

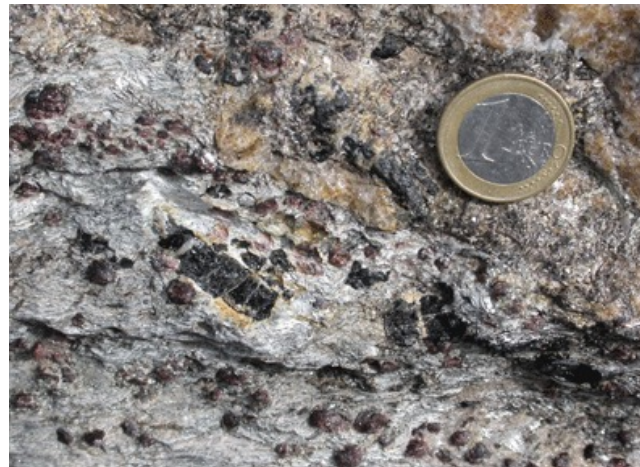
# Chapitre 9

## Géologie de la Suisse II

Alpes Penniques, Sud-/Austroalpine  
Subduction et collision  
Activité récente



Othmar Müntener  
Géopolis 4897

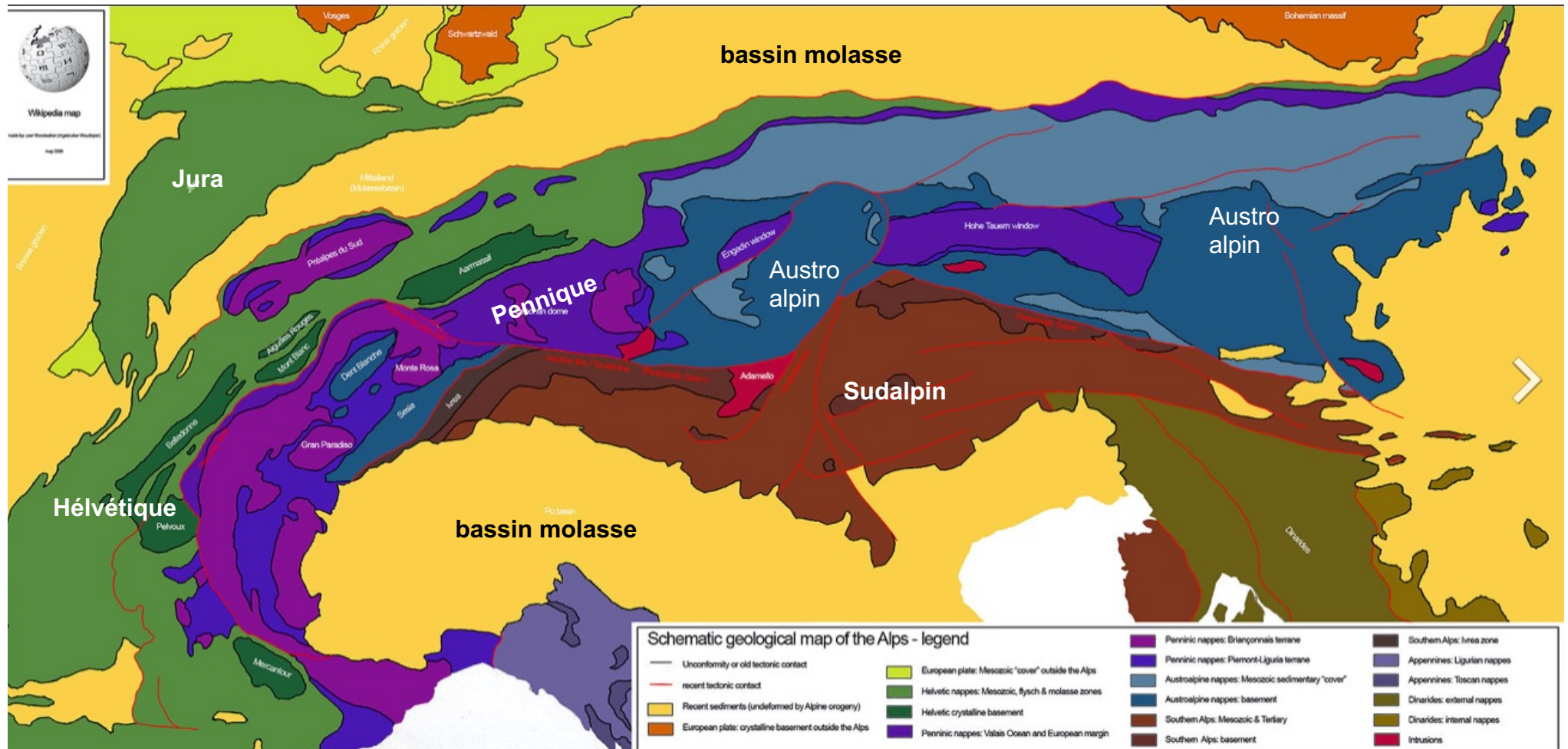


# **Contenu**

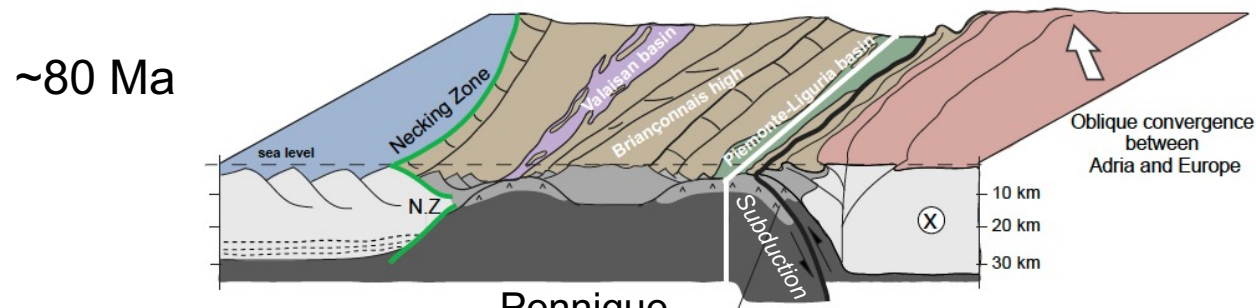
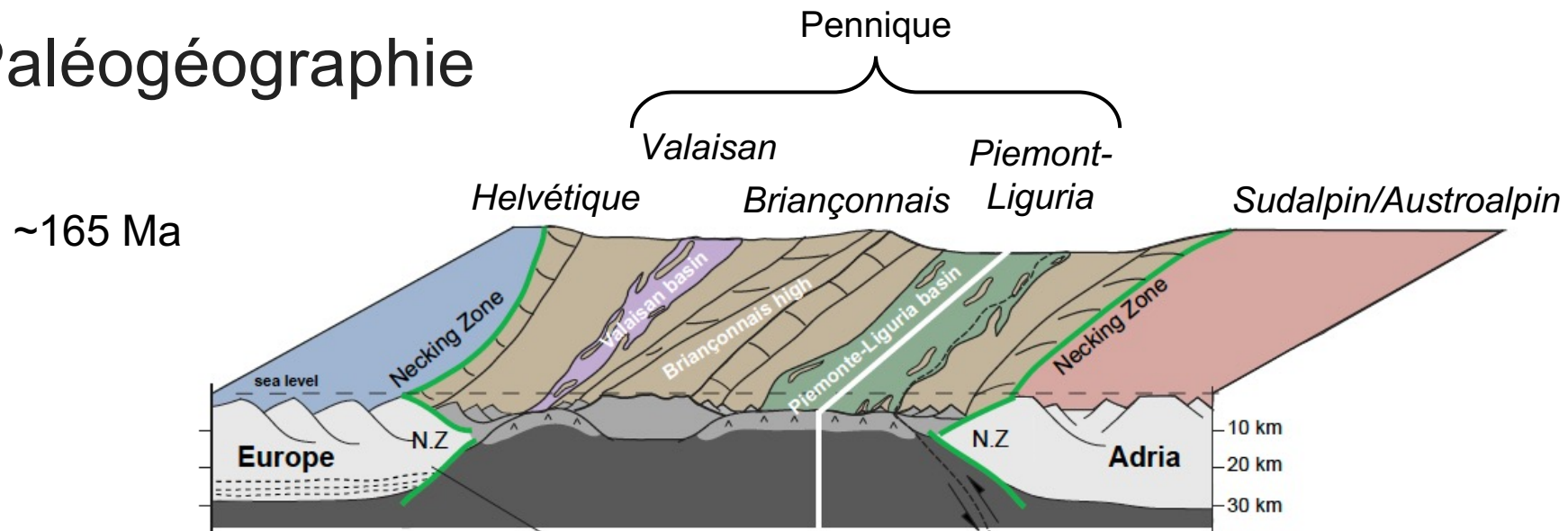
- Alpes dans le contexte européen  
orogénèses préalpines
- Paléogéographie des continents
- Evolution spatio-temporelle de la chaîne Alpine – premier tour
- Unité tectoniques dans les Alpes – dans la Suisse  
(Jura, Bassin Molassique, Helvétique, ....)
- **Pennique, Sud-Austroalpin**
- **Subduction – Collision – Métamorphisme**
- **Erosion et soulèvement (topographie)**
- **Tremblements de terre récent dans les Alpes et applications pratiques**



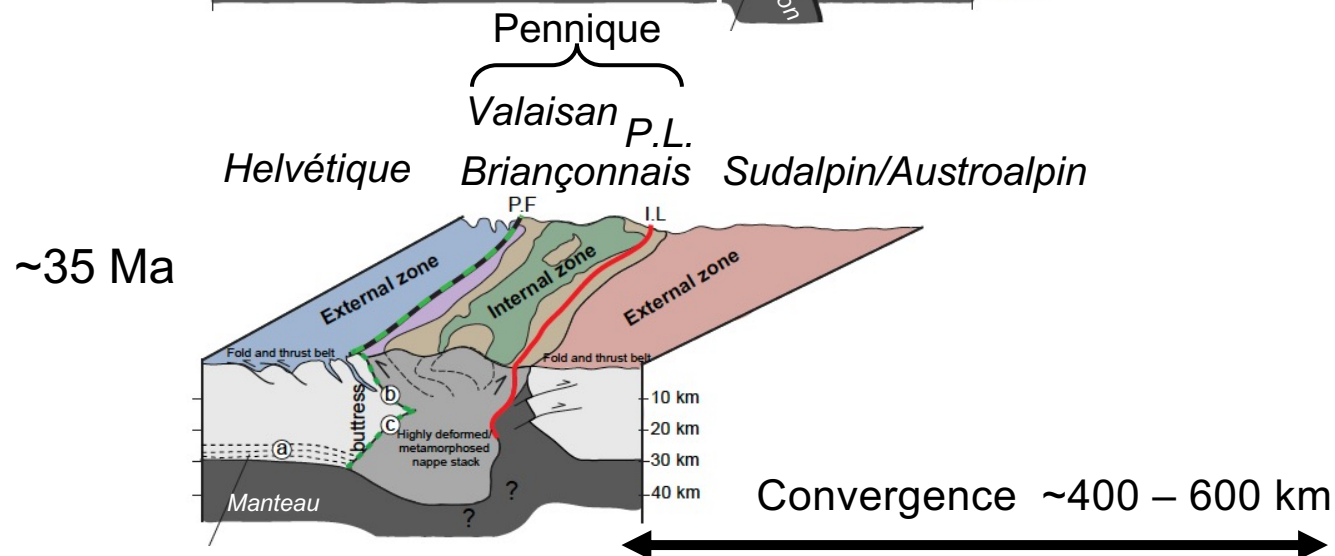
# Les domaines tectoniques des Alpes et la Géométrie générale: cylindrique



# Paléogéographie



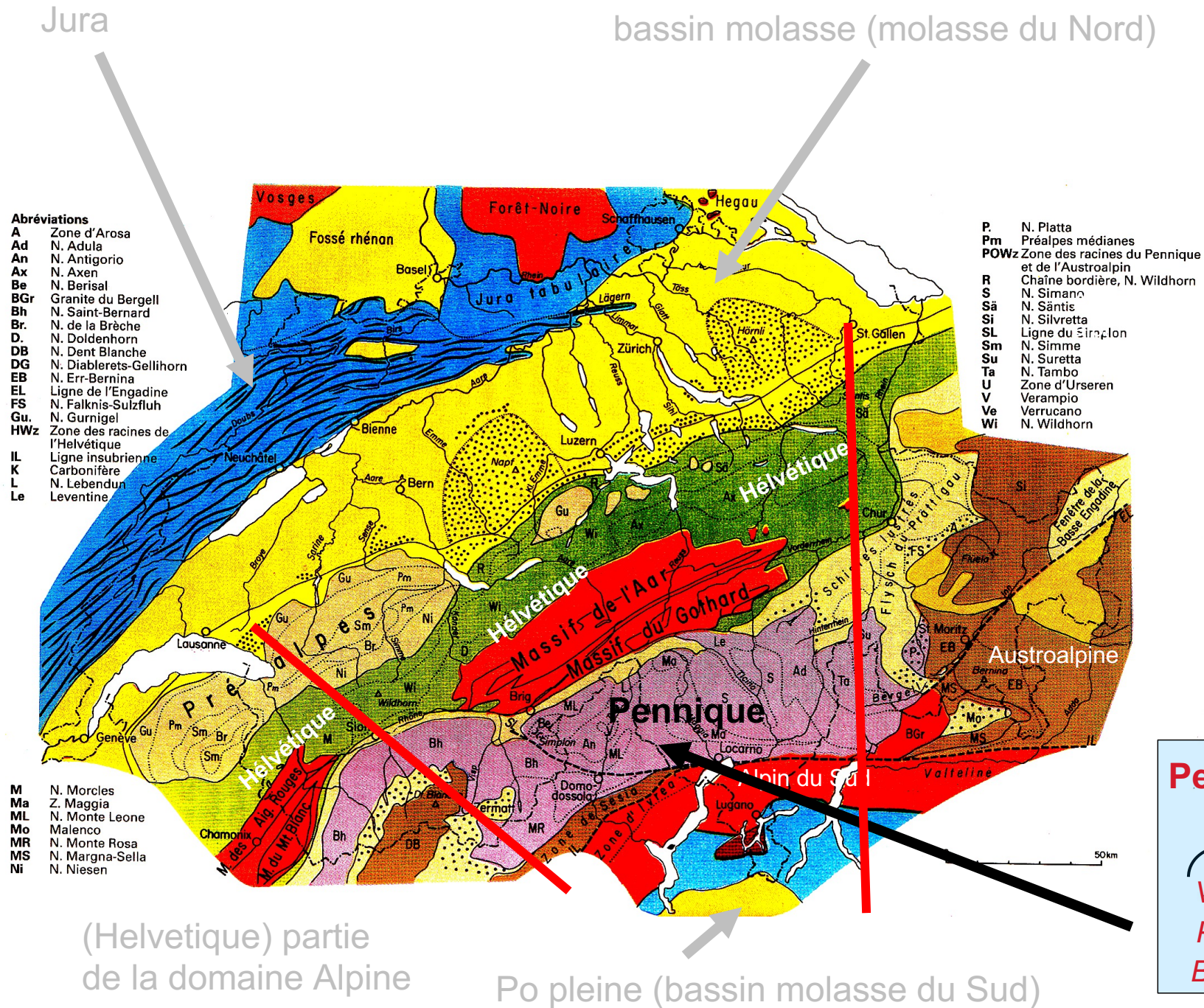
Subduction



Collision



# Répartition des unités tectoniques





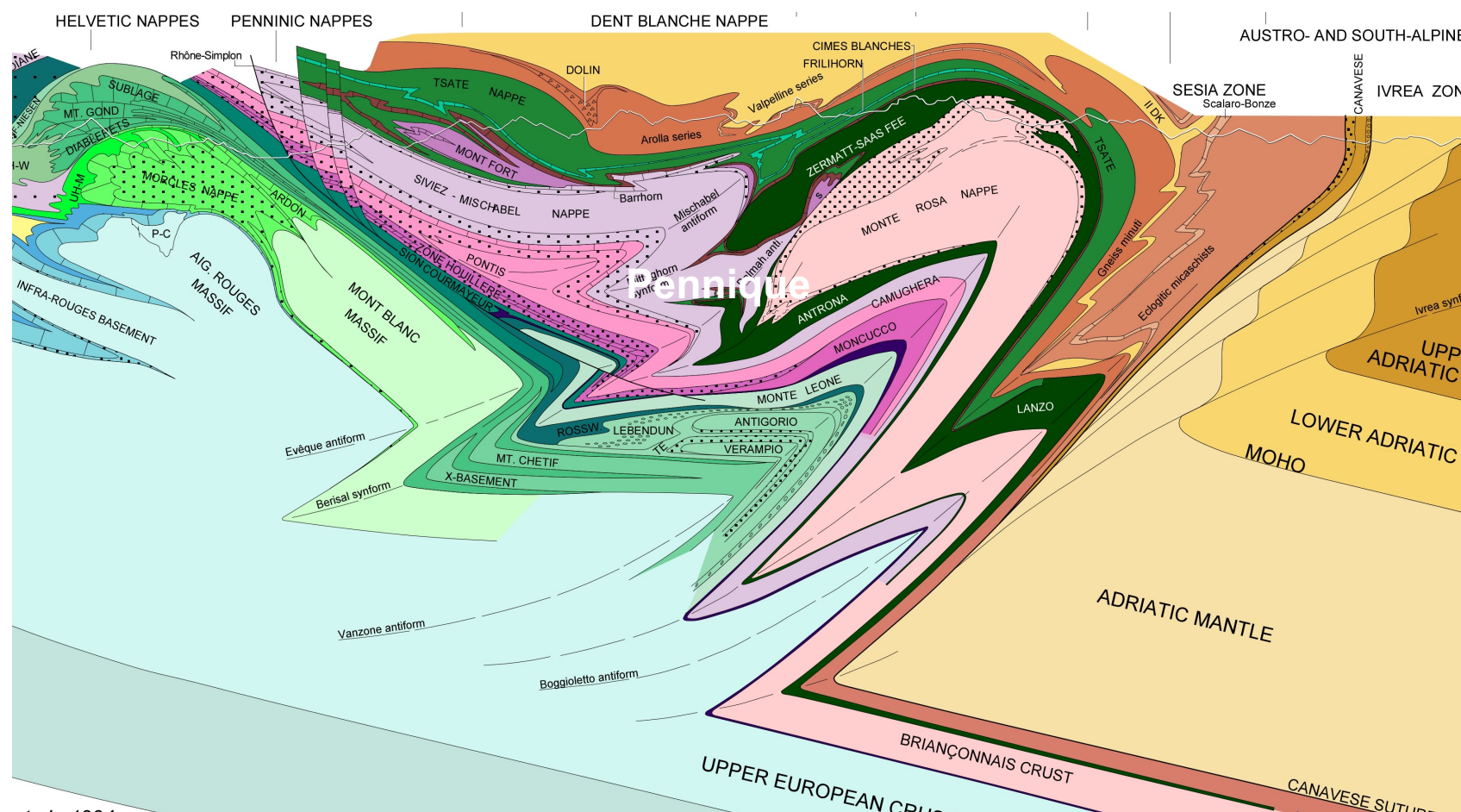
# Une coupe géologique à travers des Alpes de l'ouest (Martigny - Lago-Maggiore)

## Les unités briançonnaises

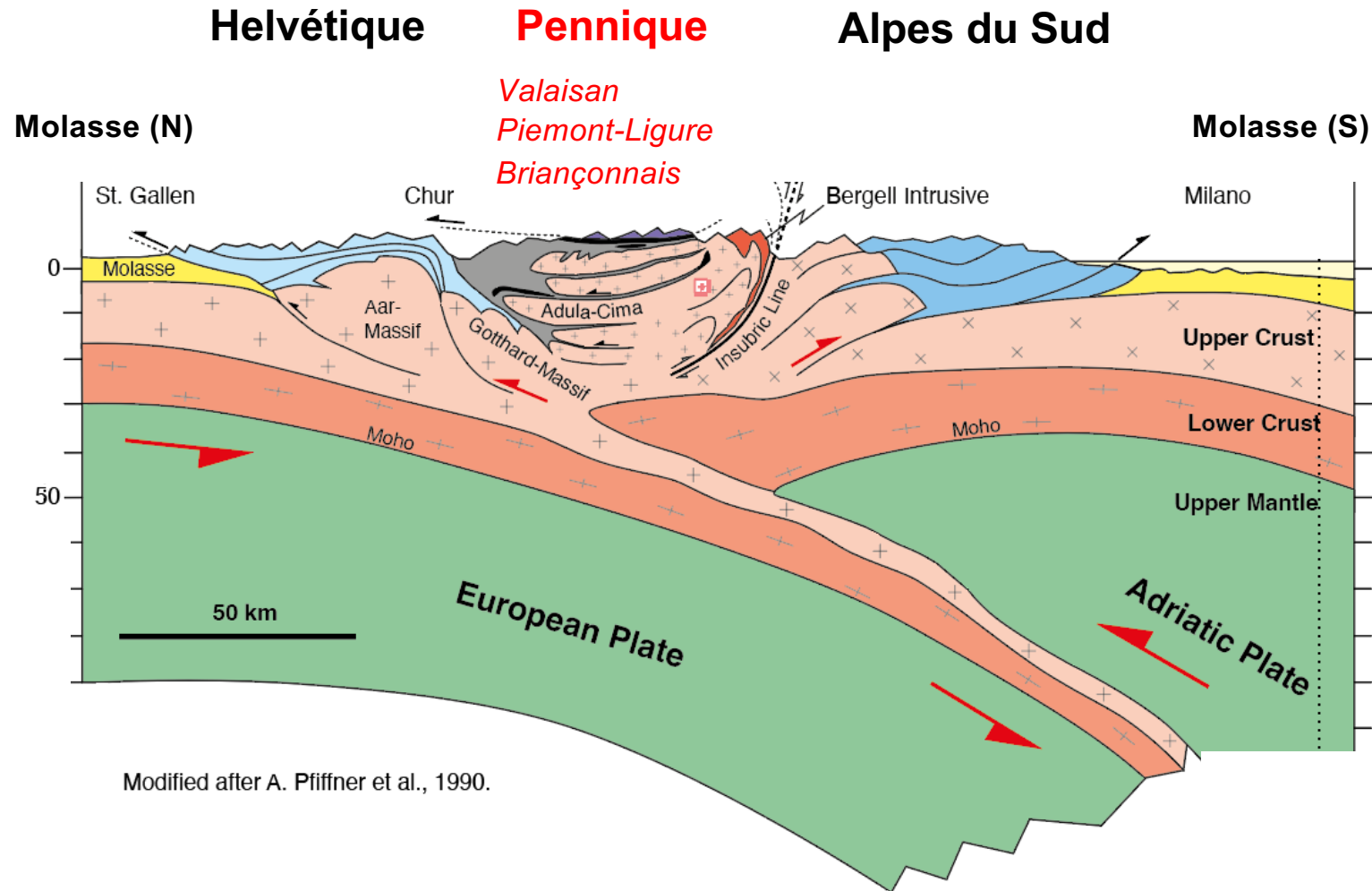
**Nappe:** Une nappe de charriage est un ensemble de couches géologiques qui, lors d'une orogénèse se sont décollées du socle et déplacées sur de grandes distances

### Helvétique

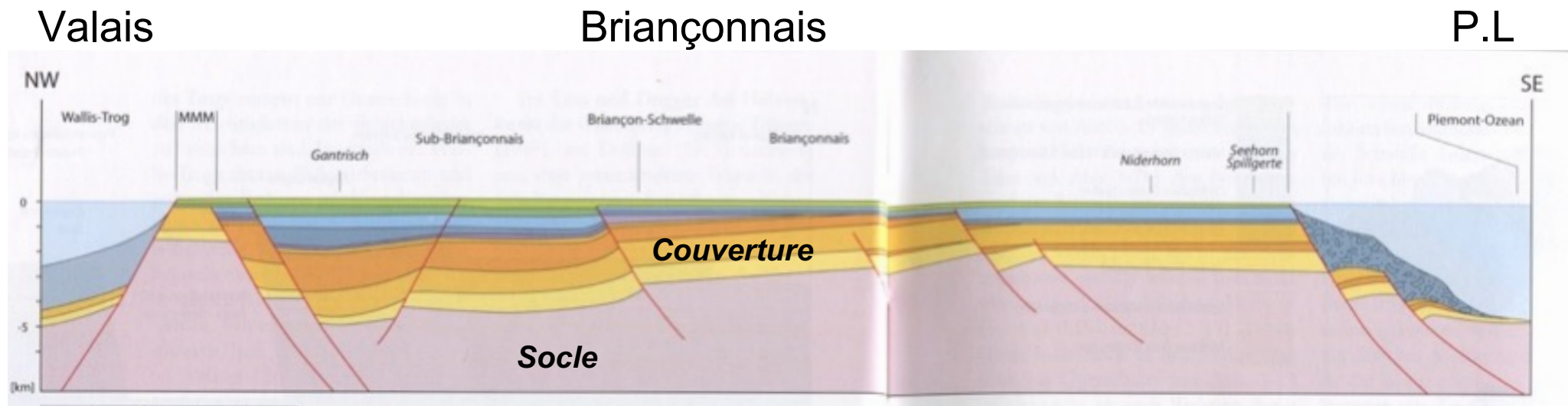
### Alpes du Sud



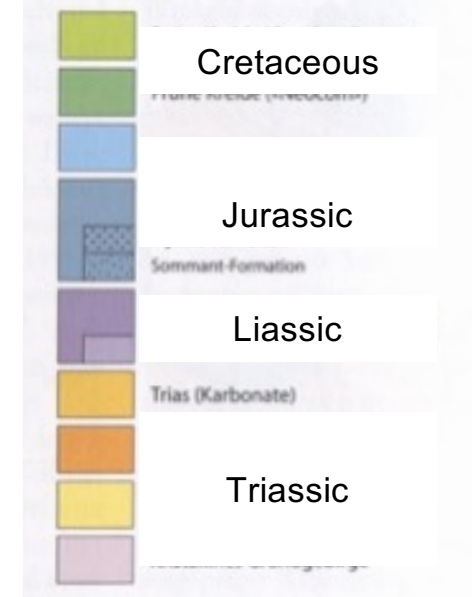
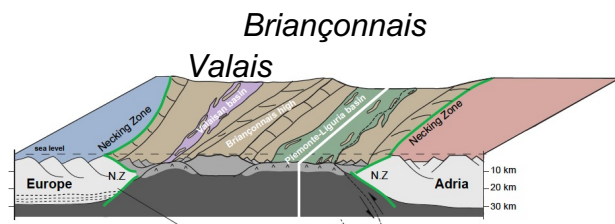
# Une coupe géologique à travers des Alpes II (St. Gall - Milano)



# Partie continentale du Péninsele: **Briançonnais** (avant la collision Alpine)

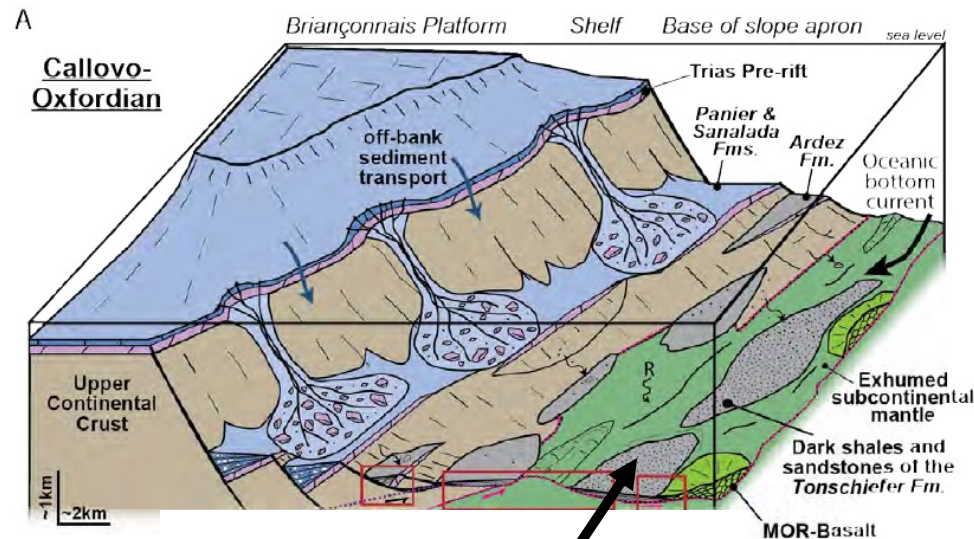


Briançonnais: socle + couverture:  
Block continentale (=microplaque ou micro-  
continent) détaché du continent Européen,  
entouré par 2 domaines océanique (Valais,  
Piemonte Ligure)

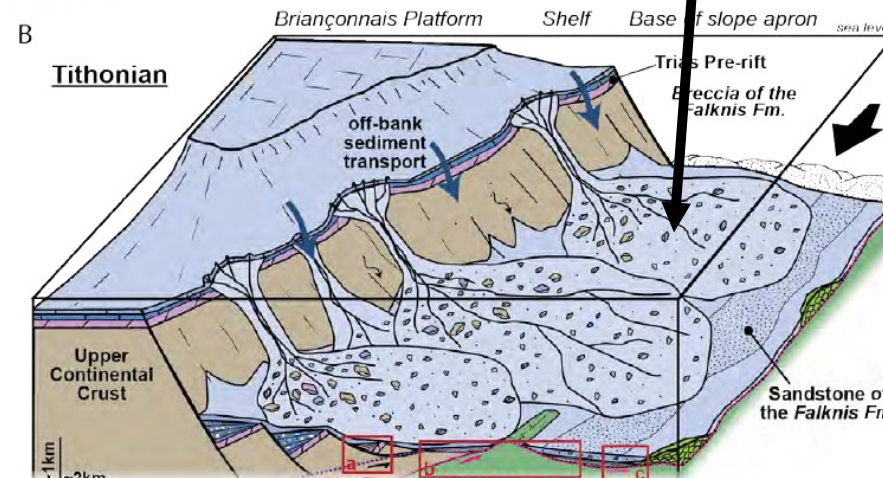
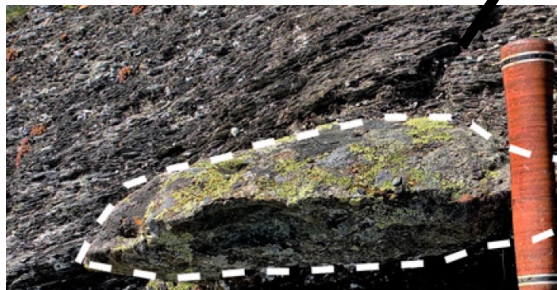
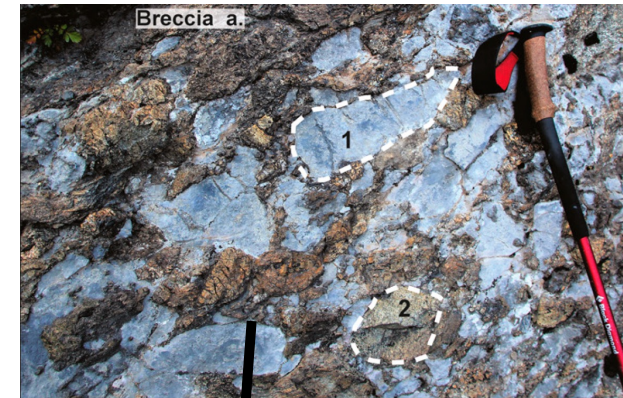




# Transition Briançonnais – Valais (~160 Ma)



Brèches supportées par des clastes de la taille de galets à rochers (socle et sédiments)



• transition abrupte d'une croute continentale d'épaisseur 'normale' à 'amincie' (notez le relief !).

• témoigné par des roches (brèches au pied des canyons, argillite loin des canyons)

Eon	Era	Period	Epoch	Million years ago
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary	Holocene	0.01
			Pleistocene	0.8
		Neogene	Pliocene	2.59
			Early	3.6
			Late	5.3
			Miocene	11.2
			Early	16.4
			Late	23.03
		Tertiary	Oligocene	28.4
			Early	33.9
			Late	41.3
			Eocene	49
			Early	55.8
			Late	61
	Mesozoic	Cretaceous	Late	65.5
			Early	99
		Jurassic	Early	145.5
			Late	159
		Triassic	Early	180
			Late	199.6
Paleozoic	Permian	Early	227	
		Late	242	
	Carboniferous	Early	251	
		Late	256	
	Devonian	Pennsylvanian	299	
		Mississippian	323	
Precambrian	Silurian	Early	359.2	
		Middle	370	
	Ordovician	Early	391	
		Late	416	
	Cambrian	Early	423	
		Late	443.7	

# Piemont Ligurie

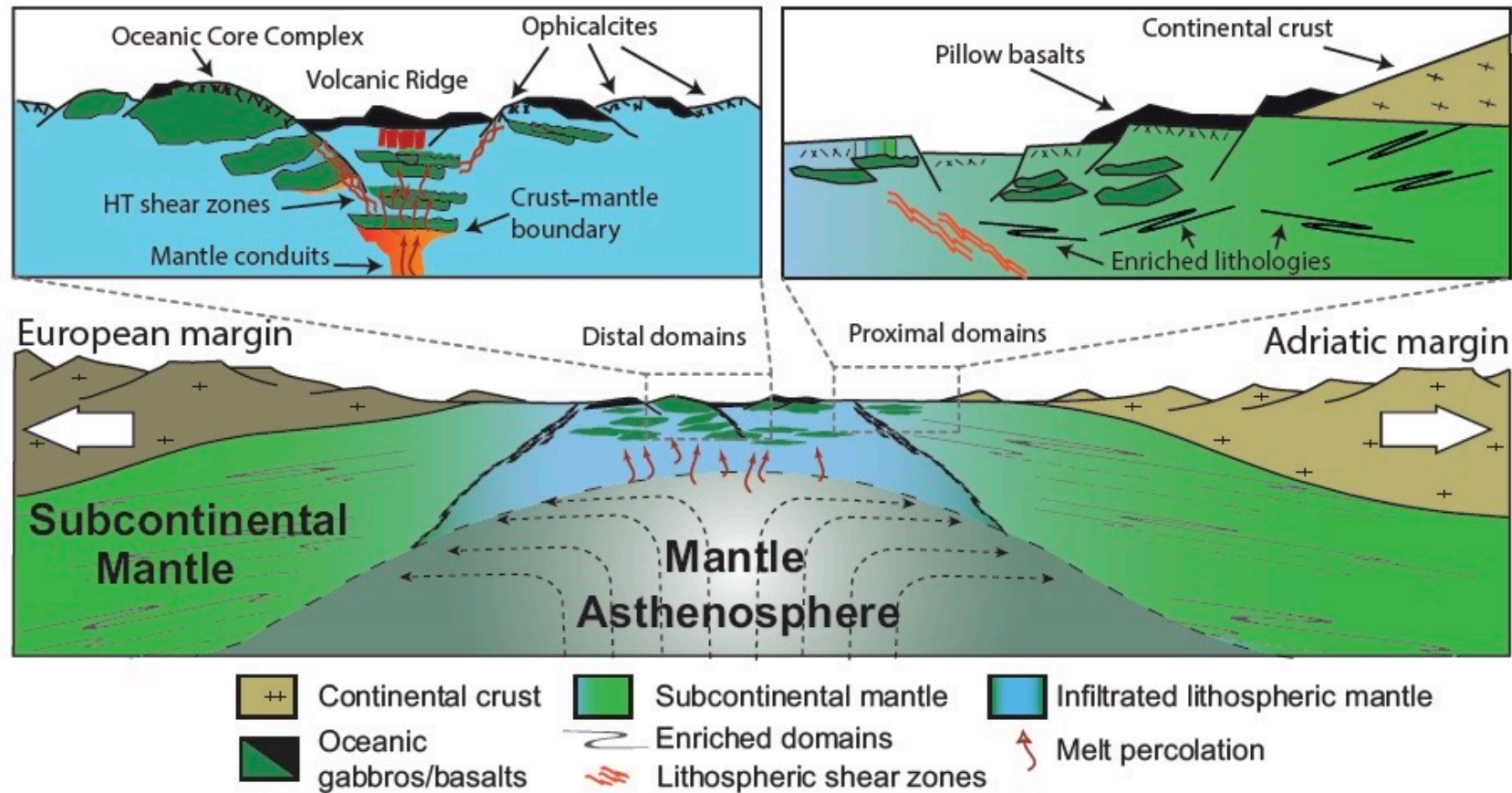
*Croute océanique entre Europe et Afrique ~160 Ma)*

- Serpentes
- gabbros+basalts
- océan à propagation très lente

*Certaines dorsales actuelles sont des analogues excellents*

*Ride mid-océanique lente*

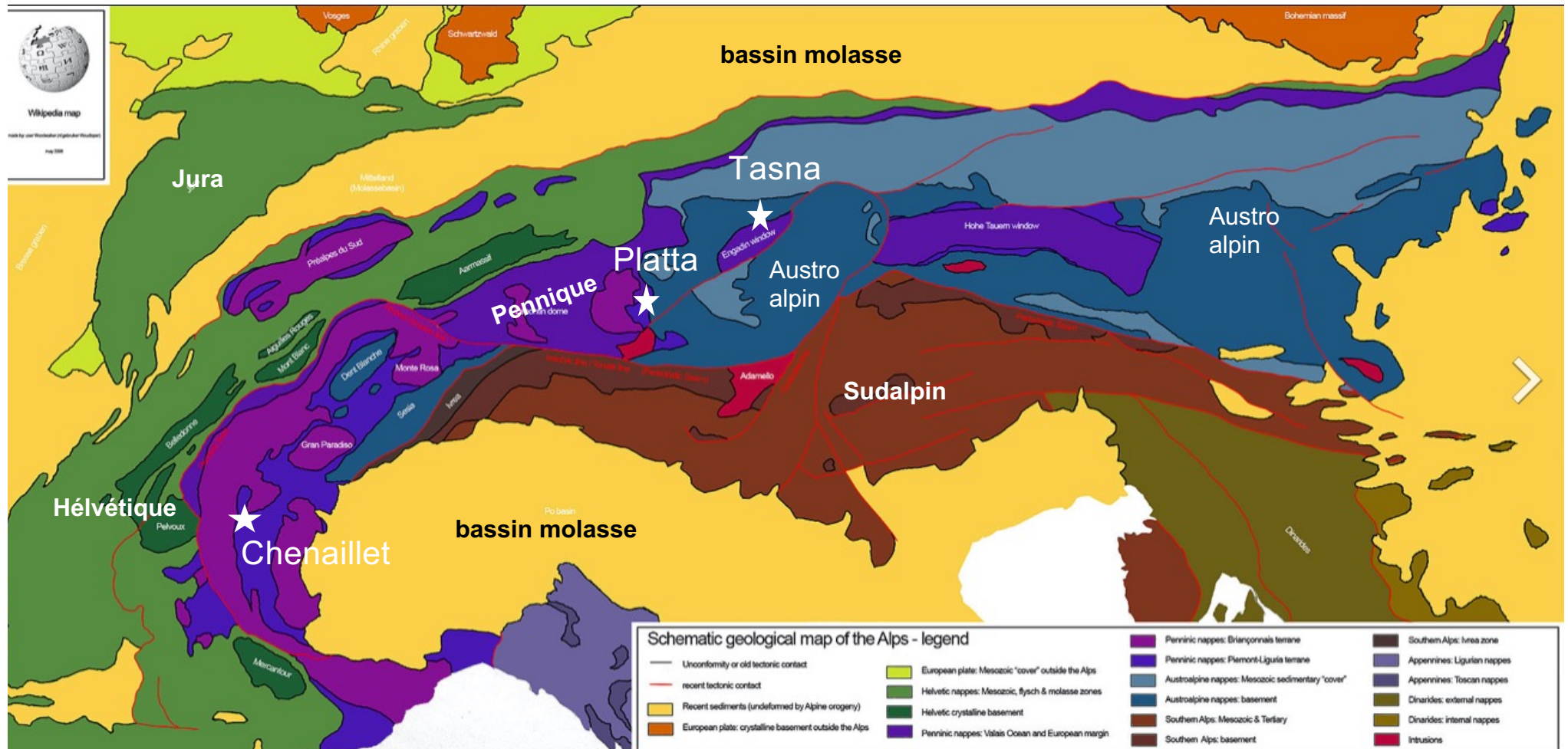
*Transition continent-océan*





# Les domaines tectoniques des Alpes

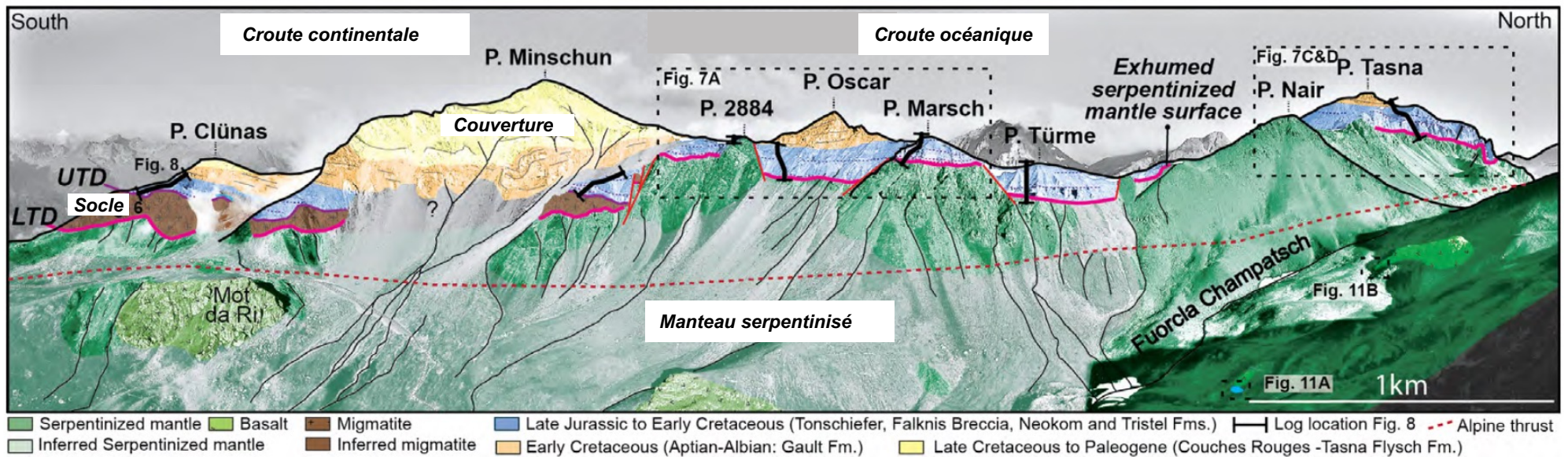
## exemples de la transition croute continental - océanique



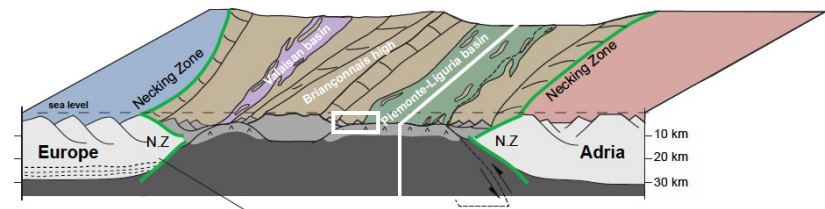


# Exemple d'une transition fossile du continent vers l'océan dans les Alpes: I

## Tasna (Engadine bas, CH)

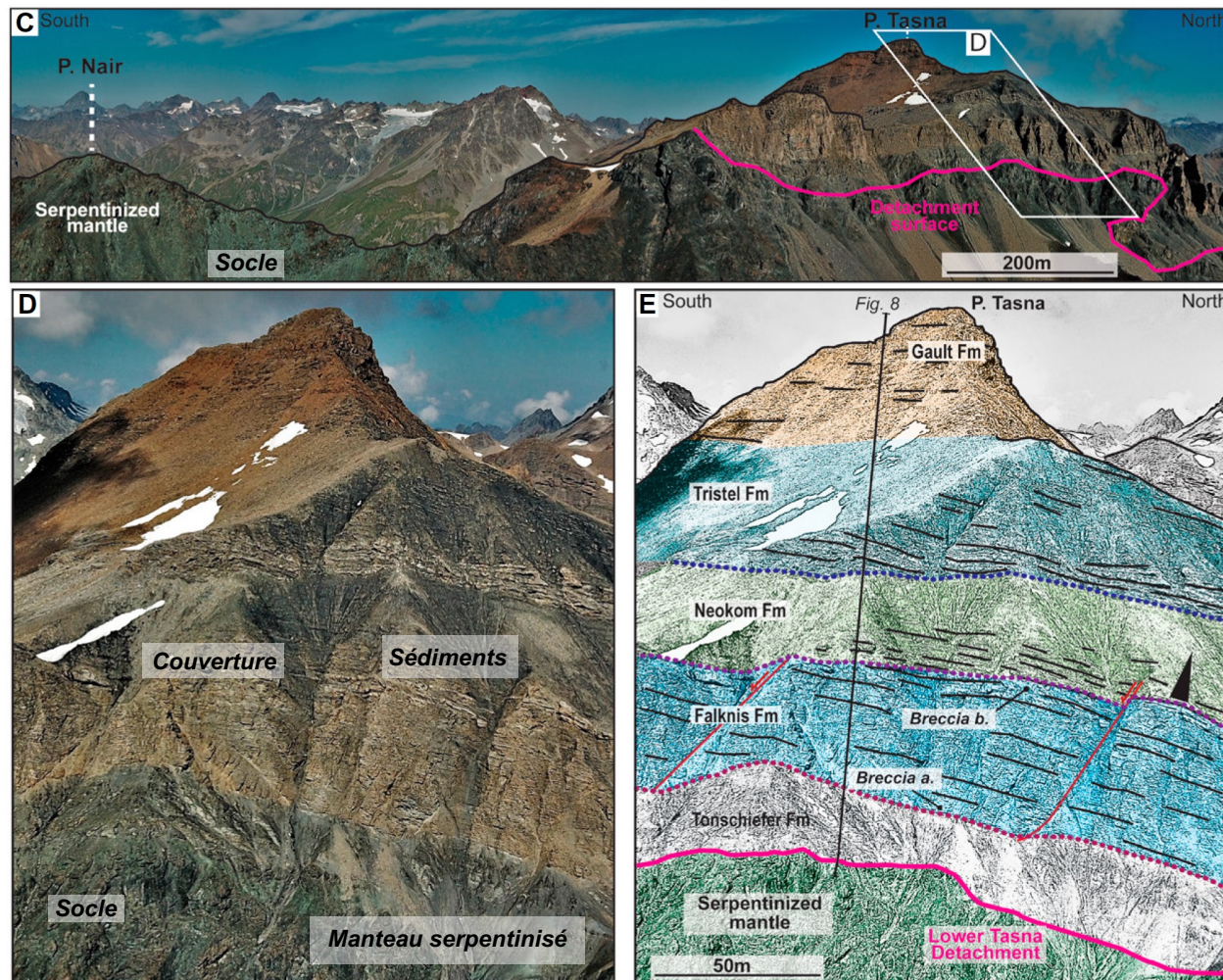


Certains endroits dans les Alpes sont peu déformé et les affleurements ne sont pas trop 'détruit' par la subduction et collision



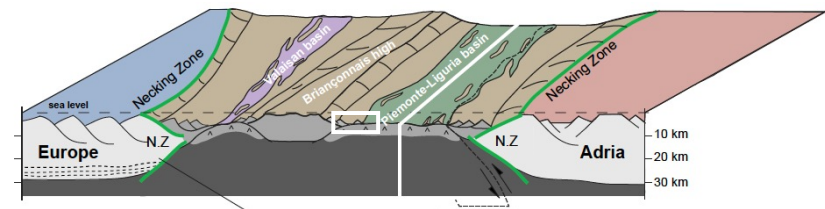


## Exemple d'une transition fossile du continent vers l'océan dans les Alpes: II



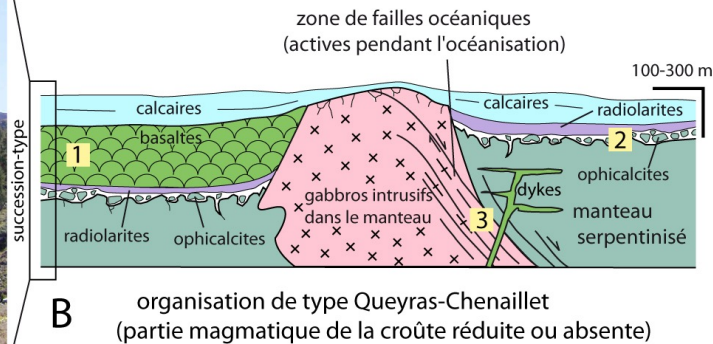
Dépôts des sédiments sur le manteau. Age de exposition au fonds de l'océan déterminé par les premiers sédiments.  
(=Jurassique, ~160 to 150 Ma)

Certains endroits dans les Alpes sont peu déformé et les affleurements ne sont pas trop 'détruit' par la subduction et collision





# Exemples des roches d'une dorsale fossile dans les Alpes: I



## Chenaillet (F)

A: Coupe géologique entre serpentinites (roches du manteau), basaltes et couverture sédimentaire

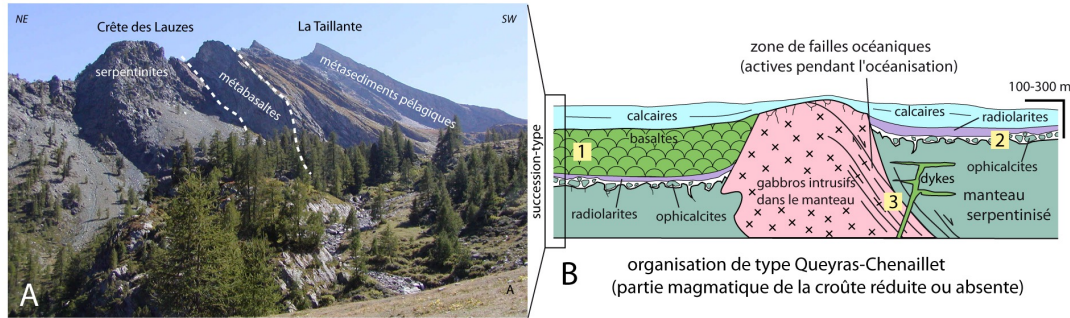
B: Reconstruction géologique avec localisation des fotos en C

C: Fotos du Terrain (Chenaillet, Montgenèvre: {frontière France-Italy})

- (1) 200m des laves à pillow
- (2) Brèches avec des morceau du manteau (serpentinites), sable de serpentine et carbonate
- (3) Filon du gabbro coupant la foliation du gabbro (pyroxene+feldspath)



# Exemples des roches d'une dorsale fossile dans les Alpes: II



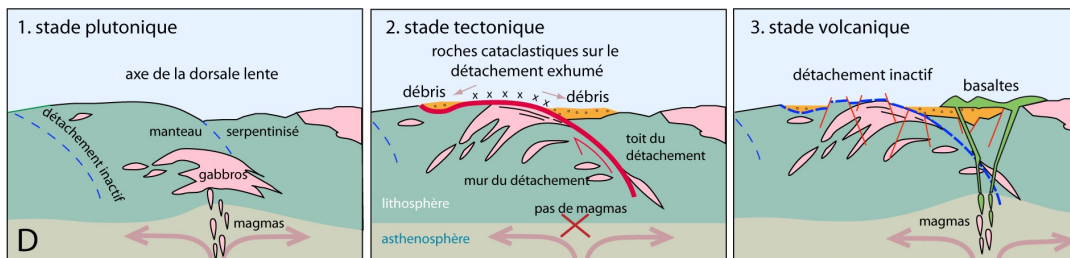
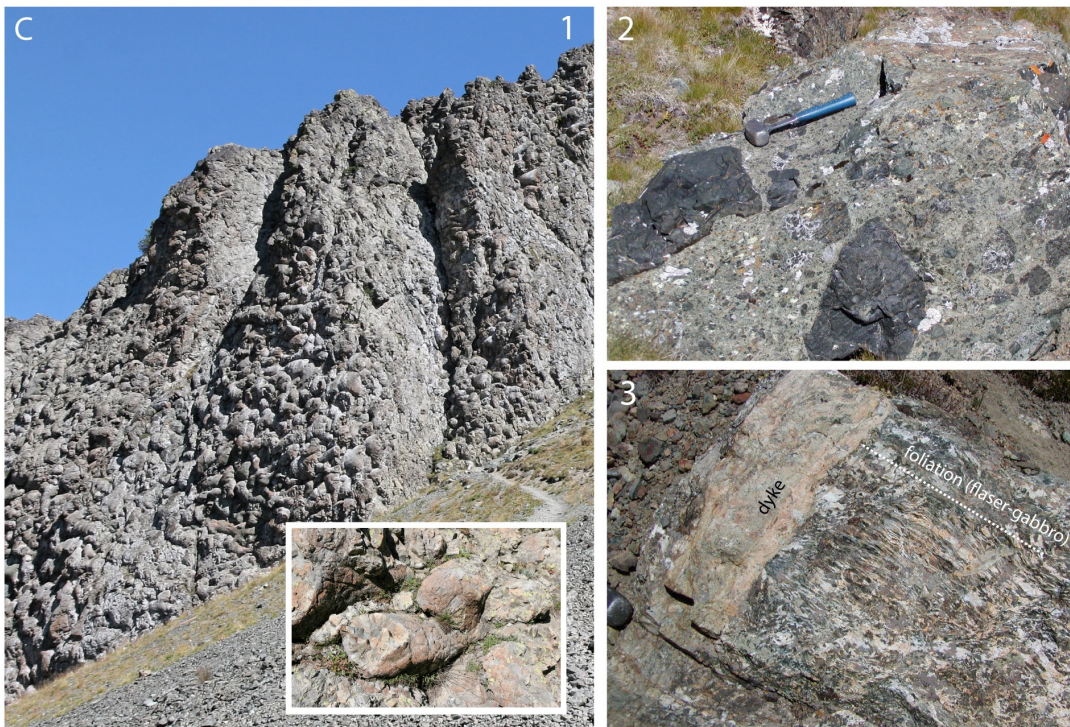
## Chenaillet (F)

A: Coupe géologique entre serpentinites (roches du manteau), basaltes et couverture sédimentaire

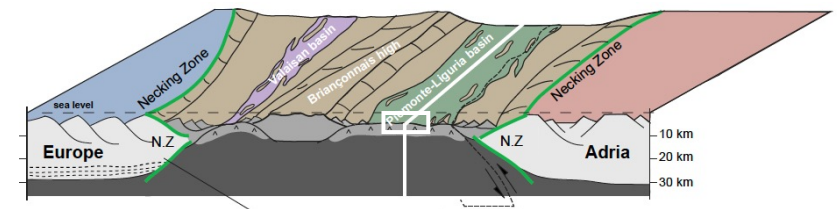
B: Reconstruction géologique avec localisation des fotos en C

C: Fotos du Terrain (Chenaillet, Montgenèvre: {frontière France-Italy})

- (1) 200m des laves à pillow
- (2) Brèches avec des morceau du manteau (serpentinites), sable de serpentine et carbonate
- (3) Filon du gabbro coupant la foliation du gabbro (pyroxene+feldspath)



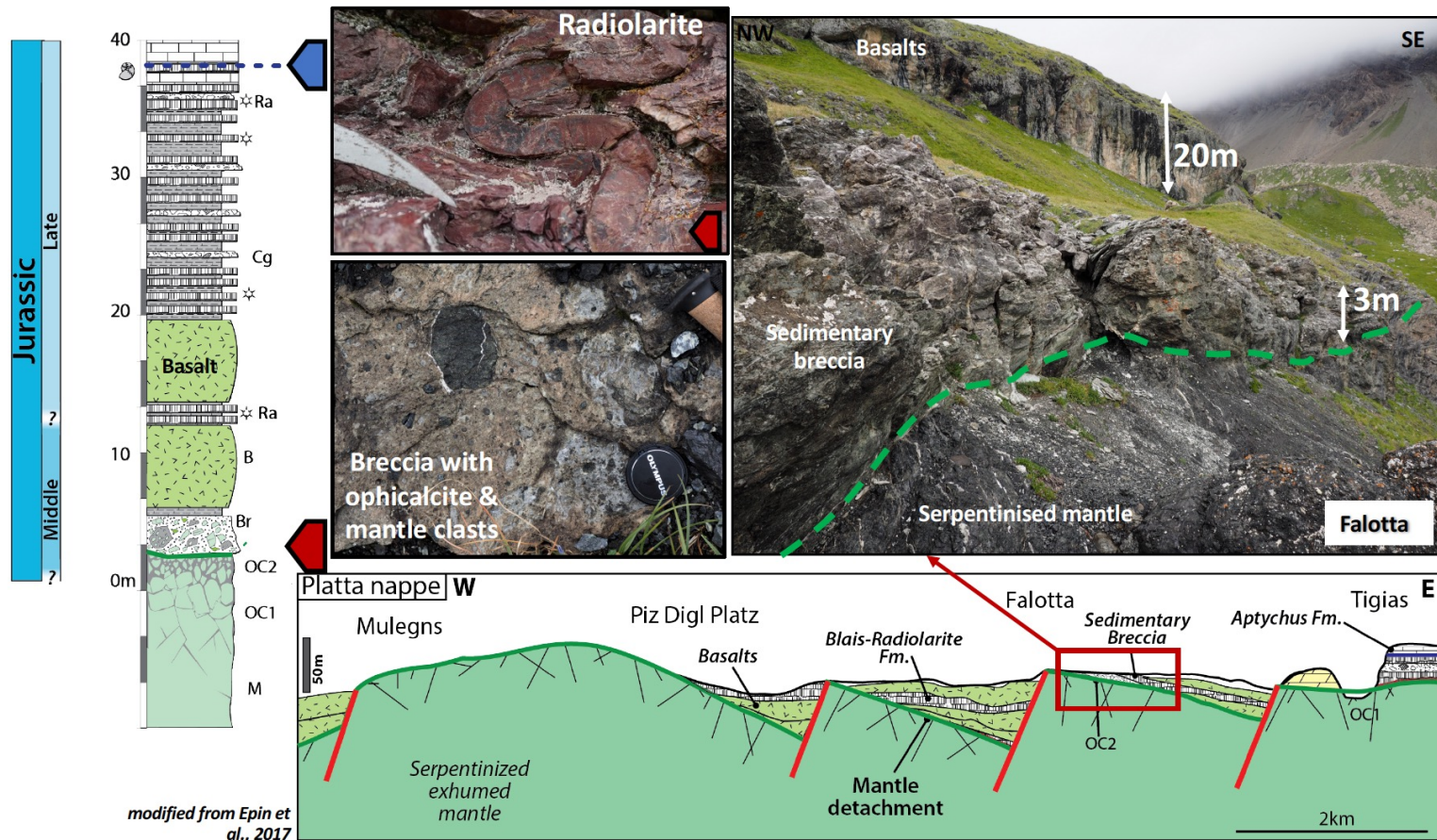
**Modèle géologique:** emplacement des magmas en profondeur, suivi par une phase de déformation, suivie par l'emplacement des basaltes





# Exemples des roches d'une dorsale fossile dans les Alpes: III

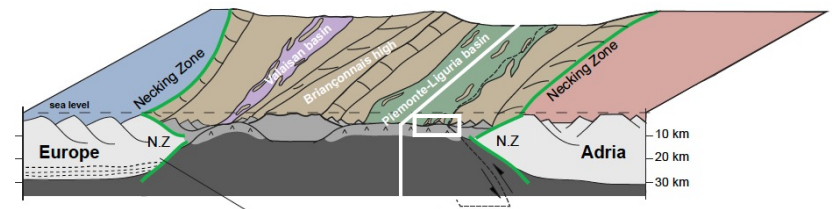
## Platta (CH)



Couverture des sédiments sur la croûte océanique au fond de l'océan Thétys

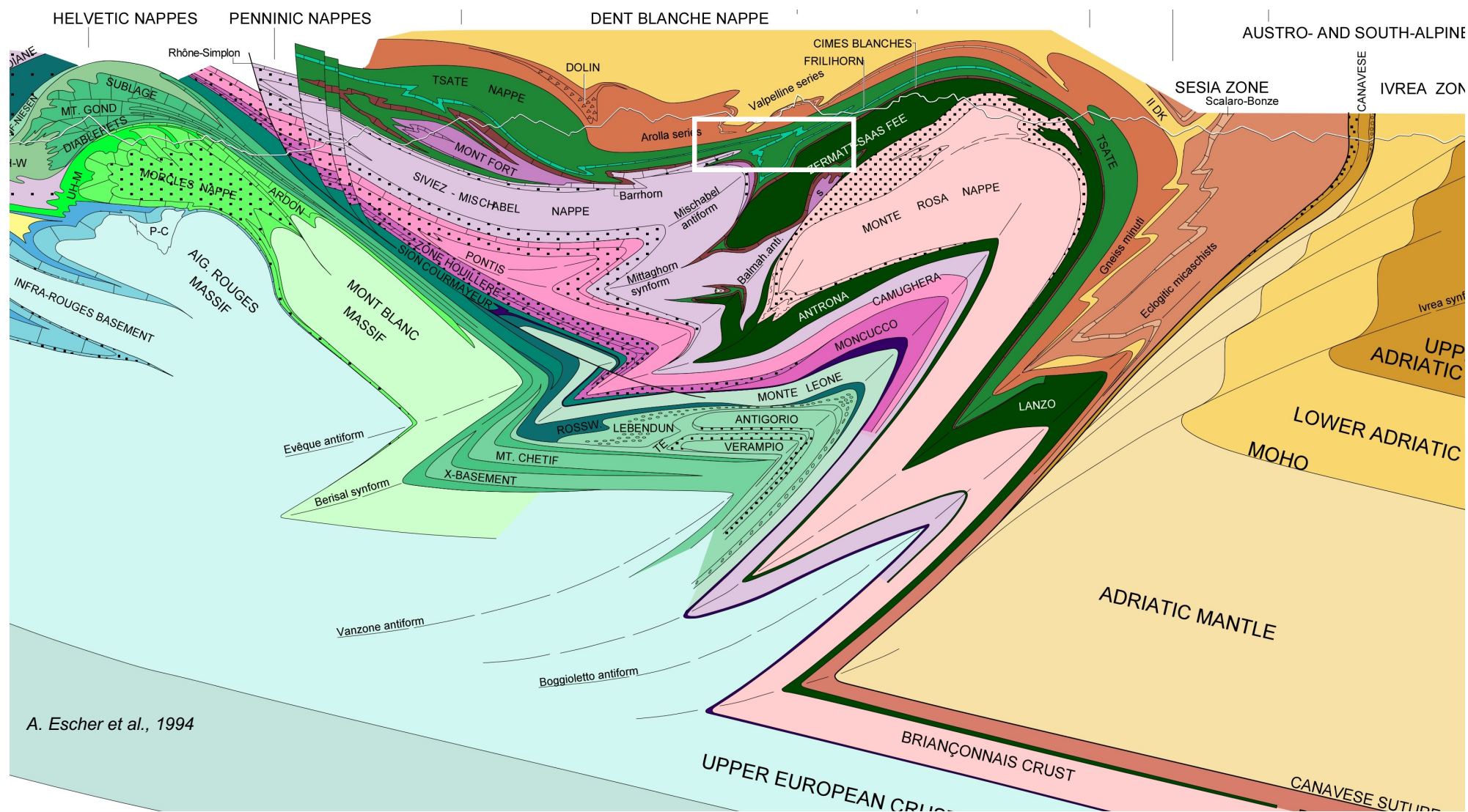
Breches similaire à Chenaillet, couvert par des sédiments du mer profonde (argille rouges, radiolarites) et des coulée de laves

Age: des sédiments: Jurassique moyen – supérieur (160-150 Ma)



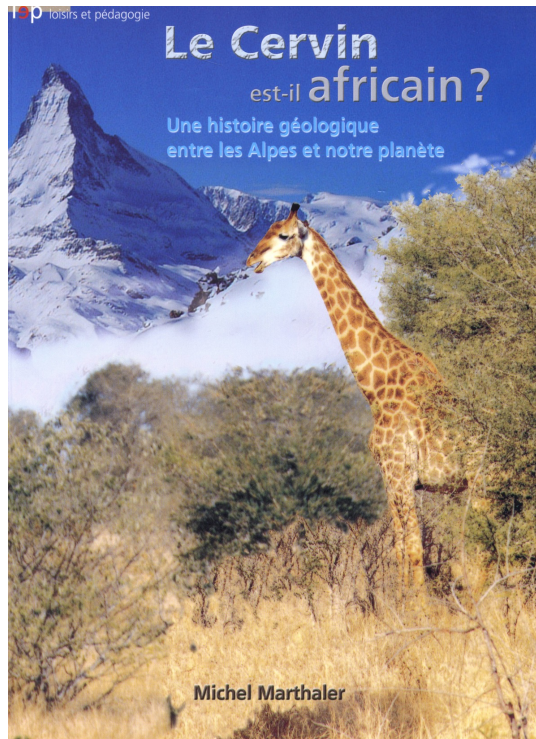


# La Téthys alpine et l'Apulie ("Afrique")





## Exemples des roches d'une dorsale fossile dans les Alpes: fortement déformé



# Géologie du Cervin



Extrait de la carte géologique d'Emile Argand (1908) 1.

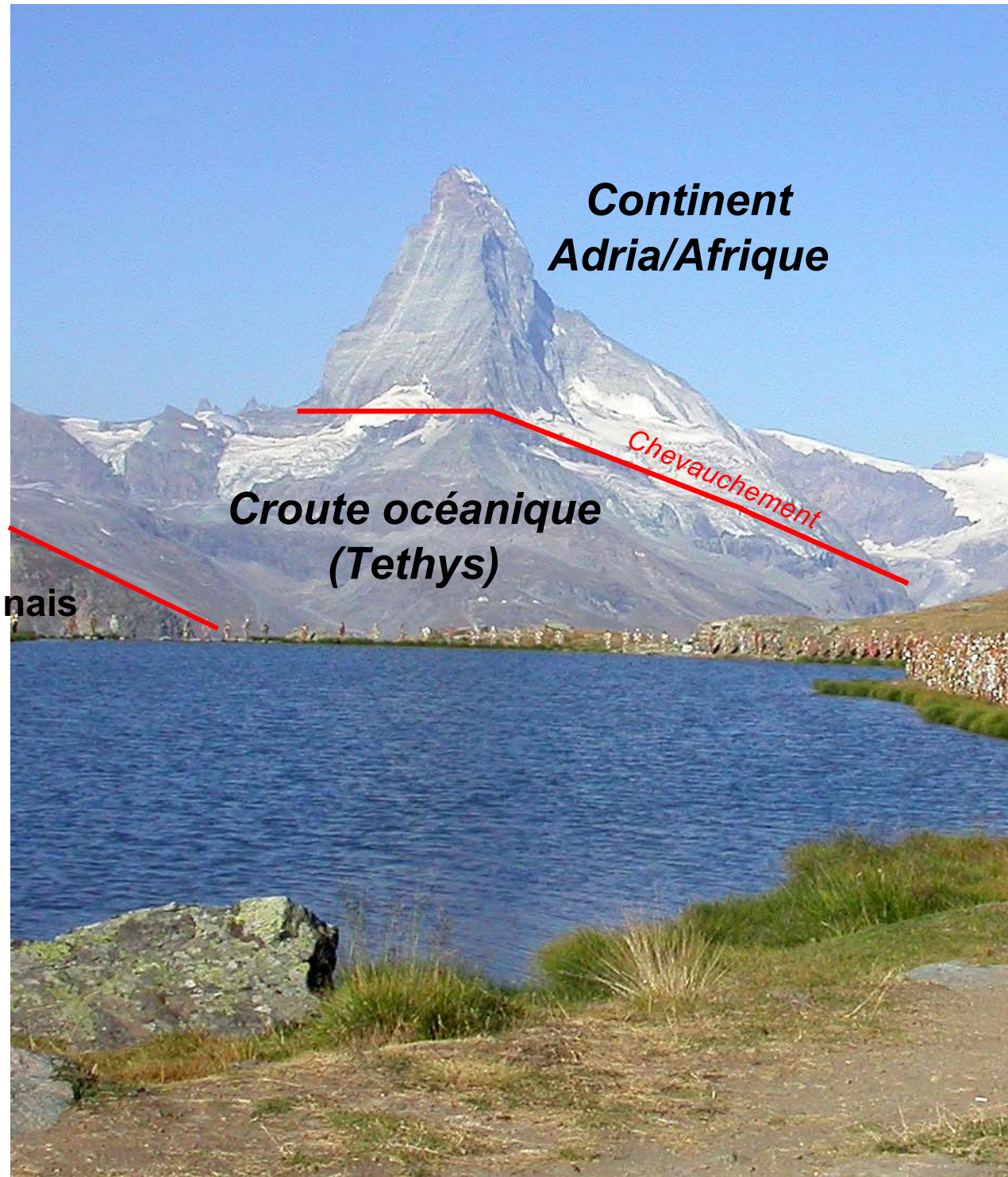
Echelle : 1:25000





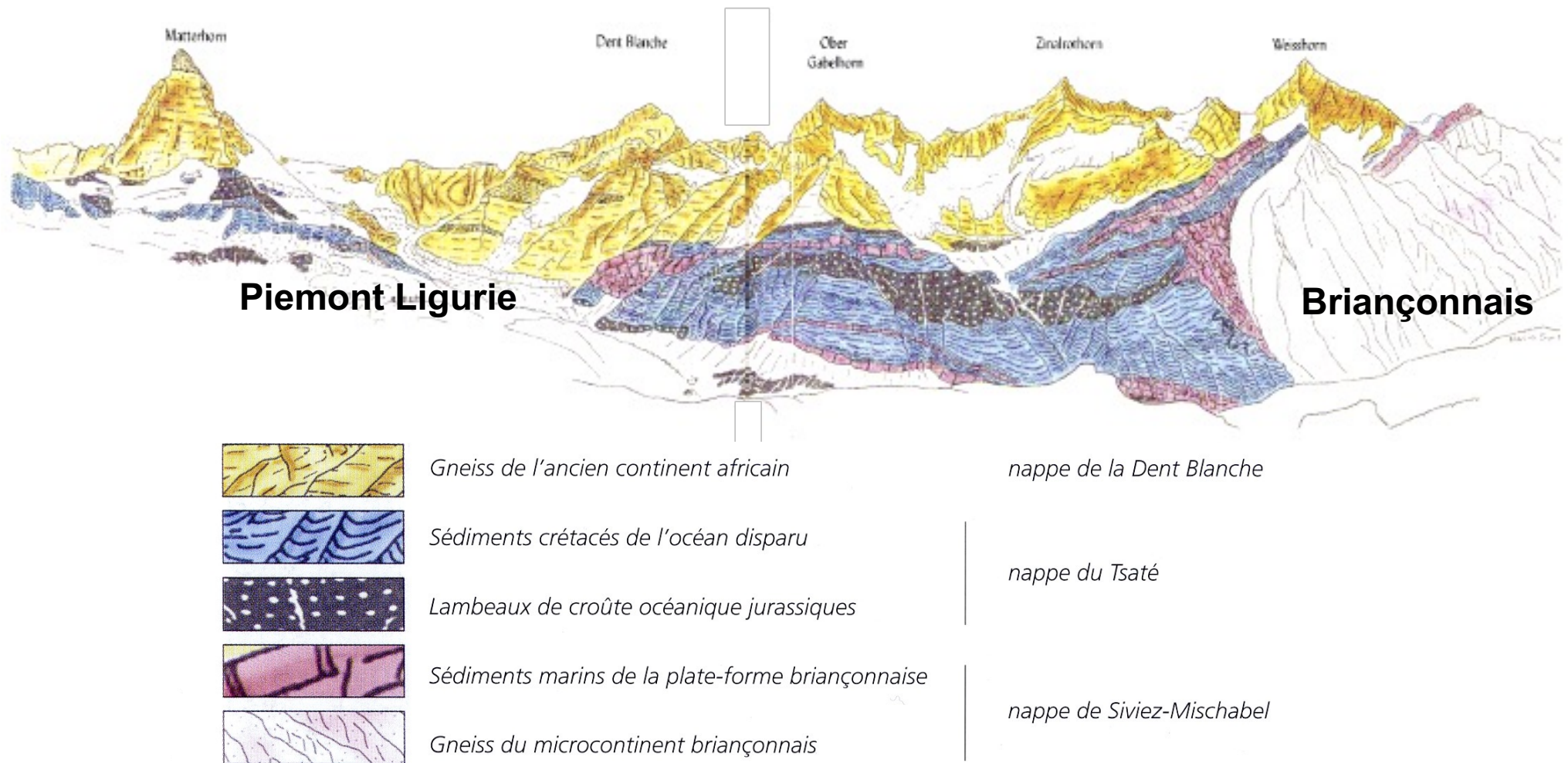
le sandwich océanique

Briançonnais  
(Europe)



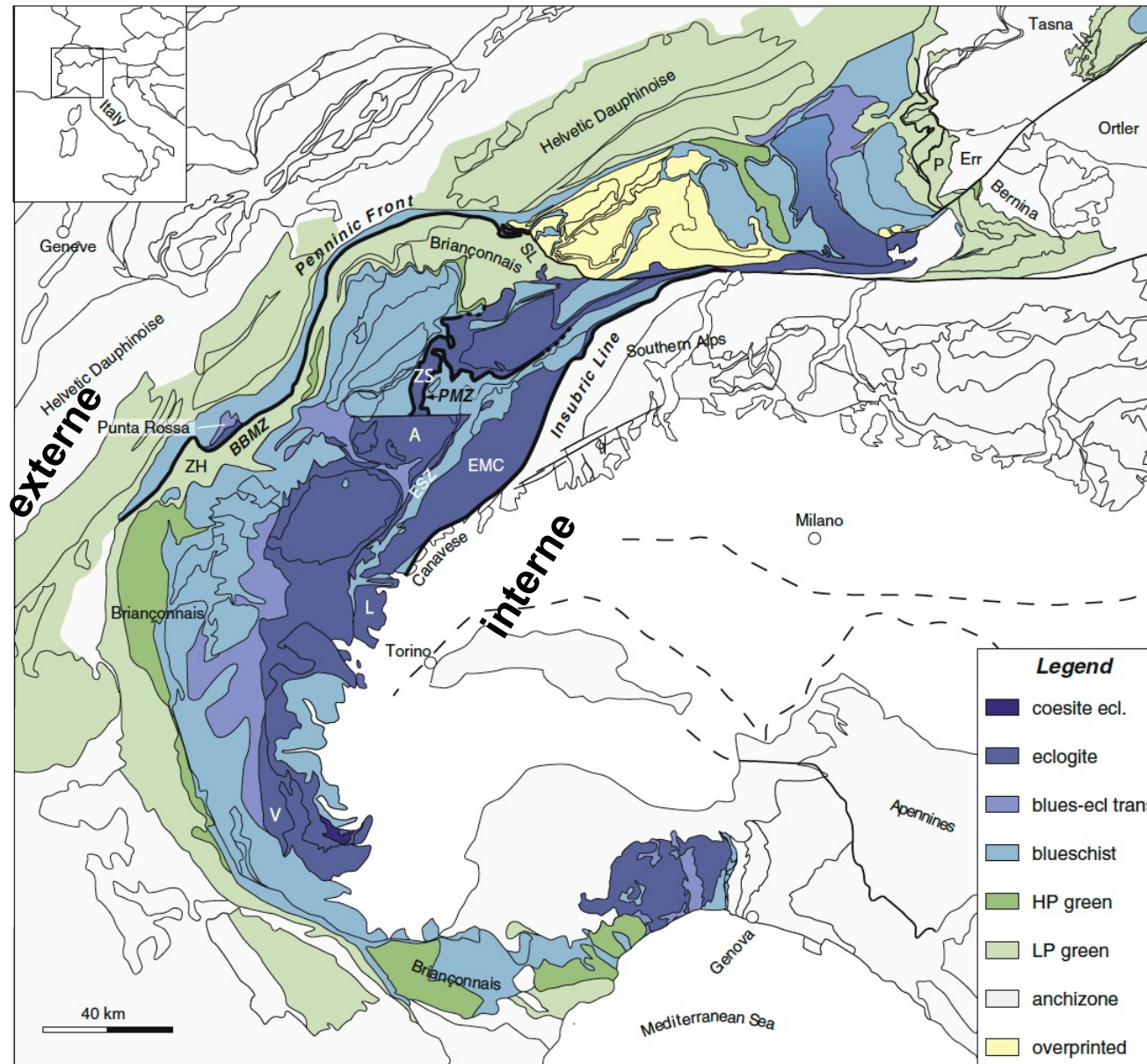
# Panorama de la géologie entre Weisshorn et Cervin

## Adria (Austroalpin)





# Zonation métamorphique des Alpes de l'Ouest



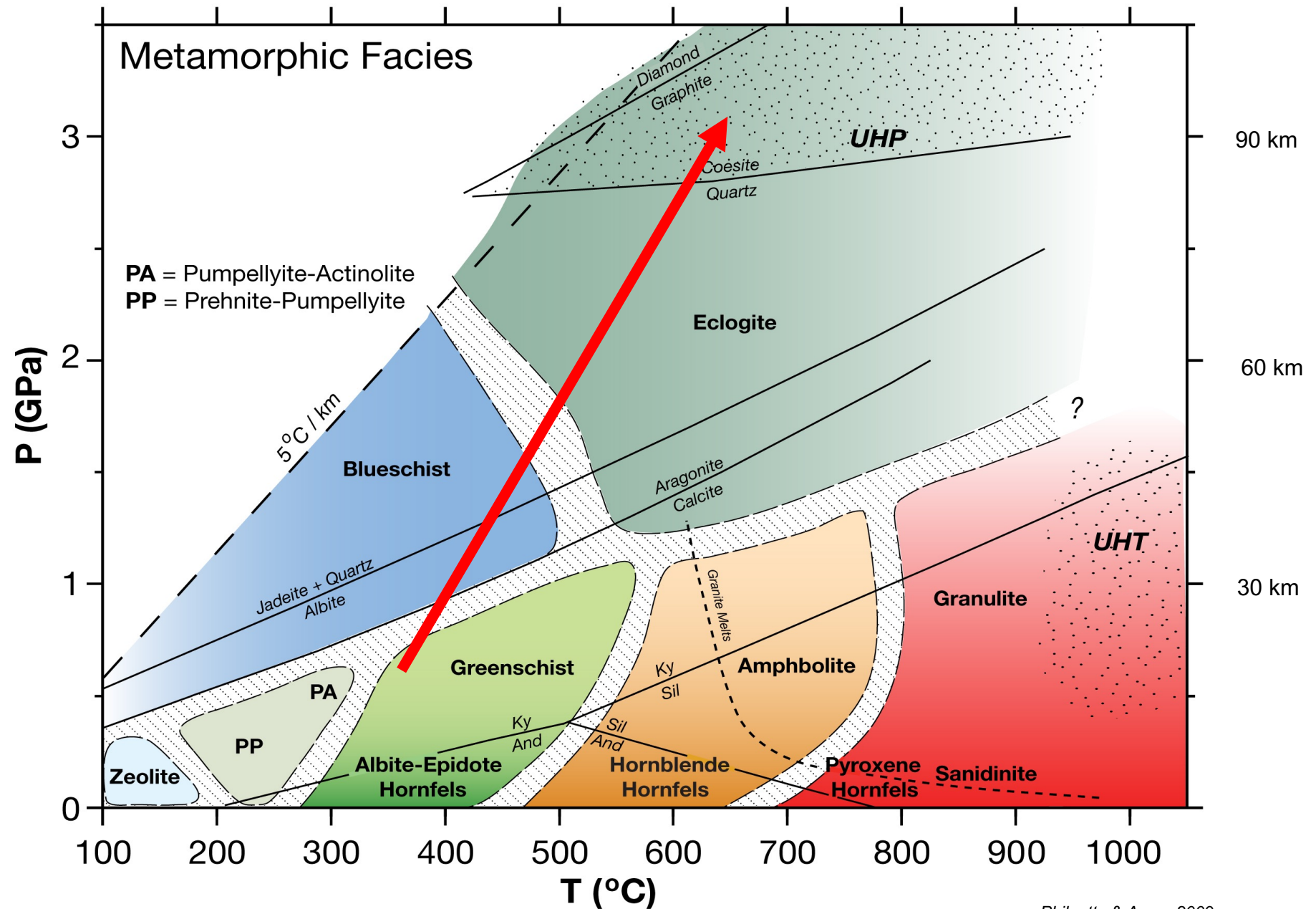
Zonation du métamorphisme de l'externe vers l'interne

- Schiste vert inf.
- Schiste vert sup.
- Schiste bleu
- Eclogite
- Coesite eclogite (UHP)

-> Pression et température augmente

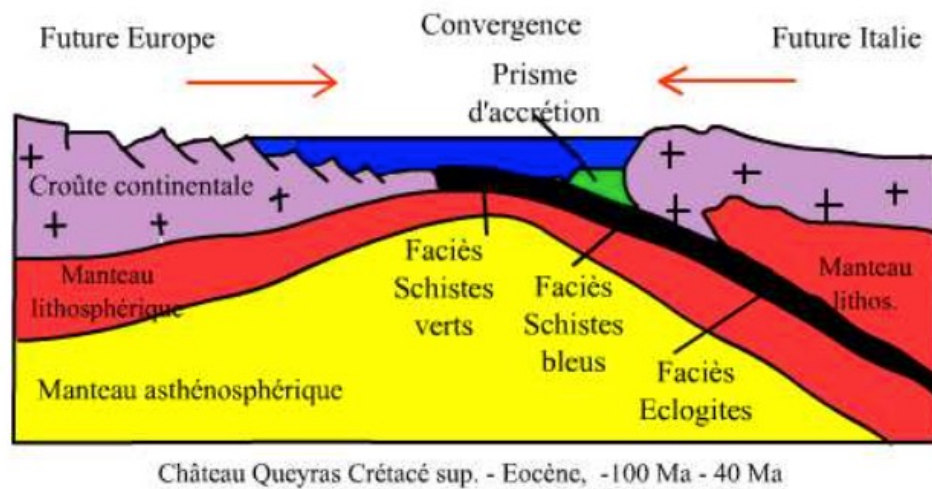
-> Gradient du métamorphisme d'une zone de subduction

# Pour rappel: facies métamorphique

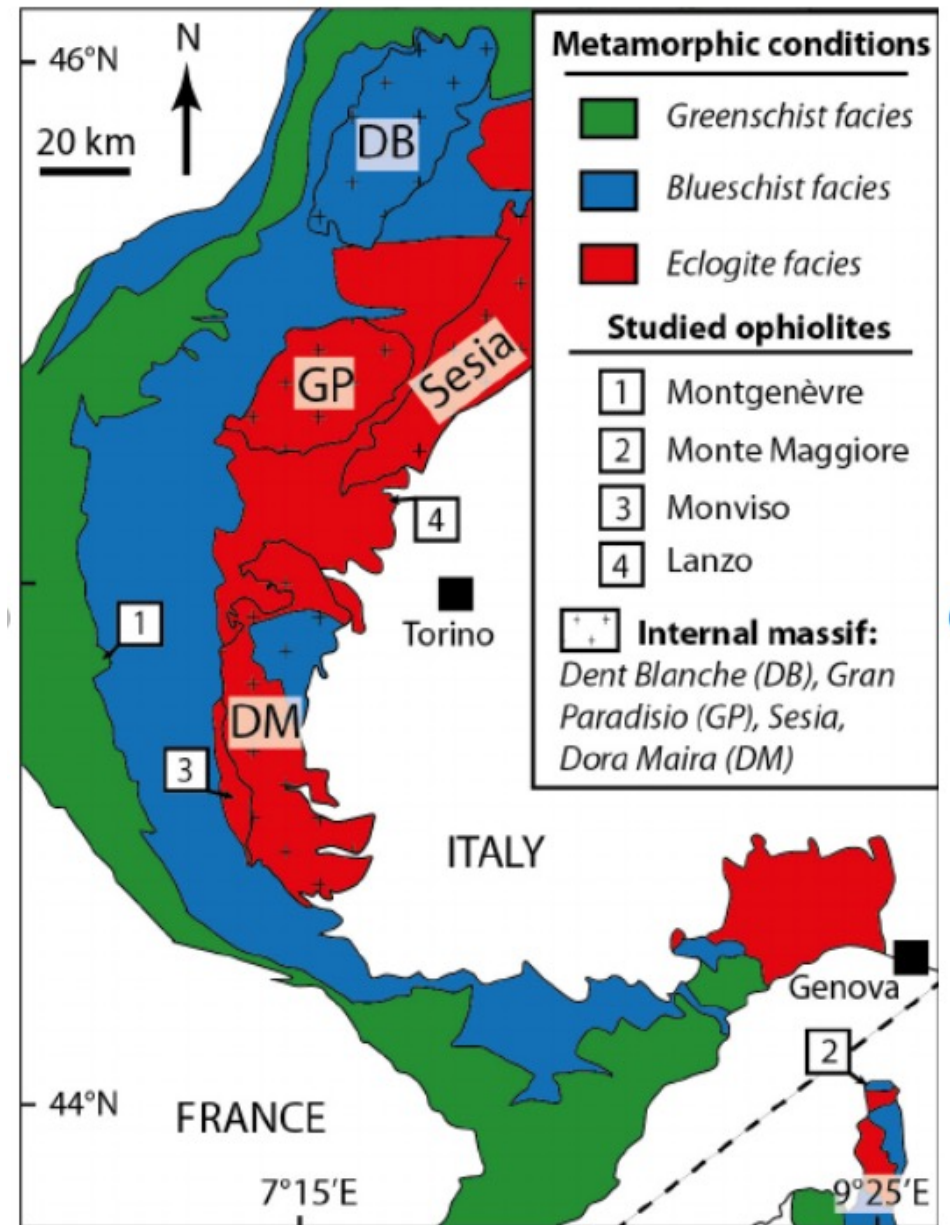




# Subduction de l'Europe sous l'Afrique !



Samuel Remérand



Geological map of the Western Alps showing the metamorphic facies and the spatial distribution of studied ophiolites. The numbers indicate the studied ophiolites: 1. The Mont Genèvre ophiolites (Chenaillet and Punta Rascia massifs); 2. Monte Maggiore ophiolite; 3. Mon Viso ophiolite and 4/Lanzo ophiolite.



# Roches typiques du métamorphisme eclogitique à Zermatt

Eclogite Facies Pillow Basalt



Eclogite facies gabbro

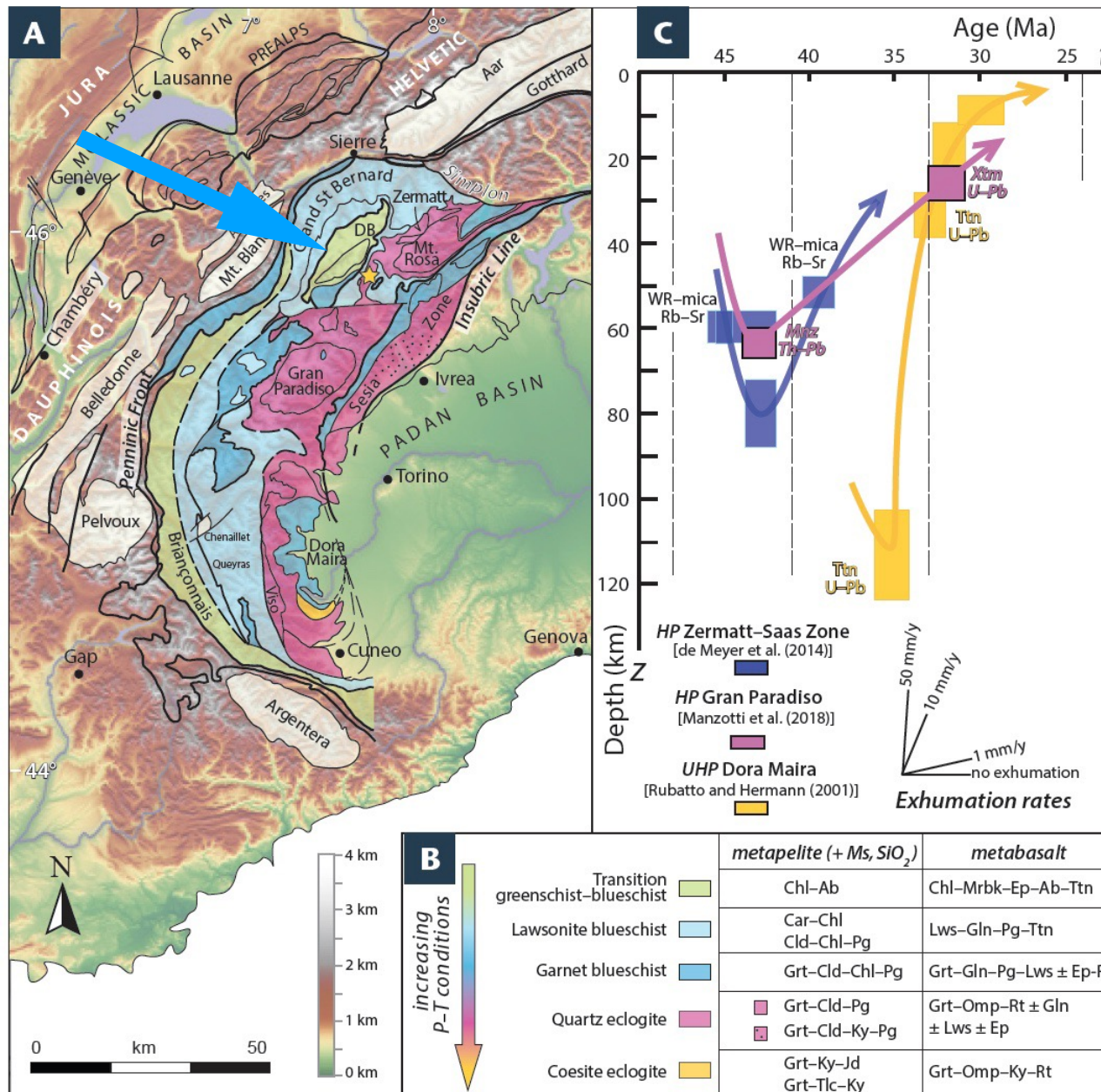


Eclogite facies basalte (minéraux: grénat, pyroxène)





# Les chemins pression-température-temps de cette subduction



Différentes nappes  
enregistrent des  
chemins p-T-t

radiogenic age dates

phase petrology => P,T

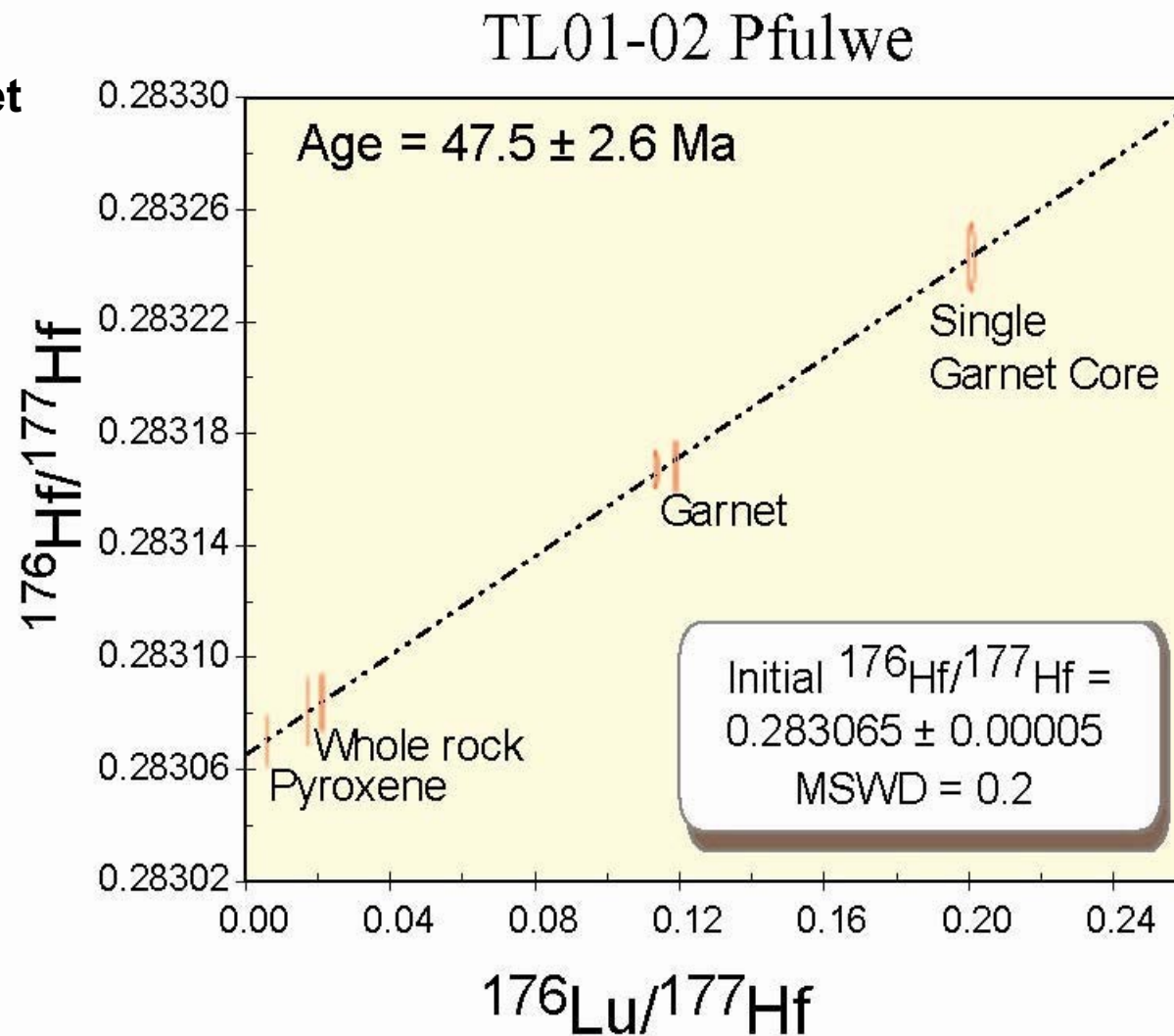
very localised UHP  
Lago Cignana, Dora Maira

Hypothèse

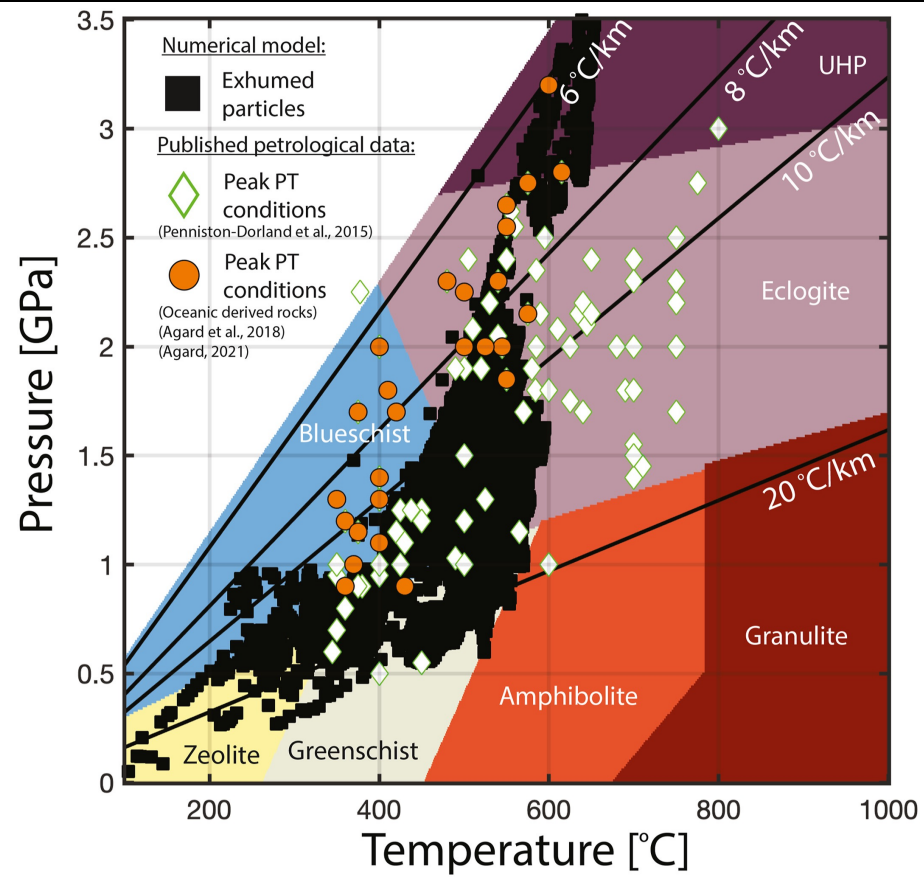
$$P_{litho} = \rho g z$$

# Un exemple pour des éclogites de Saas Zermatt (datation radiogénique)

Datation des minéraux et  
calcul d'un isochrone

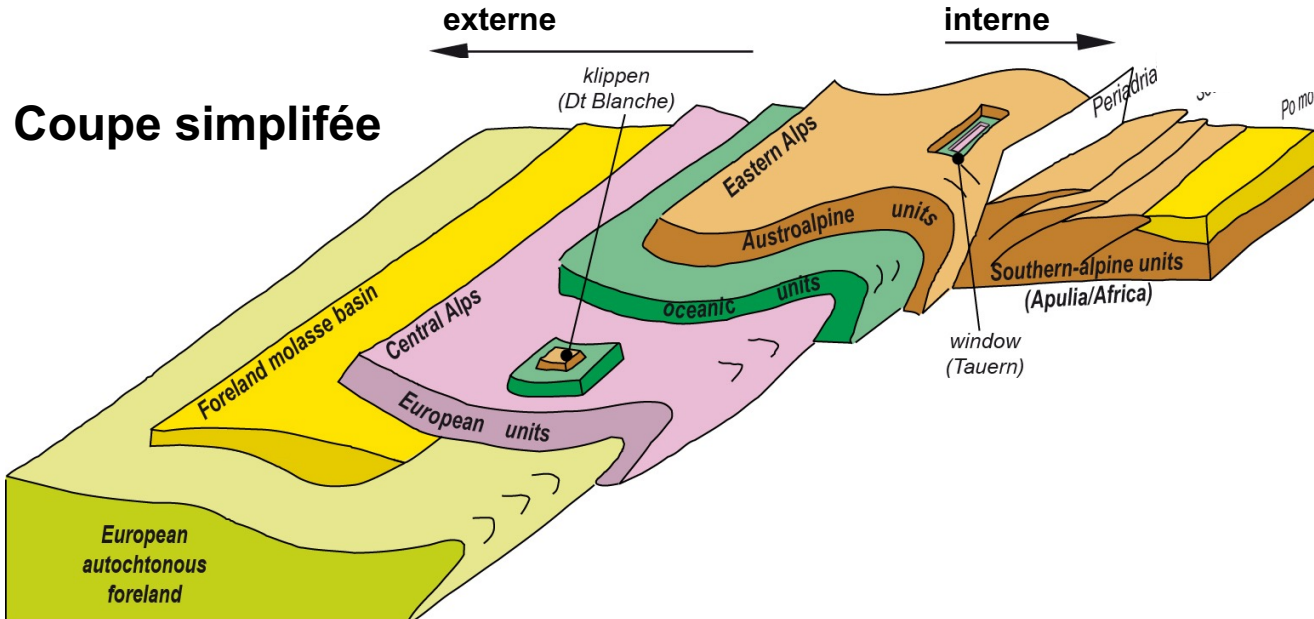
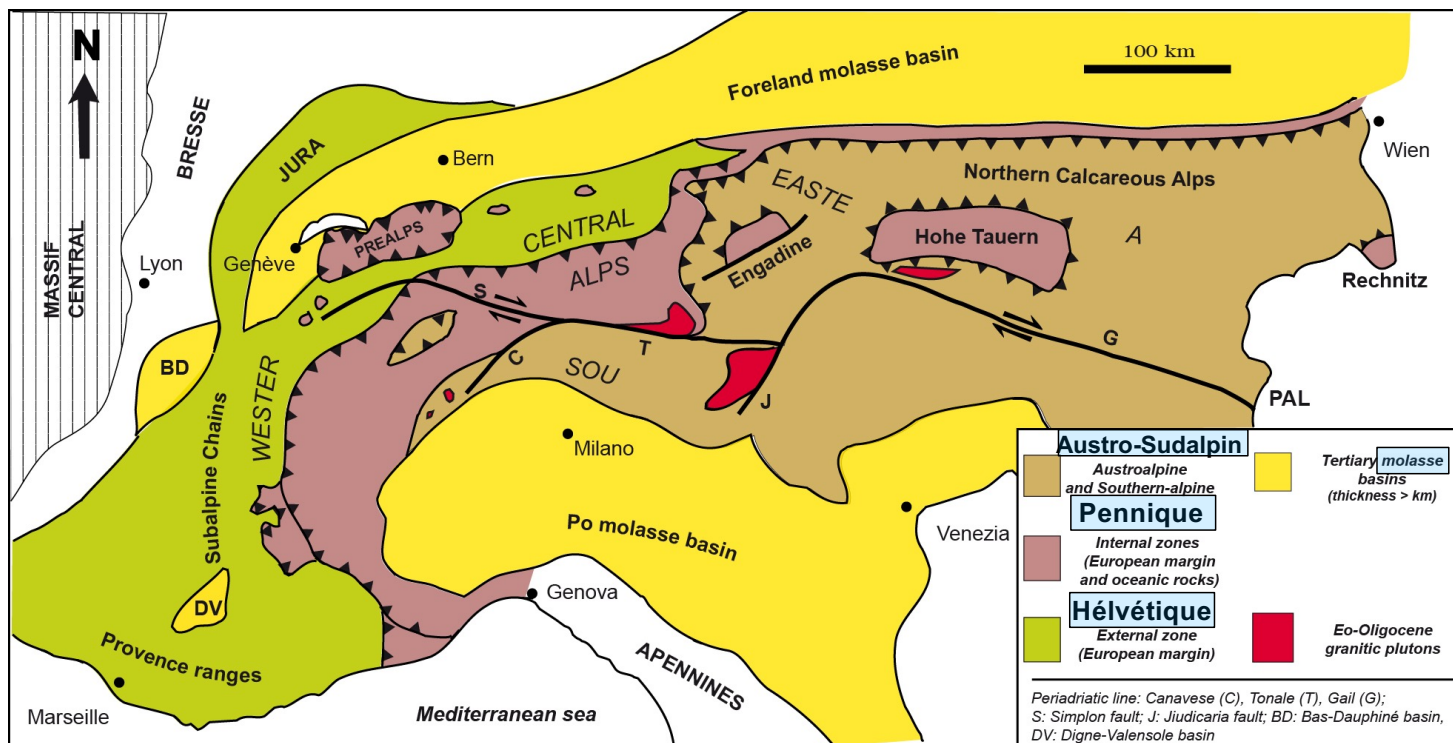






Vaughan Hammon et al., 2022.  
Gcubed 23 (8)



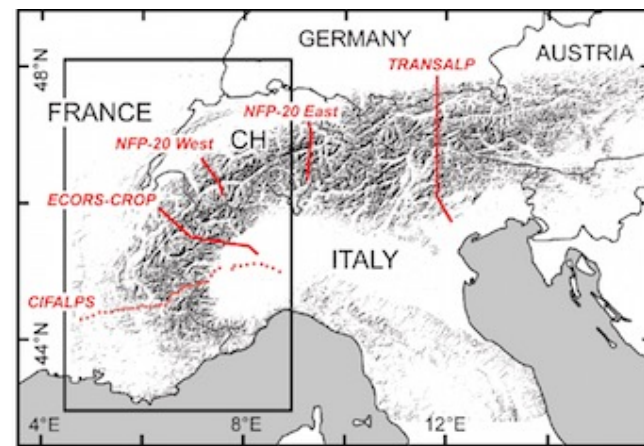


Apulia



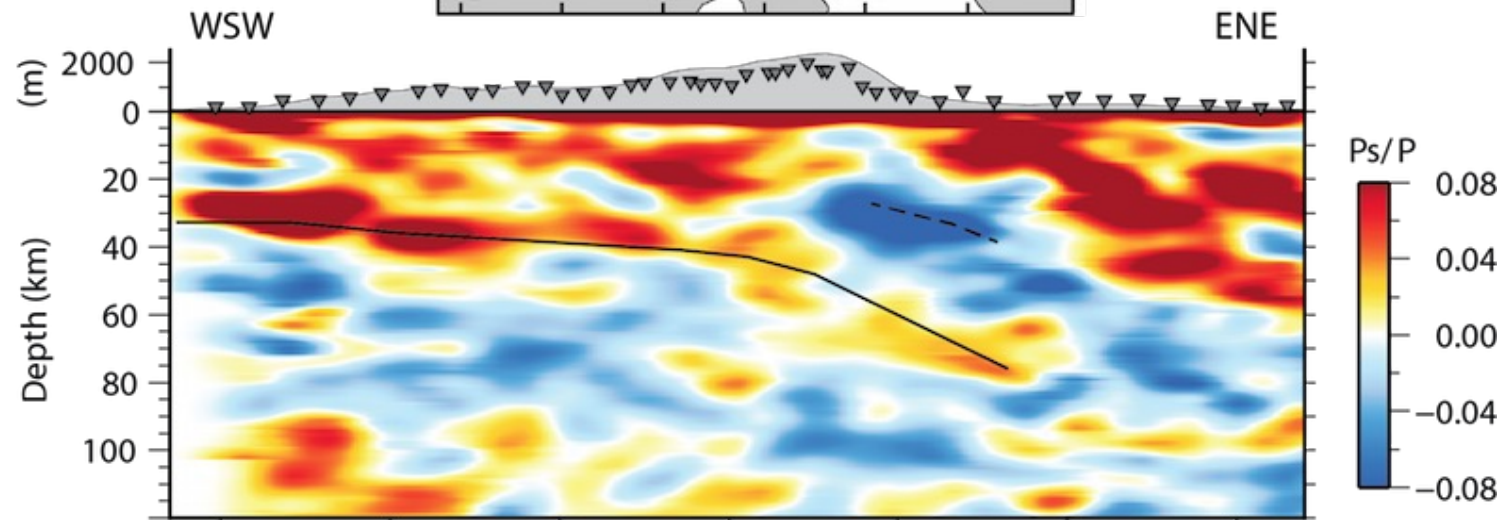
Europe

Tomographie sismique  
Permet d'interpréter la  
structure profonde des Alpes

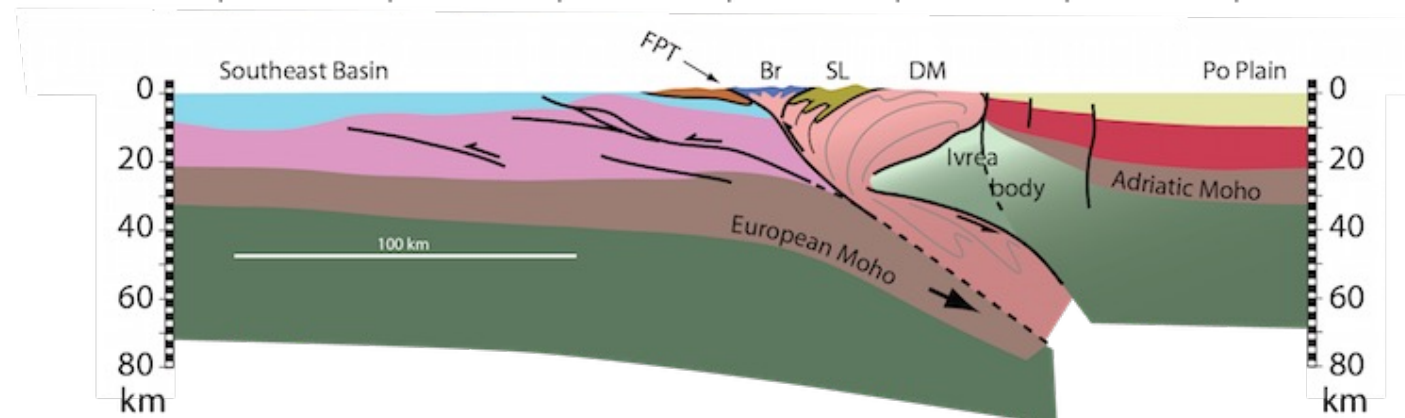


Carte des Alpes

Tomographie  
sismique

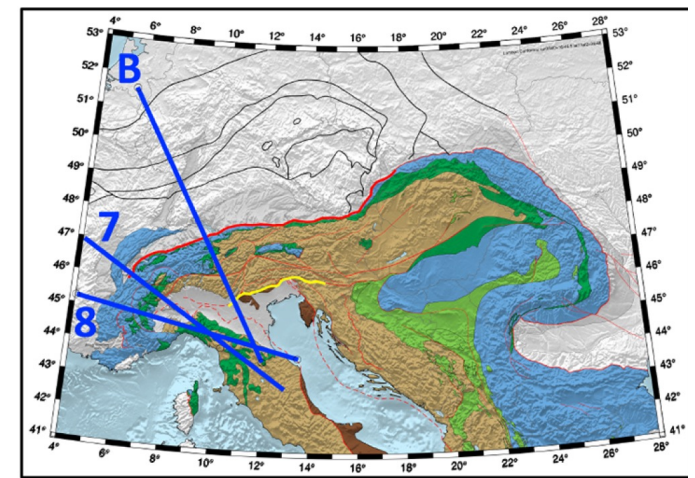
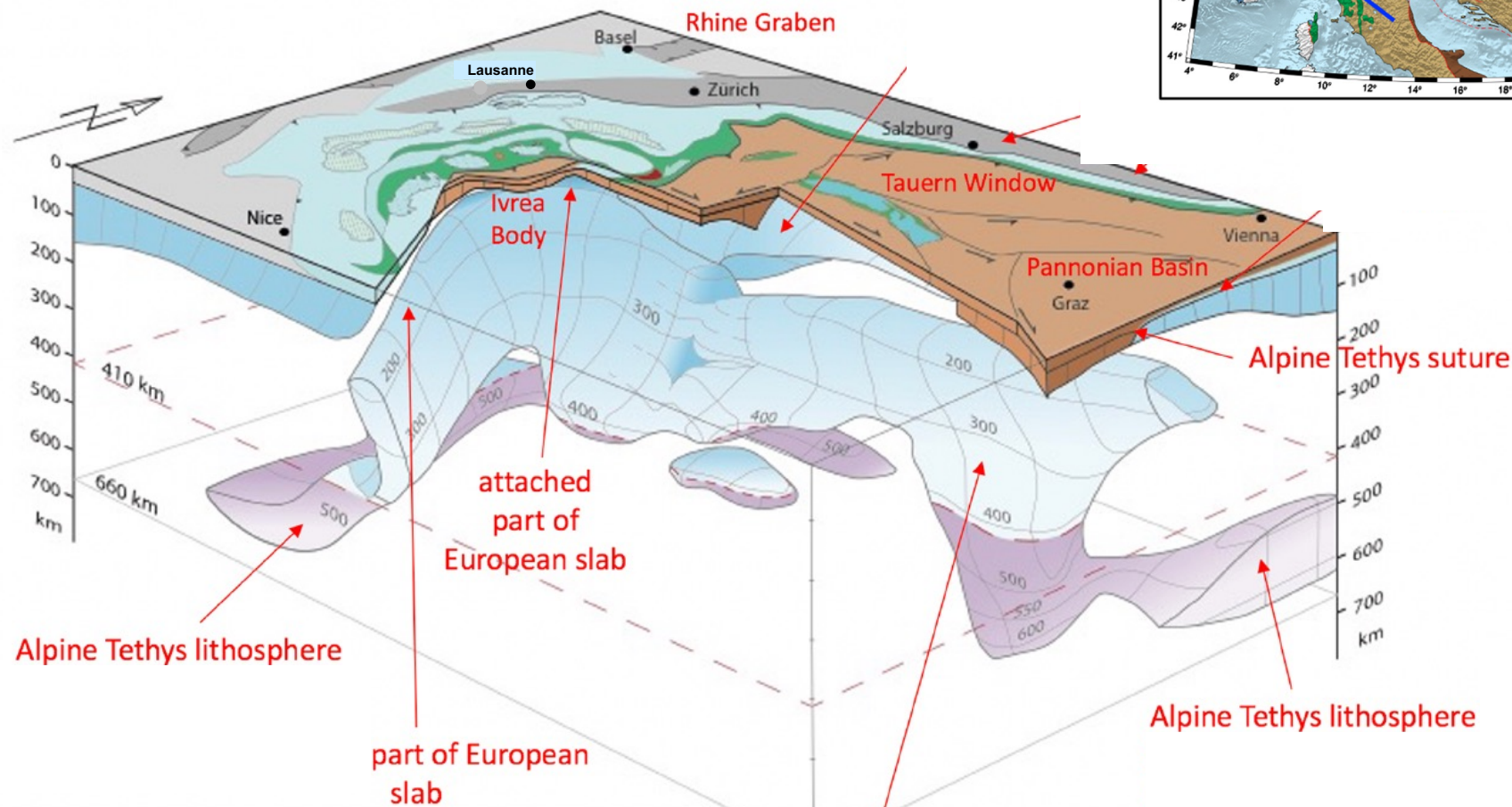


Interprétation  
géologique





# Une vue vers les racines des Alpes (avec la tomographie sismique)



Interprétation géologique: Croute  
continentale et océanique subductée et  
recyclée en profondeur

*Handy et al. 2021 Solid Earth*

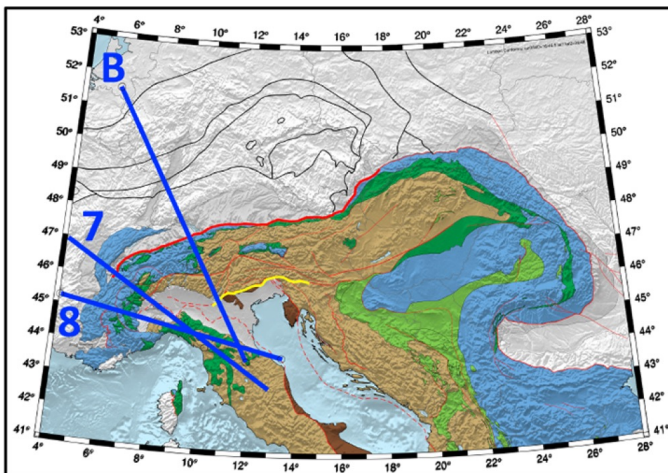
## Tomographie sismique:

Données de temps de trajet sismique (p.e.  $v_p$ ) sont comparées à un modèle terrestre initial.

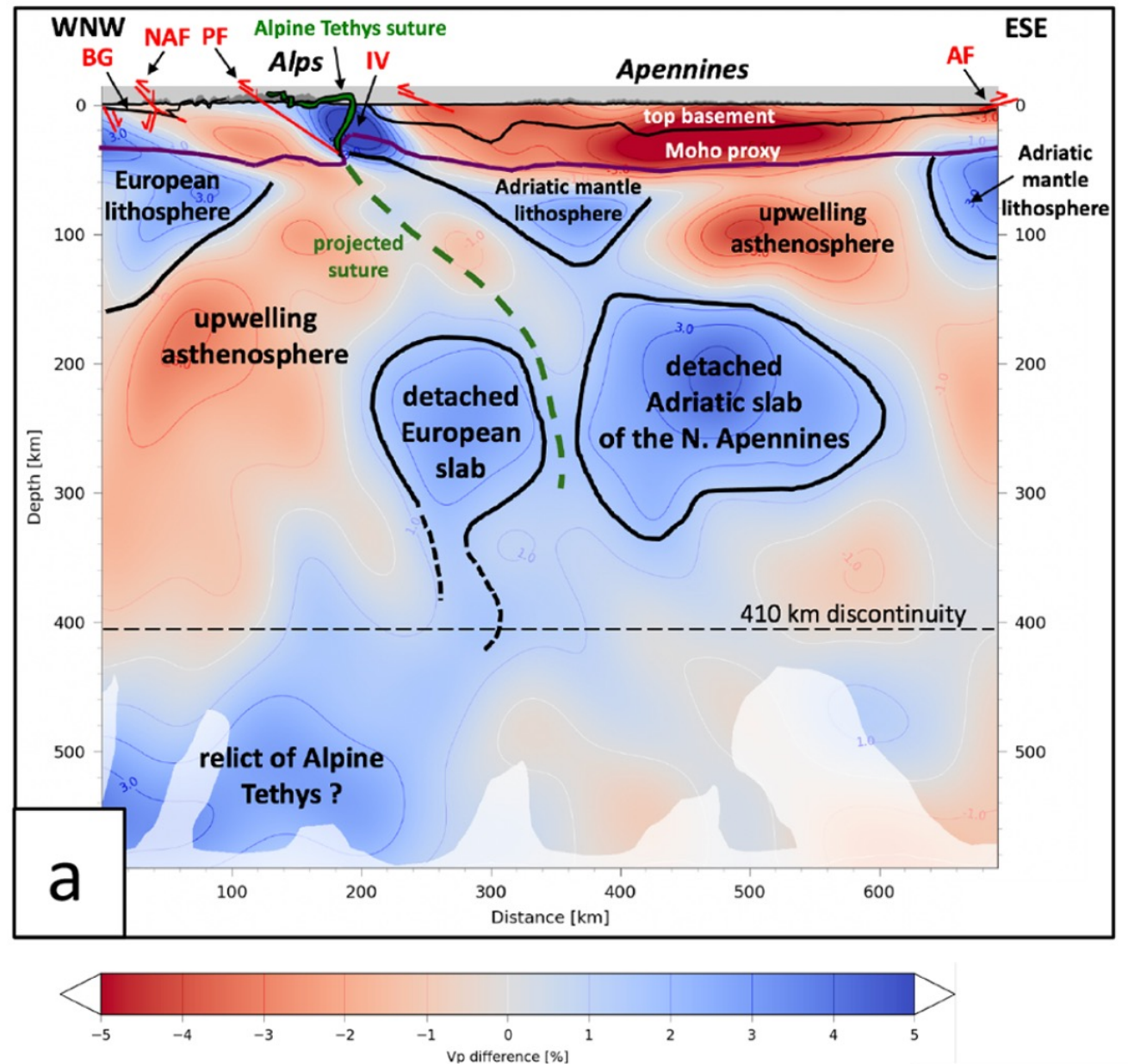
**Bleu:** vitesse plus rapide que le modèle de référence

**Rouge:** vitesse plus lente que le modèle de référence

Solutions non-unique:  
interprétées comme des variations structurales, thermiques ou de composition

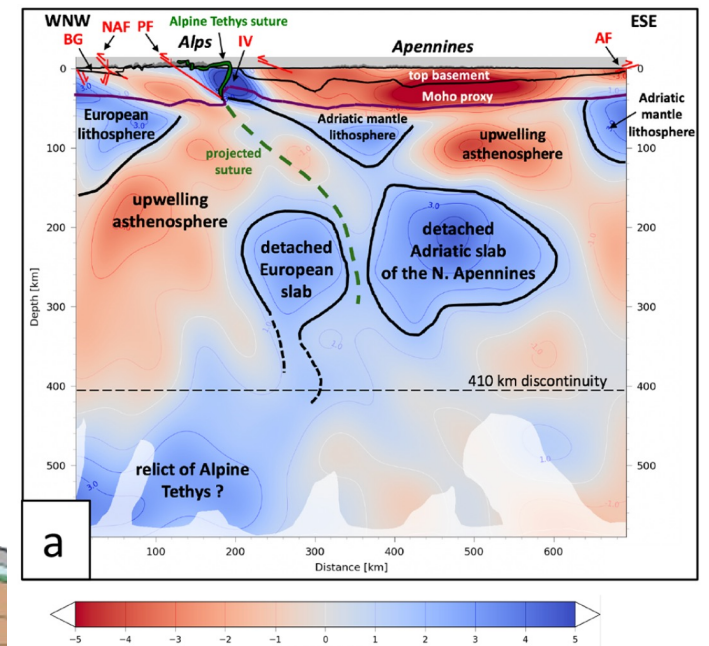
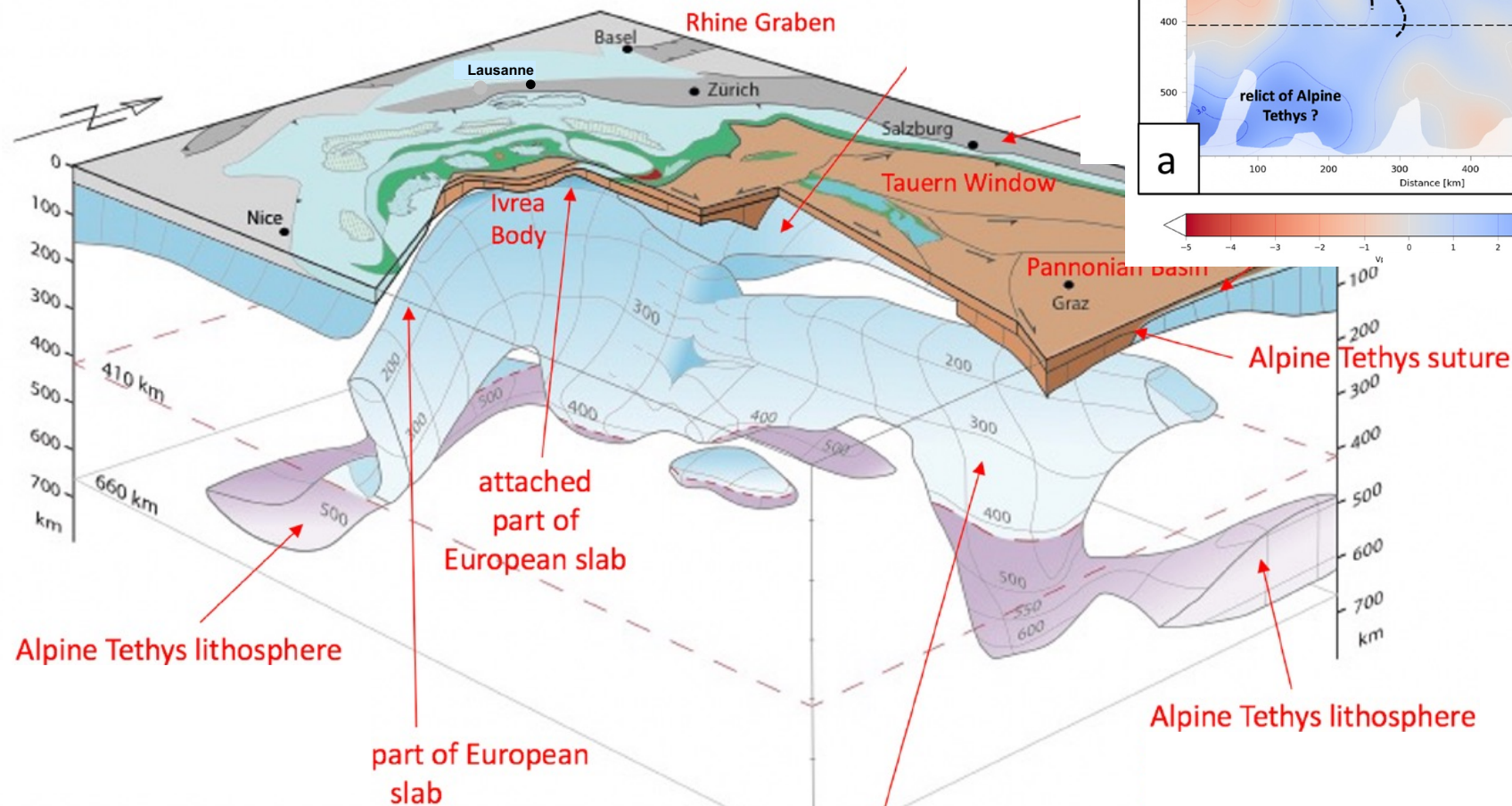


## Coupe - W. Alps - N. Apennines





# Une vue dans les racines des Alpes (avec la tomographie sismique)



Interprétation géologique: Croute  
continentale et océanique subductée et  
recyclée en profondeur

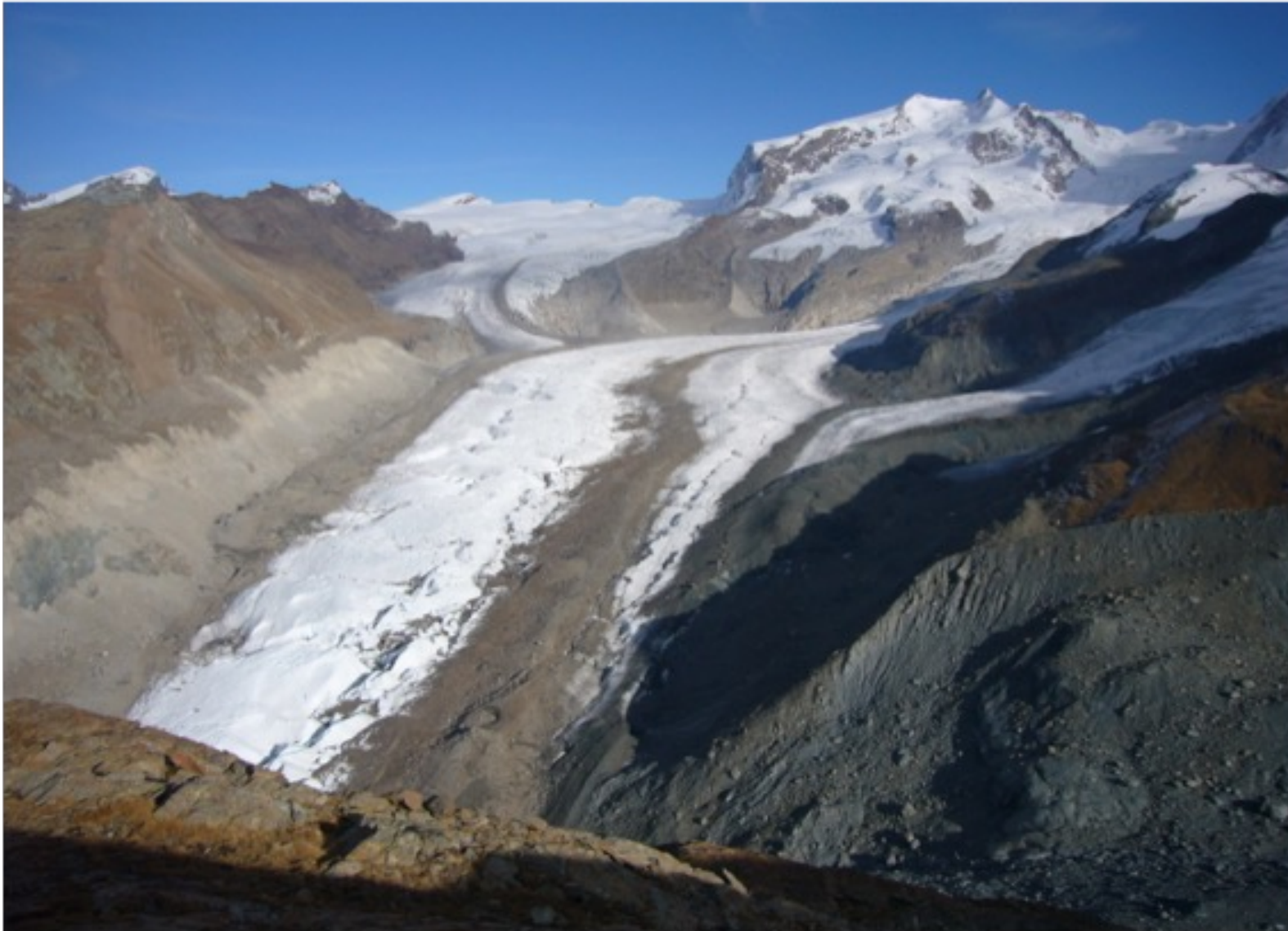
Handy et al. 2021 Solid Earth





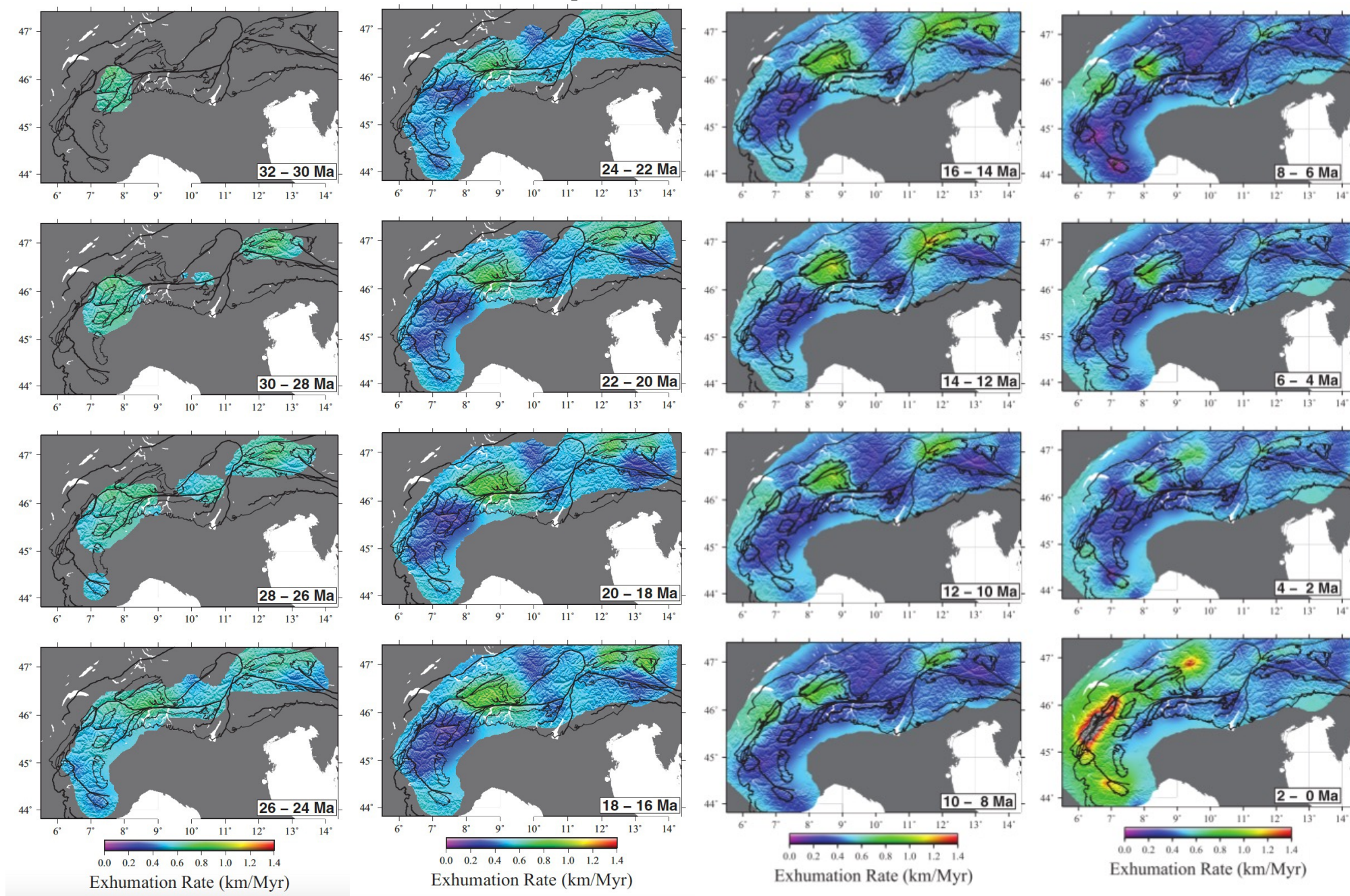
# Les Alpes: Géologie actif ?

Topographie =  $f$ (vitesse d'érosion, soulèvement, type de roche)



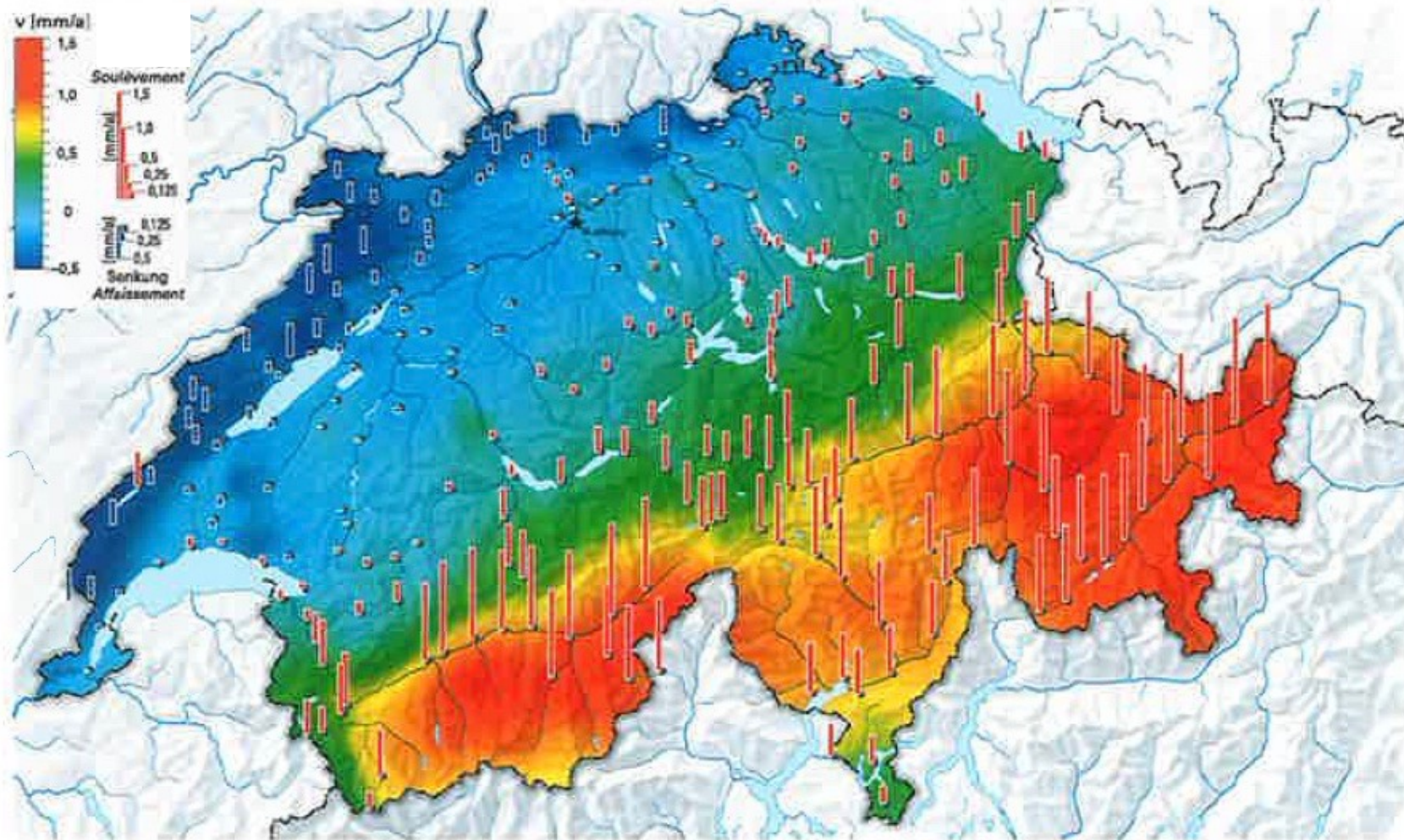


# Soulèvement dans les Alpes: dernier 30 millions d'années





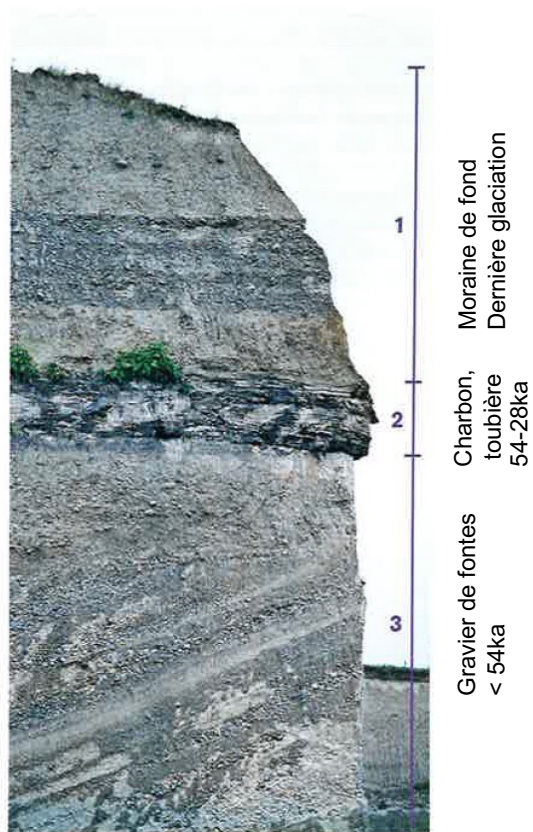
# Soulèvement (et affaissement) aujourd'hui .....





# Les glaciations: facteurs d'érosion

Coupe d'une gravière (Gossau)





# Et aujourd'hui?

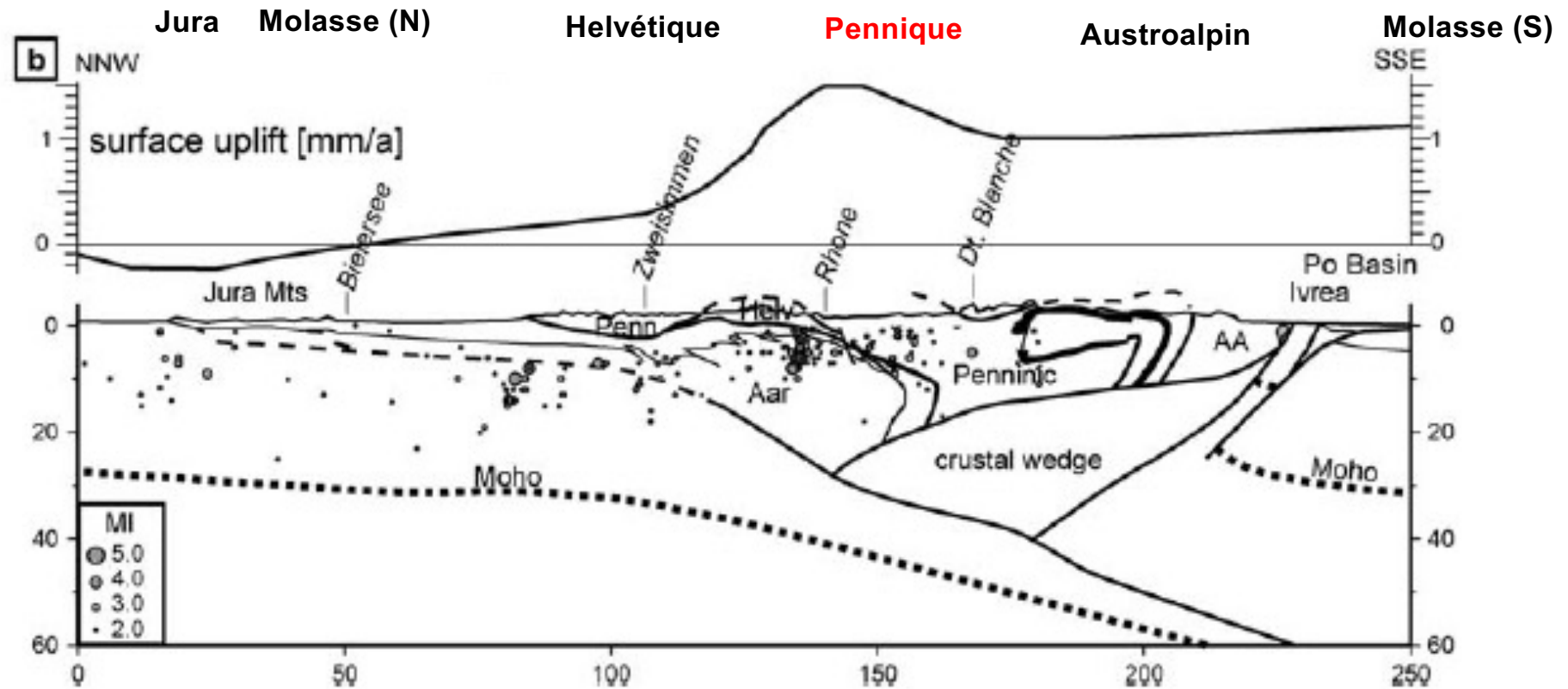
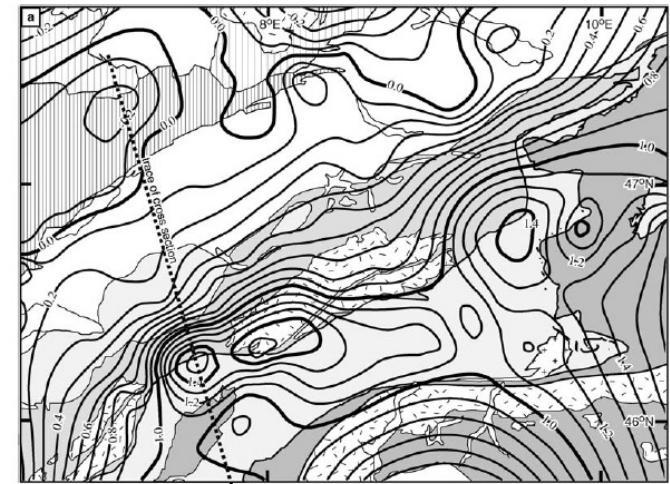
## Tremblements de terre en Suisse, sismicité, danger (aléat), risque



*Darstellung des Erdbebens 1356 in der Basler Chronik von Christian Wursteisen von 1580. Der Formschneider Georg Sickinger zeigt auf seinem Holzschnitt die unter Erdstößen schwankende Stadt und die auf die Felder flüchtende Bevölkerung.*

# Topographie et Tremblements de terre:

## Les Alpes 'grandissent' – region de Molasse subside



**Fig. 2.** (a) Surface uplift map of Switzerland. Surface uplift in mm/a, reference point is Aarburg (after Kahle *et al.* 1997). Schlatter *et al.* (2005) report slightly lower maxima. For legend, see Figure 1. (b) Comparison of surface uplift and seismicity along a cross-section. Earthquakes are plotted from a 40 km broad swath shown in Figure 1 onto the profile. (AA, Austro- and Southalpine units; Helv, Helvetic units; thick black lines, oceanic suture.)



# Magnitude des tremblements de terre

- 1979: definition of a standard magnitude scale: **moment magnitude,  $M_W$**
- **energy** = seismic moment  $M_0 = \mu \cdot A \cdot D$  [J, or N·m]  
A: rupture area [m<sup>2</sup>]; D: average slip [m];  $\mu$ : shear modulus [Pa], e.g. crust: 32 GPa
- $M_W = 2/3 (\log_{10} M_0 - 9.1)$  (−16.1 if  $M_0$  is in dyn·cm)
- This is a **logarithmic** scale with a multiplier, which means that  
+1 in M =  $10^{1.5}$  = \_\_\_\_\_ times more energy  
+2 in M =  $10^3$  = \_\_\_\_\_ times more energy

# Histoire récente des tremblements de terre en CH (11.11.2024)

## Earthquake Map Switzerland

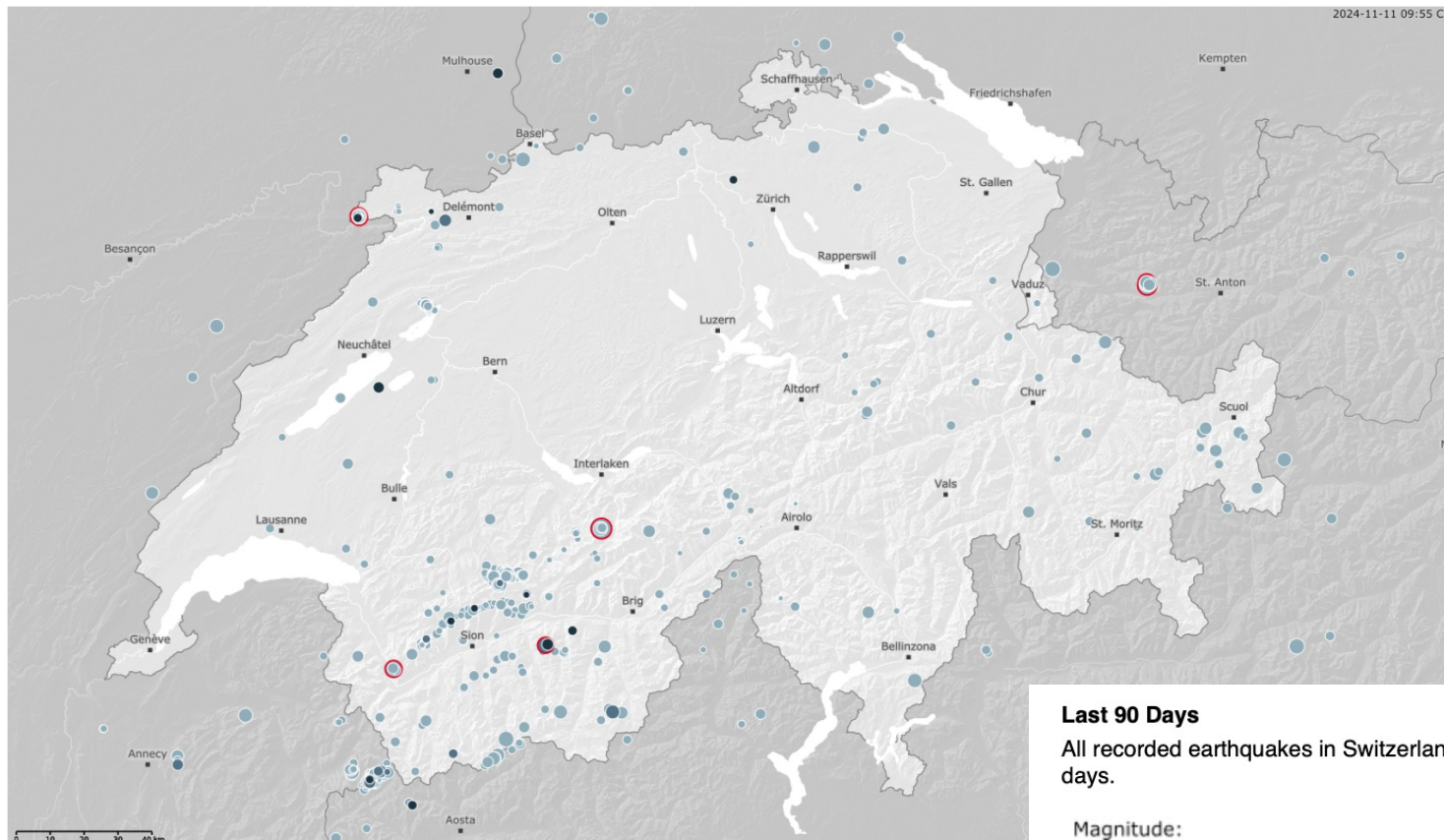


Schweizerischer Erdbebendienst  
Service Sismologique Suisse  
Servizio Sismico Svizzero  
Swiss Seismological Service

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

2024-11-11 09:55 CET



### Last 90 Days

All recorded earthquakes in Switzerland and its neighboring countries, of the last 90 days.

Magnitude:



1 2 3 4

● 24 Hours

● 3 Days

● 90 Days

○ Felt



# Histoire récente des tremblements de terre en Valais (11.11.2024)

Earthquake Map Switzerland

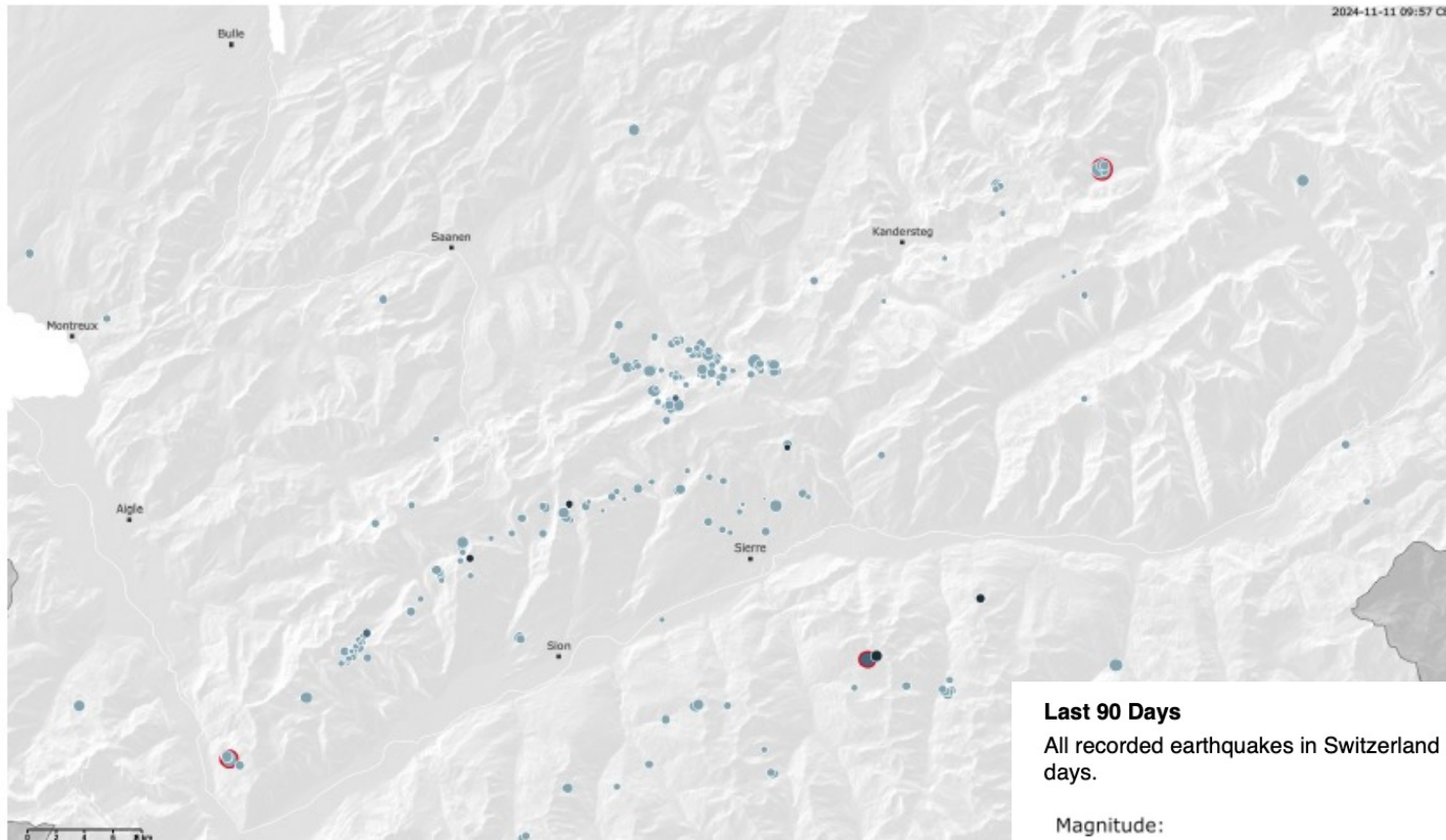


Schweizerischer Erdbebendienst  
Service Sismologique Suisse  
Servizio Sismico Svizzero  
Swiss Seismological Service

**ETH**

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

2024-11-11 09:57 CET



## Last 90 Days

All recorded earthquakes in Switzerland and its neighboring countries, of the last 90 days.

Magnitude:



1 2 3 4

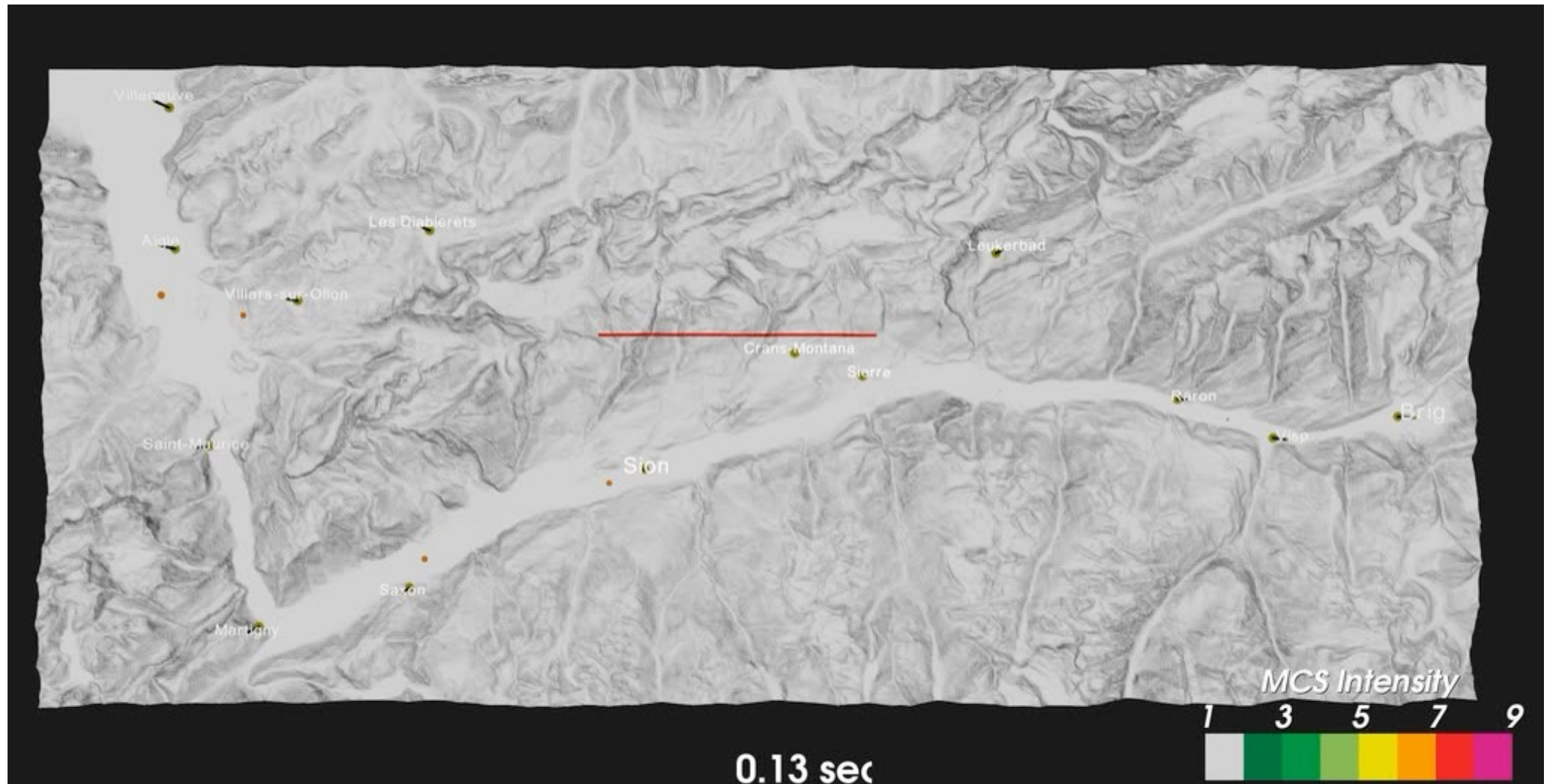
● 24 Hours

● 3 Days

● 90 Days

○ Felt

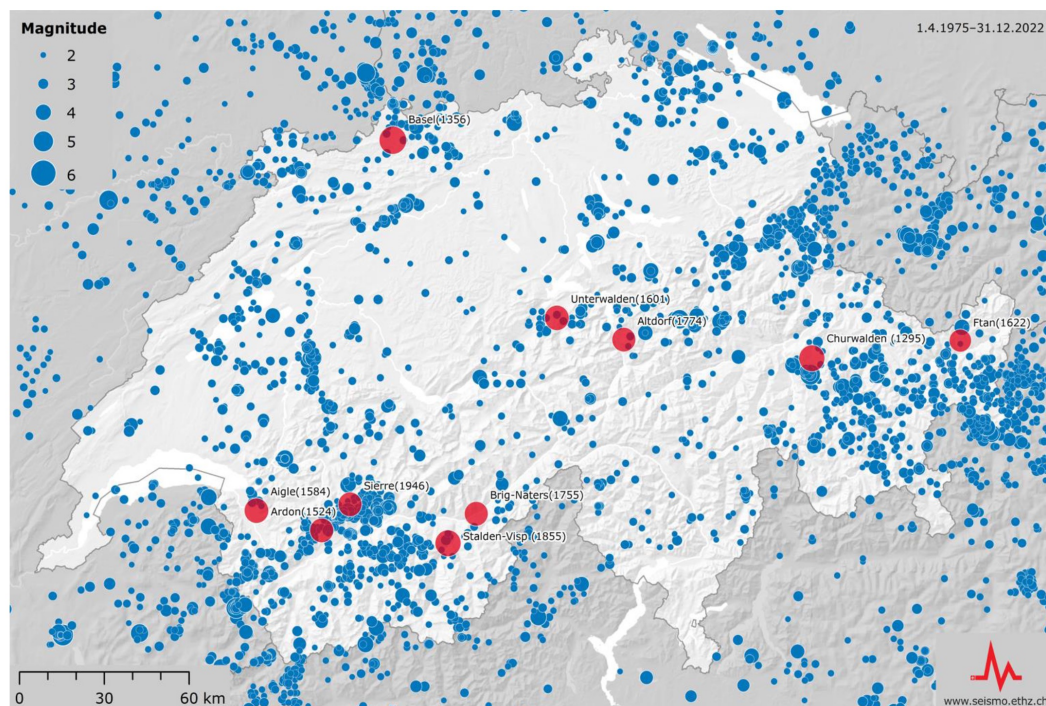
## Le tremblement de terre en Valais 1946: 5.8



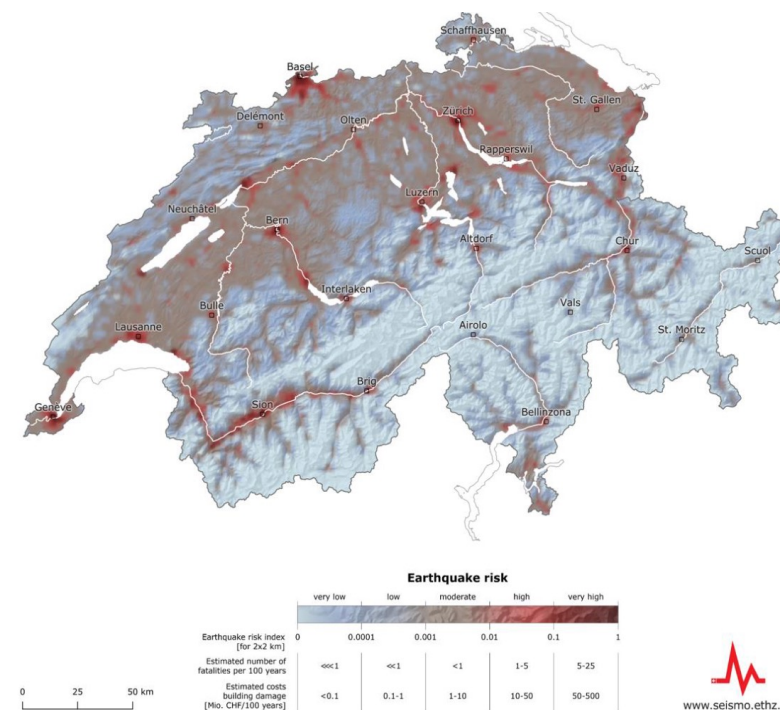
Remarques: amplitude et durée des ondes plus long au fonds de la vallée



# Distribution des tremblements de terre en Suisse



**Figure 1.1.** Map of the instrumentally recorded earthquakes between 1975 and 2022 (in blue), together with the location of the 10 strongest historical earthquakes (in red).

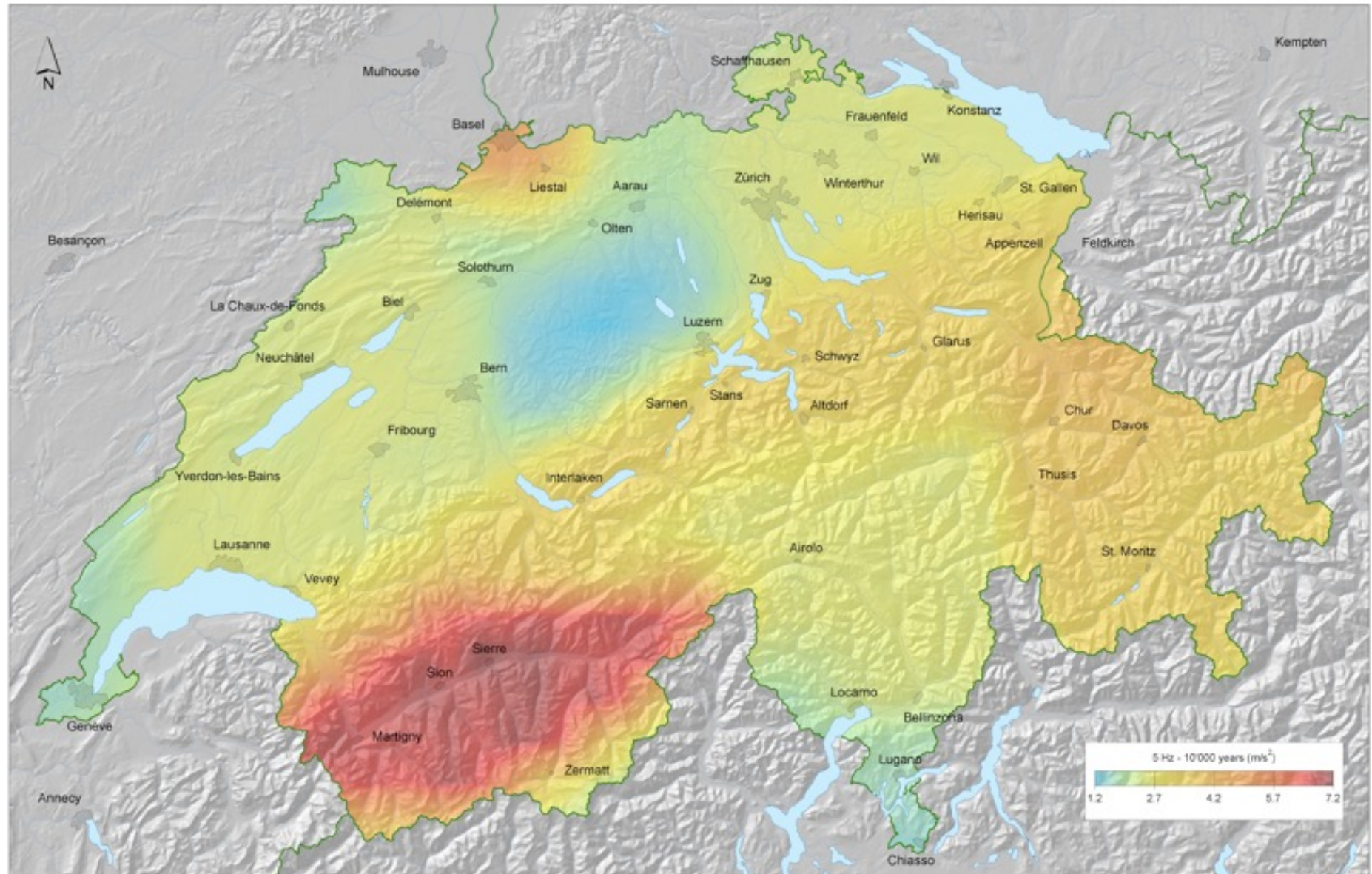


**Figure 11.5:** The earthquake risk map of Switzerland depicts an index that combines the number of fatalities and financial losses due to building damage expected in a 100-year period.

Tremblements de terre: entre 1975 et 2022 (bleu), et localisation des 10 tremblements de terre historiques les plus forts (rouge)

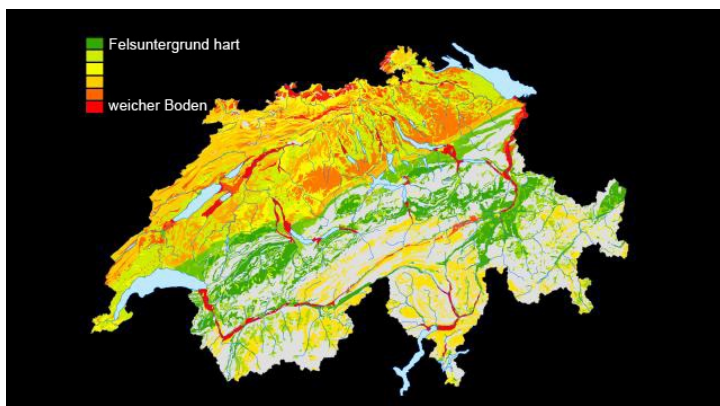
La carte des risques sismiques en Suisse  
Risque sismique: Comment construit ?

... per 10'000 years, force maximale d'un tremblement de terre

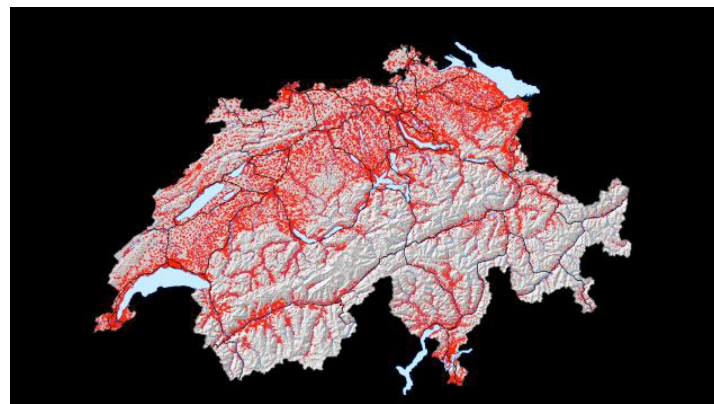




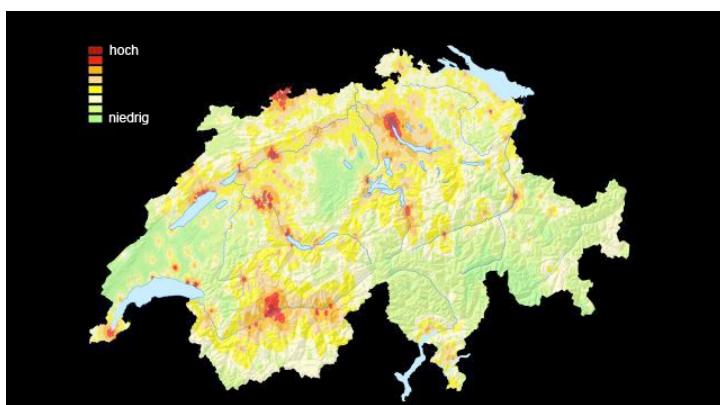
# C'est quoi le risque?



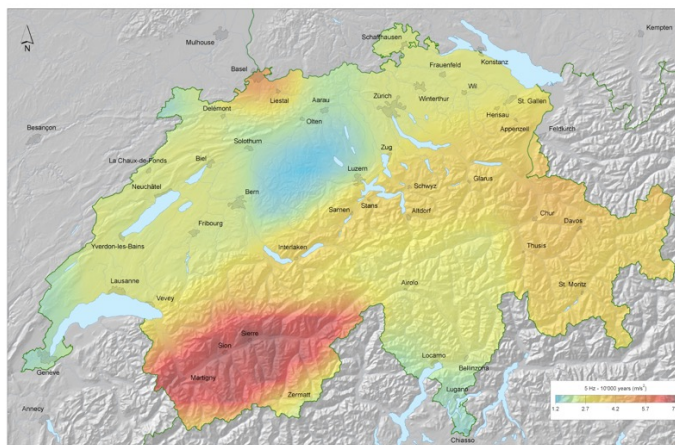
Carté géologique locale du souterrain:  
En rouge: zone particulièrement vulnérable



Répartition des implantations en Suisse



Répartition du risque de tremblement de terre financier  
(source: CatFocus PartnerRe)



Estimation d'un tremblement de terre d'une certaine  
magnitude en 10'000 ans

## Effets secondaire / risks:

Basel 1356  
MW 6.6



Déclenchement des  
glissements de terrain:

Sierre 1946 MW 5.8



Figure 8: The 1946 earthquake of Sierre: Photographs of the collapsed ceiling in the church of Chippis and of the landslide off the Rawylhorn, triggered by an aftershock of the earthquake, as well as a map of the inferred macroseismic intensities.



## Glissement de terrain

- Flims ( $\geq 9 \text{ km}^3$ ),
- Sion ( $2 \text{ km}^3$ ),
- Engelberg ( $2 \text{ km}^3$ ),
- Tamins ( $1,6 \text{ km}^3$ ),
- Kandersteg ( $0,9 \text{ km}^3$ ).

Flims (ca. 9500 a)



*Gnägi and Labhart, 2015*

Brienz (June 2023)





# Glissement des sédiments sous-marin

## Turbidite: un dépôt déclenché par ....

<https://www.youtube.com/watch?v=CE4vdar8-NA>





# Un dépôt déclenché par .... un tremblement de terre

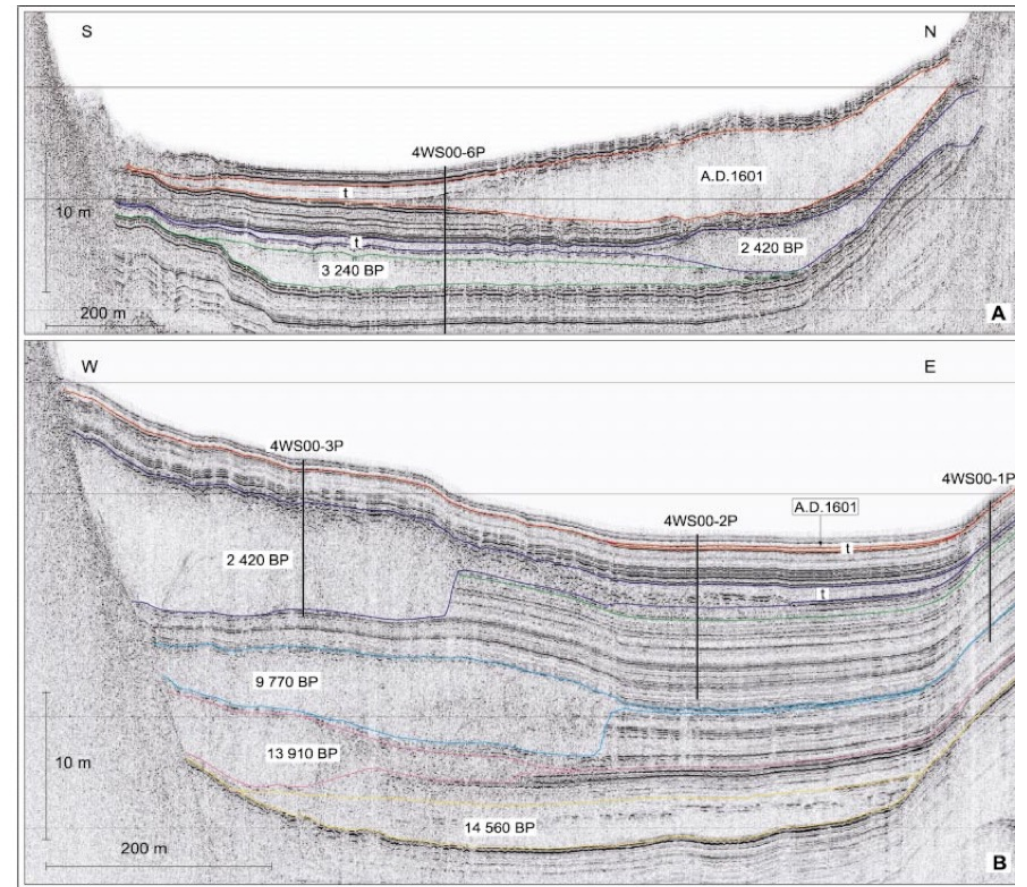
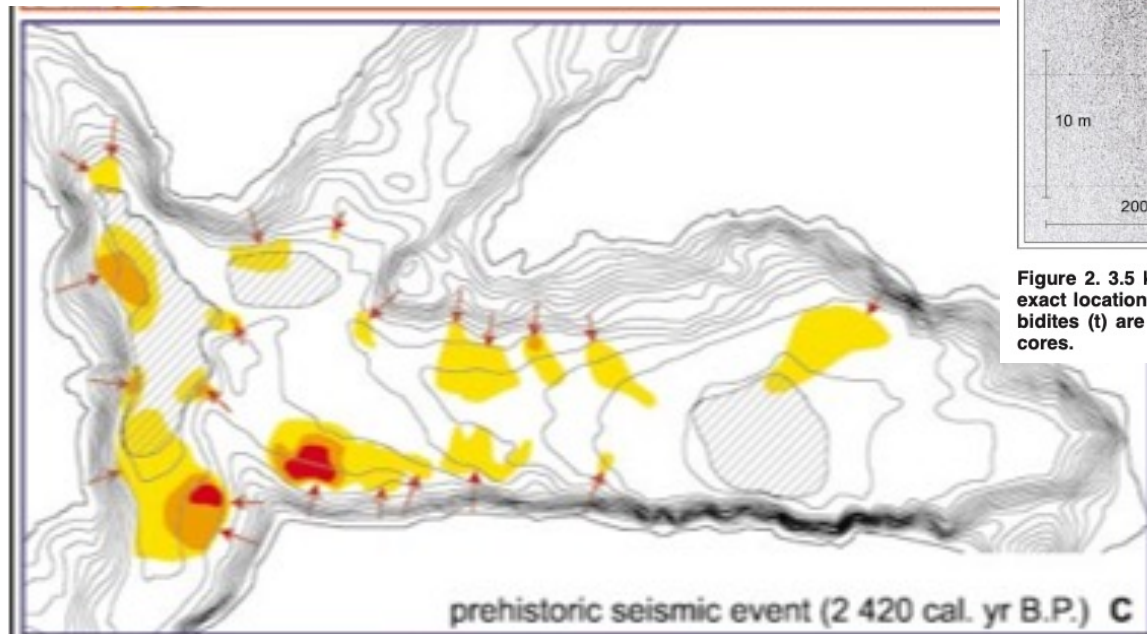
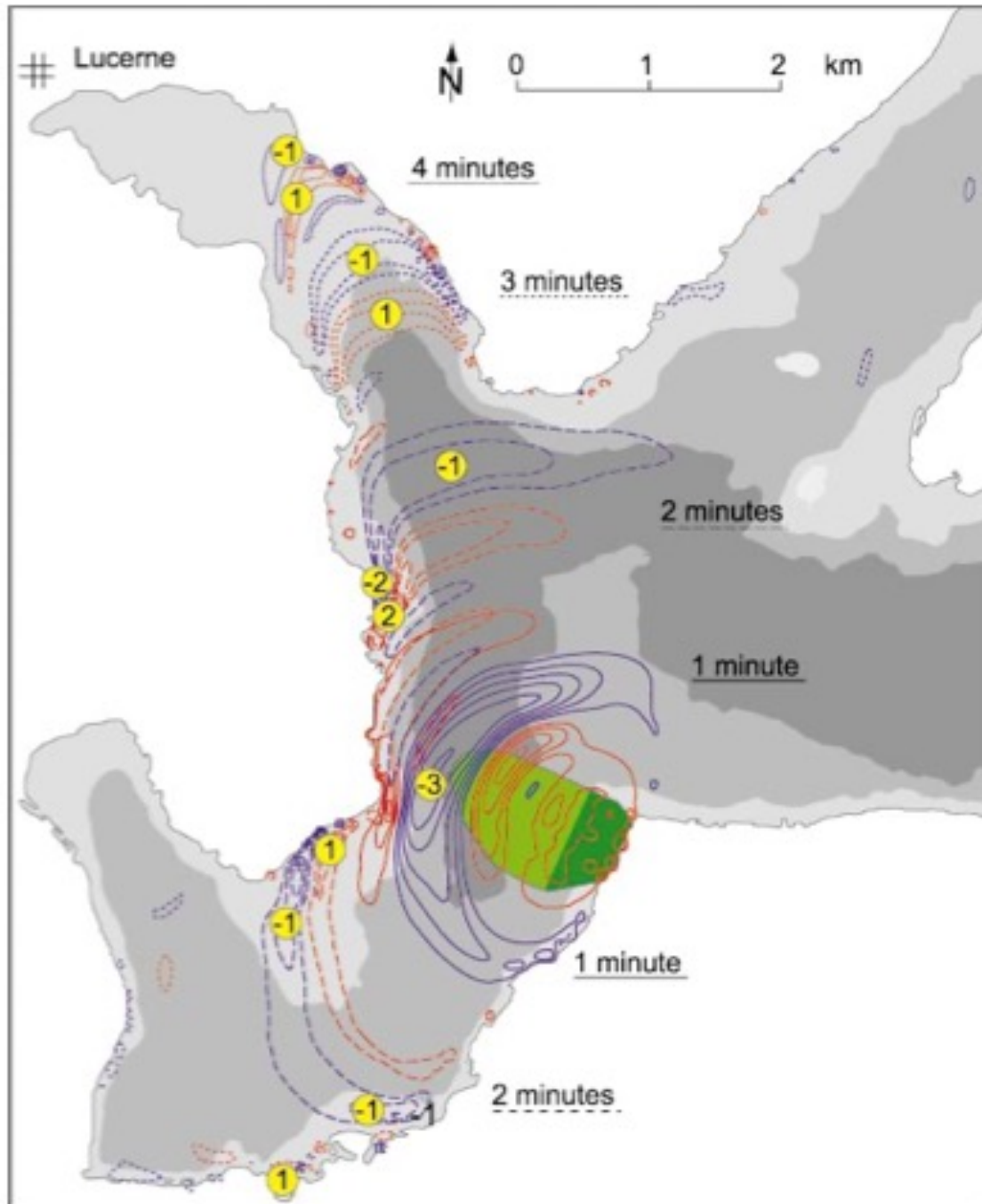


Figure 2. 3.5 kHz seismic profiles across (A) Vitznau and (B) Chrütztrichter subbasins of Lake Lucerne. For exact location of profiles, see Figure 3A. Discussed event horizons with related slump deposits and megaturbidites (t) are outlined in color. Ages: BP is calendar yr B.P. Vertical black lines indicate position of piston cores.





**Un dépôt  
déclenché par ....  
un tremblement de terre  
-> tsunamis**

Figure 4. Map of western section of Lake Lucerne with contours of tsunami wave heights generated from modeled 2420 calendar yr B.P. slump. Dark green color indicates area of excavation; light green color marks area of sediment deposition. Blue lines contour depressed areas (wave valleys); red colors contour elevated areas (wave crests). Contour interval is 0.5 m. Wave positions are shown at 1 min intervals after initiation of slump. Yellow dots and numbers sample wave height in meters.



# Le Tsunami de 1601 - Reuss sèche



Da das Erdbeben als Zeichen für Gottes Zorn galt, erliess der Rat u. a. ein Tanzverbot, das bis zur nächsten Fasnacht gelten sollte - vermutlich ist damit die Herbstfasnacht gemeint, die bis 11. November/Martini dauerte

Puisque le tremblement de terre a été considéré comme un signe de la colère de Dieu, le conseil a publié u. une. une interdiction de danser qui devrait s'appliquer jusqu'au prochain carnaval - probablement cela signifie le carnaval d'automne, qui a duré jusqu'au 11 novembre / Martini