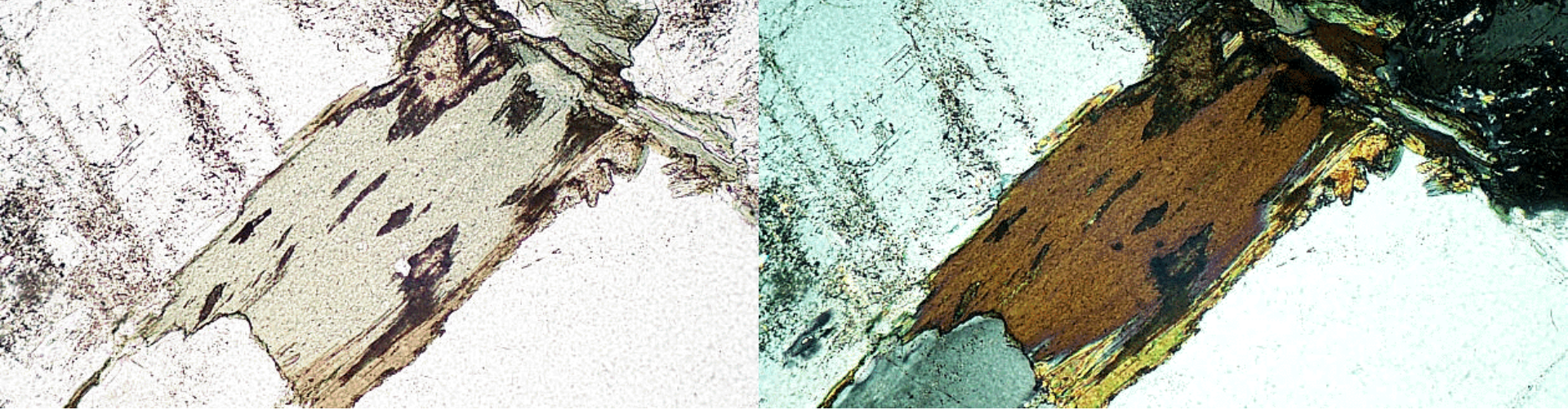


LCTE 2.11 Métamorphisme

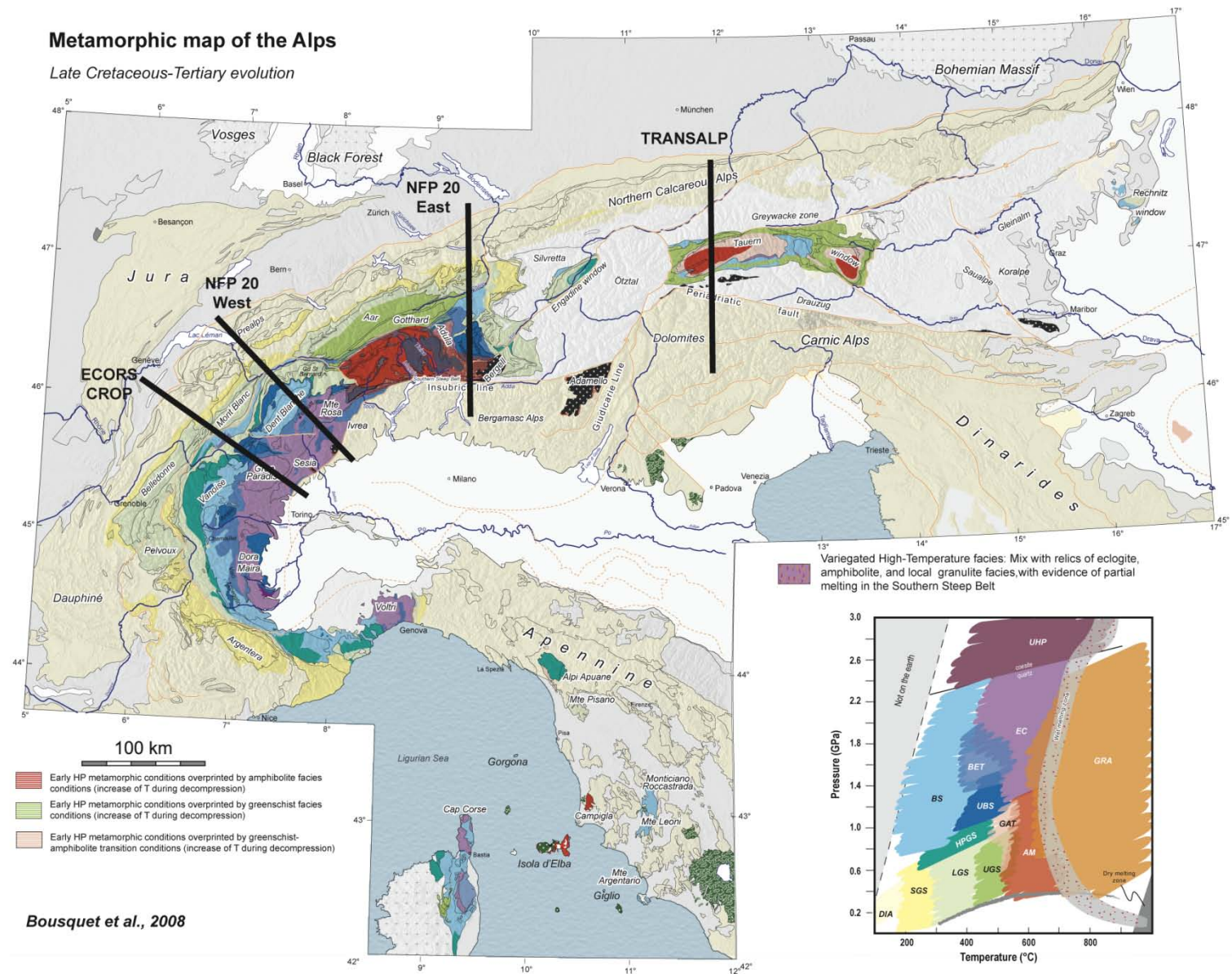


1. THERMODYNAMIQUE et ÉQUILIBRES MINÉRAUX

2. Expressions du métamorphisme dans l'orogène alpin

- ⇒ Orogenèse alpine
- ⇒ Métamorphisme HP-BT (Alpes Occidentales)
- ⇒ Métamorphisme MP-HT (Alpes Centrales)
- ⇒ Métamorphisme de faible degré
- ⇒ Métamorphisme de contact

INTRODUCTION: Carte du métamorphisme des Alpes



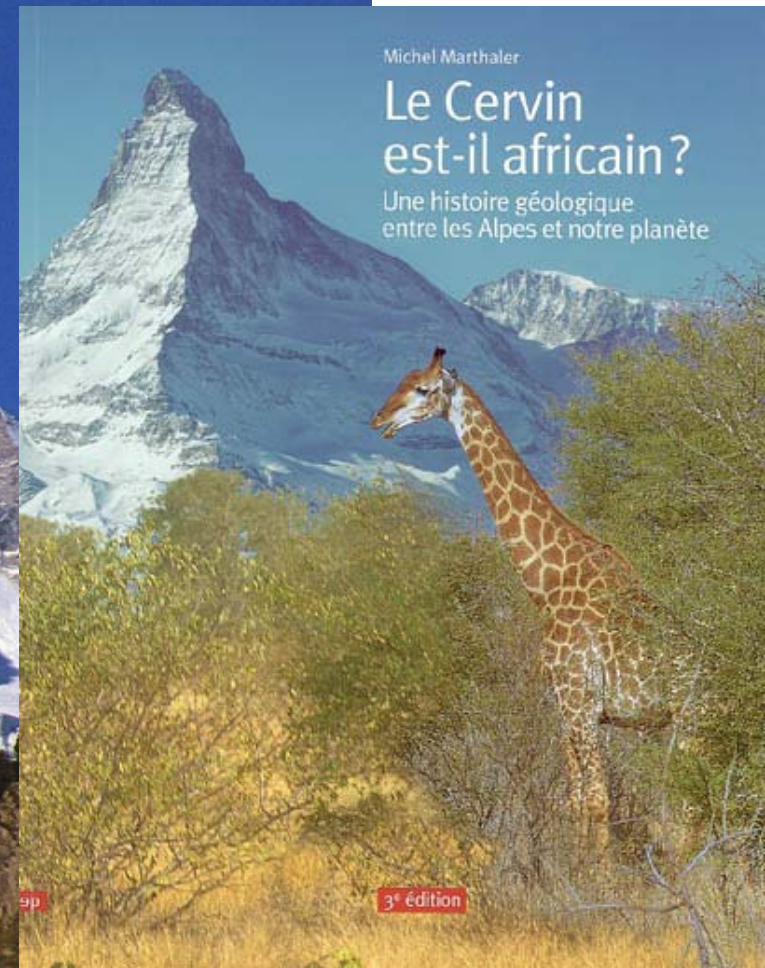
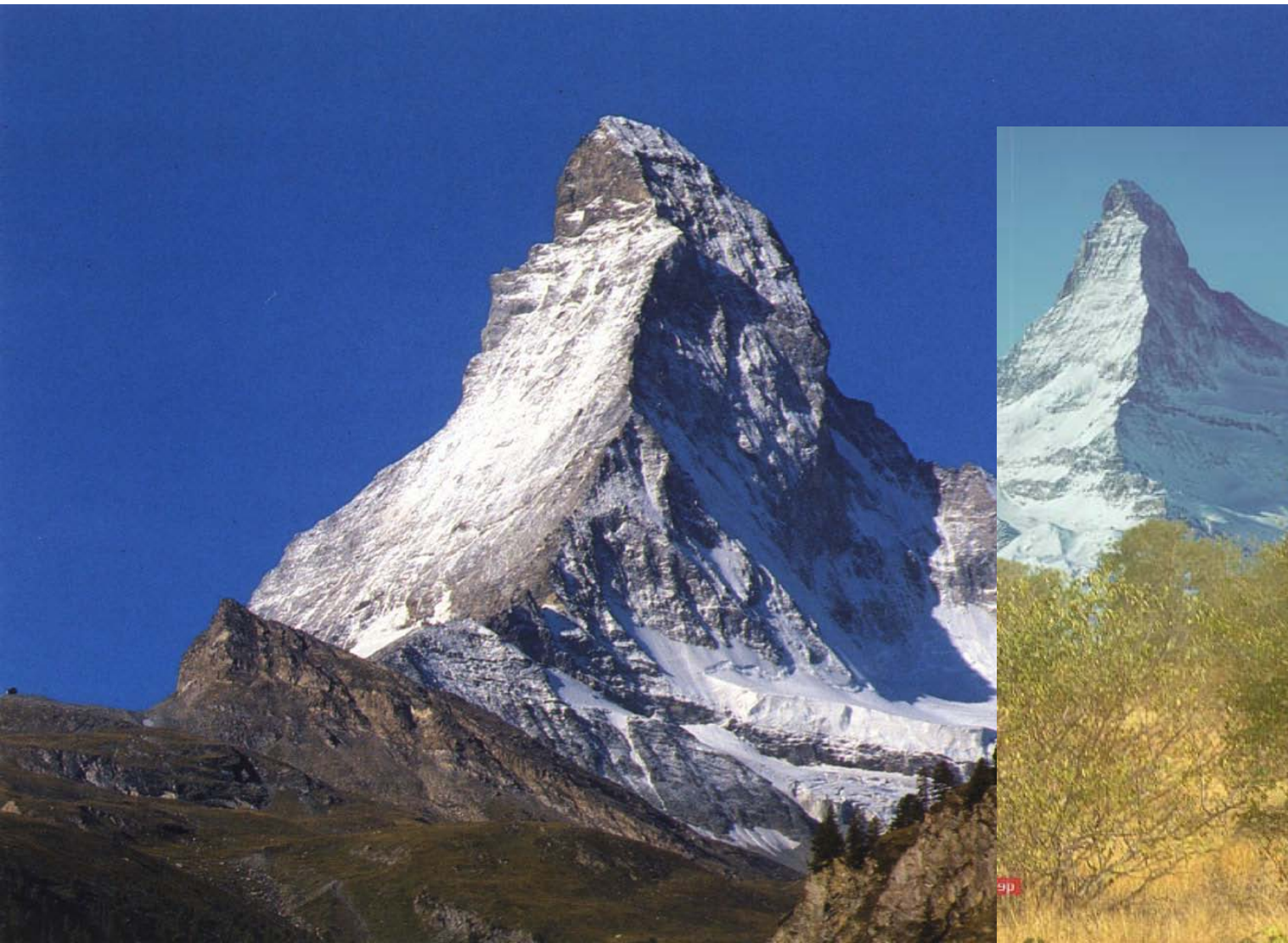
INTRODUCTION: Montagnes célèbres de Suisse

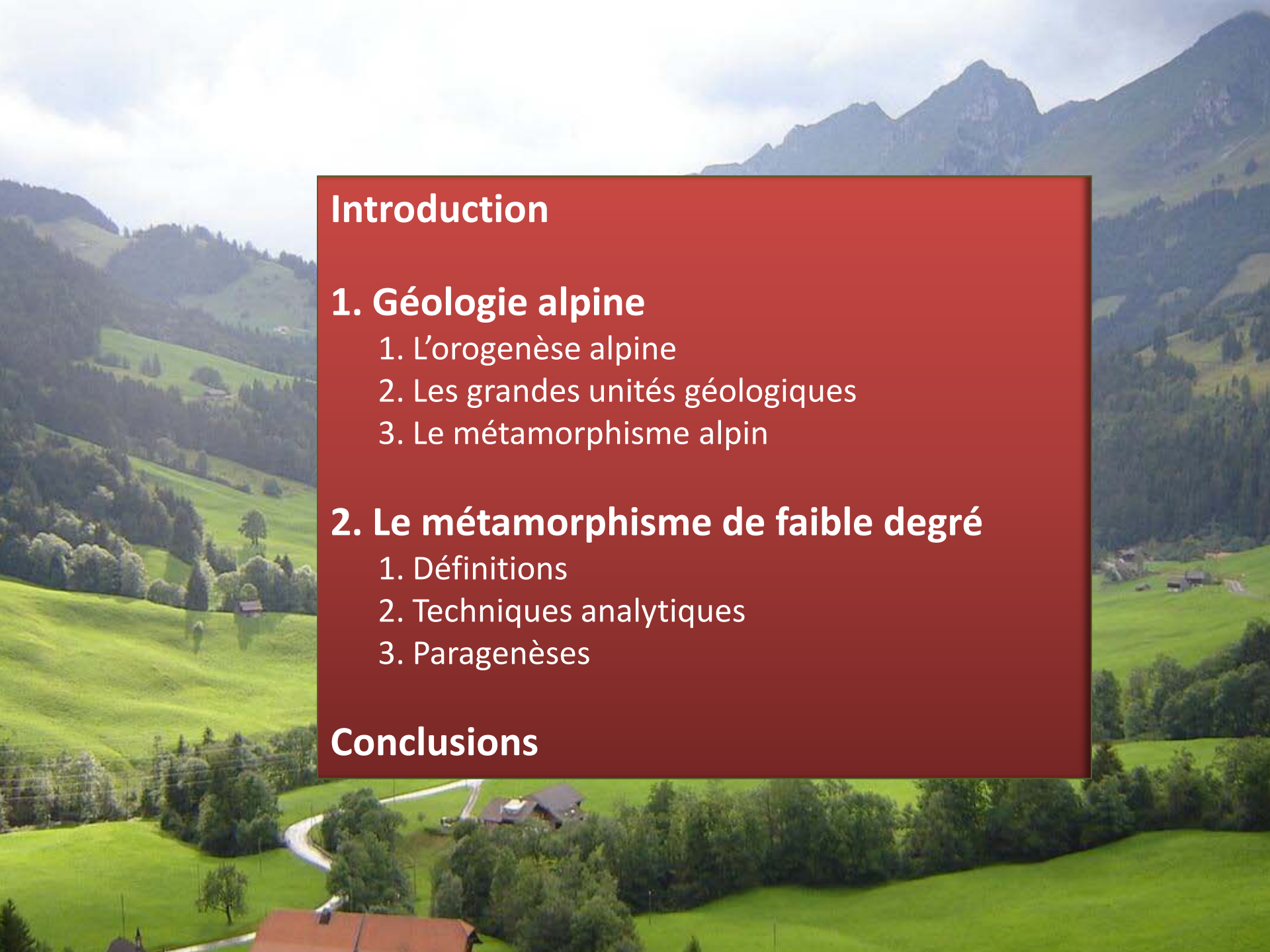
Eiger, Mönch, Jungfrau dans les **Alpes Bernoises** (que l'on peut voir depuis les Vosges).



INTRODUCTION: Montagnes célèbres de Suisse

Le Cervin ou Matterhorn vu depuis Zermatt (Valais)





Introduction

1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpine
2. Les grandes unités géologiques
3. Le métamorphisme alpin

2. Le métamorphisme de faible degré

1. Définitions
2. Techniques analytiques
3. Paragenèses

Conclusions

1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpine

1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Introduction**

L'orogénèse alpin peut se résumer à ceci:

⇒ Déchirure d'un continent

⇒ Ouverture d'un océan

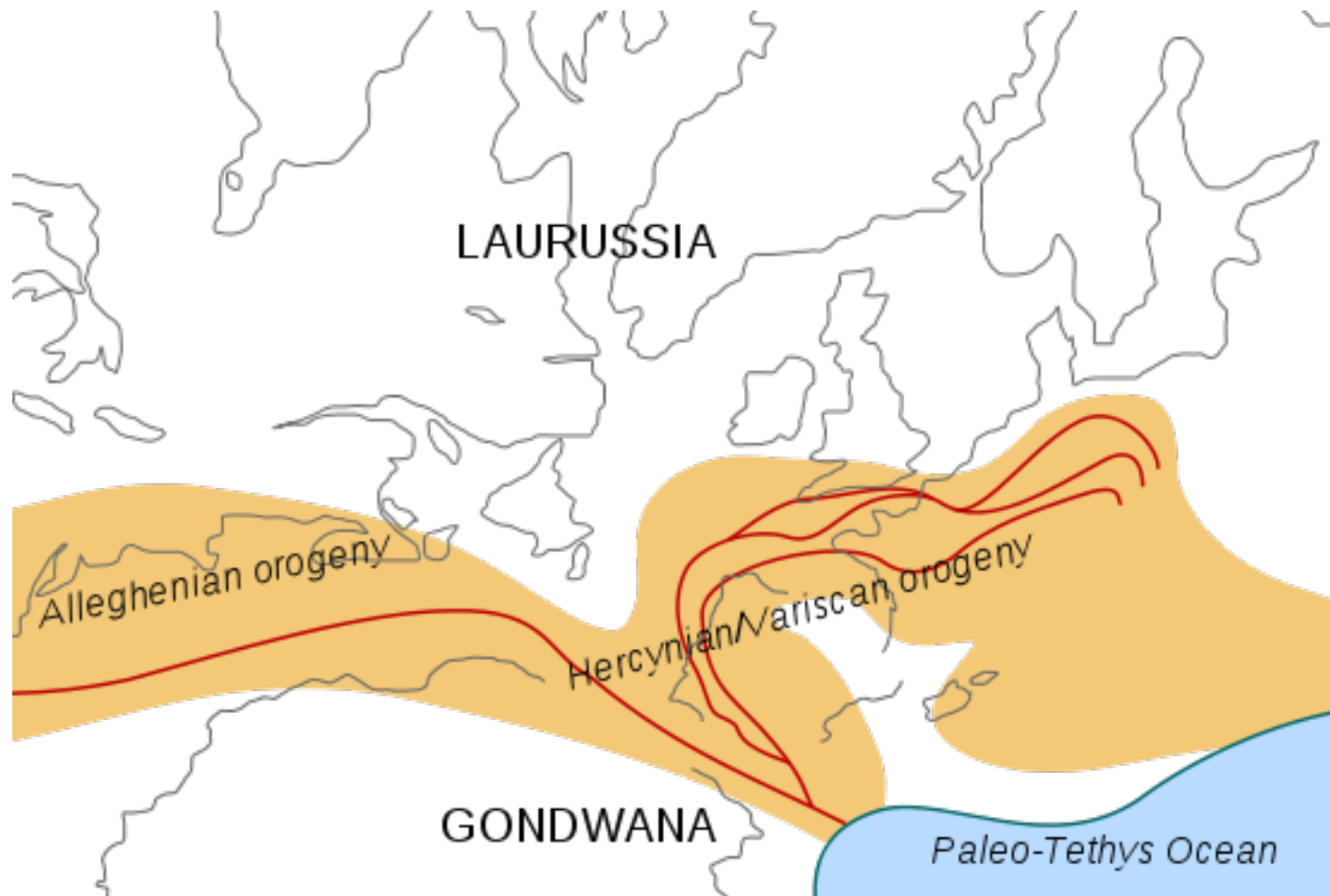
⇒ Fermeture de cet océan

⇒ Collision continentale

Quelles sont les **traces métamorphiques** laissées par cette **histoire** ?

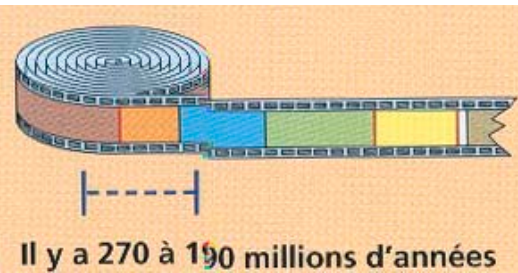
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: La chaîne Hercynienne



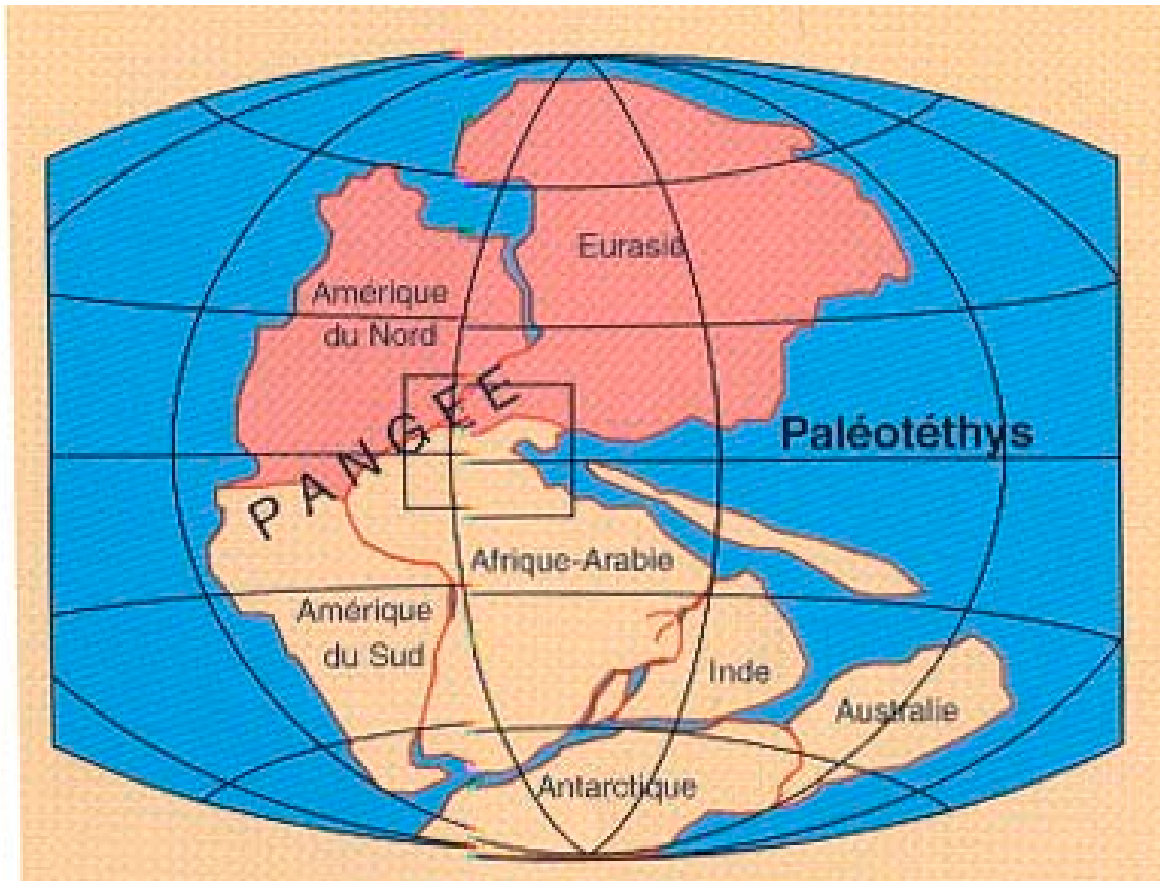
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: La déchirure de la Pangée



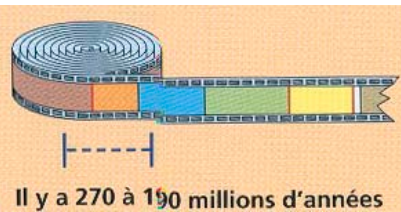
250 Ma $\Rightarrow$ Tous les continents rassemblés en un seul: la **Pangée**

Intense érosion de la **chaîne Hercynienne**



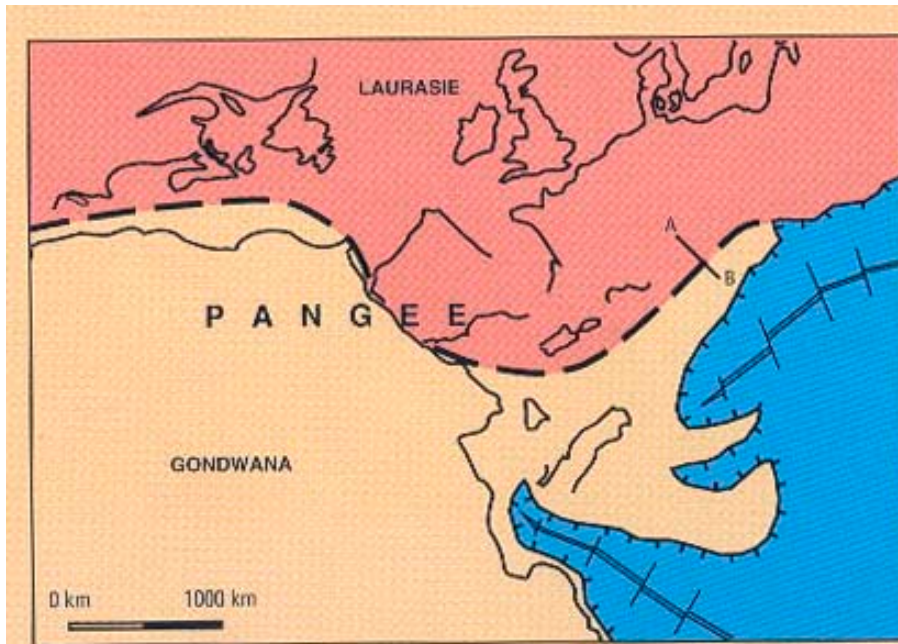
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: La déchirure de la Pangée



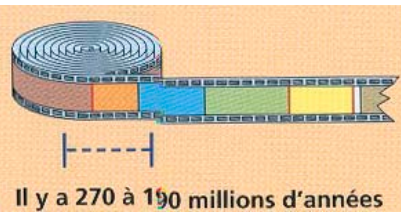
Naissance de la **Téthys**

La **Pangée** se brise et se sépare en **deux continents**



1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: La déchirure de la Pangée (200 Ma)

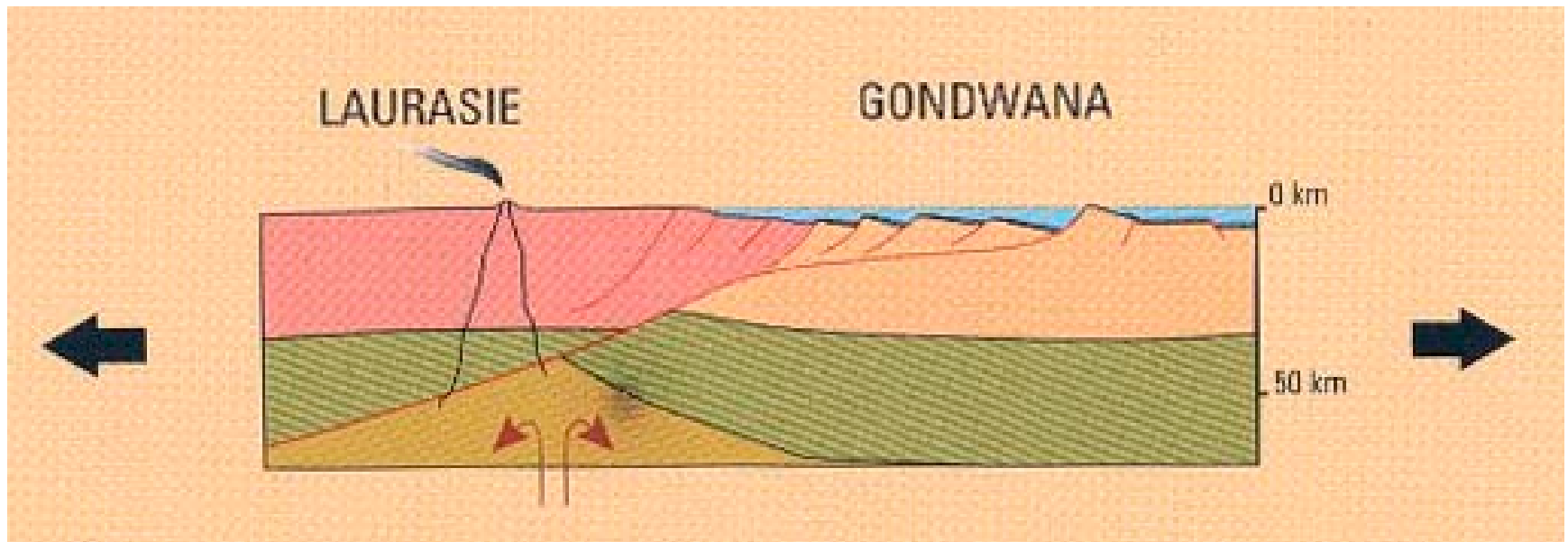


Rifting de la Pangée à la fin du Trias:

Grande faille oblique coupe toute la lithosphère ;

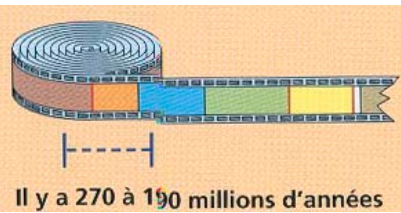
Effondrement et géométrie de **blocs basculés** entre les **épaulements du rift** qui s'élève ;

Volcanisme lié à la remontée asthénosphérique.



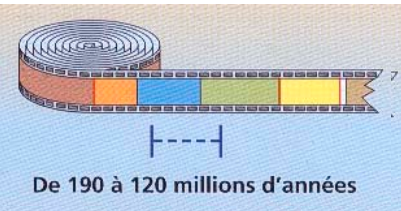
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Naissance de la Téthys** (Jurassique inf. 180 Ma)



1. Géologie alpine

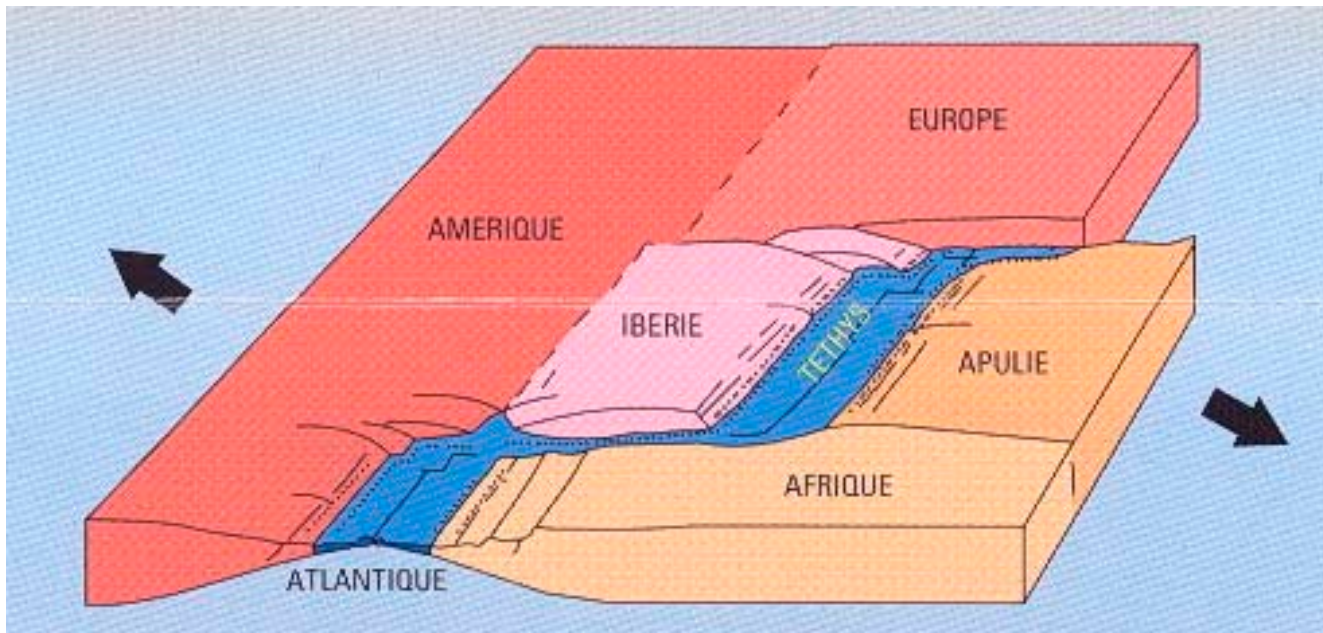
1. L'orogénèse alpin: Ouverture de la Téthys (Jurassique inf. 180 Ma)



L'ouverture de la Téthys est **contemporaine** de l'ouverture de l'Atlantique central pendant le Lias ;

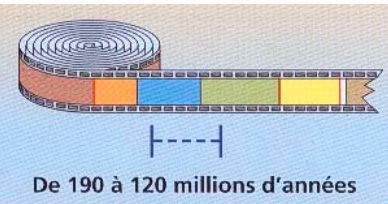
Atlantique et **Téthys** sont intimement liés et sont engendrés par l'**écartement** du double couple continental **Amérique-Europe** et **Afrique-Apulie(Adriatique)**.

Ici on ne représente pas la mer mais uniquement les masses continentales et océaniques.



1. Géologie alpine

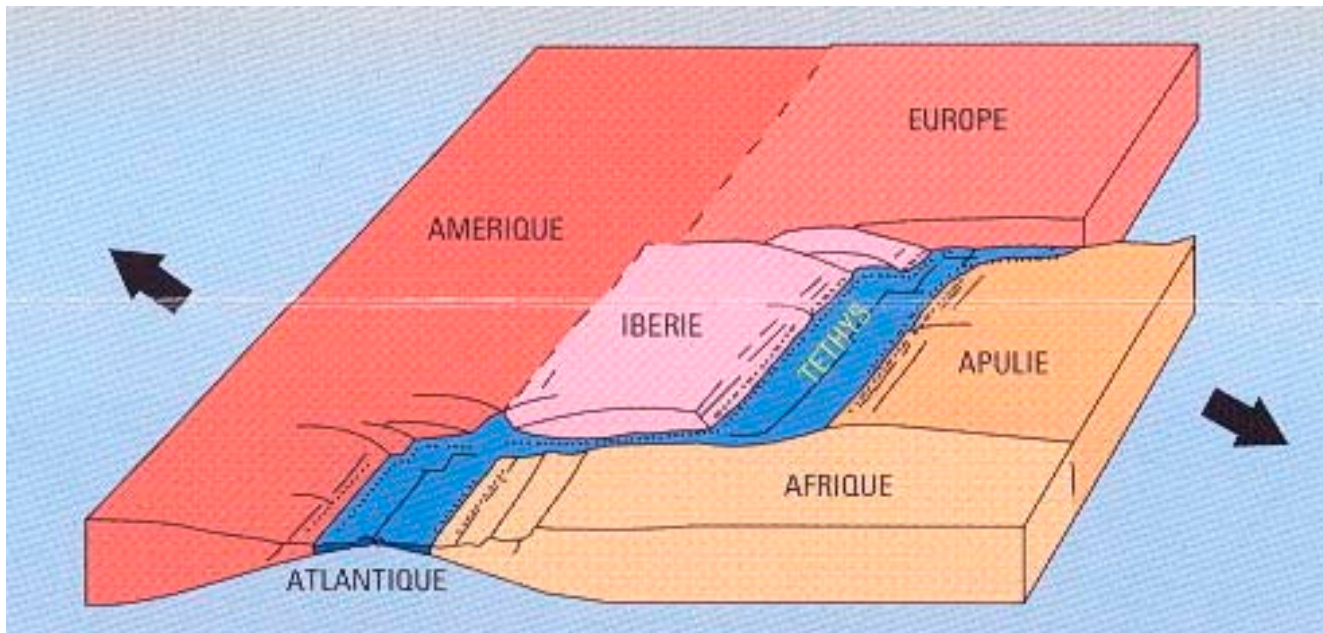
1. L'orogénèse alpin: Ouverture de la Téthys (Jurassique inf. 180 Ma)



Formation de **croûte océanique** (**ophiolites**);

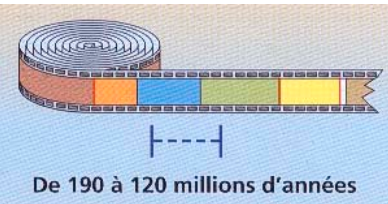
Cette partie de la Téthys qui s'océanise et s'élargit sans cesse durant le Jurassique porte le nom d'**océan piémontais** (ou piémontais-ligure)

Ici on ne représente pas la mer mais uniquement les parties continentales et océaniques.



1. Géologie alpine

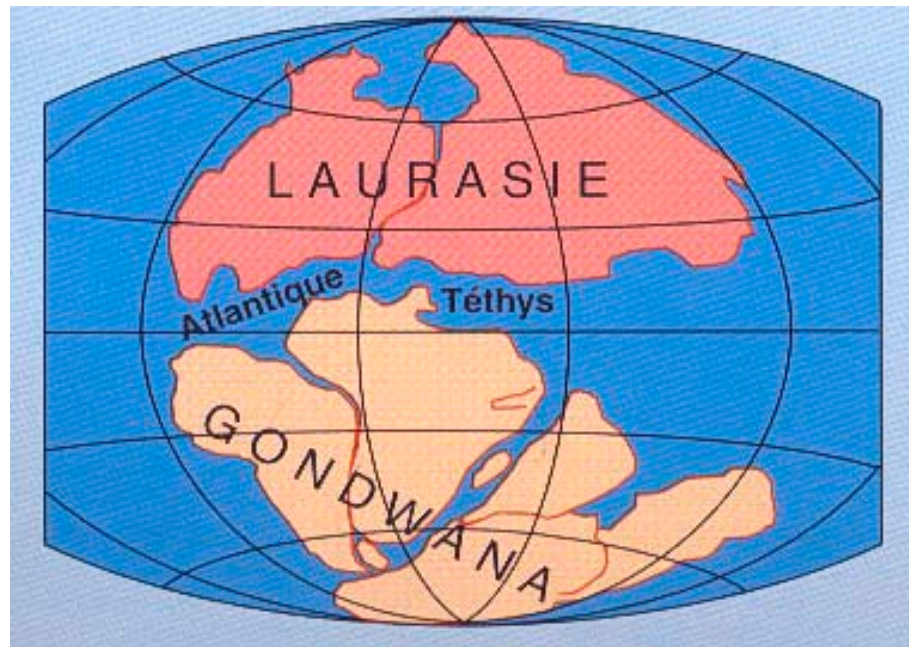
1. L'orogénèse alpin: Ouverture de la Téthys (Dogger)



Disposition des continents et des océans vers le milieu du Jurassique (160 Ma) ;

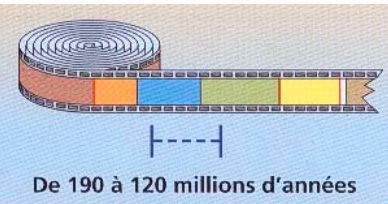
La **lithosphère** se **refroidit** et les épaulements perdent de la hauteur:

- ⇒ les **marges continentales** deviennent **subsidentes**
- ⇒ **transgression**: mer chaude et peu profonde.



1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Ouverture de la Téthys** (Dogger-Malm)



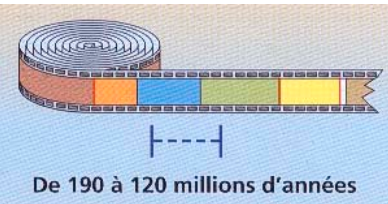
Durant tout le **Jurassique** et le **début du Crétacé**, des alternances de couches de vastes **dépôts calcaires** et **marneux** vont se succéder sur les **marges subsidentes de la Téthys**.



Churfirsten (Canton de St-Gall)
Alpes de l'Appenzell

1. Géologie alpine

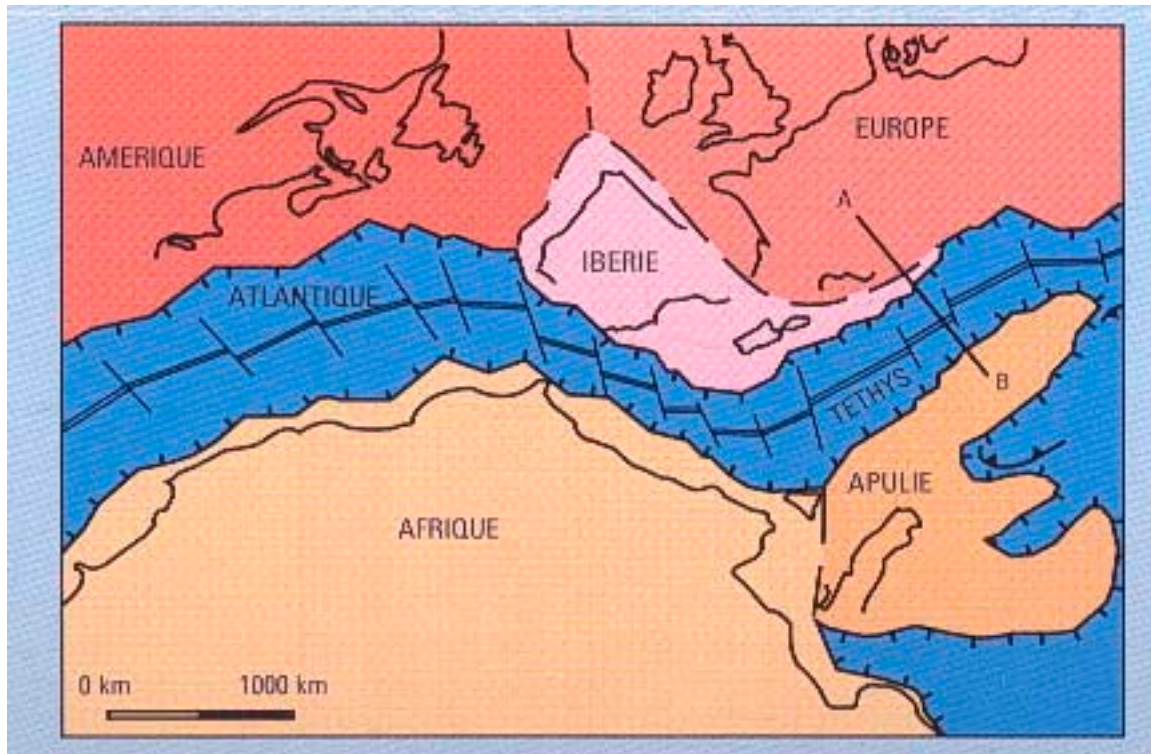
1. L'orogénèse alpin: Ouverture de la Téthys (Malm)



160-150 Ma: Atlantique Central et Thétys s'élargissent ensemble ;

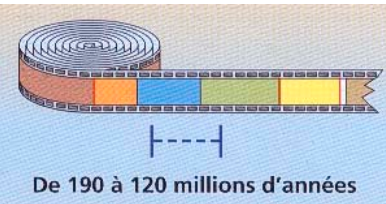
Atlantique N toujours **pas ouvert** et **Europe du N**, **Ibérie** et **Amérique** sont toujours **accolés** ;

Sous-continent **apulien** fait toujours partie de l'**Afrique**.

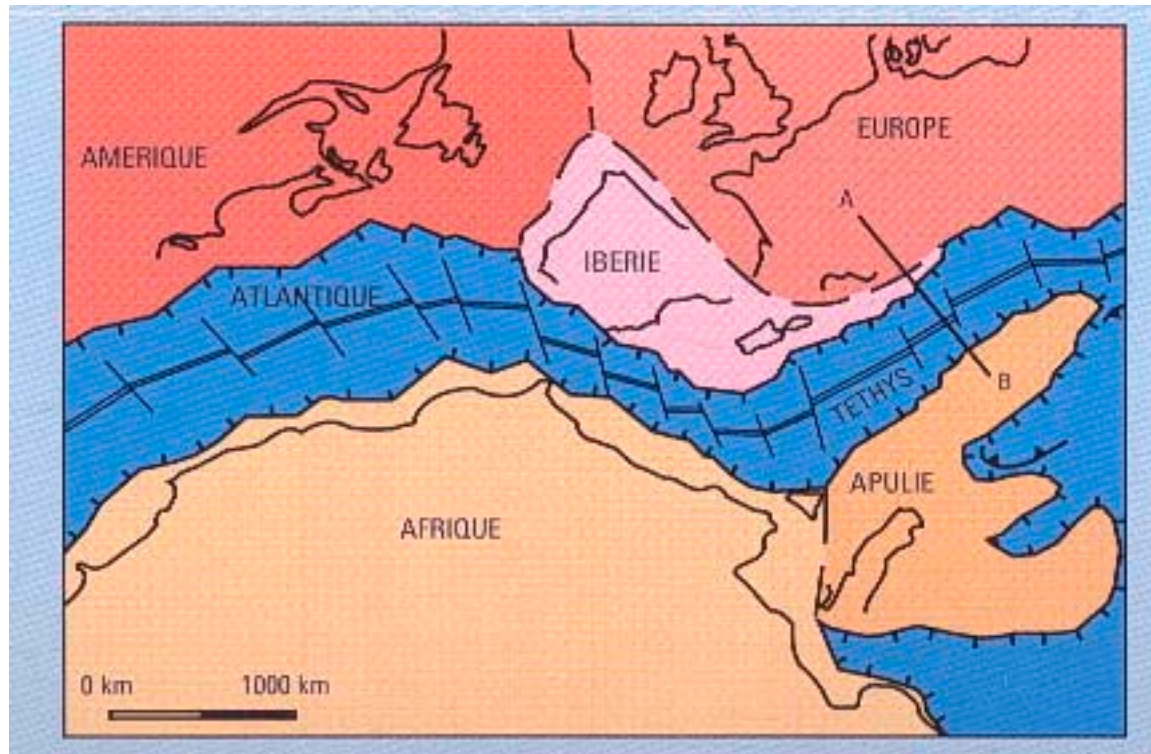


1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: Ouverture de la Téthys (Malm)

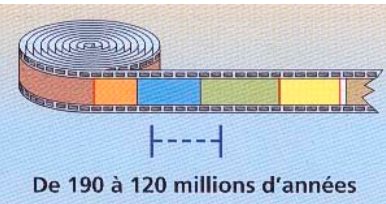


On estime la **largeur maximale de croûte océanique** de la Téthys **entre 1000 et 2000 km**; la mer devant être bien plus large.

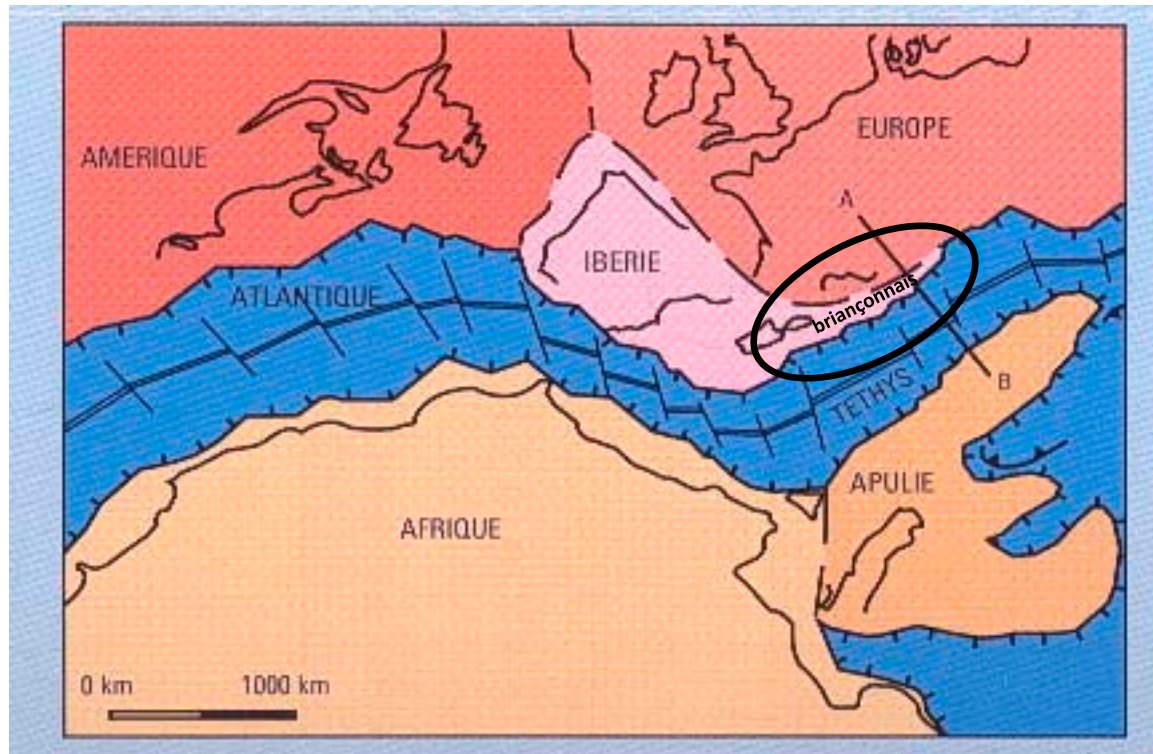


1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Ouverture de la Téthys** (Dogger-Malm)

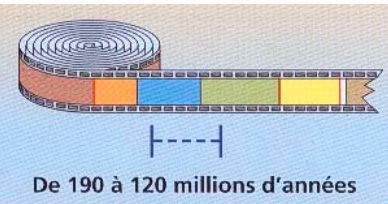


Zone Briançonnaise: Domaine paléogéographique alpin en forme de péninsule ou d'île allongée avec une sédimentation de plateforme très lacunaire:



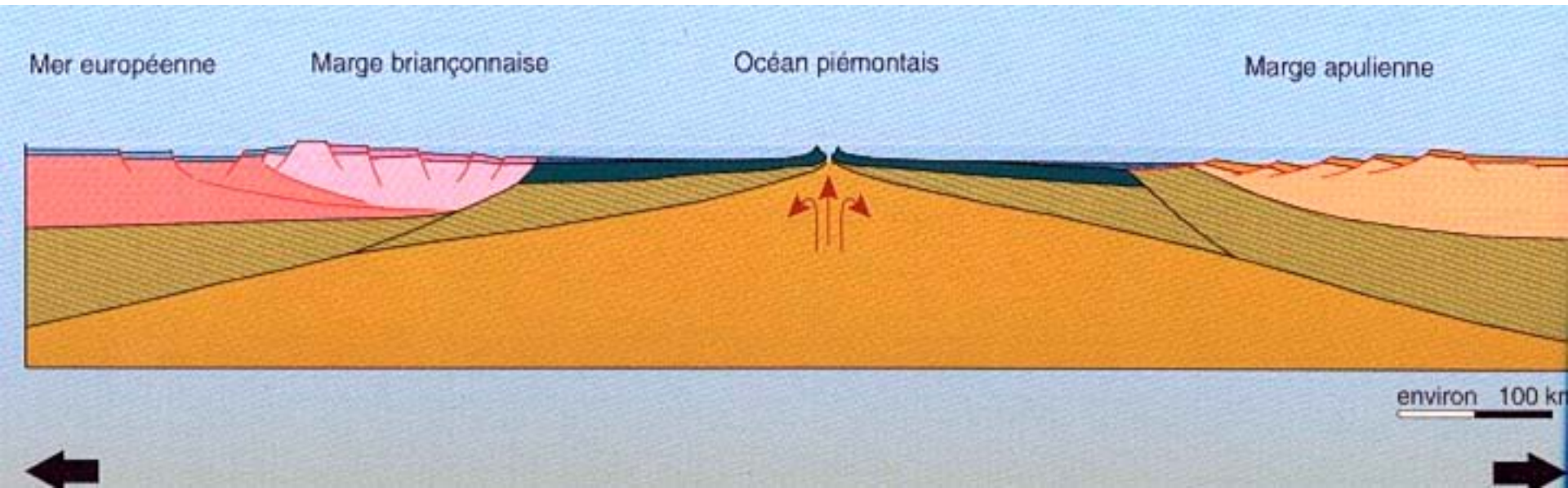
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Ouverture de la Téthys** (Dogger-Malm)



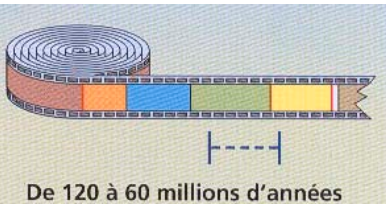
Zone Briançonnaise: Domaine paléogéographique alpin en forme de péninsule ou d'île allongée avec une sédimentation de plateforme très lacunaire:

⇒ Epaulement du rift surélevé.

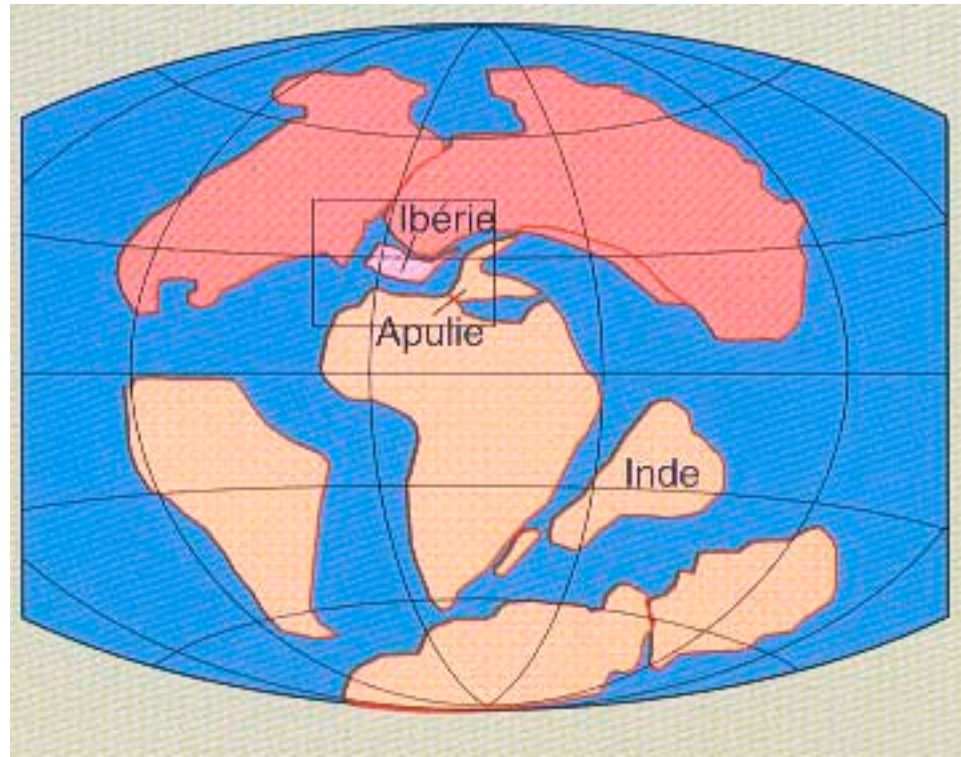


1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Subduction** (début du Crétacé)

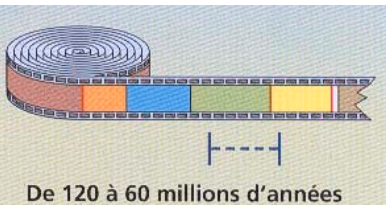


Entre 130 et 100 Ma, l'**ouverture progressive** de l'**Atlantique Nord** va induire une **rotation anti-horaire** de la **plaque ibérique** qui se sépare de l'Europe.



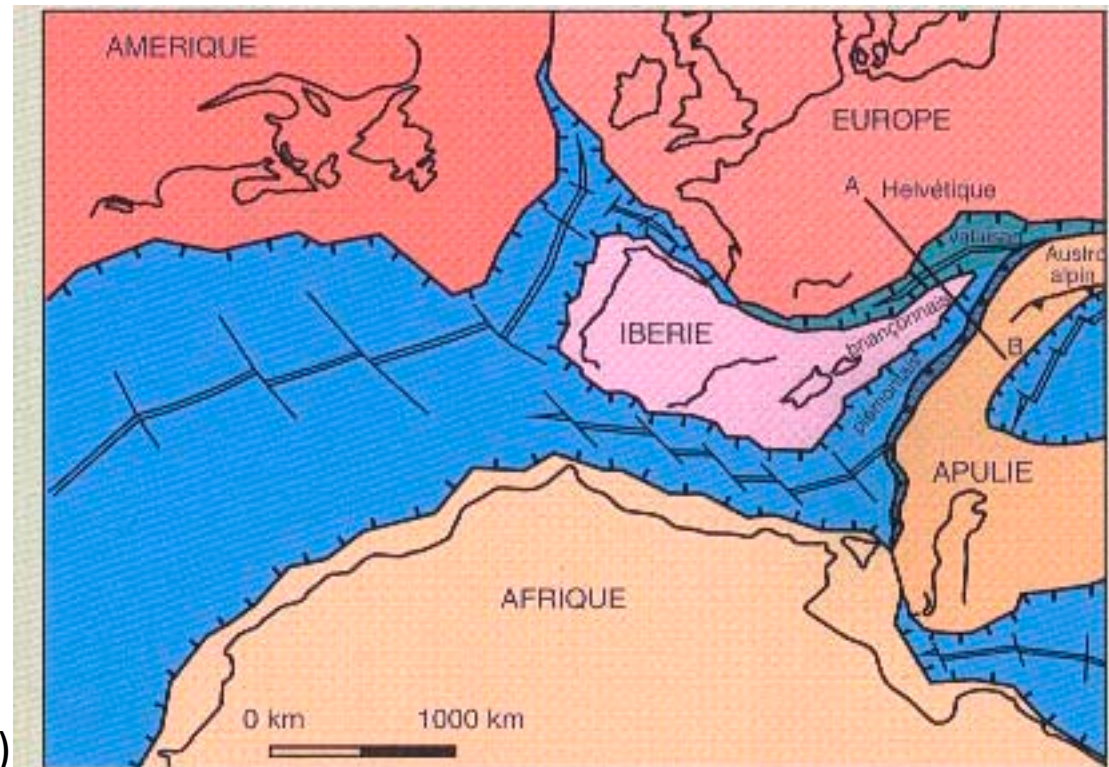
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Subduction** (début du Crétacé)



Ouverture d'un **nouveau bras océanique** ? : **océan valaisan** (au moins bassin profond avec dépôts de flyschs).

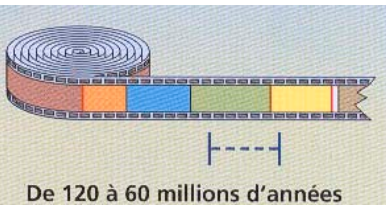
Individualisation de la **marge apulienne** qui devient **active** et se rapproche de l'**Europe**.



Milieu du Crétacé (100 Ma)

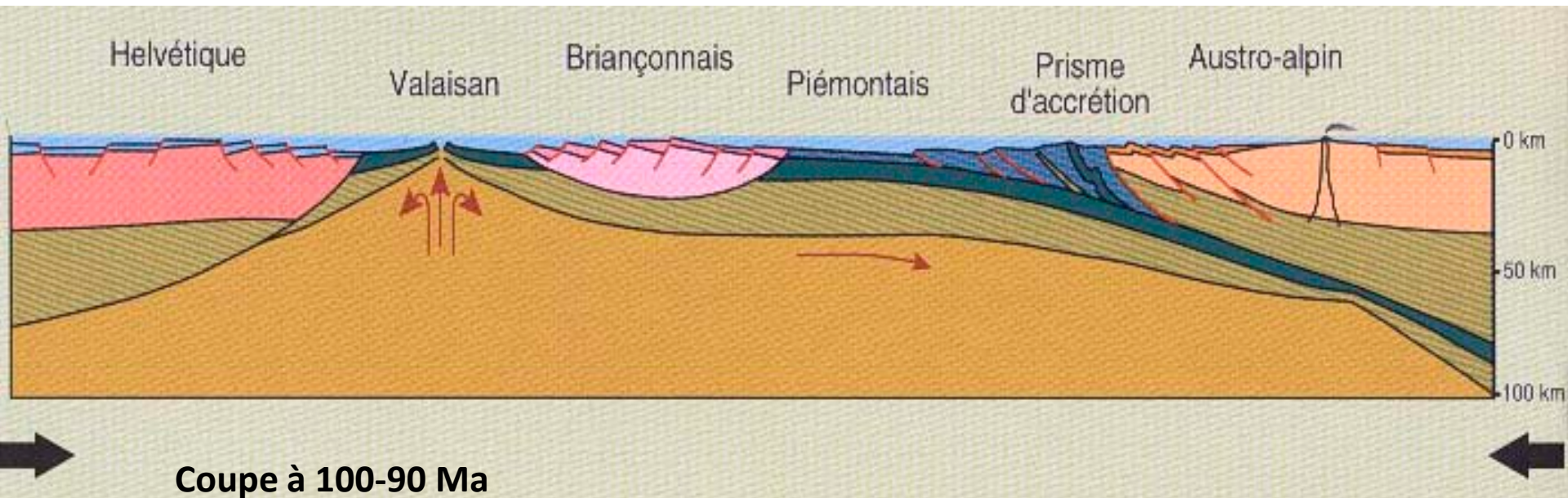
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: Subduction (début du Crétacé)



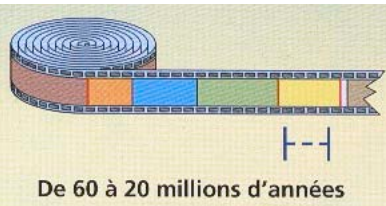
Subduction de la **plaque océanique piémontaise** (attachée au Briançonnais) **sous** la **plaque apulienne**.

Raclage du **plancher océanique** provoque la construction d'un **prisme d'accrétion** faits de **sédiments** et d'**échardes de croûte océanique** qui échappent à la subduction.



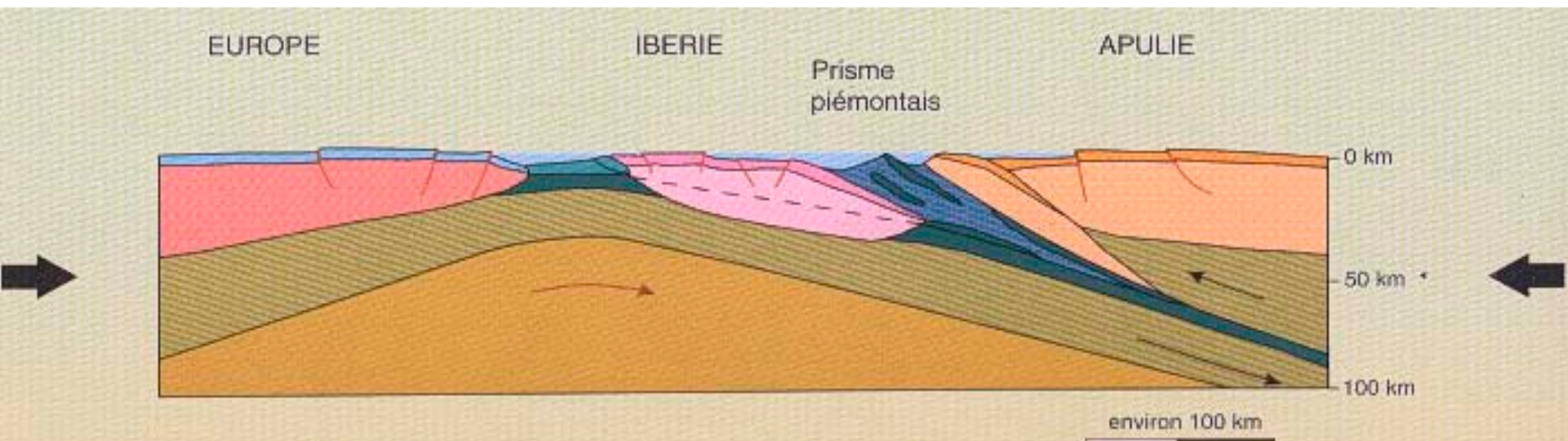
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Subduction** (début du Tertiaire ~ 60 Ma)



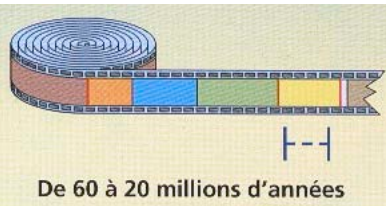
La **subduction** a fait disparaître l'océan piémontais, seul le **prisme d'accrétion** en garde la mémoire.

Le bord sud du **continent briançonnais** amorce à son tour un début de **subduction** sous le prisme d'accrétion.



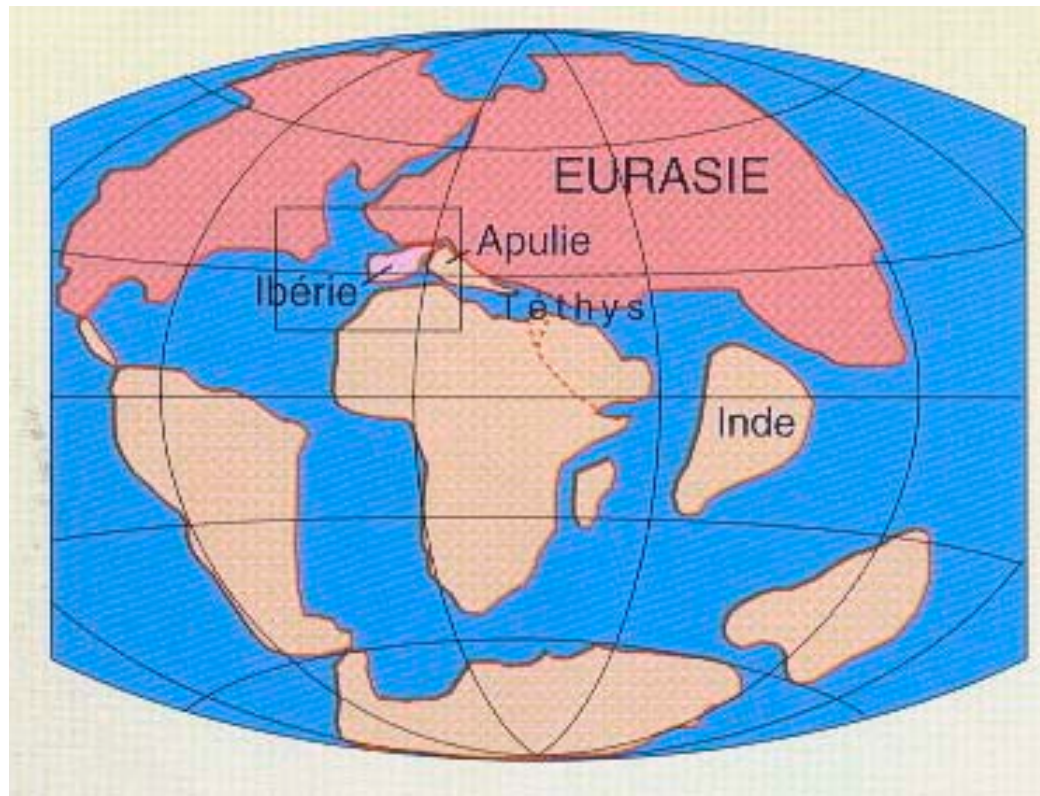
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Subduction** (début du Tertiaire ~ 55 Ma)



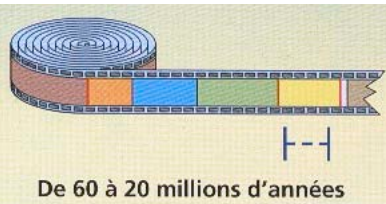
Disposition des continents au début de l'ère tertiaire.

Le **rifting** et l'**élargissement de l'Atlantique** progresse vers le **nord** alors que la **Téthys** est devenue **très étroite** au nord de l'Ibérie et de l'Apulie.



1. Géologie alpine

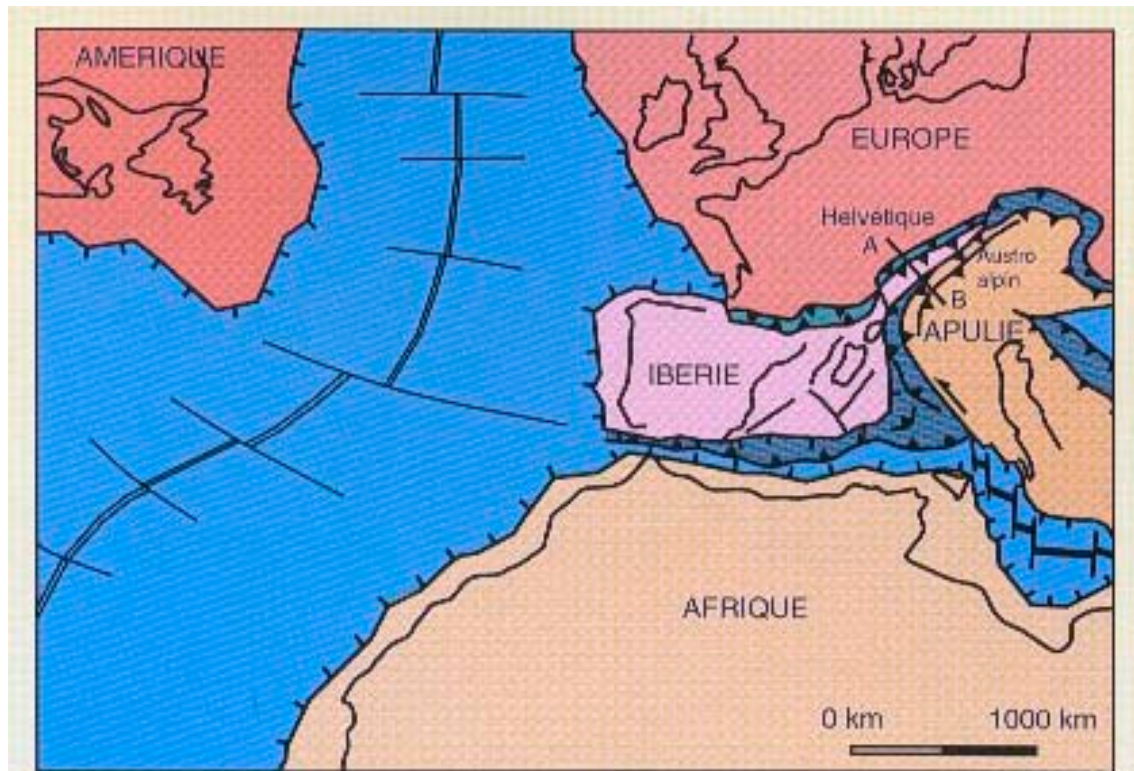
1. L'orogénèse alpin: Collision (Tertiaire 40 Ma)



L'ouverture de l'Atlantique pousse l'Afrique vers l'Europe et la collision s'amorce ;

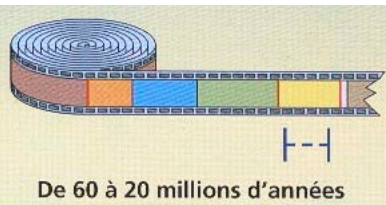
Collision entre l'Europe et l'Apulie ;

Le **Briançonnais** se désolidarise de l'**Ibérie** et est pris dans l'étau.



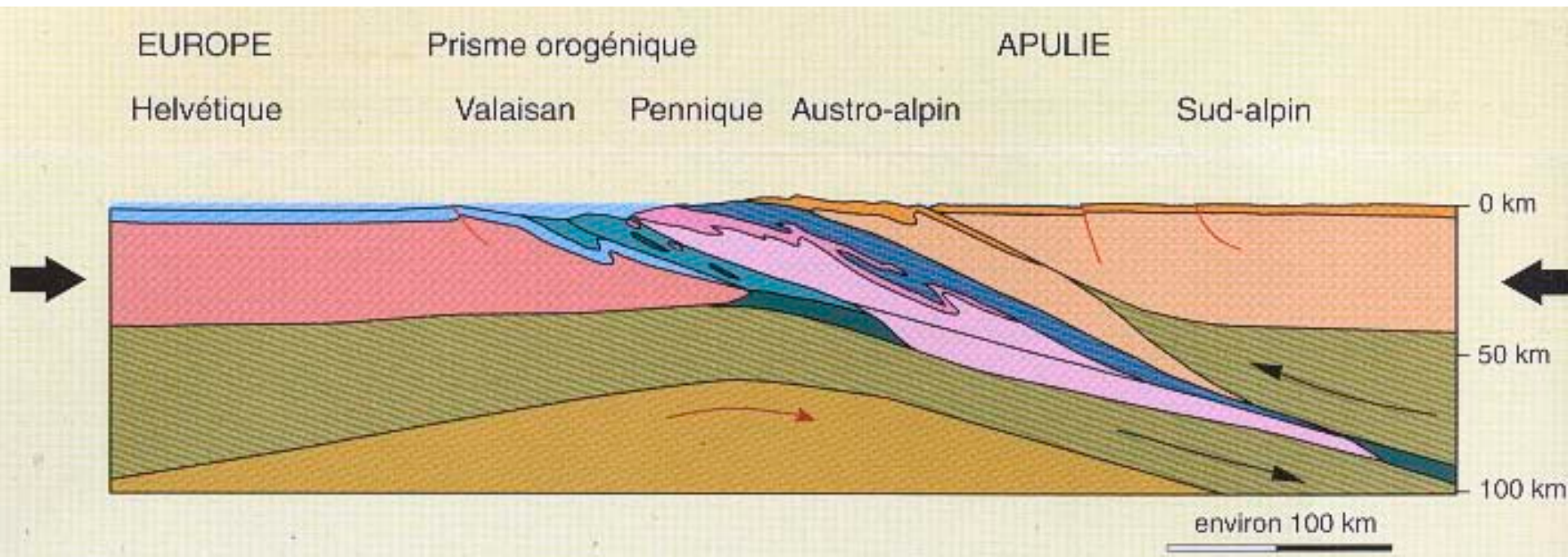
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: Collision (Tertiaire 40 Ma)



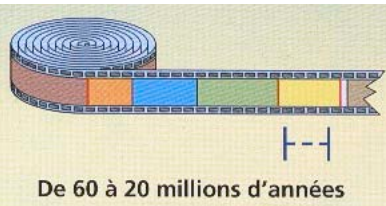
Le **prisme d'accrétion** s'est agrandi avec l'**incorporation du Briançonnais**: **prisme orogénique** (grande structure d'accrétion de matériel continental et océanique).

Le **bord de l'Europe** amorce à son tour sa **descente** sous le **prisme orogénique**.



1. Géologie alpine

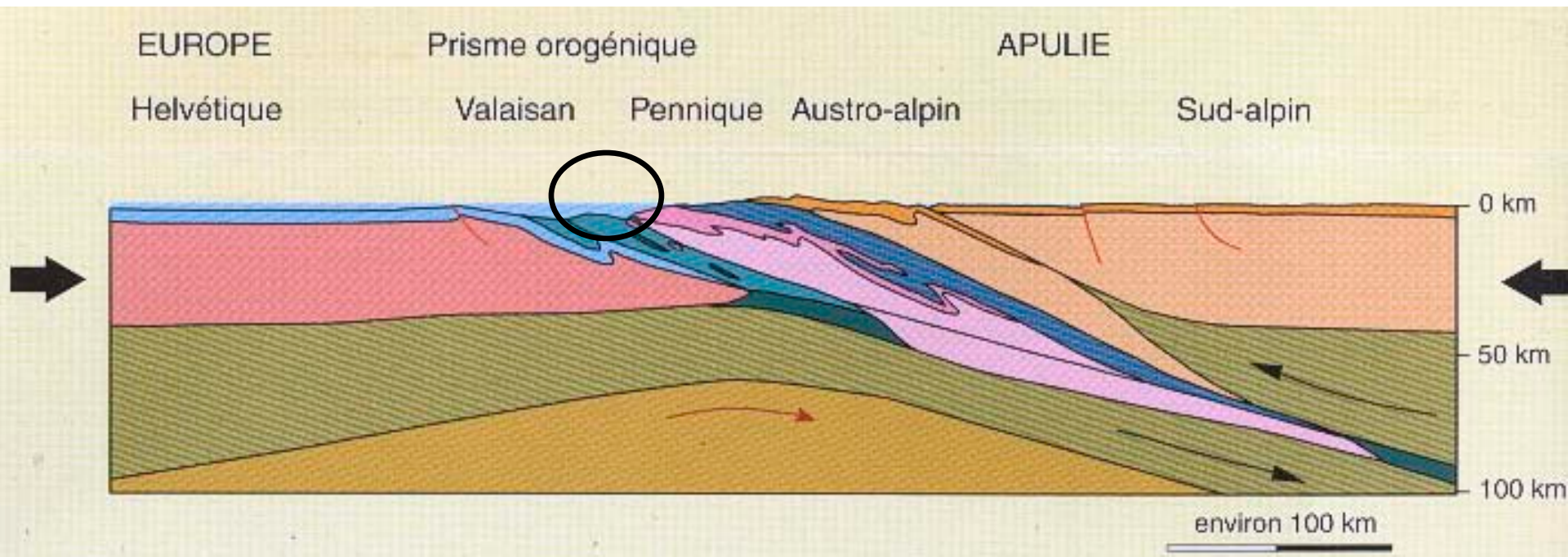
1. L'orogénèse alpin: Collision (Tertiaire 40 Ma)



Des **flyschs** se déposent au pied de la marge active.

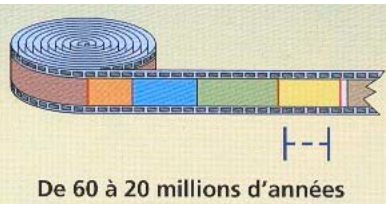
Flysch: alternance de couches de **grés granoclassés** et d'**argiles**, sédimentés dans une **fosse marine profonde**, au pied d'une marge active.

Les **grés** résultent de l'apport soudain de sables par une **avalanche sous-marine (turbidite)** alors que les argiles se déposent lentement entre deux avalanches.



1. Géologie alpine

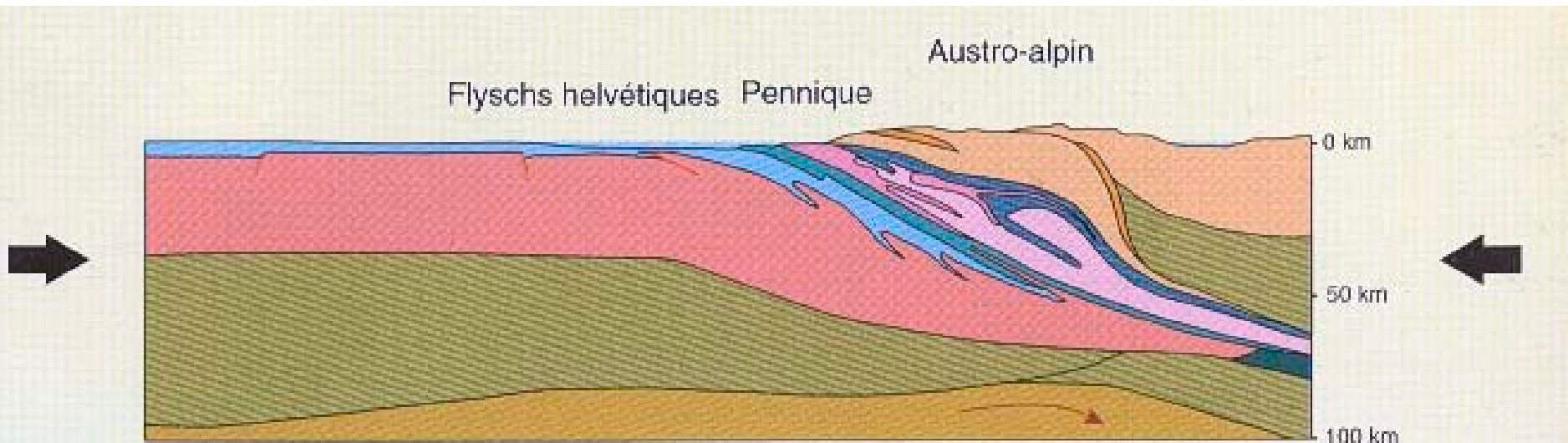
1. L'orogénèse alpin: Collision (Tertiaire 35 Ma)



A l'Eocène, la **subduction de la plaque européenne** est bien avancée .

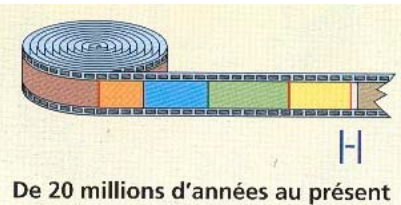
Nous sommes en plein **orogénèse**: **enfouissement** des unités de la **croûte continentale** qui devient **ductile** par augmentation de ***P-T***.

De grands ensembles de roches **se déplacent**, **se superposent** et **se déforment**: naissance du système de **nappes**.



1. Géologie alpine

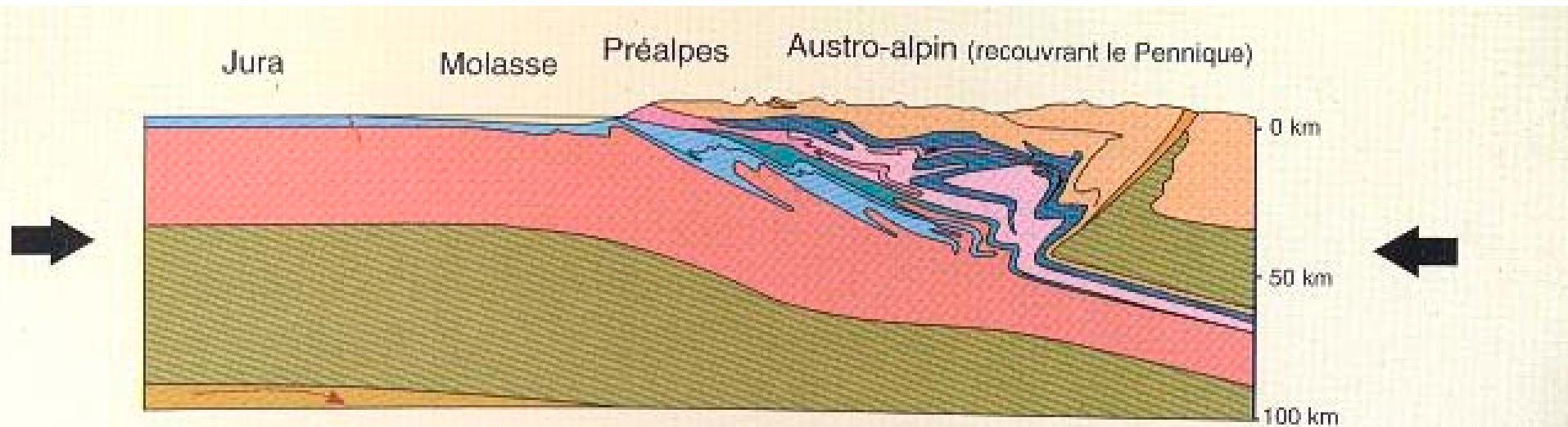
1. L'orogénèse alpin: **Soulèvement (Tertiaire 25 Ma)**



A l'Oligocène, **les Alpes se soulèvent** suite à la collision ;

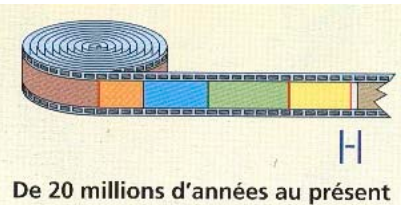
Les **unités en surface** sont d'origine **apulienne** (nappes austro-alpines) ;

Elles sont soumises à **une intense érosion**: formation de dépôts de **molasses** sur **plusieurs milliers de mètres** (dépôts de roches sédimentaires au pied d'une chaîne de montagne en cours et en fin de surrection en raison de l'altération).

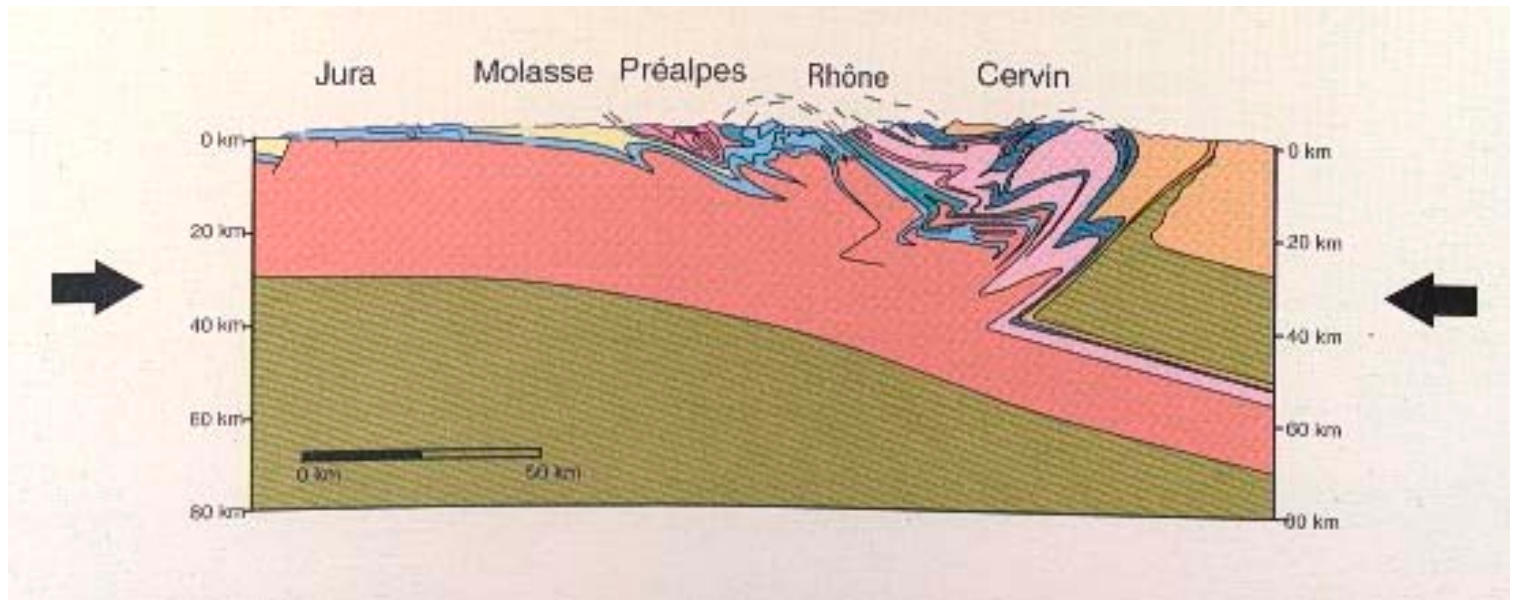


1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Soulèvement (Tertiaire 25 Ma)**



L'**érosion** accompagne le soulèvement de la chaîne et les grandes unités chevauchantes vont se retrouver à l'état de **klippes**.



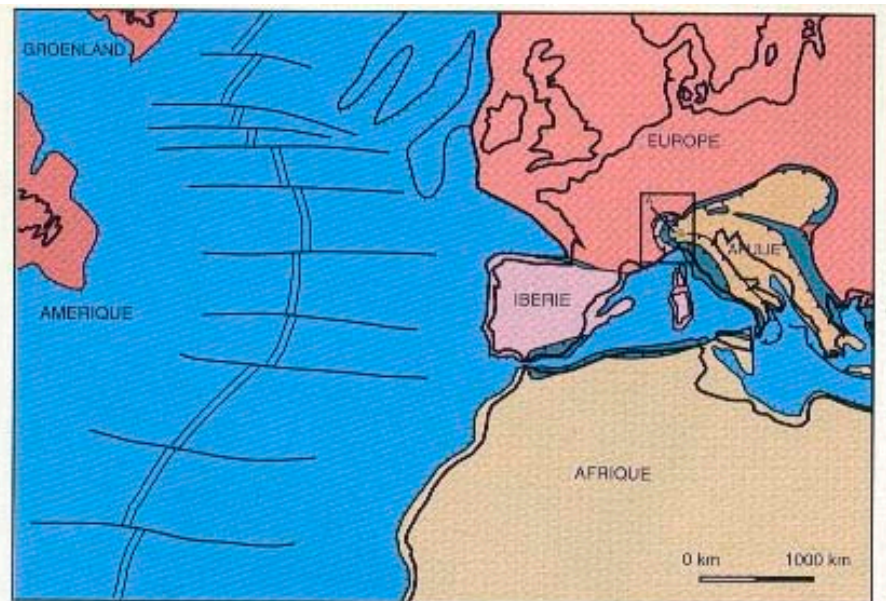
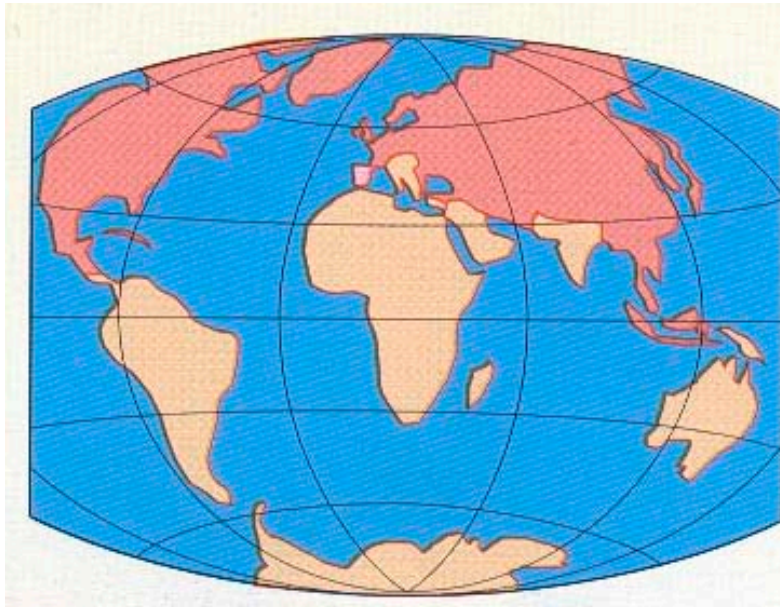
1. Géologie alpine

1. L'orogénèse alpin: **Actuel**

Trois plaques issues du **Gondwana** sont venues emboutir l'**Eurasie** en formant des chaînes de montagnes: **Apulie**, **Arabie** et **Inde**;

L'Europe méditerranéenne est une **mozaïque de plaques** témoignant de **l'histoire de la région** durant **250 Ma**.

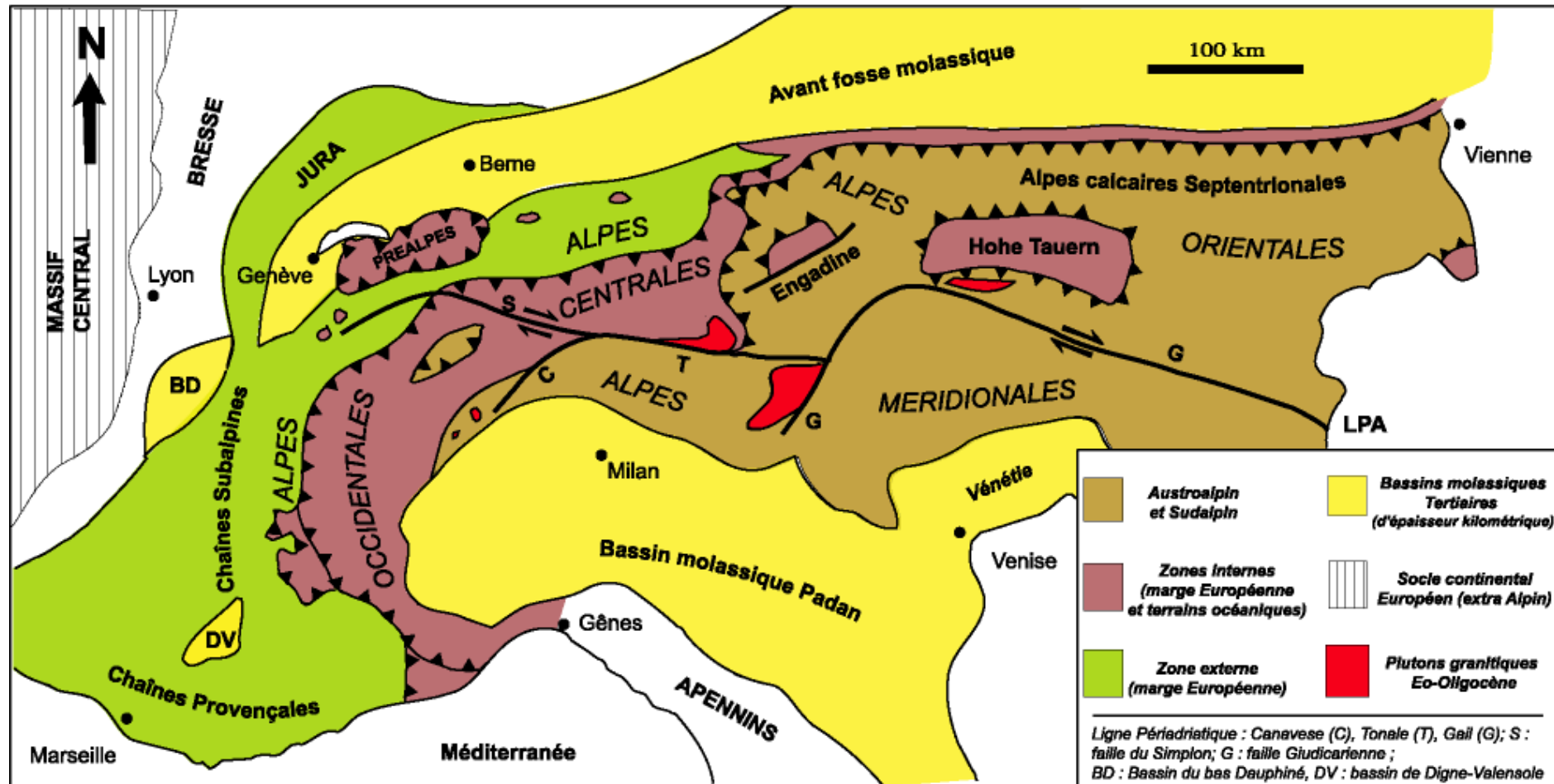
L'**Apulie** est entièrement **entourée** des **restes de l'ancien océan piémontais**.



1. Géologie des Alpes
2. Les grandes unités géologiques

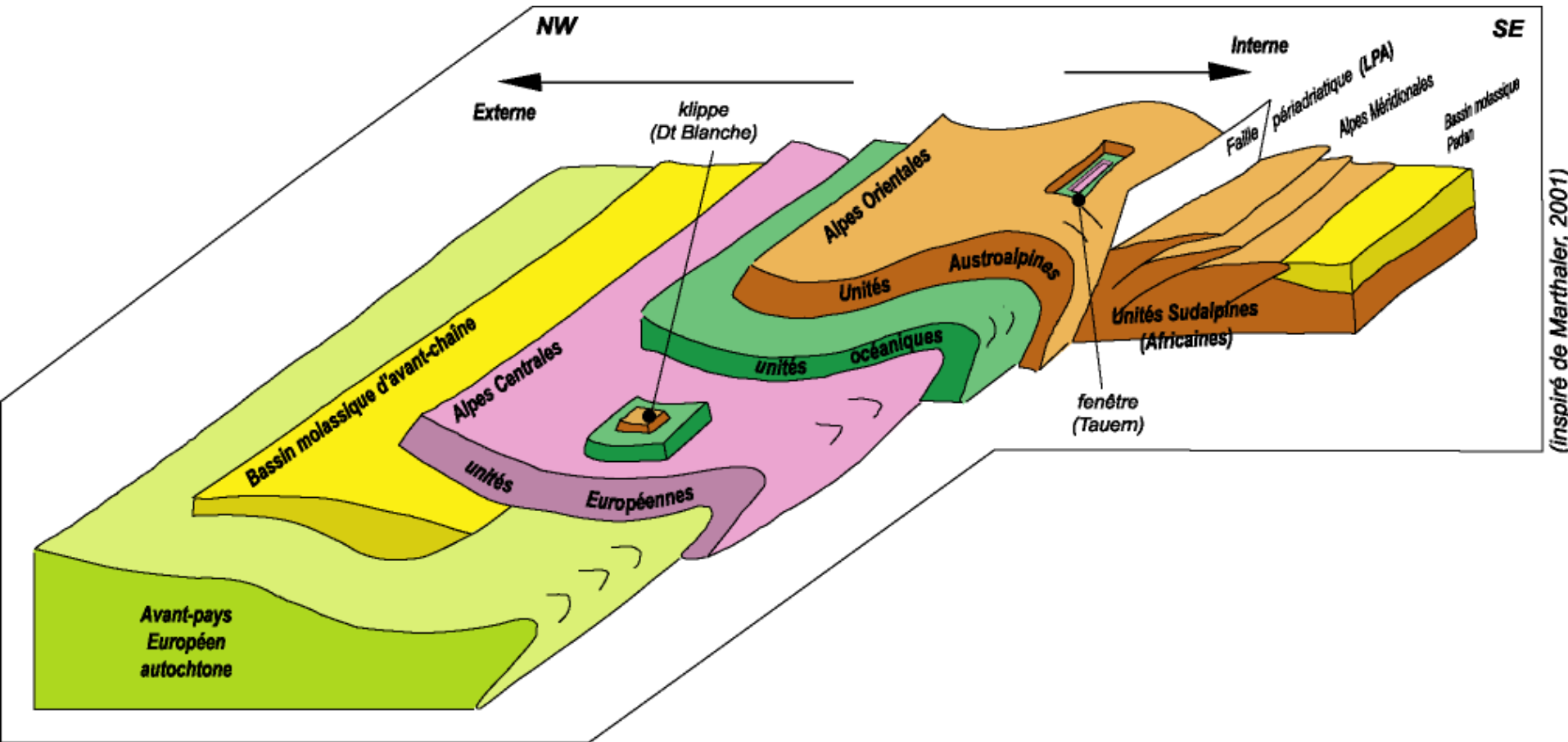
1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: Zonéographie alpine



1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: Géométrie des unités



1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: Alpes Occidentales

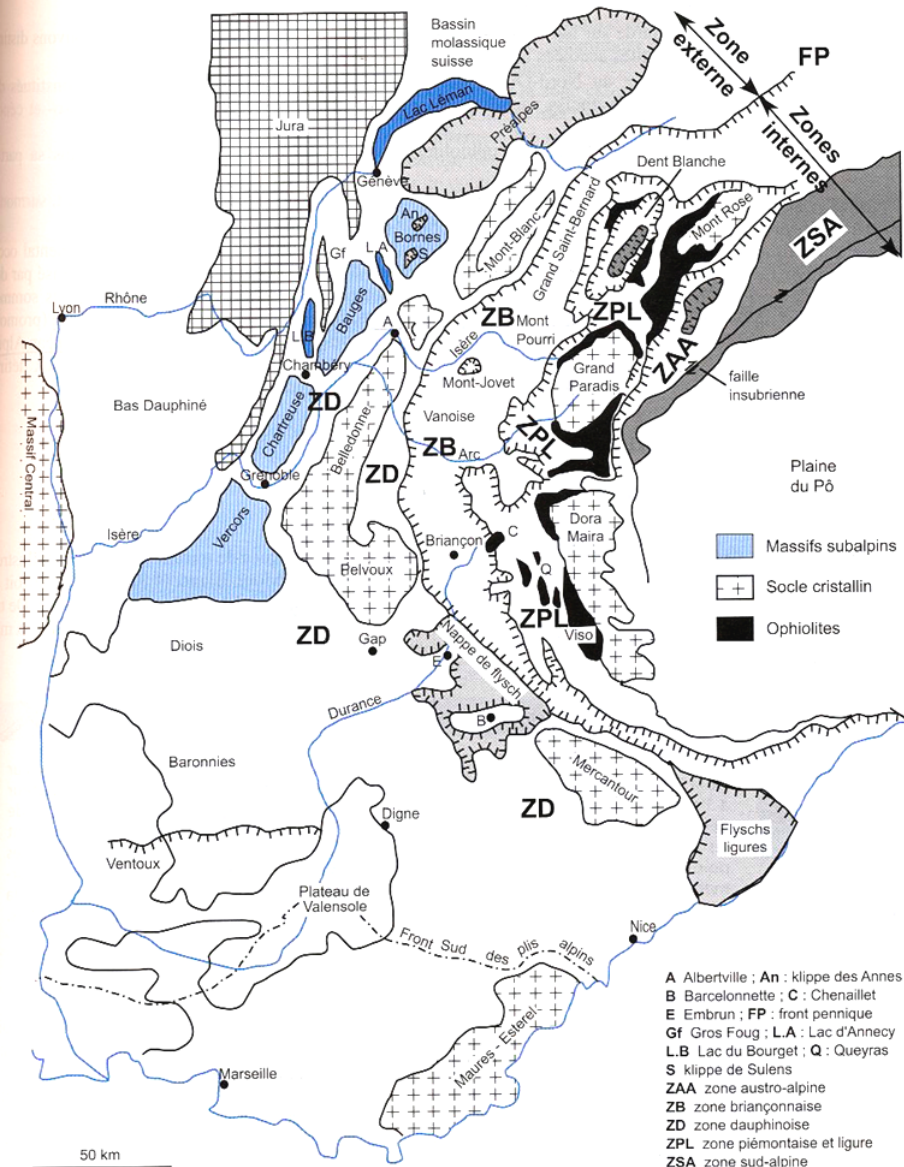
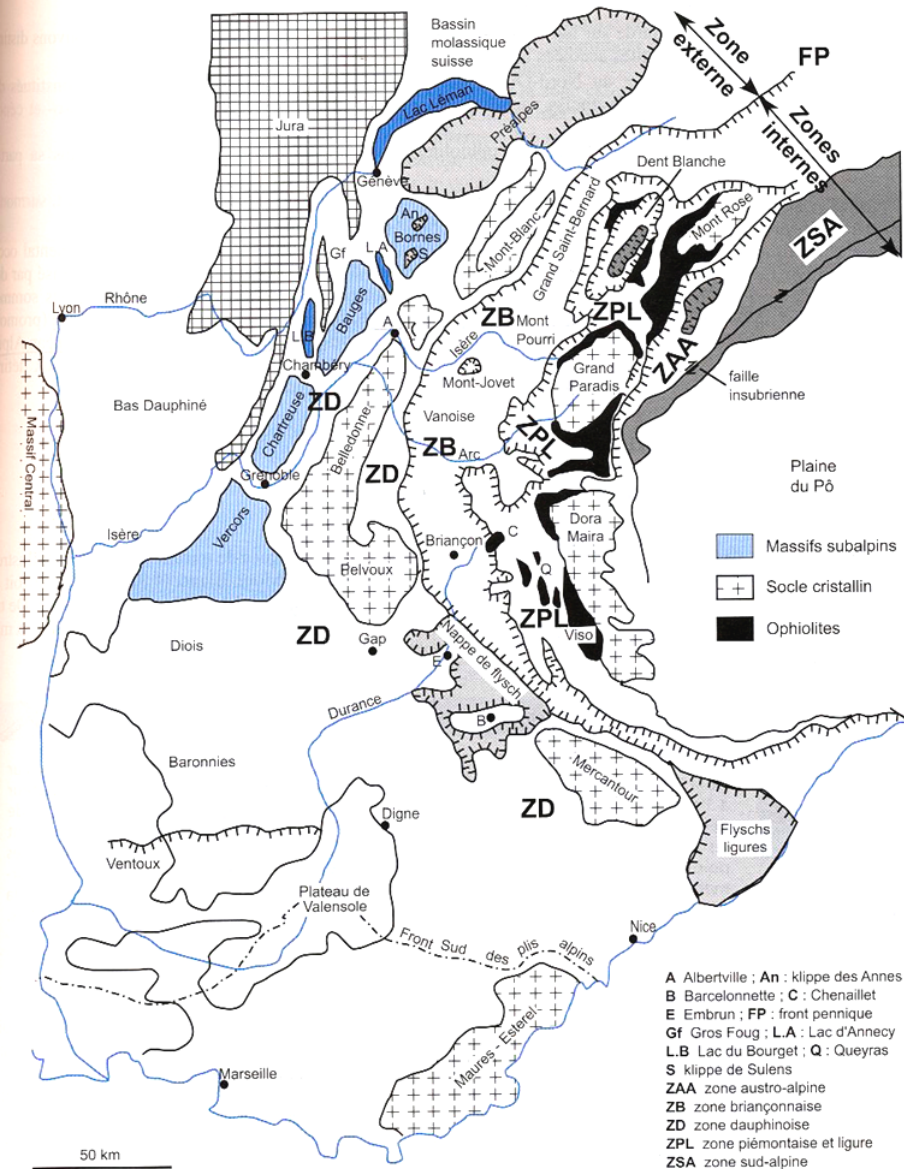


Figure 12.2 Schéma structural simplifié des Alpes occidentales.

Source: *Géologie BCPST*

2. Les grandes unités géologiques: **Alpes Occidentales**



Zone Externe

MCE: Massifs Cristallins Externes

Socle hercynien du continent
européen

----- FRONT PENNIQUE

Zones Internes

MCI: Massifs Cristallins Internes

Socle hercynien du continent européen (Briançonnais) entraîné dans la subduction (**fortement métamorphisé**) et ramené en surface lors de la collision

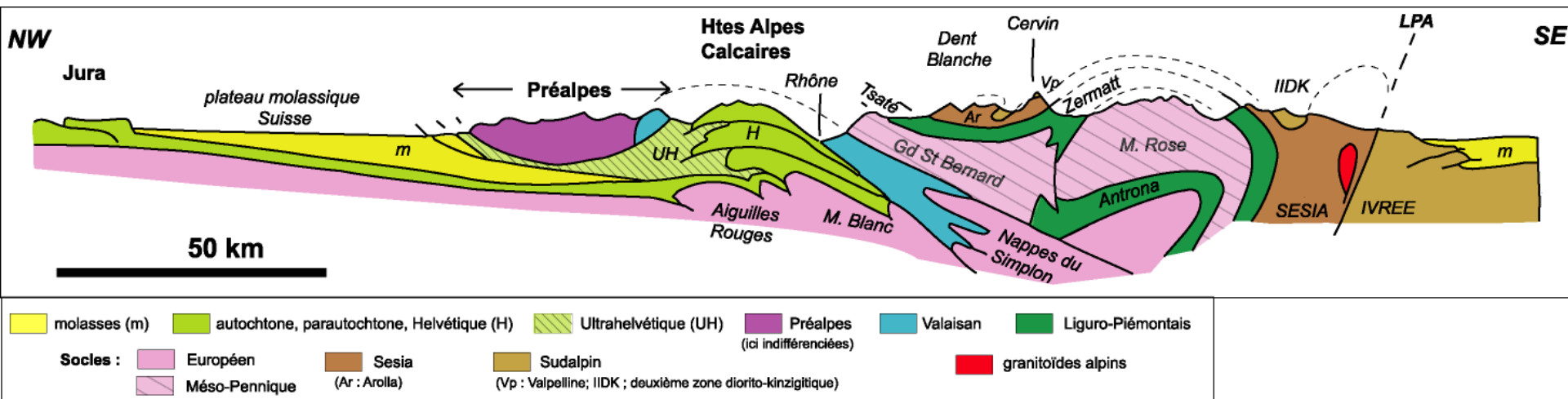
Dent Blanche: **Klippe** de continent apulien

Figure 12.2 Schéma structural simplifié des Alpes occidentales.

Source: *Géologie BCPST*

1. Géologie alpine

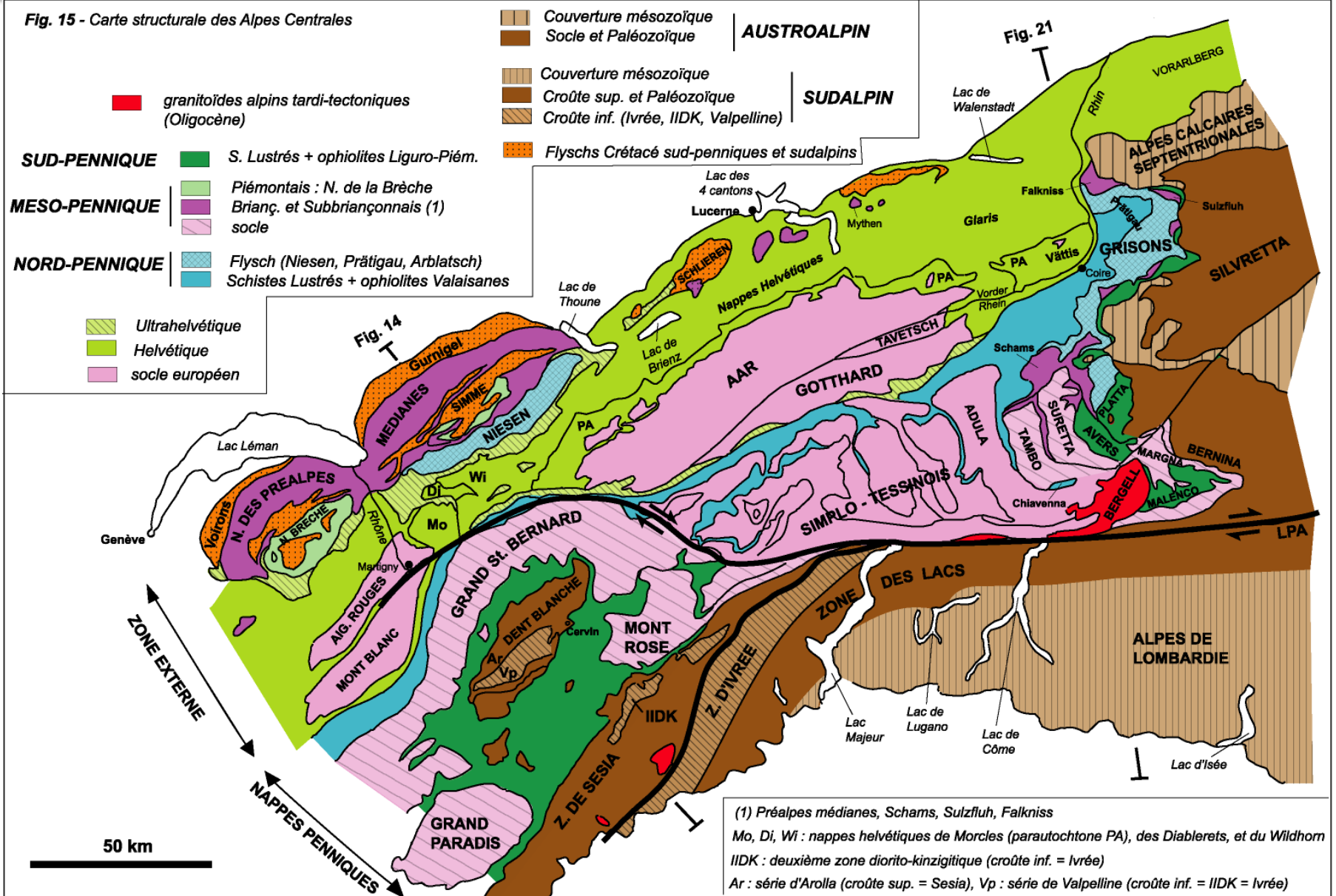
2. Les grandes unités géologiques: Géométrie des unités



1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: Alpes Centrales

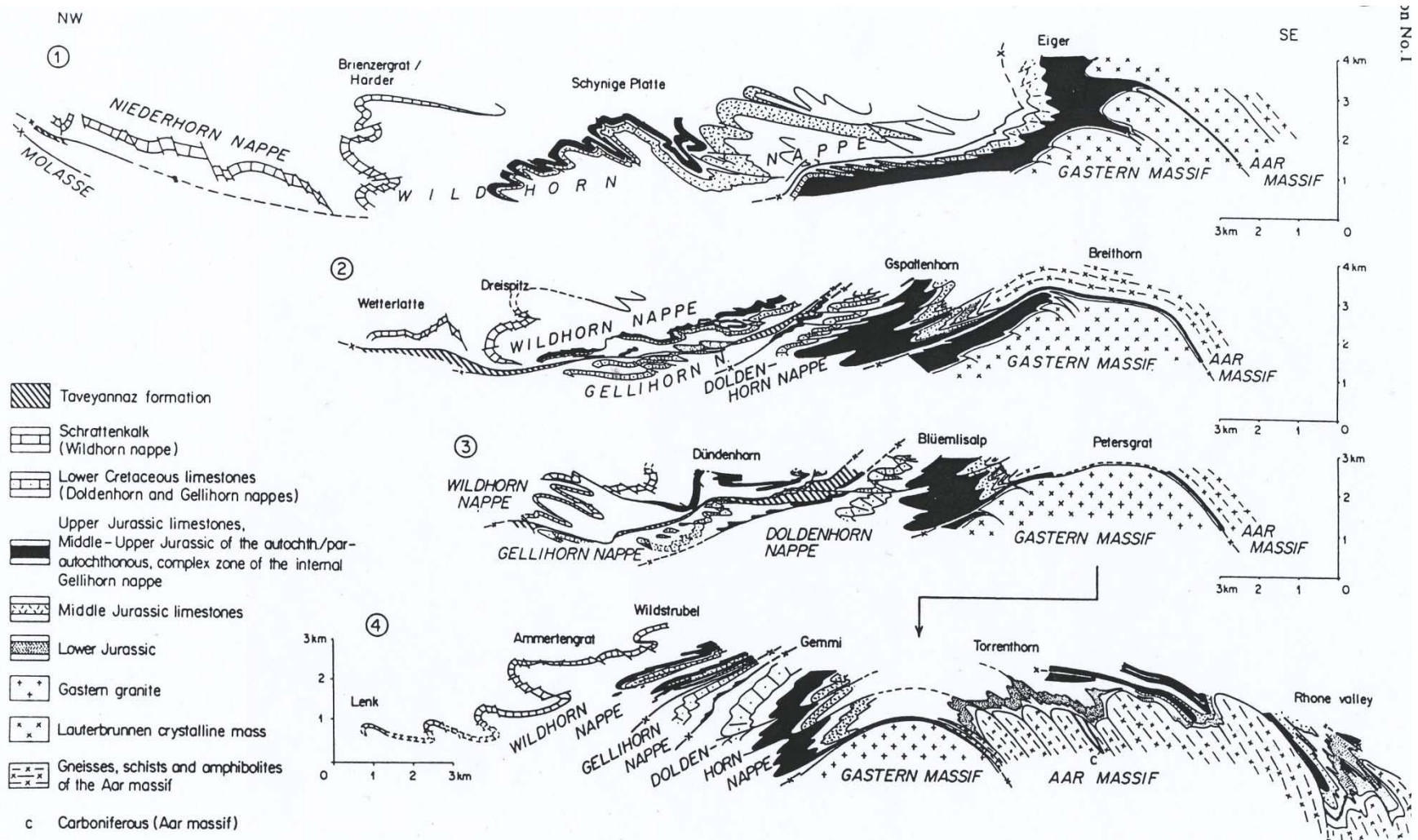
Fig. 15 - Carte structurale des Alpes Centrales



1. Géologie alpine

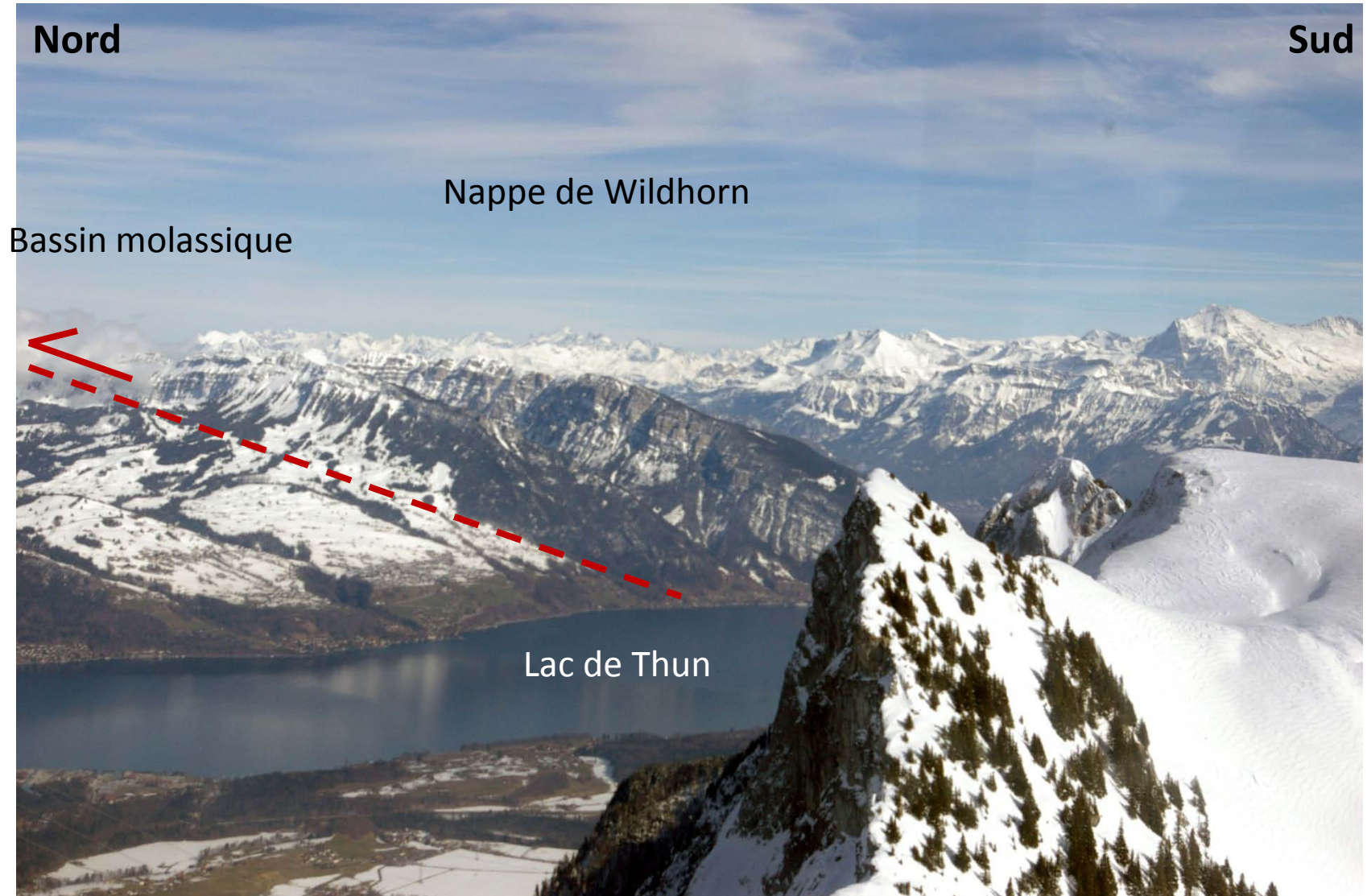
2. Les grandes unités géologiques: Les nappes Helvétiques

Toute nappe supérieure vient d'une position plus interne (Burkhard 1988)



1. Géologie alpine

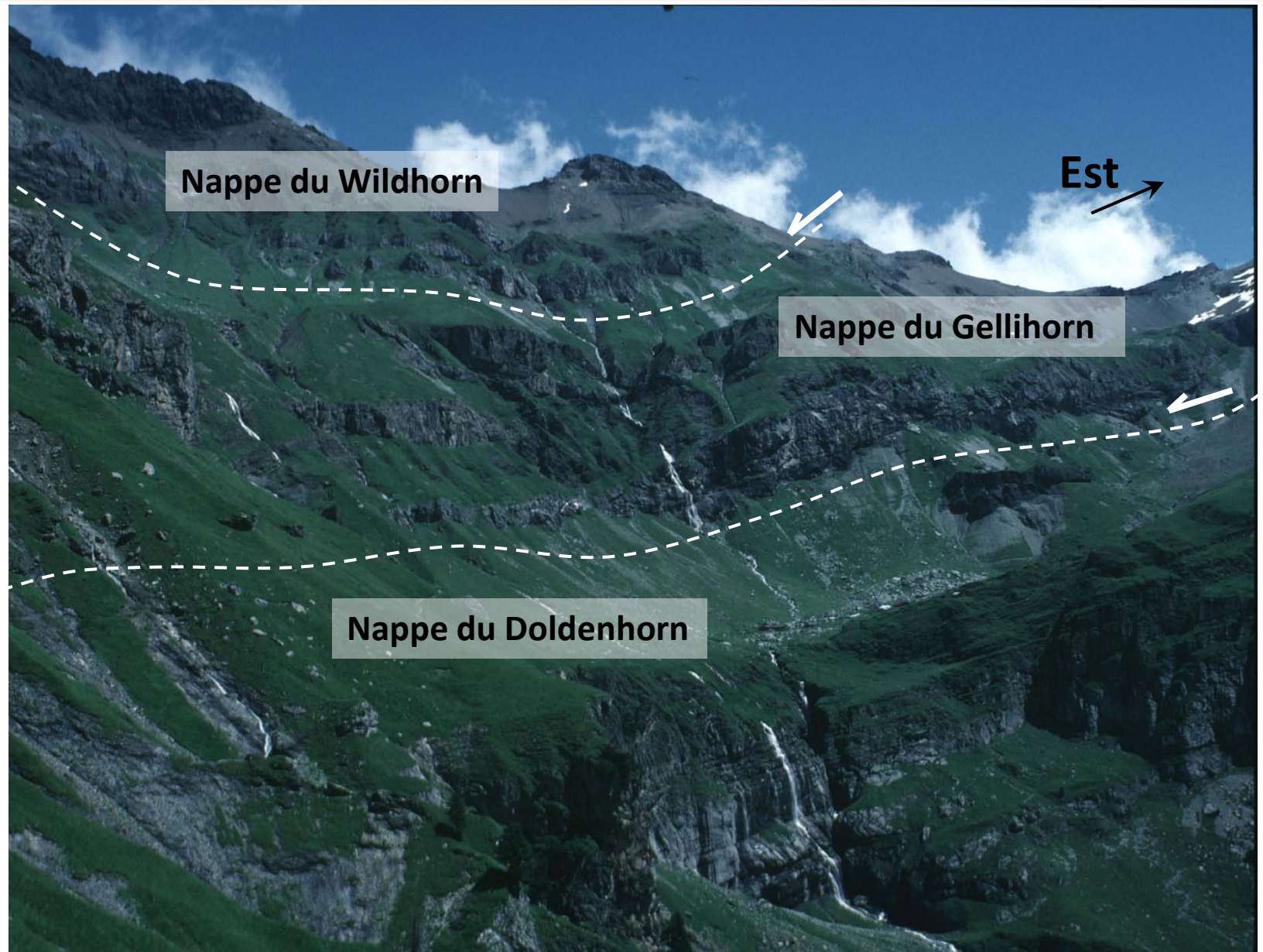
2. Les grandes unités géologiques: Les nappes Helvétiques



Vue depuis le Stockhorn (canton Bern)

1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: Les nappes Helvétiques



1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: **Chevauchement du Glarus**



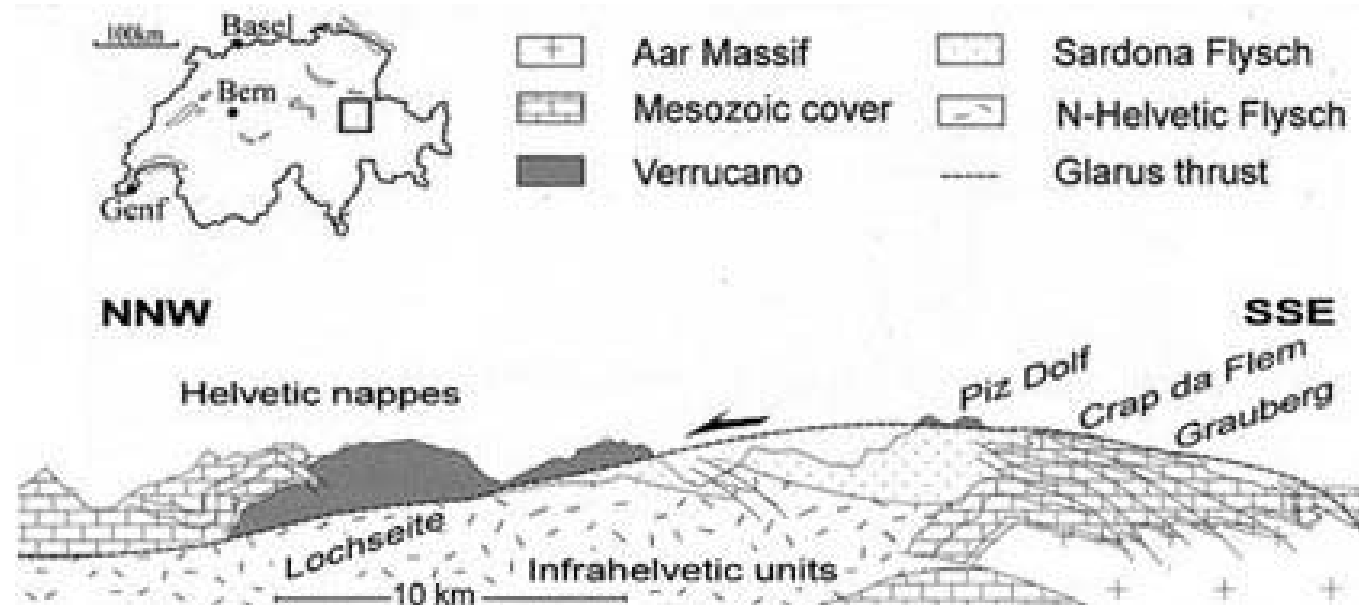
1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: **Chevauchement du Glarus**



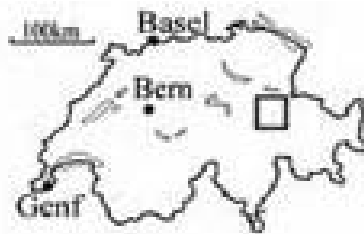
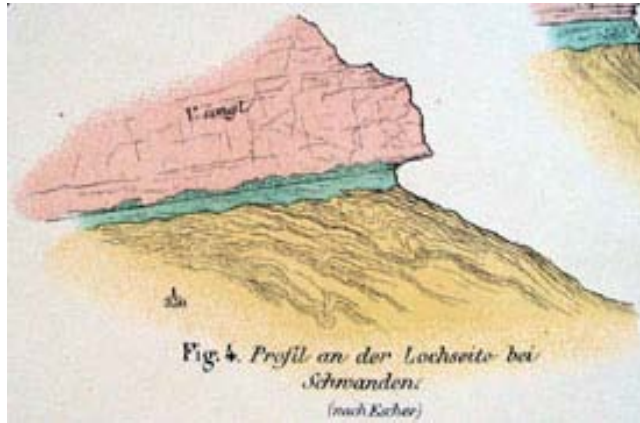
1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: **Chevauchement du Glarus**

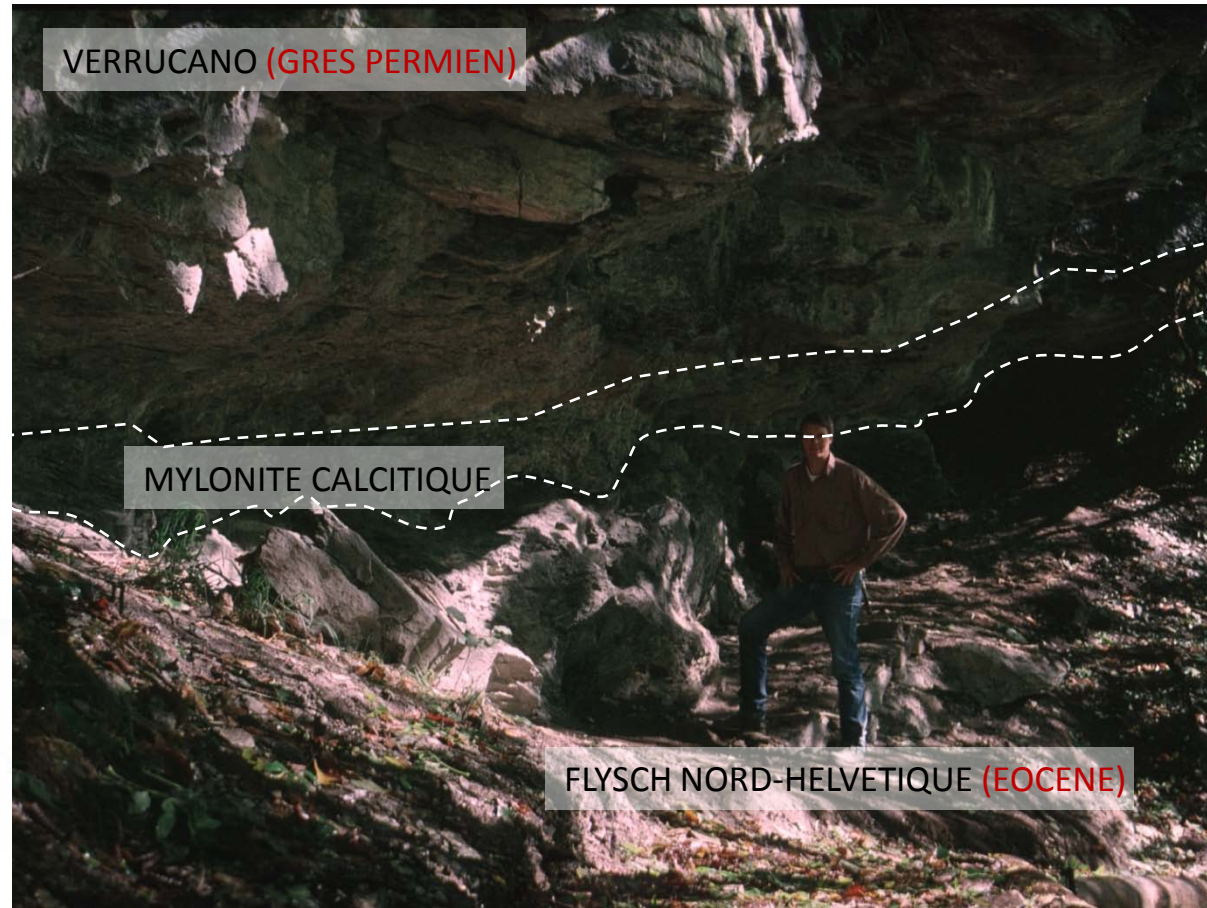


1. Géologie alpine

2. Les grandes unités géologiques: **Chevauchement du Glarus**



NNW

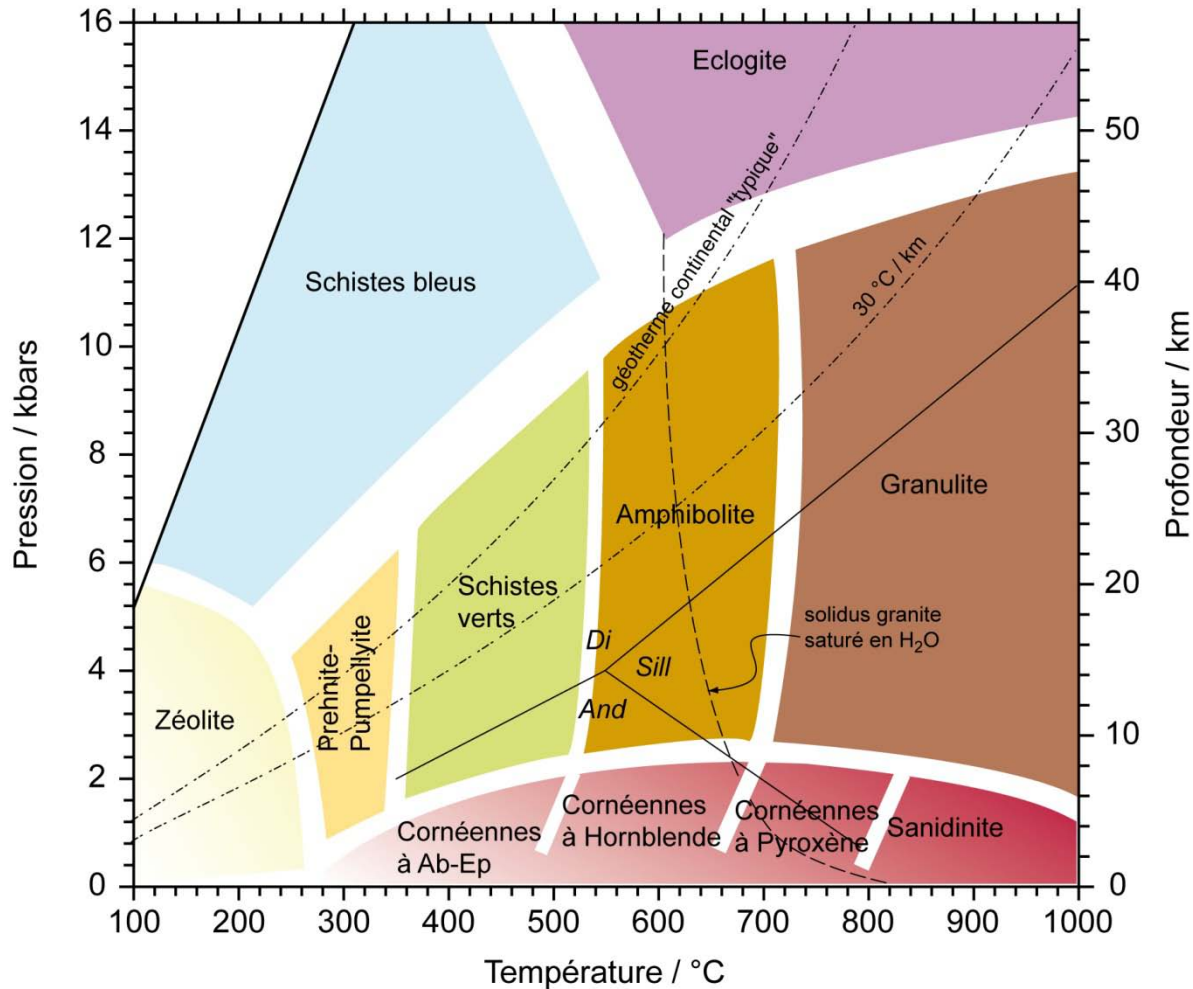


1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes

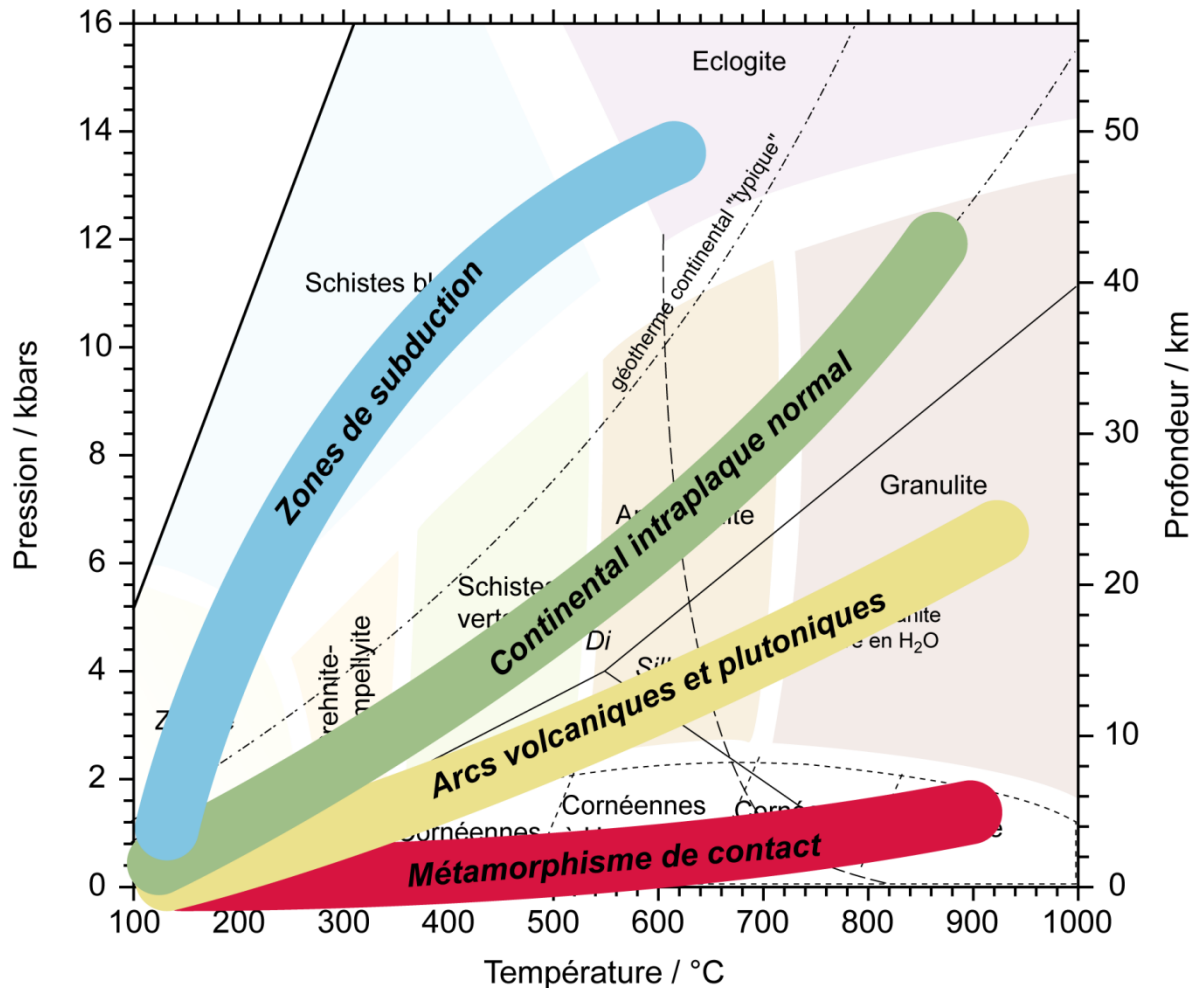
1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Faciès métamorphiques



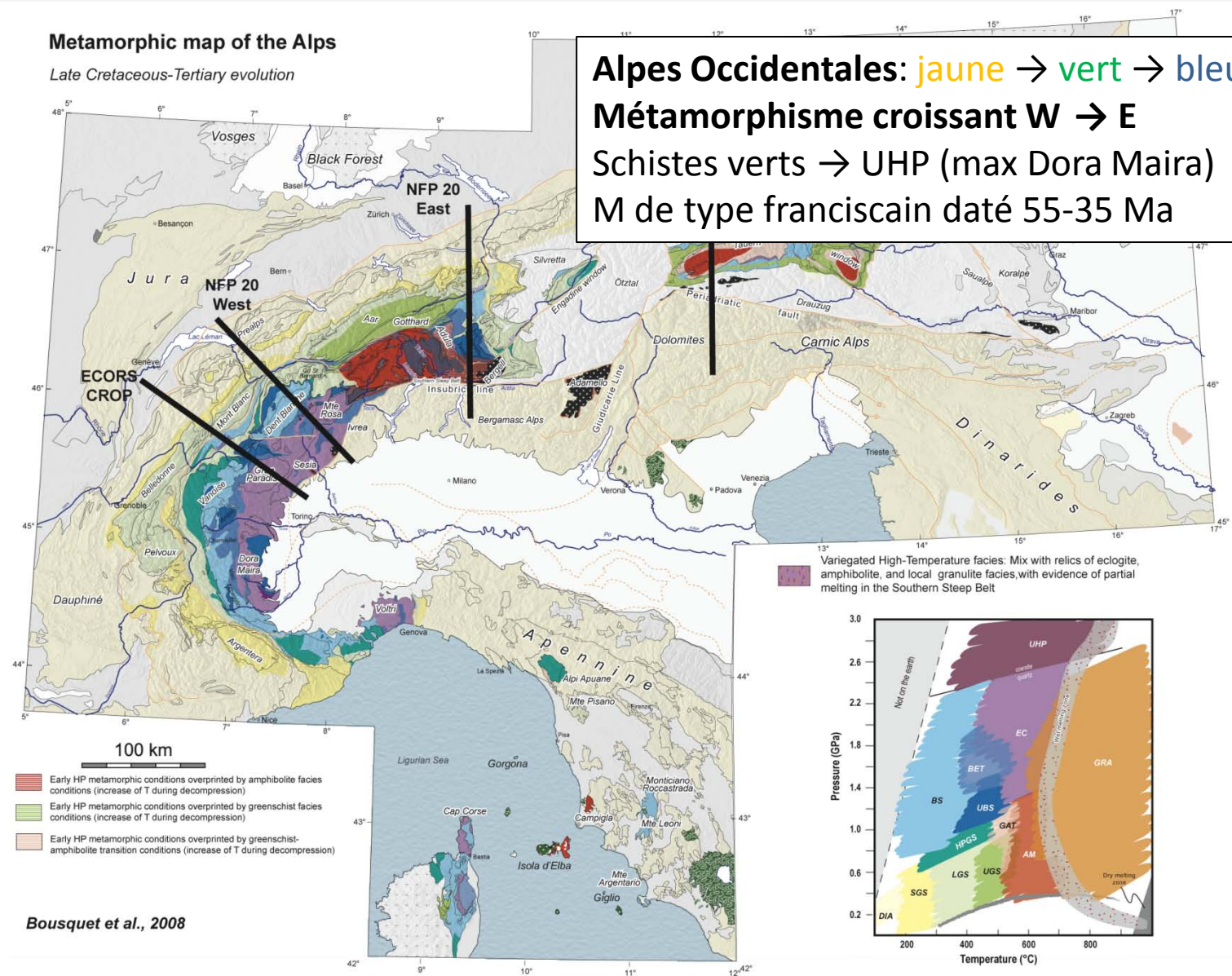
1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Faciès métamorphiques



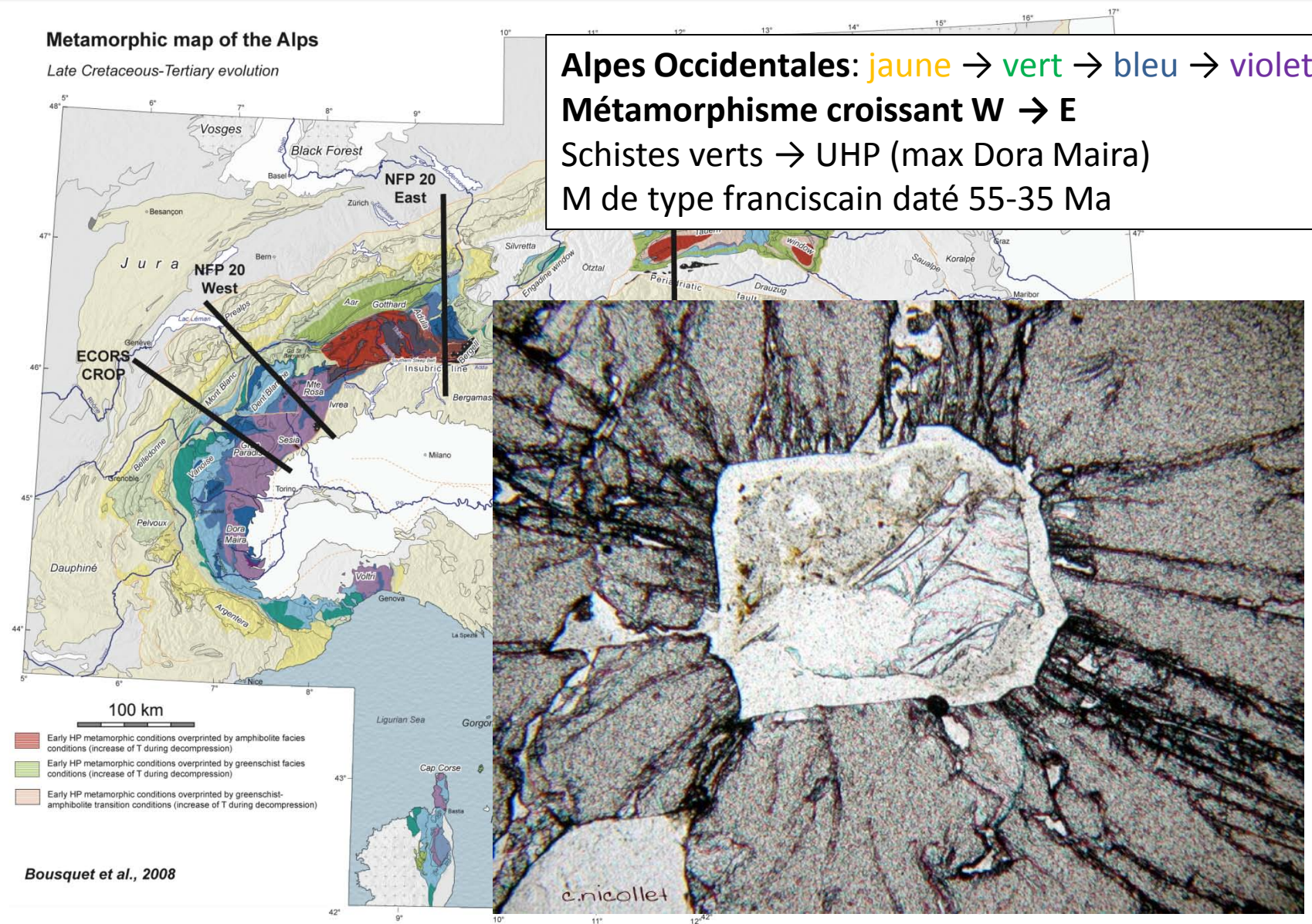
1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Carte du métamorphisme



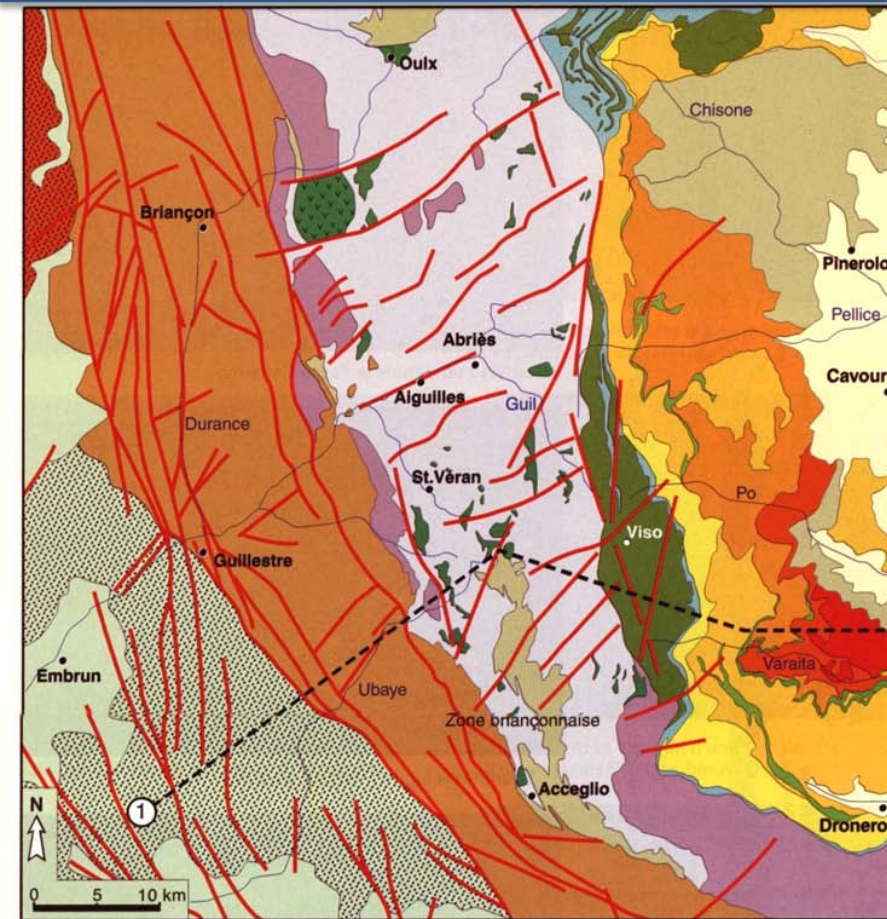
1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Carte du métamorphisme



1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Gradient Franciscain



Zone externe

Zone briançonnaise

- Unités de faciès S. Verts

Couverture Brianç.

- Unités de faciès S. Bleus

Socle briançonnais
unités d'Acceglio, Pinerolo,
Ambin, Sanfront

- Métamorphisme océanique

Ophiolite du Chenaillet

Zone piémontaise

- Faciès Schistes bleus

Ophiolites

Schistes lustrés

Unités de marge

- Faciès Éclogite

Ophiolites

(Viso, Rocciavré...)

Schistes lustrés

Massif de Dora-Maira

- Faciès Éclogite

Unité UHP à coésite

Unité de Rocca Solei

Unité paléoz. sup.

Unités de Dronero

Sampeyre

Couverture de

l'unité de Dronero

Métabasites et

calcschistes

St-Véran, massif du Queyras
Plus haute commune d'Europe (2042 m)



Unité des schistes lustrés (+ ophiolites)

Carte géologique et métamorphique dans le sud des Alpes occidentales (Schwartz, 2001).

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Gradient Franciscain**

Les schistes lustrés

Aspect satiné des micaschistes HP sans mica noir donne le nom aux Schistes lustrés
En général **pas de biotite** (au contraire du métamorphisme MP et BP)

Le mica blanc est la **phengite**

Macroscopiquement phengite = muscovite

Microscopiquement rapport Si/Al est plus élevé chez phengite

Quartz et **chlorite** accompagnent le mica blanc

Métapélites Na : **glaucophane** et **jadéite** sont présents

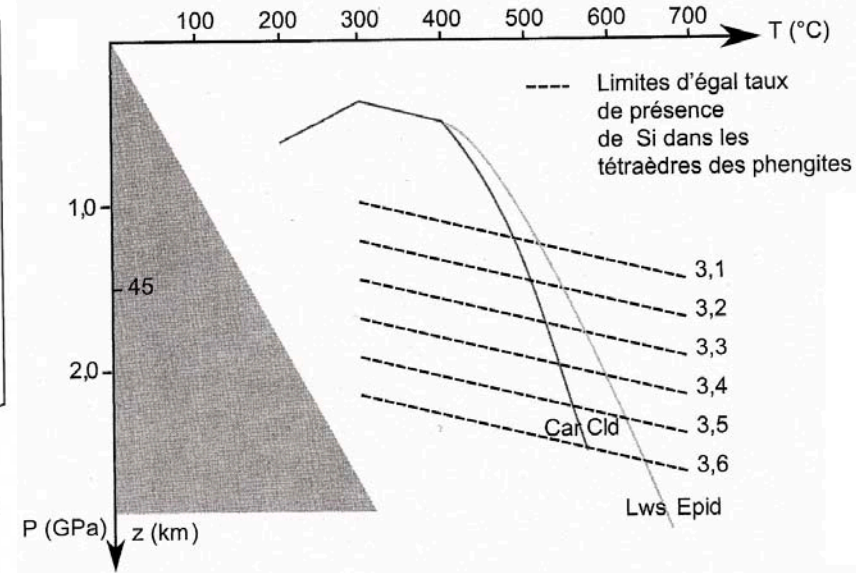
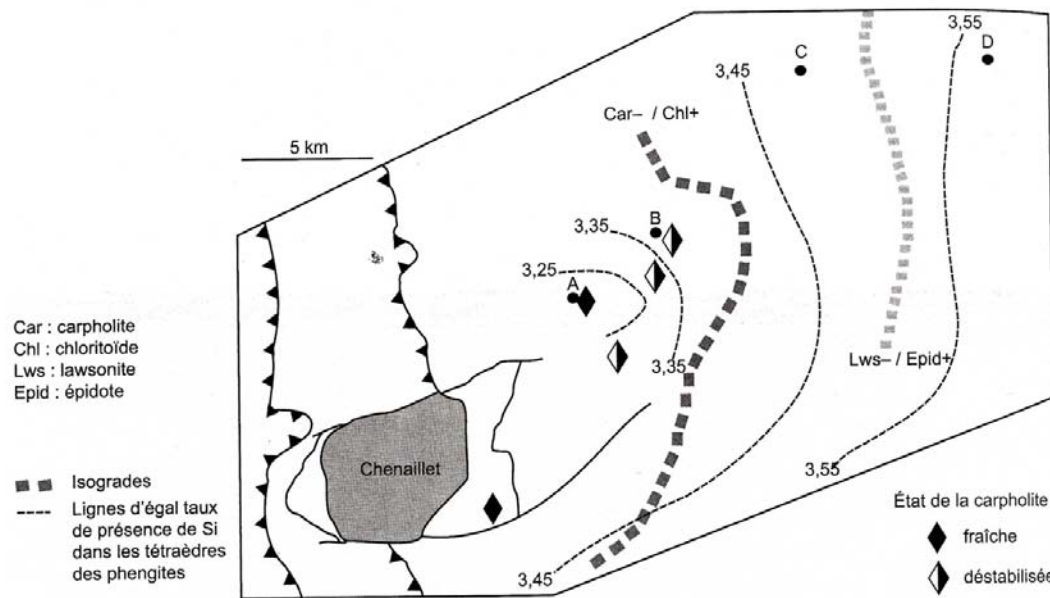
Métapélites peu Na à faibles conditions Schistes bleus : **Carpholite** et **chloritoïde** à $T > 400\text{ °C}$

Métapélites Al-Ca : **Lawsonite** souvent associée à la **carpholite** mais jq $T +$ élevée

Faciès **éclogites** : paragenèse typique = **quartz + phengite + jadéite + chloritoïde + grenat + glaucophane**

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Gradient Franciscain



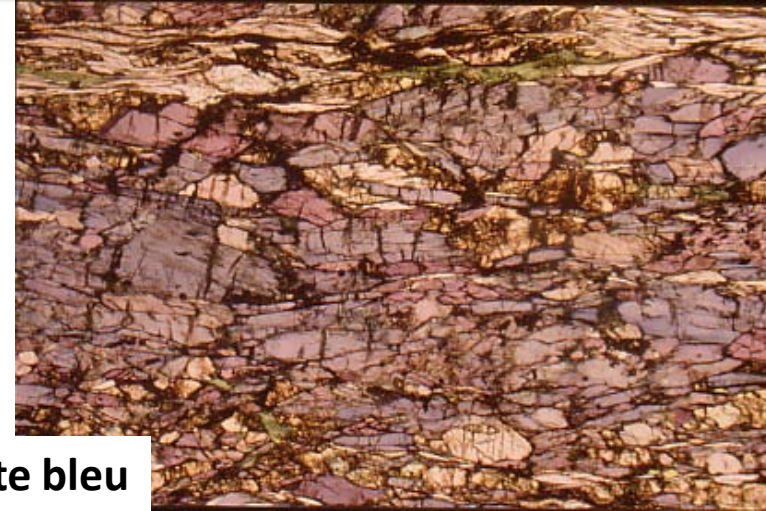
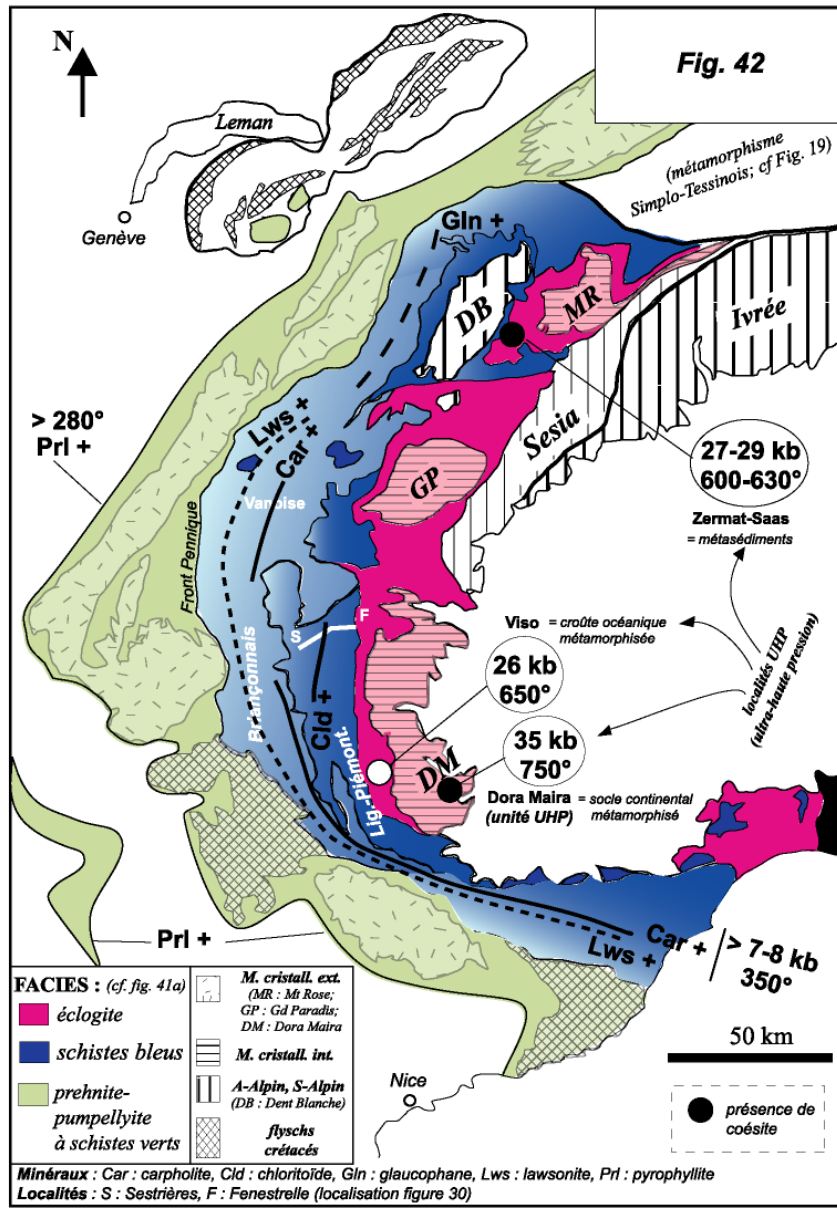
Carte des occurrences de **minéraux index** du métamorphisme dans les **schistes lustrés**.

Domaine de stabilité des minéraux du *document 12* dans le champ *PT*.

Les isogrades carpholite-/epidote+ sont figurés par les lignes épaisses en pointillés. Les pointillés noirs représentent des lignes d'égal occupation des sites tétraédriques de la phengite par Si. L'état de la carpholite (fraîche ou déstabilisée) a également été indiqué.

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Gradient Franciscain



1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Gradient Franciscain**

Méta-ophiolites

Séries ophiolitiques du bassin Liguro-Piémontais jurassique : **basaltes, gabbros, péridotites, serpentinites**

Les métagabbros en boules déca- à hectométriques dans les métasédiments et serpentinites sont souvent peu déformés

C'est la matrice incompetente des métasédiments et serpentinites qui absorbe toute la déformation et les métagabbros se comportent comme des objets durs à l'intérieur de celle-ci

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Gradient Franciscain**

Méta-ophiolites

Séries ophiolitiques du bassin Liguro-Piémontais jurassique : **basaltes, gabbros, péridotites, serpentinites**

Gabbros (à olivine) riches en Mg et Cr jusque des gabbros (et basaltes) riches en Fe et Ti

Ces lithologies sont affectées par M océanique et hydrothermalisme qui influencent la minéralogie des metabasites alpines

Métabasites (Schistes bleus) : Glaucophane, Jadéite, Chlorite, Zoïsite, Phengite, Lawsonite, Sphène

Métabasites (Eclogites) : Omphacite, Grenat, Glaucophane, Zoïsite, $\pm$ chlorite, Mg-chloritoïde, talc, disthène,

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Gradient Franciscain**

Méta-ophiolites

Peu de déformation $\Rightarrow$ peu de perméabilité $\Rightarrow$ peu d'hydratation

Peu de déformation et peu d'hydratation $\Rightarrow$ faible cinétique de réactions

Donc recristallisation métamorphique incomplète avec des **textures coronitiques** qui favorisent l'étude des mécanismes réactionnels

Dans ces roches, les sites des minéraux magmatiques constituent autant de **microsystèmes**

Des **réactions de pseudomorphose** se développent à partir de chaque minéral magmatique et des **réactions coronitiques** marquent la frontière entre ces différents minéraux magmatiques

Eclogites : agrégats de jadéite, zoïsite, quartz remplacent le plagioclase ; le Cpx se transforme progressivement en omphacite ; le grenat a souvent une disposition coronitique entre les 2 minéraux magmatiques ; talc et trémolite se forment à partir de l'olivine

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Gradient Franciscain**

Méta-ophiolites

L'hydratation de ces roches est acquise durant le métamorphisme océanique et c'est elle qui contrôle l'évolution métamorphique de HP avec un plagioclase transformé suivant les conditions en lawsonite ou jadéite+zoïsite

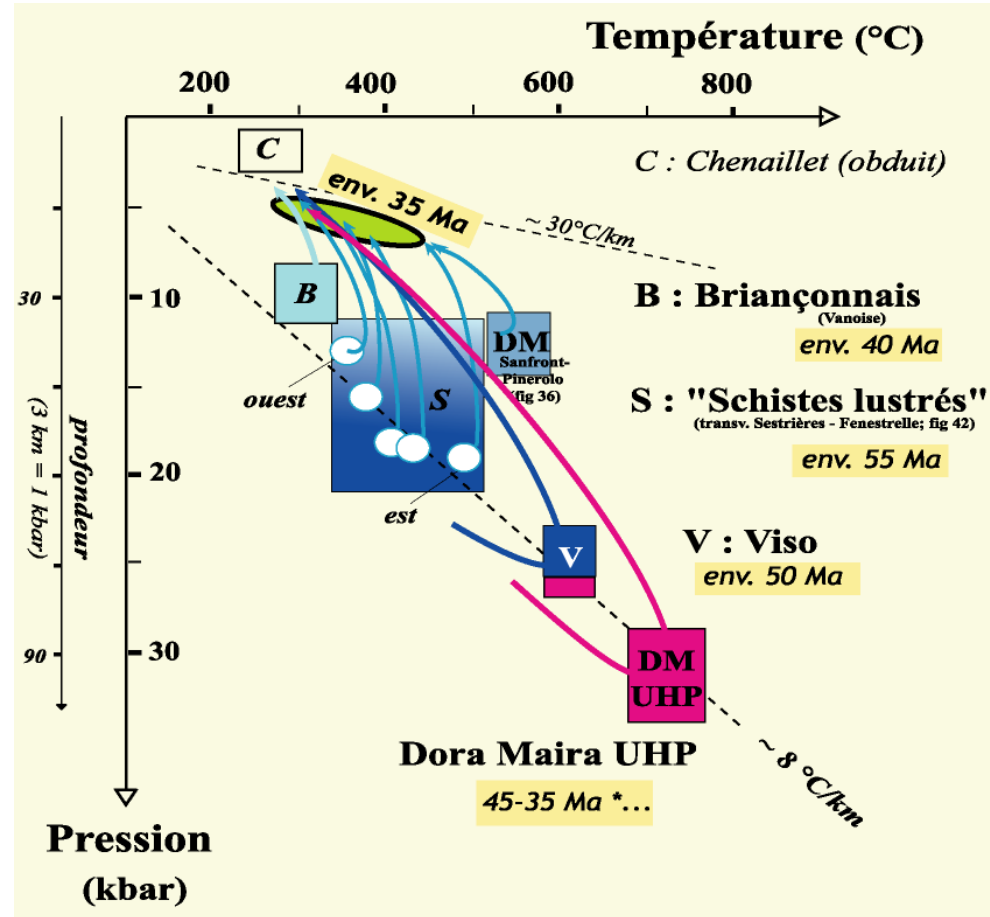
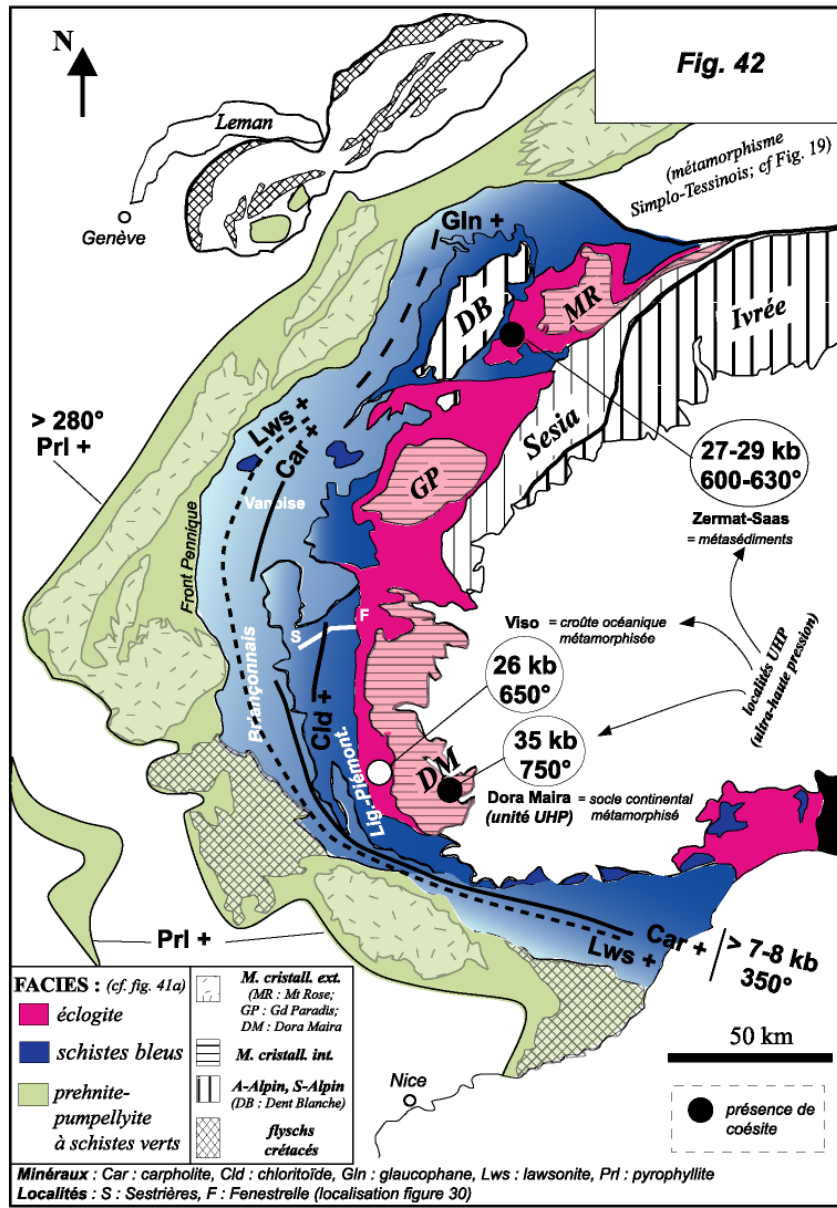
L'omphacite est un Cpx Na typique du faciès Eclogite. Il s'agit d'une solution solide de type Diopside-Hédenbergite (Cpx-magm) – Jadéite (pôle Na)

La jadéite se forme à partir du pôle Na du plagio : Albite = Jadéite + Quartz

Saussuritisation = altération hydrothermale de plagioclase en chlorite + albite + épidote + micas

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Gradient Franciscain



1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Gradient Franciscain**

Le métamorphisme sur la transversale Queyras-Viso-Dora Maira dans les Alpes Occidentales

Sur une coupe W-E, le domaine dauphinois est ici représenté par le massif cristallin du Pelvoux et sa couverture secondaire. Il est séparé des zones internes (domaines briançonnais et piémontais) par le chevauchement du front pennique. Le domaine piémontais est constitué de trois unités tectoniques majeures formées lors de la fermeture de l'océan ligure (Chenaillet, Queyras, Viso et Dora Maira).

2.1. Unité des Schistes lustrés du Queyras

Lentilles ophiolitiques emballées dans des sédiments océaniques d'âge jurassique à crétacé

Ensemble métamorphisé dans les conditions du faciès Schistes bleus

Unités des Schistes lustrés = prisme d'accrétion à l'échelle crustale où s'accumulent les sédiments du plancher océanique qui ne sont pas entraînés dans le manteau par subduction

Augmentation progressive du M d'ouest en est (300 – 500 °C, 1.2 – 1.5 GPa) avec :

Gln+Ab+Lws

Gln+Jd+Lws

Gln+Jd+Zs

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Gradient Franciscain

Le métamorphisme sur la transversale Queyras-Viso-Dora Maira dans les Alpes Occidentales

2.2. Unité éclogitique du Viso

Sous les Schistes bleus des Schistes lustrés

Limite tectonique par une faille normale ductile

Viso repose sur massif cristallin interne UHP de Dora Maira par autre faille normale ductile

Viso = unités plurikilométriques de serpentinites et metabasites imbriquées avec peu de métasédiments

450 – 640 °C, 1.2 – 2.4 GPa

Exhumation : Eclogites → Schistes bleus → Schistes verts

2.3. Massif cristallin interne de Dora Maira

Portion de la marge continentale européenne

Globalement métamorphisée à l'alpin dans des conditions de faible degré du faciès Schistes verts

Contient des reliques de très HP = métapélites schistes blancs à talc + disthène + quartz + phengite + rutile + grenat Mg

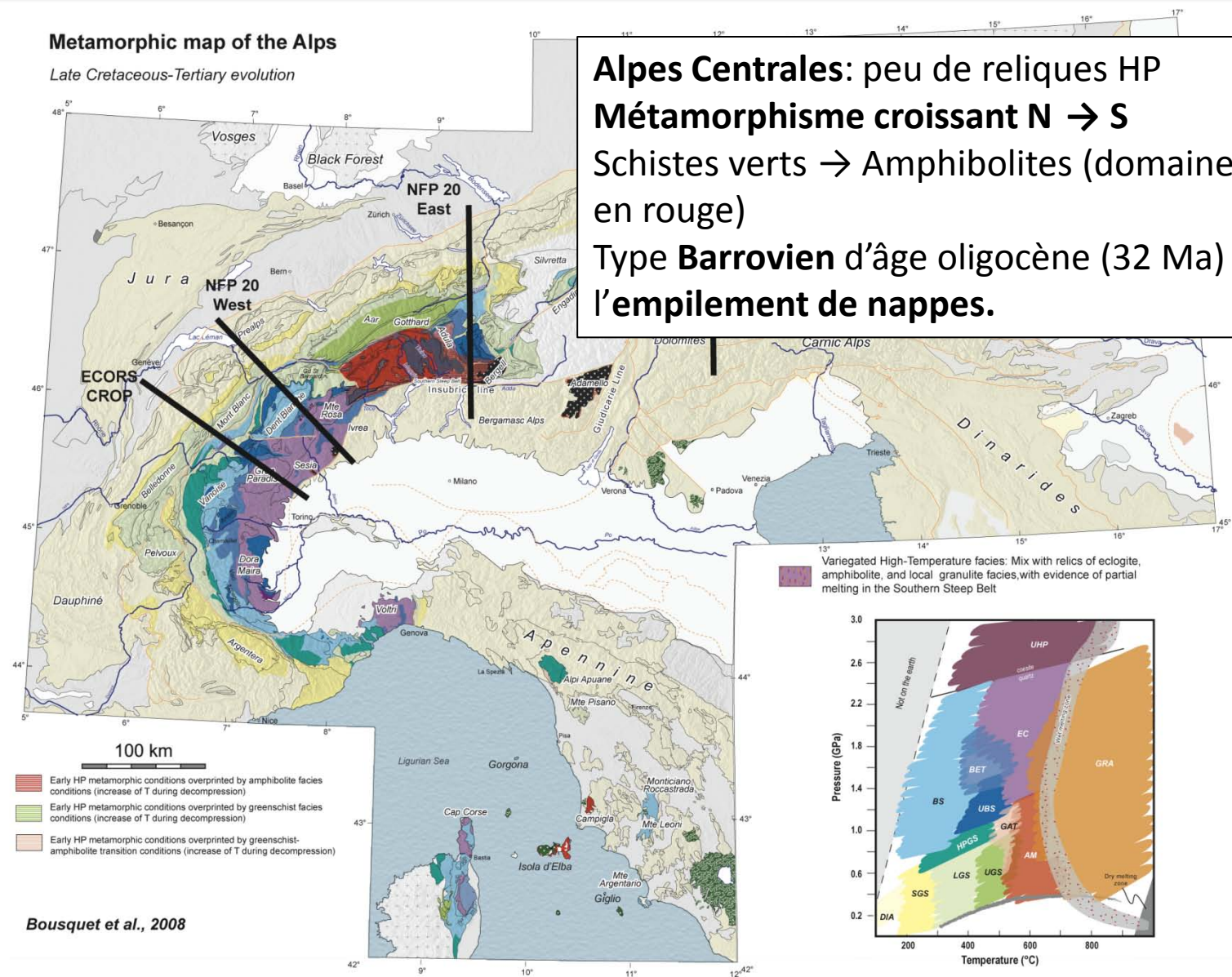
Les cristaux de grenat contiennent en inclusion des reliques de coésite partiellement transformées en quartz

Coésite stable à $P > 2.7$ GPa (> 90 km), minéral isograde UHP

Autres minéraux indicateurs d'UHP : ellenbergite, ...

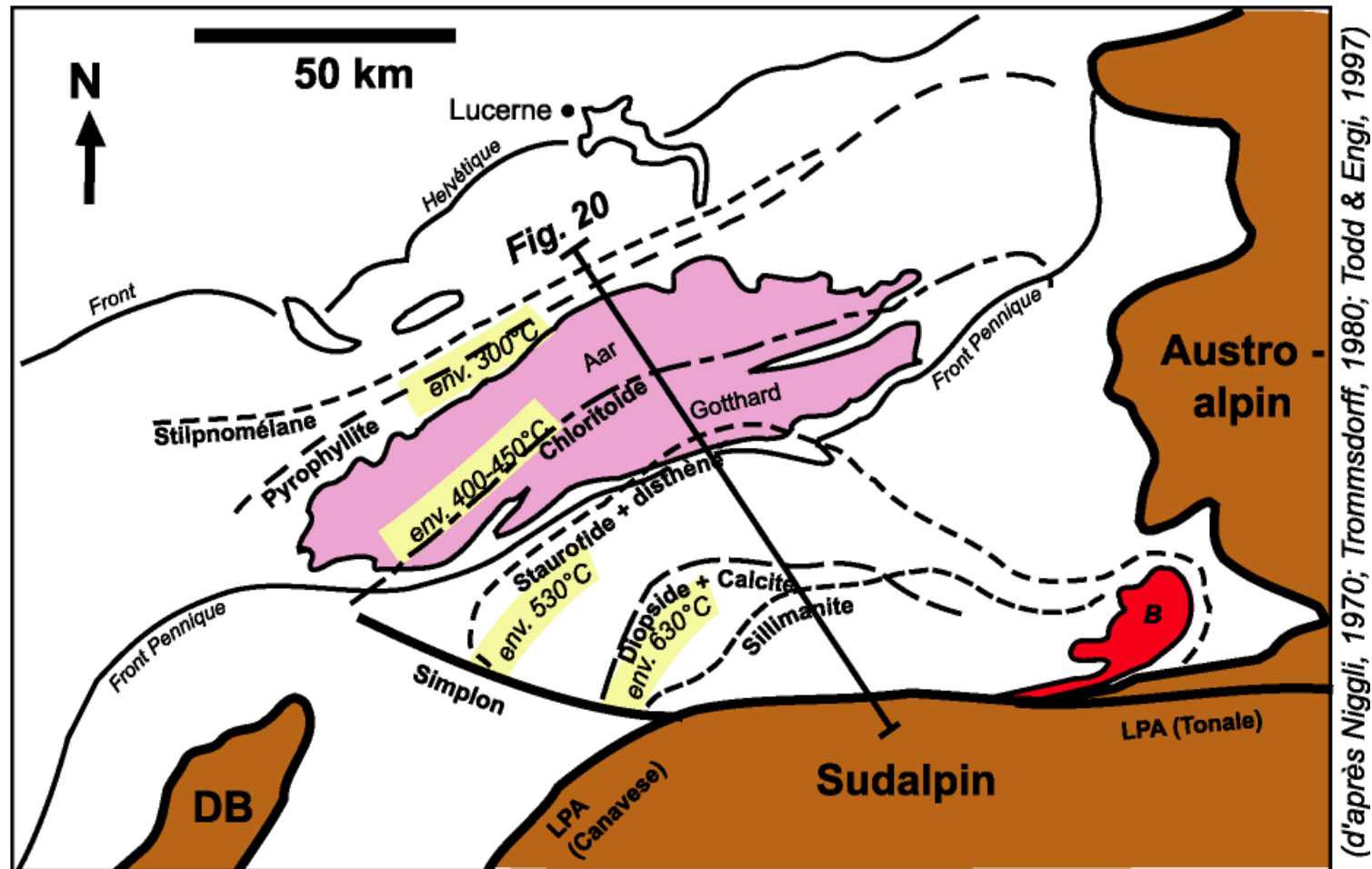
1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Alpes Centrales



1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Gradient Barrovien



1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Récapitulons

Deux types principaux de **signature métamorphique**:

Les **Alpes Occidentales** sont marquées par un **métamorphisme HP-BT (70-30 Ma)** lié à la **subduction successive** de l'**océan piémontais**, du **sub-continent briançonnais**, de l'**océan (?) valaisan** et de la **plateforme européenne** **sous** la **plaque apulienne** ;

Dans les **Alpes Centrales**, on n'observe que des **reliques** de ce **métamorphisme HP-BT**;

Cette région a subi de **manière tardive (35-15 Ma)** un **métamorphisme MP-HT** (jusqu'à la **fusion partielle** localement) lié à de l'**accrétion crustale** résultant de la **collision** entre les deux masses continentales.

1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: **Métamorphisme de contact**

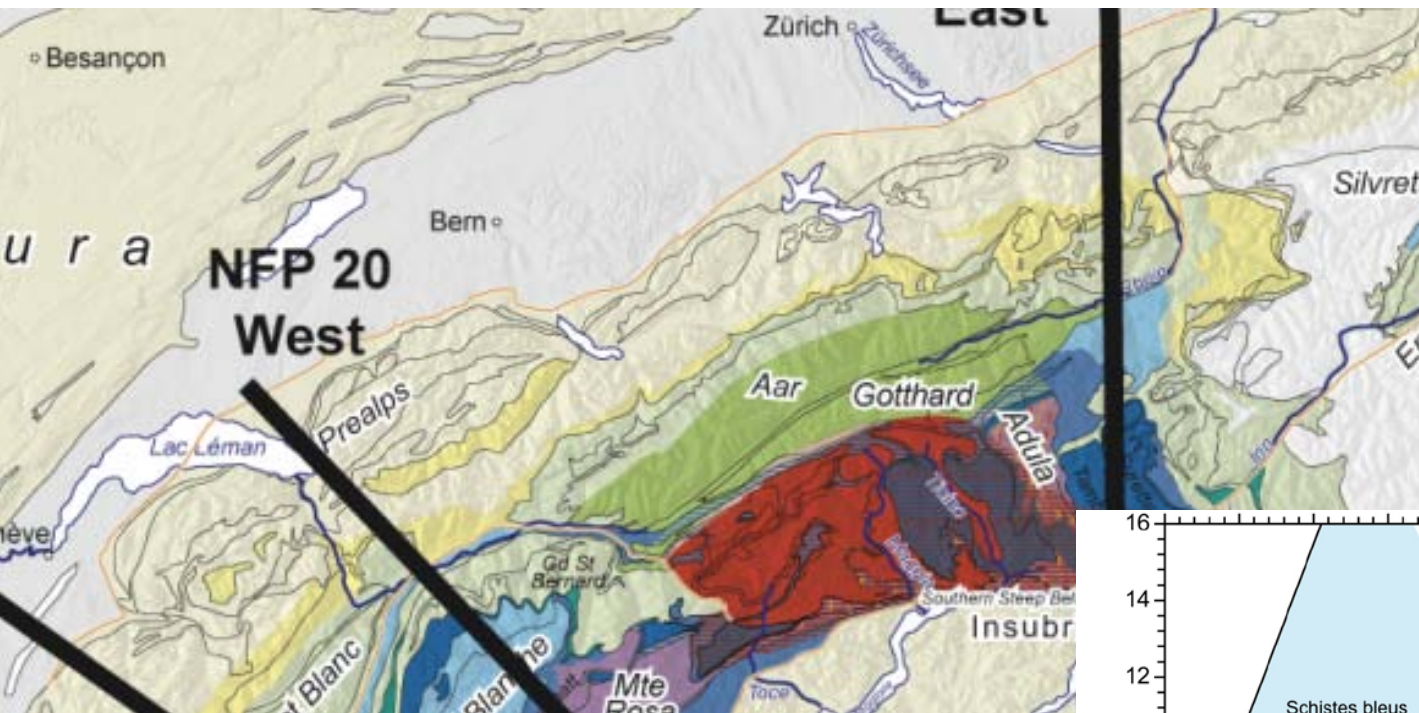


Intrusion de tonalite Oligocène (32 Ma) le long de la **ligne insubrienne ;**

Auréole métamorphique avec présence de Andalousite, Diopside, Olivine, Tremolite, Talc, ...

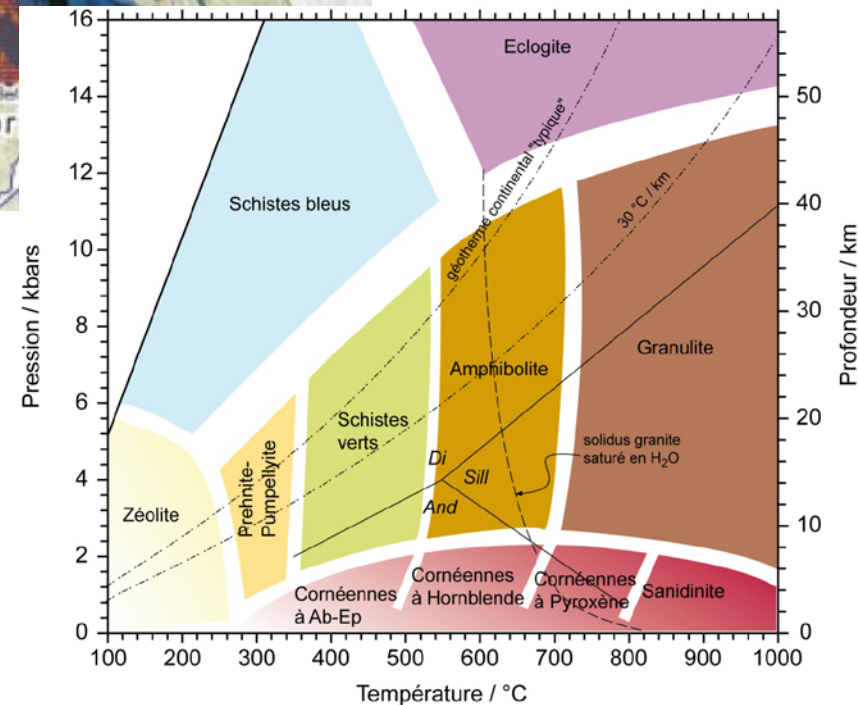
1. Géologie alpine

3. Le métamorphisme dans les Alpes: Faible degré



Transition Diagenèse – F. Schistes Verts

⇒ **Anchizone**



2. Le métamorphisme de faible degré

1. Définitions

2. Le métamorphisme de faible degré

1. Définitions

Le **métamorphisme** est un **processus de changement** d'une roche sous l'influence de **variations de *P* et *T*** au sein de la croûte terrestre.

La difficulté du pétrologiste est de **comprendre** et d'**interpréter les changements** enregistrés par la roche en termes de **texture, minéralogie** et **chimie**, en référence avec l'**évolution géodynamique**.

Une des principales difficultés dans le **métamorphisme de faible degré** est que les signes de **recristallisation** ne sont pas évidents :

- ⇒ Il n'y a **pas de transition franche** entre la **diagenèse** et le **métamorphisme**;
- ⇒ Il faut faire appel à des **techniques d'observations et d'analyse très fines**.

2. Le métamorphisme de faible degré

1. Définitions: **Contexte**

Ce type de métamorphisme va affecter des roches situées dans les **domaines superficiels** de la lithosphère.

Tout type de roche peut être concerné:

Roches sédimentaires argileuses $\Rightarrow$ **Métopélites**

Roches basiques $\Rightarrow$ **Métabasites**

...

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Rappels sur la minéralogie des argiles

Un des processus essentiel va être les **transformations des minéraux argileux** vers les **micas**.

Minéraux en couches en raison d'une **trame silicatée plane** (structure en **feuillets**) ;

Alternance de couches tétraédriques (Si, Al) et **octaédriques** (Al, Mg) + OH ;

Minéraux dioctaédriques: où l'électroneutralité est assurée par des **éléments trivalents** (Al^{3+}) dans les **couches octaédriques** ;

Minéraux trioctaédriques: où l'électroneutralité est assurée par des **éléments divalents** (Mg^{2+}) dans les **couches octaédriques** ;

Feuillets à 2 couches (TO, 7 Å): kaolinite (Al), serpentines (Mg)

Feuillets à 3 couches (TOT, 10 Å): smectites, illites, micas (Al), talc (Mg)

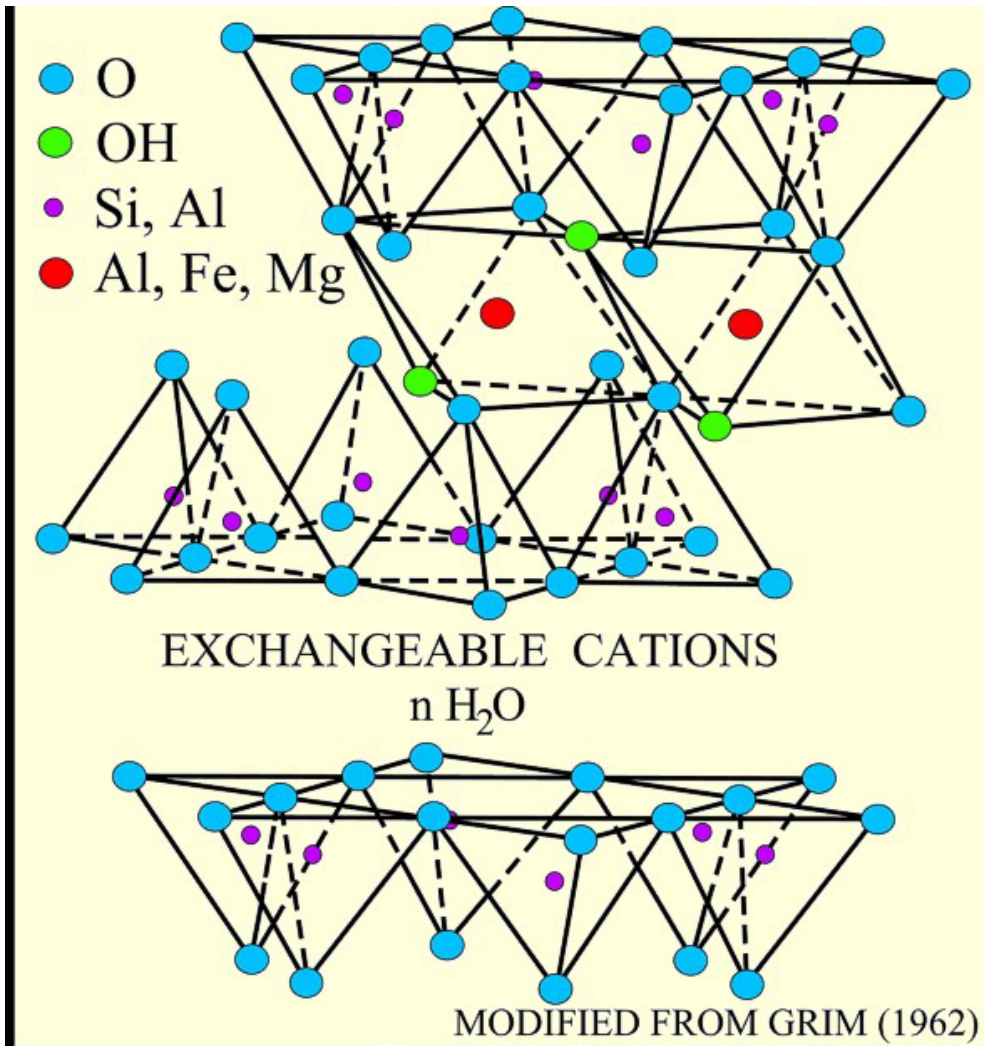
Feuillets à 4 couches (TOTO, 14 Å): chlorite

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Structure des phyllosilicates

Feuillets à 3 couches, minéraux dioctaédriques:

pyrophyllite → smectite → illite → muscovite



Couche à cavités tétraédriques occupées par Si ;

Couche à cavités octaédriques occupées par Al ;

Couche à cavités tétraédriques occupées par Si ;

Espace interfoliaire ;

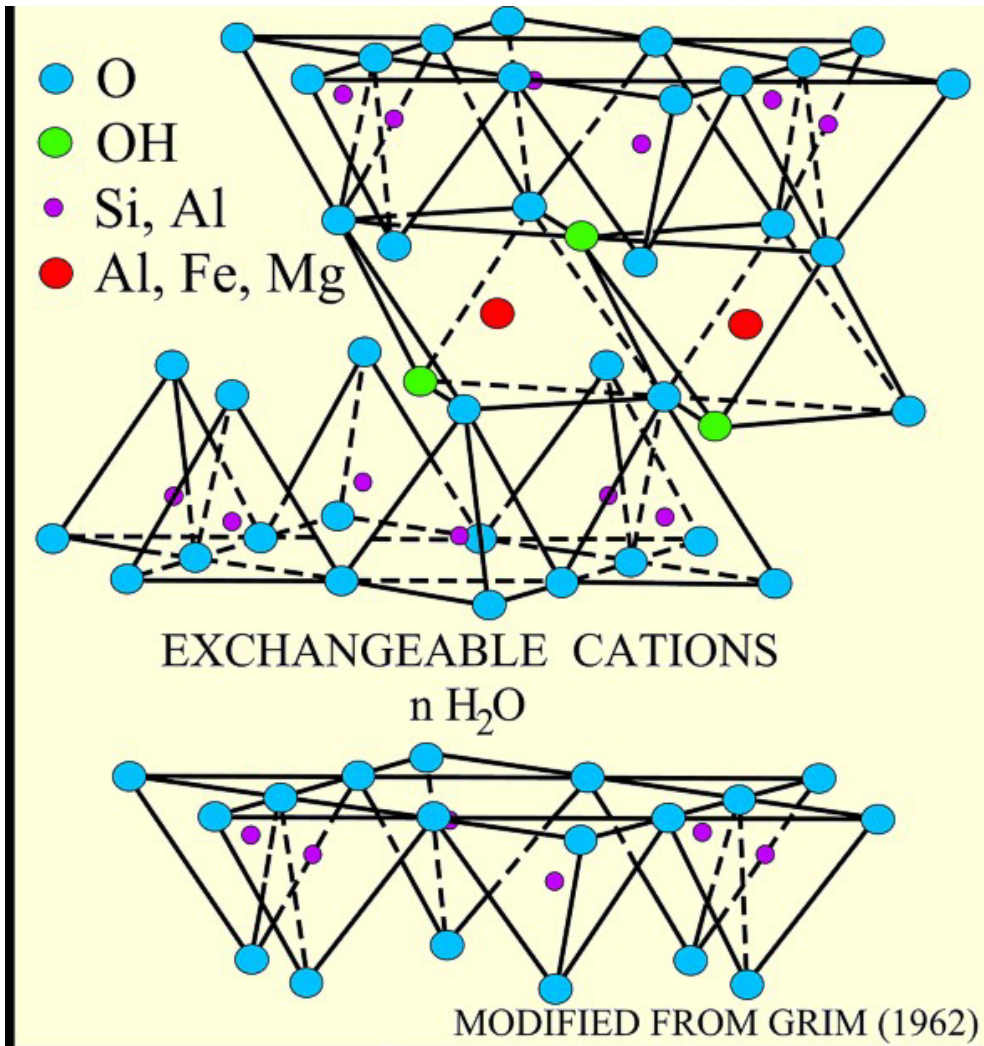
Couche à cavités tétraédriques occupées par Si ...

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Structure des phyllosilicates

Feuillets à 3 couches, minéraux dioctaédriques:

pyrophyllite → smectite → illite → muscovite



Feuillet de base $[(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{6-}$

Electroneutralité assurée par **2** Al^{3+} :

⇒ **Pyrophyllite**: $\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]\text{OH}_2$

L'électroneutralité peut être

perturbée par des **substitutions** $\text{Si} \rightarrow \text{Al}$
dans la couche tétraédrique

⇒ **Equilibre électrique** réalisé par la
présence d'**ions** dans l'**espace**
interfoliaire.

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Substitution et électroneutralité

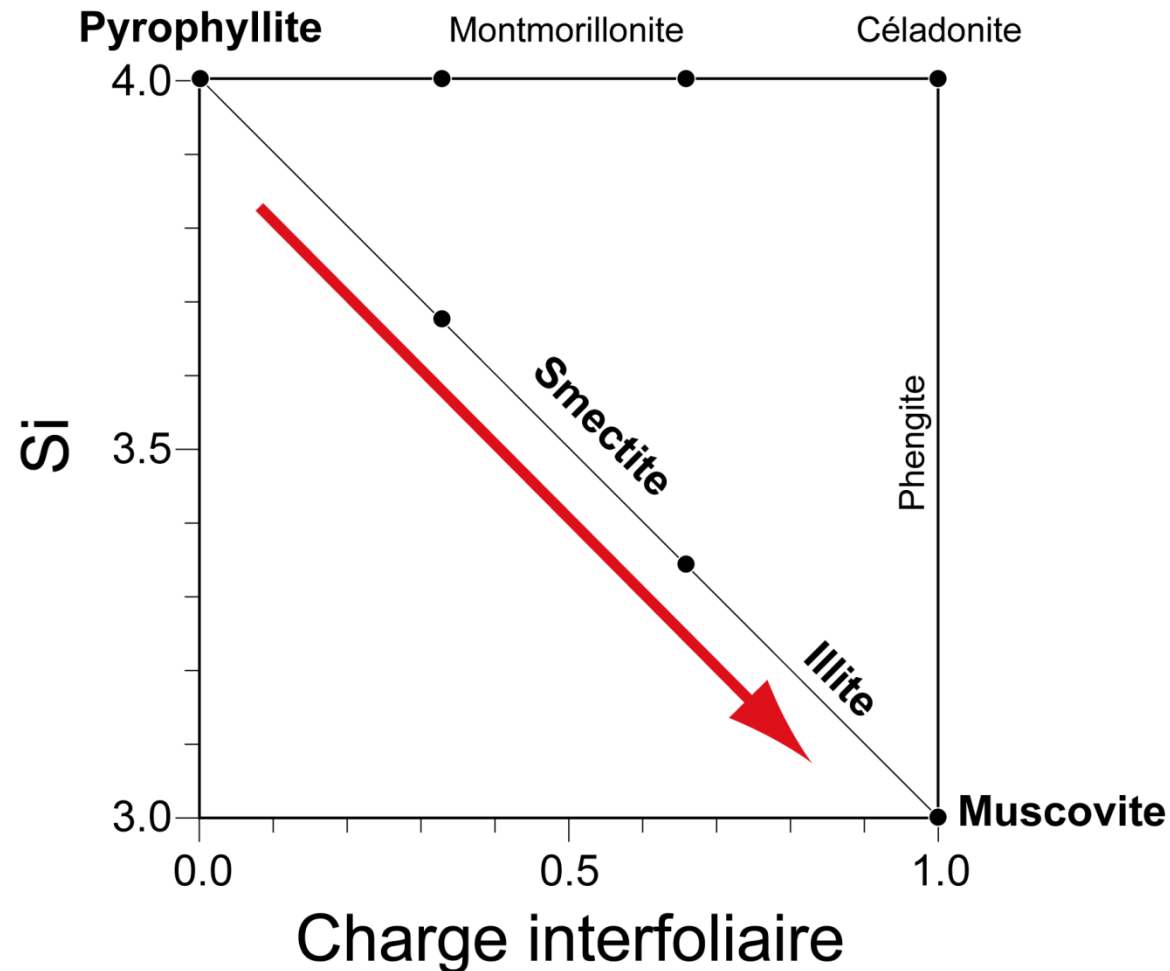
En augmentant le taux de substitution (la limite entre les différentes familles est assez arbitraire):

 Micas	Pyrophyllite	Tx de substitution = 0	$\text{Al}_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
	Smectites	Tx de substitution = 0.2 à 0.6	Couche de molécules d'eau $\text{K}^+ \ll \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$
	Illites	Tx de substitution = 0.6 à 0.9	$\text{K}^+ < \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}$
	Muscovite	Tx de substitution = 1.0	$\text{KAl}_2[\text{Si}_3\text{Al}](\text{OH})_2$
	Paragonite	Tx de substitution = 1.0	$\text{NaAl}_2[\text{Si}_3\text{Al}](\text{OH})_2$
	Margarite	Tx de substitution = 2.0	$\text{CaAl}_2[\text{Si}_2\text{Al}_2](\text{OH})_2$

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Evolution des TOT dioactédriques

L'augmentation du taux de substitution se produit avec l'augmentation du degré de métamorphisme et donc des **conditions PT** :



2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Interstratifiés I/S

Selon Nadeau et al. (1984), la **conversion** de la **smectite** en **illite** est un mécanisme de **recristallisation** suite à une **dissolution de la smectite** et la **néoformation d'illite** au sein d'une population **sans stades intermédiaires**.

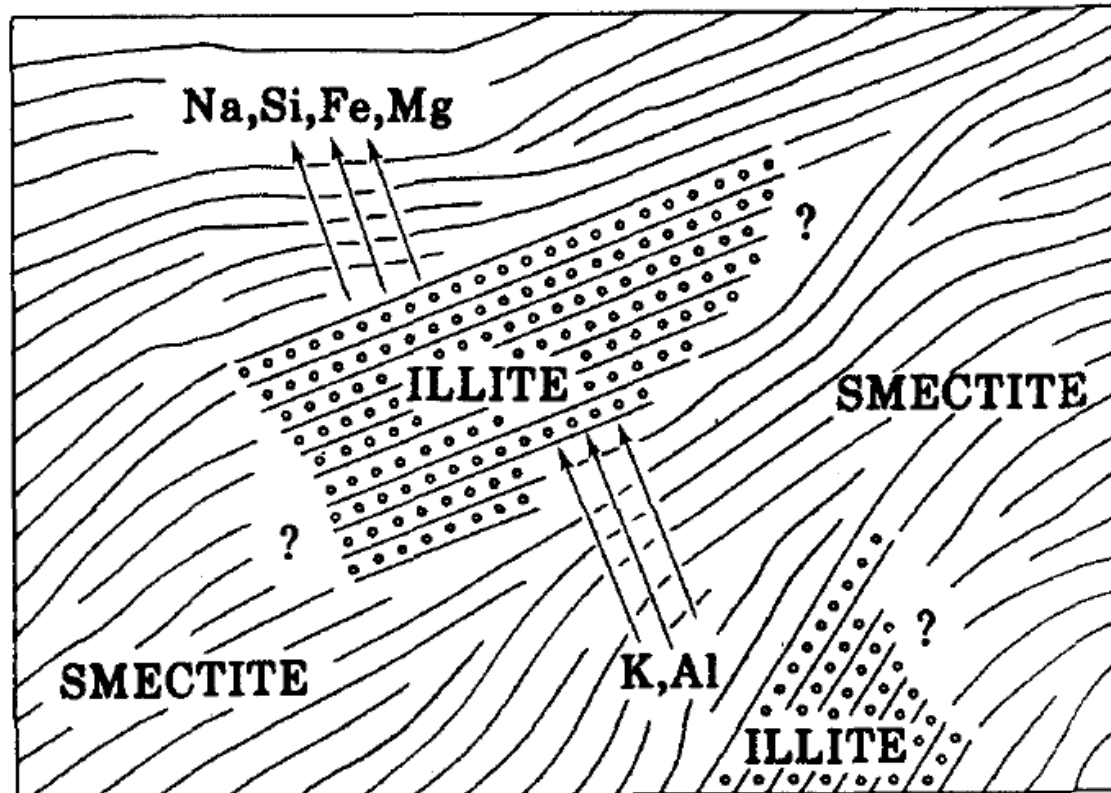


Figure 7.5 – Modèle de conversion des smectites en illites: Observations au microscope électronique par transmission (MET) confirmant la transformation directe de smectite en illite (d'après Ahn et Peacor 1986 repris de Chamley, 1989).

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Interstratifiés I/S

Les **smectites** dans les illite-smectite (I-S) ont une texture en vague avec de nombreuses dislocations ;

Les **illites** dans les I-S ne comportent pas de défaut ;

Les smectites et les illites coexistent sous forme de **domaines séparés**.

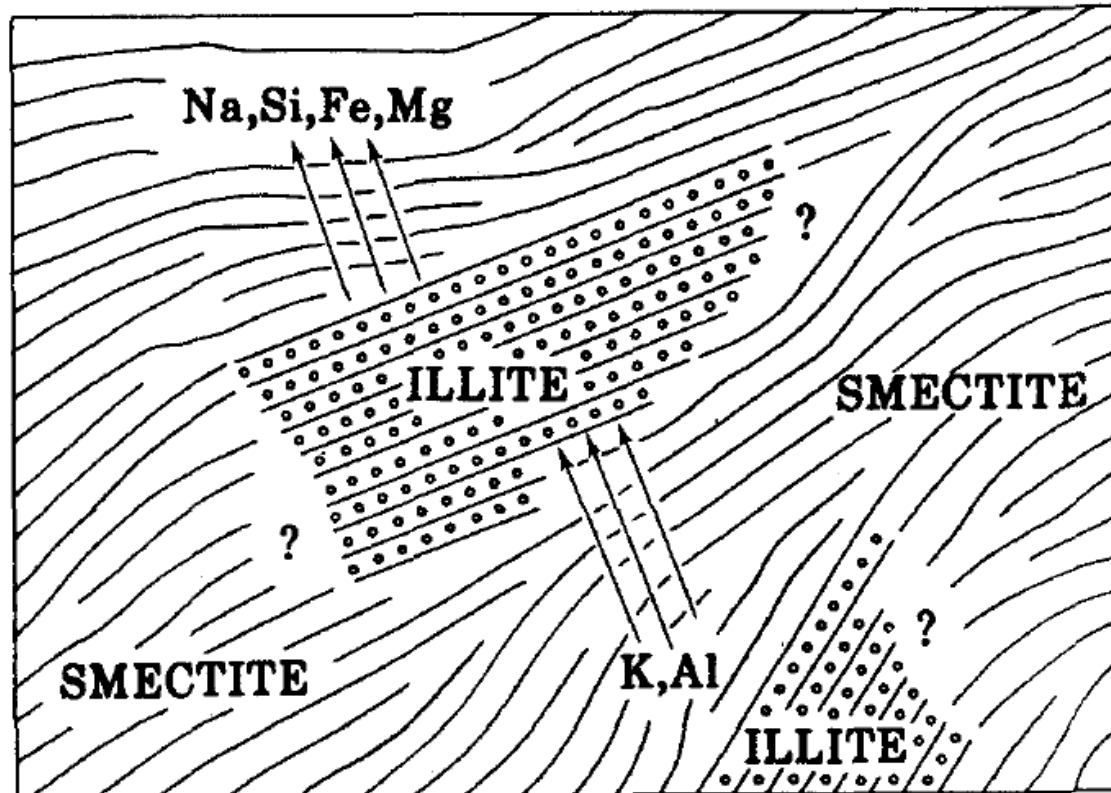
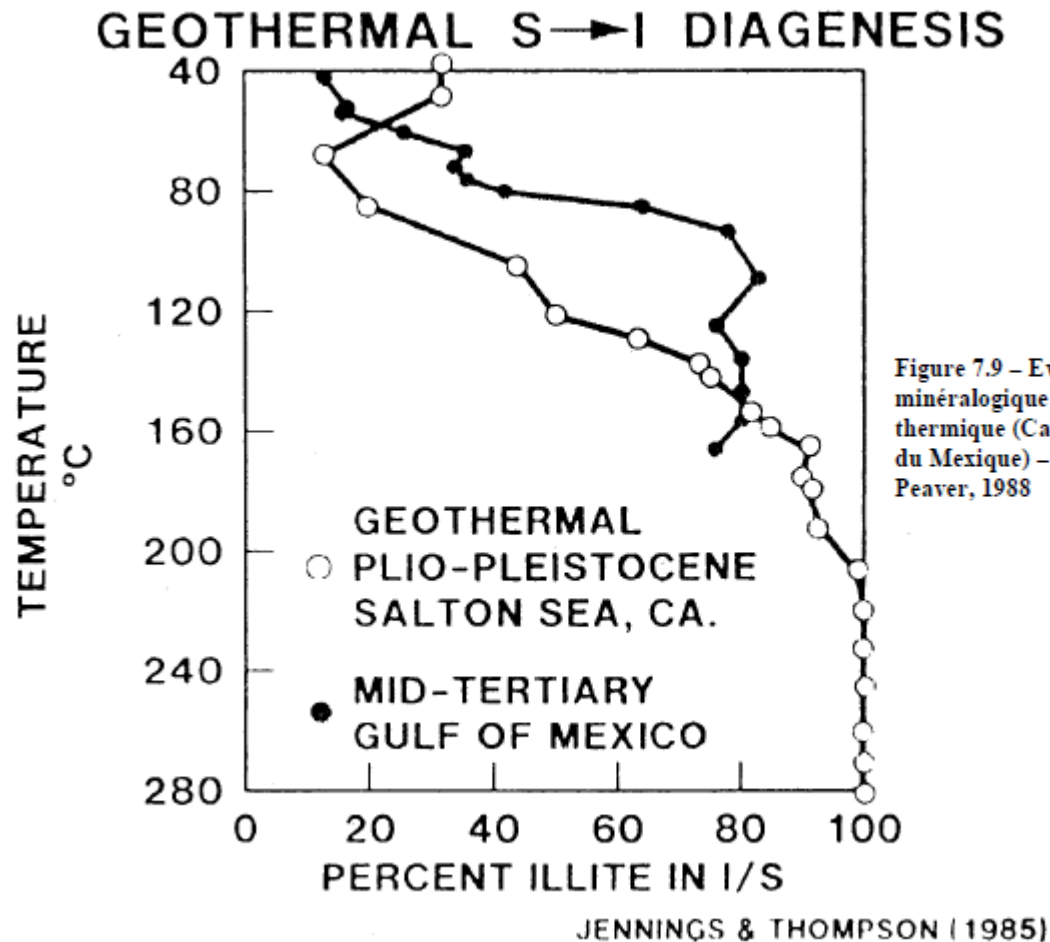


Figure 7.5 – Modèle de conversion des smectites en illites: Observations au microscope électronique par transmission (MET) confirmant la transformation directe de smectite en illite (d'après Ahn et Peacor 1986 repris de Chamley, 1989).

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: % d'illite dans I/S

Avec l'augmentation de T , le fraction d'illite augmente.



2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Cristallinité de l'illite (DRX)

La fraction de smectite diminue avec la température:

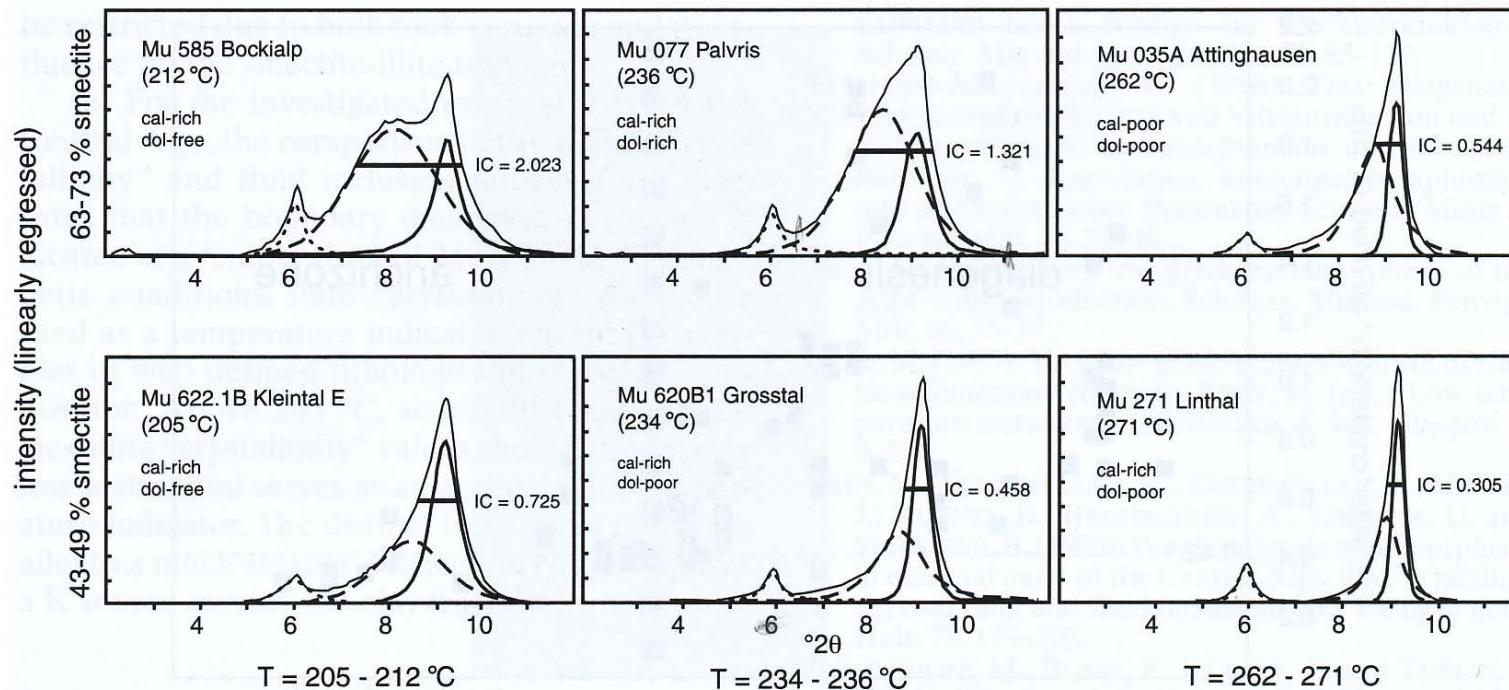
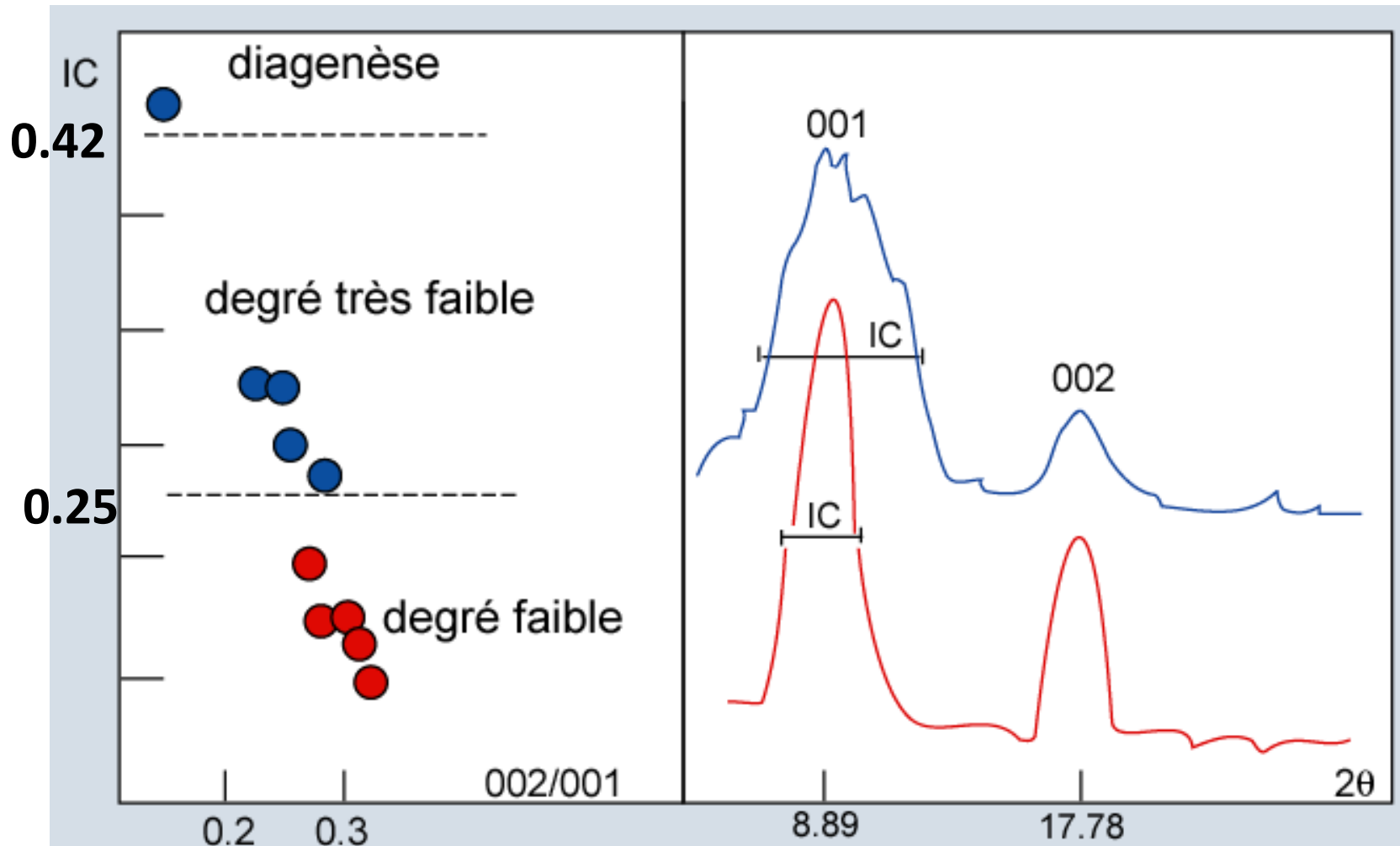


Fig. 9 Development of illite “crystallinity” with increasing fluid inclusion homogenization temperature at different contents of the smectitic phase (taken from deconvolution fitting). For the different stroke patterns, see Fig. 6. Note the different carbonate and dolomite contents at high smectitic phase content, but constant compositional parameters at low smectitic phase content.

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Cristallinité de l'illite (DRX)

Il y a de plus une **réorganisation** de la **structure minérale** qui devient **plus ordonnée** :



(d'après Kornprobst, 1994)

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: **Pouvoir réflecteur de la vitrinite**

La **vitrinite** est des principaux constituants des **charbons** ;

La **vitrinite** est un type de **macéral** (un macéral étant en géochimie des charbons ce que les minéraux sont aux roches) ;

La **vitrinite** a un **aspect vitreux** et dérive du **matériel cellulaire ligneux** des plantes à l'origine des charbons ;

La **vitrinite** se forme **diagénétiquement** par l'**altération thermique** de la lignine et la cellulose des plantes ;

Elle est donc fréquemment présente dans les **roches sédimentaires riches en matière organique** comme les **argiles** et les **marnes d'origine terrigène**.

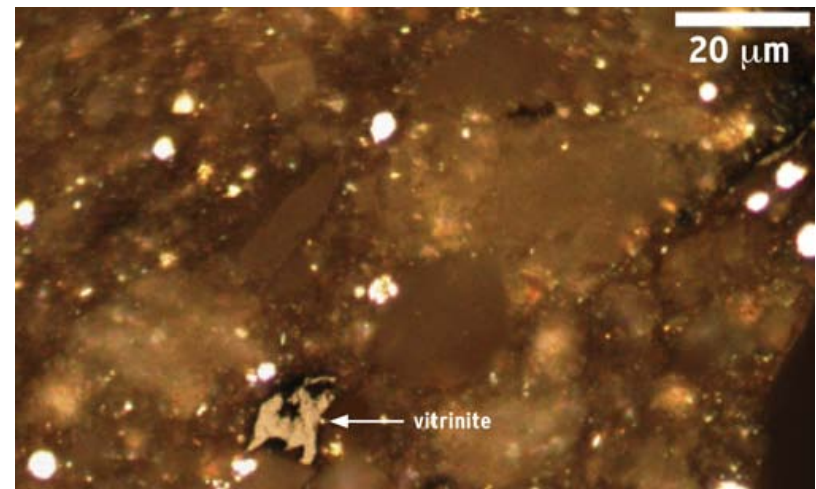
2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: **Pouvoir réflecteur de la vitrinite**

La méthode consiste à **mesurer le pourcentage de lumière incidente** qui est **réfléchi**e par le macéral étudié ;

Cette **valeur** de PRV **augmente** avec le **degré de maturation** et donc de **température** atteinte durant le **métamorphisme** ou la **diagenèse** ;

Cette méthode est largement utilisée par les **géologues pétroliers** avec les débuts de la **génération d'huile** qui correspondent à une réflectance de **0.5-0.6 %** et la fenêtre à huile qui se termine vers **0.85-1.1 %**.



2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: **Pouvoir réflecteur de la vitrinite**

Degré de maturation et température :

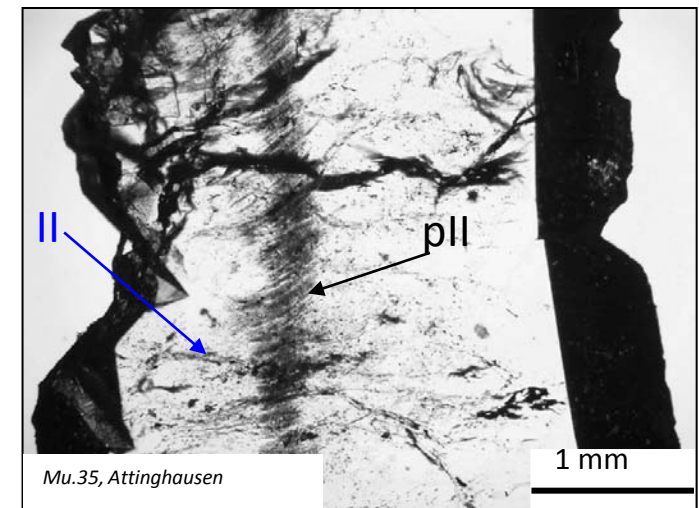
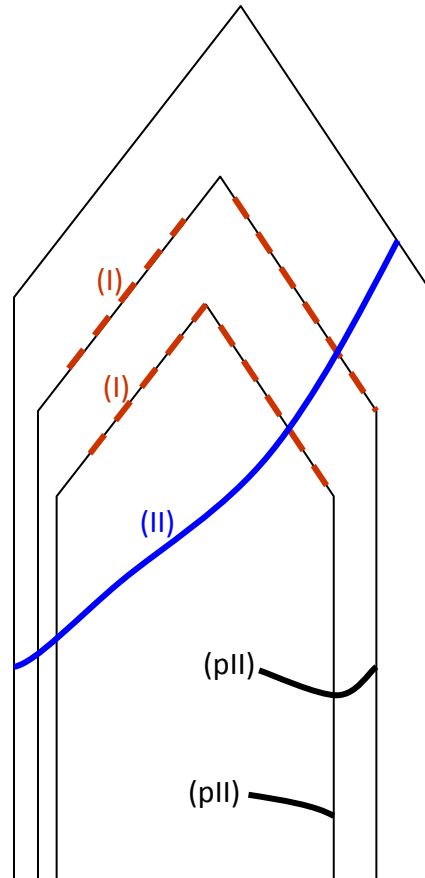
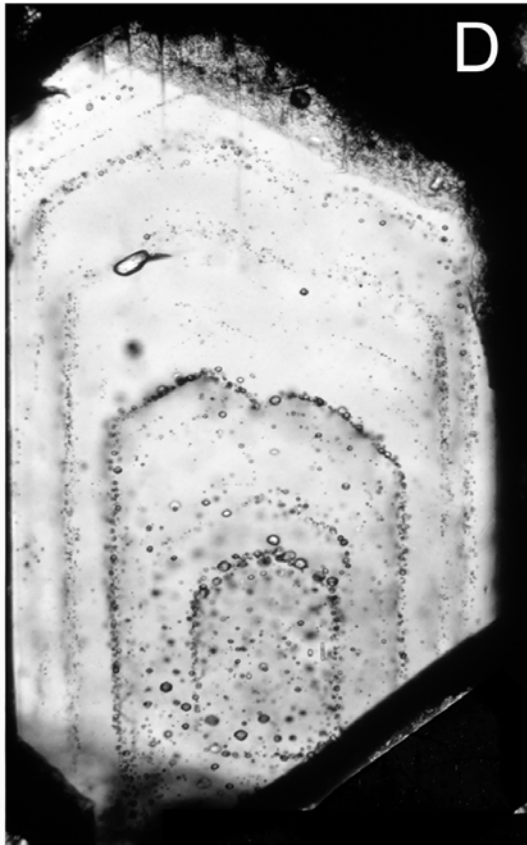
Zone	Type de charbon	% réflexion
Diagenèse	Tourbe	0.2 – 0.3
	Lignite	0.3 – 0.4
	Houille	0.4 – 1.9
	Semi-anthracite	1.9 – 2.5
Anchimétamorphisme	Anthracite	2.5 – 6.0
	Meta-anthracite	6.0 – 8.0
Epimétamorphisme	Graphite	> 8.0

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Inclusions fluides

Echantillon d'un fluide présent durant l'**histoire géologique** de la roche :

- ✓ **Durant** la croissance du minéral: **Inclusions primaires** et **pseudo-secondaires**
- ✓ **Après** la croissance du minéral: **Inclusions secondaires**



2. Le métamorphisme de faible degré

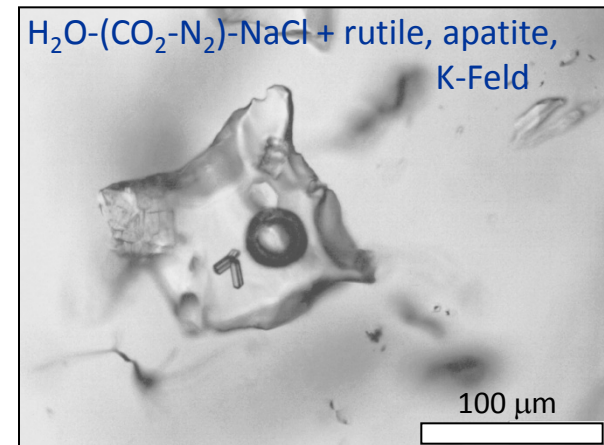
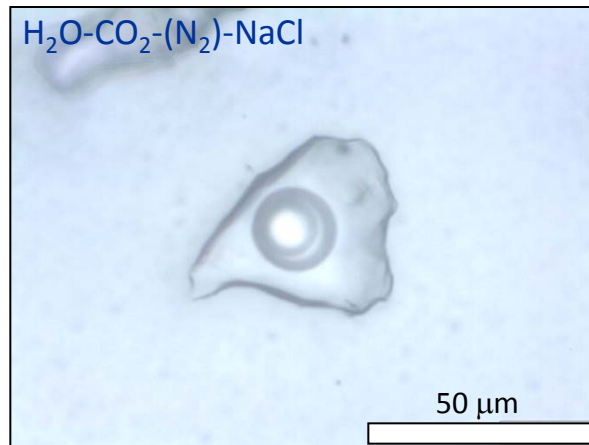
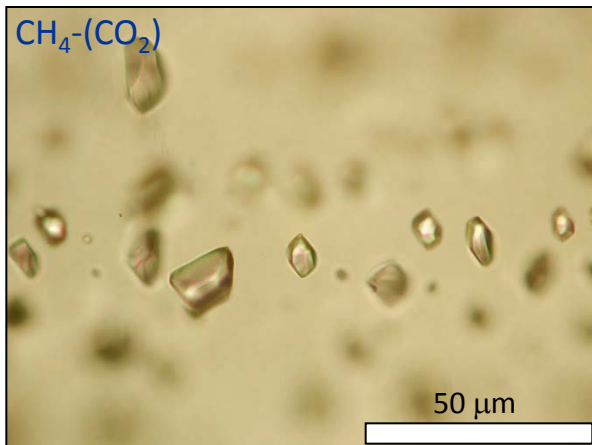
2. Techniques analytiques: Inclusions fluides

Echantillon d'un fluide présent durant l'**histoire géologique** de la roche :

- ✓ **Durant** la croissance du minéral: **Inclusions primaires** et **pseudo-sedondaires**
- ✓ **Après** la croissance du minéral: **Inclusions secondaires**

Origine du fluide :

- ✓ Fluide **météorique**: H_2O
- ✓ Fluide de **bassin** (Diagenèse, métamorphisme de faible degré): H_2O , hydrocarbures, sels
- ✓ Fluide **métamorphique** (déshydratation, décarbonatation, ...): H_2O , CO_2 , CH_4 , N_2 , ...
- ✓ Fluide **magmatique**: gaz, liquides silicatés, ...

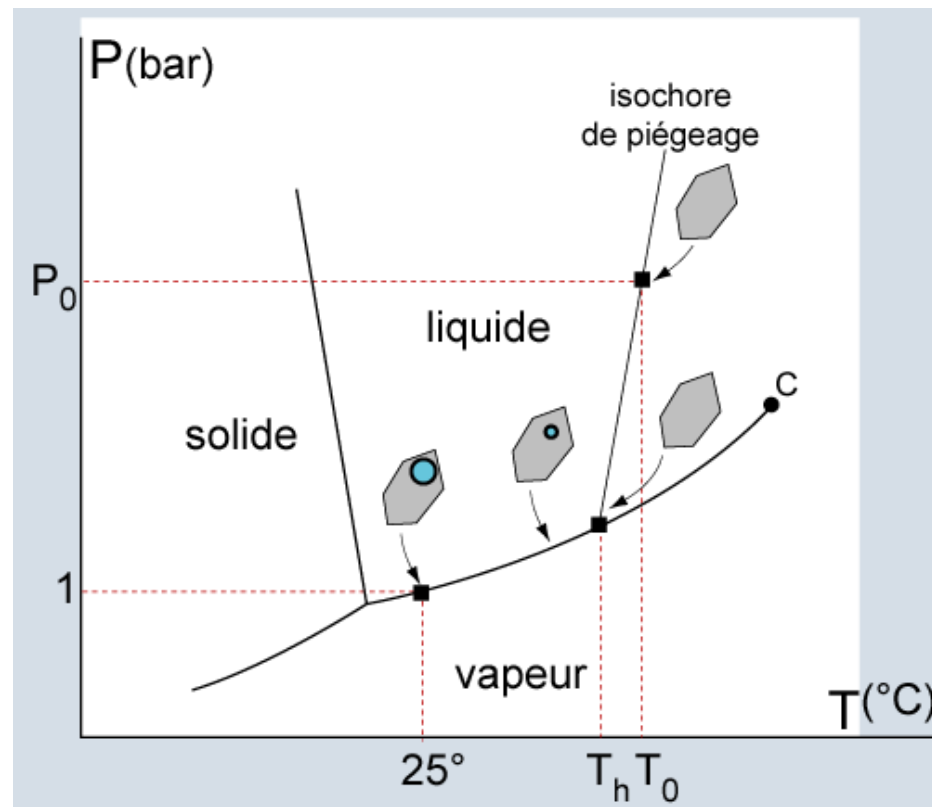


2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Inclusions fluides

Informations données par l'étude des inclusions fluides:

- ✓ **Composition** et **densité** du fluide
- ✓ Détermination des **conditions P - T** de **croissance** ou d'un **événement tectonique** sous certaines conditions
- ✓ **Interactions fluides-roches** (importance dans les **gisements métalliques**, ...)



2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Index d'altération des conodontes

Formes denticulées fossilisées apparues au **Cambrien** et disparaissant à la **limite Jurassique-Trias**.

Ces restes d'organisme sont constitués d'**apatite**.

En plus de posséder un fort **intérêt biostratigraphique** et **biochronologique**, leur altération va donner une **couleur typique** de la **température** à laquelle ils ont été portés.



FIG. 1 – Conodonte en crochet isolé. Barre d'échelle = 0,5 mm.



FIG. 2 – Conodonte en lame, avec une dent principale. Barre d'échelle = 0,5 mm.



FIG. 3 – Conodonte en lames sur une « plateforme ». Barre d'échelle = 0,5 mm.

2. Le métamorphisme de faible degré

2. Techniques analytiques: Index d'altération des conodontes

Echelle de 1 à 6 en fonction de la couleur observée.

CAI	Approximate conodont color	Temperature range (Celsius)
1	■ Pale brown	<50°-80°
2	■ Dark brown	60°-140°
3	■ Dark grey-brown	110°-200°
4	■ Dark grey	190°-300°
5	■ Black	300°-480°
6	■ Pale grey to white	360°-550°

2. Le métamorphisme de faible degré

3. Paragenèses

2. Le métamorphisme de faible degré

3. Paragenèses: Introduction

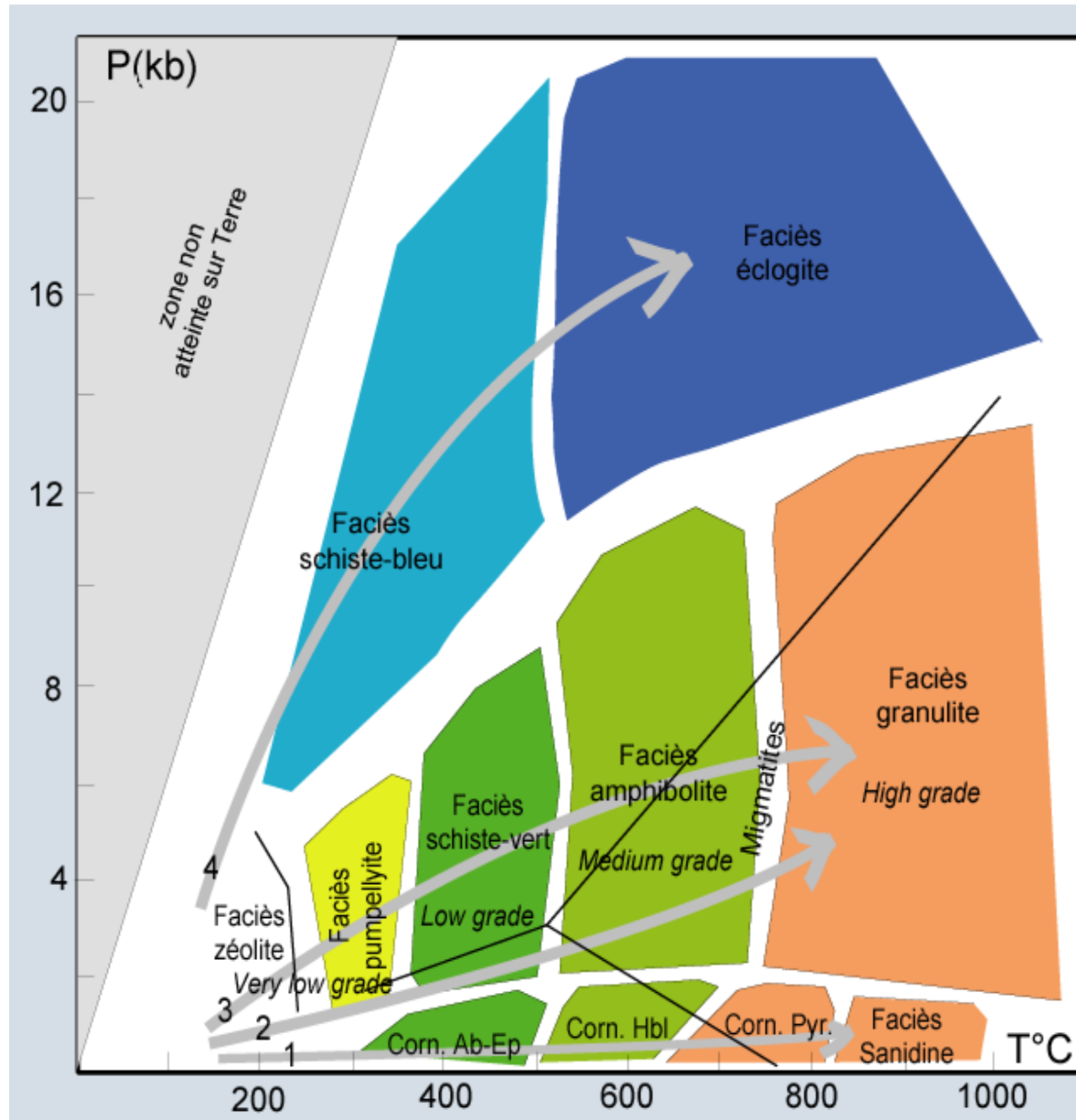
Ensemble des **minéraux stables** sous certaines conditions de ***P*** et ***T*** pour une **composition chimique** de la roche donnée ;

Le problème dans les faciès de faibles degrés de métamorphisme est que ***P* et *T* sont faibles** et que de fait **les réactions ne sont pas facilitées** ;

On aura souvent des **minéraux hérités** et des **réactions en cours de formation** avec des **minéraux métastables**.

2. Le métamorphisme de faible degré

3. Paragenèses: **Métabasites**



2. Le métamorphisme de faible degré

3. Paragenèses: Paragenèses dans les Alpes

Diagenèse

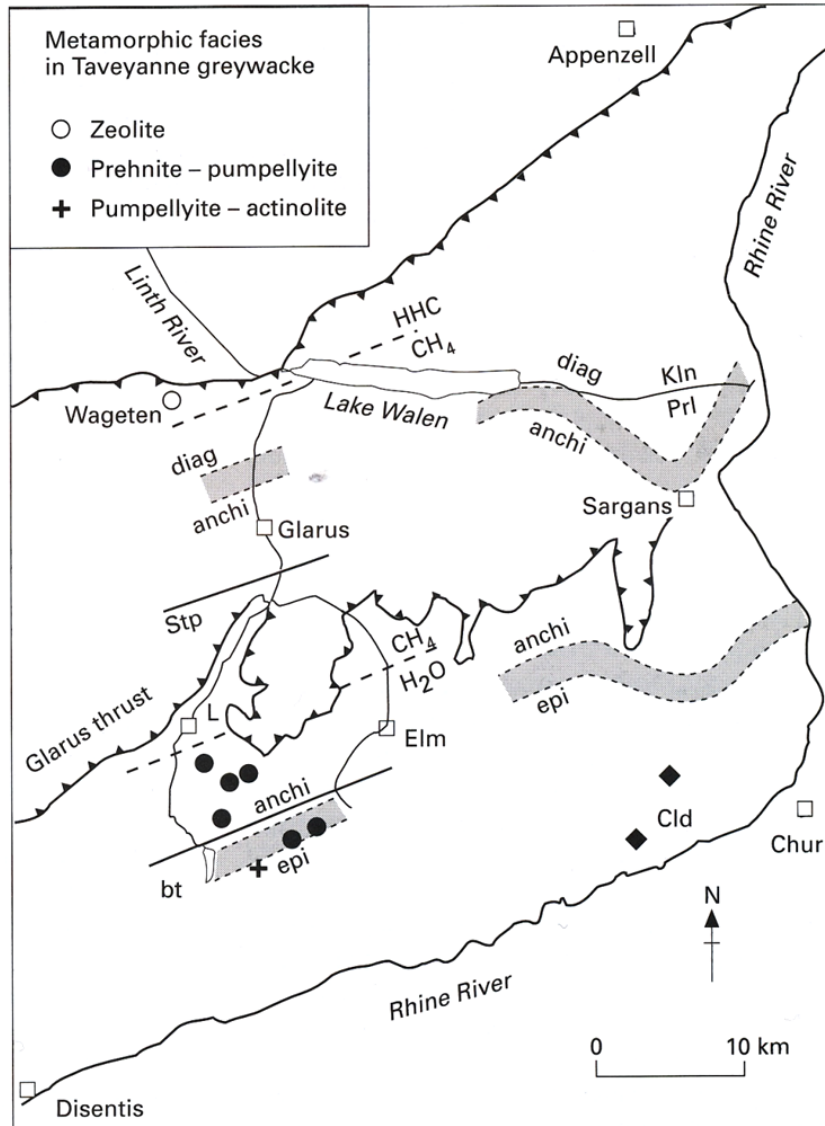
Anchiméta-
morphisme

	ANCHIMETAMORPHIC AND ZEOLITE FACIES	GREENSCHIST FACIES	AMPHIBOLITE FACIES
METAGRANITOIDS			
alkalifeldspar	orthoclase	microcline	
plagioclase	relic	albite	plagioclase
chlorite			
white mica			
stilpnomelane			
epidote			
amphibole		actinolite	hornblende
biotite			
garnet		spessartite	almandine
METABASIC ROCKS			
zeolites			
prehnite			
pumpellyite			
plagioclase		albite	plagioclase
chlorite			
METAPELITES			
illite			
muscovite			
paragonite			
chlorite			
pyrophyllite			
chloritoid			
kyanite			
staurolite			
biotite			
garnet			
sillimanite			
cordierite			
plagioclase			
alkalifeldspar			
graphite			

Fig. 38. Occurrence of critical Alpine metamorphic minerals in relation to grade of metamorphism (by V. Trommsdorff and others).

2. Le métamorphisme de faible degré

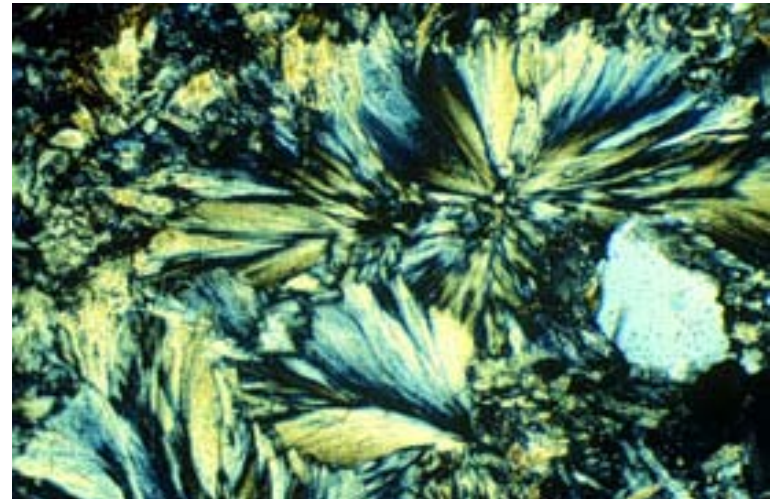
3. Paragenèses: Exemple du grauwacke de Taveyanne de Glarus



Roche sédimentaire à débris de volcanisme andésitique à quartz, feldspaths et chlorite.

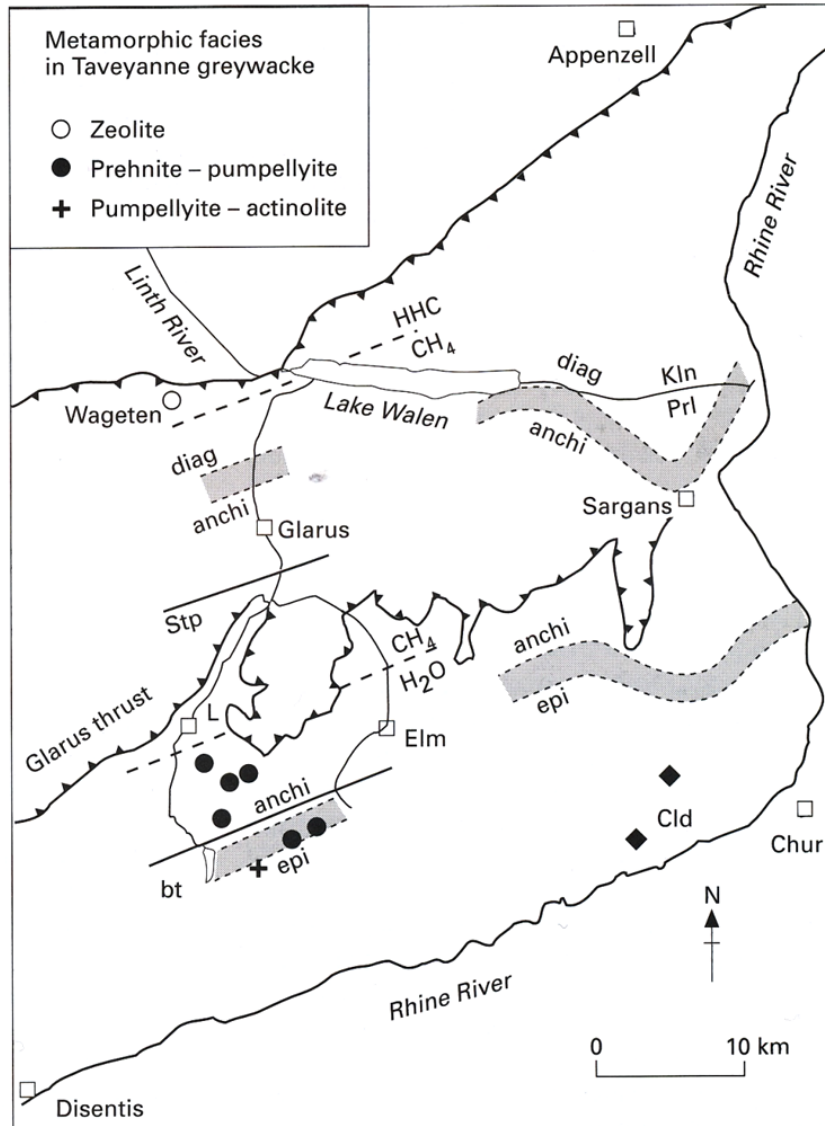
Carte métamorphique basée sur une synthèse des données des Alpes du Glarus ;

Les limites entre la **diagenèse/anchizone** et **anchizone/épizone** sont montrées par des **bandes épaisses** ;



2. Le métamorphisme de faible degré

3. Paragenèses: Exemple du grauwacke de Taveyanne de Glarus

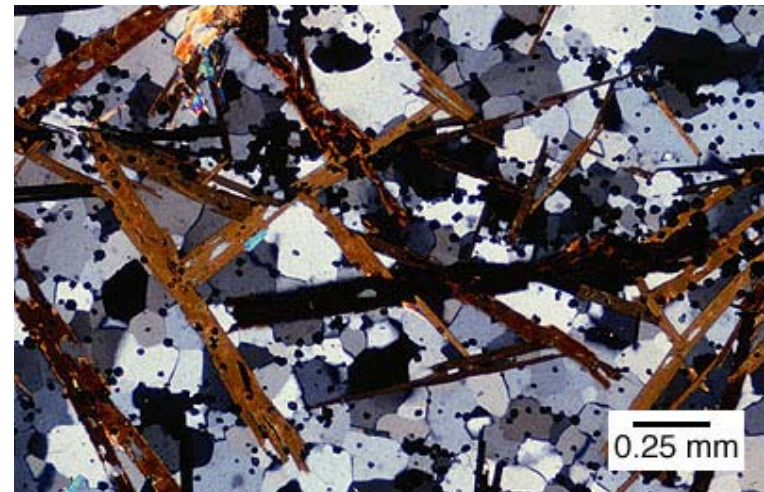


Roche sédimentaire à débris de volcanisme andésitique à quartz, feldspaths et chlorite.

Carte métamorphique basée sur une synthèse des données des Alpes du Glarus ;

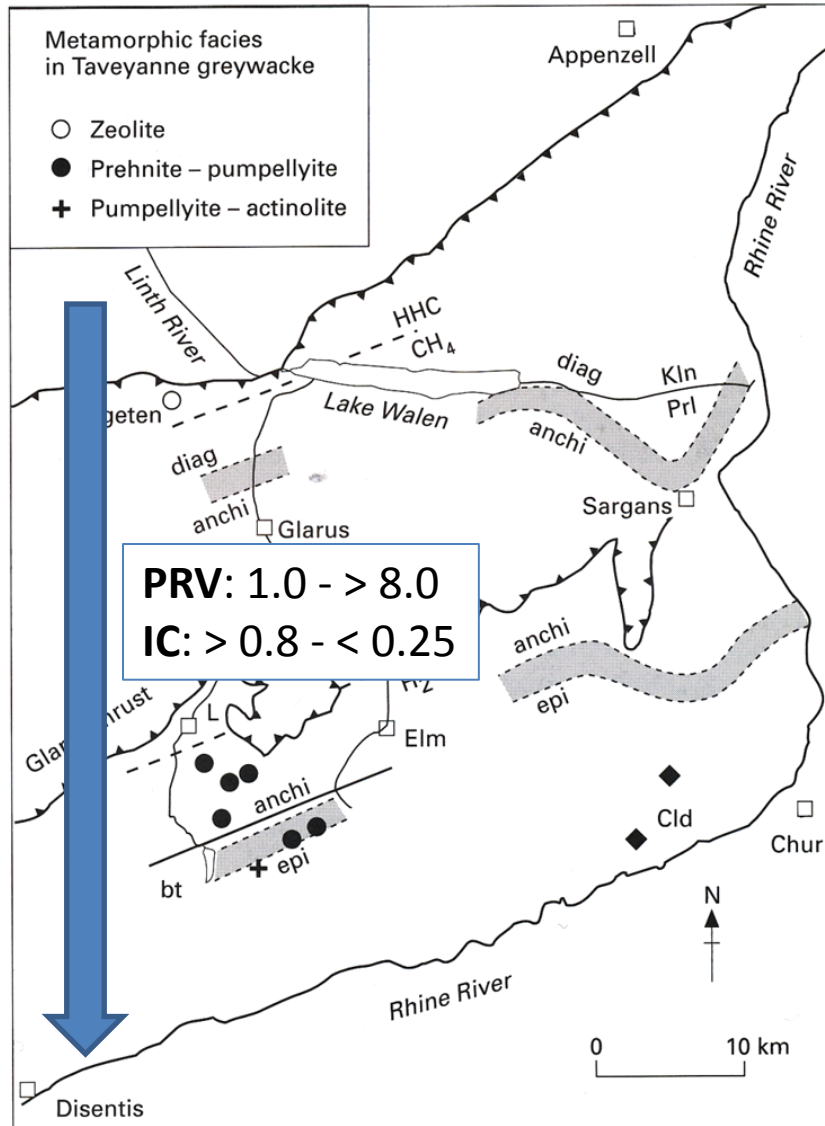
Les limites entre la **diagenèse/anchizone** et **anchizone/épizone** sont montrées par des **bandes épaisses** ;

Les isogrades à **pyrophyllite (Prl)**, **stilpnomélane (Stp)** et **biotite (Bt)** sont indiqués par des **lignes continues** ;



2. Le métamorphisme de faible degré

3. Paragenèses: Exemple du grauwacke de Taveyanne de Glarus



Roche sédimentaire à débris de volcanisme andésitique à quartz, feldspaths et chlorite.

Carte métamorphique basée sur une synthèse des données des Alpes du Glarus ;

Les limites entre la **diagenèse/anchizone** et **anchizone/épizone** sont montrées par des **bandes épaisses** ;

Les **isogrades** à **pyrophyllite** (Prl), **stilpnomélane** (Stp) et **biotite** (Bt) sont indiqués par des **lignes continues** ;

Les limites **HHC/CH₄** et **CH₄/H₂O** sont basées sur les données des **inclusions fluides** et montrées par des **lignes en pointillés** ;

Les localités où le grès de Taveyanne contient des **minéraux caractéristiques** sont indiquées ;

Deux occurrences à **chloritoïde** (Cld) sont reportées à l'ouest de Chur.