



G3 : Les transformations minérales du métamorphisme

Alix Helme-Guizon, BCPST-Véto Angers 2014

Définition

- définition : transformation à l'état solide d'une roche, sans modification de la composition chimique globale (isochimique), excepté les fluides
- on exclut la diagenèse (<250°C), magmatisme
- on inclut le métamorphisme hydrothermal

Causes:

- 1- impact de météorite (Rochechouart)
 - 2- hydrothermal -> *voir cours océan*
 - 3- contact avec un pluton = de contact
 - 4- régional = général
- 3+4 → *objet de ce cours*

Problématique



Problématique



- (en lien avec cours océan)

Pourquoi la densité de la lithosphère océanique et son hydratation changent-elles avec la profondeur?

- (en lien avec cours déformation)

Les roches profondes de la croûte sont-elles identiques pétrologiquement à celles de surface?

- (en lien avec le TP ou sortie de terrain)

Il existe de très nombreuses roches nommées « schistes ». Ont-elles toutes la même origine?

Comment apparait la foliation dans une roche?

- (en lien avec cours de thermodynamique chimique)

les réactions chimiques en phase liquide peuvent être sensibles à P et T, en est-il de même pour les réactions de transformation des minéraux?

1. Les associations minéralogiques sont indicatrices de la pression et de la température

Roches sédimentaires



Fossiles, faciès sédimentaire



Contexte géographique
et climatique

Roches magmatiques



Composition chimique



Contexte géodynamique
(dorsale, point chaud, subduction)

Roches
métamorphiques



?



Conditions de
pression et température



Contexte géodynamique
(type de chaîne de montagne,
contact avec un pluton,
hydrothermalisme)



1.1. Les minéraux d'une roche peuvent se transformer à l'état solide en d'autres minéraux, on obtient ainsi une roche métamorphique

11.1. On identifie une roche métamorphique par la présence d'une schistosité et/ou des minéraux métamorphiques

Une roche métamorphique présente une schistosité si elle s'est formée en conditions anisotropes

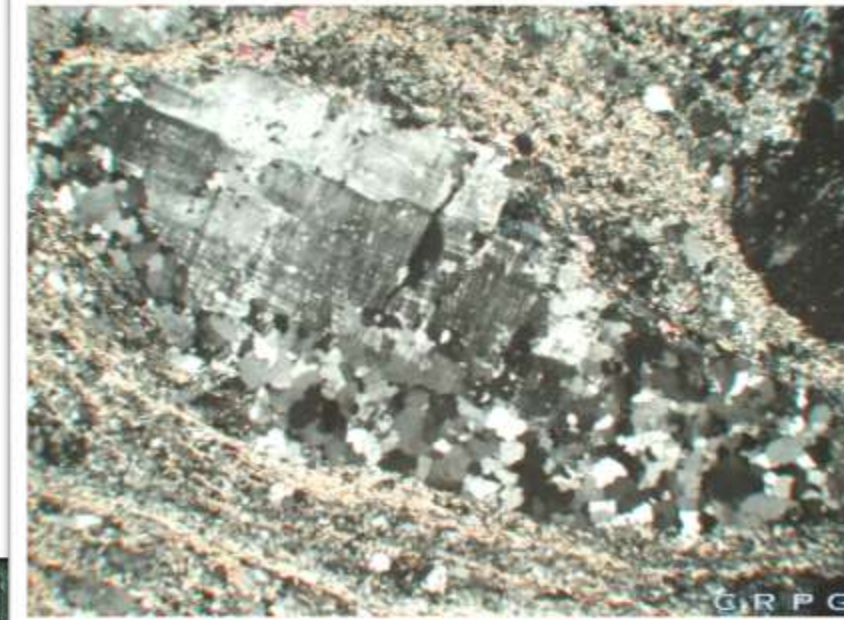


Voir cours déformation

Gneiss œillé

Gneiss, foliation

MILLIMÈTRES



Schistosité ardoisière, foliation

schiste



CRPG



Migmatite



Mais une roche métamorphique n'a pas toujours de schistosité !



Marbre
Ici cipolin = aragonite



Michel-Ange
Carrare

Une roche métamorphique peut être identifiée par des minéraux métamorphiques

Éclogite

On identifie une éclogite par l'association omphacite + grenat



Grenat

Clinopyroxène de type jadéite = omphacite

11.2. On identifie la roche initiale par analyse de la composition chimique globale de la roche métamorphique, en ajoutant ou retranchant des fluides (eau et CO₂)

Roche initiale
(protolithe)
Composition A

CONTEXTE
géodynamique

ΔP ΔT

CO₂ H₂O

Système presque fermé

Roche
métamorphique

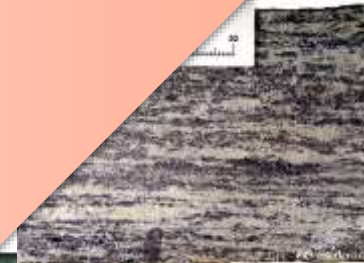
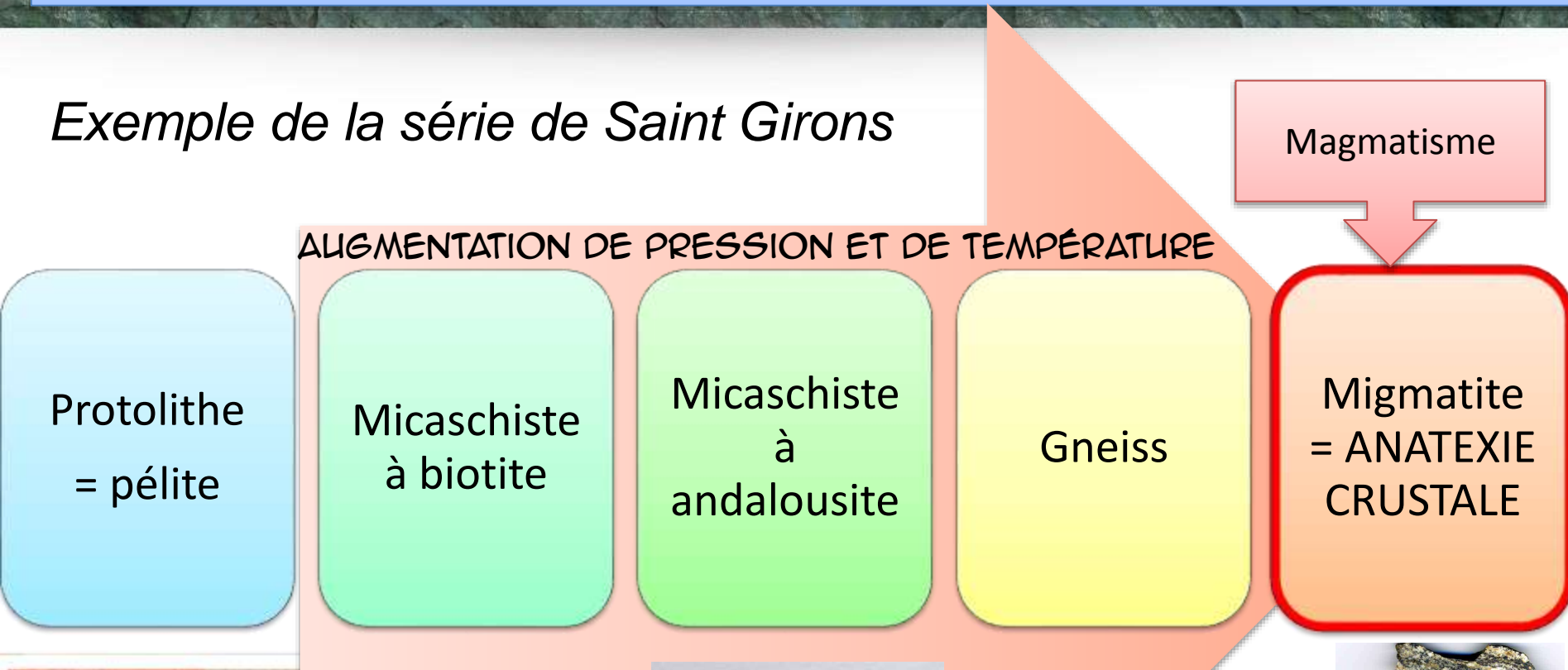
Composition A sauf ajout ou retrait de fluides

Les métamorphisme est isochimique, aux fluides près



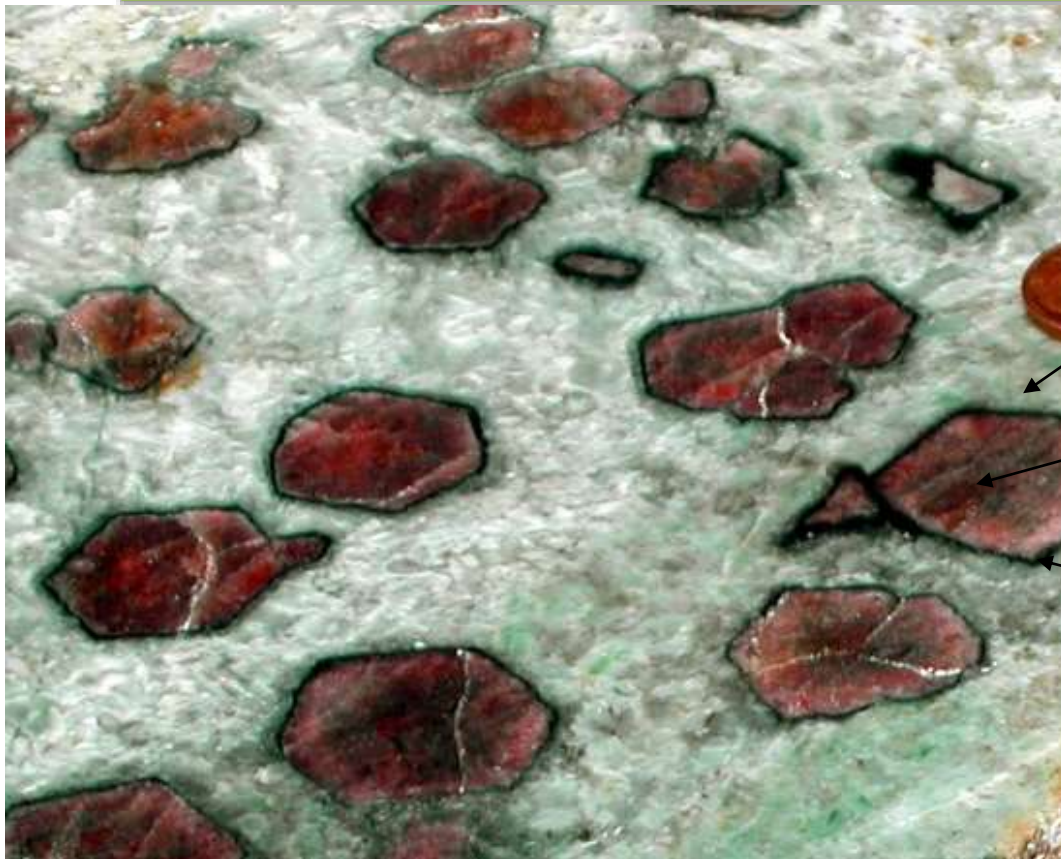
Une série métamorphique est l'ensemble des roches qui dérivent d'un **même protolithe par transformation à l'état solide** lors de variations de pression et/ou température

Exemple de la série de Saint Girons



1.2. Les réactions du métamorphisme sont régies par la cinétique chimique et sont donc souvent incomplètes, ce qui permet de les identifier

12.1. Une réaction incomplète fait coexister les minéraux réactifs et produits, souvent identifiables par des couronnes réactionnelles



omphacite

+

grenat

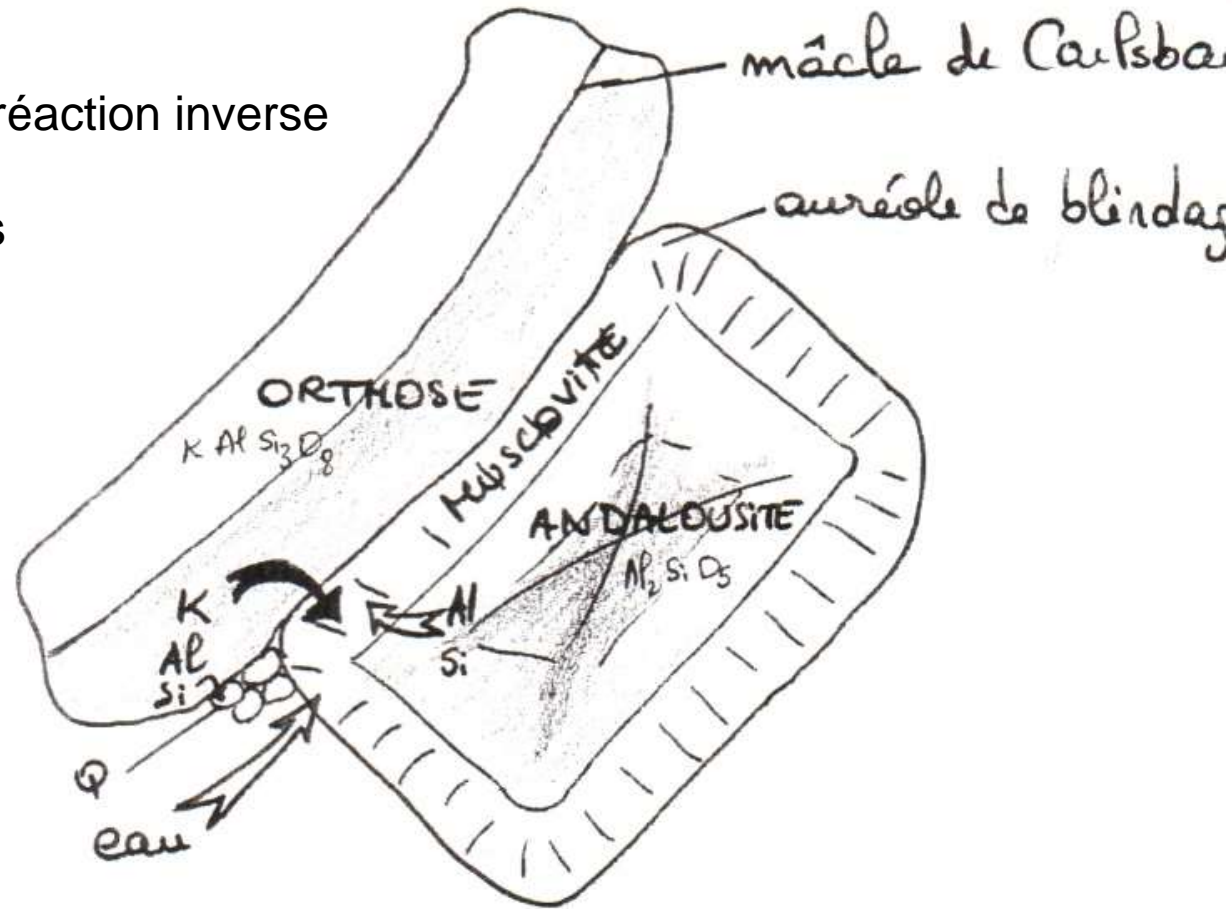


Amphibole en couronne

réaction coronitique et auréole de blindage

Bloque la réaction inverse
(diffusion)
→ reliques

$\mu + Q = \text{orthose} + \text{silicate}$
 $\text{d'alumine} + \text{eau}$



Réaction rétrograde coronitique **

1. une roche métamorphique

a) présente toujours des plans parallèles qui forment une schistosité

b) a fondu partiellement

c) s'est transformée en restant complètement solide

d) a changé de composition en se transformant

e) contient toujours des couronnes réactionnelles

2. on reconnaît

a) un schiste à la présence de micas et de grenats

b) un schiste à la présence de plans parallèles dans la roche

c) une éclogite à la présence de plans parallèles dans la roche

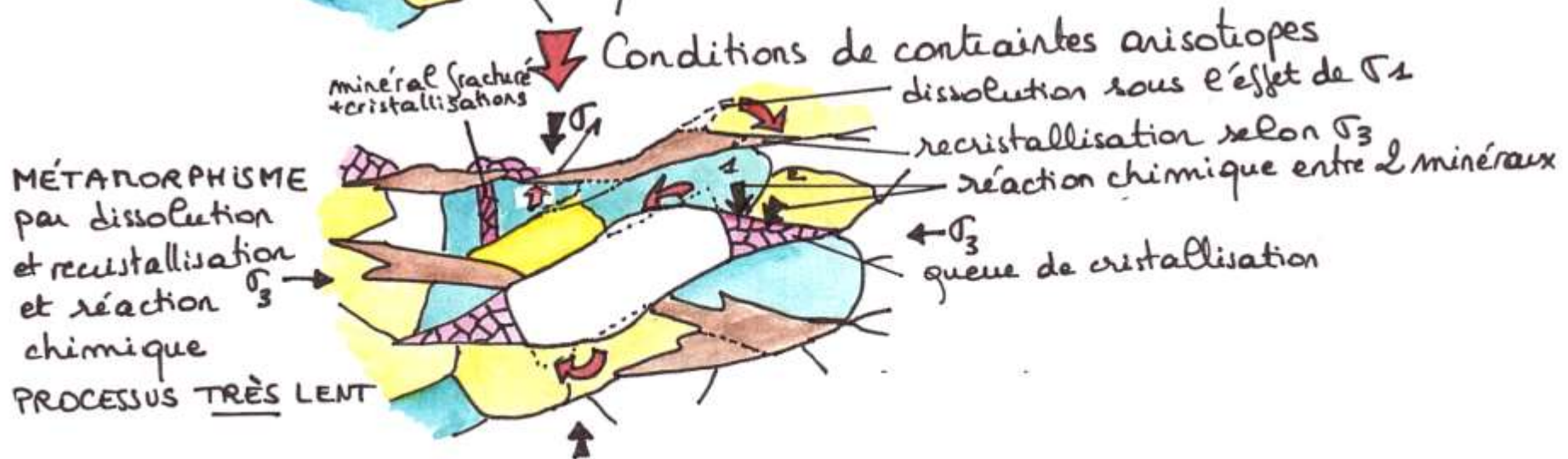
d) une éclogite à la présence d'omphacite et de grenat

e) une migmatite à la présence de lits clairs et de lits sombres

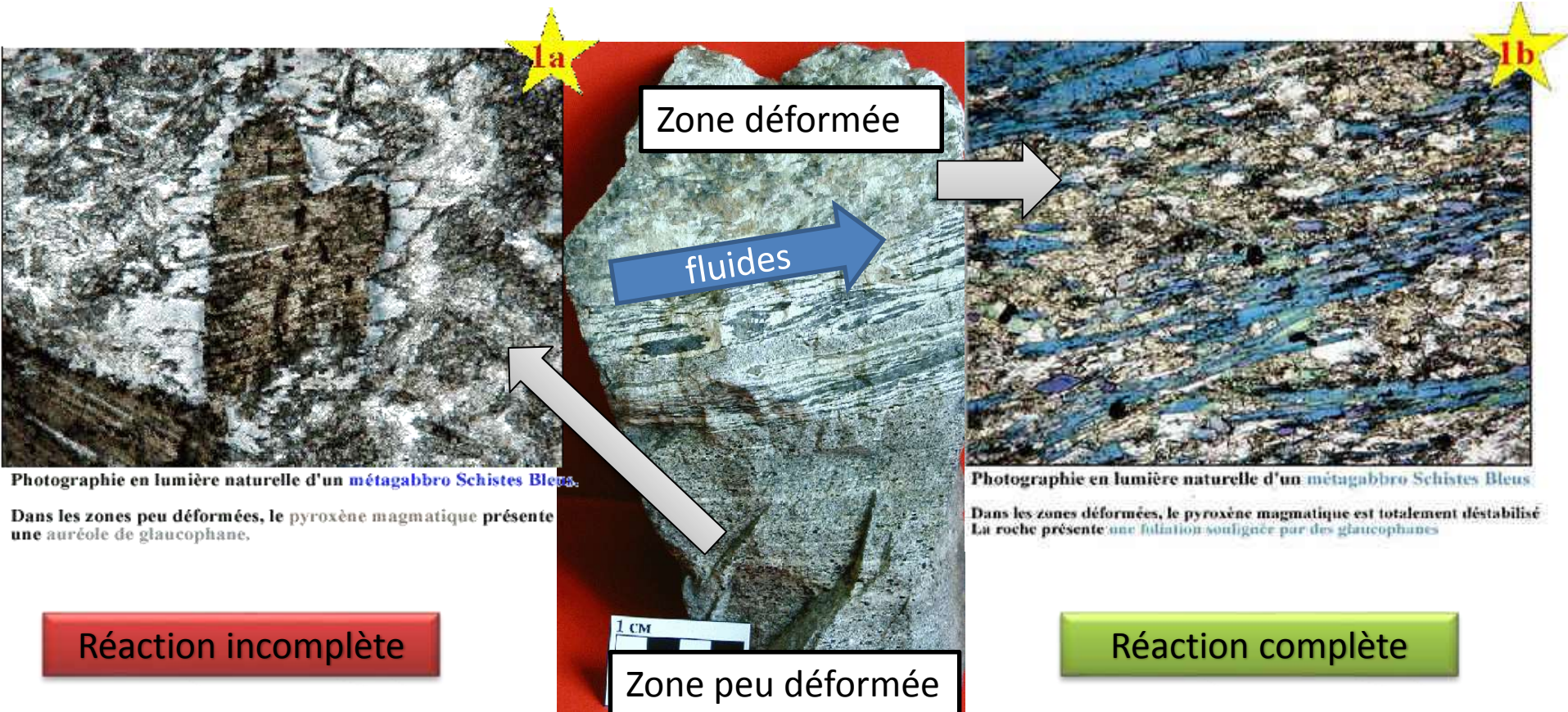
f) un gneiss à la présence de lits clairs et de lits sombres

g) un marbre à sa surface brillante

12.2. Les déformations et les réactions chimiques s'amplifient réciproquement

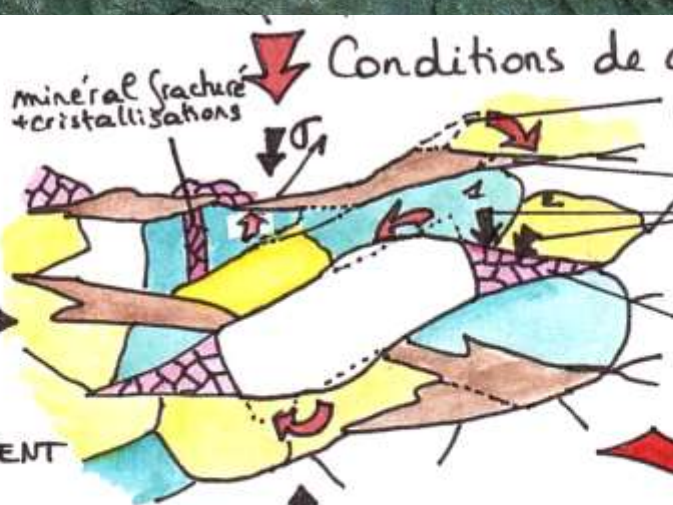


12.3. Les réactions sont accélérées par le passage de fluides, ce qui peut créer dans la roche une zone de réaction incomplète jouxtant une zone de réaction complète





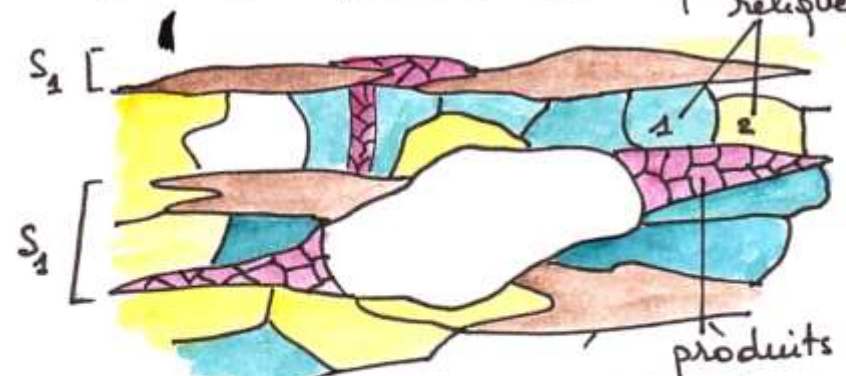
MÉTAMORPHISME par dissolution et recristallisation et réaction chimique σ_3
PROCESSUS TRÈS LENT



Conditions de contraintes anisotropes
dissolution sous l'effet de σ_1
recristallisation selon σ_3
réaction chimique entre 2 minéraux
queue de cristallisation

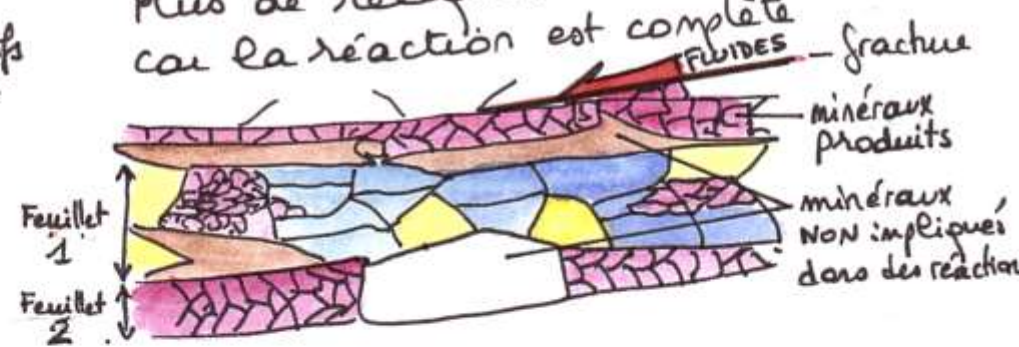
FLUIDES (O_2 ou CO_2) circulent dans les fractures

Formation d'une schistosité avec des minéraux reliques réactifs



FAIBLE DÉFORMATION
TRANSFORMATION CHIMIQUE INCOMPLÈTE

Forte schistosité (souvent foliation)
Plus de reliques car la réaction est incomplète



FORTE DÉFORMATION (Foliation)
TRANSFORMATION CHIMIQUE COMPLÈTE
le minéral 1 a disparu

1.3. Les réactions chimiques du métamorphisme sont régies par les lois de la thermodynamique, et peuvent donc permettre d'évaluer la pression et la température

13.1. Les réactions univariantes du métamorphisme sont des géobaromètre et/ou des géothermomètres

Conditions d'utilisation d'une réaction chimique métamorphique :

- 1) minéraux réactifs et produits pas stables dans les mêmes conditions de pression et température
- 2) pouvoir déterminer 2 inconnues à la fois (P et T) avec une seule réaction

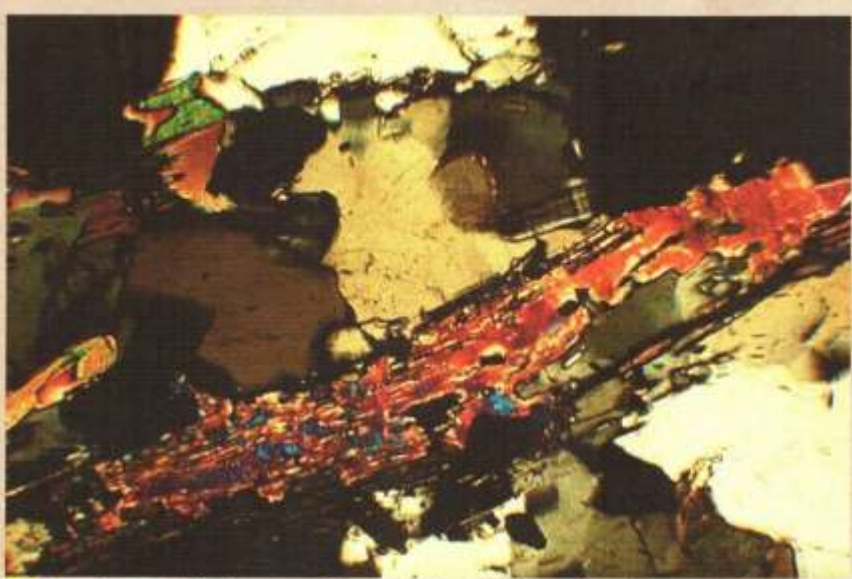
1) Principe d'utilisation de réaction univariante

- thermochimie, règle de Gibbs
- déterminer la variance = nb de constituants élémentaires (oxydes) + 2 - nb de phases

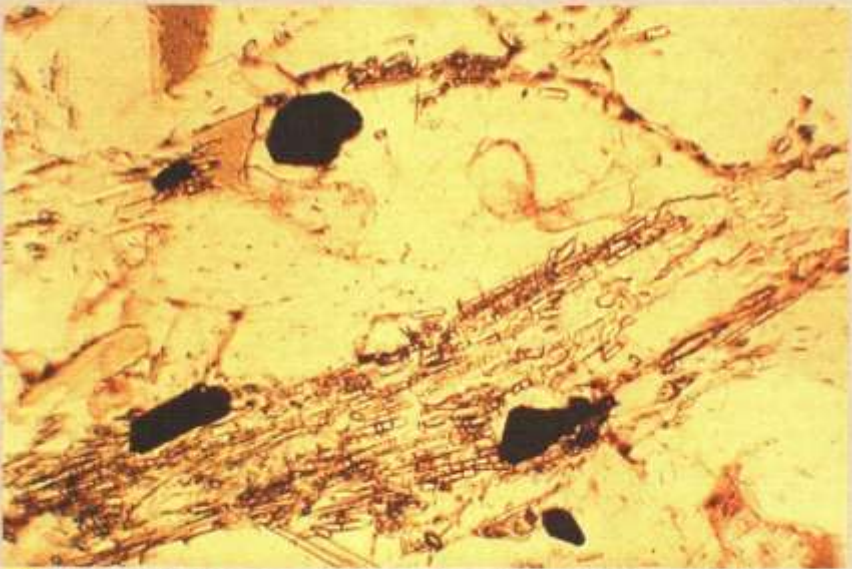


NB : Les physiciens travaillent sur les systèmes avec des gaz et/ou à faible pression. Ils utilisent la variance réduite, en supposant les potentiels chimiques insensible à la pression (-1)

En géologie, on est en phases condensées (solides, liquides) à haute pression (différent du cours de physique!), on doit utiliser la variance et non la variance réduite.
variance = degré liberté



Réactions chimiques : Muscovite-Sillimanite (Lum. Pol.)
+ Q orthose + eau



Réactions chimiques : Muscovite Sillimanite (Lum. Nat.)



mu+Q = sillimanite + orthose + eau

nb de constituants
élémentaires (oxydes)?

K₂O (mu, orthose)

Al₂O₃ (mu, sill, orth)

SiO₂

H₂O (mu, eau)

=4

Nb de « phases »

1 minéral =1 phase

4 minéraux +eau =5

Nb degré liberté réaction =

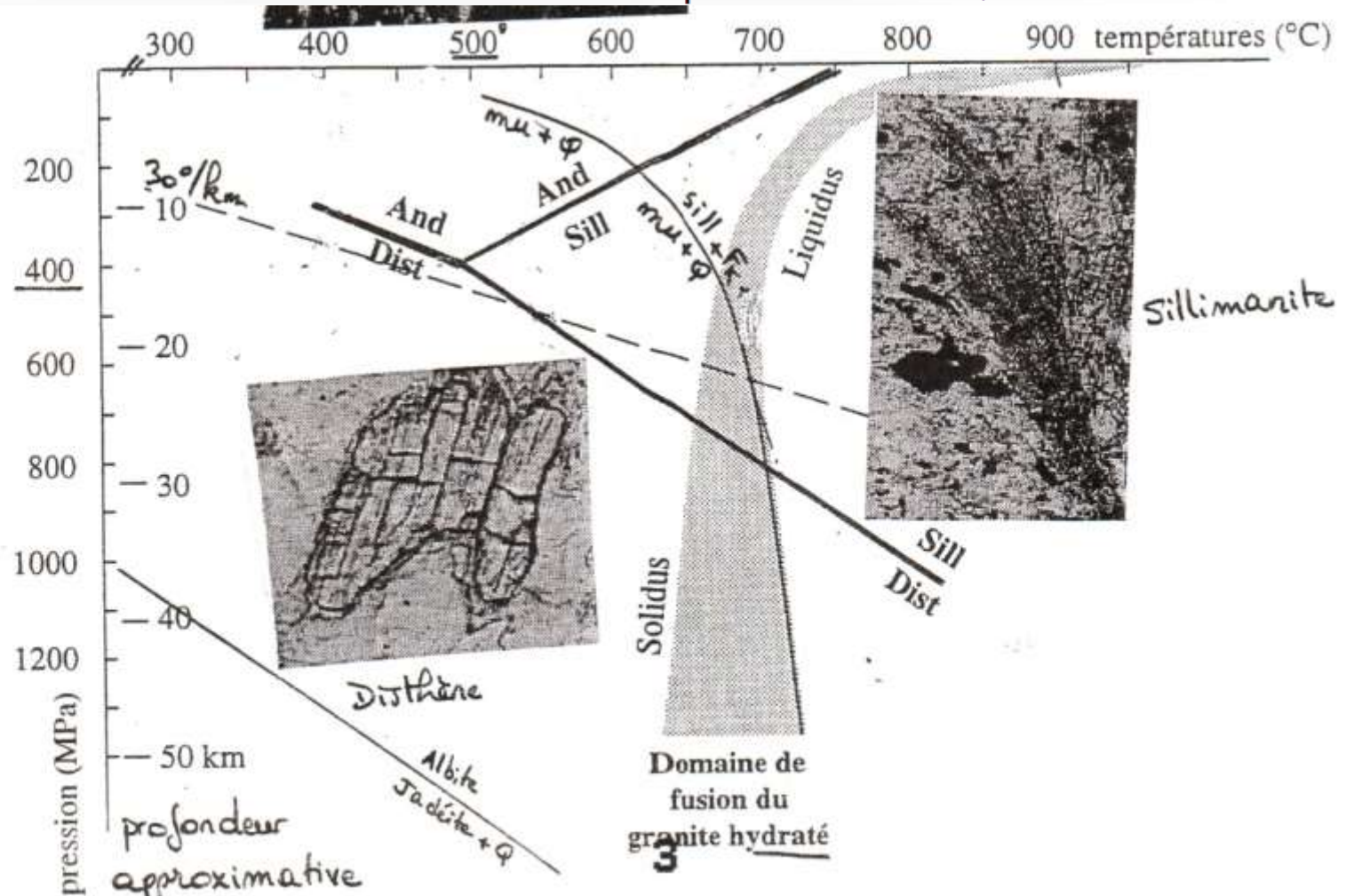
4+2-5 =1

= monovariante = P = f(T)

=> ligne dans l'espace PT

Une réaction monovariante se traduit par une ligne dans l'espace PT, en absence de fluides

Droite si pas de fluide, sinon courbe





Les réactions sont sensibles à la pression et/ou à la température à cause des lois thermodynamiques

- Chaque cristal est caractérisé par son enthalpie libre $G = U - TS + PV = H - TS$
énergie libre G (ou énergie libre de Gibbs)

H est l'enthalpie du minéral ou de l'association de minéraux.

Le passage du domaine de l'association $A + B$ au domaine de C, par le biais de la réaction $A + B = C$, se fait lorsque $G_C = G_{A+B}$, c'est-à-dire lorsque la variation d'énergie de la réaction $\Delta_r G = G_C - G_{A+B} = 0$ (si le système est fermé, c'est-à-dire qu'il n'échange pas d'énergie avec l'extérieur).

On peut donc écrire, lorsque la réaction $A + B = C$ se réalise :

$\Delta_r G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ = 0$ sans variation de la pression. Une variation de pression ΔP s'accompagne d'une variation de volume $\Delta_r V$ de la réaction. D'où, il vient :

$$\Delta_r G = \Delta_r H^\circ - T \cdot \Delta_r S^\circ + \Delta_r V (\Delta P) = 0.$$

- Les réactions métamorphiques sont donc influencées par P et T



- On a établi :

$$\Delta rG = \Delta rH^\circ - T \cdot \Delta rS^\circ + \Delta rV (\Delta P) = 0.$$

ΔP est égal à $P - P^\circ$; $P^\circ = 1$ bar est négligeable devant P (plusieurs kb). Aussi peut-on simplifier, en prenant $\Delta P = P$:

$$\Delta rG = \Delta rH^\circ - T \cdot \Delta rS^\circ + \Delta rV \cdot P = 0.$$

ou encore $P = (\Delta rS^\circ / \Delta rV) T - \Delta rH^\circ / \Delta rV$.

Ceci est l'équation d'une droite (du type $y = ax + b$) dans l'espace P-T.

Fourchette des silicates d'alumine

Al_2SiO_5 , réactions d'inversion A=B=C

Pourquoi transformation minéralogique avec changement de P et/ou T?

Clapeyron $dG = -T dS + P dV$

1) augmentation de pression

$DG < 0$ si $dS > 0$ et surtout $dV \ll 0$

Réseau cristallin différent → **volume molaire**

Andalousite
51 cm³/mole

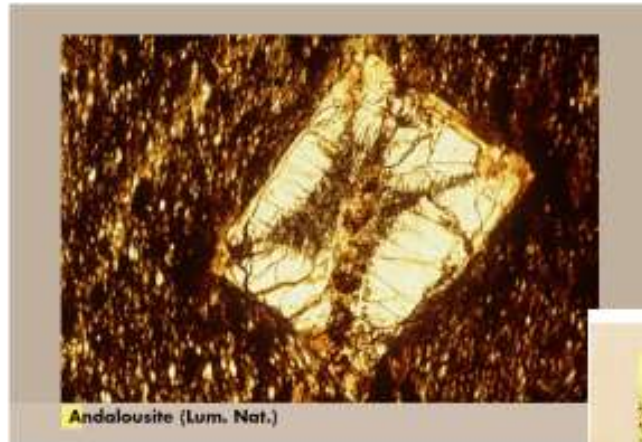
HP



Disthène
44 cm³/mol

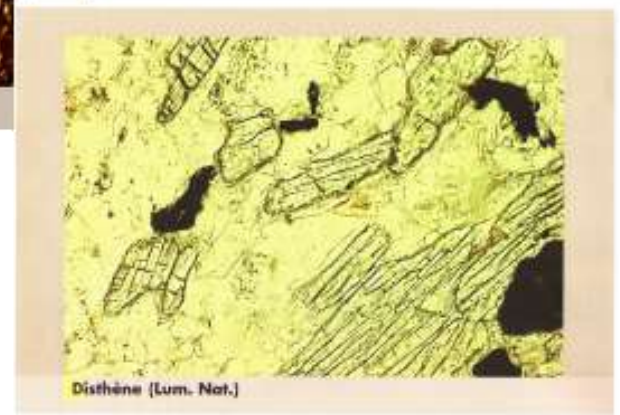
géobaromètre

Faible pression



Andalousite (Lum. Nat.)

Sillimanite
50 cm³/mol



Disthène (Lum. Nat.)

2) augmentation de T

Entropie = degré de régularité de la maille cristalline

Disthène

$S=93 \text{ J/mol.}^\circ\text{K}$

$dS \gg 0$

→ sillimanite

$S=96 \text{ J/mol.}^\circ\text{K}$

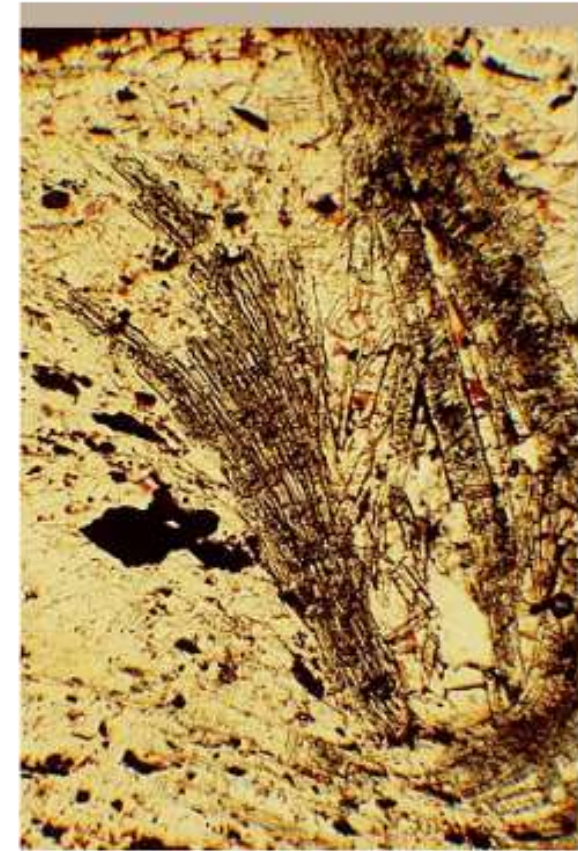
géothermomètre



Disthène

sillimanite

Source : Véronique Gardien

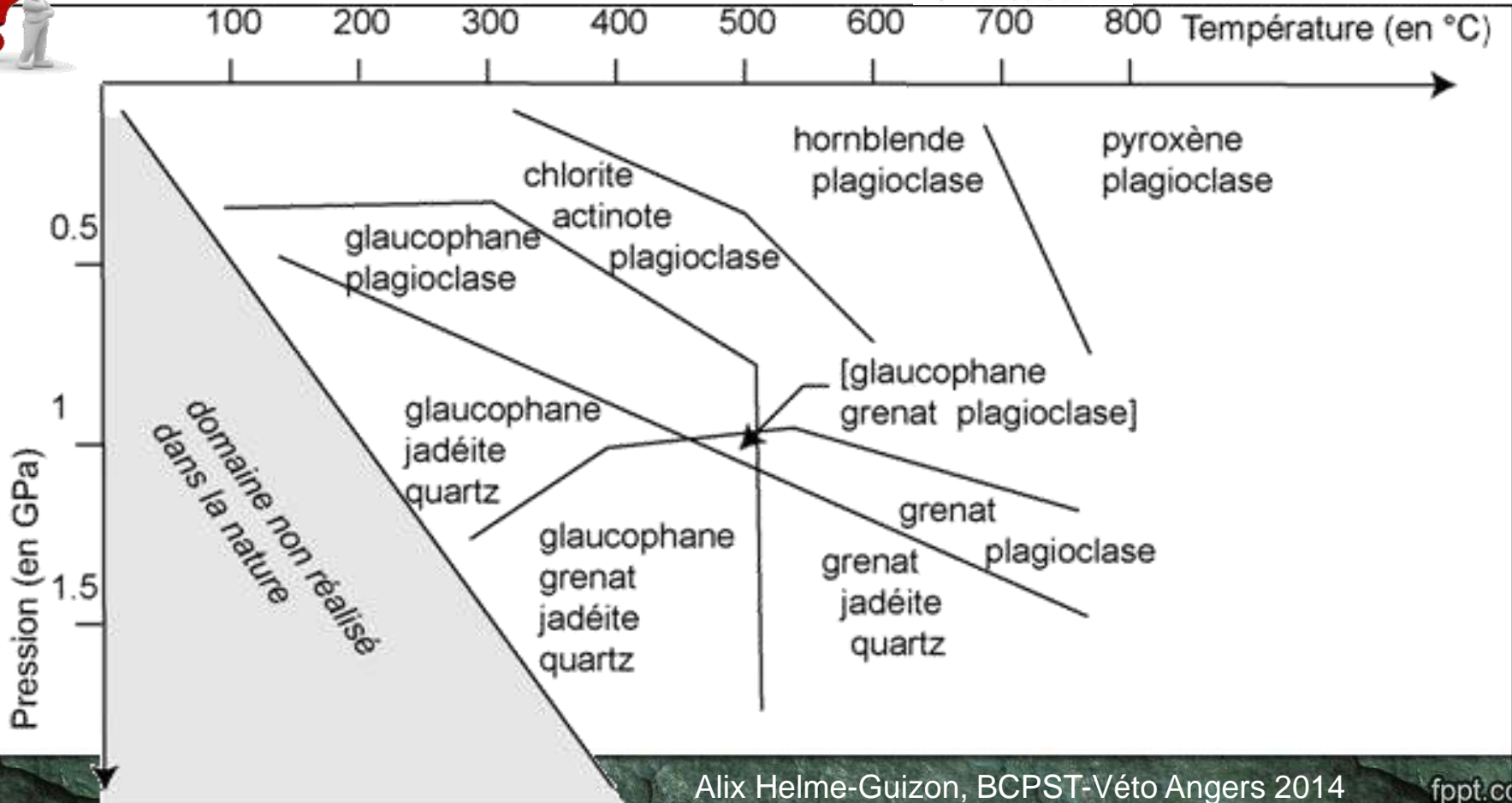


13.2. Certains minéraux marqueurs sont des géobaromètres et/ou des géothermomètres

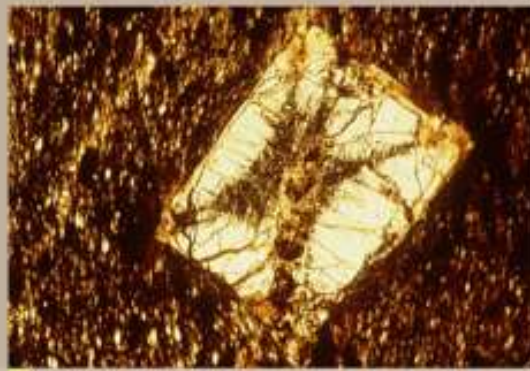
Comment utiliser le glaucophane?



Photographie en lumière naturelle d'un métagabbro Schistes Bleus.
Dans les zones déformées, le pyroxène magnésique est totalement décoloré.
La roche présente une structure contrôlée par des glaucophanes.



L'andalousite est un géobaromètre (= marqueur de faible pression)



Andalousite (Lum. Nat.)

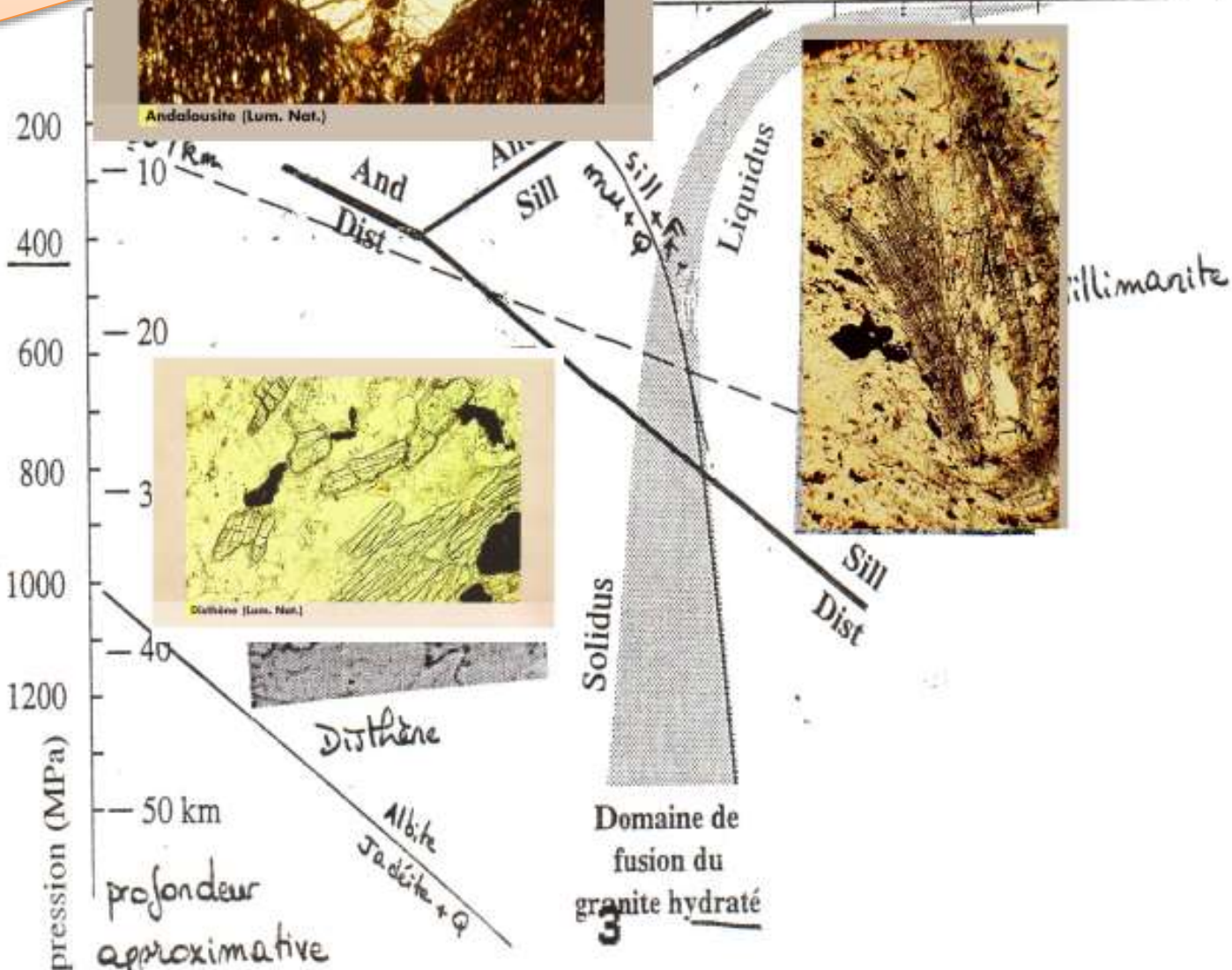


Diathène (Lum. Nat.)



Disthène

700 800 900 températures (°C)



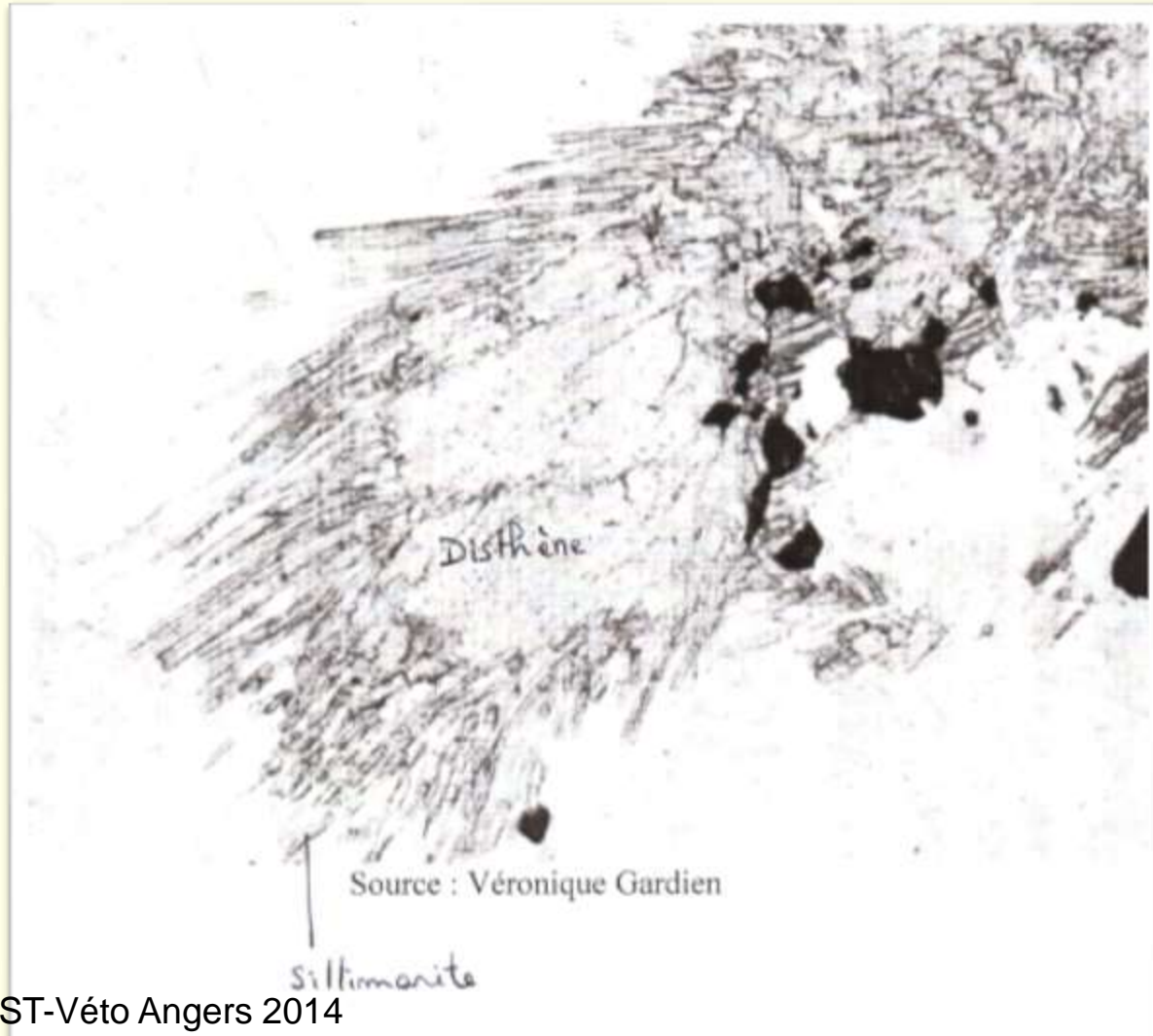
Moho continental
(sauf dans les chaînes de montagne)

profondeur approximative

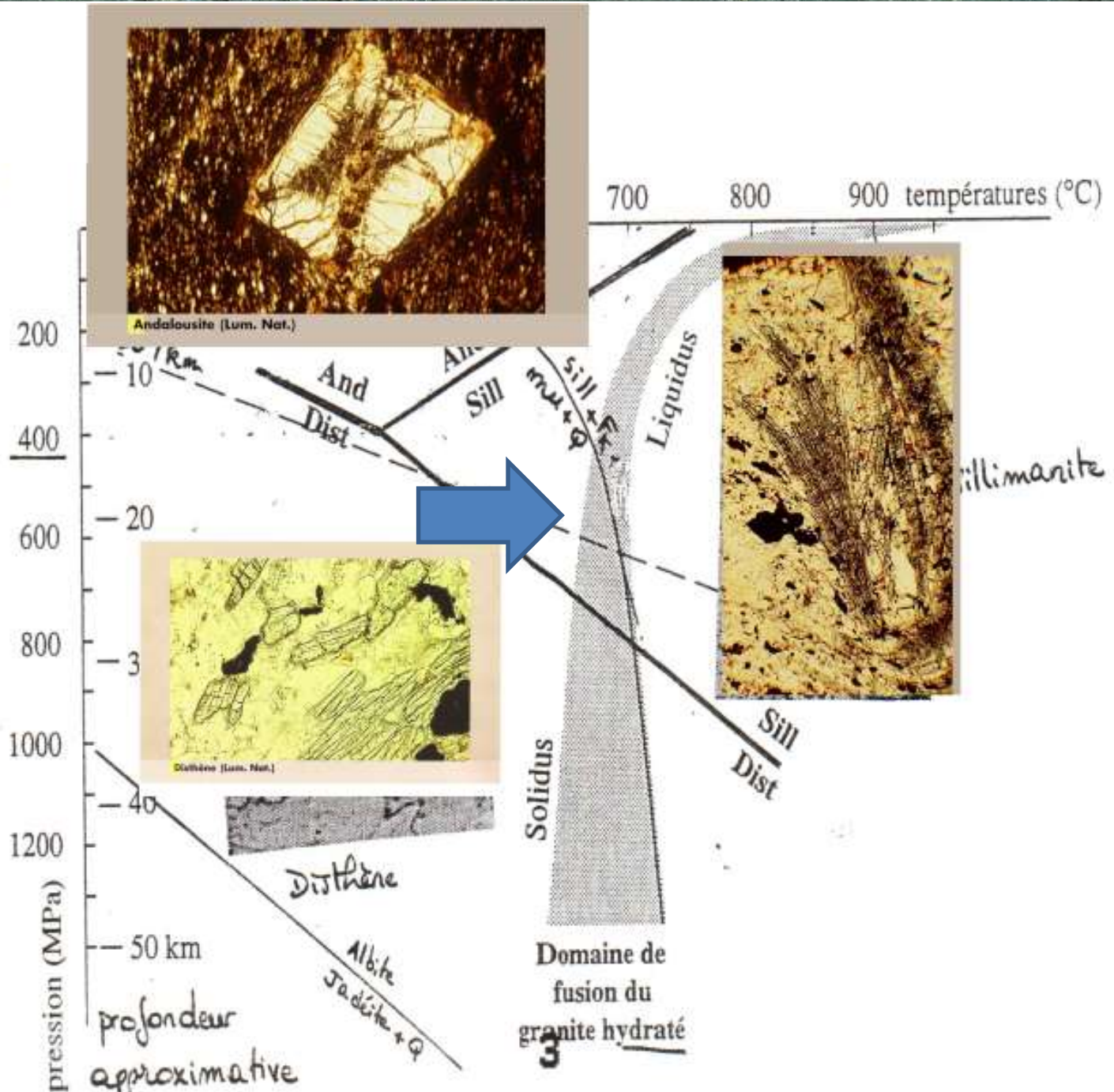
Domaine de fusion du granite hydraté

Analysez cette lame
en terme de variation de conditions thermodynamiques

Exercice concours



Fourchette des silicates d'alumine



Moho continental
(sauf dans les chaînes de montagne)

profondeur approximative

13.3. La distribution de certains éléments chimiques dans les phases minérales permet aussi d'évaluer la pression et/ou la température

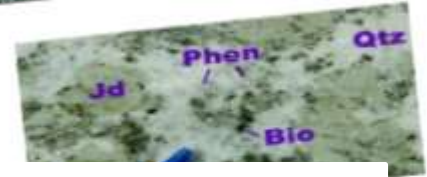
La phengite, un mica blanc géobaromètre

Roches continentales

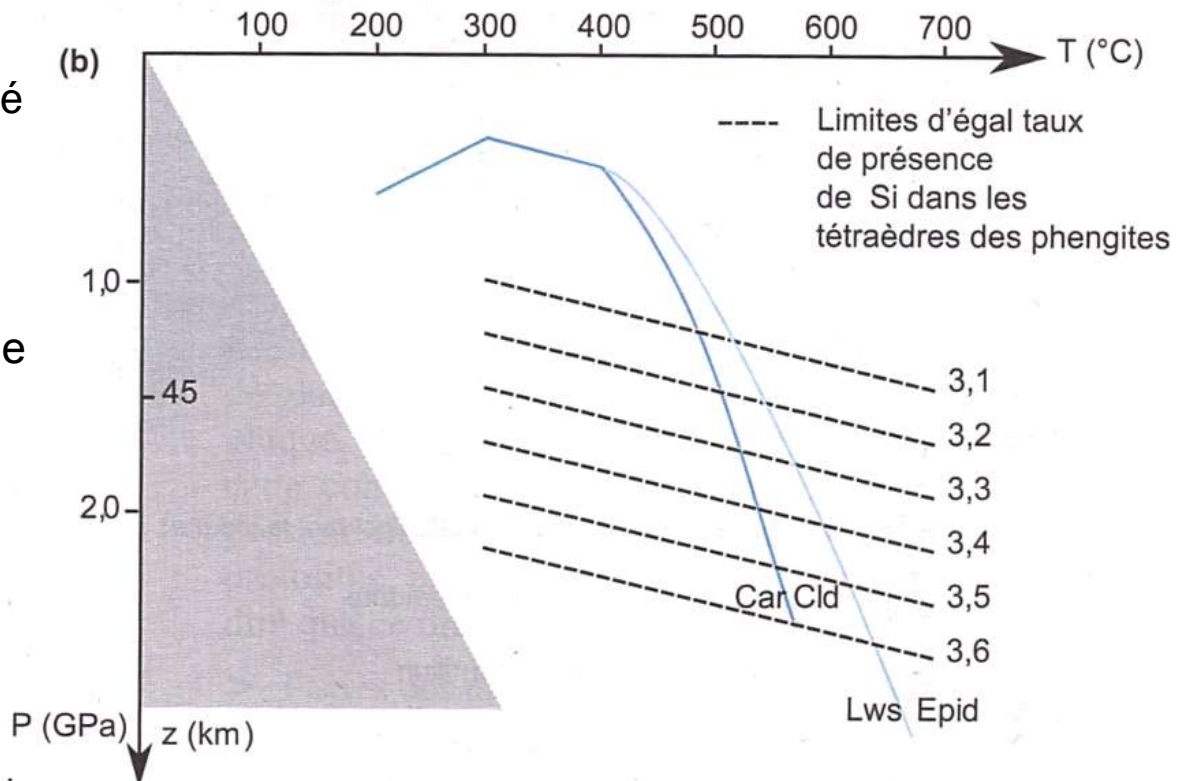
- micas blancs = muscovite
- +phengite +1autre
- tétraèdres à Al et Si
- avec pression aluminium remplacé par silicium
- Mu (3%Si) → phengite (>3%Si)

-microsonde électronique :
électrons → minéral → rayons X de longueur d'onde dépendant de la composition chimique du minéral

-ex schistes lustrés du Queyras
Phengite = 3,4 à 3,5% Si
→ valeur de pression



<http://www.geology.wisc.edu/>



3. Les déformations des roches ont un lien avec les réactions chimiques du métamorphisme car

- a) les minéraux vont (re)cristalliser dans les zones où les pressions sont les plus faibles
- b) les fortes pressions font dissoudre partiellement certains minéraux
- c) plus une zone est déformée et plus elle laisse passer les fluides (si il y en a)
- d) la fracturation des minéraux augmente la surface disponible pour les réactions chimiques

5. une réaction univariante du métamorphisme

- a) donne un seul minéral produit
- b) n'est affectée que par la pression, mais pas la température
- c) n'est affectée que par la température, mais pas la pression
- d) est affectée par la pression et la température, mais durant cette réaction pression et température sont liées

Quizz

7. On peut évaluer la pression rencontrée par une roche métamorphique en étudiant
- a) l'apparition ou la disparition de minéraux formés par des réactions chimiques sensibles à la pression
 - b) certaines réactions univariantes du métamorphisme
 - c) la distribution de certains atomes dans les phases minérales



1.4. Les faciès métamorphiques sont des domaines de l'espace pression-température permettant de reconstituer l'histoire commune d'un ensemble de roches

14.1. L'association de minéraux stables dans un faciès constitue une paragenèse à l'équilibre

SOLUTION : détermination des minéraux métamorphiques typiques

- un seul minéral = insuffisant généralement (sauf Gln, Law, phengite)
- Paragenèse = ensemble de minéraux à l'équilibre dans certaines conditions PT = même épisode de recristallisation
 - 1) réaction incomplète (on voit encore les réactifs)
 - 2) complète = seulement produits

Un boudin élogitique dans un métagabbro du faciès schiste bleu du mont Viso

Paragenèse 1
Jadéite et grenat

Paragenèse 2
Glaucophane et lawsonite

Ces deux paragenèses se sont formées dans des conditions différentes de pression et température



Alpes

14.2. Les paragenèses dépendent de la composition de la roche initiale (protolithe)



Protolite		Métamorphisme d'intensité croissante	
Roches quarzo feldspathiques	Sable ou grès	Quartzite ou gneiss (si il y a des feldspaths)	
	Granites ou rhyolites	0	(Ortho)gneiss, gneiss ocellé
Roches pélitiques	= riche en minéraux argileux	Schistes et micaschistes	(para)gneiss
Roches carbonatées	Calcaire, marne, dolomie	Marbre	
Roches basiques	b ou gabbro	Voir le nom des faciès	
Roches ultrabasiques	Péridotites et serpentinite		Transition de phase de l'olivine

PROBLEME :

Comment savoir si un ensemble hétérogène de roches a été placé dans les mêmes conditions PT (= a la même histoire)?

14.3. L'utilisation de faciès permet de retracer l'histoire commune d'un ensemble de roches hétérogènes

1965 Eskola (finlande) :

Définition des faciès à partir de la séquence magmatiques basiques

-série métamorphique : ensemble de roches provenant d'une même roche initiale, placées dans différentes conditions de pression et température

-roches acides → peu de diversité (schistes, gneiss)

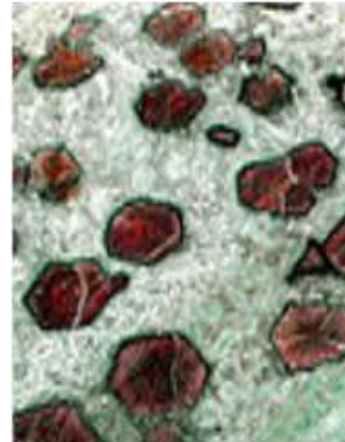
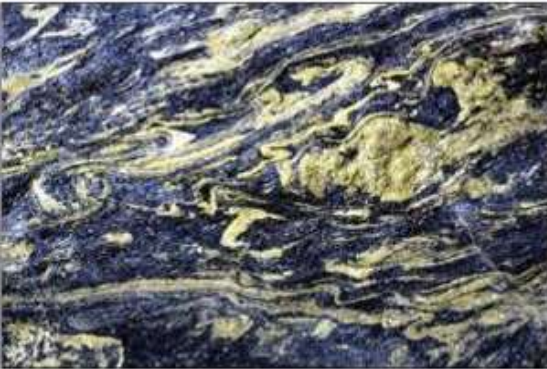
-basalte →

schistes verts, bleus,

amphibolite,

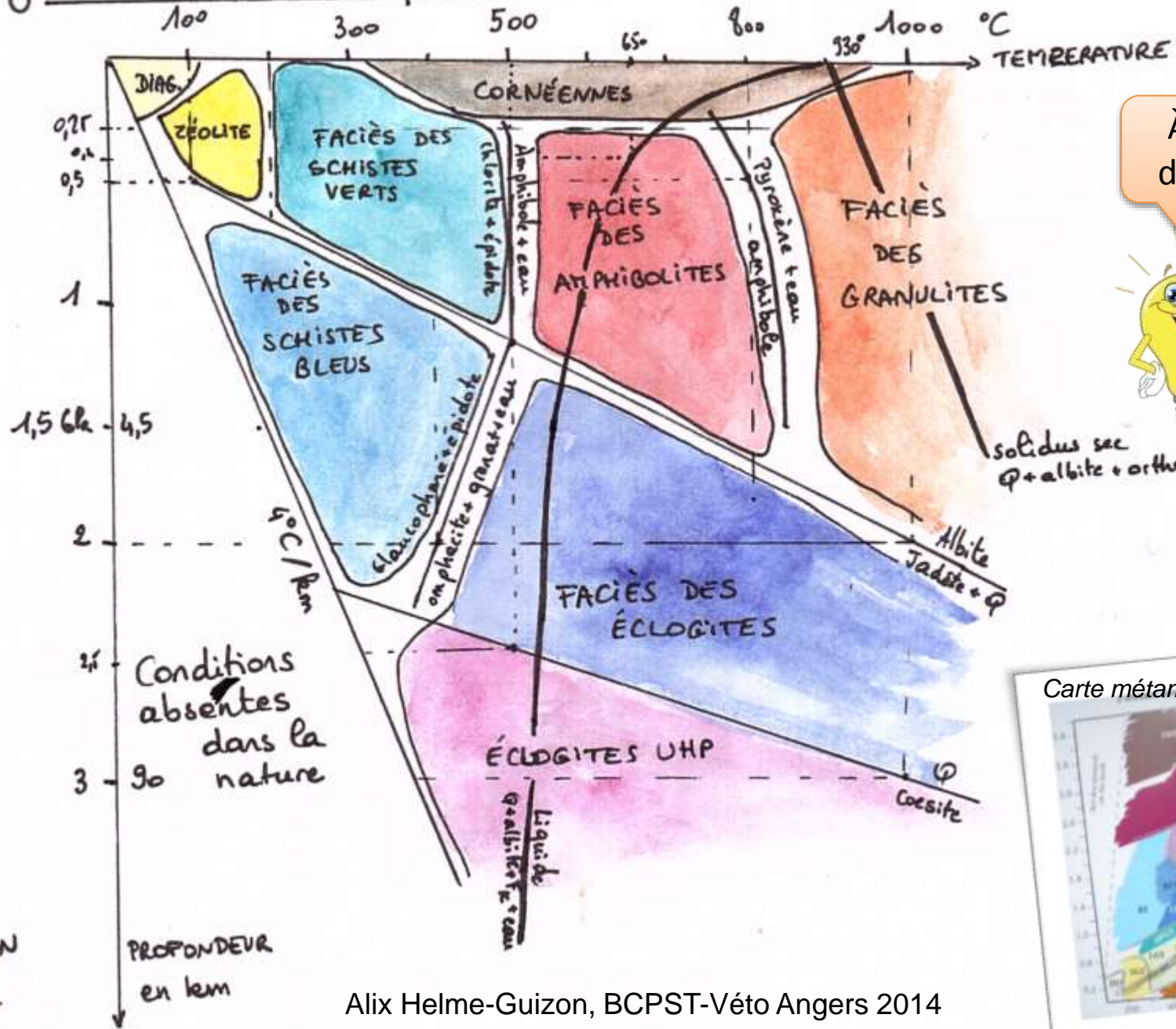
éclogite,

granulite

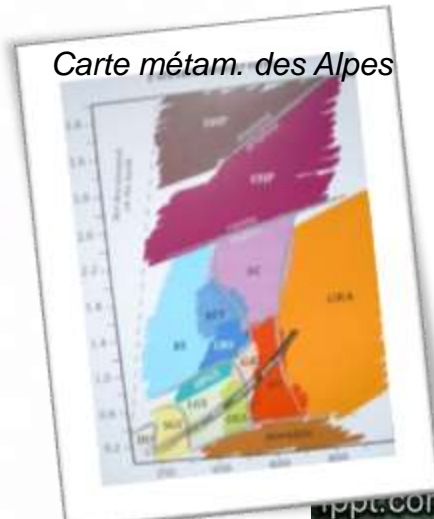


Photographie Pierre Thomas
Echantillon ENS Lyon

Les faciès métamorphiques sont des domaines de l'espace P-T

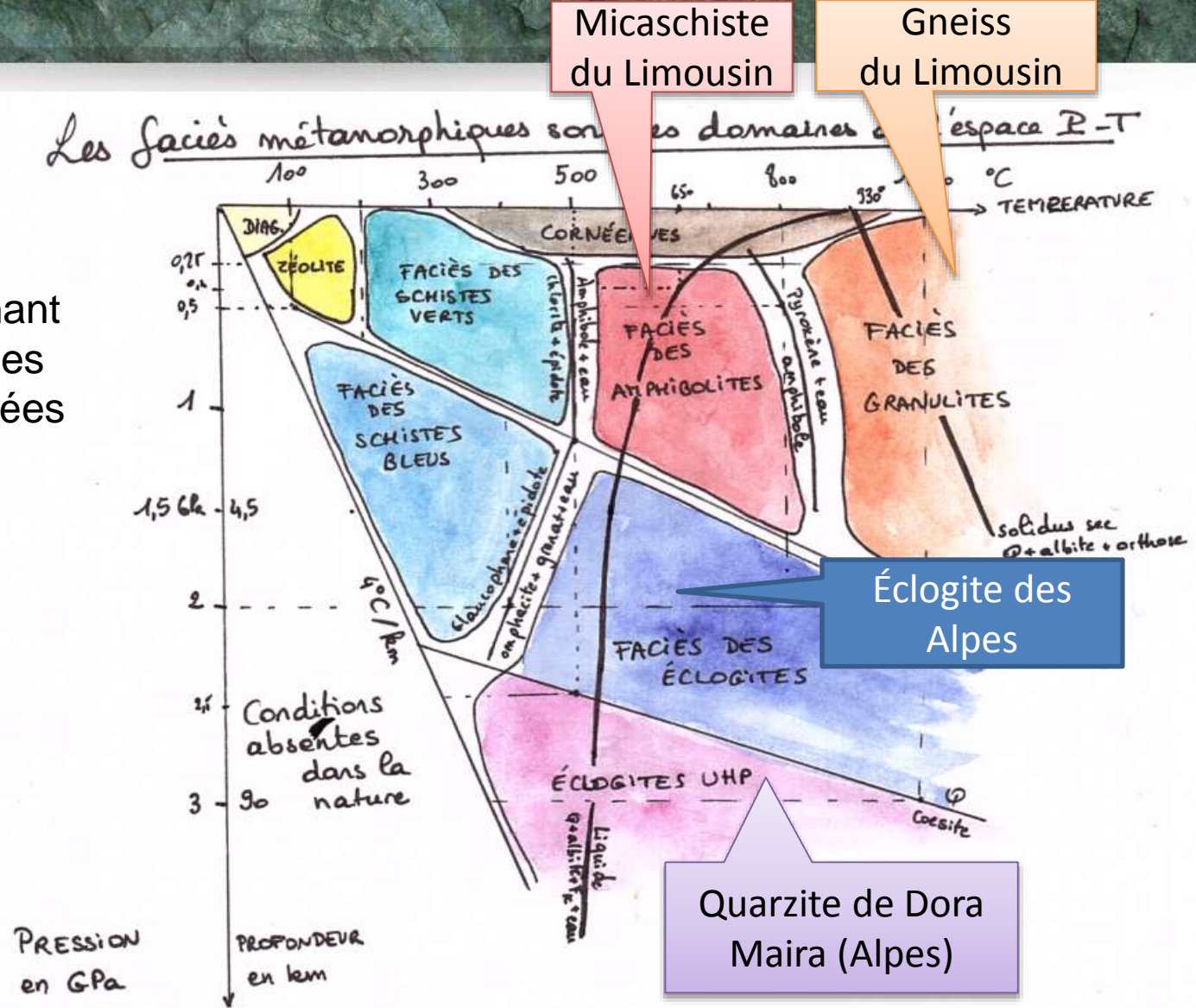


À savoir dessiner!



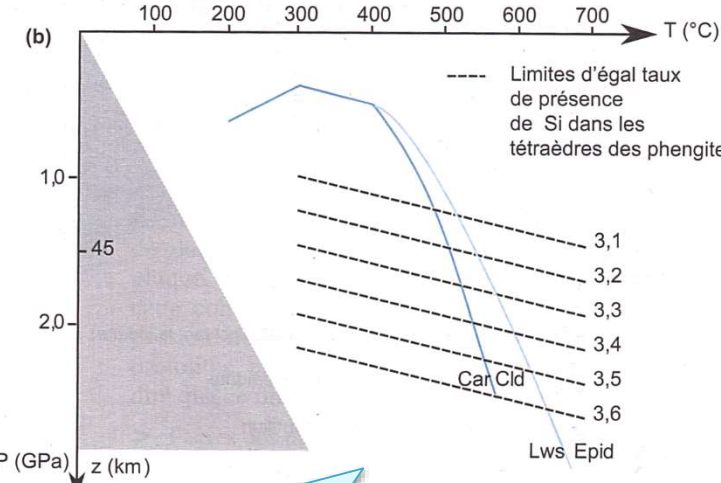
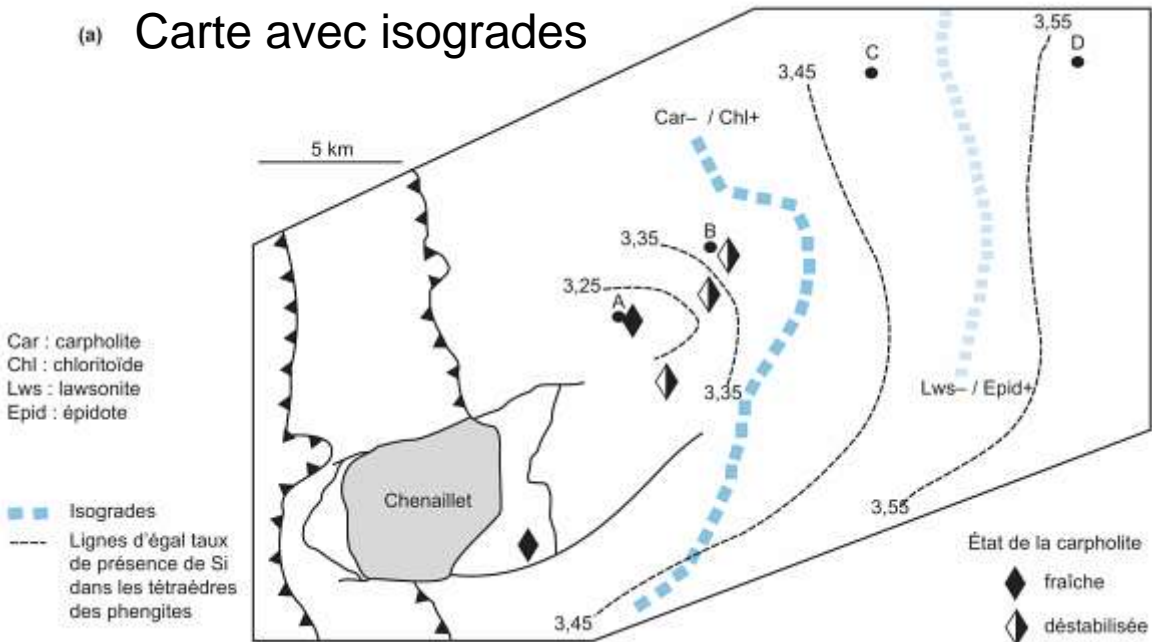
Toutes les roches peuvent être placées dans un des faciès, grâce aux réactions métamorphiques qui leur sont propres

Les réactions concernant les roches non basiques ne sont pas représentées



14.4. En carte, les anciennes cartes indiquent des réactions par des isogrades, alors que les nouvelles cartes indiquent des faciès métamorphiques

(a) Carte avec isogrades



Déterminez les conditions P-T au point C



MÉTAMORPHISME *Les caractères métamorphiques des terrains sont symbolisés par des figurés dont la couleur indique l'âge de l'orogénèse, la forme indique le faciès du métamorphisme, et l'orientation correspond à la principale foliation régionale*

Âge :
 - cadomien (orange)
 - méso-varisque (rouge)
 - néo-varisque (rose)
 - éo-alpin (bleu clair)
 - alpin (bleu)
 - permo-triasique sud-alpin (bleu foncé)
 - mésocrétacé pyrénéen (bleu-vert)
 - oligo-miocène lépootin (vert)

N. B. Dans les Alpes les faciès de haute pression sont privilégiés bien qu'ils soient généralement rétro-morphosés

Faciès :
 - de basse et moyenne pression
 - de haute pression

	Faciès schiste vert en domaine de nappes		Faciès amphibolite (paragneiss, orthogneiss)		Faciès granulite de basse pression
	Zones anatectiques (migmatites)		Faciès schiste bleu de basse température		Faciès écloïte (et schiste bleu de haute température)

1 : Relique éo-varisque écloïte
2 : Relique éo-alpine à coésite

6. une paragenèse

- a) est un faciès métamorphique
- b) est une association de minéraux métamorphiques
- c) dépend de la pression et de la température
- d) est toujours à l'équilibre, sinon elle disparaît par réaction chimique

4. Un faciès métamorphique est

- a) le nom de la roche métamorphique
- b) une zone de pression et température
- c) une façon commode de comparer les roches qui n'ont pas la même composition initiale
- d) caractérisé par un minéral typique

1.5. Le métamorphisme peut conduire à l'anatexie crustale...

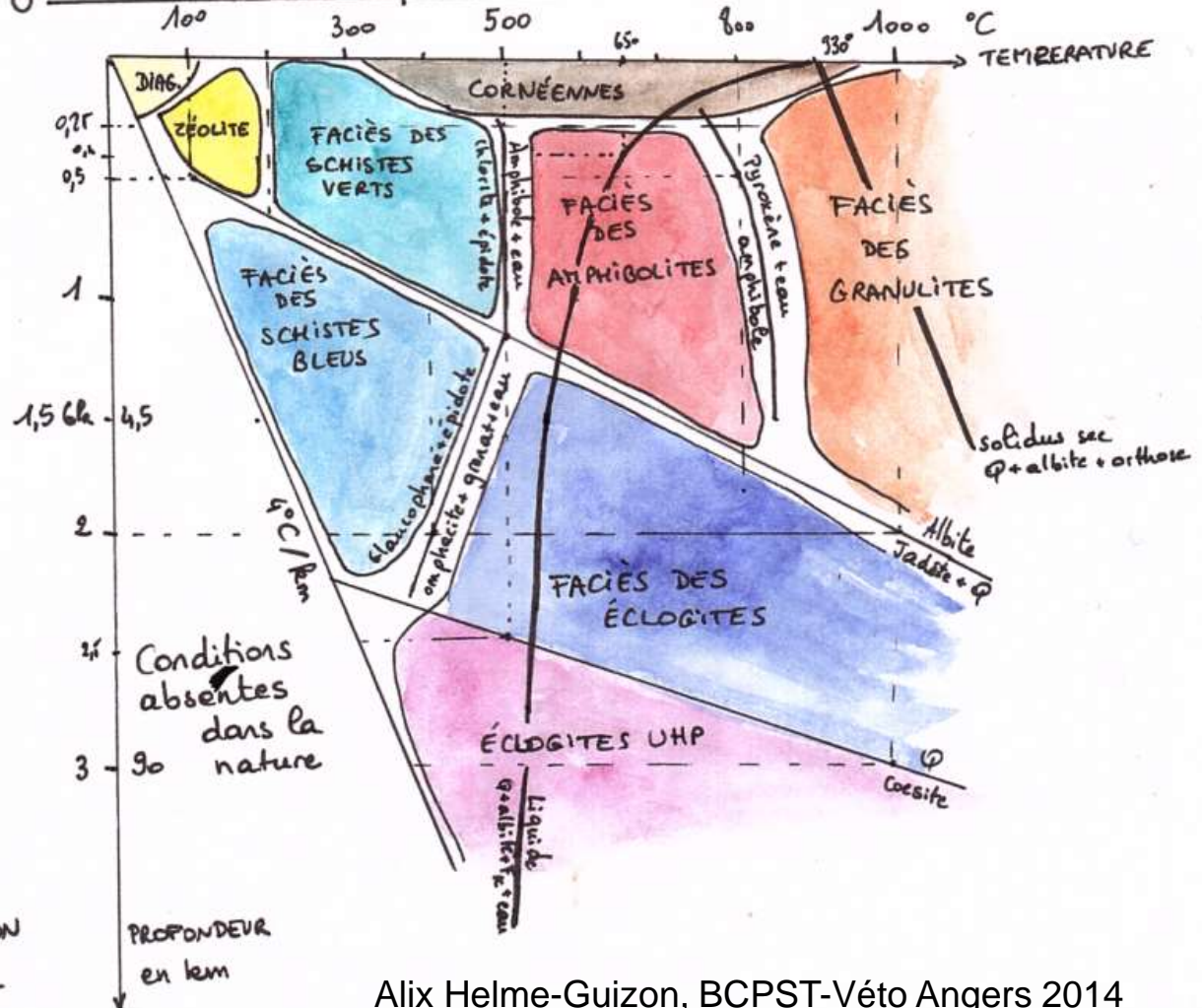
Expliquez dans quel cas une roche continentale peut subir une fusion partielle



Migmatite

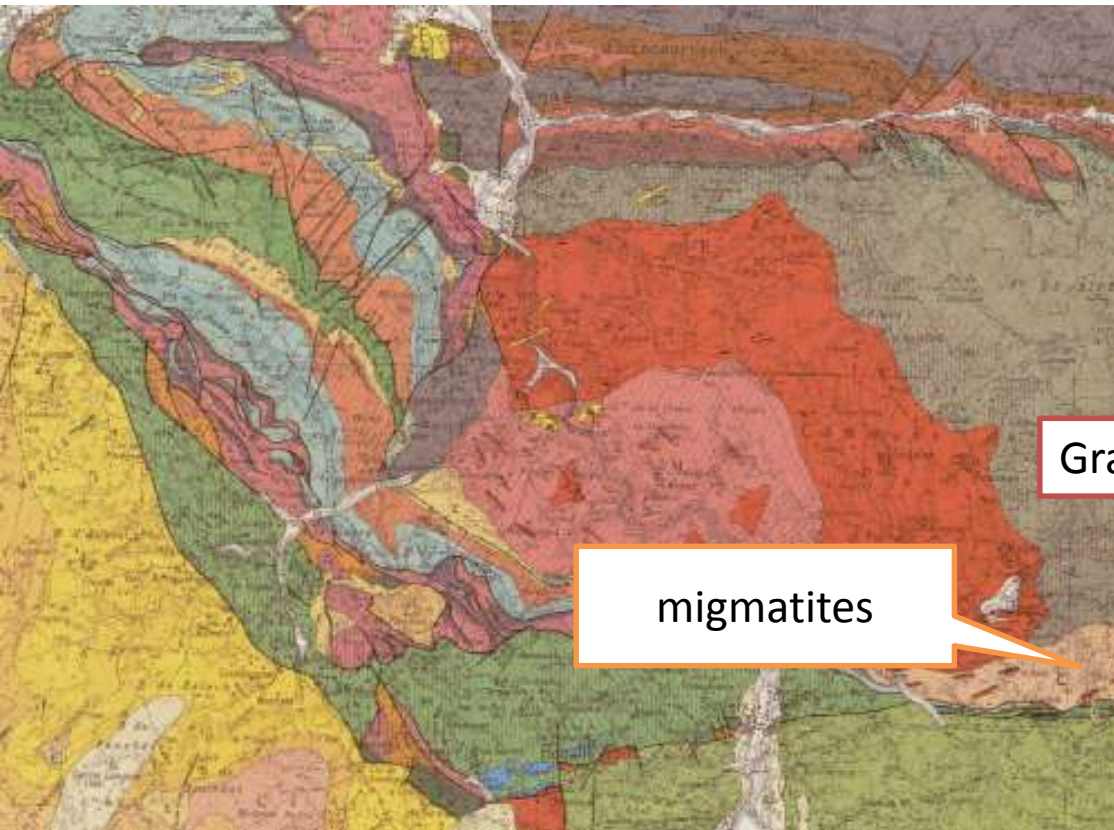
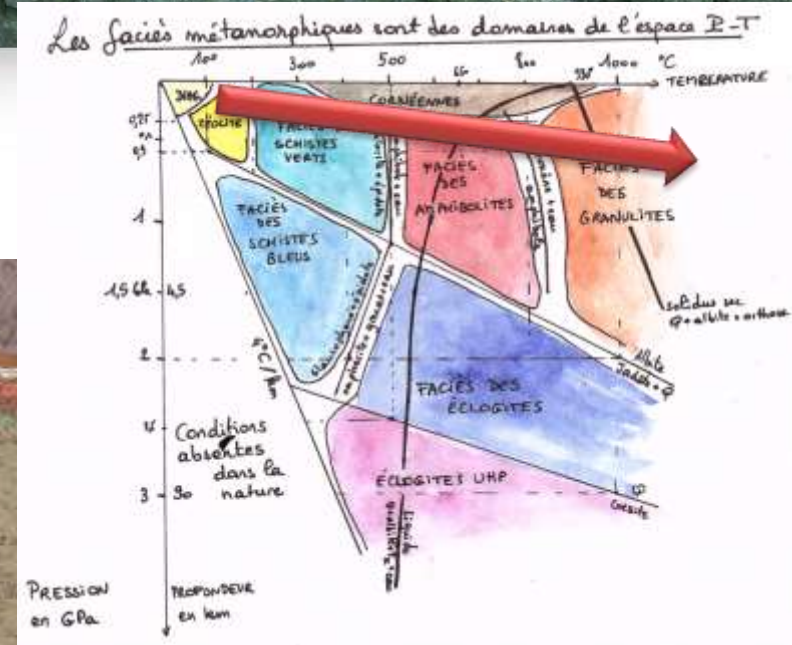


Les faciès métamorphiques sont des domaines de l'espace P-T



15.1. ...En cas d'élévation de température par amincissement lithosphérique, comme dans les Pyrénées

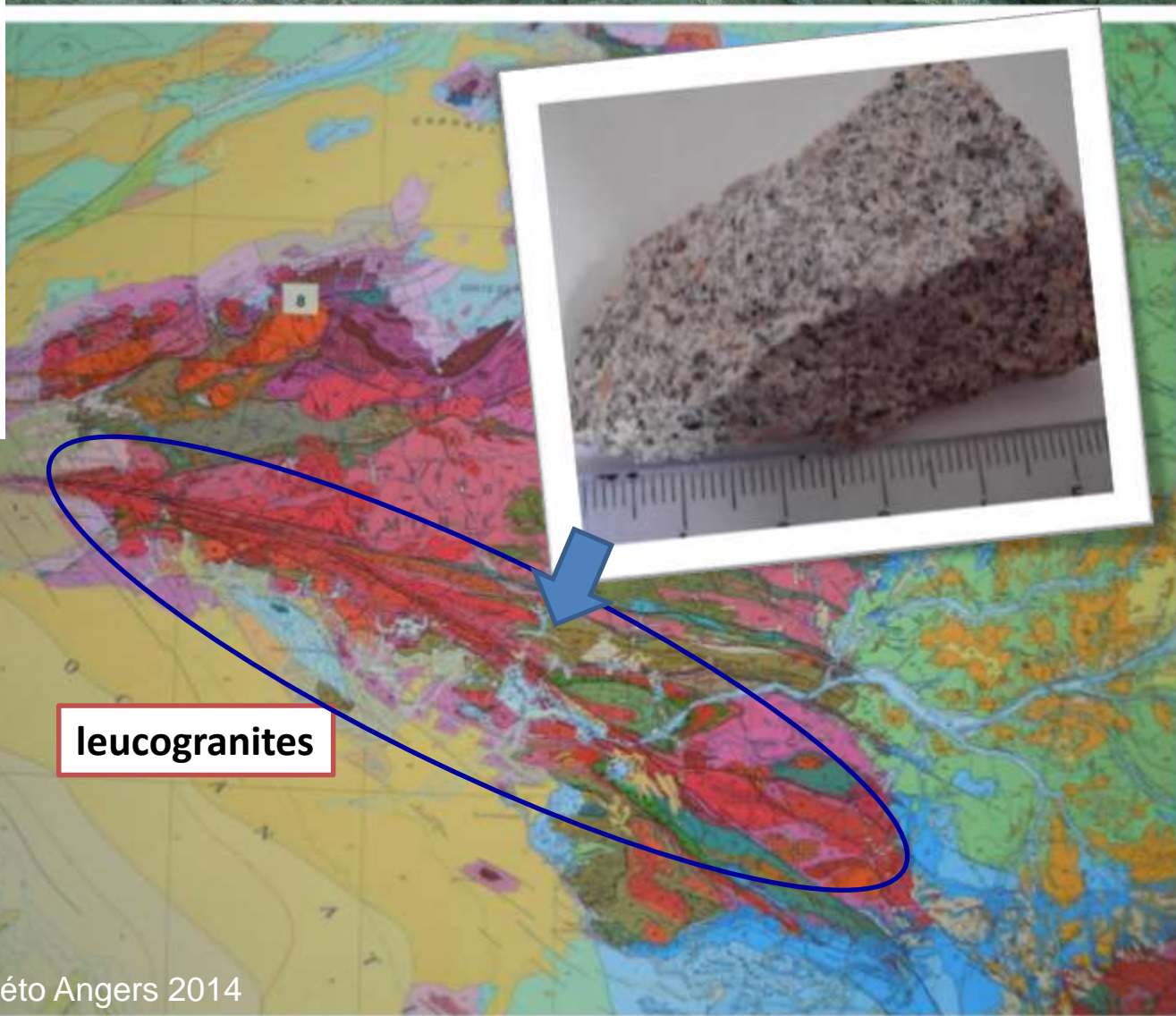
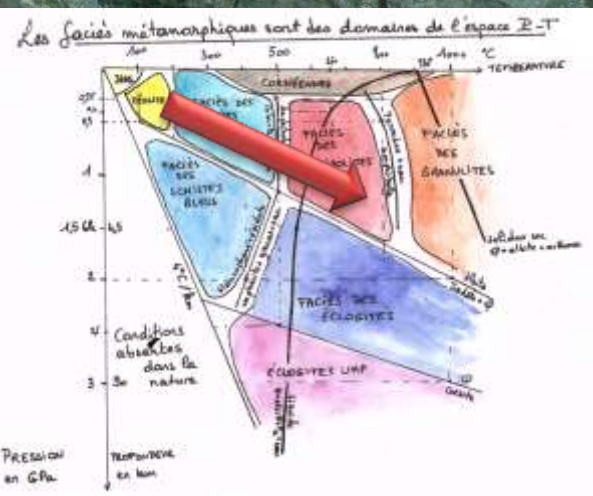
Voir TP: saint Giron



Gradient de température

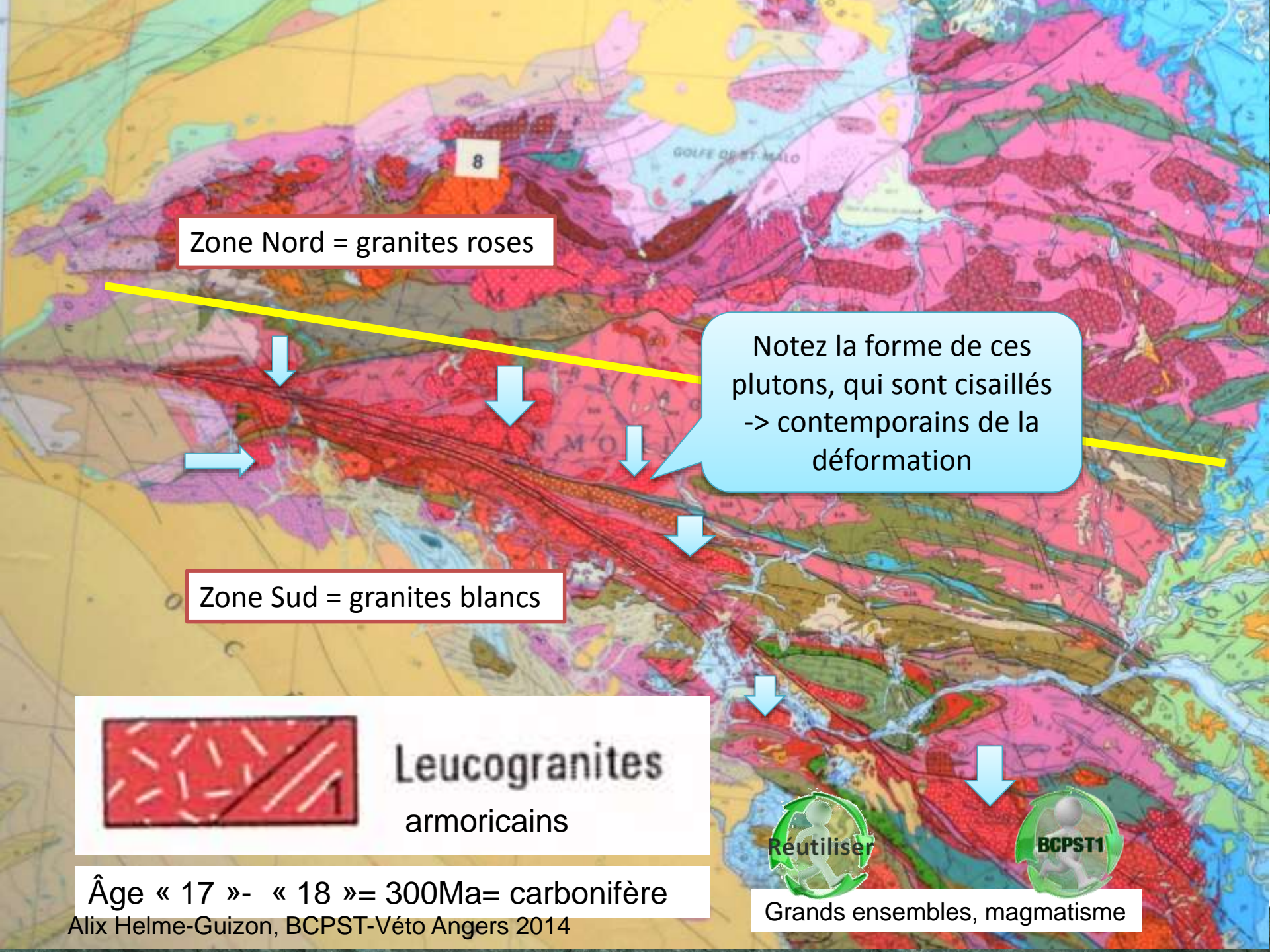


15.2. ...En présence de fluides, comme dans la zone de cisaillement sud Armoricaine



leucogranites

Granitoïdes pré-alpin	Leucogranites
	Granites et granodiorites
Formations particulières	Complexes variés leptino-amphibolites
	Principaux charnières



Zone Nord = granites roses

Notez la forme de ces plutons, qui sont cisailés -> contemporains de la déformation

Zone Sud = granites blancs



Leucogranites armoricains

Âge « 17 »- « 18 »= 300Ma= carbonifère
Alix Helme-Guizon, BCPST-Véto Angers 2014



Grands ensembles, magmatisme



Classification fonctionnelle des granites

Classification	G. hyperalcalins	G. métaalumineux	G. hyperalumineux
$Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$	< 1	> 1	> 1
$Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$	< 1	< 1	> 1
Types (Ch. et W.)	A	I	S
Minéraux normatifs	diopside + acmite	diopside	corindon
Minéraux typiques	aegyrine + riebeckite	hornbl. + biotite	muscovite + biotite + cordiérite + grenat
Noms courants	G. alcalins/hyperalcalins	G. calco-alcalins	leucogranites
Origine	diff. m.b. intraplaques	diff. m.b. arcs	anatexie crustale

Classification génétique des granites

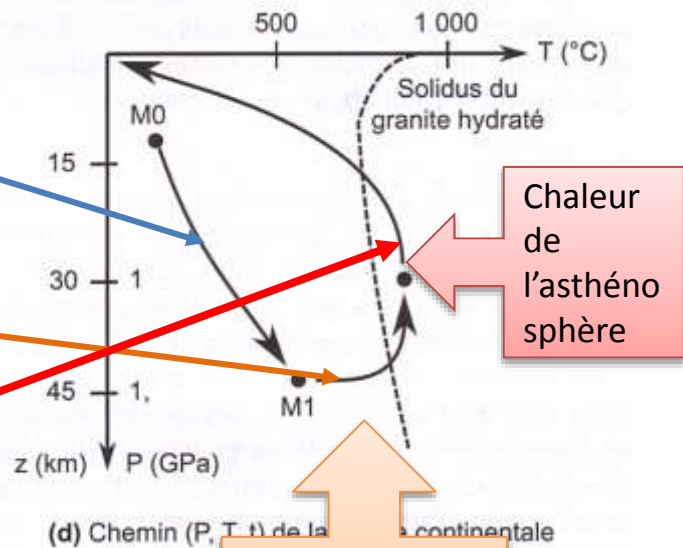
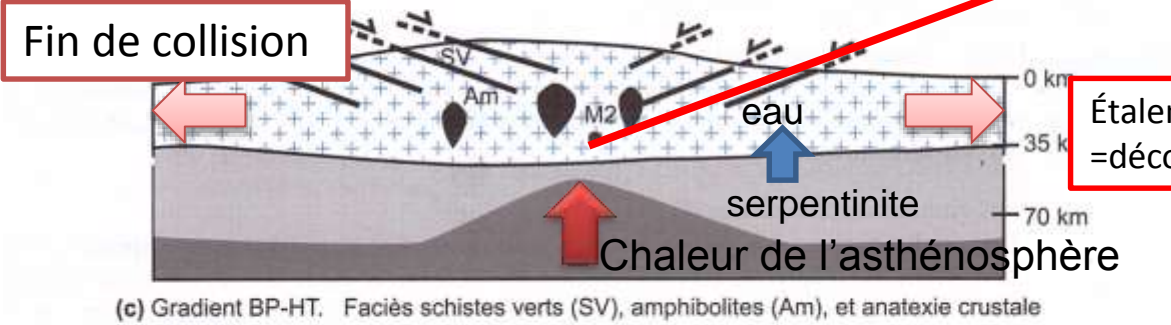
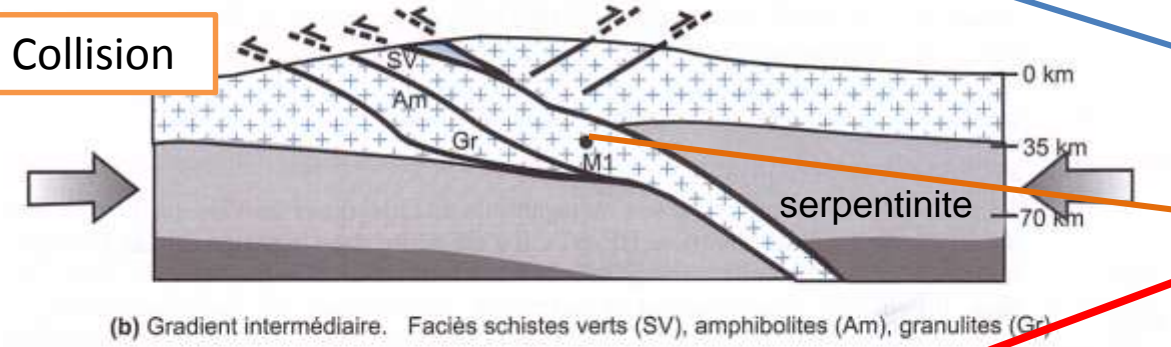
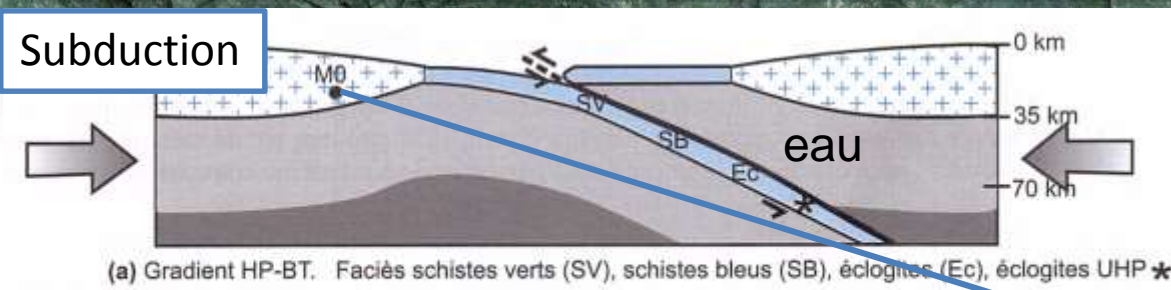
Les granites hyperalcalins, rares, (type A de Chappell et White, 1974) sont caractérisés par la présence de pyroxènes et amphiboles sodiques et l'absence de plagioclase calcique. Ils dérivent de la différenciation de magmas basaltiques (diff. m. b.) alcalins ou transitionnels en contexte intraplaque (fossés, rifts). Les granites calco-alcalins, les plus courants (type I), forment le substratum des arcs volcaniques et sont issus des magmas IAB. Les leucogranites, hyperalumineux (type S), contiennent de la muscovite et d'autres minéraux riches en alumine (cordiérite, grenat) ainsi que des enclaves de roches métamorphiques : ils proviennent de la fusion de la croûte continentale dans les contextes de subduction ou de collision (fiche 223).

Leucogranite

(leukos = blanc)

Granite clair à **deux micas** (muscovite et biotite) et riche en minéraux "blancs" (quartz et feldspaths)

15.3. ...En cas d'élévation de température et hydratation lors d'une collision



- Croûte continentale
- Croûte océanique
- Fusion partielle de la croûte continentale
- Manteau lithosphérique
- Asthénosphère



8. L'anatexie crustale se produit quand

- a) des roches de la croûte océanique fondent partiellement
- b) des roches de la croûte continentale fondent partiellement
- c) des fluides imprègnent des roches à forte pression et température
- d) il y a une collision entre masses continentales





À RETENIR!

- Une roche métamorphique est issue d'une roche sédimentaire ou d'une roche magmatique, par des transformations **chimiques** à l'état **solide**; **qui conservent sa composition chimique excepté si il y a ajout ou retrait de fluides.** -> retrouver le **protolithe**
- Le métamorphisme hydrothermal fait exception, avec un apport de Na et Mg provenant de l'eau de mer.
- À cause des lois de la thermodynamique, **Un assemblage de minéraux métamorphiques n'est stable que dans une zone du champ P-T.** Hors de ce champ, les minéraux réagissent entre eux pour former d'autres minéraux métamorphiques, stables dans ce nouveau champ P-T.
- On peut donc utiliser chaque assemblage minéral (=paragenèse) comme **marqueur du passage de la roche dans une zone du champ P-T**
- Beaucoup de réactions métamorphiques sont **incomplètes**, soit parce qu'elles sont trop lentes, soit parce qu'un des réactifs manque (un fluide qui s'est échappé par ex). Dans ce cas, **réactifs et produits coexistent, même si les réactifs ont quitté leur zone P-T de stabilité.**
- aucun n'est stable dans les conditions de surface. Ils vont donc s'altérer.



À RETENIR!

- Paragenèses -> réactions chimiques ---labo-> conditions PT
- Les paragenèses différentes mais correspondant au même domaine P-T sont regroupées sous le nom de « **faciès** » + **nom du méta-basalte** qui serait produit dans ces mêmes conditions P-T -> regroupe toutes les roches ayant la même histoire métamorphique mais des protolithes différents
- Les roches continentales métamorphisées peuvent atteindre leur point de fusion, soit en cas de forte élévation de température, soit en présence de fluides -> **anatexie crustale** -> **leucogranites** à 2 micas

Problématique



Pour quoi les conditions P-T varient-elles?

2. Les séries métamorphiques indiquent un gradient géothermique typique de chaque contexte géodynamique

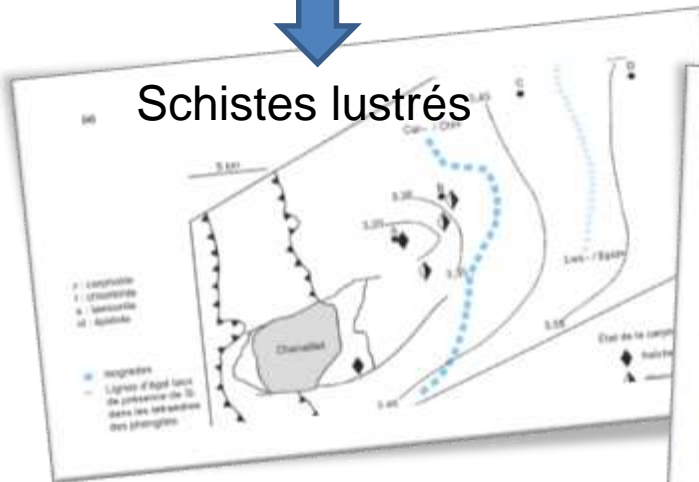
2.1. Les roches métamorphiques d'une même région et époque appartiennent à la même série métamorphique

Exemple des Alpes

1-Sédiments océaniques



Schistes lustrés



2-Chénaillet :

Lithosphère océanique
Avec hydrothermalisme,
Faciès schistes verts



3-Mont Viso:

Lithosphère océanique
Faciès éclogite



Une série métamorphique est l'ensemble des roches qui ont la même histoire métamorphique

Diversité des protolithes

1) Sédiments marins -> schistes lustrés

2) Lithosphère océanique -> serpentinites, métagabbros et metabasaltes du Chenaillet du Viso

Variation continue de pression et température

Lithosphère océanique métamorphisée dans le faciès schiste vert pour le Chenaillet, et faciès éclogite pour le Viso

Diversité des roches métamorphiques d'une région

Série métamorphique

?

Histoire métamorphique

Les roches des divers faciès d'une même série sont répartis dans l'espace

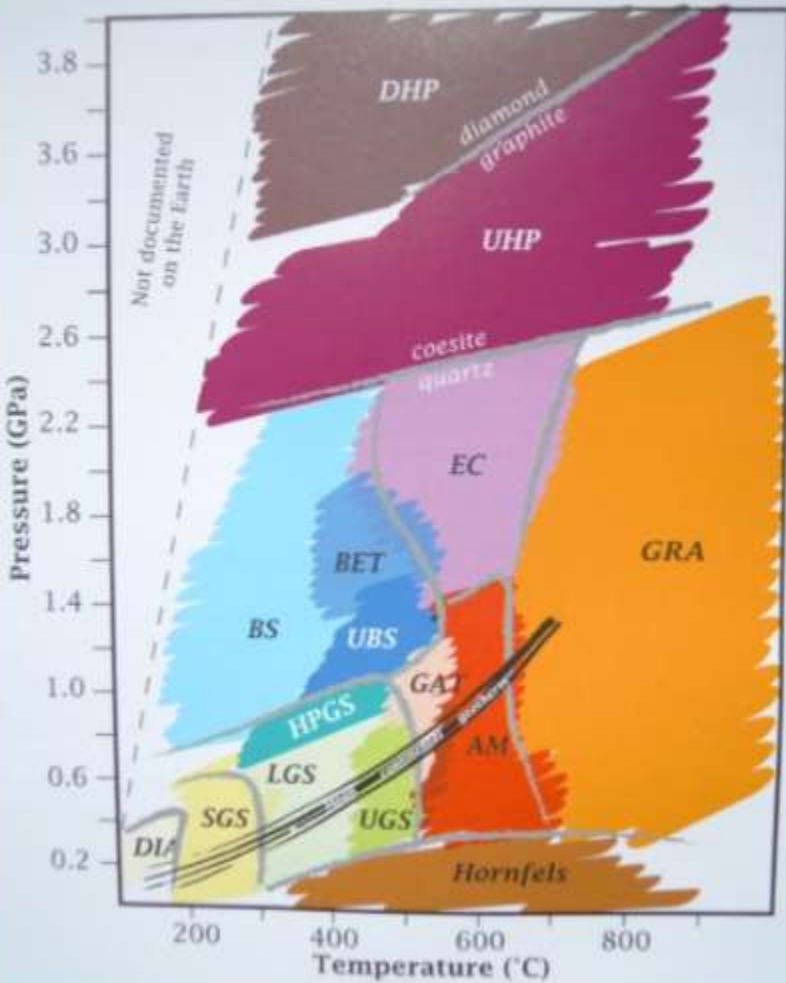
Alix Helme-Guizon, BCPST-Véto Angers 2014



Alpes

Après avoir étudié les Alpes, il faudra pouvoir nommer chaque zone de métamorphisme et dire ce que c'est en terme de paléogéographie

Facies diagram



Carte métamorphique des Alpes



2.2. Une série métamorphique permet de reconstituer un gradient géothermique local et donc un contexte géodynamique

1) Avec toutes les données disponibles, on construit un modèle des évolutions de pression et température dans chaque contexte géologique

Coupe = modèle physique

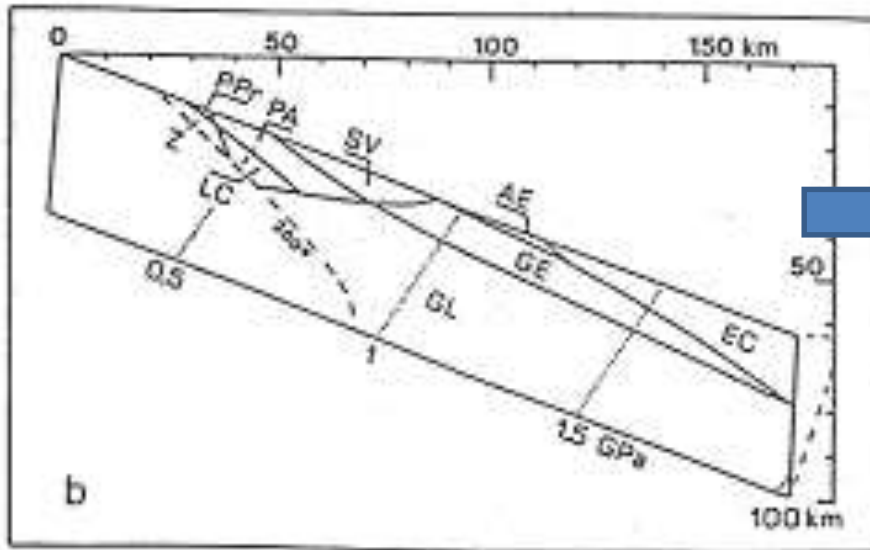
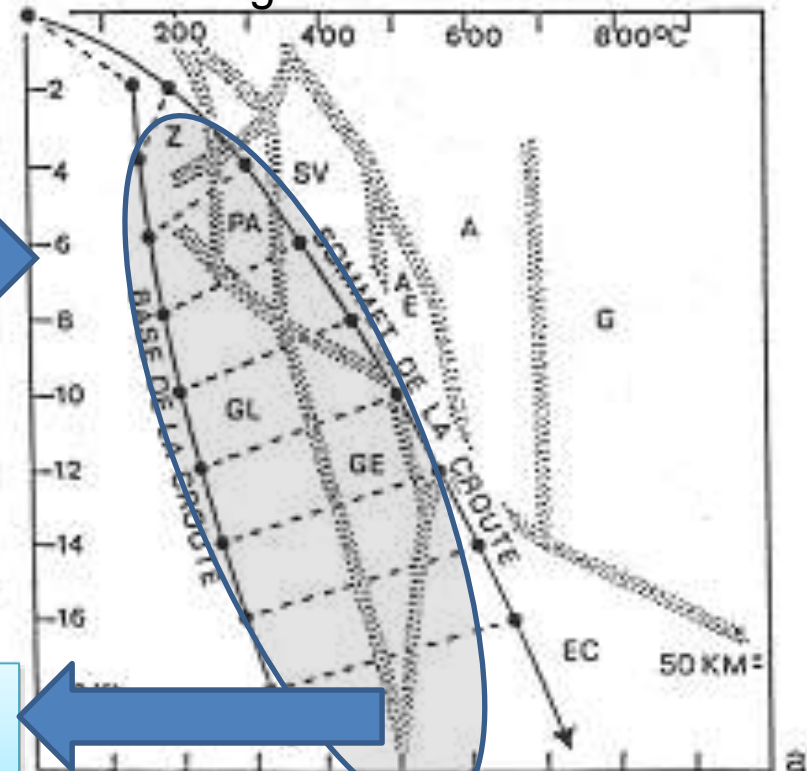


Diagramme P-T

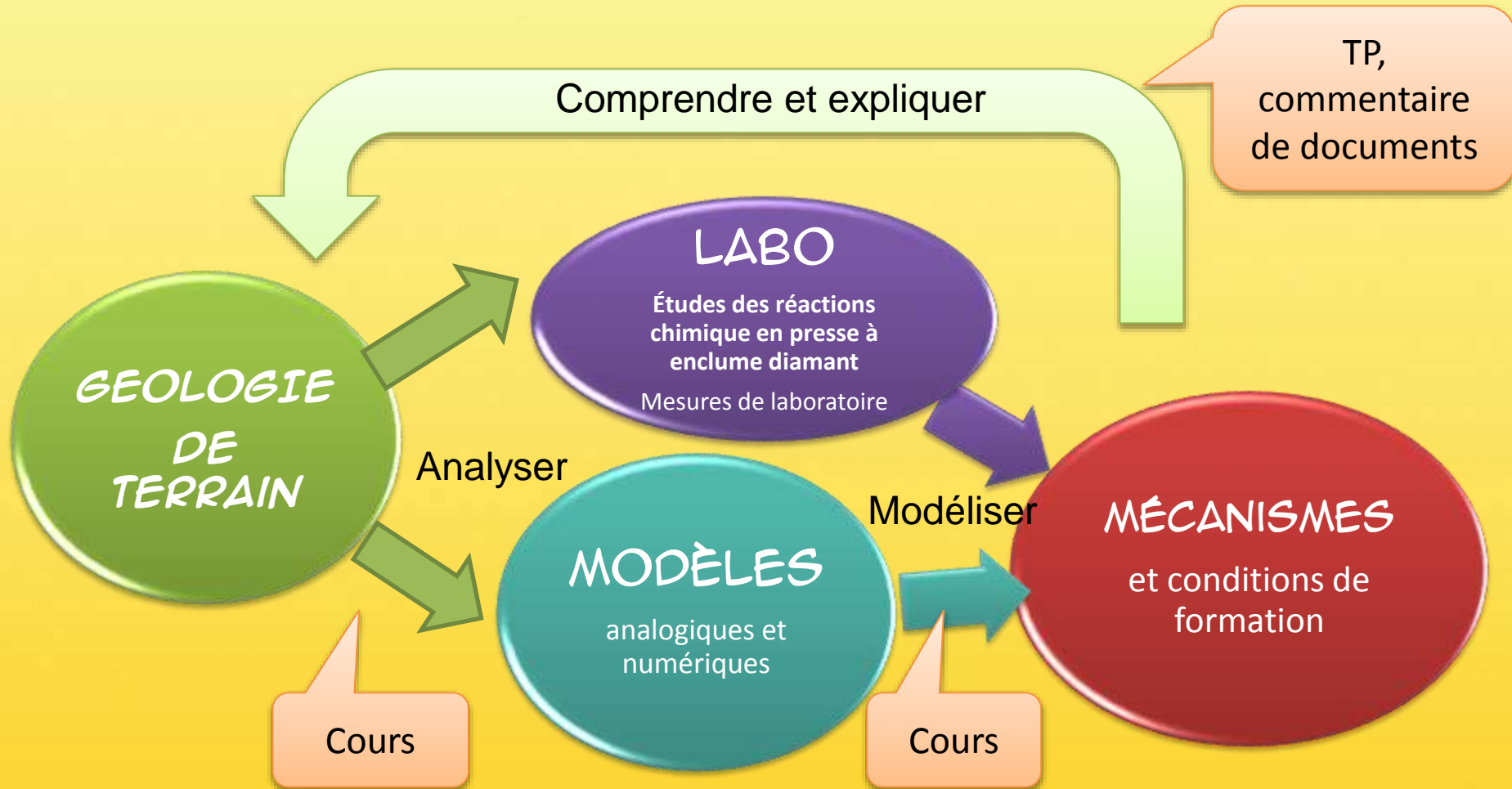


Alix Helme-Guil...

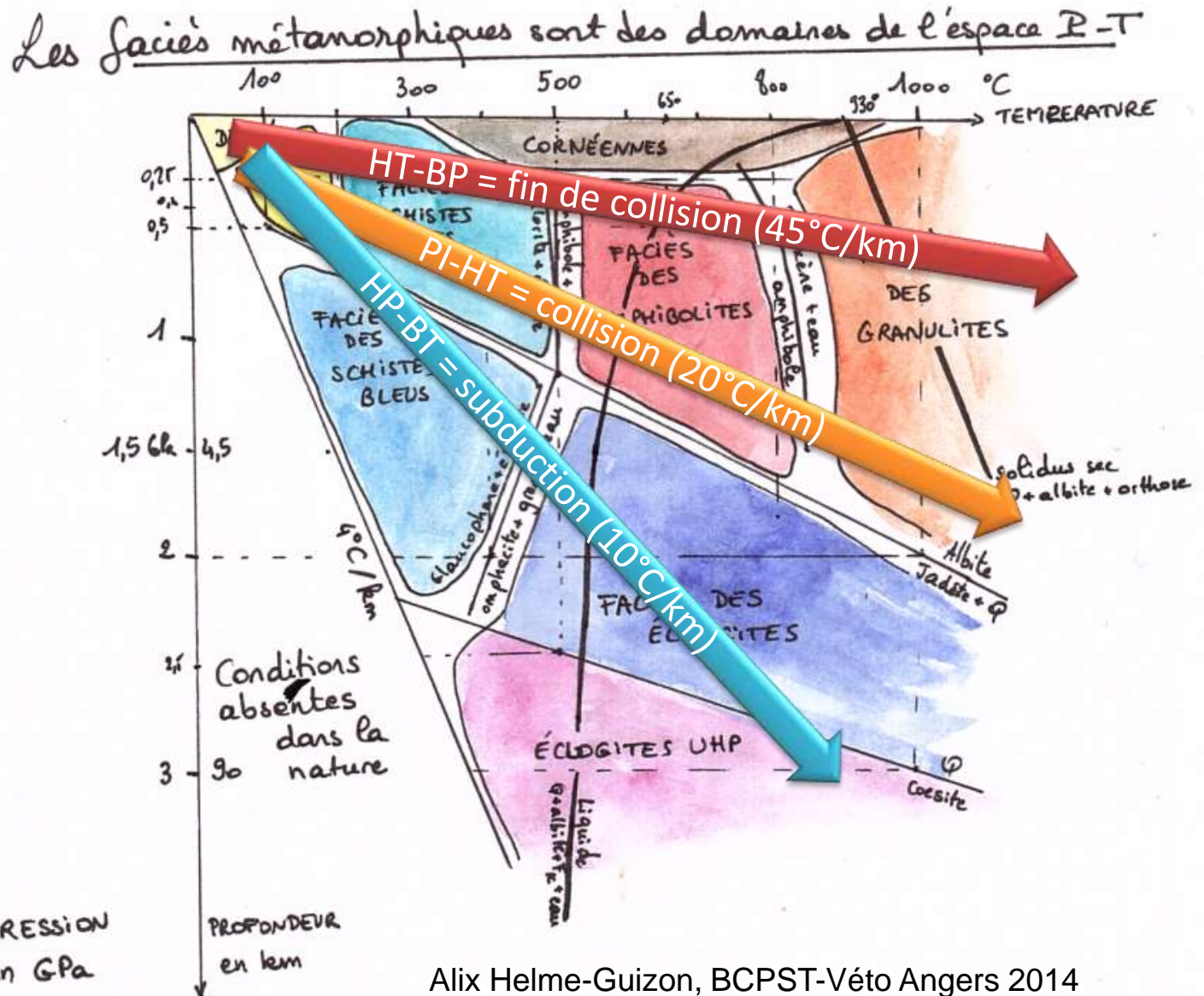
Gradient P-T typique d'une lithosphère en subduction

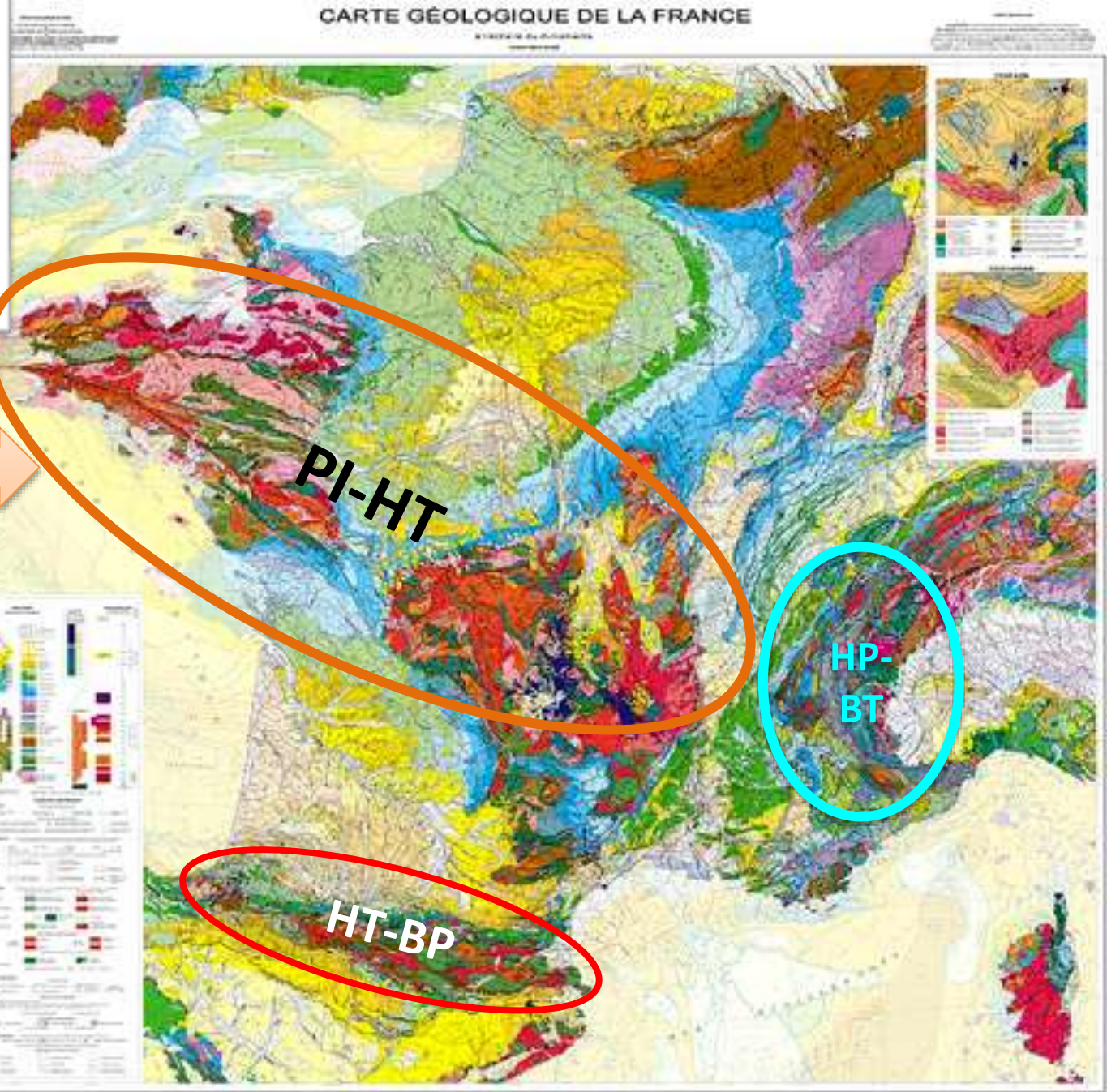
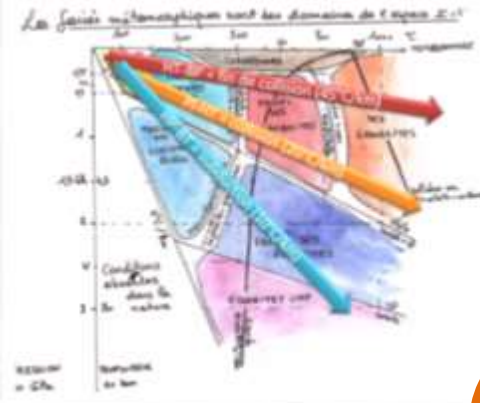


La géologie est un aller-retour entre les données de terrain et les modèles



2) On fait « le chemin inverse » :
à partir du gradient -> contexte géodynamique



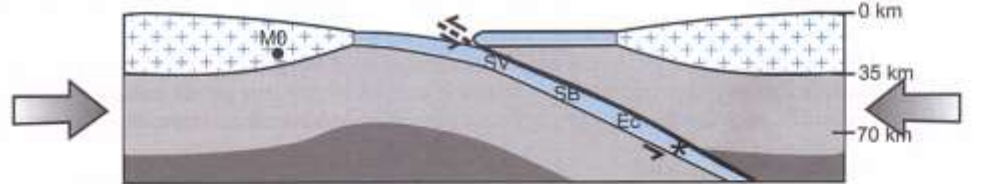


Massifs anciens

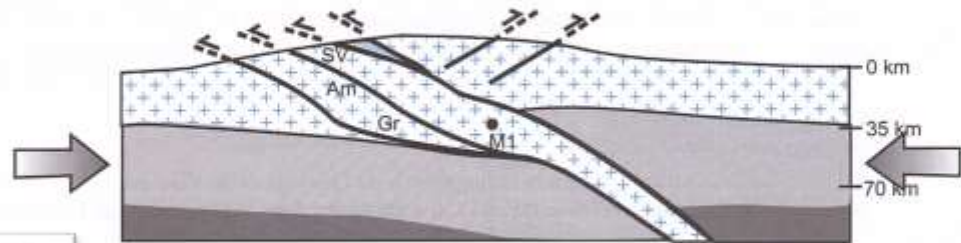
Vosges?
Corse?



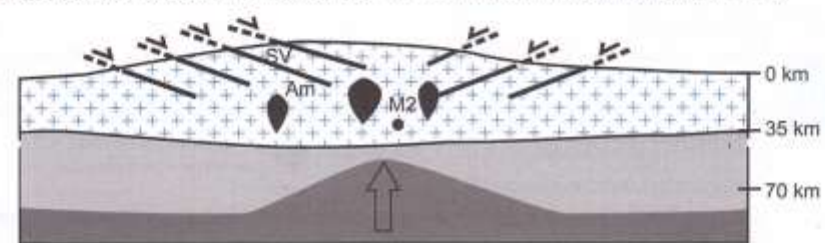
Le gradient de température dans une chaîne de montagne change avec le temps



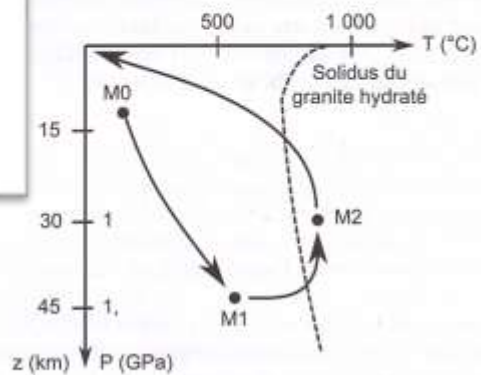
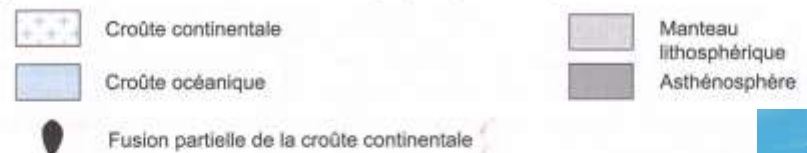
(a) Gradient HP-BT. Faciès schistes verts (SV), schistes bleus (SB), éclogites (Ec), éclogites UHP *



(b) Gradient intermédiaire. Faciès schistes verts (SV), amphibolites (Am), granulites (Gr)



(c) Gradient BP-HT. Faciès schistes verts (SV), amphibolites (Am), et anatexie crustale



(d) Chemin (P, T, t) de la croûte continentale

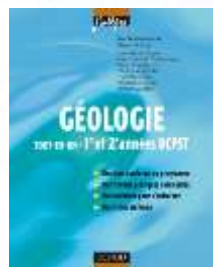
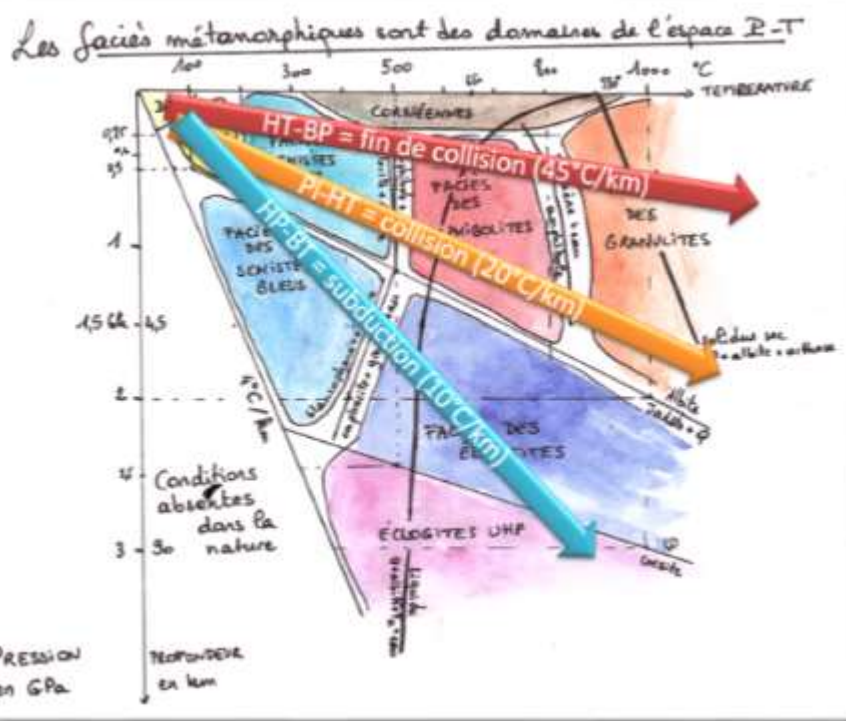


Figure 11.14 Les gradients métamorphiques associés à la convergence lithosphérique. (a) Gradient HP-BT et subduction, (b) Gradient intermédiaire et phase précoce d'une collision, (c) Gradient BP-HT et phase tardive d'une collision. Les contextes a et b seront revus dans le cadre de l'étude des Alpes au chapitre suivant, et dans le TP10.

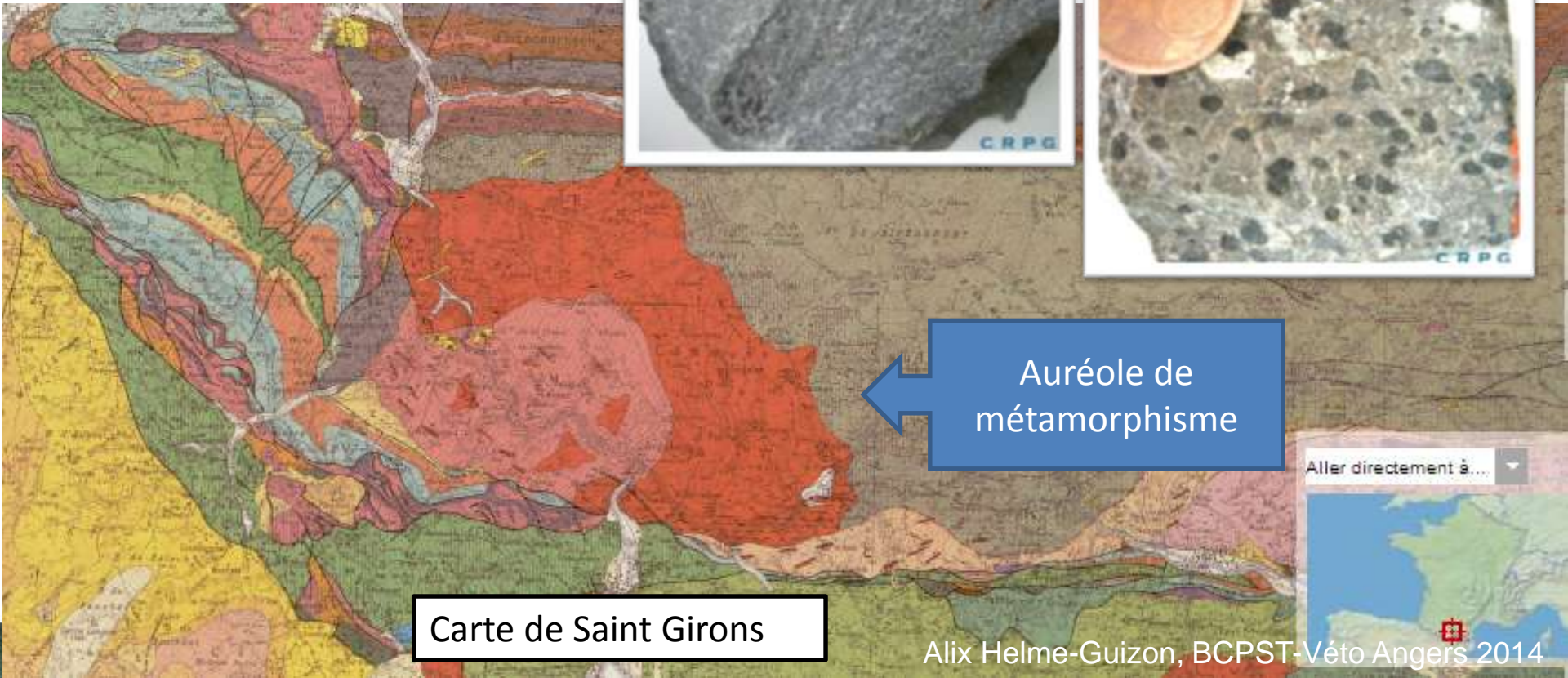
2.3. Le métamorphisme de contact suit globalement les mêmes règles que le métamorphisme régional

En couronne autour d'un pluton
Peu de diversité des roches
Gradient UHT

Cornéenne



Schiste tacheté



Carte de Saint Giron

Auréole de
métamorphisme

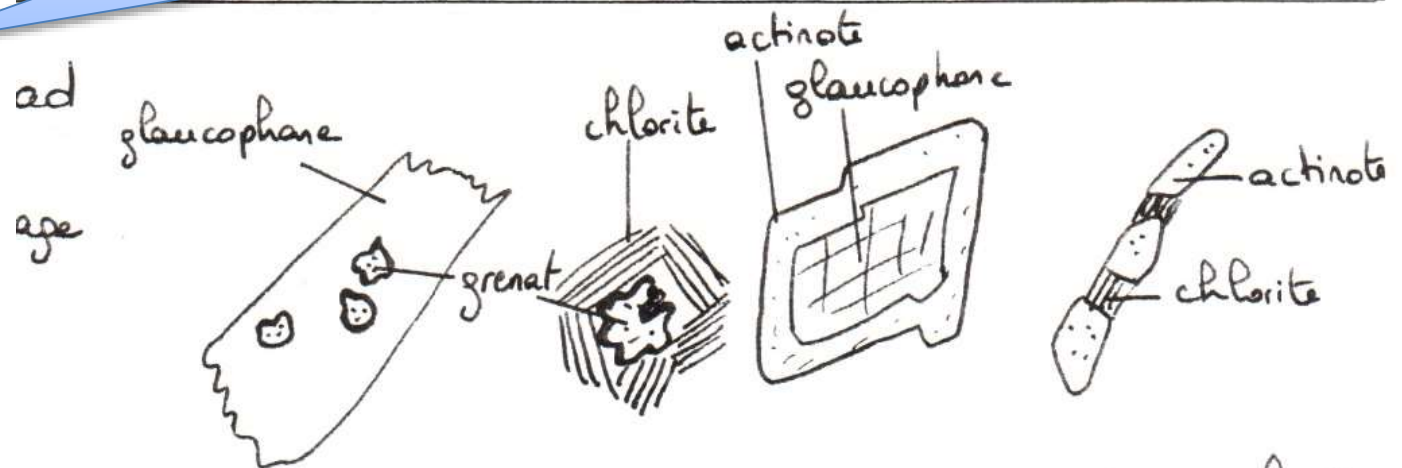
Aller directement à...



2.4. La datation des différentes paragenèses permet de reconstituer un chemin P, T = f(t)

24.1. La chronologie des paragenèses est généralement établie par les principes de datation relative et de déformation et parfois en datation absolue

À partir de ces extraits de lames de roches alpines, reconstituez la chronologie d'apparition des minéraux en justifiant votre démarche. Identifiez le contexte géodynamique de leur formation.

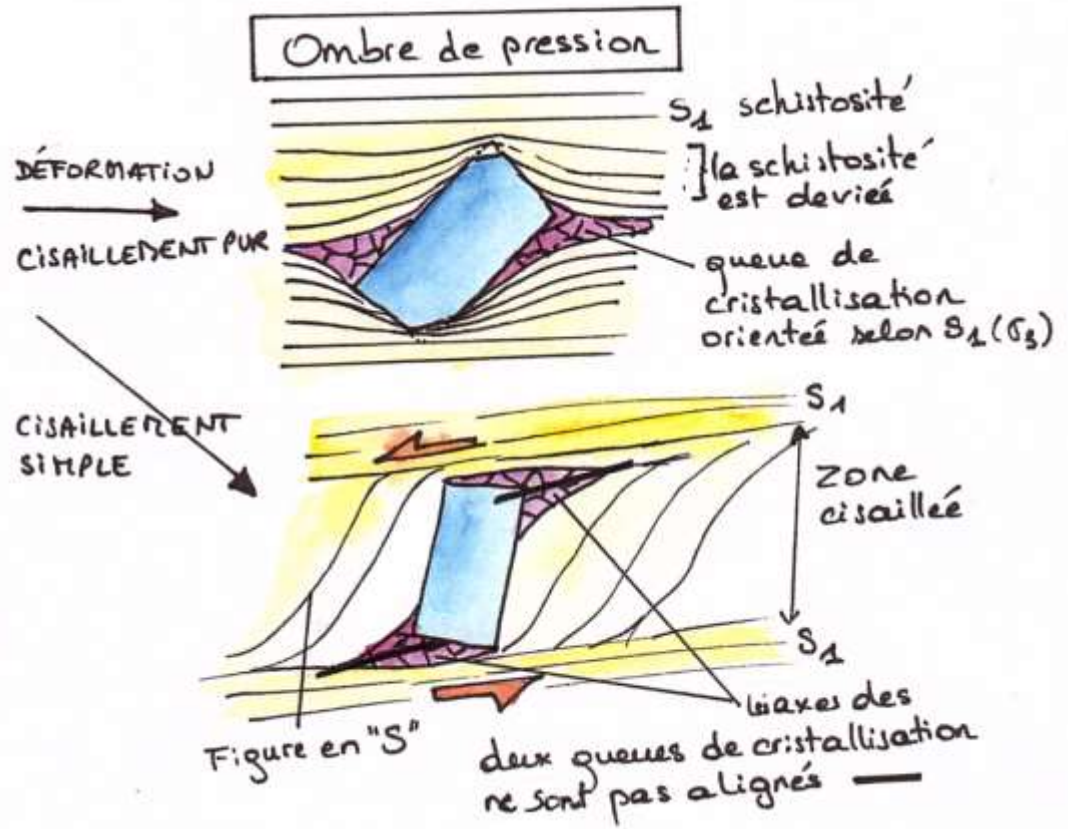
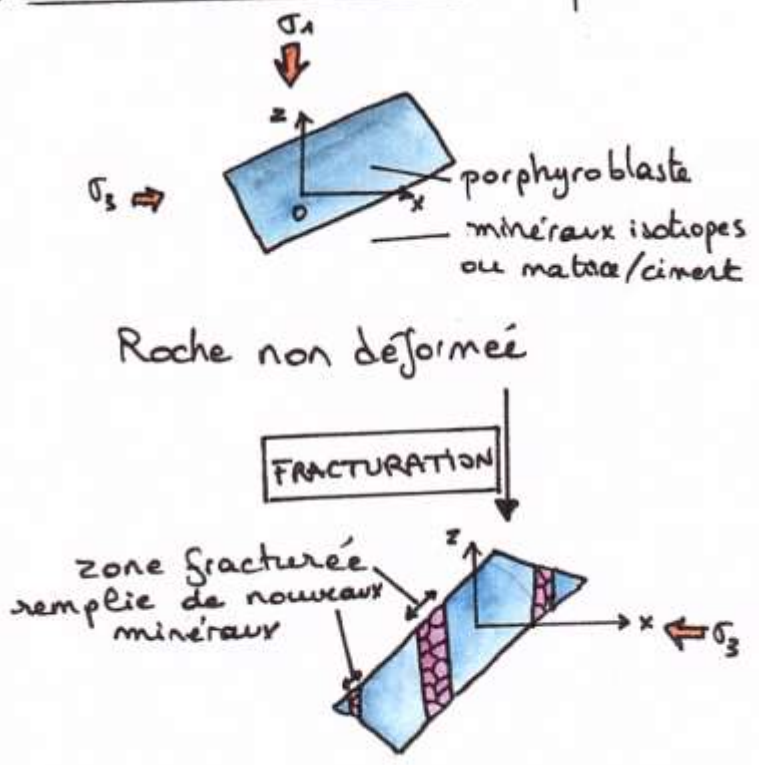


Minéraux des basaltes ophiolitiques métamorphisés



La géométrie des déformations permet de dater la formation d'un minéral par rapport à ces déformations

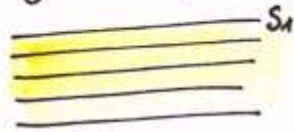
1) Minéral arte tectonique.



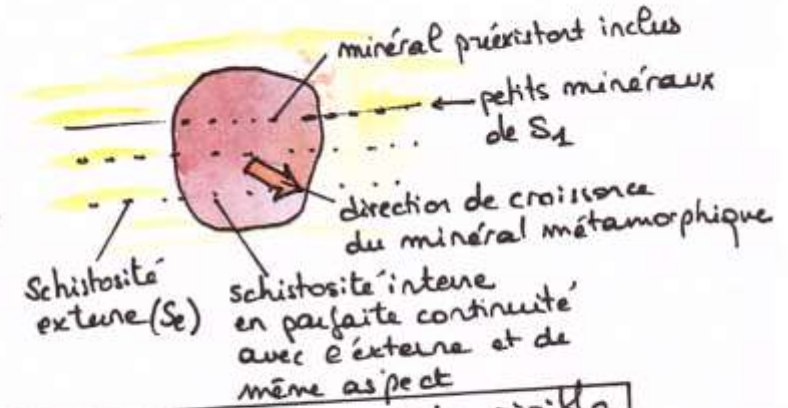
2) Minéral post tectonique

Roche déformée par

cisaillement pur



MÉTAMORPHISME



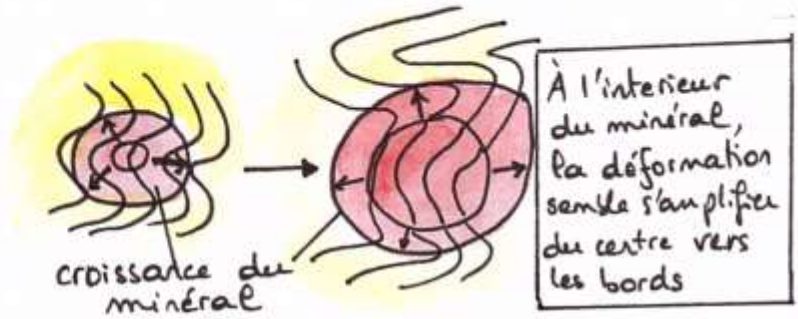
La déformation est visible dans les minéraux



3) Minéral syn tectonique

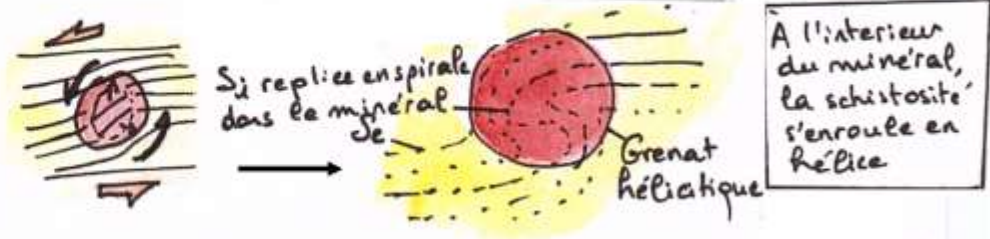
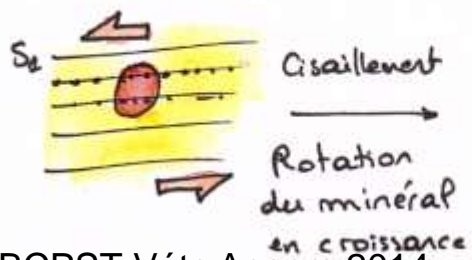
Après une première déformation qui crée S_1


CISAILLEMENT PUR
(plissement de S_1)



CISAILLEMENT SIMPLE

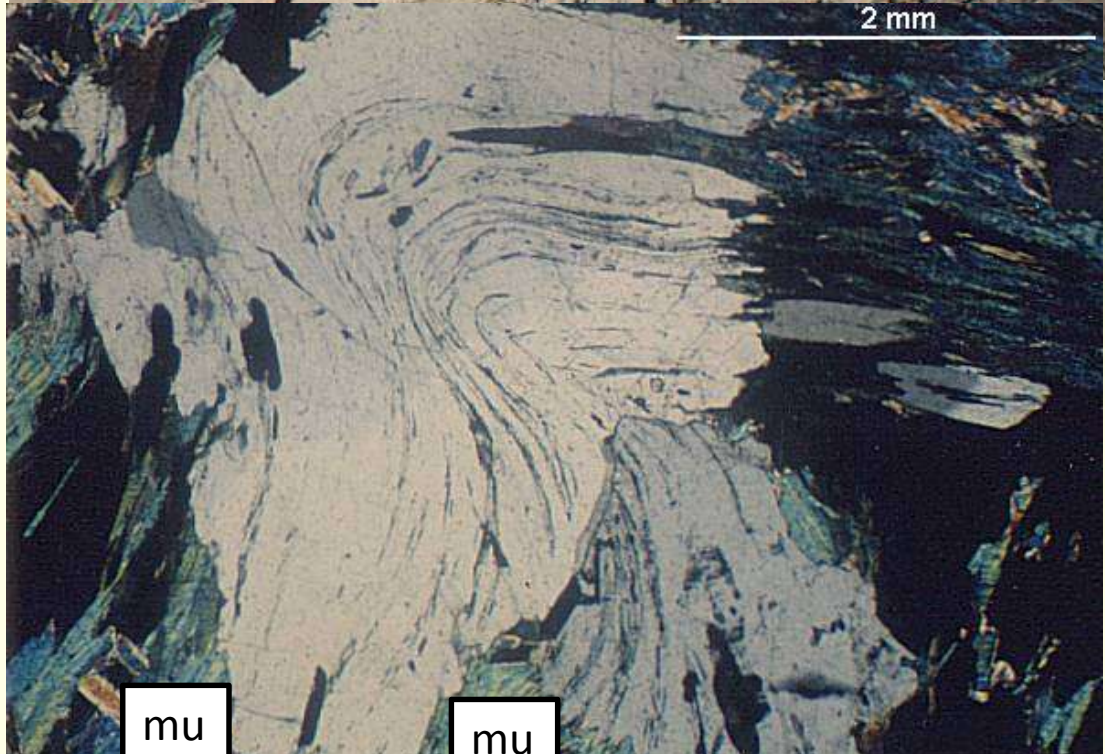
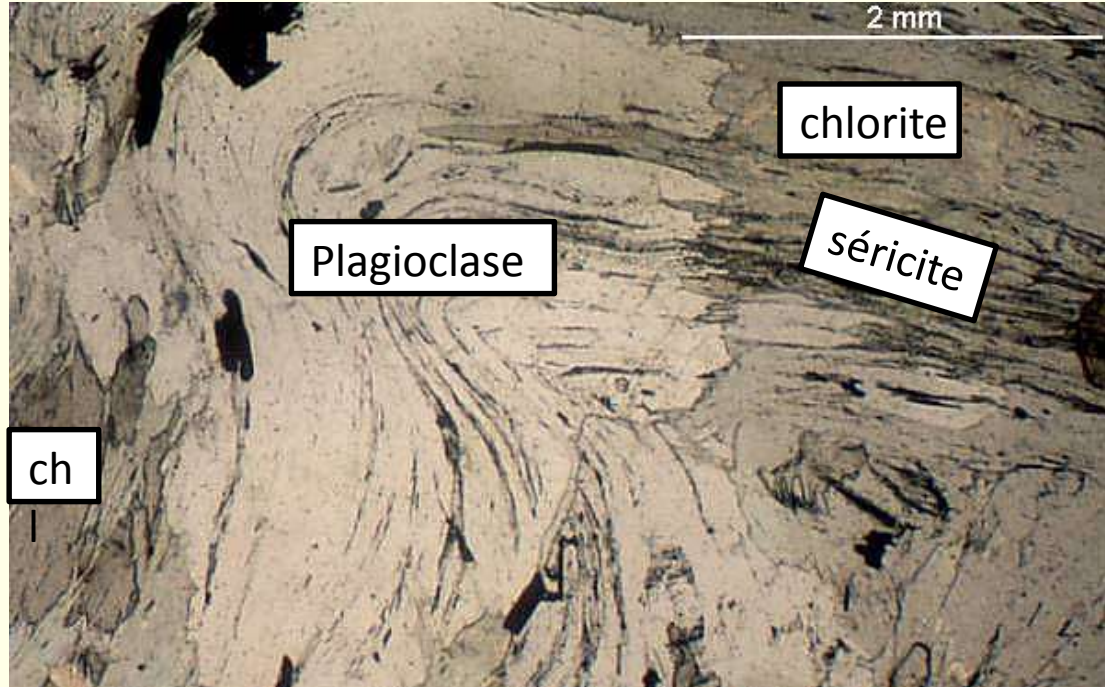
cisaillement de S_1



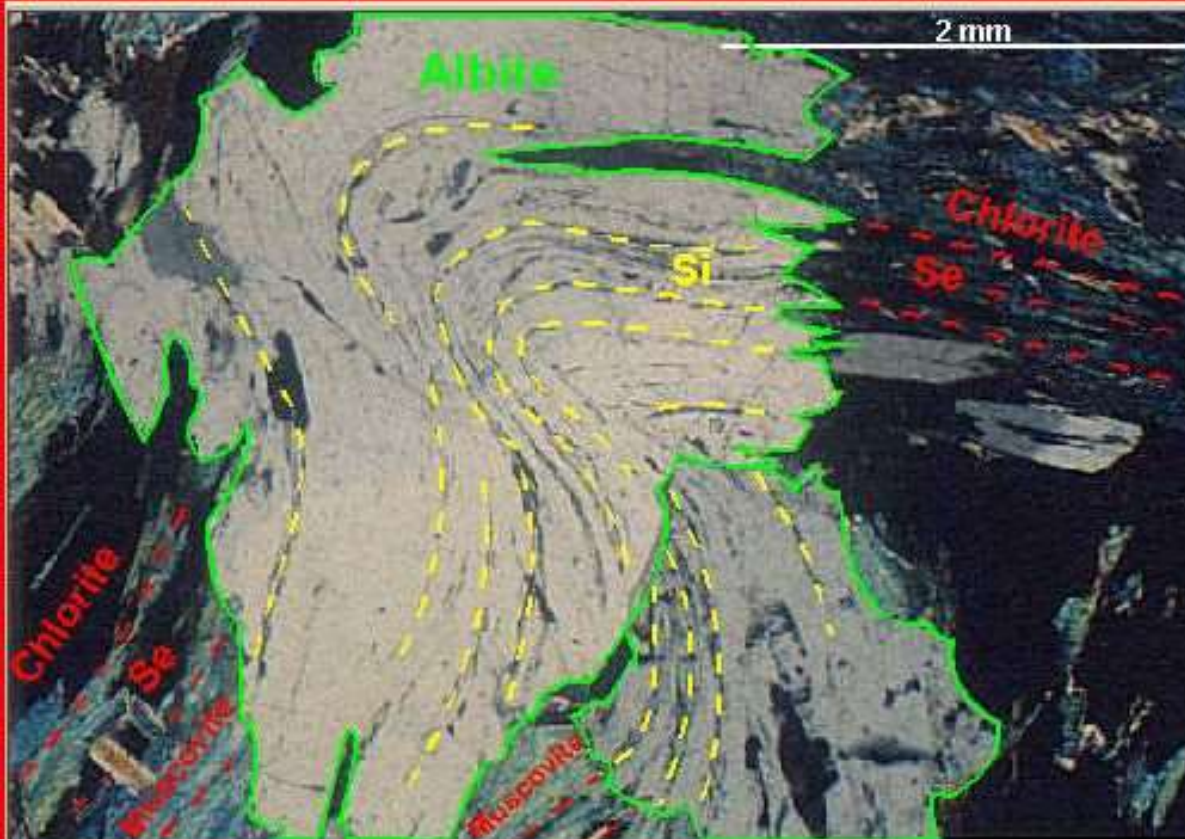


Exercice concours

Analysez cette lame en LPNA et LPA d'un schiste du golfe du Morbihan, afin de déterminer la chronologie de formation des minéraux



Solution



Photos

Clef de
chronologie

La schistosité externe (Se) au plagioclase, matérialisée par des cristaux de muscovite et chlorite est sinueuse, elle a été plissée.

Le plagioclase (non maclé, dit ocellaire) contient des inclusions (minéraux opaques grossiers et fins) qui définissent une schistosité interne (Si). Elle est aussi sinueuse.

Si et Se sont nettement en continuité.

Le plagioclase (albite) a fossilisé deux étapes de déformation, l'une responsable de la formation d'un plan de schistosité, l'autre du plissement de celui-ci (formation des microplis).

La cristallisation du plagioclase est postérieure aux deux déformations.

Datation absolue de la formation des minéraux métamorphiques

Attention : roche complète → âge de formation de la roche initiale
(sédimentaire ou magmatique!)

- extraction des minéraux métamorphiques formés au même moment
(paragenèse) → âge de cet épisode de métamorphisme

-si plusieurs étapes de métamorphisme → dater séparément les paragenèses

-limite : taille des minéraux (porphyroblastes)



Plagioclase + Actinote + Chlorite --> Glaucophane (Amphibole bleue) + eau

1a

Zone déformée

fluides

1b

1 CM

Zone peu déformée

Réaction incomplète

Réaction complète

Photographie en lumière naturelle d'un **métagabbro Schistes Bleus**.
Dans les zones peu déformées, le pyroxène magmatique présente une auréole de glaucophane.

Photographie en lumière naturelle d'un **métagabbro Schistes Bleus**.
Dans les zones déformées, le pyroxène magmatique est totalement déstabilisé. La roche présente une foliation soulignée par des glaucophanes.

24.2. Le chemin prograde indique les conditions d'enfouissement

protolithe

Chenaillet



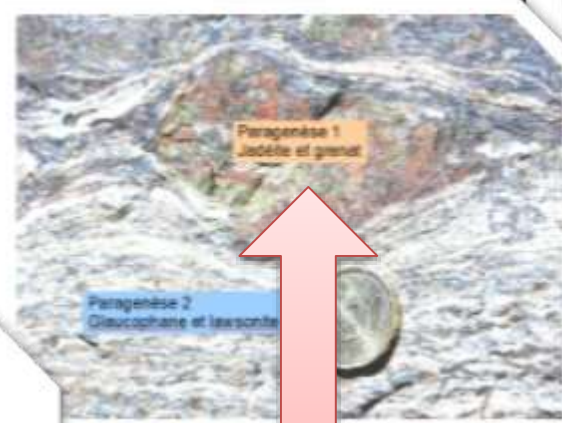
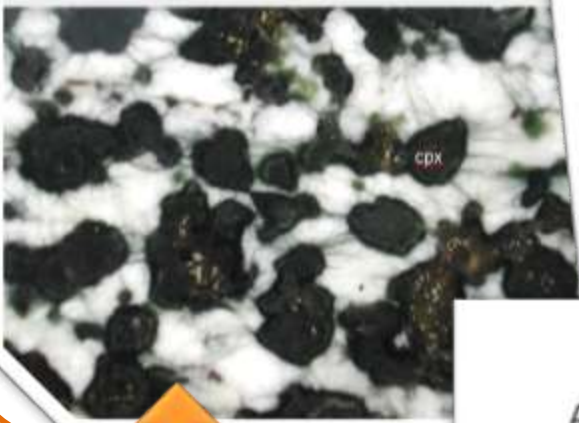
Viso



Queyras



Cpx entouré de hornblende, entourée de chlorite (et un peu d'...



Schiste bleu

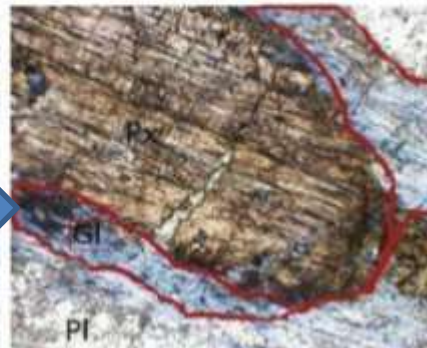
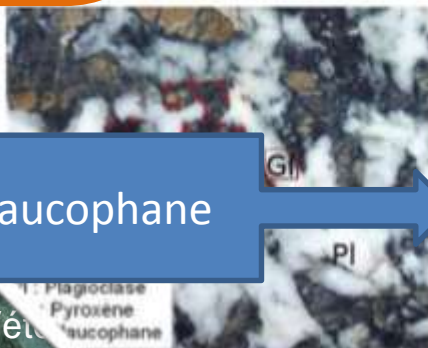
A l'oeil nu

Au microscope

hornblende

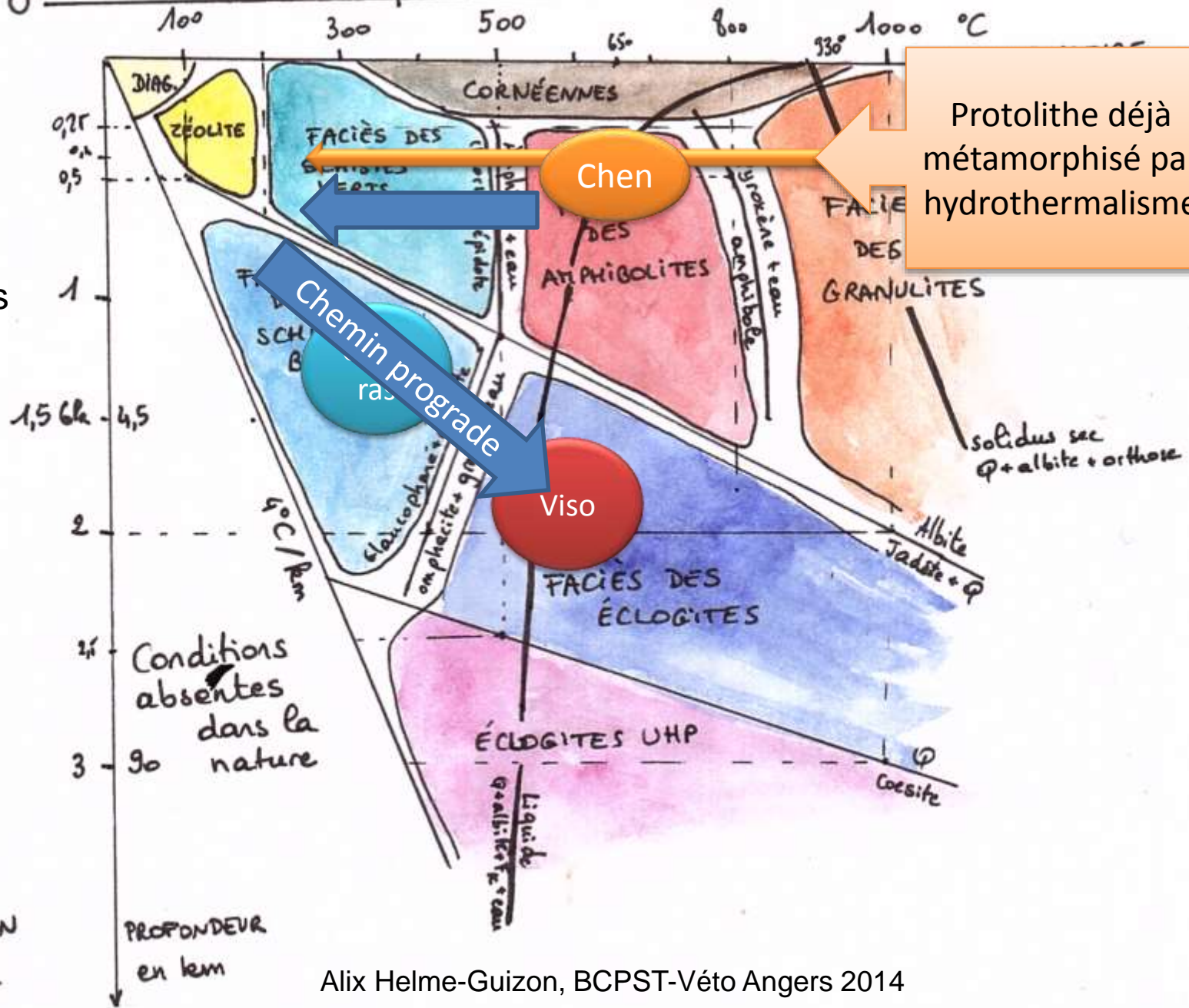
Glaucophane

Omphacite + grenat



Plagioclase
Pyroxène
Glaucophane

Les faciès métamorphiques sont des domaines de l'espace P-T



En supposant que des roches de type Queyras ont donné des roches de type Viso

24.3. Le chemin rétrograde indique les conditions d'exhumation et efface souvent le chemin prograde

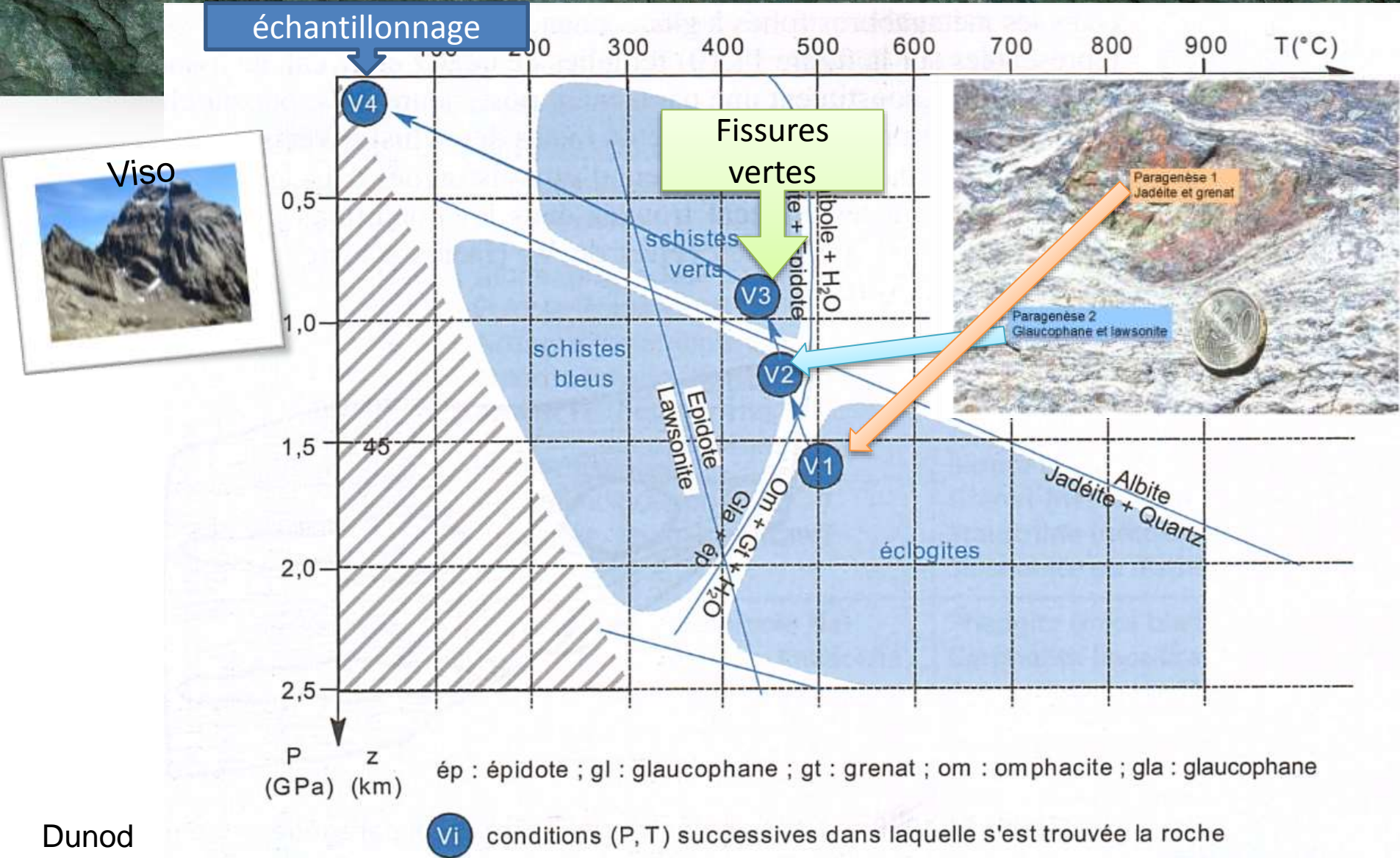
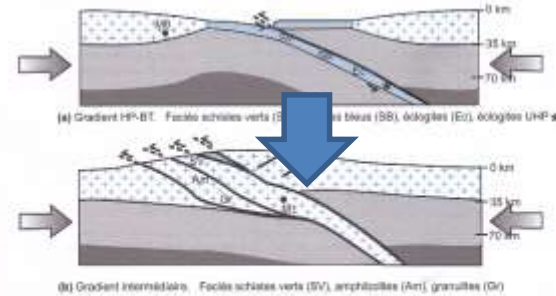
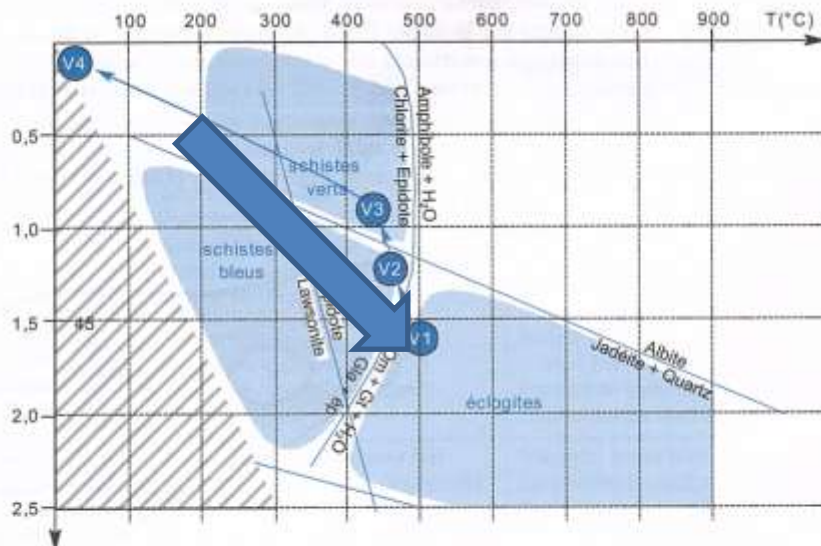


Figure 11.11 Chemin (P,T,t) des métagabbros du Massif du Viso.

Les conditions d'enfouissement et d'exhumation ne sont pas forcément identiques

Exhumation rapide
Le gradient rétrograde = prograde

Exhumation retardée
Gradient rétrograde ≠ prograde



Prograde HP-BT

rétrograde Pi-HT

Cas des massifs anciens

Mêmes gradients aller-retour car remontée par le canal serpenteux et prisme d'accrétion

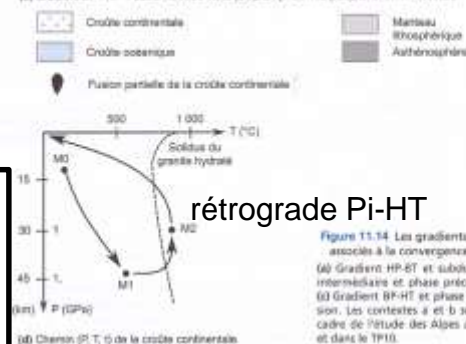


Figure 11.14 Les gradients métamorphiques associés à la convergence lithosphérique. (a) Gradient HP-BT et subduction. (b) Gradient intermédiaire et phase précoce d'une collision. (c) Gradient BP-HT et phase tardive d'une collision. Les contextes a et b seront revus dans le cadre de l'étude des Alpes au chapitre suivant, et dans le TP11.

24.4. Un chemin PTt constitue une jauge de profondeur dans l'histoire tectonique d'une unité crustale

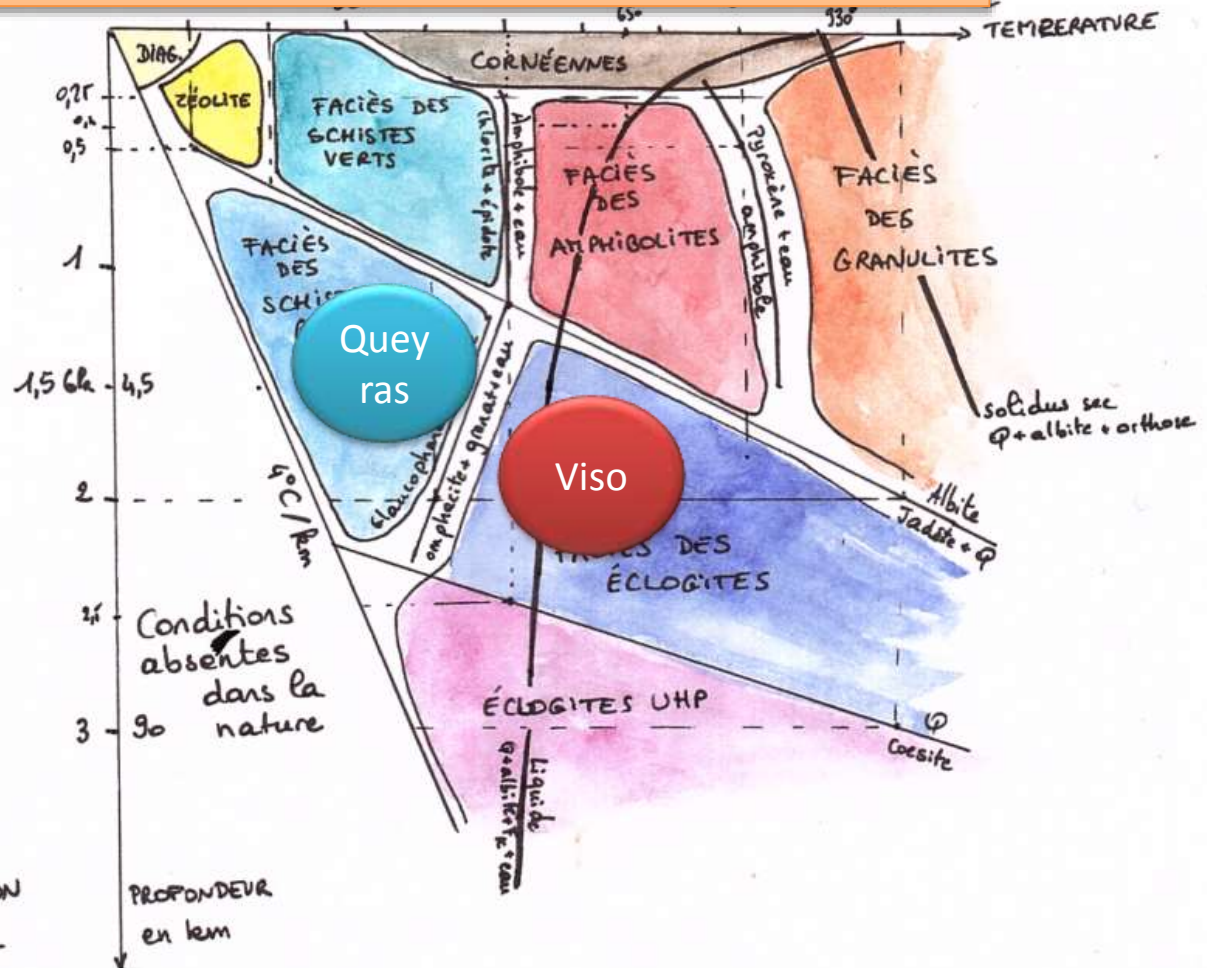
Le chemin prograde est presque toujours effacé!

On cherche la paragenèse qui, dans la roche, indique les conditions de P et T les plus élevées = **jauge de profondeur** = fin du trajet prograde

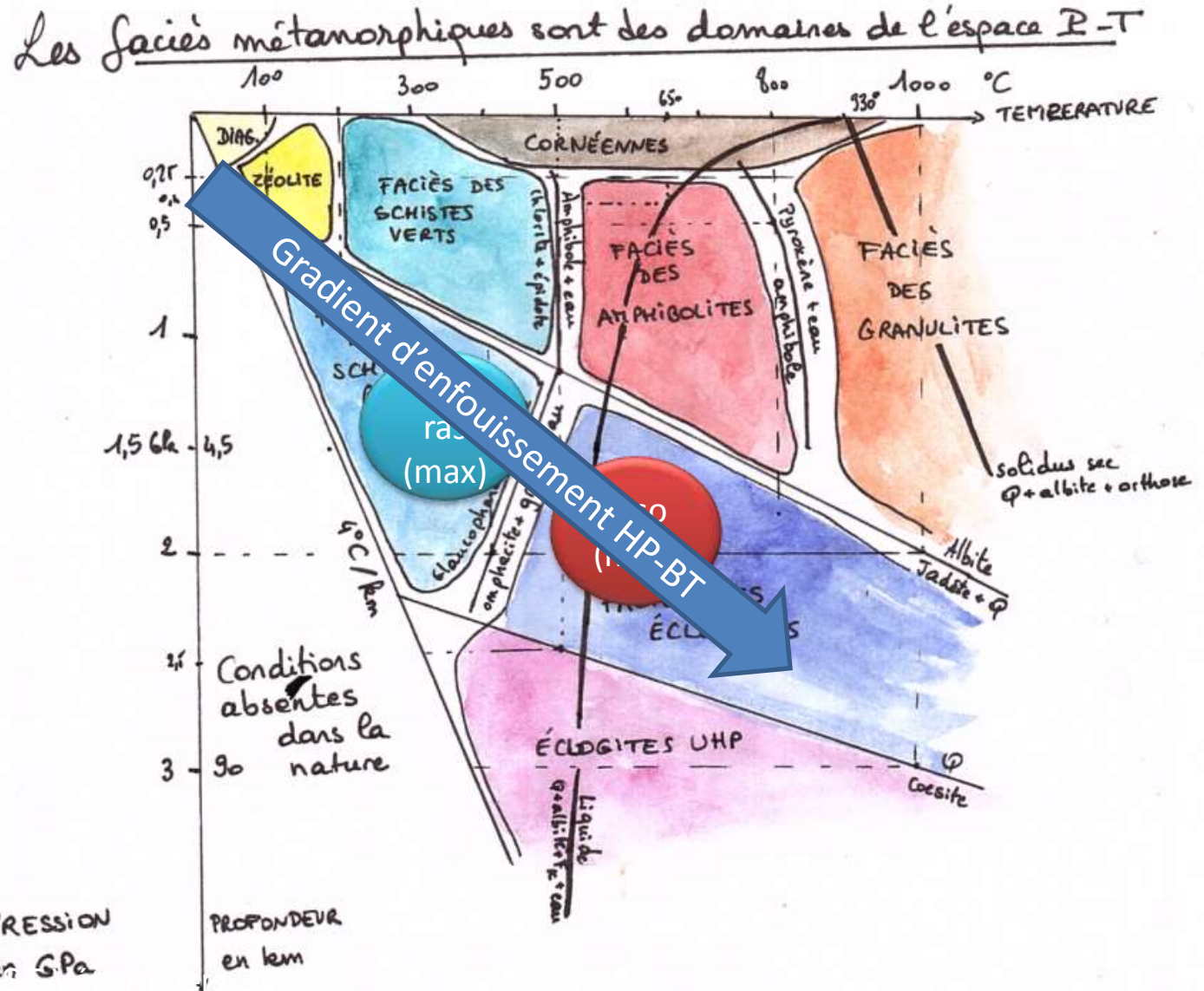


On ne sait pas du tout par quel chemin exact chacun des massifs a été enfoui

Recul critique



Les jauges de profondeurs sont les points qui permettent de retrouver le contexte géodynamique d'enfouissement



9. Un métamorphisme de contact

- a) concerne toute une région (centaine de km), en contact avec une zone d'anomalie thermique
- b) concerne seulement quelques kilomètres en contact avec une zone d'anomalie thermique
- c) se produit autour d'un massif granitique
- d) se produit obligatoirement lors de l'anatexie

10. On reconstitue le contexte géodynamique du métamorphisme

- a) de l'enfouissement, en suivant au sein de la roche, les paragenèses qui montrent un approfondissement
- b) de l'enfouissement, en utilisant plusieurs roches pour lesquelles on prend pour chacune la valeur la plus forte de pression et température
- c) de l'exhumation, en suivant au sein de la roche, les paragenèses qui montrent une diminution de pression et de température
- d) de l'exhumation, en utilisant plusieurs roches pour lesquelles on prend pour chacune la valeur la plus forte de pression et température



A RETENIR

Le métamorphisme permet, comme le magmatisme, de reconstituer le **contexte géodynamique**; il permet en particulier d'étudier la disparition de l'océan par **subduction**, et les étapes de formation d'une **chaîne de montagne**.

La reconstitution du contexte géodynamique est difficile car

1. Une roche a un trajet dans l'espace P-T qui a induit l'apparition de plusieurs réactions chimiques successives. Il faut pouvoir les ordonner par **datation relative**;
2. **Seules les dernières réactions chimiques sont visibles (métamorphisme rétrograde)**, effaçant les précédentes. Il faut donc **plusieurs roches d'une même région** et période pour obtenir pour chacune les conditions maximum de pression et de température (c'est une **évaluation de la profondeur max d'enfouissement** de chaque roche)
3. En traçant la droite qui passe par les maximum de chaque trajet $PT=f(t)$ de chaque roche, on obtient le **gradient géothermique qui donne le contexte géodynamique**
4. En cas de subduction, ce gradient est le même à l'enfouissement et à l'exhumation, mais ce n'est pas le cas pour la collision.



Pour une collision, on trace donc d'abord la droite qui relie les points de maximum de pression (enfouissement), puis celle qui relie les maximum de température (réchauffement ultérieur par empilement des croutes puis remontée de l'asthénosphère)

À RETENIR

- Pour montrer que des roches diverses ont une même histoire, on les regroupe sous le nom de méta+nom du faciès des (roche basique qui apparait dans les mêmes conditions P-T)
- La nature du protolithe et le gradient géothermique permettent de reconstituer **l'histoire** de la roche; à l'aide des roches de la région et leur distribution spatiale -> histoire de la région
- Outil très utile dans la reconstitution de l'histoire des chaînes de **montagne**
- Le métamorphisme peut amener des roches crustales à la fusion partielle (**anatexie**), et participe ainsi au recyclage des roches de la croûte -> plutons -> **métamorphisme de contact**



Alpes (S4)

À SUIVRE...