

I. Introduction générale

II. Thermodynamique des systèmes naturels

III. Cinétique des réactions

IV. Bilans thermiques

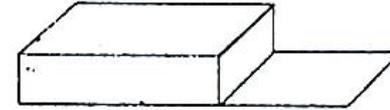
V. Métamorphisme et contextes géodynamiques

***VI. Le métamorphisme de HP-BT:
exemple des Alpes occidentales***

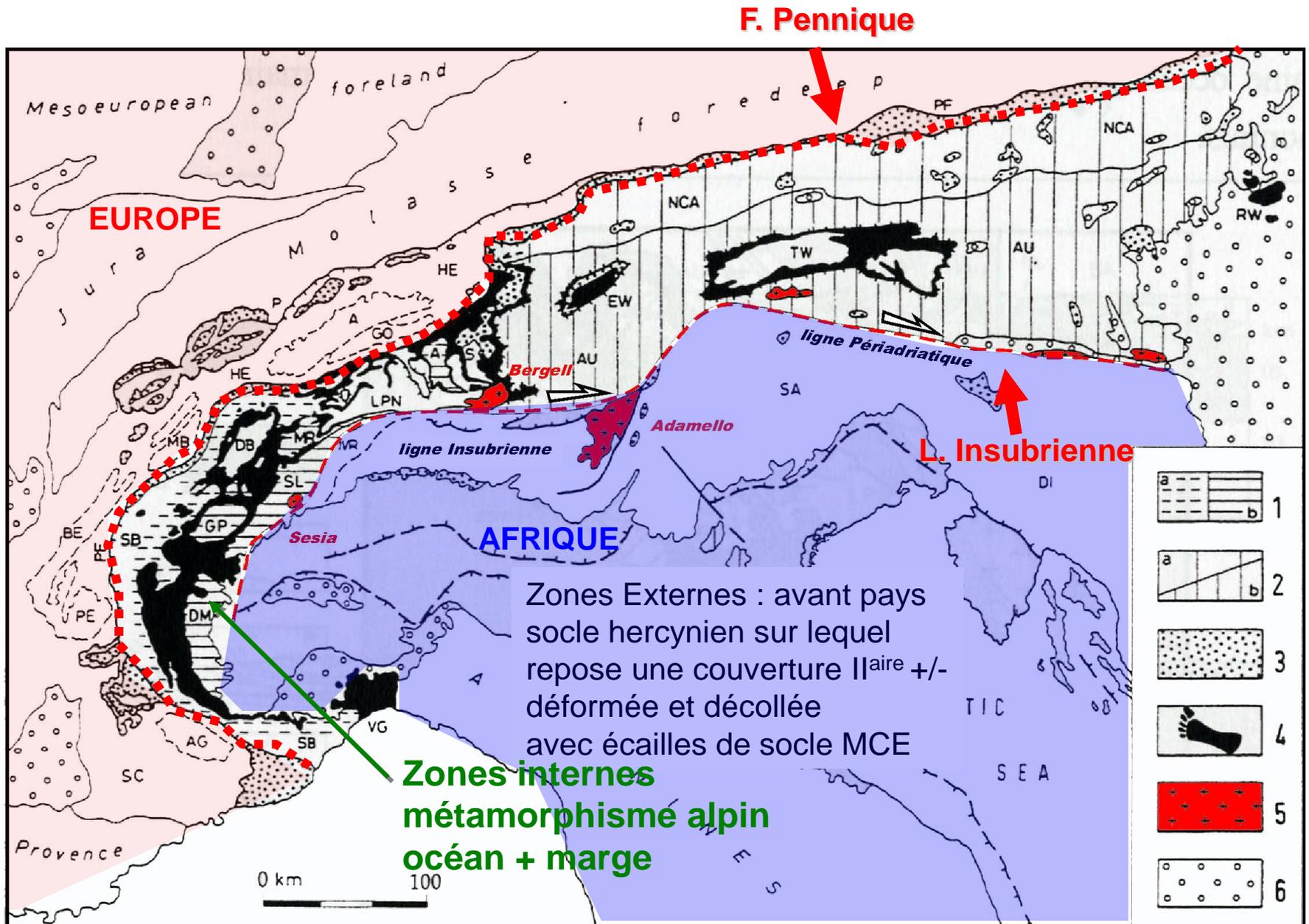
Les Alpes avant les Alpes → Evolution de la Téthys liguro-piémontaise

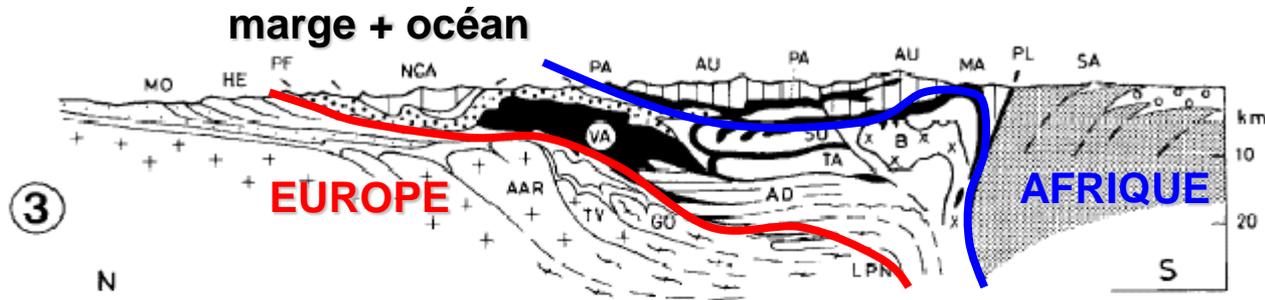


**A1: à la fin de l'ère Primaire (245 Ma):
stade pré-téthysien, la Pangée**

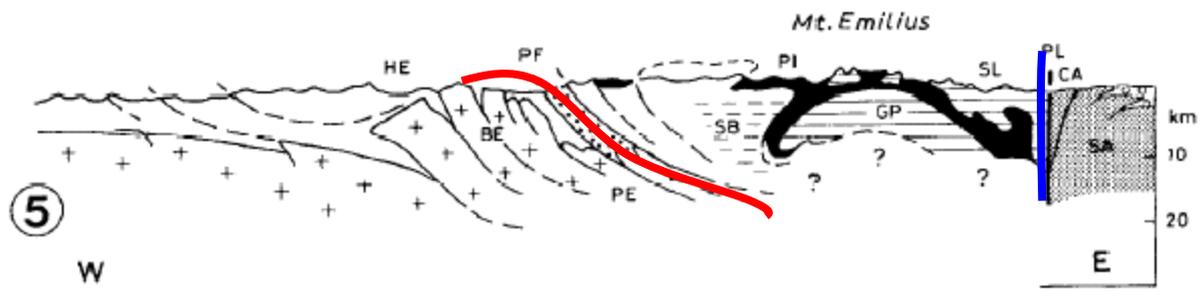
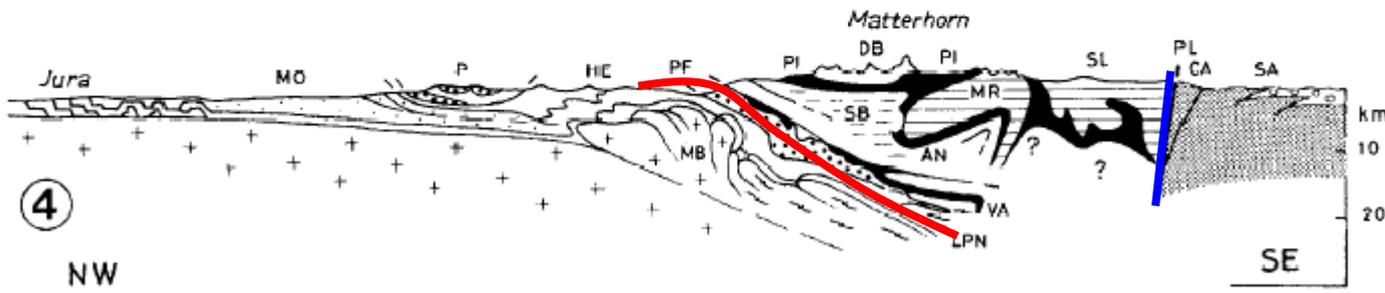


Alpes actuelles → Limite de plaques

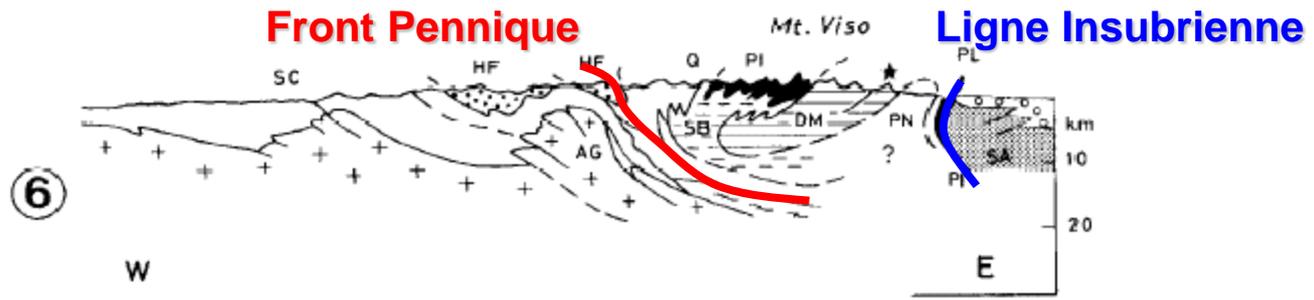


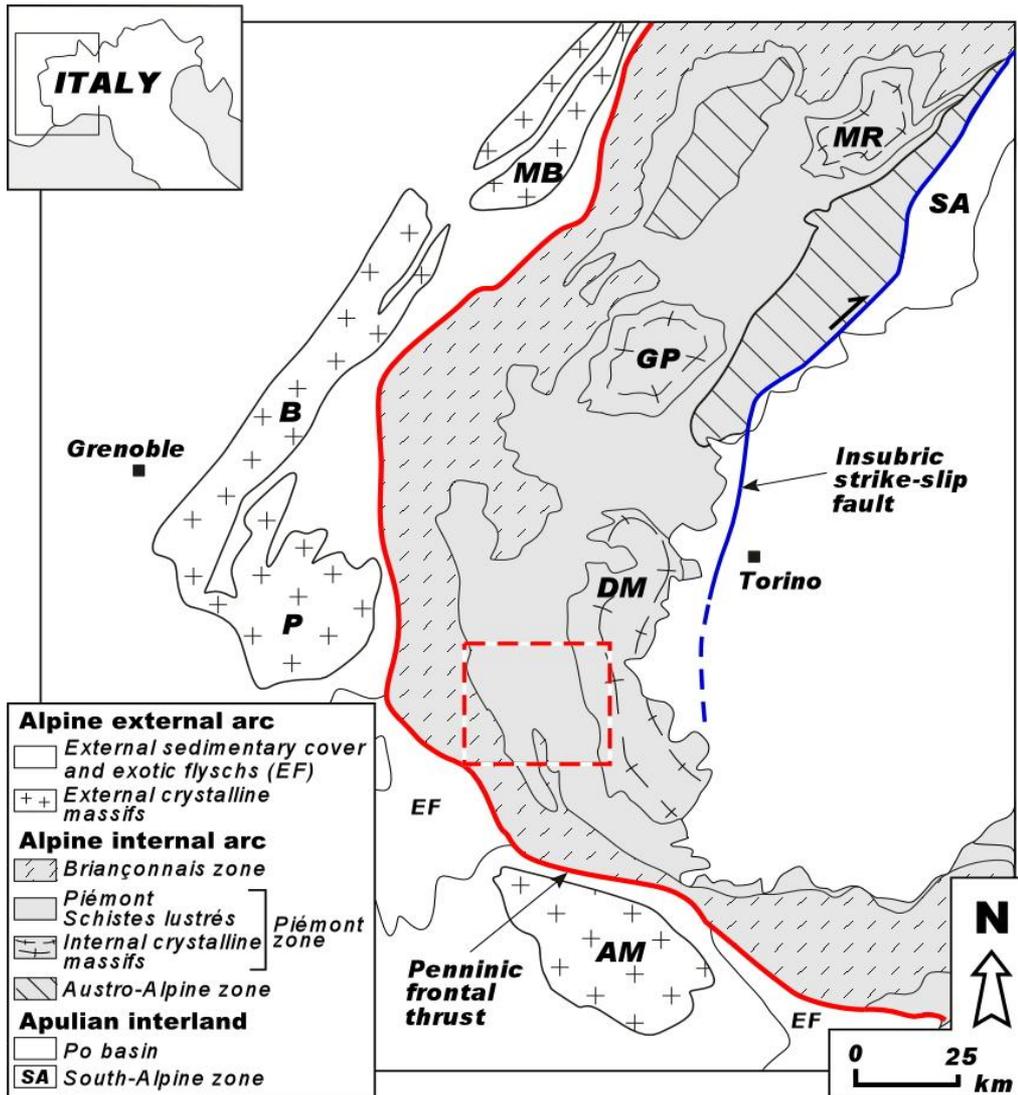


**Nord au Sud
dispositif identique**



Alpes :
sandwich orogénique
→ au centre mélange
métamorphique
océan + marge continentale
= (zones internes)





Question ?

Genèse et exhumation des roches de HP et UHP

Méthodes

**Pétrologie
Tectonique
Géochronologie**

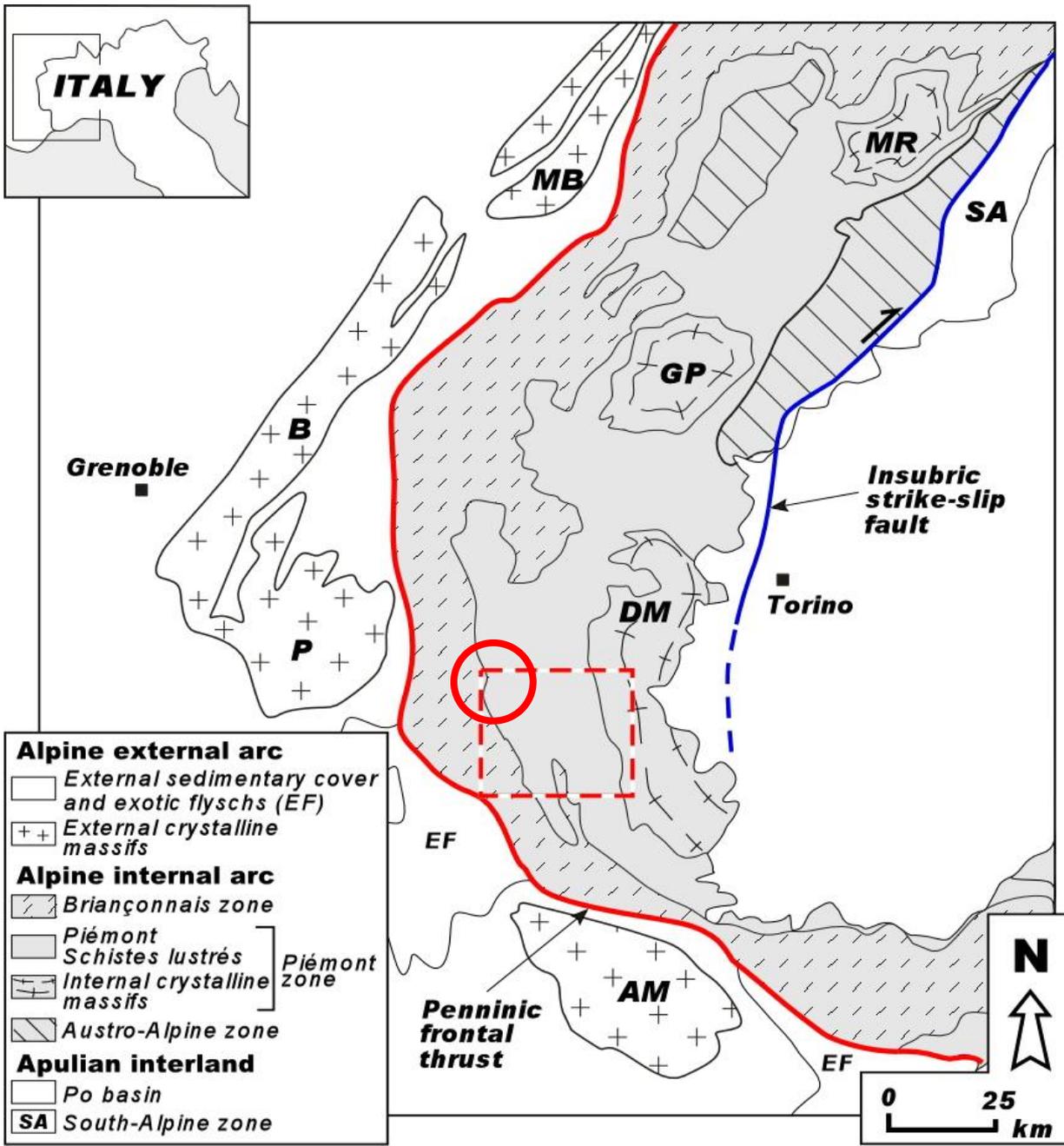
Objet

**Zone Piémontaise
des Alpes occidentales**

- ➔ unités océaniques
 - Schistes lustrés
 - ophiolites
- ➔ unités continentales

1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

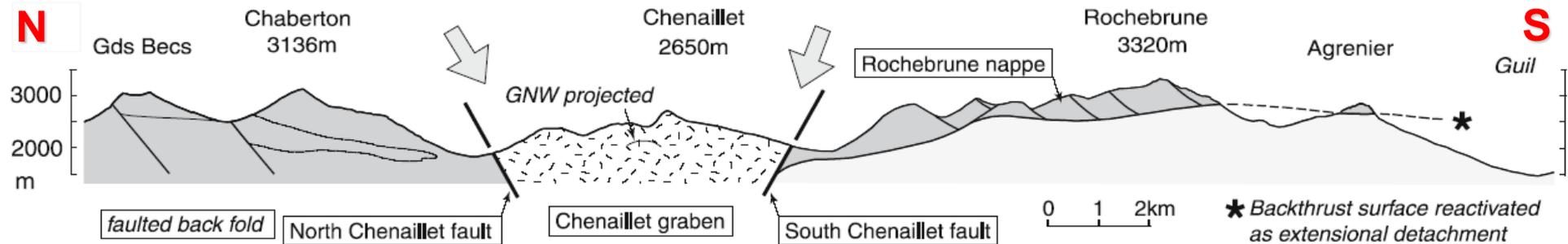
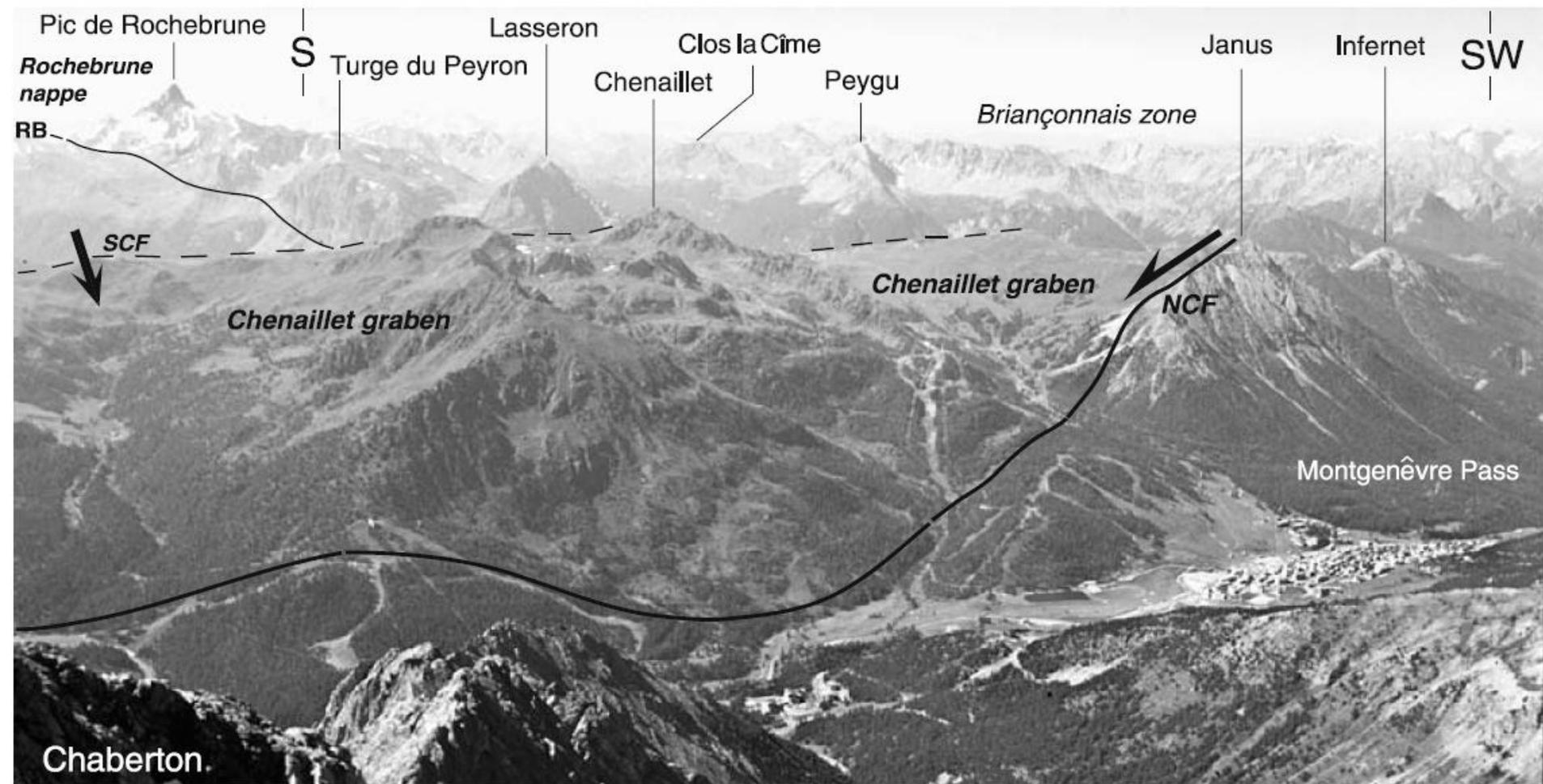
1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites



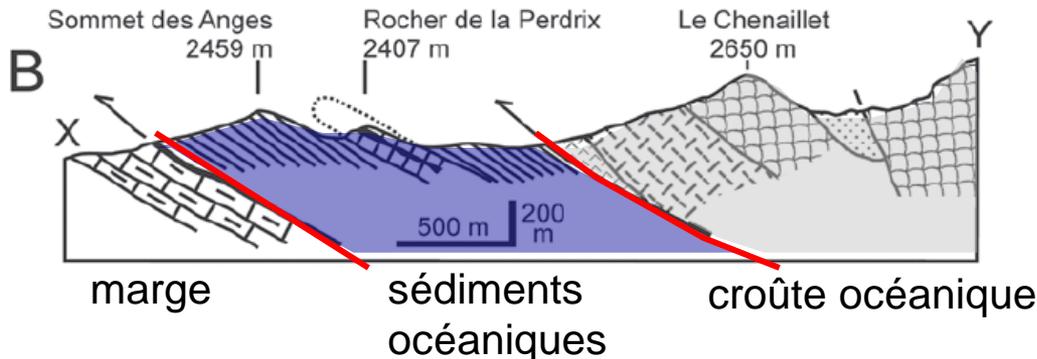
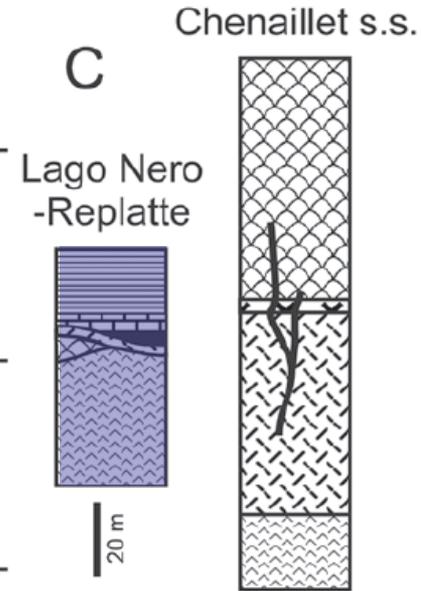
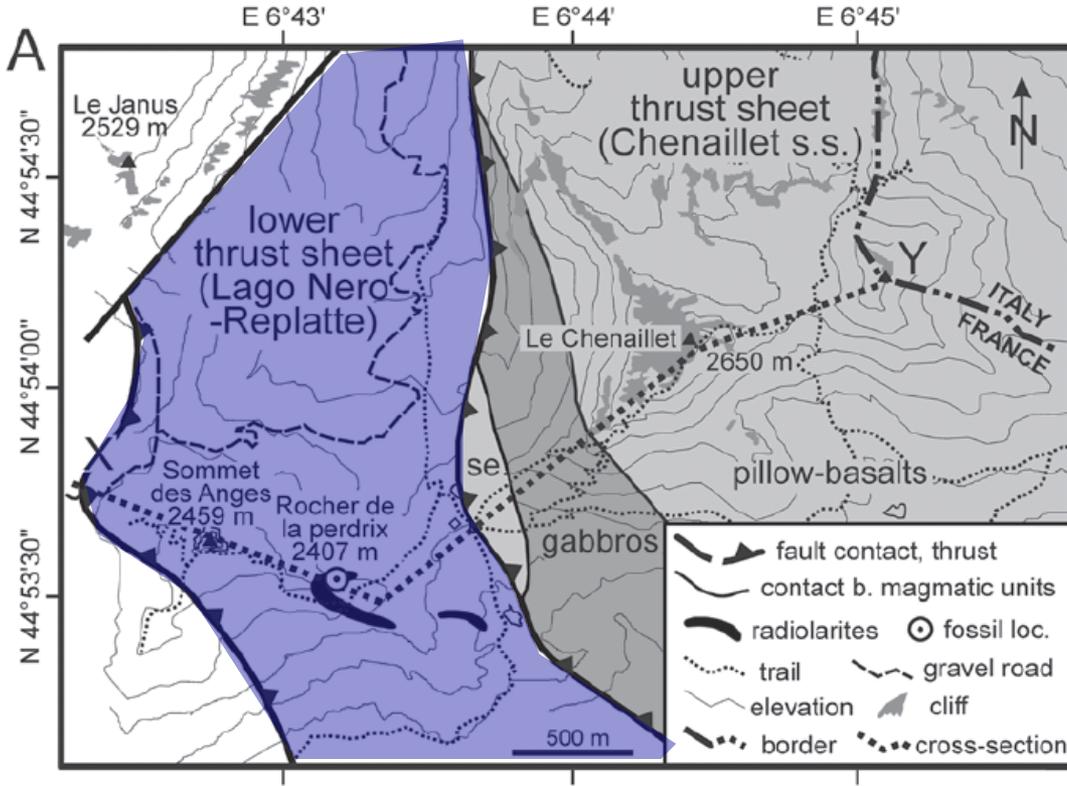
A quoi ressemblent les roches issues de l'océan avant le métamorphisme ?

Observation des ophiolites...
(massif du Chenaillet)

Chenaillet : Cadre tectonique régional (Tricart et Sue, 2006)

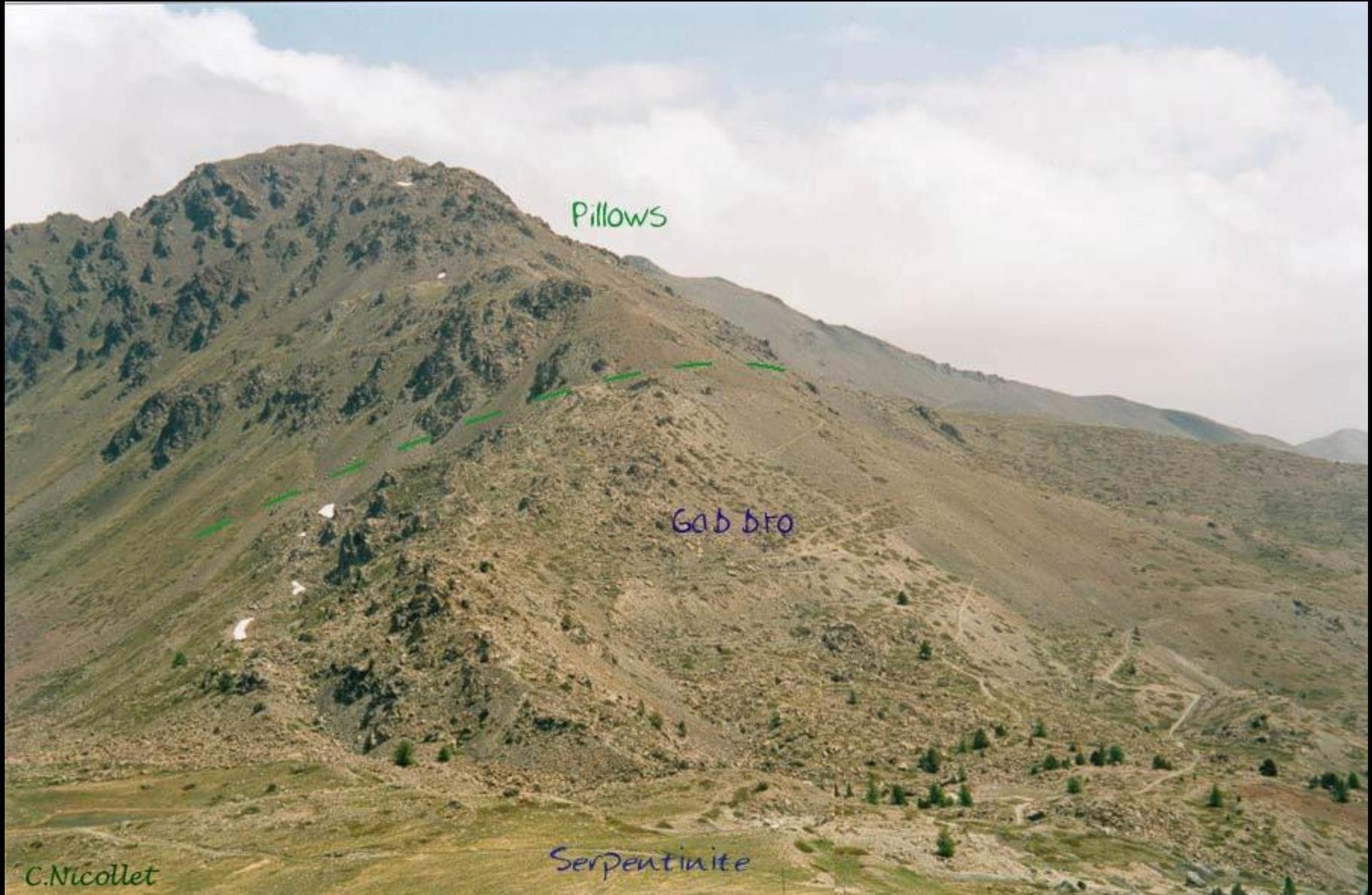


Informations lithologiques et structurales (Cordey et al., 2007)



Association d'unités océaniques typiques séparées par des contacts anormaux...





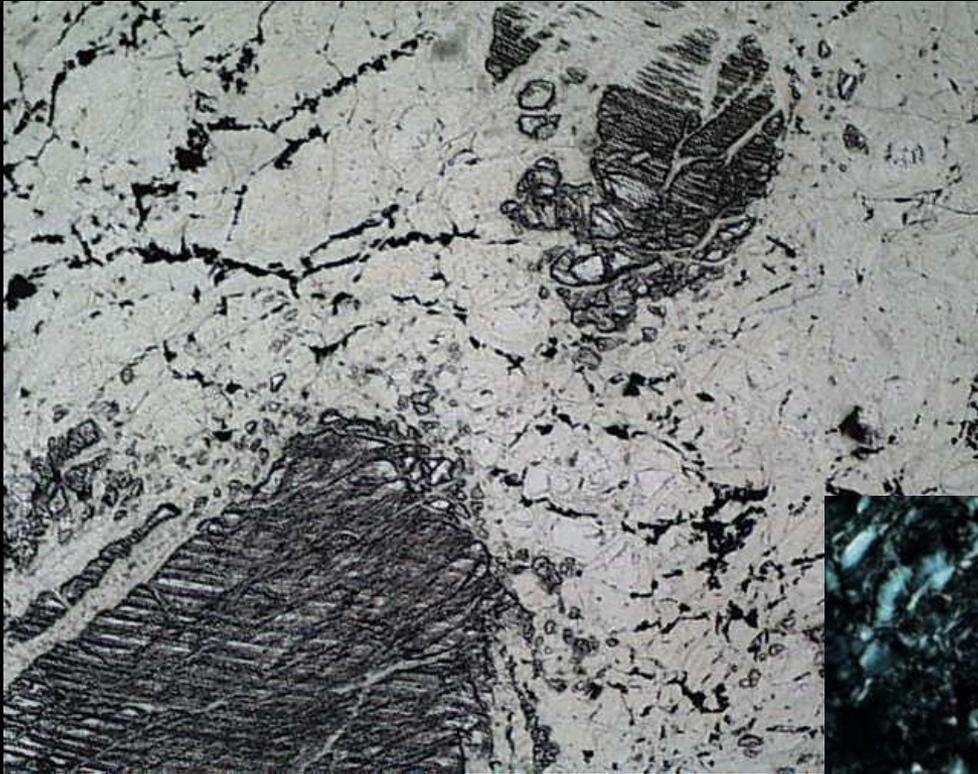
Pillows

Gabbro

Serpentinite

C. Nicollet





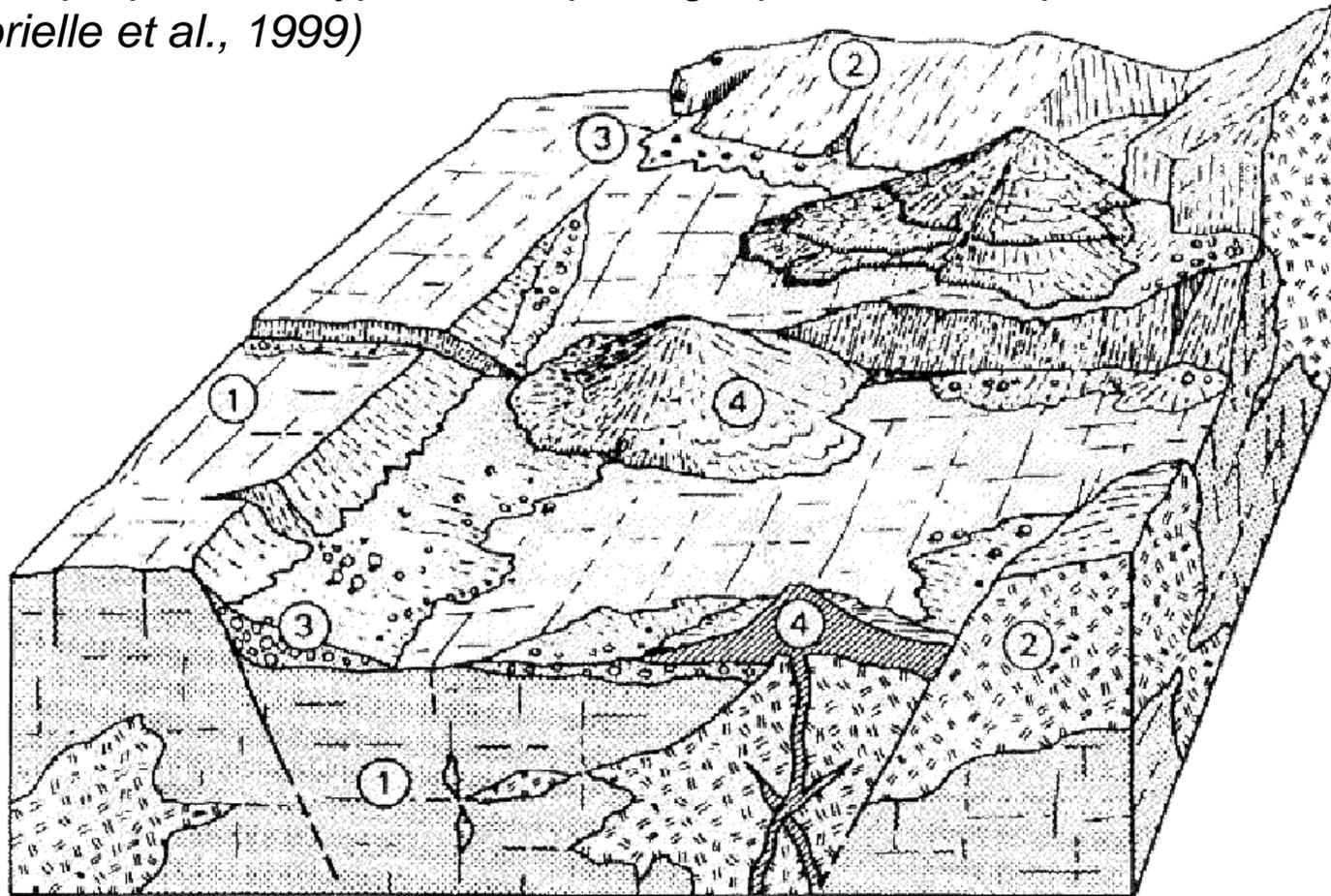






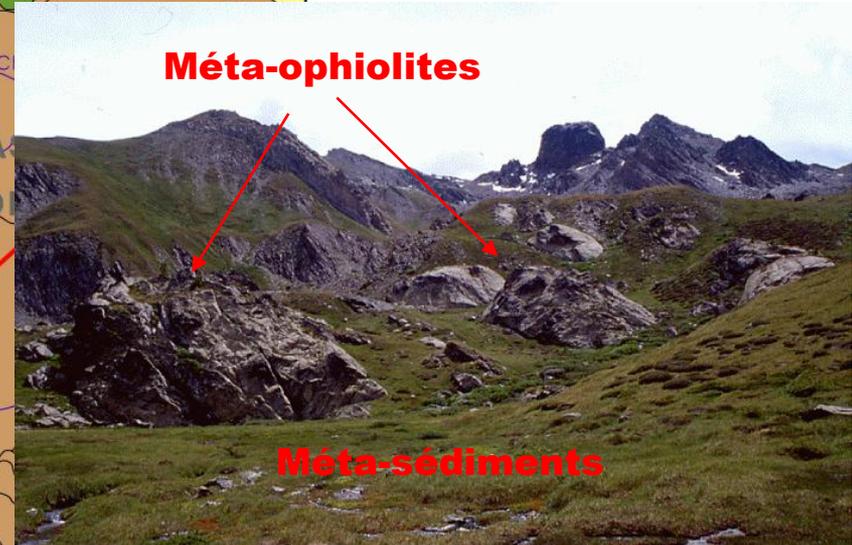
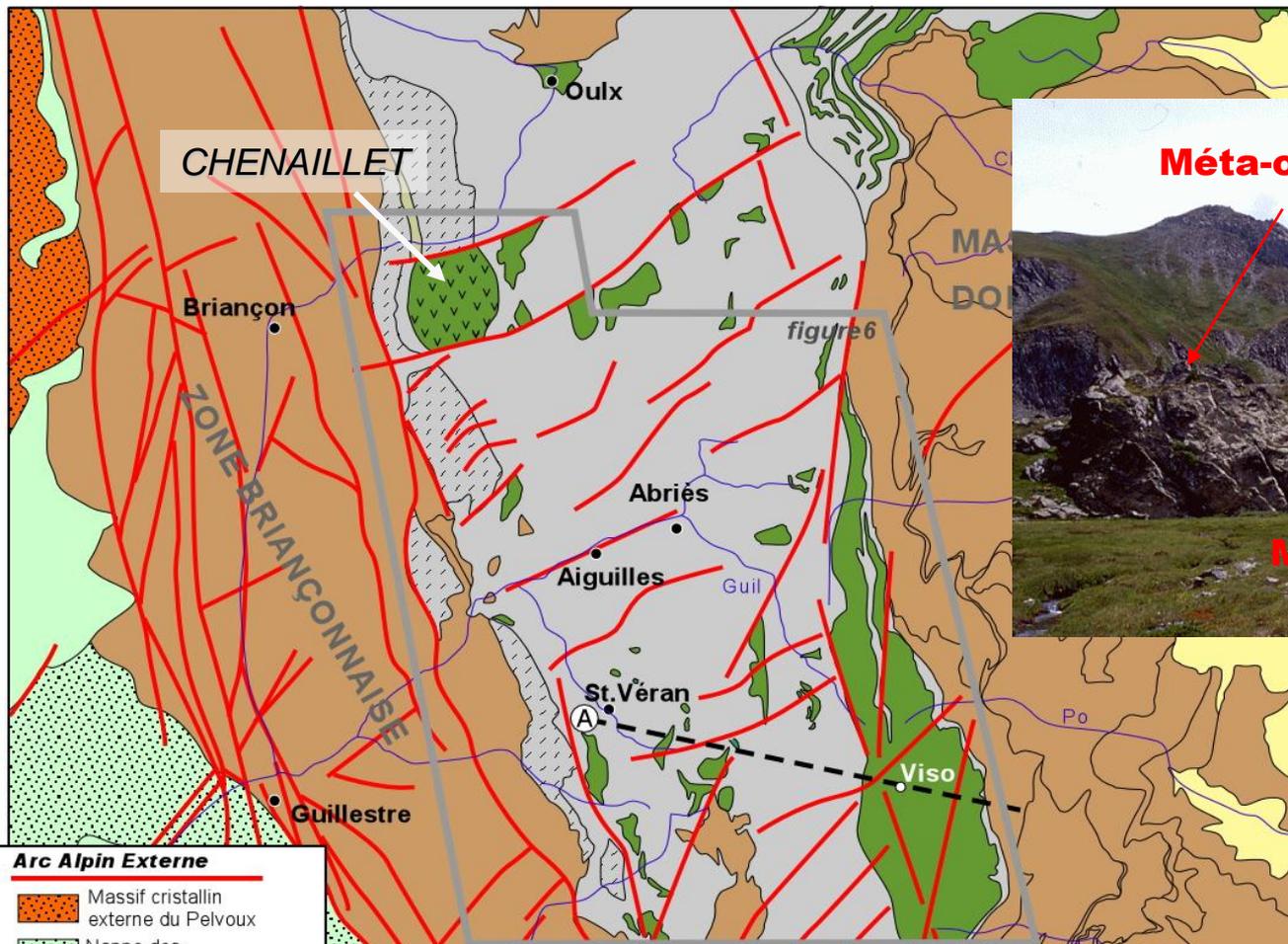
L'étude des ophiolites alpines comparées à l'observation des dorsales océaniques conduit à proposer ce type de morphologie pour océan alpin...

(Lagabrielle et al., 1999)



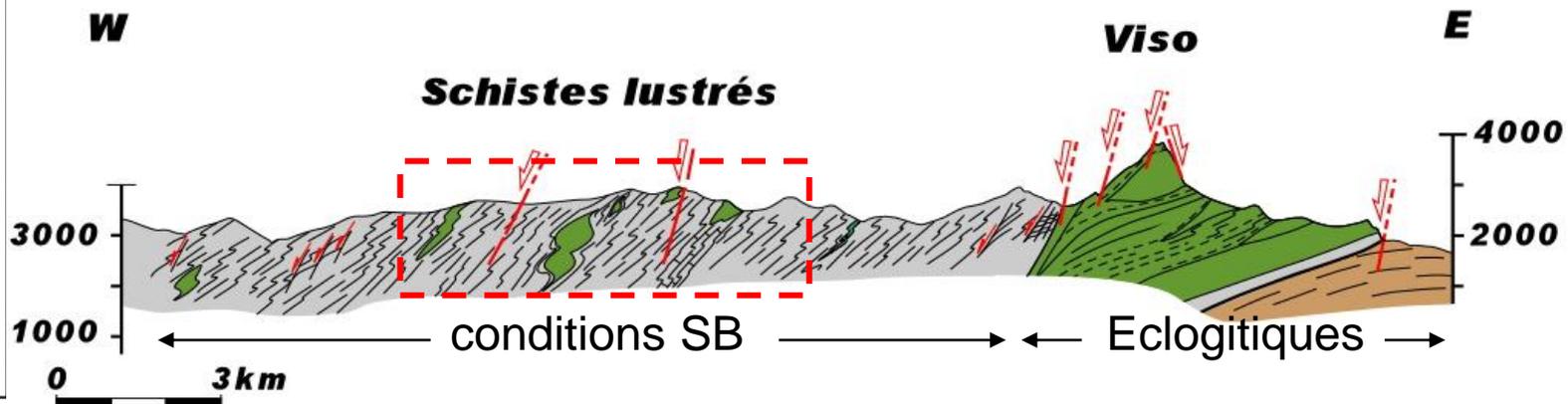
Structure similaire à la croûte océanique actuelle de l'Atlantique central...

Géométrie Z. Piémontaise



- Arc Alpin Externe**
- Massif cristallin externe du Pelvoux
 - Nappe des flyschs
 - Zone Dauphinoise
 - Sédiments quaternaires de la plaine du Pô
- Arc Alpin Interne**
- Chenaillet ophiolite
 - Unités d'affinité Briançonnaise
 - Ophiolites
 - Schistes lustrés
 - Unités de marge
- Zone Piémontaise

unités océaniques
 → 2 domaines juxtaposés présentant des **conditions métam. différentes...**



1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites

1.2. Quantification dans les unités SB à forte composante sédimentaire (Schistes lustrés)

 roches basiques (métabasites)

 roches sédimentaires (métapélites)

W

E

calcschistes

péridotites
serpentinisées

gabbros

gabbros





gabbros métamorphiques
= métagabbros

Association lithologique :

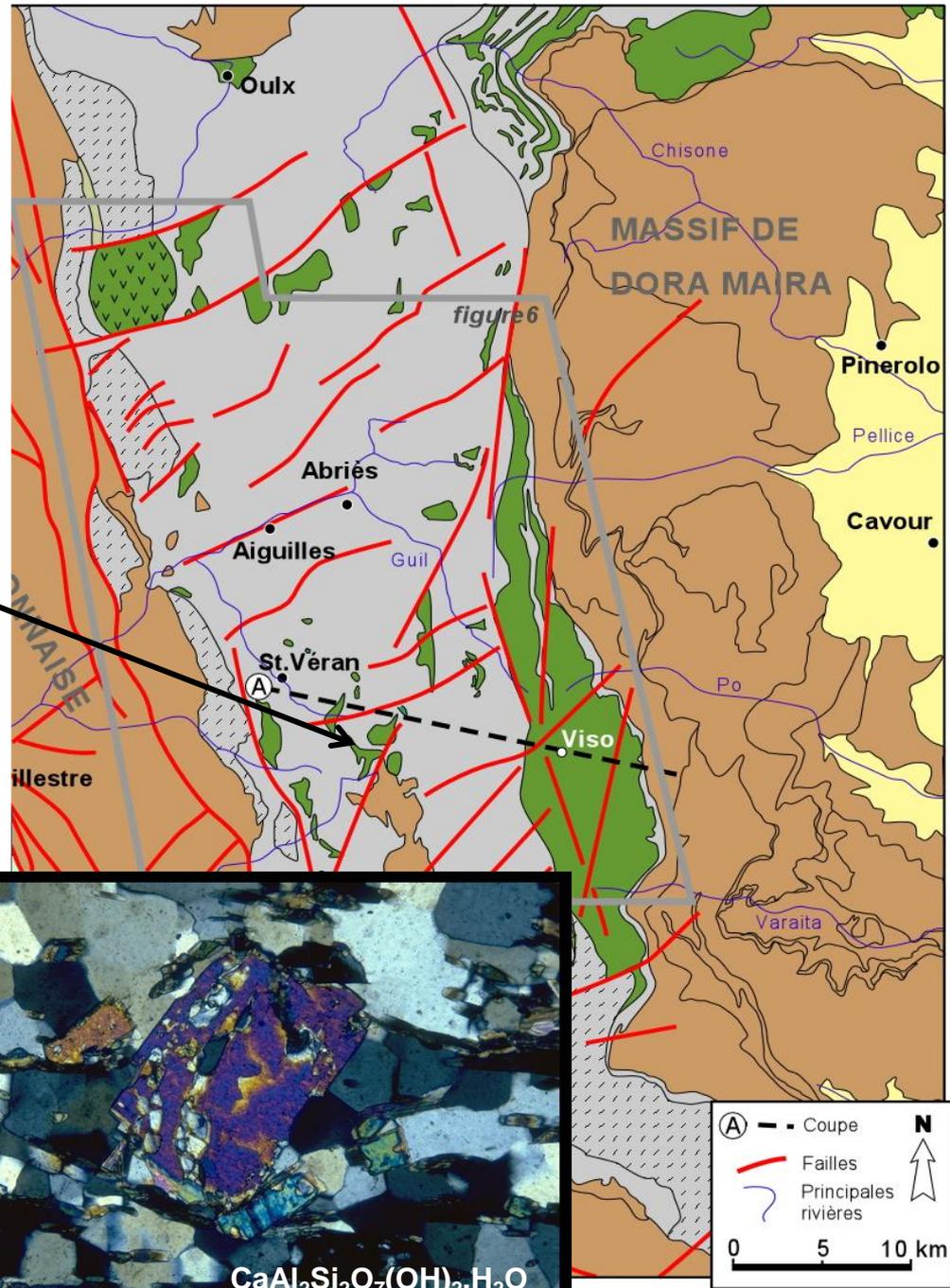
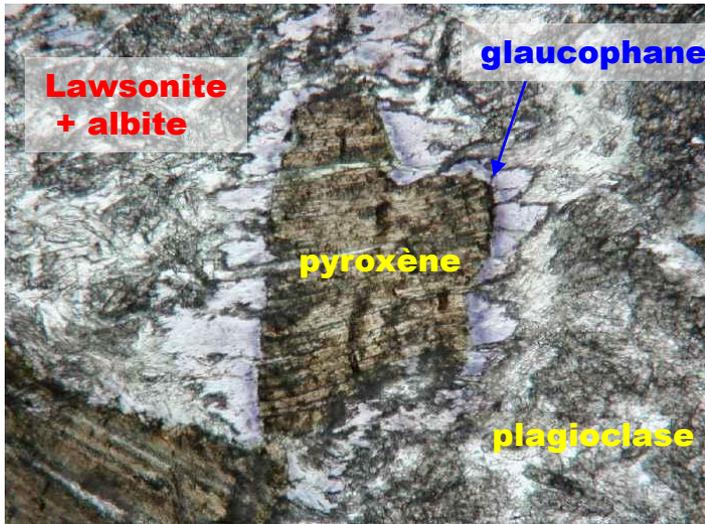
- sédiments
- gabbros
- basaltes
- péridotites serpentinisées



**Fragments de lithosphère océanique
emballés dans des sédiments le tout
métamorphisé dans les conditions P-T
du faciès des schistes bleus**

Conditions métamorphiques et transformations minéralogiques

Assemblage minéralogique dans un métagabbro



Réactions :

- 1- $\text{cpx} + \text{pl} + \text{H}_2\text{O} = \text{glaucophane}$
- 2- $\text{pl (magmatique)} = \text{lawsonite} + \text{albite}$

PARAGENESE à
gl+lws+alb

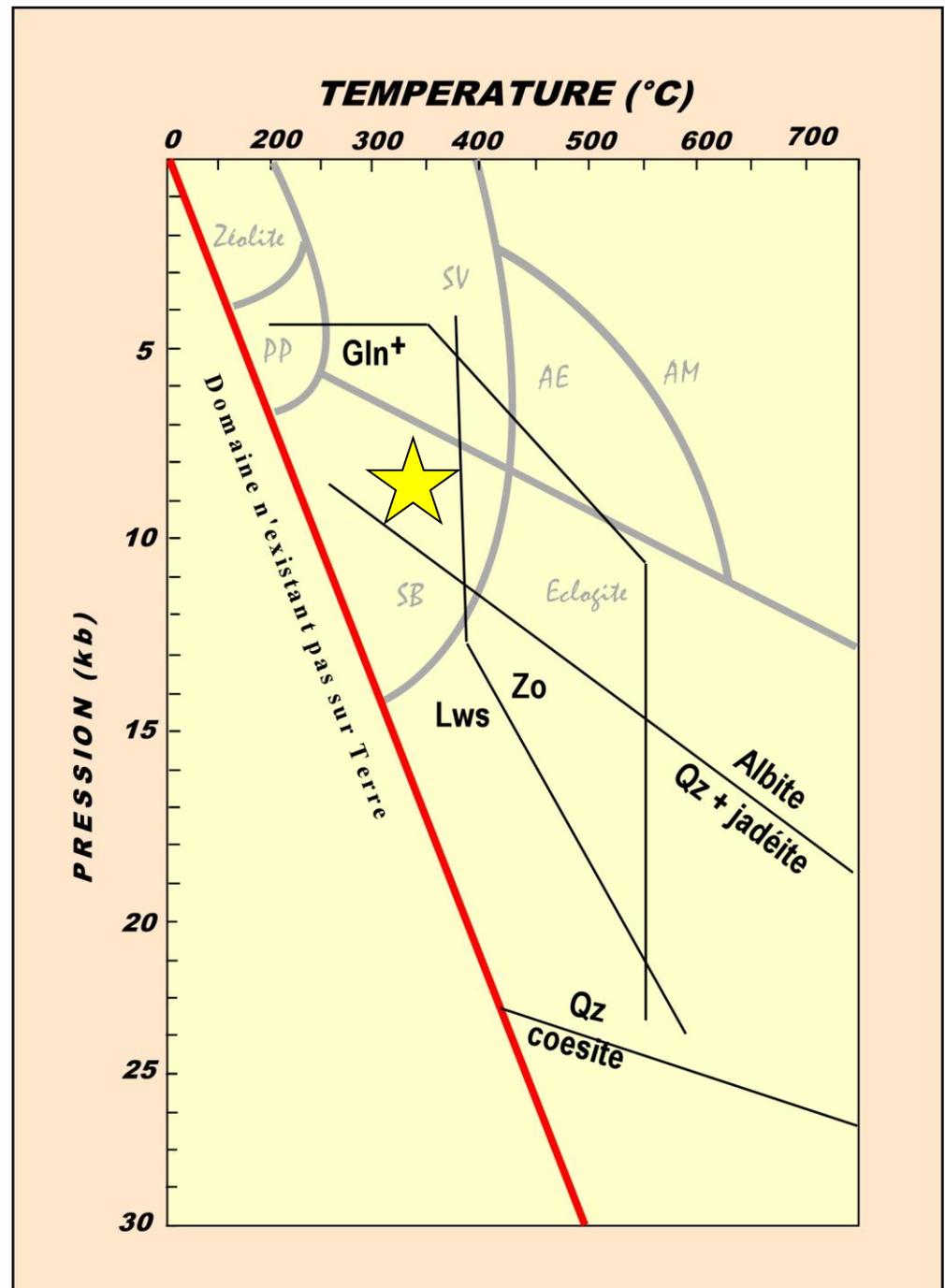
**Estimation des conditions
Pression - Température**
(utilisation grilles pétrogénétiques)

PARAGENESE à
gl+lws+alb

**faciès des
SCHISTES BLEUS
de Basse-Température**
P = 9 à 11 kbars
T = 250 à 350°C

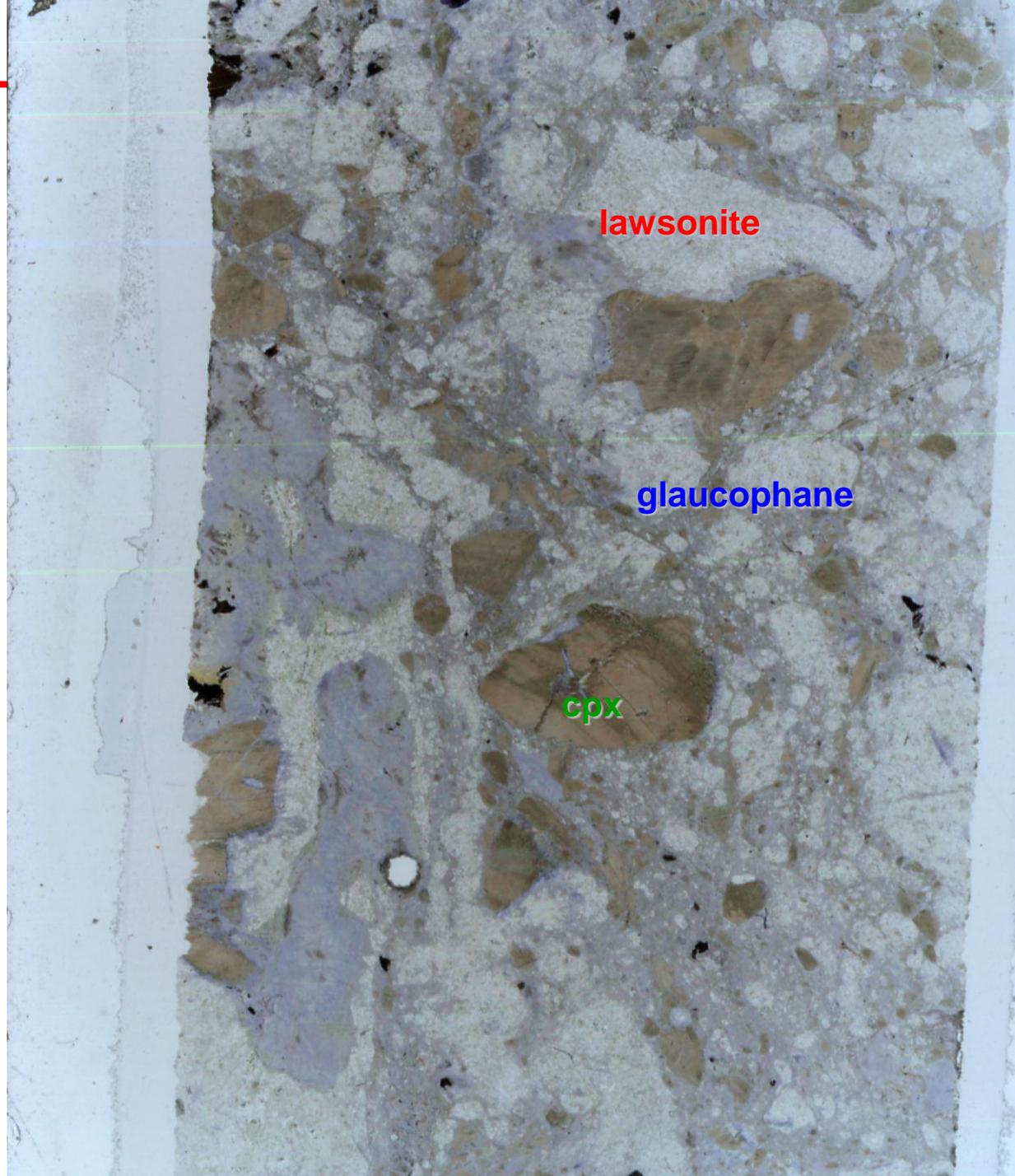
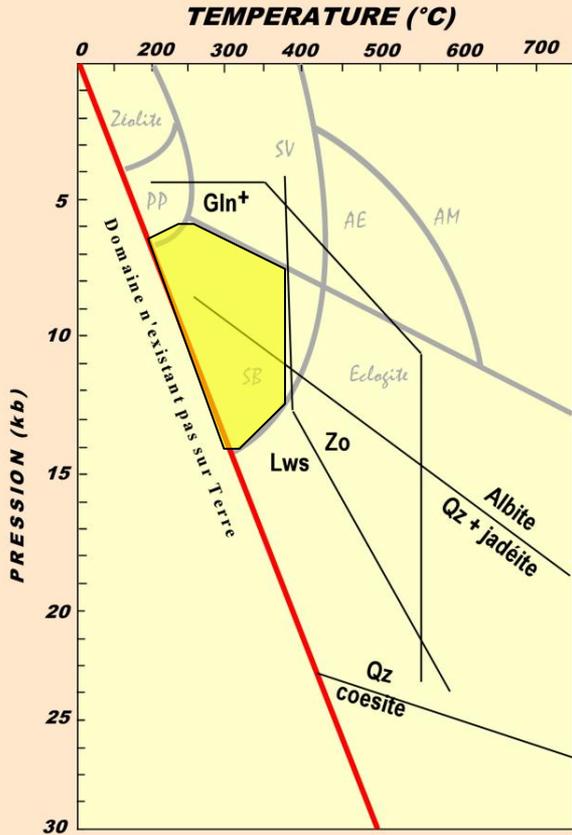
**Caractérise les conditions
P-T des Schistes lustrés**

**témoins de la disparition de
la croûte océanique par
subduction**



Dans les métagabbros
du domaine SB (schistes
lustrés) observation
de différents assemblages

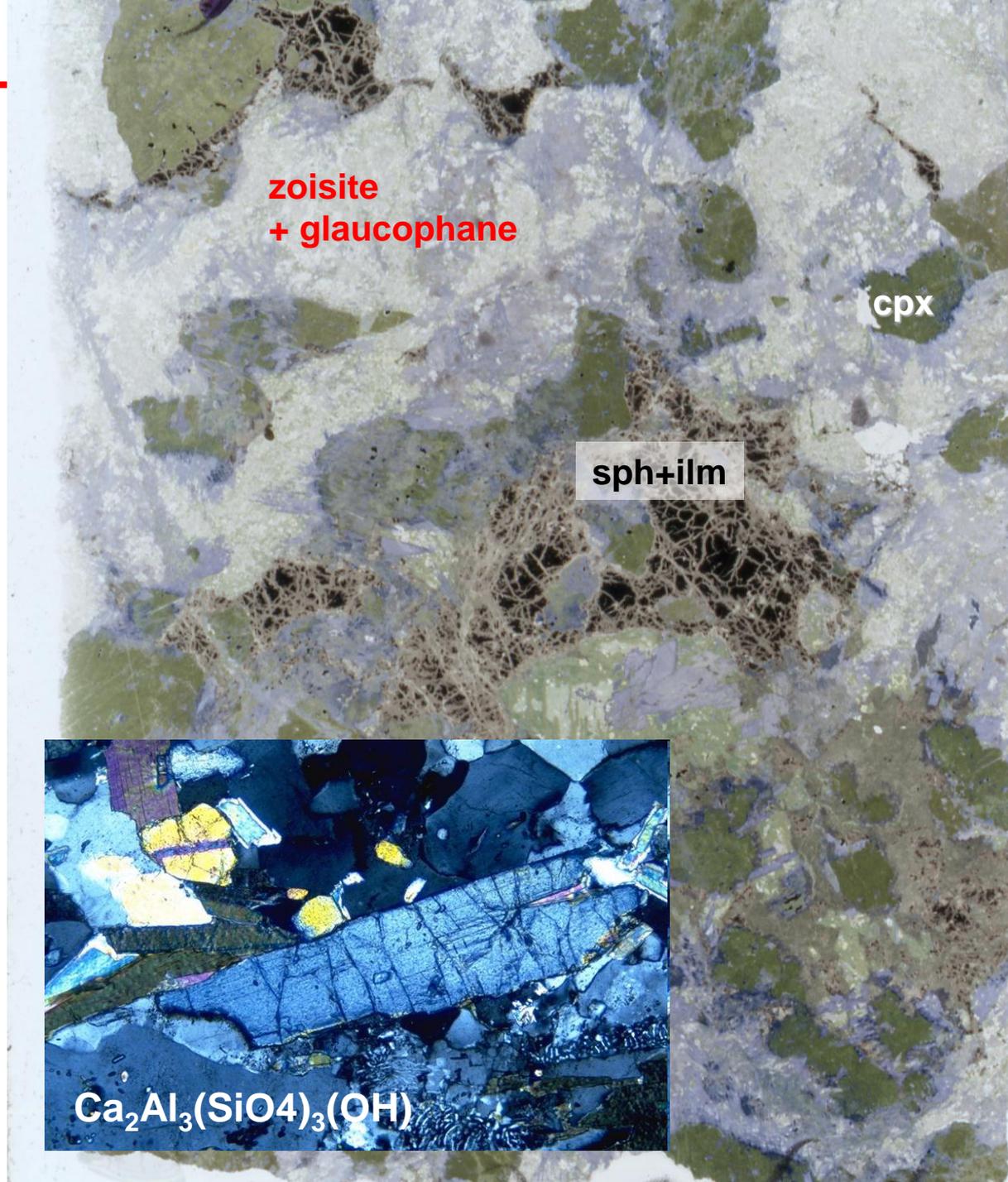
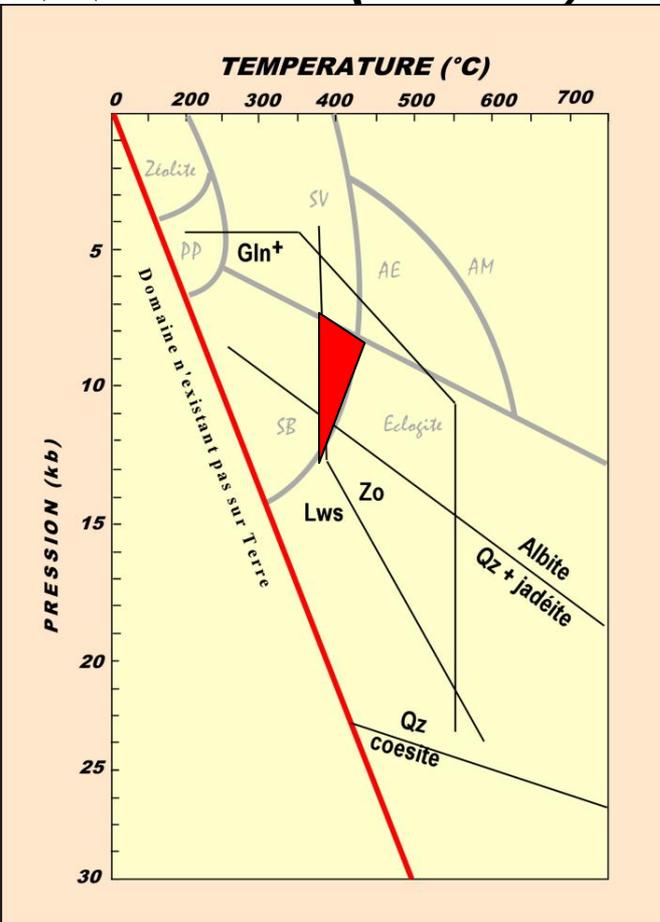
★ **Lws-Gln (Jd / Ab)**



Dans les métagabbros
des Schistes lustrés
observation de différents
assemblages métamorphiques

★ **Lws-Gln (Jd / Ab)**

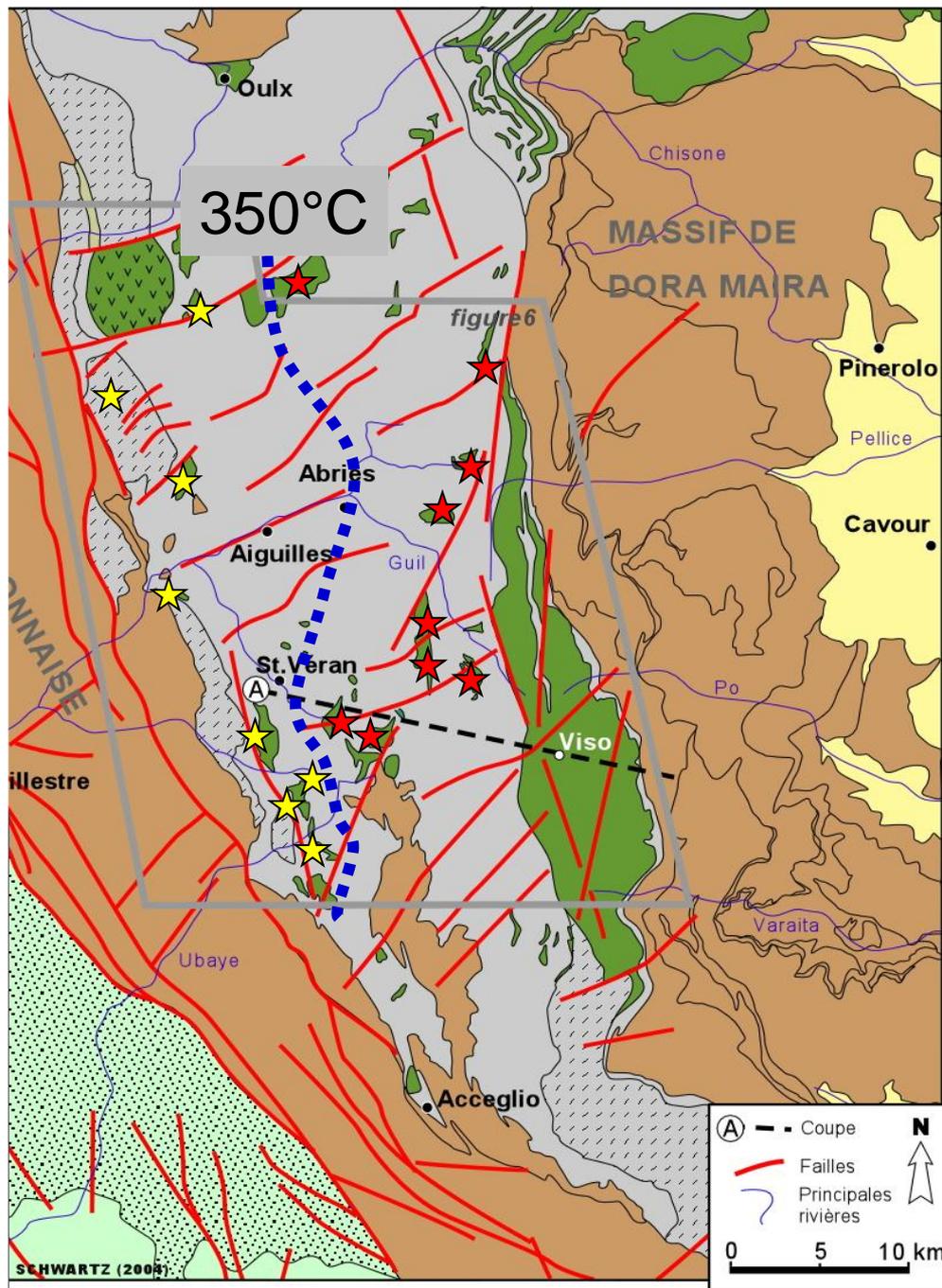
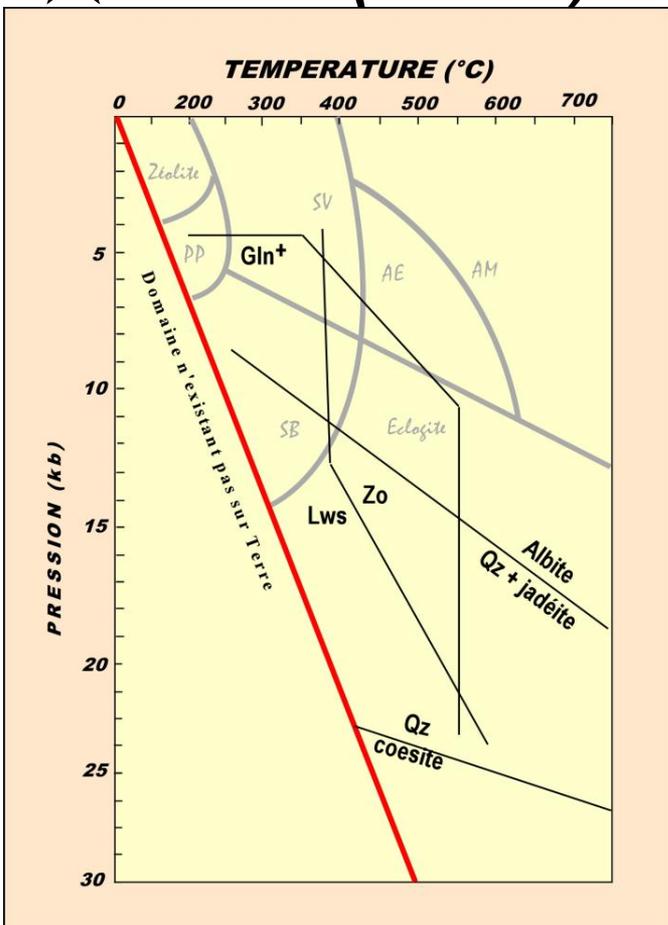
★ **Zo-Gln (Ab / Jd)**



Dans les métagabbros
des Schistes lustrés
observation de différents
assemblages métamorphiques

★ **Lws-Gln (Jd / Ab)**

★ **Zo-Gln (Ab / Jd)**



Évolution chimique des pyroxènes magmatiques au cours du métamorphisme....



unités à Lws-Jd-Gln ($T < 350^{\circ}\text{C}$)

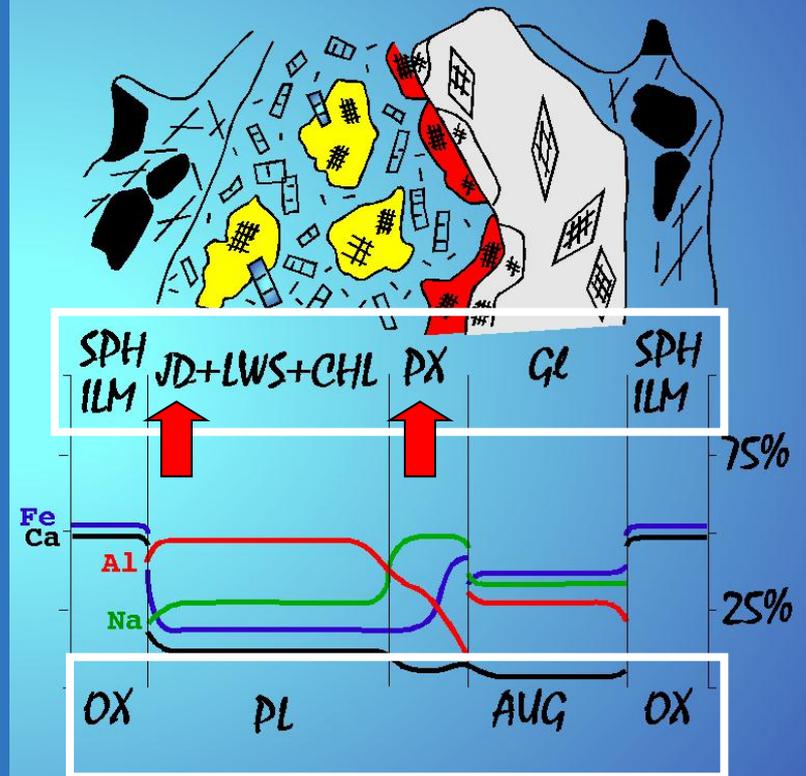
minéraux métamorphiques

observation de 2 pyroxènes

→ dans ancien site du Pl

→ dans ancien site de Aug

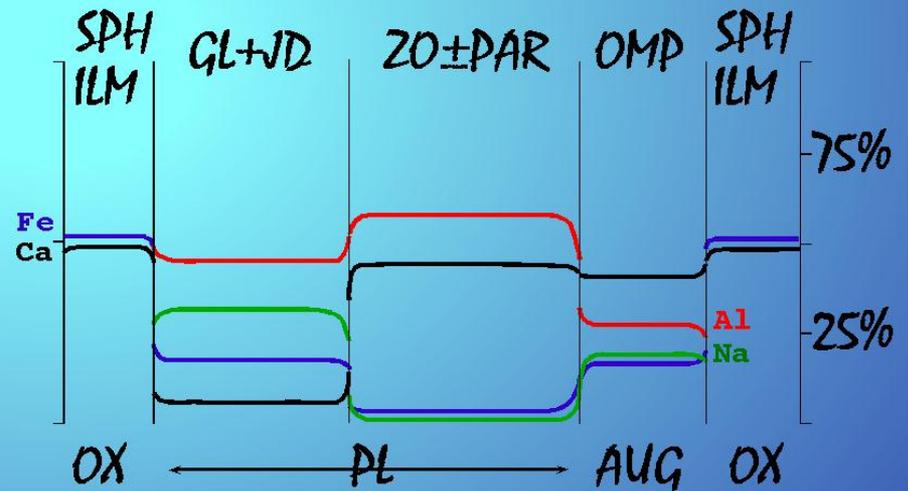
Variation de la composition en Al, Fe, Ca et Na à travers les domaines microstructuraux anté-alpins (Pognante et Kienast, 1986).



sites microstructuraux anté-alpins

unités à Zo-Jd-Gln ($T > 350^{\circ}\text{C}$)

Variation de la composition en Al, Fe, Ca et Na à travers les domaines microstructuraux anté-alpins



1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

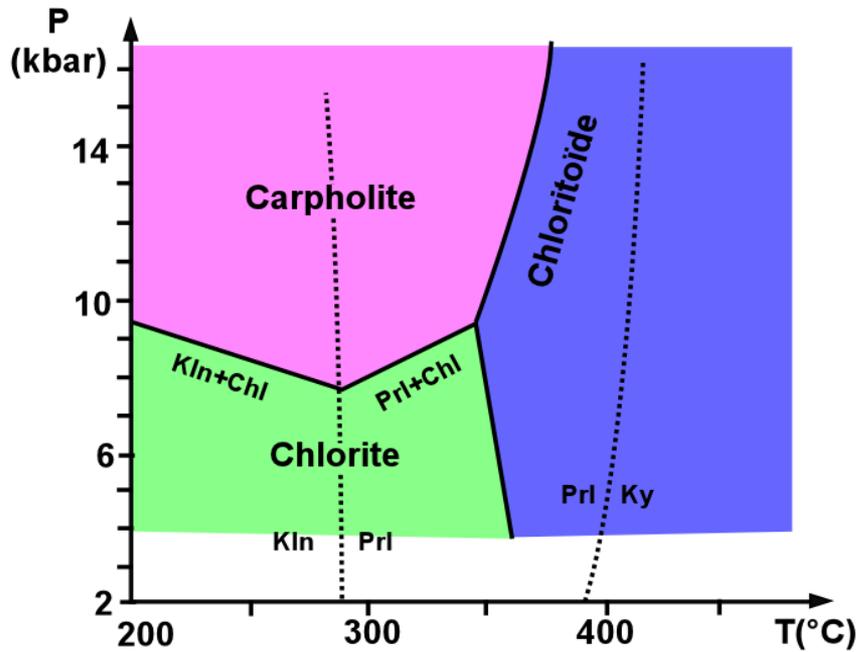
1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites

1.2. Quantification dans les unités SB à forte composante sédimentaire (Schistes lustrés)

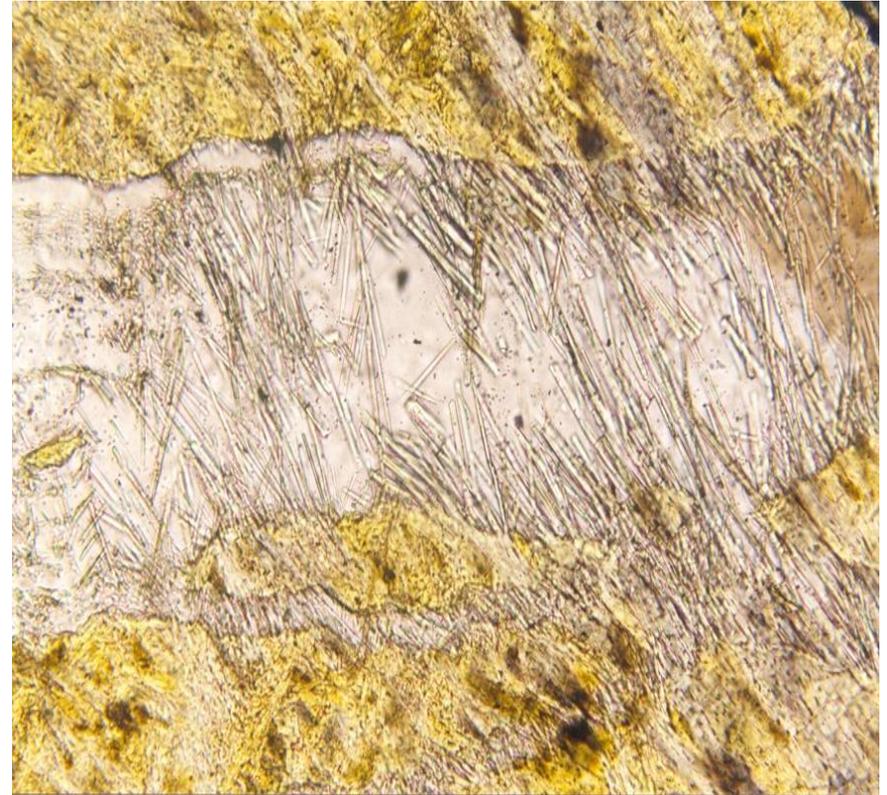
➡ roches basiques (métabasites)

➡ roches sédimentaires (méta pélites)

Apparition de minéraux index dans les métapelites

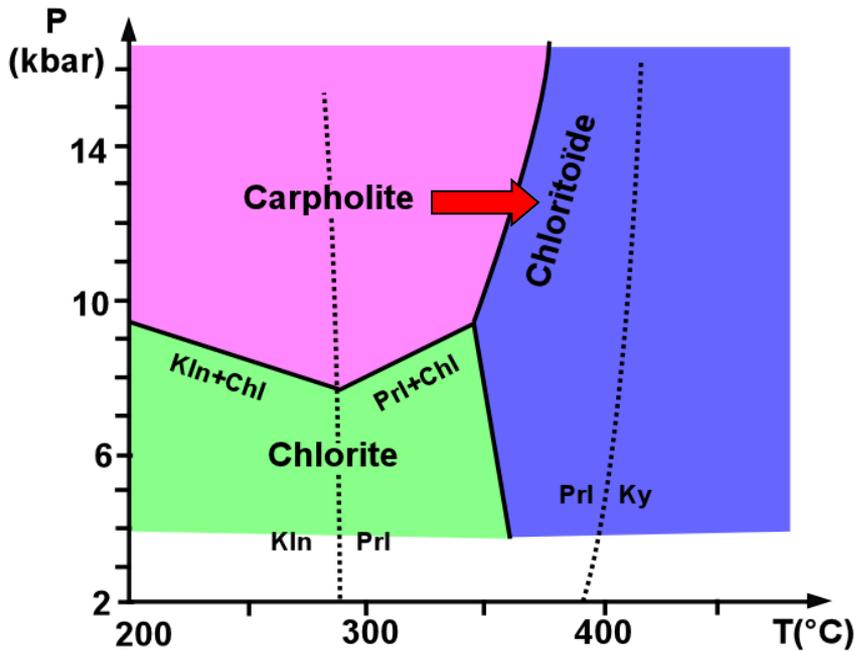


Domaine de stabilité de la carpholite dans le système FMASH (Vidal et al., 1994)
Kln-Kaolinite, Prl-Pyrophyllite

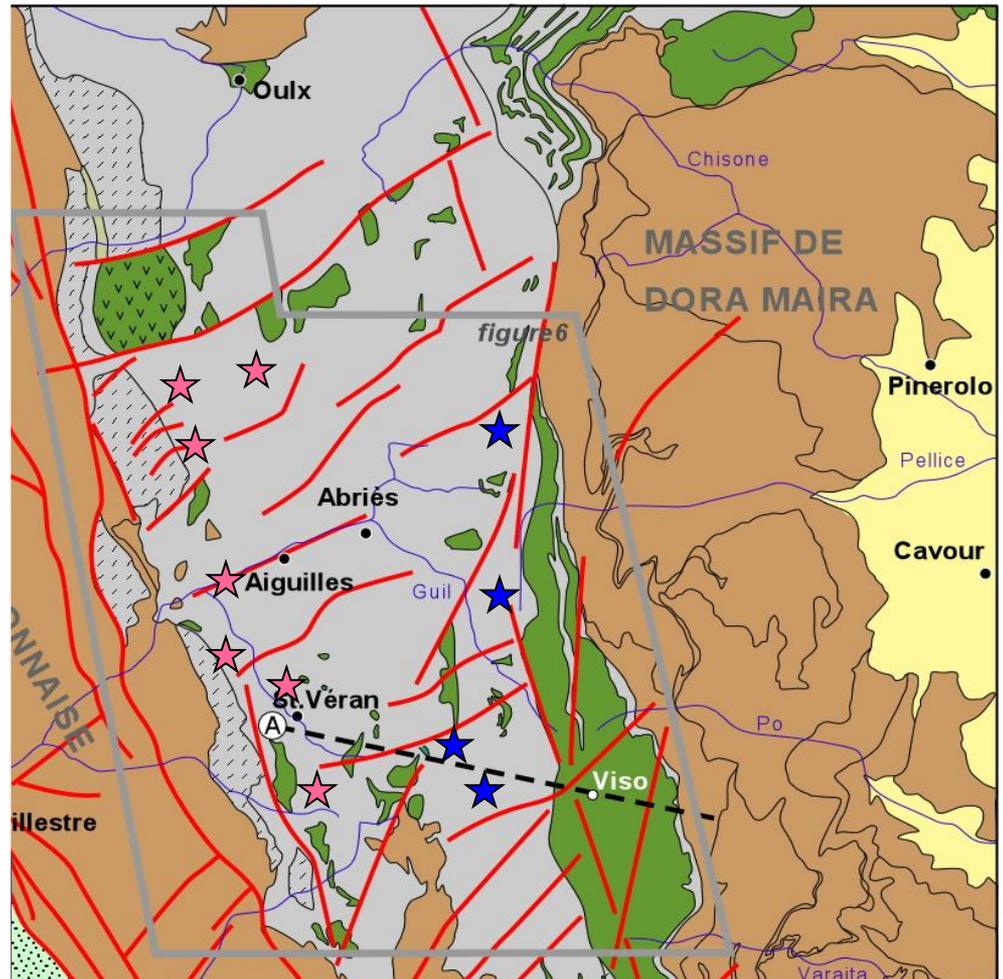


carpholite
 $(\text{Mn-Fe})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$

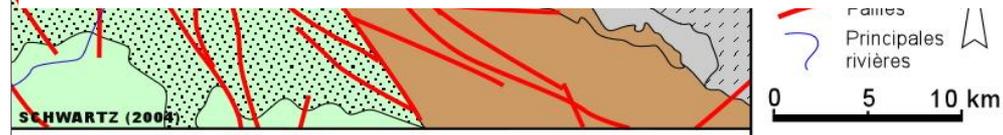
Apparition de minéraux index dans les métapélites



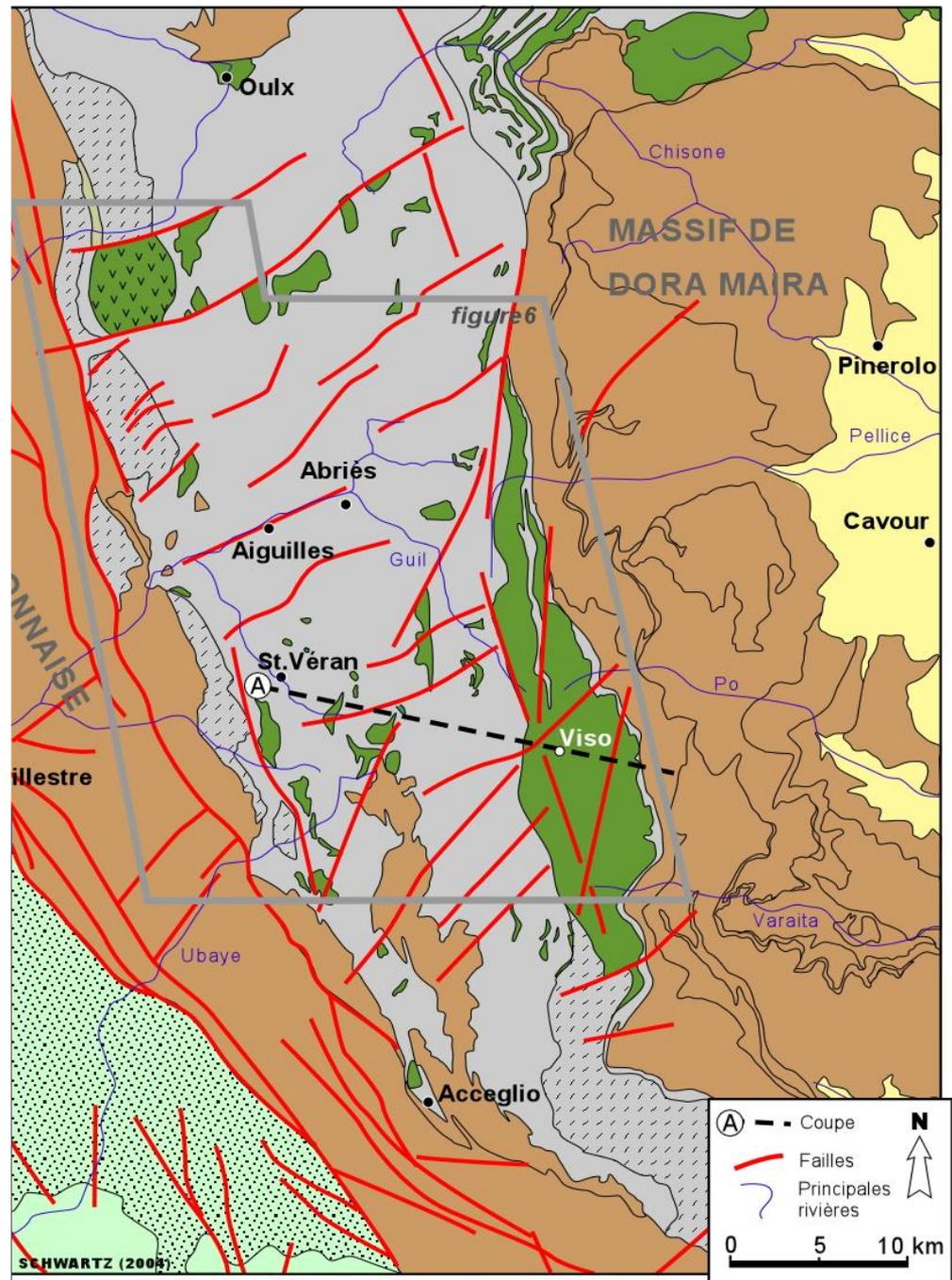
Domaine de stabilité de la carpholite dans le système FMASH (Vidal et al., 1994)
 Kln-Kaolinite, Prl-Pyrophyllite



passage carpholite / chloritoïde traduit une augmentation de la T° d'ouest en est.



combinaison métabasites / métpélites



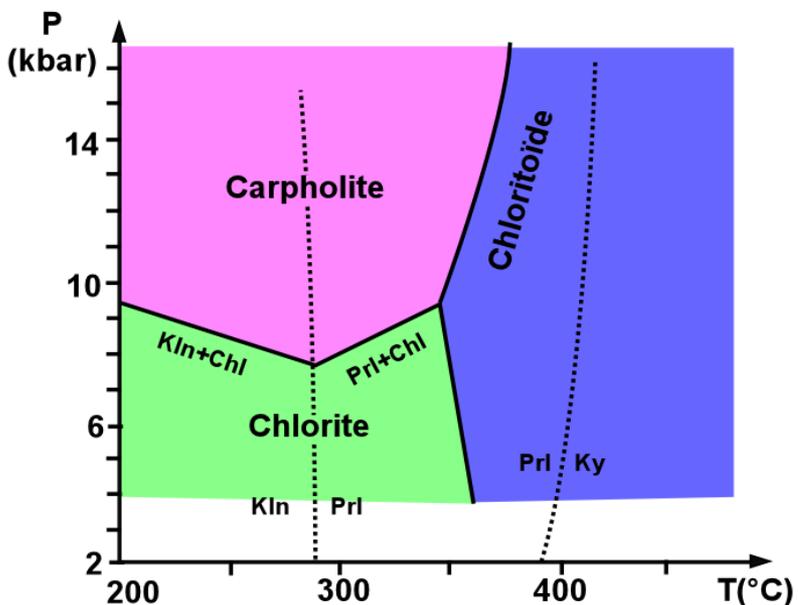
combinaison métabasites / métrapélites

Métagabbros

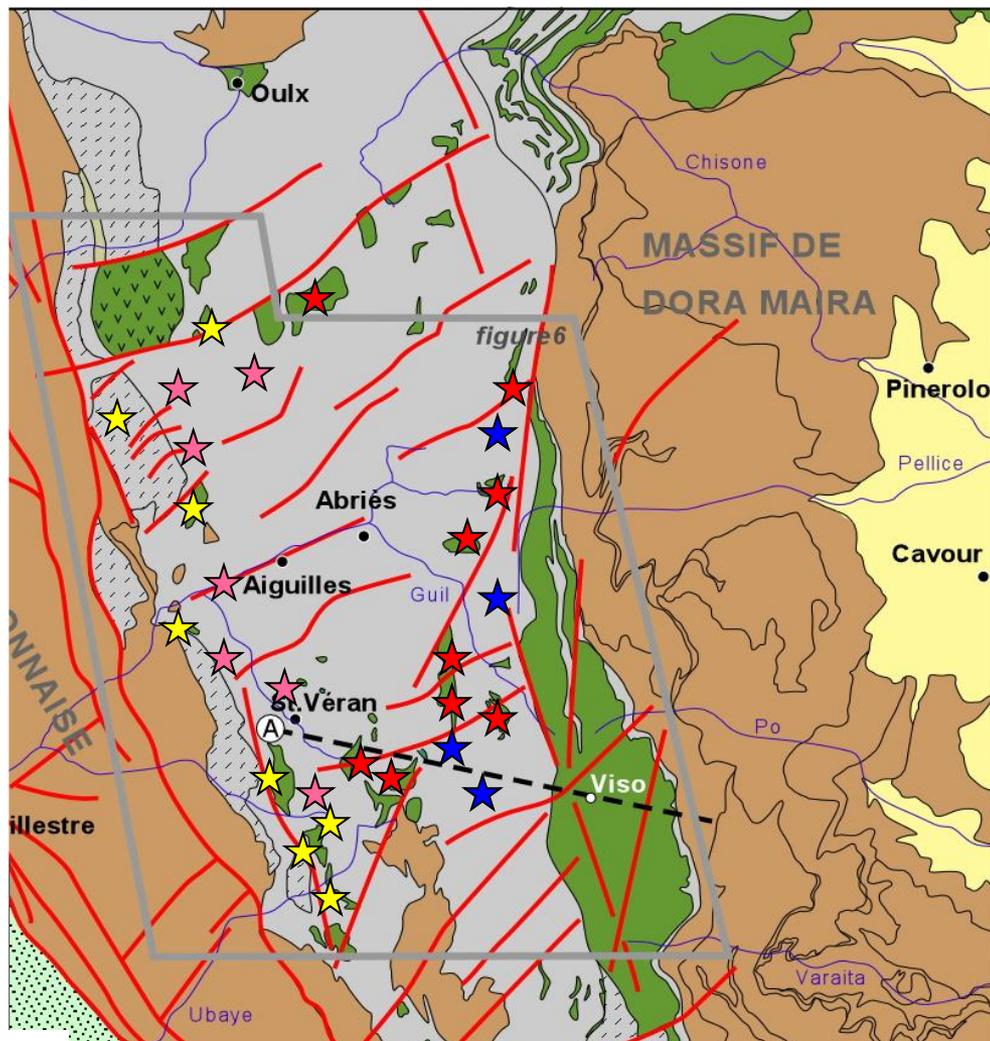
★ *Lws-Gln*

★ *Zo-Gln*

Métrapélites



informations P-T identiques dans les métasédiments que dans les métagabbros → **aug.** de la **T°** d'ouest en est.



**cela reste qualitatif (métrapélites)
comment peut-on quantifier ?**

Caractérisation de la matière carbonée par spectroscopie RAMAN

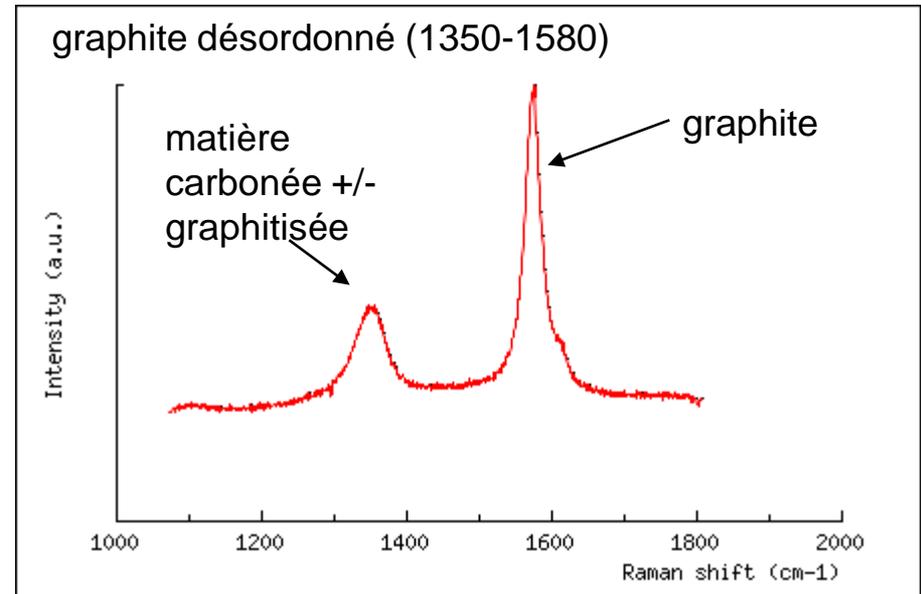
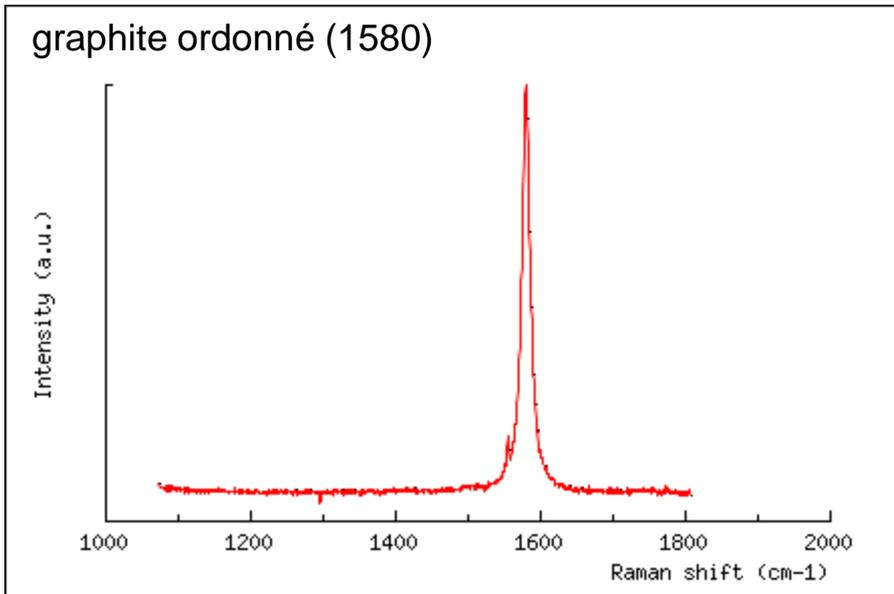
Principe :

Envoie une lumière monochromatique (laser) sur l'échantillon à analyser et l'on récupère la lumière réfléchiée...

L'énergie des photons incidents permet de modifier l'état de vibration du minéral...

La différence d'énergie entre l'énergie envoyée et celle récupérée correspond à une énergie de vibration.

Obtention de spectres :



Les raies Raman sont caractéristiques de la composition chimique du minéral et de sa structure cristalline.

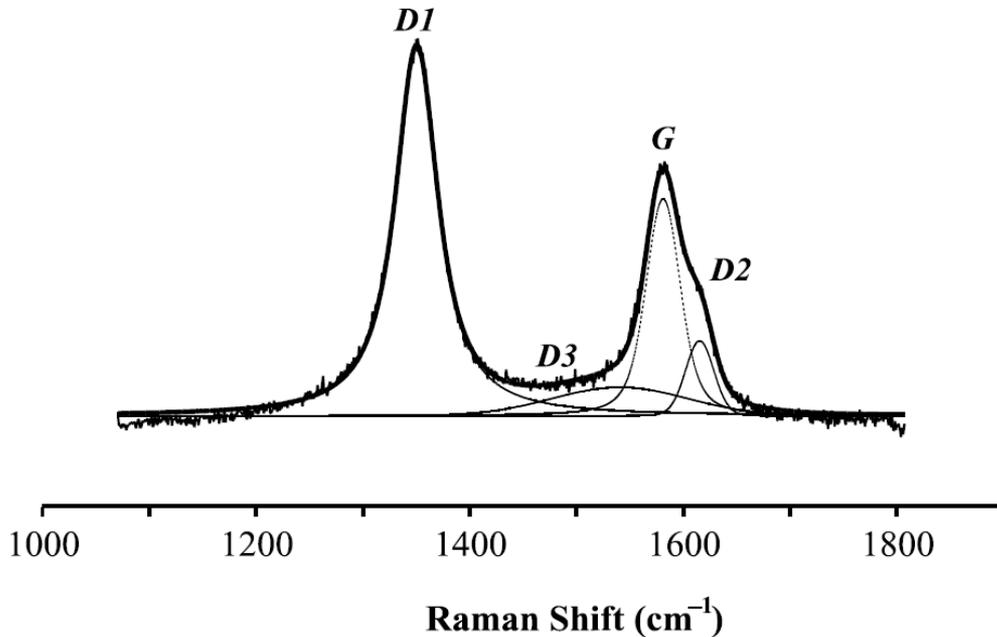
spectroscopie RAMAN

Processus de graphitisation de la matière carbonée est contrôlé par la température....

→ conséquences sur la forme du spectre...

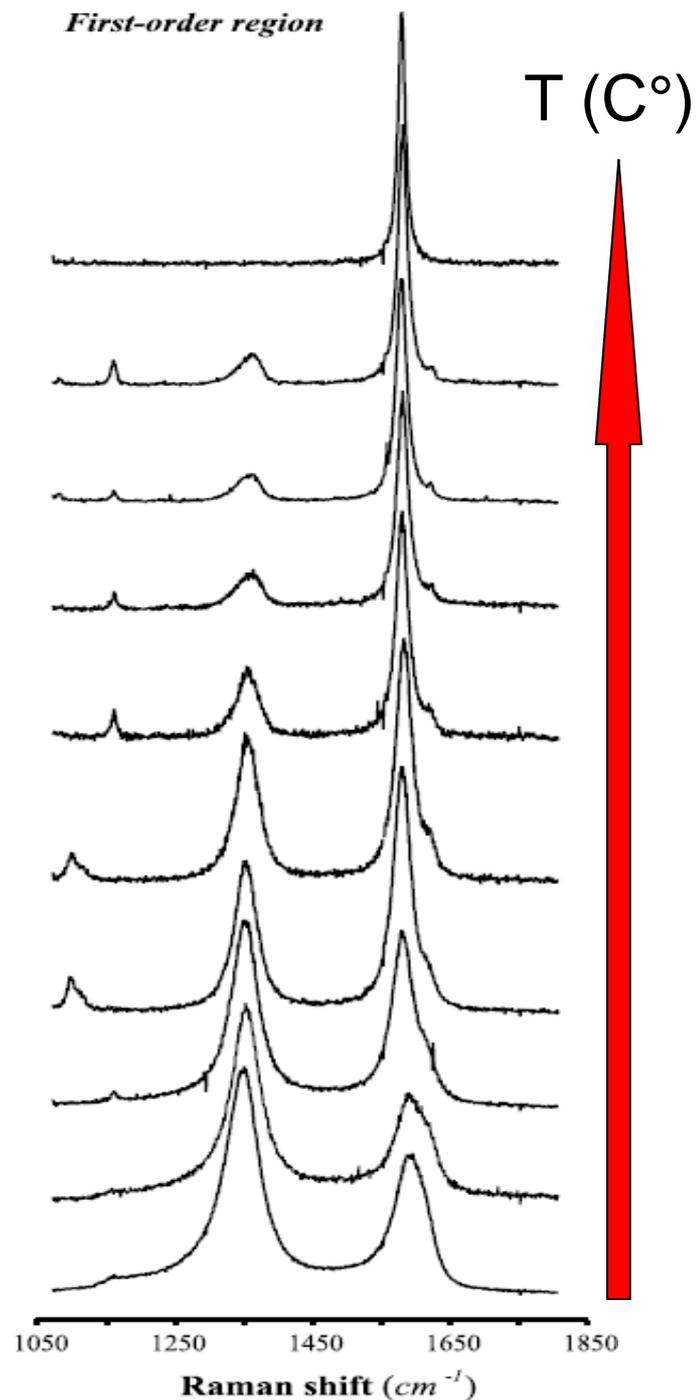
forme du spectre = $f(T^\circ)$

la déconvolution du spectre permet de mettre en évidence différentes bandes...



- bandes D1, D2, D3 correspondent à de la matière carbonée
- bande G correspond au graphite

First-order region

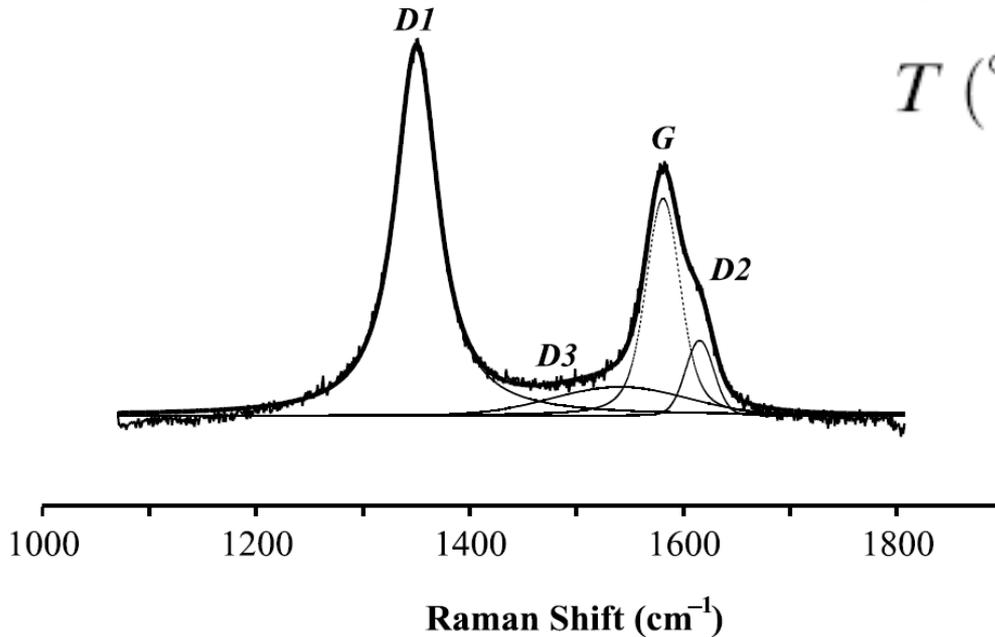


Thermomètre (Beyssac et al., 2002)

$$T (^{\circ}\text{C}) = -445R2 + 641$$

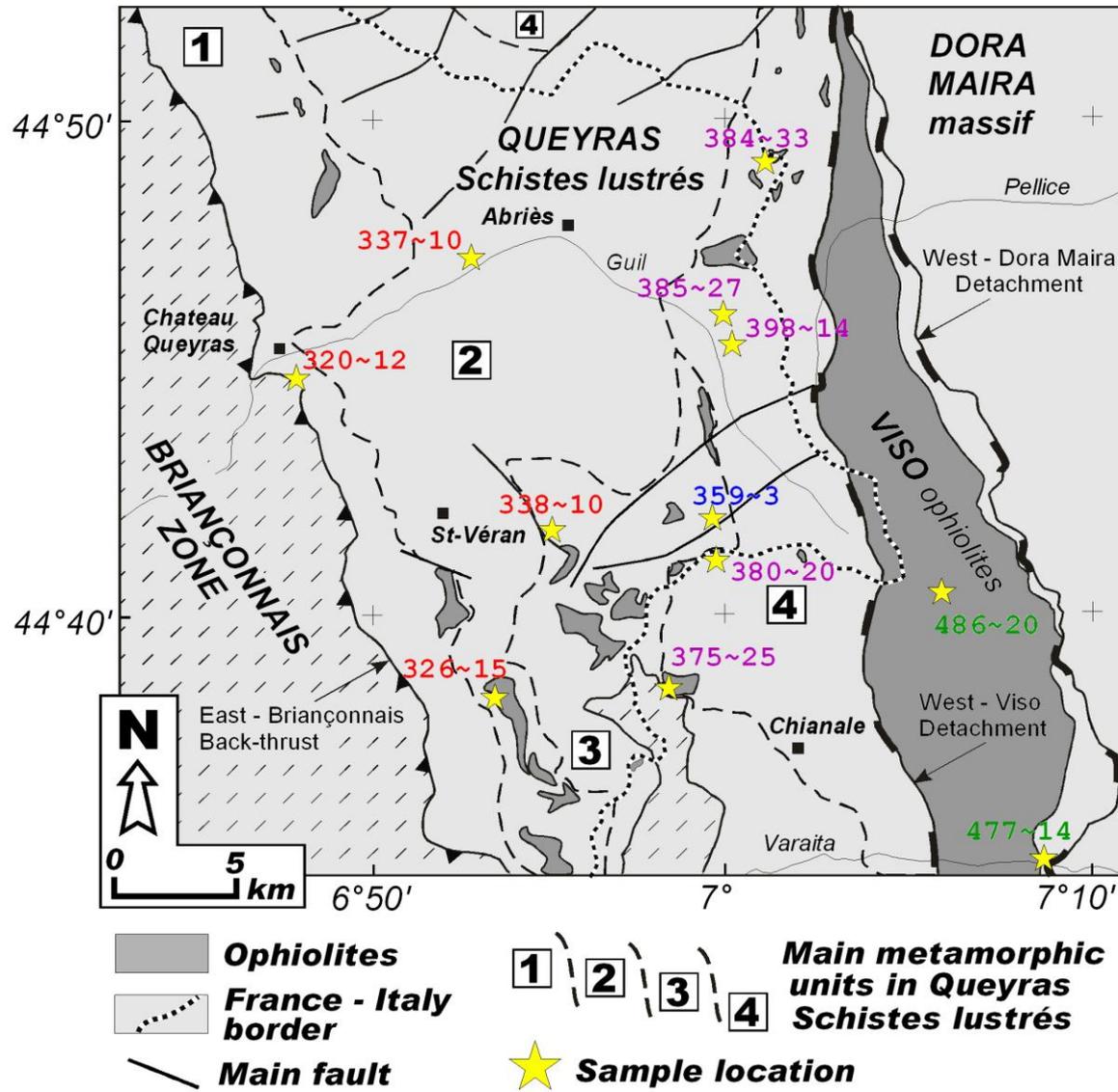
avec R2 qui est un rapport
surfaccique de bandes...

$$R2 = [D1/(G+D1+D2)]$$



Processus de graphitisation est **irréversible** (insensible aux processus de rétomorphoses)...

Thermomètre donne la température maximale de l'évènement métamorphique...



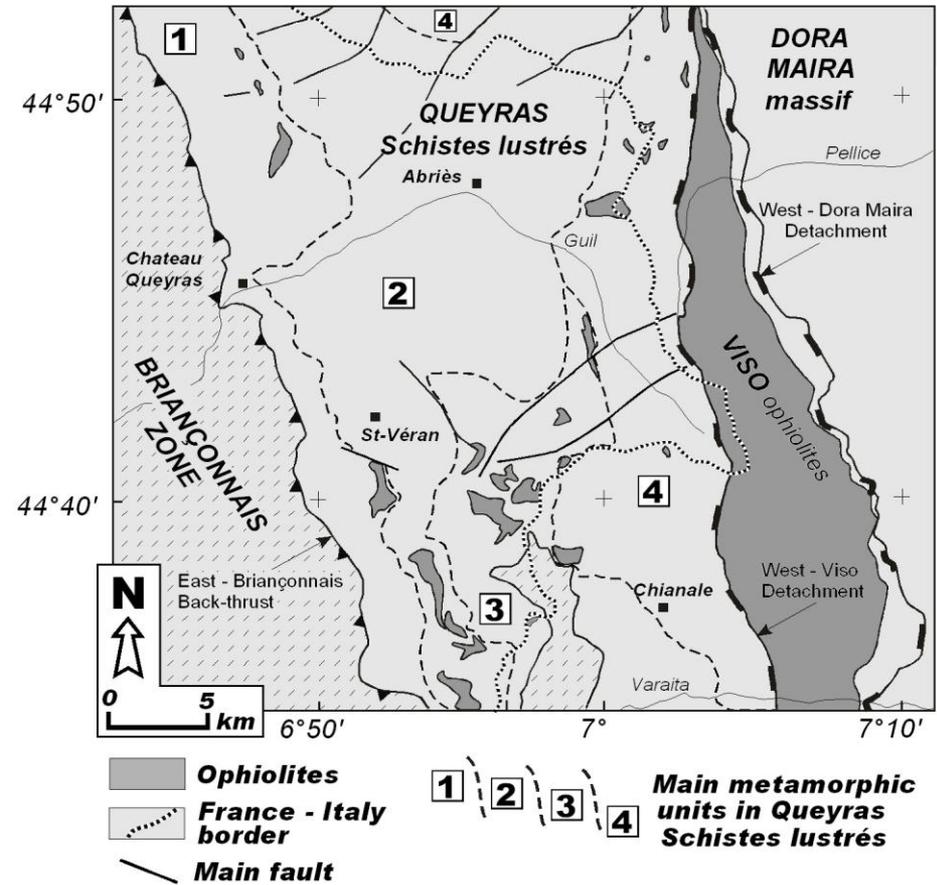
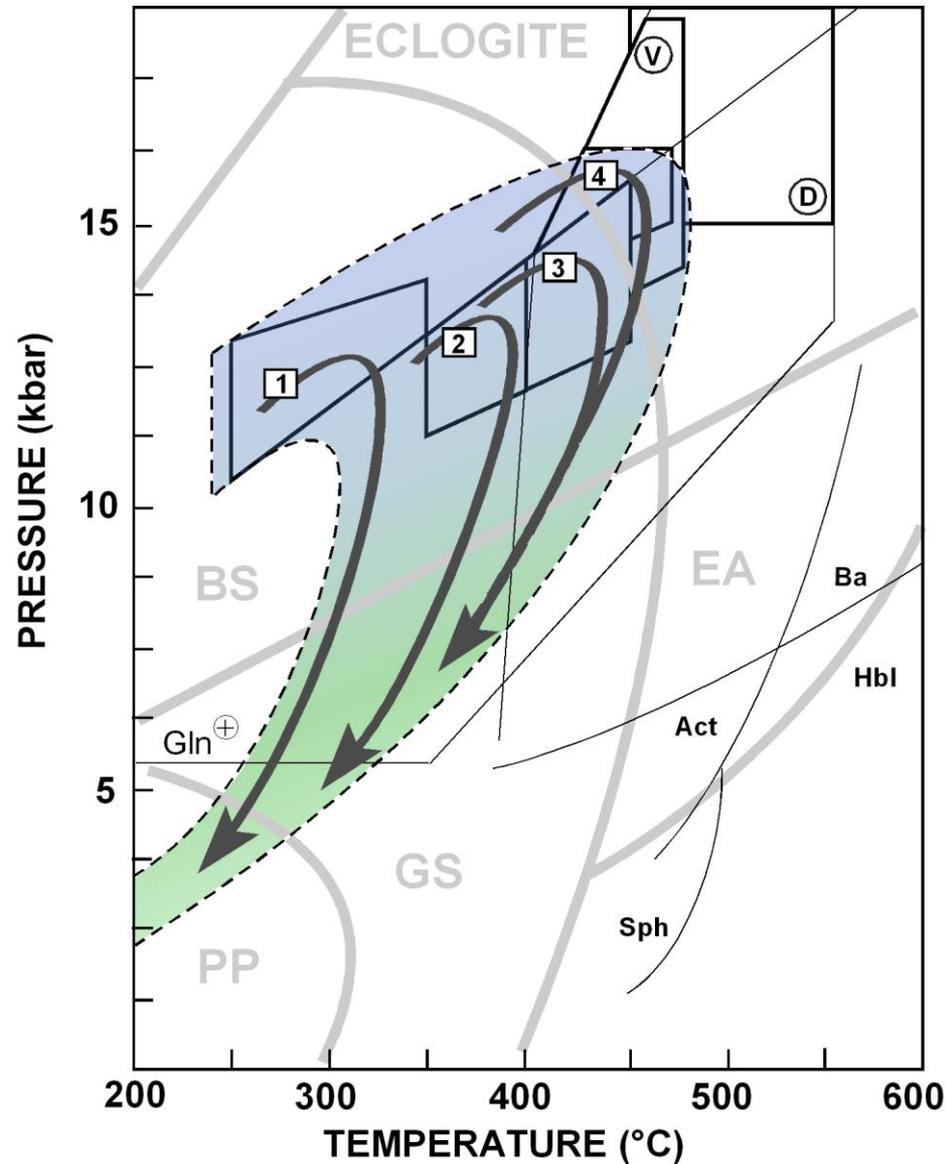
Unité 2
Lws-Ab-Gln
 $T < 350^{\circ}\text{C}$

Unité 3
Zo-Ab-Gln
 $350-370^{\circ}\text{C}$

Unité 4
Zo-Jd-Gln
 $T > 370^{\circ}\text{C}$

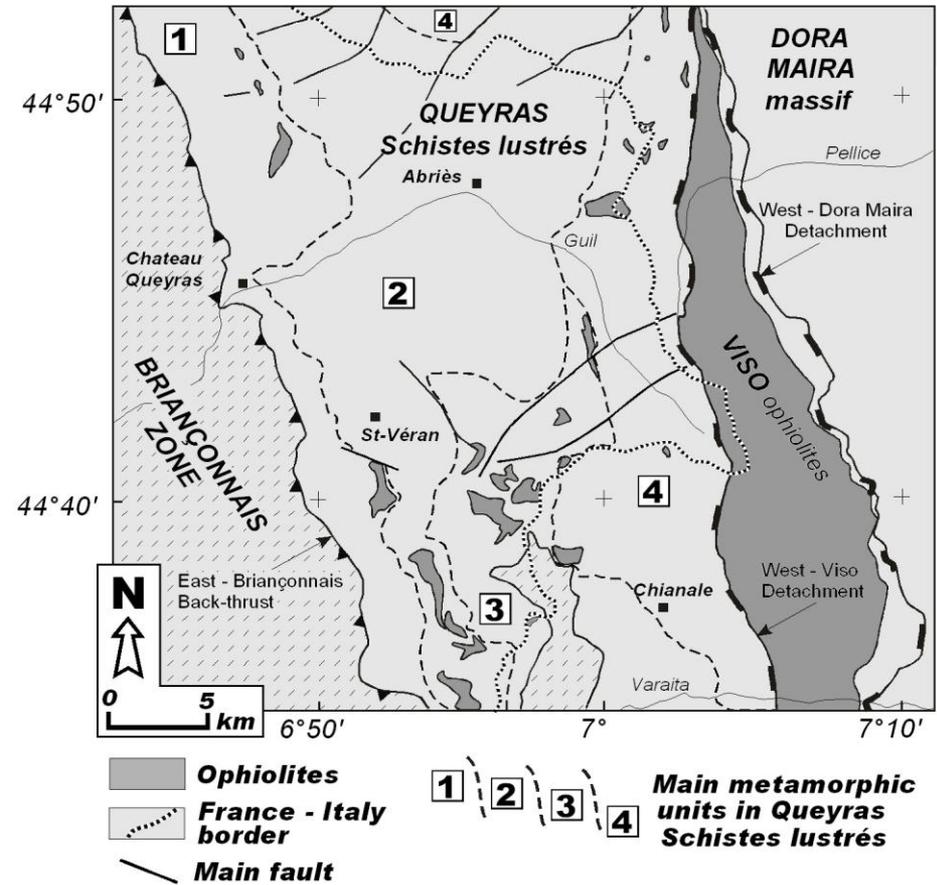
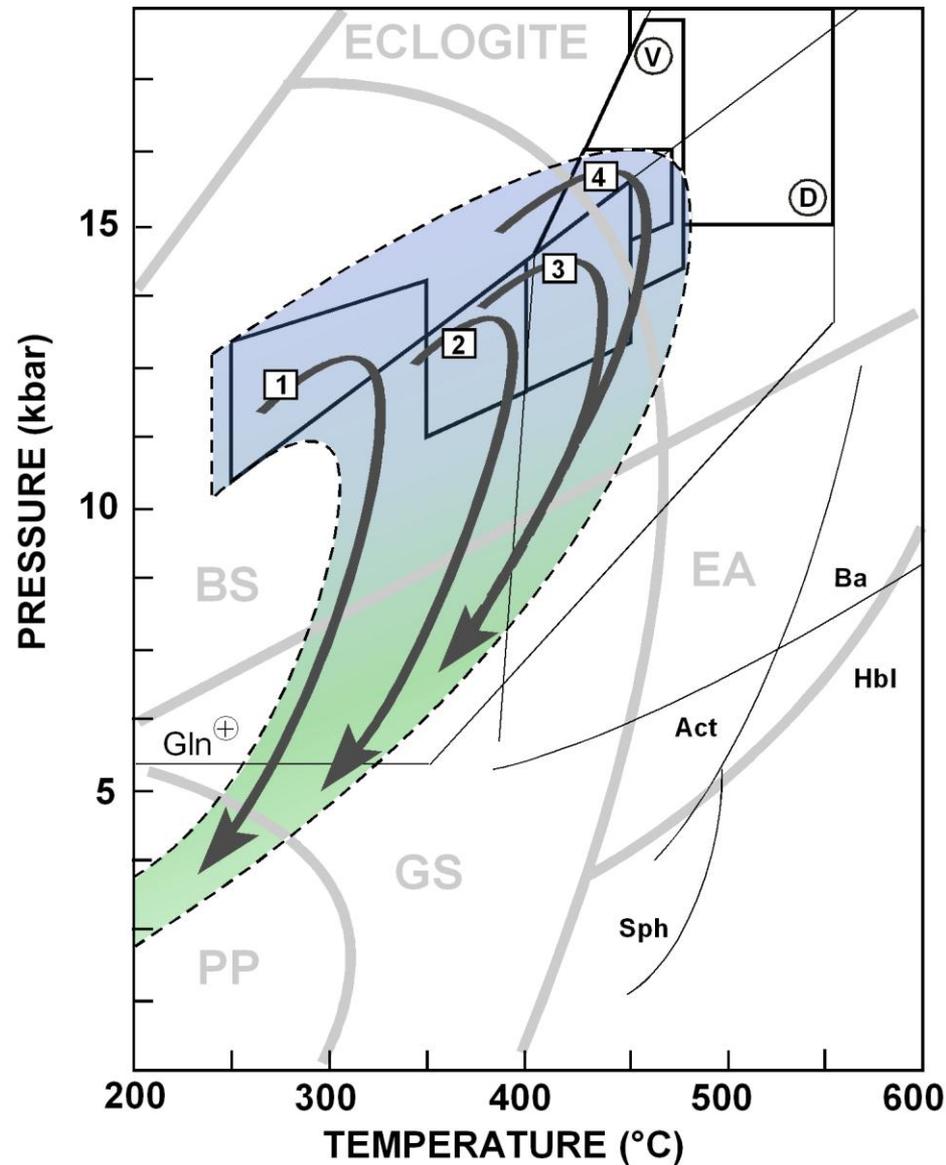
confirmation de l'augmentation de T° vers l'est et cohérence avec les données pétro-structurales...

Quantification des conditions P-T unités des Schistes lustrés

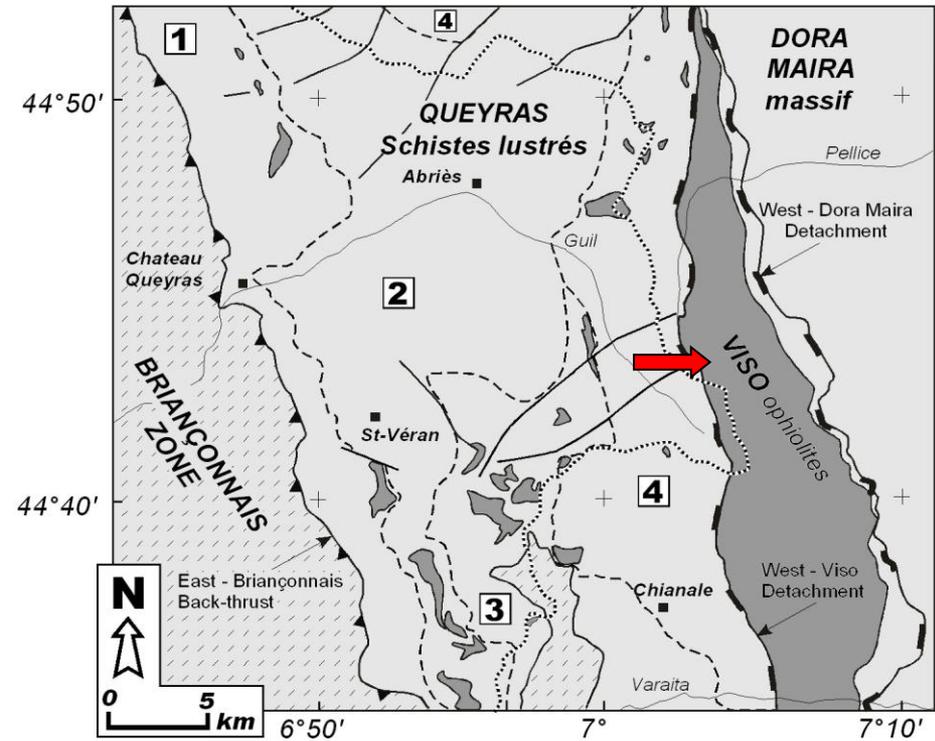
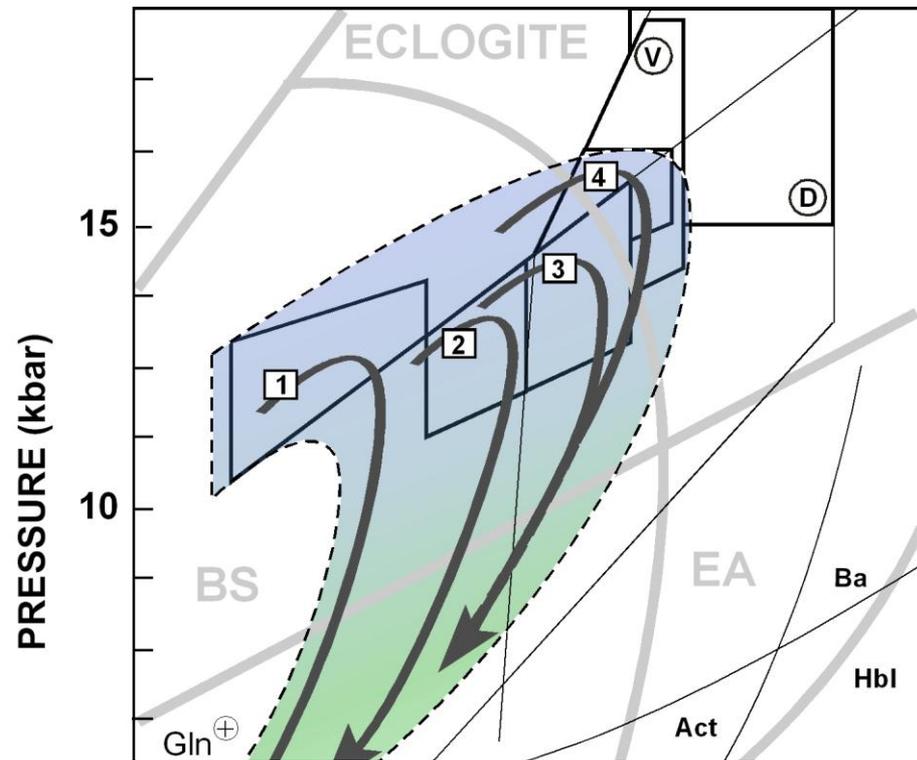


Evolution des conditions P-T depuis le faciès des SB de basse température à l'ouest jusqu'à la transition SB / éclogite à l'est

Combine l'ensemble des données P-T avec données litho-structurales et paléogéographiques



Permet de reconnaître
la juxtaposition de **4 unités**
métamorphiques Schistes Bleus...



Schistes lustrés → assemblage d'unités à forte composante sédimentaire et détritico-ophiolitique montrant une augmentation des conditions P-T d'ouest en est...

1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites

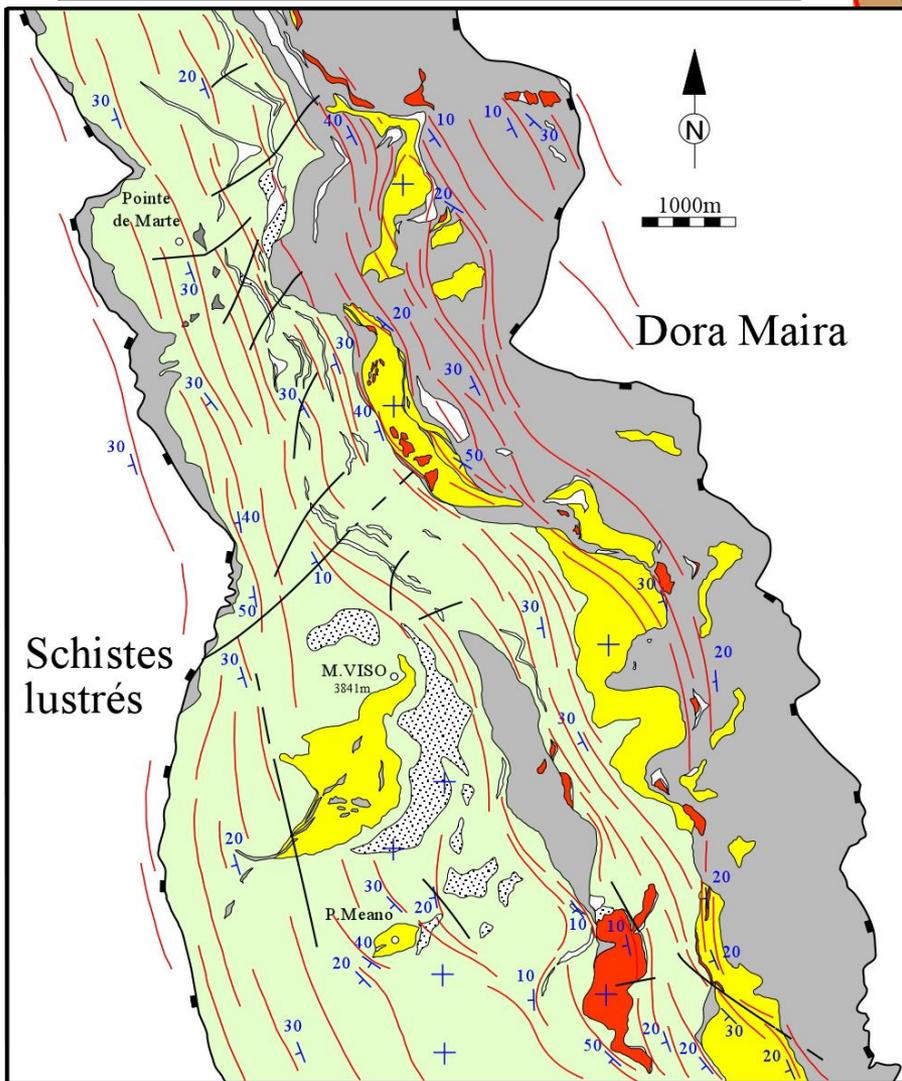
1.2. Quantification dans les unités SB à forte composante sédimentaire (Schistes lustrés)

1.3. Quantification dans les unités éclogitiques (Monviso)

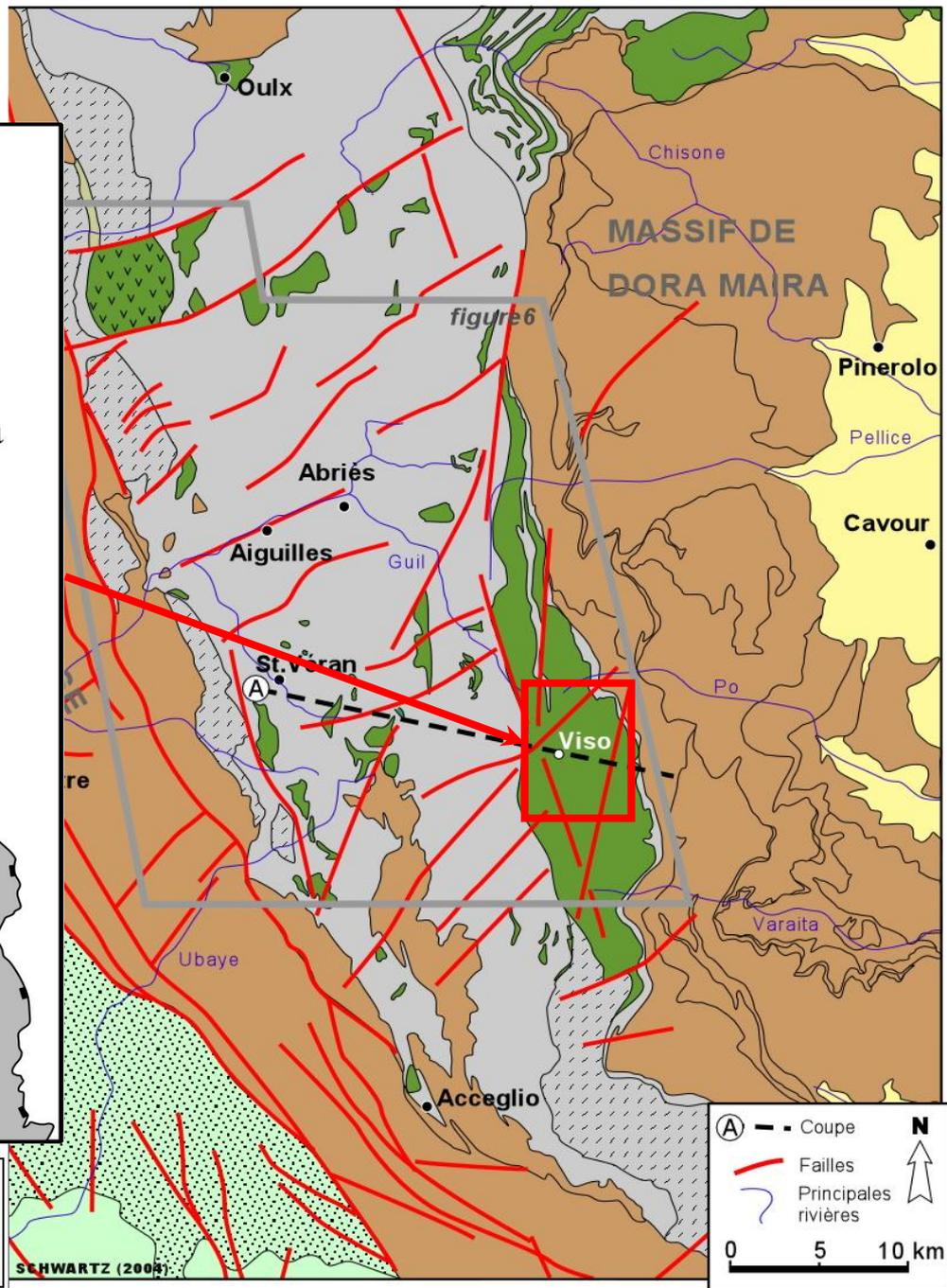
→ roches basiques (métabasites)



Carte géologique de la partie centrale du VISO



Peu de méta-sédiments par rapport aux méta-ophiolites



Carte géologique de la partie centrale du VISO

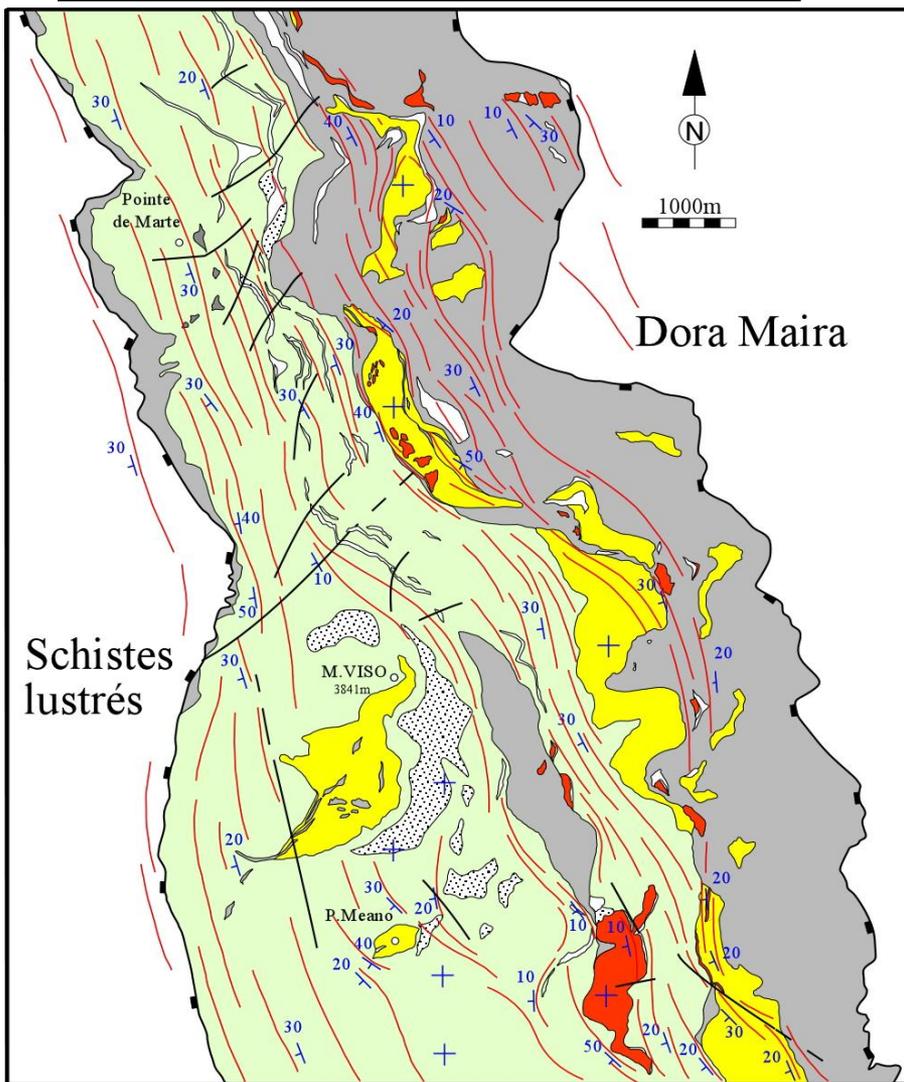
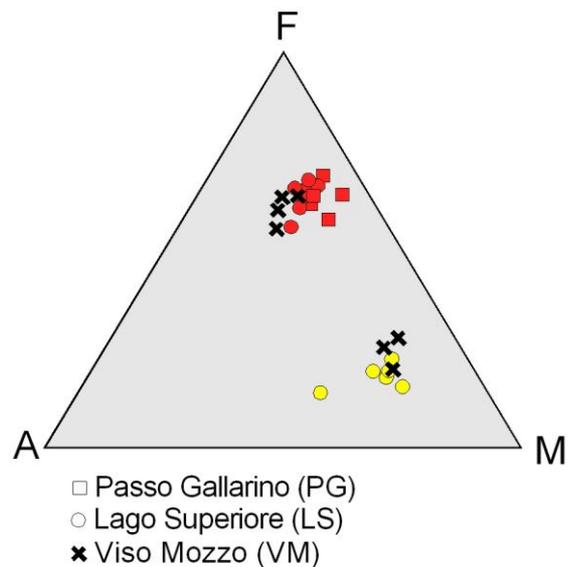
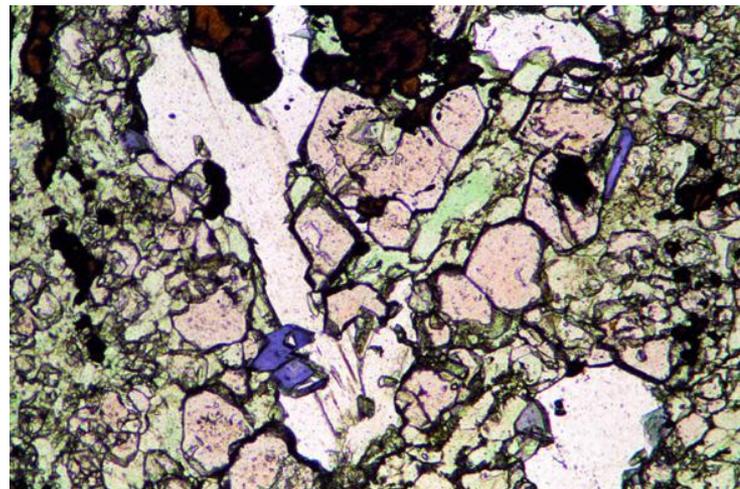


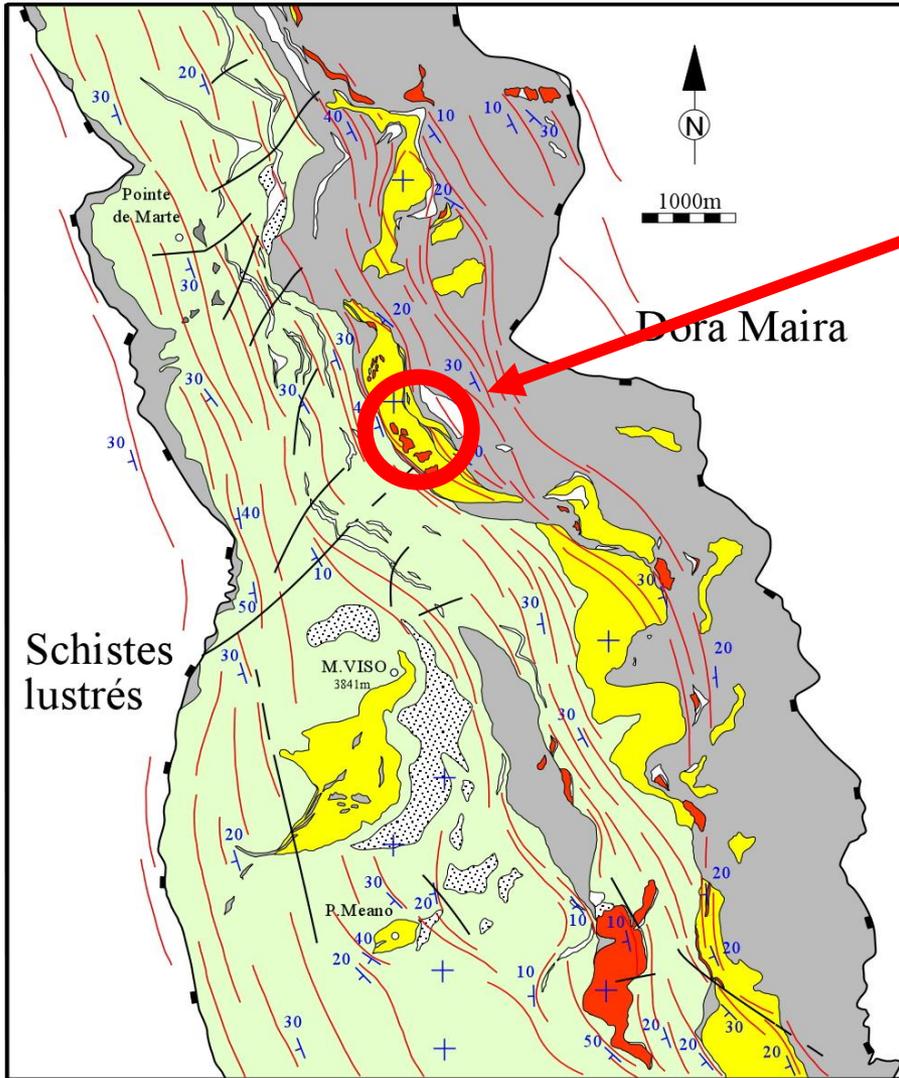
Diagramme AFM des méta-gabbros du Monviso



➔ Association des 2 types de chimies dans une même unité



Peu de méta-sédiments par rapport aux méta-ophiolites

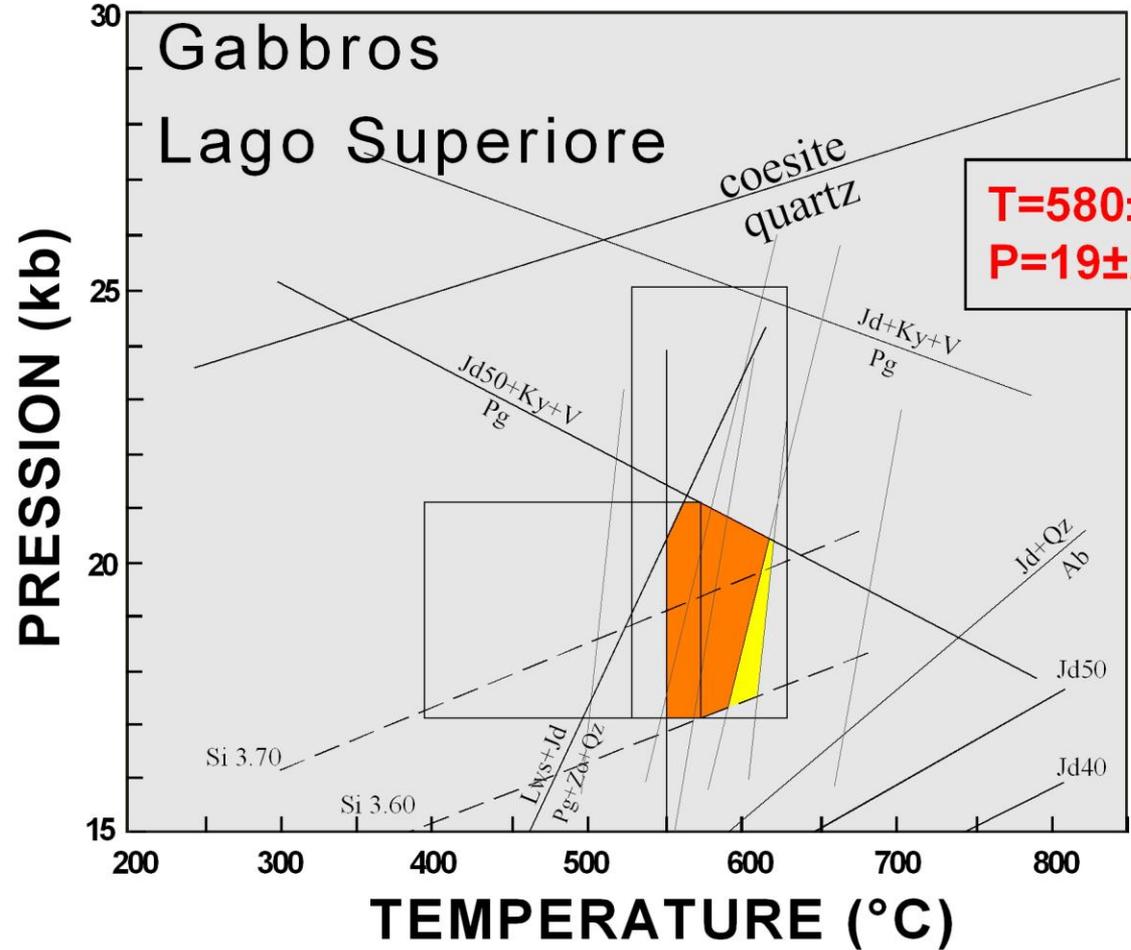
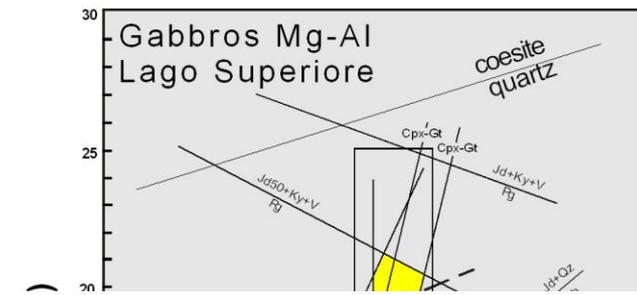
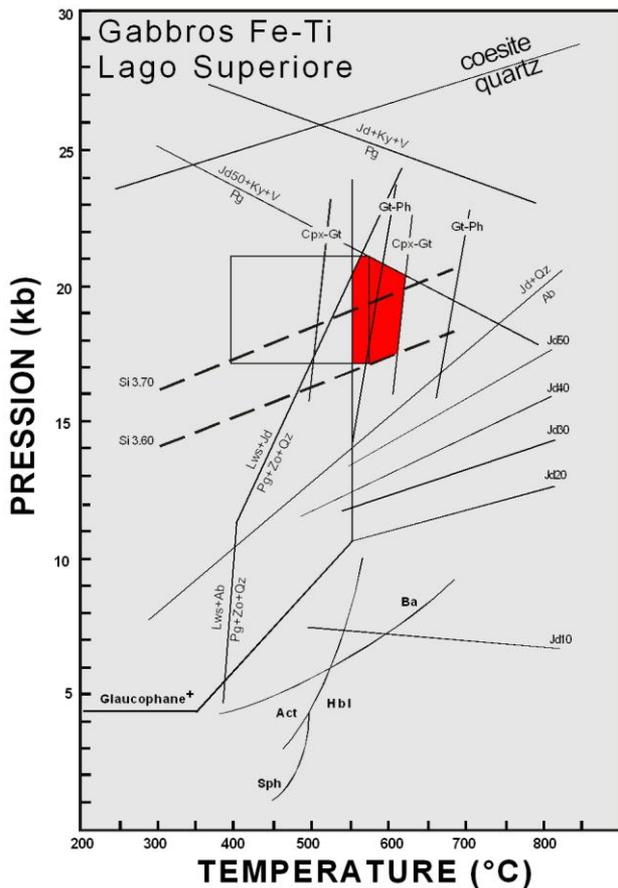


unité du **Lago Superiore**

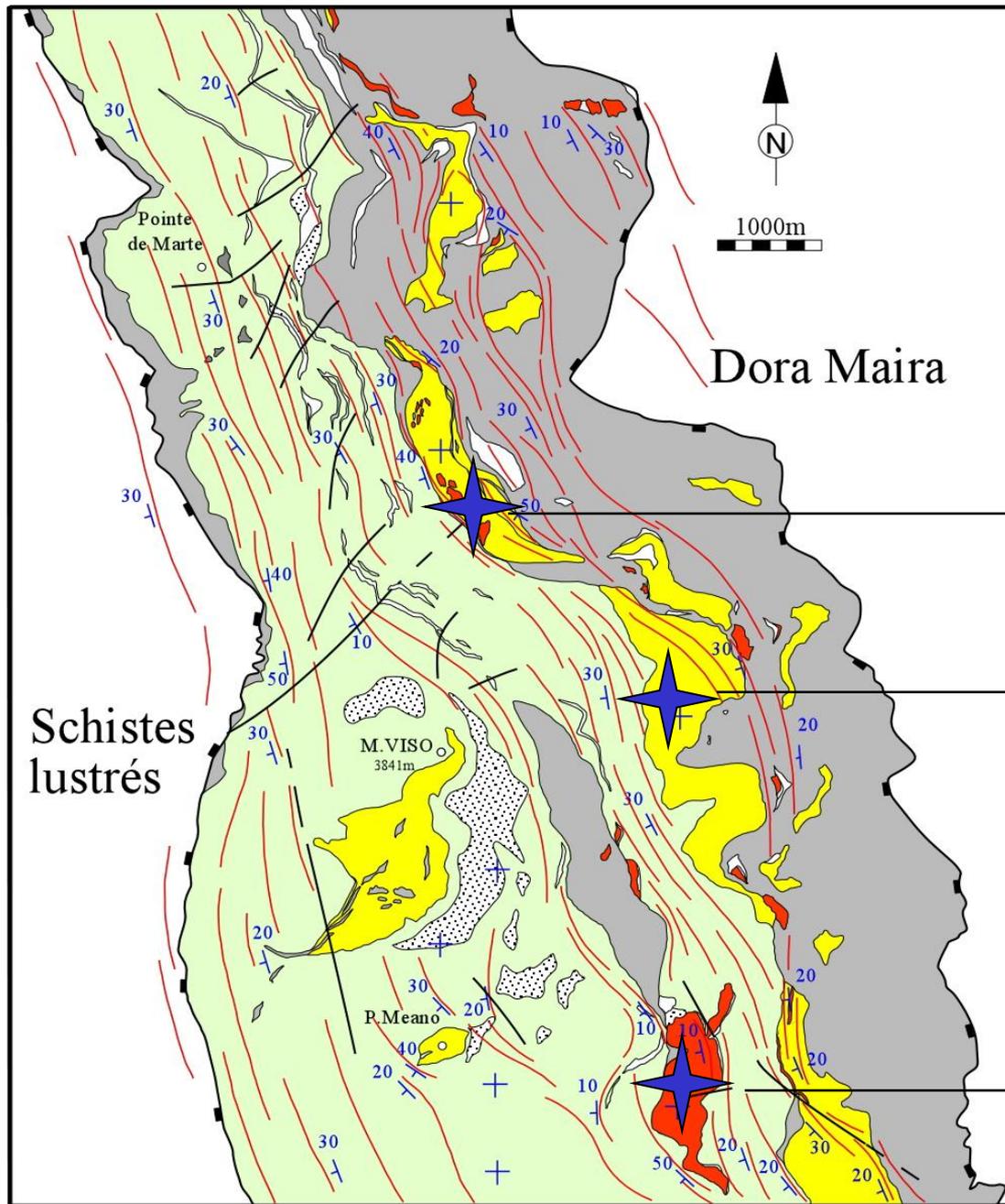
existence des 2 chimies
pour les gabbros...

Quelles sont les conditions
métamorphiques pour les
deux types de chimie ?

Conditions HP pour les 2 types de métagabbros...



estimations P-T
indépendantes
de la chimie initiale



quantification des conditions
HP dans 3unités

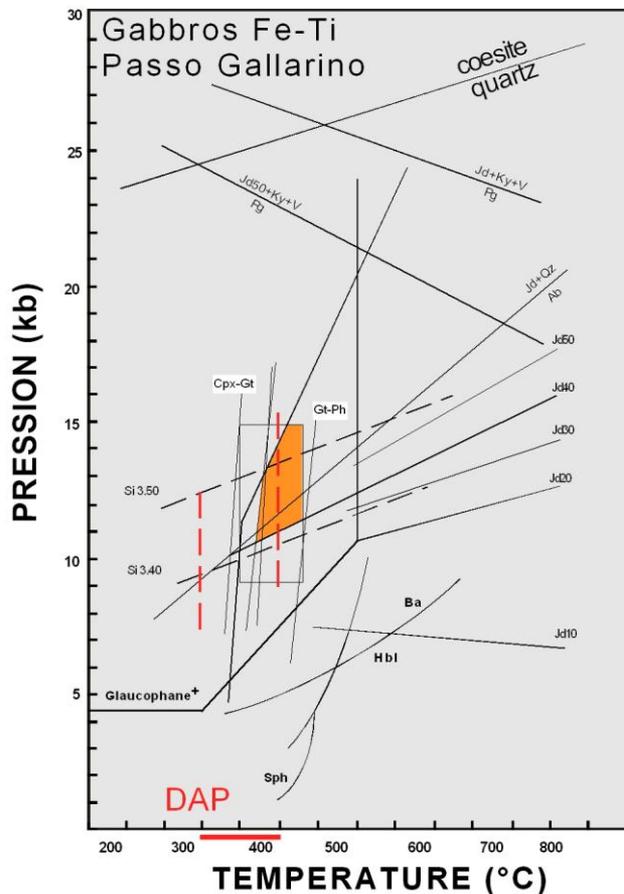
gabbros Fe-Ti

Lago Superiore (LS)

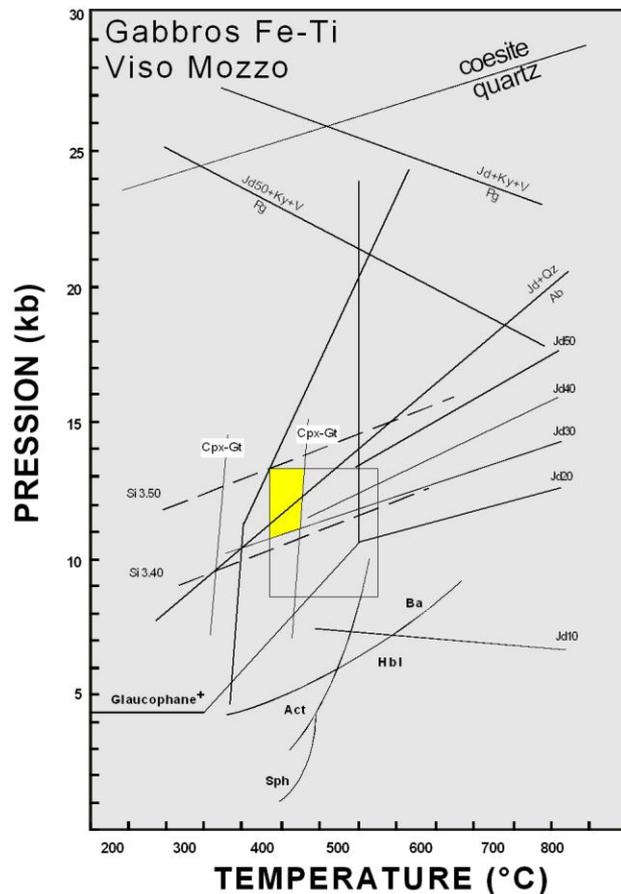
Viso Mozzo (VM)

Passo Gallarino (PG)

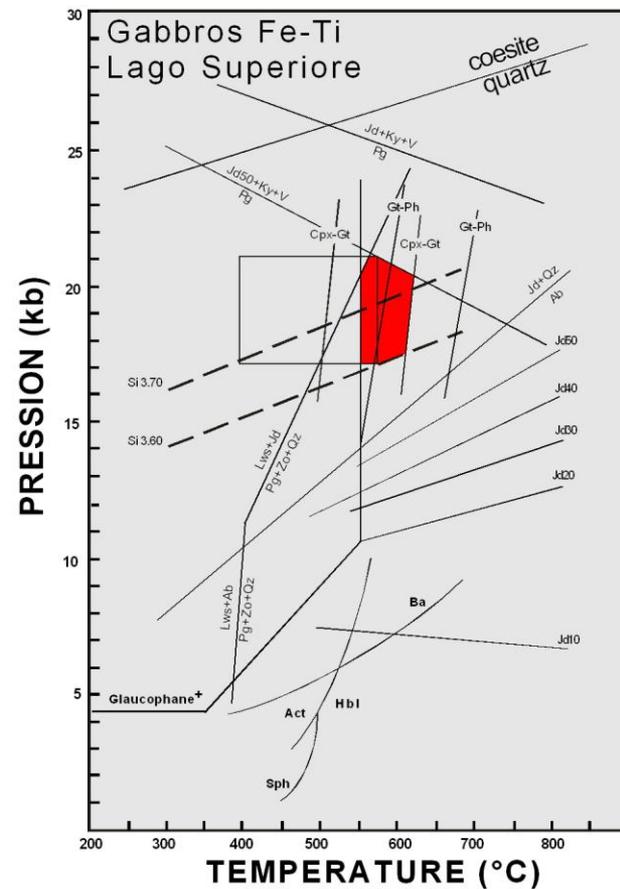
Conditions HP dans les 3 unités du Viso sur des métagabbros Fe-Ti...



Passo Gallarino (PG)
T=450±40°C
P=12±3 kb



Viso Mozzo (VM)
T=460±30°C
P=12±2 kb

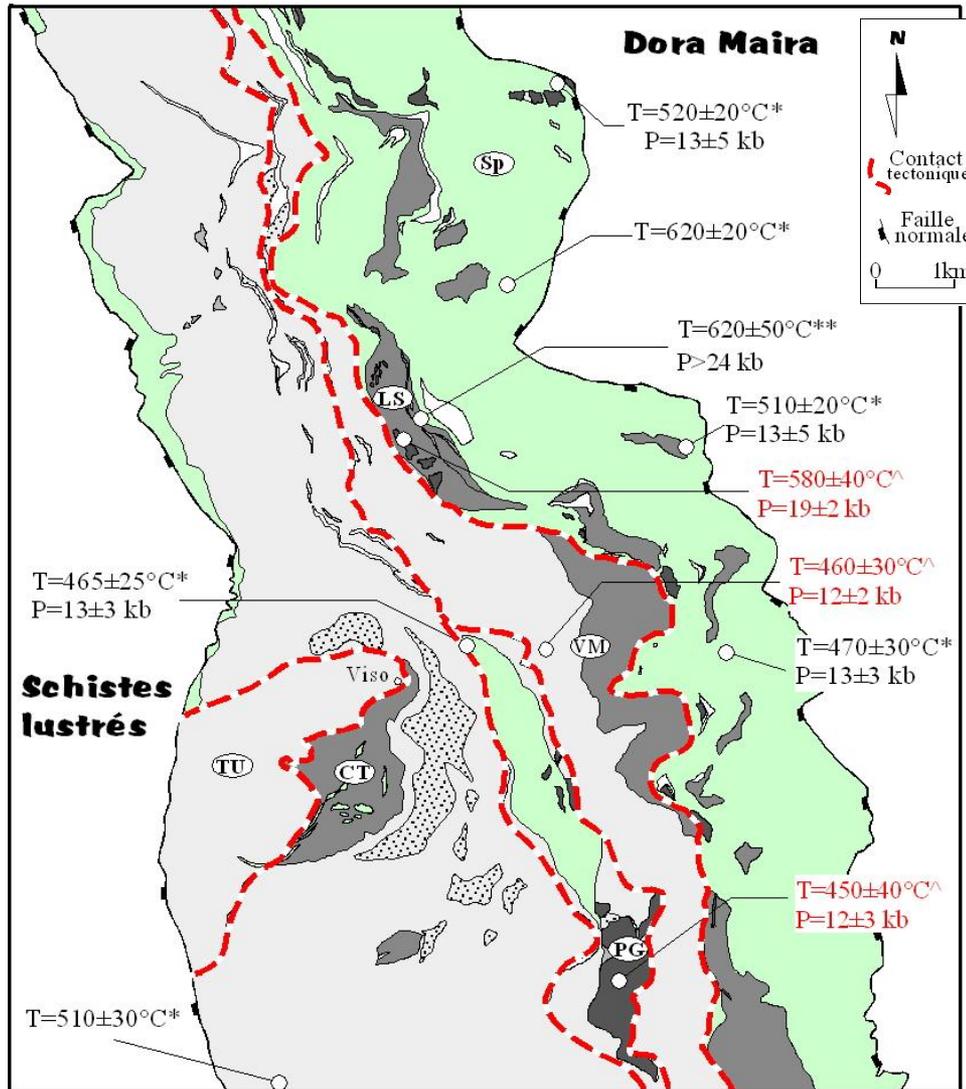


Lago Superiore (LS)
T=580±40°C
P=19±2 kb



Conditions éclogitiques hétérogènes

Compilation des conditions HP dans le massif du Viso



(*) Blake *et al.*, 1995 - (**) Messiga *et al.*, 1999 - (^) Schwartz *et al.*, 2000

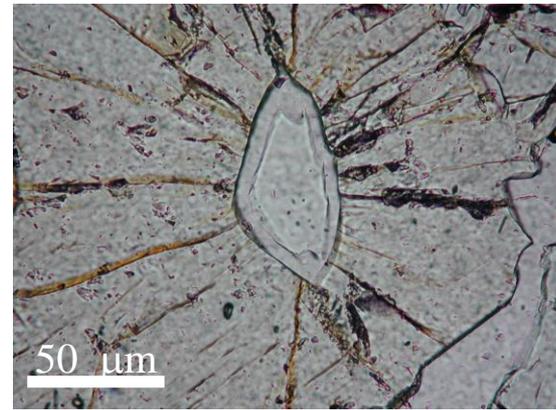
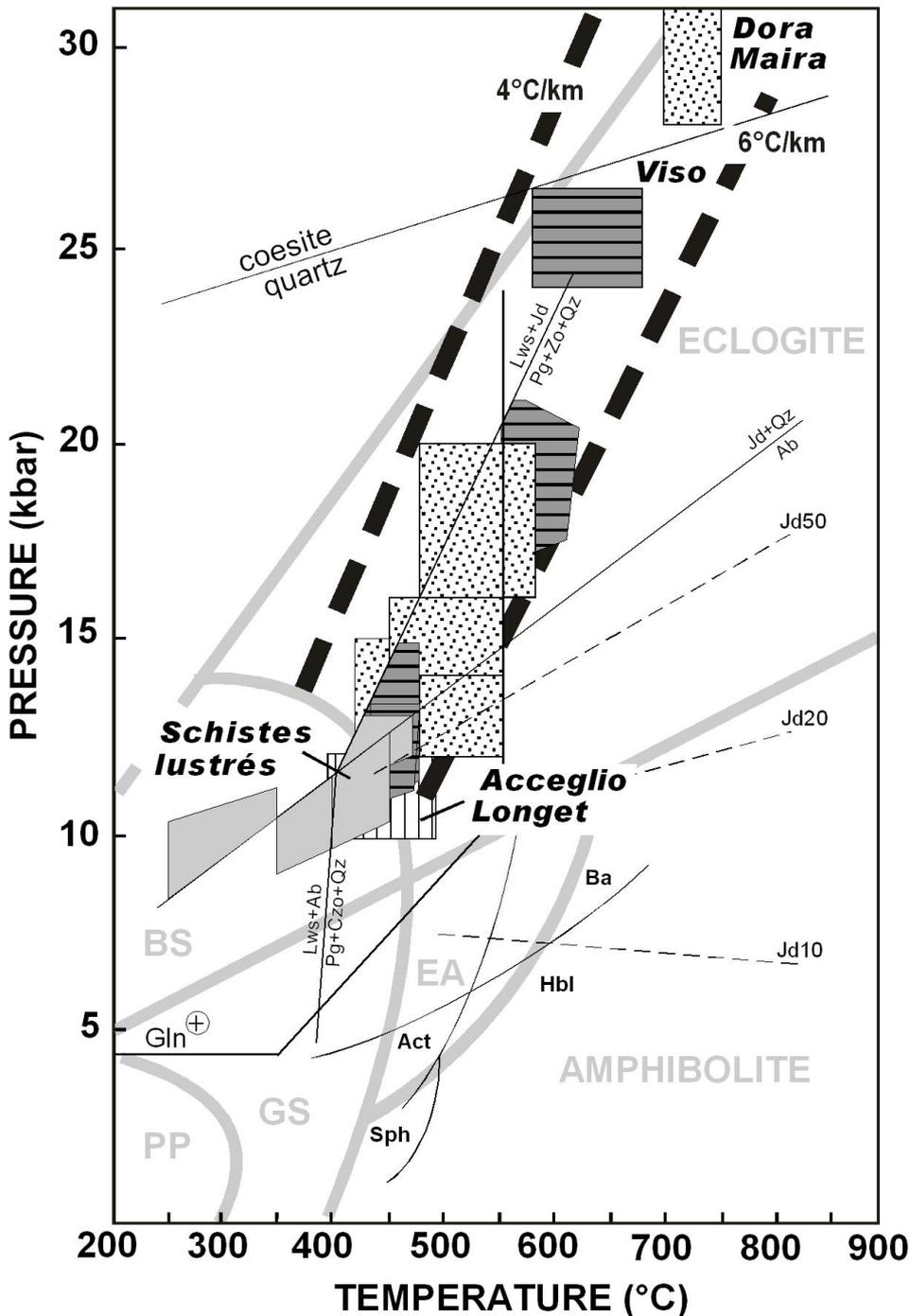
1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites

1.2. Quantification dans les unités SB à forte composante sédimentaire (Schistes lustrés)

1.3. Quantification dans les unités éclogitiques (Monviso)

2. Présentation des conditions P-T pour l'ensemble de la Zone Piémontaise



processus de subduction concerne également des fragments de **croûte continentale...**
 conditions de HP hétérogènes avec des sautes en pression...

Massif de Dora Maira → dôme métamorphique HP de croûte continentale

Pour proposer un modèle cohérent de genèse et d'exhumation des unités métamorphiques

→ **besoin de contraintes chronologiques**

1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites

1.2. Quantification dans les unités SB à forte composante sédimentaire (Schistes lustrés)

1.3. Quantification dans les unités éclogitiques (Monviso)

2. Présentation des conditions P-T pour l'ensemble de la Zone Piémontaise

3. Contraintes chronologiques

Méthodes de géochronologie basées sur le piégeage par les minéraux de certains éléments issus de processus de désintégration radioactive... ($^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$)

la concentration de ces éléments (isotopes radiogéniques) par rapport à un isotope stable dans le minéral est fonction du temps... $[\text{}^{40}\text{Ar}]/[\text{}^{39}\text{Ar}]$

Au dessus d'une certaine température, appelée température de fermeture (Tc) le minéral se comporte comme un système ouvert... (chrono ne fonctionne pas) en dessous de Tc le chronomètre fonctionne...

U-Pb grenat Tc=600-700°C

Lu-Hf grenat Tc=600-700°C

Sm-Nd grenat Tc=500-600°C

K-Ar phengite Tc=300-400°C

Ar-Ar phengite Tc=350-400°C

Traces de fissions

zircon Tc=200-250°C

apatite Tc=60-120°C

choix important de systèmes isotopiques couvrant une large gamme thermique de 700 à 60°C !!!

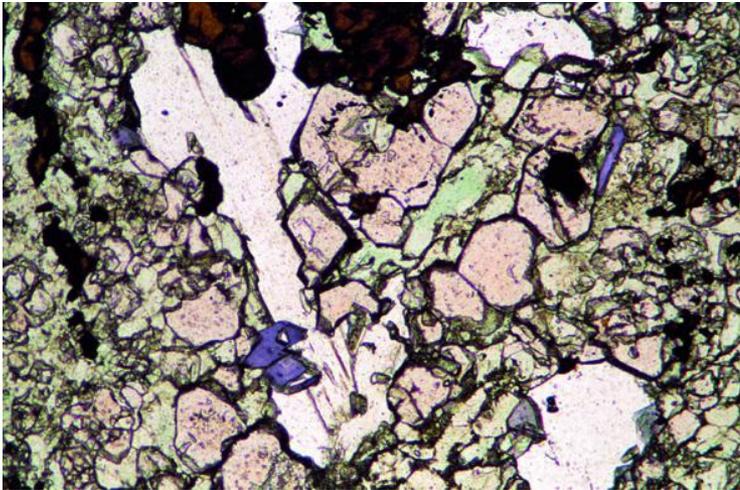
Dans le cas des roches métamorphiques que date t-on?

Tc température de fermeture du système

Tm température du métamorphisme

Dans le cas où $T_c > T_m$

l'âge que l'on obtient est un âge de cristallisation du minéral



paragenèse HP à Gt-Ph

$T_m = 550^\circ\text{C}$

si U-Pb $T_c > 600^\circ\text{C}$

alors l'âge obtenu sera un âge

de cristallisation du grenat

donc de la paragenèse à Gt-Ph donc

âge correspond au stade HP.

Dans le cas où $T_m > T_c$

l'âge que l'on obtient est un âge de refroidissement donc d'exhumation

de la roche...

paragenèse HP à Gt-Ph

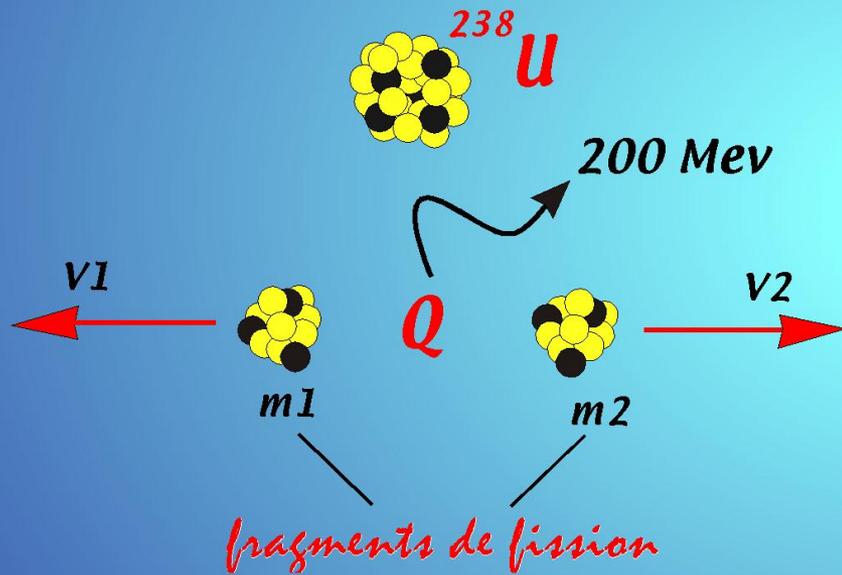
$T_m = 550^\circ\text{C}$

Ar-Ar phengite T_c 350 et 400°C

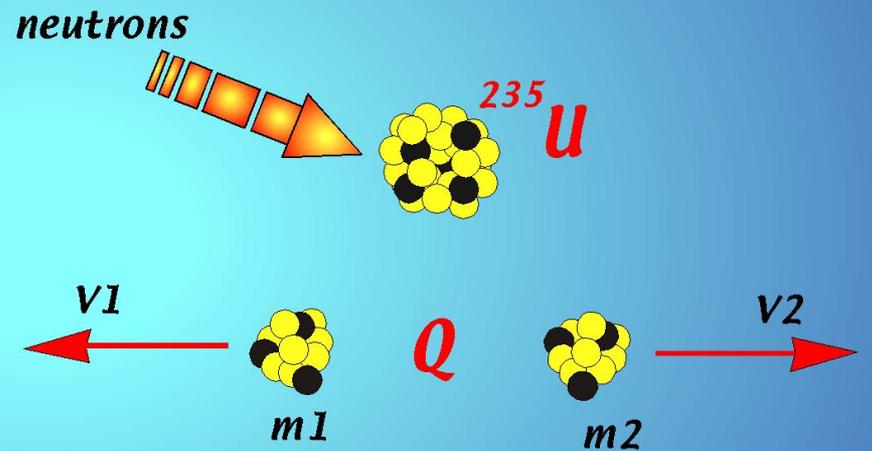
→ âge de passage de l'isotherme 400°C
pour l'ensemble de la paragenèse HP

PRINCIPE GENERAL

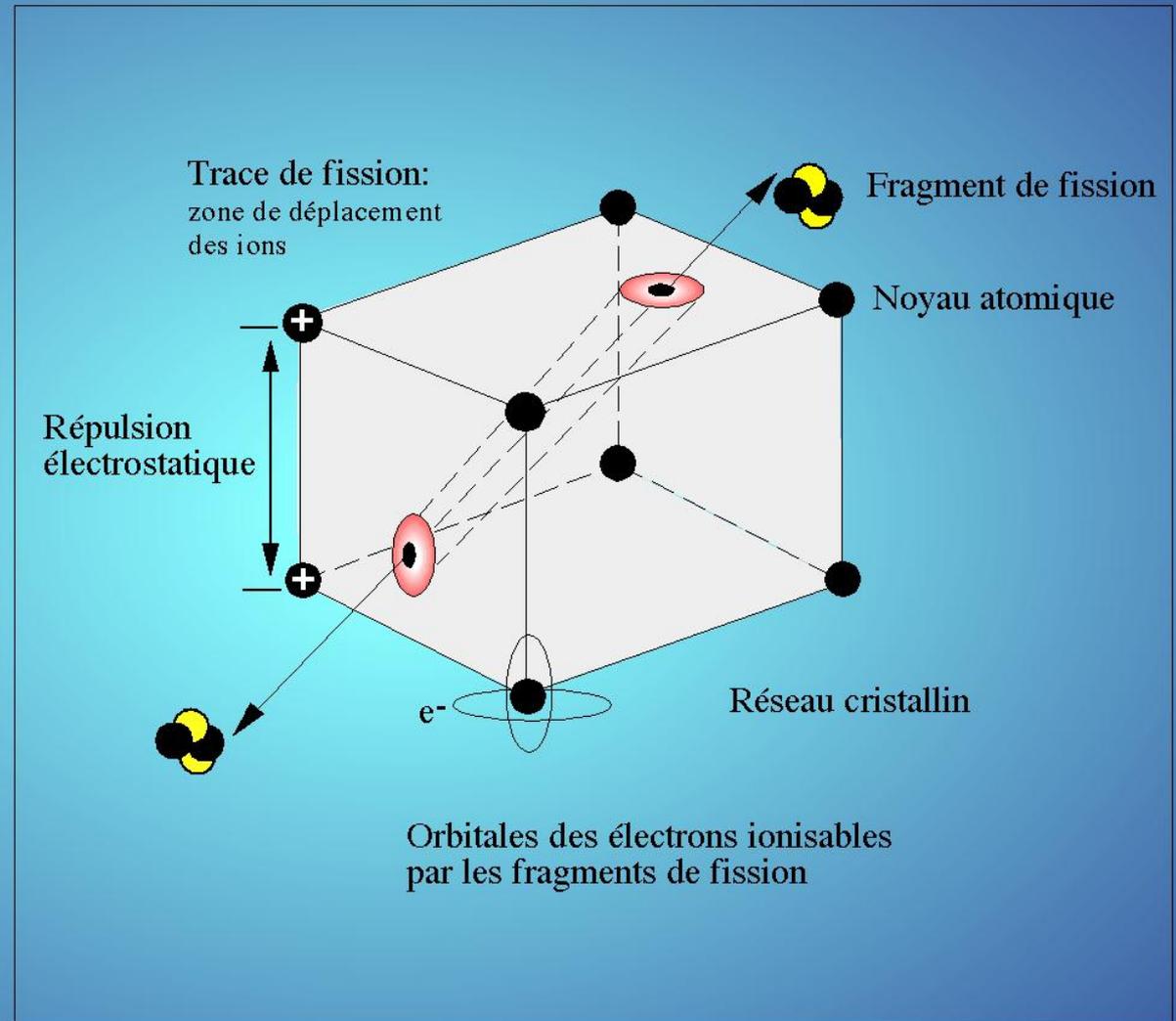
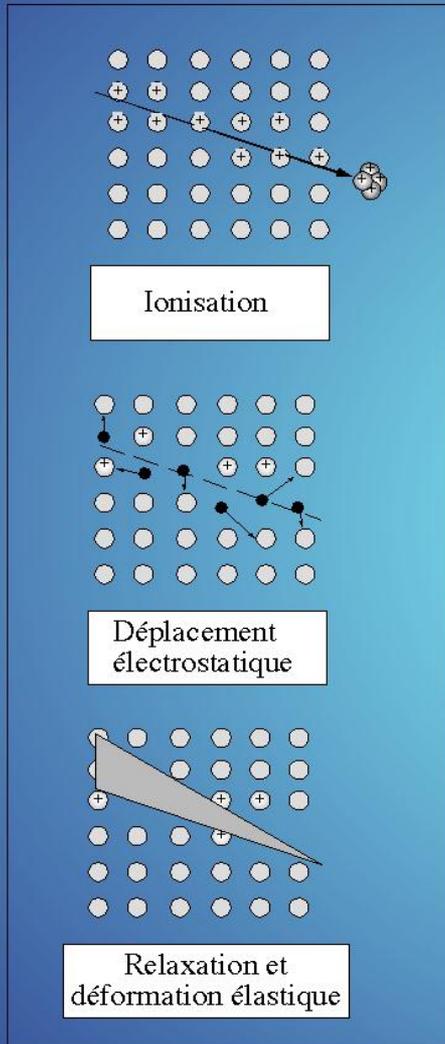
fission spontanée



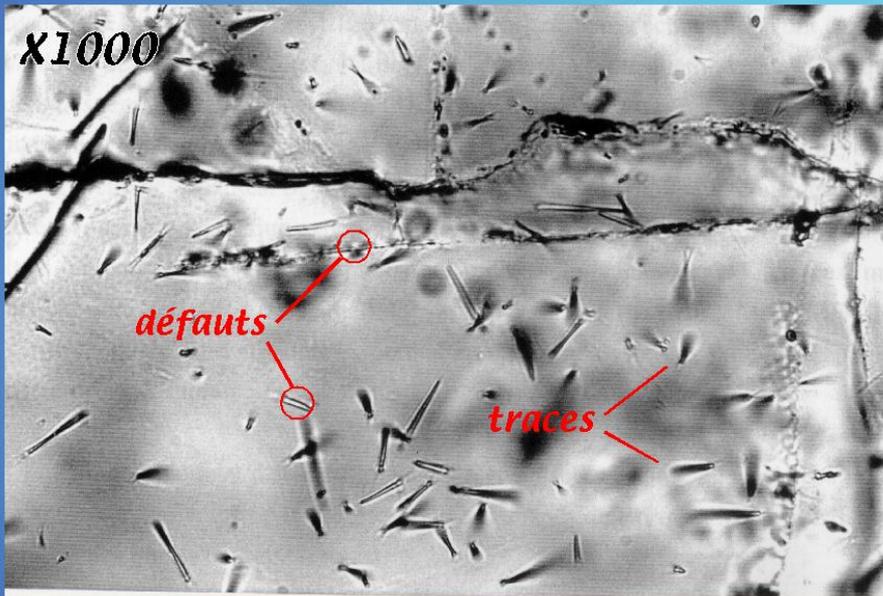
fission induite



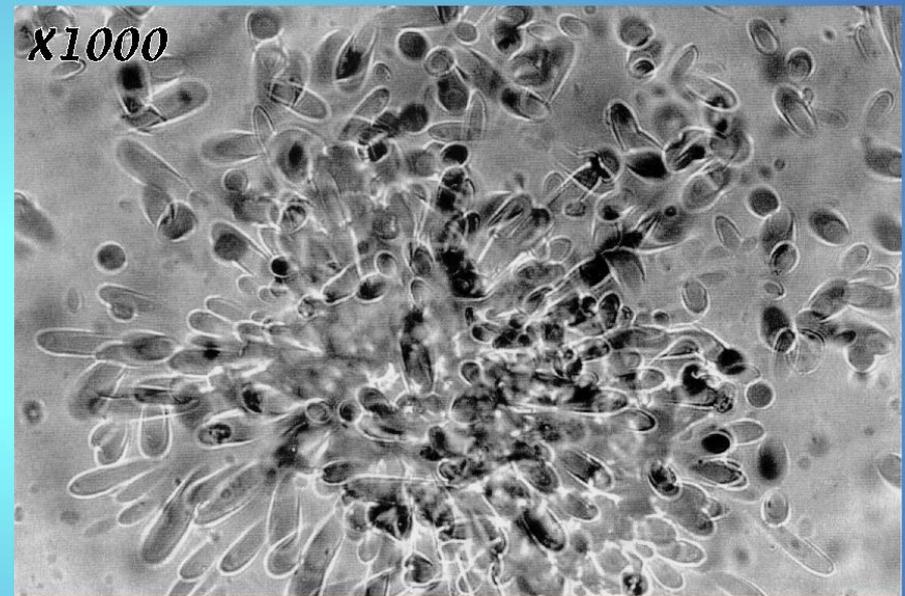
FORMATION D'UNE TRACE LATENTE



**TRACES FOSSILES DANS
UN CRISTAL D'APATITE**



**TRACES INDUITES
DANS UN KAPTON**



Principe général (équation d'âge) :

$$D(\text{TF})=f(t,[\text{U}])$$

Dans un minéral la densité des traces fossiles est :

$$D_s=f(t,[^{238}\text{U}]) \quad \text{problème car } t \text{ et } [^{238}\text{U}] \text{ sont inconnus!!!}$$

On sait que :

$$^{235}\text{U}/^{238}\text{U} \text{ est une constante} = (A)$$

De plus la densité des traces induites par capture neutronique est :

$$D_i=f(\phi,[^{235}\text{U}]) \quad \phi \text{ fluence neutronique}$$

d'où

$$t=A.(D_s/D_i).\phi \quad \longrightarrow \quad \text{Signification d'un âge TF ?}$$

Age TF est un âge apparent!!!

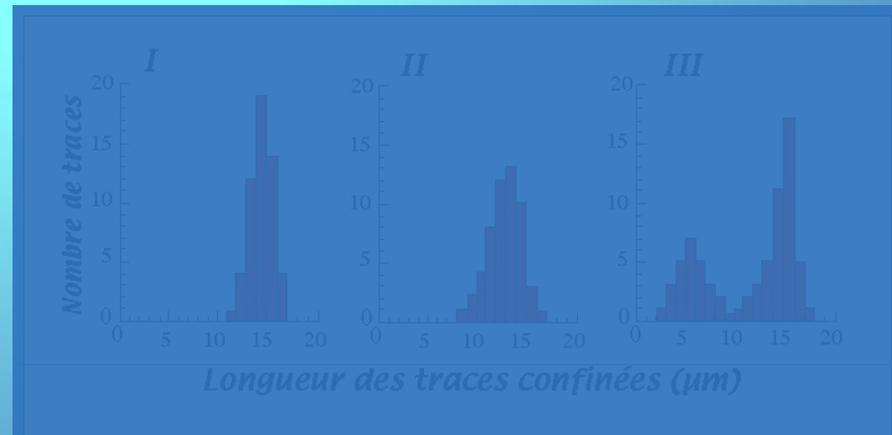
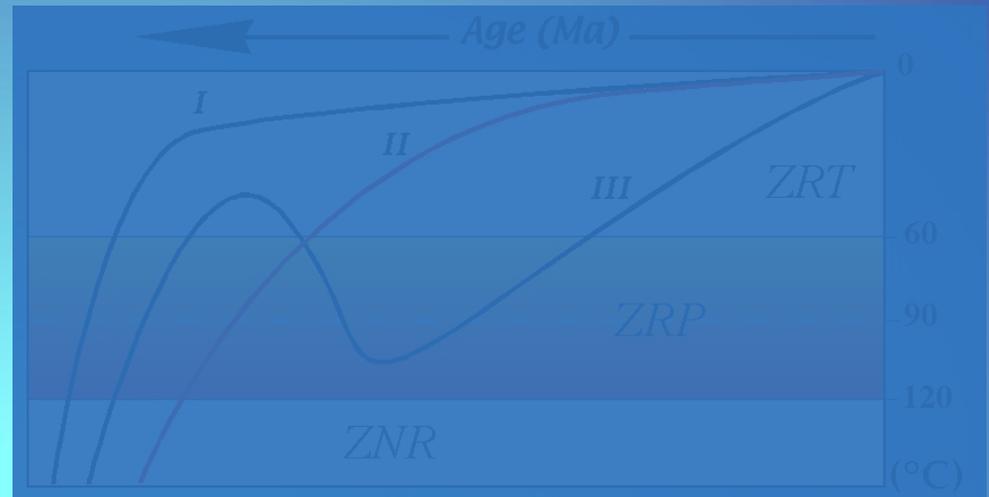
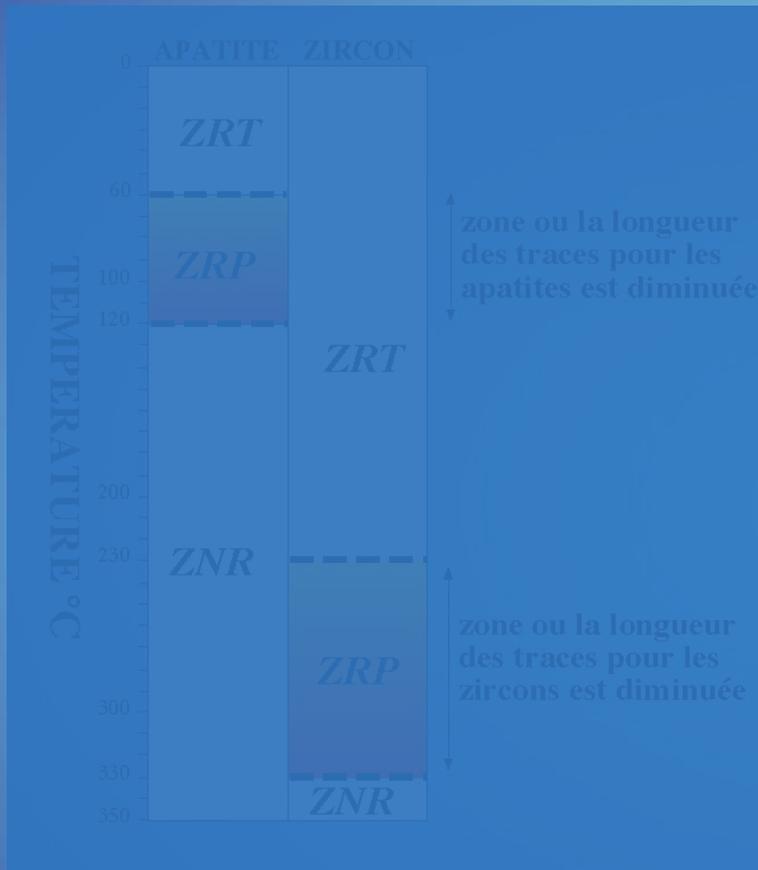
Age TF est un âge apparent!!!

TF sensibles à la température...

Augmentation de T° provoque une diminution de la longueur révélable des traces \rightarrow Age TF rajeuni

Rajeunissement dépend : (i) du minéral daté et (ii) durée de l'évènement thermique...

ZONES DE STABILITES DES TRACES DE FISSION

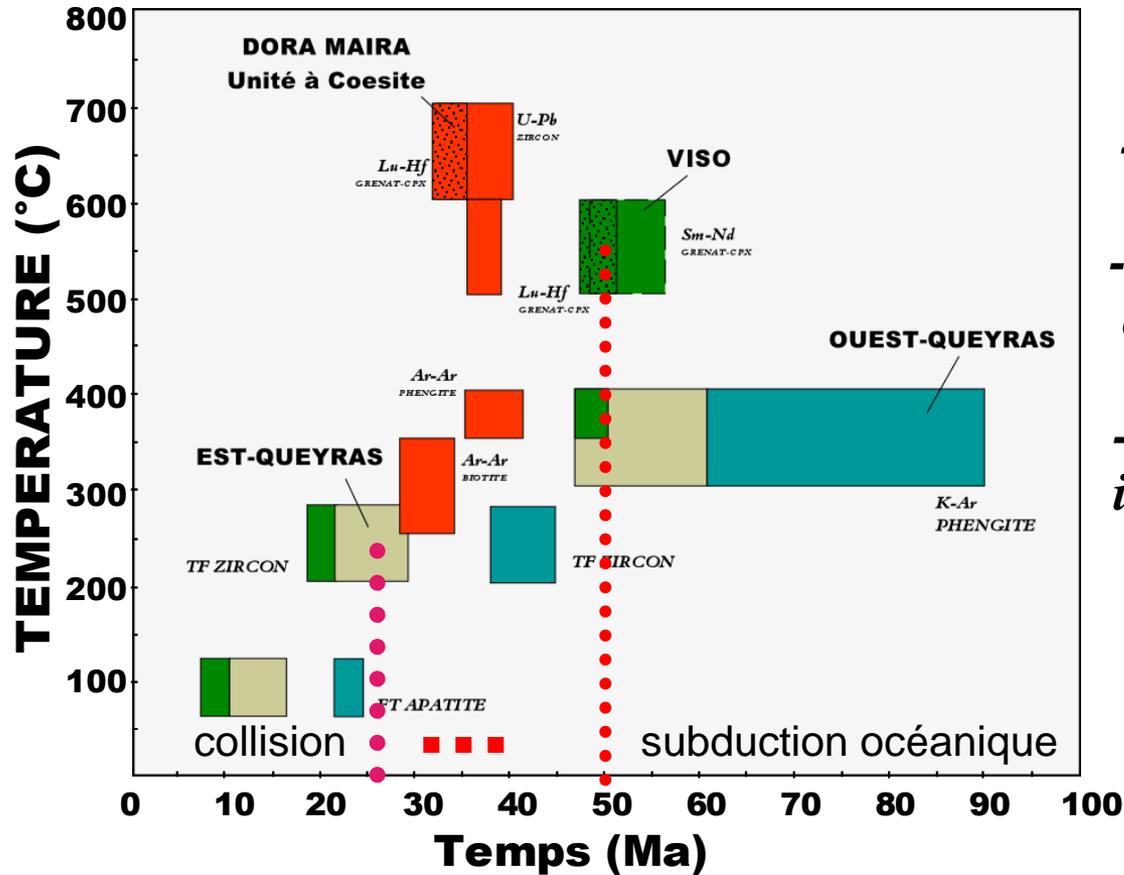


Définition de trois zones thermiques où les traces de fission ont un comportement différent...

RESULTATS TF MASSIF DU CHENAILLET

massif a échappé au
métamorphisme HP-BT

Compilation des données géochronologiques à l'échelle des Alpes Occidentales



à 50 Ma

-Viso déjà en subduction

-Unités SB partiellement exhumées

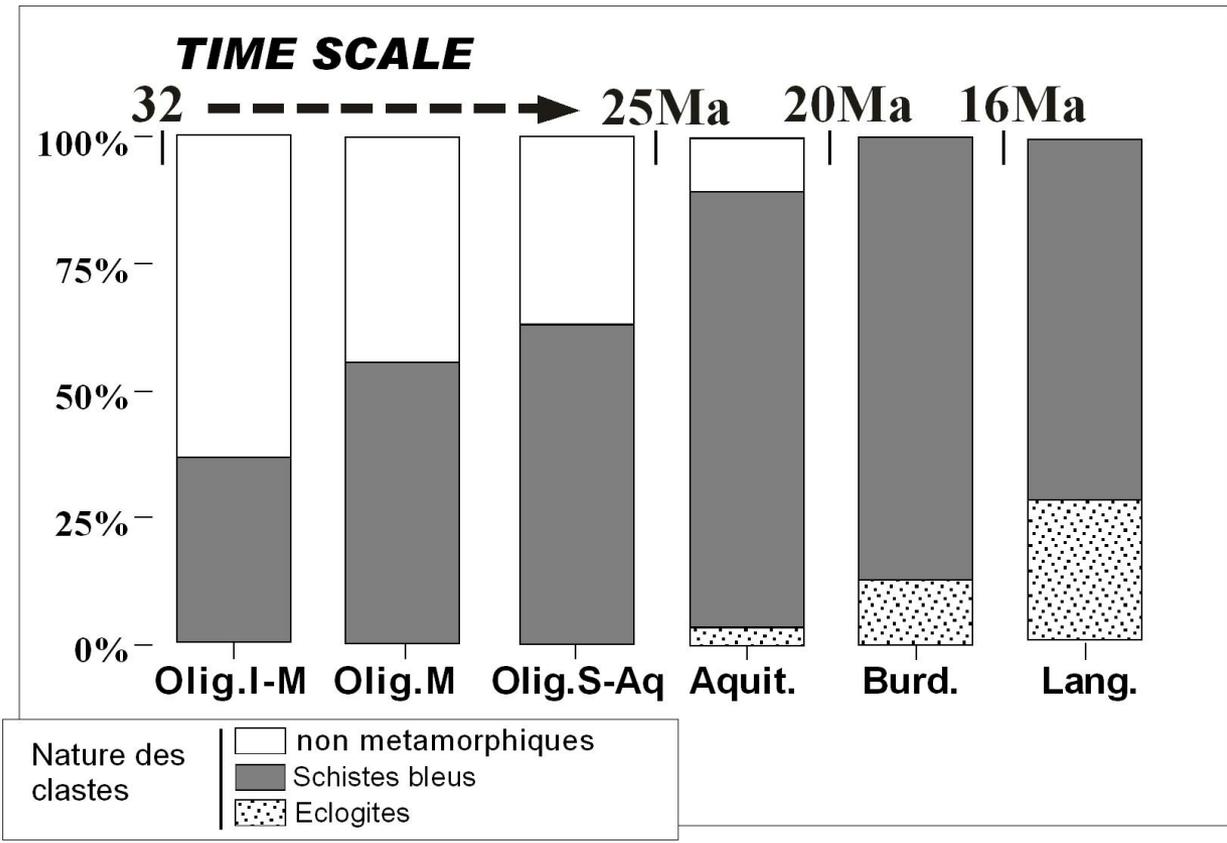
-Marge européenne n'est pas impliquée dans la subduction

A partir de 25 Ma l'ensemble des unités sont dans les conditions de sub-surface (10-15 km)

Fort diachronisme dans l'exhumation avec des âges plus récents dans les unités éclogitiques

Comparaison avec le message sédimentaire

→ conglomérats tertiaires du bassin Liguro-Piémontais (Polino et al., 1991)



→ Important diachronisme dans l'exhumation des unités SB et éclogitiques

→ Apparition des premiers clastes SB dès Oligocène inf.

→ Apparition des premiers clastes éclogitiques dès Aquitanien (2%)

→ Datations TF en accord avec le signal sédimentaire détritique

1. Quantification des conditions P-T dans les unités océaniques

1.1. Caractérisation des unités océaniques non-métamorphiques : apport des ophiolites

1.2. Quantification dans les unités SB à forte composante sédimentaire (Schistes lustrés)

1.3. Quantification dans les unités éclogitiques (Monviso)

2. Présentation des conditions P-T pour l'ensemble de la Zone Piémontaise

3. Contraintes chronologiques

4. Modèle d'évolution

→ **ZONE PIEMONTAISE COMPOSITE** juxtaposition de 3 domaines

→ **Domaine Piémontais type Chenaillet**

- absence de HP-BT
- phénomène d'obduction

→ **Domaine Piémontais Schistes bleus**

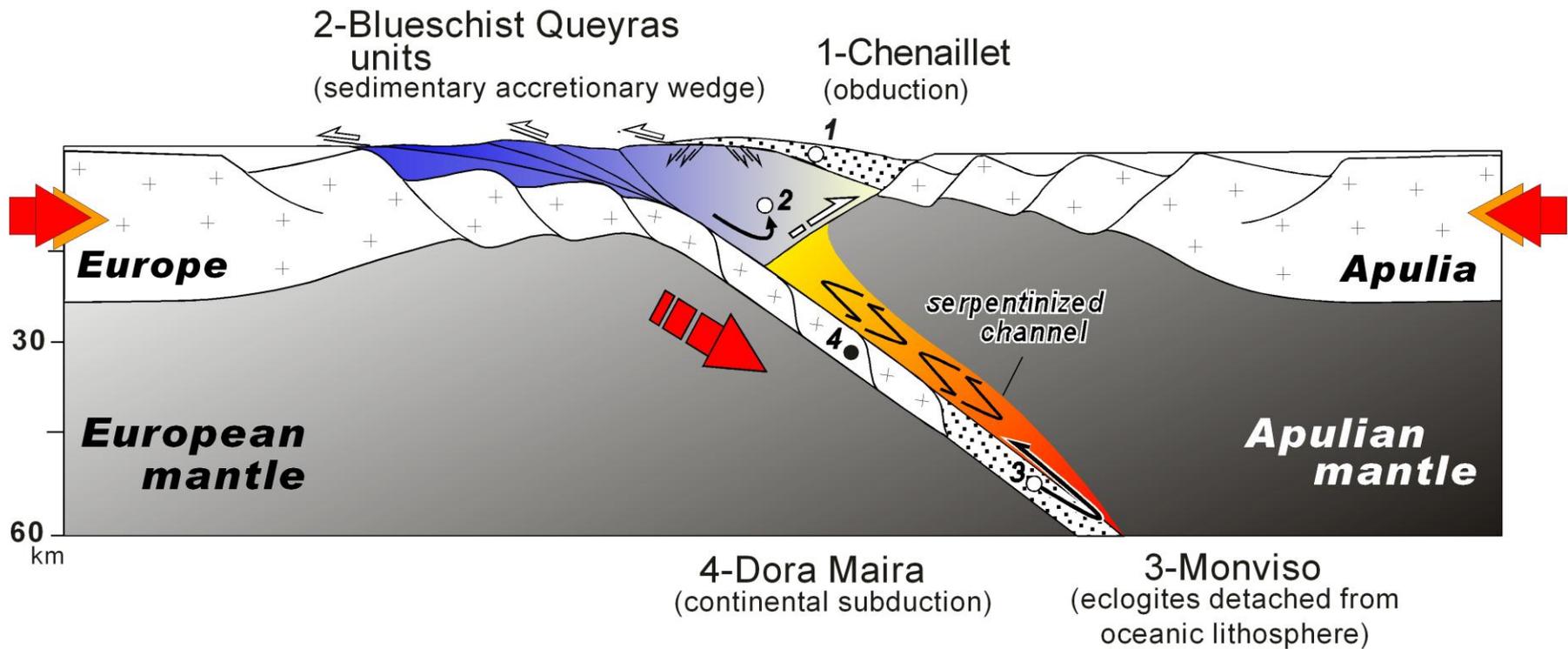
- large volume de sédiments et detritisme océanique
- chemins P-T progressifs dans les conditions du faciès des schistes bleus
- exhumation précoce (dès 60Ma)

→ **Domaine Piémontais éclogitique**

- large volume de roche dérivées de la lithosphère océanique
- matrice serpentineuse
- P-T hétérogènes, sautes en pression et faibles volumes
- exhumation tardive

Zone Piémontaise correspond à différents niveaux d'une paléo-zone de subduction

ca. 50 Ma
OCEANIC to CONTINENTAL SUBDUCTION



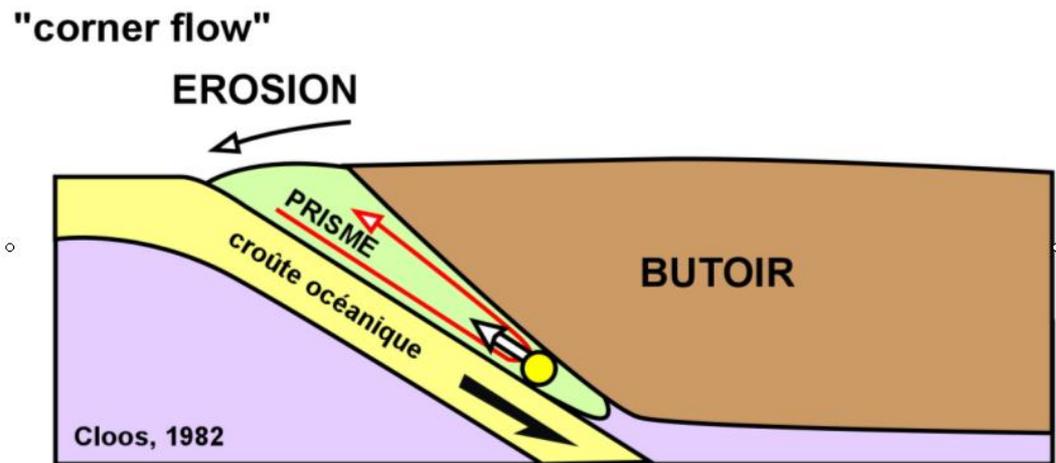
hydratation du manteau change sa viscosité...

on passe de 10^{21} Pa.s à 10^{19} Pa.s

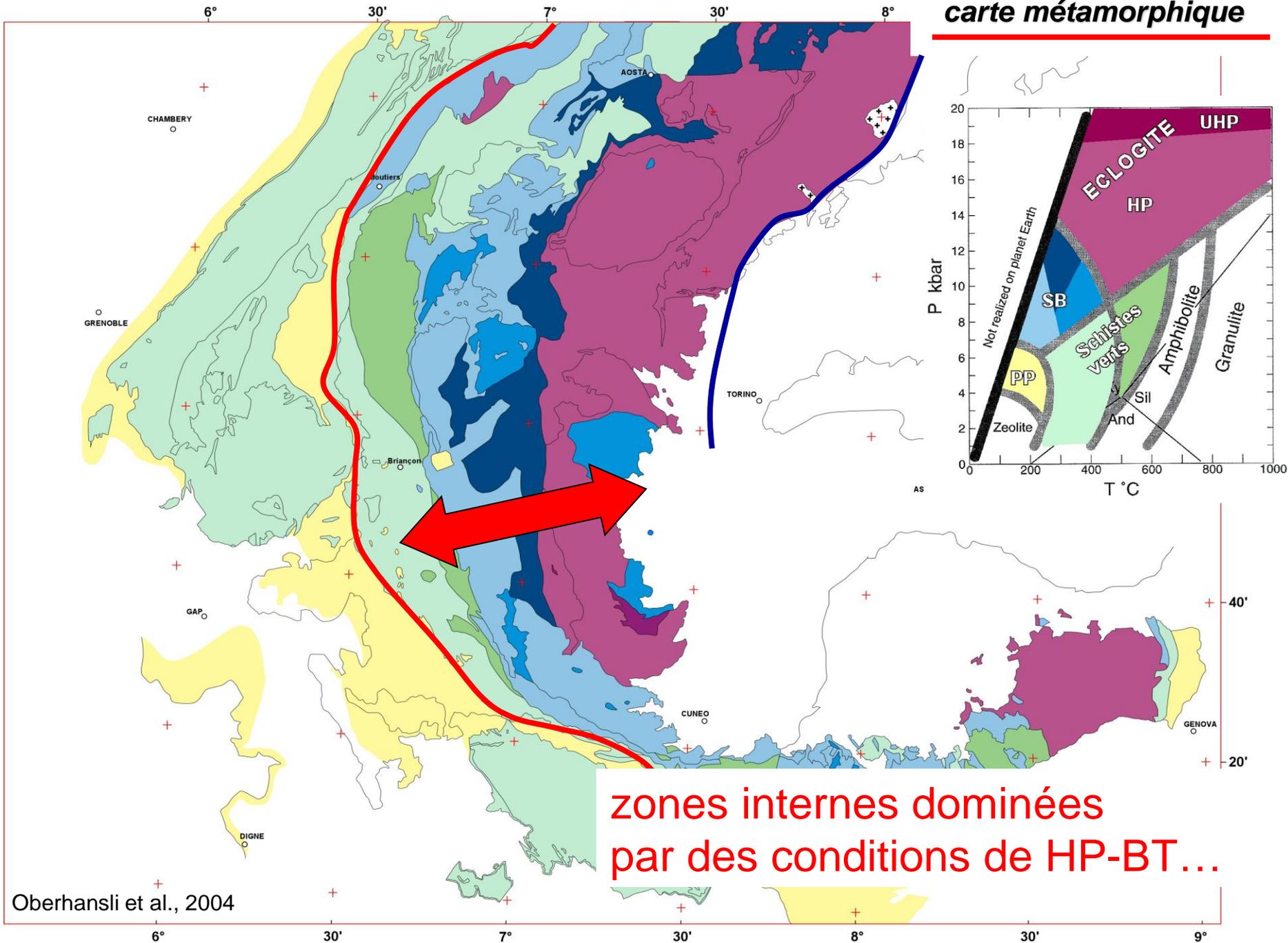
permet de générer un **courant de retour!!**

le long du plan de subduction → modèle de « corner flow »

suffisant pour exhumer des
objets de faible volume
< 50 km^3 type unités du viso!!

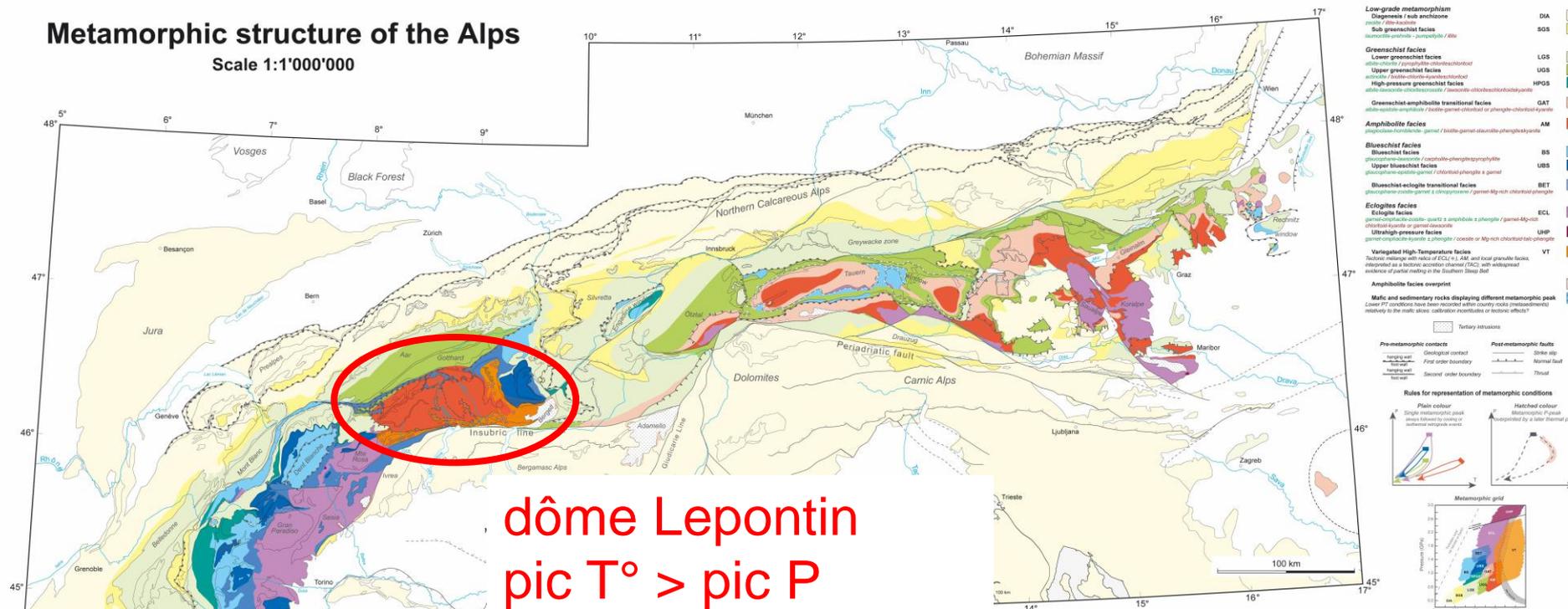


carte métamorphique



Metamorphic structure of the Alps

Scale 1:1'000'000



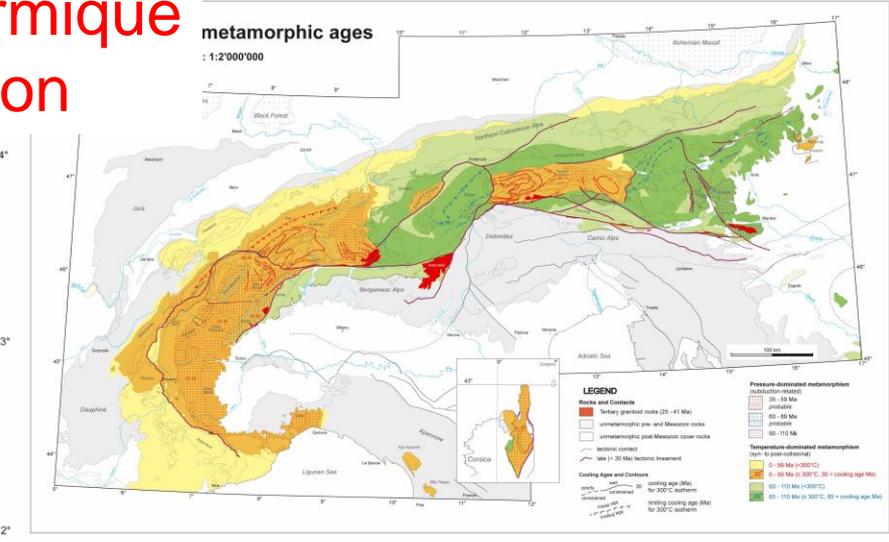
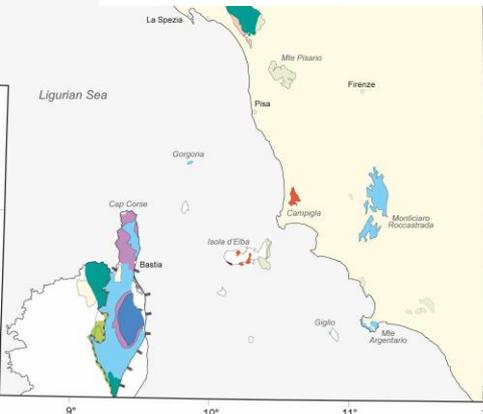
dôme Lepontin
 pic T° > pic P
 anomalie thermique
 post-subduction

Edited by Roland Oberhänsli (Coordinator, Universität Potsdam), Romain Bousquet (Universität Basel), Martin Engi (Universität Bern), Bruno Goffé (ENS Paris-CNRS), Guido Gosso (Università di Milano), Mark Handy (Freie Universität Berlin), Volker Höck (Universität Salzburg), Friedrich Koller (Universität Wien), Jean-Marc Lardoux (Université de Nice), Riccardo Polino (CNR Torino), Philippe Rossi (BRGM, Paris), Ralf Schuster (Geologische Bundesanstalt Wien), Stéphane Schwartz (Université de Grenoble), Iole Spalla (Università di Milano)

Advisory board R. Cabry (Université de Montpellier), Ch. Chopin (ENS Paris-CNRS), R. Compagnoni (Università di Torino), G. V. Dal Piaz (Università di Padova), R. Furrer (Universität Marburg), Technische Universität Darmstadt, Ch. Miller (Universität Innsbruck), St. Schmidt (Universität Basel)

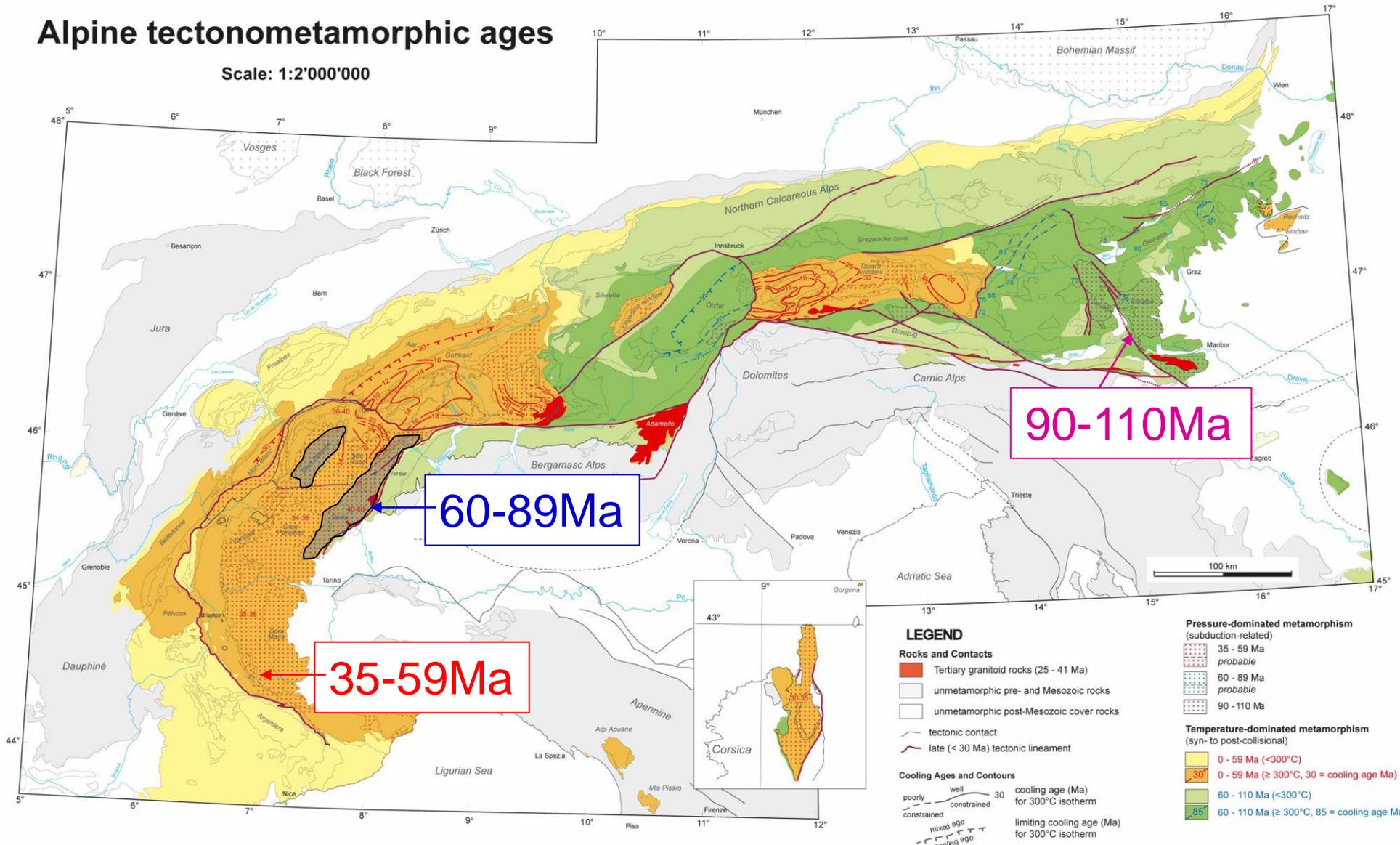
with contributions from Ph. Agard (Université Paris VII), J. Babat (Freie Universität Berlin), A. Berger (Universität Bern), R.J. Bertle (Universität Vienna), St. Bucher (Universität Basel), T. Burni (Universität Bern), P. Heltmann (BWG Bern), G. Hoinkes (Universität Graz), L. Jolivet (Université Paris VI), L. Keller (Universität Basel), M. Lamer (Geologische Bundesanstalt Wien), B. Lombardo (IG-CNR Torino), G. Martinotti (Università di Torino), A. Michard (ENS Paris), G. Passal (Geologische Bundesanstalt Wien), A. Proyer (Universität Graz), G. Rantsch (Universität Leoben), C. Rosenberg (Freie Universität Berlin), J.M. Schramm (Universität Salzburg), H. Soelva (Universität Wien), M. Thoeni (Universität Wien), M. Zucali (Università di Milano)

Computer graphics: R. Bousquet, J. Tensi, M. Grundmann



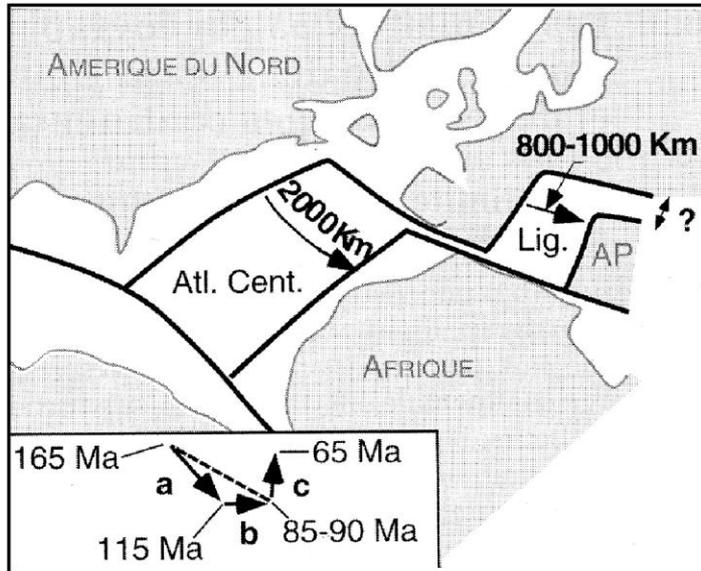
Alpine tectonometamorphic ages

Scale: 1:2'000'000

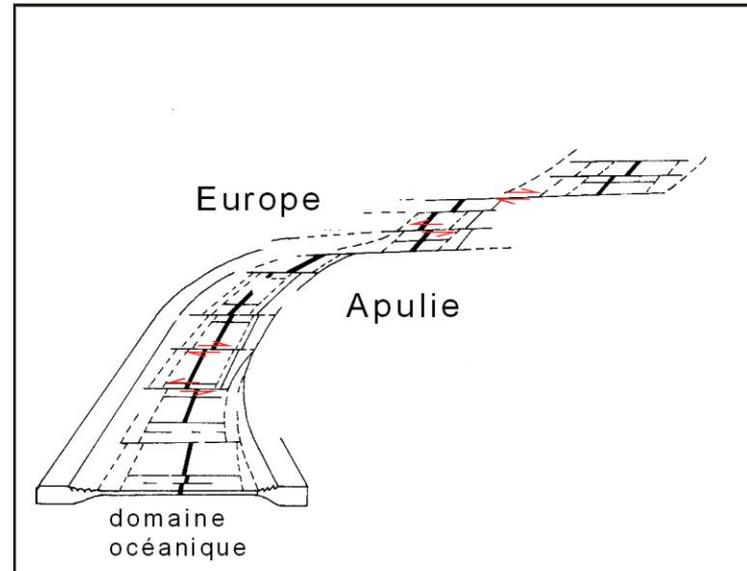


3 gammes d'age pour le métamorphisme HP-BT !!!
 Quelle est la signification ???

Géométries de marge non-rectilignes

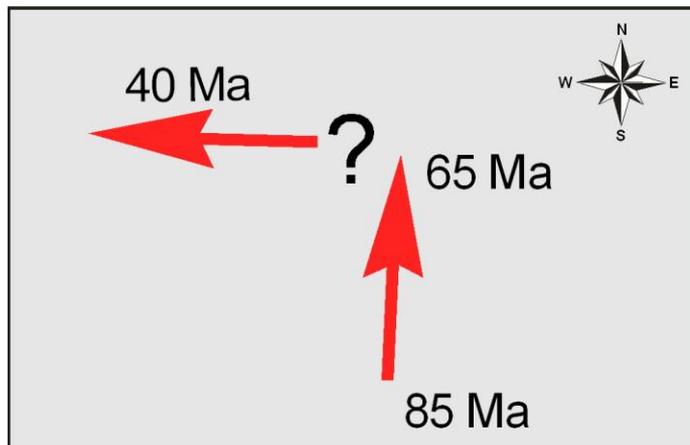


Lemoine et al., 2000

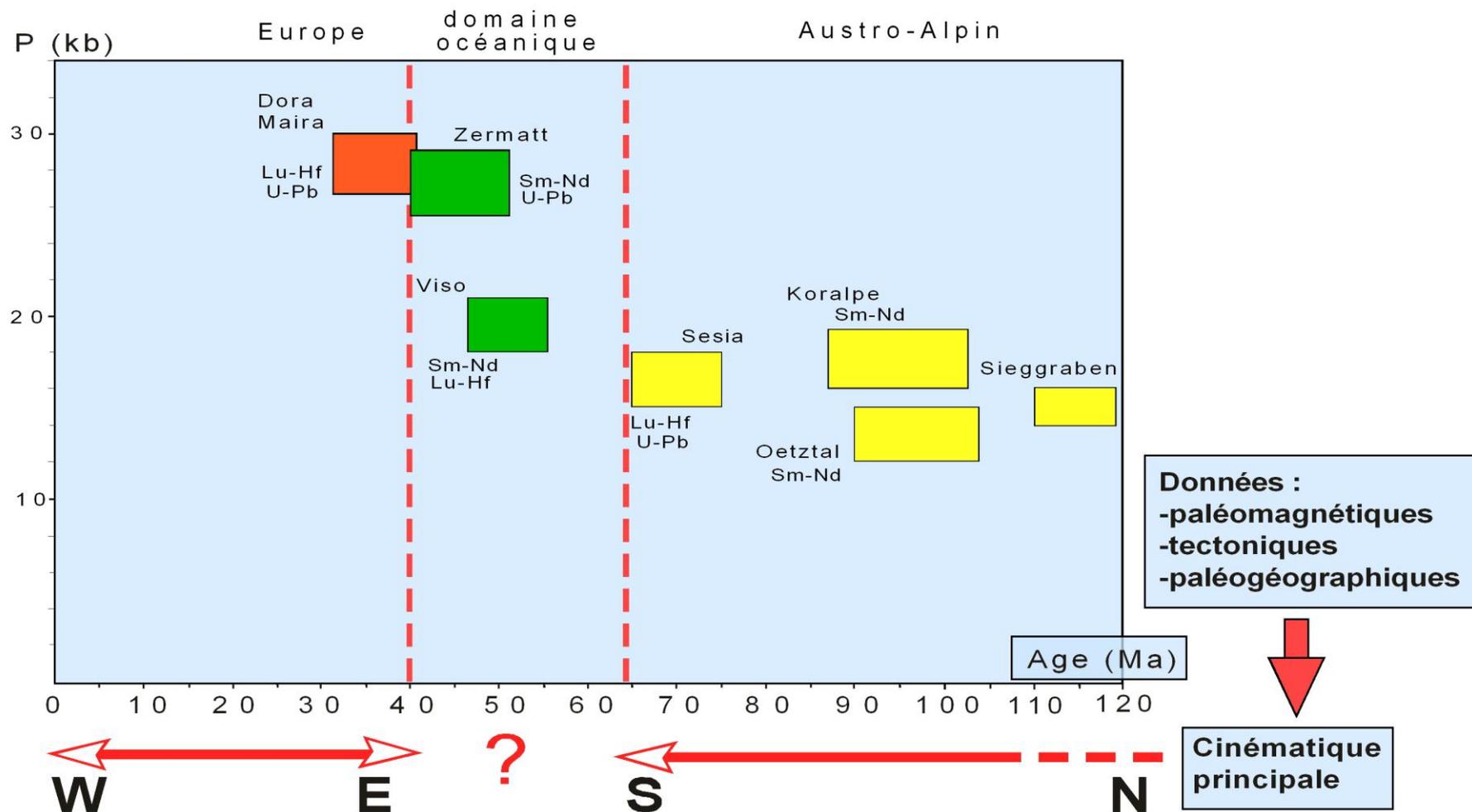


Beccaluva et al., 1984 in Dal Piaz, 1997

Directions de convergence Europe / Apulie

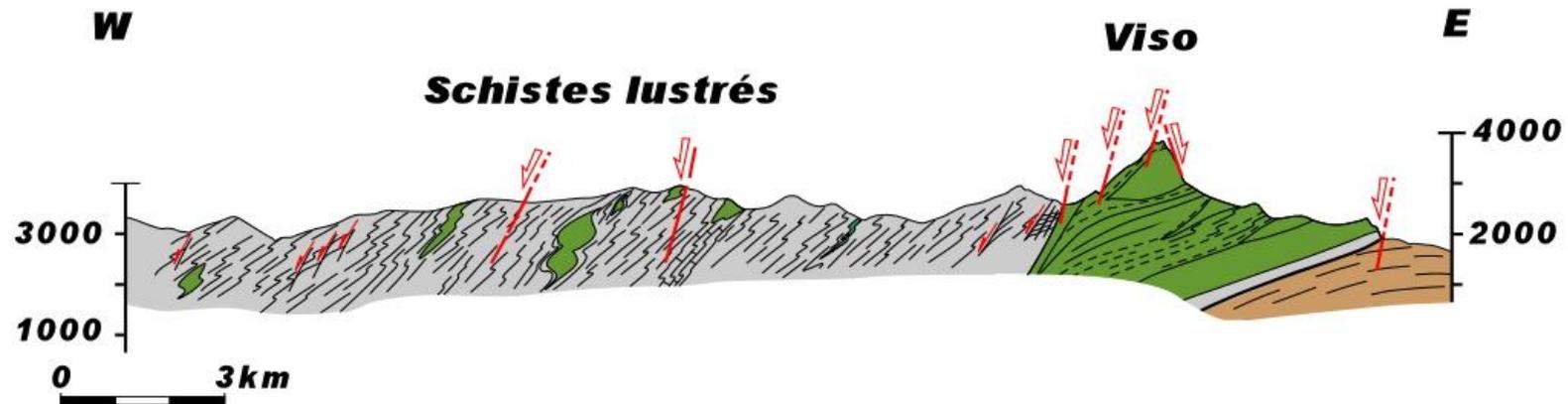


Hétérogénéité des conditions d'éclogitisation



- Profondeurs d'enfouissement différentes
- Ages pour la HP différents
- Vitesses d'exhumation différentes

L'exhumation finale des roches de HP des Alpes occidentales ?



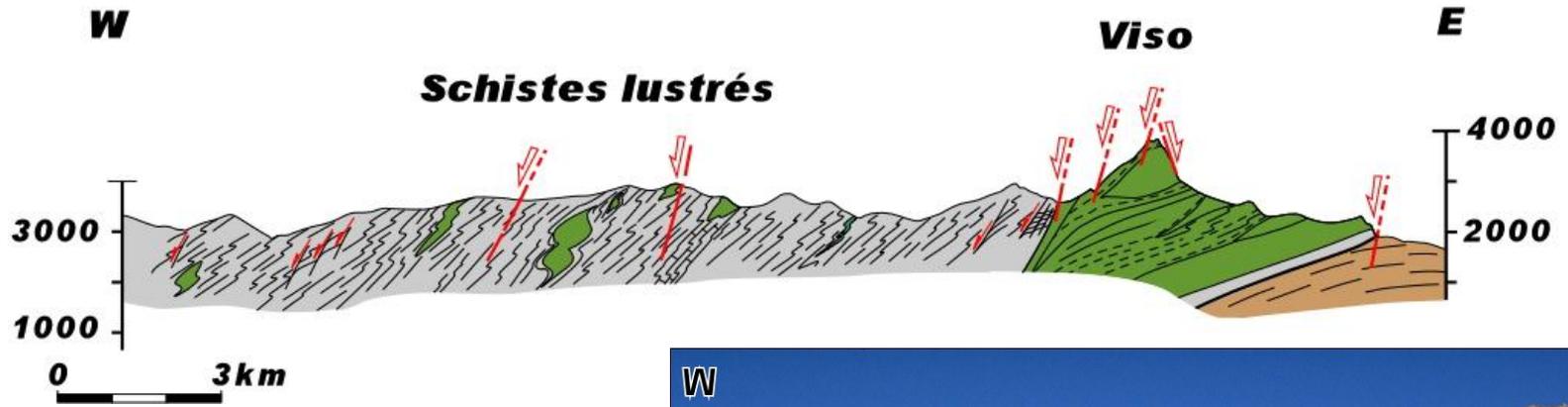
Géométrie actuelle...

plan de foliation principal à pendage vers l'ouest de 30°

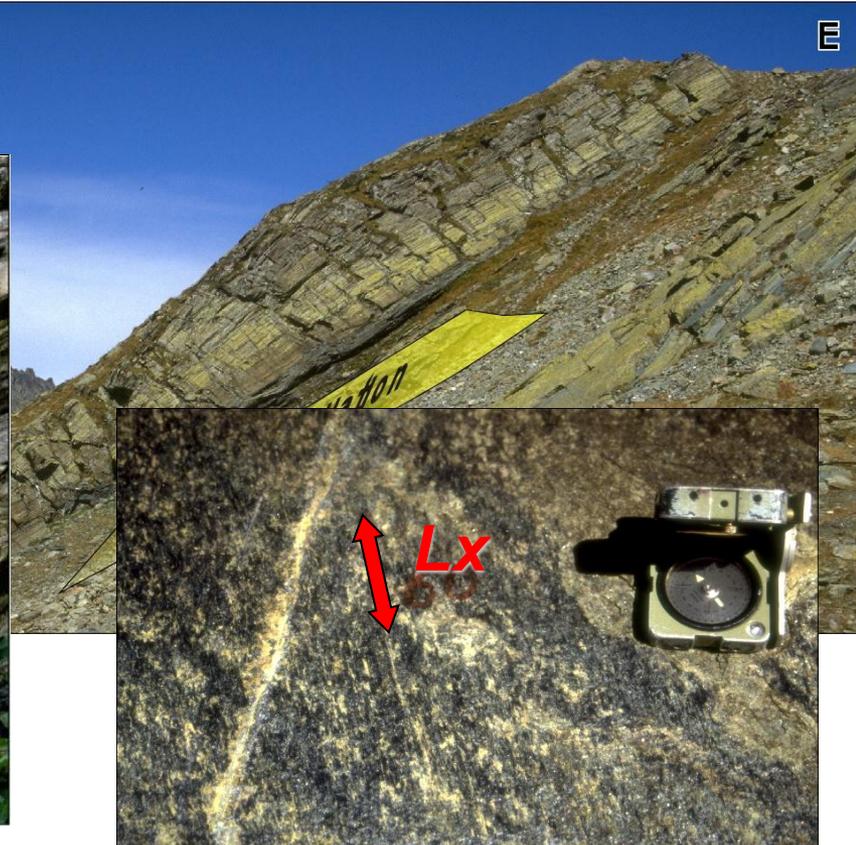
foliation HP schistes bleus déformée par des plis (axes N-S)

schistes verts → chlorite, muscovite, épidote (actinote roches basiques)

Formation et évolution des Alpes



Plis SV asymétriques avec des axes N-S



Comment rendre dynamiquement compatible

1-la géométrie

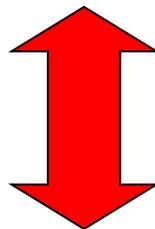
-structures régulièrement pentées vers l'ouest pour le visé et Schistes lustrés

-Structures ductiles (SV) en extension vers l'ouest

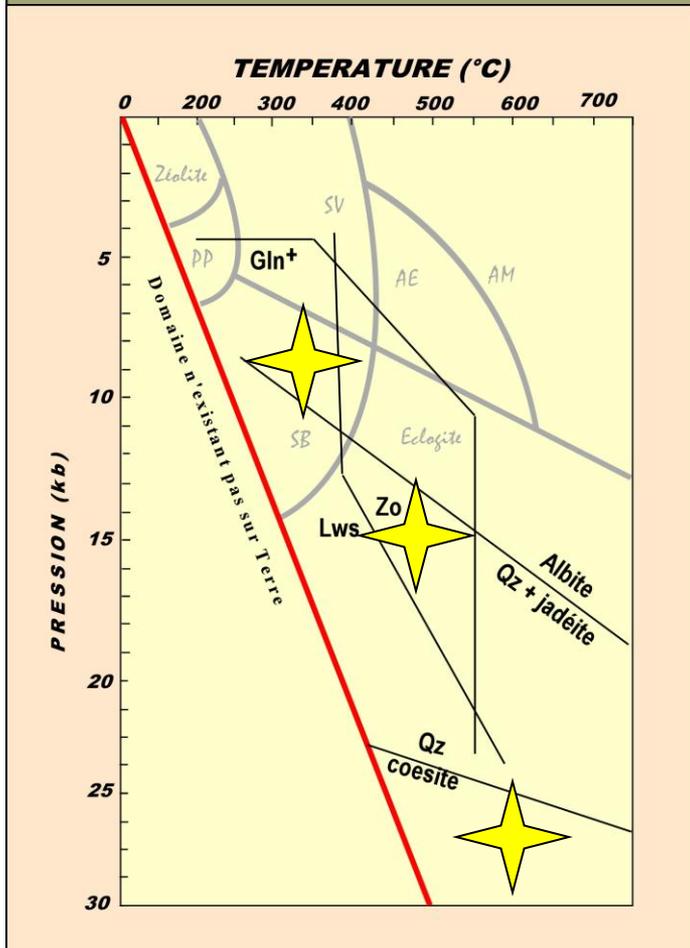
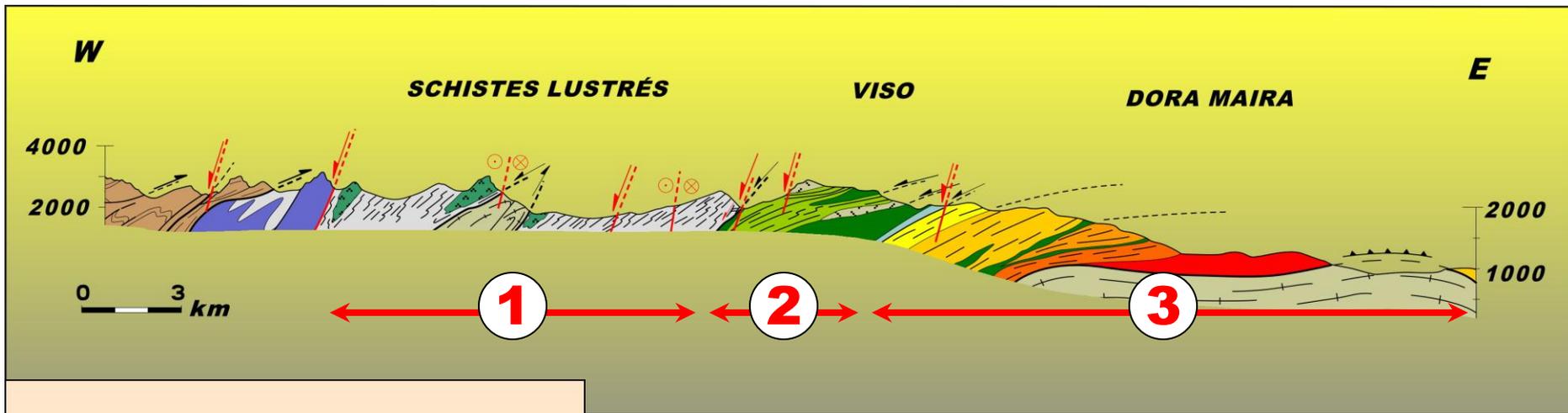
avec

2-les données métamorphiques

-augmentation des conditions P-T d'ouest en est et du sommet vers la base de l'édifice tectonique



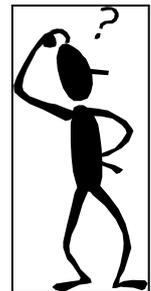
Problème de l'exhumation finale des roches métamorphiques



1-Schistes lustrés
 $P = 9 \text{ à } 11 \text{ kbars}$
 $T = 250 \text{ à } 400^\circ\text{C}$

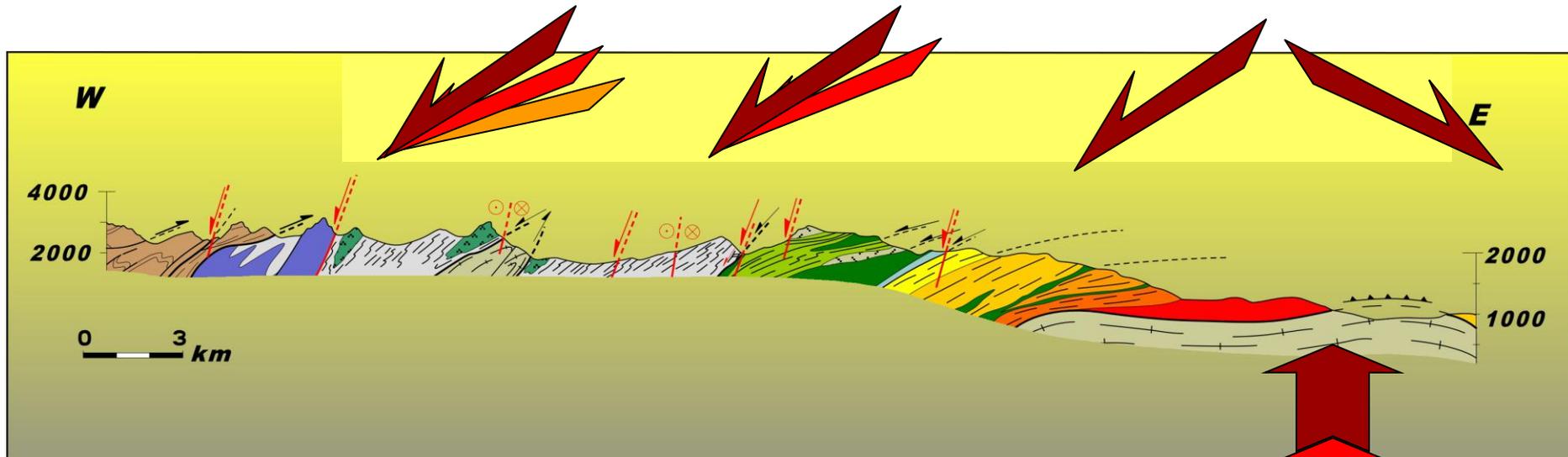
2-Viso
 $P = 13 \text{ à } 20 \text{ kbars}$
 $T = 400 \text{ à } 550^\circ\text{C}$

3-Dora Maira
 $P > 25 \text{ kbars}$
 $T > 550^\circ\text{C}$



Augmentation des conditions P-T d'ouest en est associée à une tectonique en extension

Poinçonnement **vertical** et **dénudation** tectonique

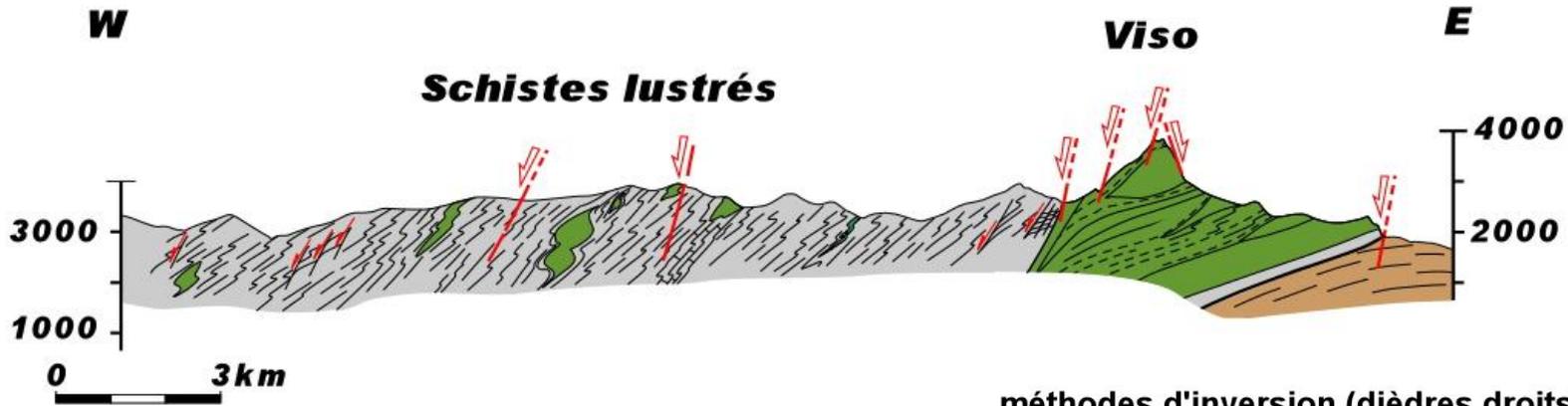


Unités + métamorphiques
poinçonnent unités - métamorphiques

Le poinçonnement est accommodé
en surface par de **l'extension**

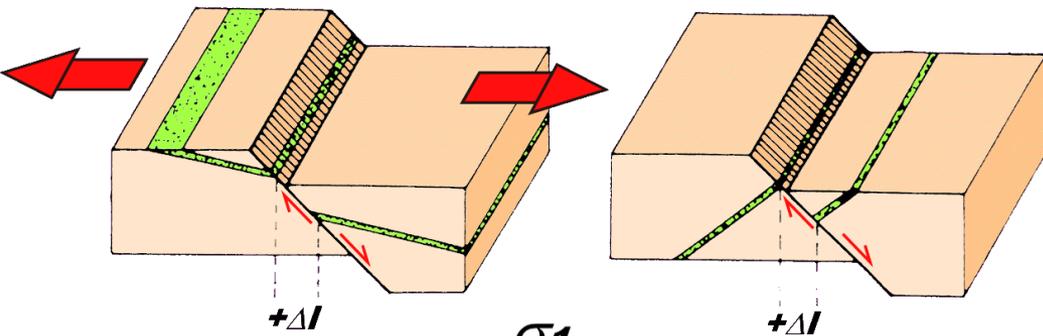
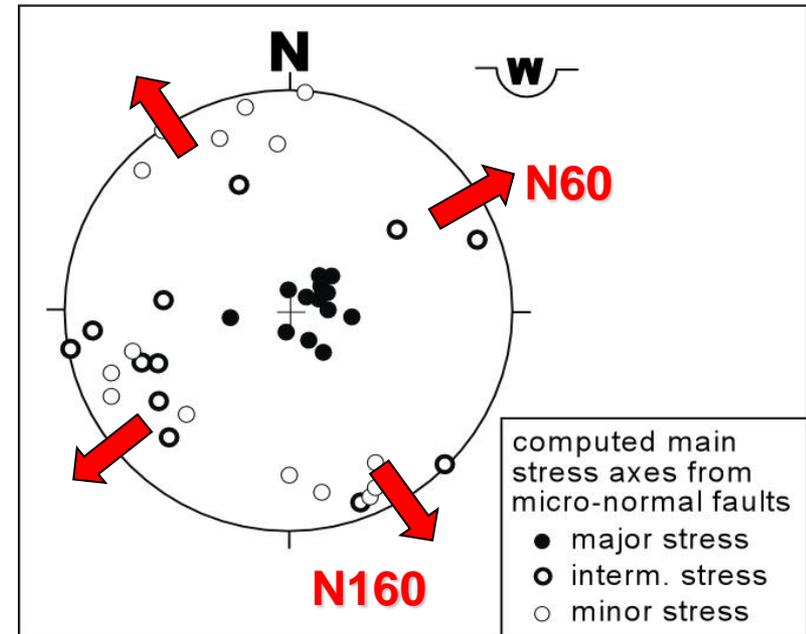
**a-t-on des
preuves?...**

Formation et évolution des Alpes

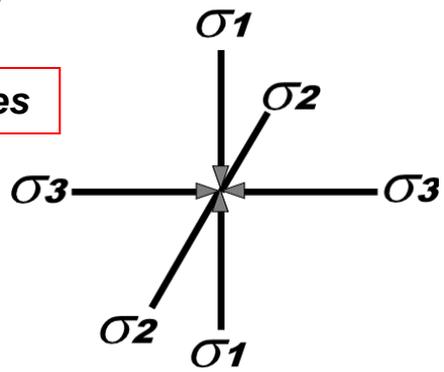


présence de nombreuses failles découpant l'édifice tectonique

méthodes d'inversion (dièdres droits) sur 520 failles dans le Queyras Viso

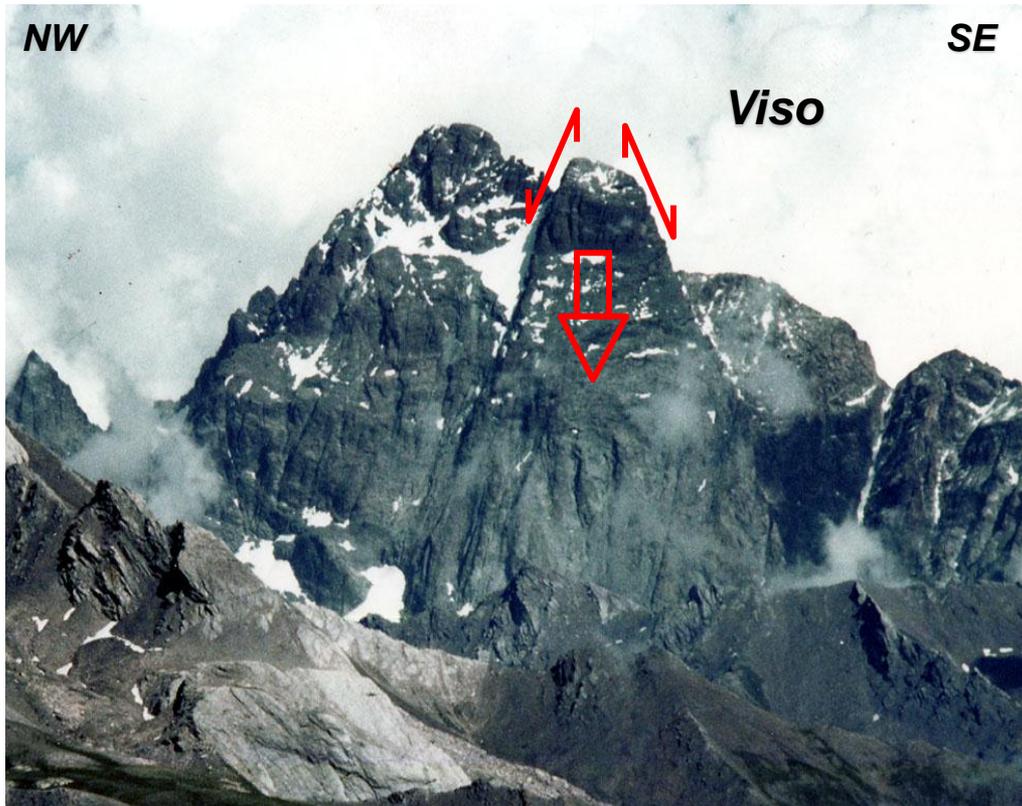
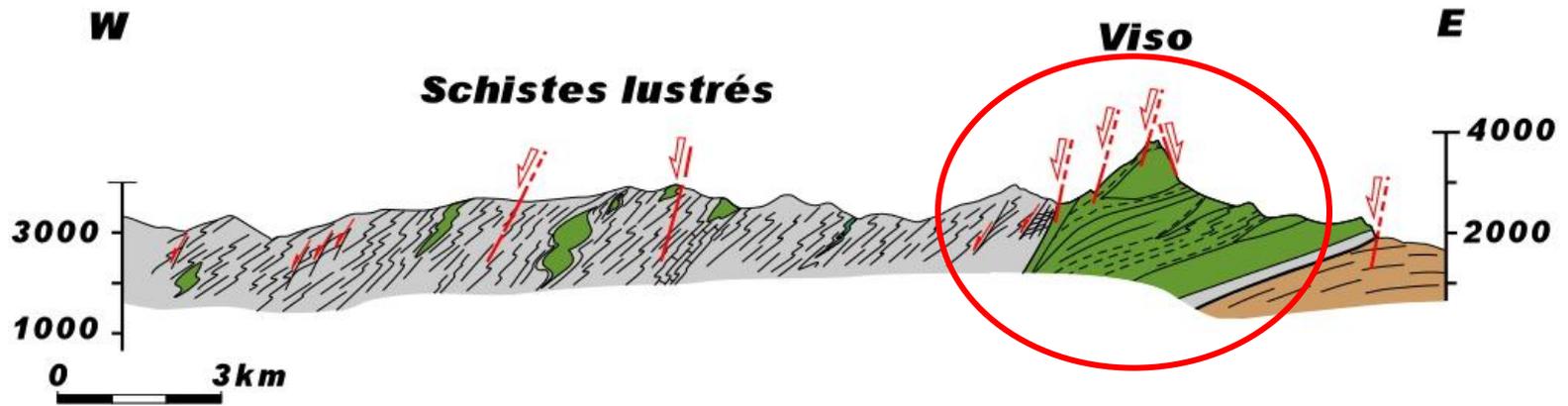


Failles normales

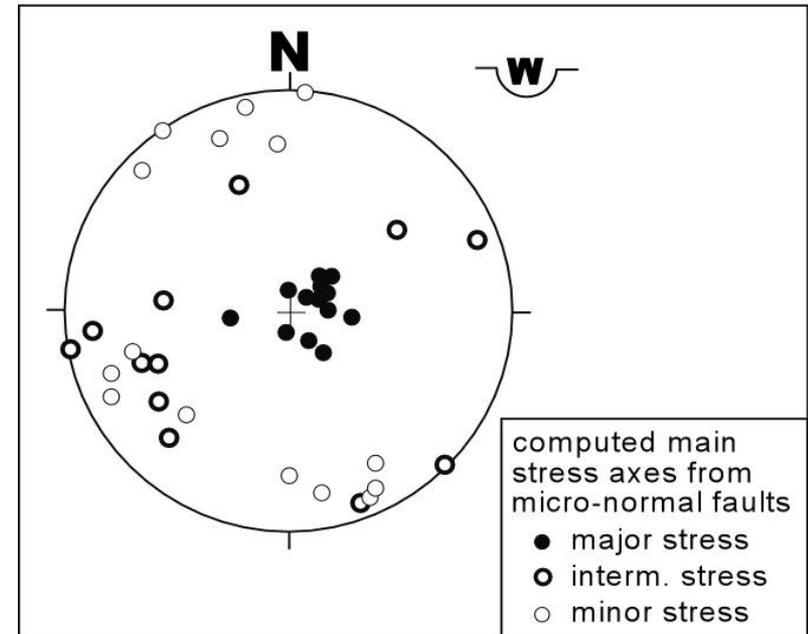


σ_1 vertical et $\sigma_2 = \sigma_3$ horizontaux
 → failles normales (extension multidirectionnelle)

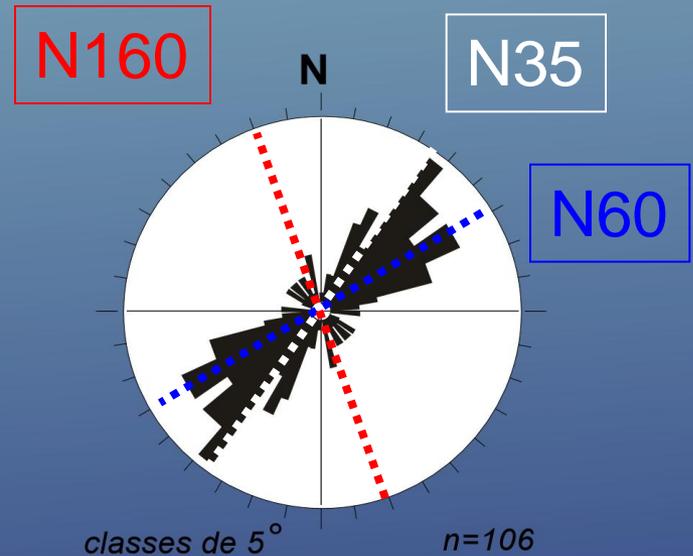
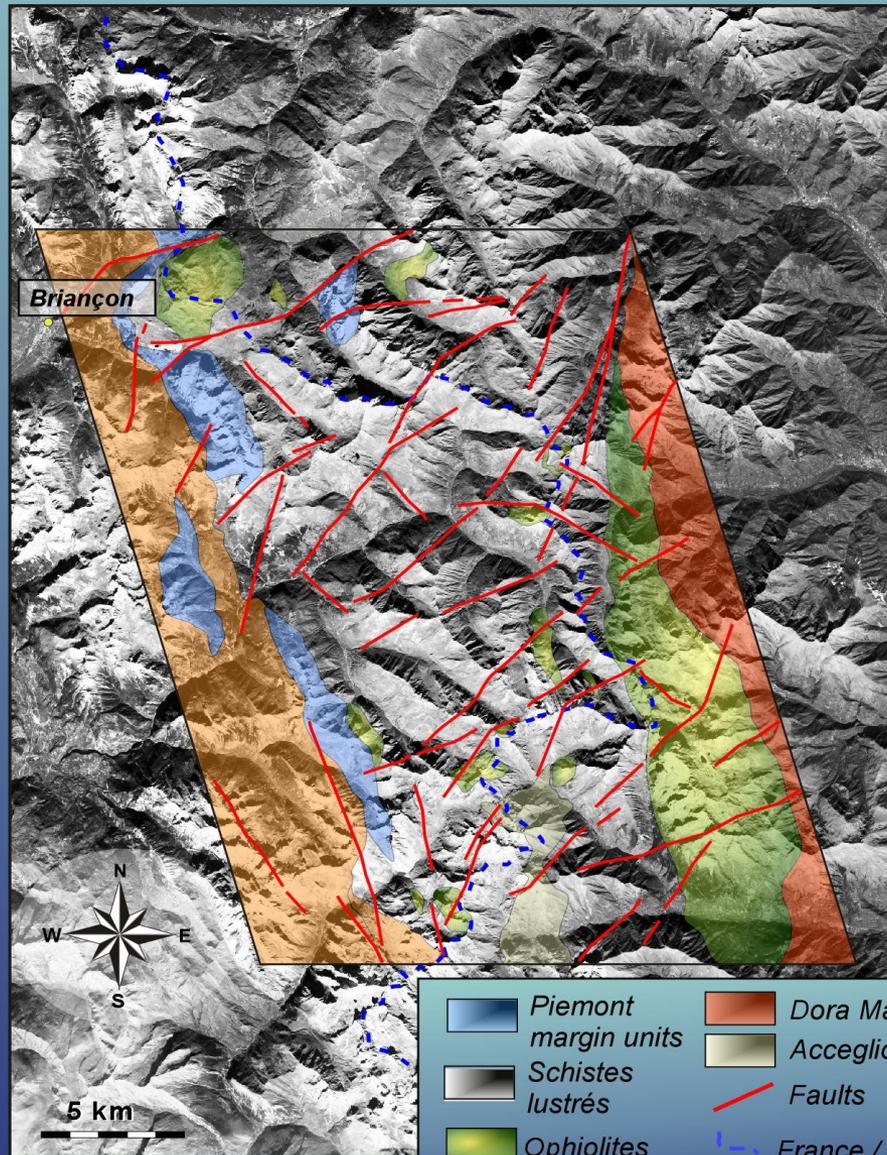
Formation et évolution des Alpes



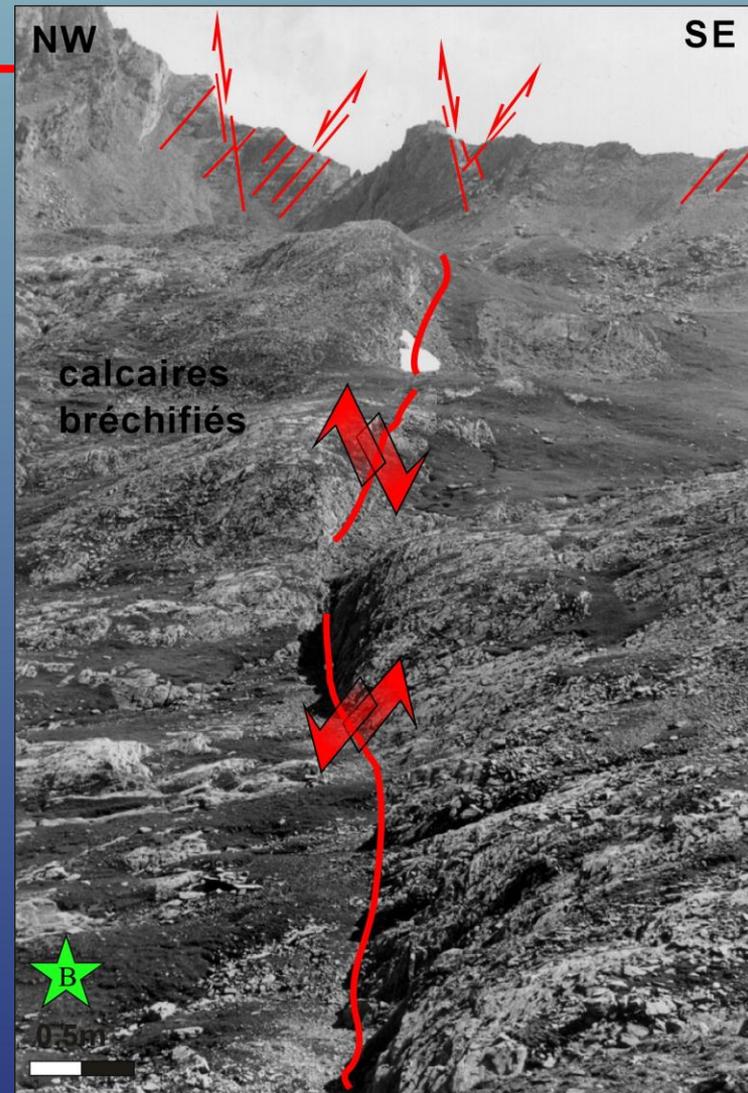
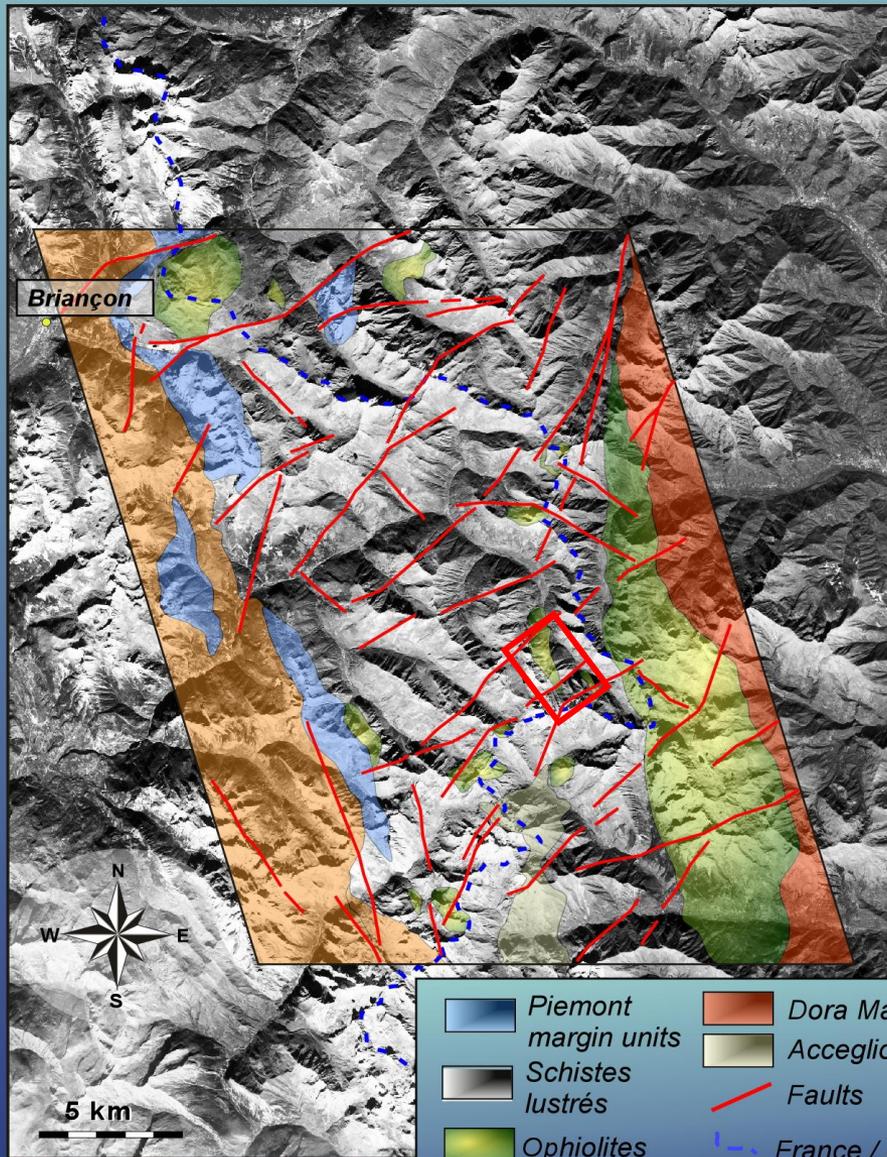
méthodes d'inversion (dièdres droits) sur 520 failles dans le Queyras Viso



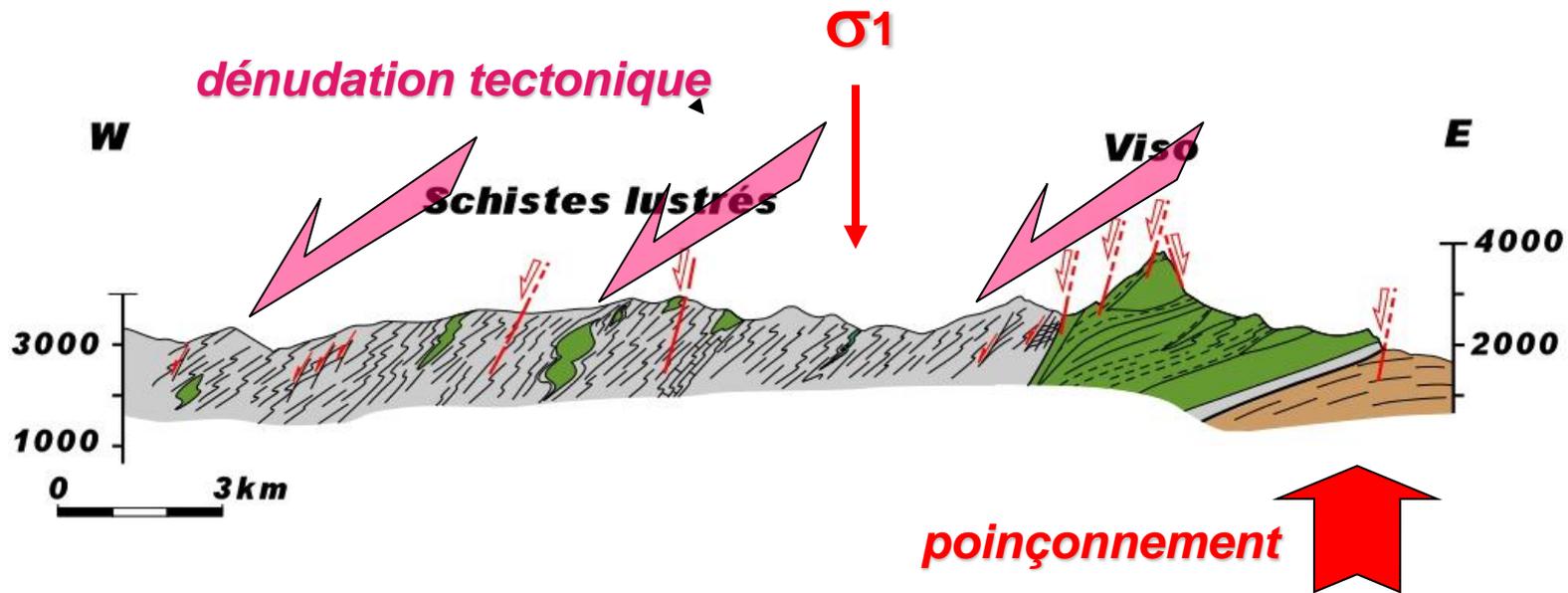
Analyse structurale image SPOT



On retrouve les deux directions d'extension mesurée sur le terrain



déformation cassante
 → failles normales conjuguées
 N60 et N160 → **extension multi-directionnelle**



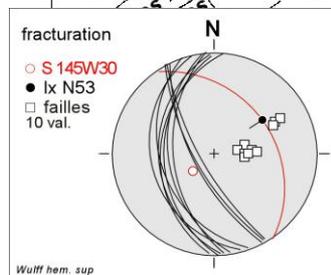
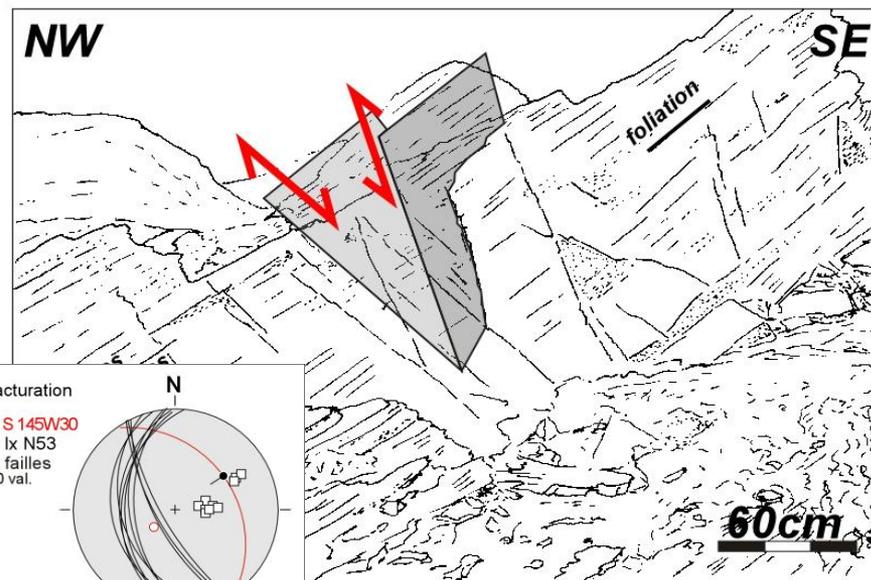
La déformation cassante correspond à une extension multidirectionnelle qui admet un sigma 1 en position verticale....

Compatible avec le modèle d'exhumation par poinçonnement vertical et dénudation tectonique...

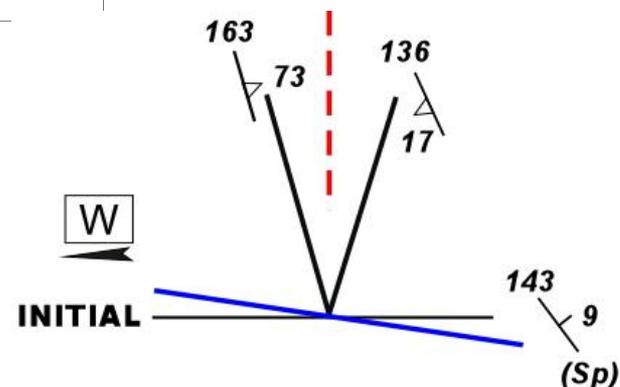
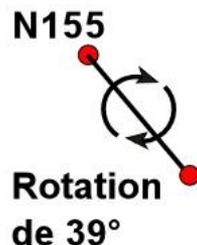
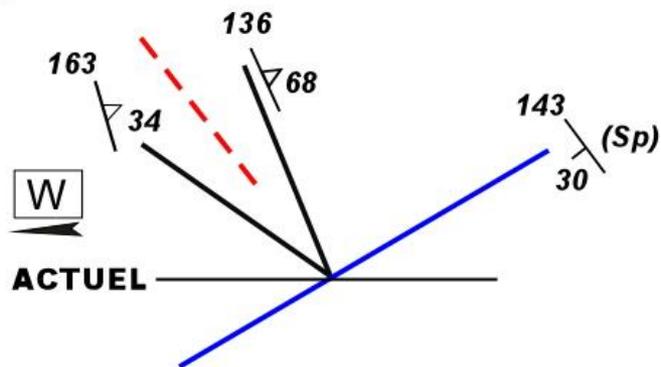
Ce modèle sous entend que le sigma 1 est resté en position verticale durant toute l'exhumation...

Dans le détail c'est un peu plus compliqué car le poinçonnement induit des rotations !!!

Exemple de structures basculées



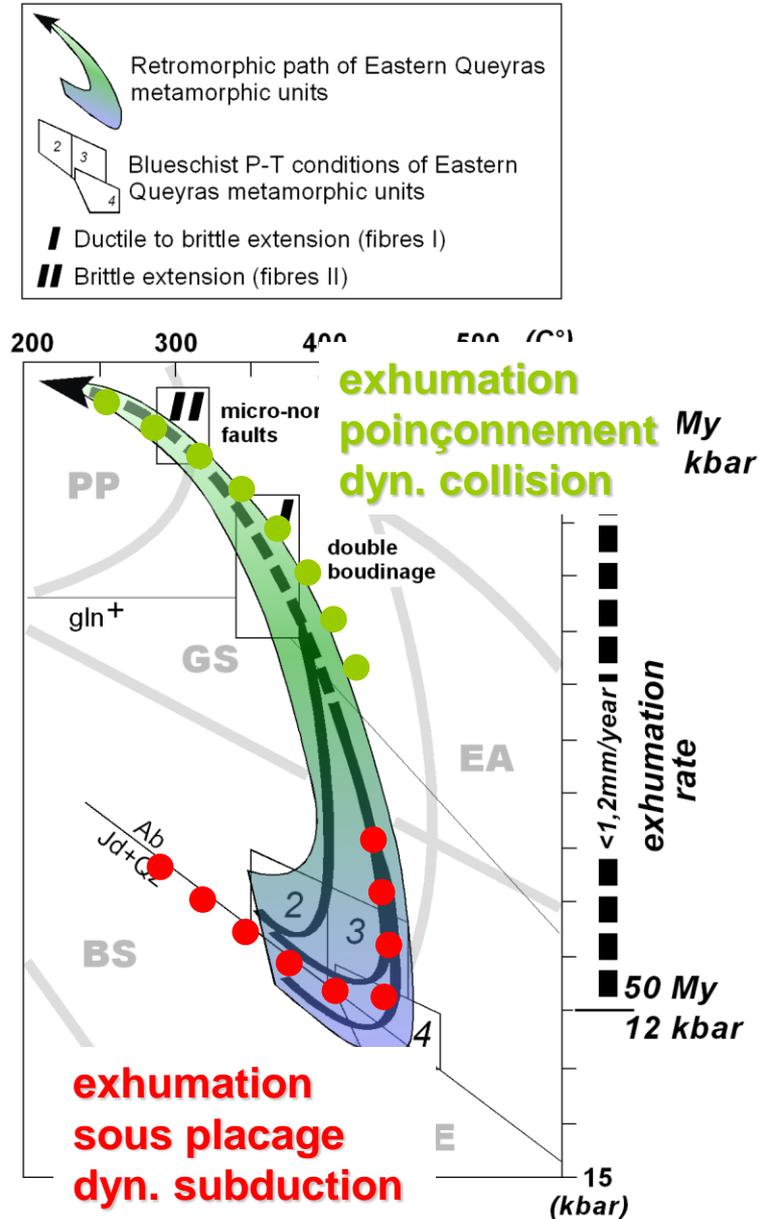
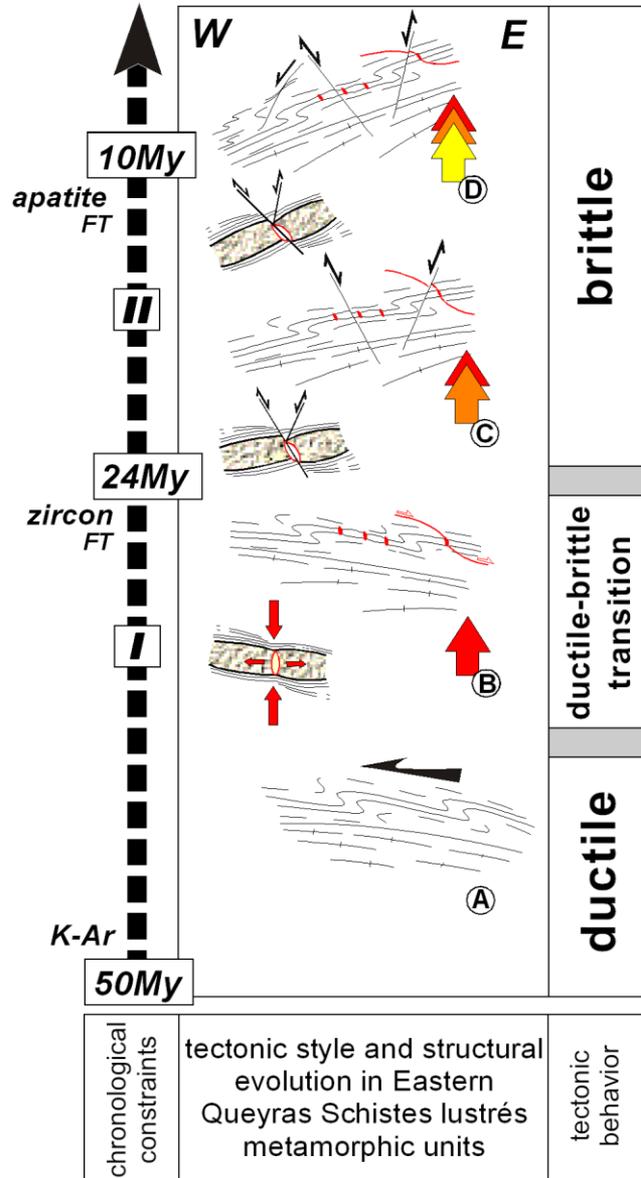
plan bissecteur

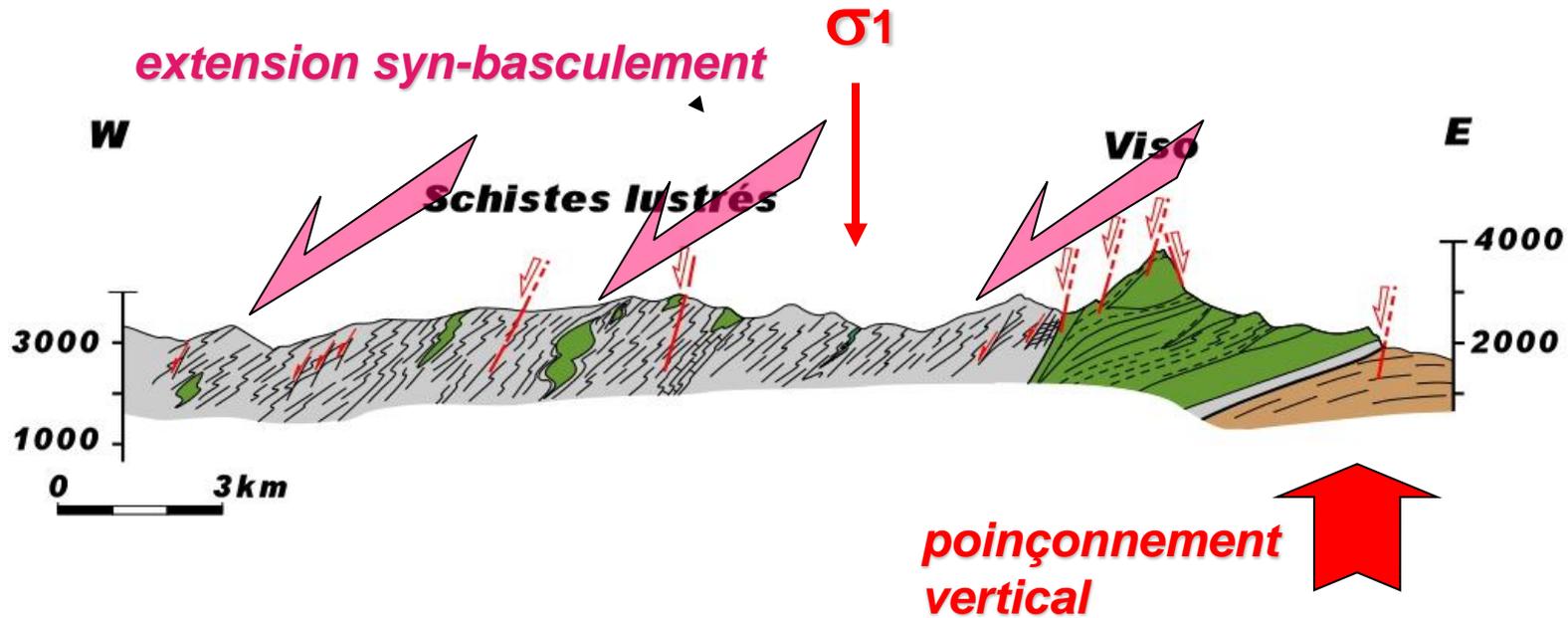


plan bissecteur initialement en position verticale

➔ Géométrie actuelle des failles normales résulte d'un basculement comme celui observé à la transition Ductile / Fragile que l'on peut quantifier...

Formation et évolution des Alpes





Problème:

Il faut trouver un **moteur pour le poinçonnement vertical...**

Que nous dit la géophysique?

Carte indiquant les anomalies du champ de pesanteur...

différence entre une valeur pesanteur **mesurée** en un point et une valeur de pesanteur **calculée sur l'ellipsoïde** de référence.

Cette différence peut être corrigée

-air libre

-topographique

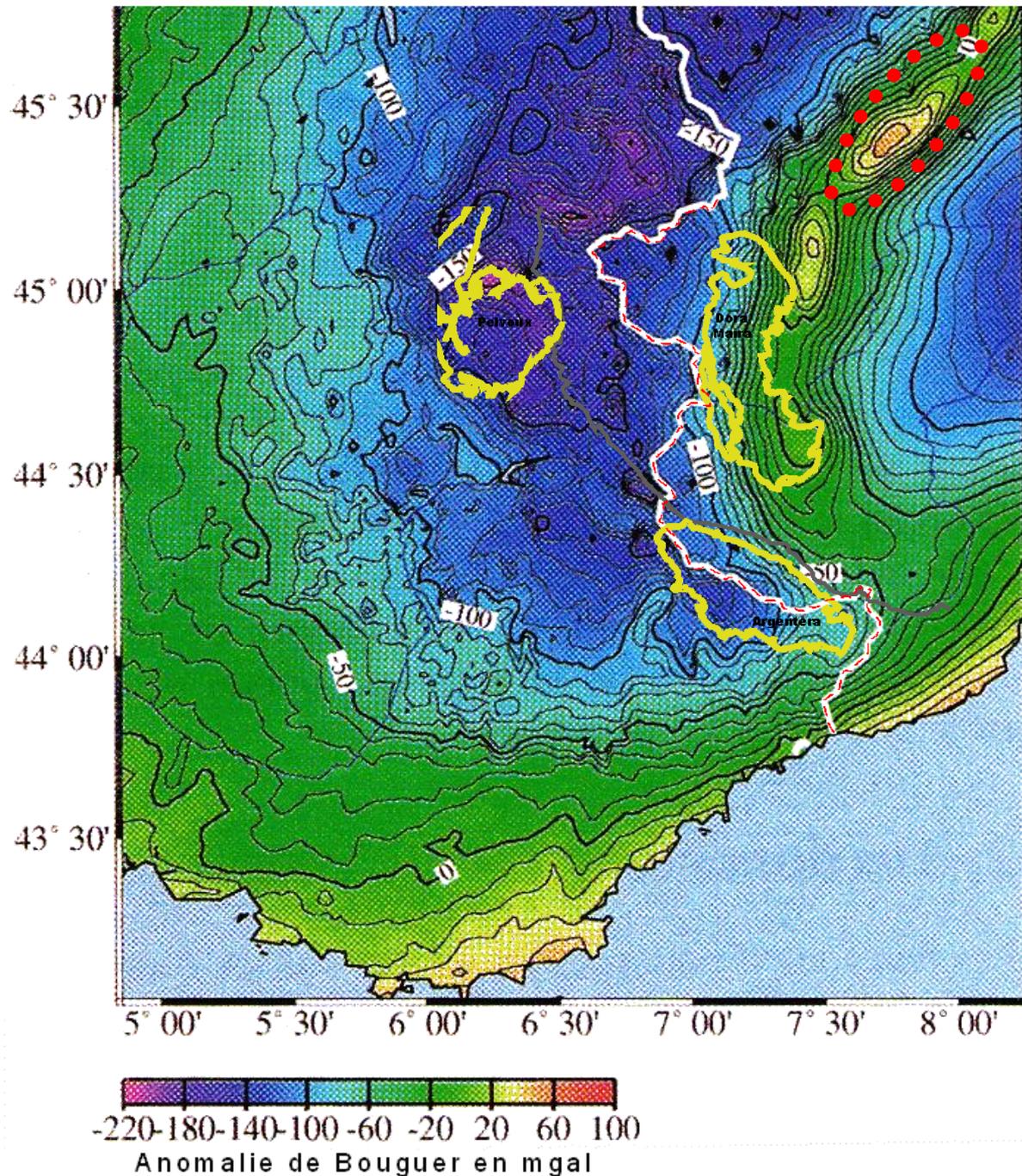


anomalie de Bouguer

Anomalie positive sous les océans et négative sous les continents...

***dans le cas des Alpes occidentales
qu'observe t-on ?....***

données gravimétriques



zones externes
→ anomalies négatives
déficit de masse en
profondeur...

épaississement crustal
et bassins sédimentaires

zones internes
→ anomalies positives
excès de masse en
profondeur...

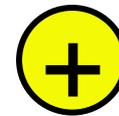
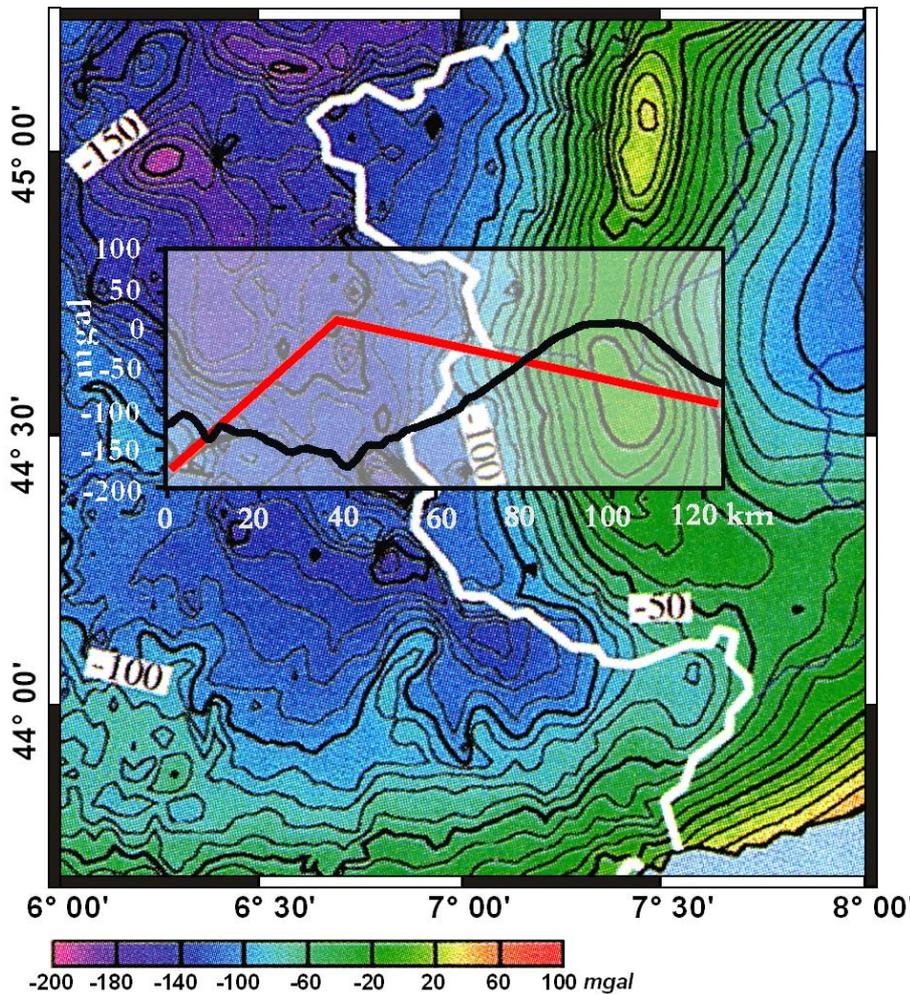
présence de manteau
à l'affleurement →
corps d'Ivrée

données gravimétriques

Anomalie positive à la verticale de Dora Maira

prolongement sud du corps d'Ivrée?

manteau à faible profondeur...



Penninic frontal thrust

Briançonnais zone

Queyras Schistes lustrés

Dora Maira massif

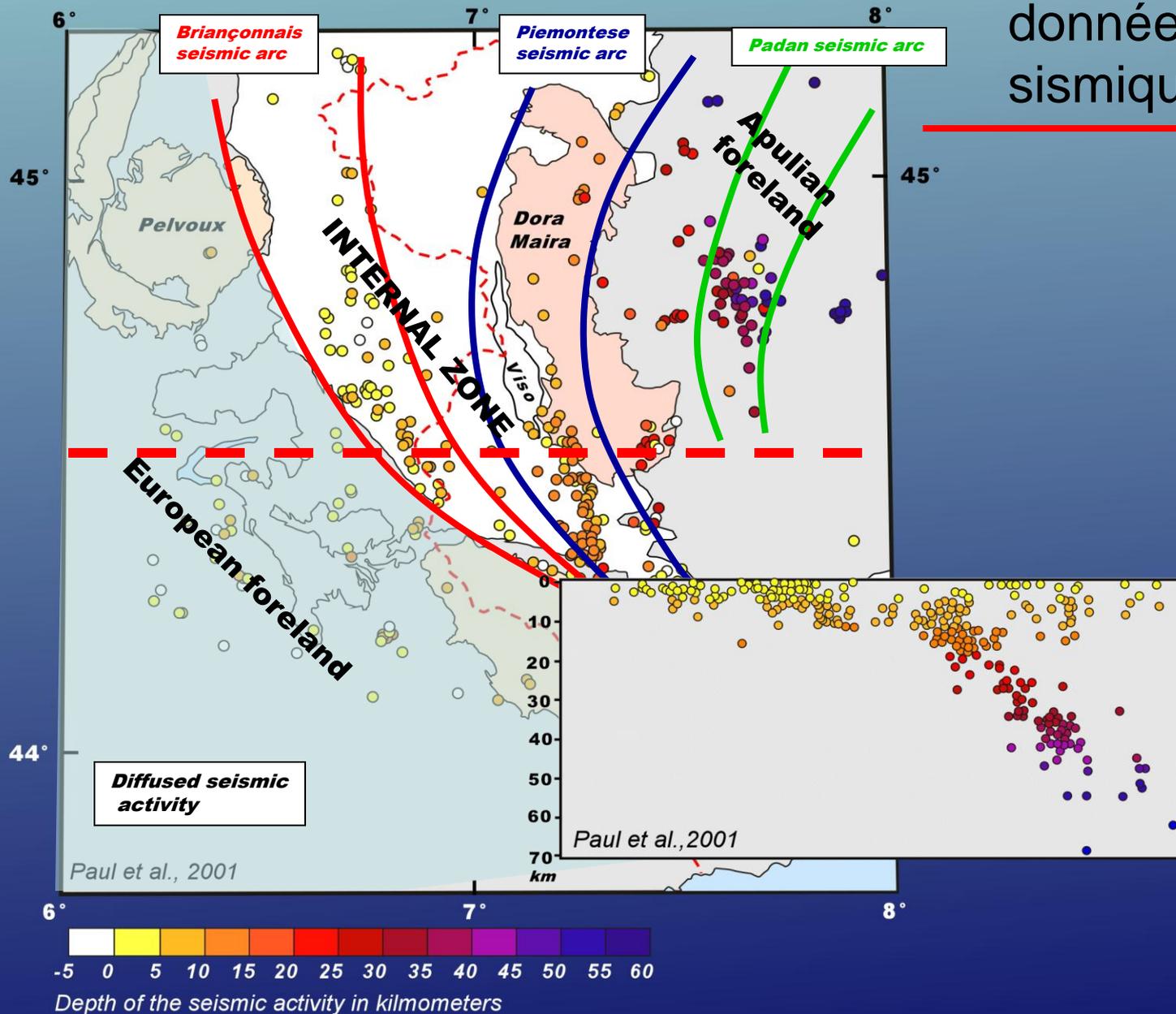
Pelvoux massif

Viso ophiolites

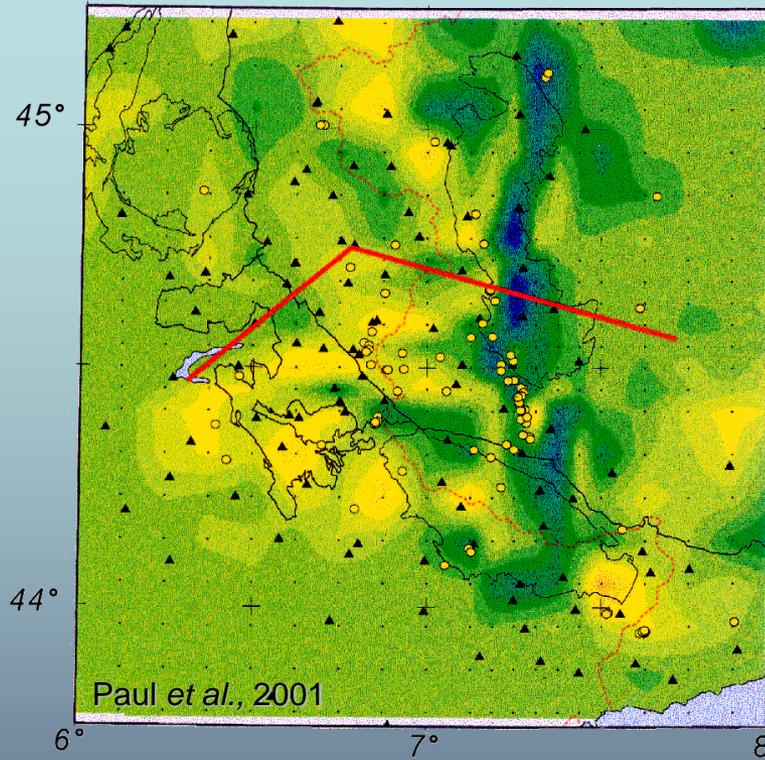
0 10 km

4000 m
2000 m
0
-2000 m

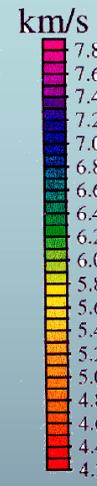
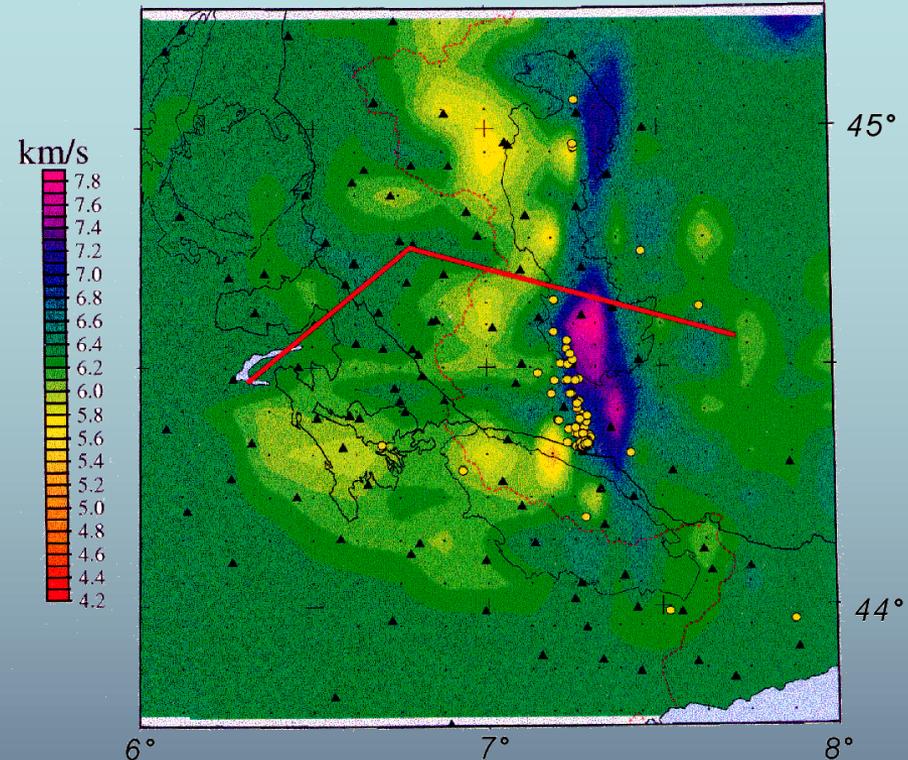
données sismiques



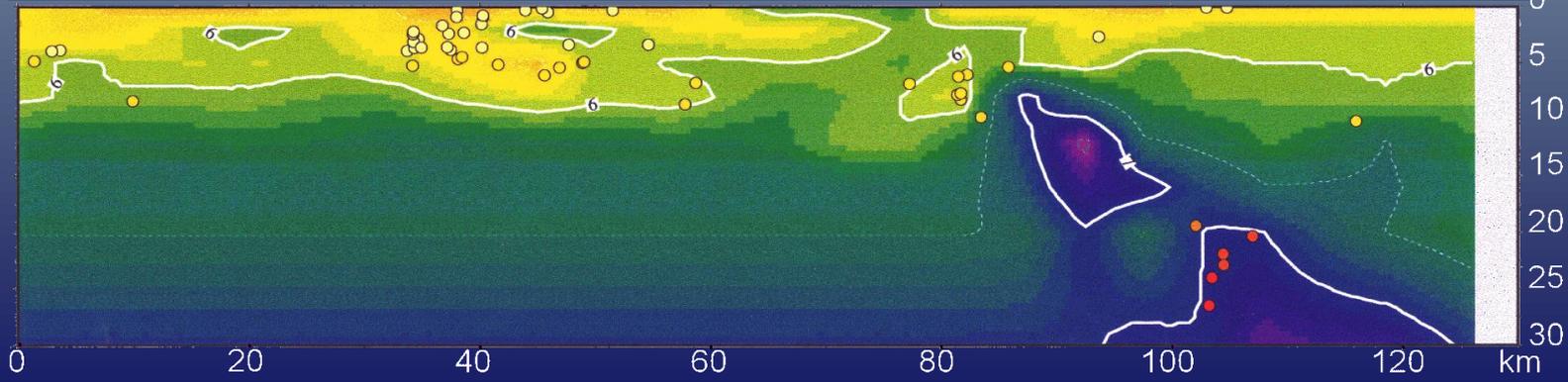
P-wave velocity-Depth 8km

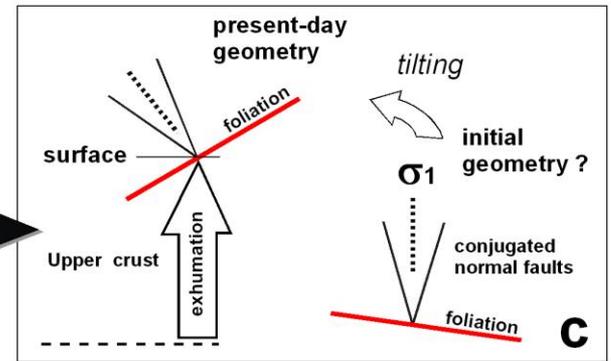
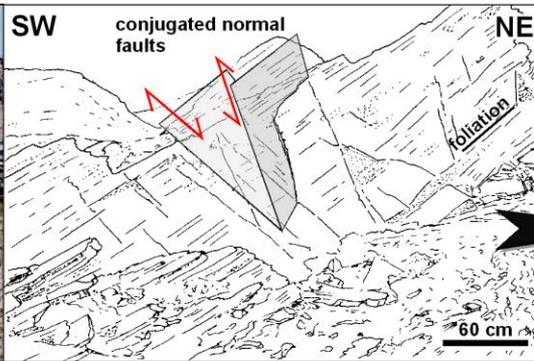
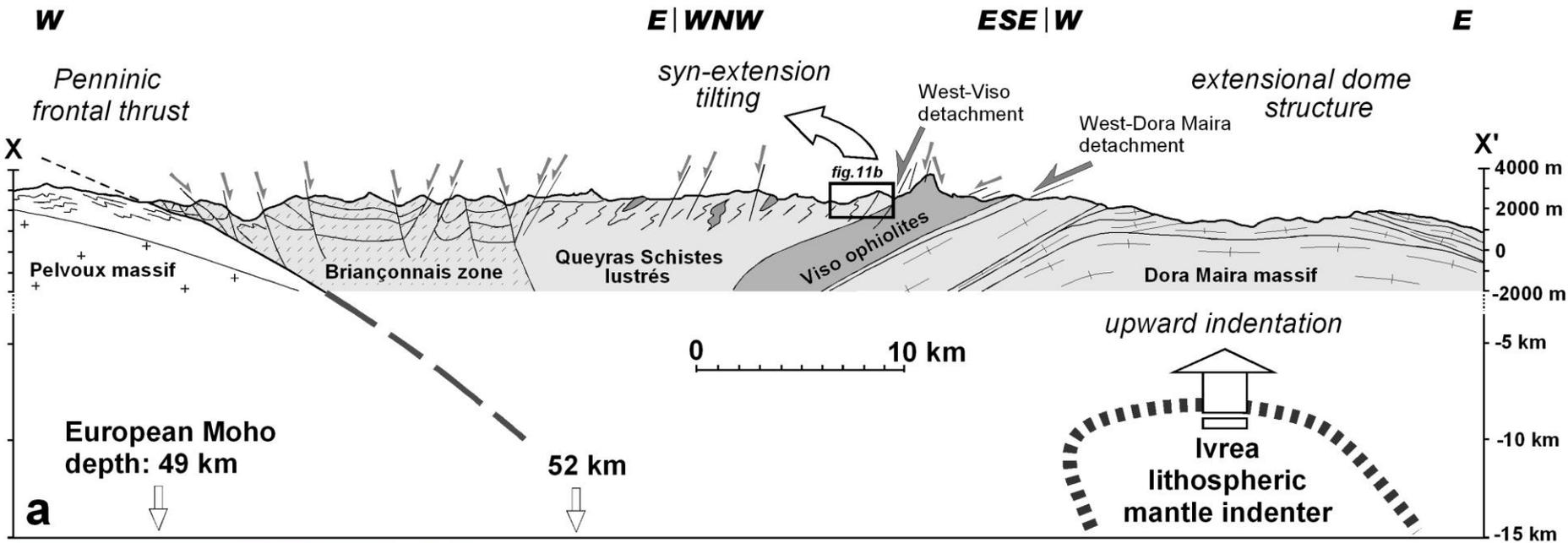


P-wave velocity-Depth 12km



SW | Dauphinois | Briançonnais | Schistes lustrés | Viso | Dora Maira | Pô Plain | SE

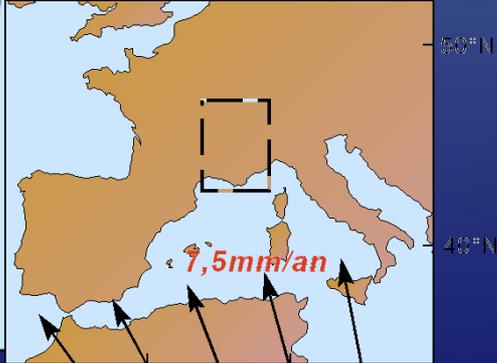
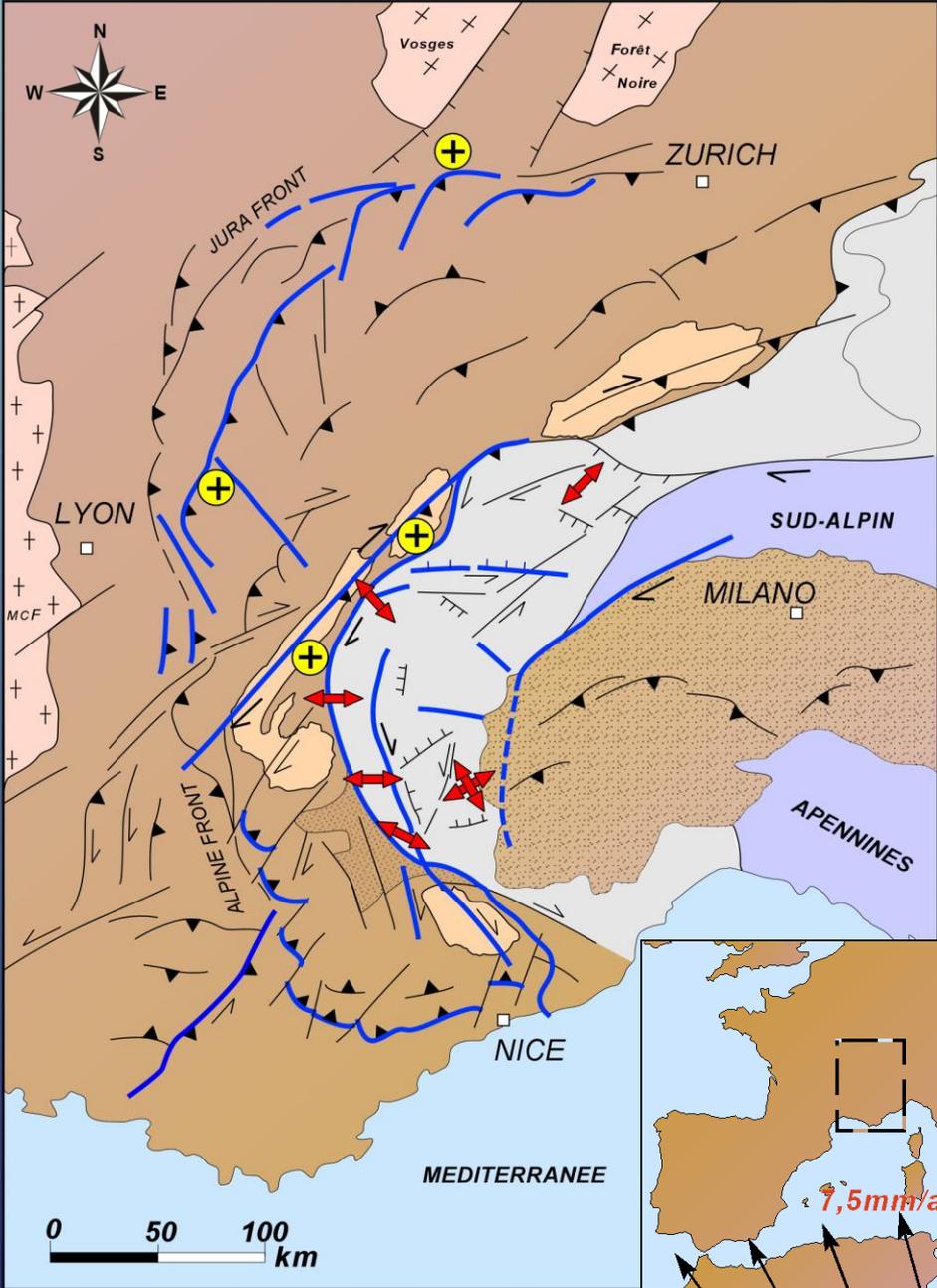


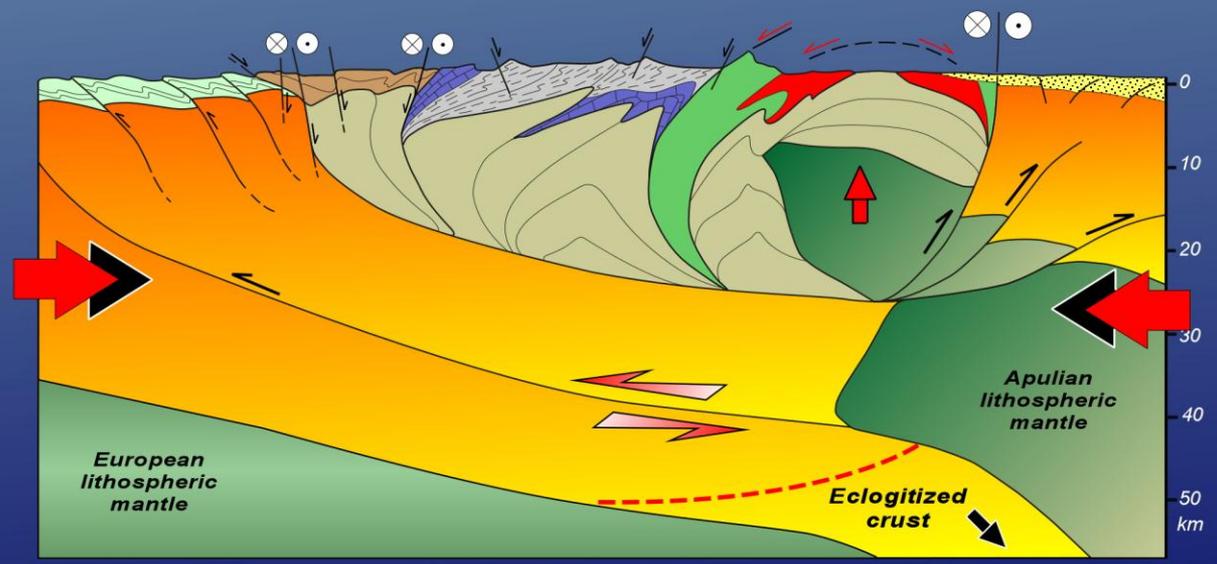
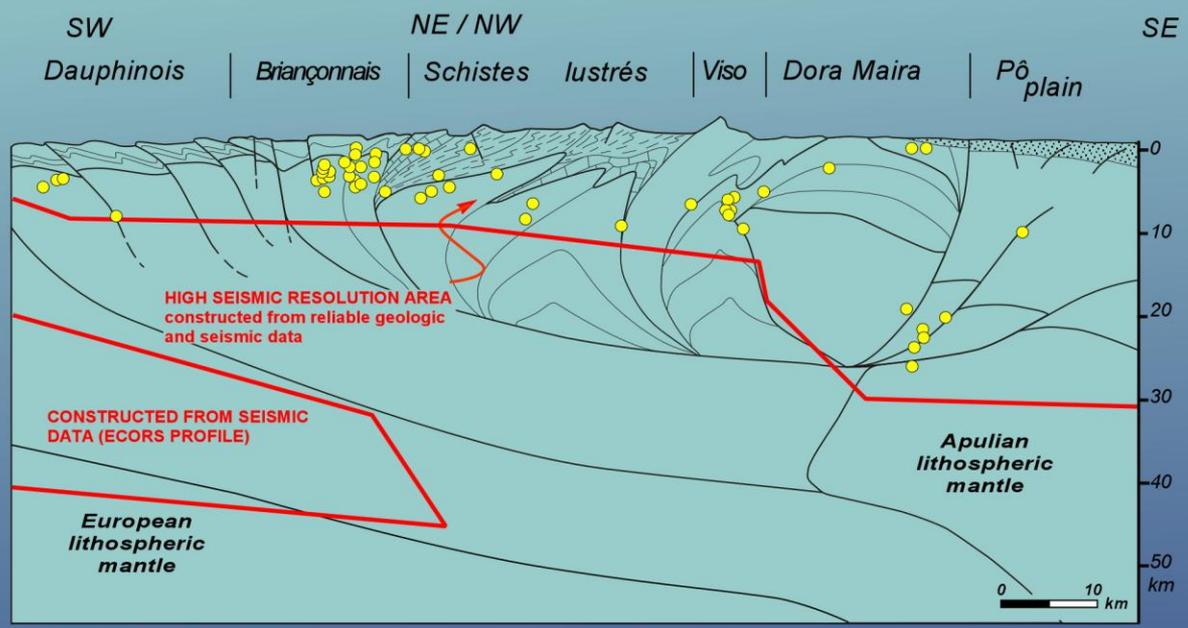


Moteur de l'exhumation → **poissonnement vertical** lié à l'existence d'un **indenteur mantellique** sous les zones internes
 Peut-il être responsable du partitionnement de la déformation actuelle à l'échelle des Alpes occidentales??

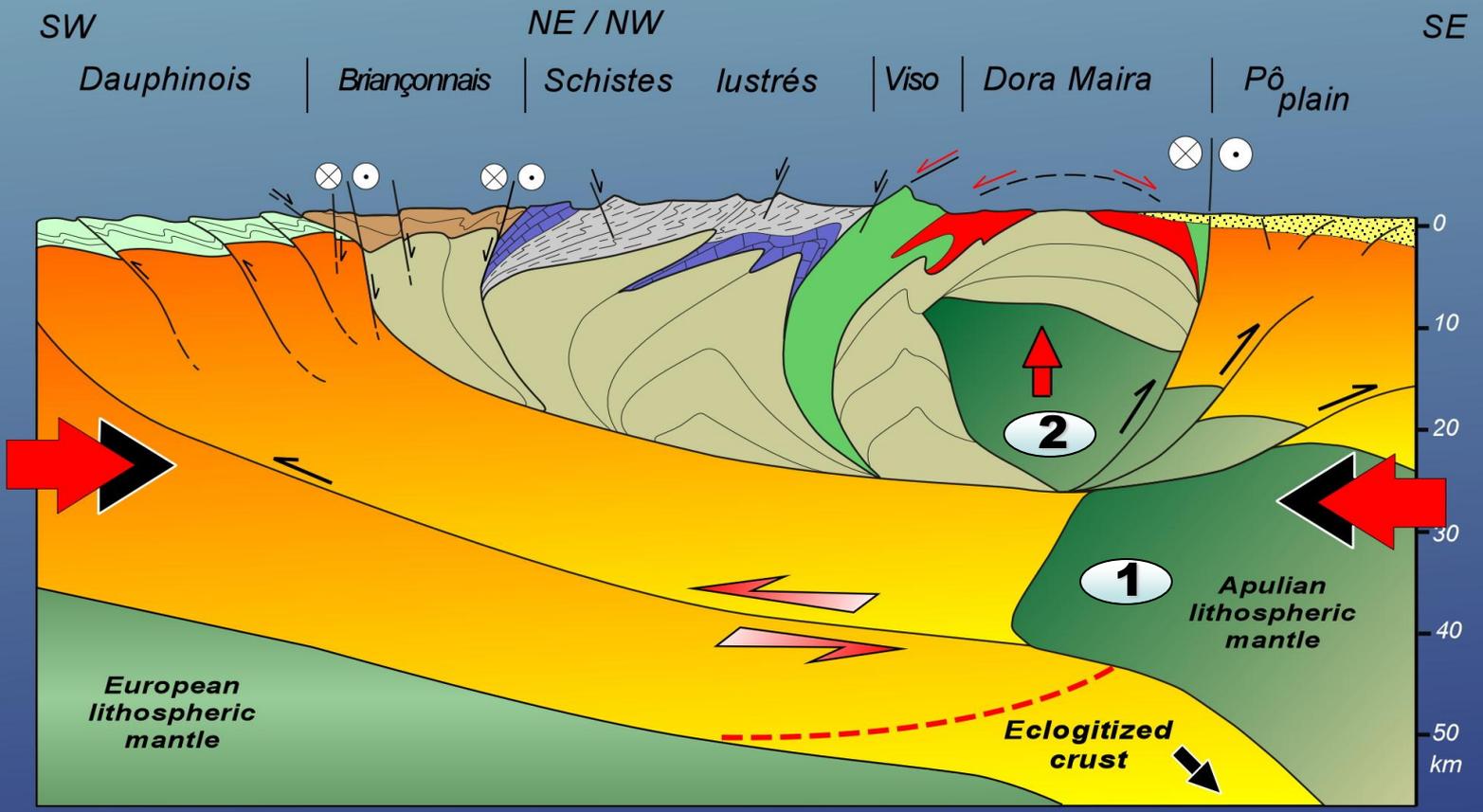
Champ de déformation actuel des Alpes occidentales

-  major structures
-  thrusts
-  area in surrection
-  strike slip component
-  Internal domain
-  direction of extension
-  multidirectional extension



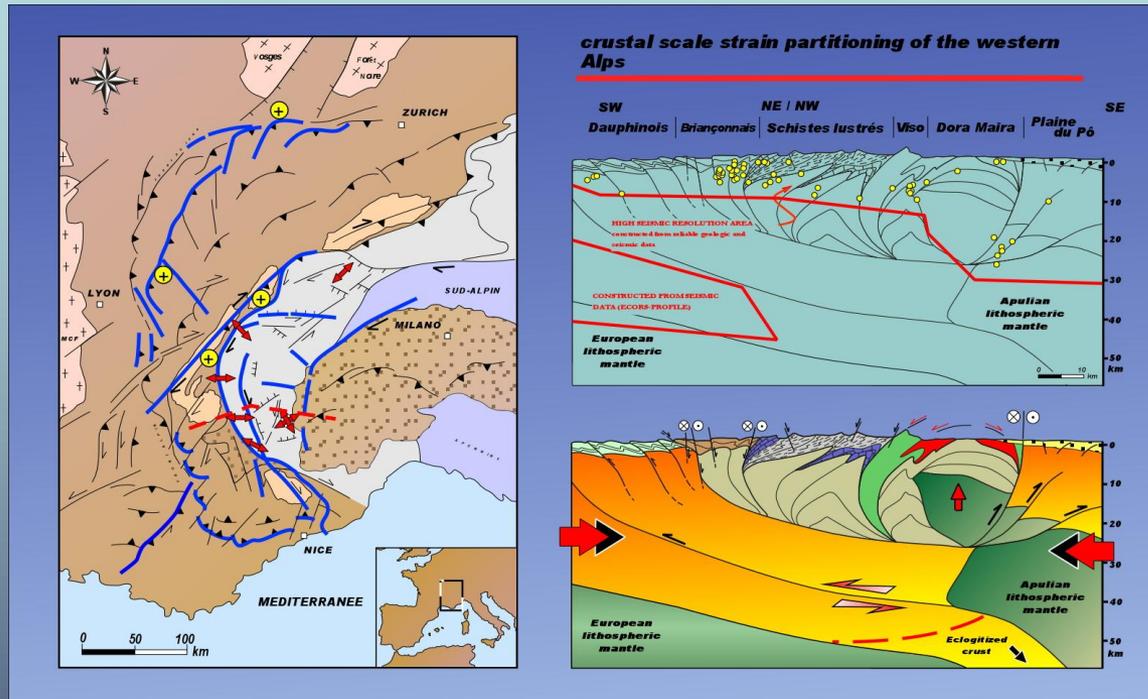


2-raccourcissement de la croûte apulienne et indentation verticale de la pile tectonique...

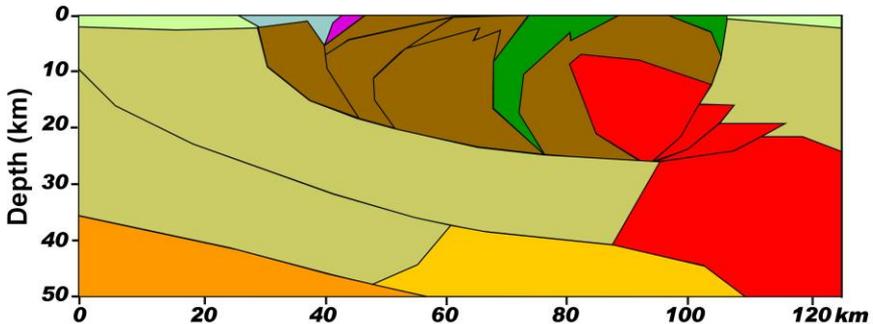
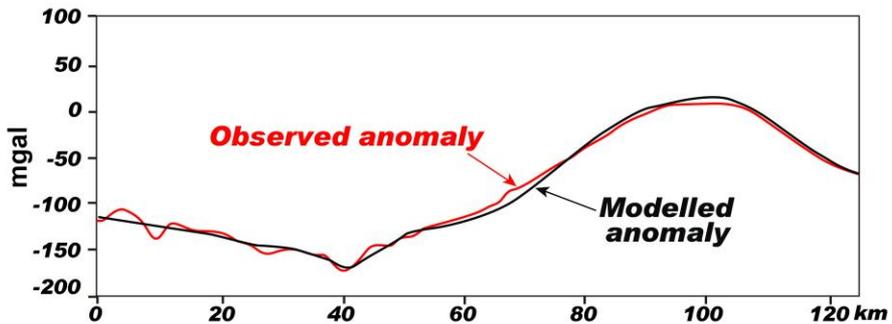
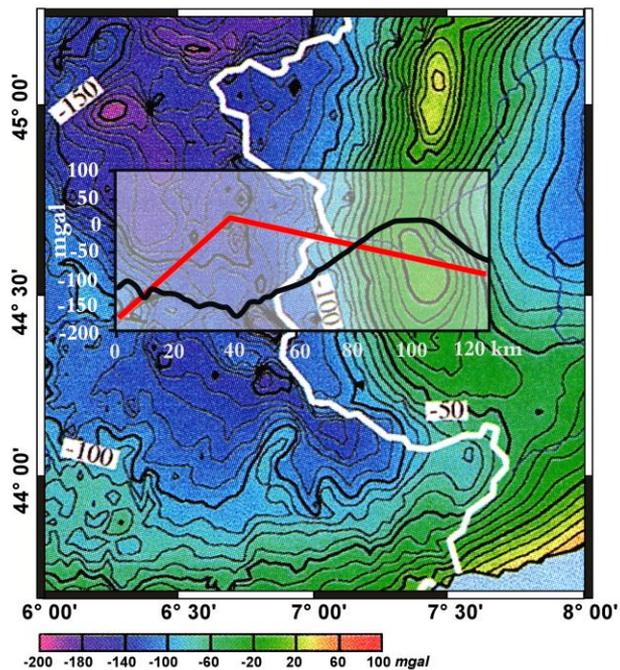
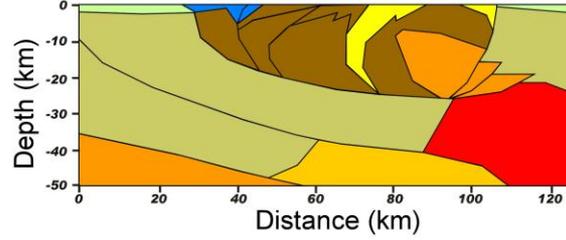
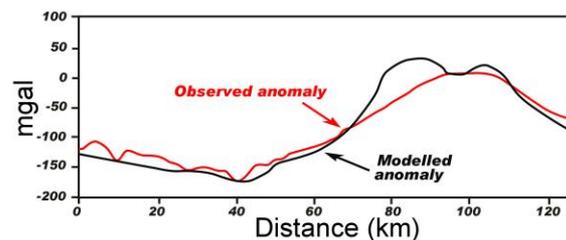
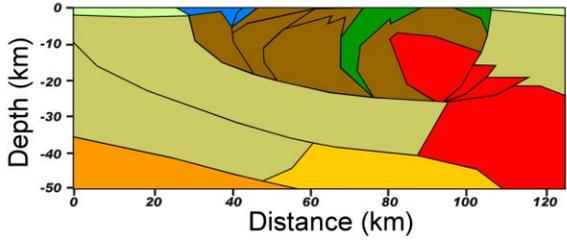
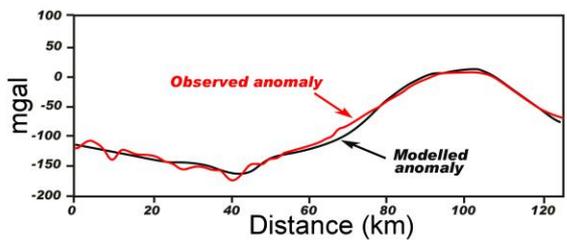
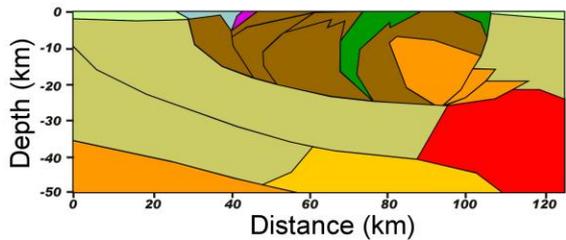
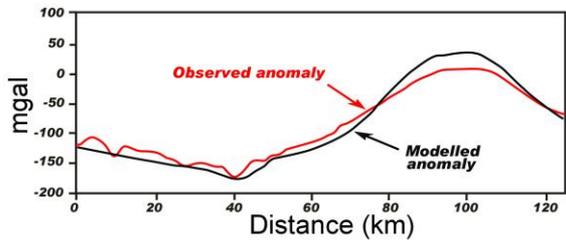


1-Transfert la compression sur l'avant pays européen et est responsable du raccourcissement observé dans la zone Dauphinoise.

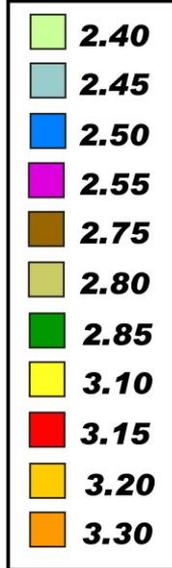
Dans un tel modèle



Extension syn-convergence correspond à l'accommodation des déplacements résultant d'une extrusion verticale imposée par le raccourcissement actuel entre les plaques Afrique et l'Europe...



Density
(g/cm^3)

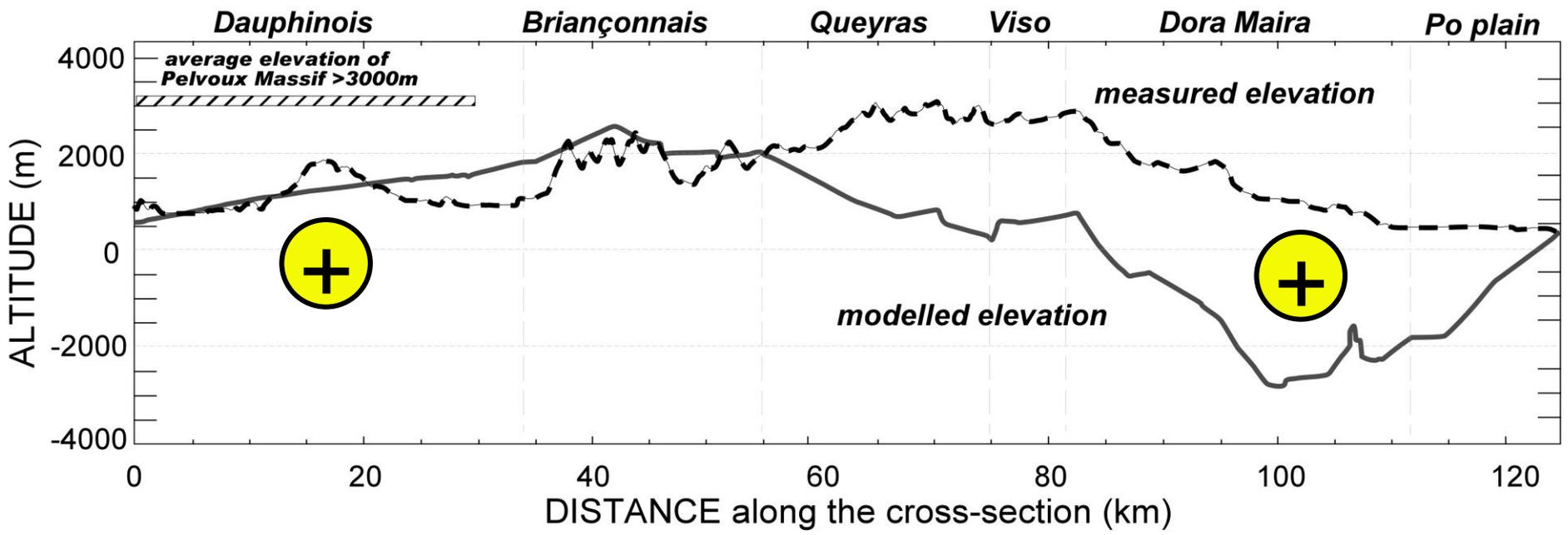


implications en terme d'équilibre topographique...

altitude réelle
+ élevée

équilibre

altitude réelle
+ élevée



rôle de la géométrie profonde de la chaîne ??