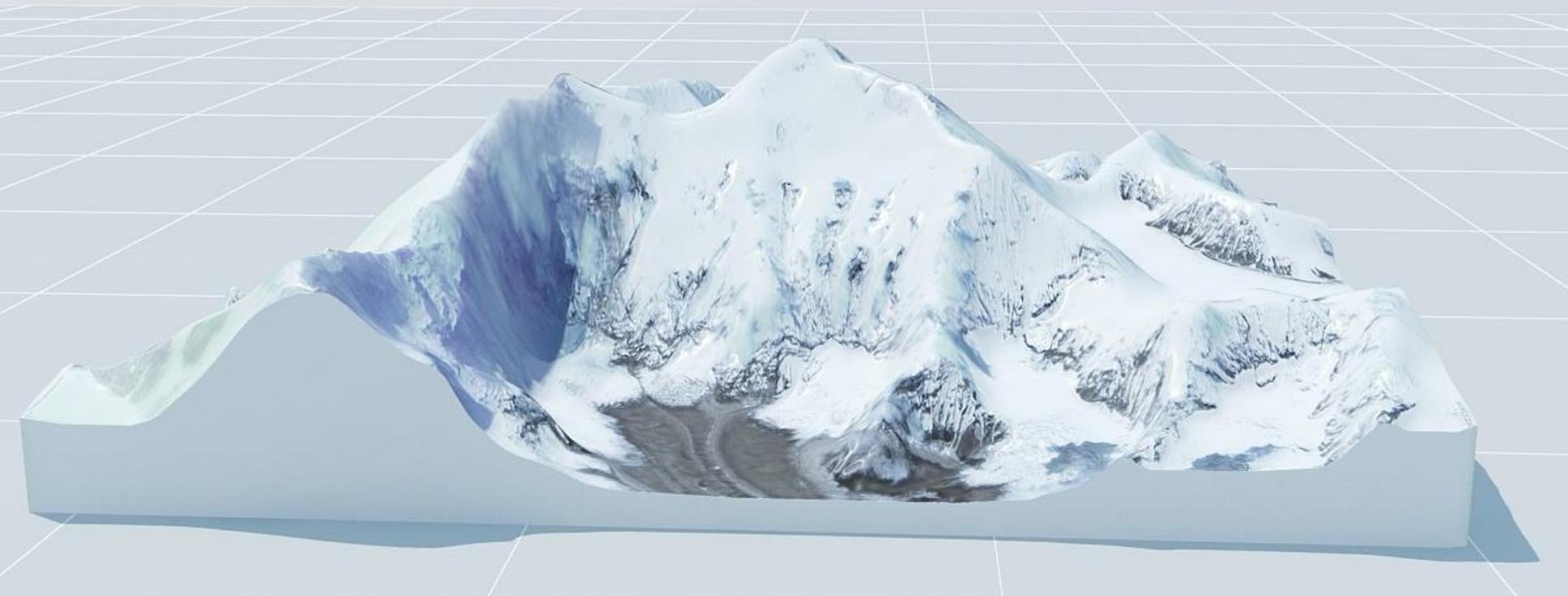


Subduction continentale



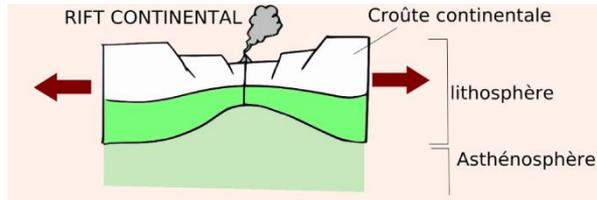
Reconstitution 3D de l'Everest

Eric LECOIX – Nov 2013

Aperçu des différents type de frontières des plaques lithosphériques

FRONTIERES EN DIVERGENCE

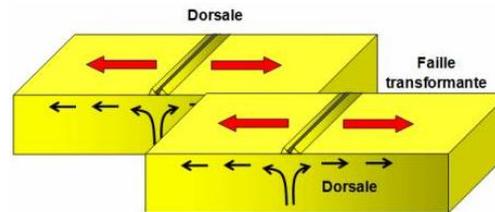
Rift continental



Exemple : Rift Africain

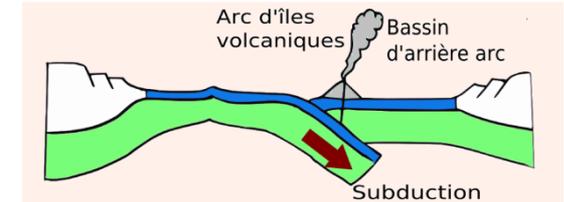
FRONTIERES EN DECROCHEMENT

Failles transformantes océaniques



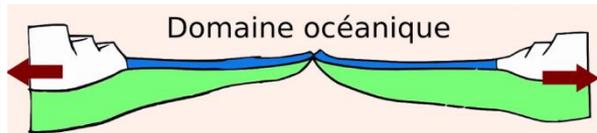
FRONTIERES EN CONVERGENCE

Subduction entre 2 lithosphères océaniques



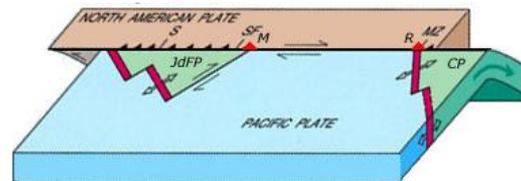
Exemple : Antilles

Accrétion océanique



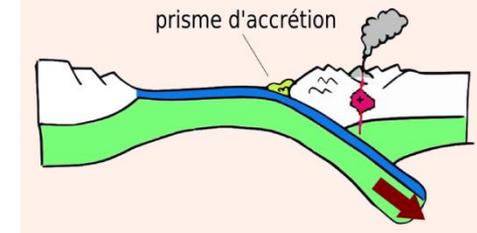
Exemple : Dorsale Atlantique

Failles transformantes continentales



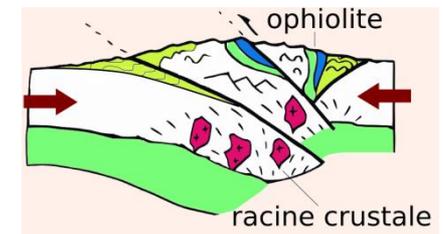
Exemple : Faille de San Andrés

Subduction entre lithosphère océanique et continentale



Exemple : Côte Ouest Amérique

Collision continentale



Exemple : Alpes

I – Marqueurs de la collision

- Marqueurs topographiques
- Marqueurs sismiques
- Marqueurs gravimétriques
- L'épaississement crustal
- Bassins sédimentaires
- Structures tectoniques

II – Le métamorphisme de collision

- Métamorphisme Ultra Haute Pression
- Métamorphisme barrovien

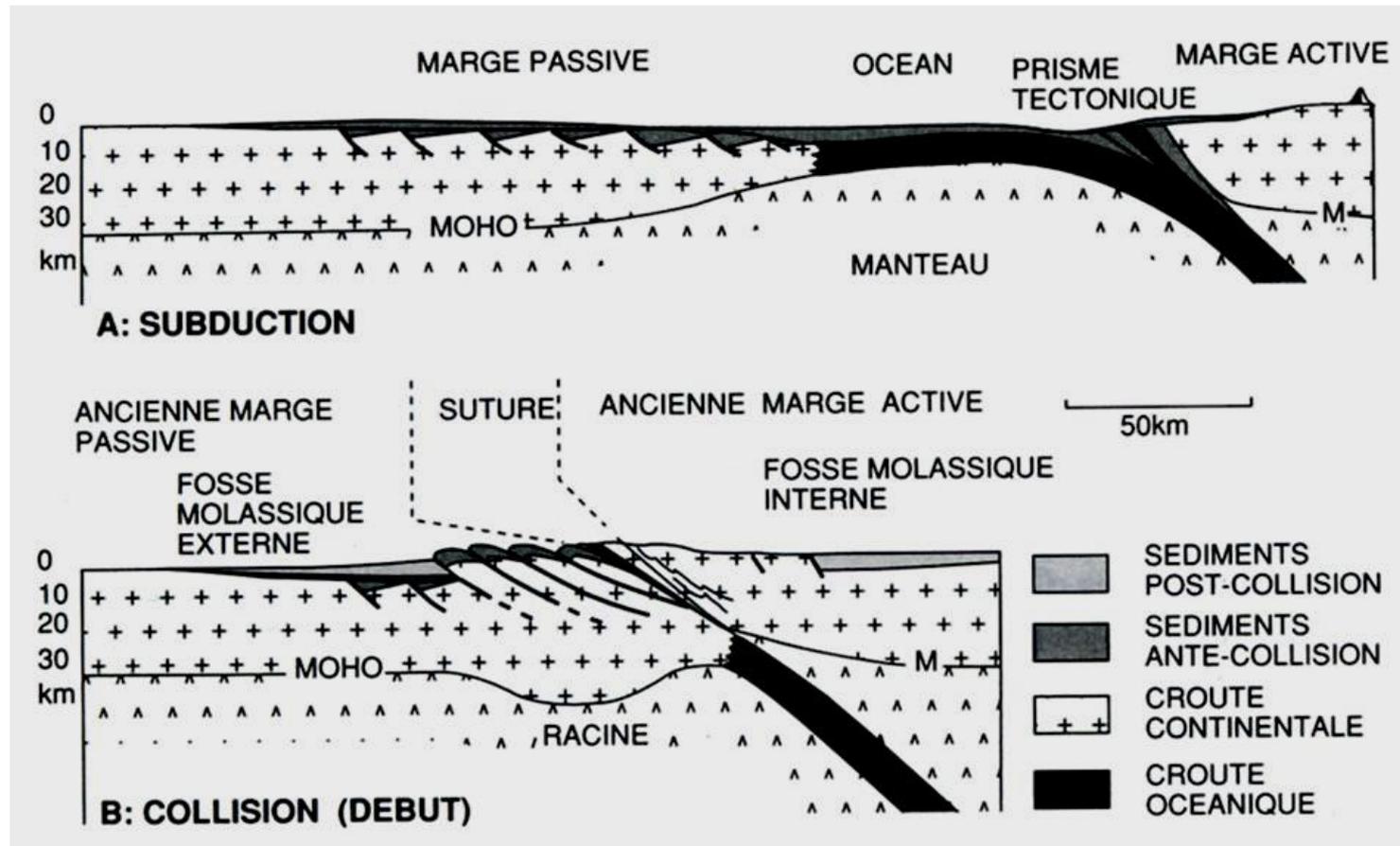
III – L'anatexie dans un contexte de collision

IV – Reconstitutions géodynamiques

Les marqueurs de la subduction continentale

De la subduction à la collision

Collision débutante entre une marge active et une marge passive



La collision induit l'engagement de lithosphère continentale dans la zone de subduction. La subduction devient difficile en raison de la densité moindre de la croûte continentale.

- Raccourcissement horizontal + un épaississement de la croûte continentale.
- La réaction isostatique donne lieu à des reliefs élevés en surface (5 à 6 km), et à l'approfondissement du Moho en profondeur (de 60 à 80 km).

Les marqueurs de la subduction continentale

Marqueurs topographiques et sismiques

La collision induit des instabilités mécaniques → sismicité importante et reliefs élevés



Les marqueurs de la subduction continentale

Marqueurs topographiques

Reliefs élevés

Mont Blanc, 4810 m



Les marqueurs de la subduction continentale

Marqueurs topographiques

Reliefs élevés

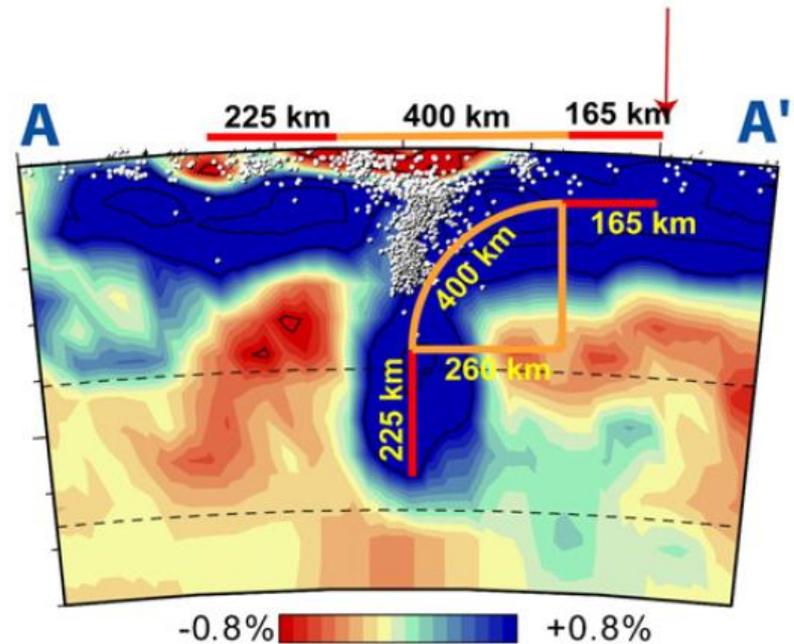
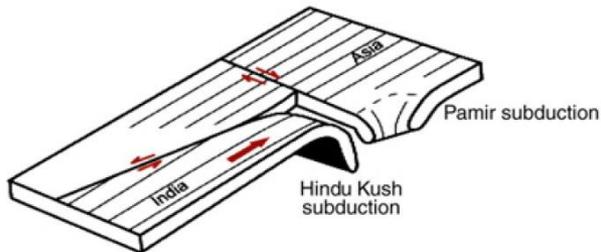
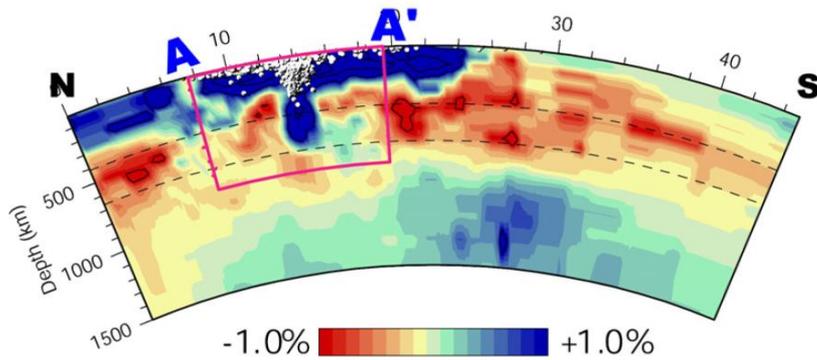
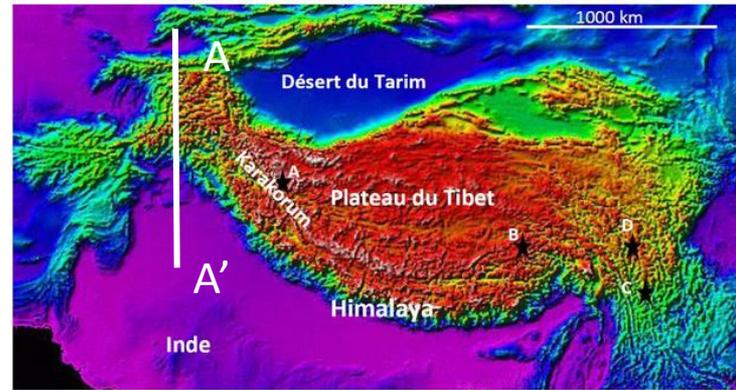
Everest, 8848 m



Les marqueurs de la subduction continentale

Marqueurs sismiques

Himalaya: Tomographie sismique dans la région de Pamir–Hindu Kush

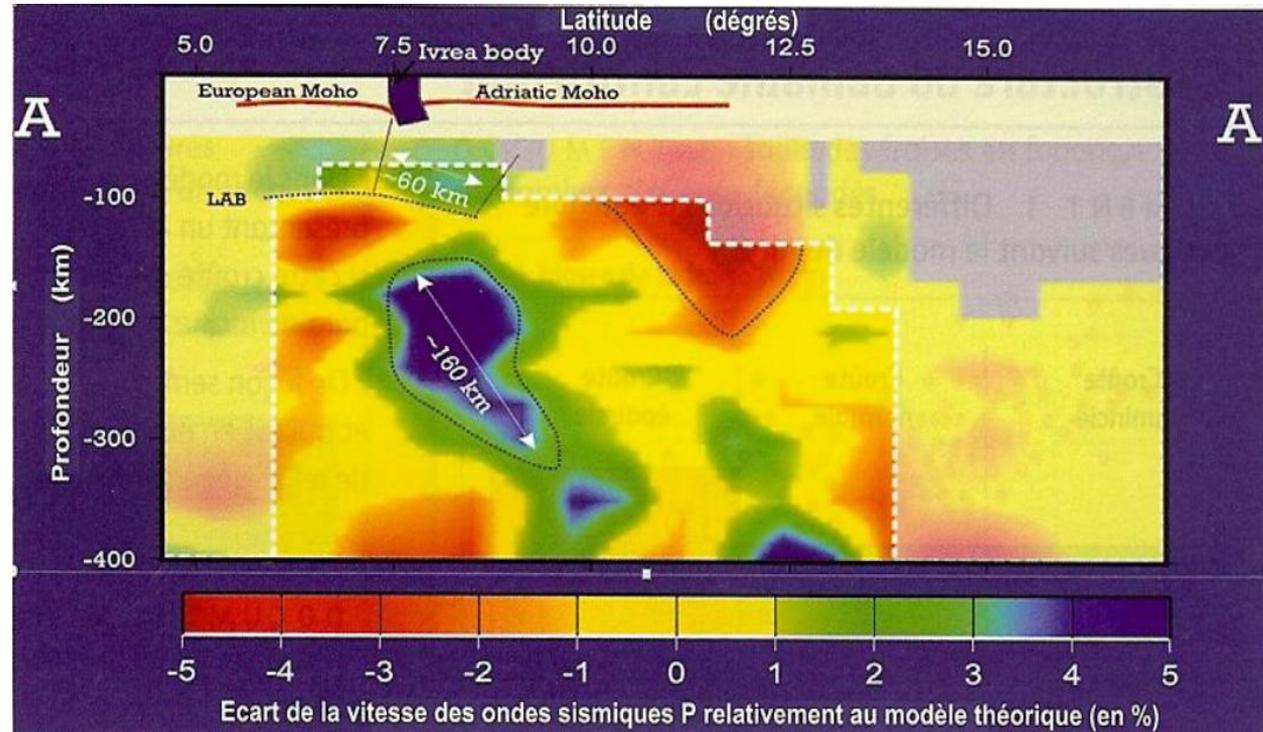


La tomographie sismique met en évidence la présence d'un slab lithosphérique

Les marqueurs de la subduction continentale

Marqueurs sismiques

Tomographie sismique sous les Alpes occidentales et la plaine du Pô

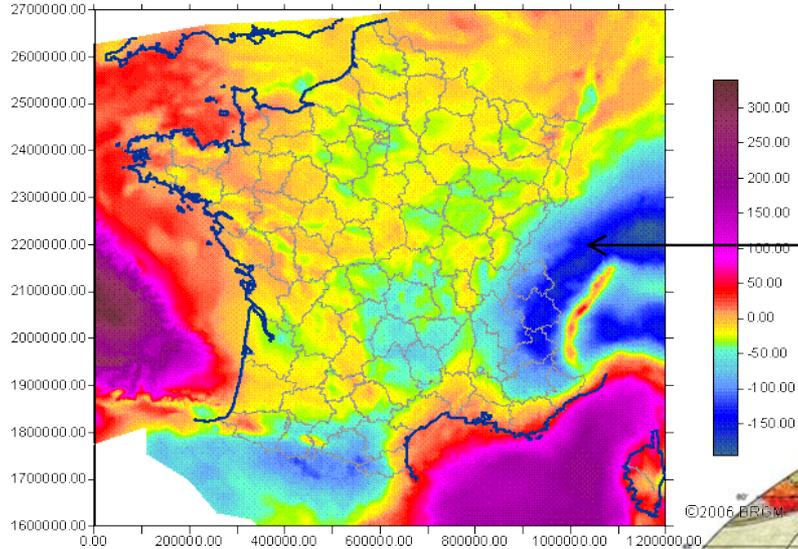


Selon Spallarossa et al. (1998) la tomographie sismique sous les Alpes occidentales semble montrer qu'un corps « froid » (entre 100 et 230 km de profondeur) plonge sous la plaine du Pô. Il pourrait s'agir (hypothèse) d'un **panneau lithosphérique plongeant vers l'est sous la plaine du Pô.**

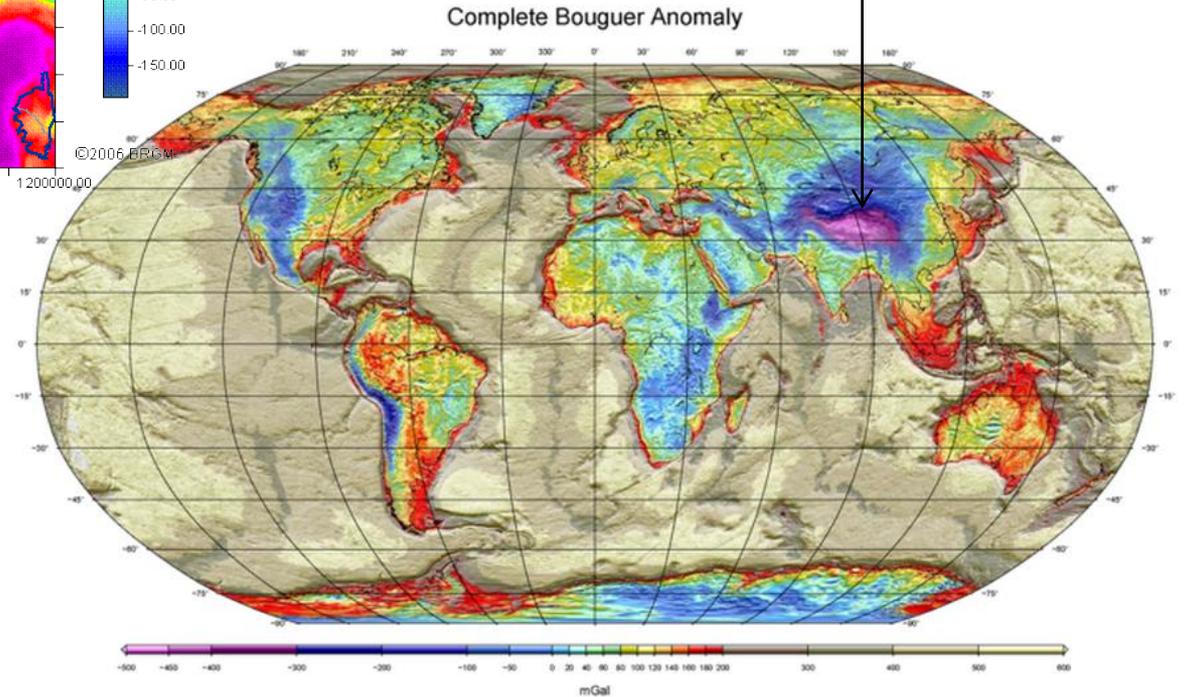
Les marqueurs de la subduction continentale

Marqueurs gravimétriques

L'anomalie de Bouguer révèle un excès de matériel de faible densité en profondeur
→ Correspond à la racine crustale, qui traduit un épaissement de la croûte.



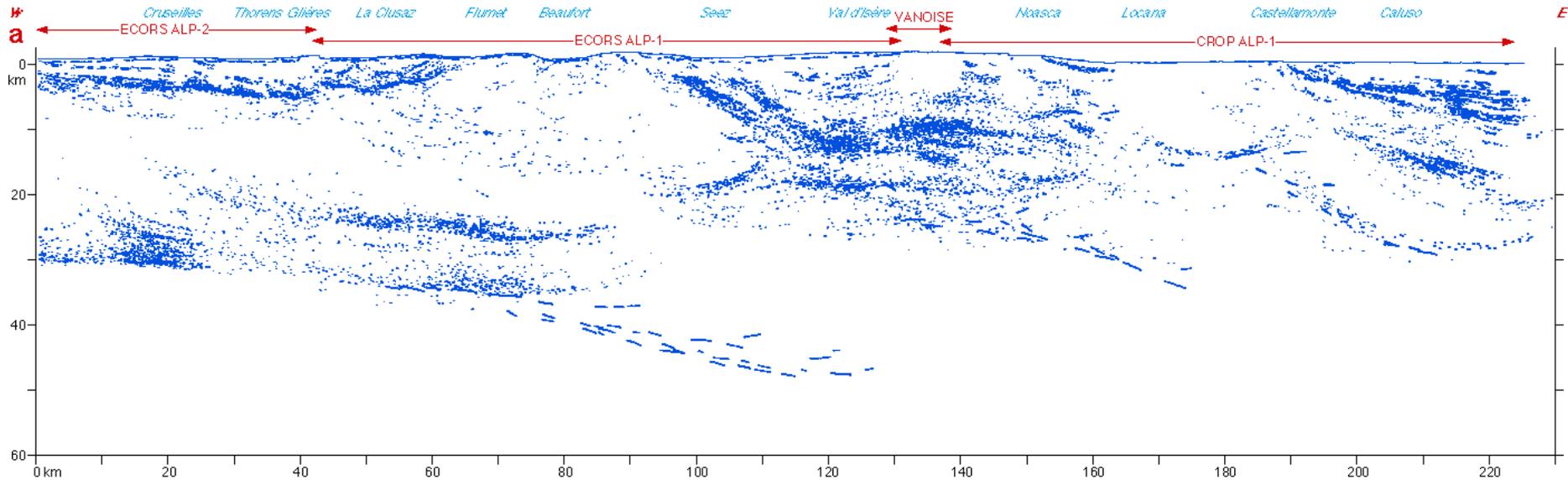
Anomalies négatives de Bouguer



Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

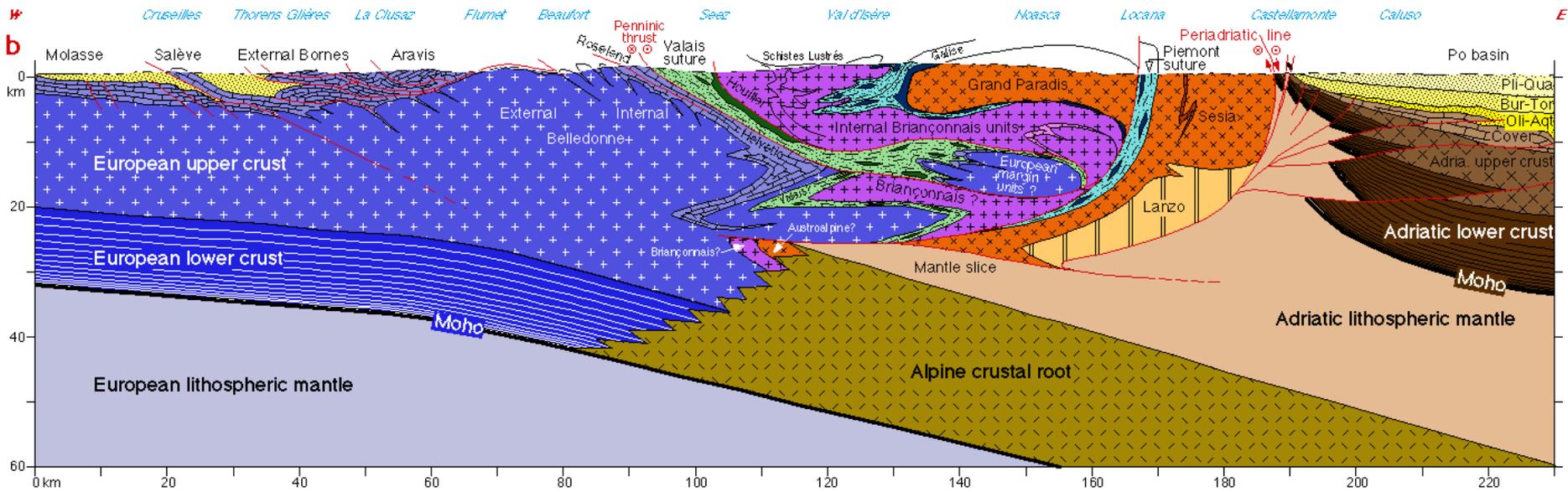
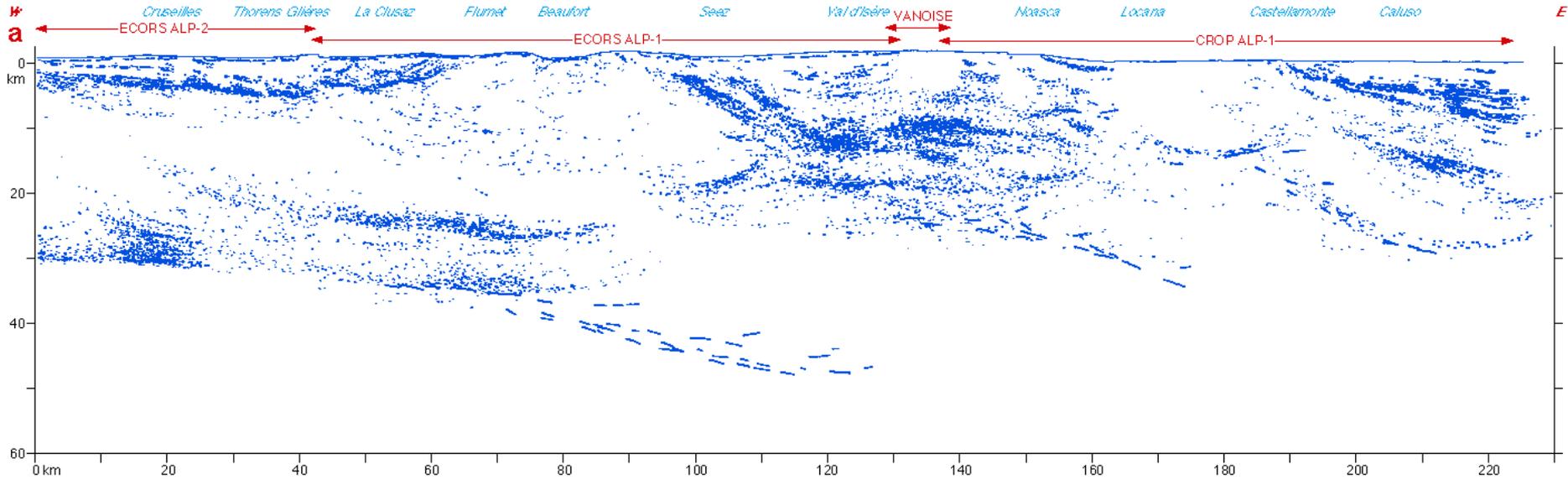
Les profils sismiques révèlent la structure interne des chaînes de montagne (épaississement crustal dû au chevauchement de différentes unités)



Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

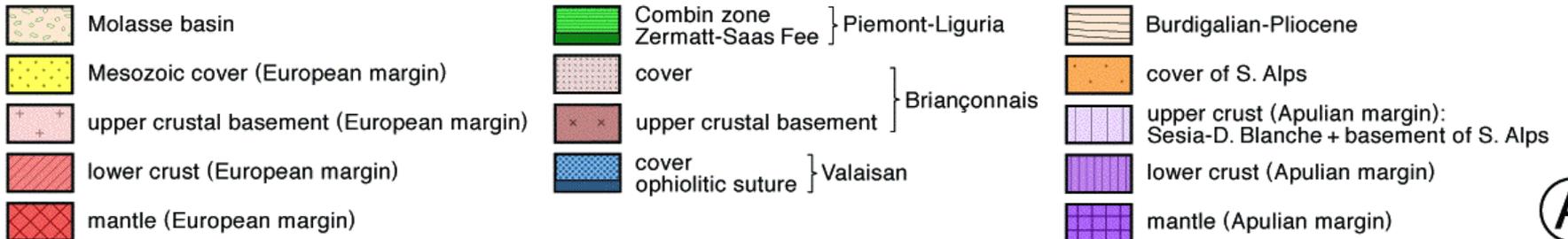
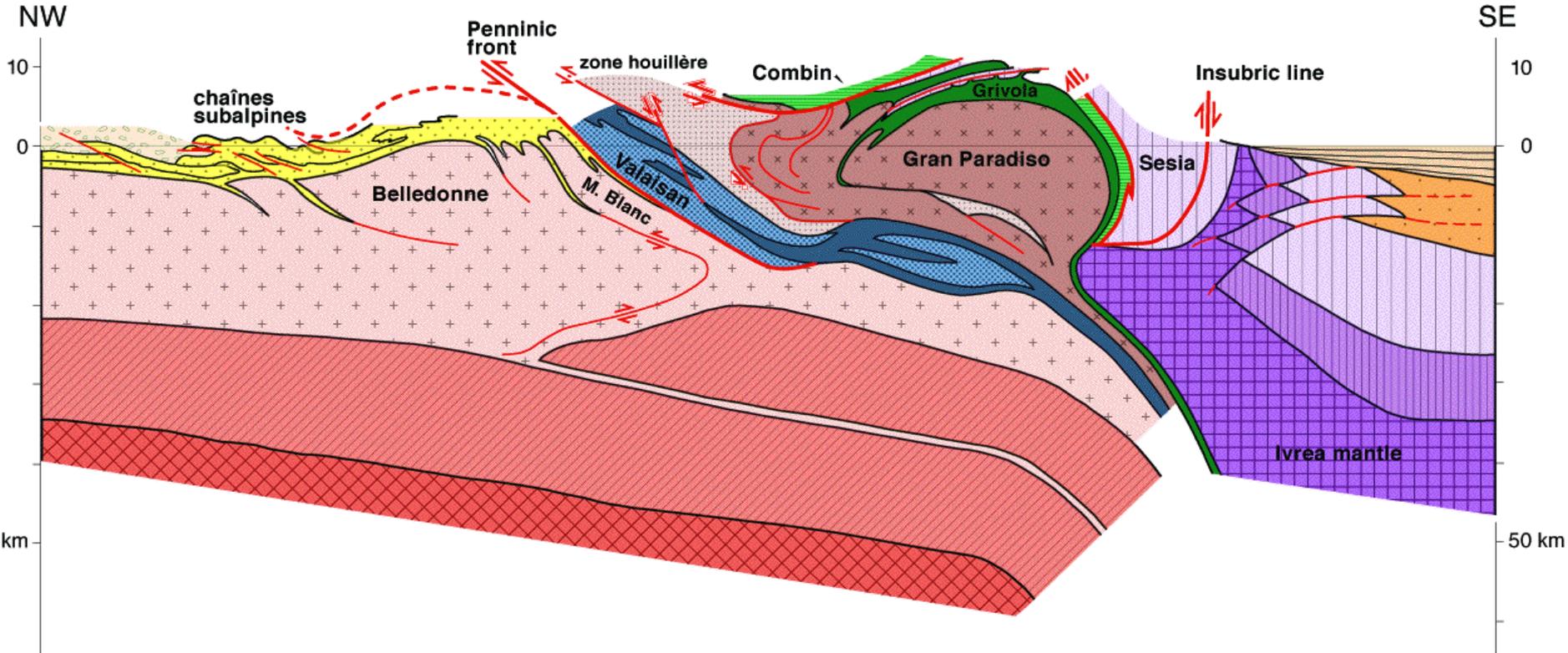
Profil sismique ECORS à travers les Alpes et son interprétation



Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

Interprétation du profil sismique ECORS à travers les Alpes

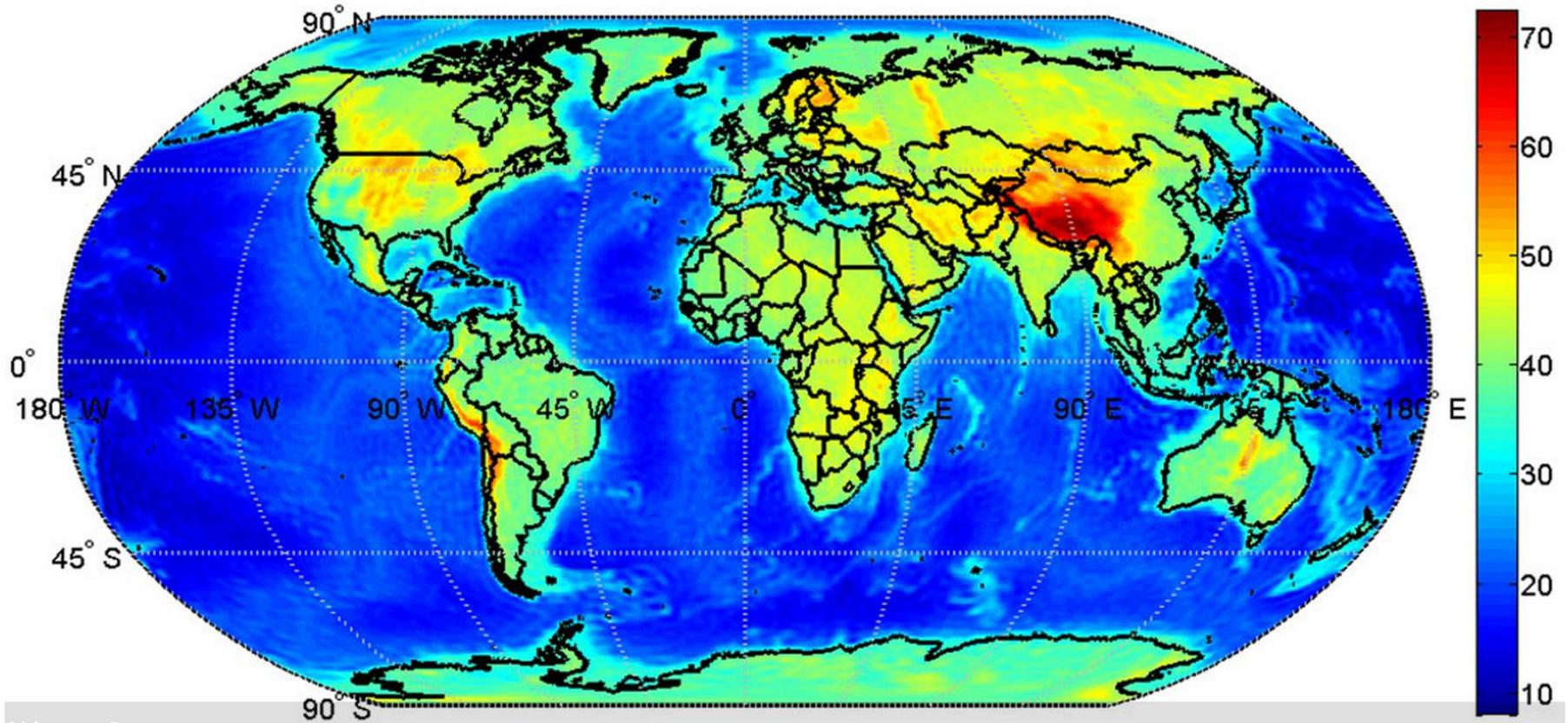


(A)

Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

Carte de la profondeur du Moho (satellite GOCE)

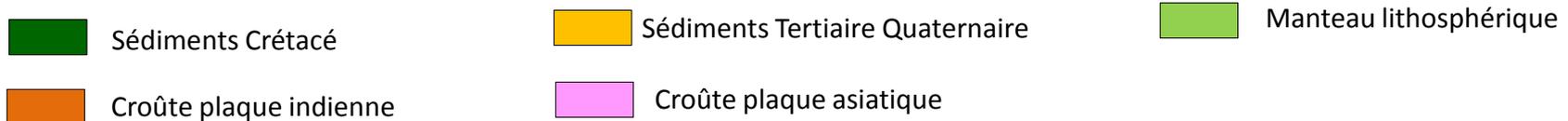
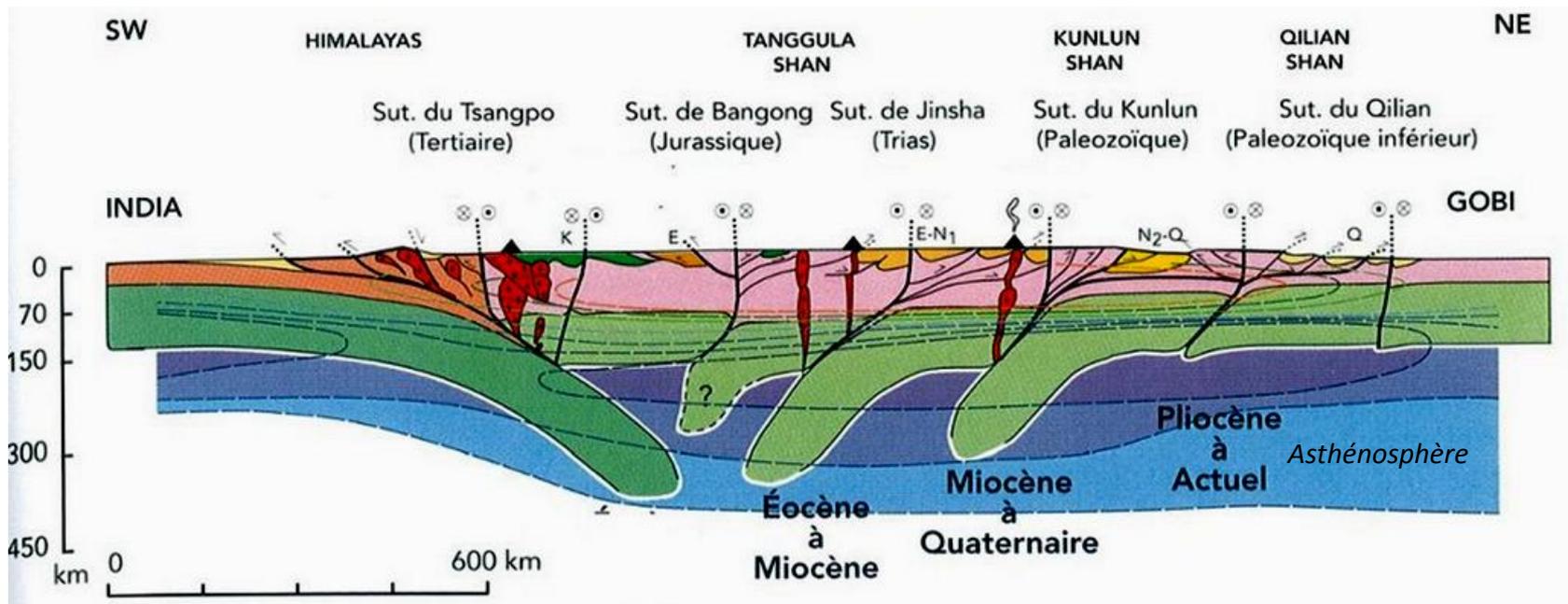
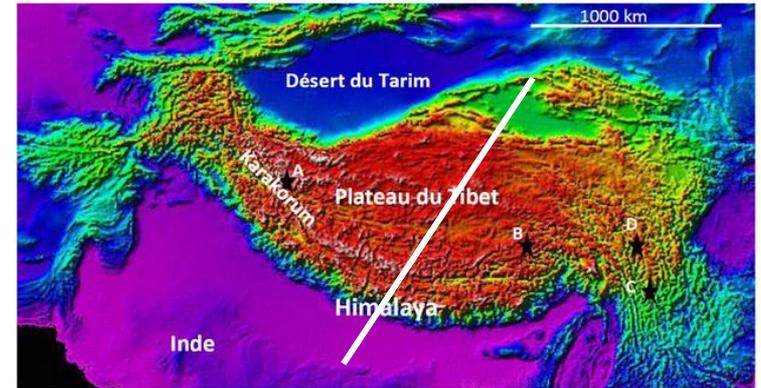


Fort épaississement crustal au niveau d el'Himalaya

Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

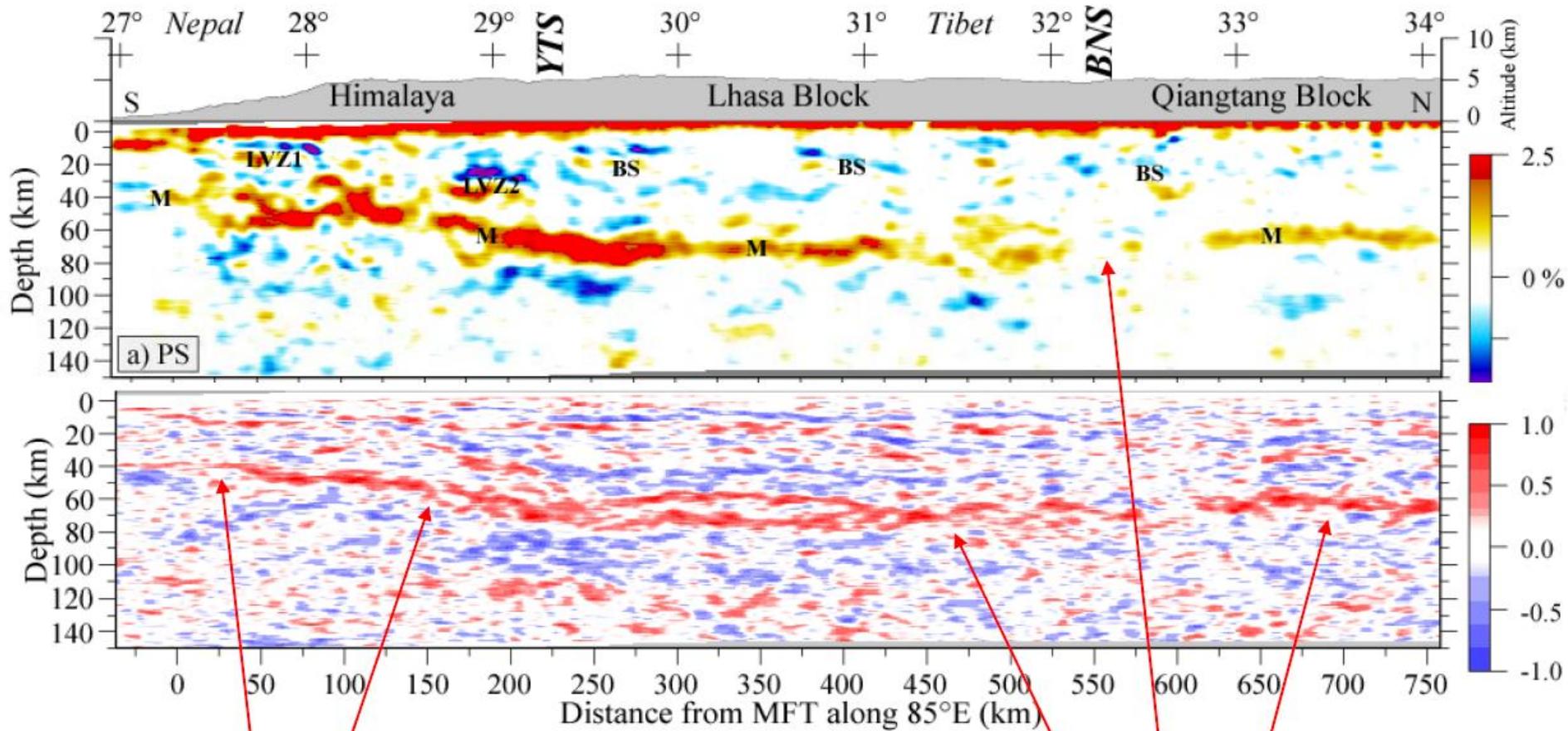
Coupe interprétative Sud-Nord de l'Himalaya et du Tibet



Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

Profil sismique HI CLIMB Himalaya Tibet Sud



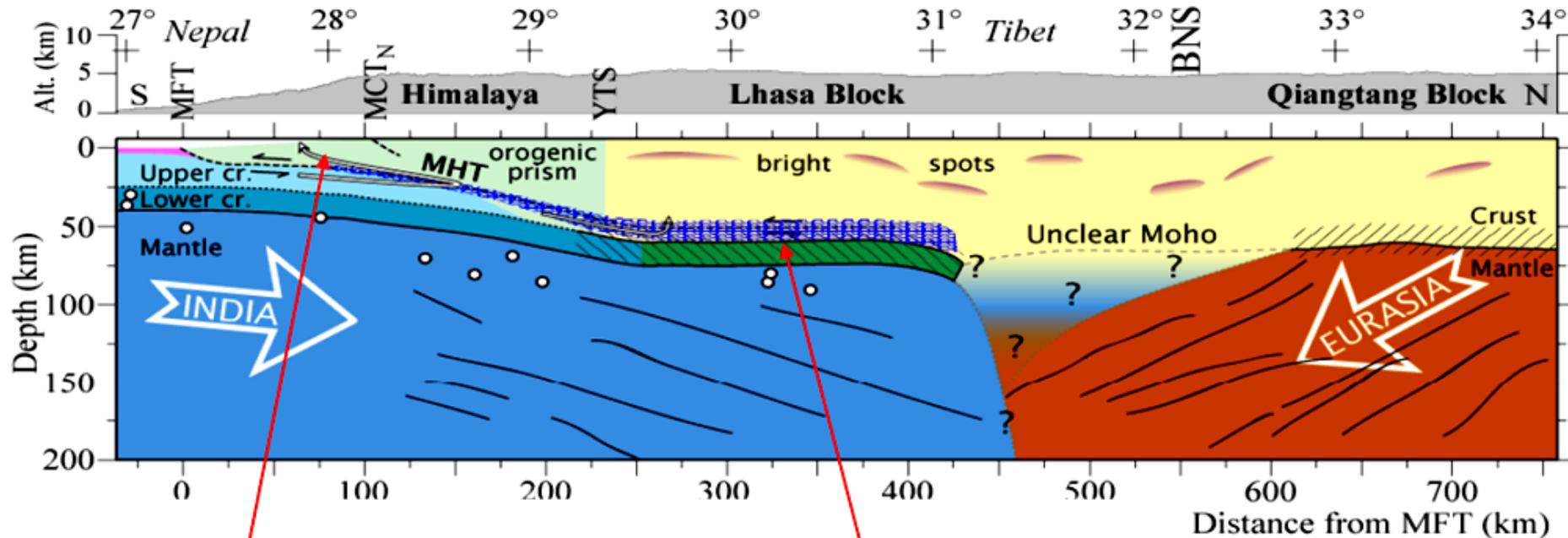
- Moho très clair sous le Népal à ~40 km
- Il plonge régulièrement vers le N sous le Ht-Himalaya et la suture du Tsang Po jusqu'à ~75 km

- Moho quasiment horizontal (~75 km) sous le bloc de Lhasa
- Moins visible sous la suture de Banggong
- Légèrement moins profond sous le bloc du Qiangtang (~65 km)

Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

Interprétation du profil sismique HI CLIMB Himalaya Tibet Sud



Exhumation au front topographique

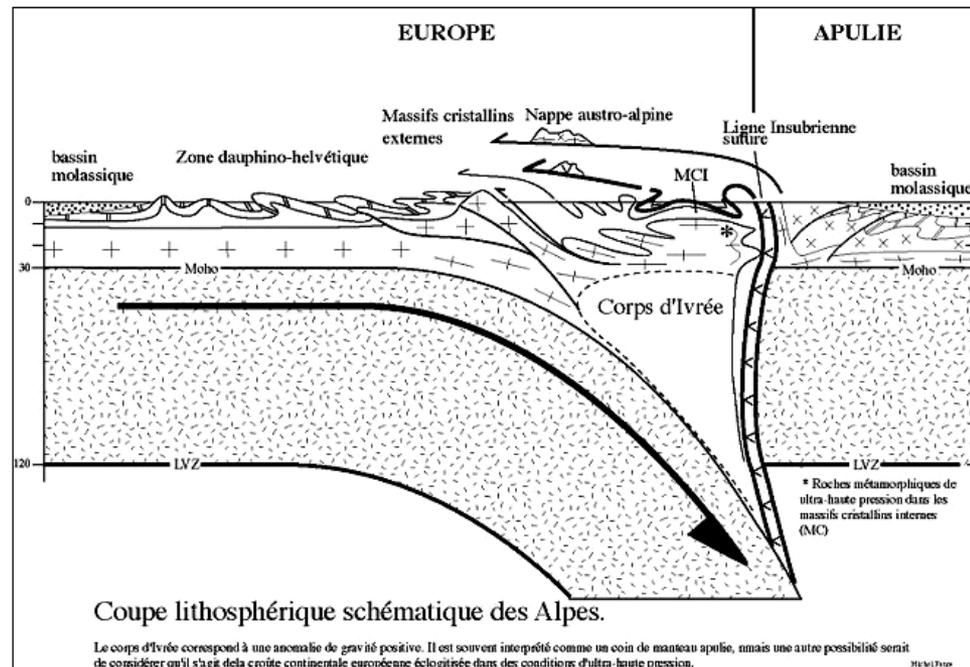
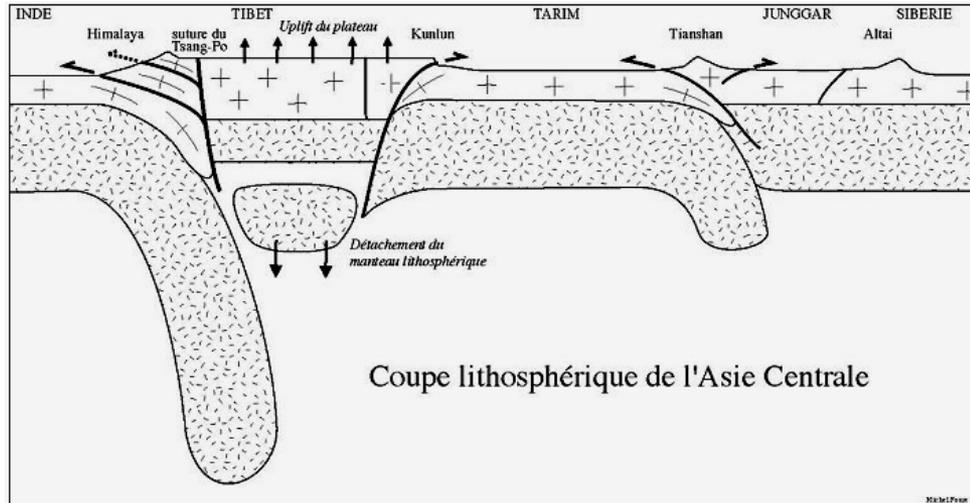
Écoulement dans la croûte moyenne, sous le Tibet épais

Le profil sismique révèle la confrontation de 2 lithosphères continentales (Inde et Eurasie)

Les marqueurs de la subduction continentale

L'épaississement crustal

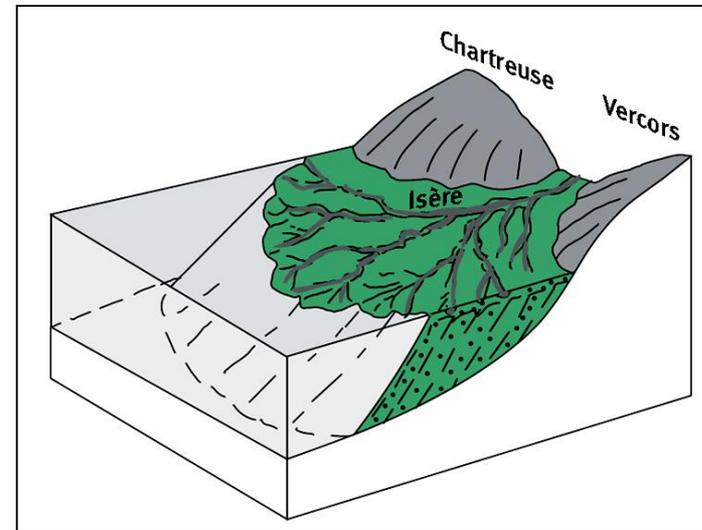
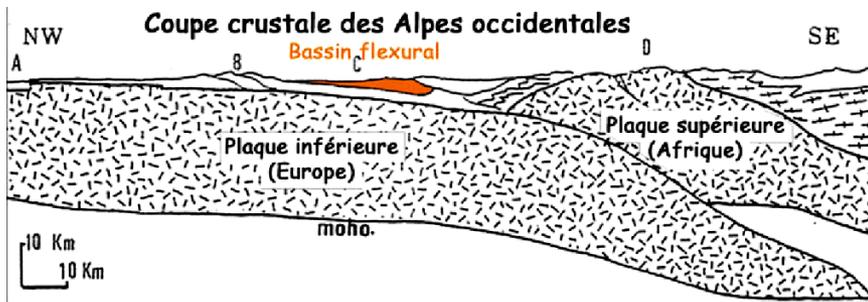
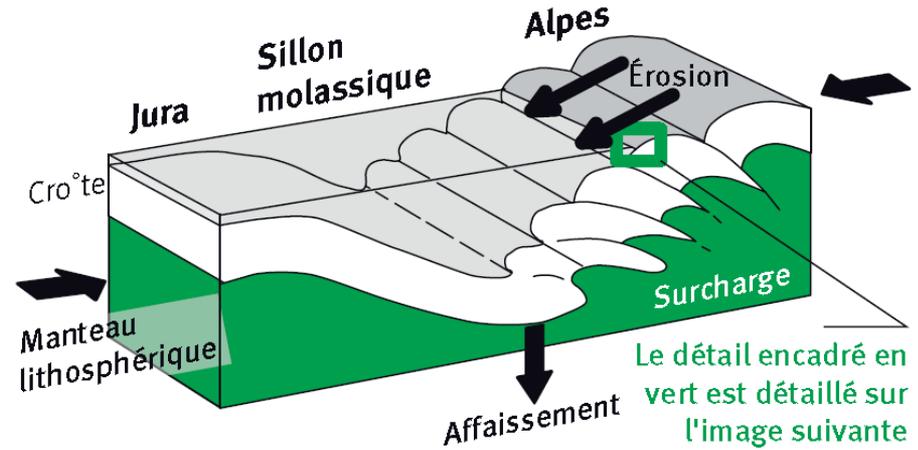
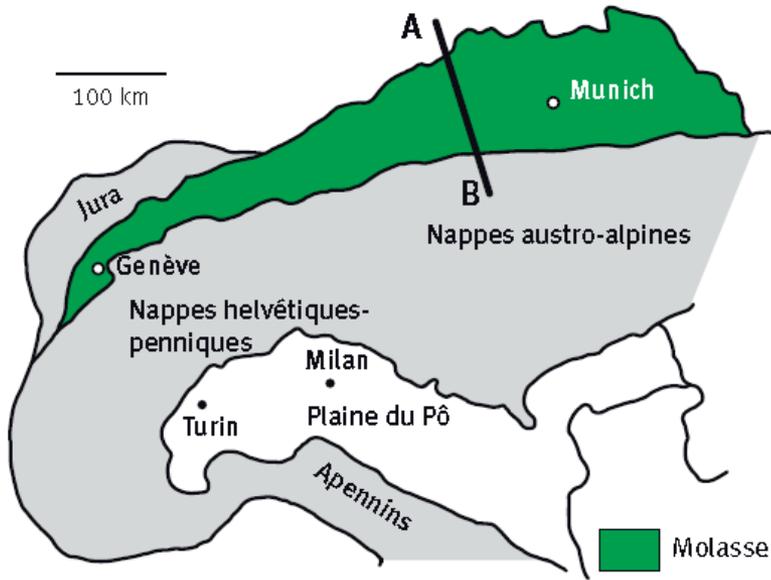
Comparaison de coupes interprétatives Himalaya et Alpes



Les marqueurs de la subduction continentale

Présence de bassins sédimentaires

Bassins flexuraux (avant chaîne) au niveau des Alpes



Isère : rivière

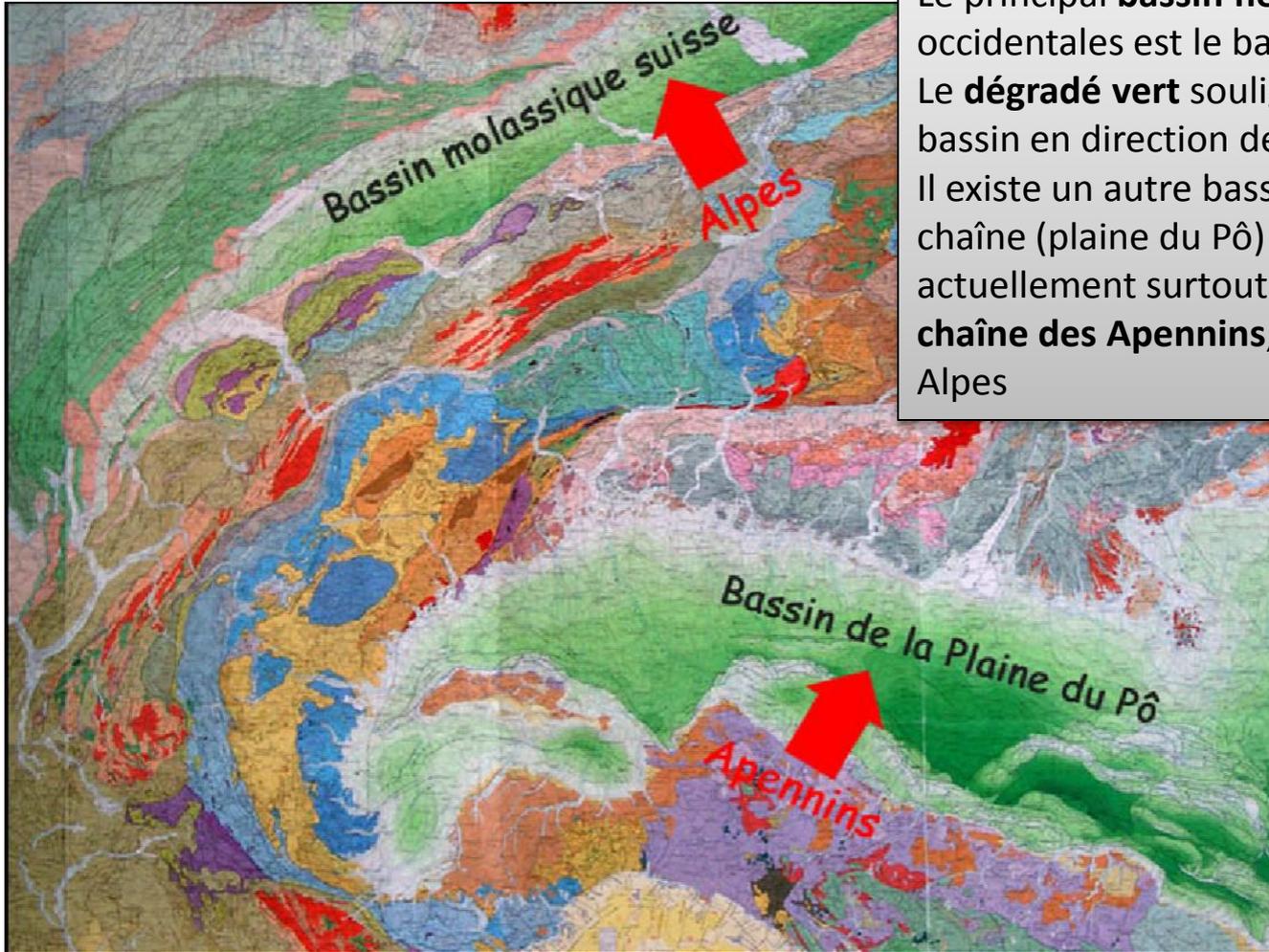
Chartreuse, Vercors : massifs rocheux

Molasse

Les marqueurs de la subduction continentale

Présence de bassins sédimentaires

Bassins flexuraux (avant chaîne) au niveau des Alpes

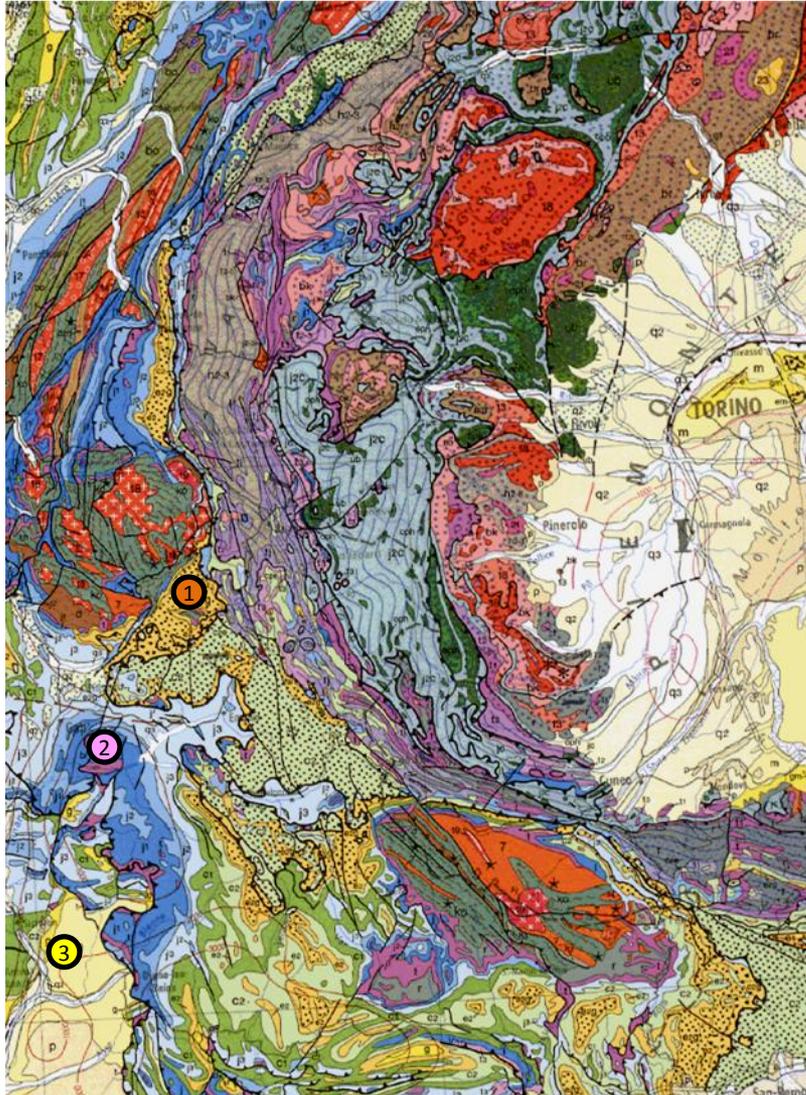


Le principal **bassin flexural** dans les Alpes occidentales est le bassin molassique suisse. Le **dégradé vert** souligne l'**épaississement** du bassin en direction de la chaîne (vers le SE). Il existe un autre bassin de l'autre côté de la chaîne (plaine du Pô) mais il correspond actuellement surtout au **bassin flexural** de la **chaîne des Apennins**, plus récente que les Alpes.

Les marqueurs de la subduction continentale

Présence de bassins sédimentaires

Bassins flexuraux (avant chaîne) au niveau des Alpes



Les bassins **syn-orogéniques**, remplis par l'érosion du relief, se propagent d'Est en Ouest, **vers l'extérieur de la chaîne.**

- ① Bassin le plus ancien. Grès du Champsaur de l'Eocène sur flysch à Helminoïdes du Crétacé sup
- ② Dépôts molassiques de l'Oligocène, rouges et déformés
- ③ Sédiments molassiques récents (Mio-Pliocène) en moyenne Durance et Bas Dauphiné. Peu déformés mais soulevés au front actuel des Alpes

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Synclinal couché de St Clément (Flysch à Helminthoïdes, nappe de l'Embrunais)

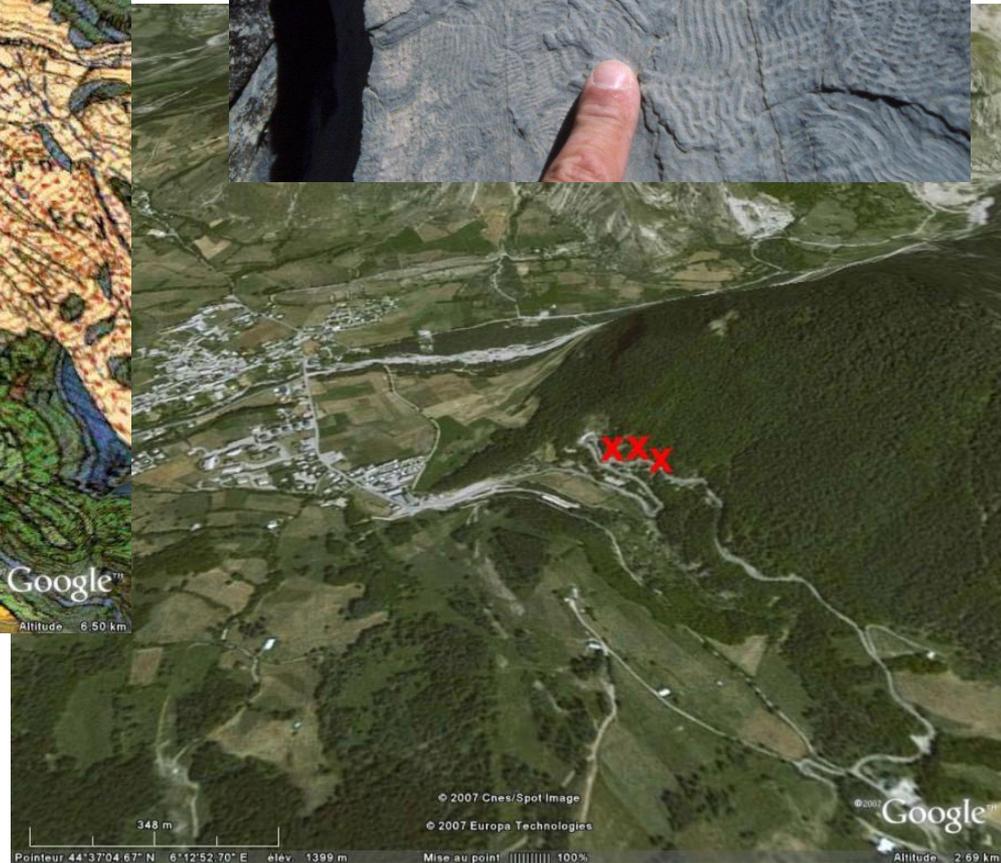
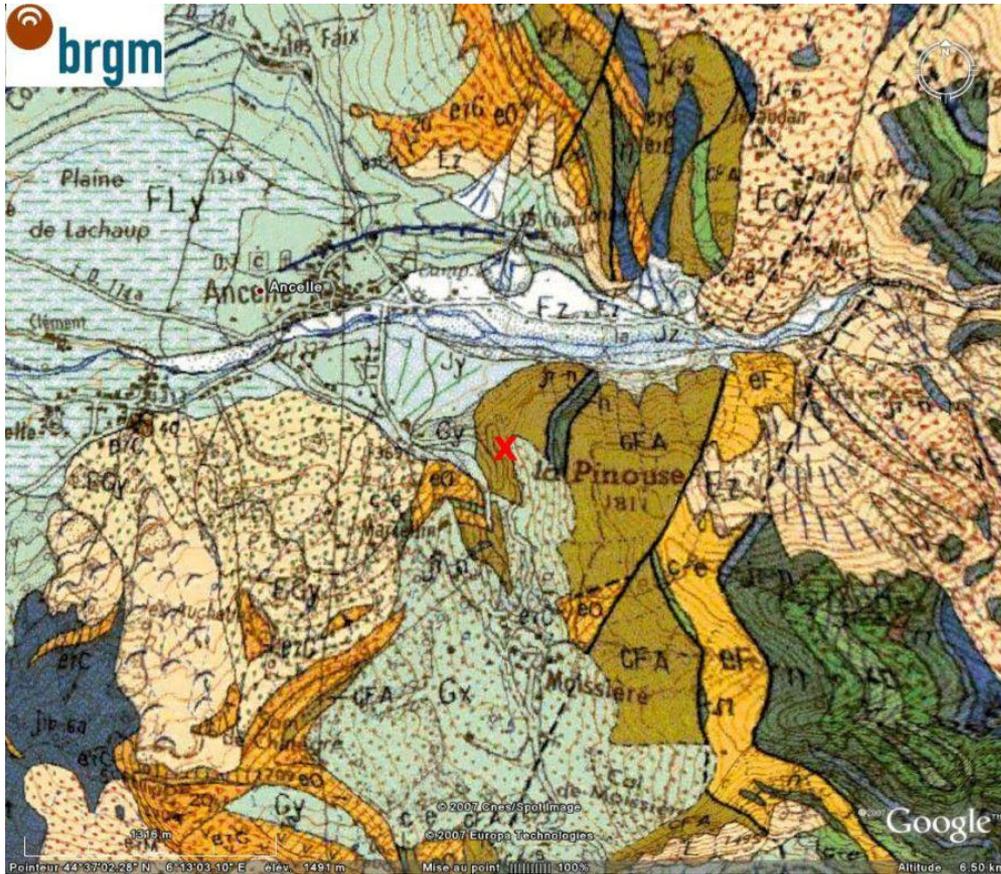


Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Ancelle (Hautes Alpes)

Flysch à Helminthoïde (Crétacé supérieur)



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Anticlinal dans la nappe des flyschs à helminthoïdes, Ancelle (Hautes Alpes)



Photographie : Pierre Thomas

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Faïlle inverse d'Ancelle (nappe des flyshs à helminthoïdes)

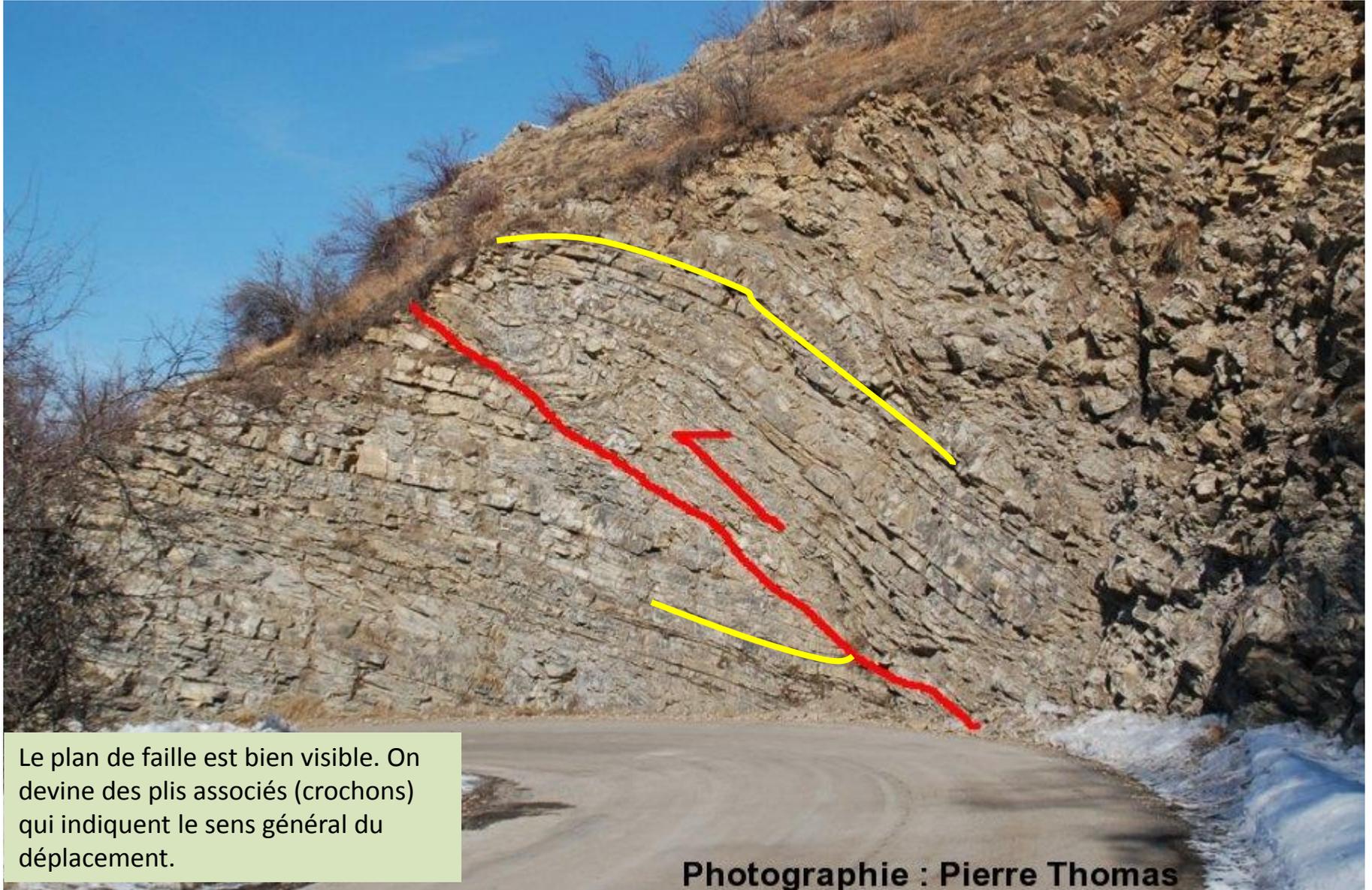


Photographie : Pierre Thomas

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Faille inverse d'Ancelle (nappe des flyshs à helminthoïdes)



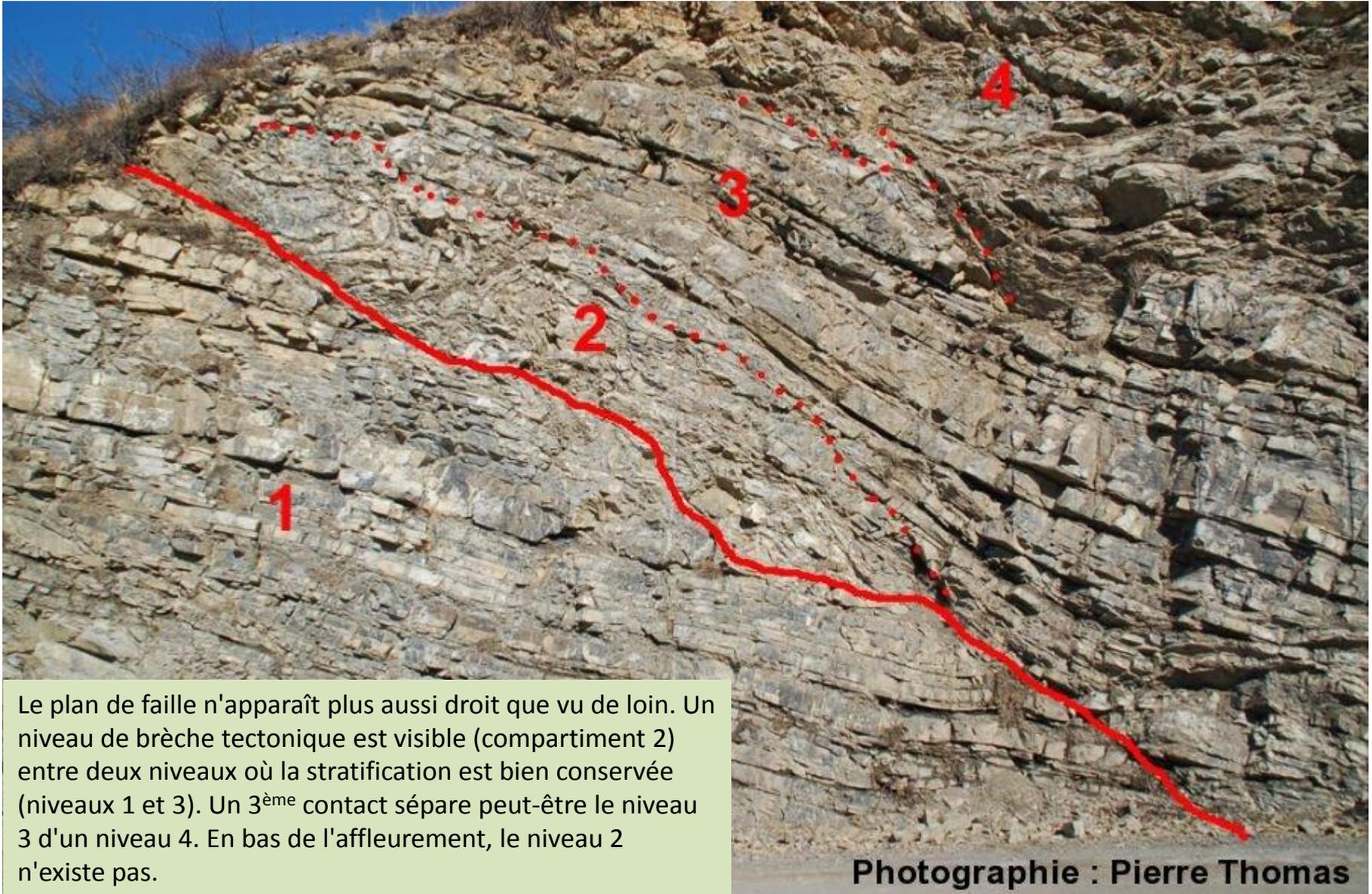
Le plan de faille est bien visible. On devine des plis associés (crochons) qui indiquent le sens général du déplacement.

Photographie : Pierre Thomas

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Faïlle inverse d'Anelle (nappe des flyshs à helminthoïdes)



Le plan de faille n'apparaît plus aussi droit que vu de loin. Un niveau de brèche tectonique est visible (compartiment 2) entre deux niveaux où la stratification est bien conservée (niveaux 1 et 3). Un 3^{ème} contact sépare peut-être le niveau 3 d'un niveau 4. En bas de l'affleurement, le niveau 2 n'existe pas.

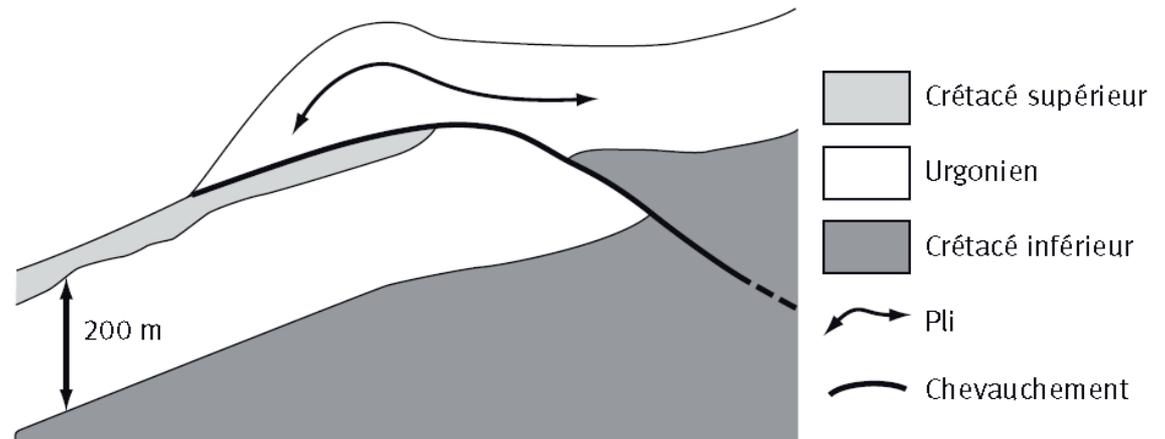
Photographie : Pierre Thomas

D'après Lithothèque PACA et ENS Lyon

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

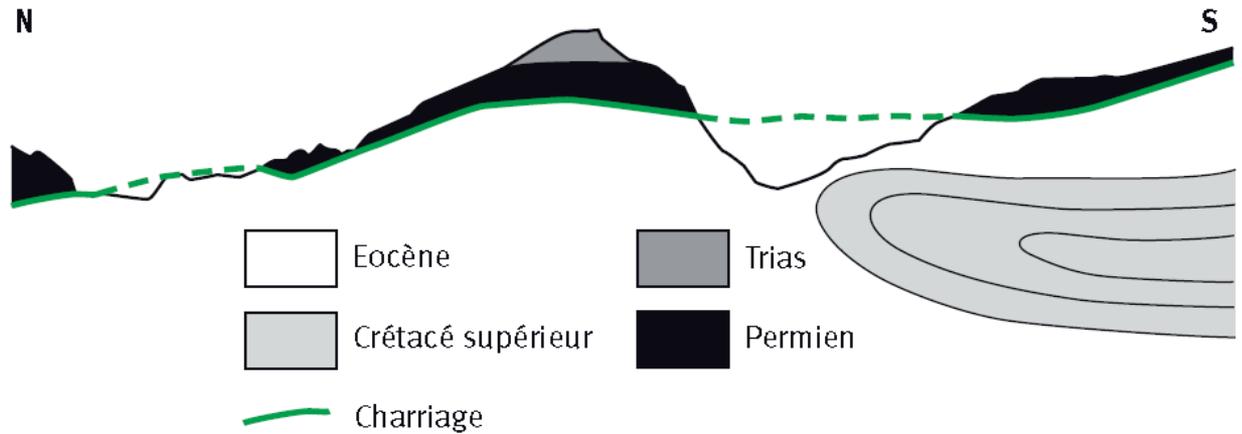
Chevauchement : Rochers de Leschaux, massif des Bornes, Haute-Savoie



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriages de Glaris, Alpes suisses

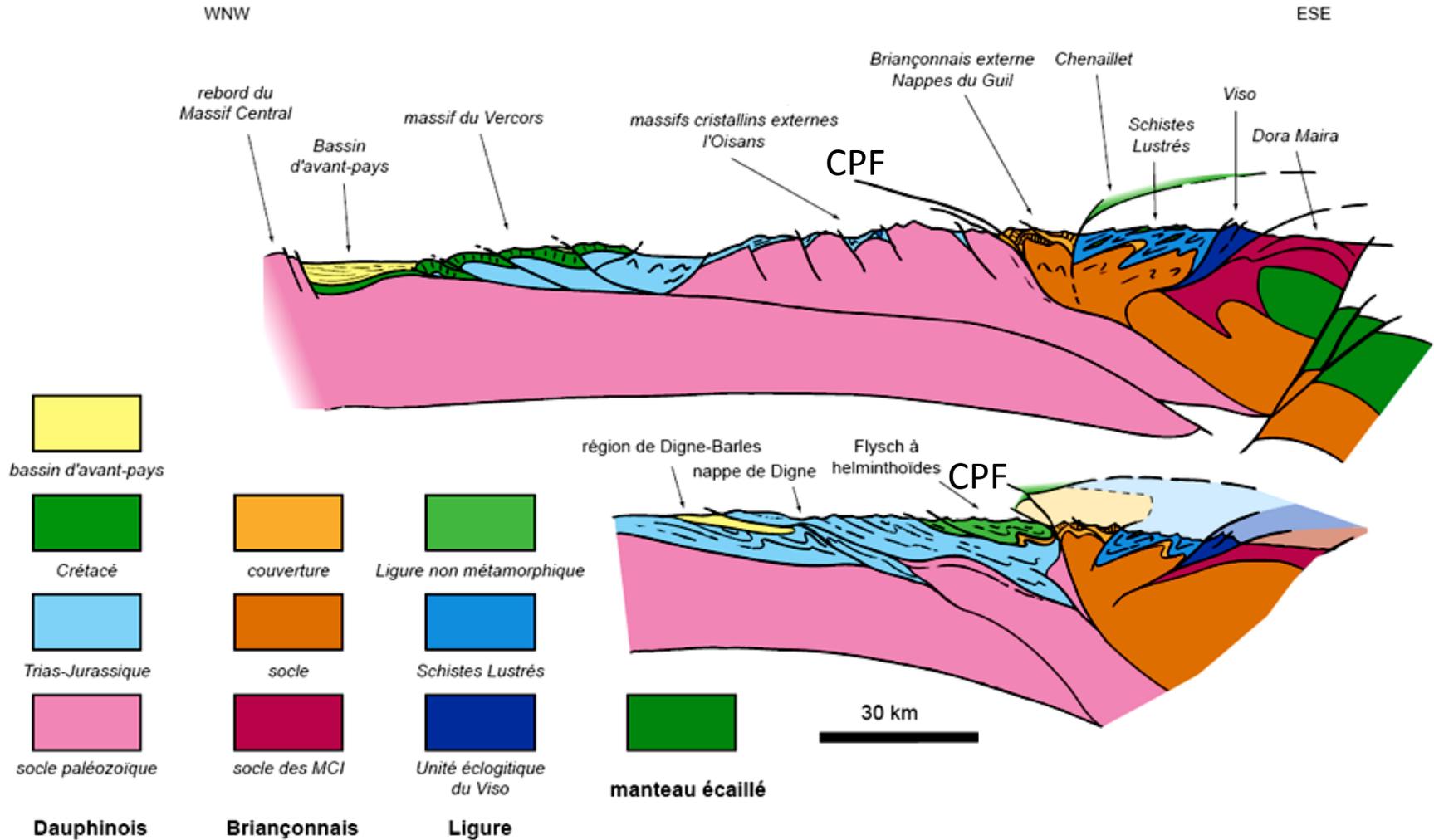


Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

CPF = Chevauchement pennique frontal

Coupe Vercors - Ecrins - Viso - D. Maira



Coupe nappes de Digne et des flyschs à Helminthoïdes

Les marqueurs de la subduction continentale

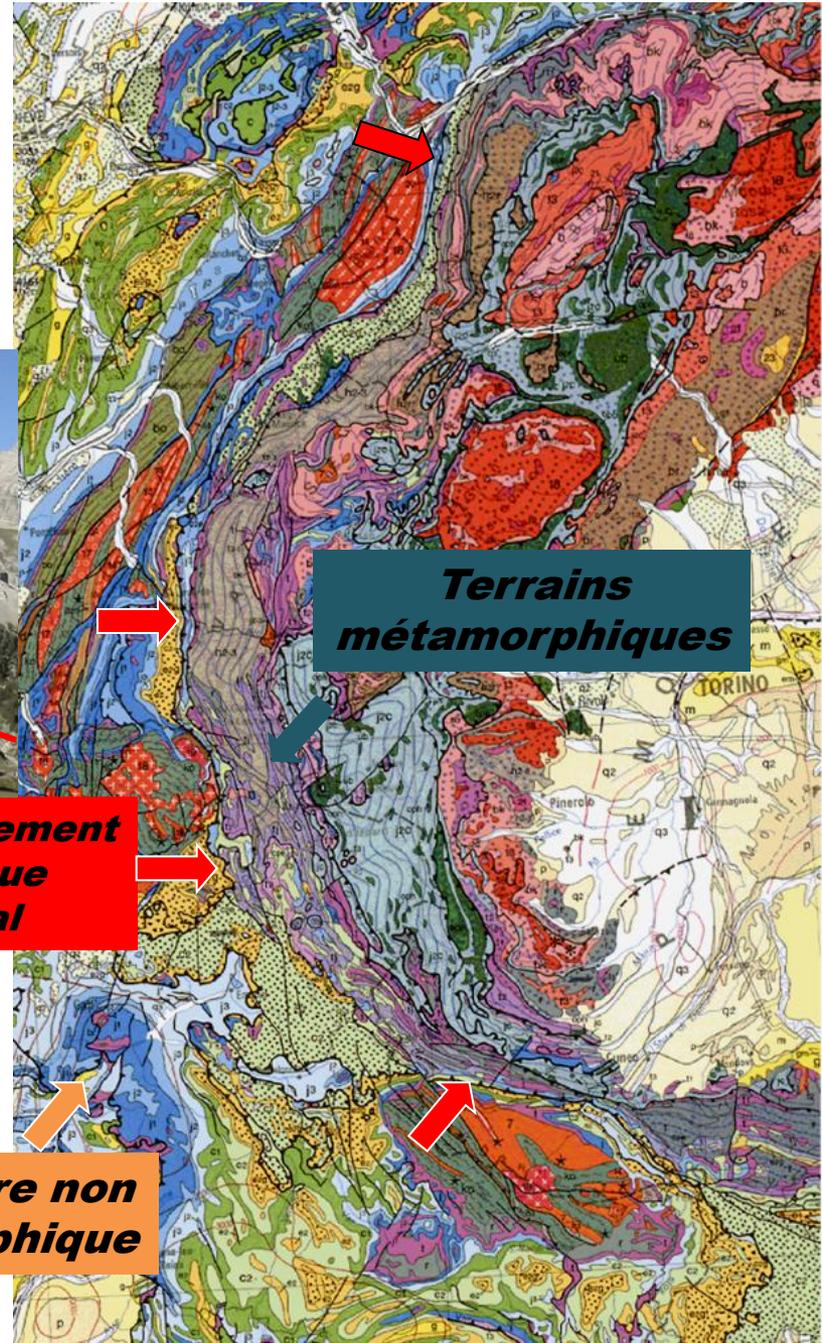
Structures tectoniques

Le chevauchement pennique frontal = Marqueur tectonique majeur à l'échelle de l'arc alpin



Le Galibier vu du Col du Lautaret

Chevauchement pennique frontal



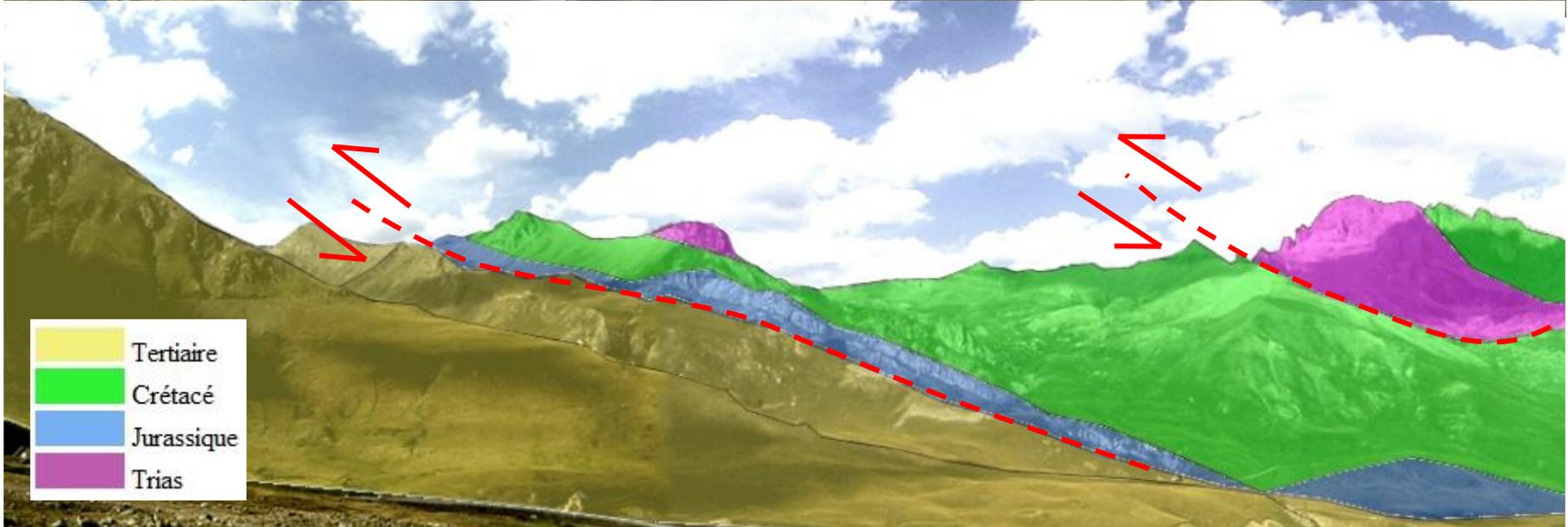
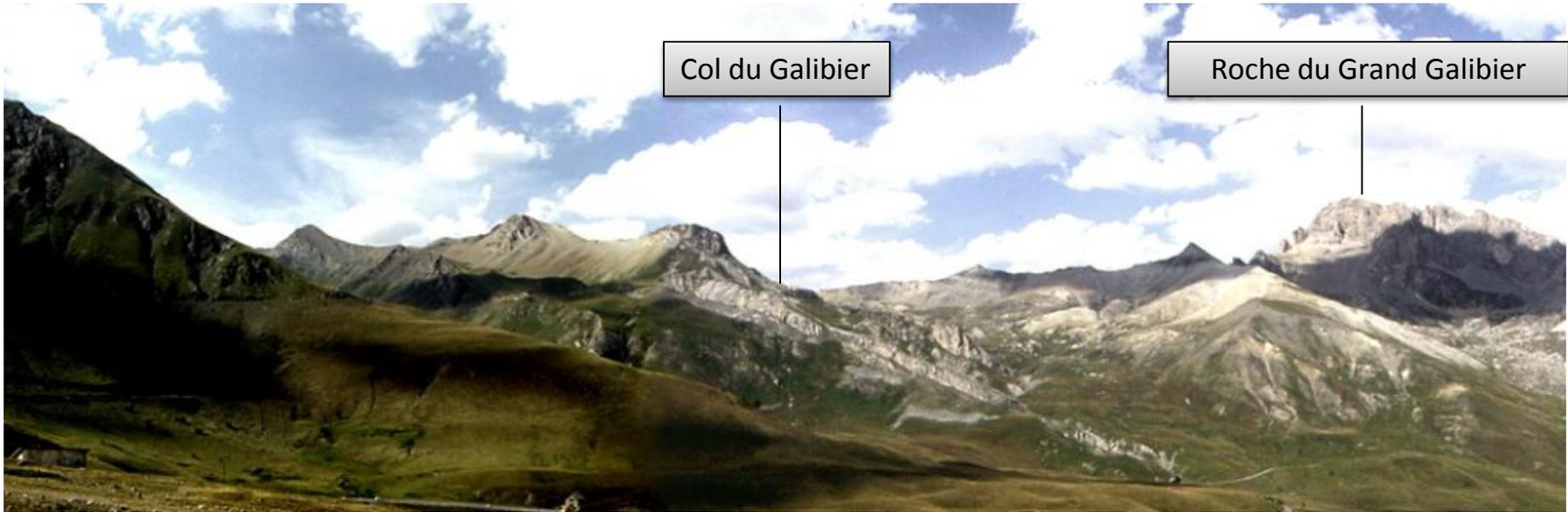
Terrains métamorphiques

Couverture non métamorphique

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Panorama du Galibier depuis le Lautaret

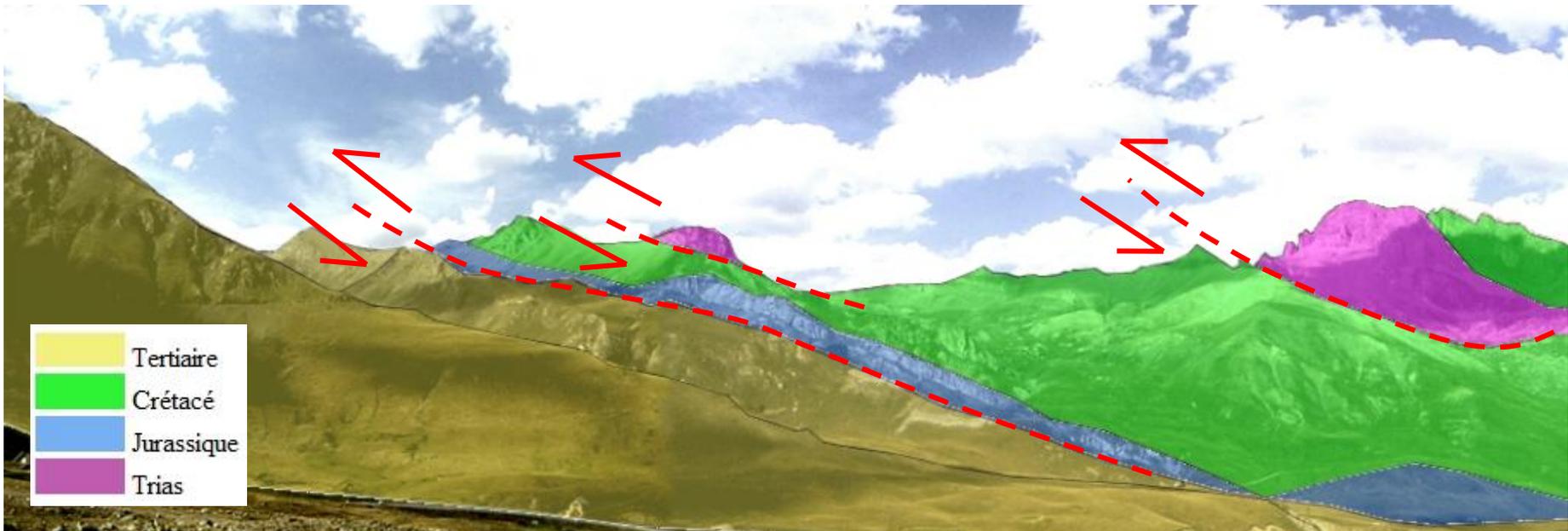


Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Panorama du Galibier depuis le Lautaret

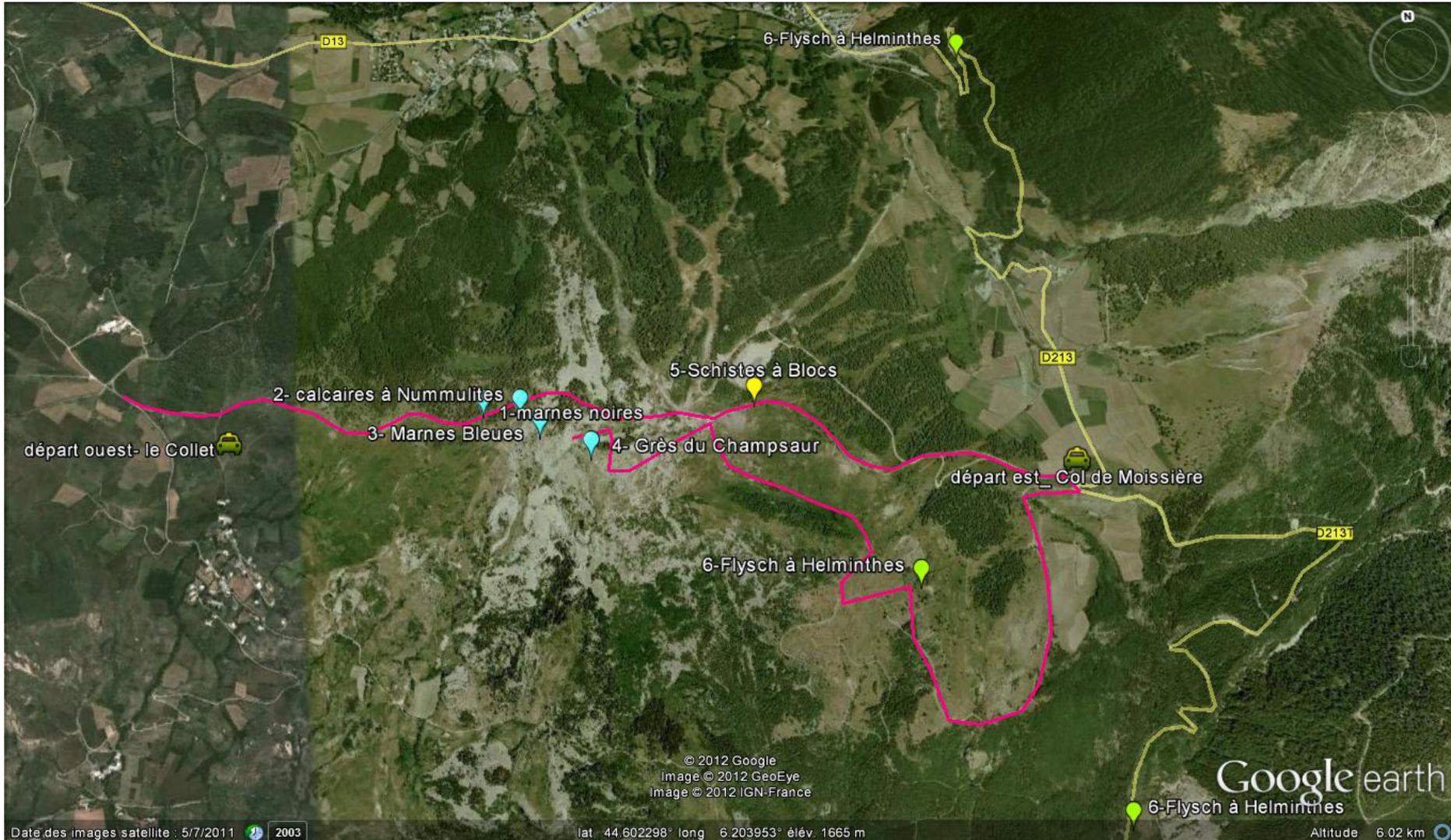
- **Flysch Nummulitique (Eocène)**, sombre et strié (alternance grès/schiste) = **zone Dauphinoise**. Ces terrains constituent le Pic de Côte-Plaine, le Pic Blanc ainsi que le vallon de Roche Noire.
- Longue arrête rocheuse de calcaire gris (**Jurassique moyen**), allant de la route du Galibier jusqu'à la route de Briançon en contre-bas. Cette barre rocheuse est surmontée de calcschistes gris ou noirs (**Crétacé supérieur**), souvent recouverts de prairies ou d'éboulis. Ces terrains appartiennent à la **zone Sub-Briançonnaise**.
- Une deuxième barre rocheuse, massive et sombre, contraste avec les calcschistes Sub-Briançonnais. Il s'agit des quartzites du **Trias inférieur**. Ceux-ci sont surmontés de calcaires dolomitiques du Trias moyen, d'aspect ruiniforme, et constituant l'ossature du Grand Galibier. Ces terrains appartiennent à la **série Briançonnaise**.



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

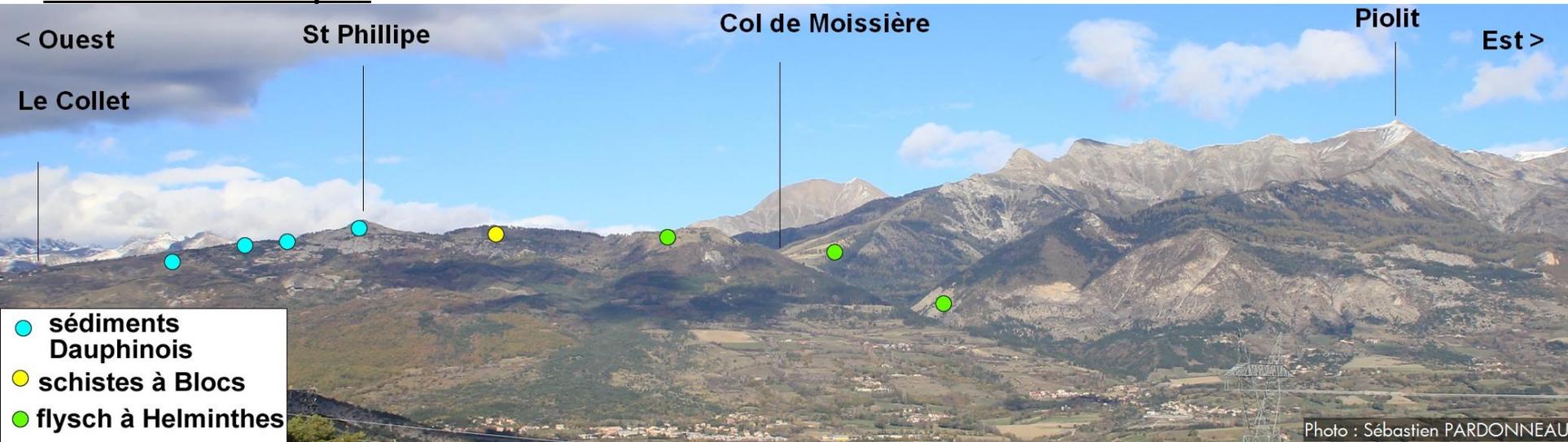
Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



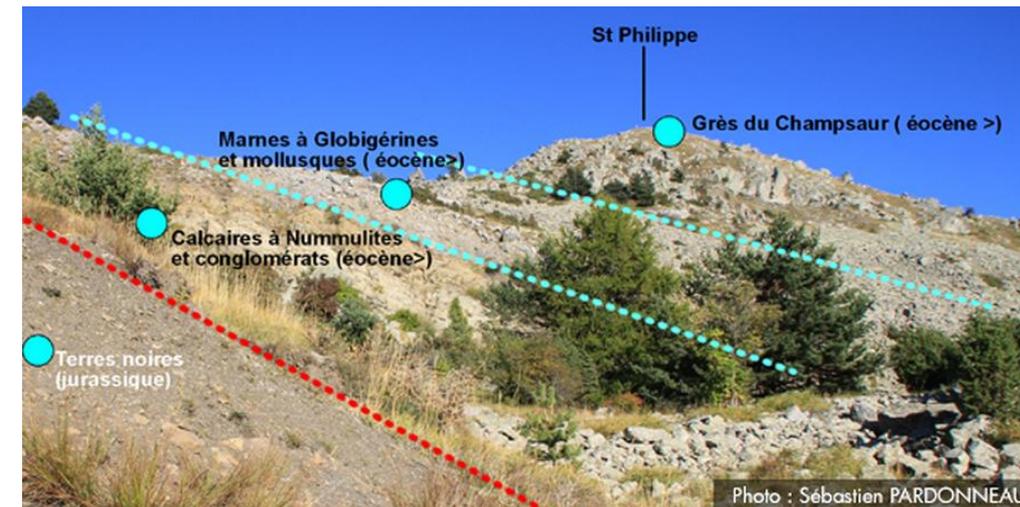
Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



Sédiments de St Philippe : Eocène sup (nummulites)



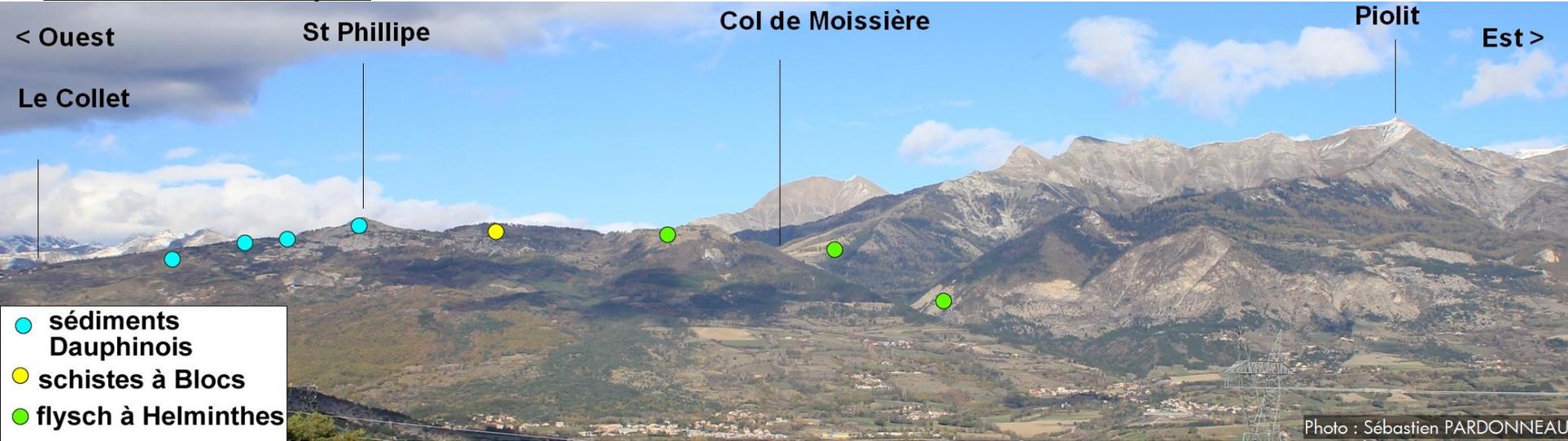
Flysch à Helminthoïdes de l'Autapie: Crétacé supérieur (*Globotruncana* et helminthoïdes).



Les marqueurs de la subduction continentale

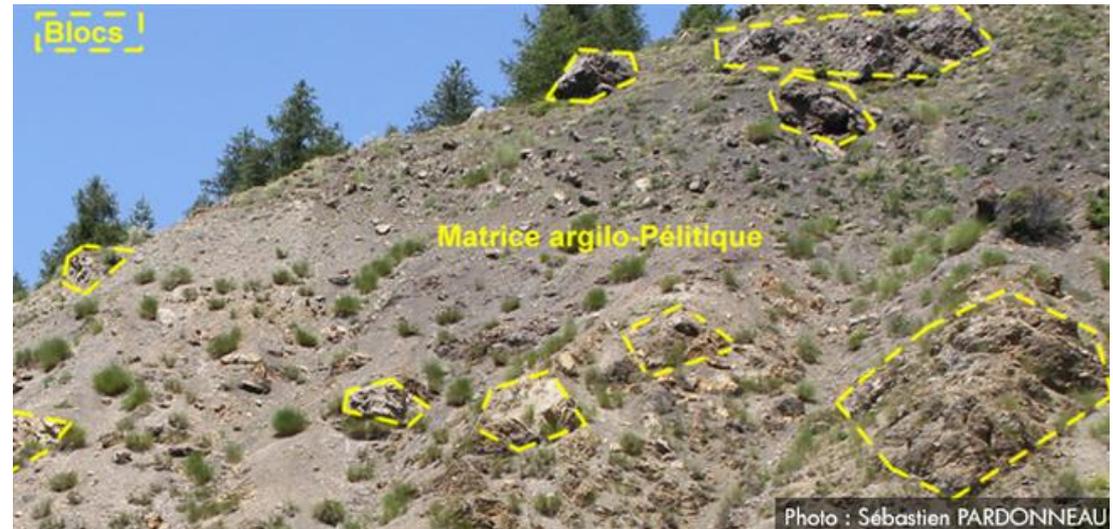
Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



Schistes à blocs (eO= Priabonien - Oligocène inférieur)

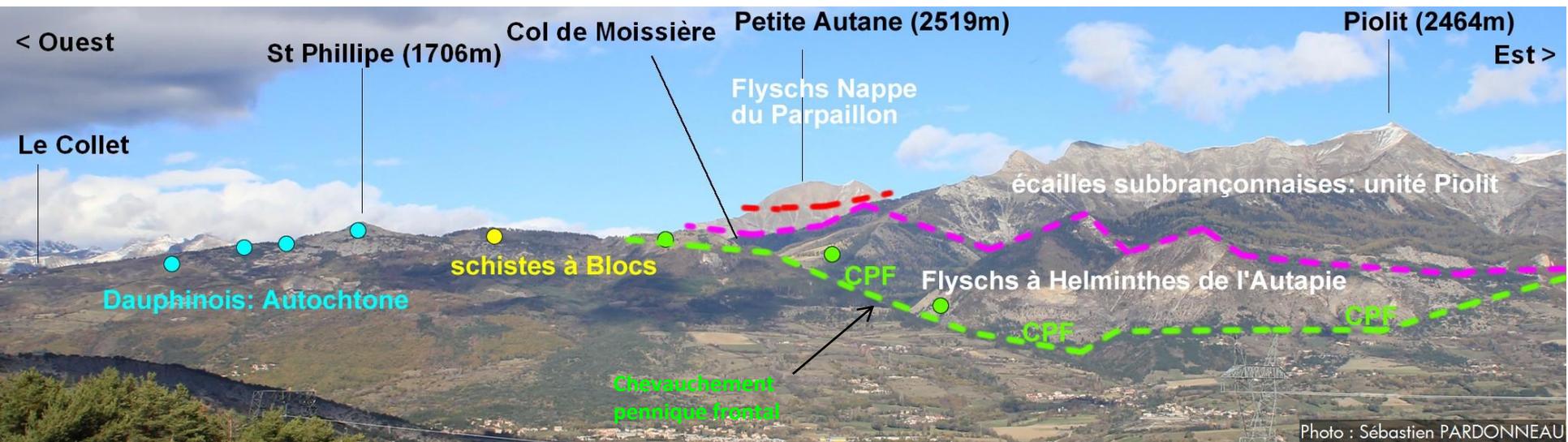
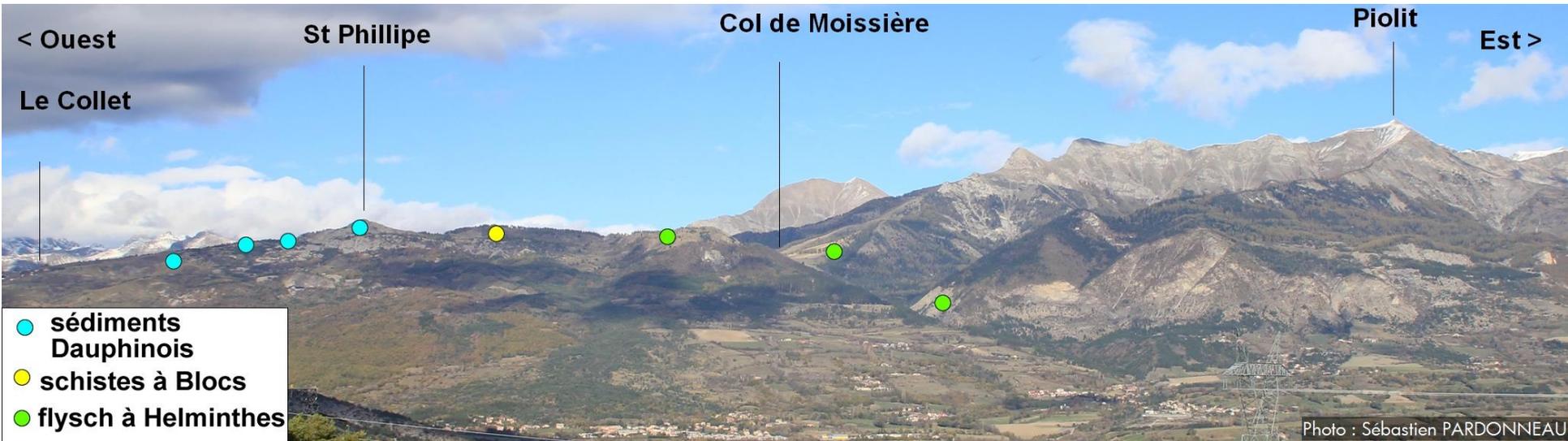
La formation des « Schistes à blocs » a été interprétée par C. Kerckhove comme un olistostrome, c'est-à-dire un ensemble d'olistolites inclus dans un **corps chaotique** au cours du glissement gravitaire accompagnant la mise en place sous l'eau d'une nappe de charriage dans un bassin sédimentaire.



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

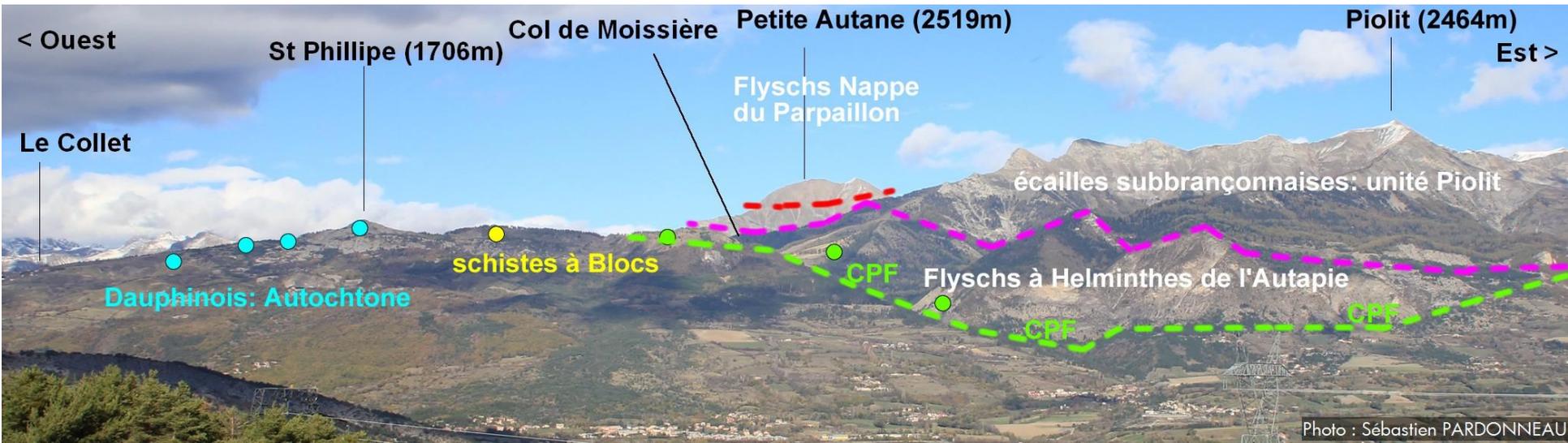
Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



La lecture du panorama du Collet au Piolit montre une augmentation des altitudes des sommets de l'ouest vers l'est.

Deux **zones** apparaissent selon ce critère :

- à l'ouest la **zone de St Philippe** d'altitude modeste (1706m),
- à l'est la **zone des Autanes et du Piolit** (2500m) domine cette région. Les altitudes plus élevées à l'est du col de Moissière s'expliquent par une puissance supérieure des matériaux rocheux (puissance des séries et empilement de nappes dû à la convergence).

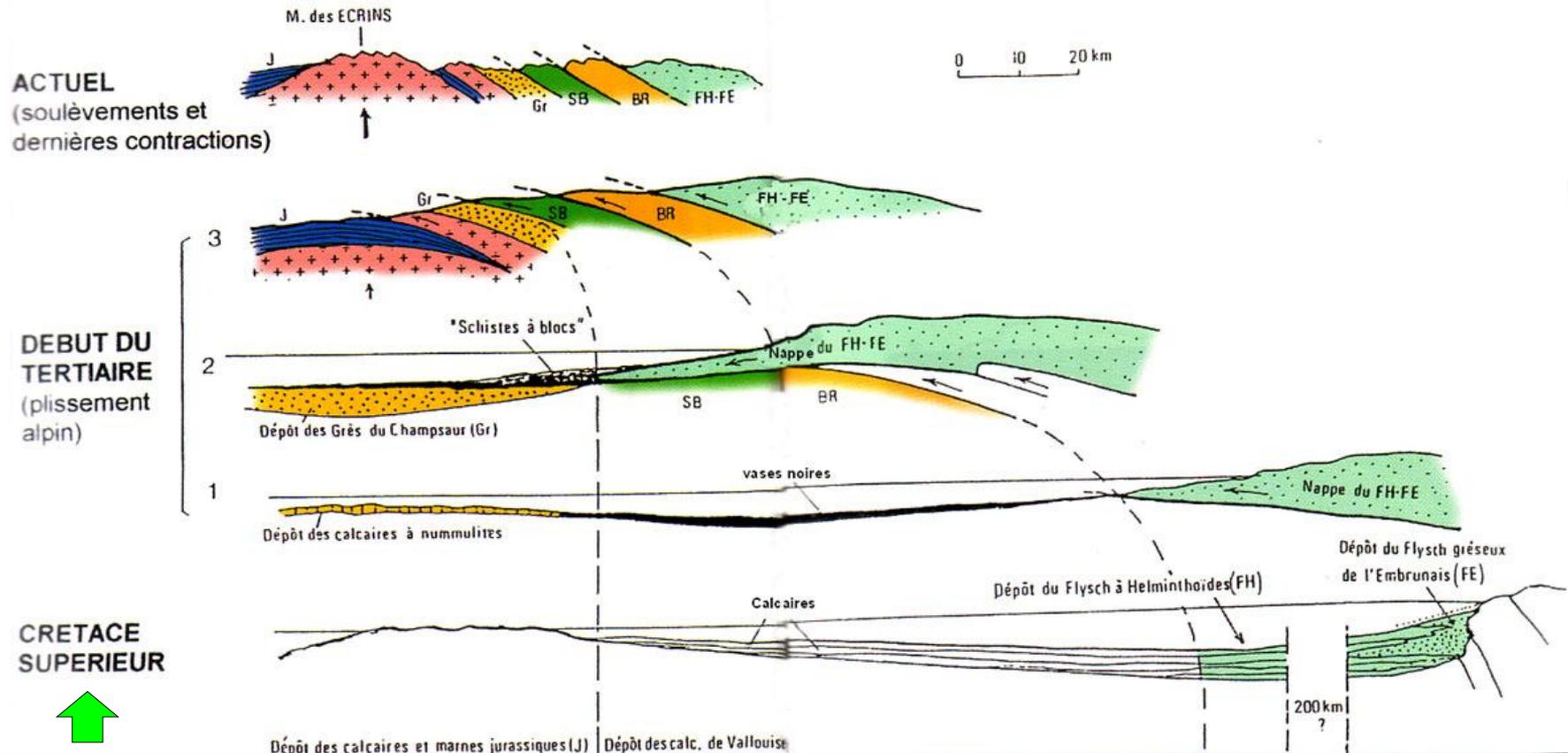
Le col de Moissière se situe au niveau du contact tectonique majeur (le chevauchement pennique frontal = CPF) entre les domaines externe et interne de l'ancien océan alpin :

- **Le domaine externe** (Dauphinois) est à l'ouest du col de Moissière. Il est autochtone et comprend deux ensembles :
 - les **sédiments dauphinois** (NB : pour simplifier la lecture les écailles et redoublements dans l'autochtone dauphinois alors qualifié de « para-autochtone » dans ces cas, n'ont pas été mentionnées).
 - le **complexe des Schistes à blocs**
- **Le domaine interne** occupe la partie orientale. Il appartient au domaine des écailles et des nappes de charriage de l'Embrunais et comprend trois ensembles :
 - la **nappe des Flyschs à Helminthoïdes de l'Autapie**, des écailles subbriançonnaises, la nappe des Flyschs du Parpaillon.

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



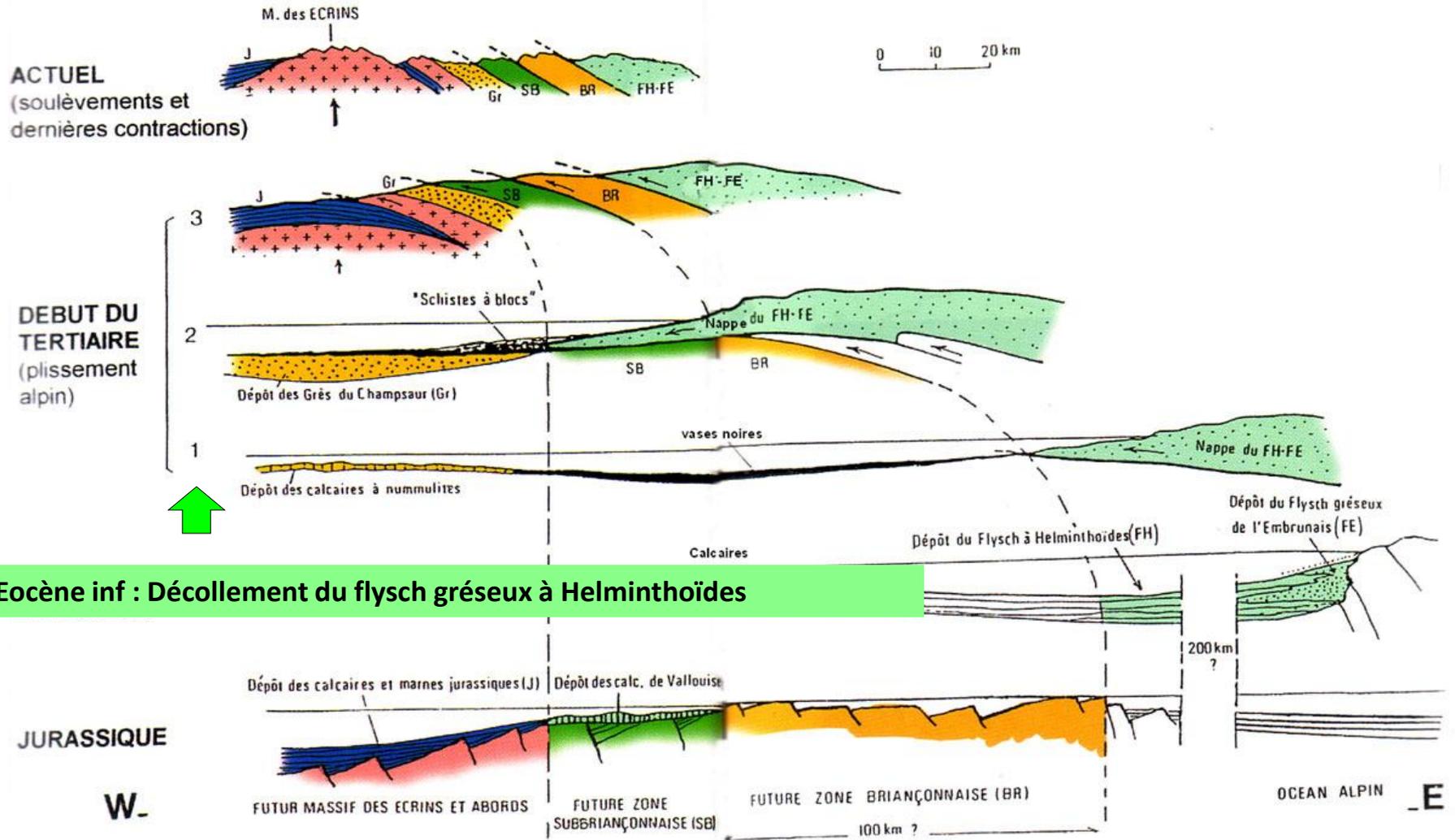
Crétacé supérieur : dépôts et paléoenvironnement.

- les turbidites du Flysch à Helminthoïdes indiquent un milieu de sédimentation recevant des apports détritiques dans la zone Piémontaise. Cette zone est de type pélagique profond. Cette sédimentation riche en apport détritique contraste avec celle peu détritique du Jurassique inférieur et Crétacé supérieur de la zone Piémontaise. Il y a donc des reliefs alpins au Crétacé supérieur situés à l'est de cette zone Piémontaise qui fournissent ces matériaux détritiques.

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



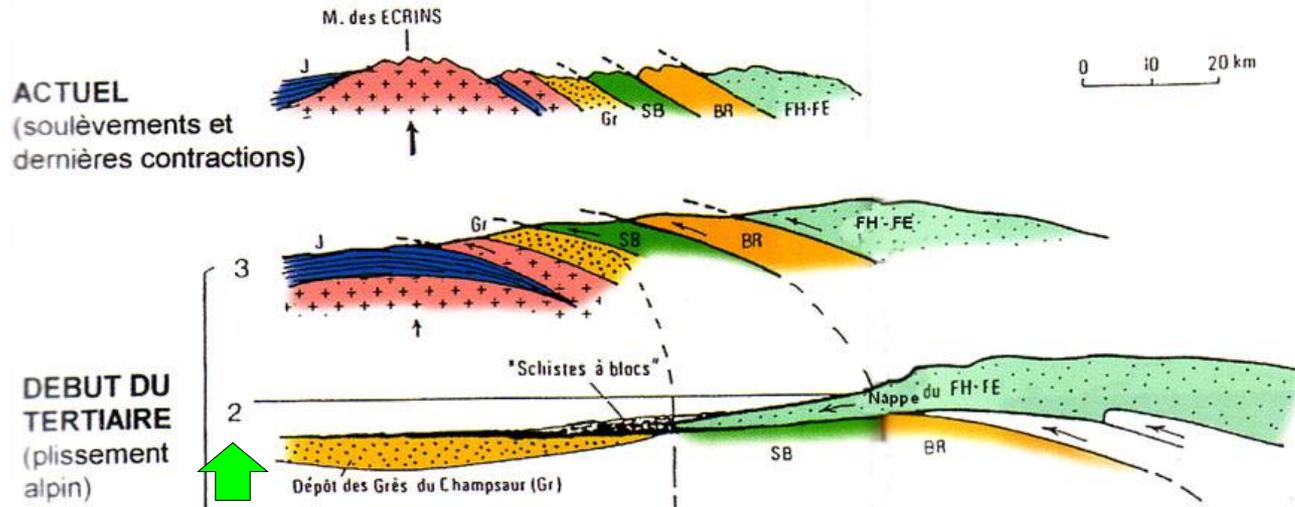
Eocène inf : Décollement du flysch gréseux à Helminthoïdes

Schéma de mise en place des nappes. (src guide géologique des Ecrins)
Coupes transversales E-W de la région depuis l'époque où elle était faite de bassins marins juxtaposés (jurassique, Crétacé, début du Tertiaire) jusqu'à l'époque actuelle. Le raccourcissement dû au plissement alpin a pu être de l'ordre de 20 à 1, voire plus.

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



Eocène supérieur : Déplacement des nappes internes, dépôt de grès du Champsaur (bassin flexural)

-Sédimentation avec un apport détritique important, qui montre que les reliefs des Alpes sont plus proches à l'Eocène qu'ils ne l'avaient été avant.

L'épaisseur des sédiments éocène augmente dans les zones internes (Est) → cela traduit un enfoncement de la lithosphère (bassin flexural d'avant chaîne, en bordure du relief situé à l'Est, engendré par la collision)

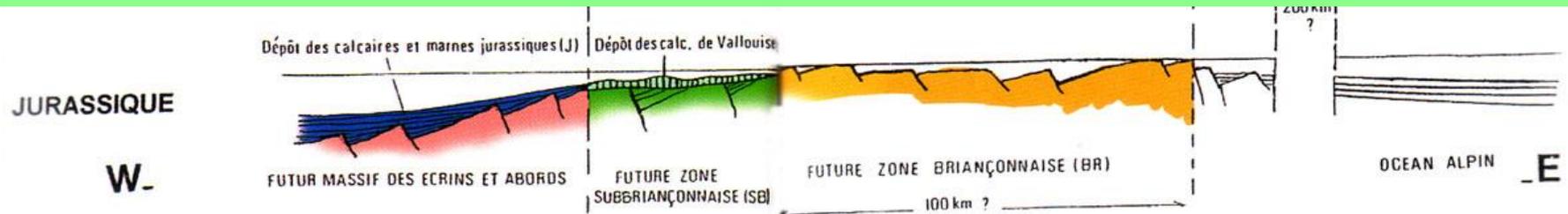
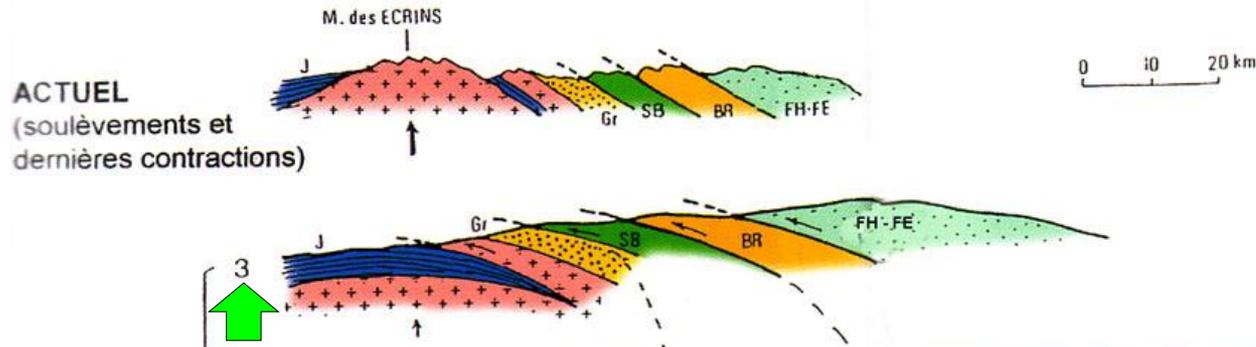


Schéma de mise en place des nappes. (src guide géologique des Ecrins)
Coupes transversales E-W de la région depuis l'époque où elle était faite de bassins marins juxtaposés (jurassique, Crétacé, début du Tertiaire) jusqu'à l'époque actuelle. Le raccourcissement dû au plissement alpin a pu être de l'ordre de 20 à 1, voire plus.

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière



Début Oligocène

Les grès du Champsaur sont recouverts par des olistostromes produits par l'avancée gravitaire des nappes des internes des flyschs à Helminthoïdes de l'est vers l'ouest. Cette mise en place est sous-marine. Mais elle finit par combler le bassin et stopper la sédimentation. Ces nappes et écailles charriées sous l'effet du raccourcissement lié à la collision contribuent à l'épaississement de la croûte continentale et à la création de reliefs supplémentaires dans cette région dauphinoise. La collision s'est déplacé du Piémont jusqu'à la région Dauphinoise.

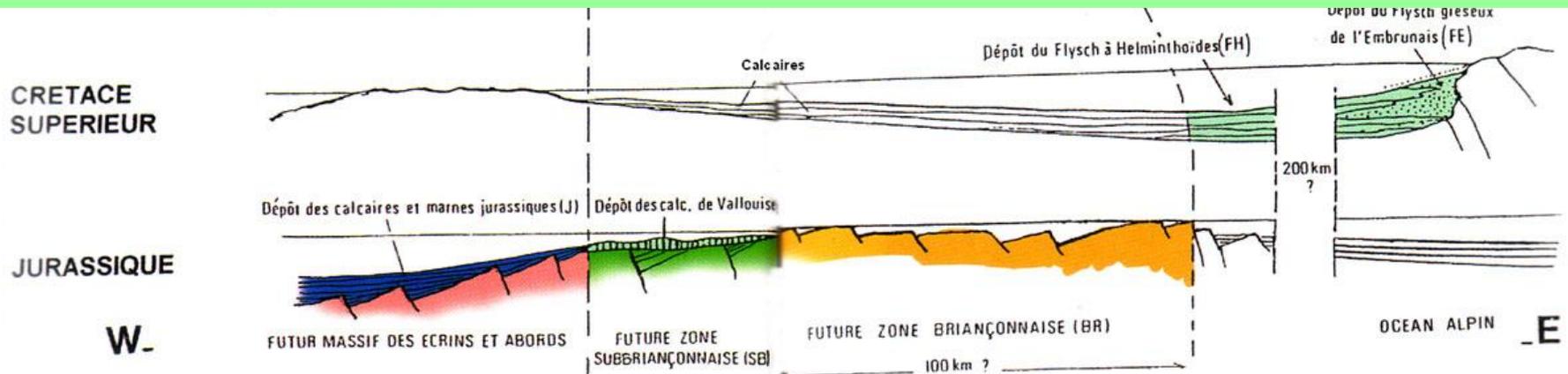


Schéma de mise en place des nappes. (src guide géologique des Ecrins)
Coupes transversales E-W de la région depuis l'époque où elle était faite de bassins marins juxtaposés (jurassique, Crétacé, début du Tertiaire) jusqu'à l'époque actuelle. Le raccourcissement dû au plissement alpin a pu être de l'ordre de 20 à 1, voire plus.

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Nappes de charriage à Ancelle – Col de Moissière

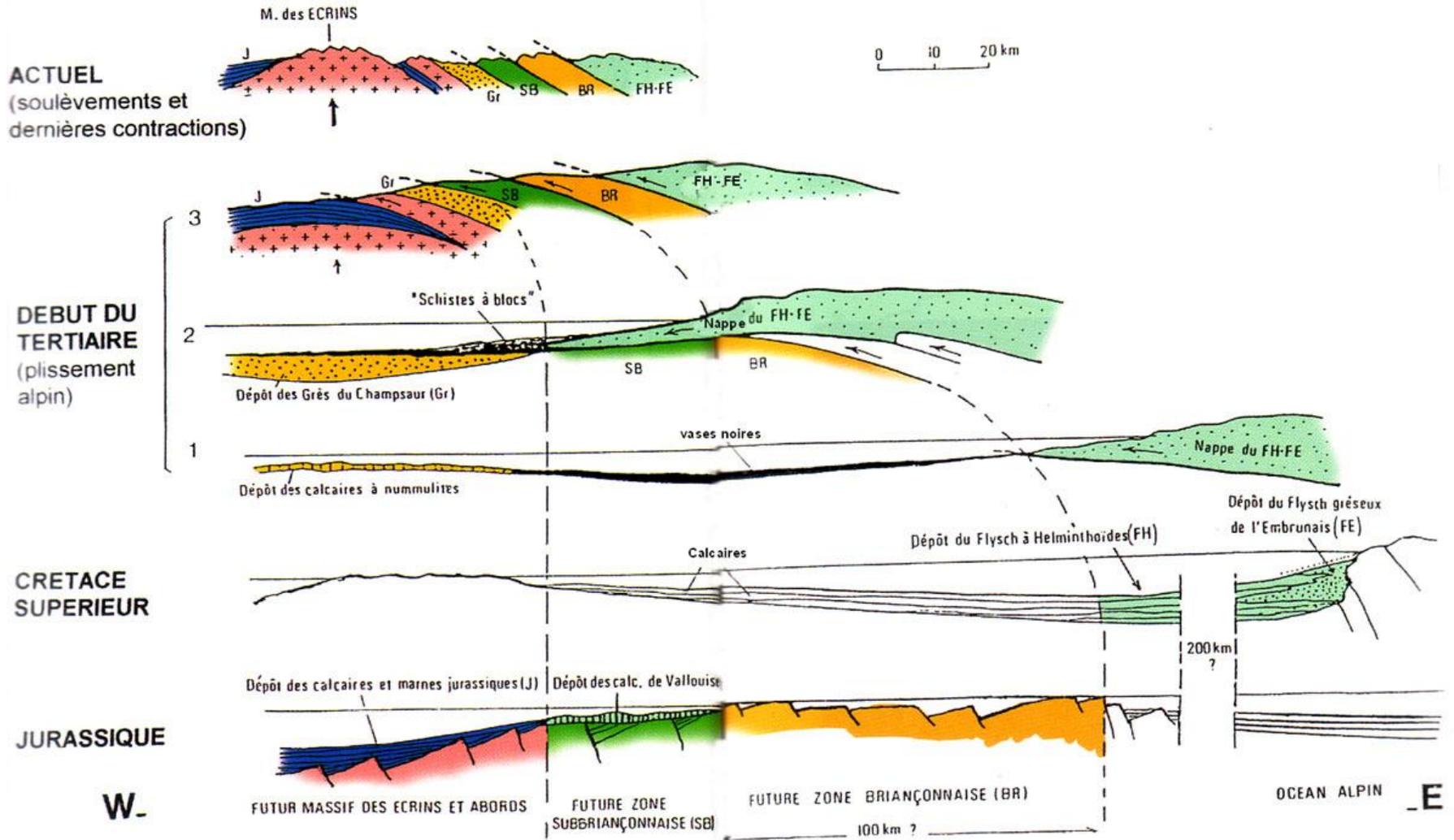
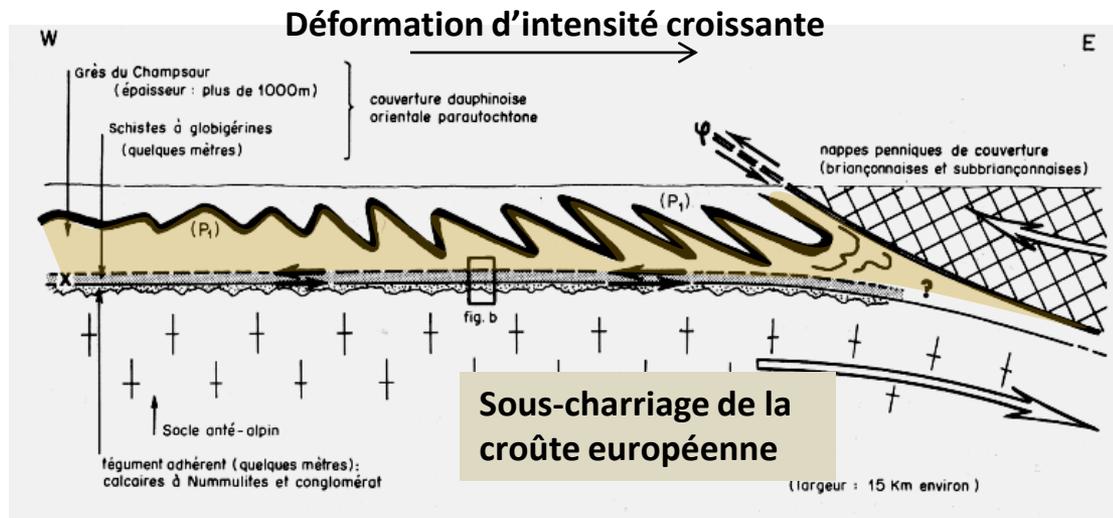
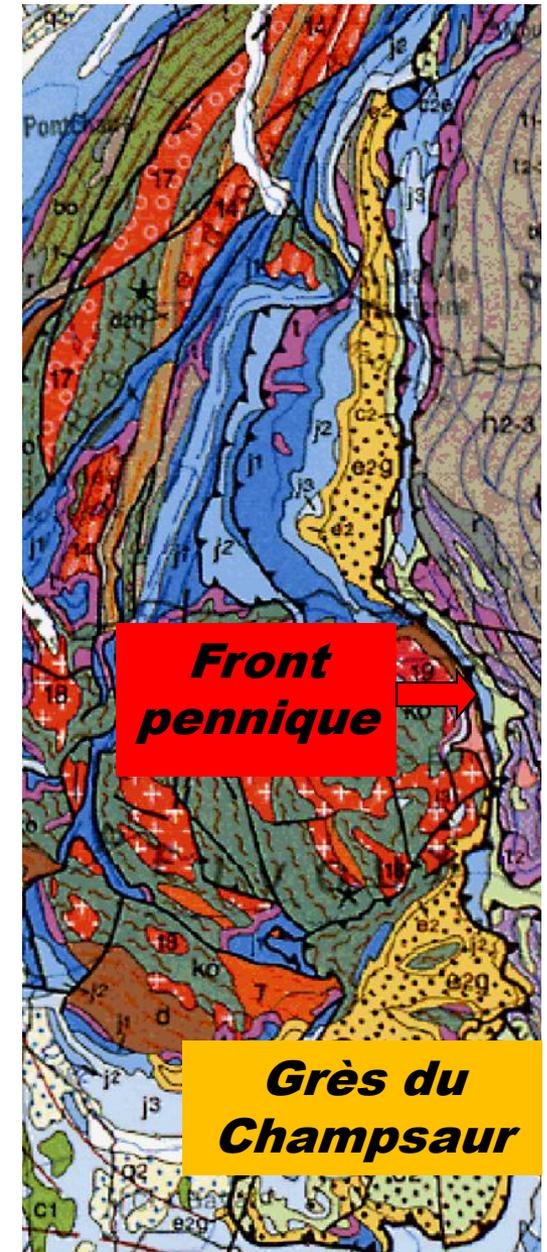


Schéma de mise en place des nappes. (src guide géologique des Ecrins)
Coupes transversales E-W de la région depuis l'époque où elle était faite de bassins marins juxtaposés (jurassique, Crétacé, début du Tertiaire) jusqu'à l'époque actuelle. Le raccourcissement dû au plissement alpin a pu être de l'ordre de 20 à 1, voire plus.

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

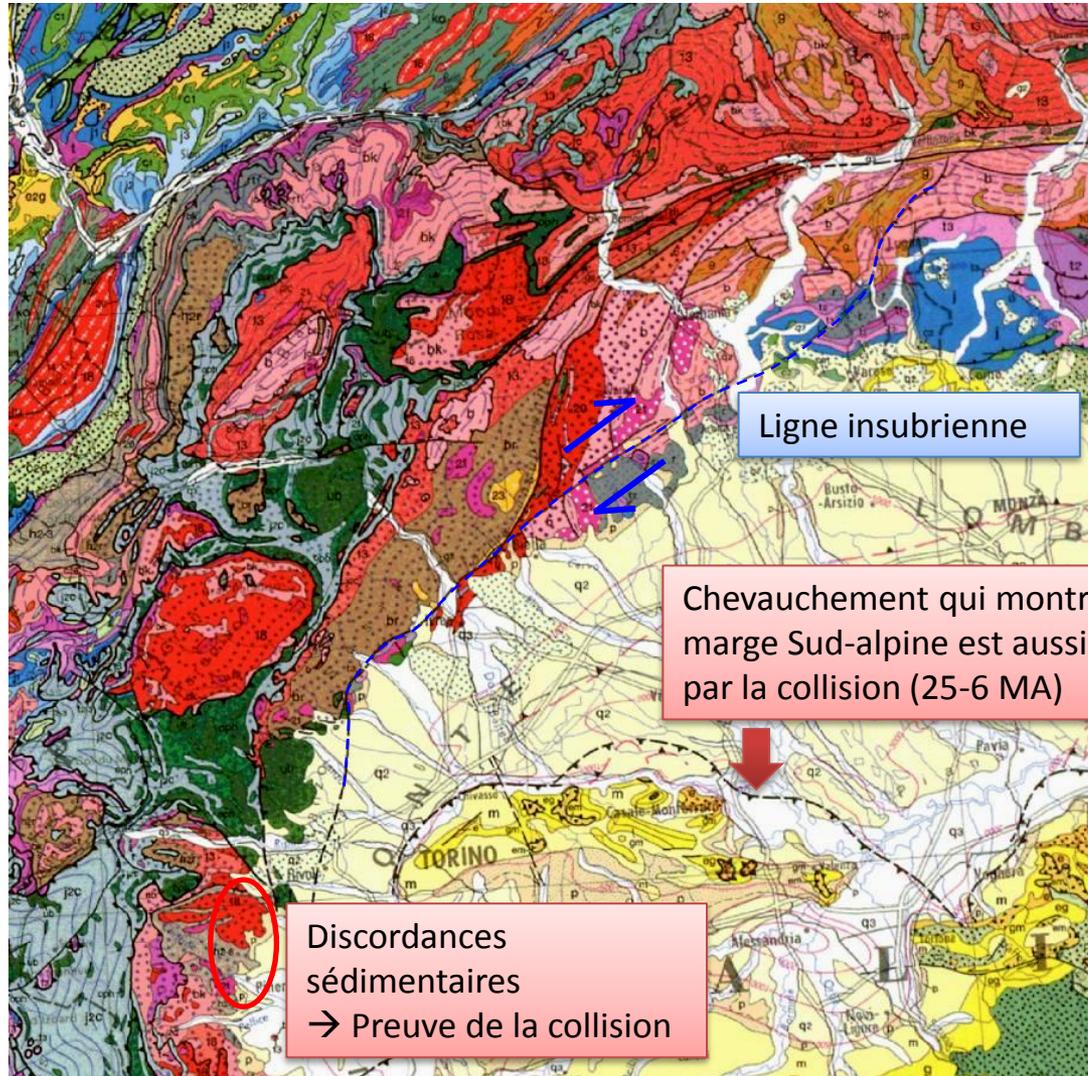
Déformations au sein de la couverture Dauphinoise



Les marqueurs de la subduction continentale

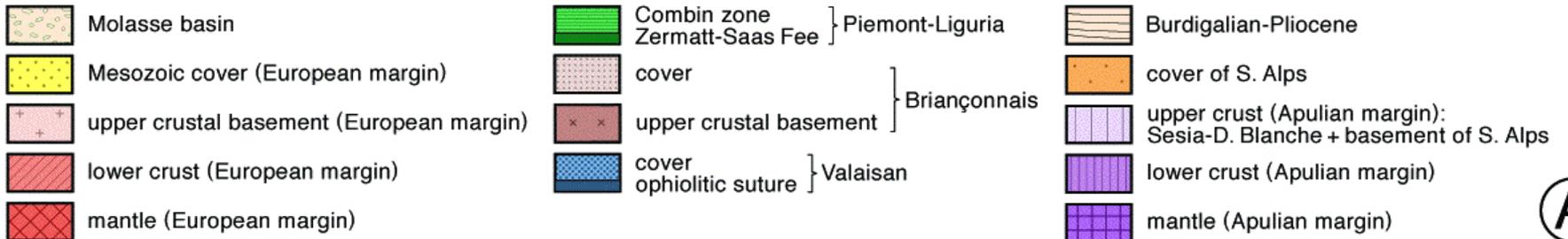
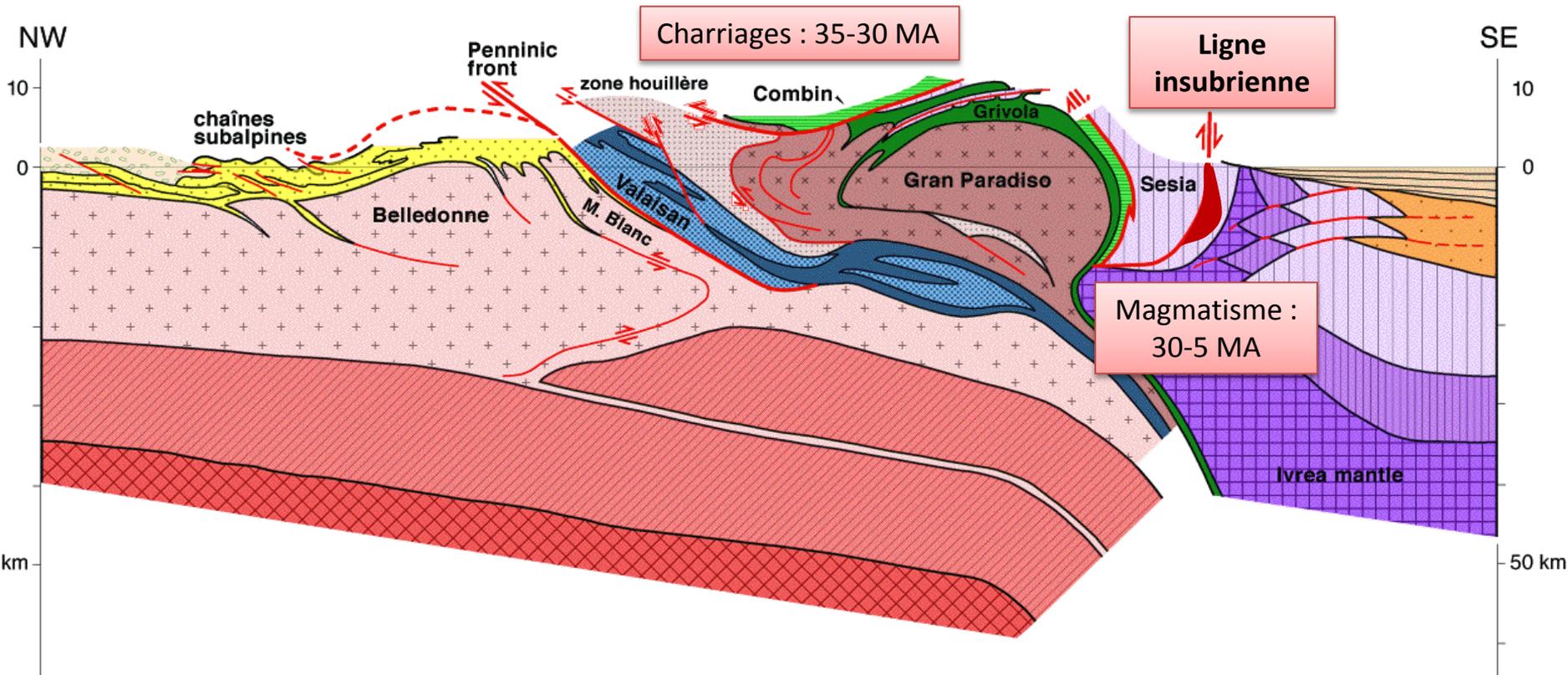
Structures tectoniques

La ligne insubrienne est un décrochement majeur qui marque la limite Est de la chaîne alpine



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

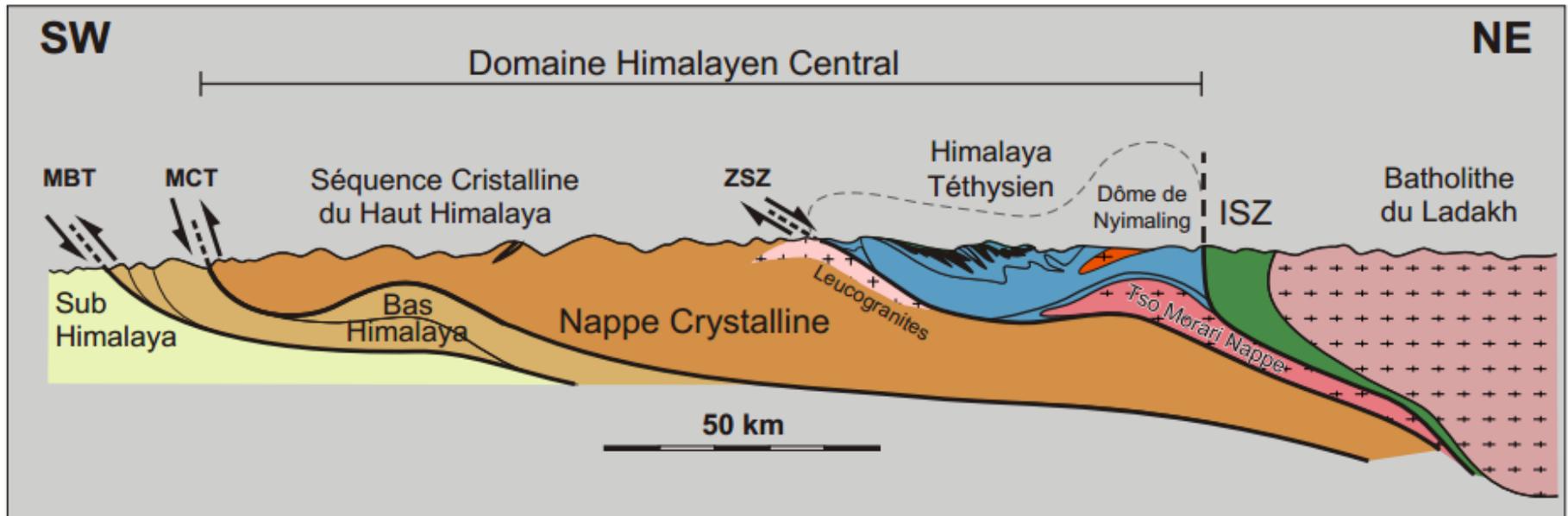
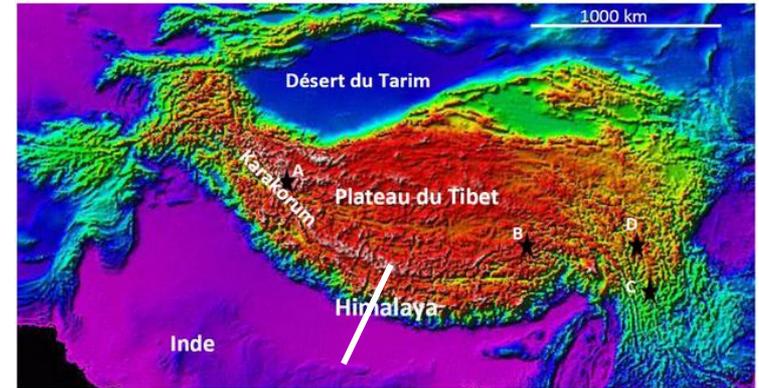


(A)

Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques Coupe interprétative Sud-Nord de l'Himalaya

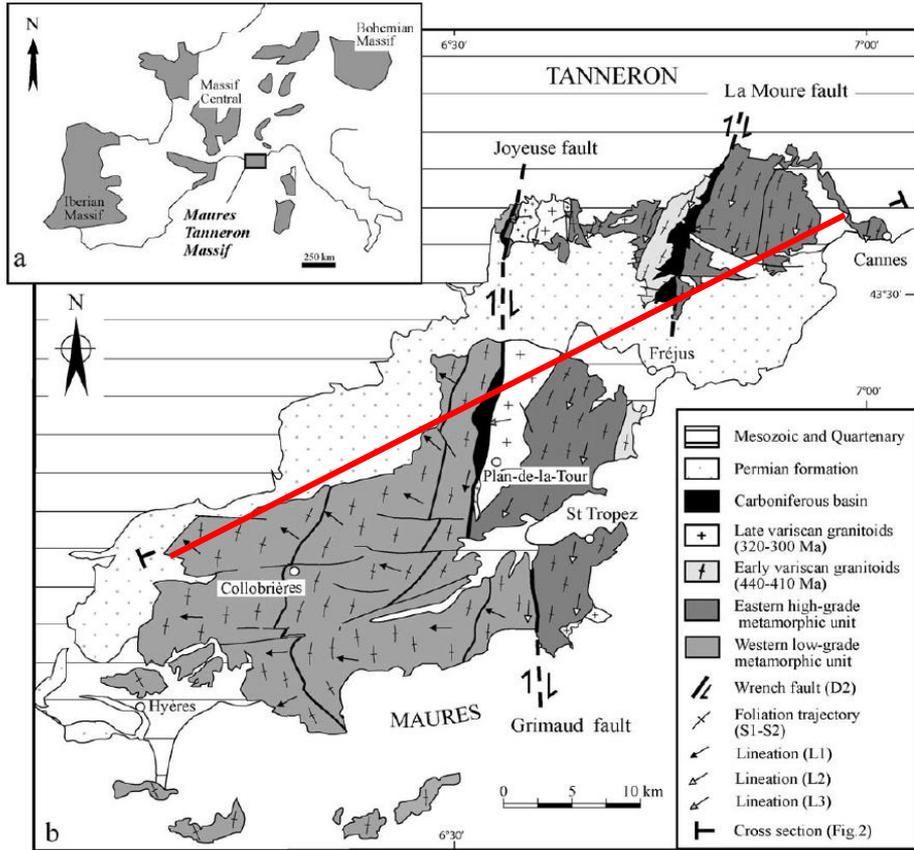
La structure en nappes empilées caractérise aussi la chaîne Himalayenne



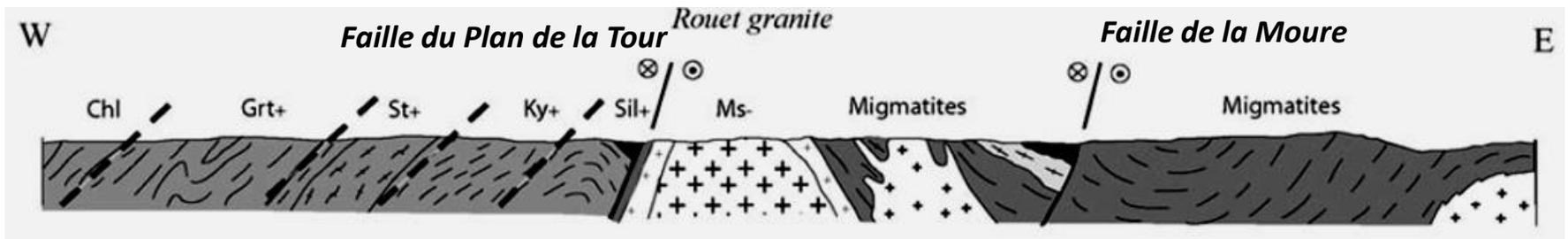
Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Des déformations à toutes les échelles dans le Massif des Maures



Plis dans les gneiss de la plage du Rayol (Maures)



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Déformations affectant les gneiss de la plage du Rayol (Maures)

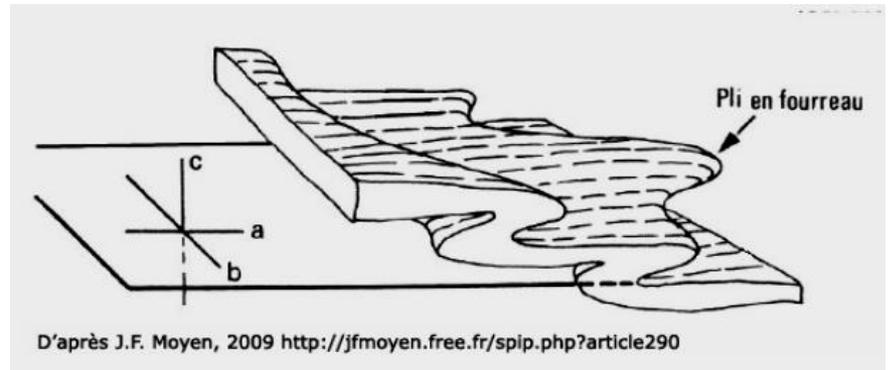
Foliation dans les gneiss



Microplis dans les niveaux micacés des gneiss



Plis en fourreau affectant les micaschistes de la plage St Clair



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Comparaison d'un gneiss avec un granite

Gneiss présentant une foliation



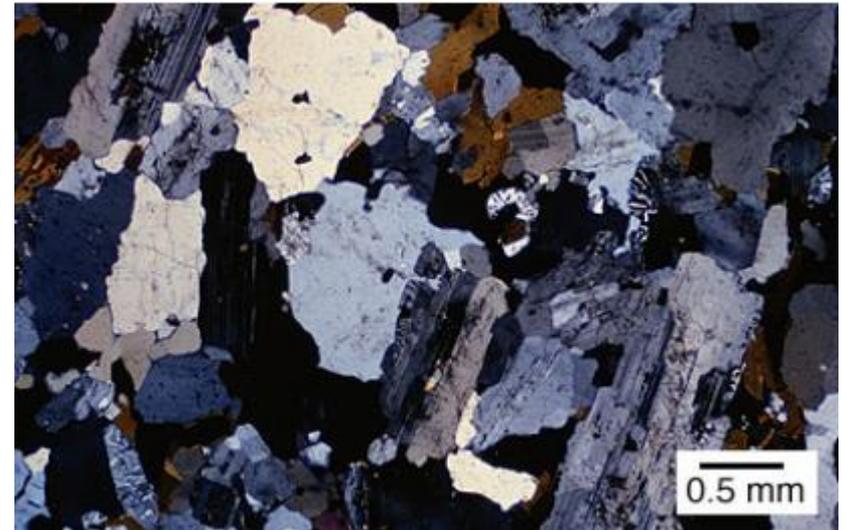
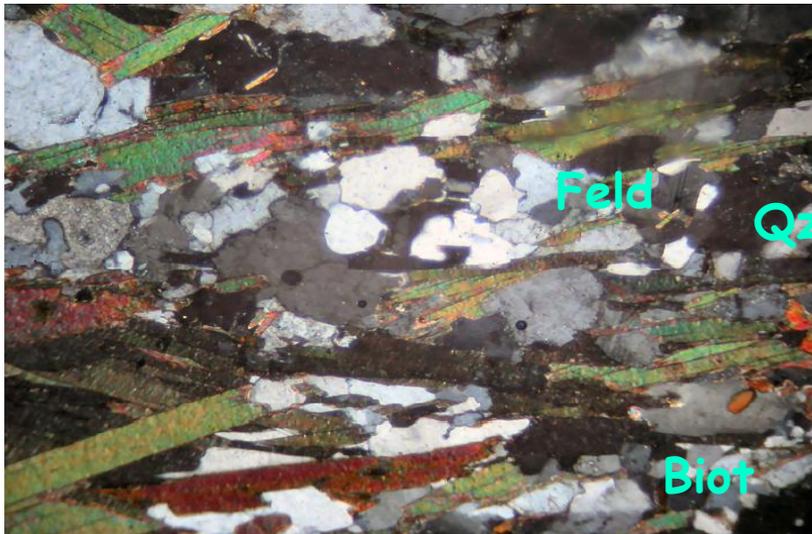
Echantillon de granite



Qz = Quartz
Biot = Biotite (Mica)
Feld = Feldspath

Observation des lames minces au microscope (LPA)

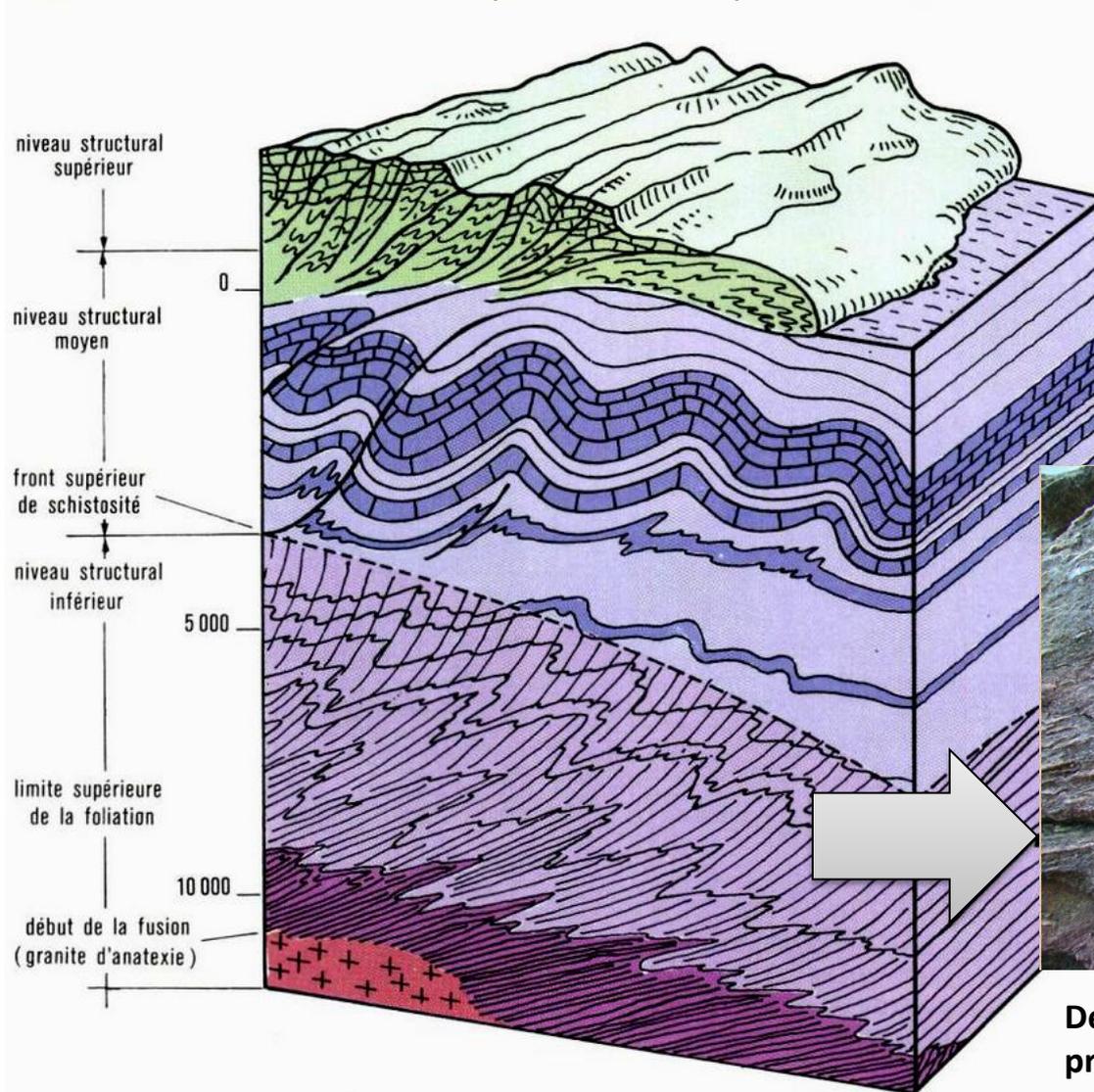
Qz = Quartz
Biot = Biotite (Mica)
Orth = Orthose (Feldspath)



Les marqueurs de la subduction continentale

Structures tectoniques

Représentation schématique des styles tectoniques en fonction de la profondeur à différents niveaux structuraux (Mattaer, 1980)



Contexte MP MT



Déformations dans matériaux ductiles, proche de l'anatexie (fusion)

I – Marqueurs de la collision

- Marqueurs topographiques
- Marqueurs sismiques
- Marqueurs gravimétriques
- L'épaississement crustal
- Bassins sédimentaires
- Structures tectoniques

II – Le métamorphisme de collision

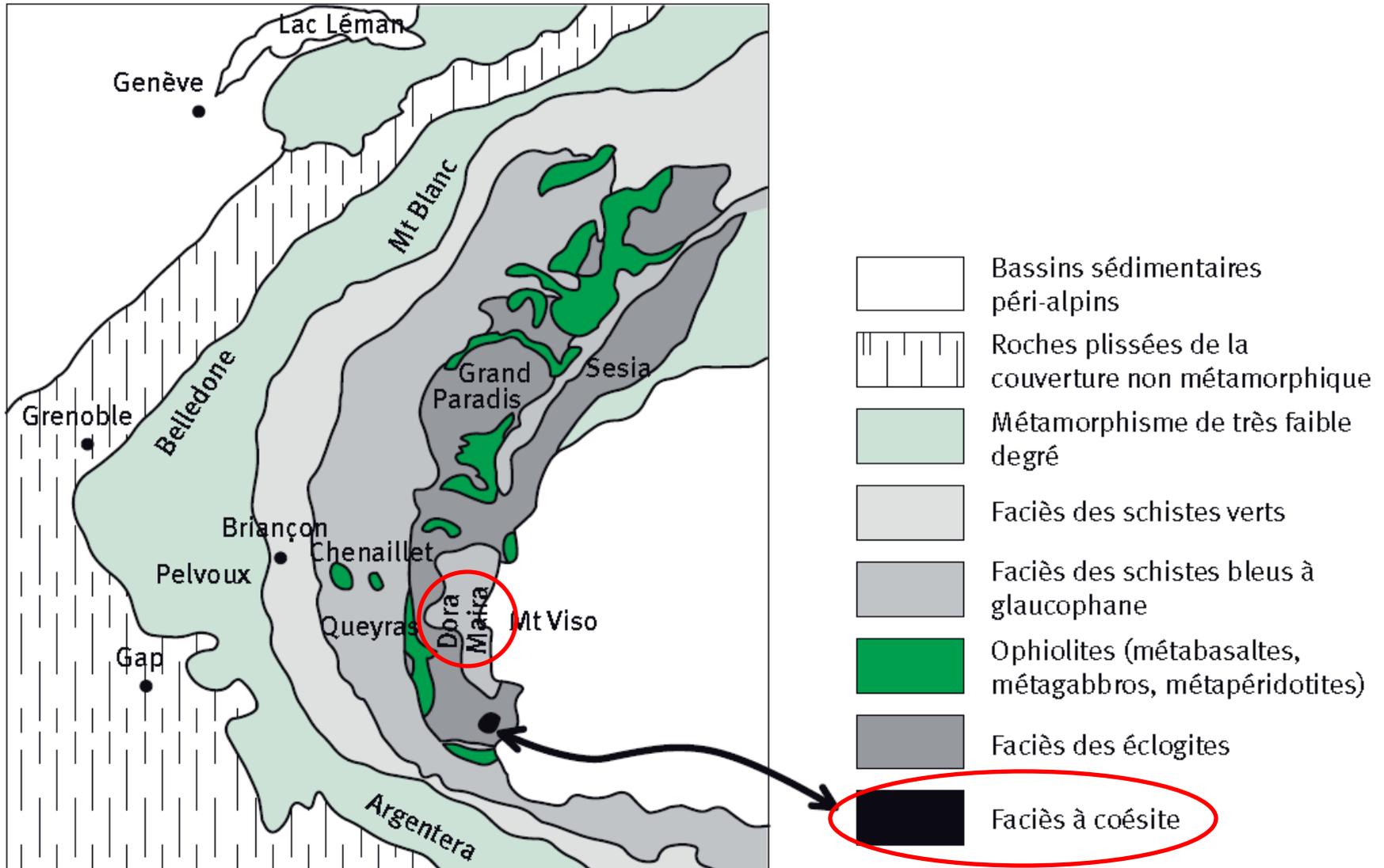
- Métamorphisme Ultra Haute Pression
- Métamorphisme barrovien

III – L'anatexie dans un contexte de collision

IV – Reconstitutions géodynamiques

Le métamorphisme de subduction continentale

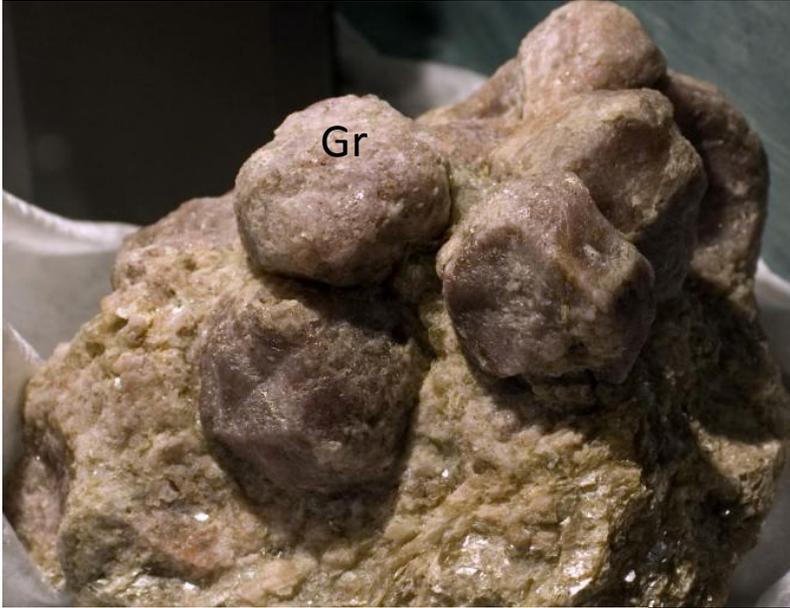
Métamorphisme UHP



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme UHP

Echantillon de métaquartzite à phengite, grenat pyrope et coésite (Dora Maira)



La **roche** contient du **quartz** (Qz), du disthène, de la phengite (Ph) (mica blanc de haute pression) des **grenats** (Gr) et de la **coésite** (forme de haute pression de la silice) en inclusion dans les grenats. Les grenats, très magnésiens, peuvent être centimétriques.

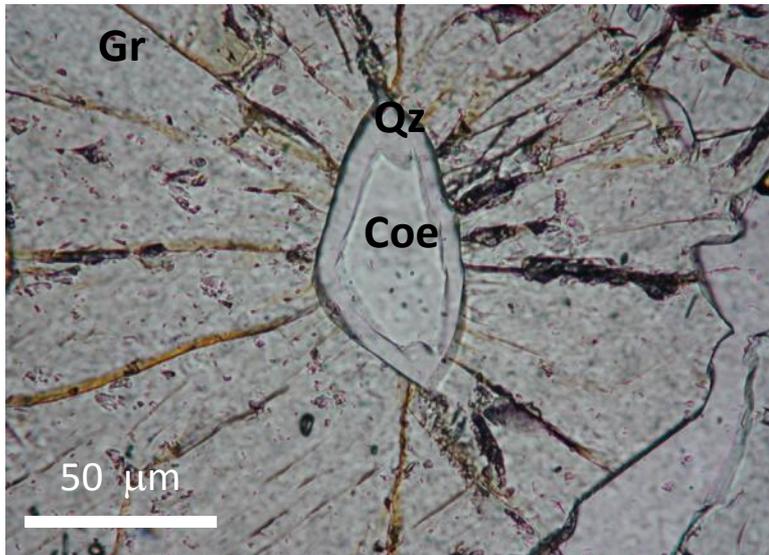
Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme UHP

Détail d'un grenat avec inclusion de quartz et coésite

La présence de minéraux de haute pression indique que la roche (initialement sédimentaire), a été enfouie jusqu'à **100 Km de profondeur (Quartz → coésite)**

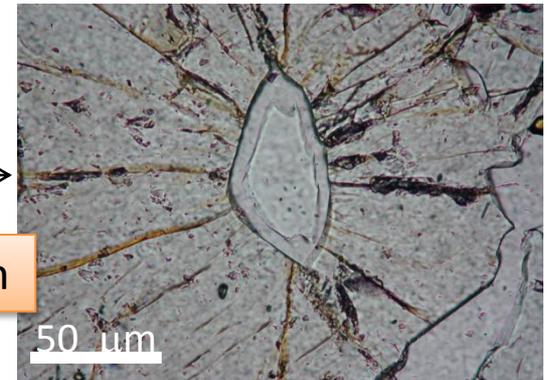
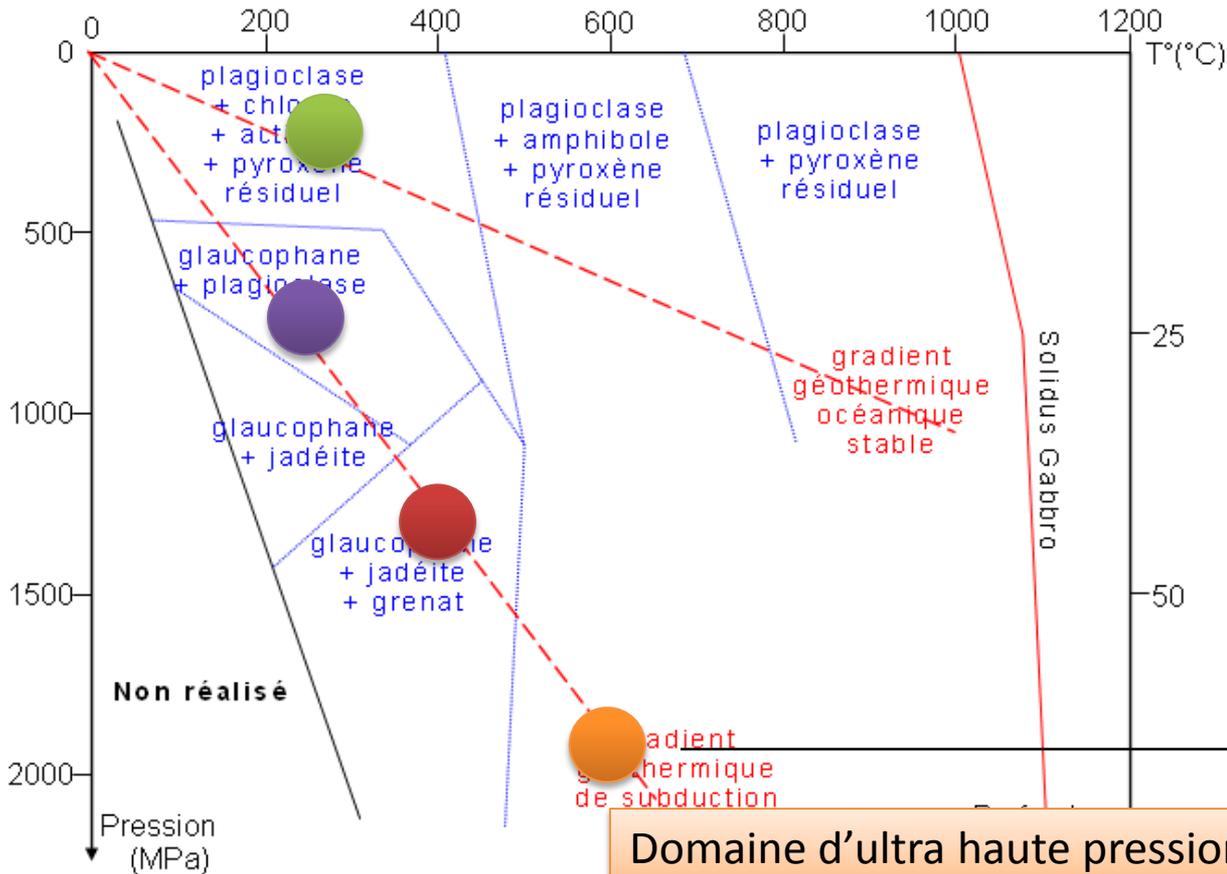
La transformation peut se réaliser dans l'autre sens lors de la remontée: la **coésite → quartz**. La coésite incluse dans les grenats ne subit qu'un début de transformation mais l'augmentation de volume liée à cette transformation est responsable de la **fracturation radiale du grenat**.



Le métamorphisme de subduction continentale

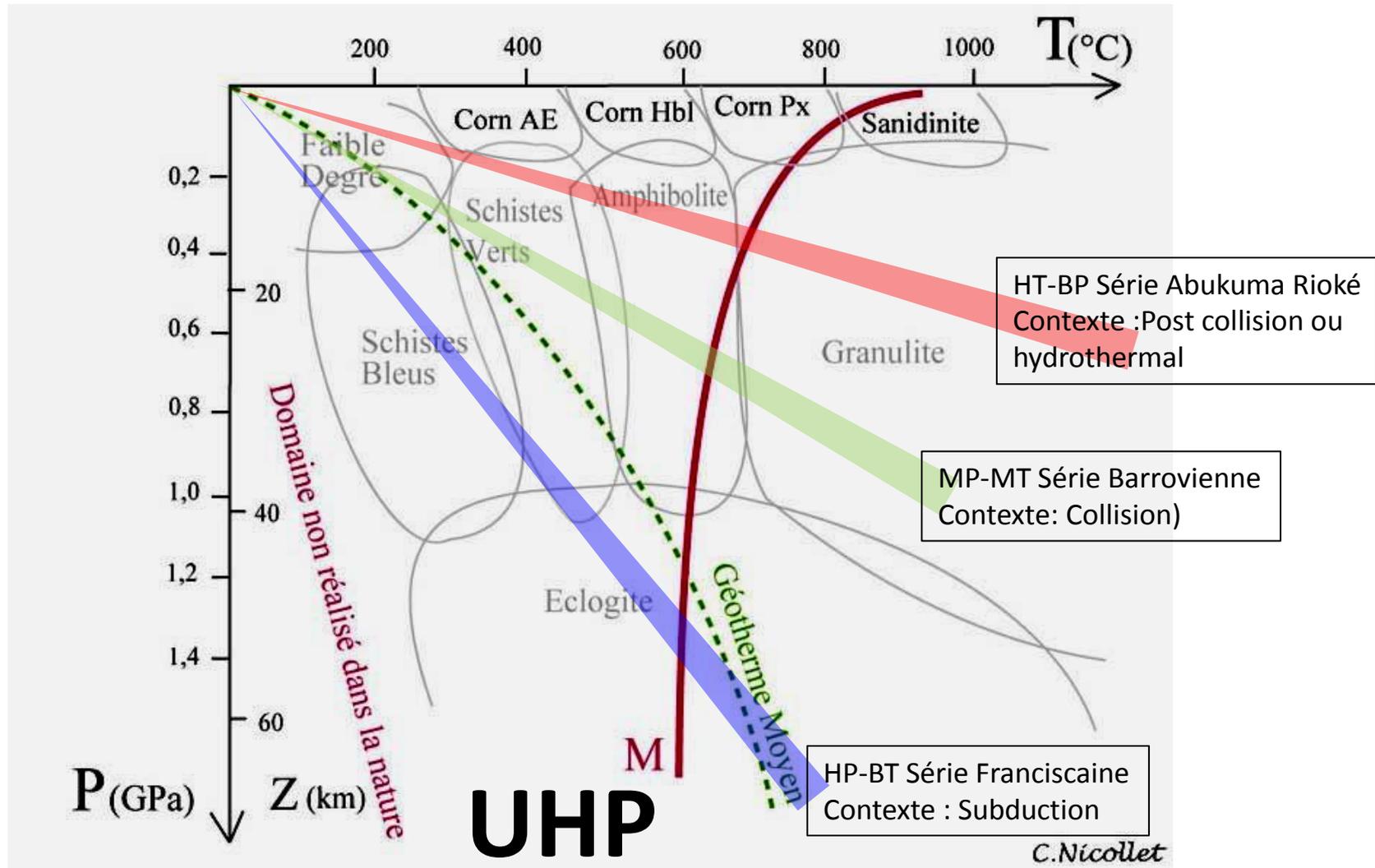
Métamorphisme UHP

Diagramme pression_température



Le métamorphisme de subduction continentale

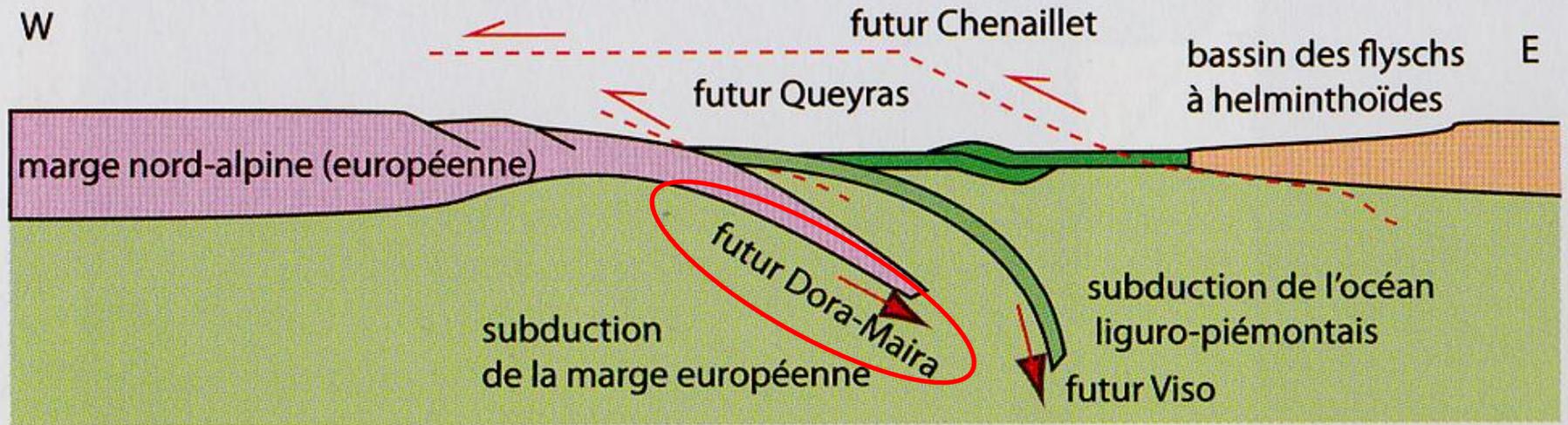
Métamorphisme UHP



M = Anatexis

Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme UHP

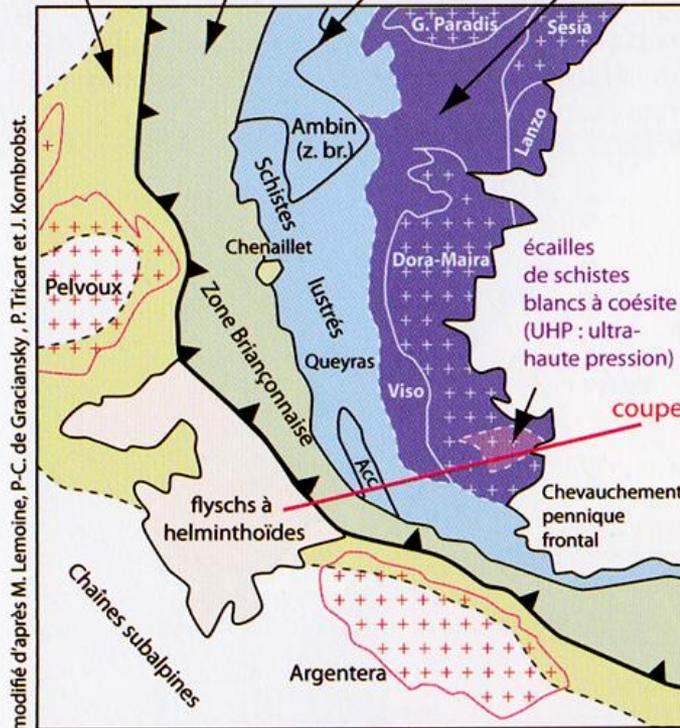


Coupe hypothétique de l'océan liguro-piémontais en cours de fermeture

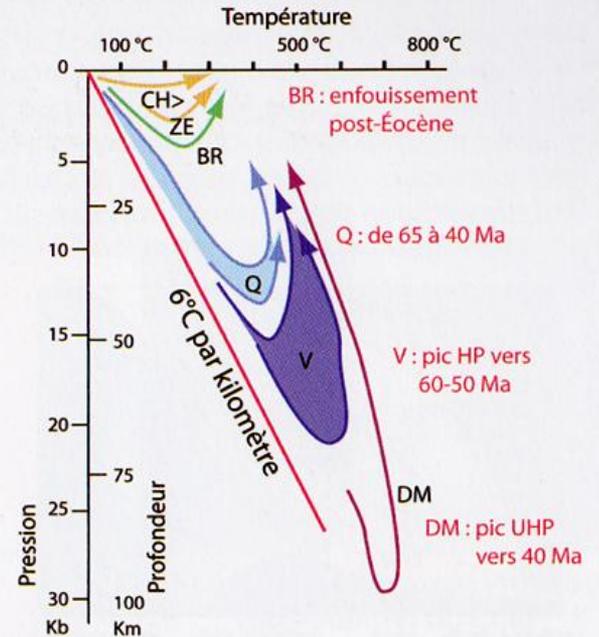
Le métamorphisme de subduction continentale

En conclusion

métamorphisme de faible degré schistes verts à lawsonite schistes bleus de basse T schistes bleus de haute T et éclogites

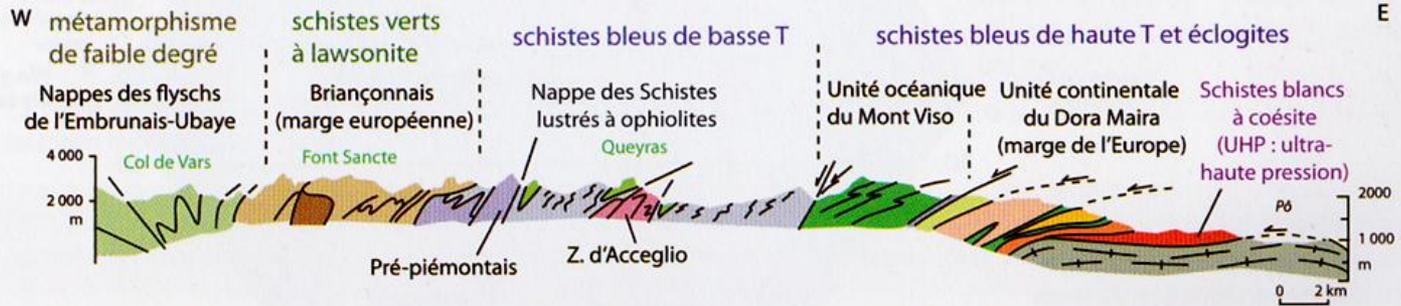


modifié d'après M. Lemoine, P.-C. de Graciansky, P. Tricart et J. Kornbrobst.



CH> : unité supérieure du Chenaillet V : unités du Viso (évolutions différentes selon les unités)
 ZE : zones alpines externes (dauphinoises)
 BR : briançonnais DM : écailles du Dora-Maira à coésite
 Q : unités du Queyras et certaines unités briançon. profondes (Ambin, Acceglio...)

Carte du métamorphisme et chemins P, T, t des Alpes sud-occidentales

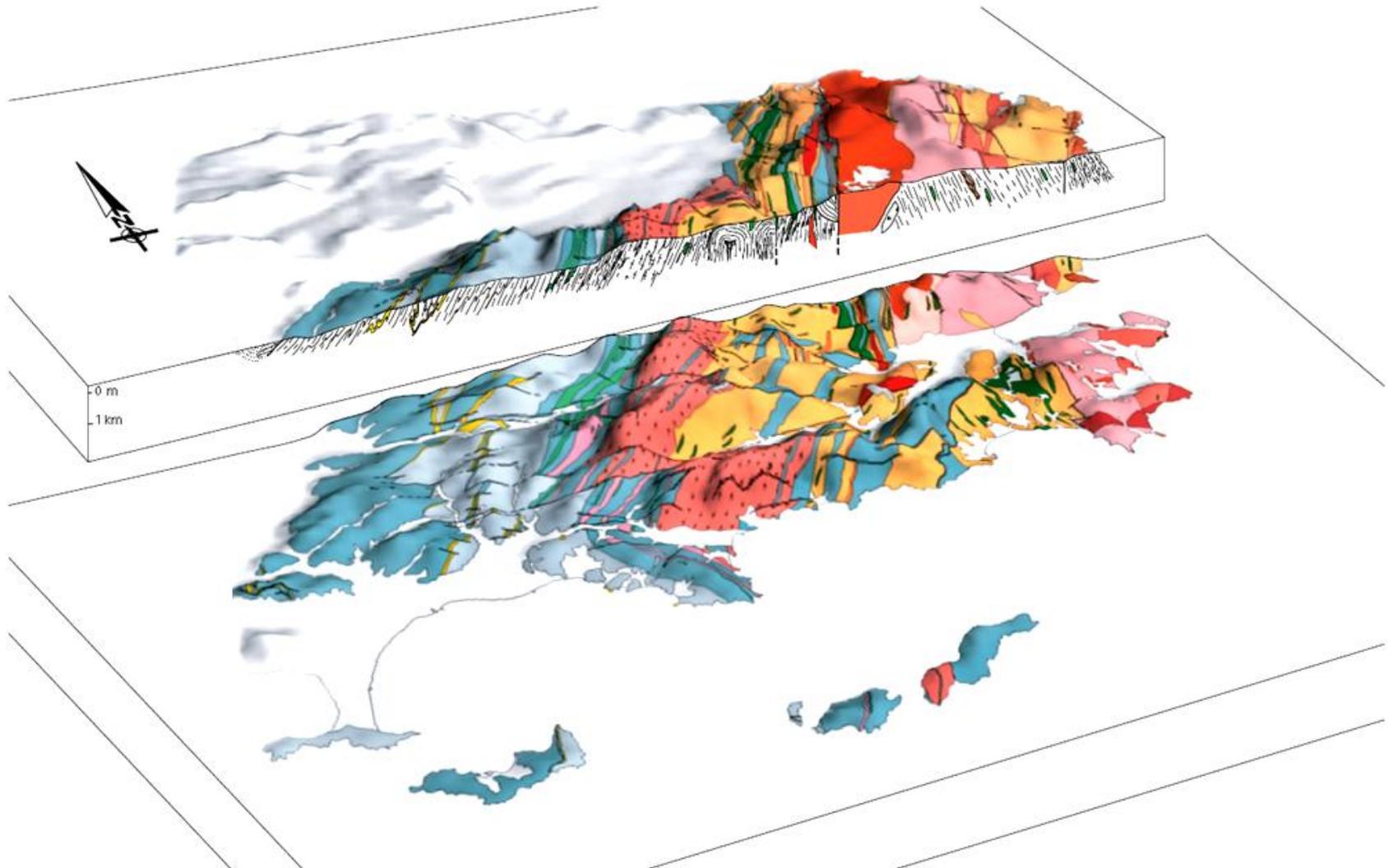


Coupe des Alpes sud-occidentales montrant la position des unités HP-BT

Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

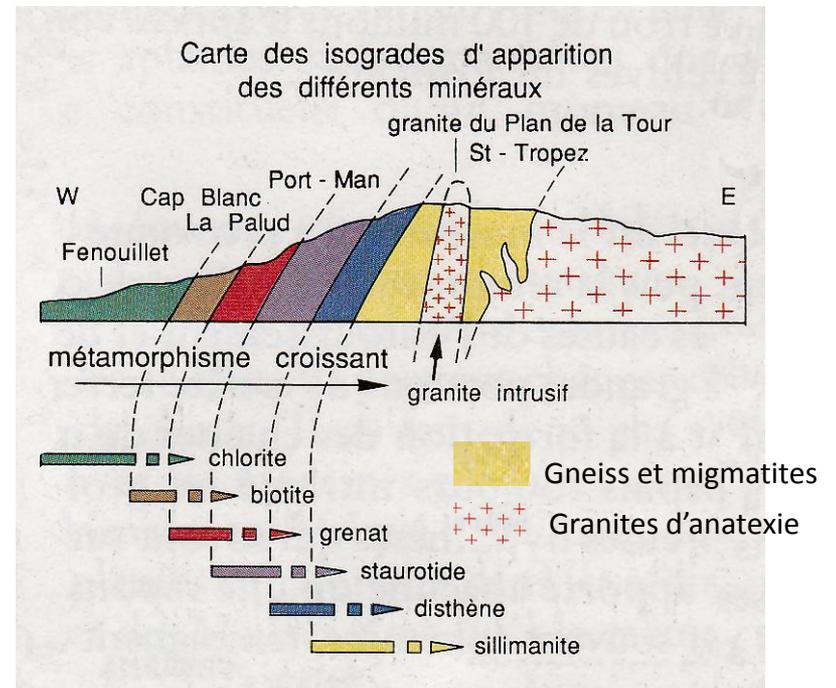
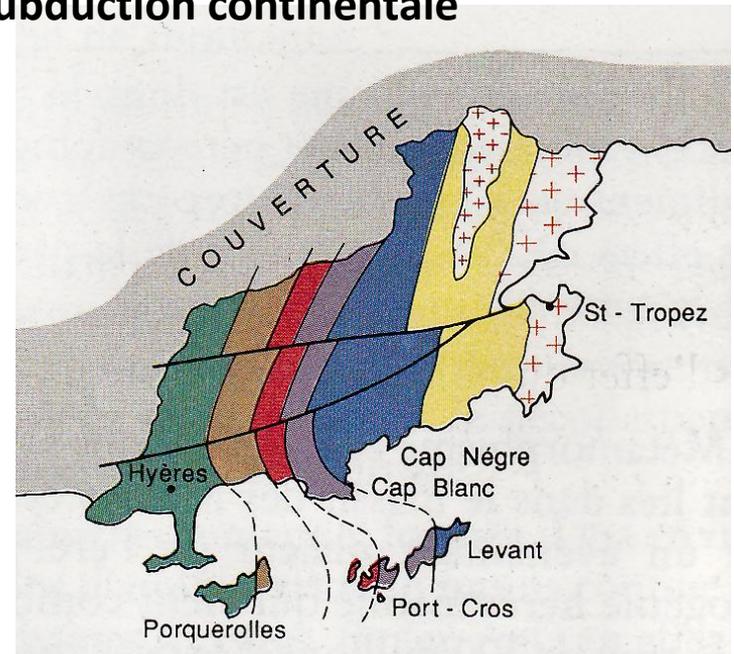
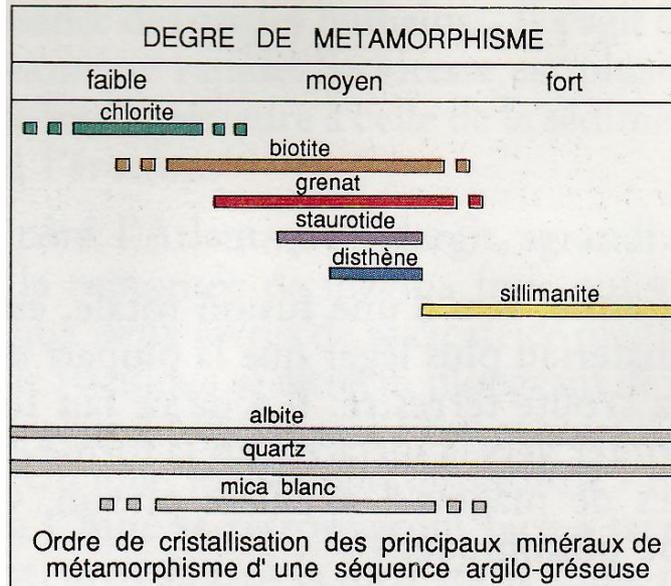
Bloc 3D du massif des Maures montrant une succession barroviennne avec métamorphisme d'intensité croissante d'Ouest en Est



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

En plus simplifié...



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Etude chimique de 3 micaschistes des Maures

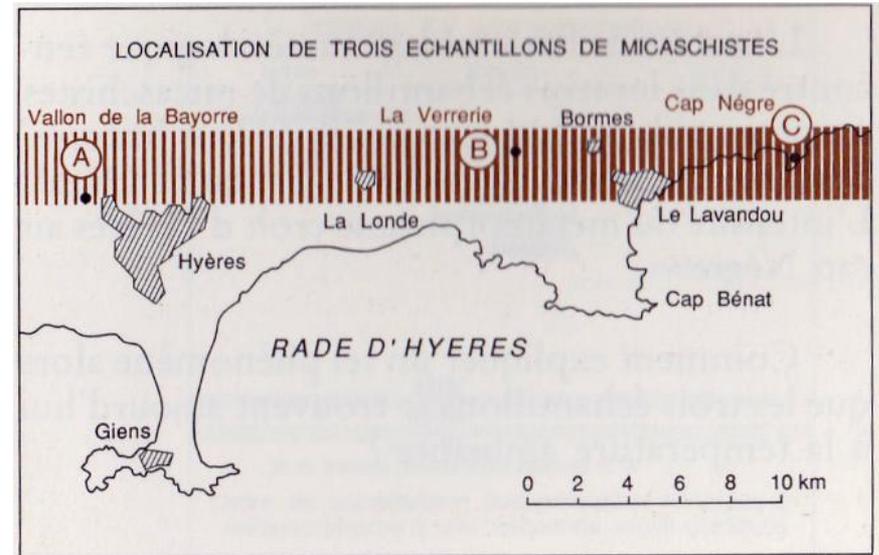
A : Quartz, sércite, chloritoïde, chlorite, biotite

B : Quartz, muscovite, biotite, grenat, staurotide, feldspaths

C : Quartz, muscovite, biotite, grenat, staurotide, tourmaline

Composition (simplifiée) en oxydes de 3 micaschistes des Maures

	A	B	C
Silicium	64,1	65,4	62,5
Aluminium	16,0	15,4	17,1
Fer	12,6	12,0	12,0
Magnésium	2,1	1,4	0,5
Calcium	0,8	0,6	1,7
Sodium	1,7	1,0	2,4
Potassium	1,5	2,8	2,6
Titane	1,2	1,4	1,2
total %	100,0	100,0	100,0
température	400°	→ 550°	

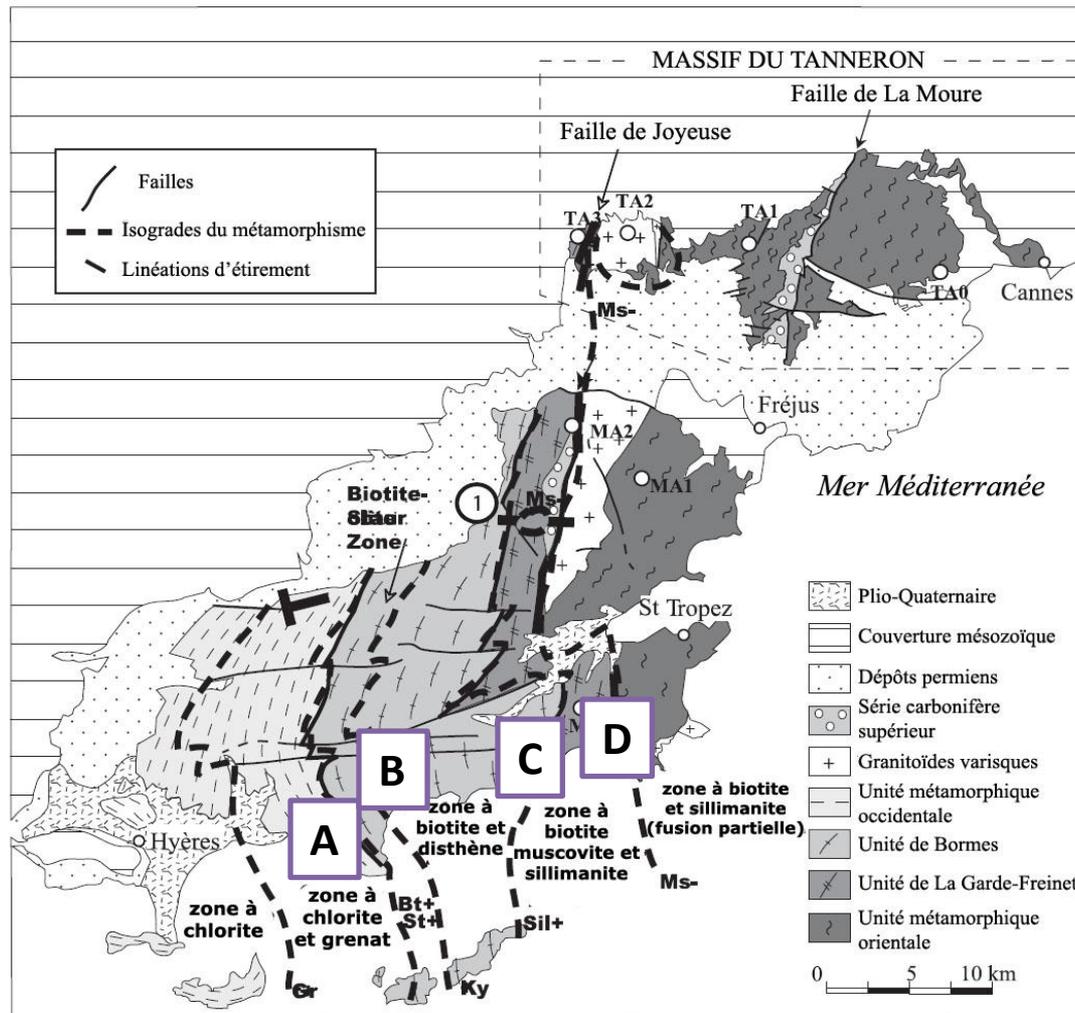


Les compositions chimiques voisines soulignent l'origine commune de ces 3 micaschistes (sédimentaire détritique). Il s'agit bien d'un métamorphisme d'intensité croissante qui affecte une même roche initiale.

Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures



Carte métamorphique du Massif des Maures-Tanneron (Rolland et al., 2009)

Les lignes en pointillés sont des isogrades séparant des domaines avec des associations minéralogiques types (domaines de stabilité des minéraux). Le signe + signifie « apparition » et le signe – « disparition » du minéral. Gr = grenat, Bt = biotite, St = staurotide, Ky = disthène, Sil = sillimanite, Ms = muscovite

Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

A - Micaschistes de la plage de Brégençon

A



Roche riche en mica blanc (séricite) et chloritoïdes (petits batonnets bruns infracentimétriques)

L'**organisation des bancs rocheux** évoque celle d'une série sédimentaire dans laquelle alternent des strates riches en argiles et d'autres formées de grès (flysch).

Chloritoïde



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

B - Gneiss et micaschistes – Plage de Saint Clair

Les roches sont des alternances de bancs riches en mica blanc et quartz - les micaschistes – et de bancs plus massifs - les gneiss. Cette alternance de roches est probablement le reflet d'une ancienne série sédimentaire.

Grenats dans un gneiss



Baguettes de disthène dans un gneiss



Le métamorphisme de subduction continentale

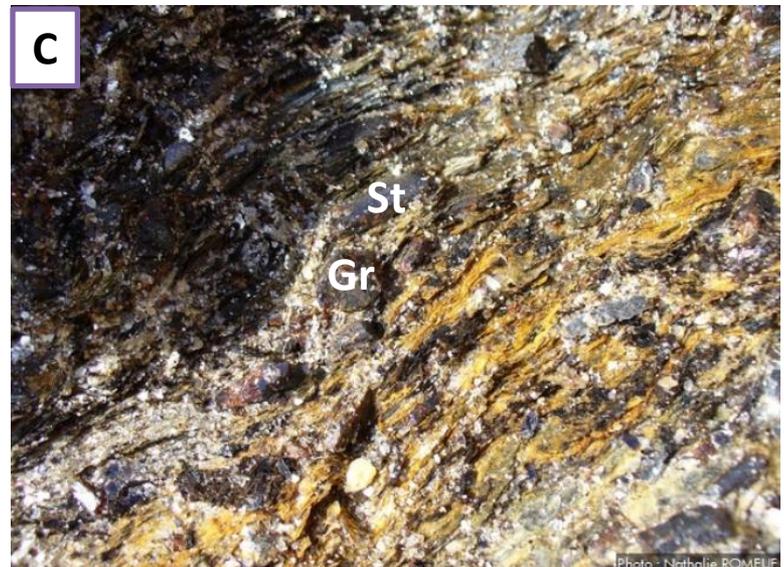
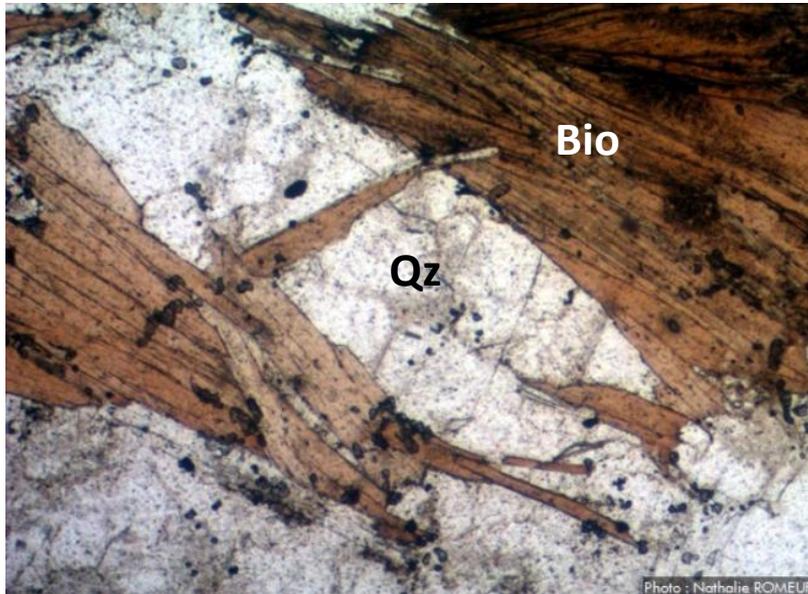
Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

Grenats, disthène, staurotide (parfois andalousite)

C – Micaschistes à minéraux de la plage du Canadel

Foliation dans un micaschiste (LPNA): Lits clairs = quartz, et lits sombres = biotite



Le métamorphisme de subduction continentale

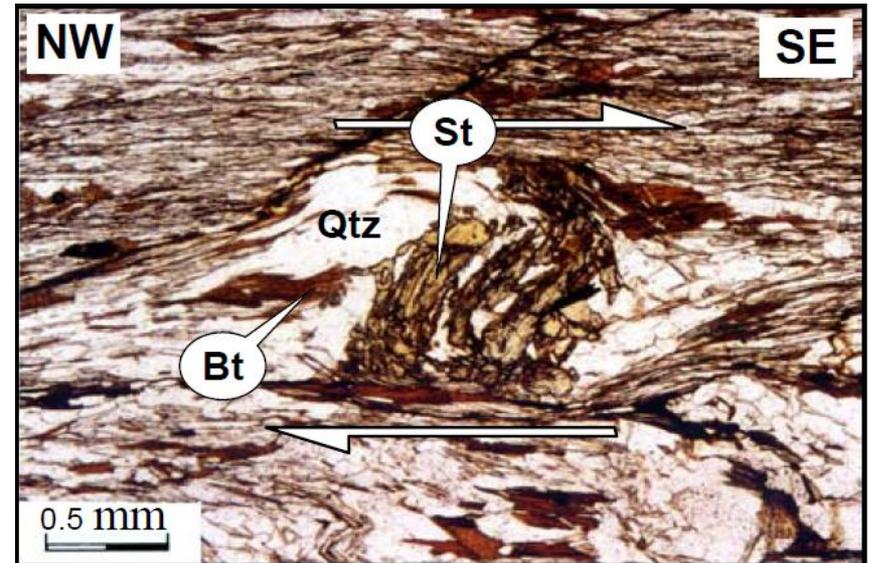
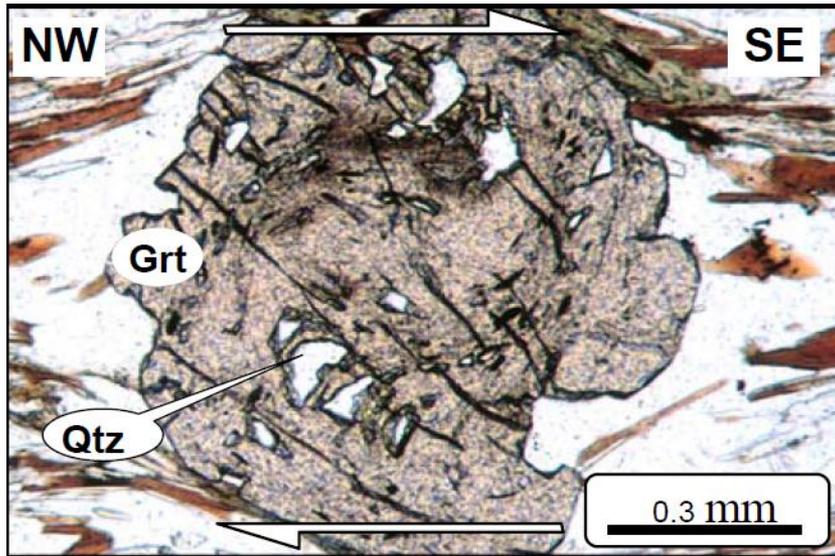
Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

Le **grenat** ou la **staurotide** présentent des inclusions de quartz indiquant une déformation par cisaillement

Grt = grenat, Qtz = quartz, Bt = biotite, St = staurotide.

Micaschistes de la Chaîne de la Sauvette, Bormes.



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Gneiss oillé de Cap Camarat



Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

D - Gneiss (Cap Camarat) et micaschiste

Ce gneiss présente une nette foliation:

- Les lits clairs de quartz transparent et de feldspaths blancs plus ou moins étirés constituant des "yeux" feldspathiques. Les micas noirs y sont peu abondants.
- Les lits sombres doivent leur couleur à l'abondance de mica noir.

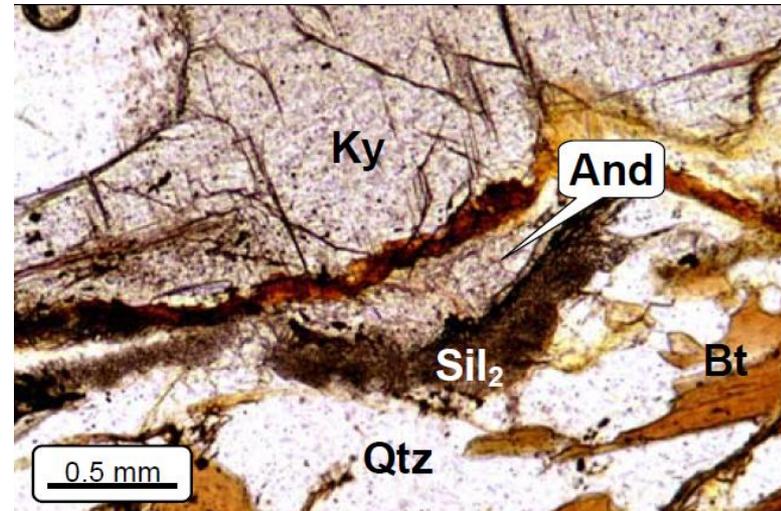
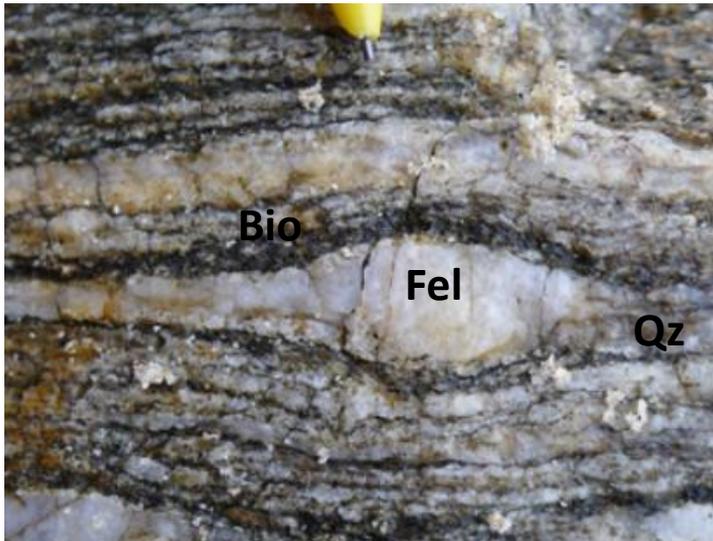
L'orientation des minéraux selon le plan de foliation est héritée des transformations subies lors de la convergence par des roches de la croûte continentale.

La présence de minéraux tels que la biotite et de la sillimanite permet de situer ce gneiss dans un contexte métamorphique de basse à moyenne pression et haute température.

Détail d'un micaschiste à biotite et sillimanite (Chaîne littorale).

La sillimanite fibreuse se développe autour d'un cristal d'andalousite

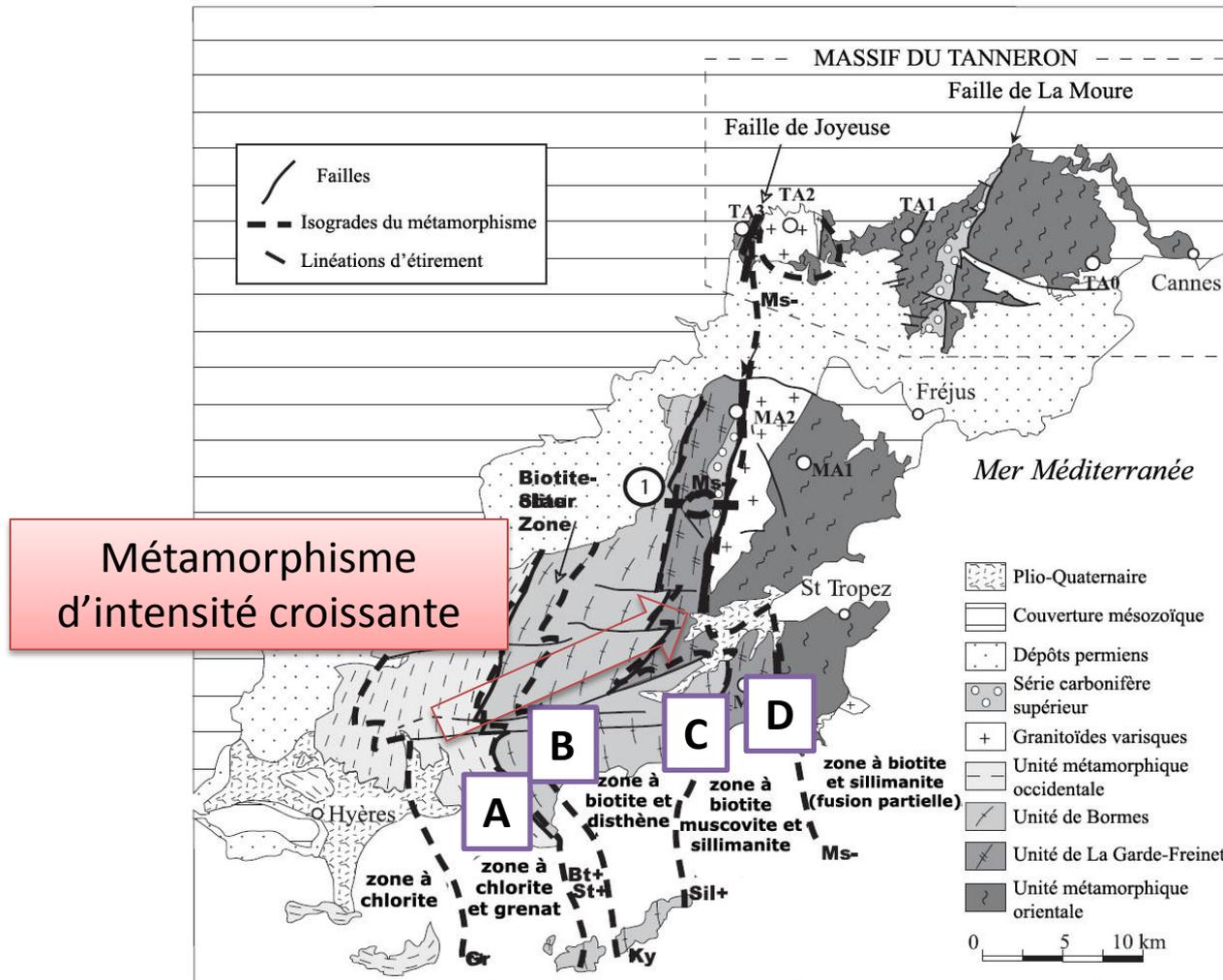
Bt = biotite, Qtz = quartz, Bt = biotite, Ky=disthène, And = andalousite; Sil₂ = sillimanite.



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures



Carte métamorphique du Massif des Maures-Tanneron (Rolland et al., 2009)

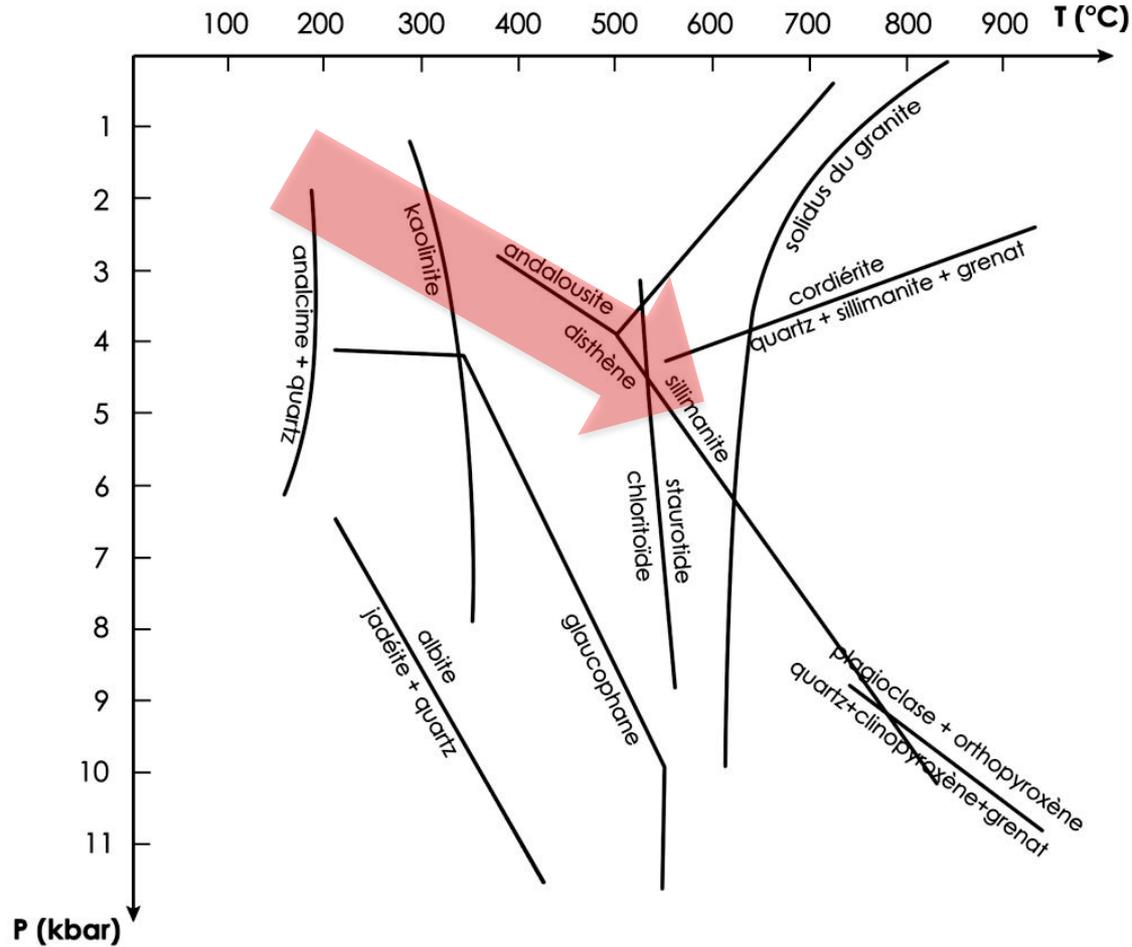
Les lignes en pointillés sont des isogrades séparant des domaines avec des associations minéralogiques types (domaines de stabilité des minéraux). Le signe + signifie « apparition » et le signe - « disparition » du minéral. Gr = grenat, Bt = biotite, St = staurotide, Ky = disthène, Sil = sillimanite, Ms = muscovite

Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

Diagramme « pression-température » indiquant les domaines de stabilité des minéraux

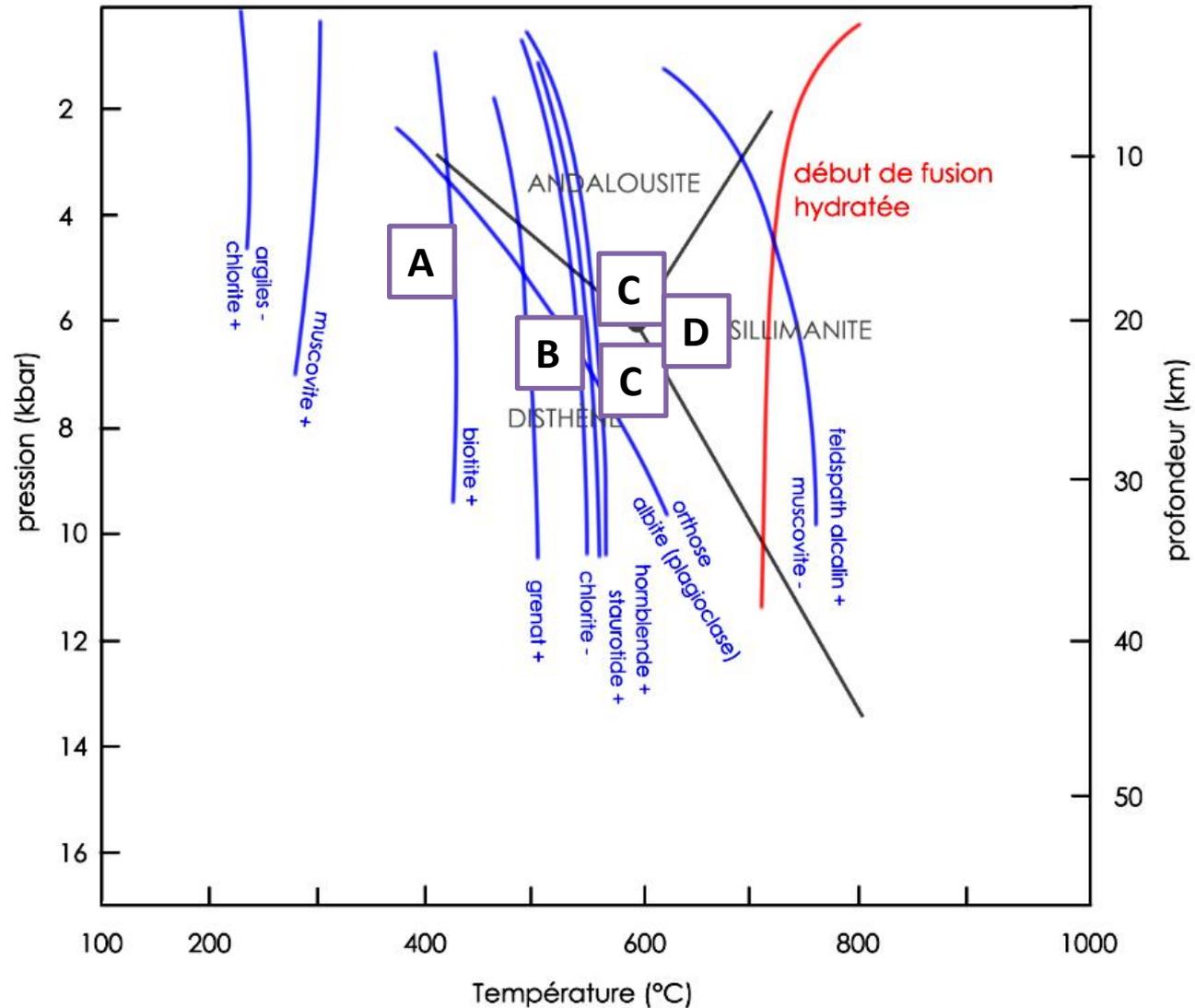


Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)

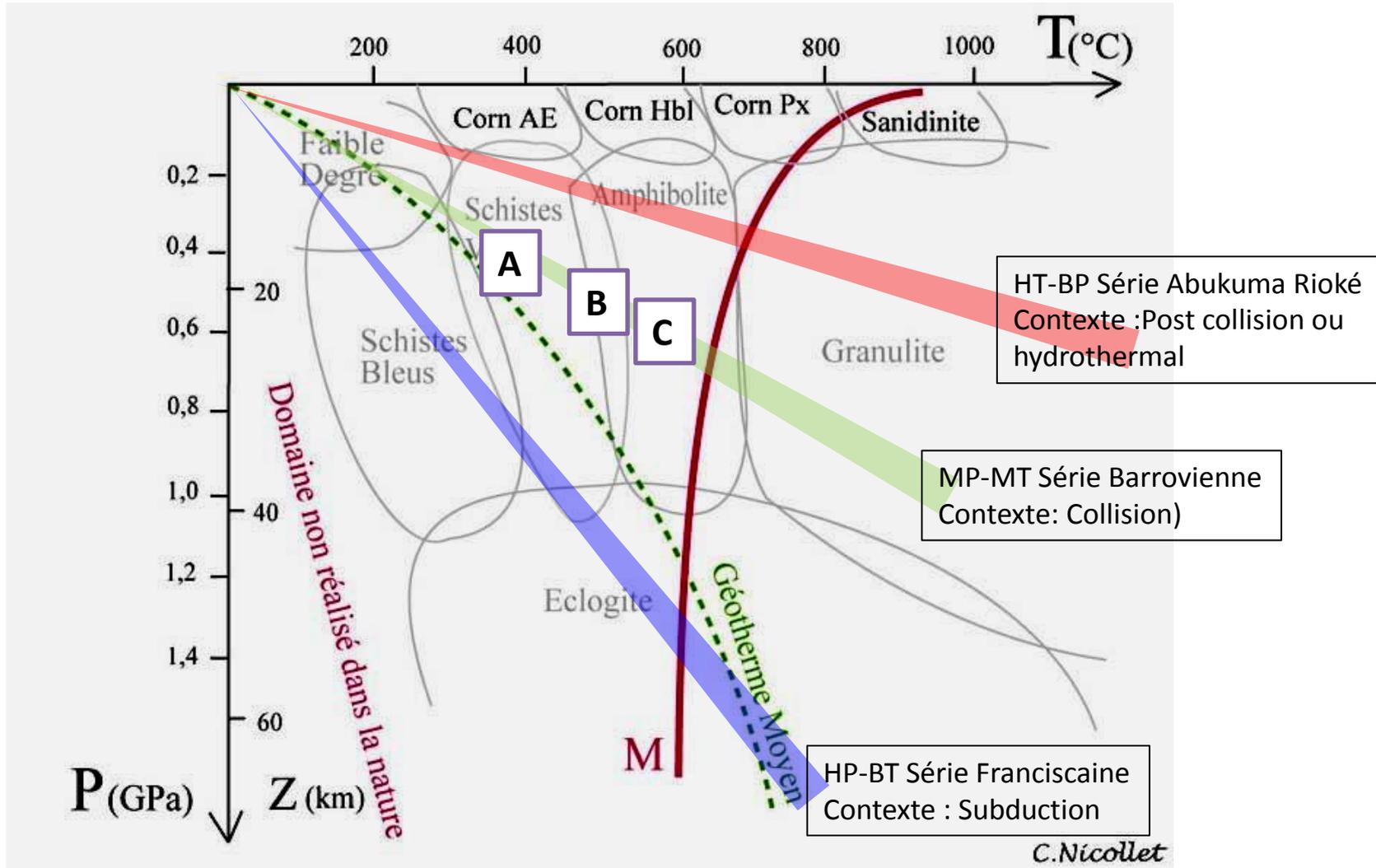
Localisation de quelques affleurements de roches métamorphiques dans les Maures

Diagramme « pression-température » indiquant les domaines de stabilité des minéraux



Le métamorphisme de subduction continentale

Métamorphisme barrovien (MPMT)



M = Anatexis

I – Marqueurs de la collision

- Marqueurs topographiques
- Marqueurs sismiques
- Marqueurs gravimétriques
- L'épaississement crustal
- Bassins sédimentaires
- Structures tectoniques

II – Le métamorphisme de collision

- Métamorphisme Ultra Haute Pression
- Métamorphisme barrovien

III – L'anatexie dans un contexte de collision

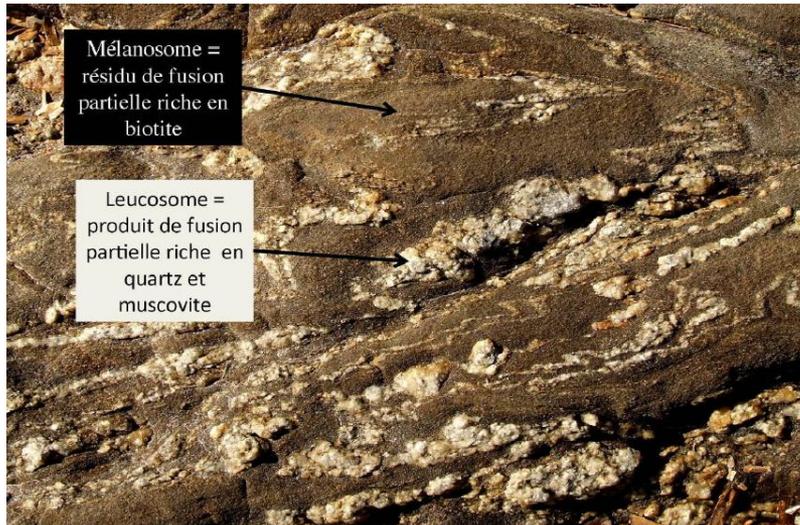
IV – Reconstitutions géodynamiques

L'anatexie dans un contexte de collision

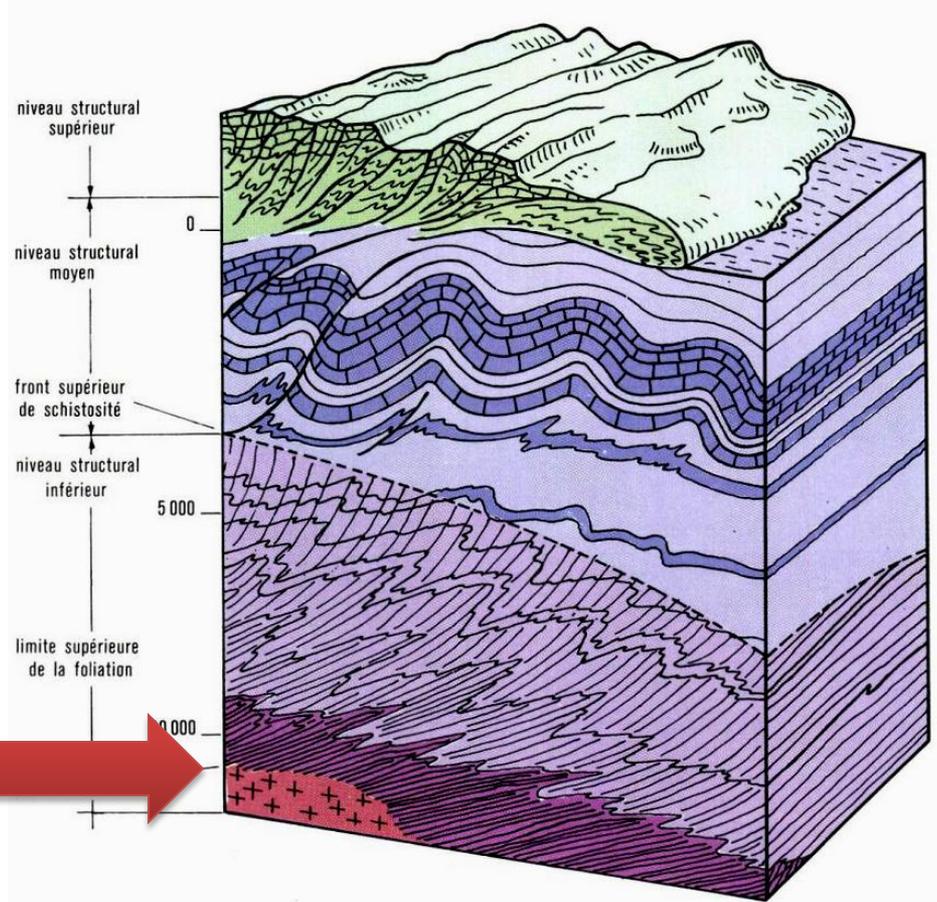
Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures

Dans les **chaînes de montagne anciennes**, l'épaississement crustal est tel que la base de la **croûte** peut subir par augmentation de température une **fusion partielle** conduisant à la production de **liquides magmatiques**. Ces liquides magmatiques peuvent donner par refroidissement des **granites d'anatexie**. La fusion partielle de la croûte peut être favorisée par l'**hydratation** ou la **remontée isostatique** (décompression adiabatique)

Migmatite du massif des Maures

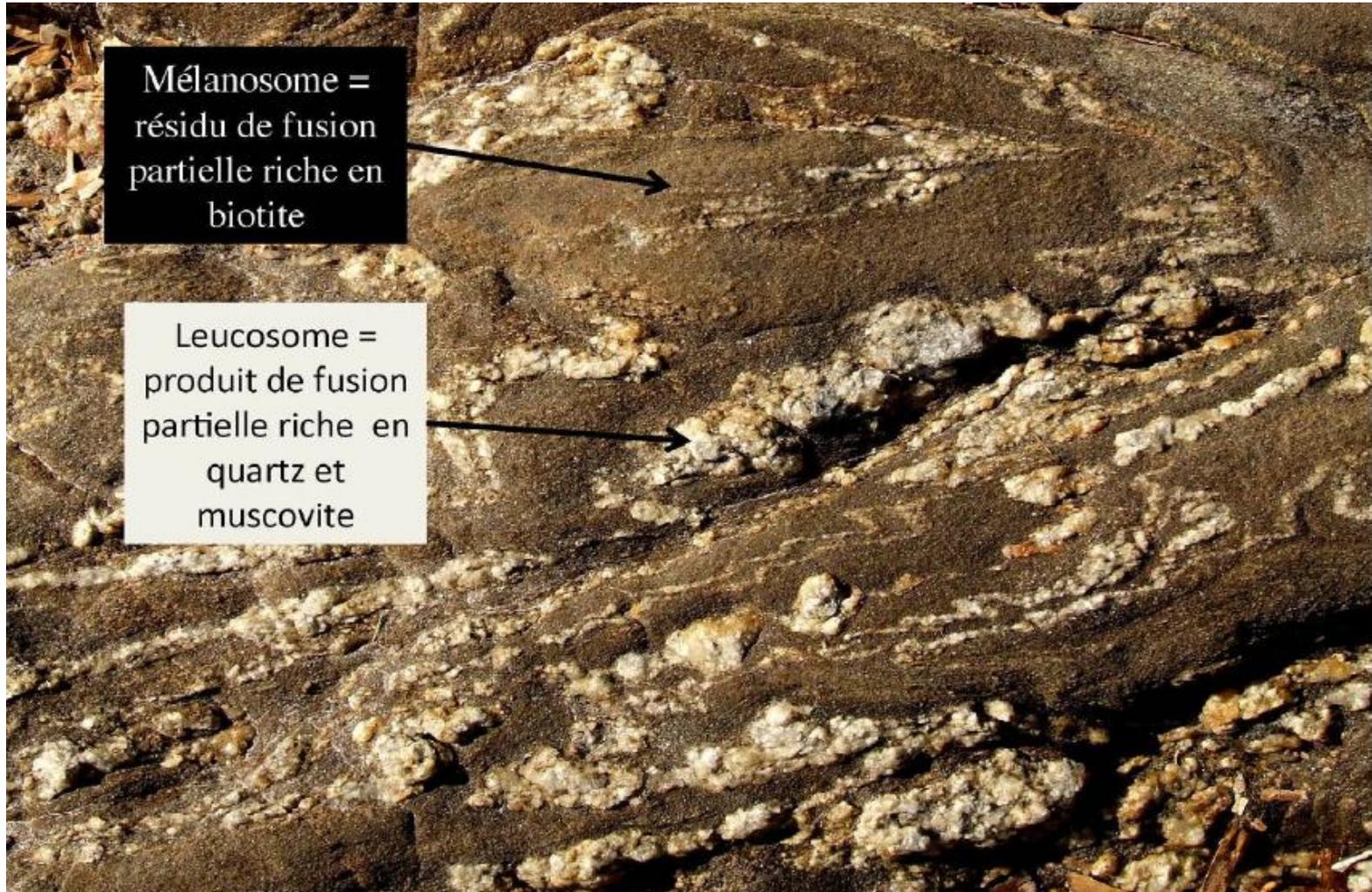


Domaine de l'anatexie



L'anatexie dans un contexte de collision

Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures



L'anatexie dans un contexte de collision

Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures

Migmatite = mélange de 2 catégories de roches : gneiss + néosome formé des roches provenant de la fusion partielle des gneiss.

Néosome = enclaves étirées de différentes tailles et des filons. Il est constitué d'une partie claire (leucosome) et une partie sombre (mélanosome)

- Le leucosome: Résulte de la cristallisation du liquide magmatique à composition quartzo-feldspathique. Peu de micas noirs car ils sont plus réfractaires (la fusion des minéraux clairs a lieu à des températures inférieures à celle des minéraux sombres).

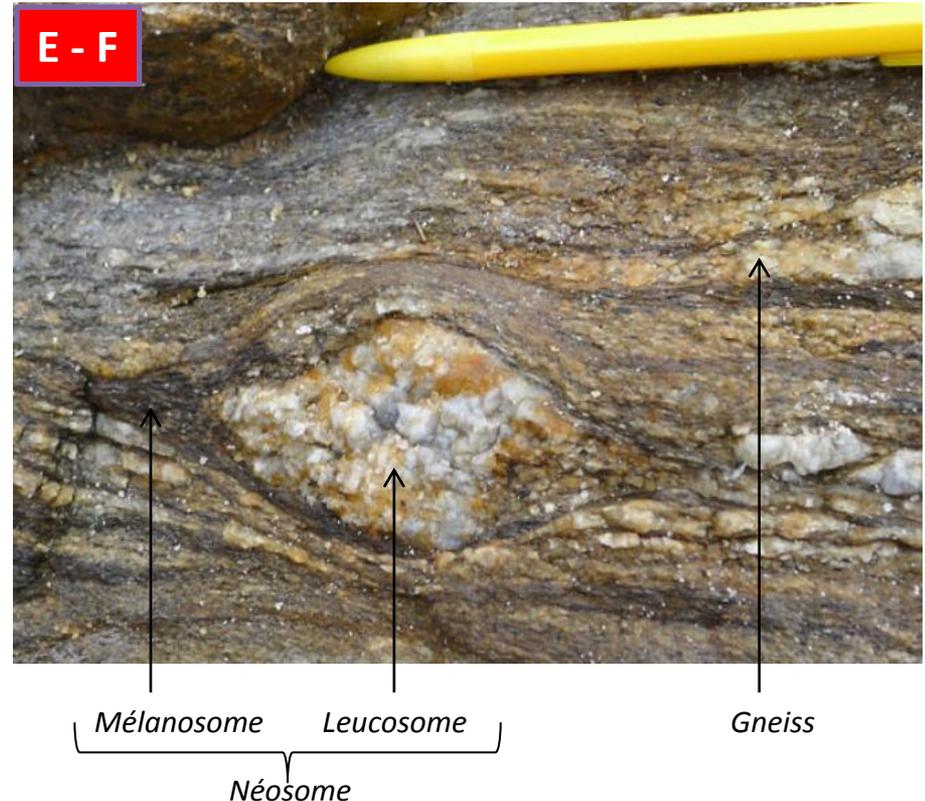
- Le mélanosome: contient des minéraux sombres (biotite, grenat...) = résidu non fondu du gneiss .

Plis (déformations ductiles) dans les migmatites (Cap de Bonne Terrasse)



Le contexte géodynamique de formation des migmatites (Pression basse à moyenne et température élevée) est propice au développement de déformations ductiles.

Enclave de néosome dans un gneiss migmatitique (Cap du Pinet, Saint Tropez)



L'anatexie dans un contexte de collision

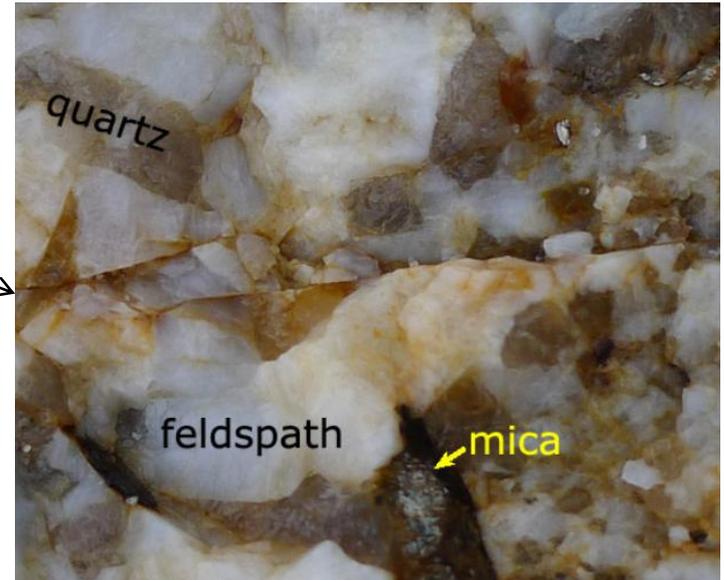
Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures

Filons granitiques au sein des migmatites

Filon granitique qui recoupe les migmatites
(Cap du Pinet, Saint Tropez)

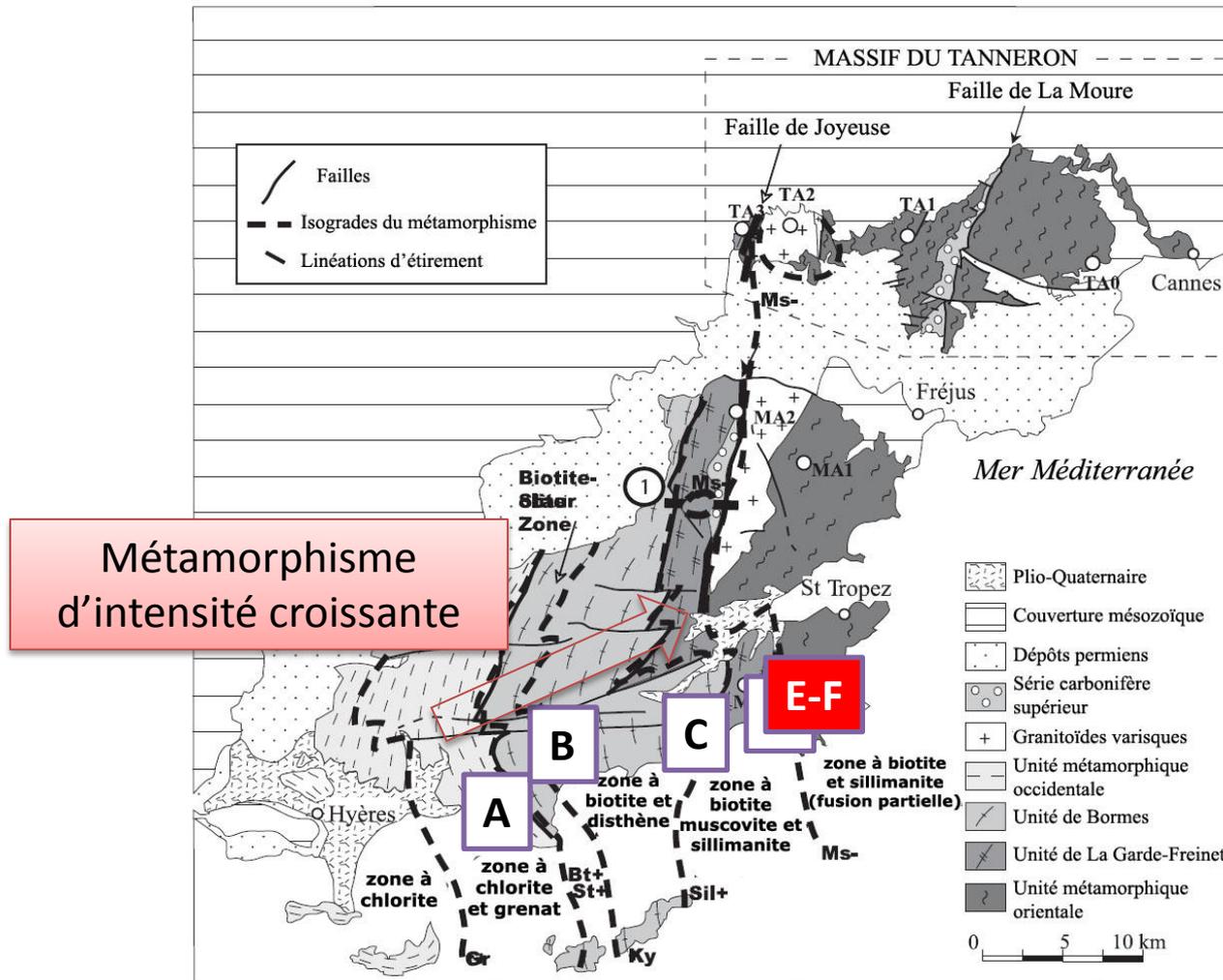


Détail du granite



L'anatexie dans un contexte de collision

Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures



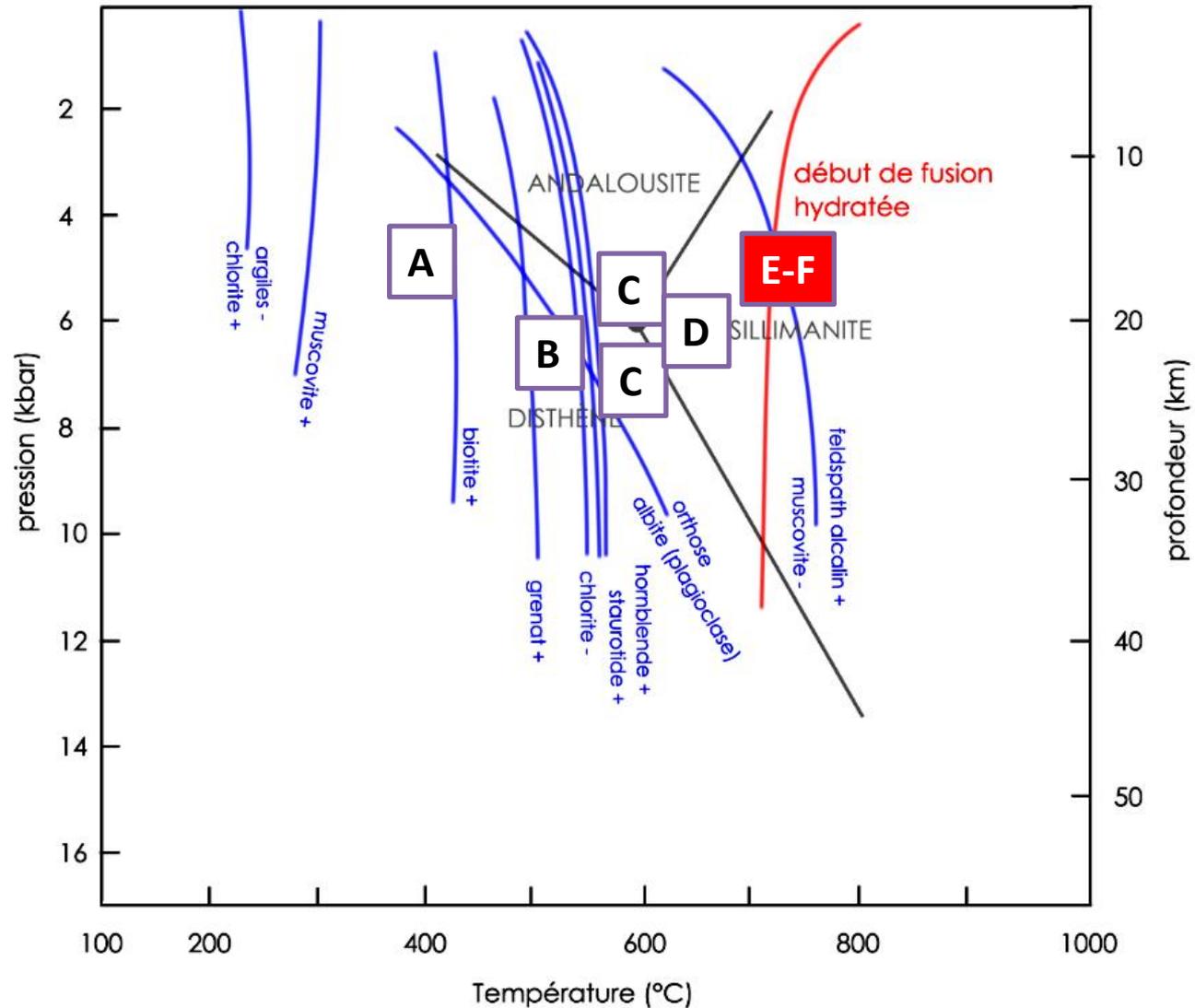
Carte métamorphique du Massif des Maures-Tanneron (Rolland et al., 2009)

Les lignes en pointillés sont des isogrades séparant des domaines avec des associations minéralogiques types (domaines de stabilité des minéraux). Le signe + signifie « apparition » et le signe – « disparition » du minéral. Gr = grenat, Bt = biotite, St = staurotite, Ky = disthène, Sil = sillimanite, Ms = muscovite

L'anatexie dans un contexte de collision

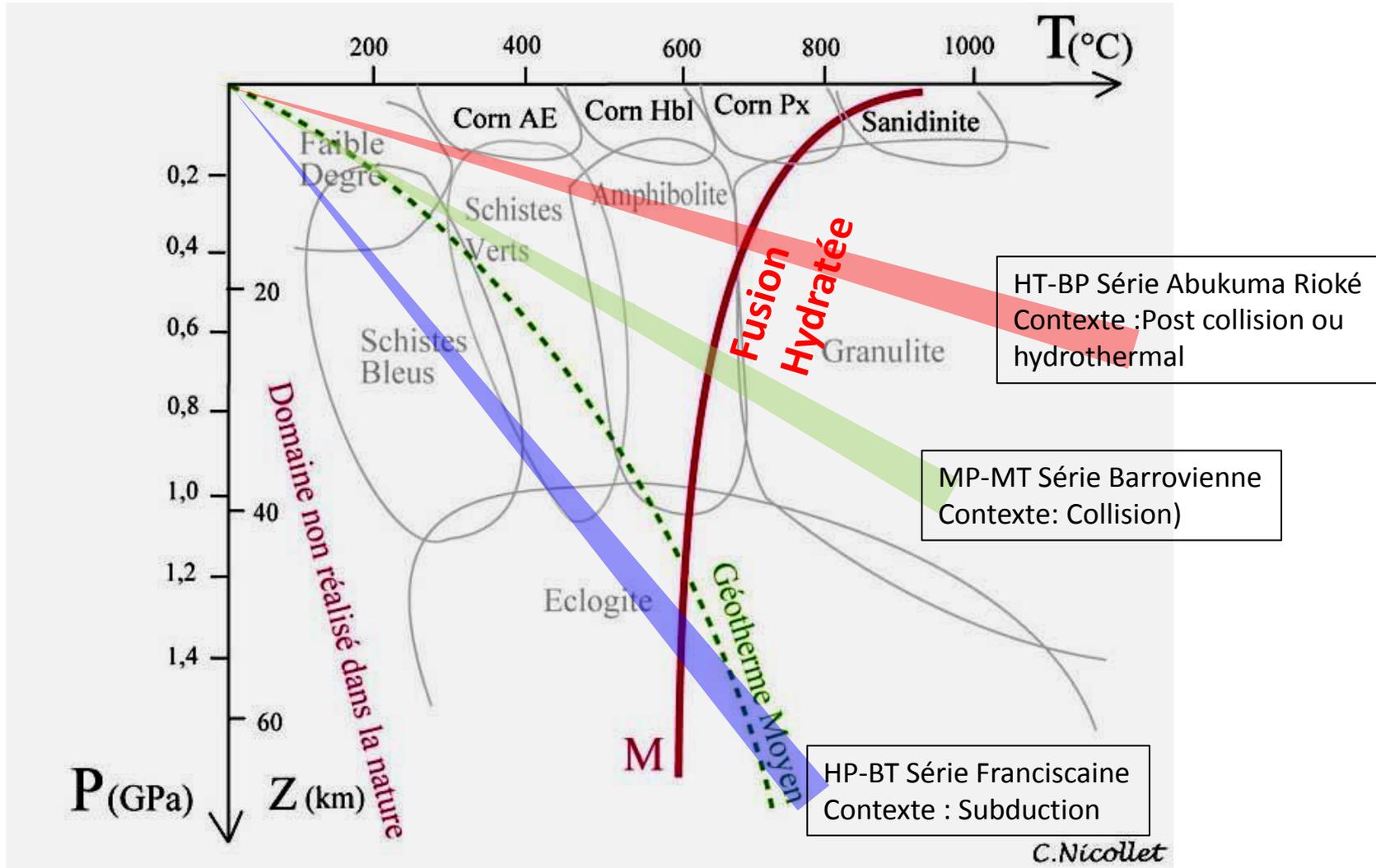
Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures

Diagramme « pression-température » indiquant les domaines de stabilité des minéraux



L'anatexie dans un contexte de collision

Migmatites et granites d'anatexie dans les Maures



M = Anatexie

I – Marqueurs de la collision

- Marqueurs topographiques
- Marqueurs sismiques
- Marqueurs gravimétriques
- L'épaississement crustal
- Bassins sédimentaires
- Structures tectoniques

II – Le métamorphisme de collision

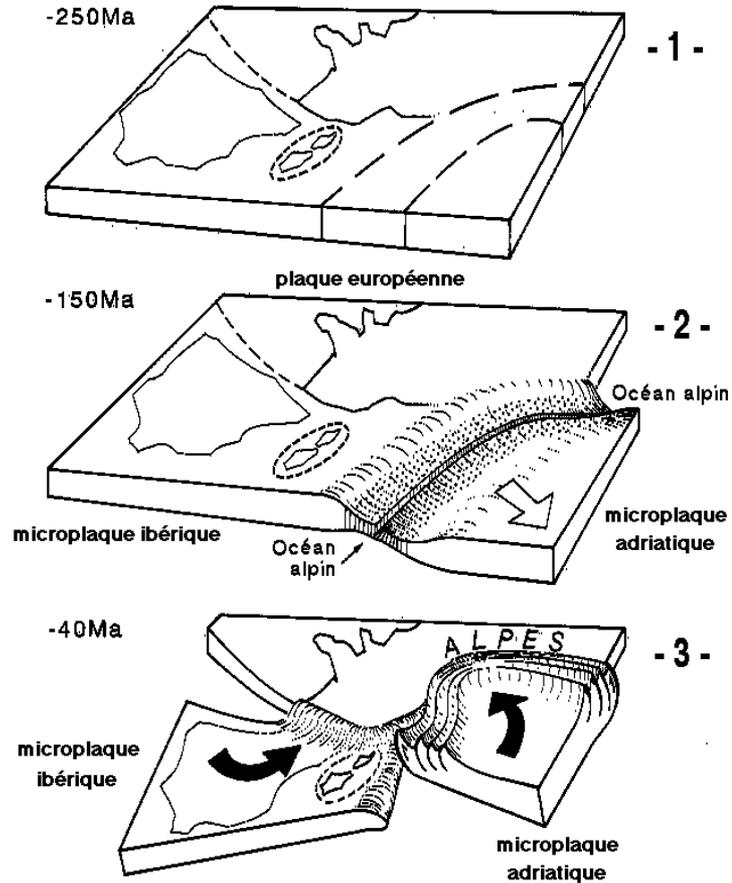
- Métamorphisme Ultra Haute Pression
- Métamorphisme barrovien

III – L'anatexie dans un contexte de collision

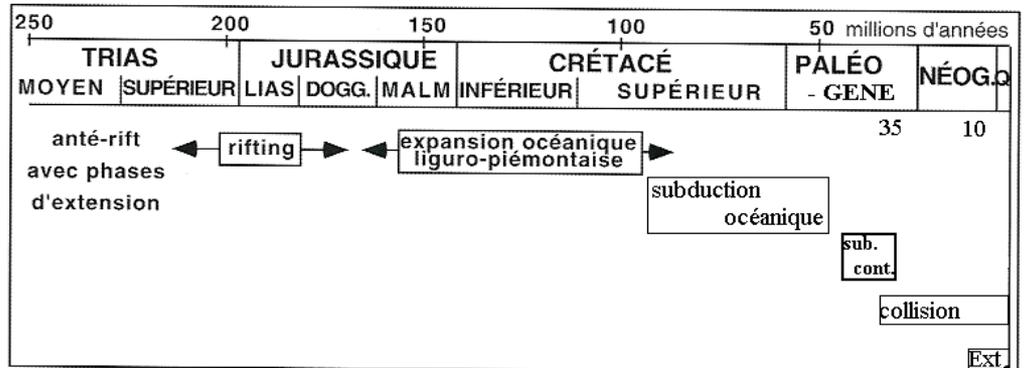
IV – Reconstitutions géodynamiques

Reconstitutions géodynamiques

Les Alpes



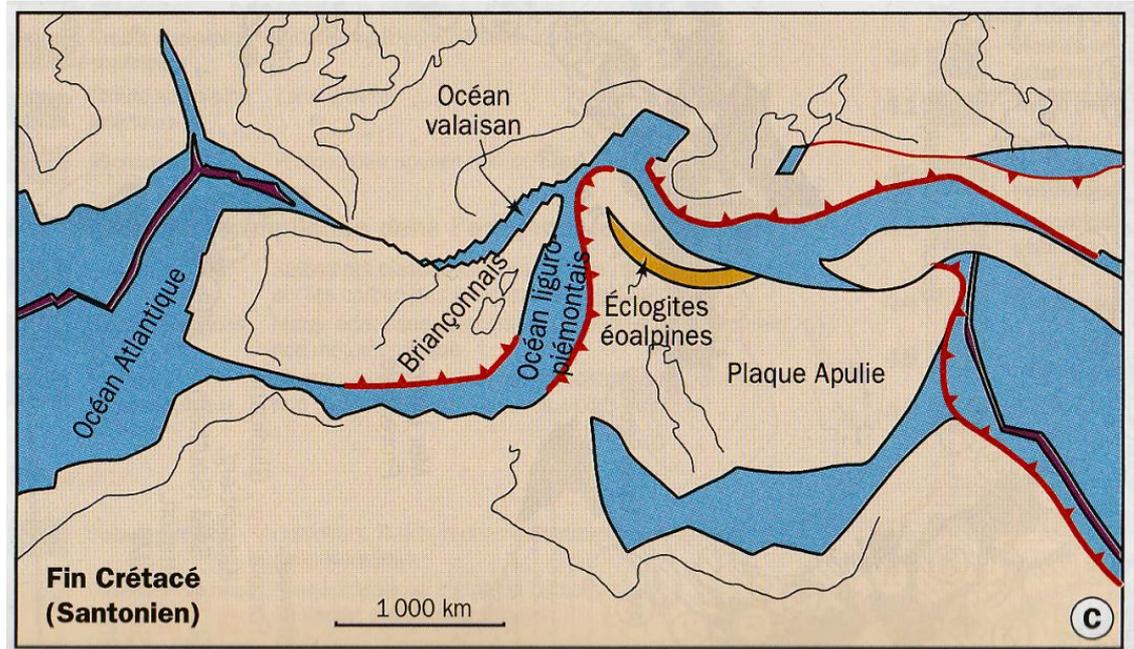
d'après M.MATTAUER "Monts et merveilles" (retouché)



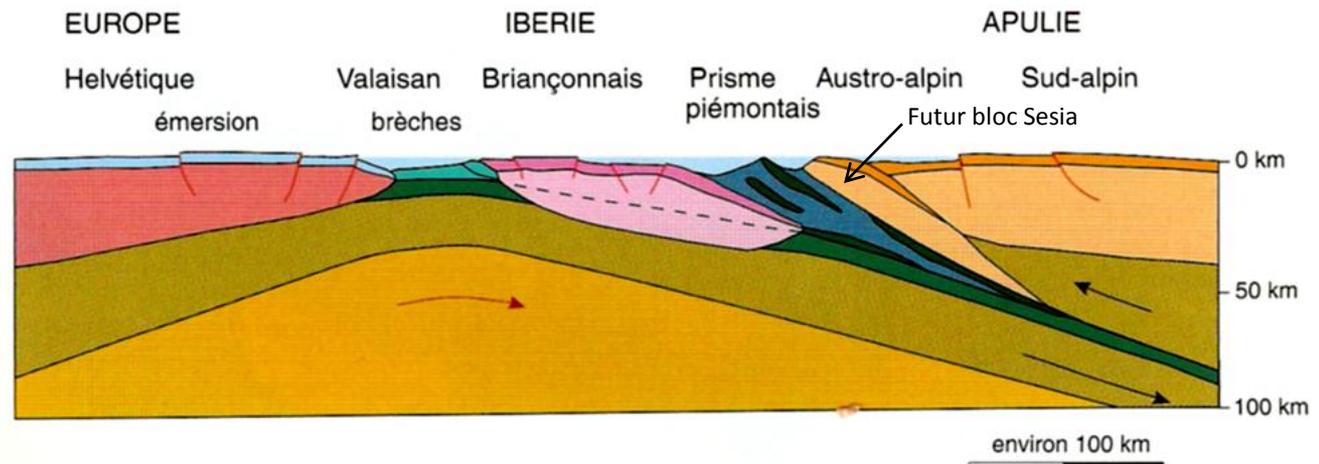
Reconstitutions géodynamiques

Les Alpes

Début Tertiaire
- 60 MA



Début de **subduction continentale** et **fermeture des océans** Valaisin et Liguro-Piémontais.
Soulèvement des marges → érosion → dépôts épais de **flysch** (apport terrigène)

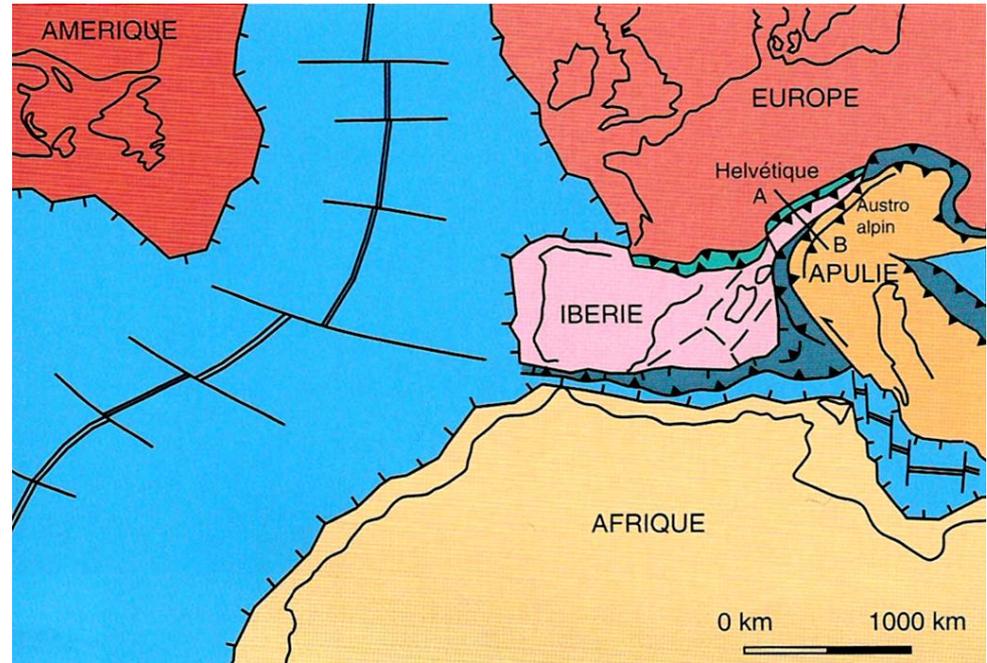


Reconstitutions géodynamiques

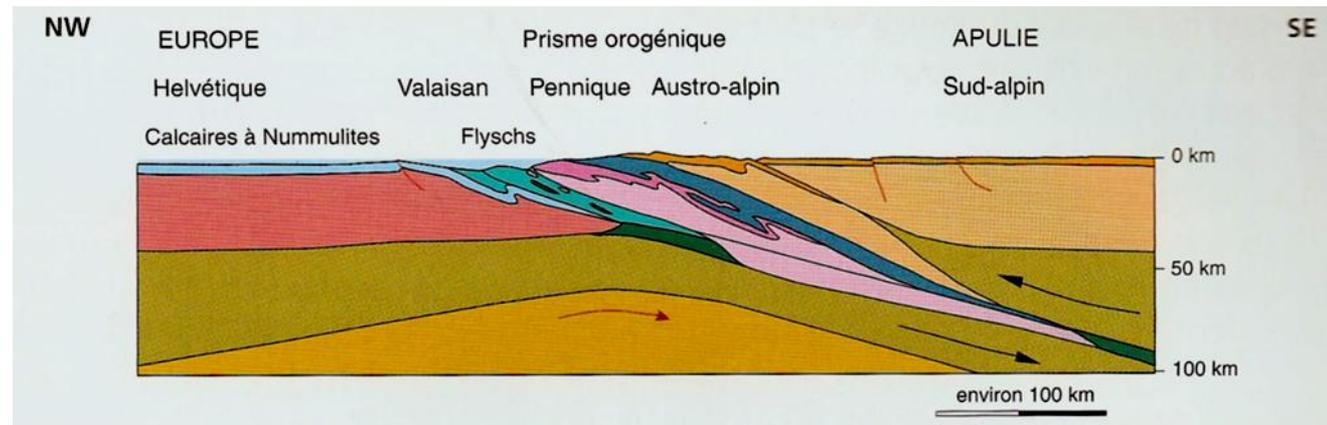
Les Alpes

Eocène
- 40 MA

Ouverture Atlantique Sud
→ Poursuite rotation antihoraire
de l'Afrique.
Remontée vers le Nord de
l'Apulie → Stade de collision



Subduction continentale avec
chevauchement d'unités
crustales.
Dépôts de **flysch** dans un
profond bassin Valaisin.
Reprise de la sédimentation au
Nord (Calcaires à Nummulites)

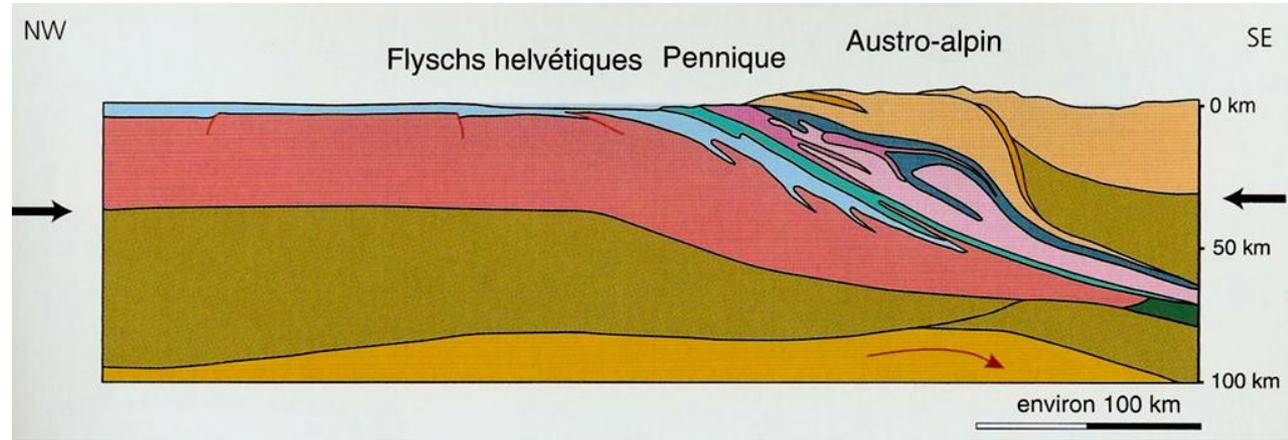


Reconstitutions géodynamiques

Les Alpes

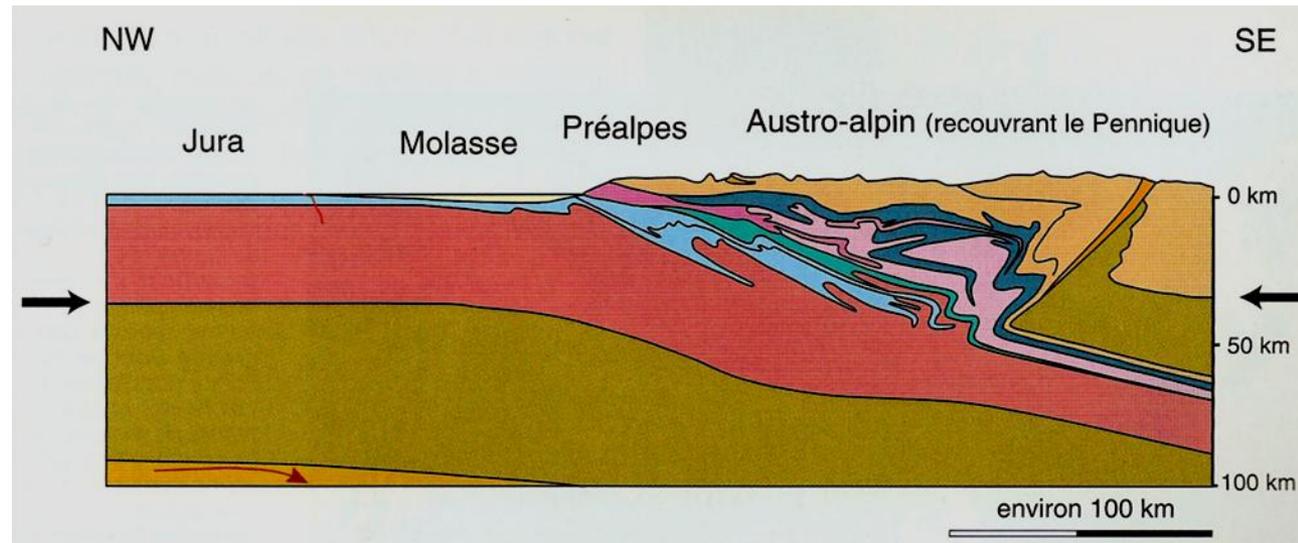
Fin Eocène
- 35 MA

Phase d'**orogénèse** avec épaissement crustal at augmentation de la ductilité → formation de nappes de charriage. Remontée vers la surface de certaines unités. Derniers dépôts de Flyschs



Fin Oligocène
- 25 MA

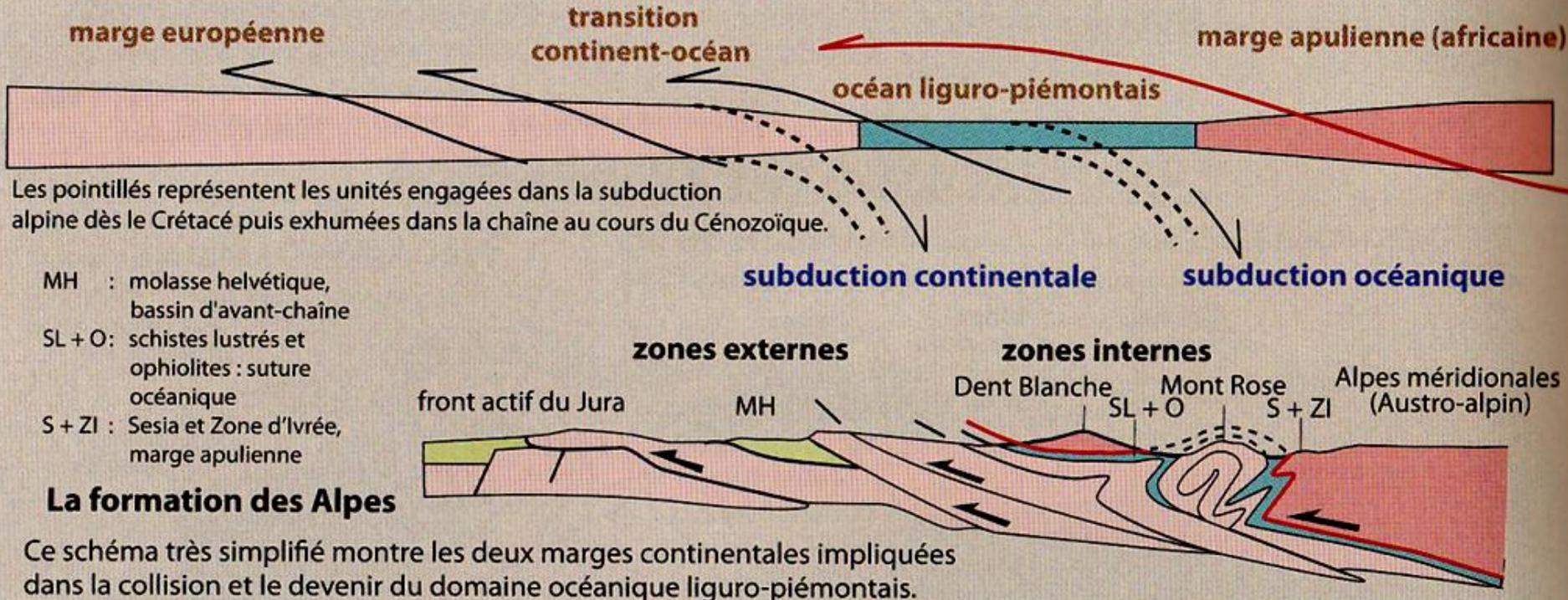
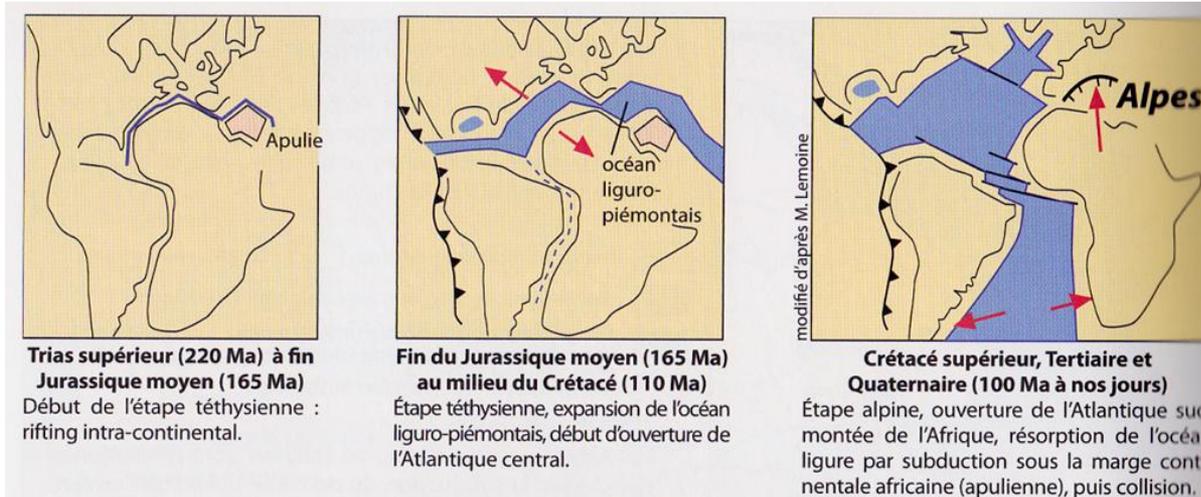
Début d'**érosion** des nappes austro-alpines (d'origine Apulienne) → dépôts molassiques.



Reconstitutions géodynamiques

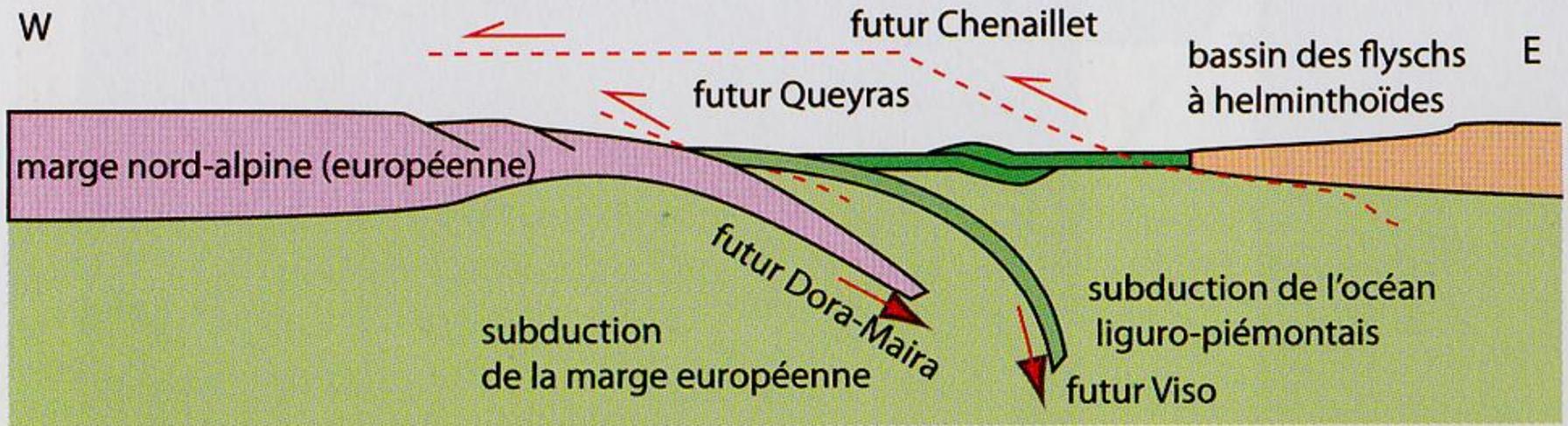
Les Alpes

Une schématisation simplifiée...



Reconstitutions géodynamiques

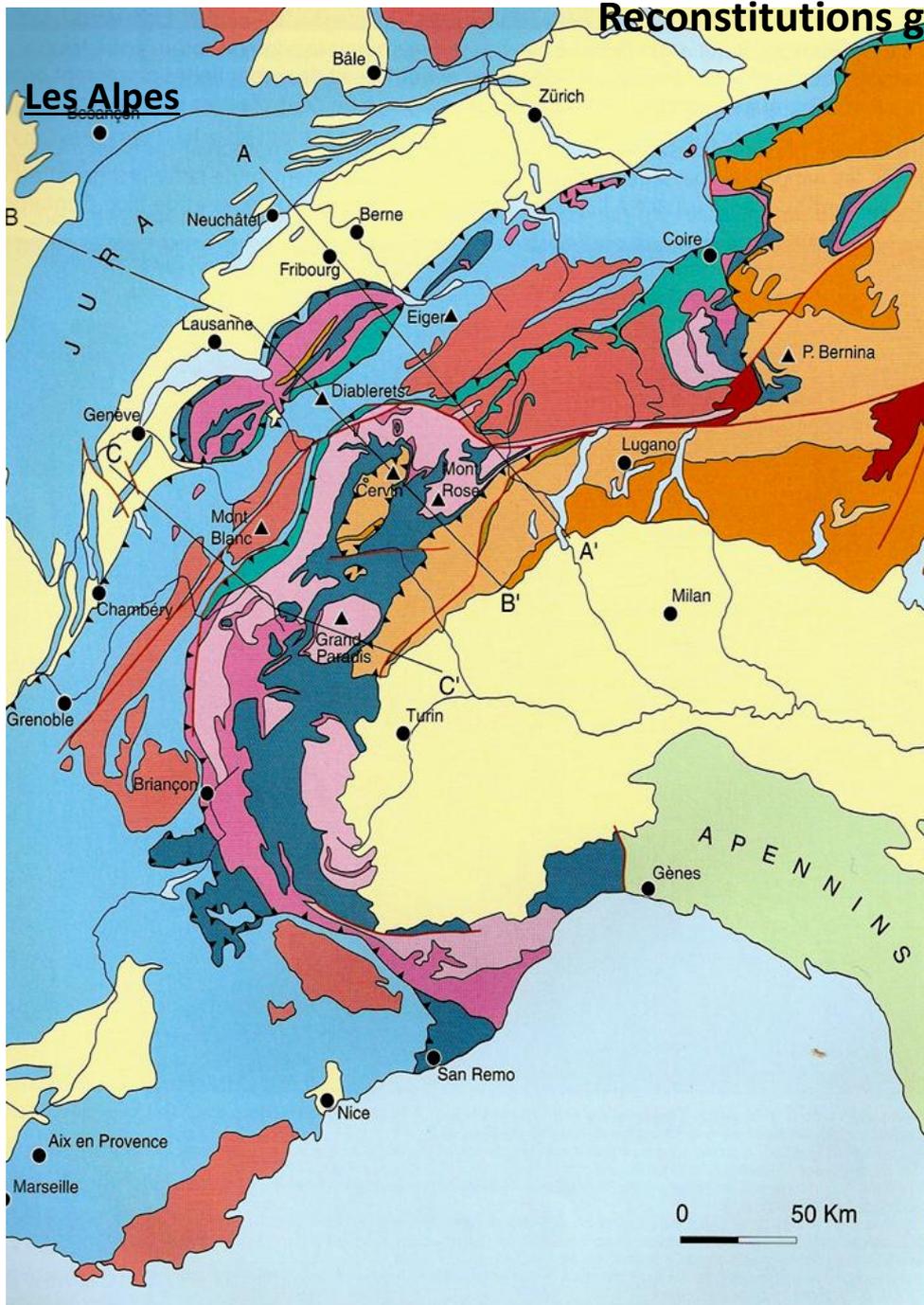
Les Alpes



Coupe hypothétique de l'océan liguro-piémontais en cours de fermeture

État pour la période fin-Crétacé-début Tertiaire, avant le pic HP à 40 Ma du Dora-Maira. Le contenu du bassin des flyschs à Helminthoïdes et les ophiolites non métamorphiques du Chenaillet viendront ensuite recouvrir vers l'ouest, l'océan et la marge européenne non enfouie. Puis, les unités continentales et océaniques enfouies remonteront rapidement pour former les zones les plus internes de la chaîne.

Reconstitutions géodynamiques



Carte simplifiée des Alpes Franco-Italiennes

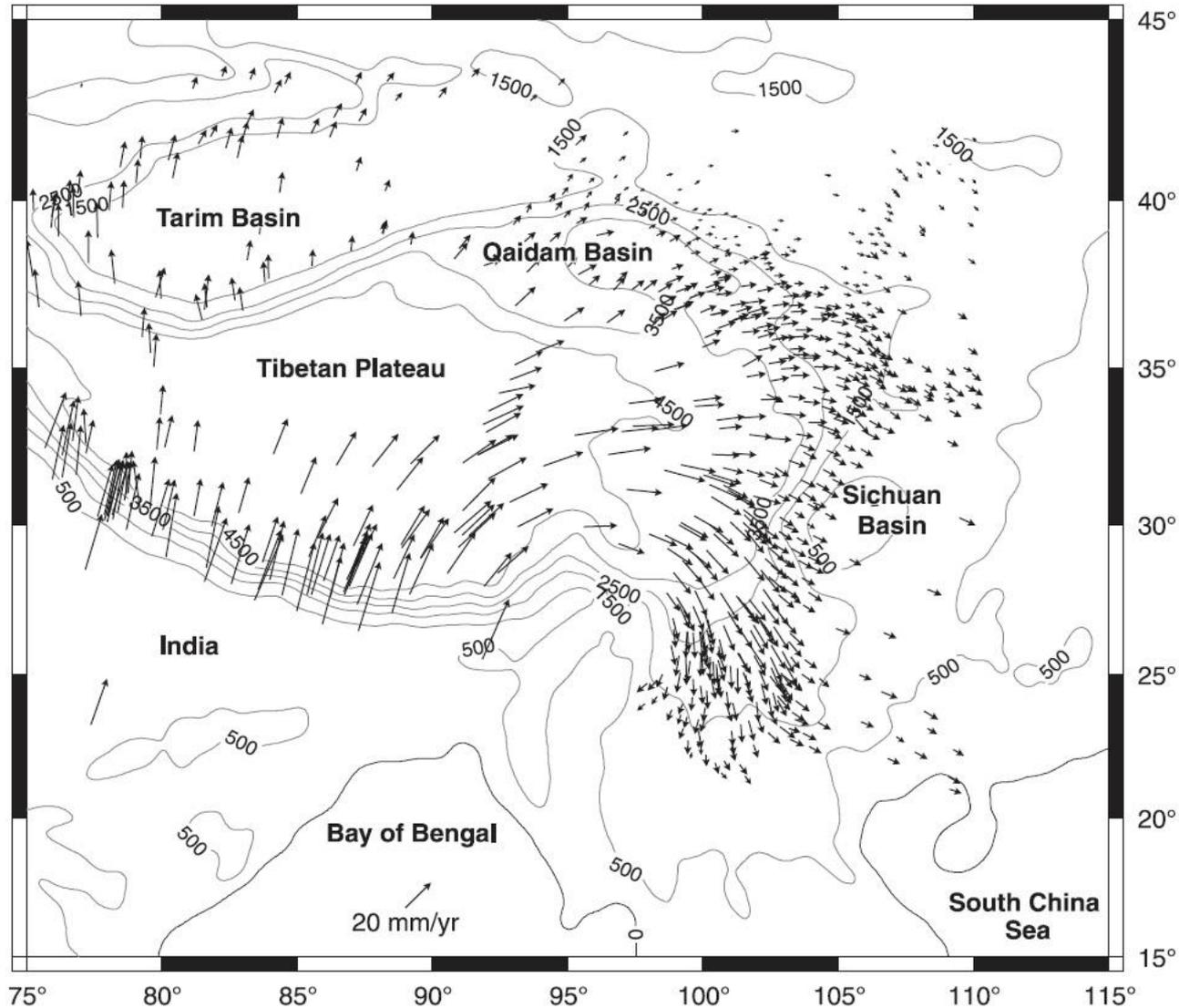
Ages stratigraphiques	Roches principales		Unités tectoniques Nappes	Domaine paléogéographique
Oligocène-Miocène-Pléistocène	sédiments détritiques alluvions		Molasse	Europe (au N) et Apulie (au S)
Trias-Eocène	sédiments marins : calcaires, dolomies, brèches		Austro et Sud-Alpin	Apulie (microcontinent détaché de l'Afrique)
Paléozoïque	socle : gneiss granites, gabbros (croûte continentale)			
Jurassique-Crétacé	métasédiments océaniques et lambeaux d'ophiolites (croûte océanique)		Pennique supérieur	Piémontais (océan jurassique et crétacé)
Trias-Eocène	sédiments marins : calcaires, dolomies		Pennique moyen	Briançonnais (péninsule rattachée à l'Ibérie)
Paléozoïque	socle : gneiss, micachistes (croûte continentale)			
Crétacé-Eocène	métasédiments océaniques, flyschs, rares ophiolites		Pennique inférieur métasédimentaire	Valaisan (océan crétacé)
Trias-Oligocène	sédiments marins : calcaires, marnes		massifs externes Pennique inférieur cristallin	Europe (continent et sa marge marine)
Paléozoïque	socle : gneiss, granites (croûte continentale)			
Oligocène	granites intrusifs post-orogéniques		Austro et Sud-alpin (en grande partie)	Origine magmatique profonde
	péridotites		Lithosphère inférieure	(sommets du manteau terrestre, rarement visible en surface)

	Principaux chevauchements (pointes du côté chevauchant ou supérieur)
	Failles principales

Reconstitutions géodynamiques

Himalaya

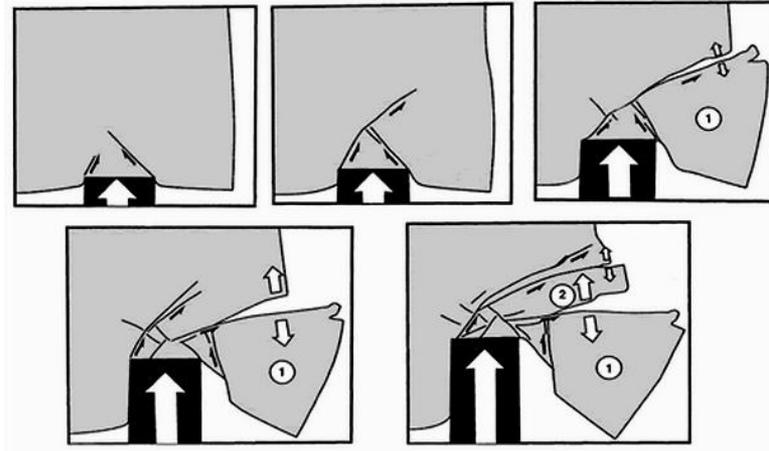
Mouvements absolus du plateau du Tibet et de l'Himalaya mesurés par GPS, avec l'Eurasie comme référence fixe



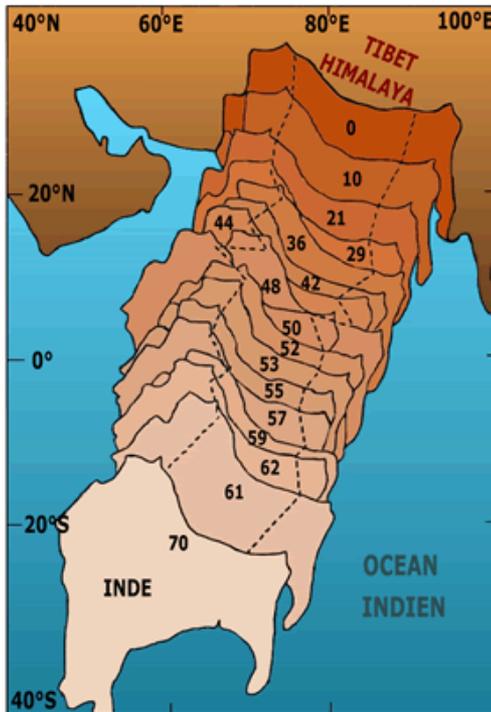
Reconstitutions géodynamiques

Himalaya

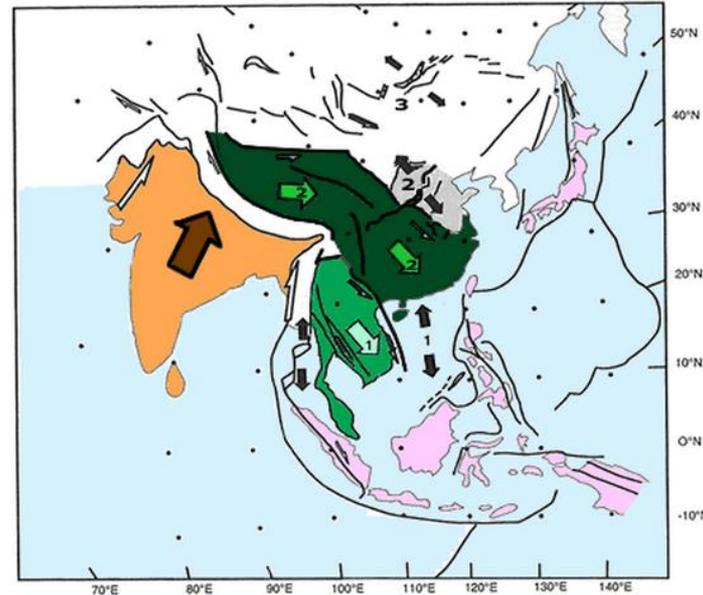
Dessins d'un modèle analogique de la collision Inde-Asie en plastique (Tapponier et al., 1982)



Evolution cinématique de la plaque indienne



Modèle d'évolution de la zone de collision (Tapponier et al., 1982)



Reconstitutions géodynamiques

Maures

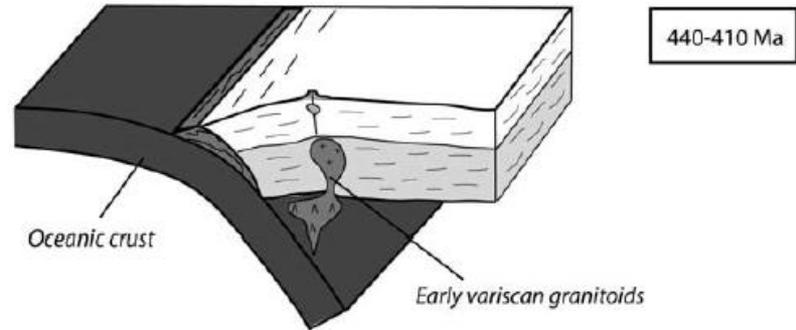
Datations absolues et modèle géodynamique d'évolution du massif des Maures

Des datations (méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Morillon *et al.*, 2000) récentes effectuées sur des muscovites et biotites des Gneiss de l'unité de Bormes ont livré des âges compris entre 320.6 ± 0.7 Ma et 317.1 ± 0.2 Ma

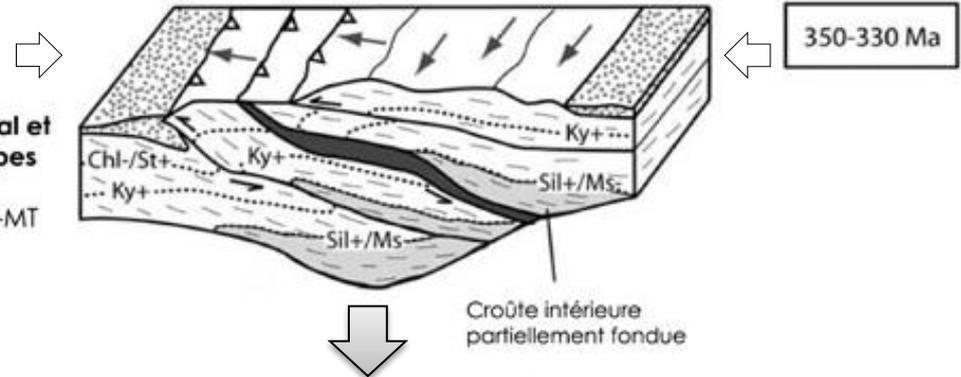
Les migmatites de la plage de Bonne Terrasse ont été datées par méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ à 301.1 ± 0.6 Ma sur biotite (Morillon *et al.*, 2000).

Le granite de Camarat est considéré comme post-tectonique. Il a été daté par méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ entre 299.4 ± 0.6 Ma et 300.2 ± 0.4 Ma sur biotite et muscovite (Morillon *et al.*, 2000).

Subduction hypothétique
Métamorphisme HP BT

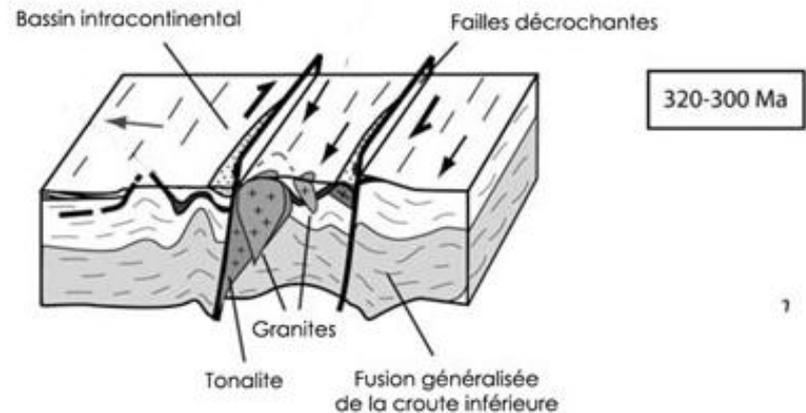


Épaississement crustal et empilement de nappes
Métamorphisme MP-MT



Exhumation

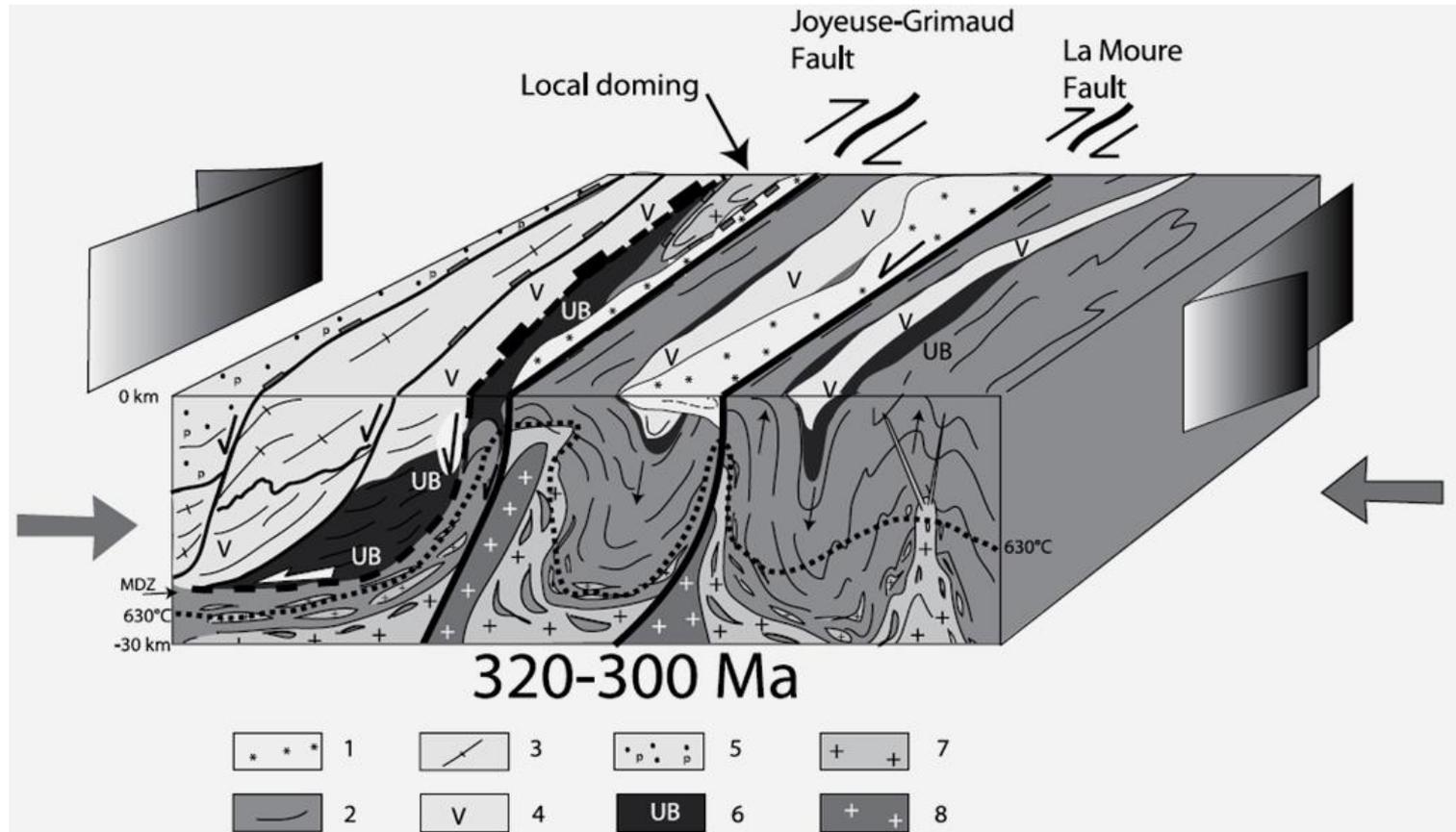
Métamorphisme HT-BP



Reconstitutions géodynamiques

Maures

Bloc diagramme illustrant les caractères géométriques, lithologiques et métamorphiques du massif des Maures-Tanneron, au cours de son évolution tardive en transpression (320-300 Ma).



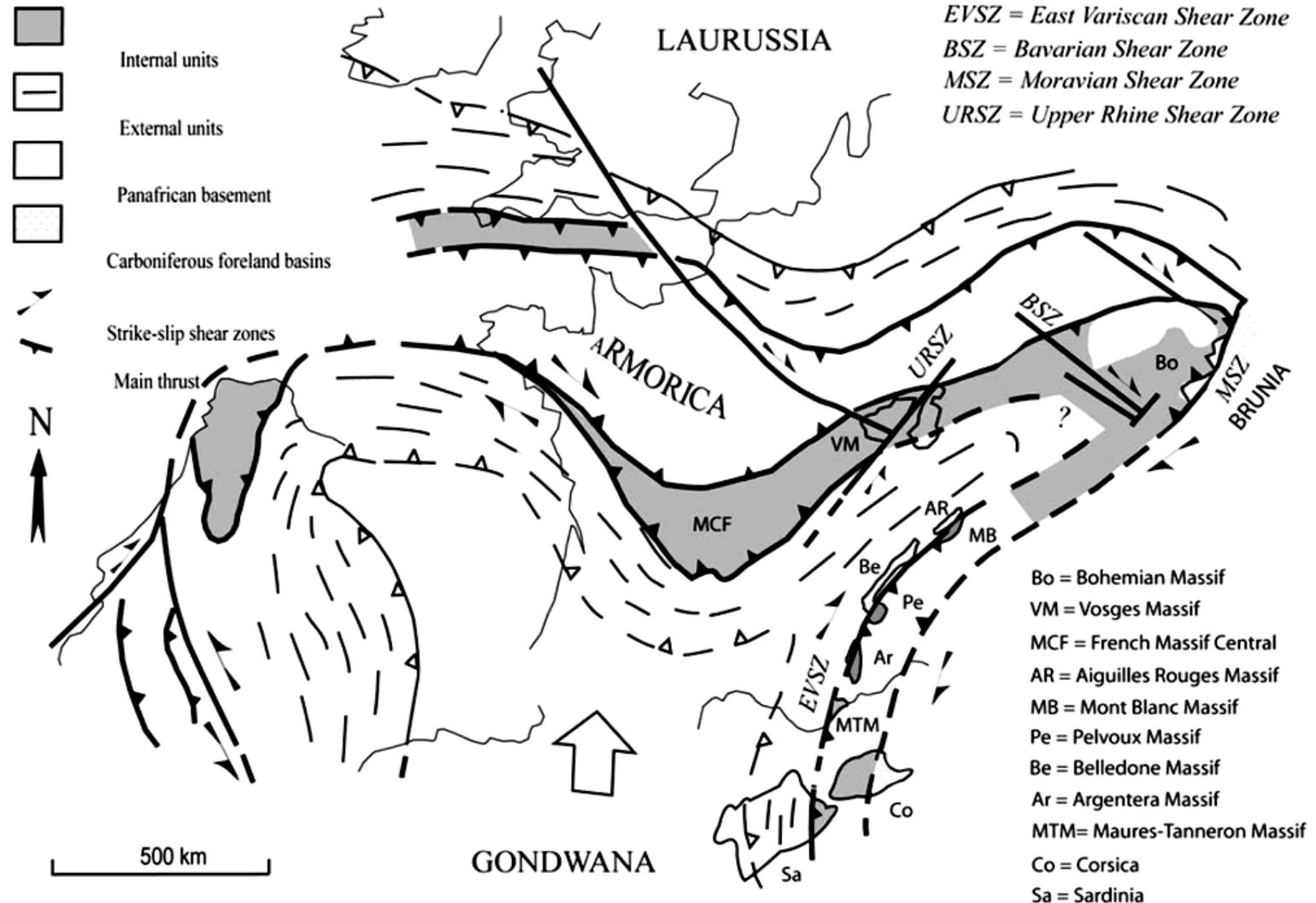
1, conglomérats carbonifères non métamorphiques ; 2, micaschistes ; 3, orthogneiss de Bormes ; 4, série leptyno-amphibolique ; 5, phyllades (p), de composition pélitique ; 6, ultrabasites, et mégagabbros (amphibolites), initialement une séquence de croûte océanique obduite ; 7, migmatites et granites alumineux ; 8, tonalites (magmatisme dérivé de la fusion du manteau avec une forte assimilation crustale).

Reconstitutions géodynamiques

Maures

Carte structurale schématique de la Chaîne varisque du Sud de l'Europe

Cette figure montre l'existence de grandes zones de cisaillement entre 310 et 290 Ma dans la partie orientale de la Chaîne varisque.



Reconstitutions géodynamiques

Maures

Carte structurale simplifiée de la Chaîne varisque du Sud de l'Europe

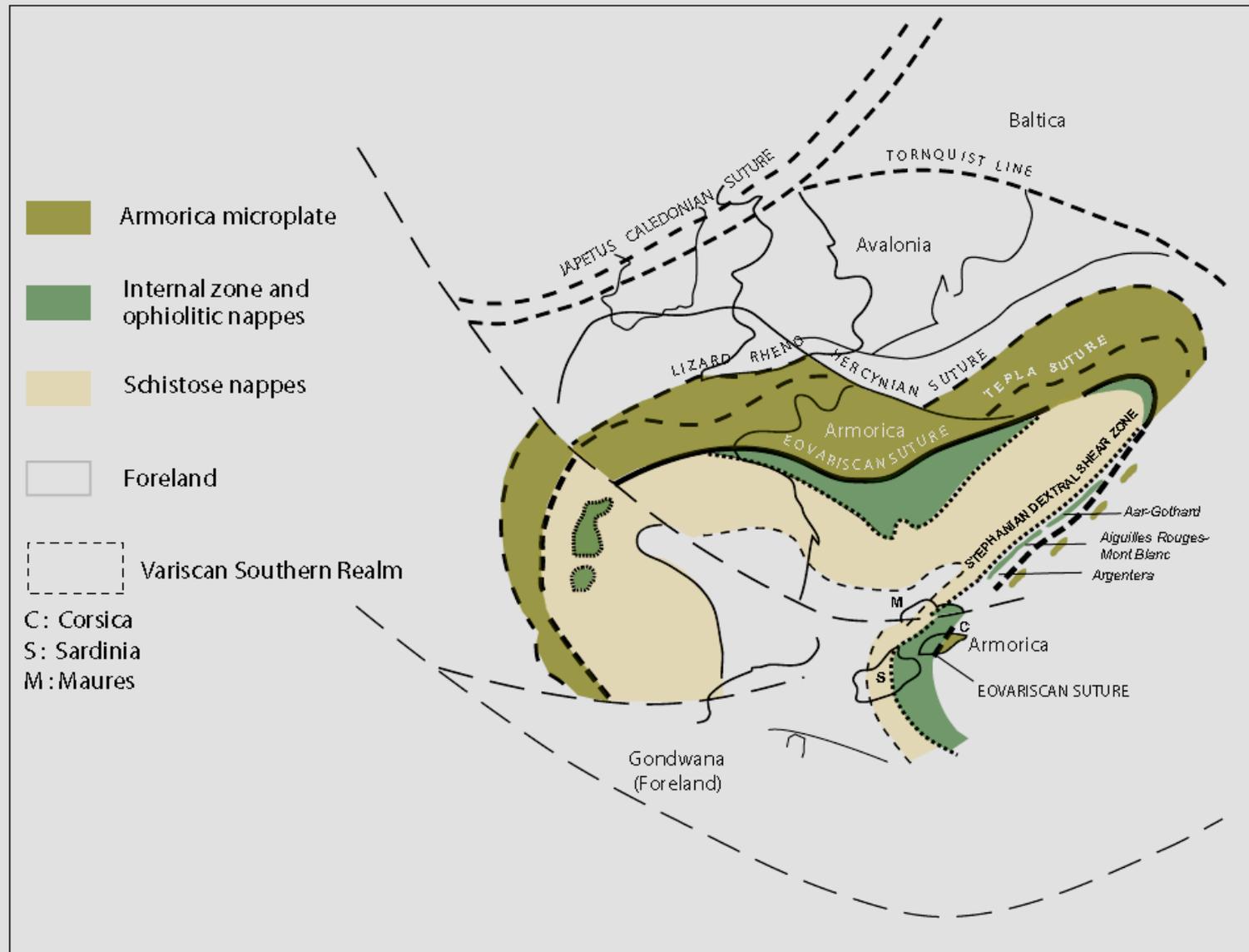


Fig. 2-1.- The southern Variscan realm in Western Europe. Permian Variscan zonation after Matte (2011).

FIN