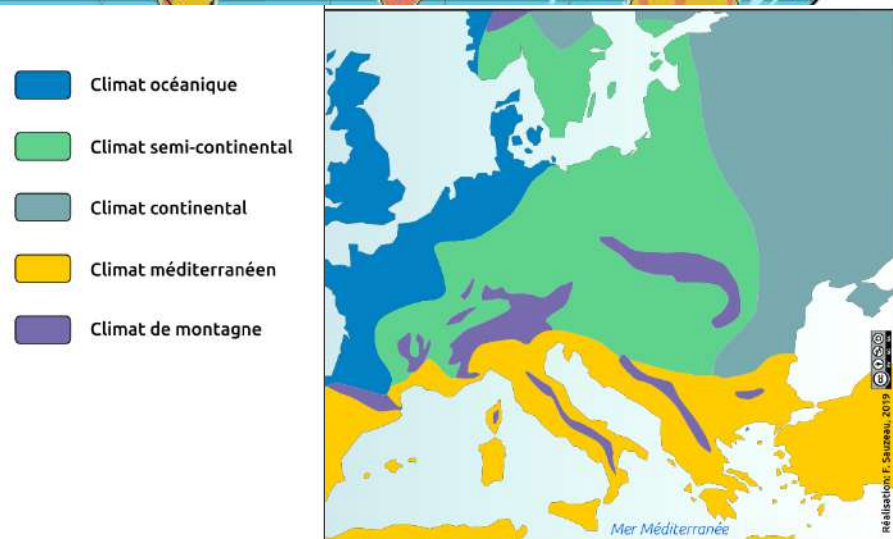
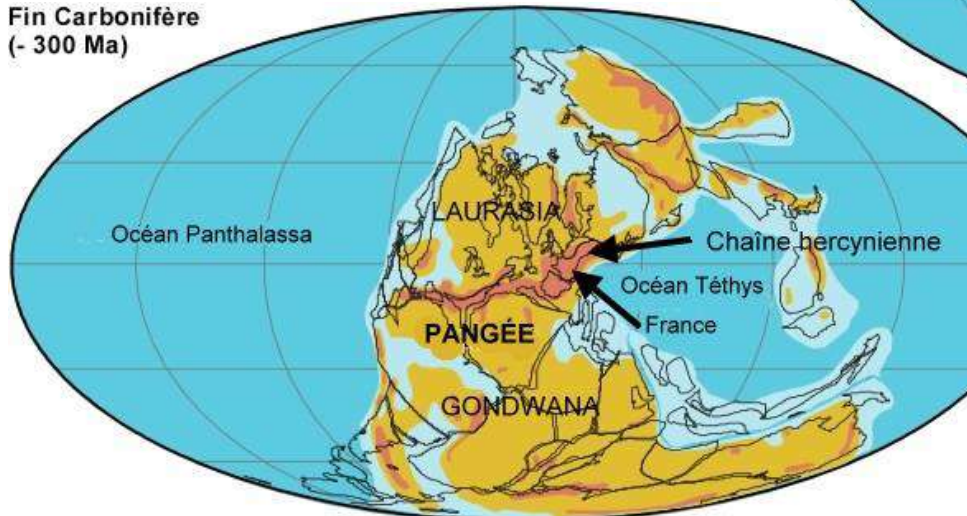
3^{ème} extinction

- 250 M années

-95% mer, -70% terre



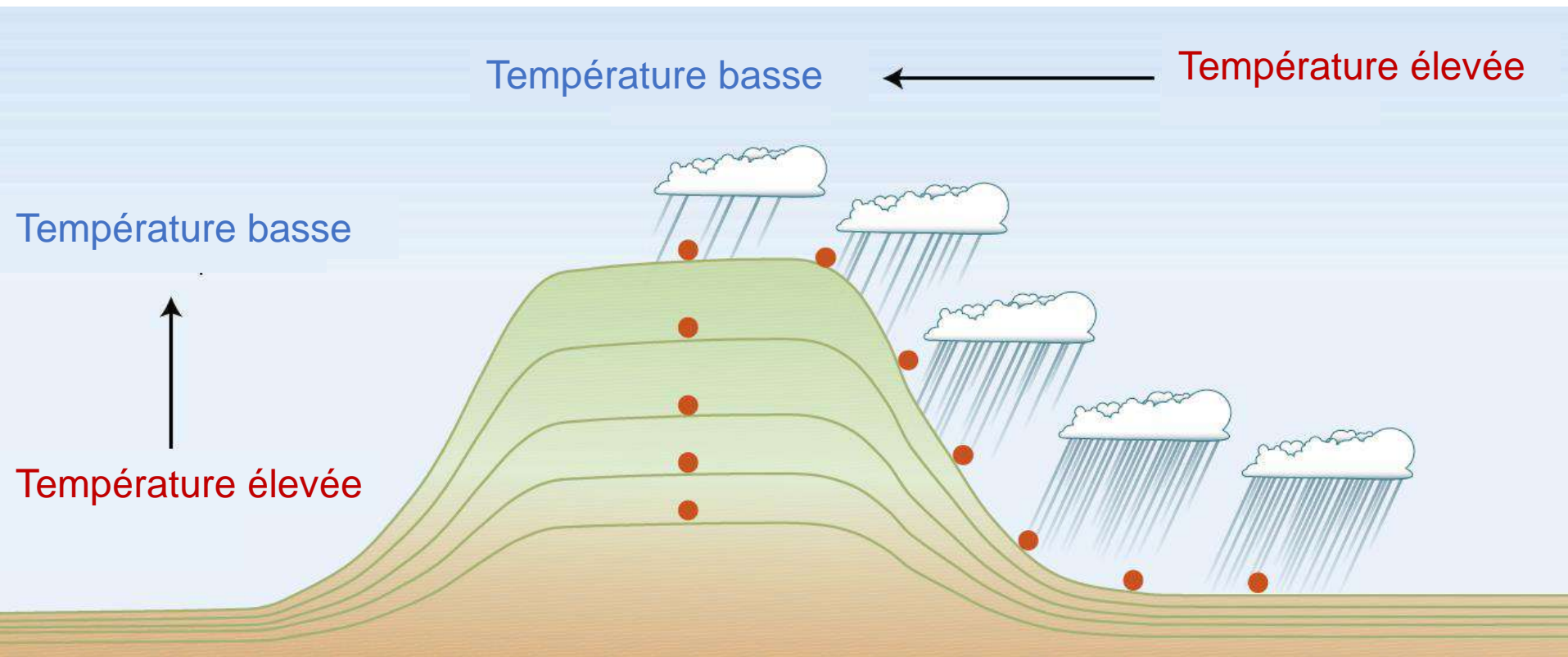
Fin Carbonifère (- 300 Ma)



Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

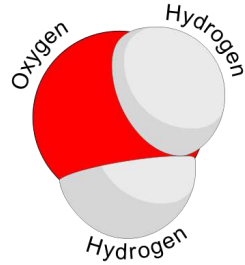
METHODE DE RECONSTITUTION PALEOALTIMETRIQUE
PAR L'UTILISATION DES ISOTOPES STABLES

Température : -6.5 °C pour 1 km d'altitude

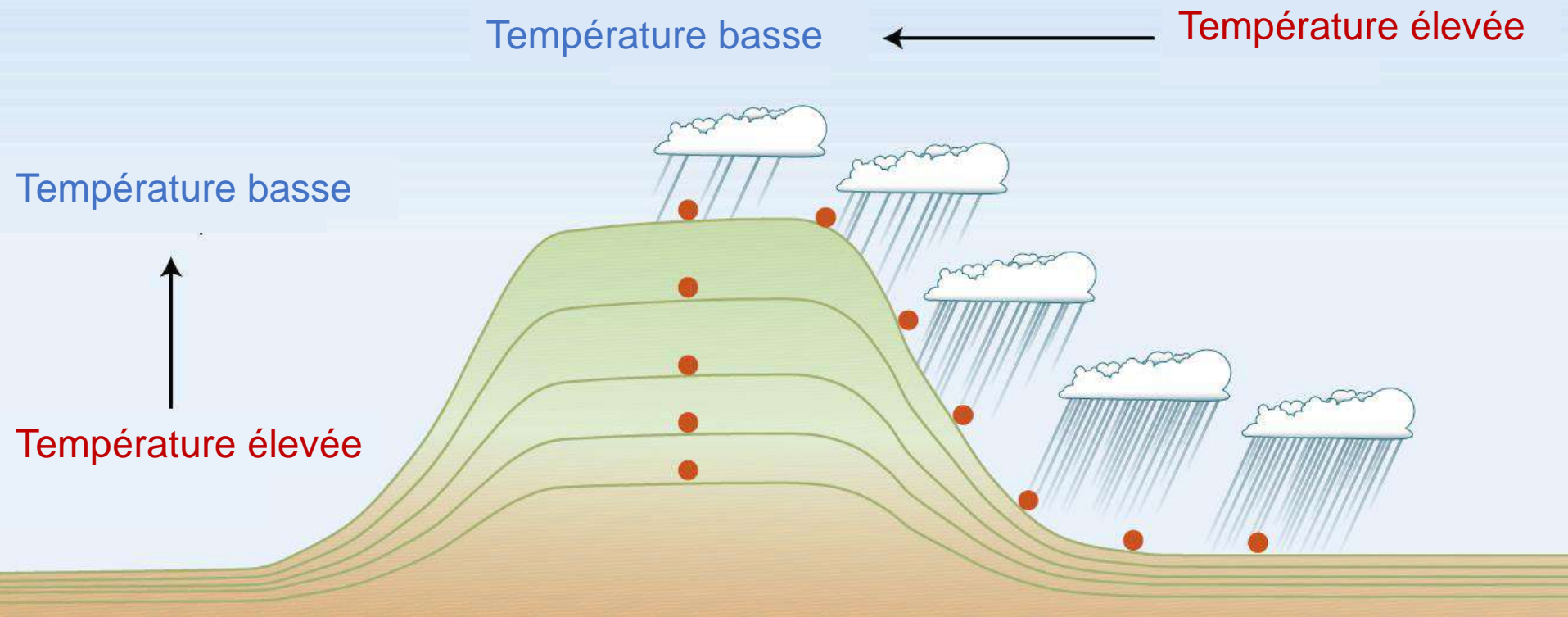


Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

METHODE DE RECONSTITUTION PALEOALTIMETRIQUE
PAR L'UTILISATION DES ISOTOPES STABLES

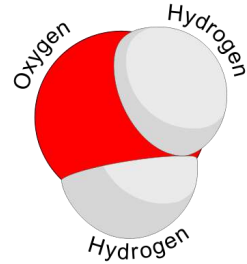


Composition isotopique des eaux de pluie ↔ Altitude



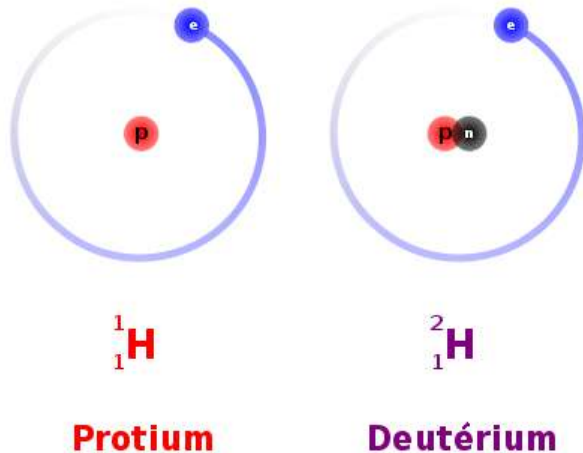
Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

METHODE DE RECONSTITUTION PALEOALTIMETRIQUE
PAR L'UTILISATION DES ISOTOPES STABLES

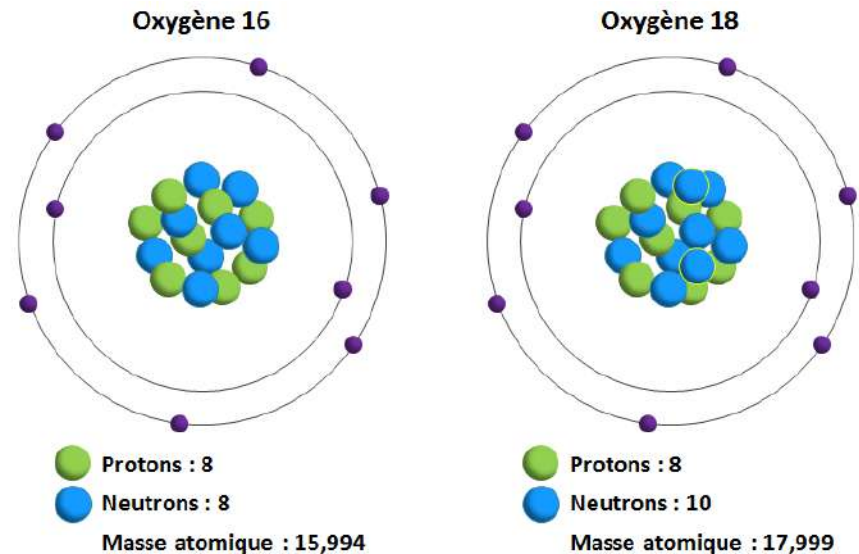


Isotopes d'un élément : même nombre de protons
mais **nombre de neutrons différent**

Les isotopes de l'hydrogène



Les isotopes de l'oxygène

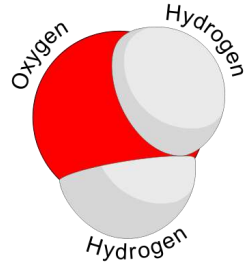


$$\delta D \approx {}^2\text{H} / {}^1\text{H}$$

$$\delta^{18}\text{O} \approx {}^{18}\text{O} / {}^{16}\text{O}$$

Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

METHODE DE RECONSTITUTION PALEOALTIMETRIQUE
PAR L'UTILISATION DES ISOTOPES STABLES



Composition isotopique des eaux de pluie ↔ Altitude

$$\delta^{18}\text{O} \approx -2.8 \text{ ‰/km}$$

$$\delta\text{D} \approx -22 \text{ ‰/km}$$

Température basse
 $\delta^{18}\text{O}$ et δD faibles

Température élevée
 $\delta^{18}\text{O}$ et δD élevés

Température basse

Température élevée

Différence
d'altitude

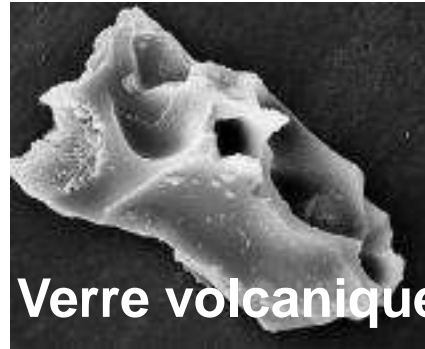
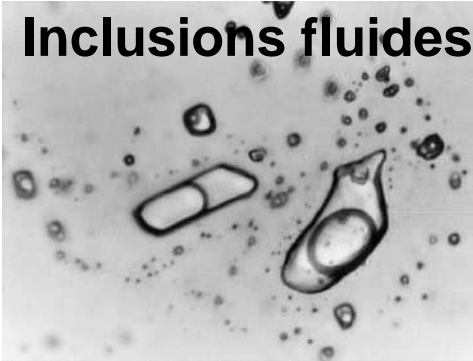
$$\delta^{18}\text{O} \approx \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}$$

$$\delta\text{D} \approx \frac{^2\text{H}}{^1\text{H}}$$

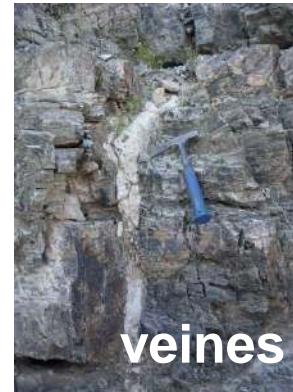
Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?

Inclusions fluides



Verre volcanique



veines

**Carbonates
lacustres**



De l'eau de pluie...



Dents fossiles terrestres



Paléosols

Micas déformés

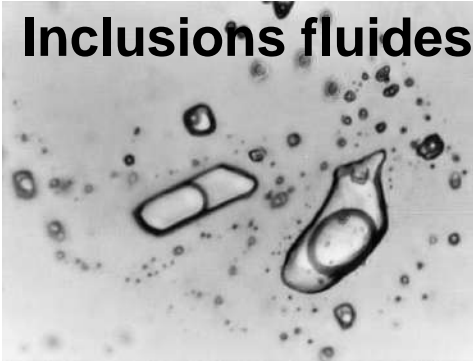


dans les failles

Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?

Inclusions fluides



Verre volcanique



veines



**Carbonates
lacustres**

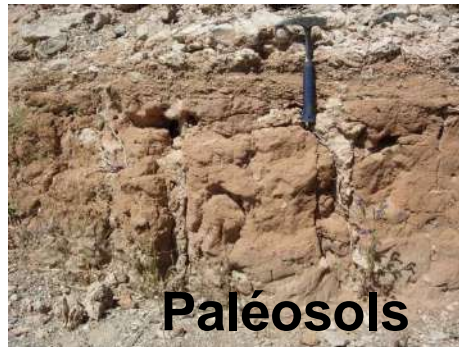


De l'eau de pluie... de plusieurs millions d'années !

**Minéraux
souvent trop
altérés !**

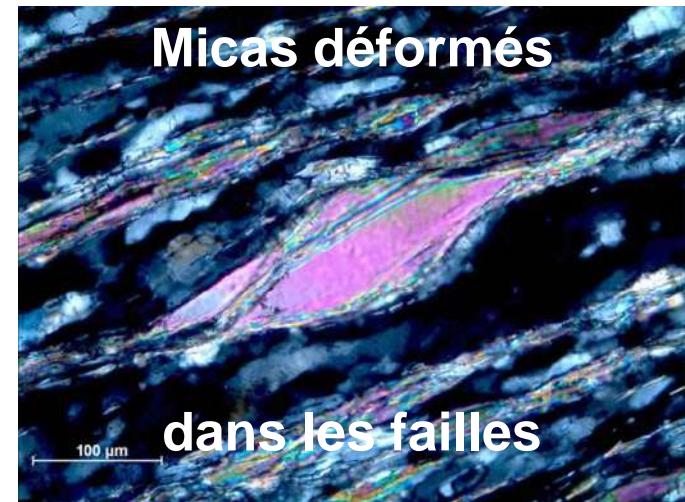


Dents fossiles terrestres



Paléosols

Micas déformés



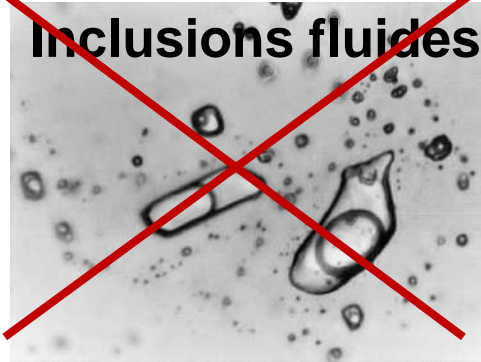
dans les failles

100 μ m

Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?

~~Inclusions fluides~~



~~Verre volcanique~~



~~veines~~



~~Carbonates lacustres~~

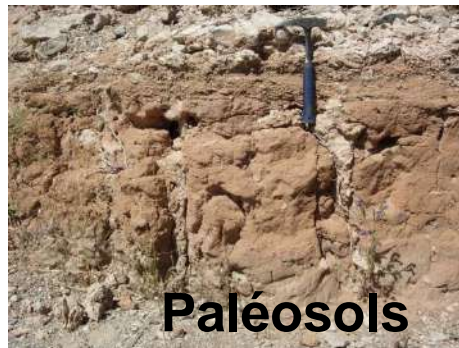


De l'eau de pluie... de plusieurs millions d'années !

Pas encore datables



Dents fossiles terrestres



Paléosols

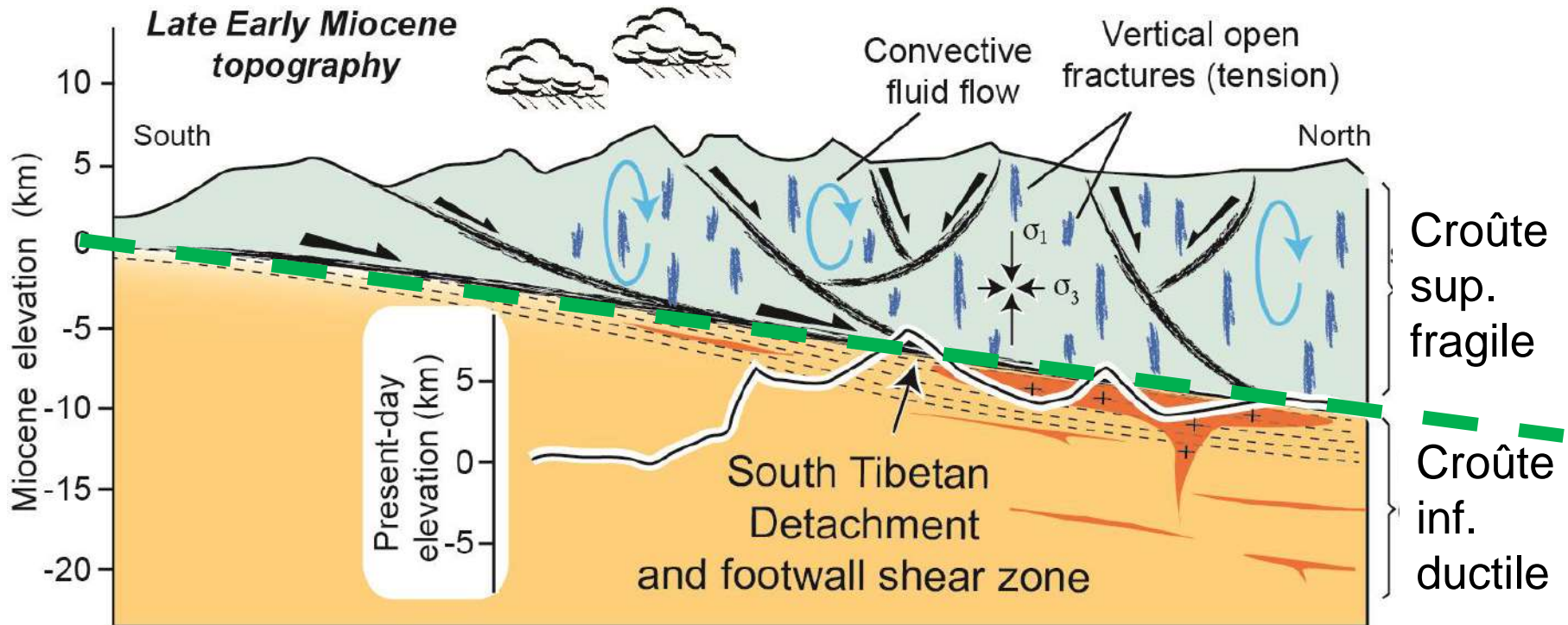
Micas déformés



dans les failles

Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?

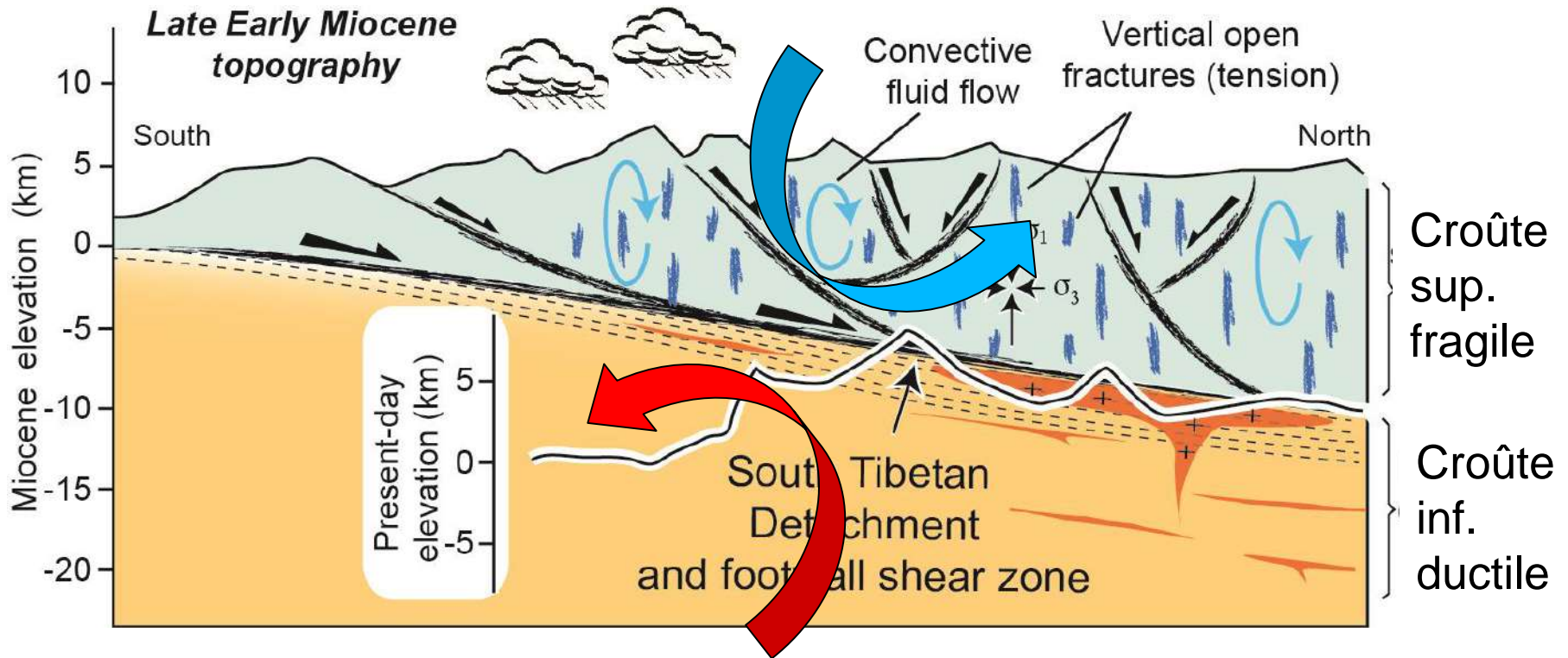


Failles d'échelle crustale :

Localisent la déformation et la circulation des fluides

Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?

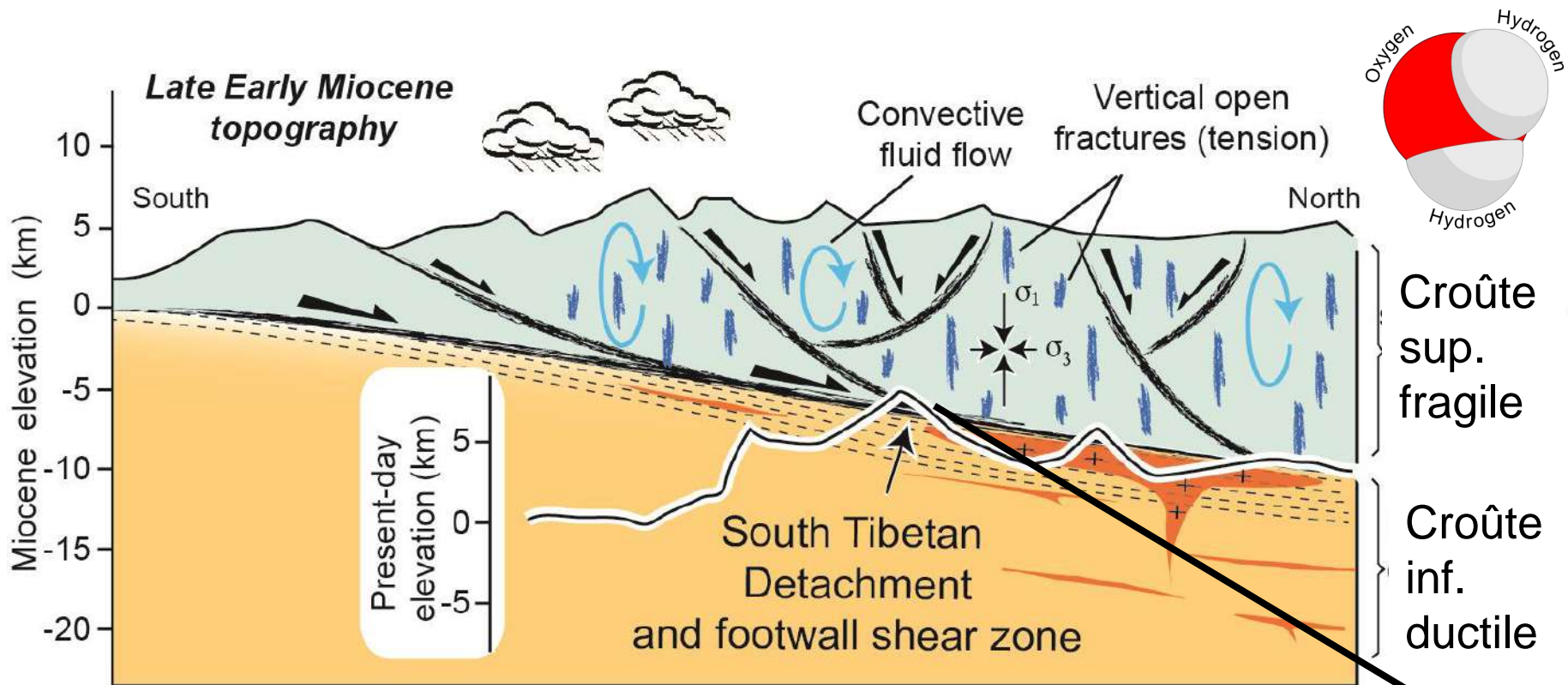


Failles d'échelle crustale :

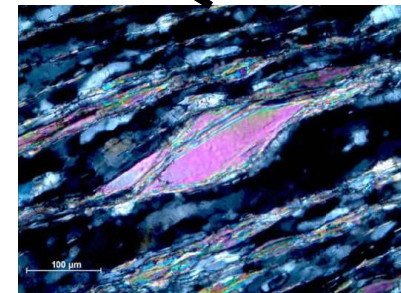
Interface où **fluides de surface** et **fluides profonds** se mélangent

Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?

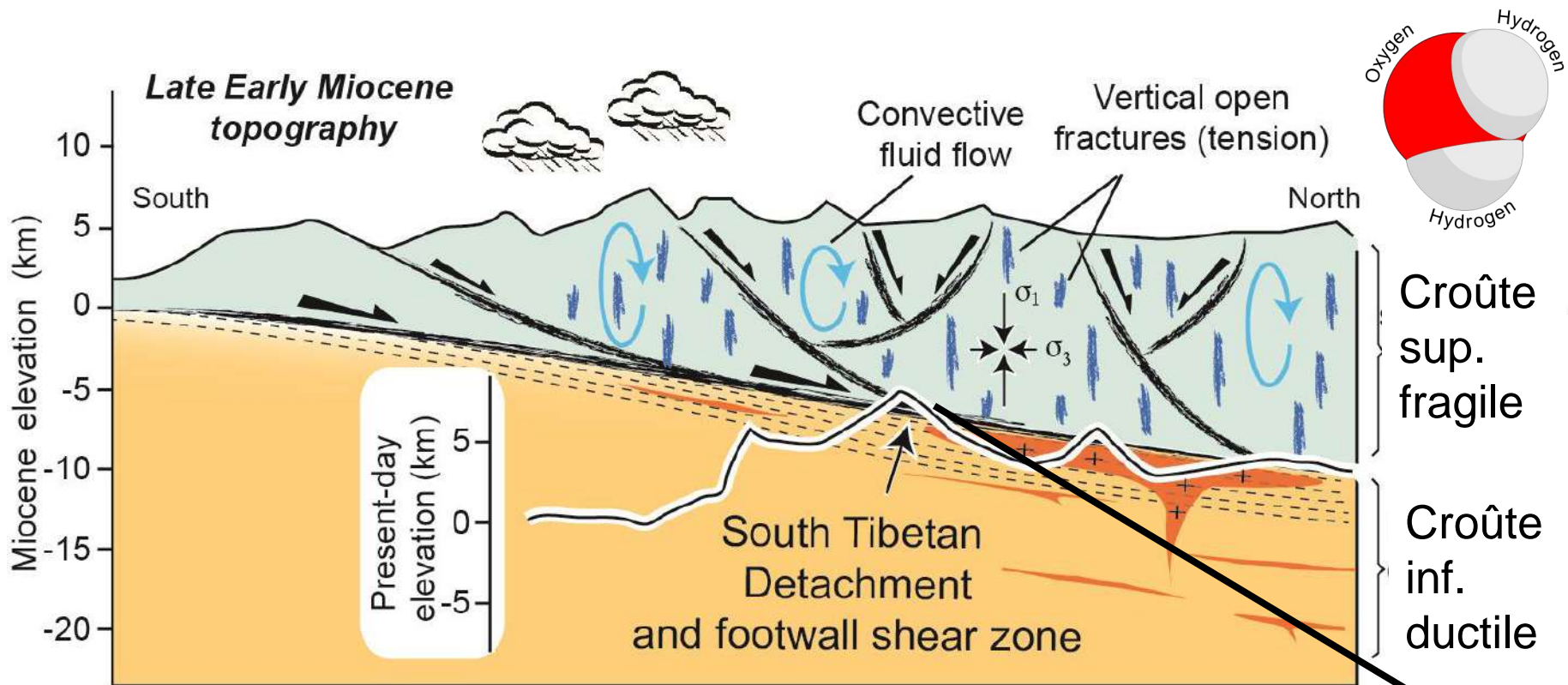


Les **fluides de surface** interagissent en profondeur avec des **minéraux hydratés déformés**.



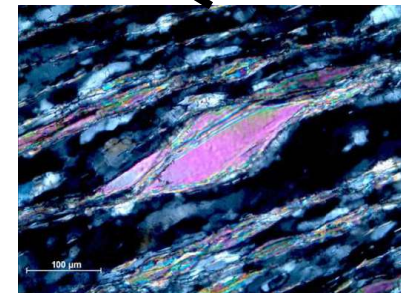
Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?



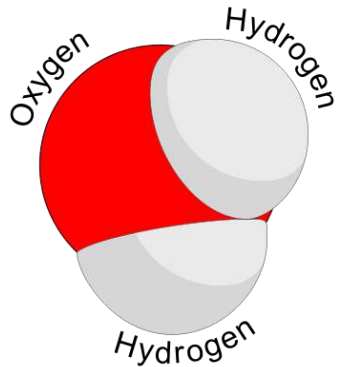
$\delta^{18}\text{O}$ = Ratio des isotopes de l'oxygène ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$)

δD = Ratio des isotopes de l'hydrogène ($^1\text{H}/^2\text{H}$ ou $^1\text{H}/\text{D}$)



Comment reconstituer l'altitude des chaînes de montagnes il y a plusieurs millions d'années ?

Où trouver des eaux de pluie dans l'enregistrement géologique ?



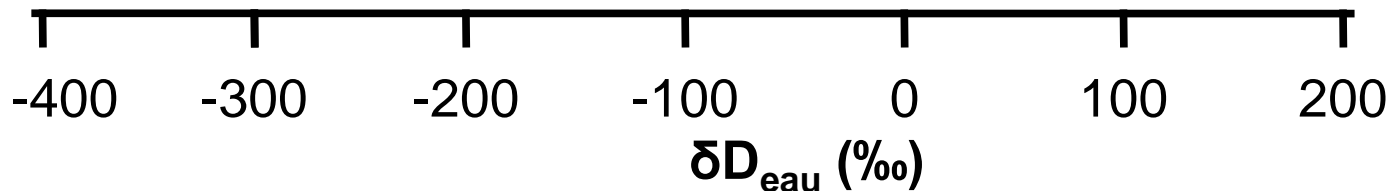
Eaux de pluie



Altitude +++

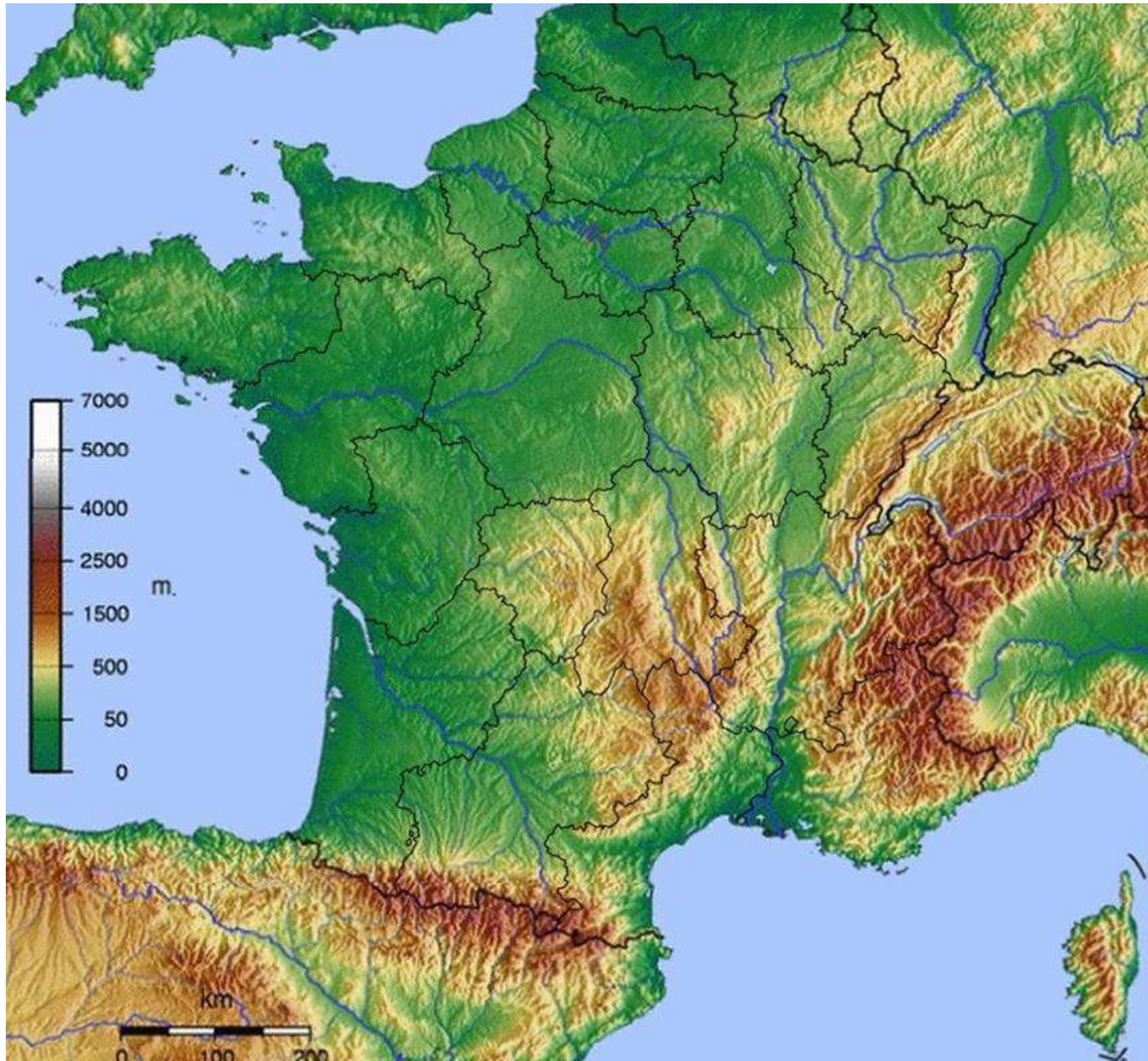
■ Océan

■ Fluides magmatiques et métamorphiques

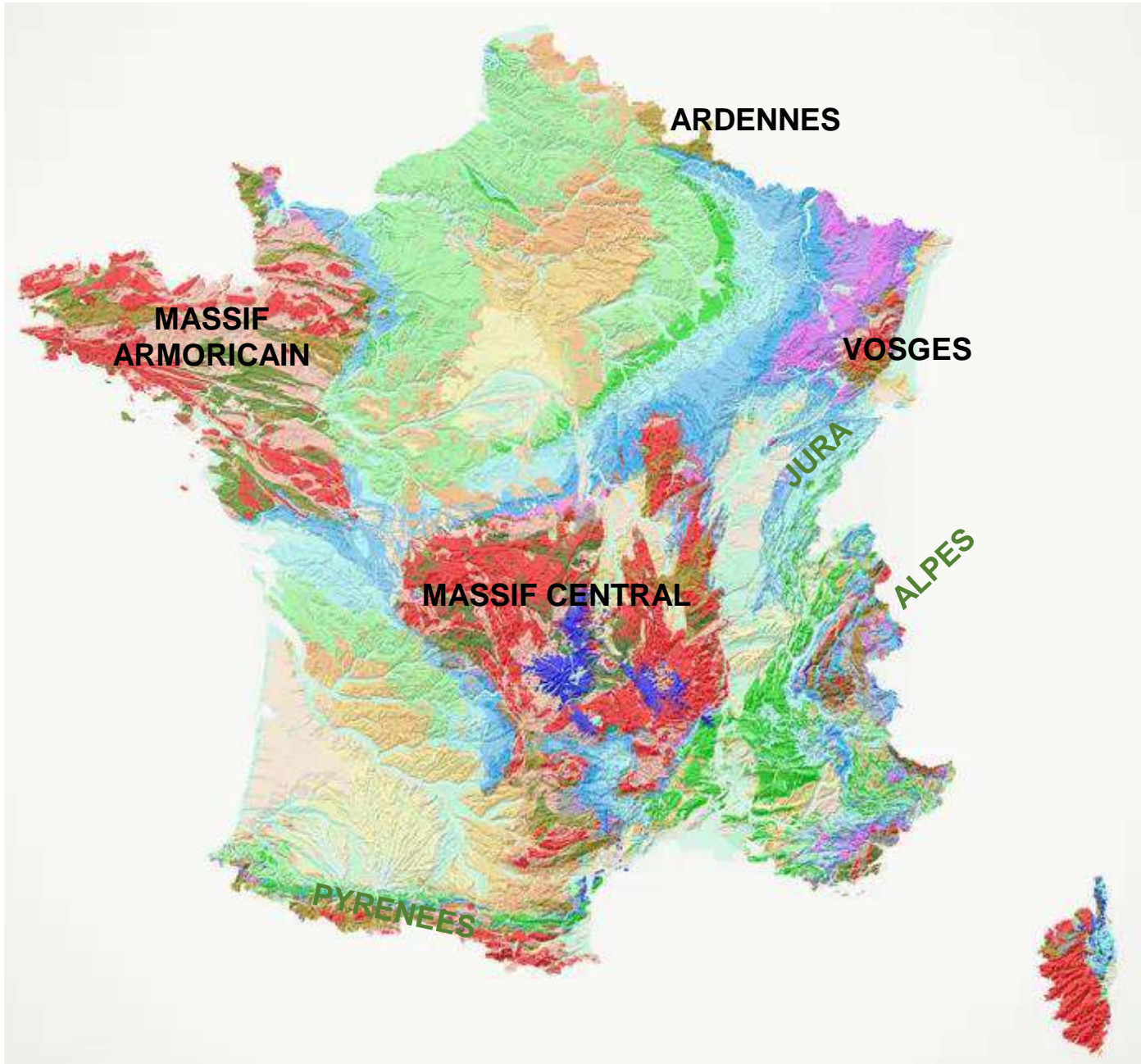


Composition isotopique en hydrogène
des principales eaux géologiques

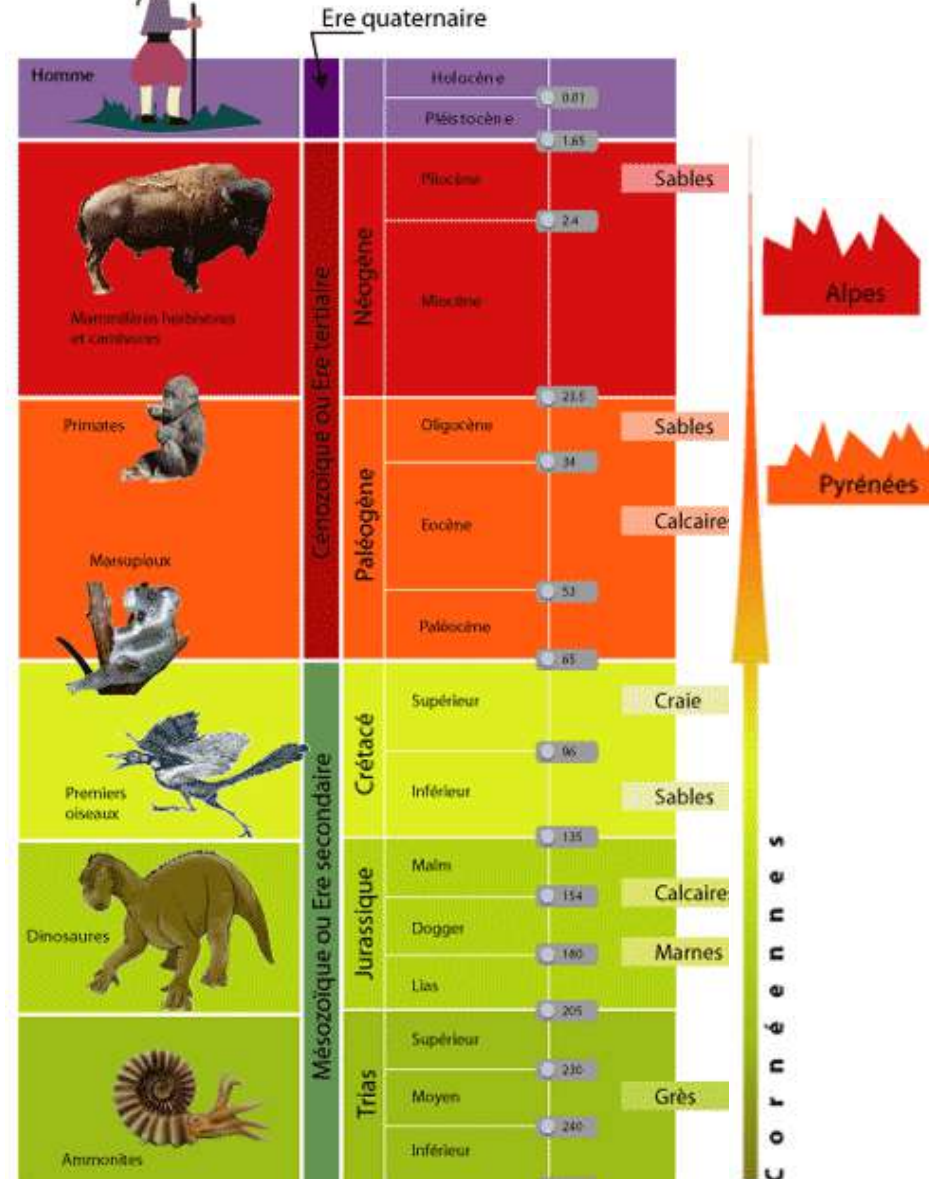
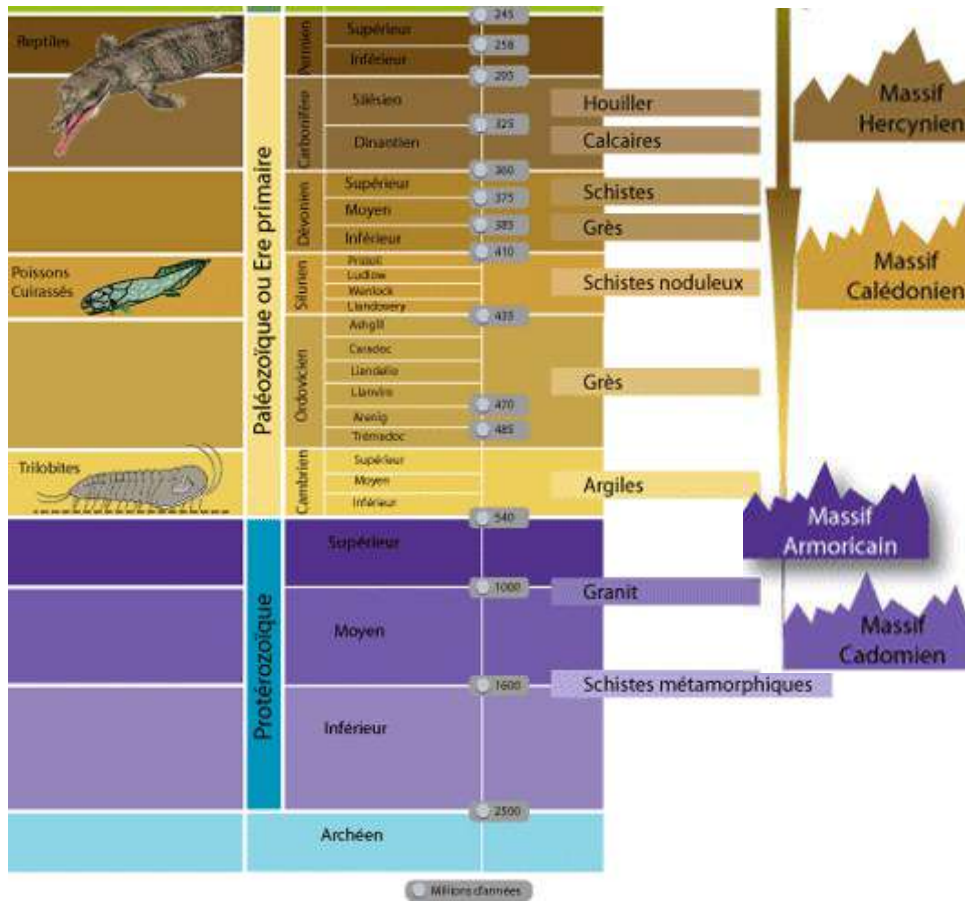
Les chaînes de montagnes en France



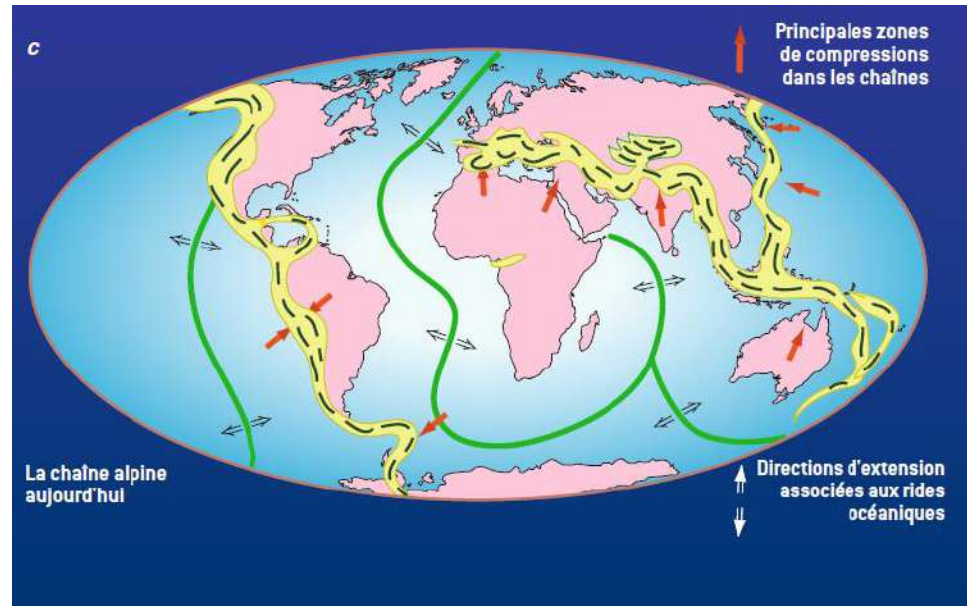
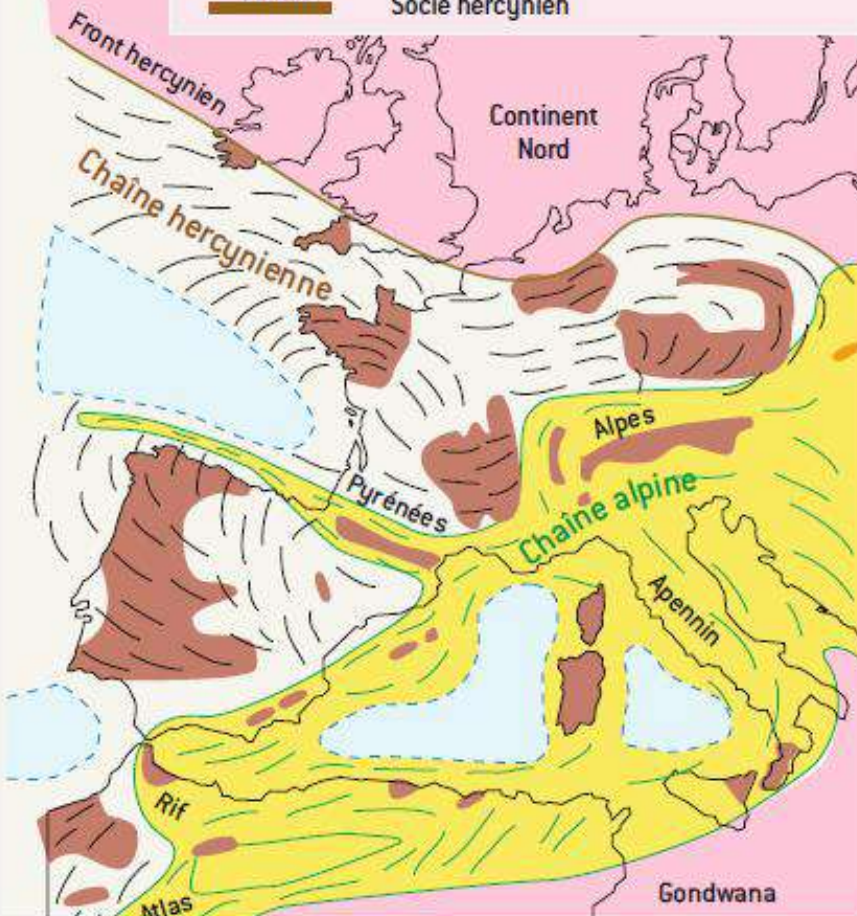
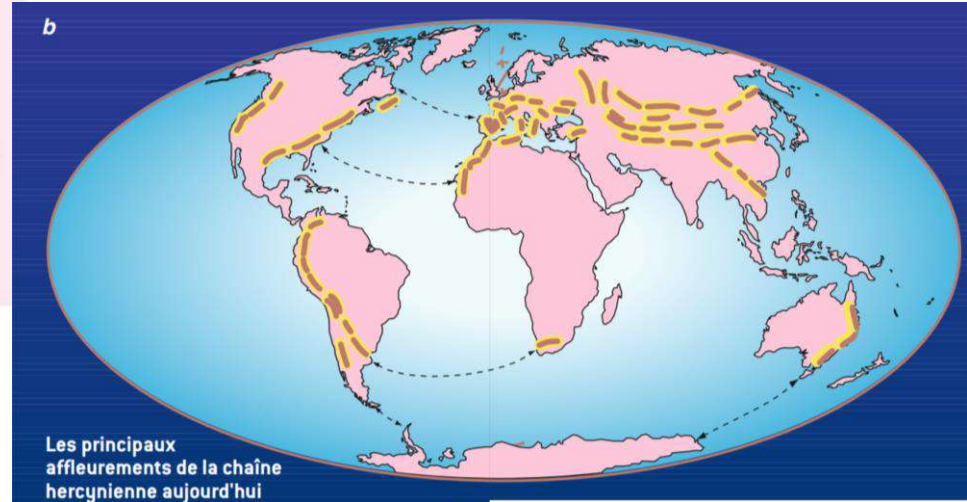
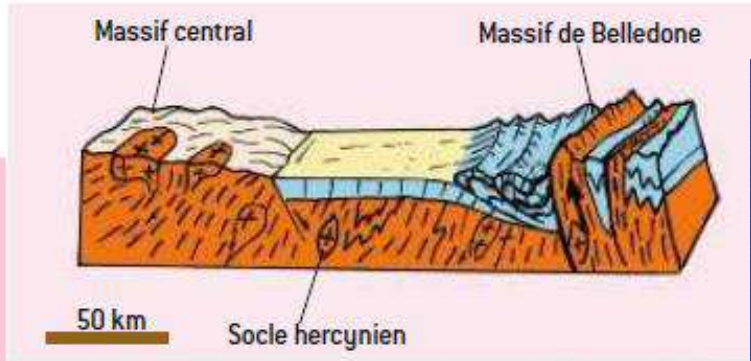
Les chaînes de montagnes en France



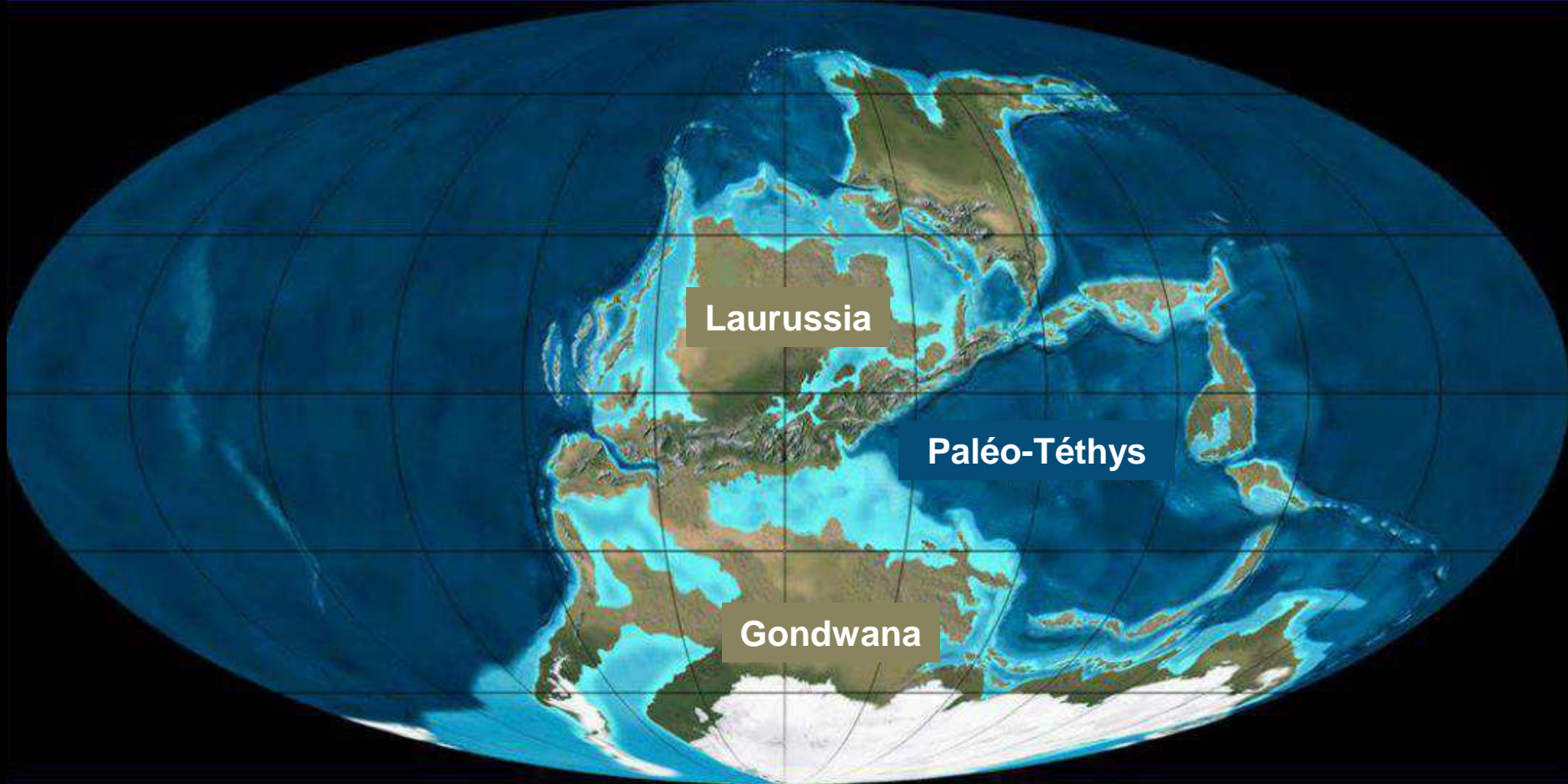
Les chaînes de montagnes en France



Les chaînes de montagnes en France

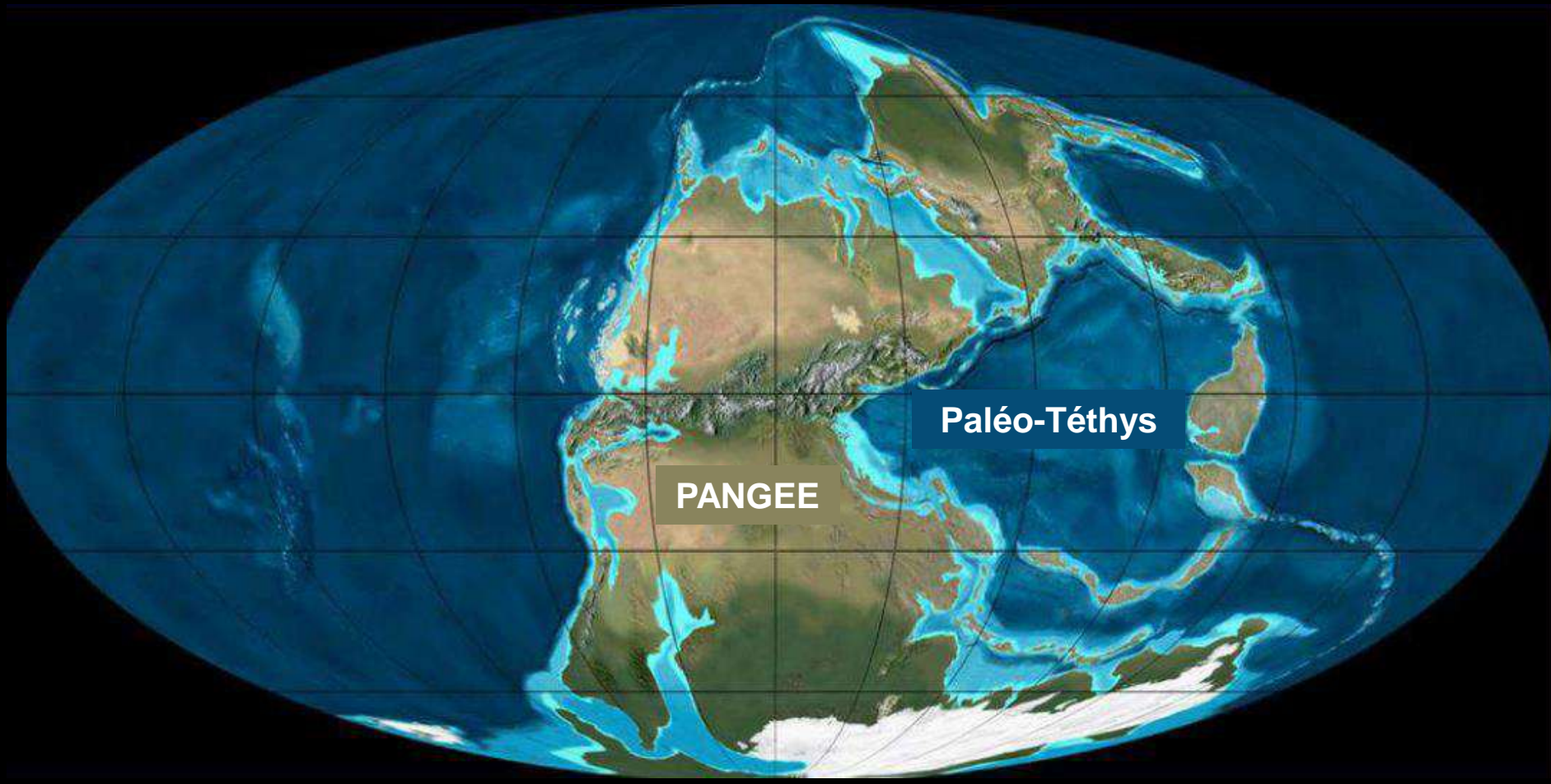


Chaîne Varisque



280 Ma

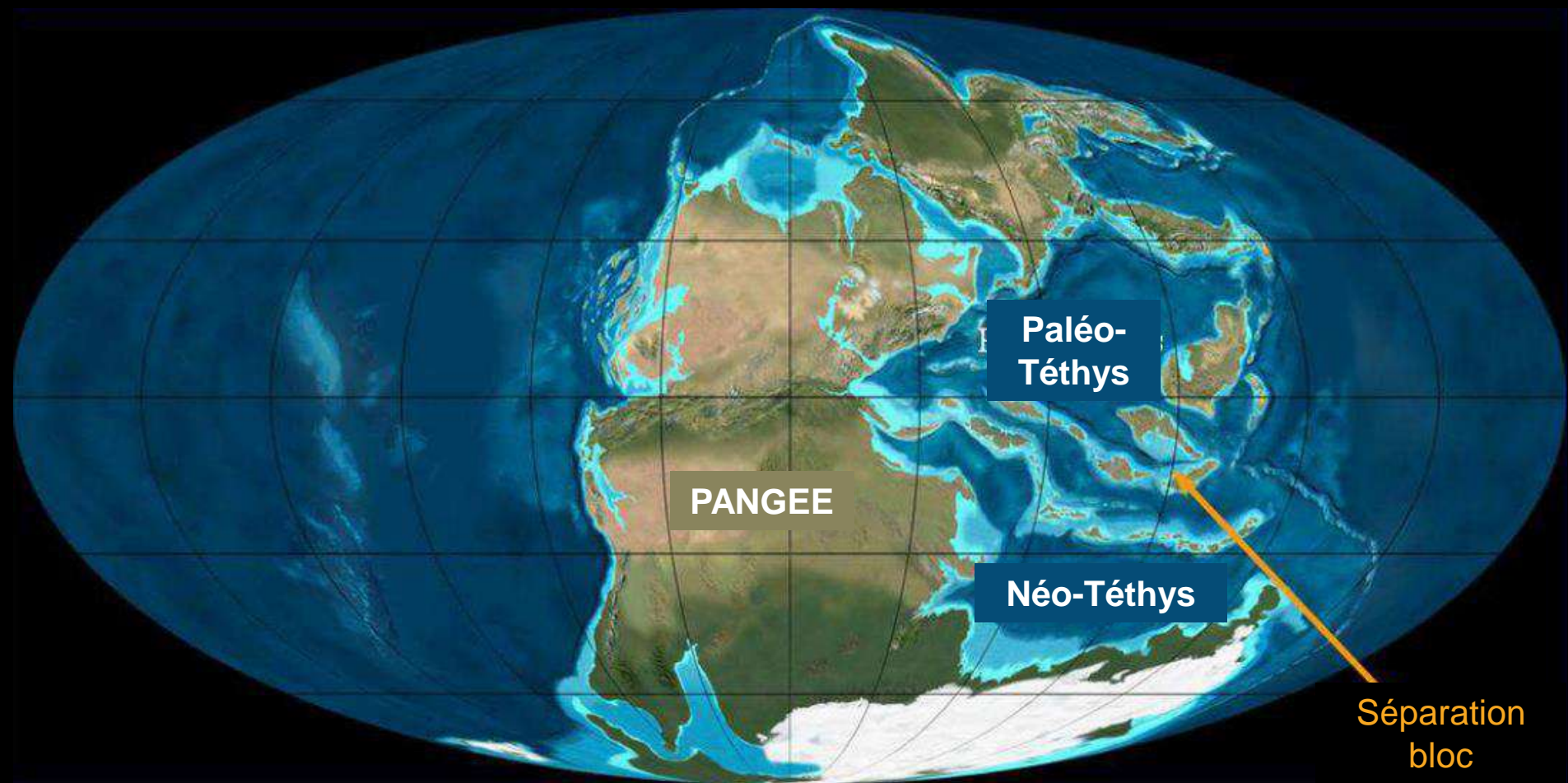
Pangée



PANGEE

Paléo-Téthys

260 Ma



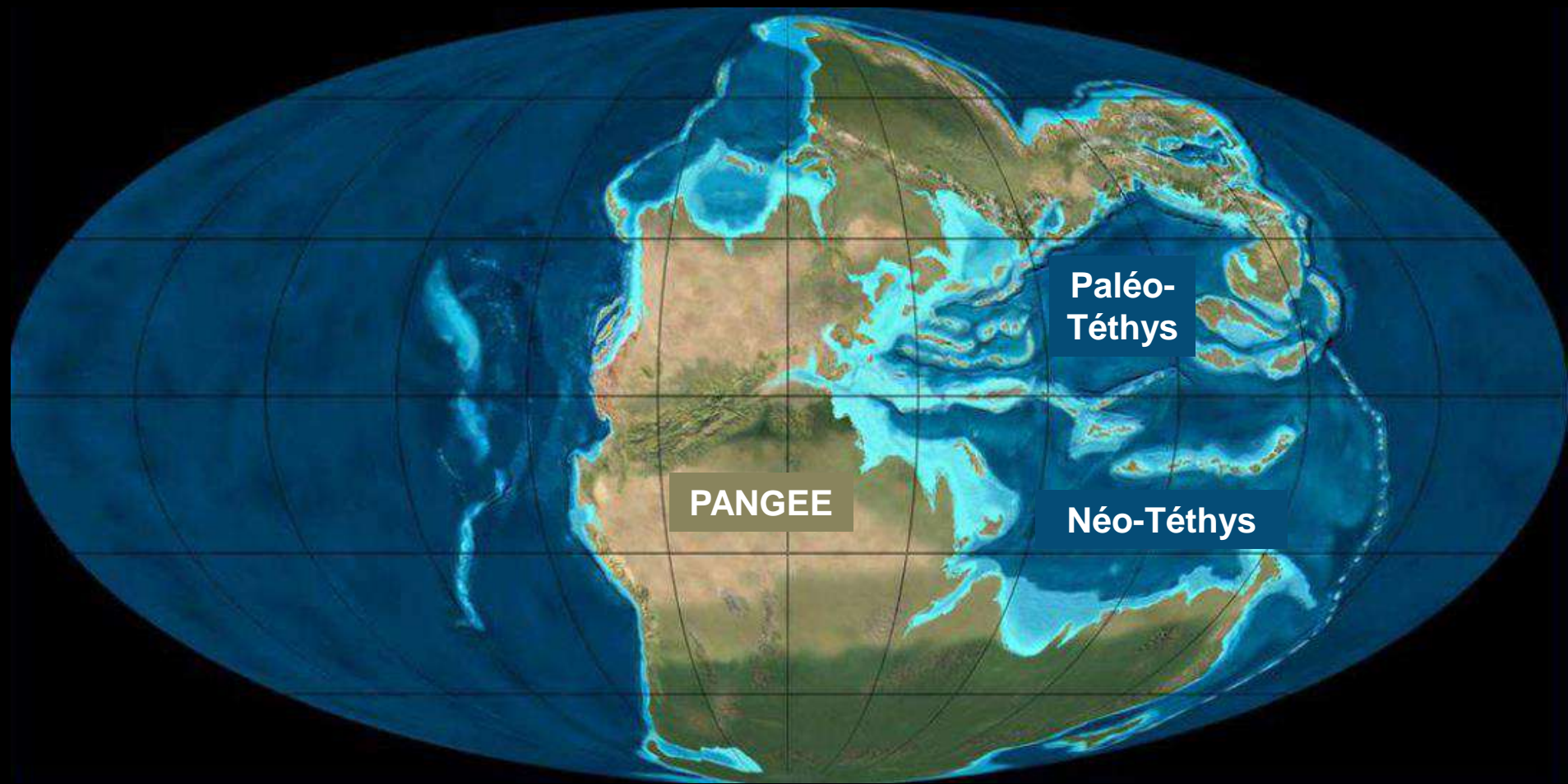
Paléo-Téthys

PANGÉE

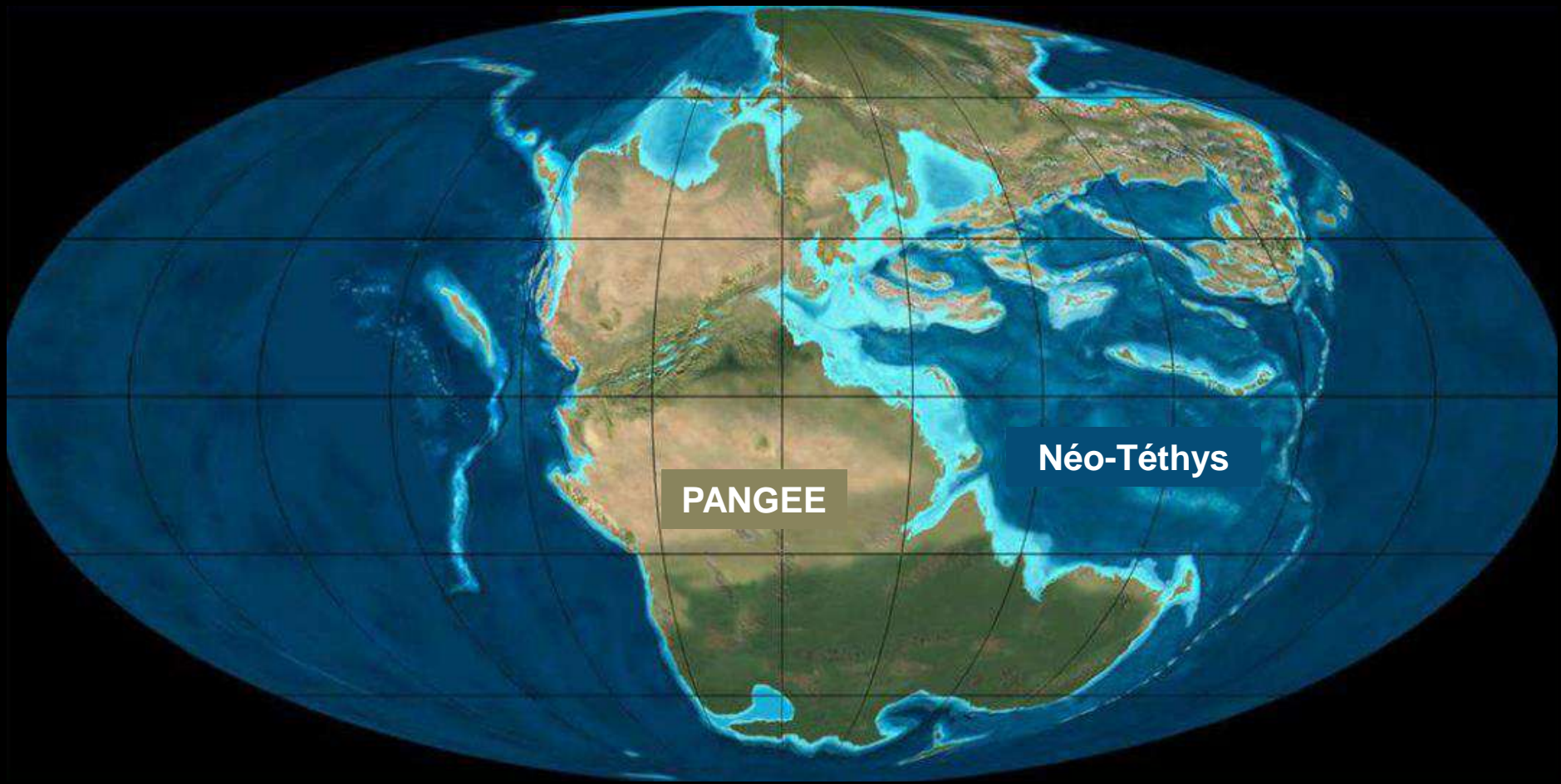
Néo-Téthys

Séparation
bloc
Cimmérien du
Gondwana

240 Ma



220 Ma



PANGEE

Néo-Téthys

200 Ma

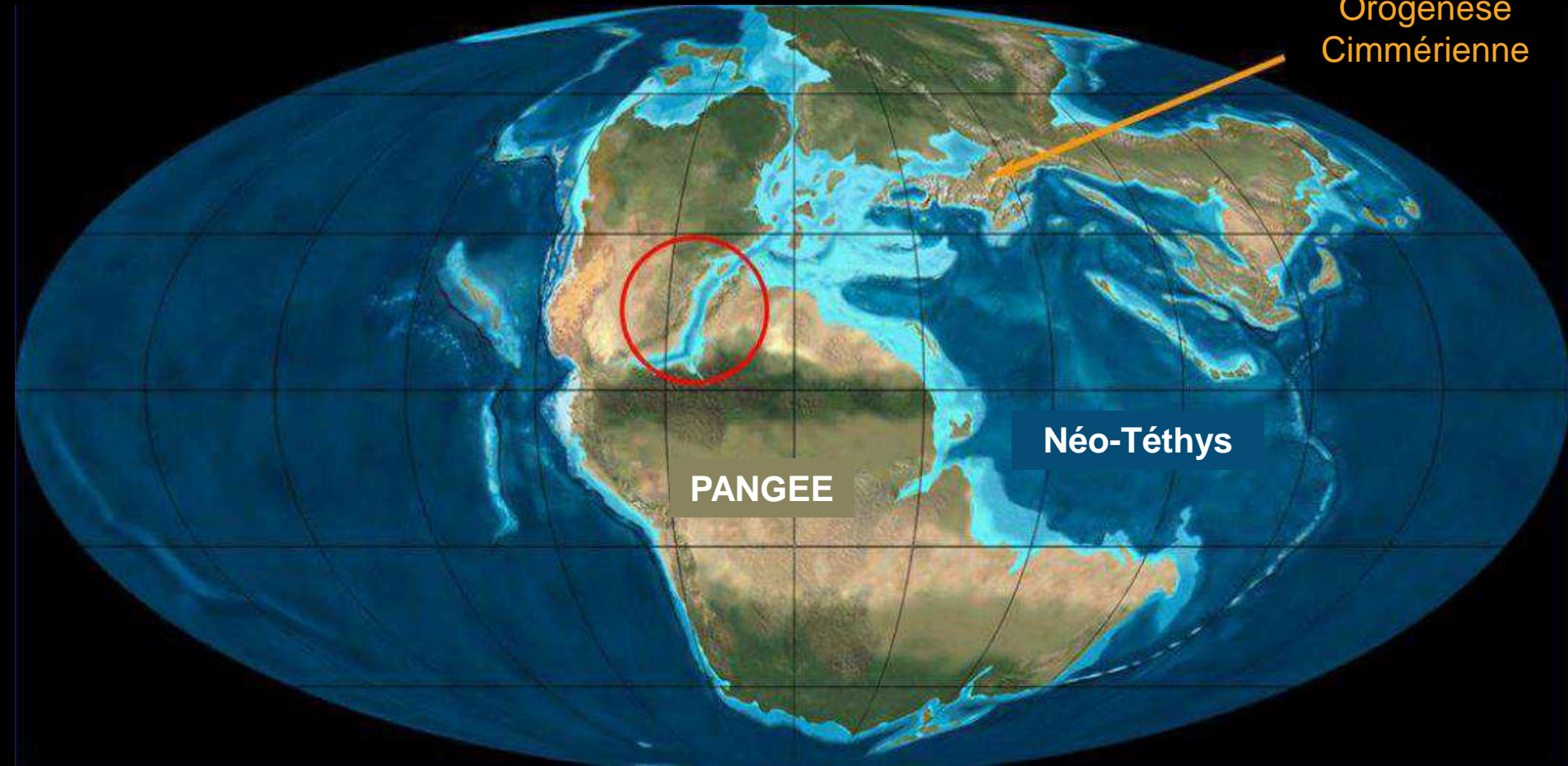
Ouverture de l'Atlantique Central

Orogenèse
Cimmérienne

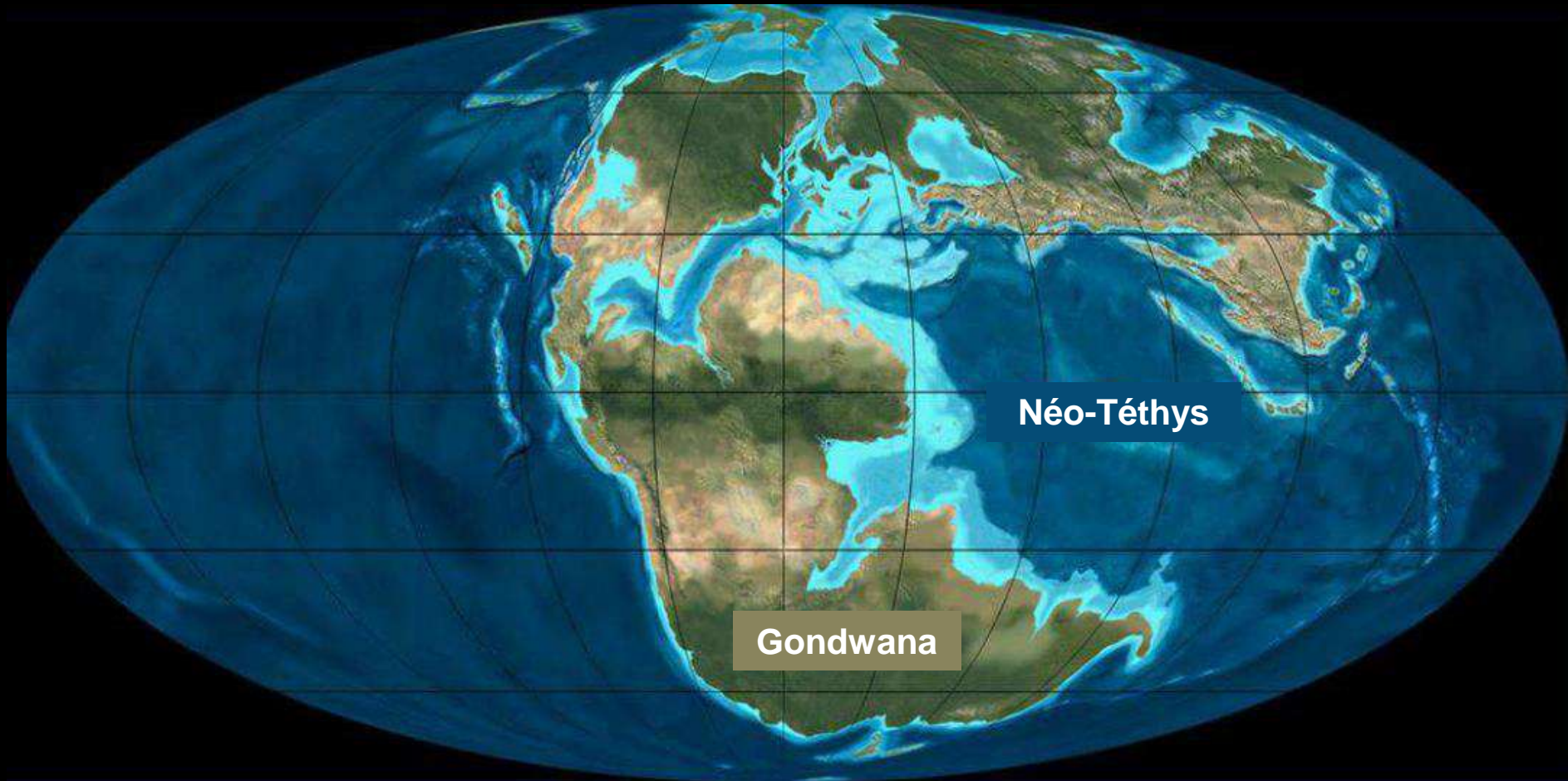
Néo-Téthys

PANGÉE

170 Ma

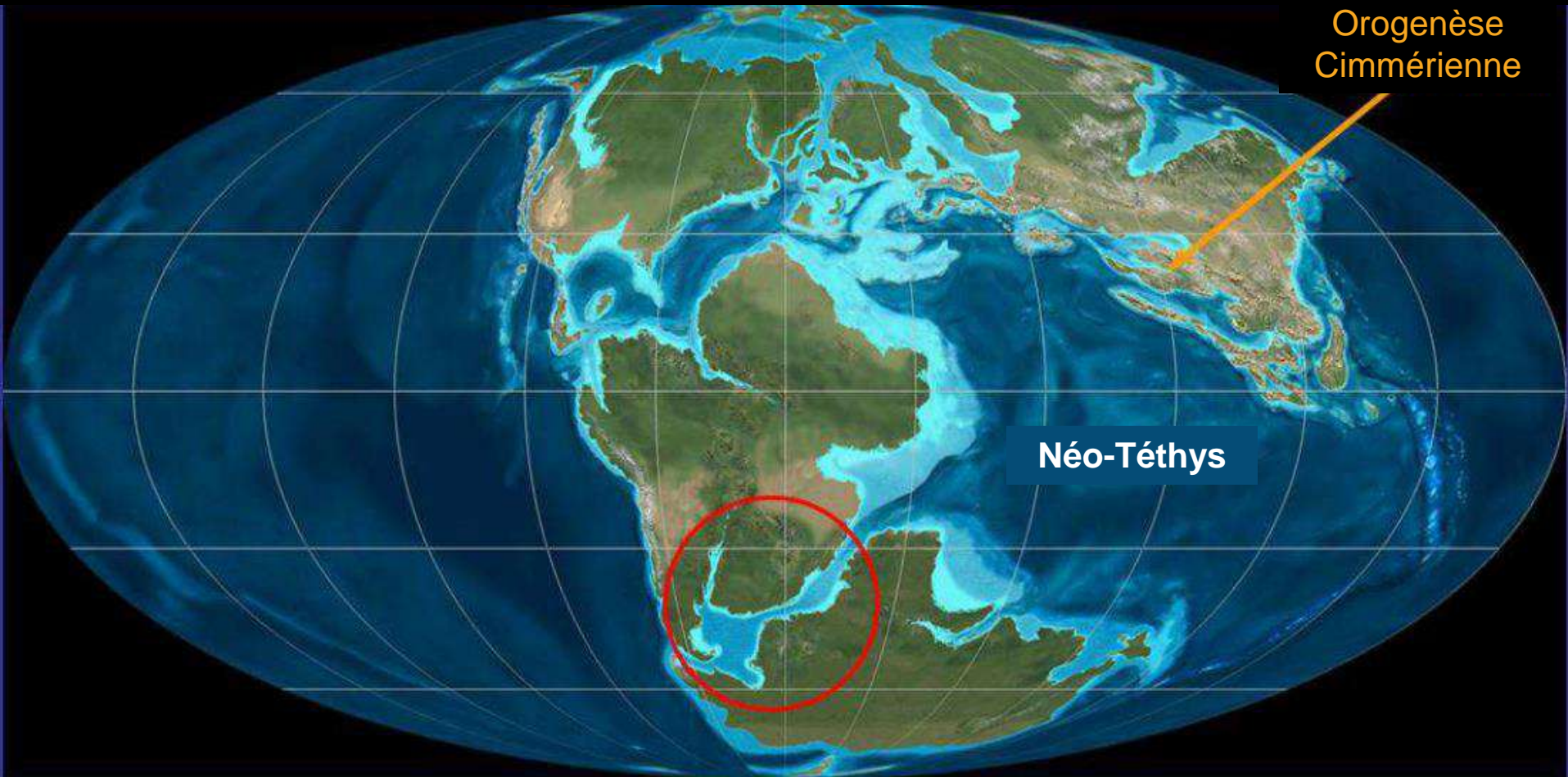


Dislocation du Gondwana



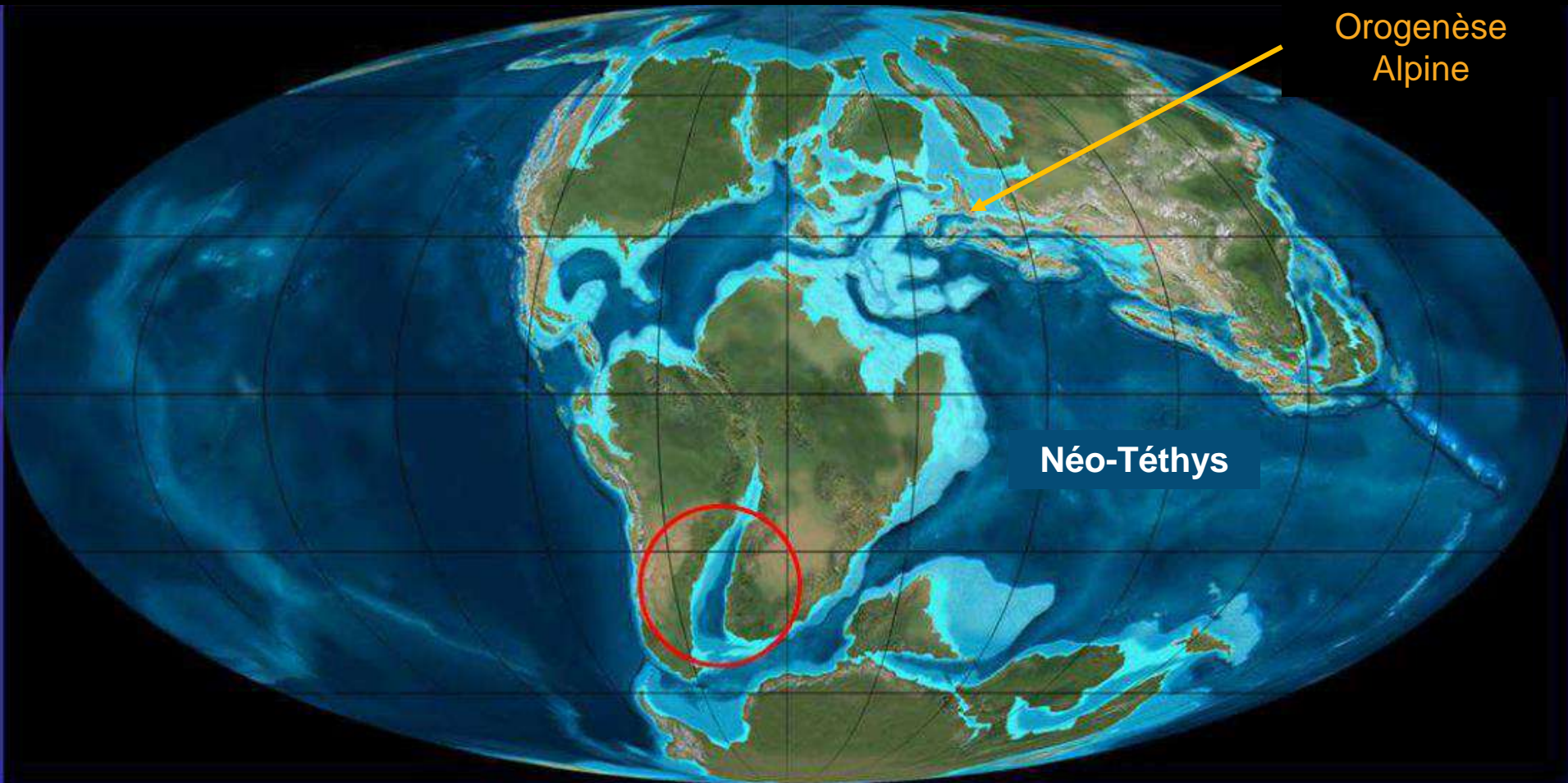
150 Ma

Dislocation du Gondwana



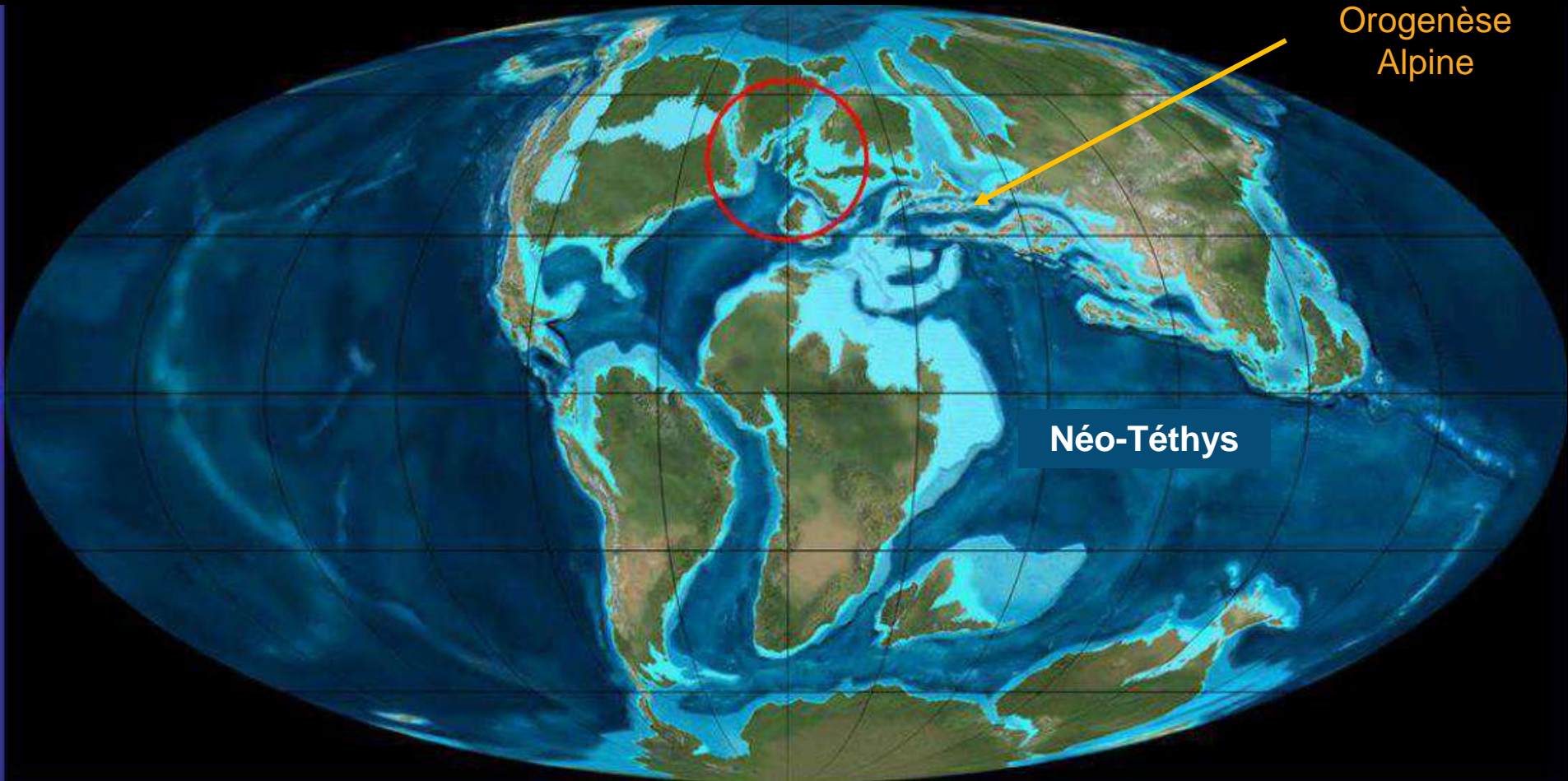
130 Ma

Ouverture de l'Atlantique sud



120 Ma

Ouverture de l'Atlantique nord

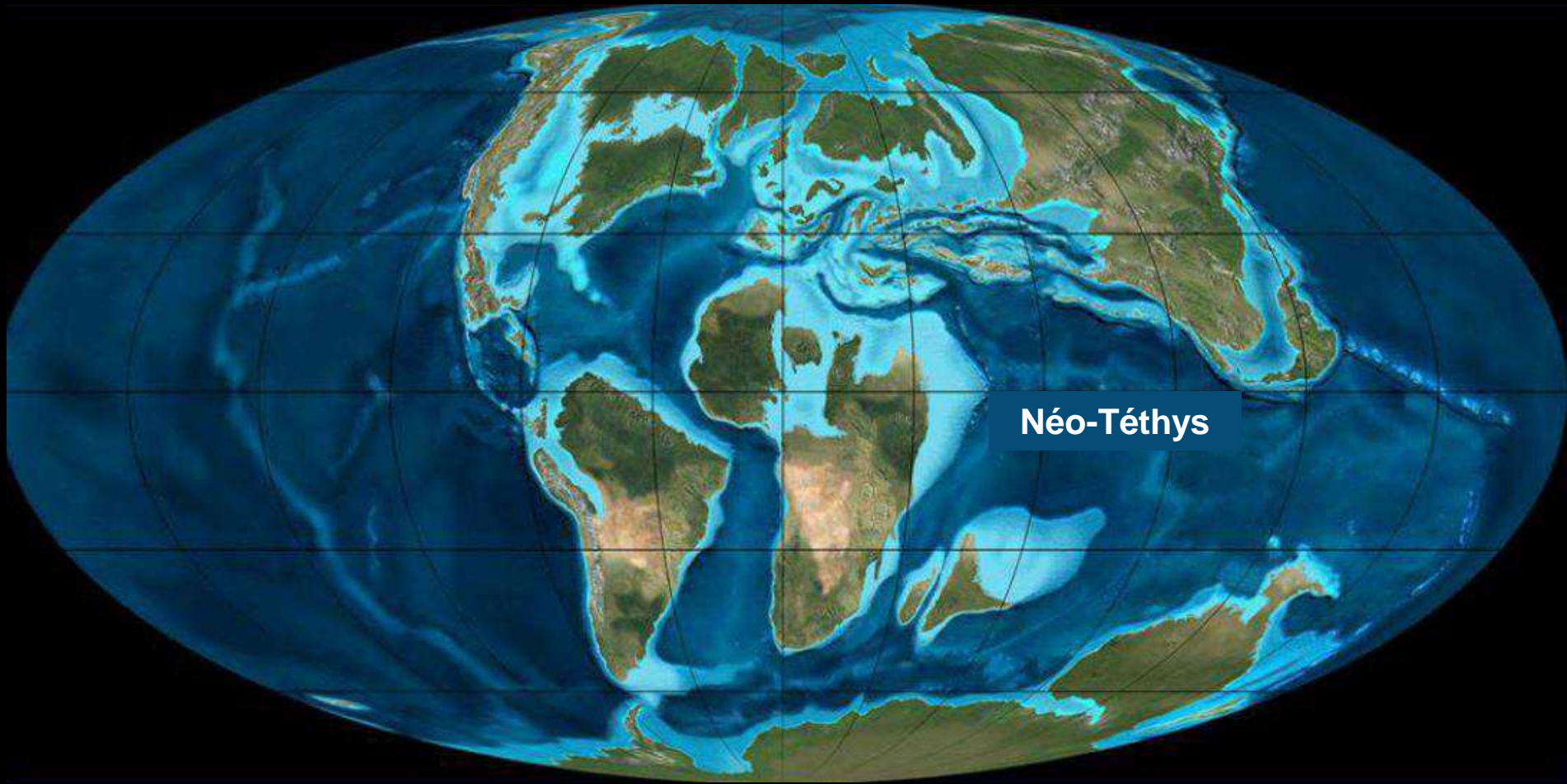


Orogenèse
Alpine

Néo-Téthys

105 Ma

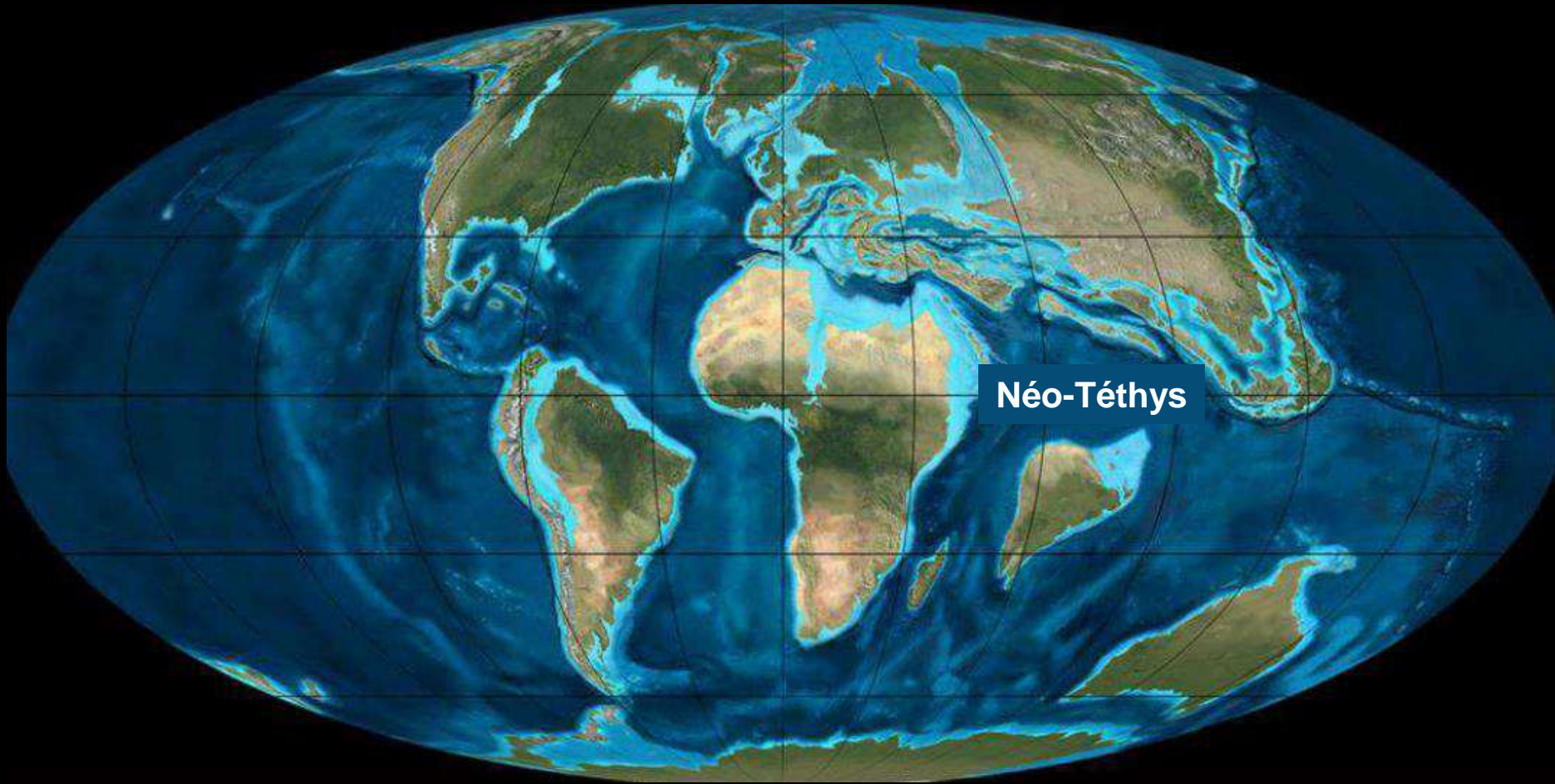
Orogenèse Alpine



Néo-Téthys

90 Ma

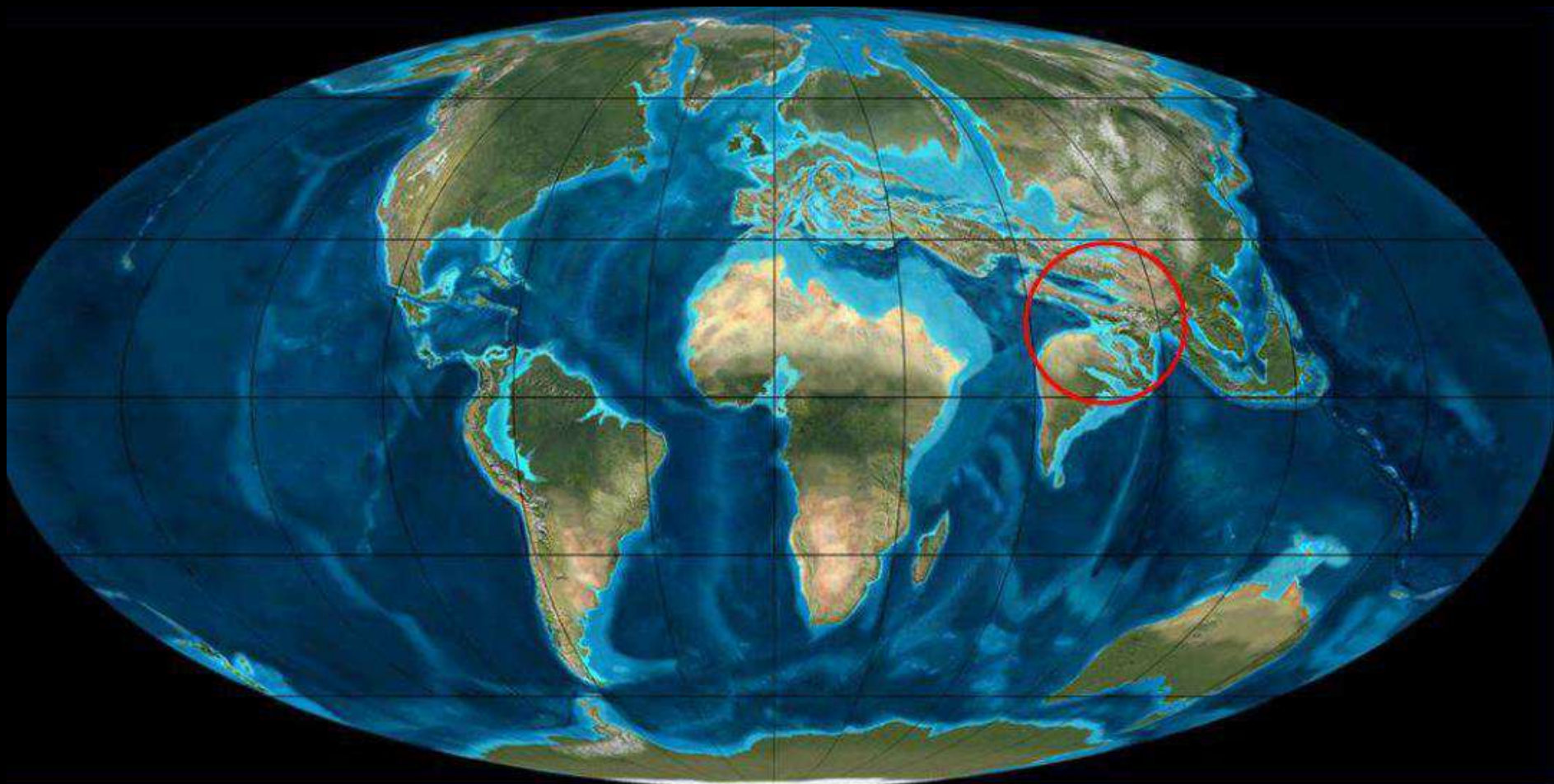
Orogenèse Alpine



Néo-Téthys

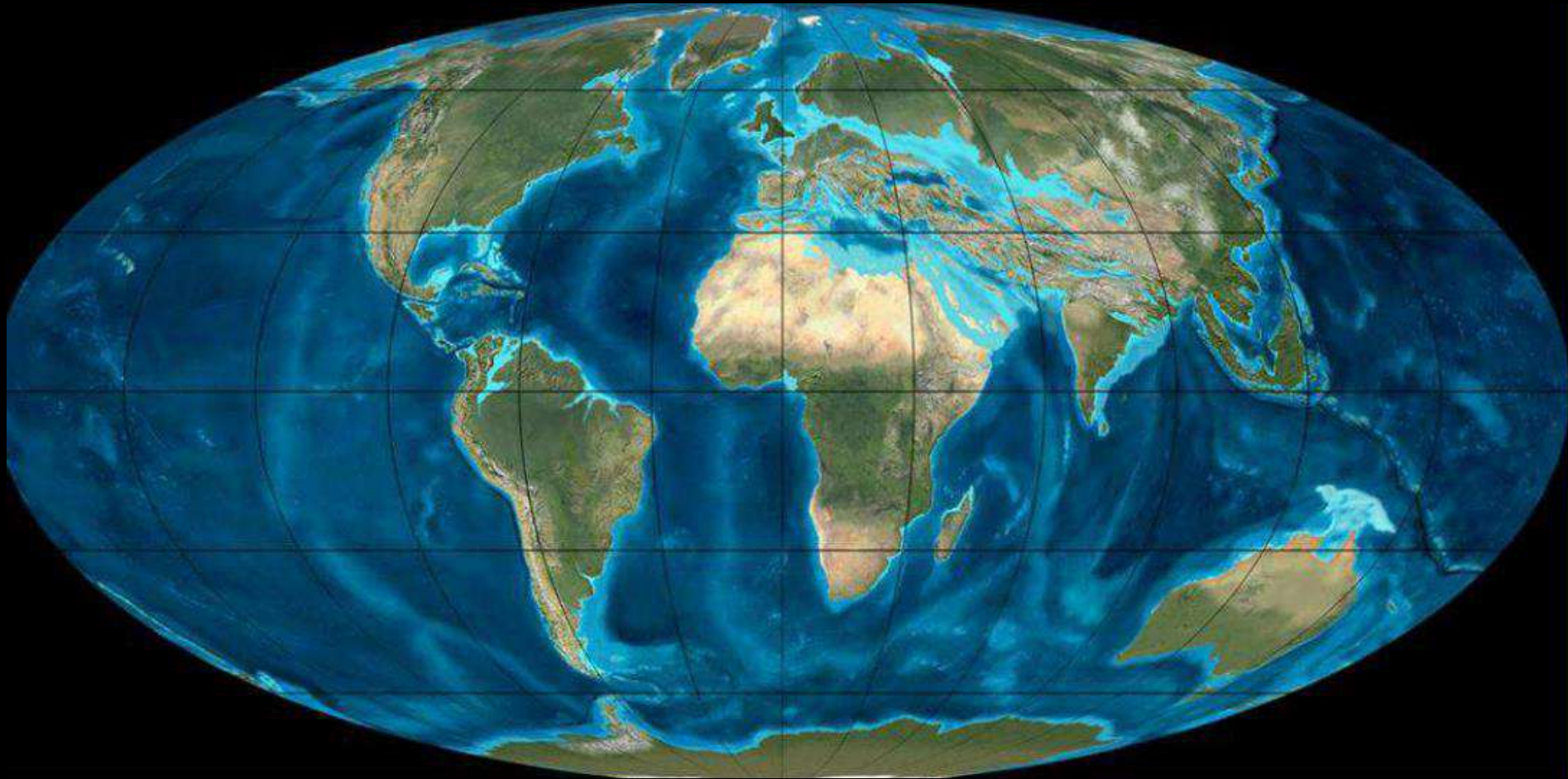
65 Ma

Collision Inde-Eurasie



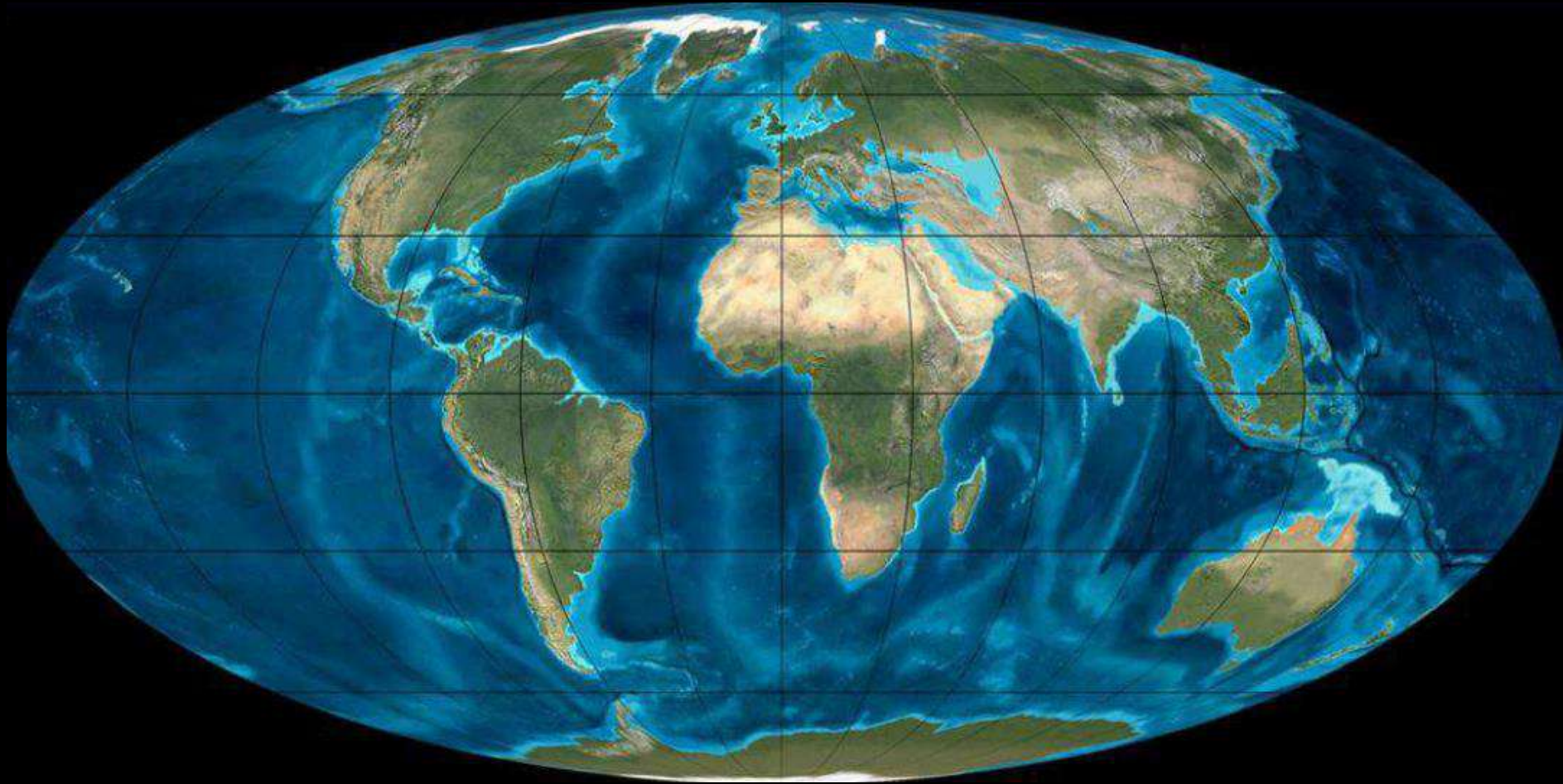
50 Ma

Orogenèse Alpine



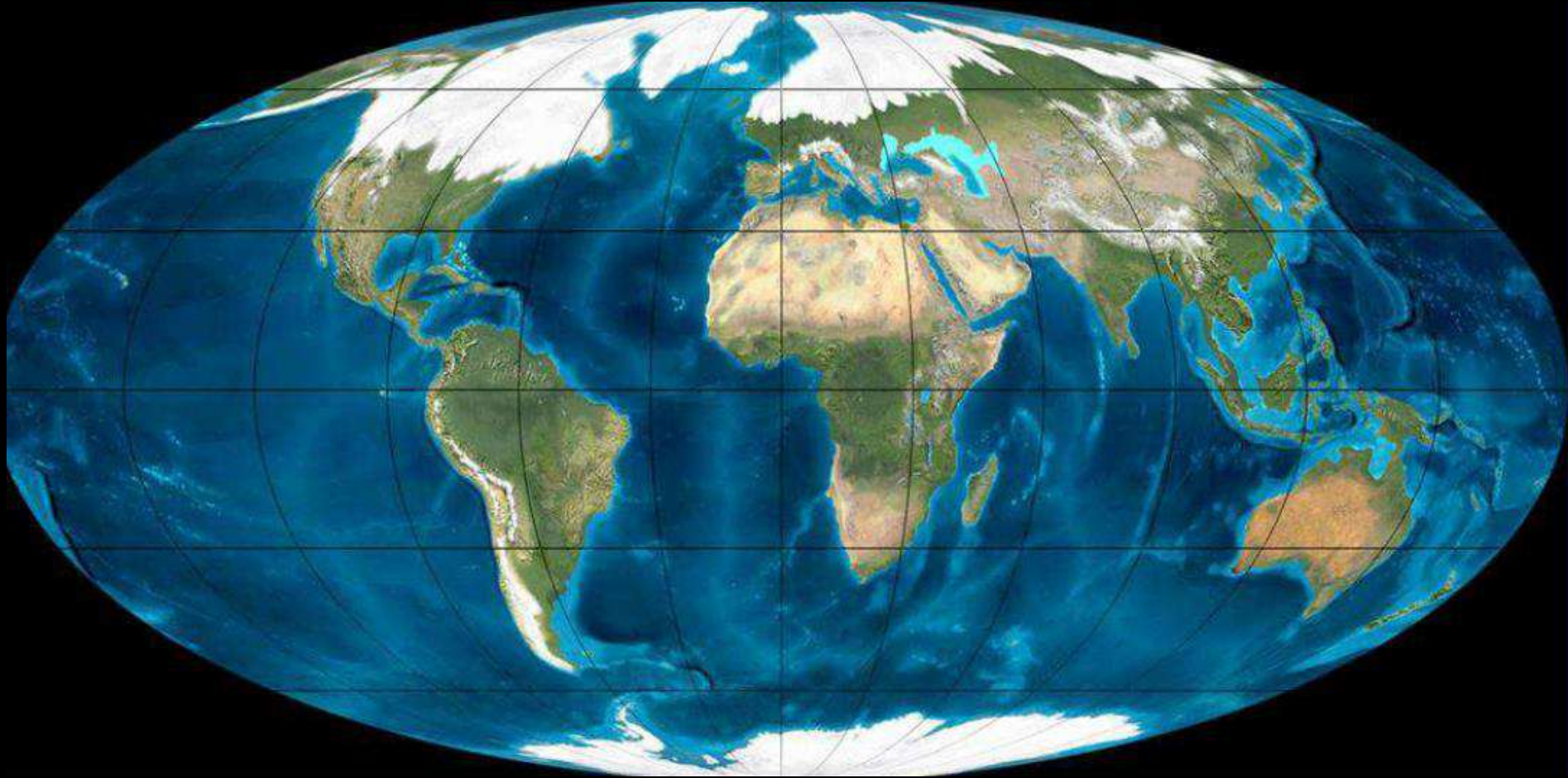
35 Ma

Orogenèse Alpine



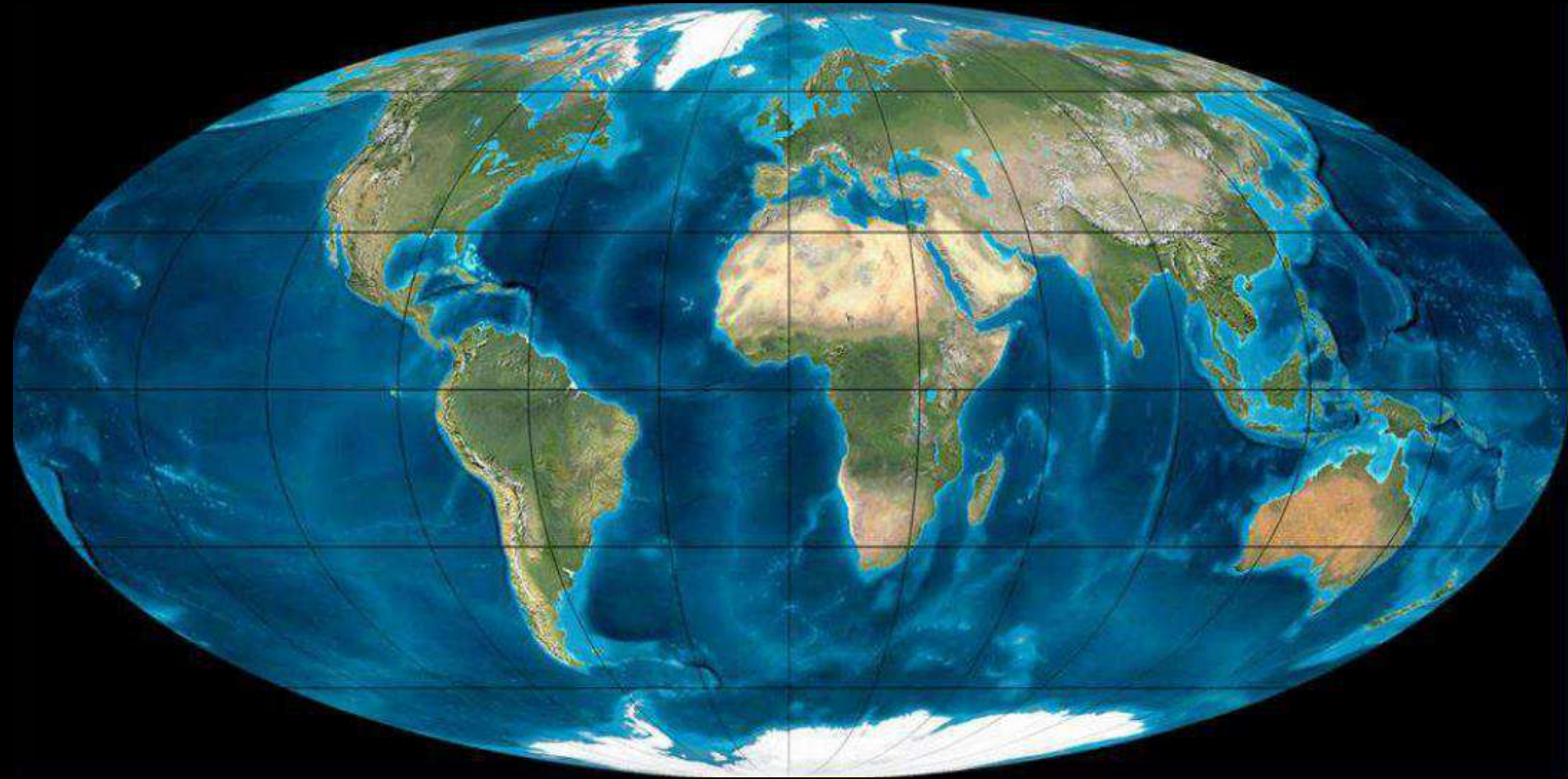
20 Ma

Glaciations quaternaires



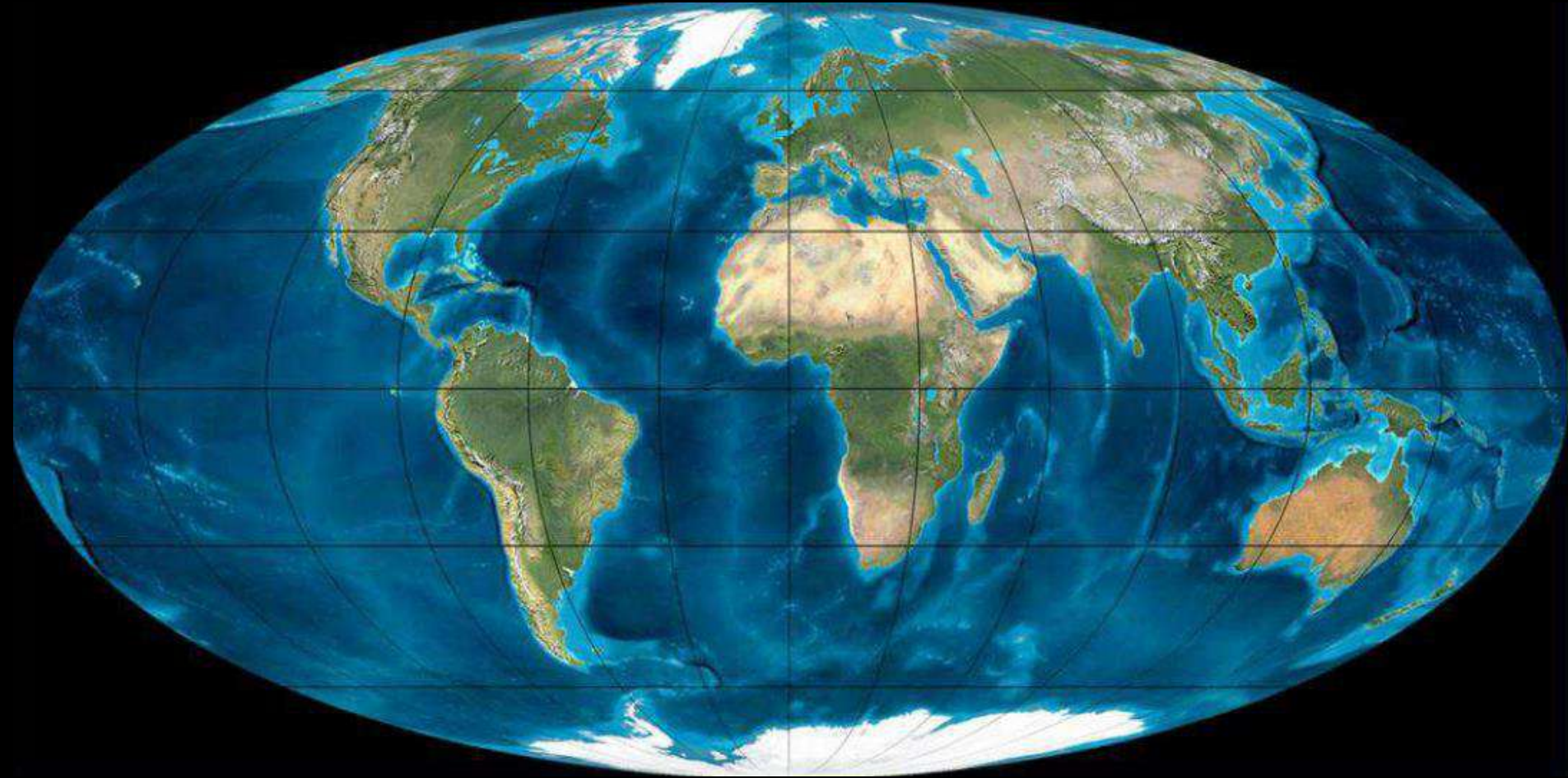
2 Ma ; Pléistocène

Orogenèse Alpine



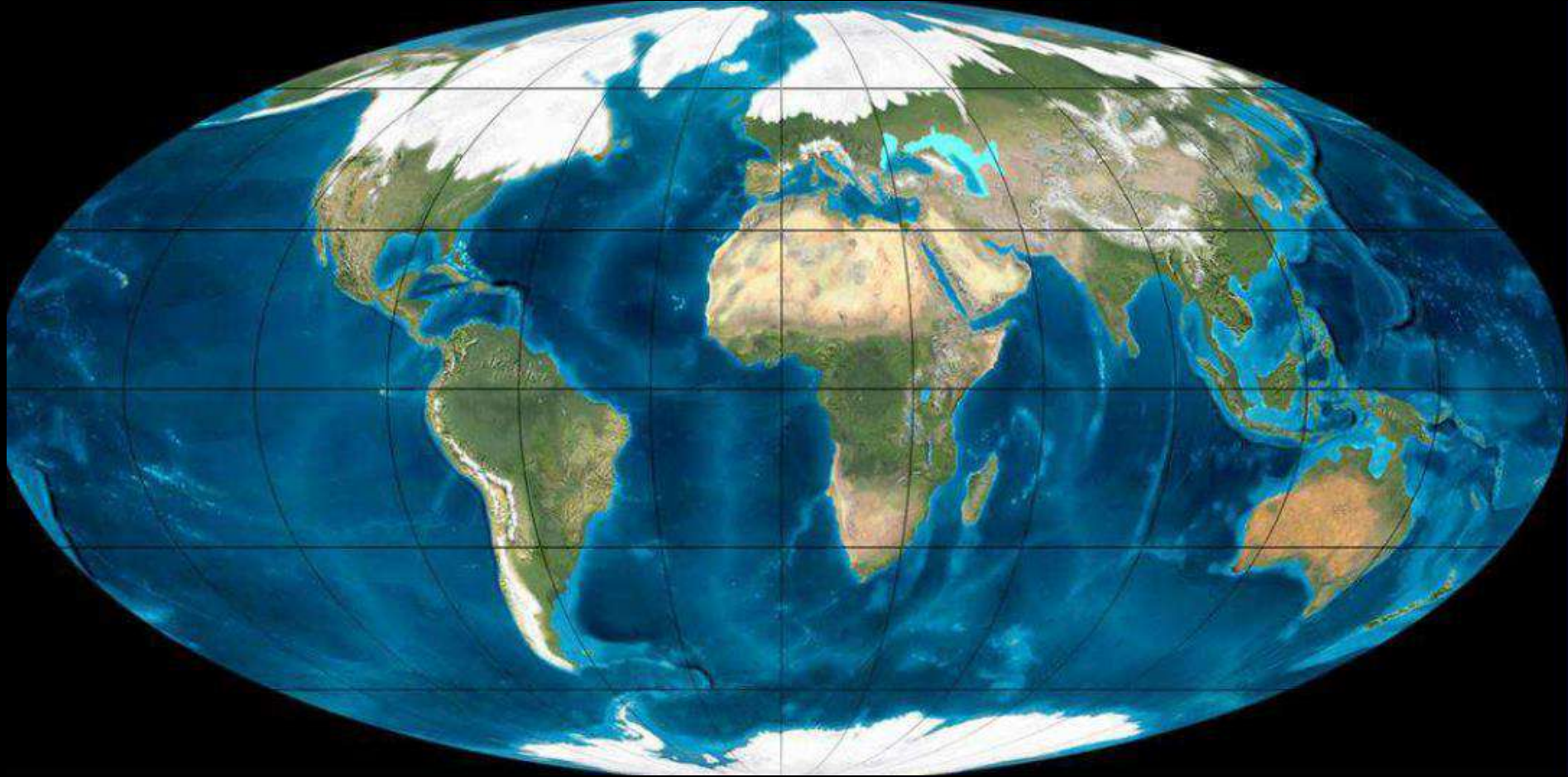
Actuel

**Altitude moyenne alpine
2500 mètres**



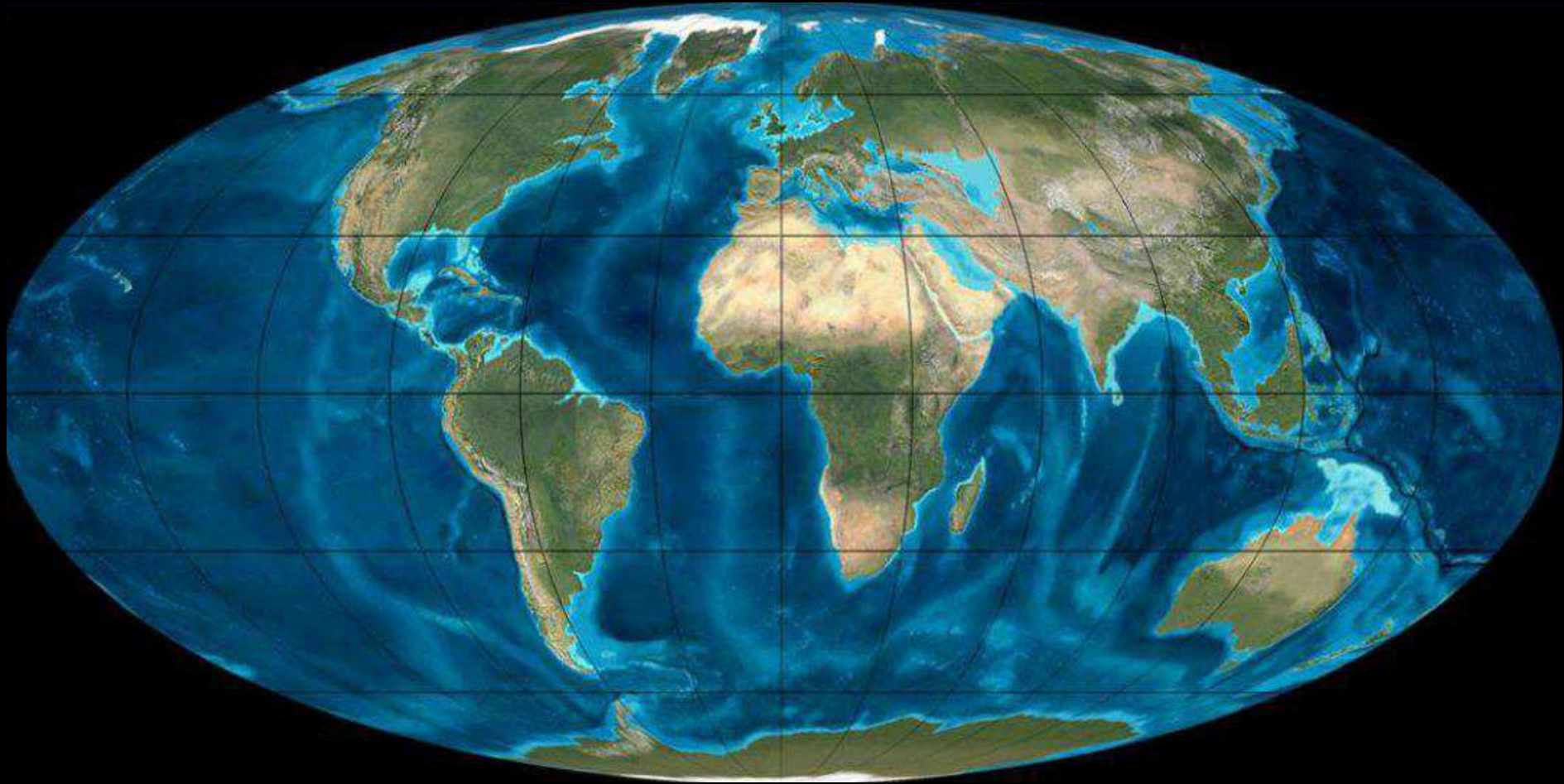
Actuel

**Altitude moyenne alpine
2500 mètres ?**



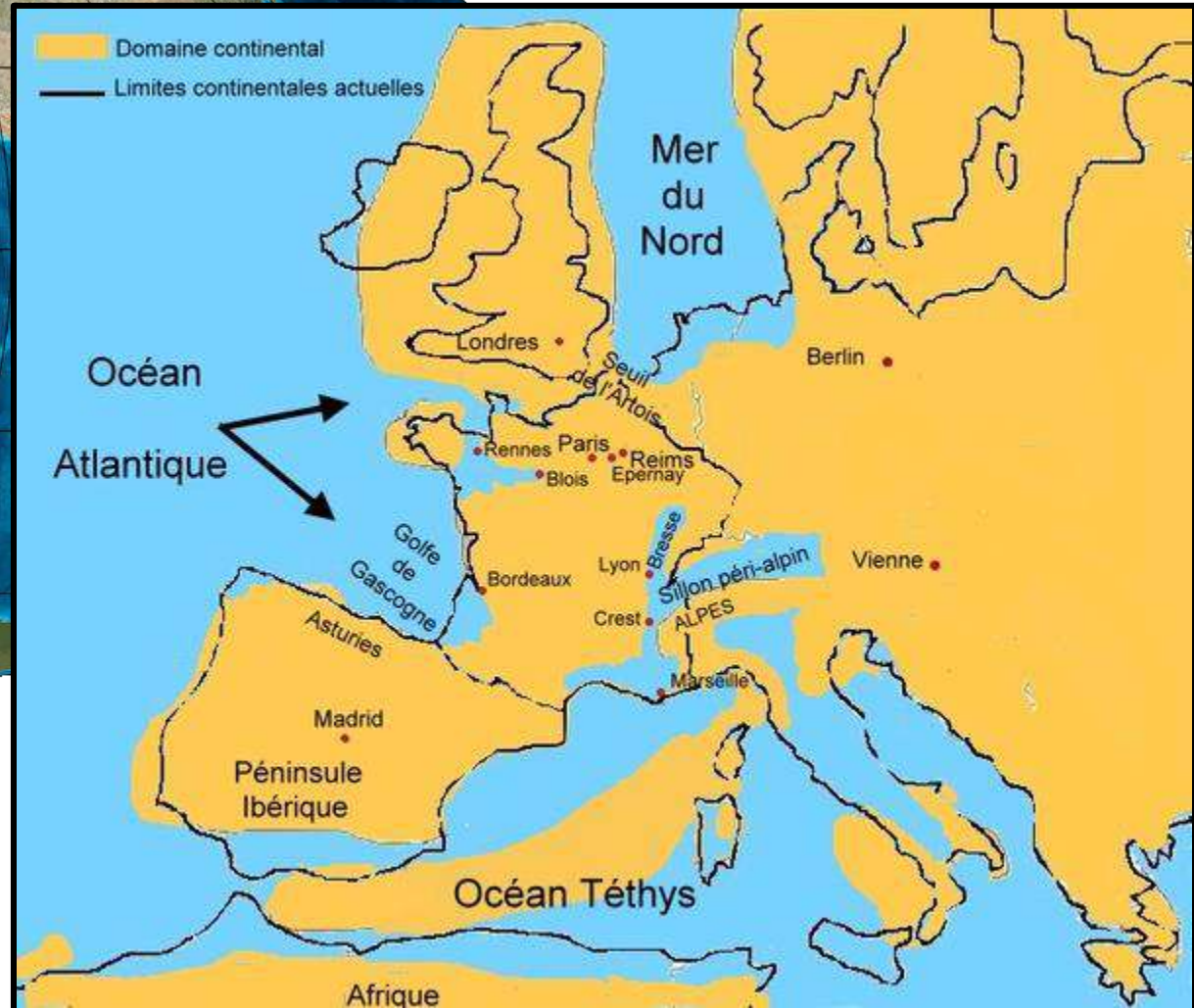
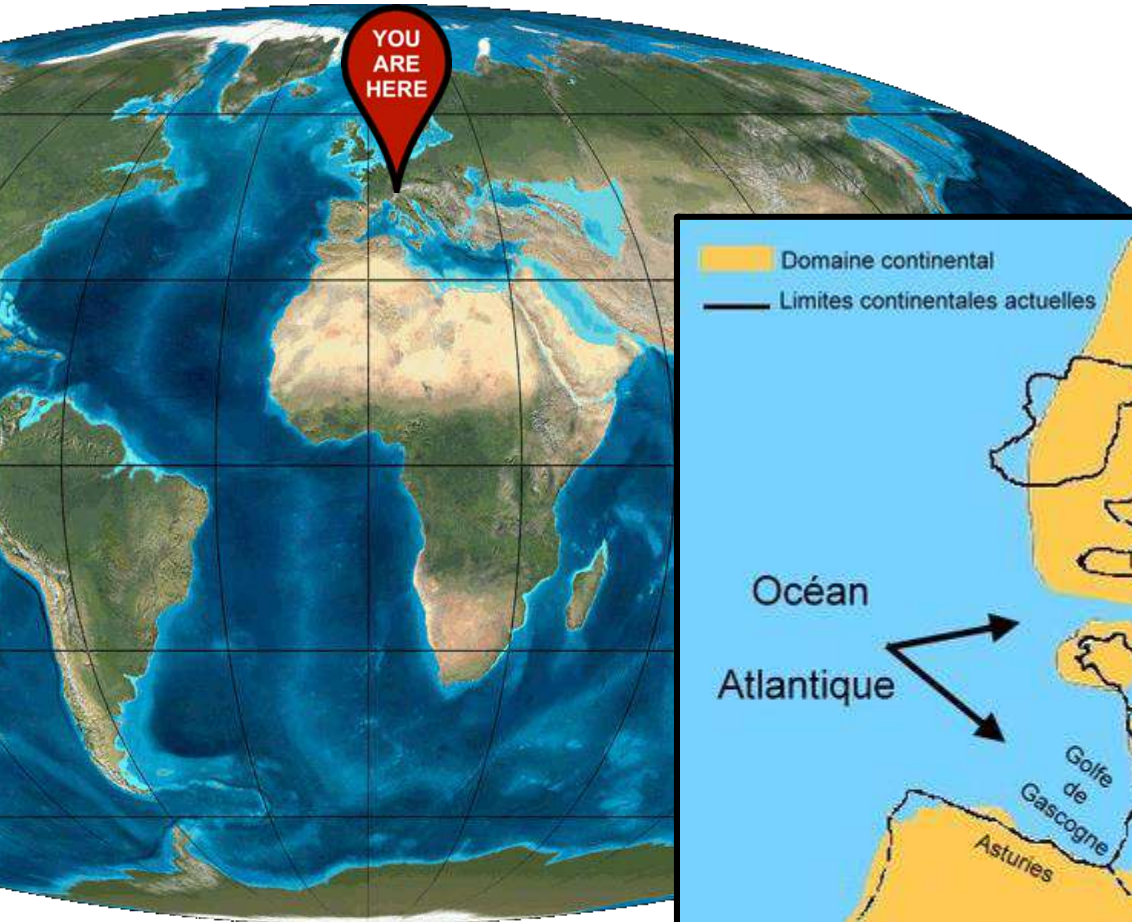
2 Ma ; Pléistocène

**Altitude moyenne alpine
????**



20 Ma

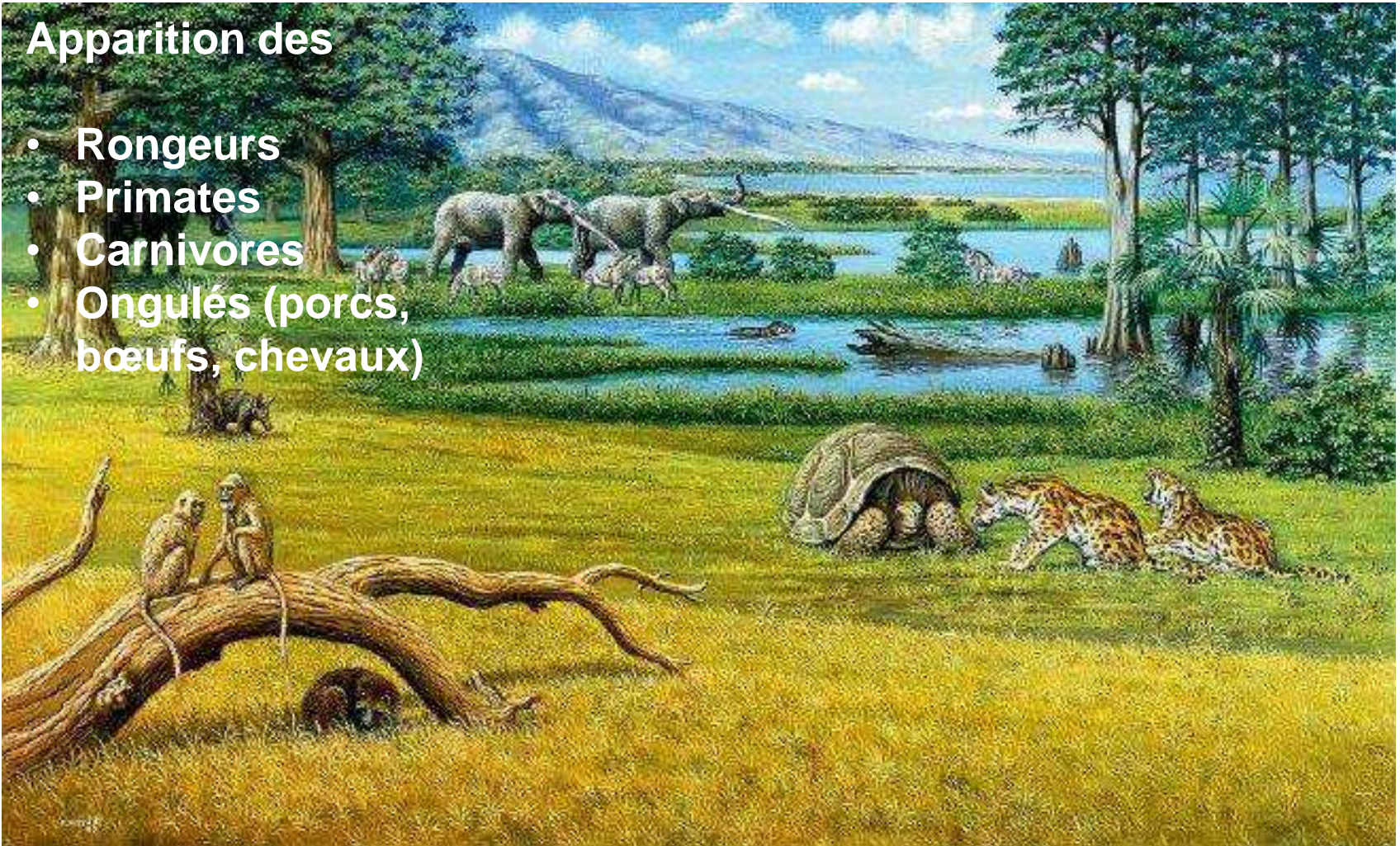
Les Alpes au Miocène (20 – 5 Ma)



Les Alpes au Miocène (20 – 5 Ma)

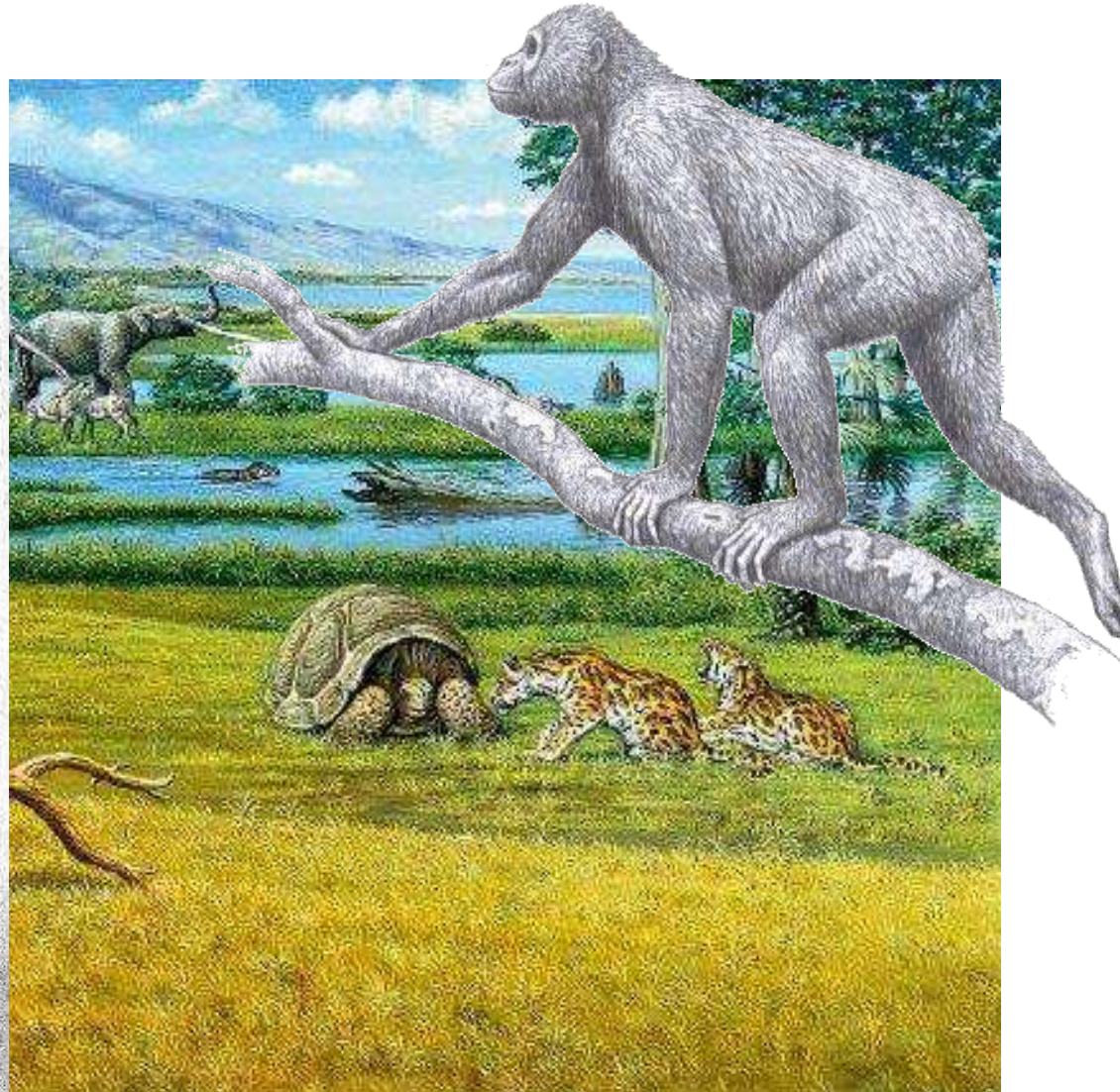
Apparition des

- Rongeurs
- Primates
- Carnivores
- Ongulés (porcs, bœufs, chevaux)



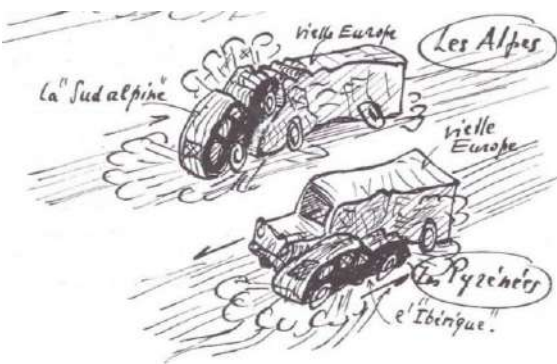
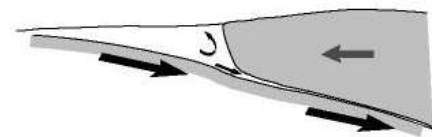
Reconstitution de la faune dans les environs de Perpignan

Les Alpes au Miocène (20 – 5 Ma)

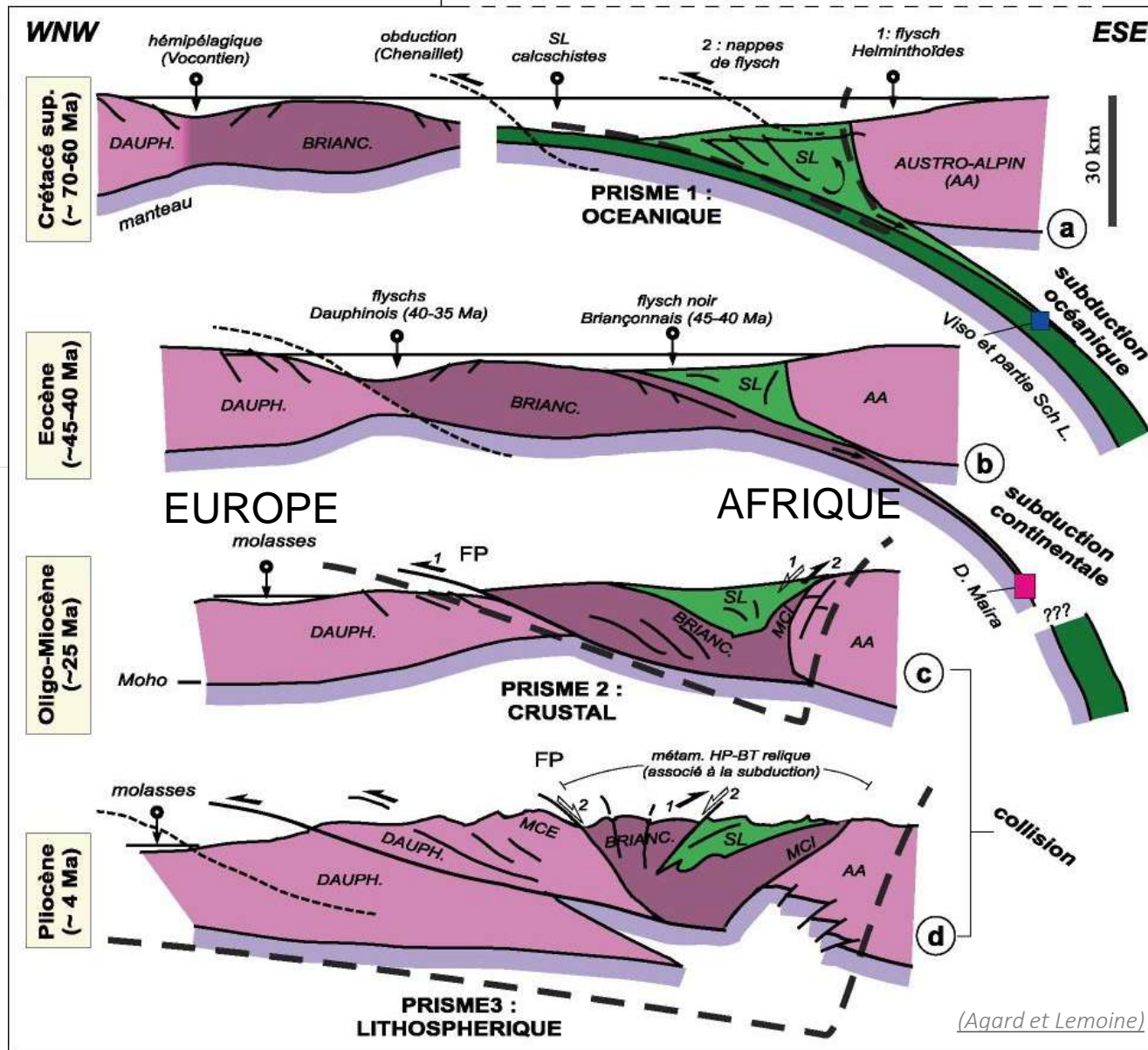


La formation des Alpes

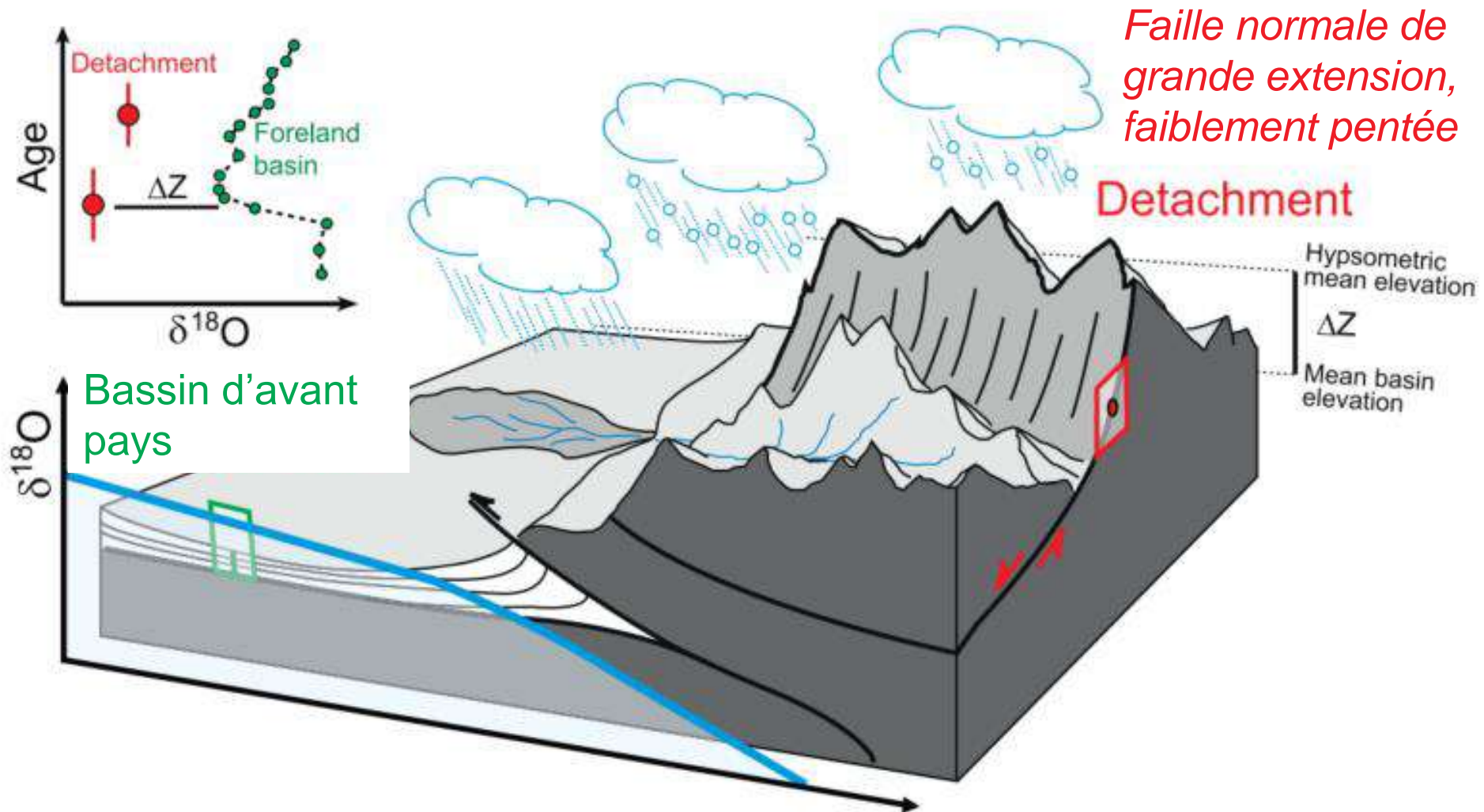
Afin de décrire l'évolution géodynamique en convergence, accompagnant la fermeture de l'océan Alpin et la collision (étapes a-d, ci-dessous), un modèle mécanique très simple, inspiré du fonctionnement d'un prisme d'accrétion (Fig. 47), a été privilégié :



Une simulation suggestive, mais approximative, des différents types de chaînes de collision.



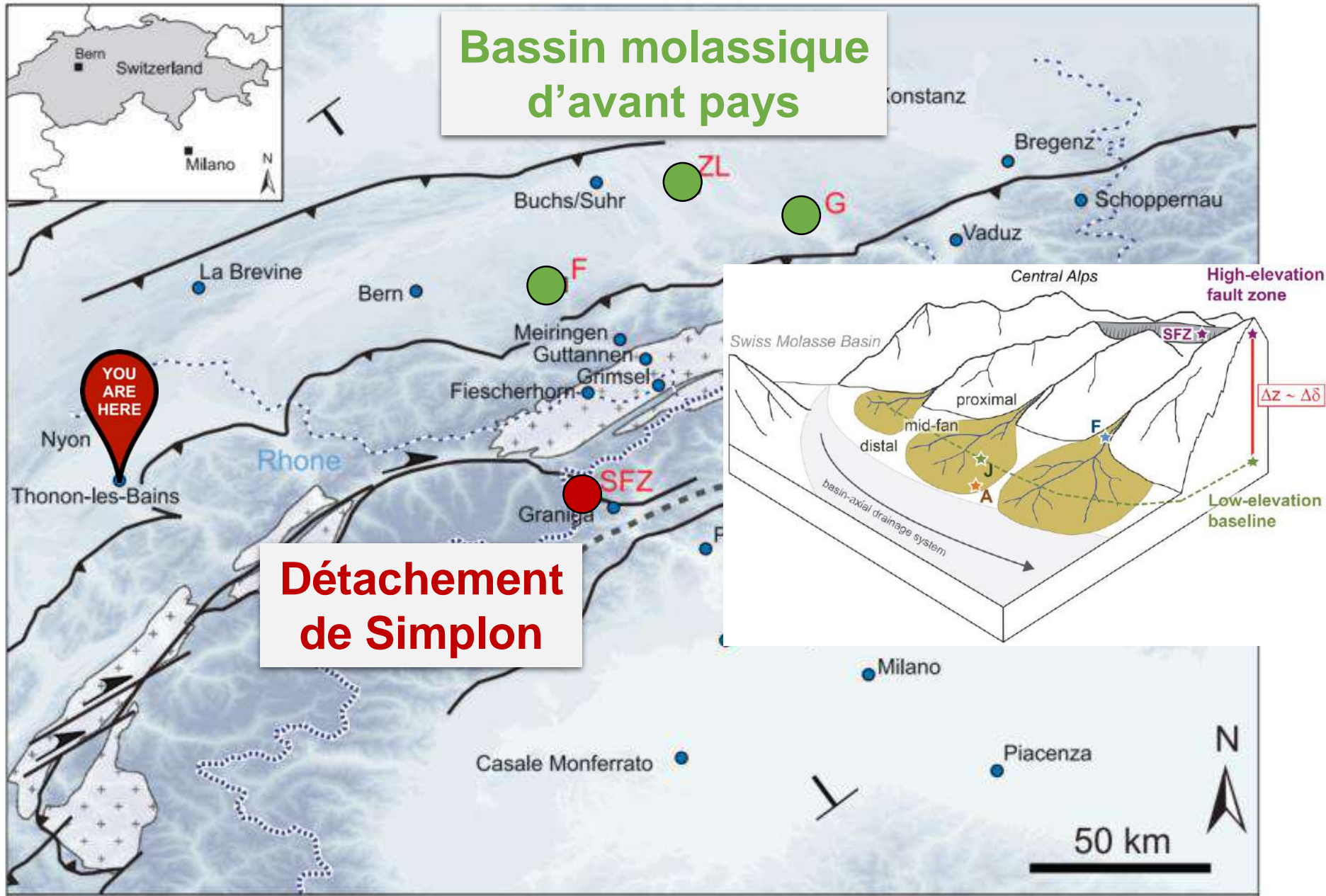
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



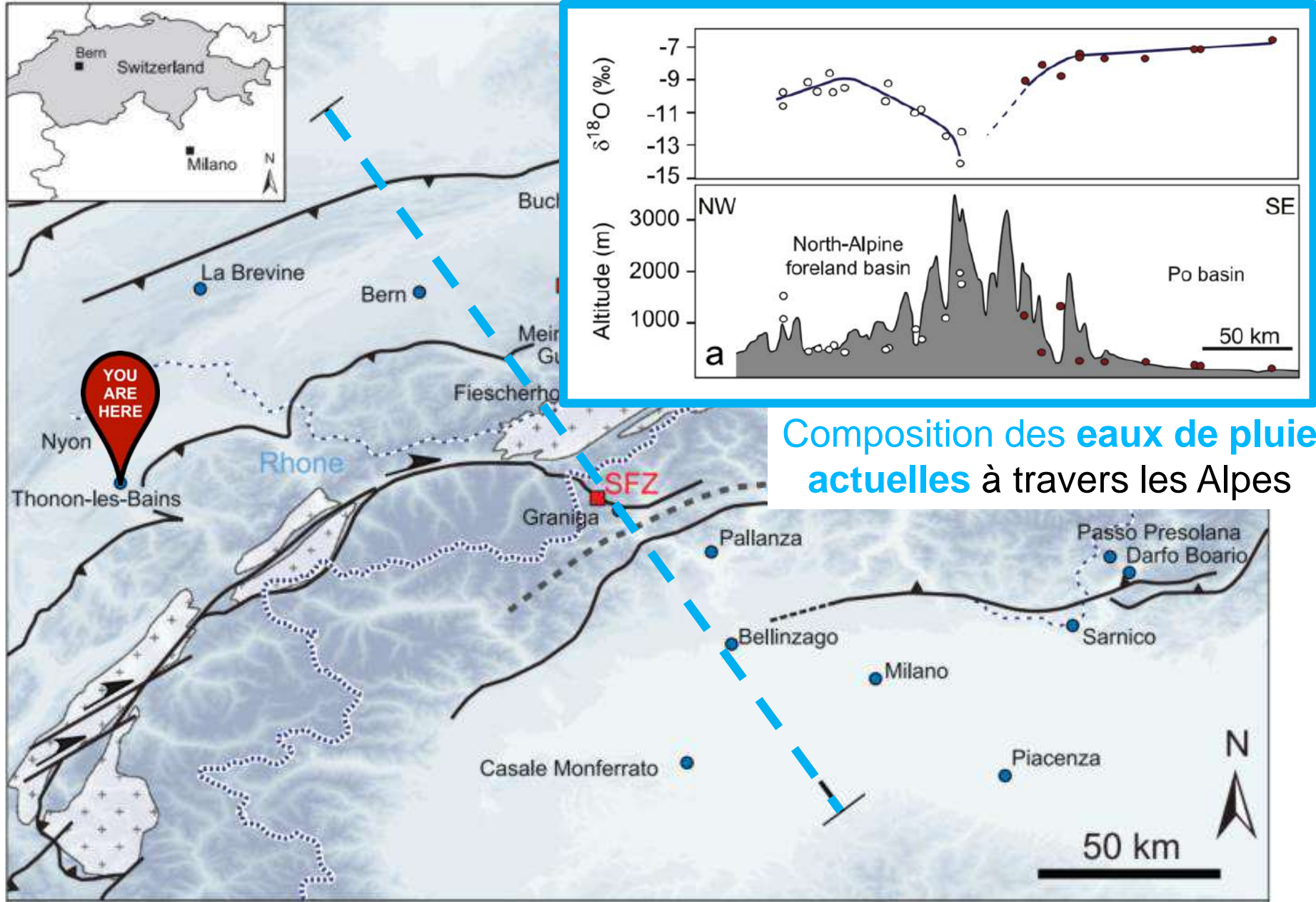
Faille normale de grande extension, faiblement pentée

Bassin sédimentaire qui se développe parallèlement à une chaîne de montagnes dû à la flexion de la lithosphère créée par l'épaississement crustal

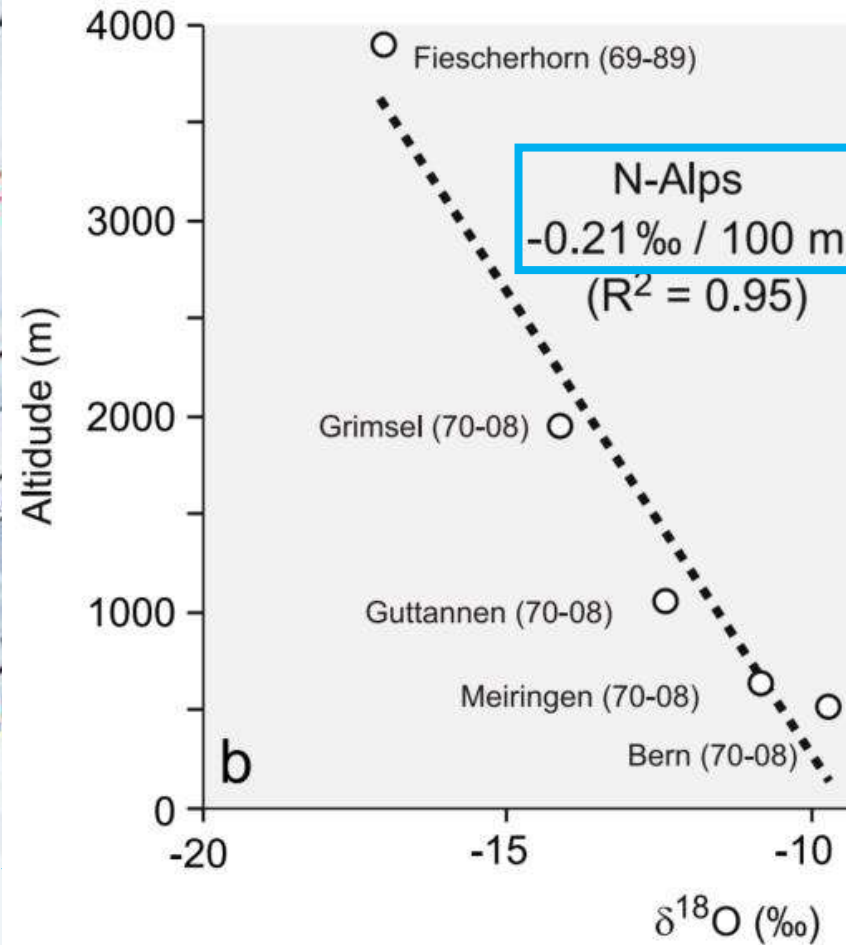
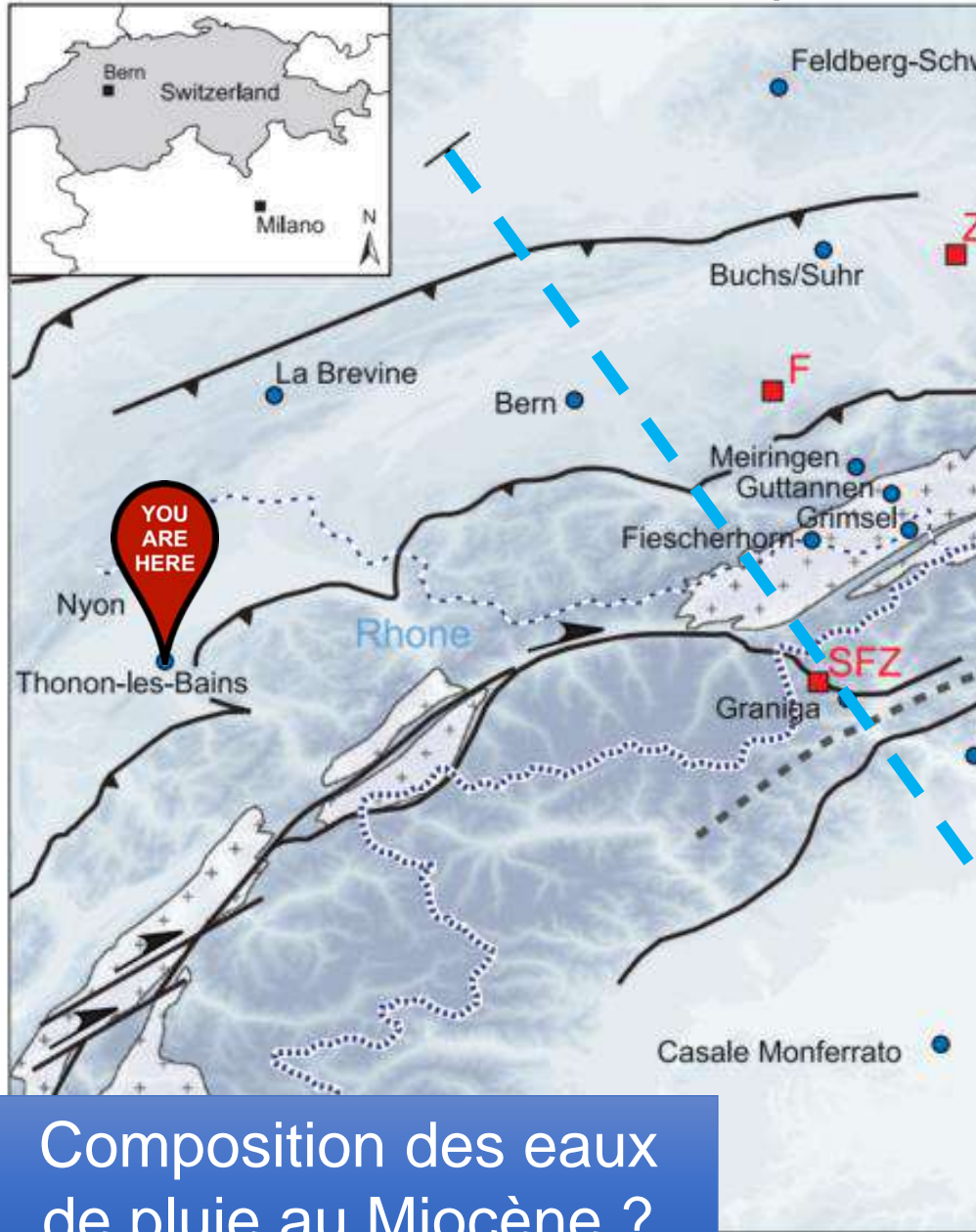
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



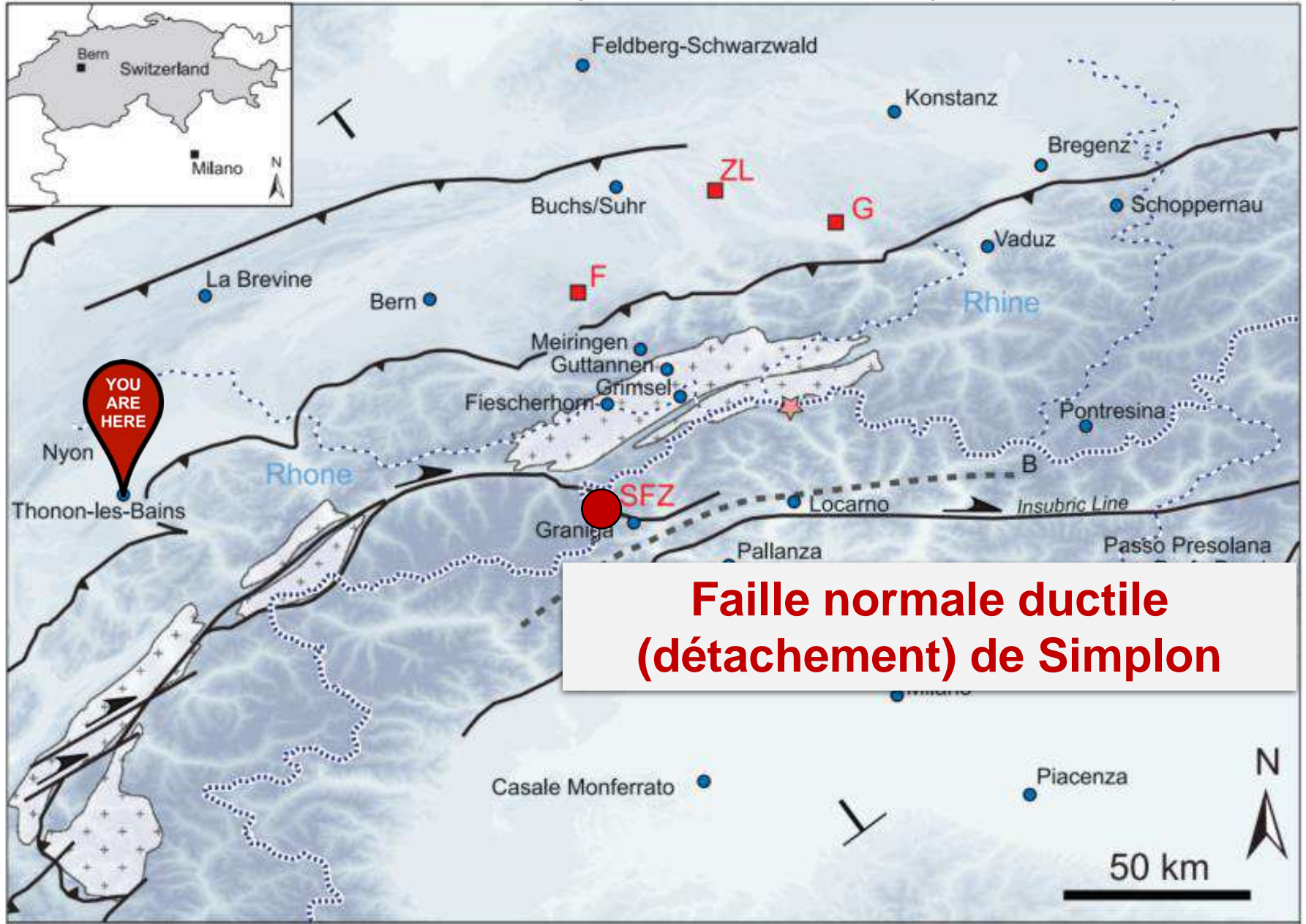
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



Composition des eaux de pluie au Miocène ?

Relation entre la **composition des eaux de pluie** actuelles et l'**altitude** dans les Alpes

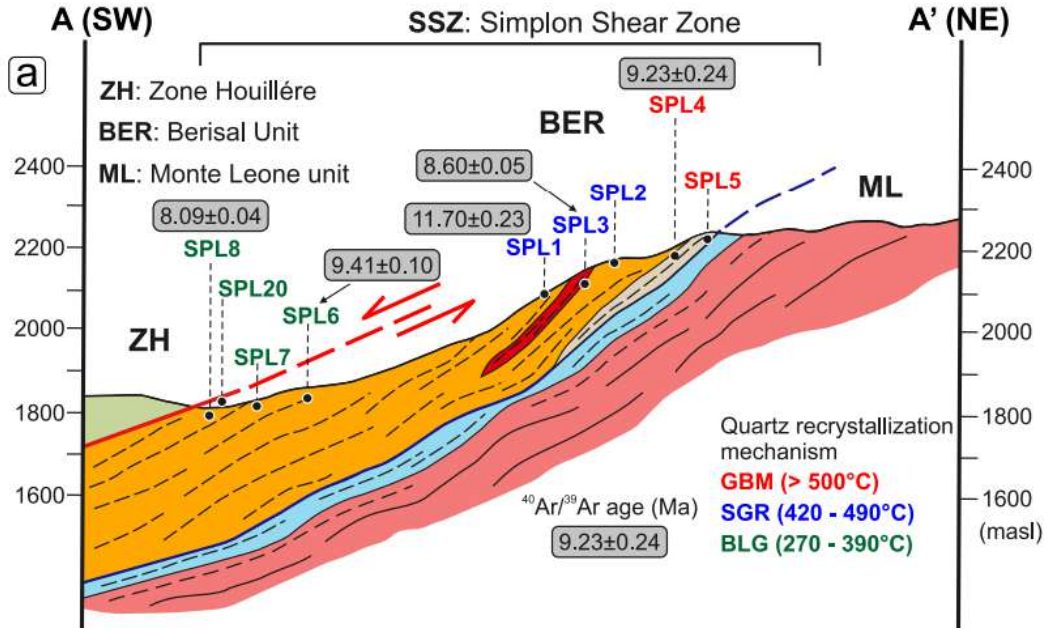
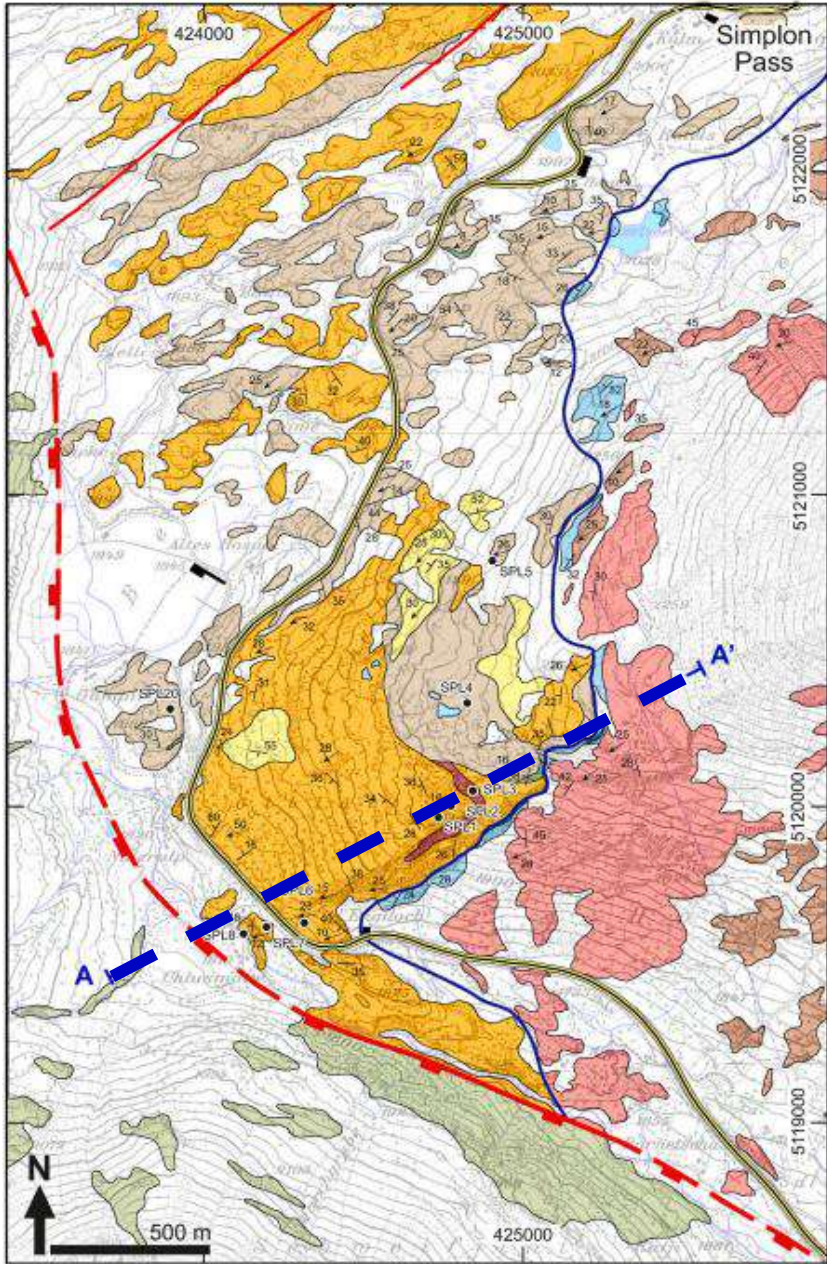
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



**Faille normale ductile
(détachement) de Simplon**

Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Faille normale ductile (détachement) de Simplon



Berisal unit

- Paragneiss
- Garnet-Paragneiss
- Orthogneiss (a: leucocratic)
- Amphibolites

Monte Leone unit

- Calcitic Marbles
- Calcschists
- Orthogneiss
- Paragneiss

- Simplon Fault
- Monte Leone - Berisal tectonic boundary
- Fault

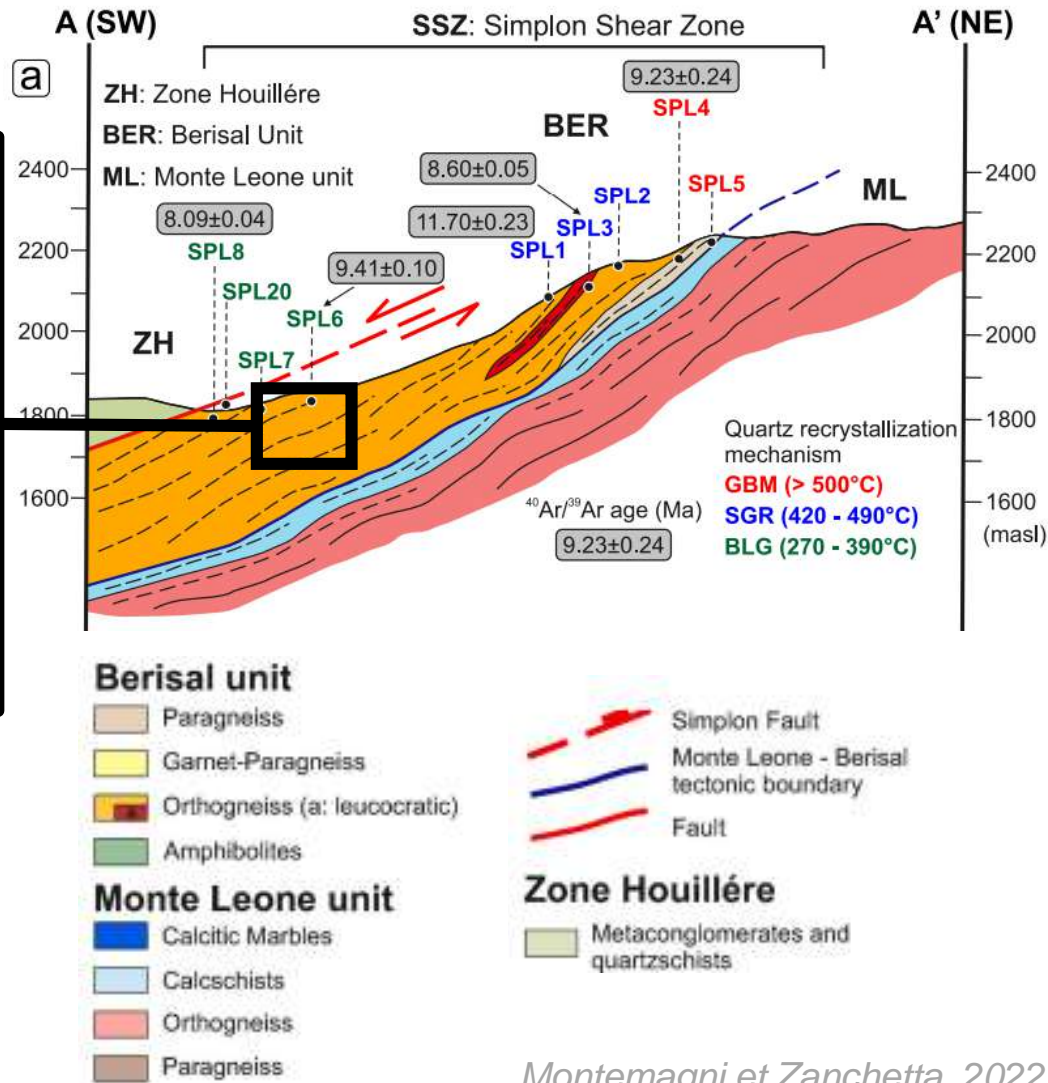
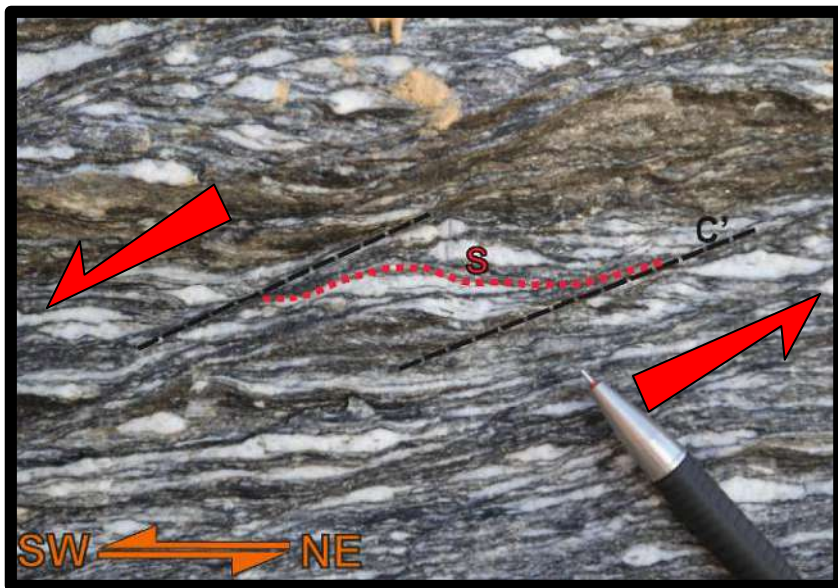
Zone Houillère

- Metaconglomerates and quartzschists

Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Faille normale ductile (détachement) de Simplon

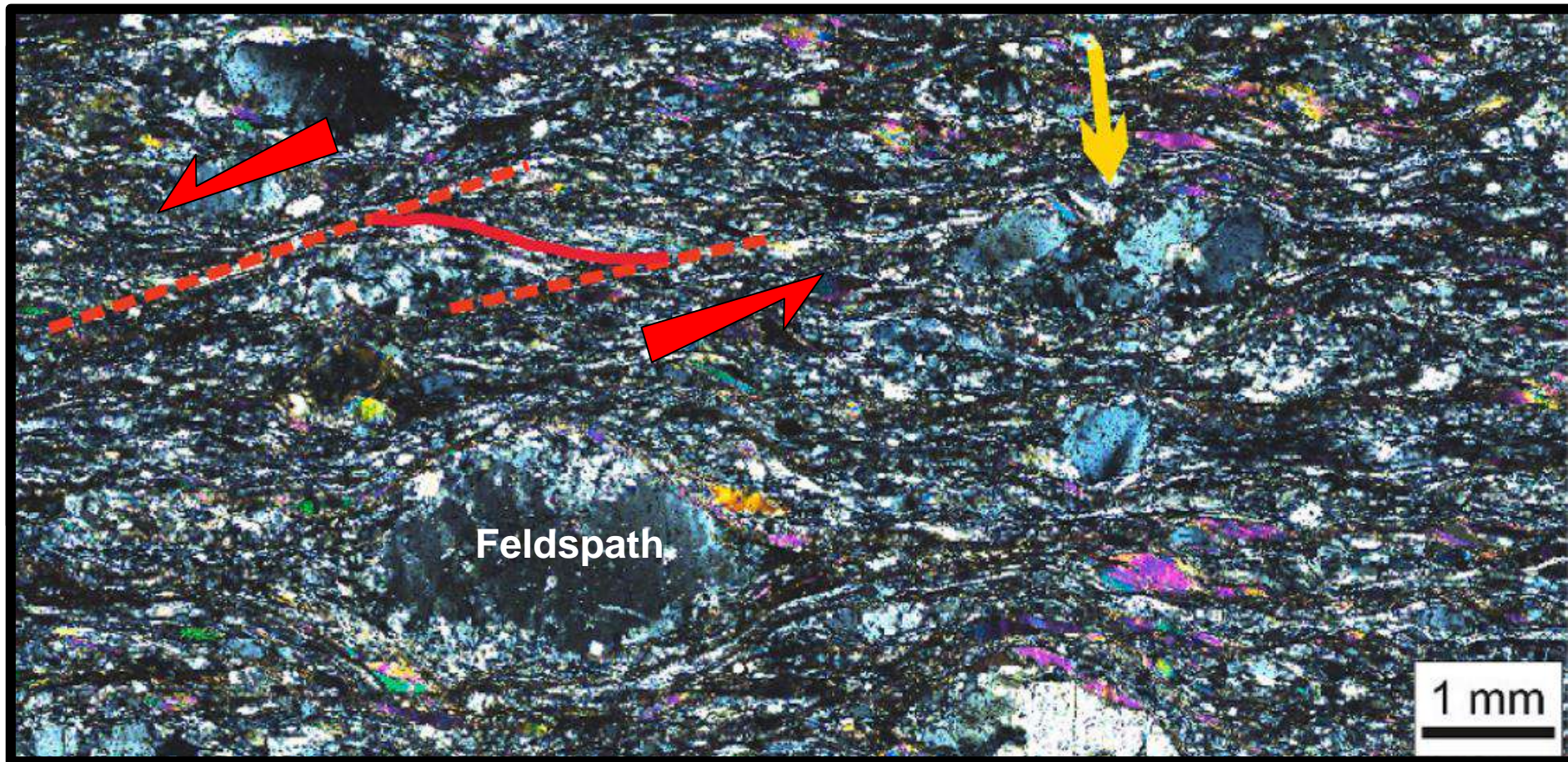
Orthogneiss cisailés dans la faille de Simplon



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

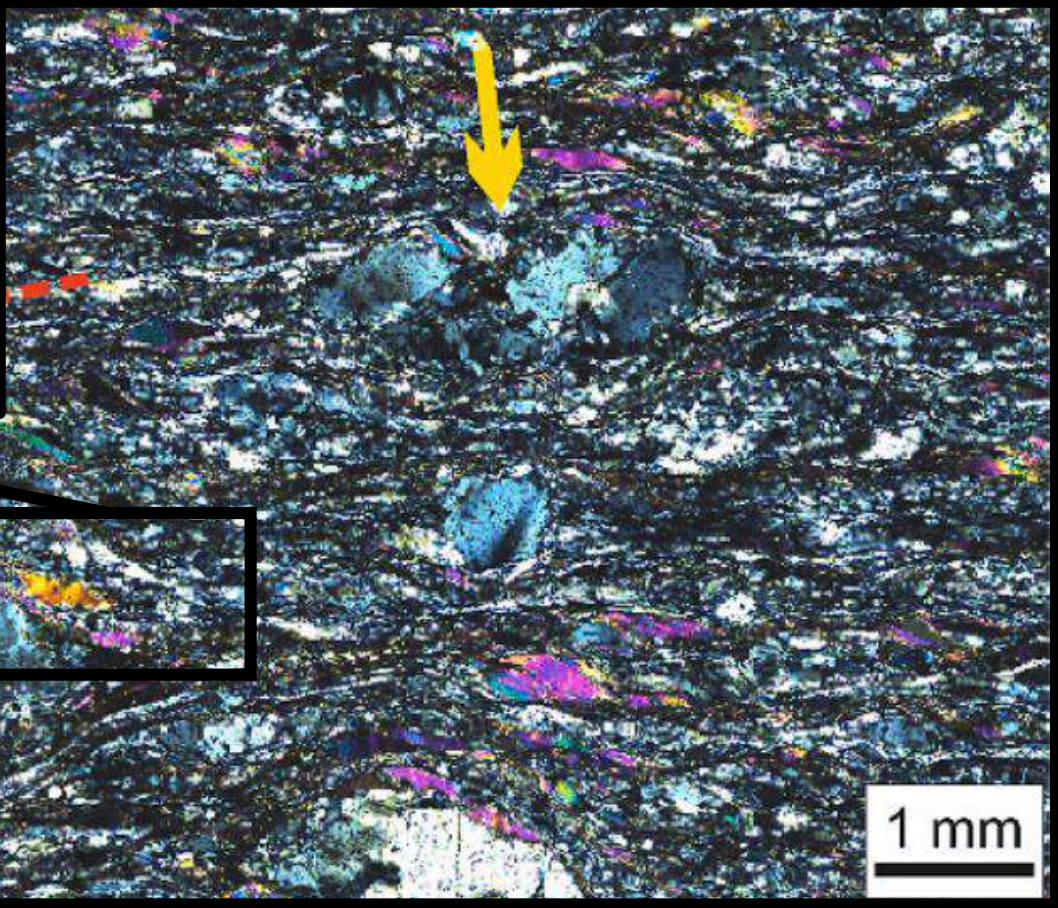
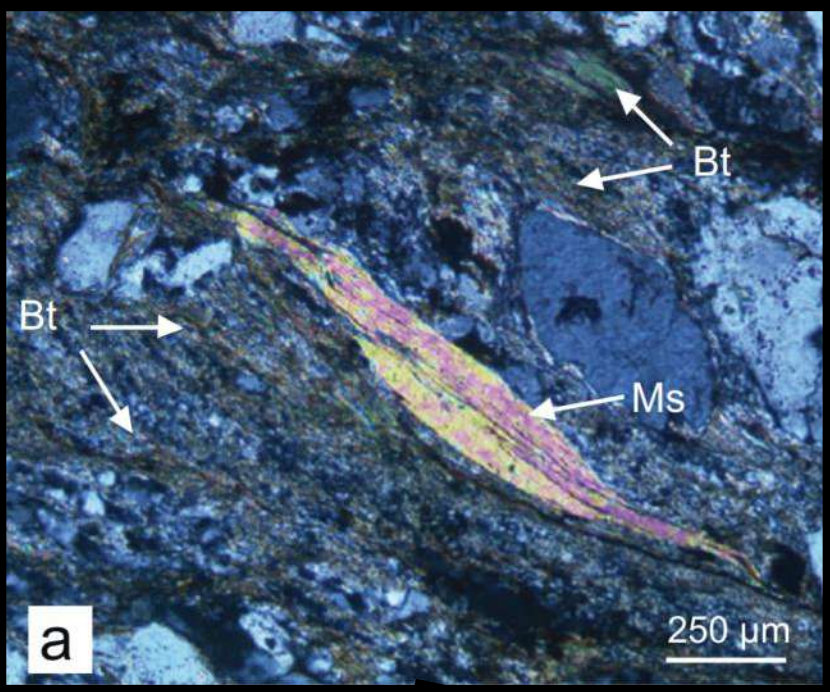
Faille normale ductile (détachement) de Simplon

Orthogneiss cisailés



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Faille normale ductile (détachement) de Simplon

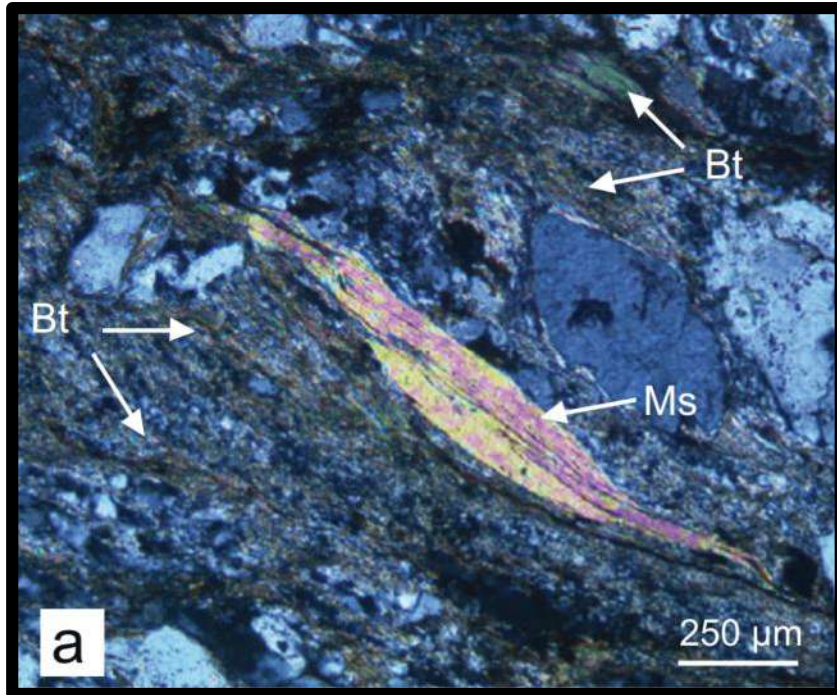


Micas datés entre 20 et 5 Ma

Feldspath

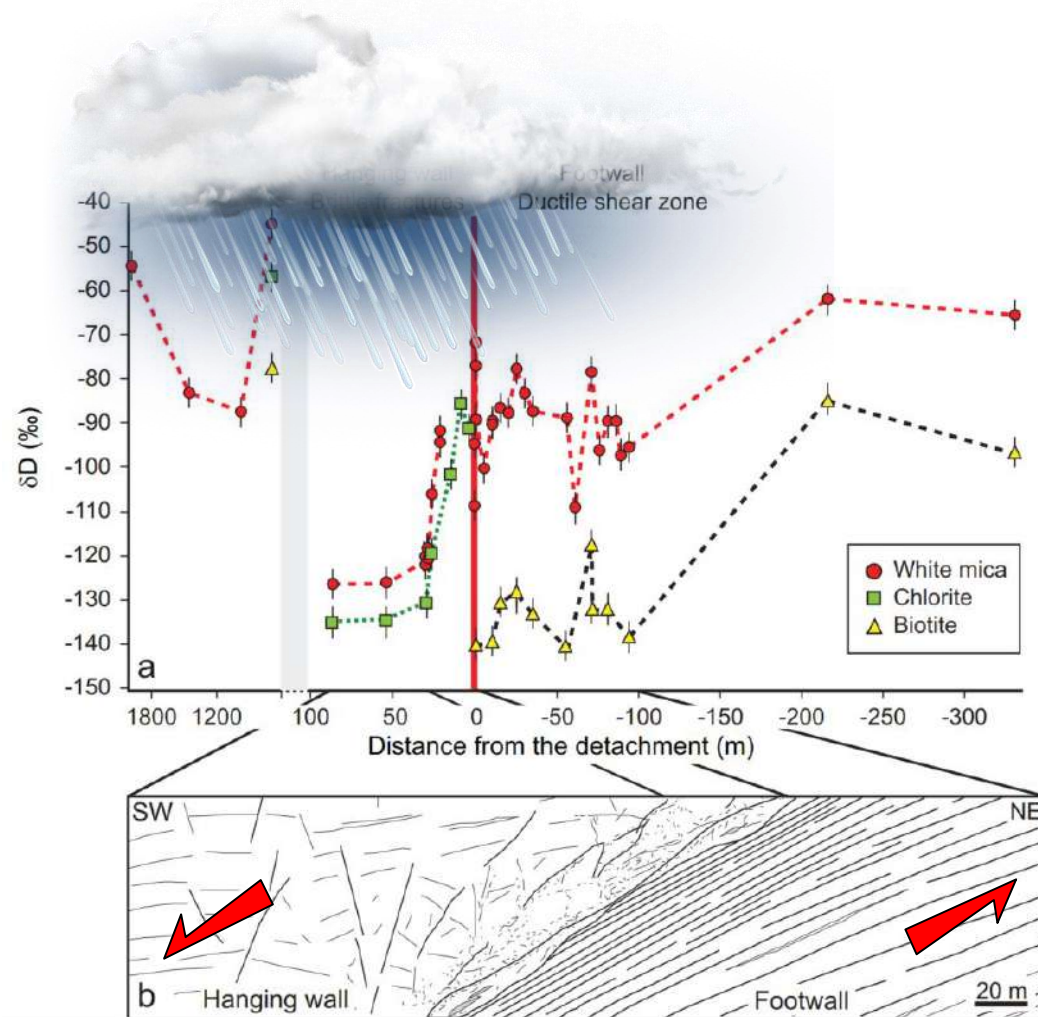
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Faille normale ductile (détachement) de Simplon

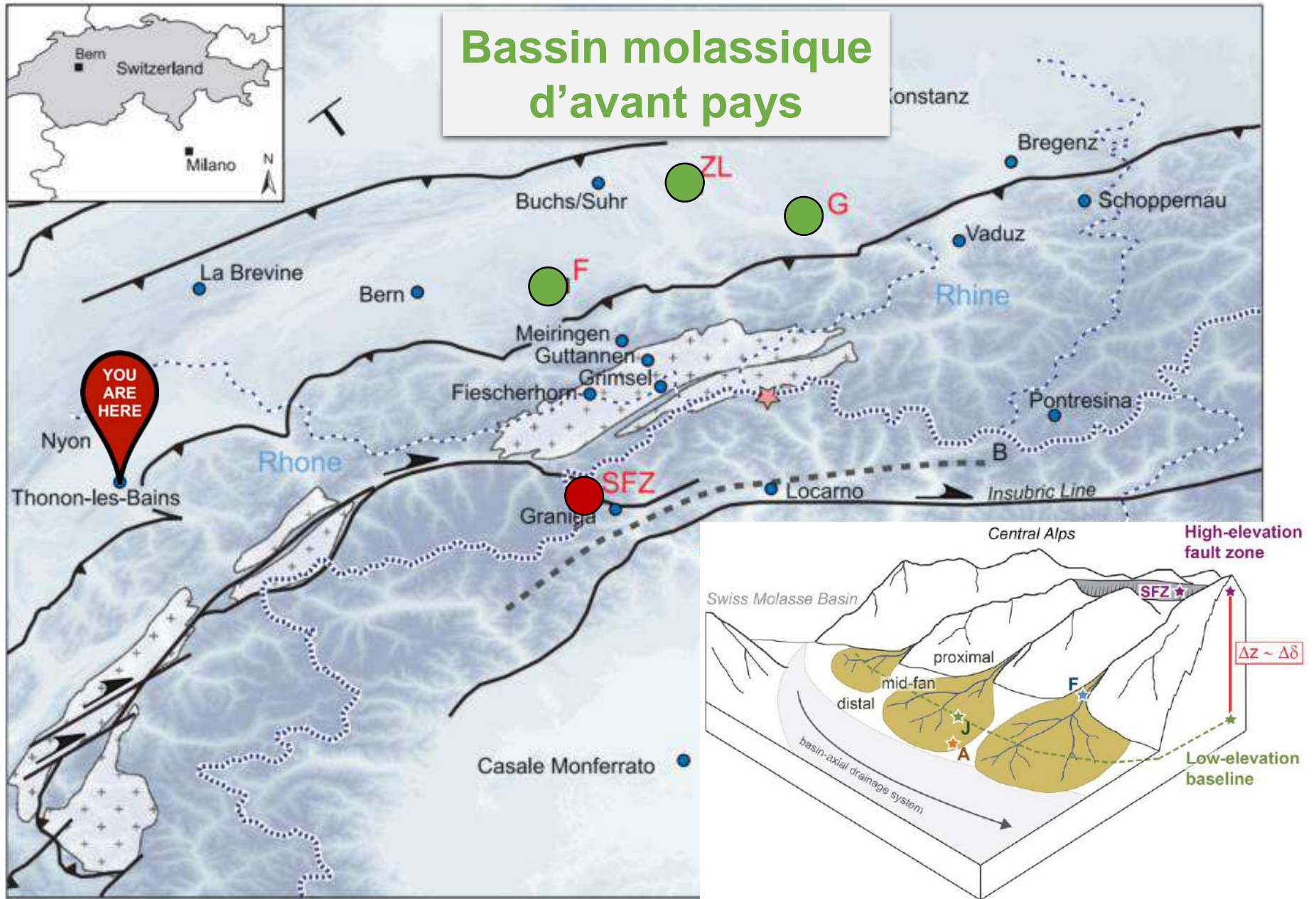


Ratios des isotopes de l'hydrogène (δD) dans les micas

- Biotite jusqu'à -140‰
- Muscovite jusqu'à -126‰
- Chlorite jusqu'à -135‰

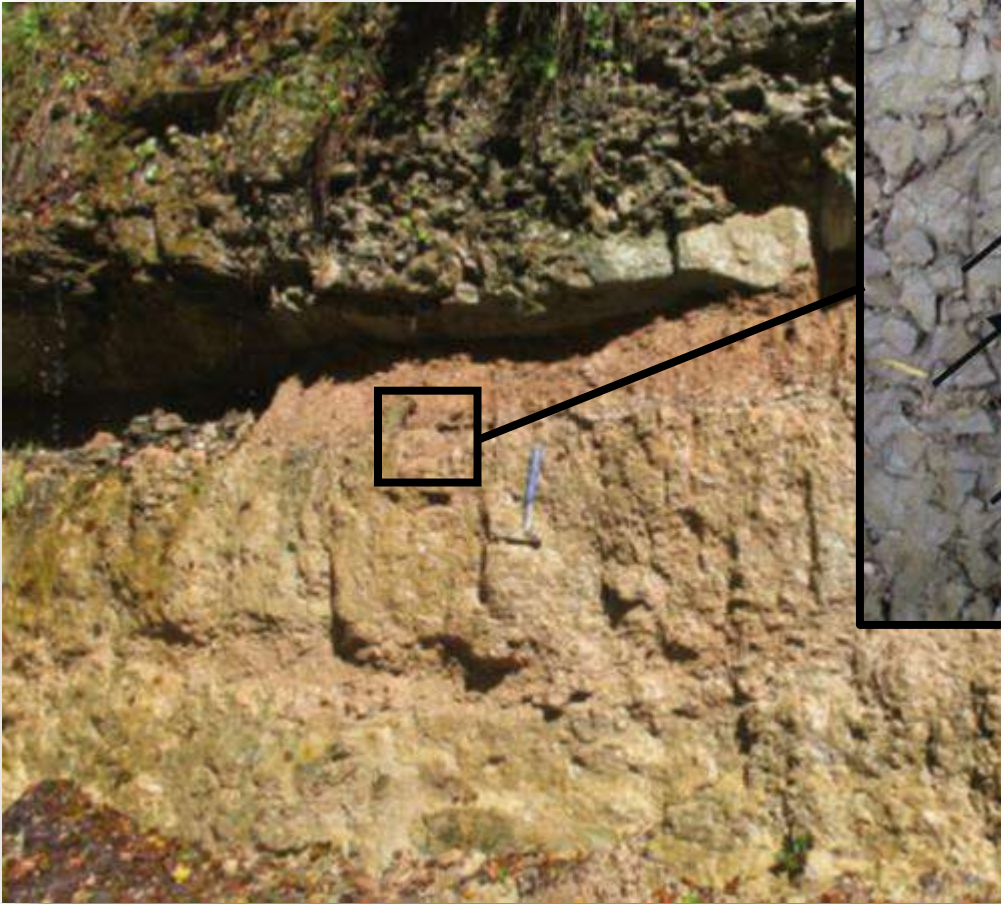


Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Bassin molassique d'avant pays

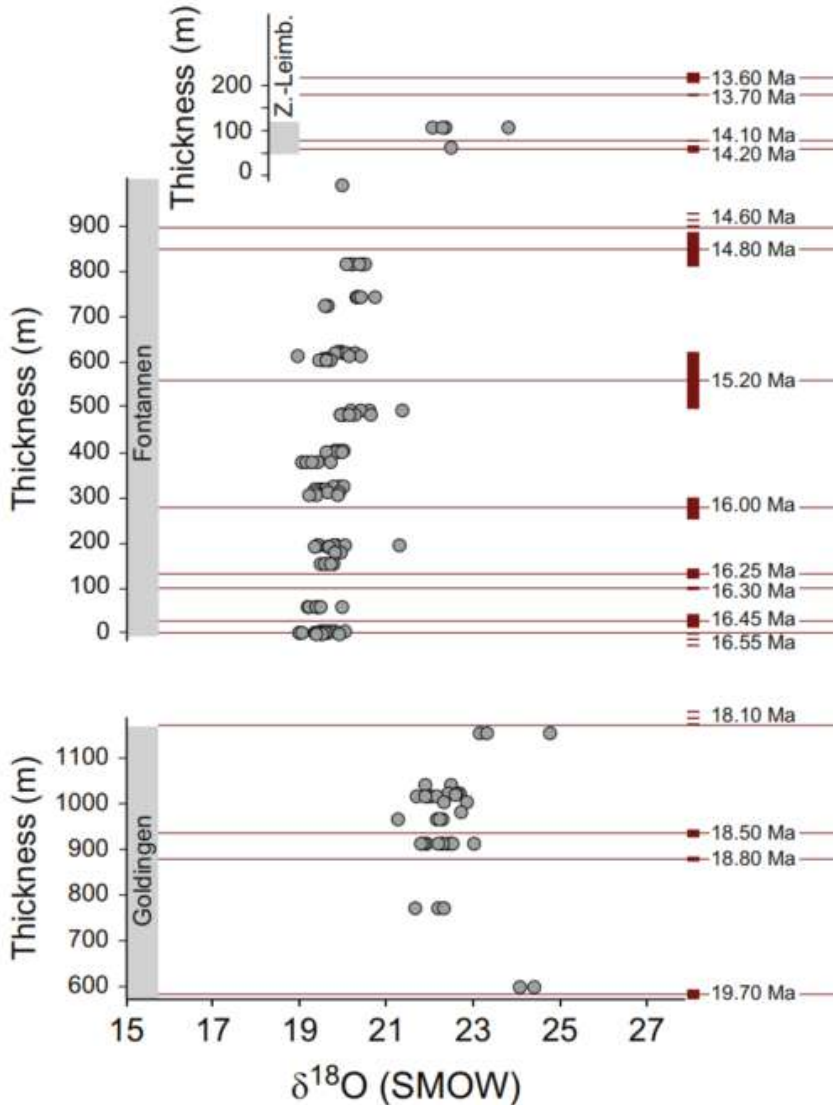


Nodules de carbonates

Paleosol dans des dépôts sédimentaires

Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Bassin molassique d'avant pays



**Isotopes de l'oxygène ($\delta^{18}\text{O}$)
des carbonates
entre 19 et 24 ‰
de 20 à 13 Ma**

Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Calcul de la composition des eaux de pluie

Isotopes de
l'hydrogène (δD)
des micas

Isotopes de
l'oxygène
($\delta^{18}O$) des
carbonates



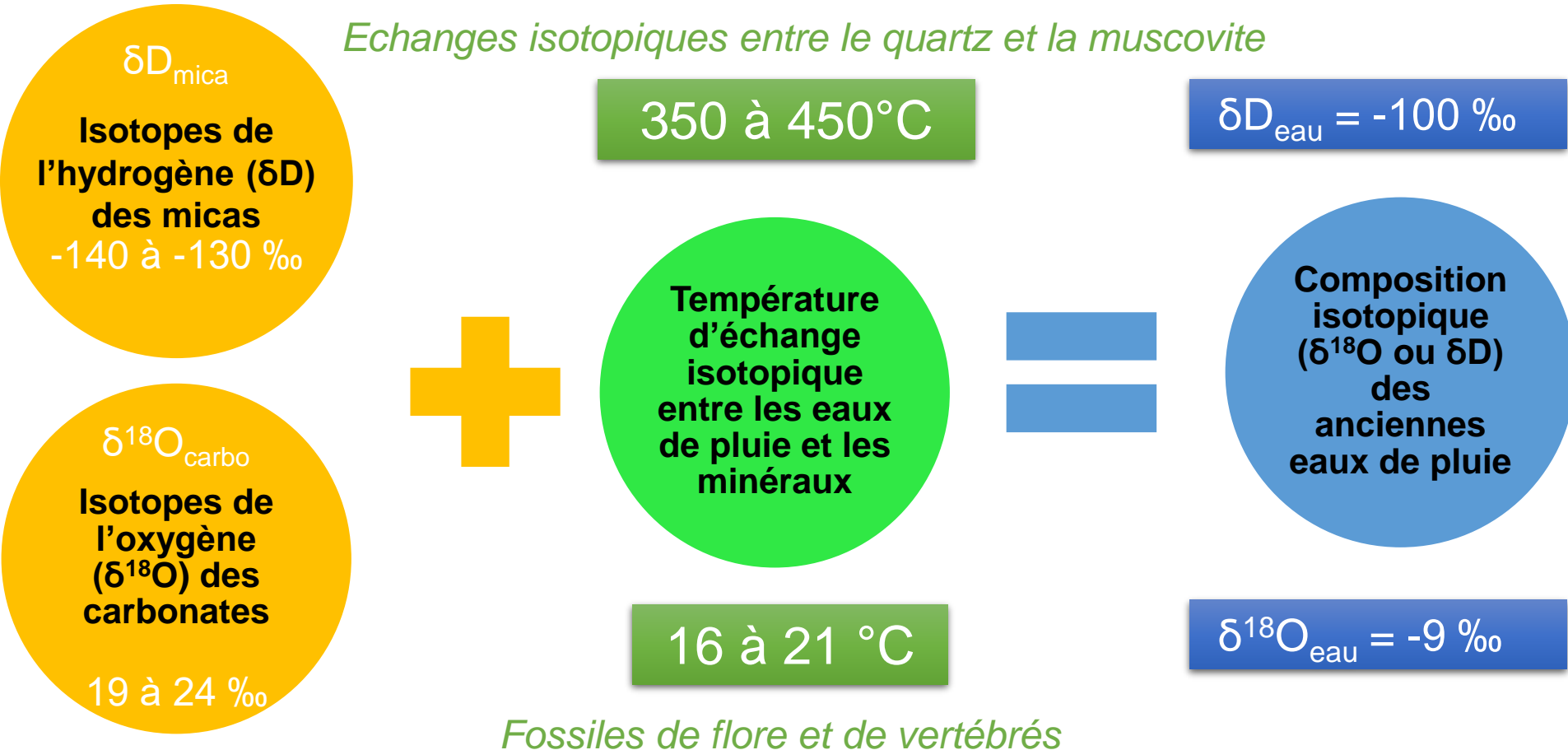
Température
d'échange
isotopique
entre les eaux
de pluie et les
minéraux



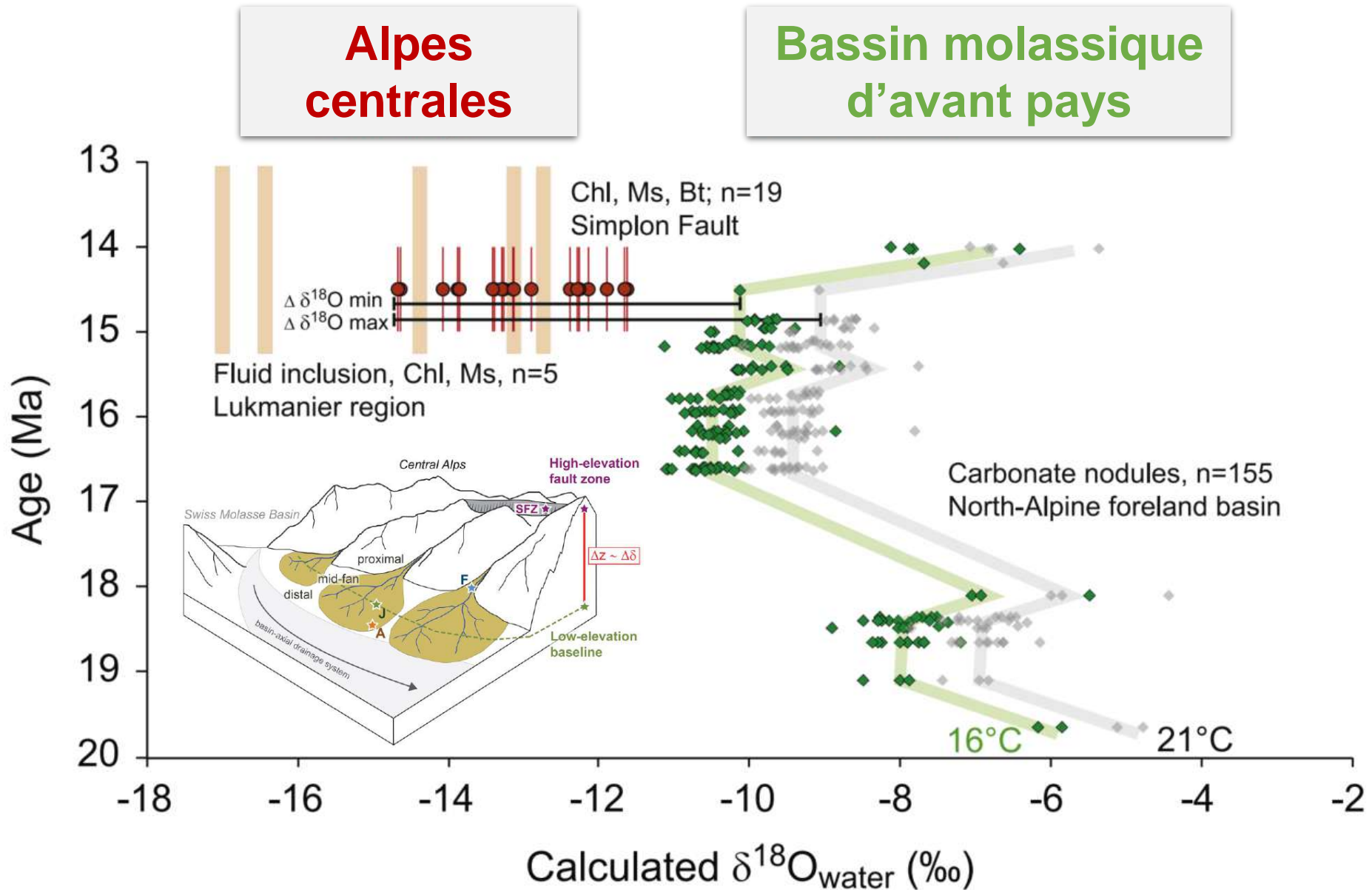
Composition
isotopique
($\delta^{18}O$ ou δD)
des
anciennes
eaux de pluie

Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

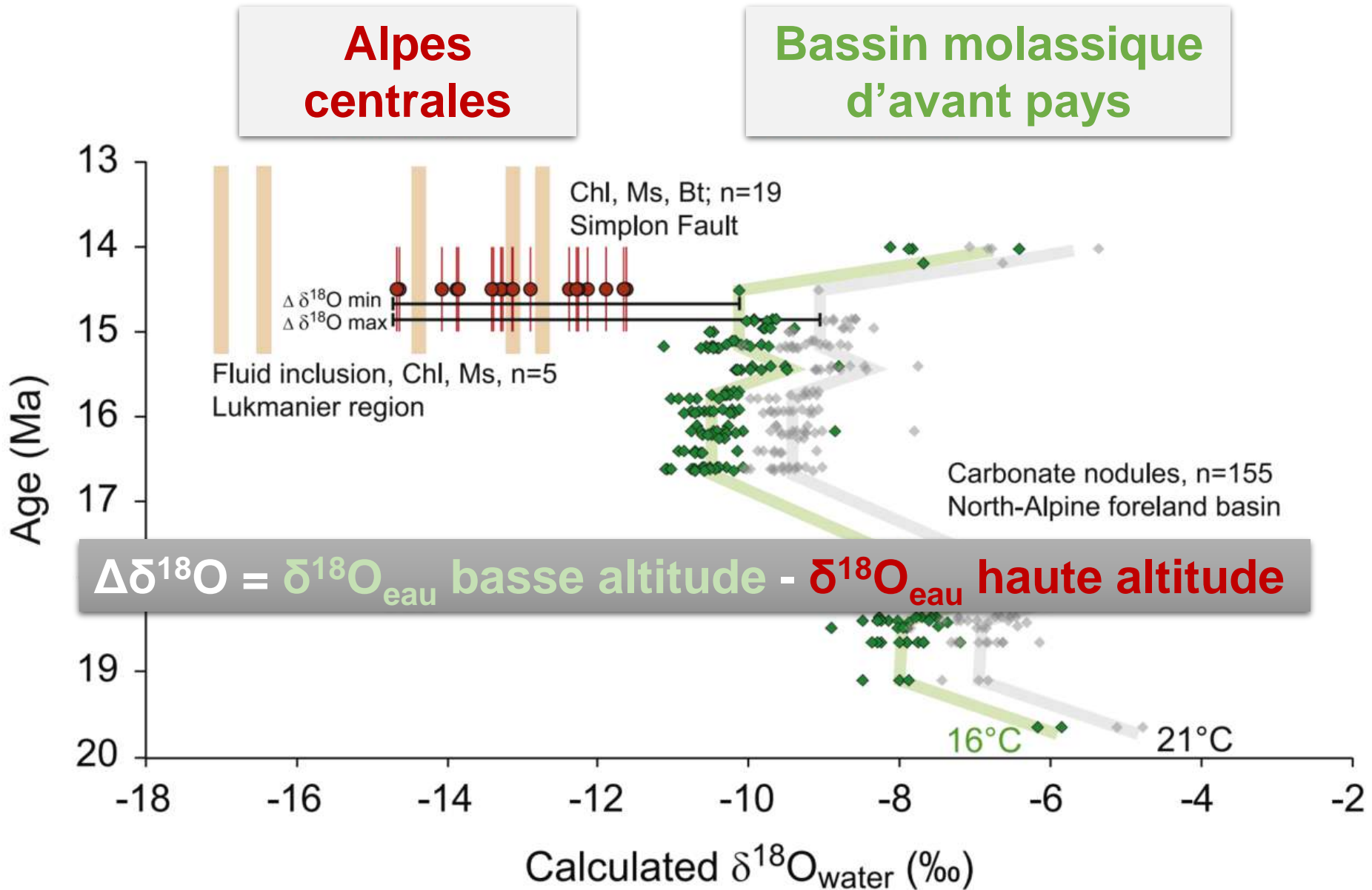
Calcul de la composition des eaux de pluie



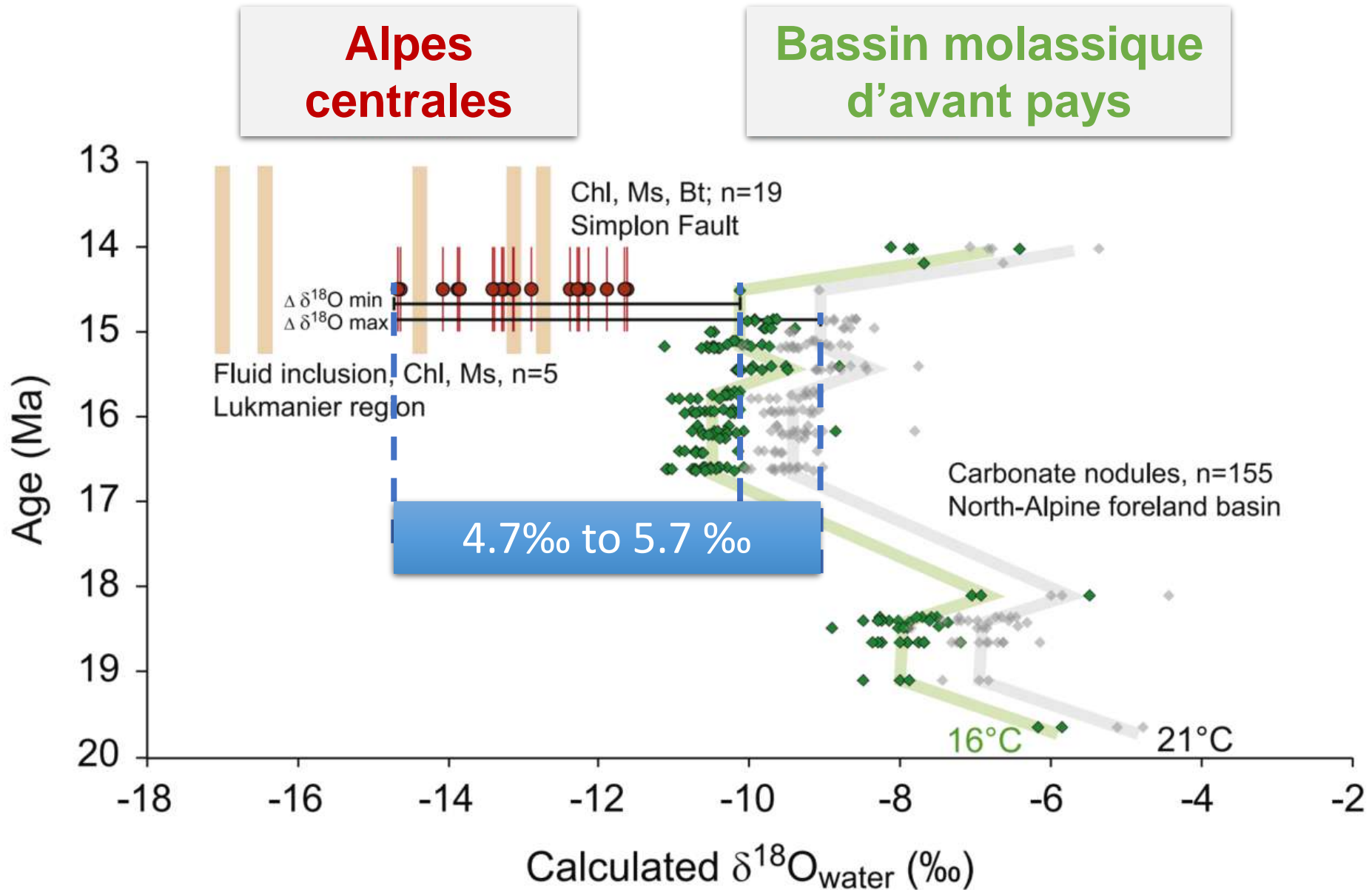
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



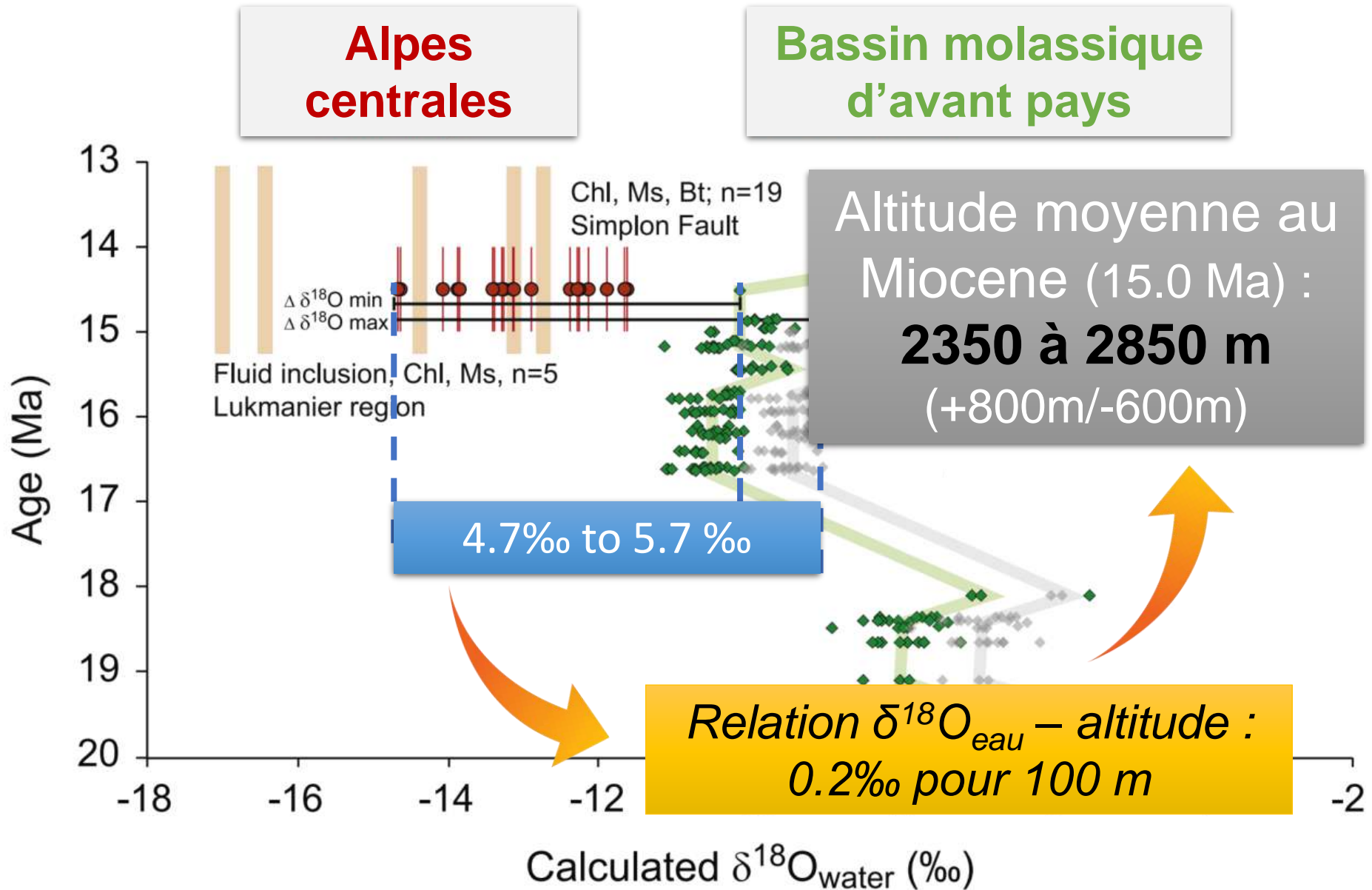
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)



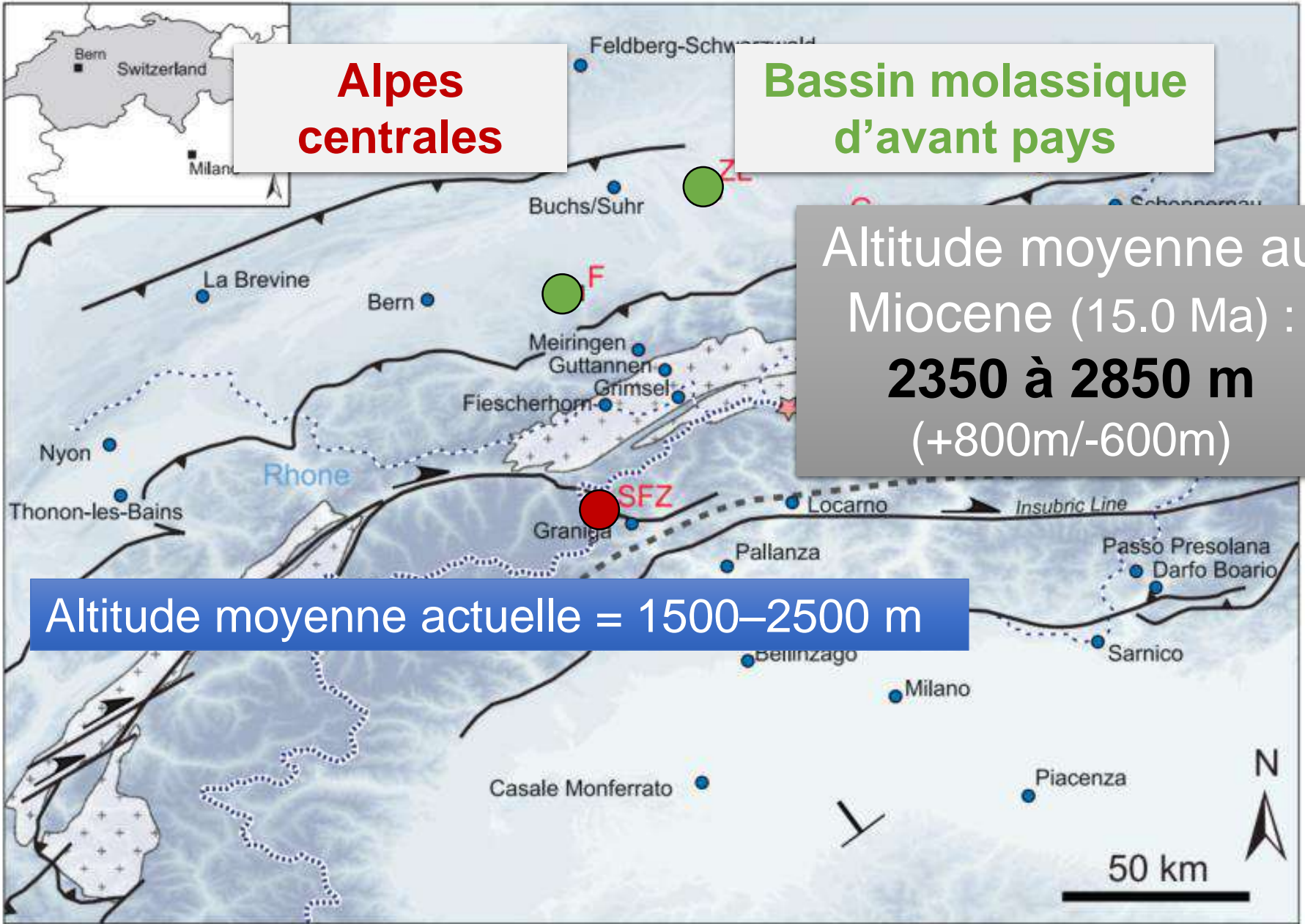
Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

**Alpes
centrales**

**Bassin molassique
d'avant pays**

Altitude moyenne au
Miocene (15.0 Ma) :
2350 à 2850 m
(+800m/-600m)

Altitude moyenne actuelle = 1500–2500 m



Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

Au Miocène, la région des Alpes valaisannes, à la frontière entre l'Italie et la Suisse, avait une altitude similaire voire un peu plus élevée qu'aujourd'hui !

Altitude moyenne au
Miocene (15.0 Ma) :
2350 à 2850 m
(+800m/-600m)

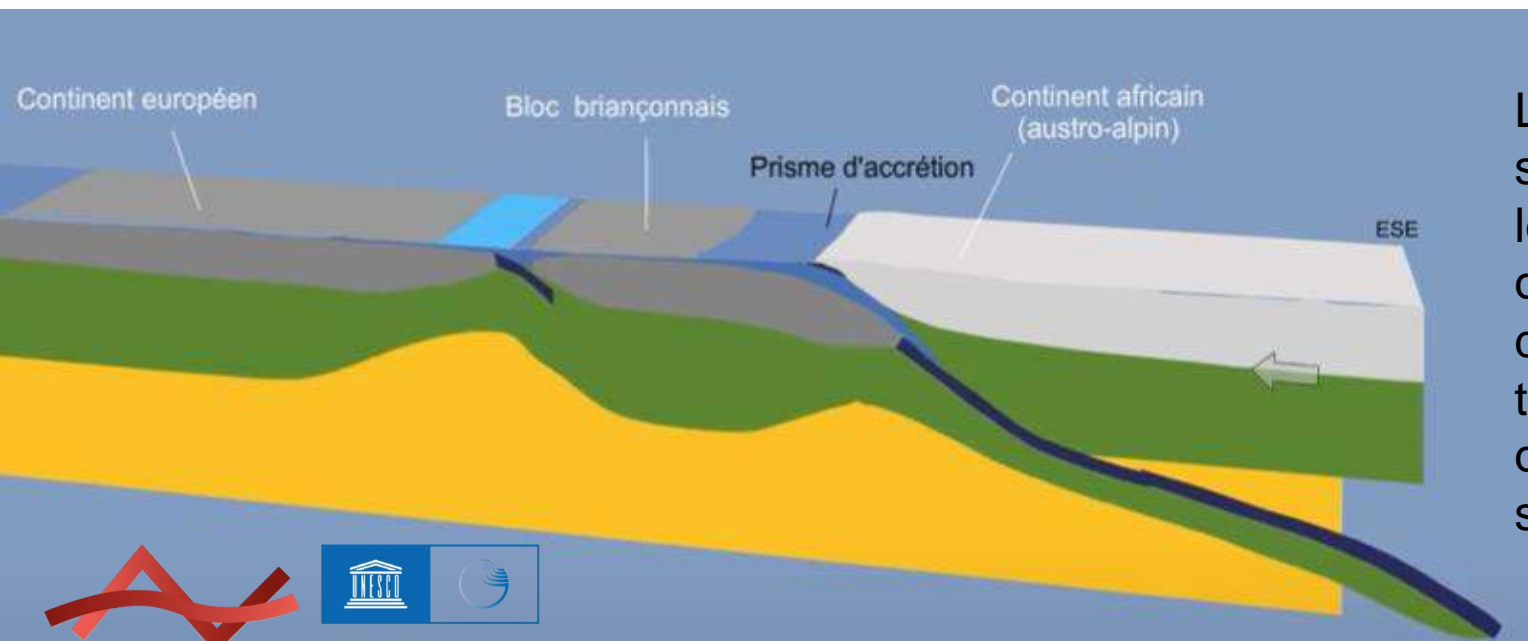
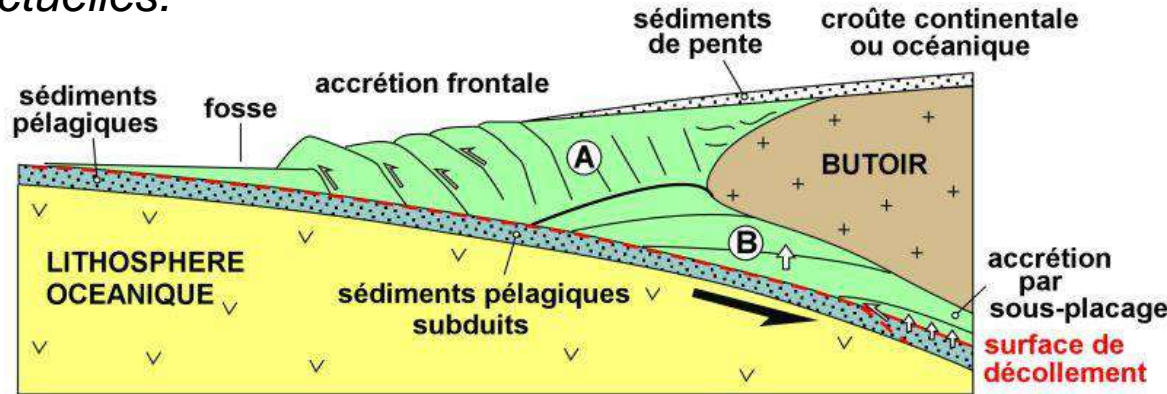
Altitude moyenne actuelle = 1500–2500 m

On imagine ainsi des pics atteignant 3350 à 3850 m d'altitude, comme la punta d'Andolla qui culmine aujourd'hui à 3 656 m.

Paléo-altitude des Alpes au Miocène (20 – 15 Ma)

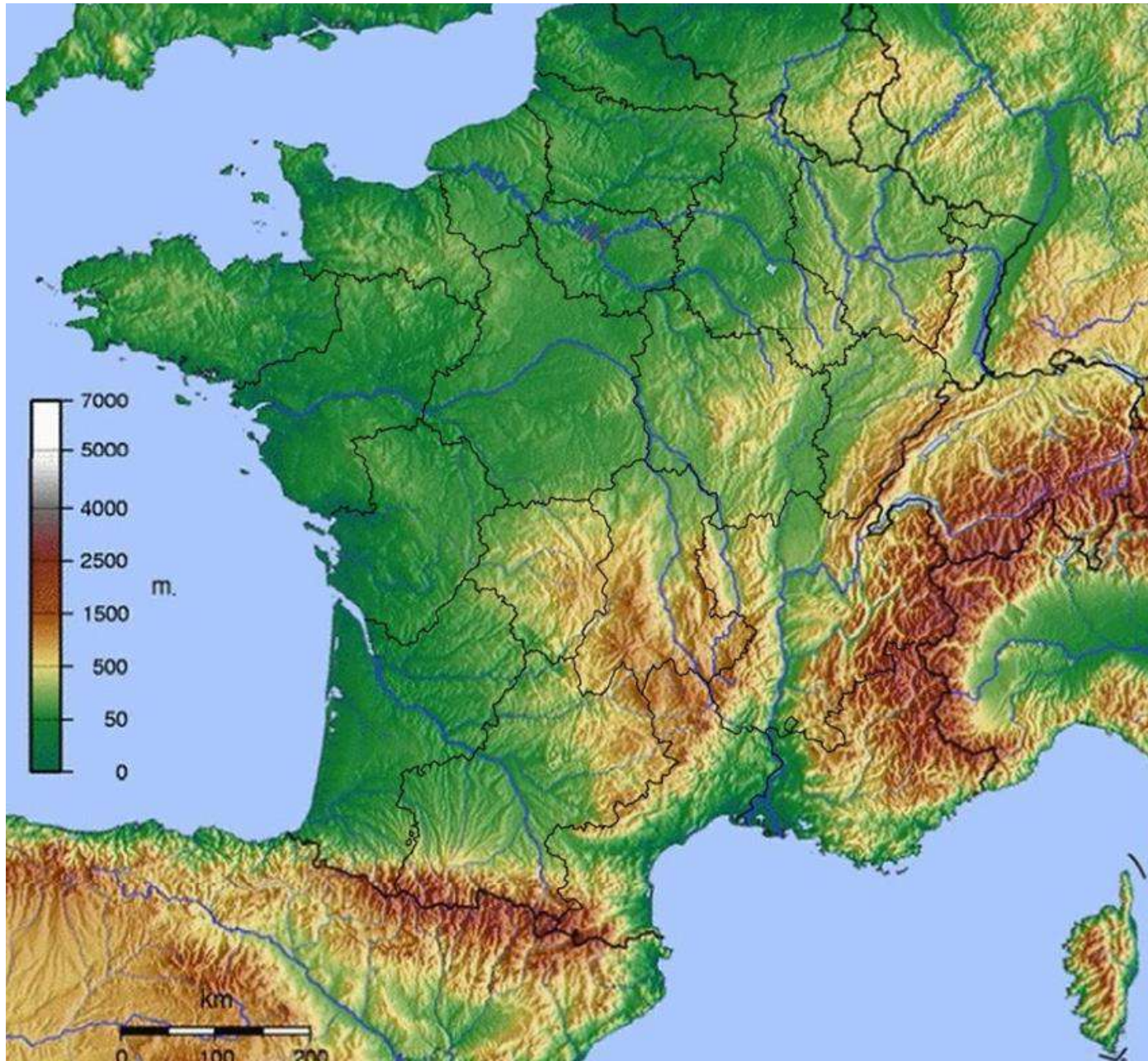
L'altitude des Alpes au Miocène (15 Ma) était similaire, ou encore plus élevée que les altitudes alpines actuelles.

La topographie alpine s'est donc largement construite pendant le stade de construction du prisme orogénique alpin.

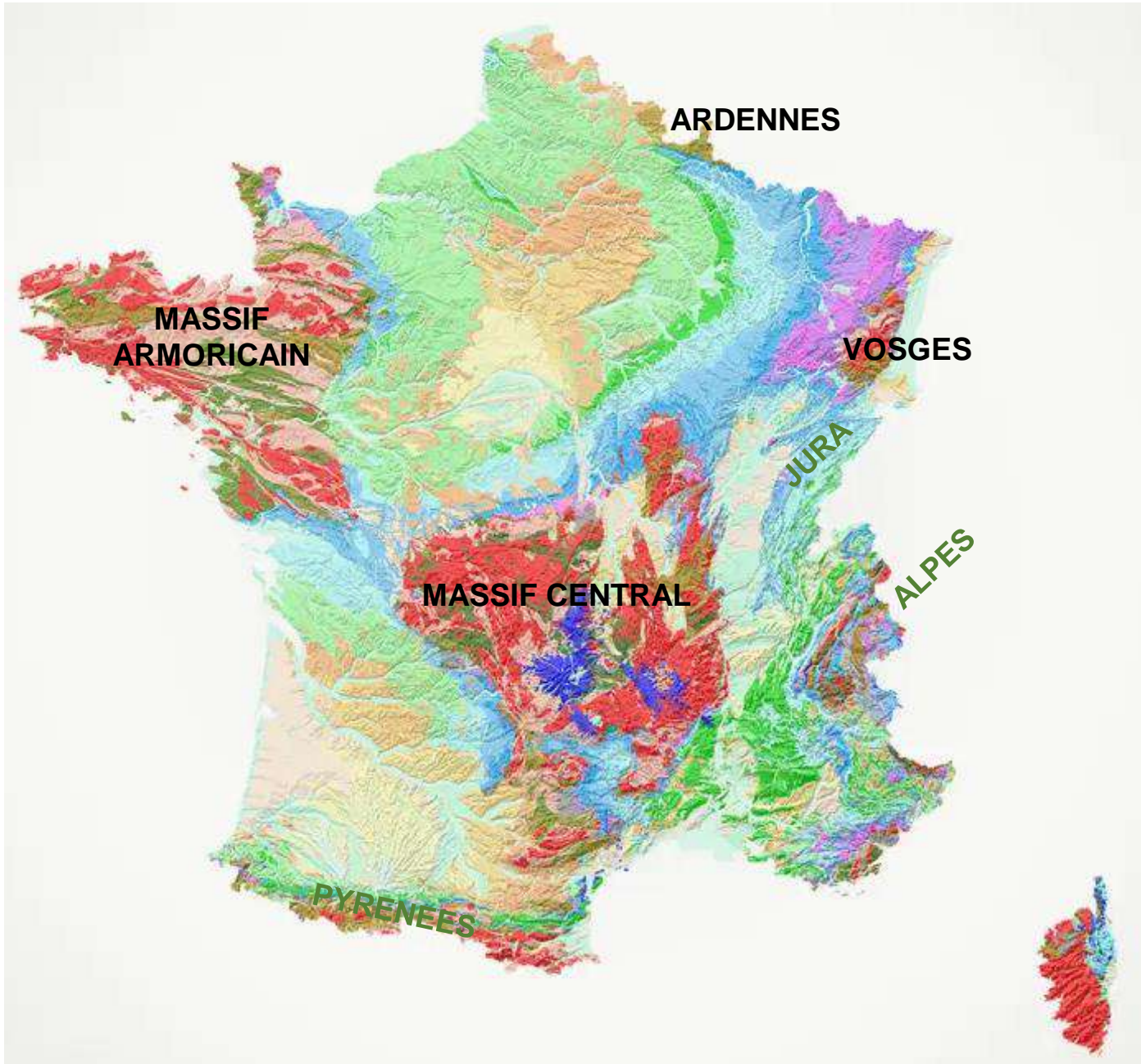


La topographie se construit car les taux d'accrétion dépassent les taux d'érosion et d'évacuation des sédiments.

Les chaînes de montagnes en France

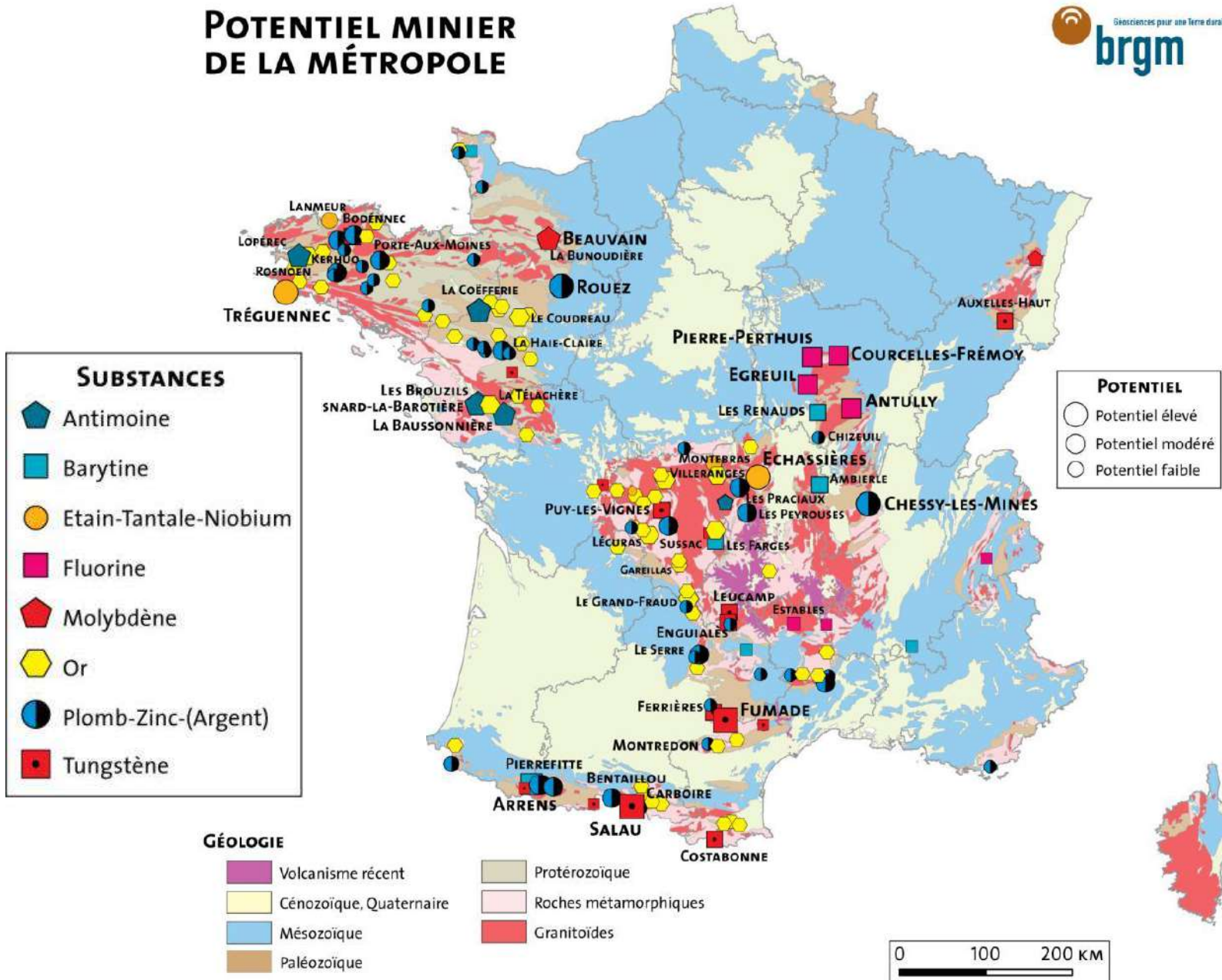


Les chaînes de montagnes en France

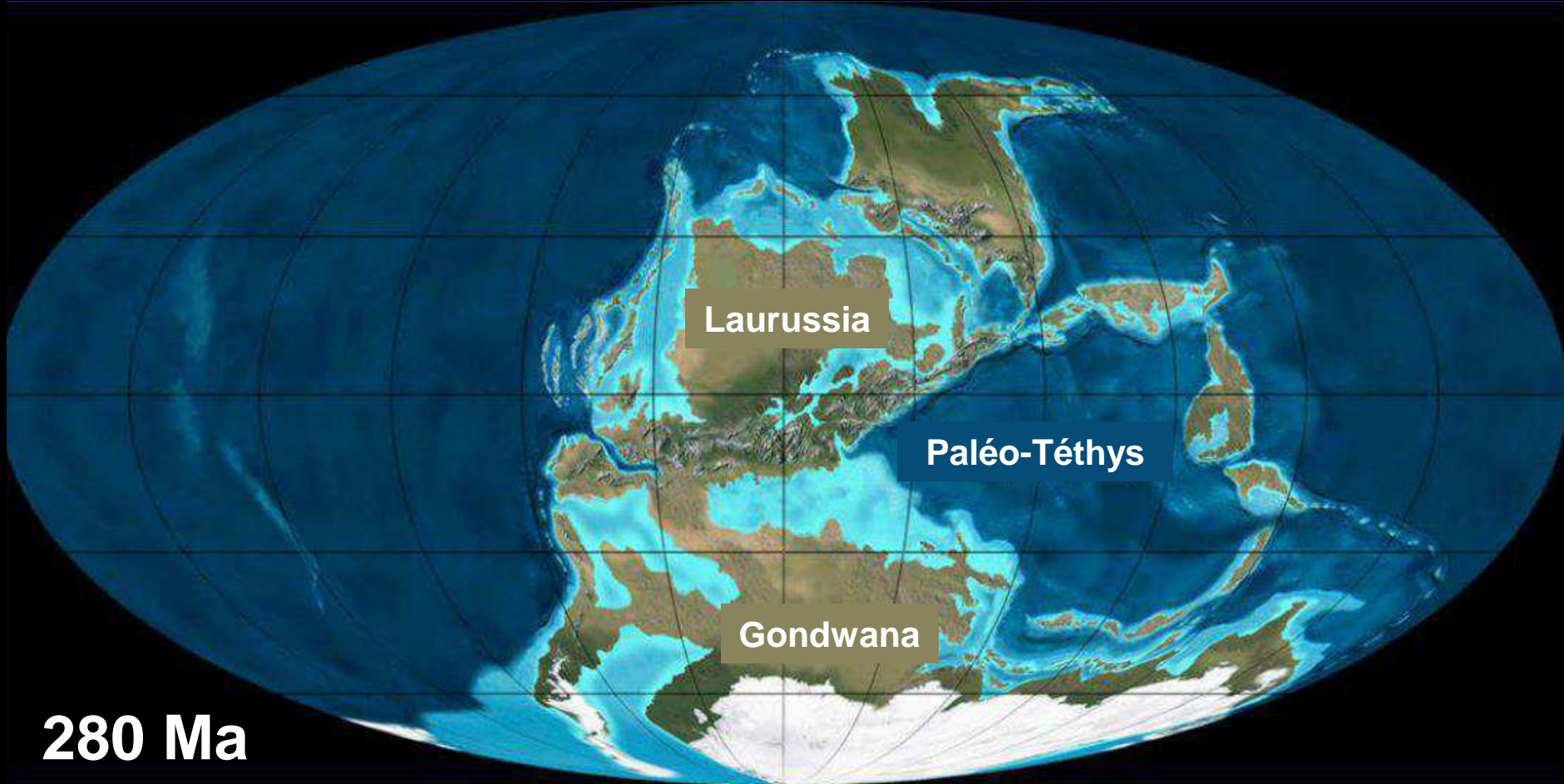


Les chaînes de montagnes en France

POTENTIEL MINIER DE LA MÉTROPOLE



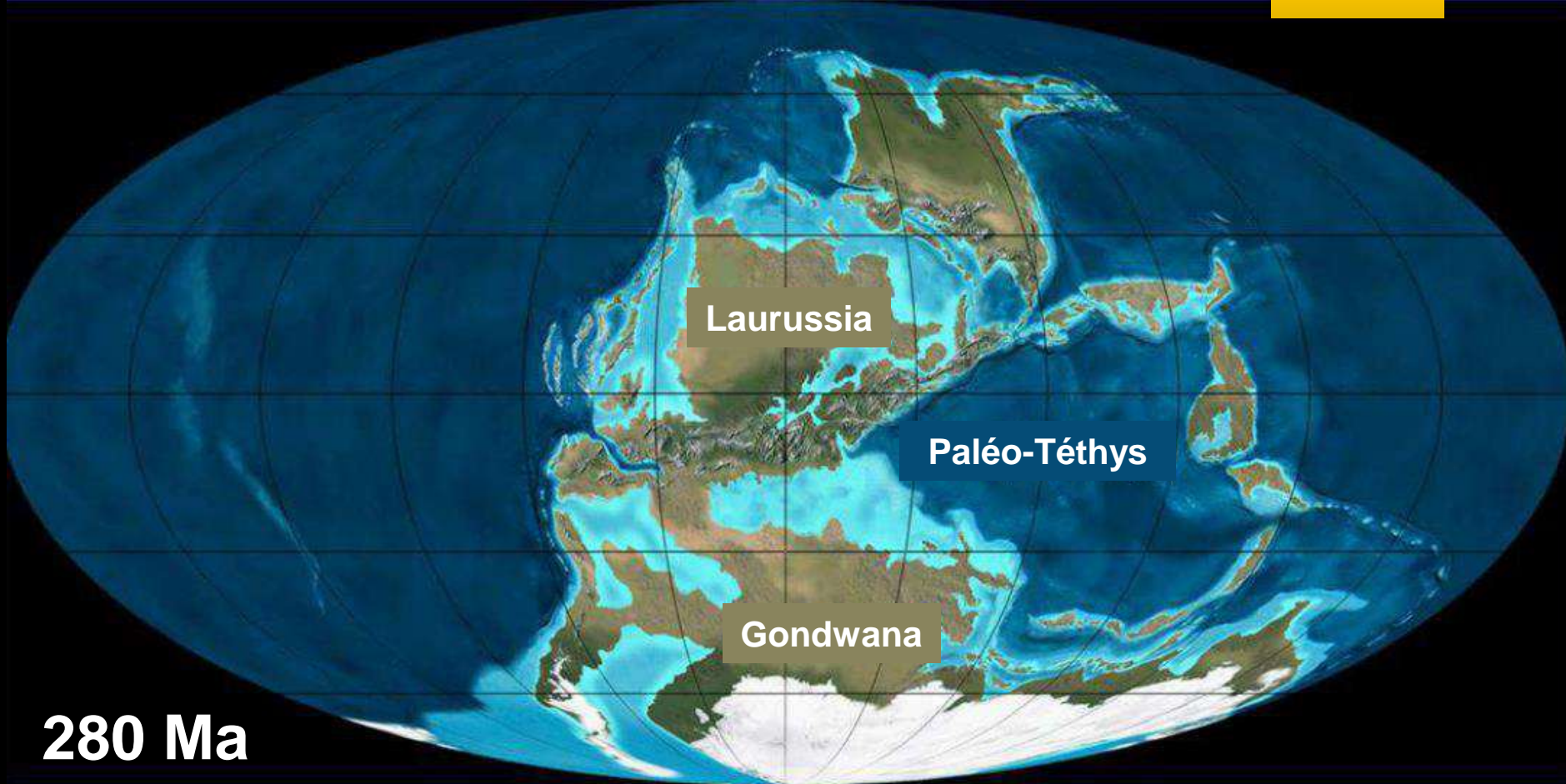
La chaîne Varisque au Carbonifère



Pangée

La chaîne Varisque au Carbonifère

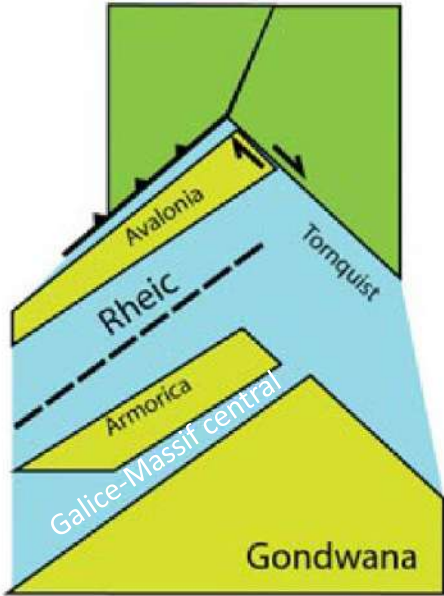
CLIMAT



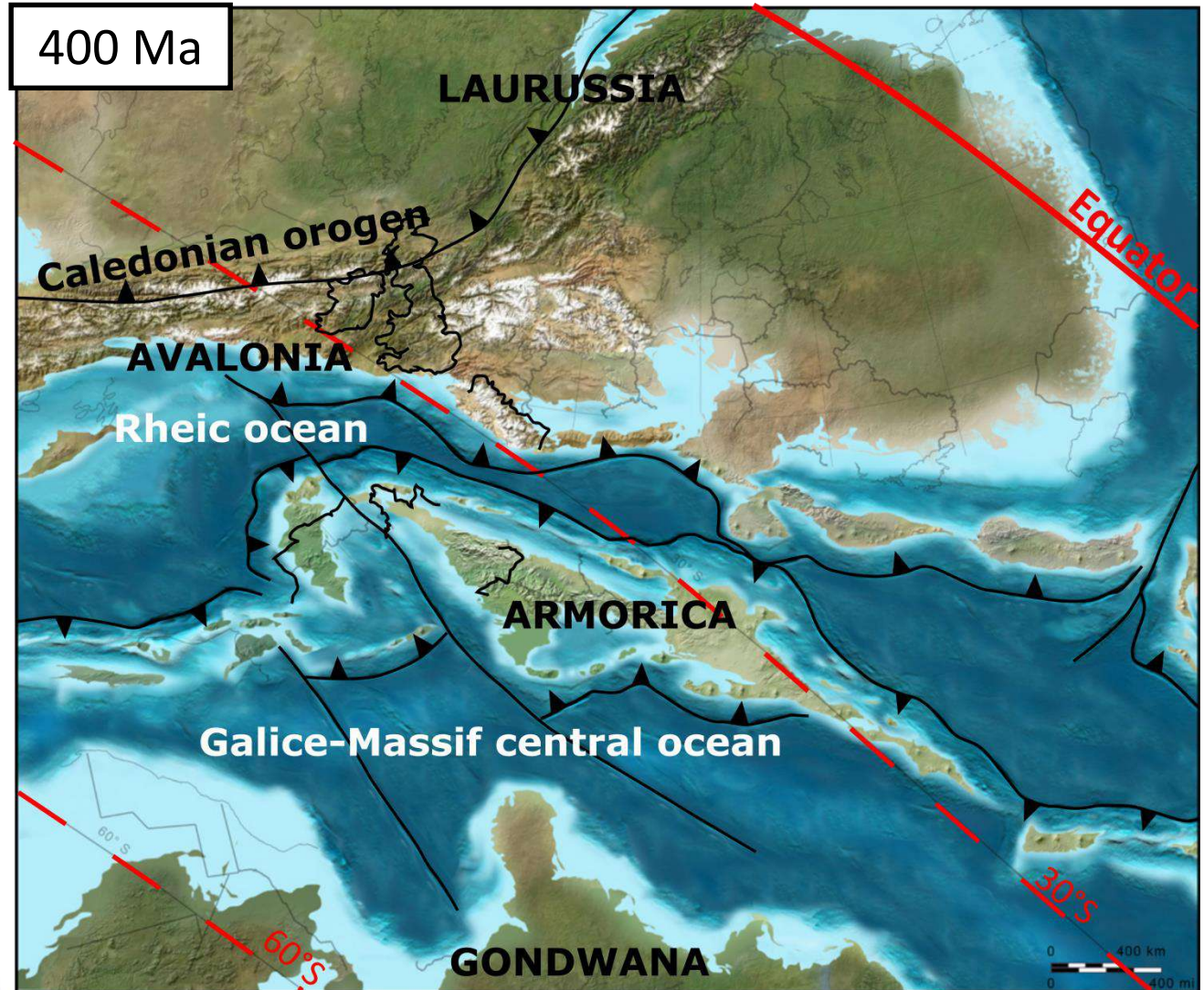
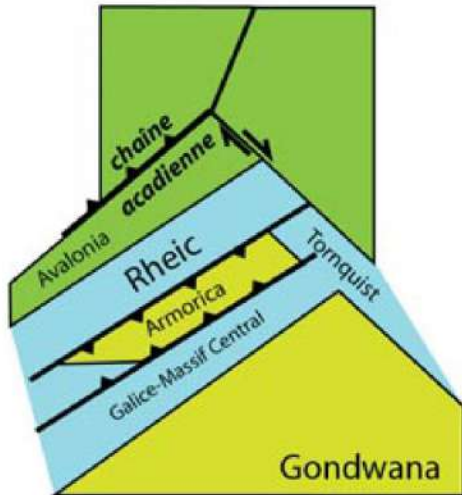
- Fin Carbonifère (300 Ma) :** 2 glaciations majeures à ~315 et ~298-295 Ma
- Permien:** réchauffement climatique (fonte de la banquise et climat aride)
- Fin Permien (250 Ma) :** plus grande extinction de masse (95% mer, 70% terre)

La chaîne Varisque au Carbonifère

Silurien
(430 Ma)

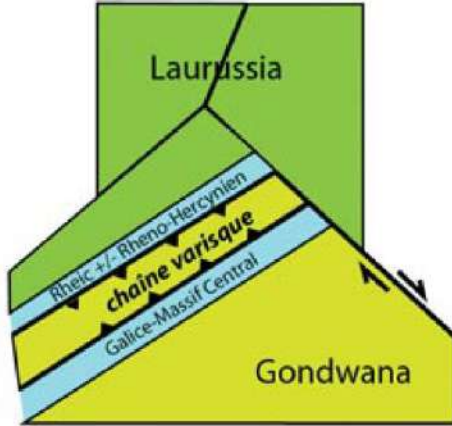


Dévonien inf.
(420-410 Ma)

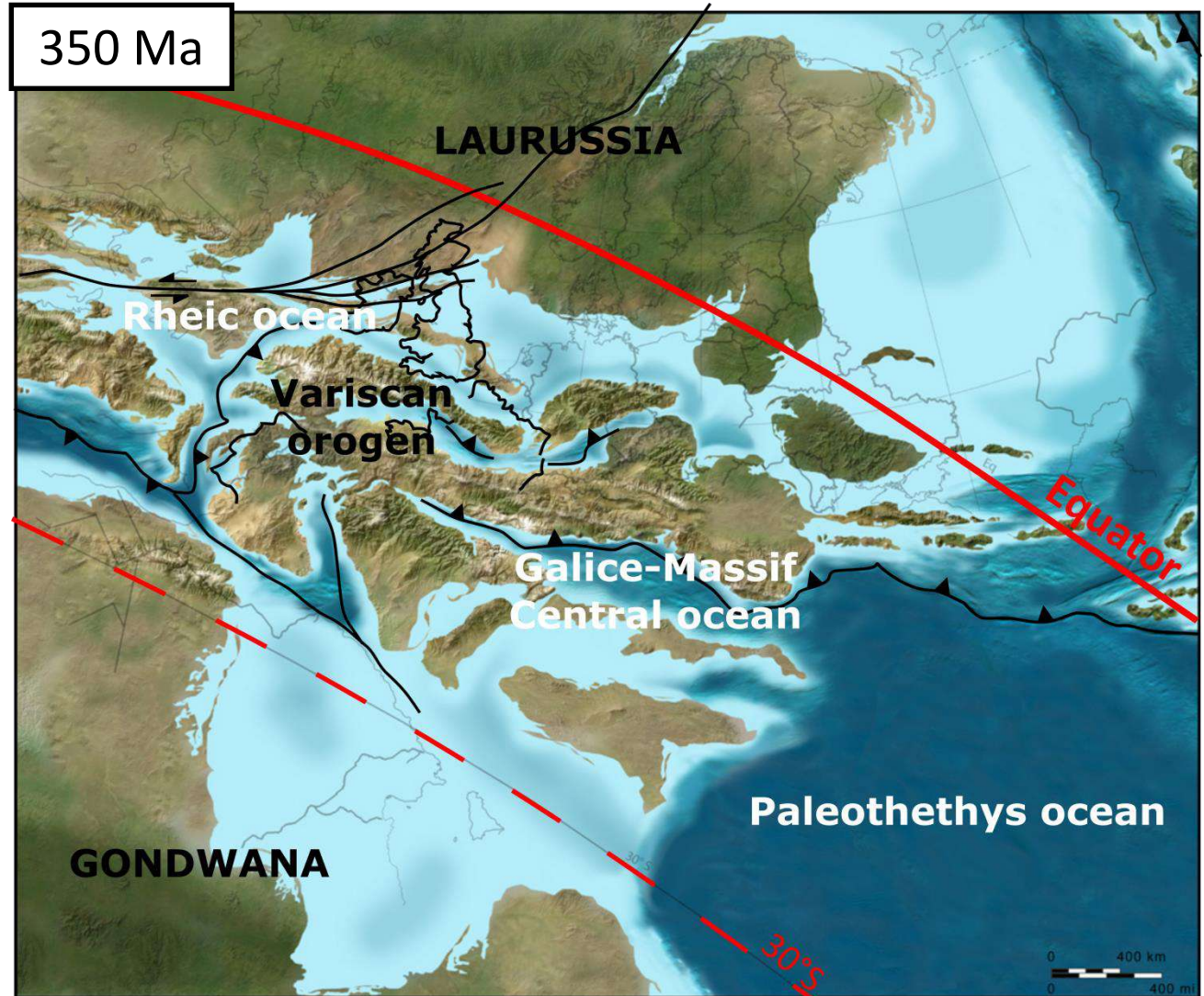
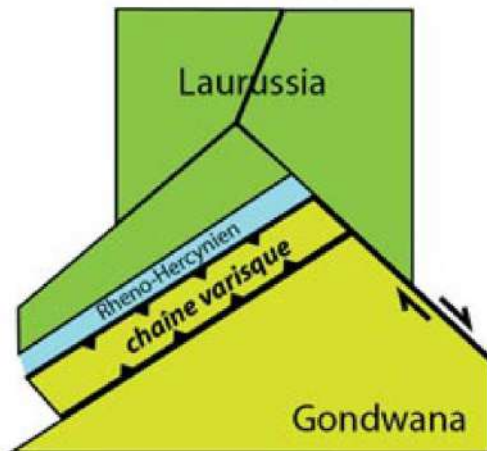


La chaîne Varisque au Carbonifère

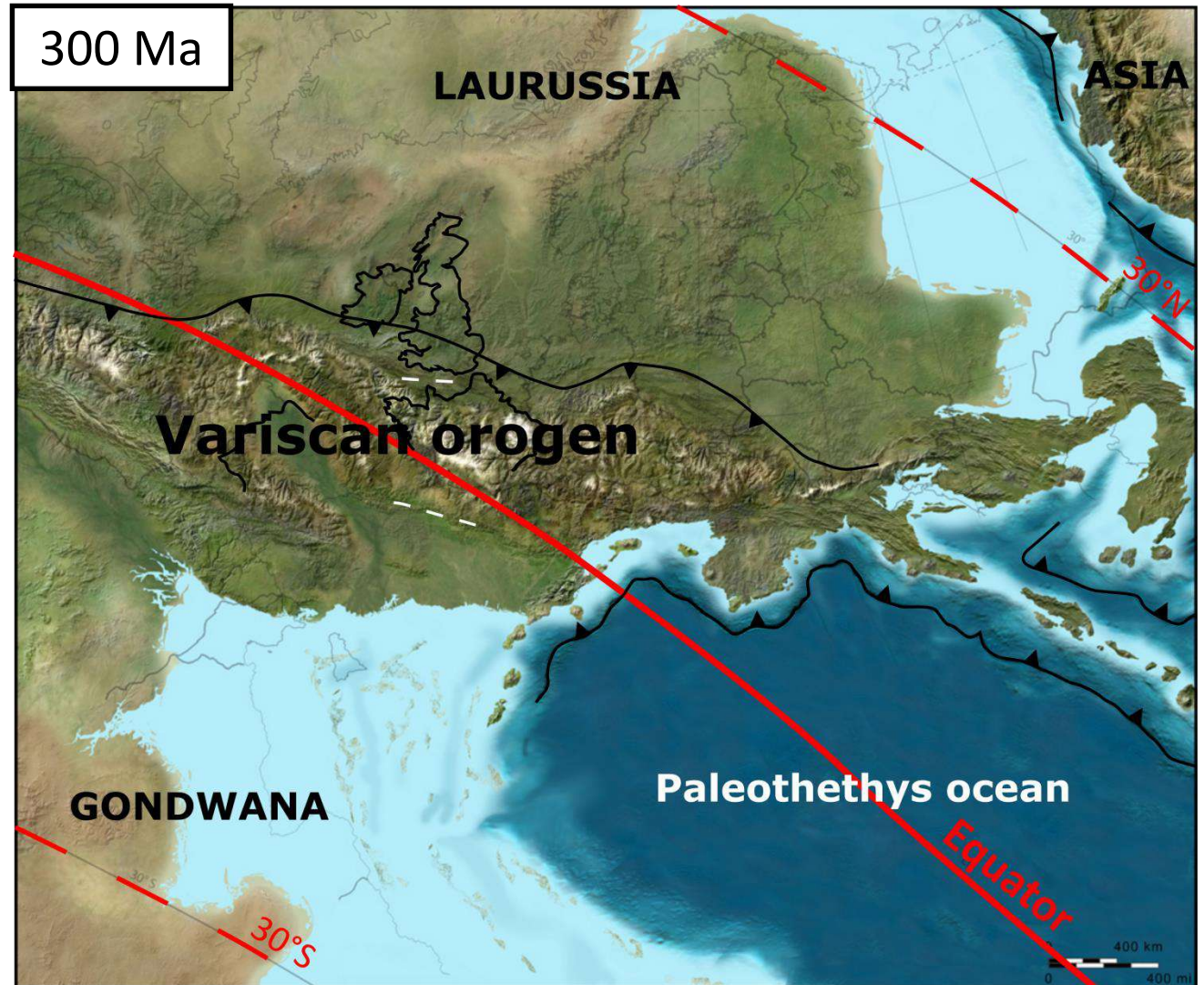
Dévonien sup.
(380-360 Ma)



Carbonifère inf.
(350-340 Ma)



La chaîne Varisque au Carbonifère



*Carbonifère sup.
(330-320 Ma)*

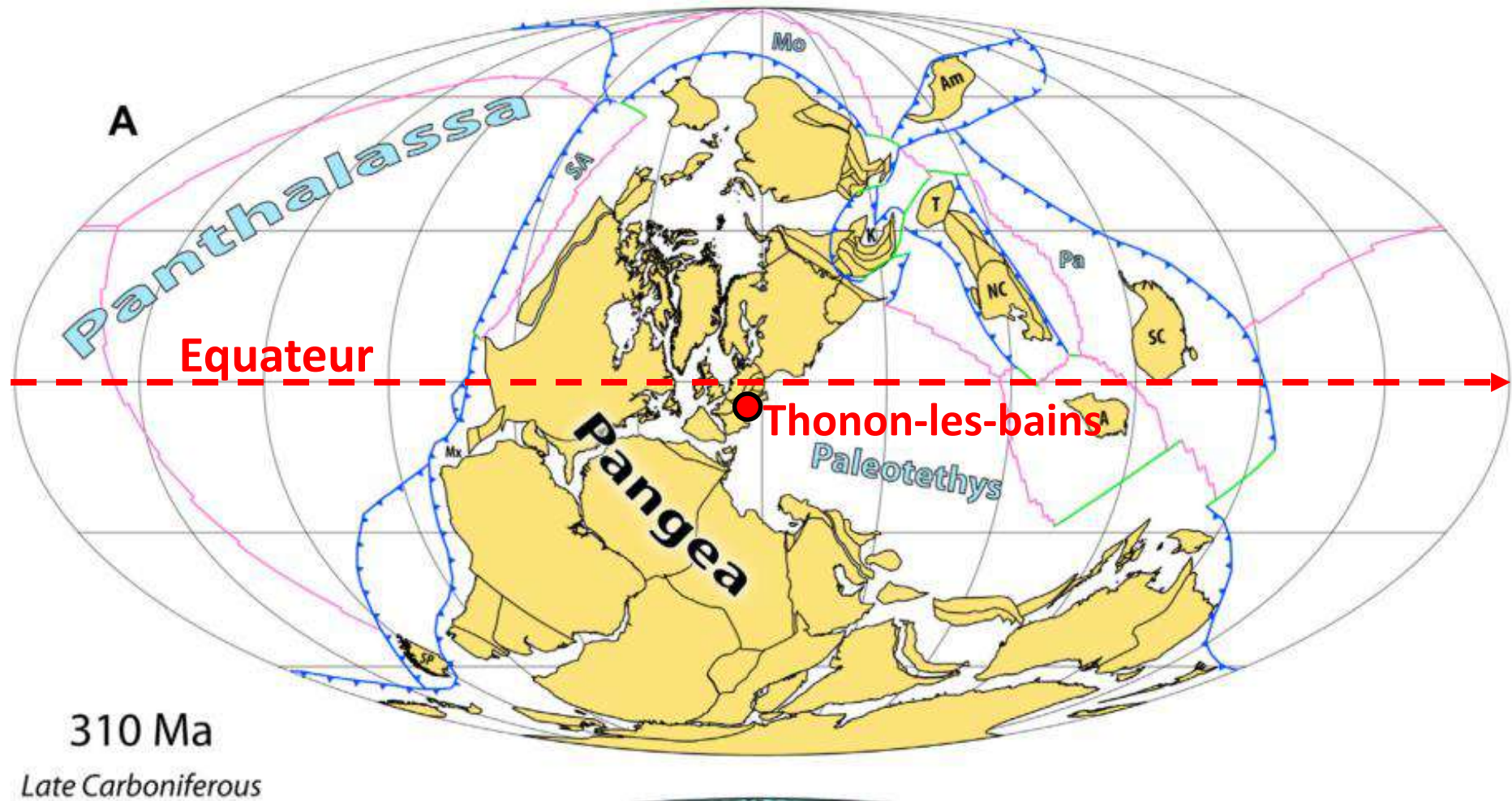


La chaîne Varisque au Carbonifère

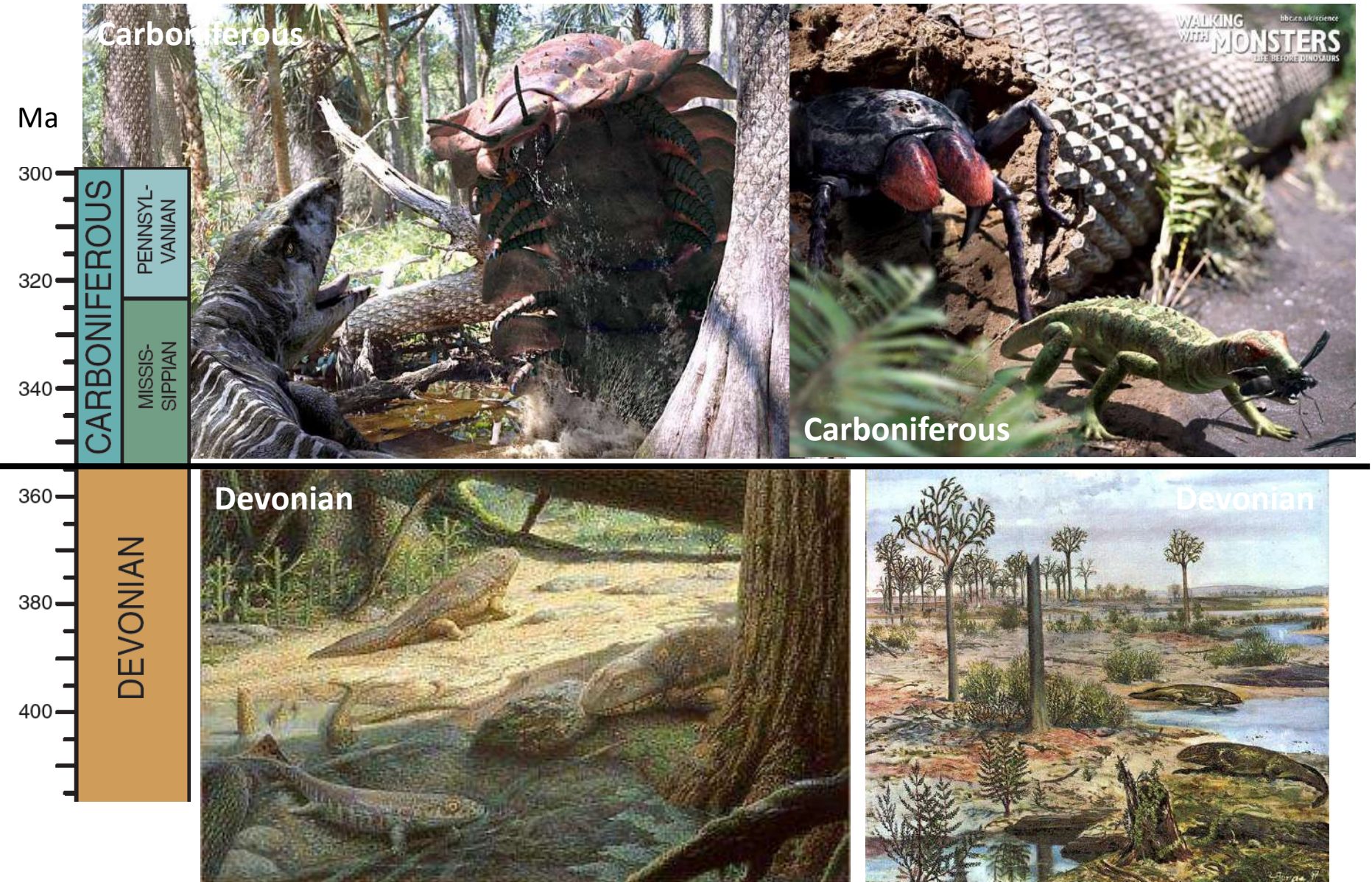
**Thonon-les-Bains
il y a
300
millions
d'années**

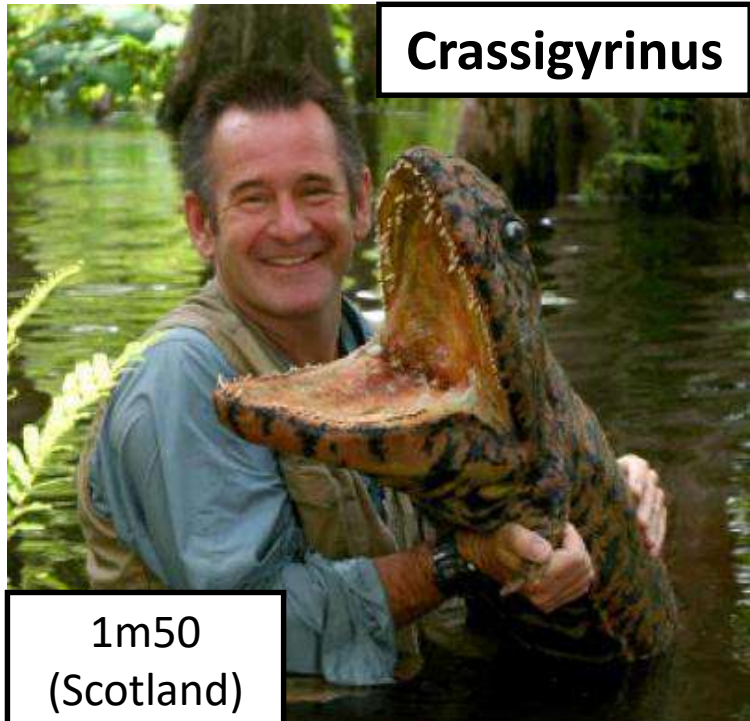
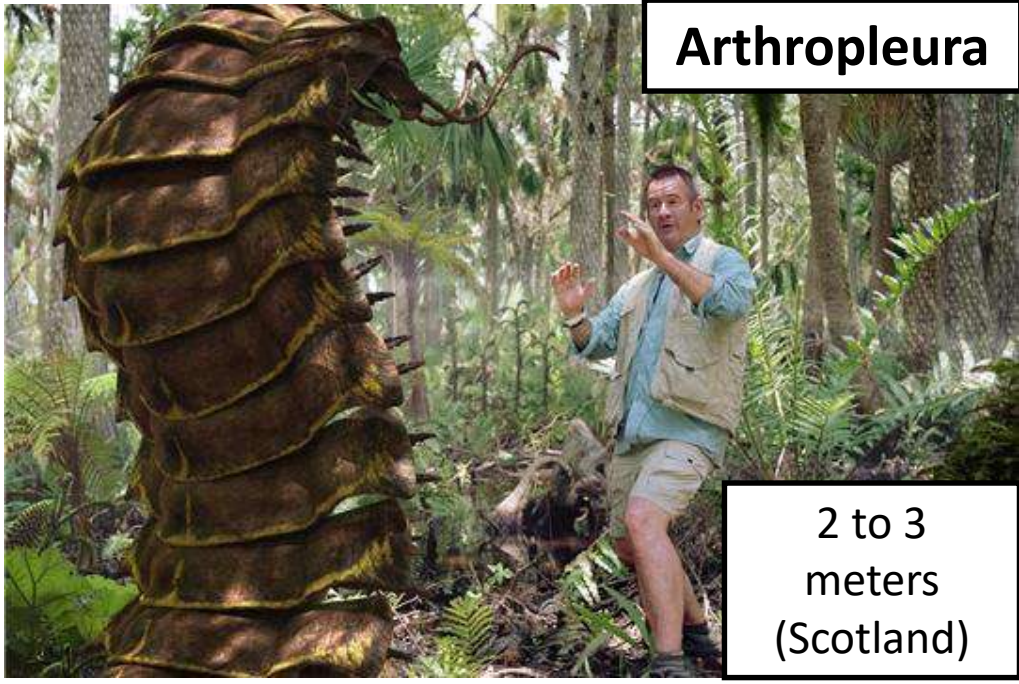
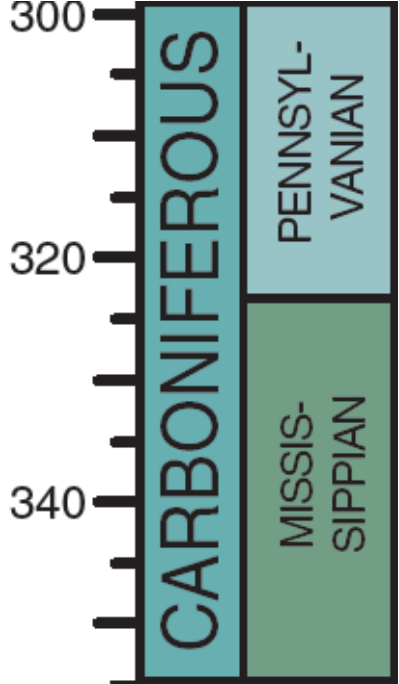


La chaîne Varisque au Carbonifère



Vos voisins au Carbonifère



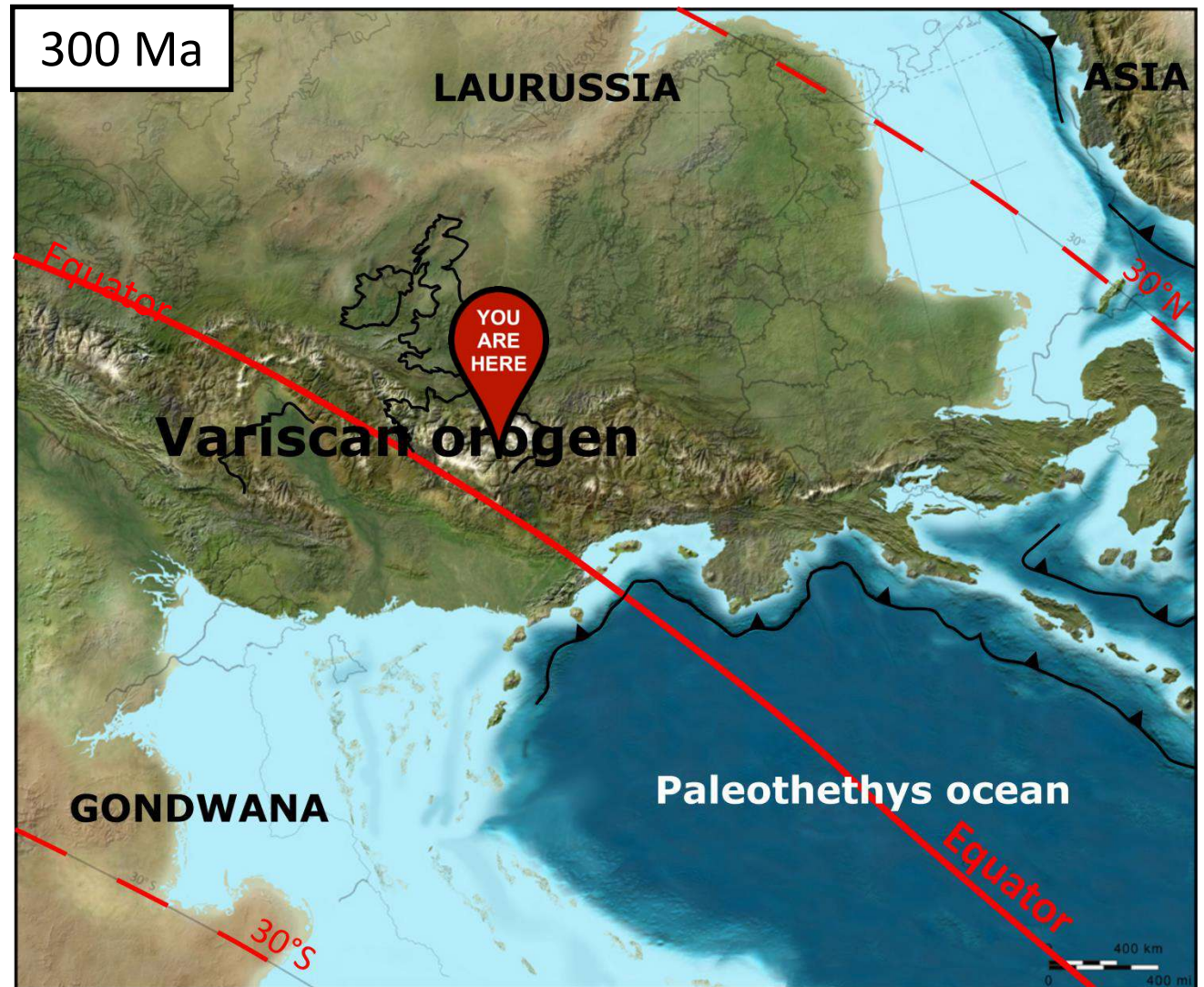


Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)

Altitude

Himalayenne
?

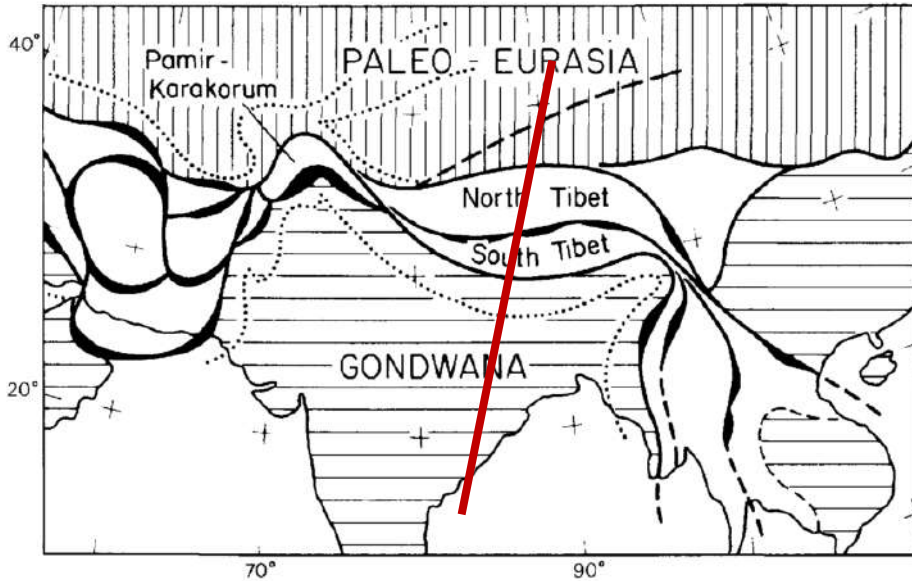
Alpine?



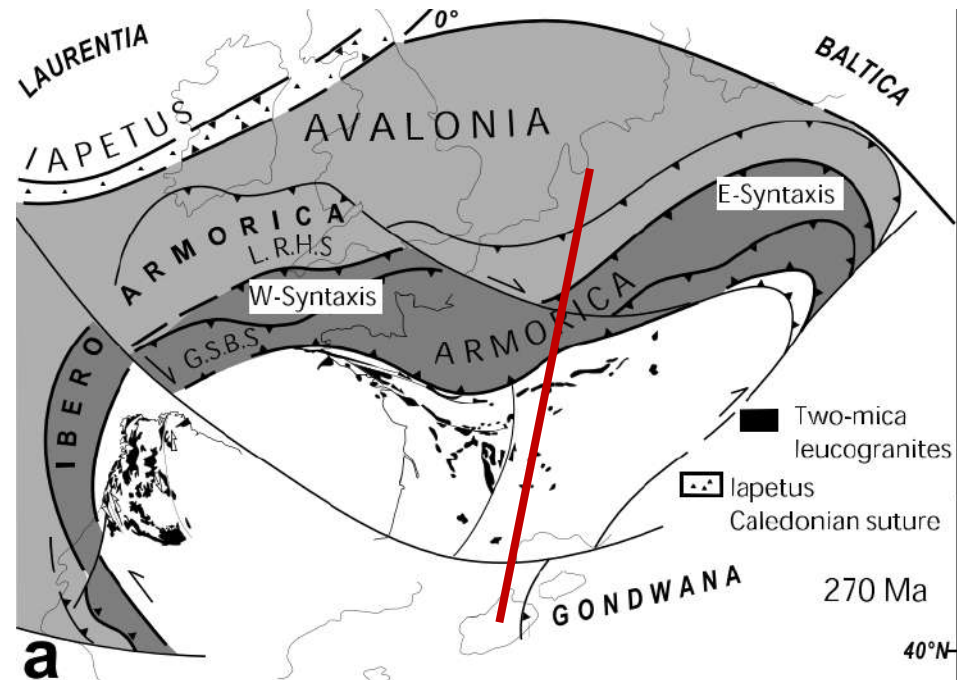
e.g. Becq-Giraudon et al., 1996; Roscher and Schneider, 2006; Dörr and Zulauf, 2010; Franke, 2014; Goddérès et al., 2017

Modified after Blakey, 2011

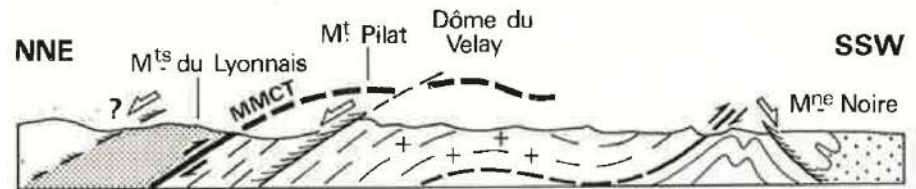
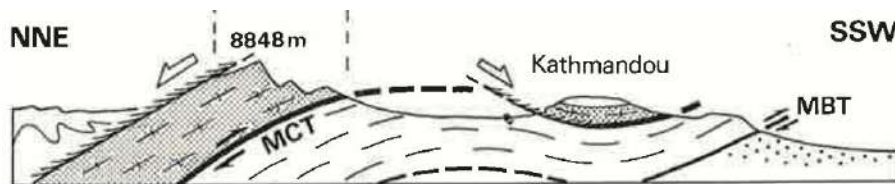
Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)



Himalayas (aujourd'hui)



Chaîne Varisque (300 Ma)



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)

Altitude

**Himalayenne
?**

Alpine?

**Impact sur le
changement
climatique
global ?**



e.g. Becq-Giraudon et al., 1996; Roscher and Schneider, 2006; Dörr and Zulauf, 2010; Franke, 2014; Goddérís et al., 2017

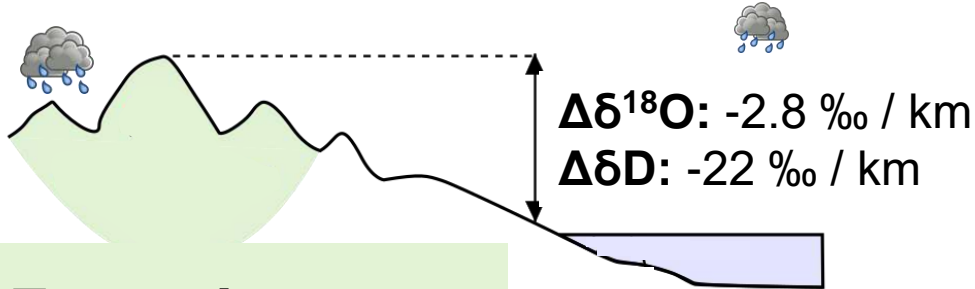
Modified after Blakey, 2011

Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

310 Ma

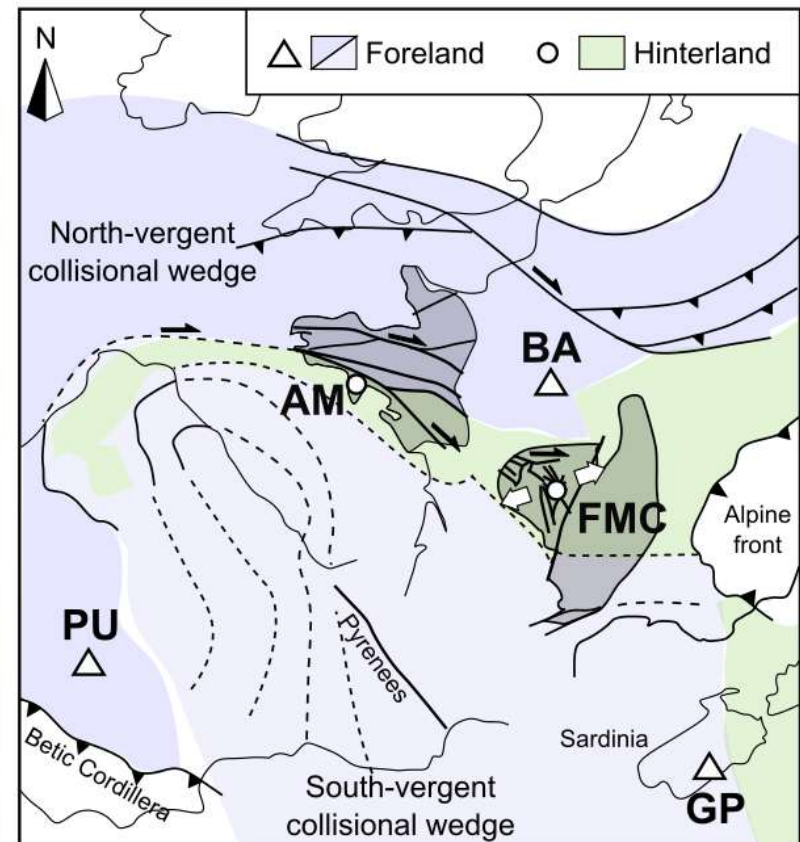
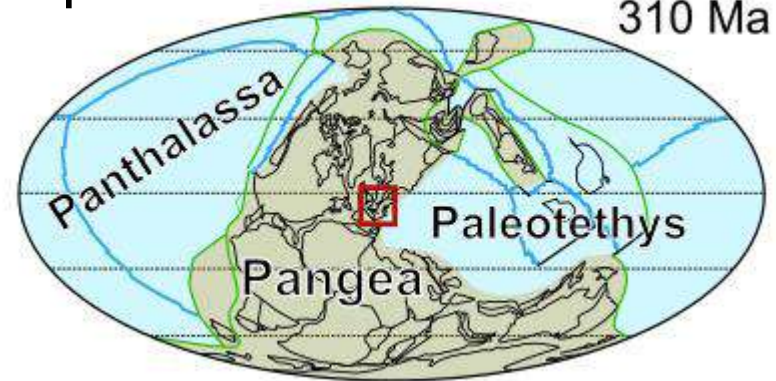
Zones internes

Zones externes



Zones internes
 Eaux de pluie de haute altitude

Zones externes
 Eaux de pluie de basse altitude

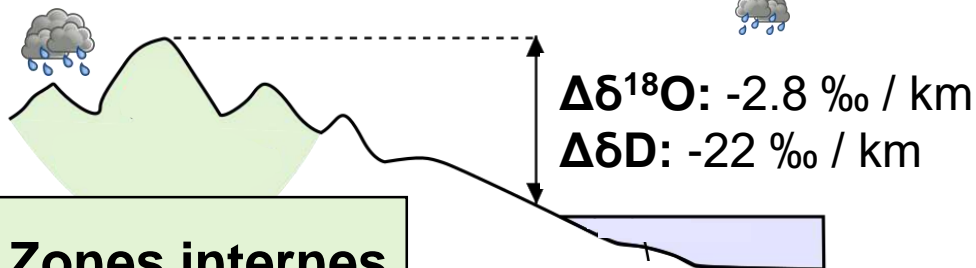


Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

310 Ma

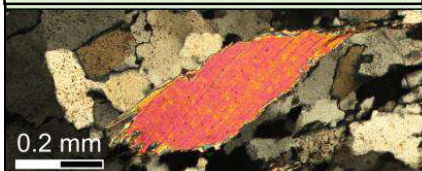
Zones internes

Zones externes

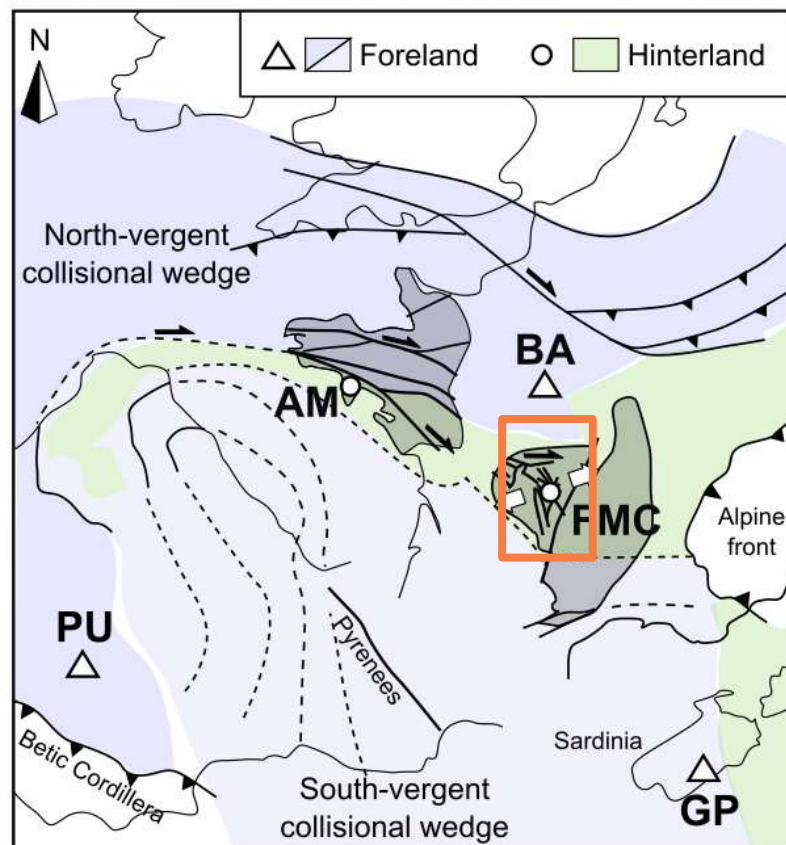
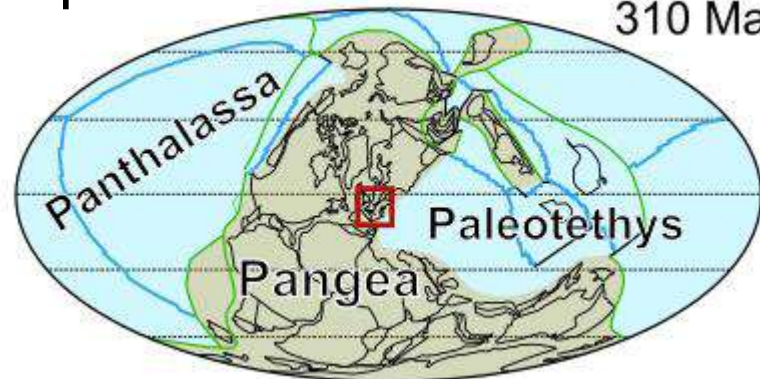


Zones internes

Eaux de pluie
de haute
altitude



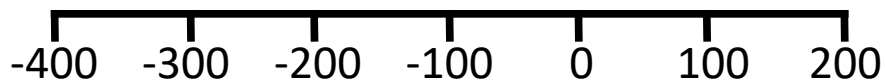
Proxy :
**Muscovites
syncinématiques**



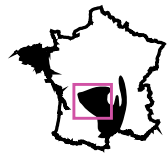
Eaux de pluie

■ Océan

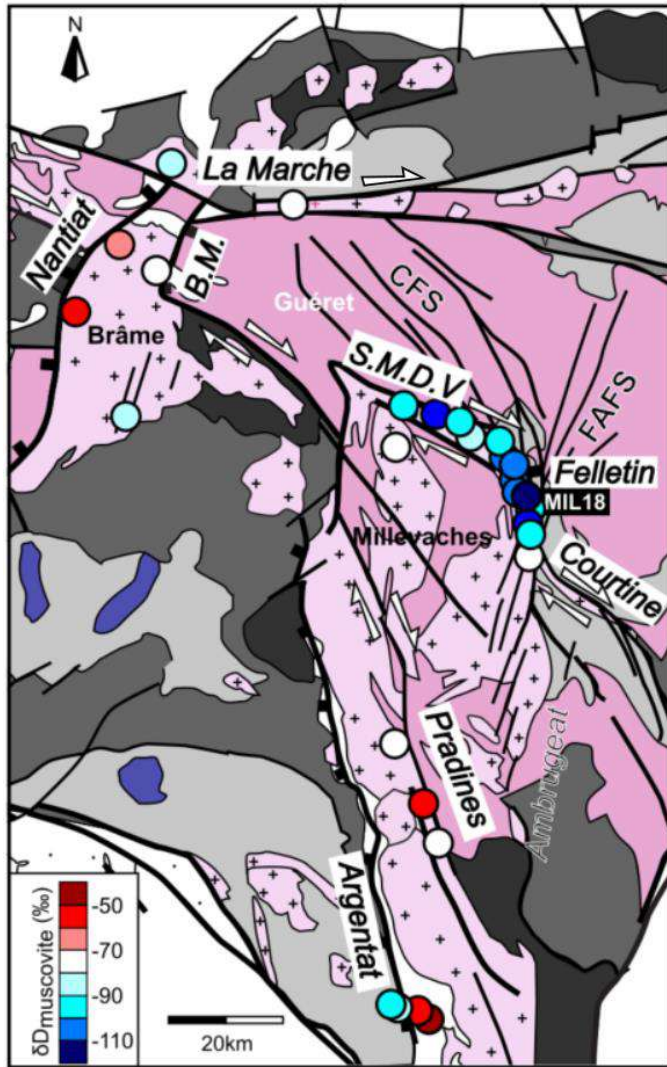
■ **Eaux magmatiques et
métamorphiques**



Isotopes de l'hydrogène : $\delta\text{D}_{\text{eau}}$ (‰)



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

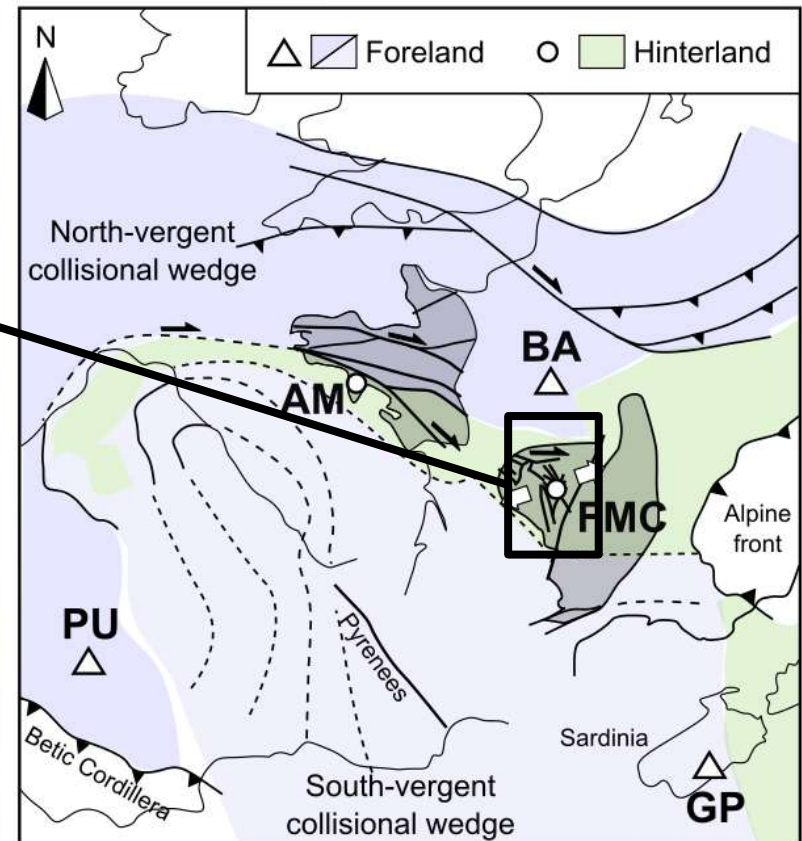


UGU	2-mica leucogranite
LGU	granodiorite/monzogranite
Para-autochthonous	Anthracifer tuffs
Low-grade Upper Unit	Post-orogenic sediments

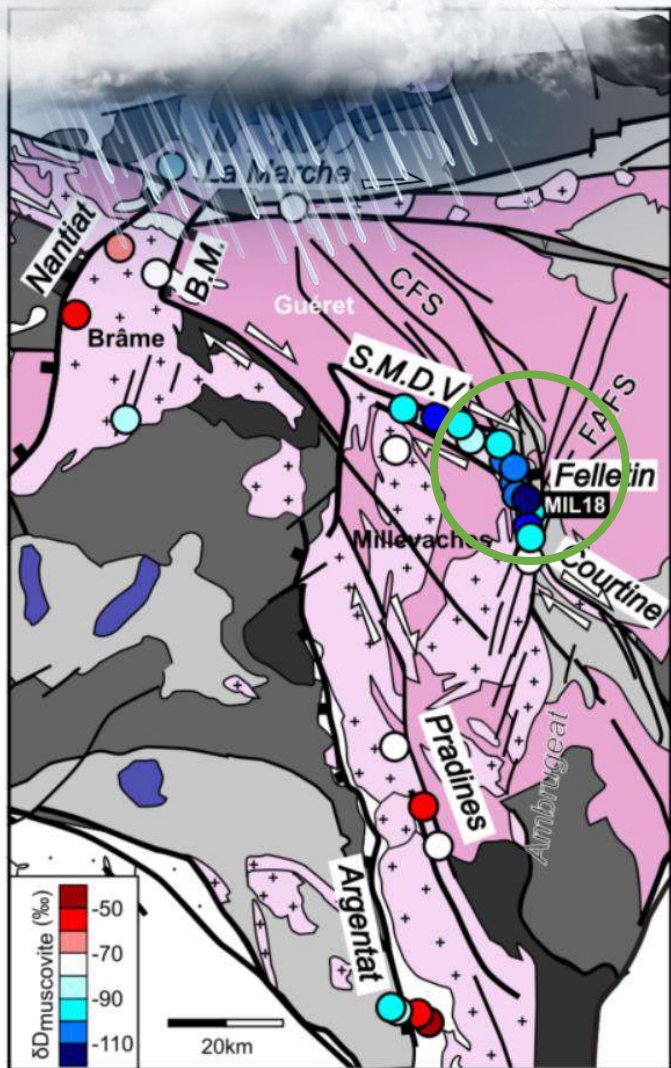
68 échantillons

Failles ductiles

- décrochantes
- détachantes

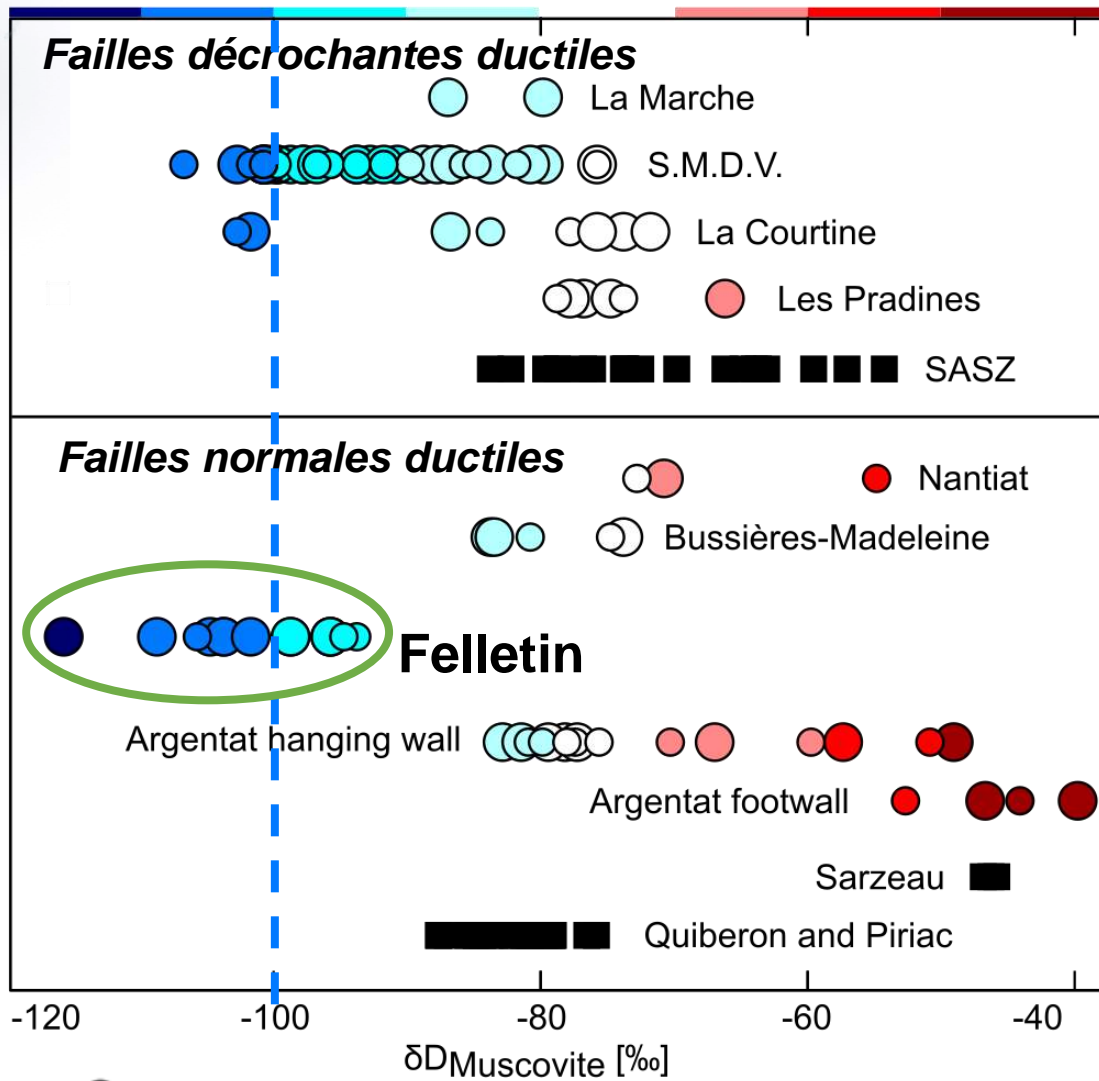


Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère



Eaux de pluie

Eaux profondes



● Massif Central
■ Bretagne

- UGU
- LGU
- Para-autochthonous
- Low-grade Upper Unit
- 2-mica leucogranite
- granodiorite/monzogranite
- Anthracerifer tuffs
- Post-orogenic sediments



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Terrain

Microscopie

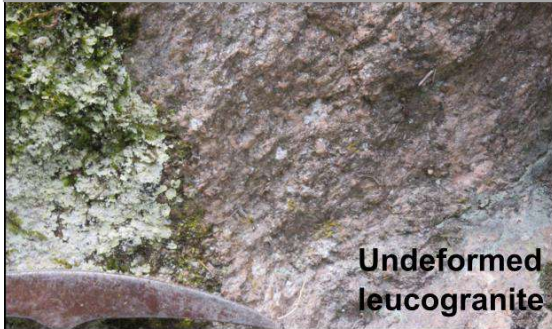
Hydrogène (δD)

Oxygène ($\delta^{18}O$)

Thermométrie

Datations

Granite non déformé



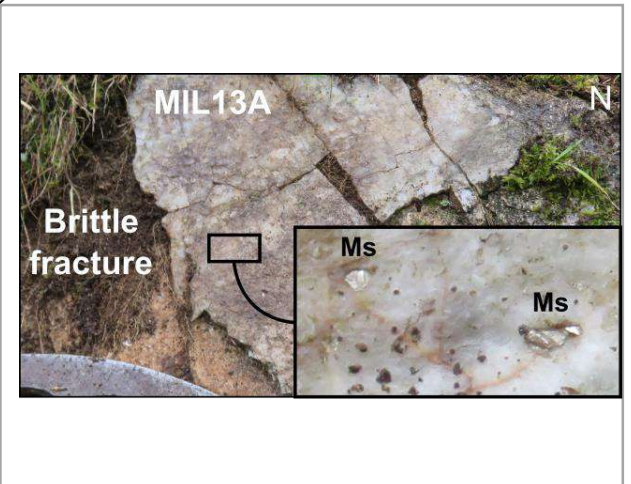
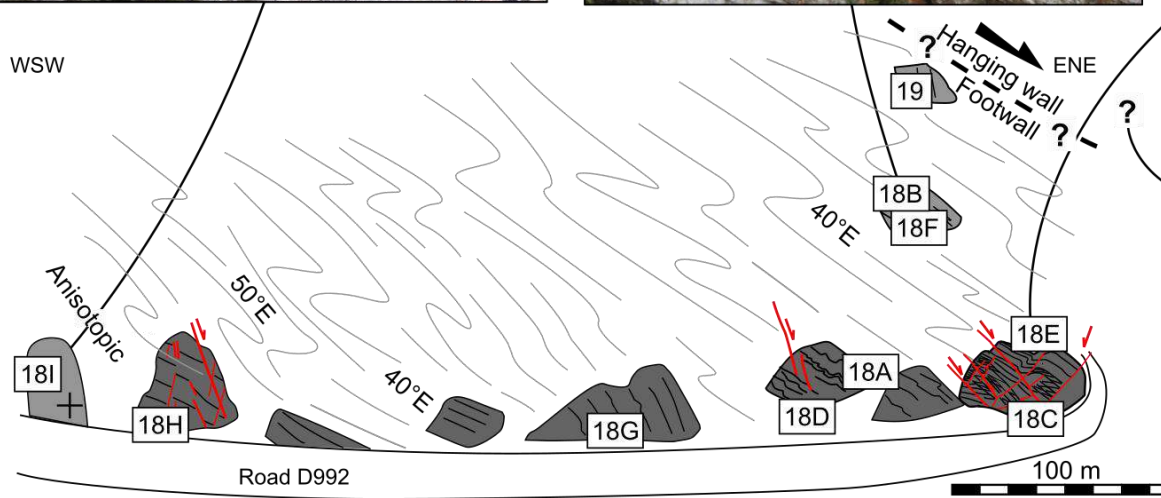
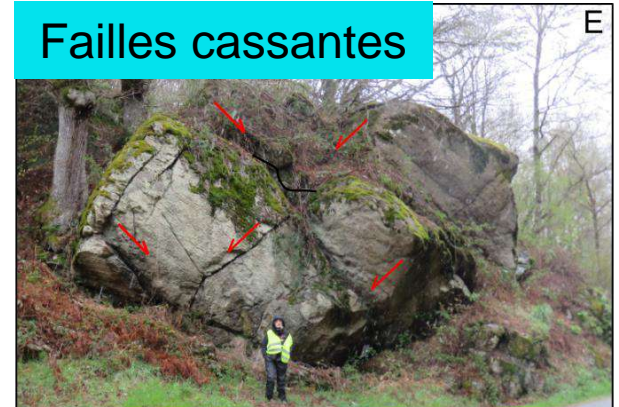
Undeformed
leucogranite

Granite déformé



Mylonitic
leucogranite

Failles cassantes





Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Terrain

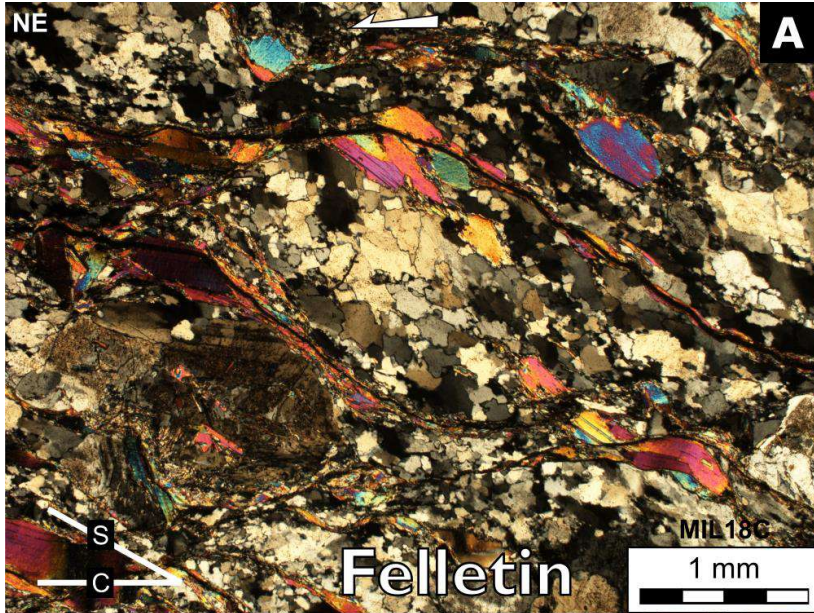
Microscopie

Hydrogène (δD)

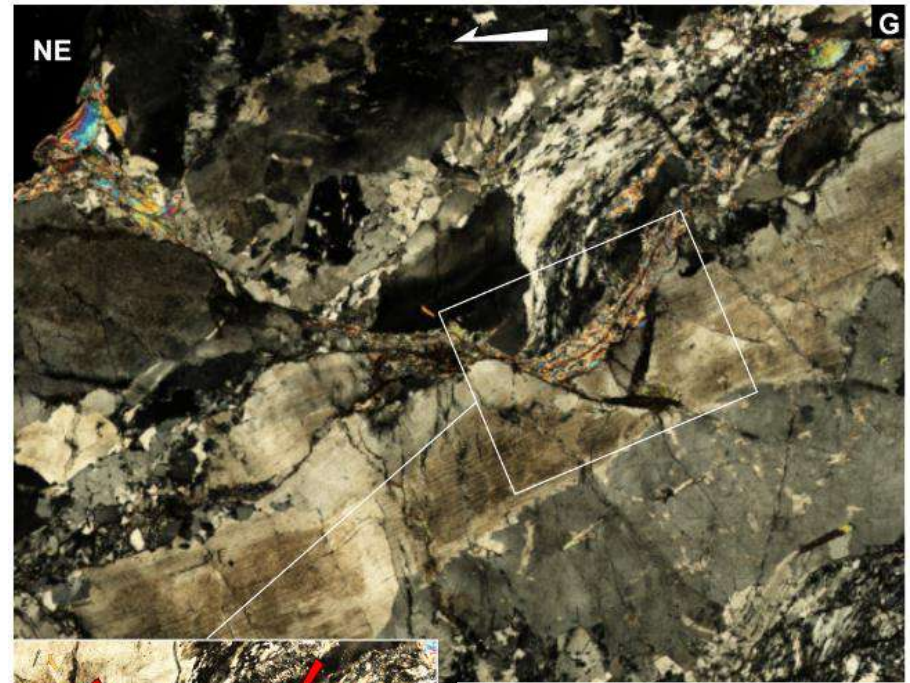
Oxygène ($\delta^{18}O$)

Thermométrie

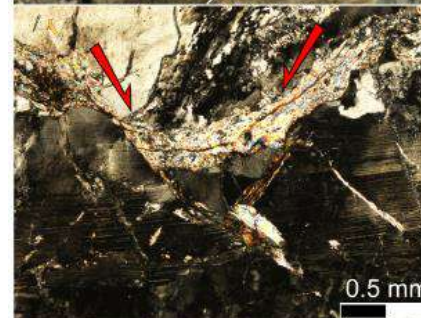
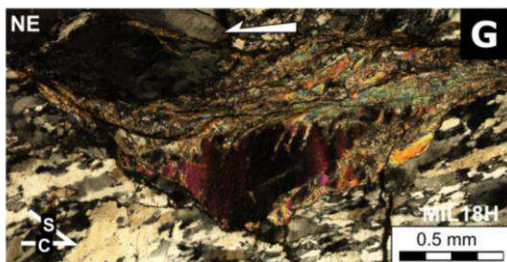
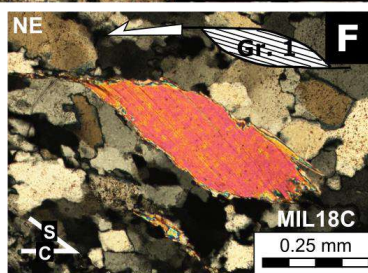
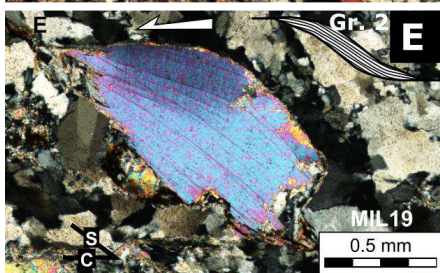
Datations



Micas déformés, plissés, broyés le long des plans de cisaillement



Failles normales cassantes remplies de micas





Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Terrain

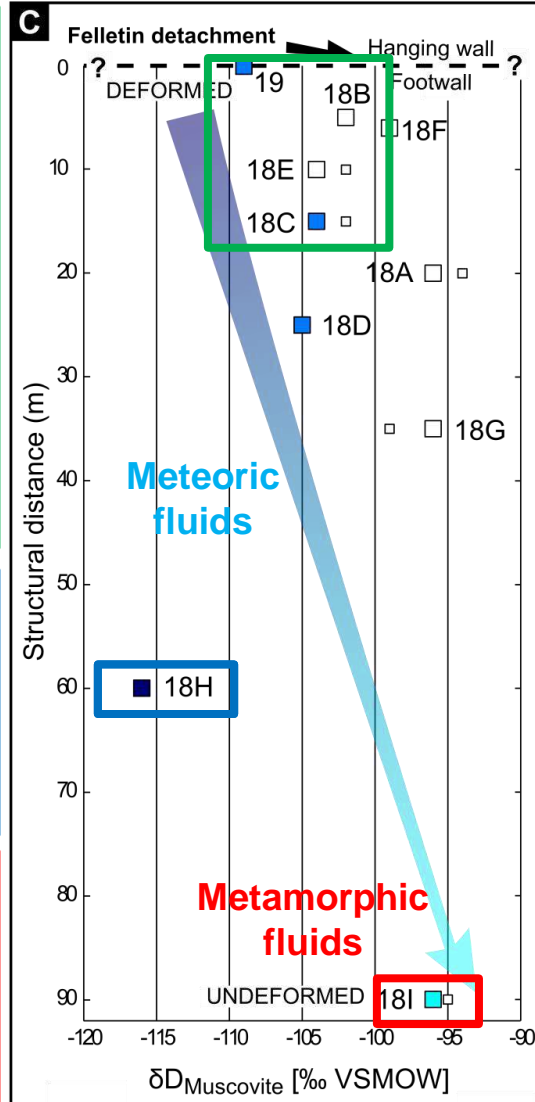
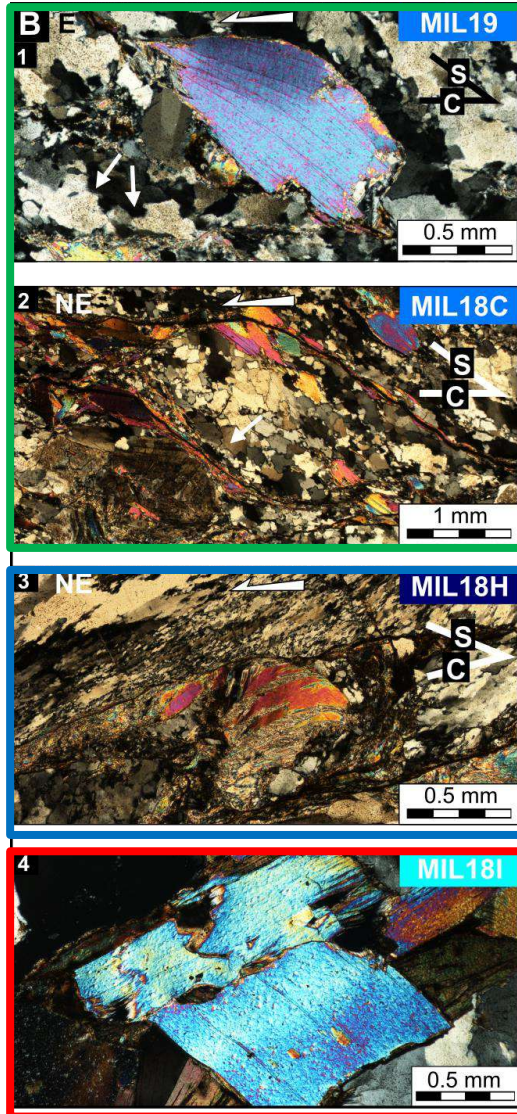
Microscopie

Hydrogène (δD)

Oxygène ($\delta^{18}O$)

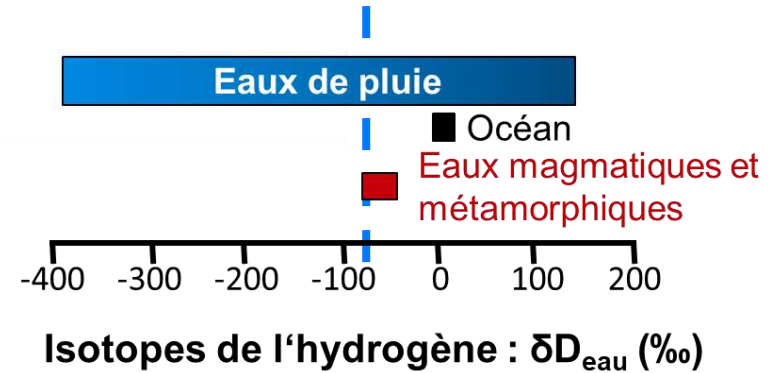
Thermométrie

Datations



$\delta D_{muscovite}$ jusqu'à -116‰

$\delta D_{muscovite}$ moyenne $-103 \pm 6 \text{‰}$





Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Terrain

Microscopie

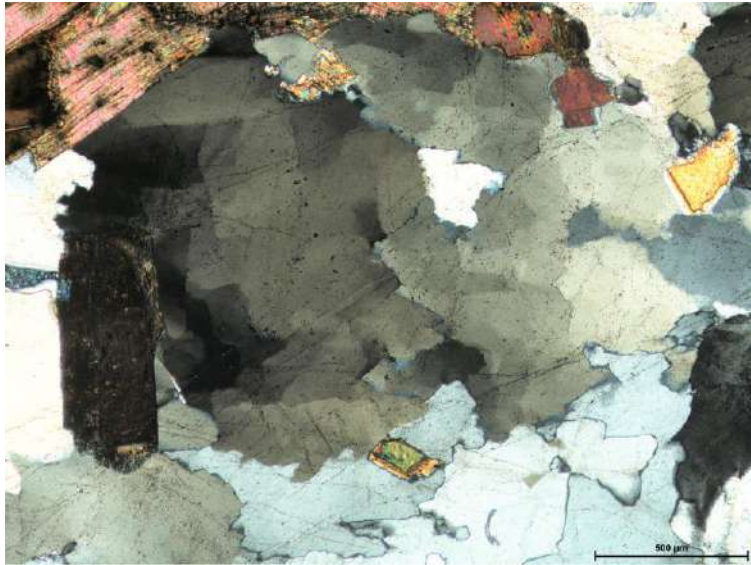
Hydrogène (δD)

Oxygène ($\delta^{18}O$)

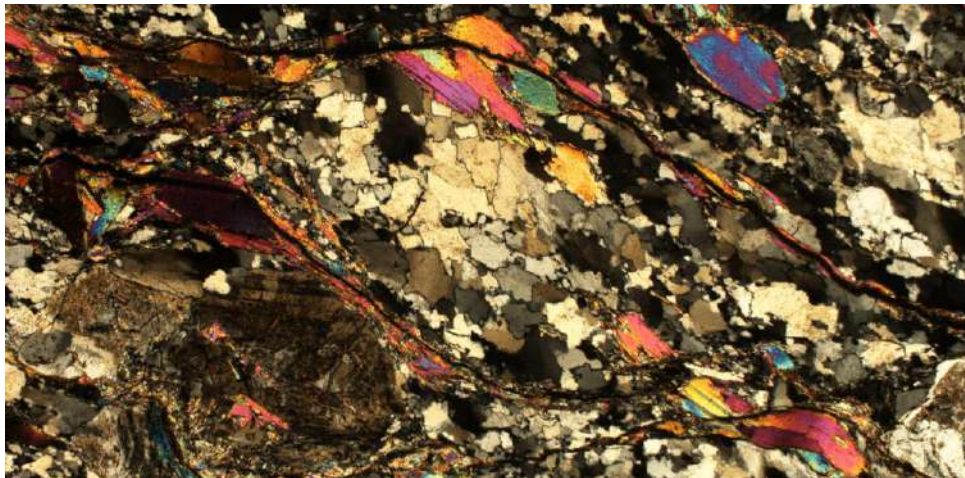
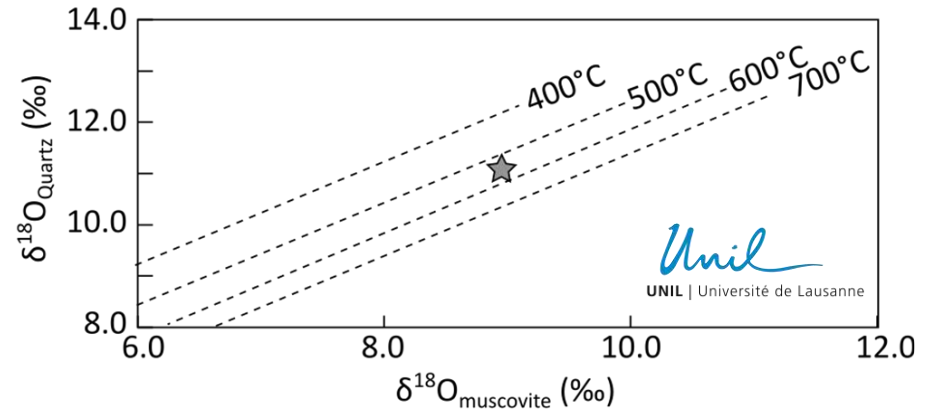
Thermométrie

Datations

1. Microstructures > 500°C



2. Échange isotopique en oxygène entre quartz et muscovite : $538 \pm 41^\circ C$





Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Terrain

Microscopie

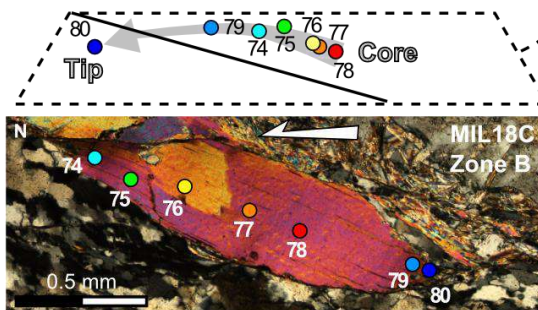
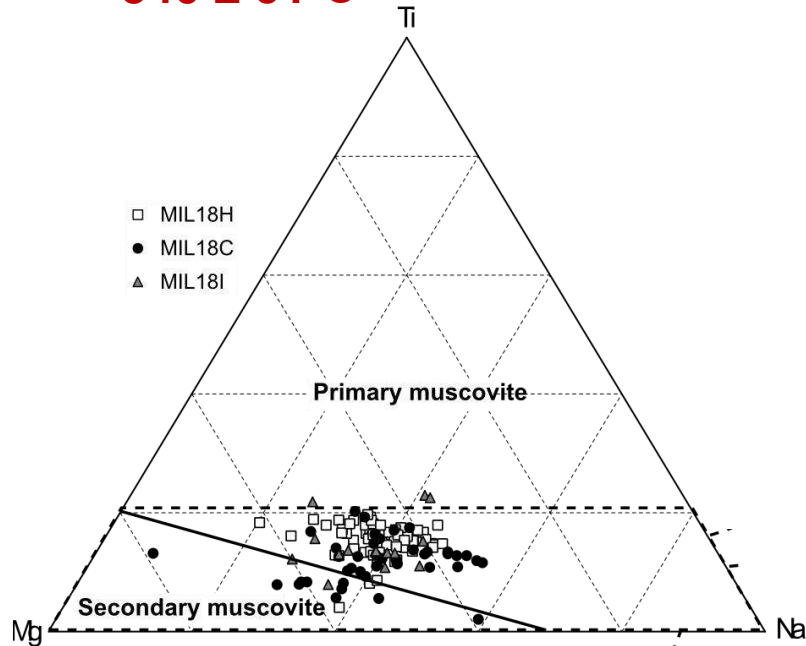
Hydrogène (δD)

Oxygène ($\delta^{18}O$)

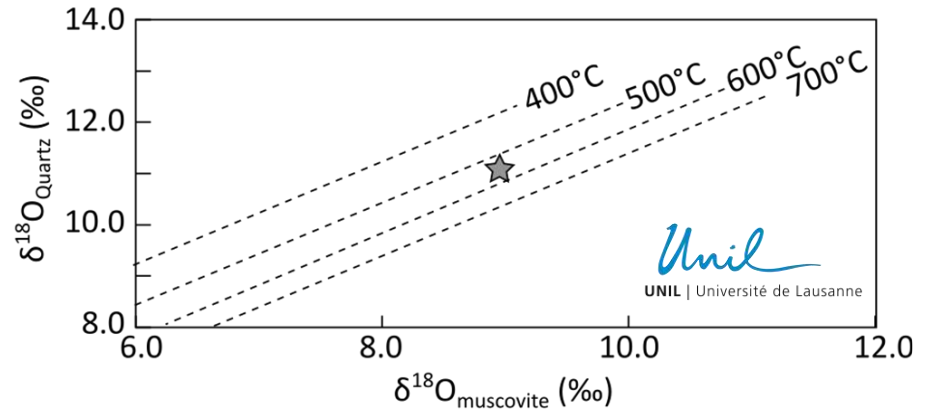
Thermométrie

Datations

3. Titane dans la muscovite **$540 \pm 51^\circ C$**



2. Échange isotopique en oxygène entre quartz et muscovite : **$538 \pm 41^\circ C$**



**Température d'échange
isotopique entre l'eau et la
muscovite :
 $540 \pm 51^\circ C$**



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Terrain

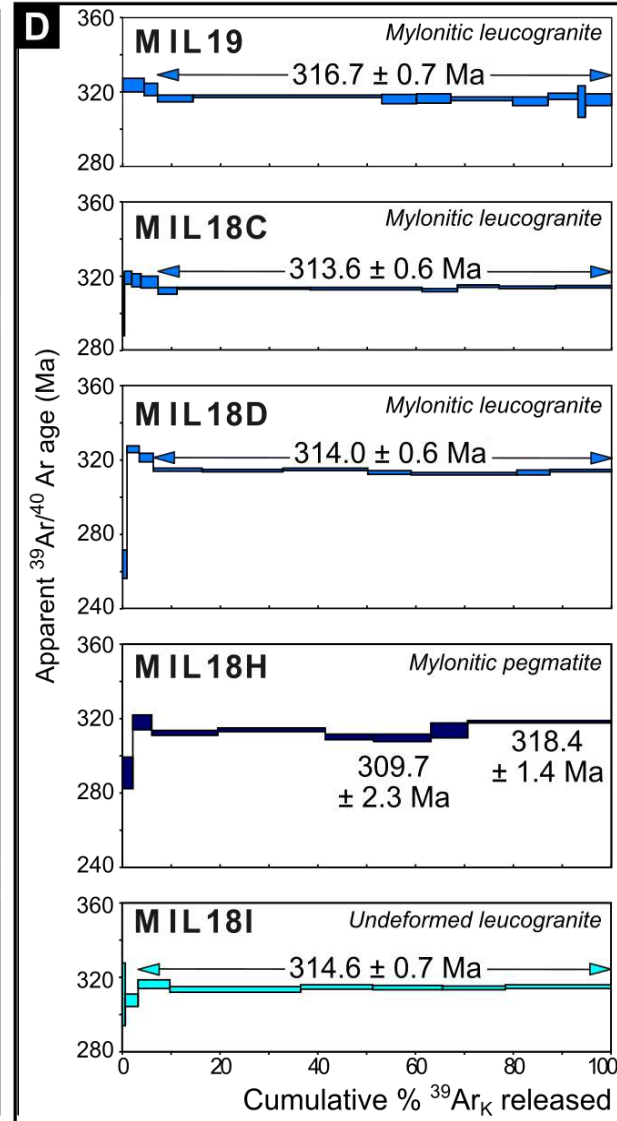
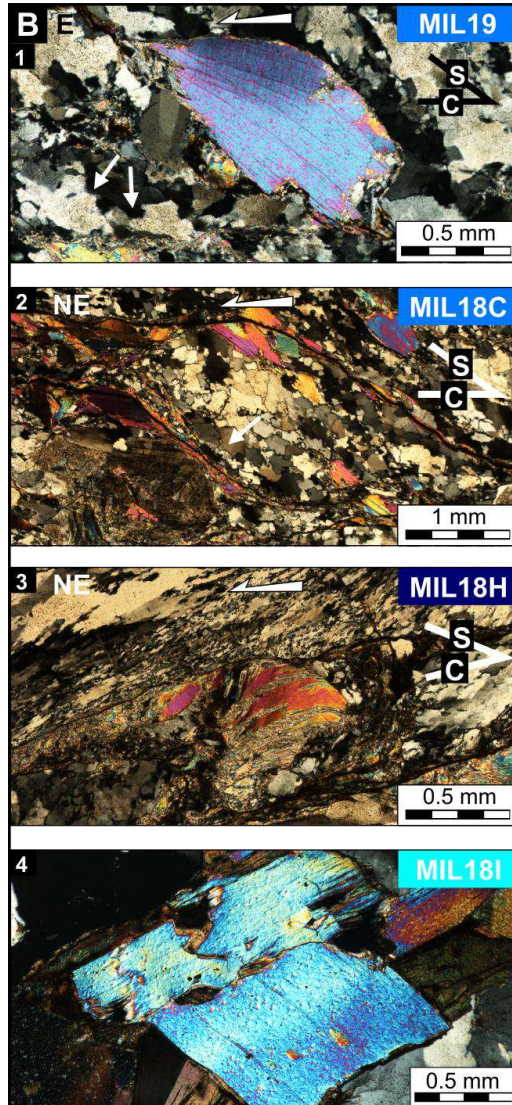
Microscopie

Hydrogène (δD)

Oxygène ($\delta^{18}O$)

Thermométrie

Datations

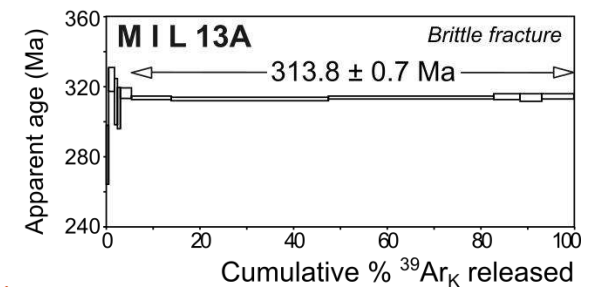
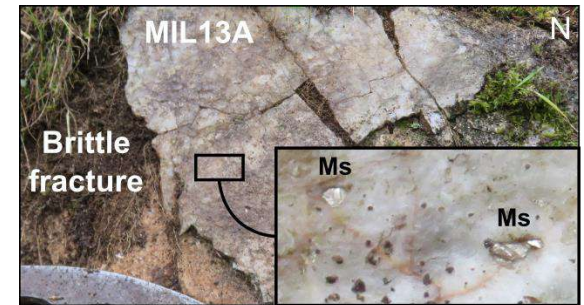


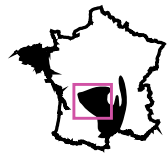
Géochronologie Ar/Ar des muscovites

~ 317 – 314 Ma

Fonctionnement de la faille ductile pendant l'infiltration des eaux de pluie

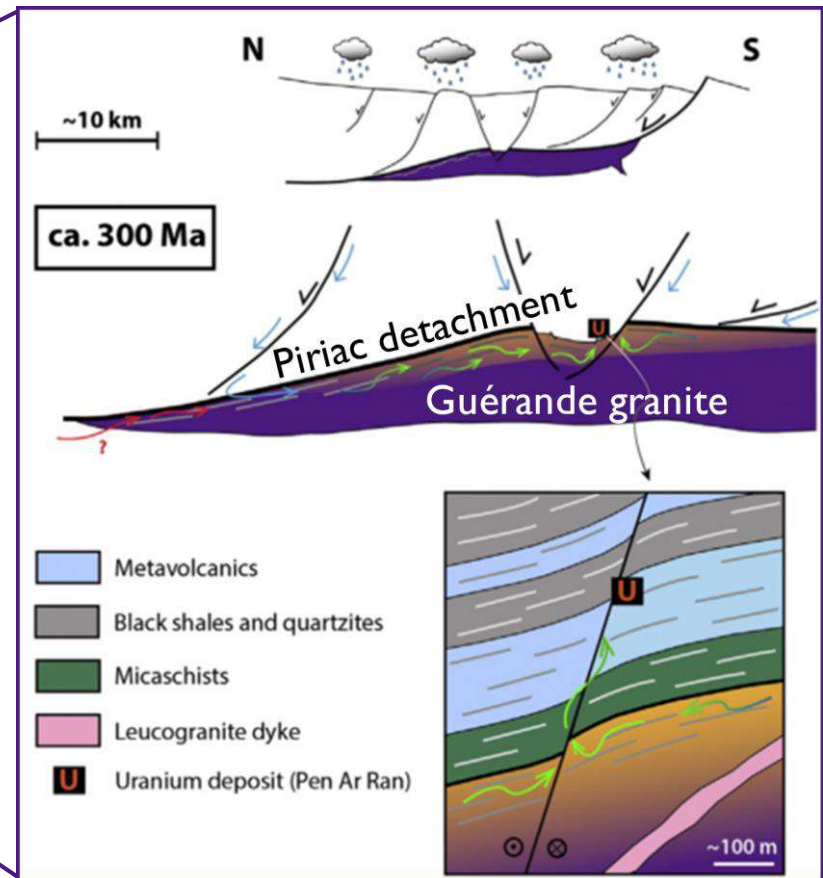
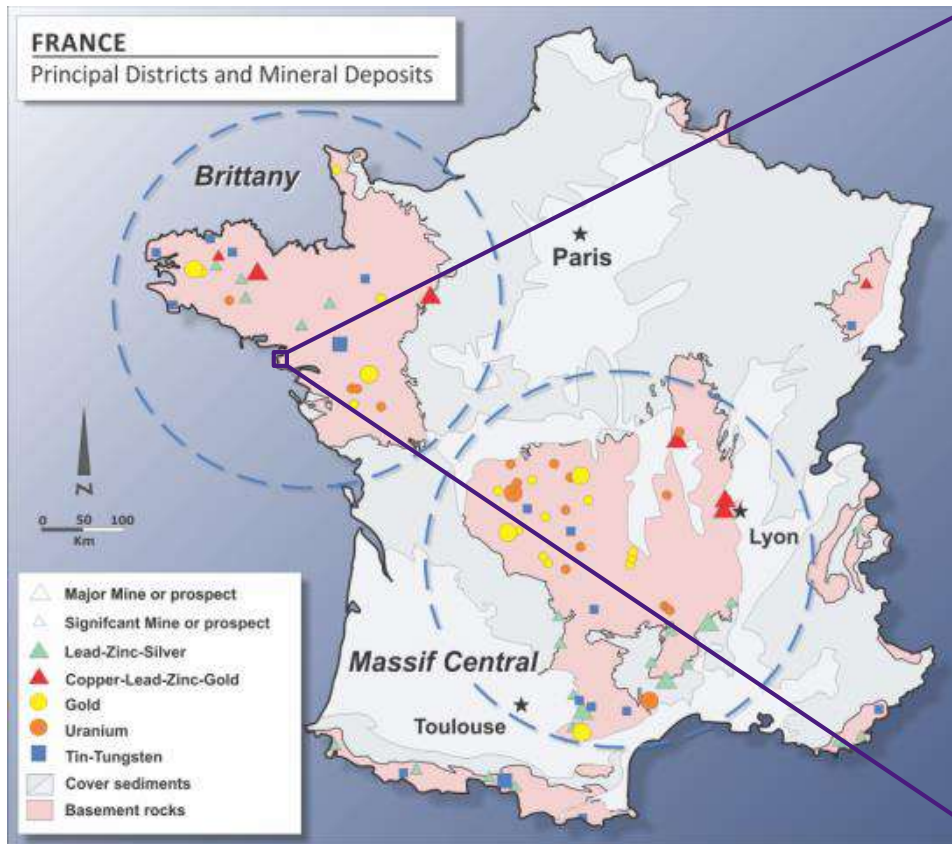
~ 314 Ma : failles cassantes





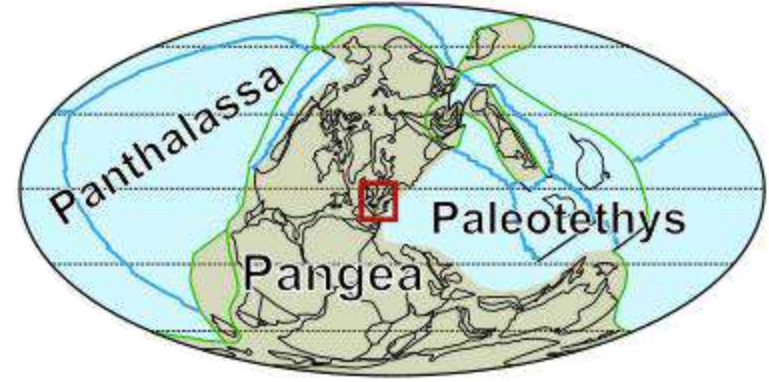
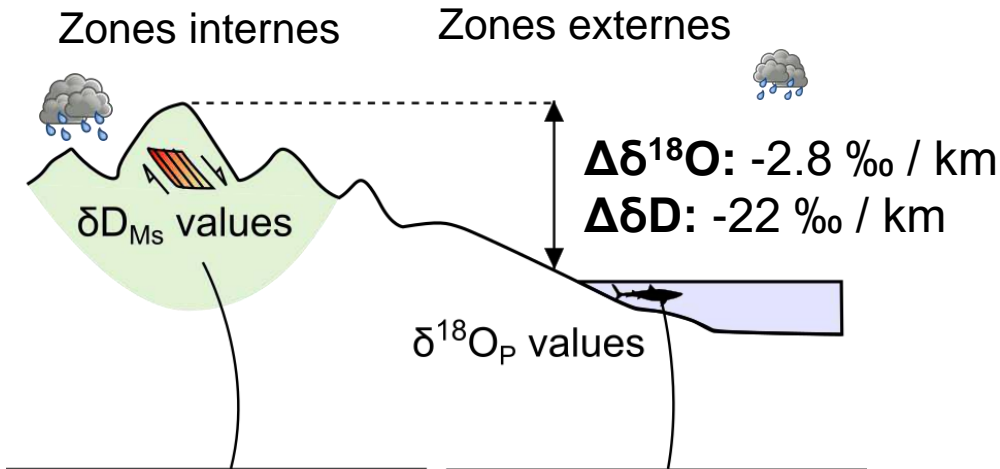
Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère

Gisements métalliques varisques



Liés à la circulation d'eaux de pluie à 300 Ma

Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)



Zones internes
Muscovite

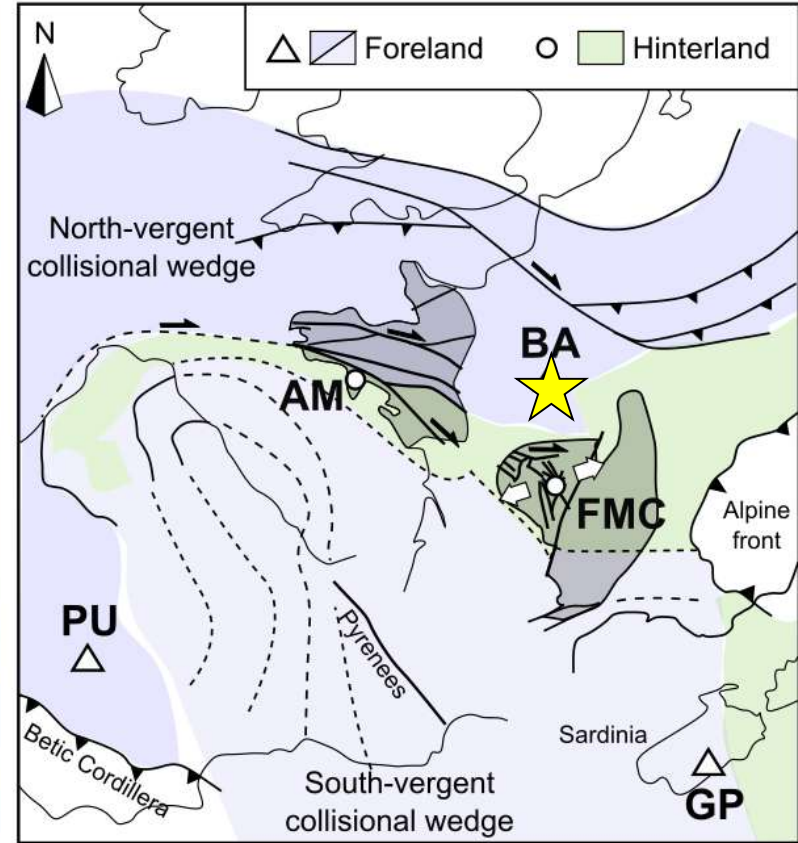
0.2 mm

French Massif Central

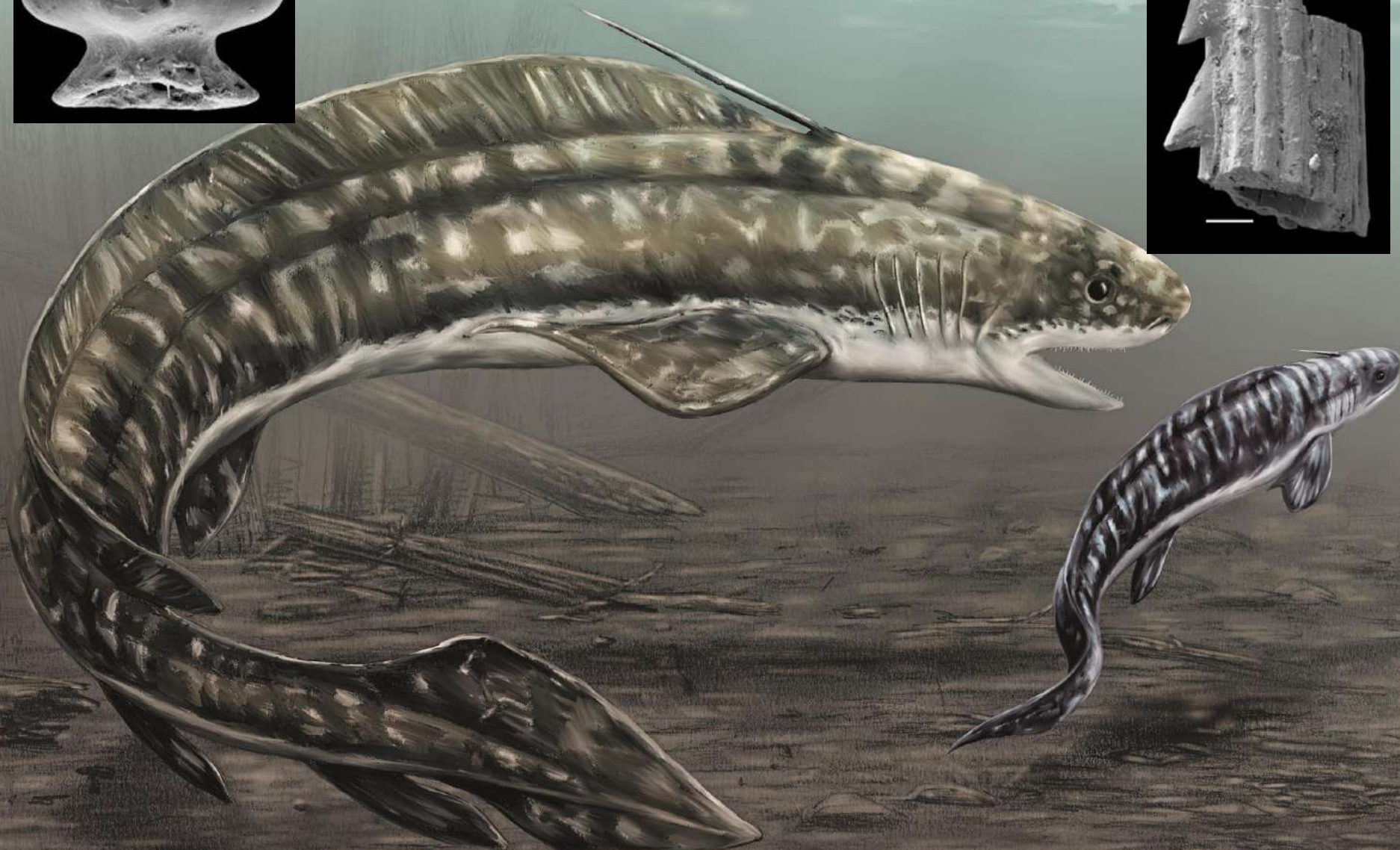
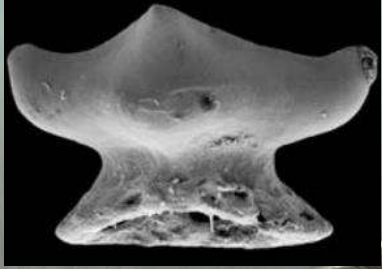
$\delta D_{Water} = -96 \pm 8 \text{ ‰}$
 $\delta^{18}O_{Water} = -13.3 \pm 1.1 \text{ ‰}$

Zones externes
Requins fossiles

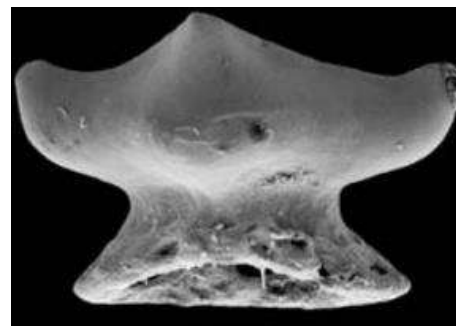
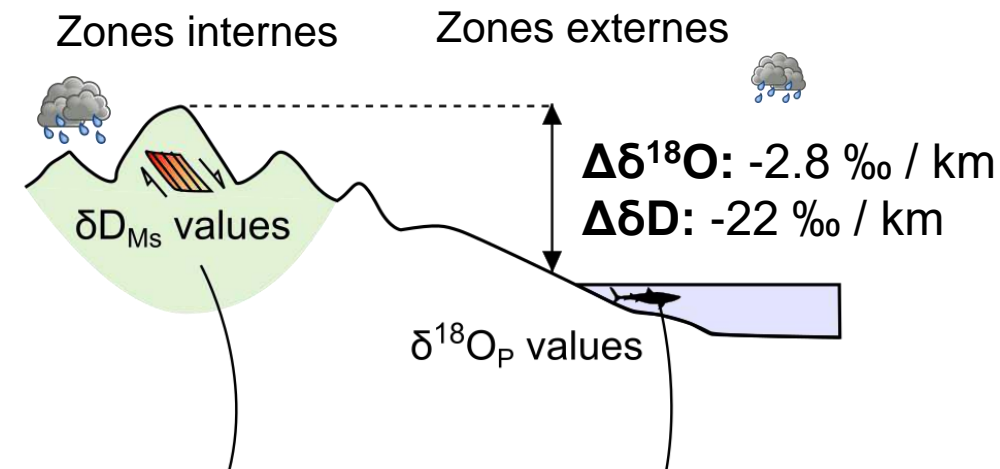
Bourbon l'Archambault



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)



Zones internes
Muscovite

0.2 mm

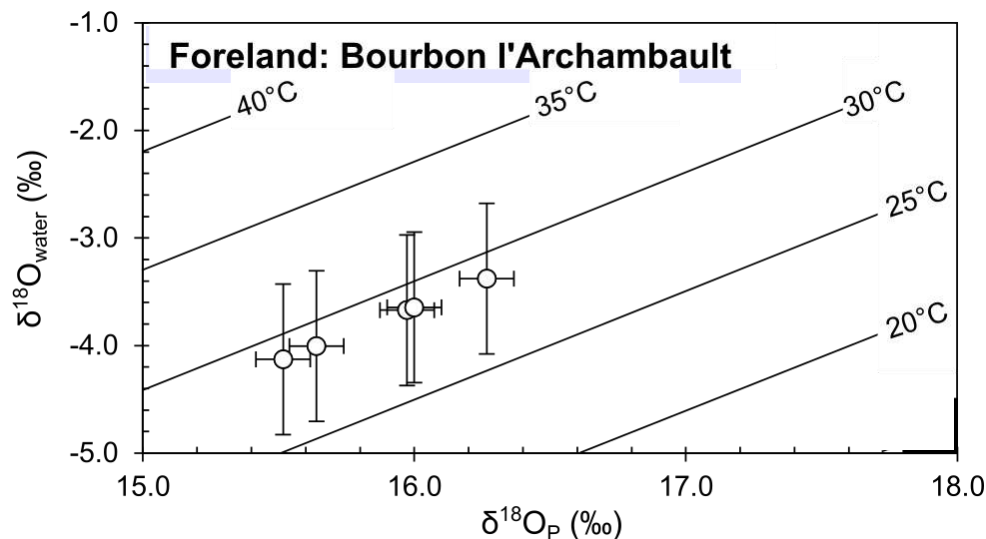
French Massif Central

$\delta D_{Water} = -96 \pm 8 \text{ ‰}$
 $\delta^{18}O_{Water} = -13.3 \pm 1.1 \text{ ‰}$

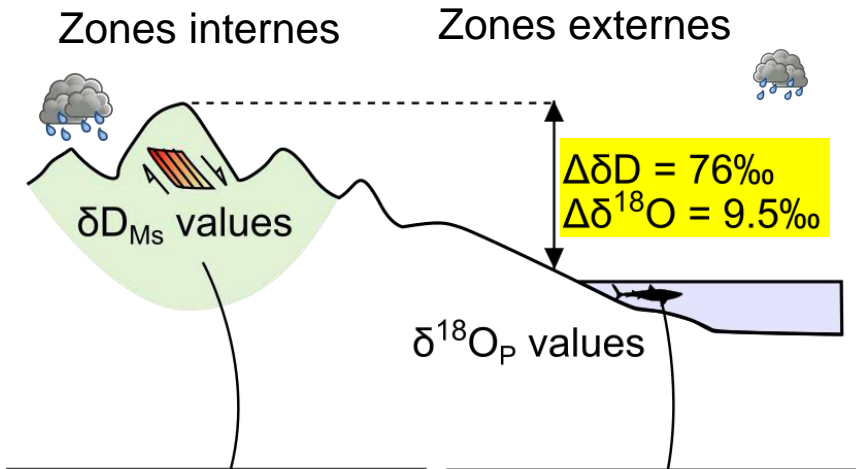
Zones externes
Requins fossiles

Bourbon l'Archambault

$\delta D_{Water} = -20 \pm 6 \text{ ‰}$
 $\delta^{18}O_{Water} = -3.8 \pm 0.8 \text{ ‰}$



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)



Zones internes
Muscovite

0.2 mm

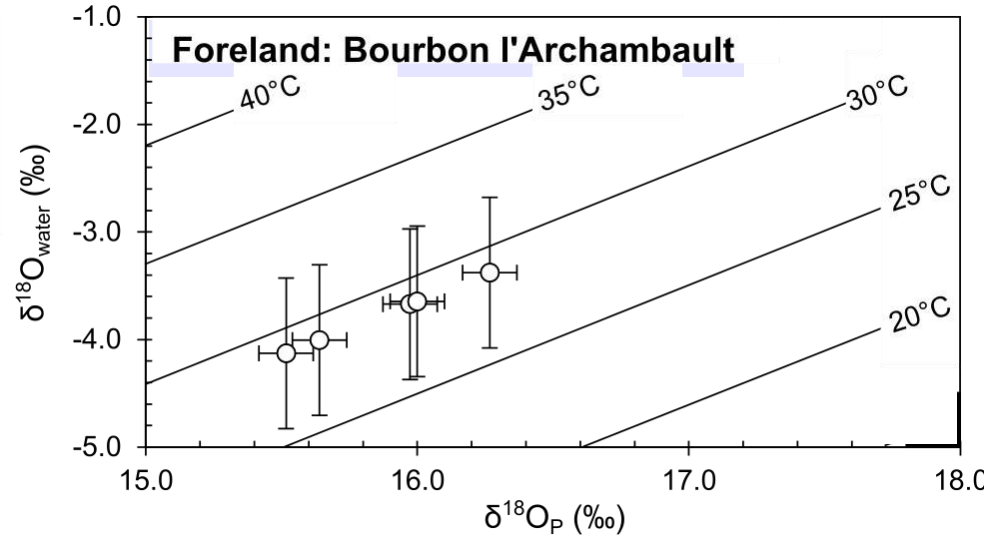
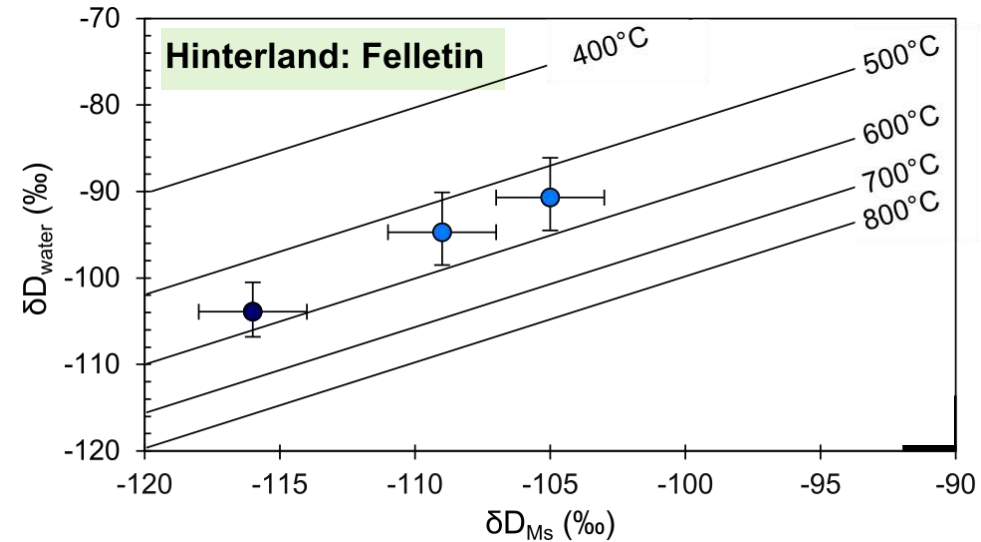
French Massif Central

$\delta D_{Water} = -96 \pm 8\text{‰}$
 $\delta^{18}O_{Water} = -13.3 \pm 1.1\text{‰}$

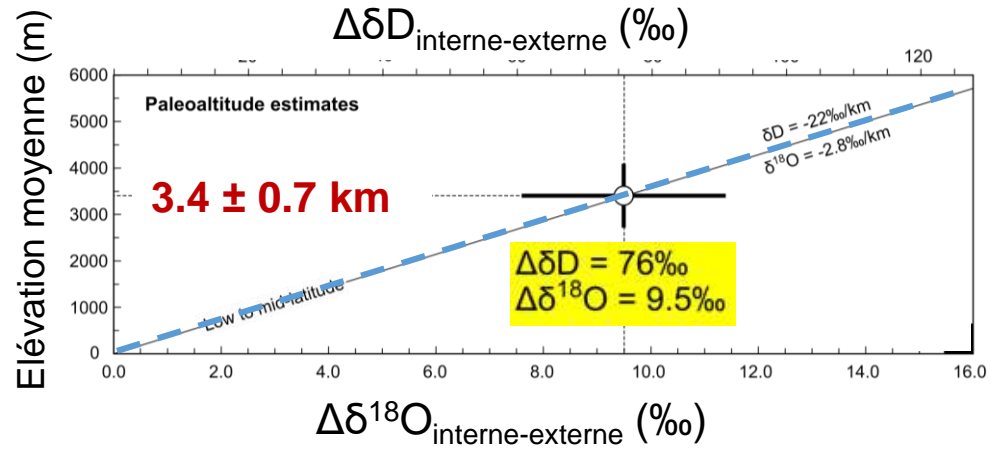
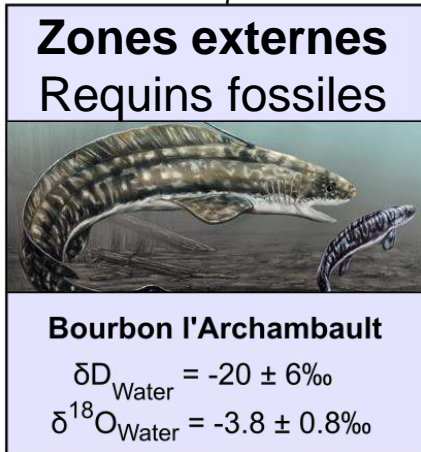
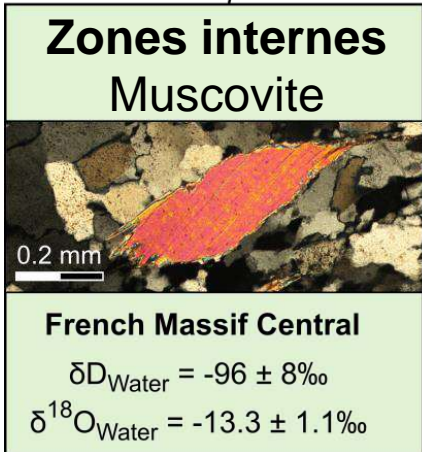
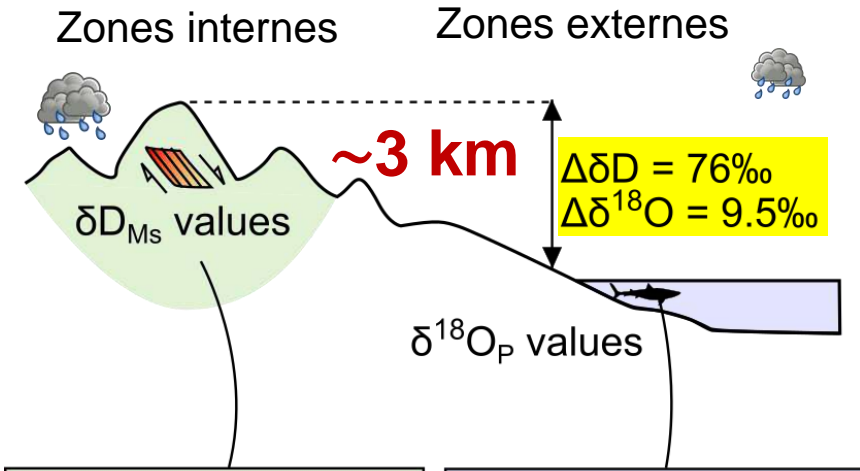
Zones externes
Requins fossiles

Bourbon l'Archambault

$\delta D_{Water} = -20 \pm 6\text{‰}$
 $\delta^{18}O_{Water} = -3.8 \pm 0.8\text{‰}$



Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)



Relation

Altitude



Composition des
eaux de pluies

-22‰/km pour le δD_{eau}

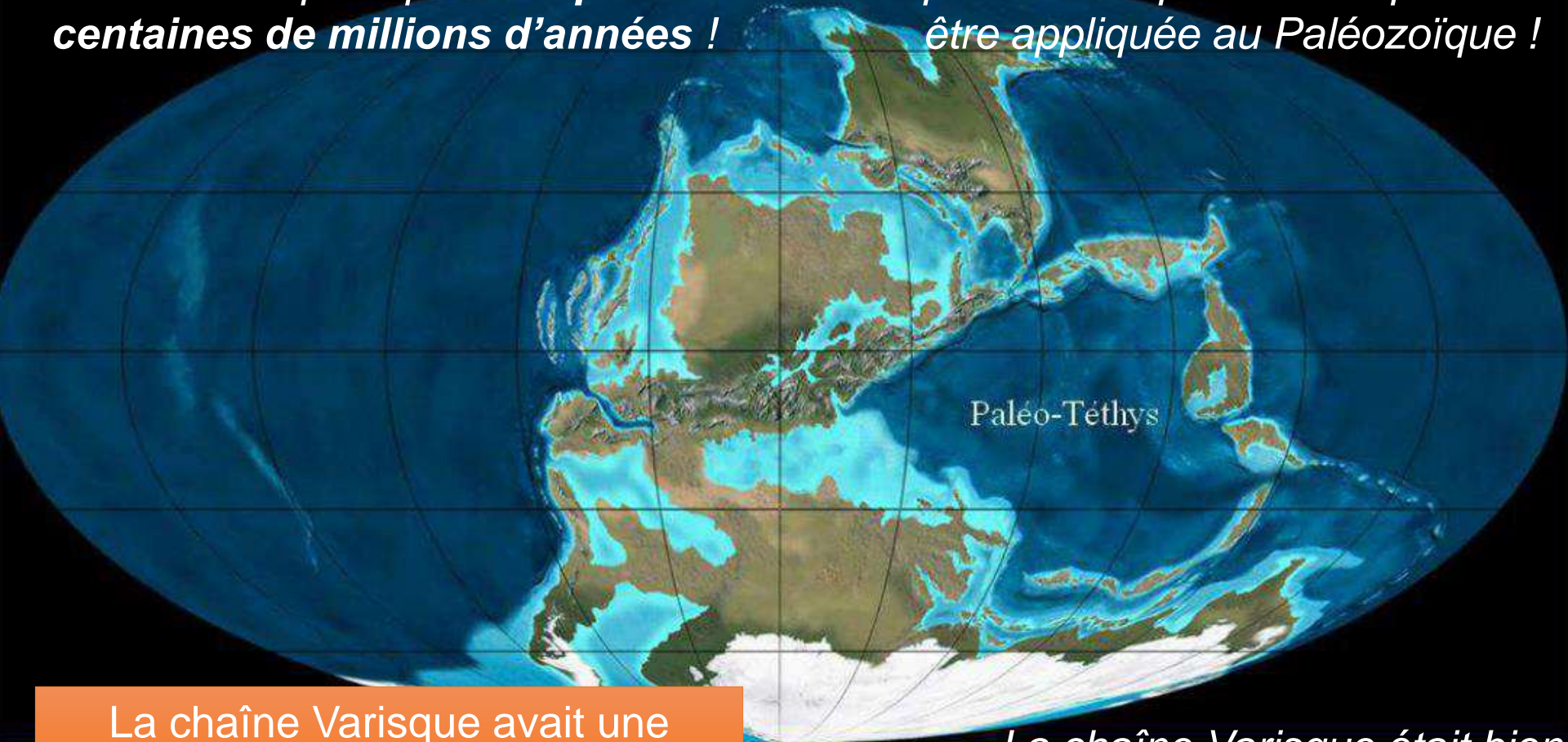
Pour 68 chaînes de montagnes à
travers le monde

La chaîne Varisque avait une
altitude moyenne de $3.4 \pm 0.7 \text{ km}$
il y a 315 millions d'années !

Paléo-altitude de la chaîne Varisque au Carbonifère (300 Ma)

*Les micas conservent la composition des eaux de pluie pendant **plusieurs centaines de millions d'années** !*

La méthode de paléoaltimétrie par les isotopes stables peut être appliquée au Paléozoïque !



La chaîne Varisque avait une altitude moyenne de **3.4 ± 0.7 km** il y a 315 millions d'années !

La chaîne Varisque était bien une chaîne de montagnes de haute altitude !