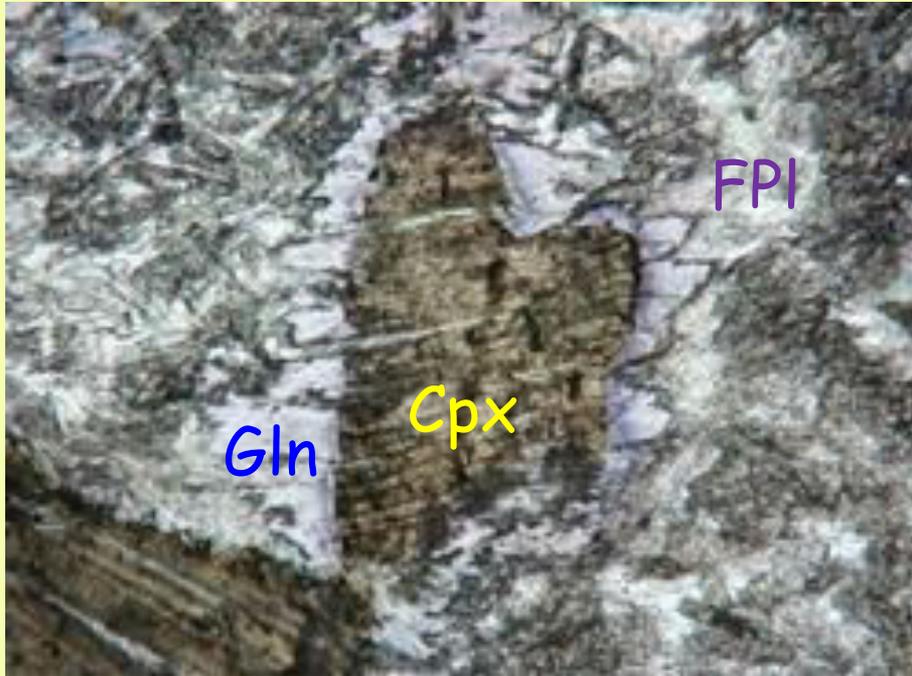
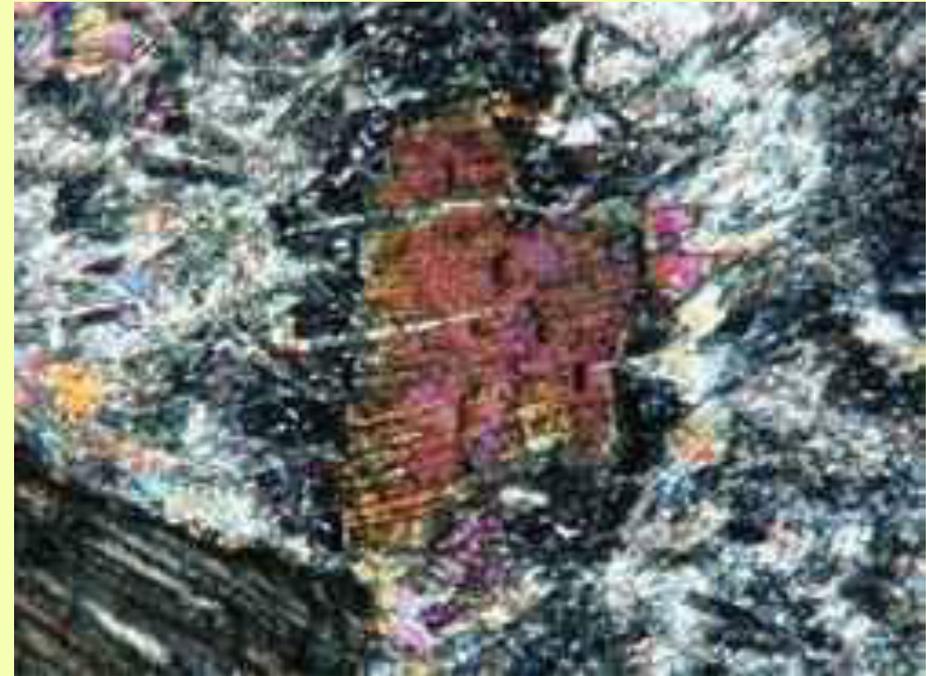


# PARTIE ST-G LE MÉTAMORPHISME, MARQUEUR DE LA GÉODYNAMIQUE INTERNE



LPNA



LPA

Métagabbro métamorphisé dans le faciès schistes bleus  
 $Cpx + FPI + H_2O = Gln$

## SAVOIRS VISÉS

### ST-G-1 Les associations minéralogiques indicatrices de pression et de température

Une roche exposée à un changement de température et/ou de pression est le siège de transformations minéralogiques. Ces transformations sont régies par les lois de la thermodynamique et de la cinétique chimique.

Les associations minéralogiques des roches métamorphiques sont métastables.

Les faciès métamorphiques sont des domaines de l'espace pression-température. L'association de minéraux stables dans un faciès constitue une paragenèse à l'équilibre. Ces associations minérales dépendent de la nature de la roche originelle (protolithe).

Des géobaromètres et des géothermomètres sont constitués par des réactions univariantes du métamorphisme, des minéraux index et par la distribution de certains éléments chimiques dans les phases minérales.

Dans certaines conditions, le métamorphisme peut conduire à l'anatexie crustale. Une migmatite est une roche métamorphique qui résulte d'une anatexie crustale partielle.

La lithosphère océanique, formée à l'axe des dorsales, interagit avec l'eau de mer et acquiert un faciès schistes verts.

## CAPACITÉS EXIGIBLES

- Analyser et exploiter les représentations cartographiques du métamorphisme.

- Exploiter les données des lames minces, les minéraux étant légendés.

- Exploiter des données permettant de faire le lien entre déformation des roches et recristallisations.

- Identifier à l'oeil nu des roches métamorphiques : micaschistes, gneiss, métagabbros, amphibolites, élogites, migmatites, marbres.

- Situer approximativement les limites des principaux faciès métamorphiques : schistes verts, amphibolite, granulite, schiste bleu, élogite.

- Discuter de la pertinence du choix d'un géobaromètre ou d'un géothermomètre.

- Exploiter des données de thermométrie et barométrie chimiques.

- Utiliser une grille pétrogénétique fournie.

- Interpréter et exploiter des données montrant l'association métamorphisme – anatexie crustale.

- Exploiter des documents montrant les échanges chimiques avec l'eau de mer.

## ST-G-2 La distribution spatiale des roches métamorphiques et les variations temporelles des associations minéralogiques

La distribution spatiale des roches métamorphiques à l'échelle régionale permet d'identifier des séries métamorphiques, indicatrices d'un gradient métamorphique.

Les mêmes méthodes peuvent être transposées à plus petite échelle dans le cadre du métamorphisme de contact.

L'étude des différentes paragenèses présentes dans une roche métamorphique et leur datation permettent de reconstituer un chemin  $P, T = f(t)$ . Ce chemin fait apparaître des étapes progrades et des étapes rétrogrades, caractéristiques des conditions d'enfouissement et des conditions d'exhumation. Un chemin  $P, T = f(t)$  constitue une jauge de profondeur dans l'histoire tectonique d'une unité crustale.

La nature des séries métamorphiques et les reconstitutions de chemins  $P, T = f(t)$  sont étroitement liées à l'histoire géodynamique.

- Analyser et exploiter une carte géologique laissée au choix permettant l'étude d'une série métamorphique.

- Exploiter la juxtaposition d'assemblages typomorphes (i.e. ressemblant à un type de roche précis) dans une série métamorphique. Déterminer un gradient métamorphique.

- Relier les principaux gradients à des contextes géodynamiques (dans le cadre des Alpes).

- Exploiter des données illustrant le cas particulier du métamorphisme de contact.

- Exploiter des données pétrogénétiques et structurales pour proposer une hypothèse en termes de chemin  $P, T = f(t)$  ;

- Exploiter des assemblages typomorphes et des chemins  $P, T = f(t)$  dans le cadre d'une histoire régionale.

- Utiliser l'évolution dans le temps des associations minéralogiques pour éclairer l'exemple d'une chaîne de montagne en termes géodynamiques.

Roches portées à des profondeurs  $\neq$  de leur profondeur initiale  $\rightarrow$  recristallisation qui les transforme en roches métamorphiques.

Métamorphisme = réajustement minéralogique et/ou structural, de phases cristallines, à de nouvelles conditions PT. Réarrangements à l'état solide, sans fusion, en présence souvent d'une phase fluide,  $H_2O$  ou  $CO_2$ .

Transformations effectuées dans le niveau structural inférieur: limite inférieure = anatexie qui débute à  $700^\circ C$   $\rightarrow$  magma de nature granitique.

Cette « fourchette métamorphique » est due à plusieurs paramètres  $\rightarrow$   $\neq$  types de métamorphisme

- ✓ Présence de fluides  $\rightarrow$  apparition de l'anatexie plus ou moins tôt.
- ✓ Nature de la roche de départ ou protolithe car tous les minéraux ne fondent pas à la même  $T^\circ C$ .
- ✓ Paramètres physiques.

# Rappel BCPST 1 ST-D Les déformations de la lithosphère

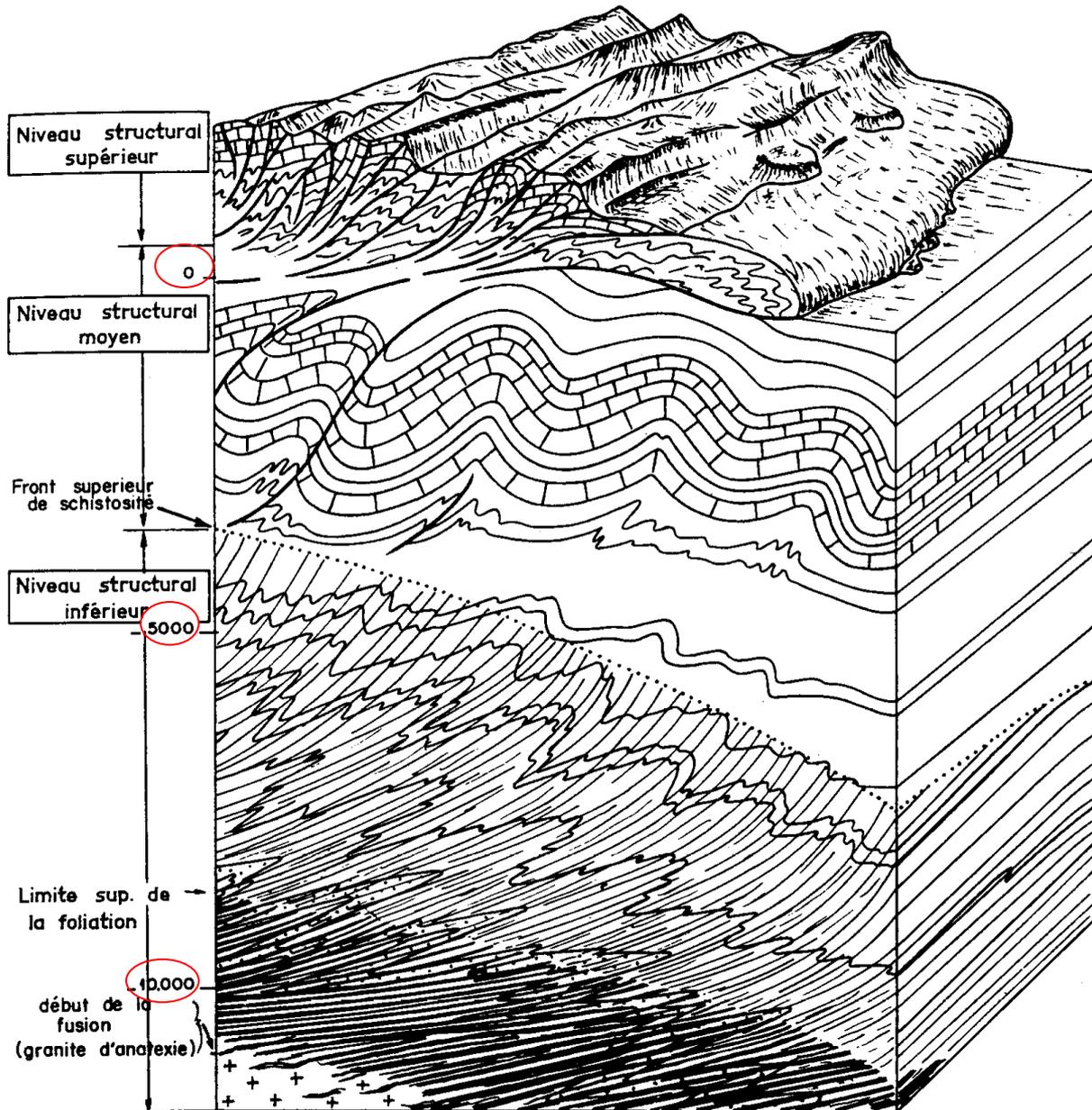
**Fragile: failles, chevauchements  
charriages**

**Fragile/ductile: Association de  
déformations hétérogènes  
continues (plis) et discontinues  
(failles)**



**T° C et P augmentent: Ductile  
Plis anisopaques, schistosité  
généralisée fluage  
Domaine du métamorphisme.  
Ne s'observe à l'affleurement  
qu'après érosion**

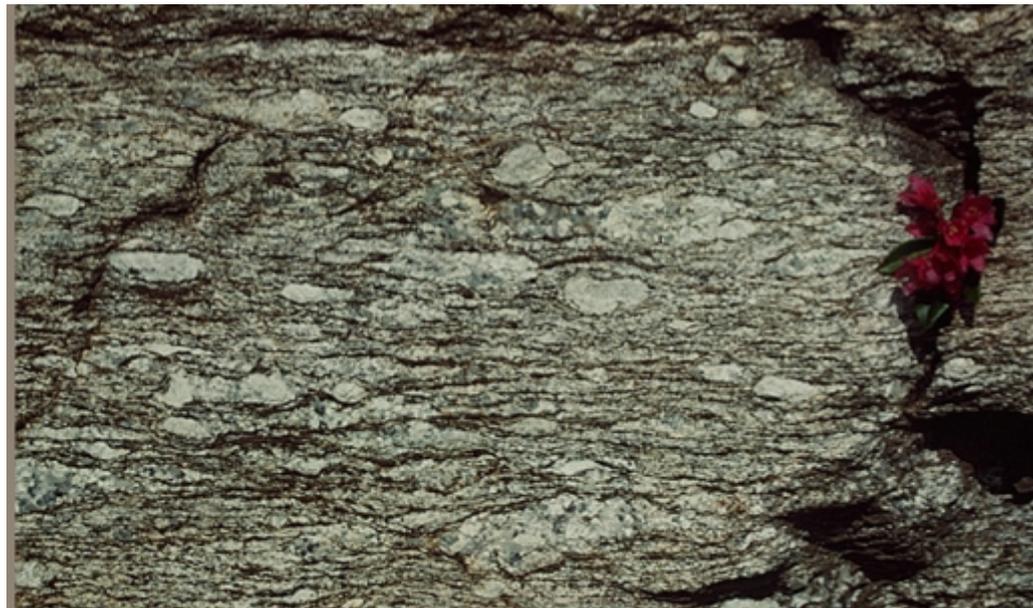
**Anatexie = fusion. Domaine du  
magmatisme**



Protolithe reconnaissable → *préfixe méta* : metabasalte, métapélite, métagranite.

Protolithe non identifié mais origine, sédimentaire ou magmatique reconnue → *préfixes para et ortho* :

- ✓ R. sédimentaire → roche paradérivée. Paragneiss = métapélite.
- ✓ R. magmatique → roche orthodérivée. Orthogneiss = métagranite



# Problématiques

- ✓ Quels sont les marqueurs du métamorphisme ?
- ✓ Quels sont les mécanismes de transformation minéralogiques ?
- ✓ Quels enseignements nous apportent les assemblages minéralogiques ?
- ✓ En quoi les roches métamorphiques sont-elles des témoins de l'histoire géodynamique ?

# I. LES MARQUEURS DU MÉTAMORPHISME A DIFFÉRENTES ÉCHELLES D'OBSERVATION

## I.1 LES DONNÉES CARTOGRAPHIQUES : EXEMPLE DE LA CARTE DE ST GIRONS

### I.1.1 Le métamorphisme régional

*A. Qu'est-ce qu'un(e) isograde du métamorphisme ?*

*B. Les migmatites et l'anatexie*

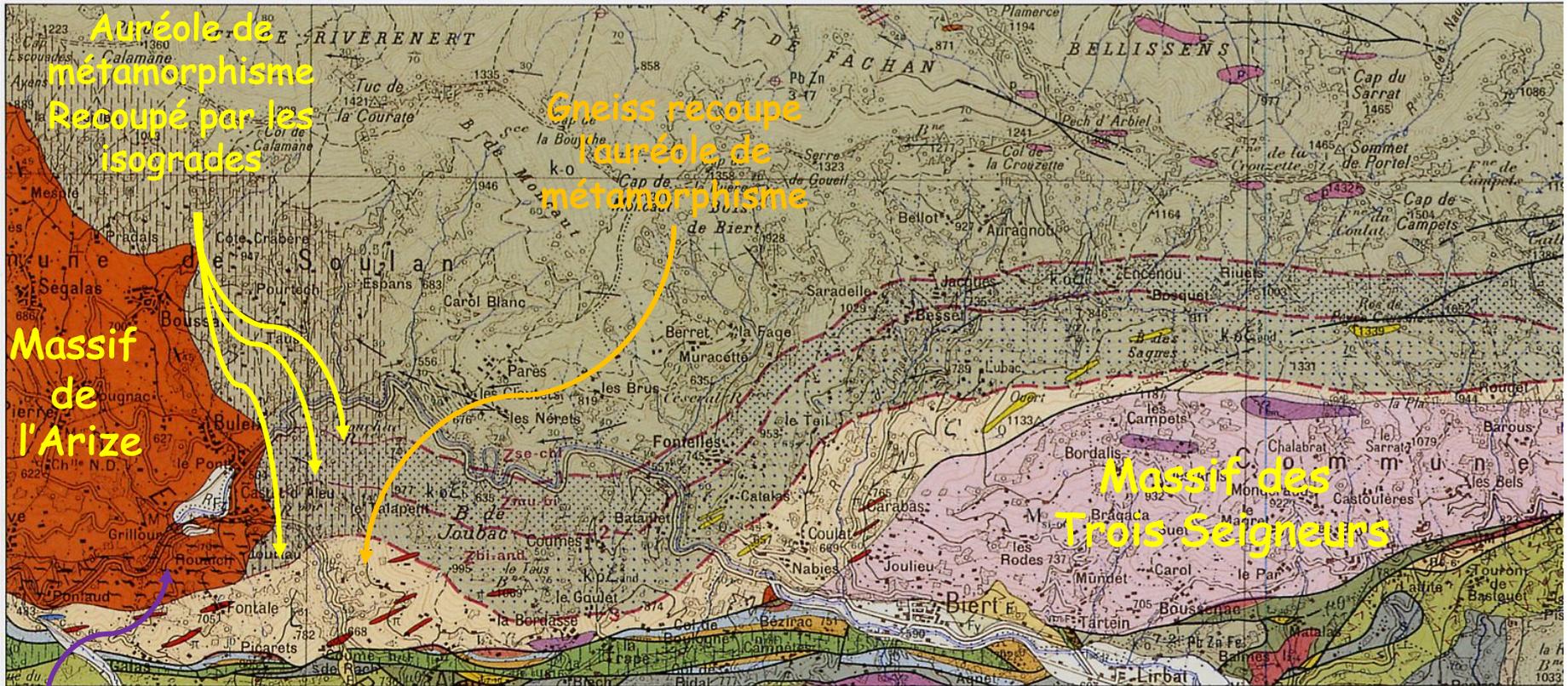
### I.1.2 Le métamorphisme de contact

## I.2 IDENTIFICATION DE QUELQUES ROCHES MÉTAMORPHIQUES (cfTP)

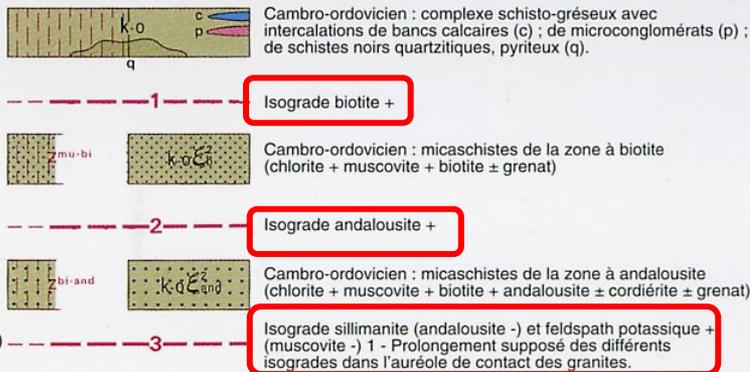
I.2.1 Quelques roches du métamorphisme de contact

I.2.2 Quelques roches du métamorphisme général

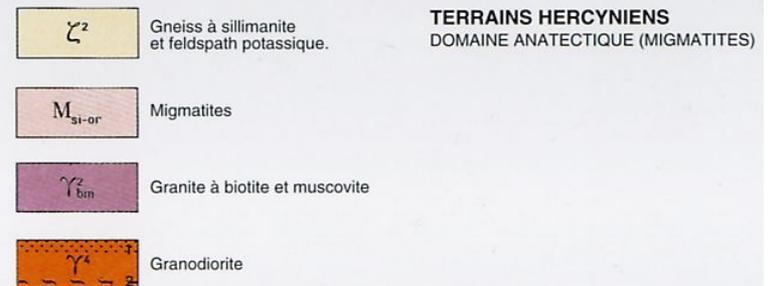
# Isogrades du métamorphisme dans les Pyrénées



## Structure fluidale



Métamorphisme régional



Isograde = ligne de même degré métamorphique = apparition ou disparition de minéraux index, facilement identifiables sur le terrain (œil nu et loupe ou compte-fil).

Sur la carte: intersection entre la surface isograde et la topographie.

Signe + indique la première apparition et signe - indique la disparition d'un minéral index.

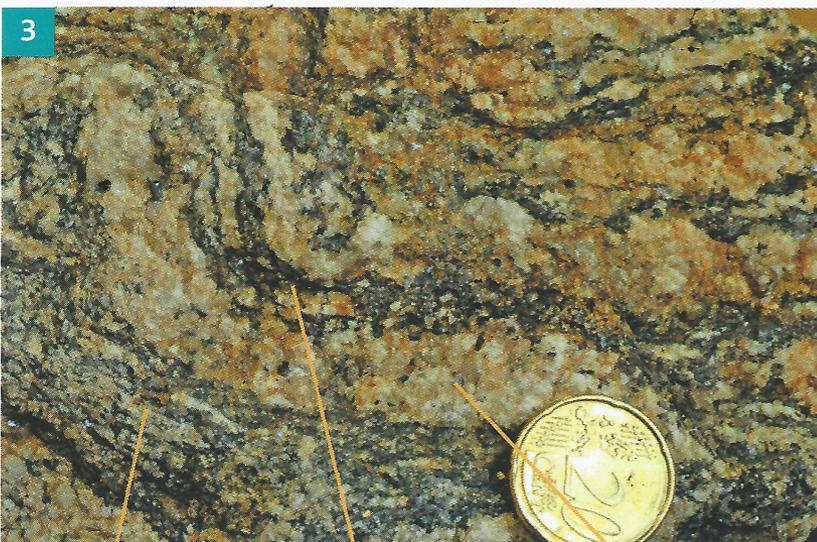
Le minéral ne reflète pas toujours une réact° spécifique, plusieurs réact° # pouvant conduire à ce minéral. Cela dépend du chimisme du protolithe et des conditions P/T.

## Migmatite (zone de faible fusion)



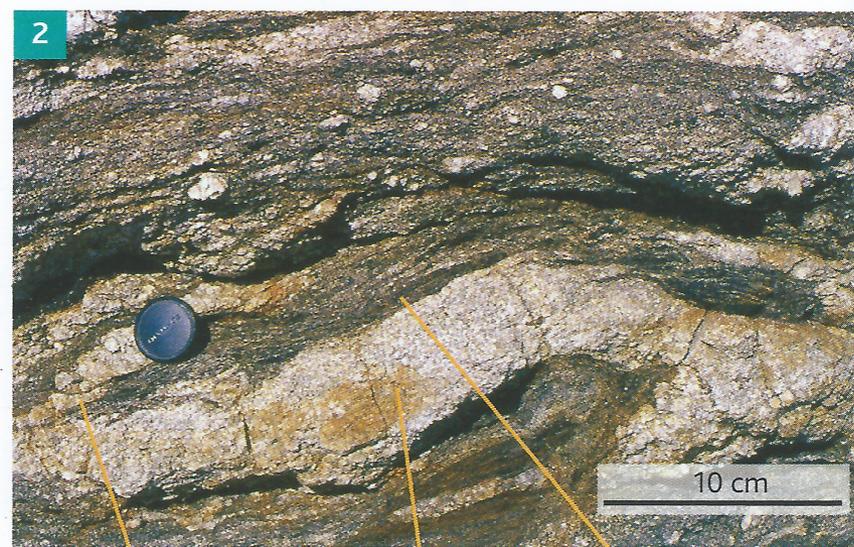
1  
zone gneissique conservée (paléosome)    zone granitique (leucosome ou mobilisat)    résidu réfractaire (mélanosome ou restites)

## Migmatite (détail)



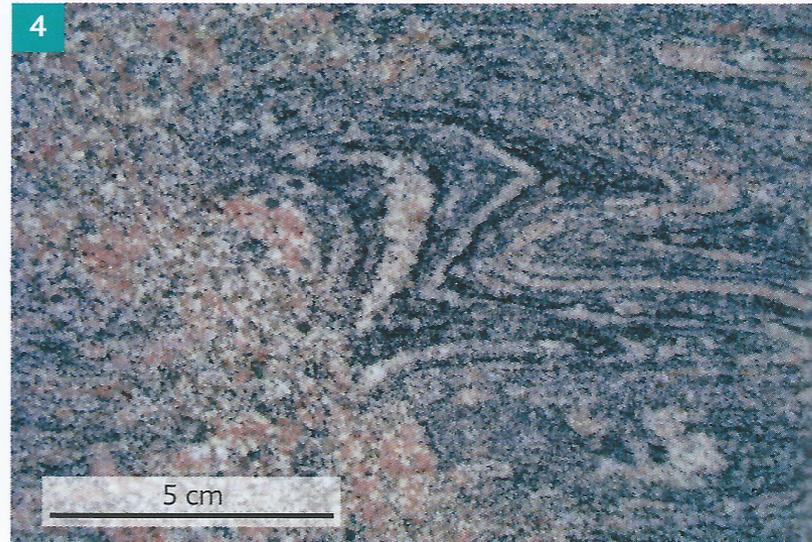
3  
zone gneissique conservée (paléosome)    résidu réfractaire (mélanosome ou restites)    zone granitique (leucosome ou mobilisat)

## Migmatite (fusion plus importante)



2  
déformations    zone granitique (leucosome ou mobilisat)    résidu réfractaire (mélanosome ou restites)

## Migmatite (section polie)



4  
zone granitique (leucosome ou mobilisat)    zone gneissique (paléosome)

## *B. Les migmatites et l'anatexie*

Si métamorphisme devient de haut degré  $\rightarrow T^{\circ} C$  augmente

Pour  $T^{\circ} C > 650^{\circ} C \rightarrow$  FP des roches ou **anatexie**  $\rightarrow$  liquides généralement de **composition granitique**.

✓ Si ces liquides restent enfermés et cristallisent au sein des roches qui leur ont donnée naissance  $\rightarrow$  **migmatites**.

Roches composites = association entre produits et résidus de FP. Ce sont **des roches métamorphiques**.

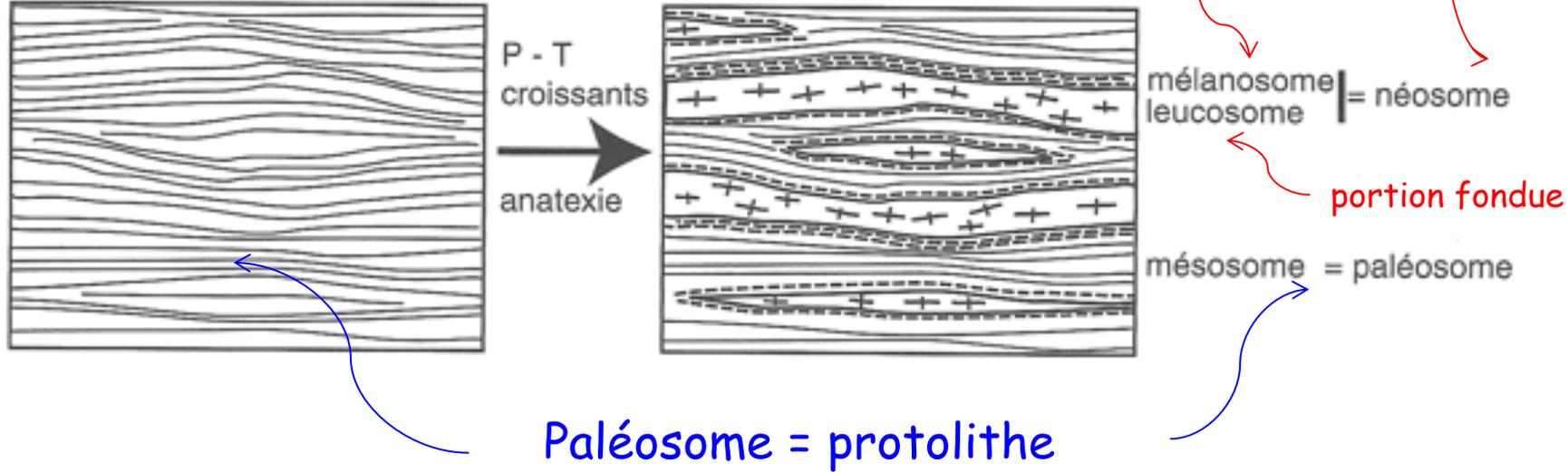
✓ Si le liquide s'échappe, migre et cristallise,  $\rightarrow$  granite dit anatectique. Il s'agit alors d'une **roche magmatique**.

**Migmatites** : du grec « migma » signifiant mélange, elles sont constituées d'un niveau sombre aux caractéristiques de roche métamorphique et d'un niveau clair à l'aspect d'une roche magmatique, de type granitoïde.

Fins liserés sombres de biotite = **mélanosome**.

Résultent généralement de l'anatexie → **anatexites**.

**Néosome = roche néoformée par fusion partielle.**



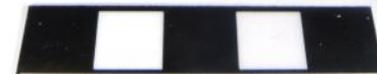
## I.1.2 Le métamorphisme de contact

Autour de la granodiorite, auréole concentrique de roches métamorphosées : **cornéennes** et **schistes tachetés** fréquents. Cela dépend de la nature du protolithe



5 cm

Cornéenne à grandes baguettes d'andalousite sans orientations préférentielles dans une matrice de petits minéraux de biotite, de quartz et de graphite (ENS Lyon)



5 cm

Micaschiste très riche en grandes baguettes d'andalousite altérées en séricite (ENS Lyon)

## BILAN

Un fort degré de métamorphisme peut conduire à la fusion partielle ou anatexie. Il en résulte un magma, liquide silicaté à haute température ( $> 600^{\circ} \text{C}$ ) contenant des gaz dissous qui donne par refroidissement une roche magmatique.

L'observation des roches et des lames minces montre que le métamorphisme est souvent associé à la déformation. Ainsi, l'expression du métamorphisme sera différente selon le contexte géologique.

## II. CONDITIONS DU MÉTAMORPHISME ET FORMES D'EXPRESSION

### II.1 DU MÉTAMORPHISME À L'ANATEXIE CRUSTALE

#### II.1.1 Les données de laboratoire

*A. La réaction de fusion*

*B. La fusion-déshydratation*

*C. Quelle est la réaction qui domine lors d'un épisode métamorphique ?*

#### II.1.2 La vérité-terrain

#### II.1.3 Les conditions de l'anatexie crustale : les courbes solidus-liquidus

### II.2 TRANSFORMATION MINÉRALOGIQUES ET DÉFORMATION DES ROCHES

### II.3 MÉTAMORPHISME ET CONTEXTE GÉOLOGIQUE

# Métam 3 Deux réactions de fusion possible pour les roches crustales : **fusion hydratée (réaction 1)** et **fusion-deshydratation de la biotite (2)** d'après JF Moyen (ENS Lyon)

R. congruente : seul du liquide se forme

R. incongruente : apparit° d'une nouvelle phase solide

## Fusion hydratée



R. incongruente



## Fusion-deshydratation de la biotite



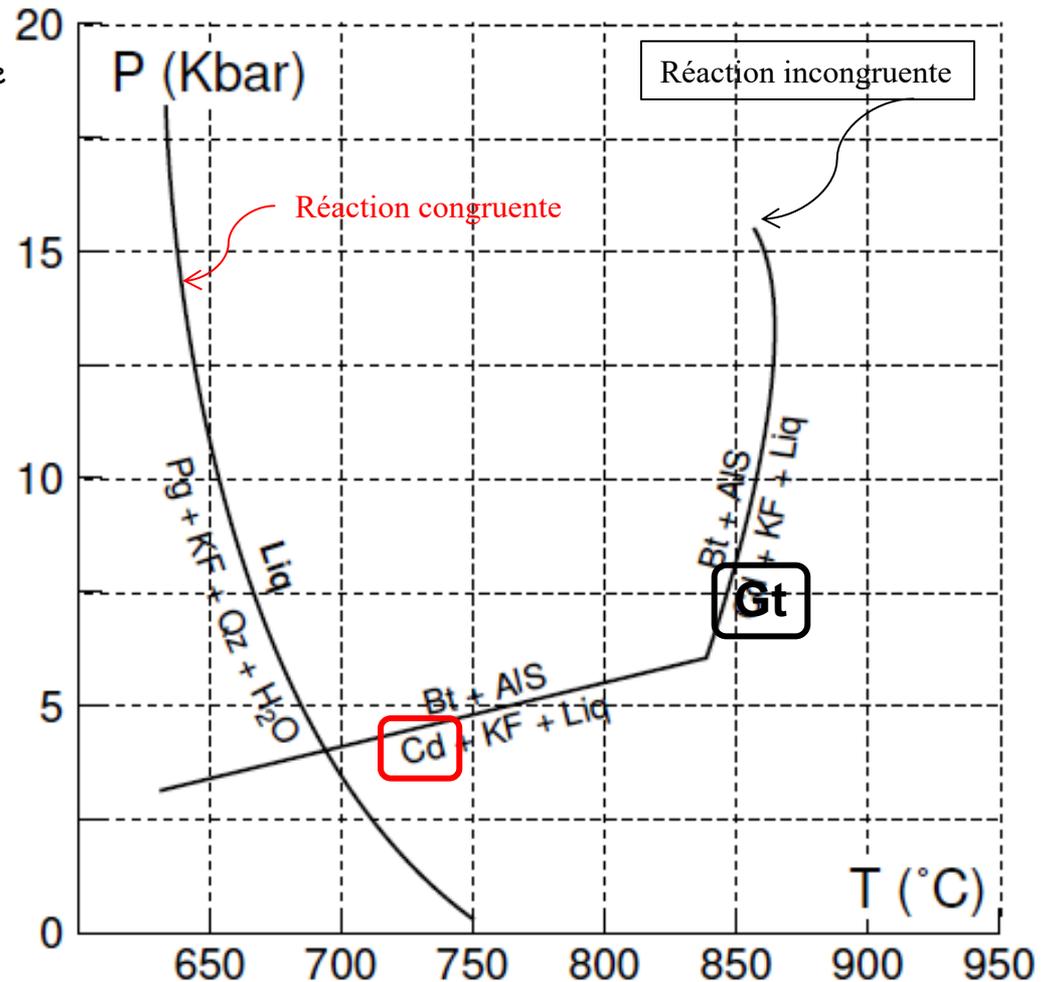
Réaction métamorphique « normale » de  
déstabilisation de la biotite



Réaction de fusion: H<sub>2</sub>O et KF apportés par la  
réaction précédente



**H<sub>2</sub>O provient uniquement  
des minéraux hydroxylés (Bt ici)**



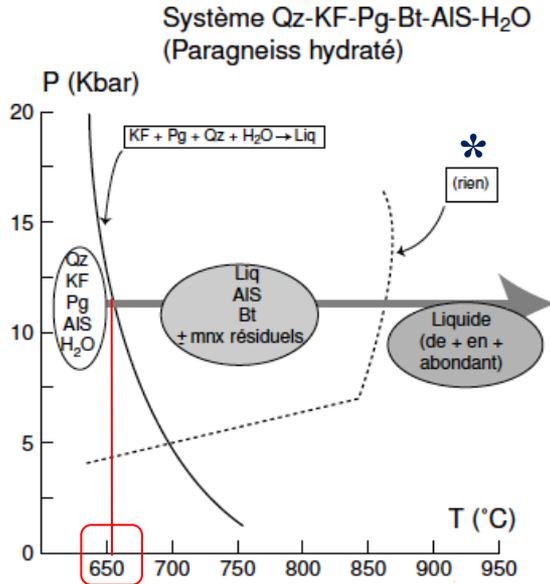
Qz : quartz; Ab : albite; Or : orthose; Pg : plagioclase; KF: feldspath potassique; Bt : biotite; Cd : Cordiérite; Gt : grenat; AIS : Silicates d'alumine (andalousite, sillimanite ou disthène)

*La flèche indique un métamorphisme prograde.*

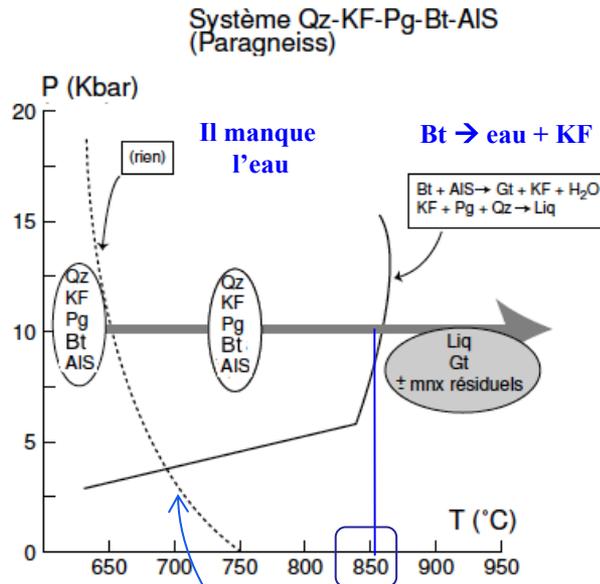
**Tonalite: Pg + Amph + Pyr + Qz (faible %)**

**Les 3 systèmes sont à même pression = 0,1 Gpa = 3 km de profondeur**

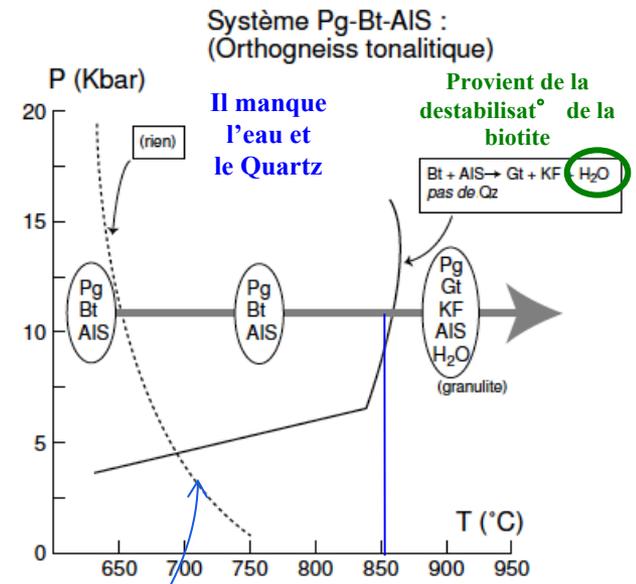
**Paragneiss hydraté (avec Pg)**



**Paragneiss anhydre**



**Orthogneiss tonalitique**



\*: sauf incorporation des produits de la destruction de la Bt

Pas de réaction (1) car il manque l'eau



**Pas de Q → réaction (2b) impossible**

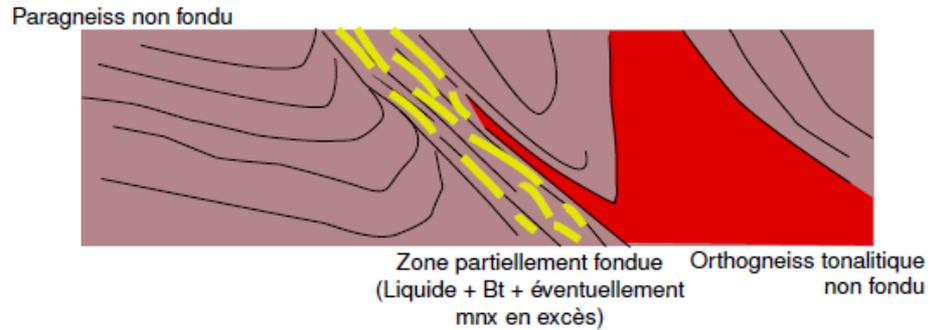
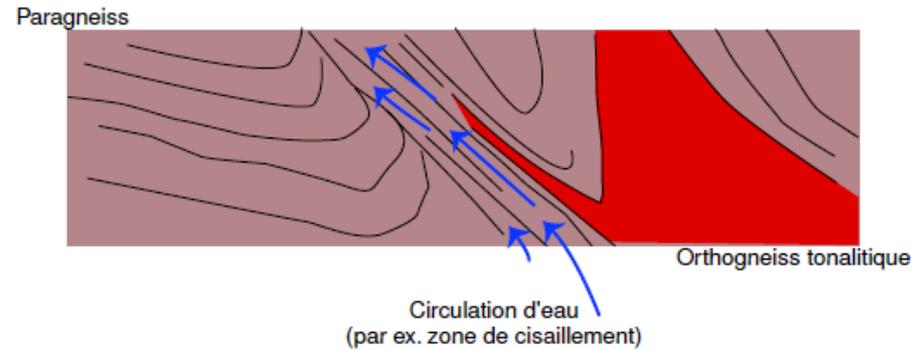
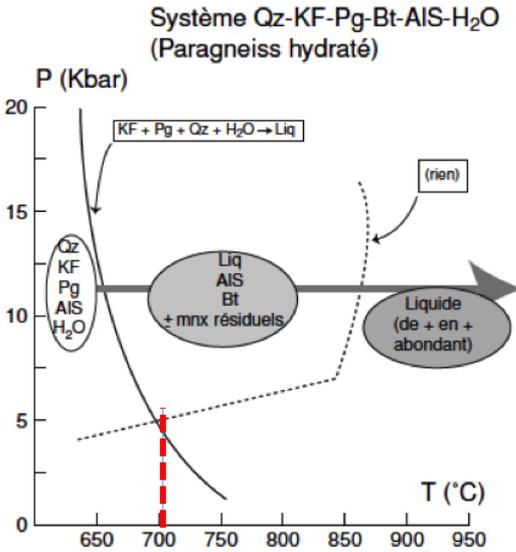
## Morale de cette « histoire expérimentale »

Une CC composite (OrthoG + ParaG) portée à HT suite à un métamorphisme prograde, peut présenter des secteurs complètement fondus cohabitant avec d'autres qui ne le sont pas, alors même que l'ensemble de la région a été portée dans les mêmes conditions de pression et de température.

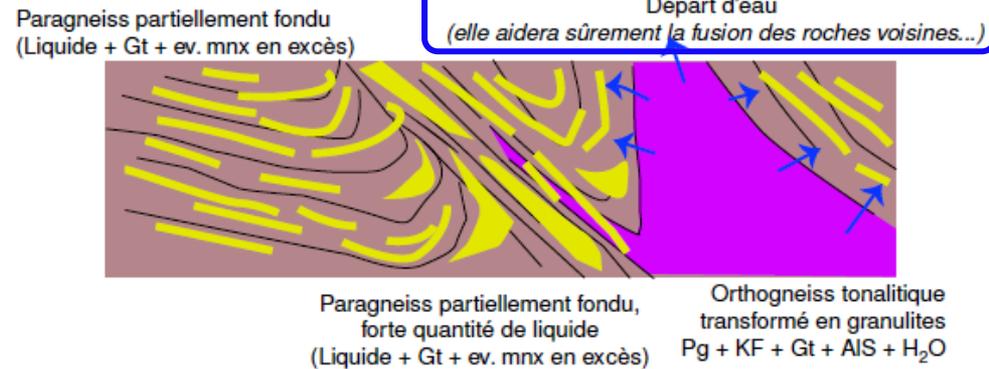
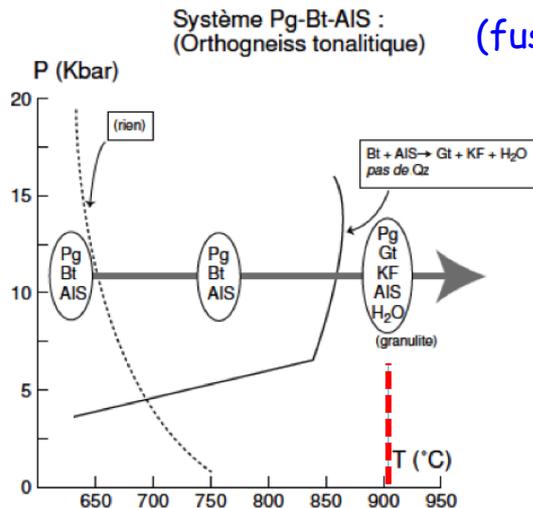
Métam 5 Fusion partielle d'une croûte composite, formée d'un socle d'orthogneiss tonalitique sur lequel reposent des métasédiments (paragneiss), d'après JF Moyen (ENS Lyon)

Une zone de cisaillement draine de l'eau dans une partie du Système (Fusion hydratée cas 1).

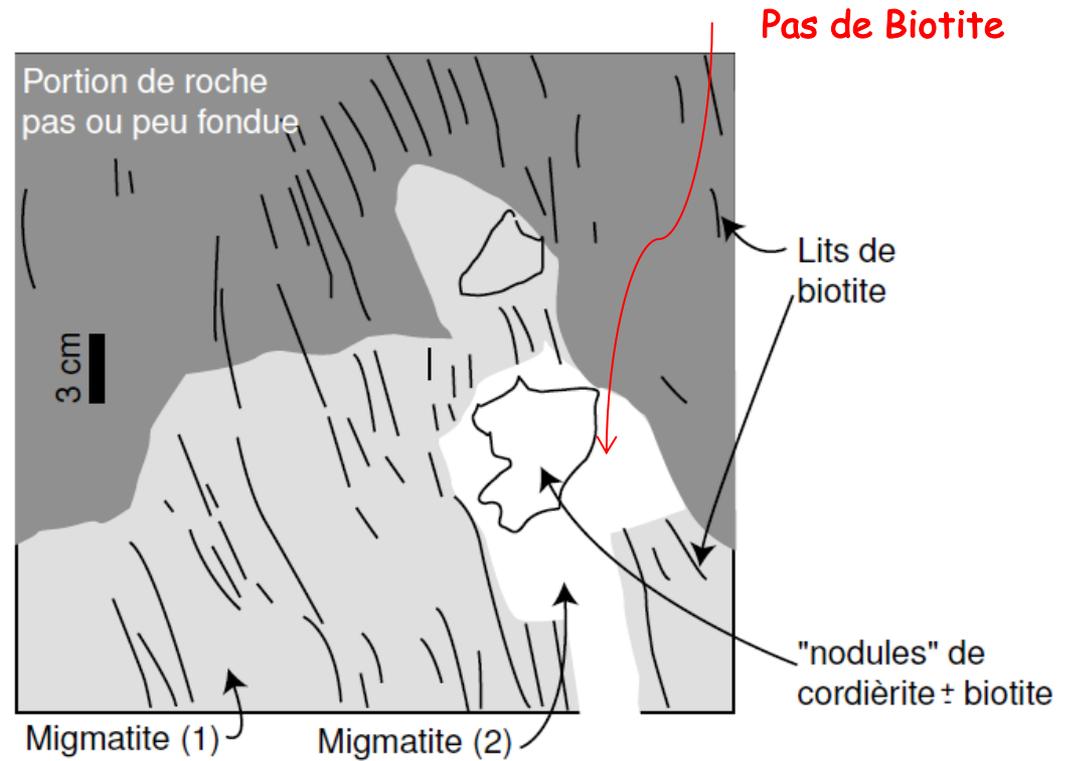
Roches d'origine



Absence de Qz (fusion-deshydratation cas 2).



Rôle de la déformation dans la circulation des fluides permettant les réactions du métamorphisme.



Deux générations de FP;

Liquides migmatitiques de la génération (1) : réaction  $Qz + Ab + Or + H_2O = \text{Liquide}$ .  
Biotite non impliquée → films de liquides granitiques, piégés entre des lits de biotite.

Migmatites de la génération (2) : réaction  $Bt + Ab + Qz + ALS = \text{Liquide} + \text{Cord} + KF$ .  
Biotite détruite → zones de liquide autour des nodules de cordièrite, dépourvus de biotite résiduelle.

Zones sécantes sur la foliation = apparition tardive



## Granite à cordiérite du Velay Pont du Doux

Zone périphérique déplétée en  
Fe et Mg.  
Peu de biotites

FP en présence d'eau de l'équation  
1. n'entraînant pas la disparition  
de la biotite

Cordiérite

Cet affleurement porte donc la  
trace de deux générations  
successives de fusion partielle,  
d'abord en présence d'eau puis  
par fusion-déshydratation de la  
biotite.

# Métam 7a Le solidus Quartz-Albite-Orthose (in <http://geolvar.free.fr>)

Expériences réalisées sur des roches de composition granitique

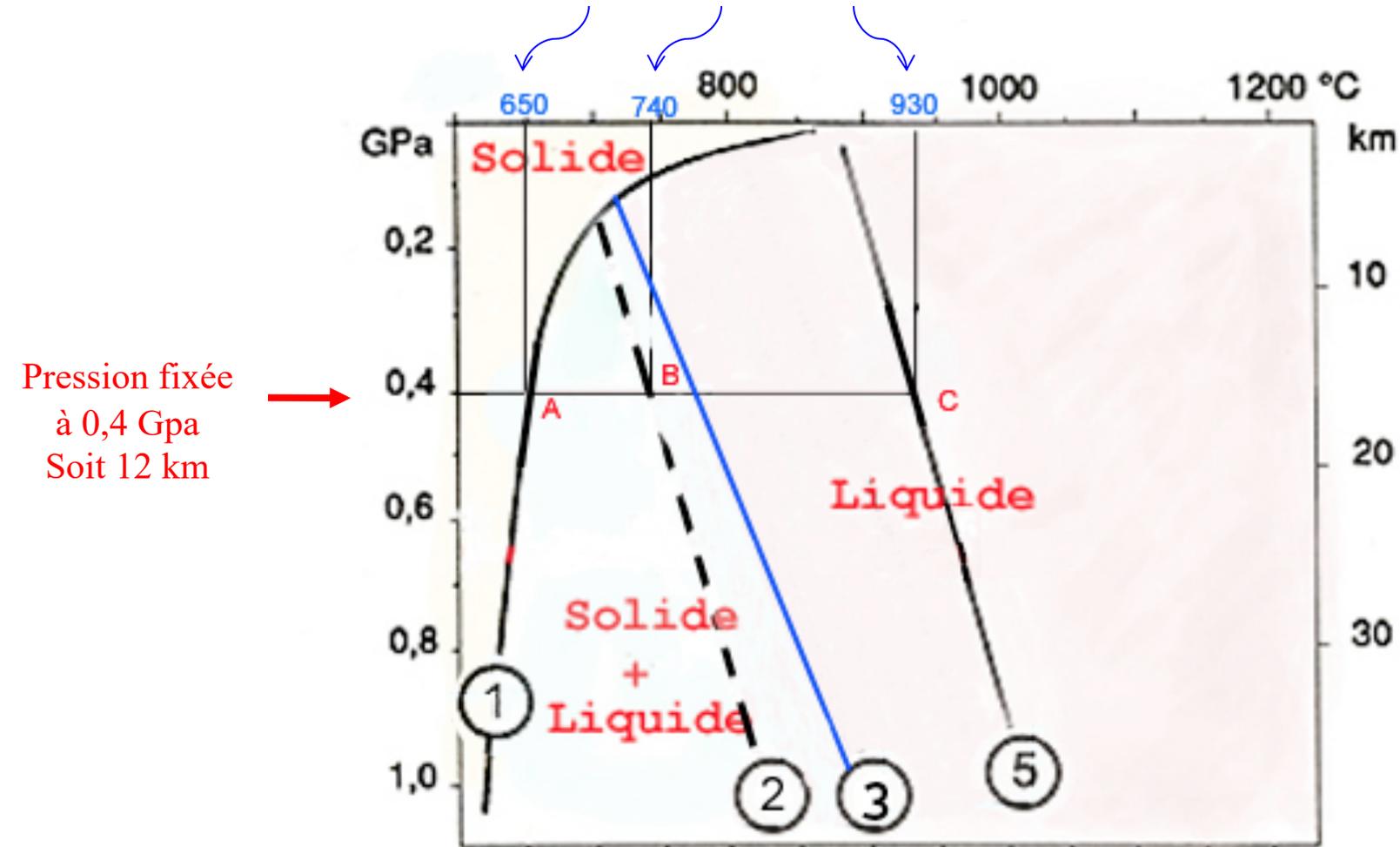
(1) solidus du système quartz + albite + orthose en présence d'eau

(2) solidus d'un granite sec à biotite

(3) liquidus 4% eau

(5) solidus du système quartz + albite + orthose à sec et sans minéraux hydroxylés (radicaux OH).

Début de fusion



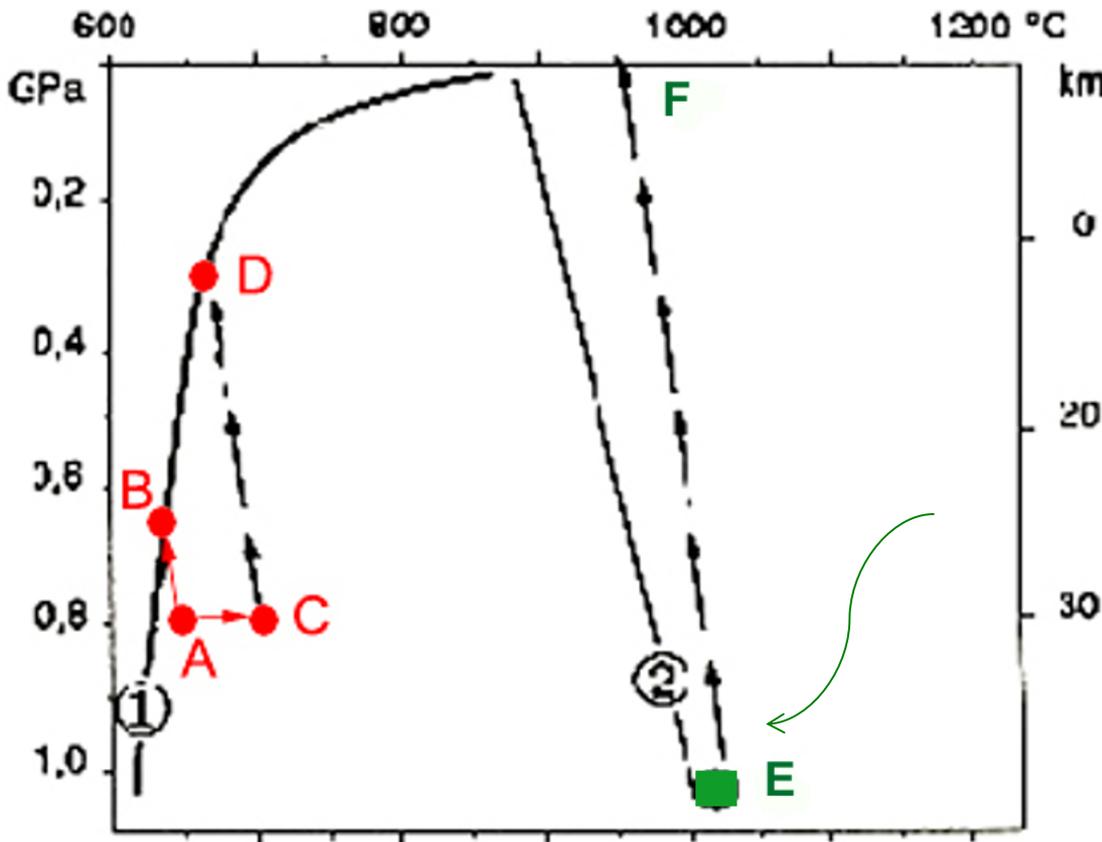
A, B et C = conditions d'apparition d'un magma migmatitique

Métam 7b Le devenir du liquide anatectique (in <http://geolvar.free.fr>)

- (1) solidus de la CC hydratée
- (2) solidus de la CC anhydre

8-10 km

18-20 km



Magma granitique d'anatexie crustale (A) rencontre très rapidement les conditions de solidification en (B) en présence d'eau → massif de migmatites en profondeur.

Si surchauffe (C) dans un contexte tectonique de collision, migration possible vers la surface → massif granitique intrusif à bords circonscrits ou pluton en (D): Granite de Lacourt, carte de St Girons)

Pour donner des roches extrusives (épanchements de rhyolites en (F)), le magma (E) issu de la fusion d'une CC anhydre (solidus 2) doit être très chaud donc d'origine infra-crustale.

# Bilan

Frontière métamorphisme / magmatisme très ténue.

Métamorphisme → anatexie crustale dans certaines conditions PT: ( $P > 0,4 \text{ GPa}$  et  $T > 650^\circ \text{ C}$ ) → liquide de composition migmatitique.

Les migmatites peuvent donner des massifs granitiques à bords diffus.

**Mylonite = roche métamorphique caractérisée par une recristallisation dynamique de ses minéraux sous l'effet d'une intense déformation principalement ductile**



Lit sombre contenant des porphyroblastes de grenat (en gris) et des lits de biotite (en noir) qui « se moulent » autour des grenats.

Lit clair quartzo-feldspathique

Les grenats ont tourné et sont munis d'une ombre de pression, souvent disymétrique

Métam 8b Métamorphisme et déformation Exemple de la faille du fleuve Rouge (d'après S. Guillot, LGCA Grenoble)

Faïlle située entre Vietnam et Chine du Sud.

Zone de cisaillement de 700 Km X 10-20 km.

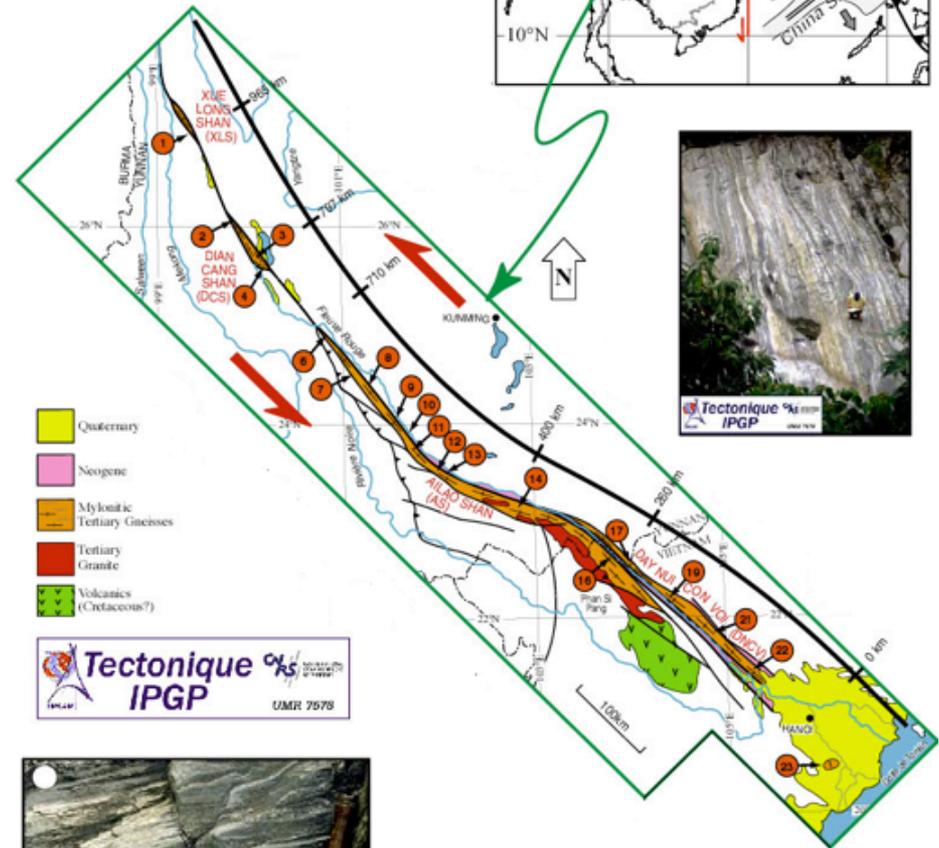
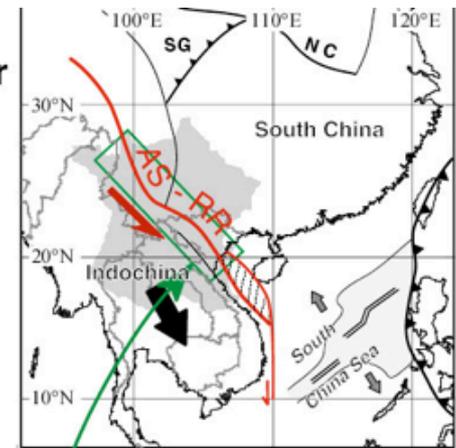
Métamorphisme de dislocation: P élevée au niveau des failles et T° C très faibles.

Les roches obtenues sont des mylonites.

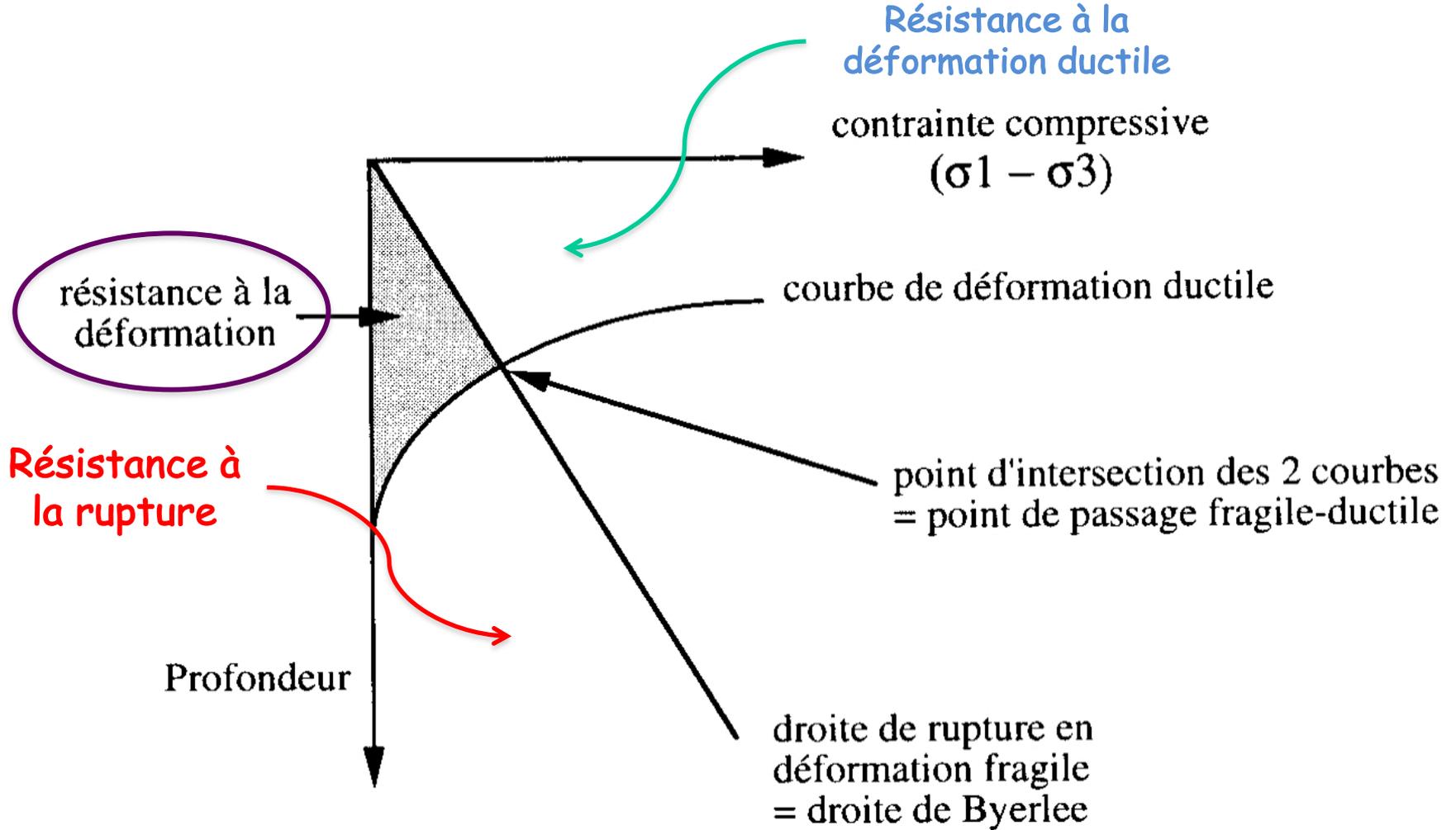
Minéraux écrasés, peu ou pas de néoformation. (pas de transformation chimique). Ce sont des tectonites.

C'est du dynamométamorphisme.

## The Ailao Shan - Red River Shear zone (AS-RR)

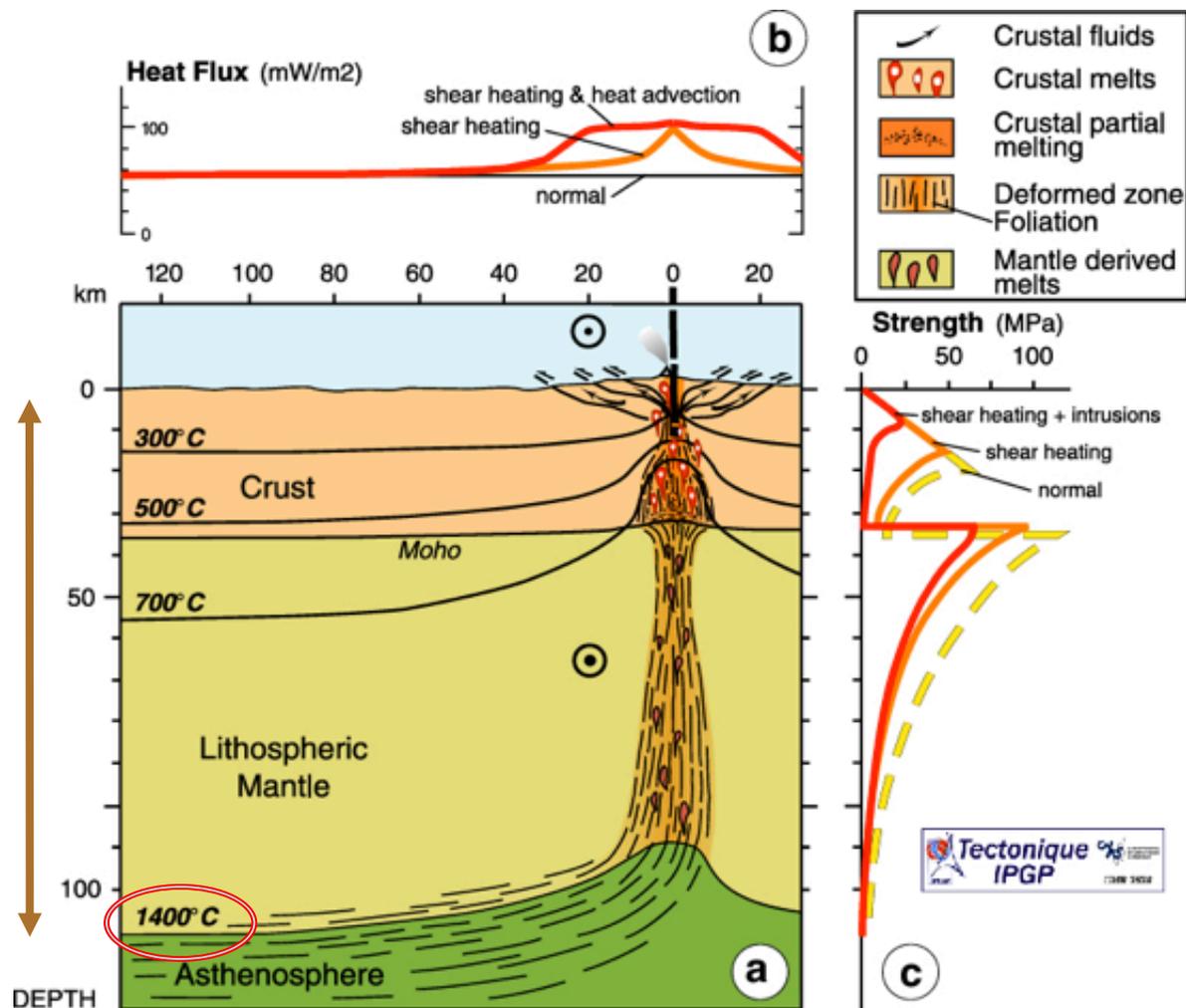


# Rappel Chapitre ST-D-1 : Superposition des deux courbes



b. Flux de chaleur comparés dans trois situations : zone « normale », zone en cisaillement chaud sans ou avec advection (déplacement d'un fluide dans le sens horizontal)

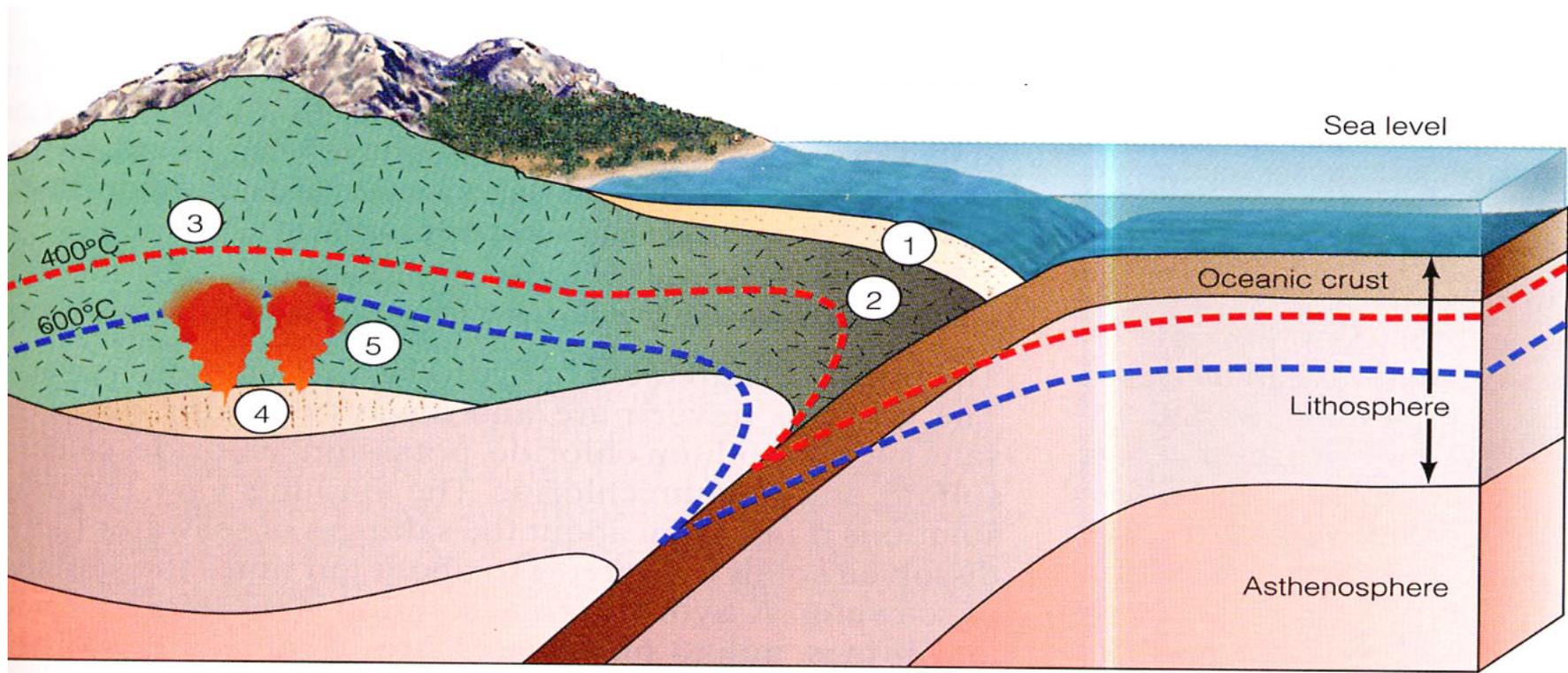
a. Remontée des isothermes, foliation et circulation des fluides dans une lithosphère continentale en extension.



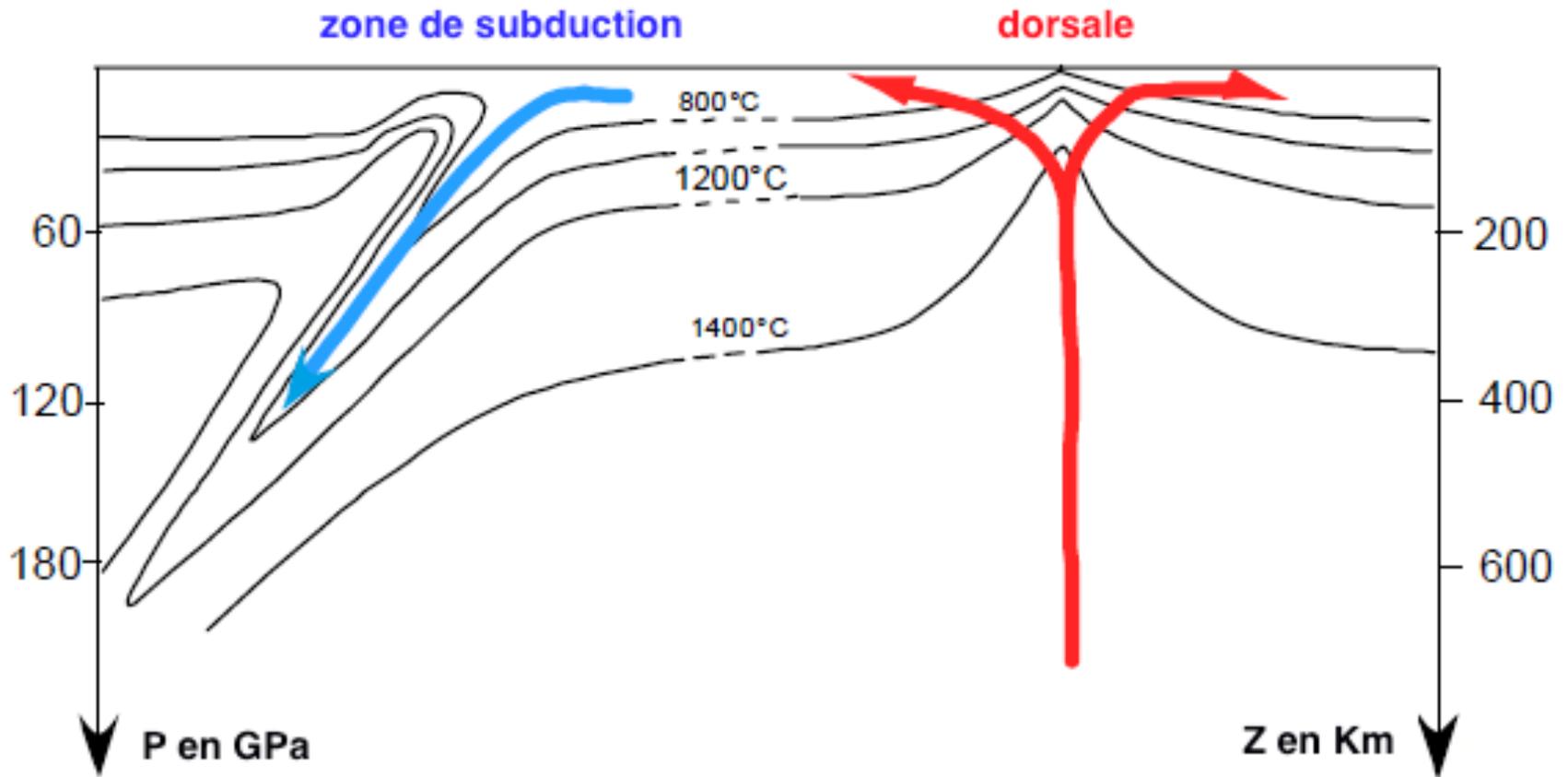
c. Comportement rhéologique de la lithosphère continentale dans trois situations : zone « normale », zone en cisaillement chaud sans ou avec intrusions. Notez la diminution de la zone de fragilité crustale et la diminution du découplage croûte/manteau dans les zones cisillées chaudes.

## Métam 10a Métamorphisme et contexte géologique (d'après S. Guillot, LGCA Grenoble)

Métamorphisme régional et de contact: roches métamorphiques visibles dans les zones orogéniques, la majorité de ces roches sont formées par métamorphisme régional. Ces roches sont déformées (plis, foliation, linéation). Plus localement l'augmentation de T° C autour d'un massif granitique → auréole de métamorphisme de contact.



1. **Métamorphisme d'enfouissement**
2. **Métamorphisme dans le faciès Schiste Bleu et éclogitique.**
3. **Métamorphisme régional**
4. **Zone où commence la FP humide**
5. **Migration du magma granitique et métamorphisme de contact associé**



zone de subduction

dorsale

P en GPa

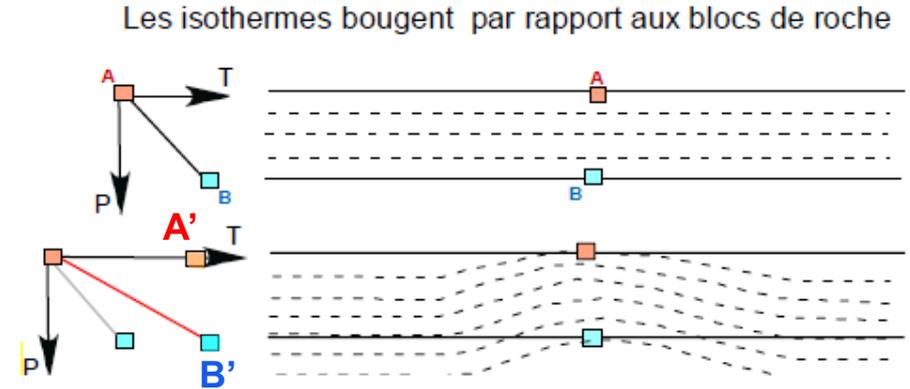
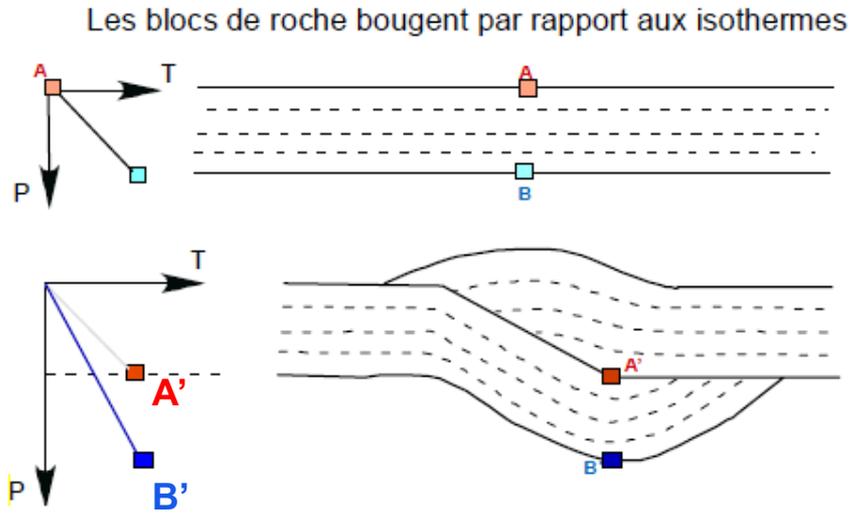
Z en Km

**Dorsale = partie ascendante de cellule de convection**, apport de chaleur sous forme de magmas basiques (CO), isothermes resserrés = géotherme élevé (proche de l'axe de T).

**Zone de subduction = matériaux « froids » s'enfoncent**, isothermes étirés, géotherme moyen faible (proche de l'axe de la P).

*Roches mauvais conducteurs thermiques : Granite :  $27 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , basalte :  $22 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , péridotite:  $3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Flèches = sens des déplacements de matière (vitesses de l'ordre du centimètre par an.)*

Métam 11 : Les deux situations à l'origine du métamorphisme (d'après S. Guillot, LGCA Grenoble)  
**Les roches métamorphiques se forment dans différents contextes dès lors que la P et T changent**



On pourrait faire le même raisonnement pour un gradient de pression. La pression (et la densité) des matériaux augmente avec la profondeur. Les roches peuvent être enfouies ou exhumées lors des phénomènes tectoniques et donc subir des variations importantes de P lithostatique  $P = \rho gh$

# III. LES MÉCANISMES DE LA TRANSFORMATION

## III.1 POURQUOI LES ROCHES RECRISTALLISENT-ELLES ?

III.1.1 Les enseignements de la coésite de Dora maira

III.1.2 Les roches métamorphiques, témoins des conditions P-T

*A. Etude d'un exemple : la rétro-morphose des éclogites*

*B. Généralisation*

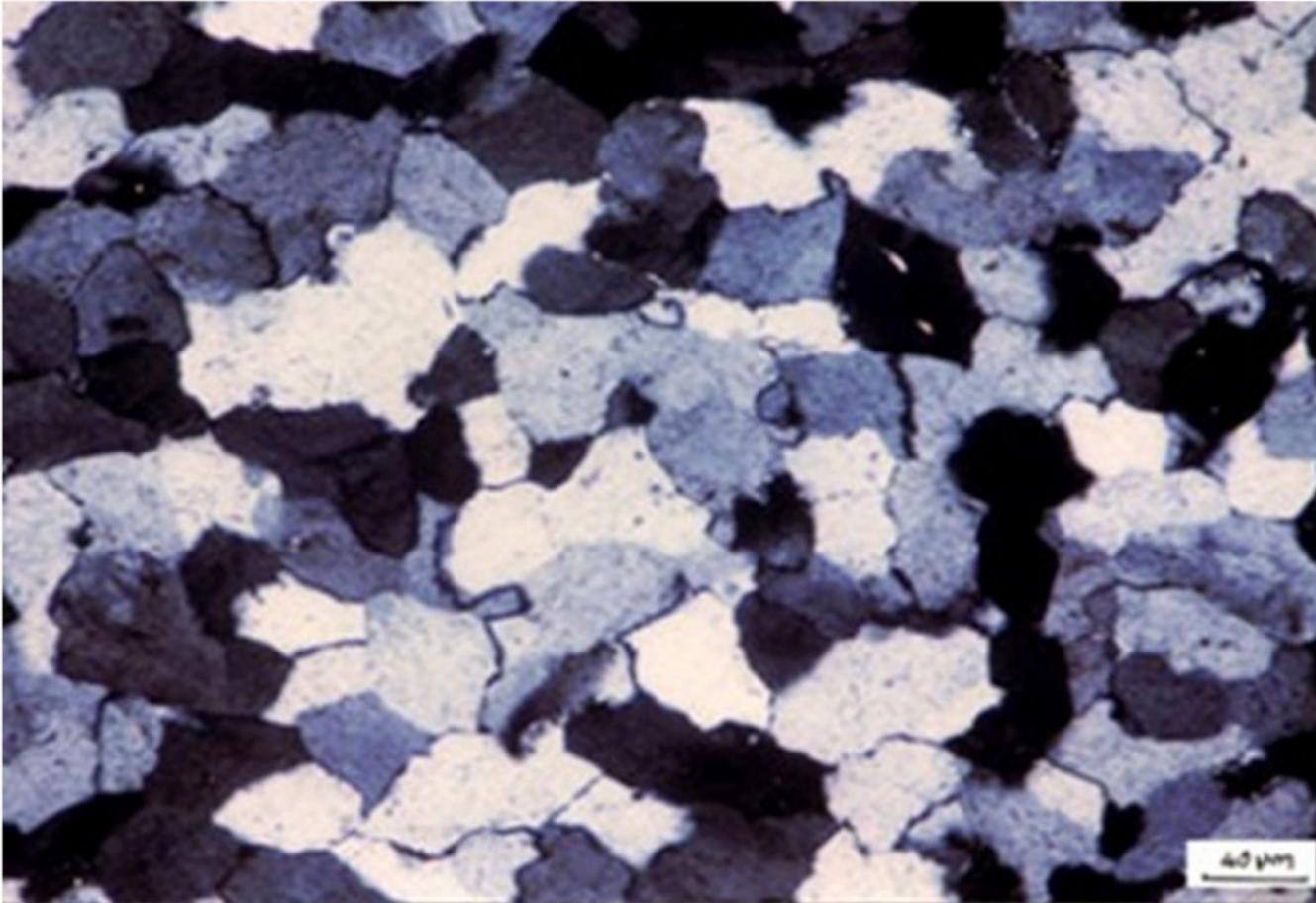
*C. La variance, indicateur des paramètres internes et externes*

1. La règle des phases de Gibbs

2. Applications

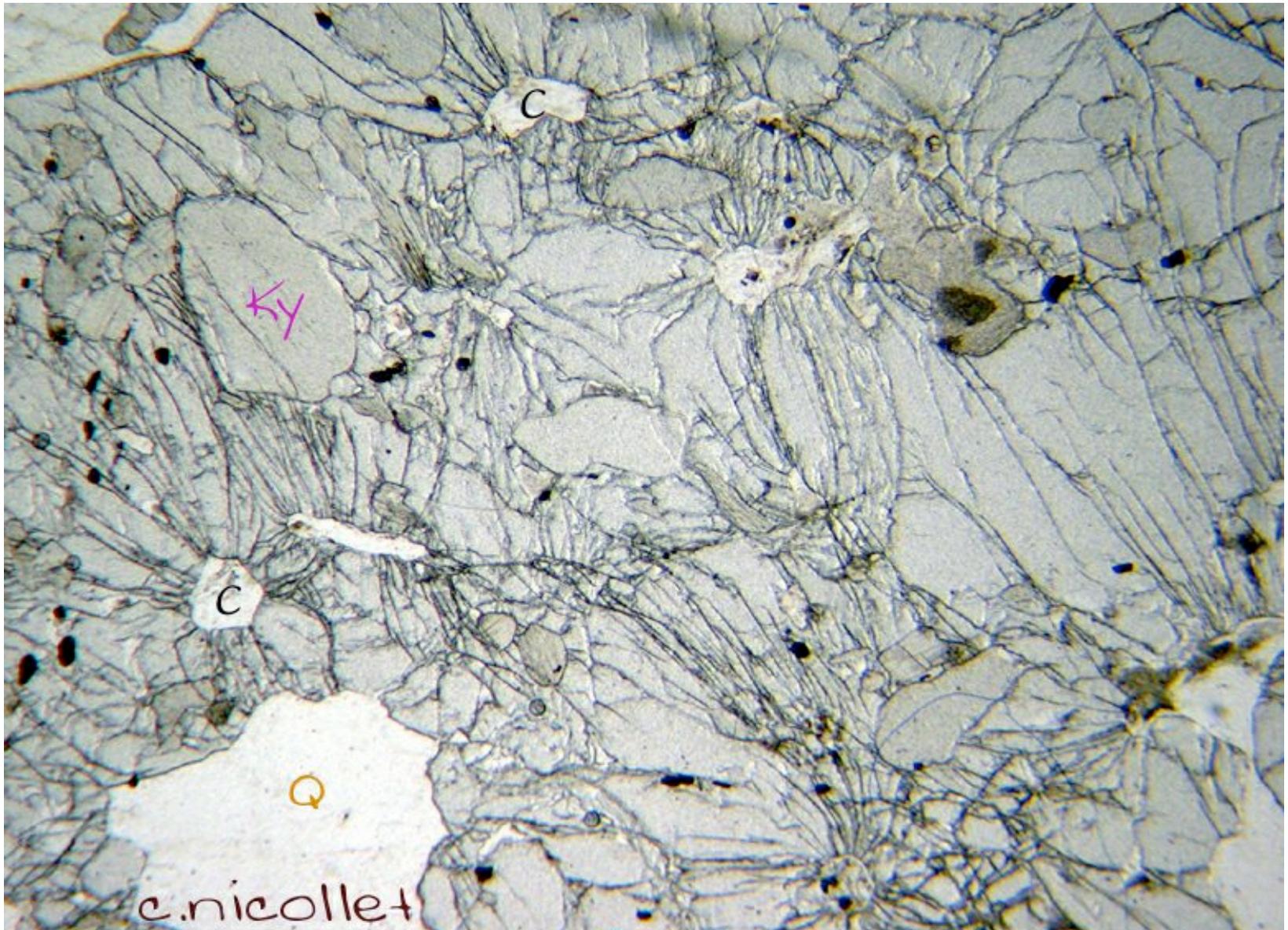
III.1.3 Trajectoires P-T-t et histoire métamorphique des roches

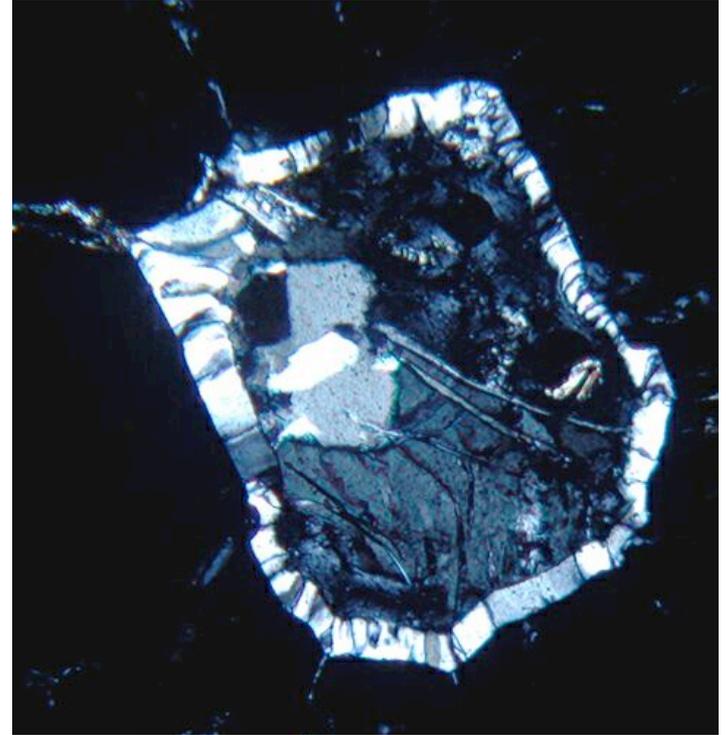
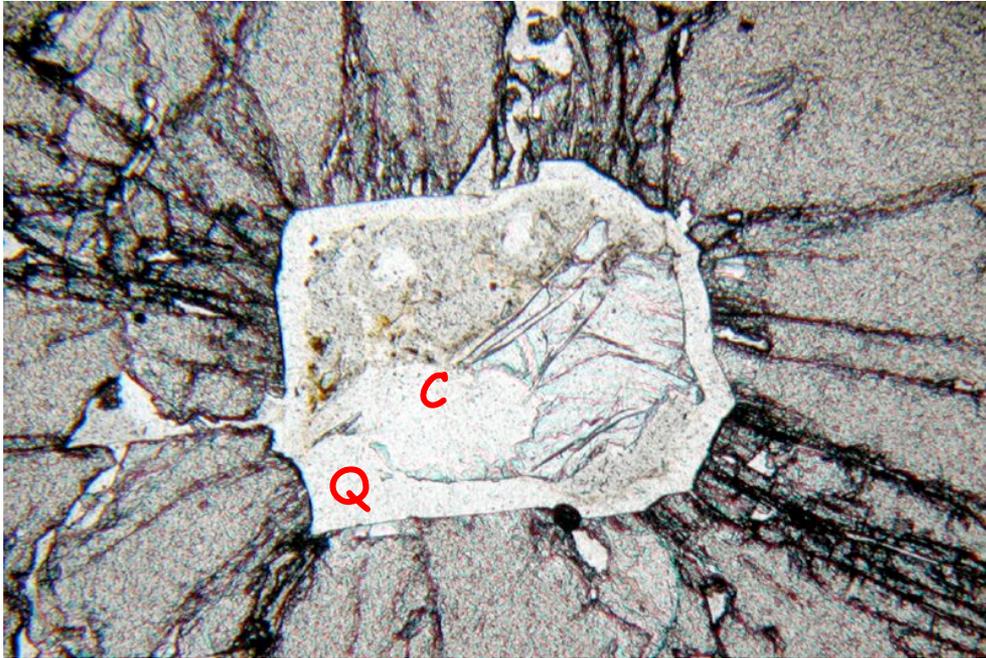
# Quartzite sédimentaire



Grès quartzite, Ordovicien massif armoricain.

Métam 12a La quartzite à Coésite de Dora Maira (d'après C. Nicollet, modifié)  
*C : coésite ; Ky : disthène ; Q : quartz. Bien voir la fracturation en étoile autour de la coésite.*





(1) La coésite est le minéral incolore très réfringent (à "fort relief") associé au quartz peu réfringent (à "faible relief") en inclusion dans un grenat.

(2) De minuscules cristaux de quartz ont une disposition radiale autour de la coésite : ceci montre que le quartz se forme au détriment de la coésite

# Quartz et Coésite, deux polymorphes de SiO<sub>2</sub>

	QUARTZ	COÉSITE
Domaine de stabilité	< 100 Km	> 100 km
Volume molaire	2,27	2,06
Densité	2,65	2,92

Minéraux très peu compressibles → remplacement par d'autres quand P varie

- Si P augmente, apparit° de mx denses: cas de la descente: métam Prograde (Q → C)
- Si P diminue, apparit° de mx peu denses: cas de la remontée: métam Rétrograde (C → Q)

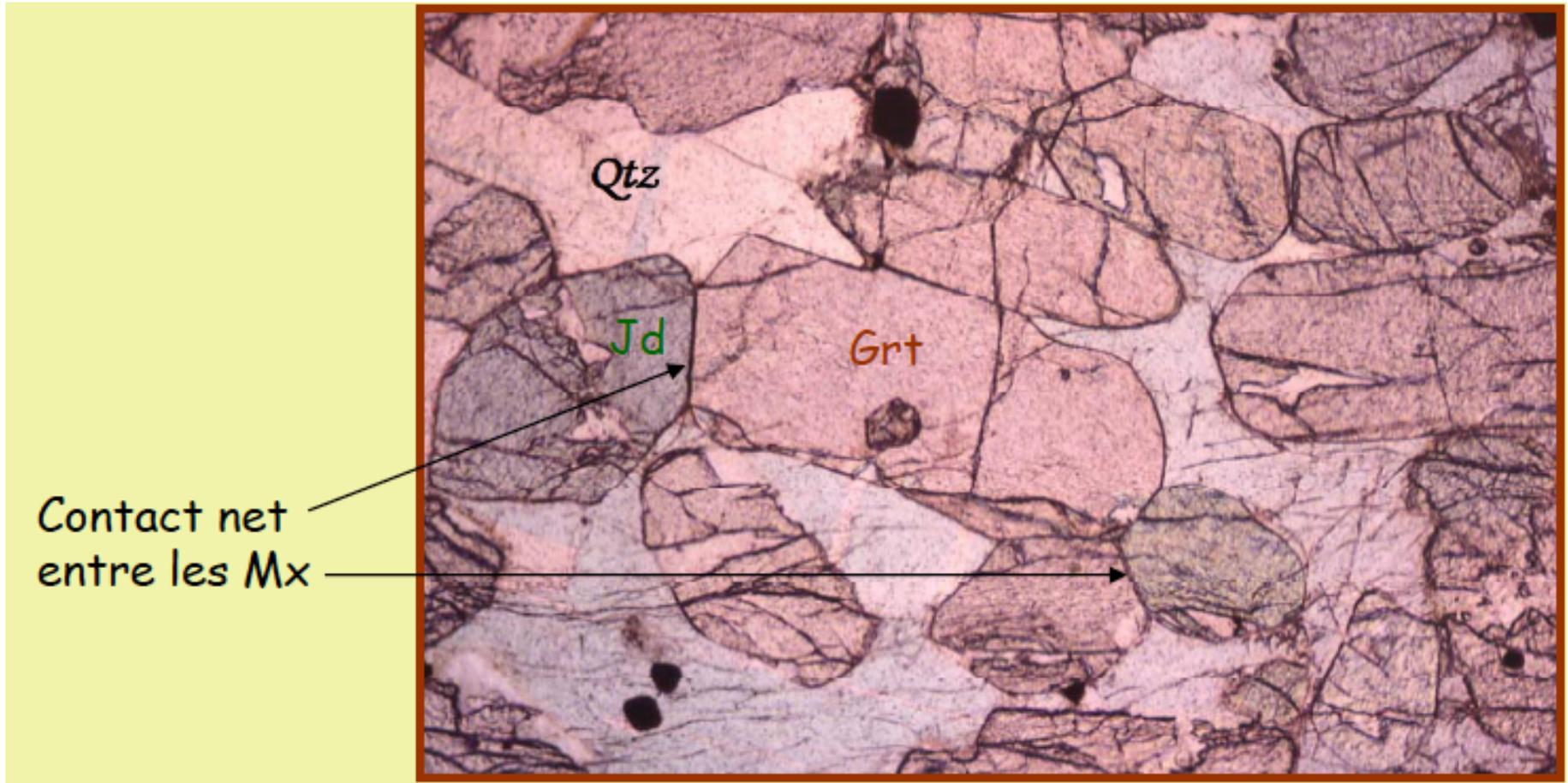
La quartzite portée à grande profondeur est majoritairement constituée de coésite.  
En remontant, C → Q à l'exception de minuscules inclusions dans le grenat non encore retromorphosées

Conséquences de la remontée: fracturation radiale du grenat au sein duquel  
Coésite → Quartz

**Métam 13 : Eclogite stable (d'après S. Guillot image modifiée)**



## Métam 13 : Eclogite stable (d'après C. Nicollet, image modifiée)



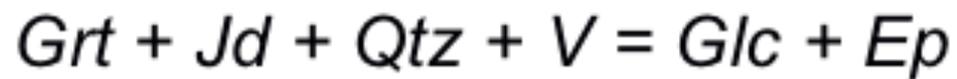
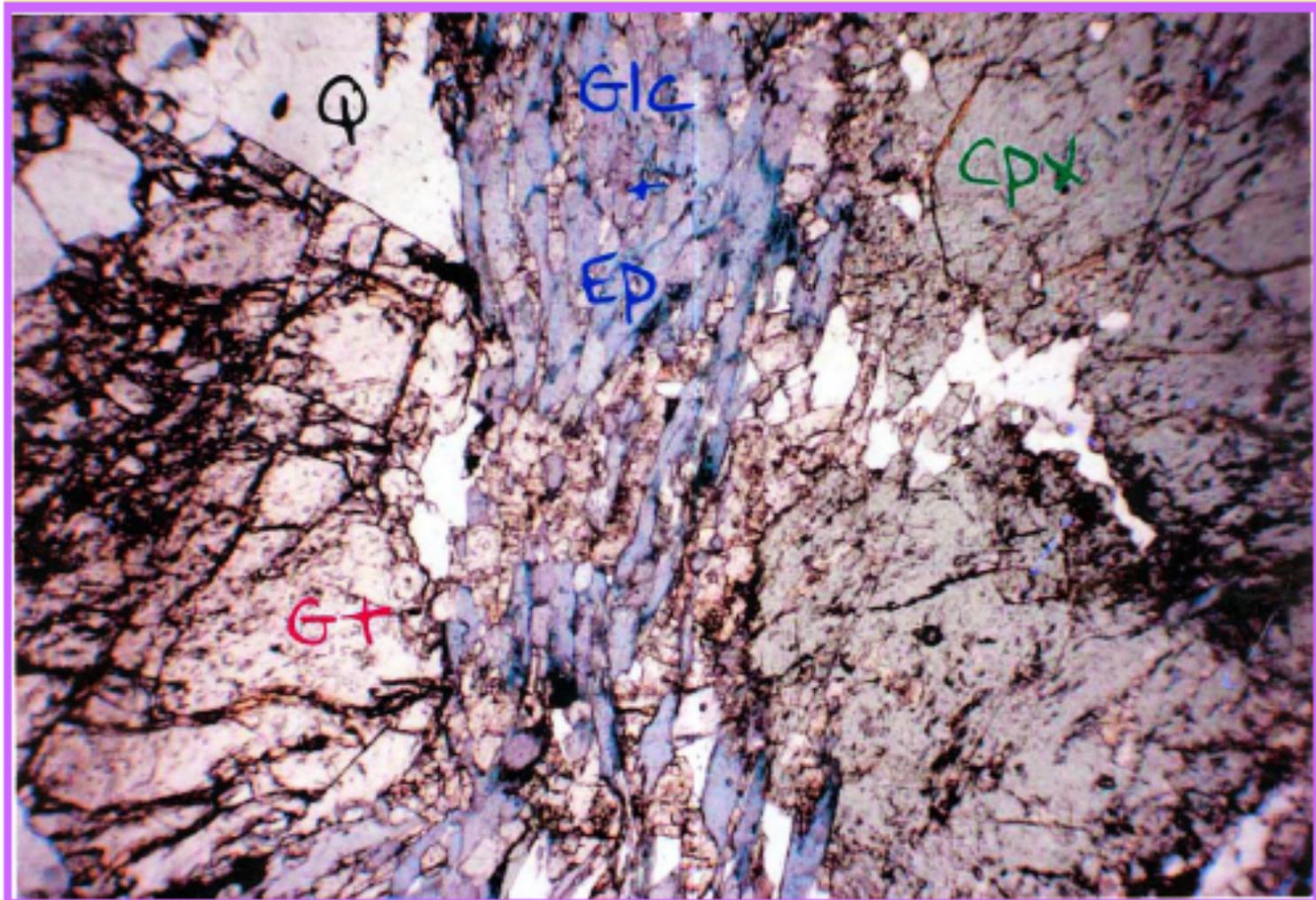
Grt : grenat ; Jd : jadéite (Cpx) ; Qtz : quartz.

## Métam 14 : Eclogite rétro-morphosée dans le faciès schiste bleu (d'après C. Nicollet, modifié)



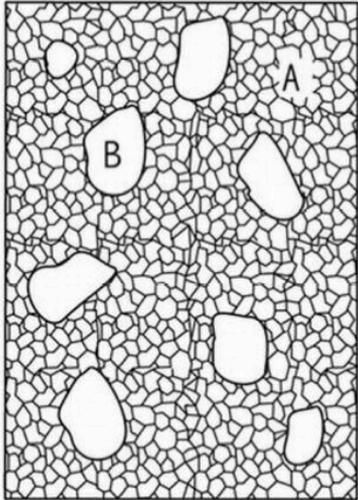
(1) Eclogite rétro-morphosée observée à l'œil nu : Grenat (Grt) entouré d'une couronne sombre de glaucophane (Gln), témoignant de la rétro-morphose de cette roche dans les conditions du faciès Schistes Bleus. L'épidote jaune (Ep) est abondante. Qtz : quartz

**Métam 14 : Eclogite rétro-morphosée dans le faciès schiste bleu (d'après C. Nicollet, modifié)  
observée en LPA**

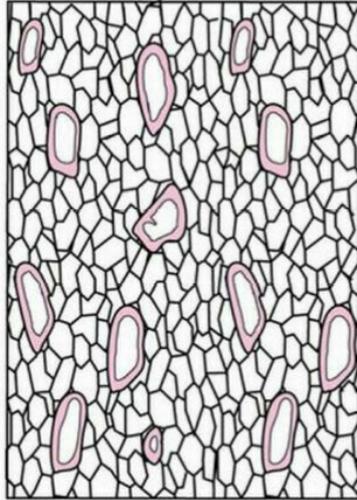


# Metam 15 Les roches métamorphiques, témoins de l'évolution thermo-barométrique de la lithosphère

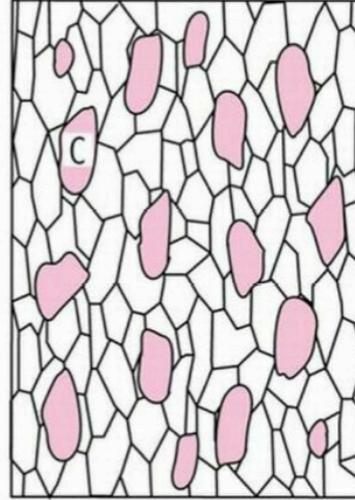
A P0-T0 la roche contient les minéraux A+B



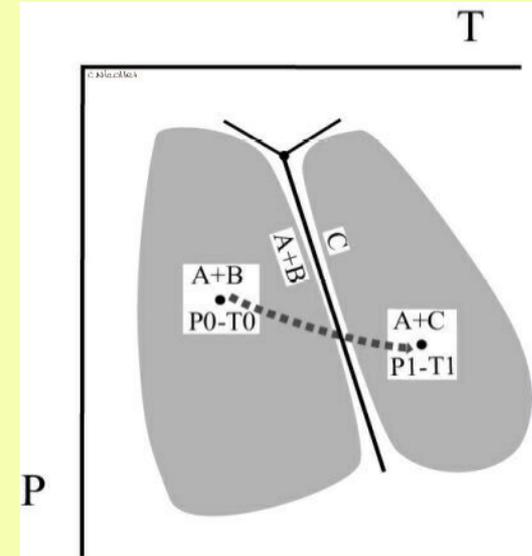
A P1-T1, la réaction A+B=C intervient ...



... jusqu'à disparition de B.



e. Nicollet



m, n et p = proportion de minéraux impliqués dans la réaction

A = PL; B = Cpx; C = Gln

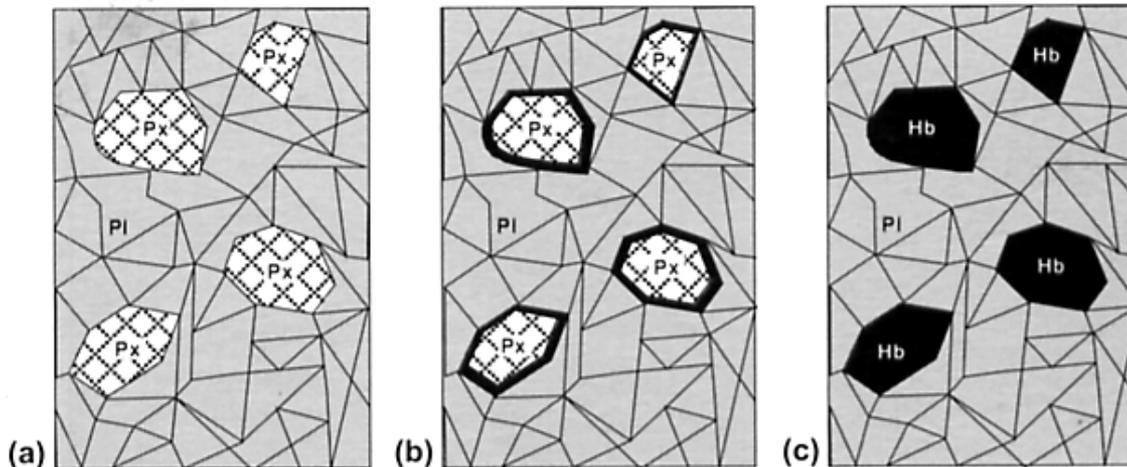
P0-T0: conditions de cristallisation du gabbro, assemblage stable. Minéraux en équilibre = contact sans réaction

P1-T1: déstabilisation des Cpx et apparition de Gln. Couronne = texture coronitique. Disparition totale des Cpx transformés en Gln. Cette étape peut ne jamais être atteinte.

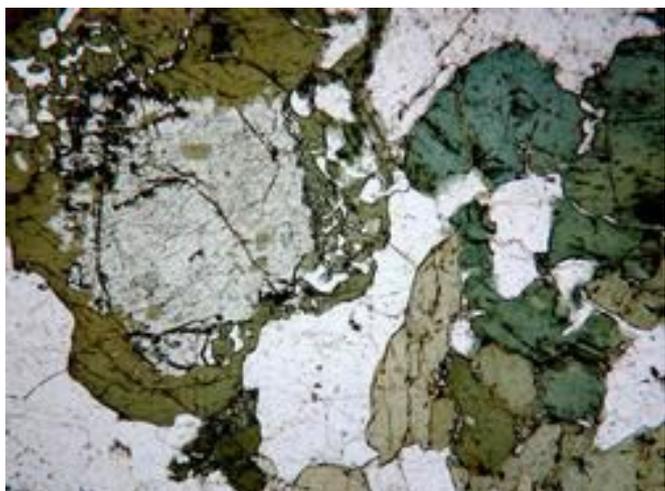
# La coronitisation des clinopyroxènes par métamorphisme hydrothermal



Gabbro  
Cpx et FPl en  
équilibre lors de la  
cristallisation du  
gabbro dans les  
conditions  $P_0, T_0$



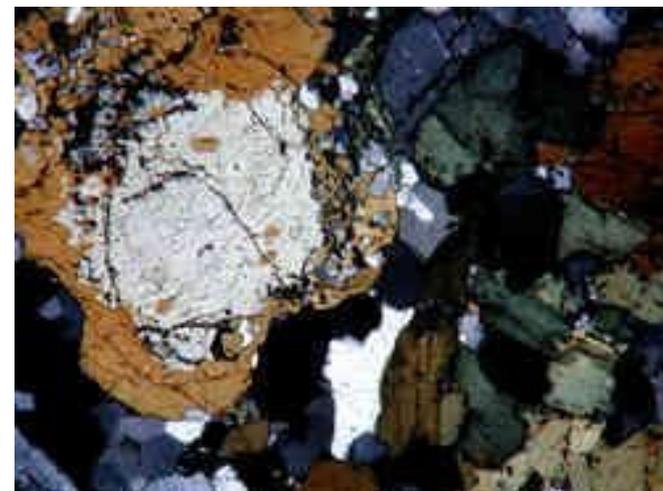
Réaction  
achevée.  
Disparition  
totale des Cpx.



LPNA

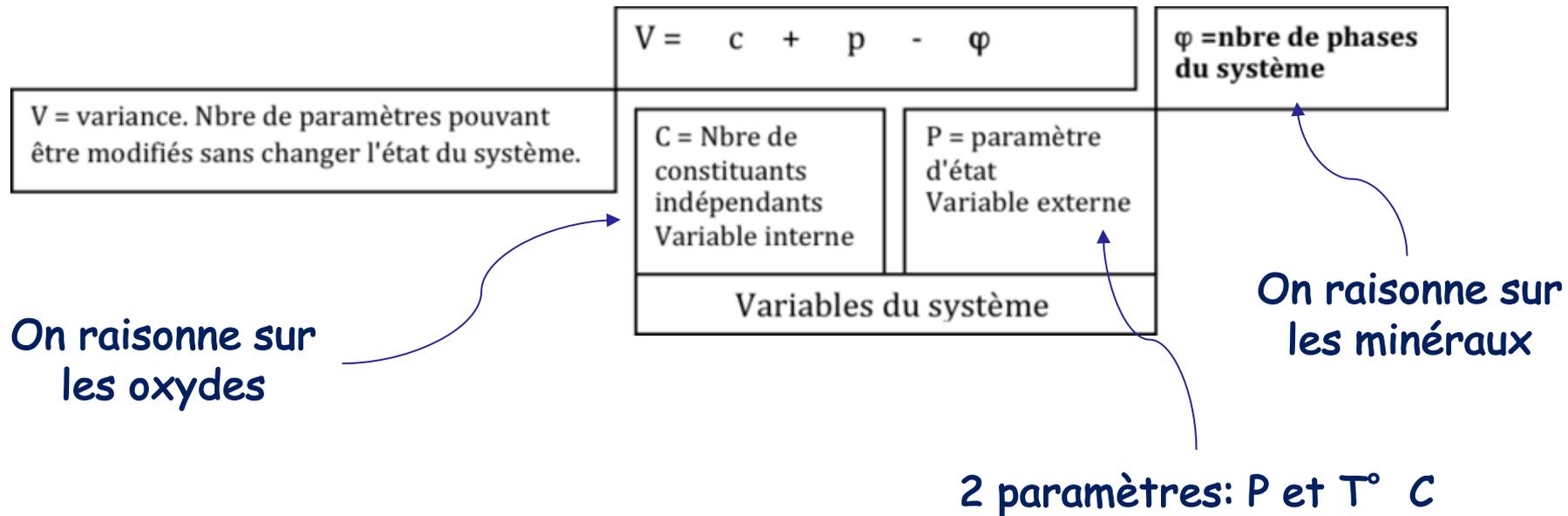
LPA

Métagabbro  
Changement des  
conditions  $P_1, T_1$   
formation d'une  
couronne de Hb



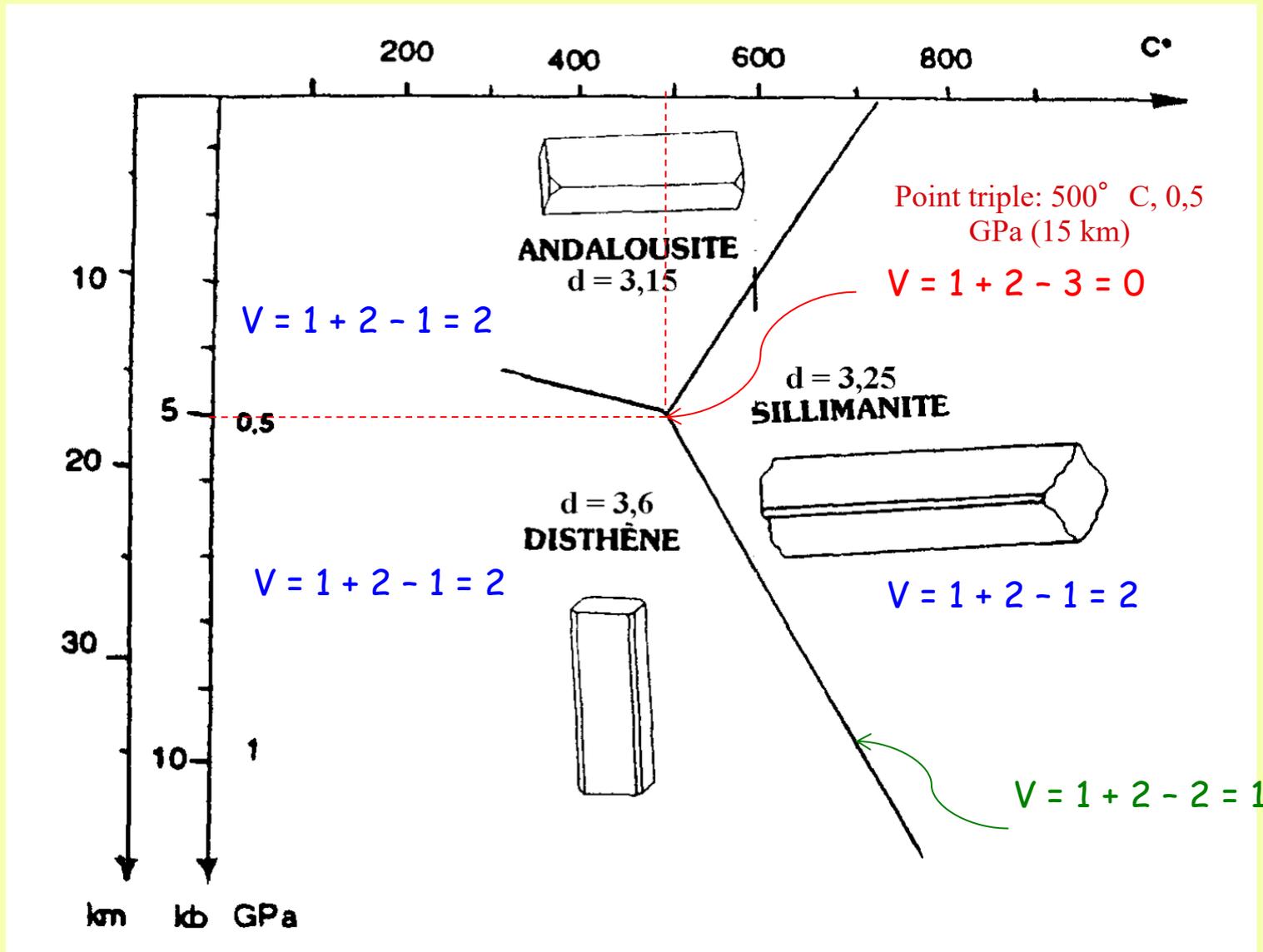
## La règle des phases de Gibbs

Elle prend en compte les paramètres internes du système et permet de déterminer la variance du système. La variance d'un système mesure le nombre de paramètres qui peuvent être modifiés sans changer l'état du système.



Le géologue doit trouver des systèmes à faibles variances, c'est à dire à faible degré de liberté, pour bien contraindre les paramètres  $T$  et  $P$

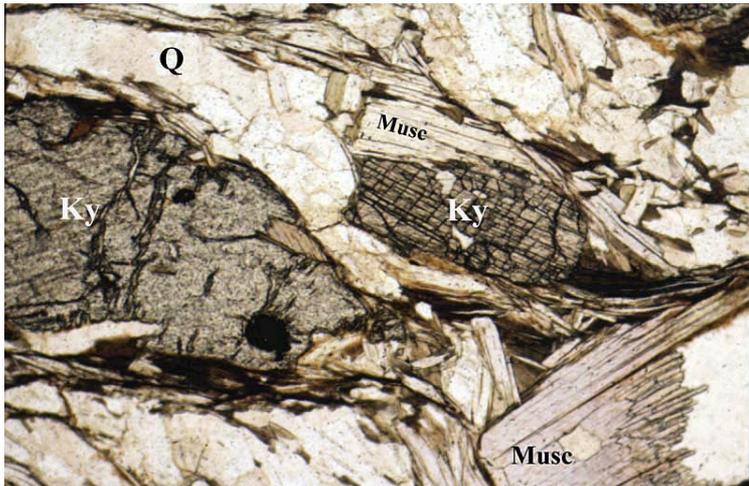
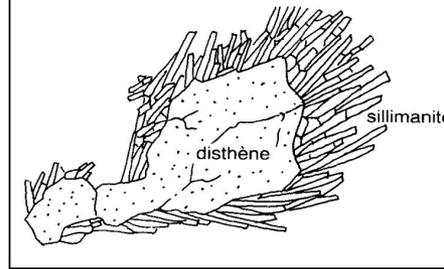
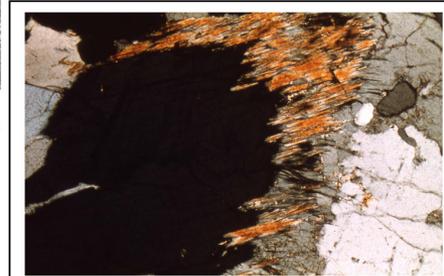
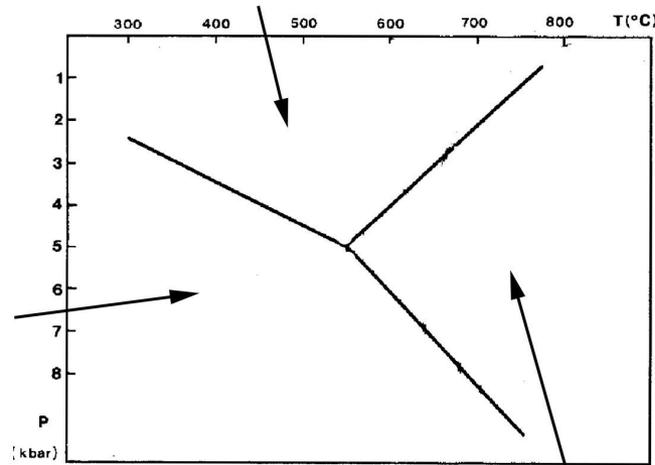
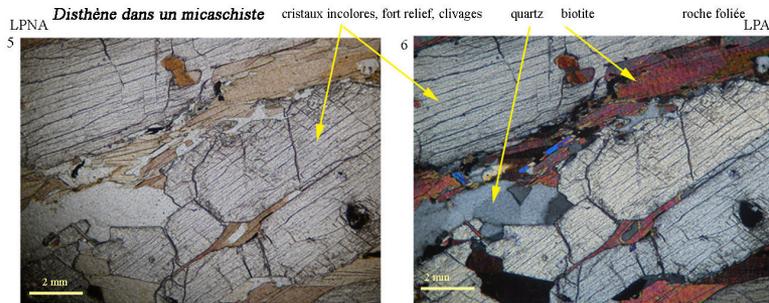
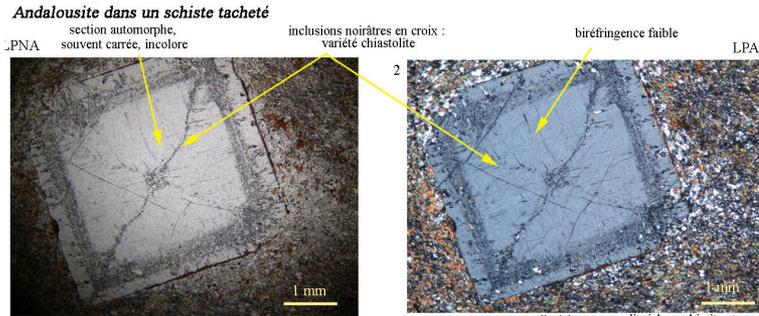
Metam 16b Un exemple d'application : Transformations polymorphiques des silicates d'alumines  $\text{SiAl}_2\text{O}_5$ , Nésosilicate.



$$V = C + 2 - \phi$$

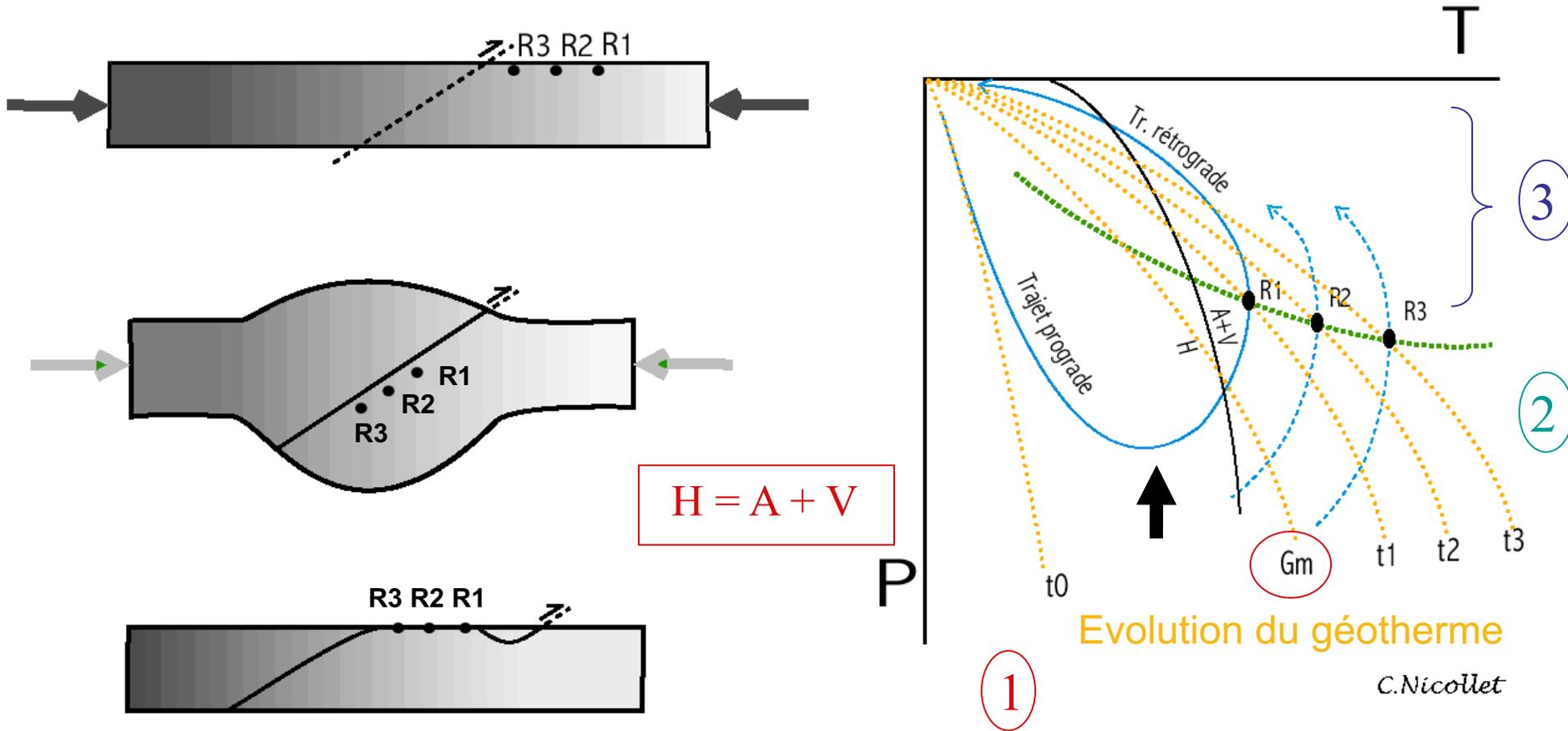
# Les 3 polymorphes des AIS (Silicates d'alumine $SiAl_2O_5$ )

## Andalousite, Sillimanite, Disthène



Le disthène est encore appelé kyanite ou cyanite. Le grand côté de la photo mesure environ 1 mm.

# Metam 17 Relation entre trajectoires P-T-t des roches, géothermes et gradient métamorphique lors d'une collision continent-continent



1: Convergence (flèche = Arrêt);

2: Début de remontée;

3: Accélération de la remontée

P et T augmentent ensemble;

P diminue mais T augmente;

P et T diminuent ensemble

$t_0$ : géotherme d'enfouissement;

$G_m$ : géotherme moyen;

$t_1$ ,  $t_2$  et  $t_3$ : géotherme de remontée

..... gradient métamorphique (cf construction en TP)

H<sub>2</sub>O non disponible car libérée → paragenèses de HT persistent = Grad metam

## III.2 LES RÉACTIONS CHIMIQUES DU MÉTAMORPHISME

### III.2.1 Les différents types de réactions

- A. Les réactions d'inversion*
- B. Les réactions de décomposition*
- C. Les réactions de combinaisons*
- D. Les réactions d'oxydation*

### III.2.2 Les caractéristiques des réactions du métamorphisme

- A. Une cinétique lente*
- B. Des systèmes réactionnels rarement clos*
- C. Le rôle de la déformation*

# Métagabbro folié du Chenaillet

Disparition totale des Cpx

Atteinte des conditions de  
stabilité de la hornblende

La déformation augmente la  
cinétique réactionnelle



## III.3 THERMOMÉTRIE ET BAROMÉTRIE GÉOLOGIQUES

III.3.1 Le principe de la géothermo-barométrie

III.3.2 Un exemple de réaction géothermomètre

*A. Les données expérimentales*

*B. Les causes explicatives*

III.3.3 Un exemple de réaction géotherbaromètre

*A. Un exemple de couple géobaromètre*

*B. Quelques réactions barodépendantes*

# Métamorphisme et entropie

## Roches polyminérales

Réactions métamorphiques = transformations minéralogiques.

Enfouissement : P augmente → roches comprimées → leur volume V diminue. Dans la réaction  $A+B = C+D$ ,  $V(C+D) < V(A+B)$ .

Roche de surface, froide, s'enfonce → variation d'entropie S (entropie = mesure du désordre).

**Entropie de la roche chaude > entropie de la roche froide.**

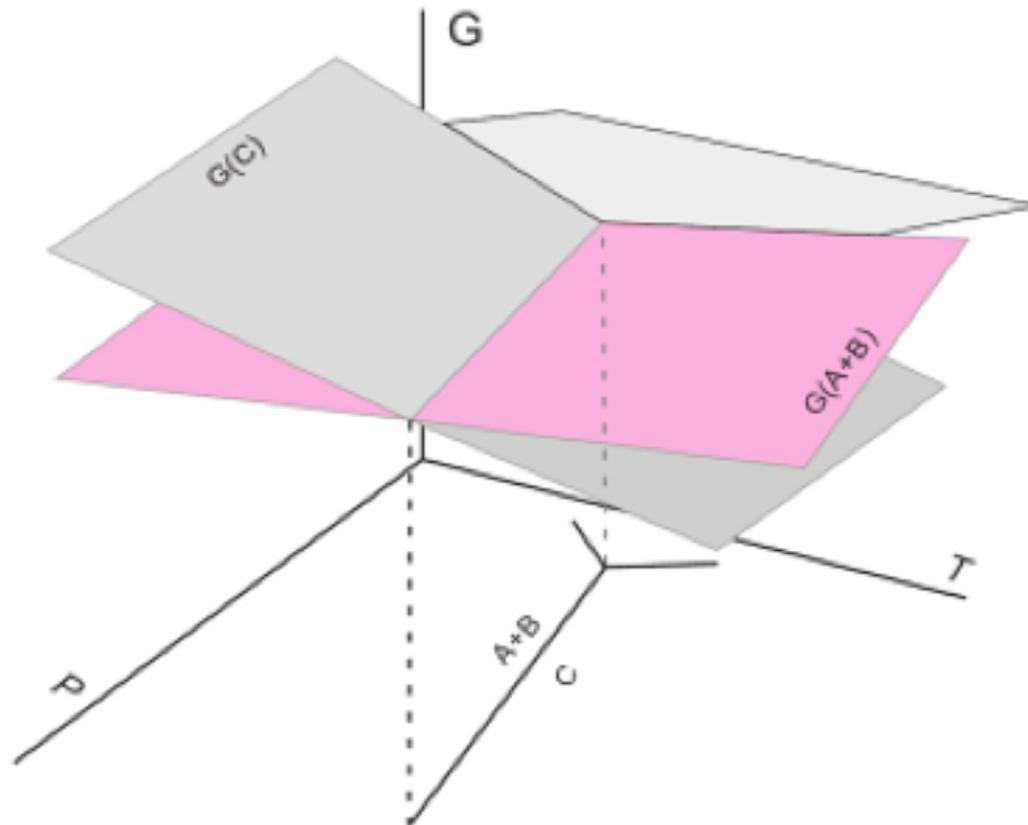
Entropie = nbre de façons dont les constituants atomiques et moléculaires peuvent se répartir dans un minéral Si ce nbre est faible → entropie des minéraux varie peu.

Entropie d'une roche portée à HT augmente mais entropie de ses mx variant peu → **mx de BT remplacés par mx de HT à entropie élevée.**

Assemblage de mx a emmagasiné de l'énergie interatomique → Energie libre de Gibbs  $G = U + PV - TS$

U est l'énergie interne, S l'entropie et V le volume du minéral ou de l'association minérale.

Assemblage stable = celui qui a l'énergie libre la plus faible.  
Diagramme P-T-G, une surface correspondante à l'énergie libre pour chaque minéral ou association de minéraux.  
Ainsi, l'assemblage A+B a la plus faible énergie libre à BT = association stable dans ces conditions.  
Aux HT, C stable car  $G(C) < G(A+B)$ .



## La méthode de calcul en géothermo-barométrie

$$\Delta_r G = \Delta_r H - T \Delta_r S + \Delta_r V \cdot \Delta P = 0 \quad (1)$$

$\Delta P = P - P_0 = P$  car  $P_0 = 1$  bar, négligeable devant  $P$  (plusieurs kb) d'où

$$\Delta_r G = \Delta_r H - T \Delta_r S + \Delta_r V \cdot P = 0 \quad (2)$$

Soit dans l'espace P-T

$$P = (\Delta_r S / \Delta_r V) T - \Delta_r H / \Delta_r V \quad (3)$$

Lorsqu'une réaction fait intervenir des phases solutions solides et qu'elle est continue, son enthalpie libre  $\Delta_r G_{SS}$  varie d'une composante appelée enthalpie de mélange  $G_M$  tel que :

$$\Delta_r G_{SS} = \Delta_r G + \Delta_r G_M \quad (4)$$

L'enthalpie libre de mélange  $\Delta_r G_M = RT \ln K$ .

$$\Delta_r G_{SS} = \Delta_r H - T \Delta_r S + \Delta_r V \cdot P + RT \ln K = 0 \quad (5)$$

Cette expression est la base de la géothermobarométrie. En réécrivant cette expression, nous avons un thermomètre (6) ou un baromètre (7)

$$T = \Delta_r H + P \cdot \Delta_r V / \Delta_r S - R \ln K \quad (6)$$

$$P = - \Delta_r H + T \cdot \Delta_r S - R \ln K / \Delta_r V \quad (7)$$

# La relation de Clapeyron

Soient 2 polymorphes notés A et B. La condition de co-stabilité est exprimée par la relation de Clapeyron

$$\Delta P / \Delta T = S_A - S_B / V_A - V_B = \Delta S / \Delta V$$

	ANDALOUSITE	SILLIMANITE
<b>S</b> Entropie molaire J. mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	93,22	96,11
<b>V</b> Volume en m <sup>3</sup> .mol <sup>-1</sup>	5,15. 10 <sup>-5</sup>	4.99. 10 <sup>-5</sup>

$$\Delta S / \Delta V = 1,8. 10^6 \text{ Pa. K}^{-1}$$

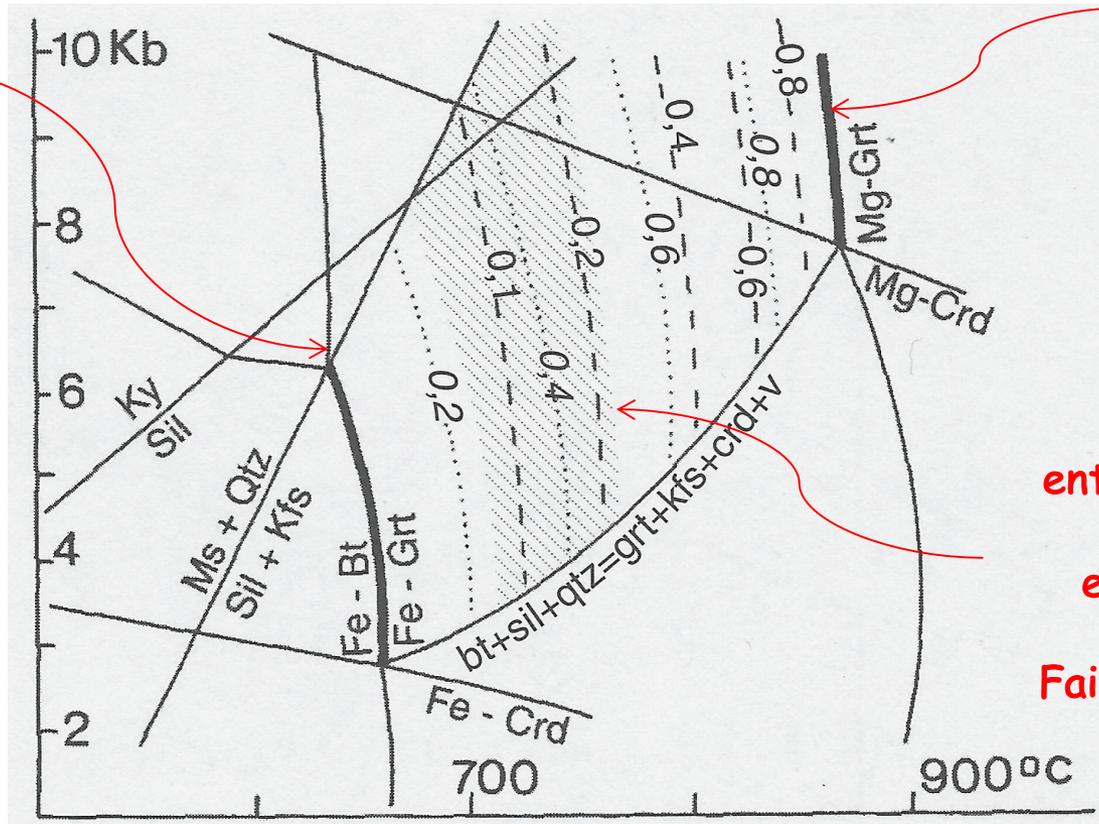
**V et S déterminées expérimentalement**

Metam 18a Champ divariant de l'équilibre  $Bt+Sil/Qtz = Grt+Kfs+V$  (in Nicollet)

Exemple de réaction dans les métapelites



Univariante  
Pôle pur Fe  
Faible  
influence de P



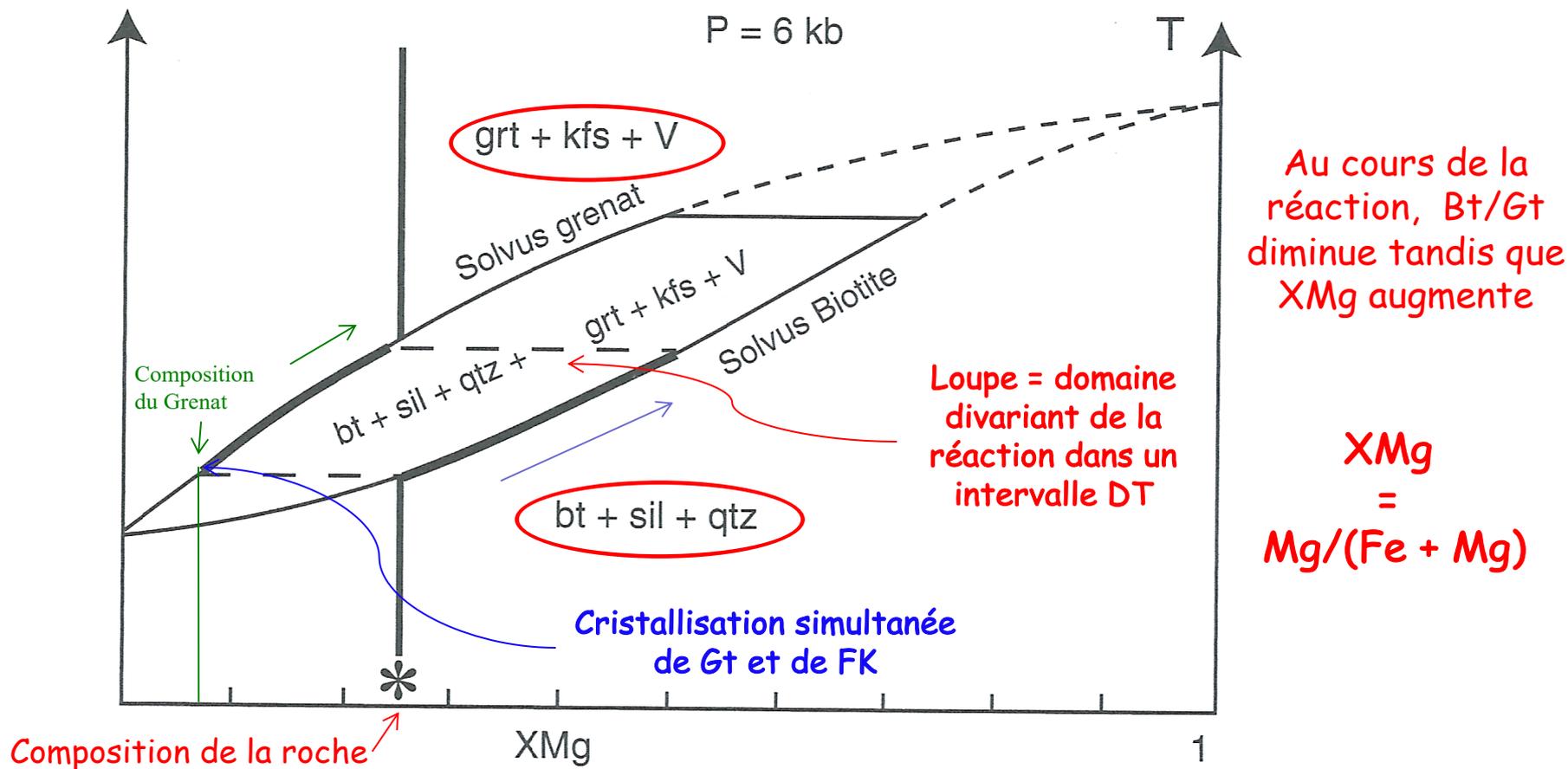
Univariante  
Pôle pur Mg  
Faible  
influence de P

Divariante  
entre le pôle pur Mg  
(900° C)  
et le pôle pur Fe  
(650° C)  
Faible influence de P

250° C environ

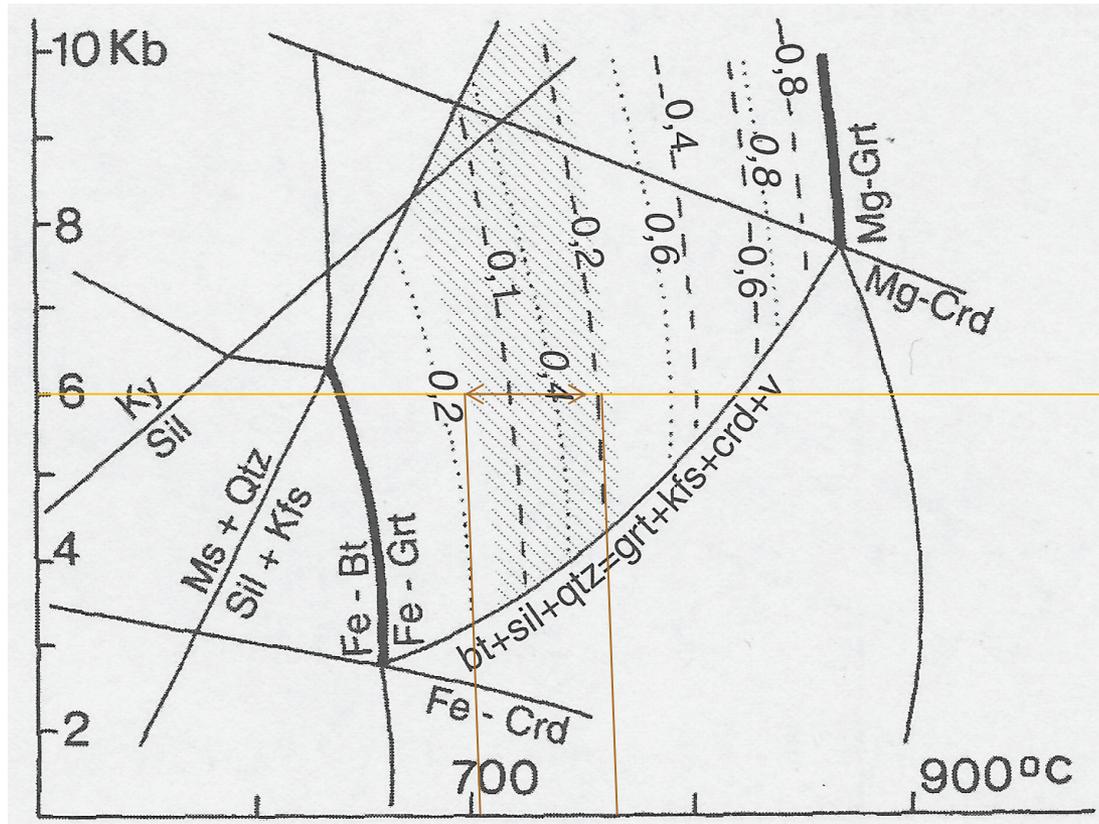
Le champ est limité en T par les deux réactions pôle pur (traits épais) : Fe à basse température, Mg à haute température. Les compositions respectives du grenat (tirets) et de la biotite (pointillé) dans le champ divariant sont données en XMg (Mg/Mg+Fe). Le champ hachuré correspond au champ divariant de la réaction pour la composition de la roche (\*) de la figure 18b.

Metam 18b Diagramme T-XMg de la réaction continue  $Bt+Sil+Qtz=Grt+Kfs+V$  dans les conditions du faciès granulite à  $P = 0,6 \text{ GPa}$  (in Nicollet)



**Solvus** : courbe qui sépare en phase solide le domaine où les minéraux forment une solution solide de celui où ils sont distincts.

Metam 18a Champ divariant de l'équilibre  $Bt+Sil/Qtz = Grt+Kfs+V$  (in Nicollet)



60° C environ

Le champ hachuré correspond au champ divariant de la réaction pour la composition de la roche (\*) de la figure 18b. Température de début (700° C) et de fin (760° C) de la réaction continue.



**BT: 650° -750° C:**

- **Bi Fe (annite) --> Gr Fe (almandin)**

**HT: 750° -900° C**

- **Bi Mg (phlogopite) --> Gr Mg (pyrope)**

*Le couple Mg/Fe est un géothermomètre  
Mg/fe augmente avec T, indépendamment de P*

*Fe (ri = 0,74 Å) et Mg (ri = 0,66Å) soit une # < 15% →  
Substitution aisée et  $\Delta V$  faible lors de la réaction*

# Musc + F. Pl + Q + H<sub>2</sub>O = Phengite

## Réaction barodépendante

Muscovite



Phyllosilicate

Remplacement de Al (0,49A) par Si (0,40A)  
dans les tétraèdres

Phengites



Phyllosilicate

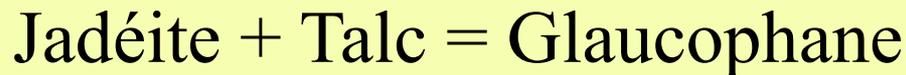
Phengite = minéral indicateur de HP: c' est  
un géobaromètre

# Réaction barodépendante HP-BT

( $P > 0,4 \text{ Gpa}$  et  $T < 400^\circ \text{ C}$ )



Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Tectosilicate
Jadéite	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$	Inosilicate (cpx)
Quartz	$\text{SiO}_2$	Tectosilicate



Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	Tectosilicate
<b>Talc</b>	<b><math>\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]</math></b>	<b>Phyllosilicate</b>
Glaucophane	$\text{Na}_2(\text{Mg, Fe})_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Inosilicate (amph)

# Réaction barodépendante HP-HT

(0,8 Gpa < P > 1,1 Gpa et T > 700° C)

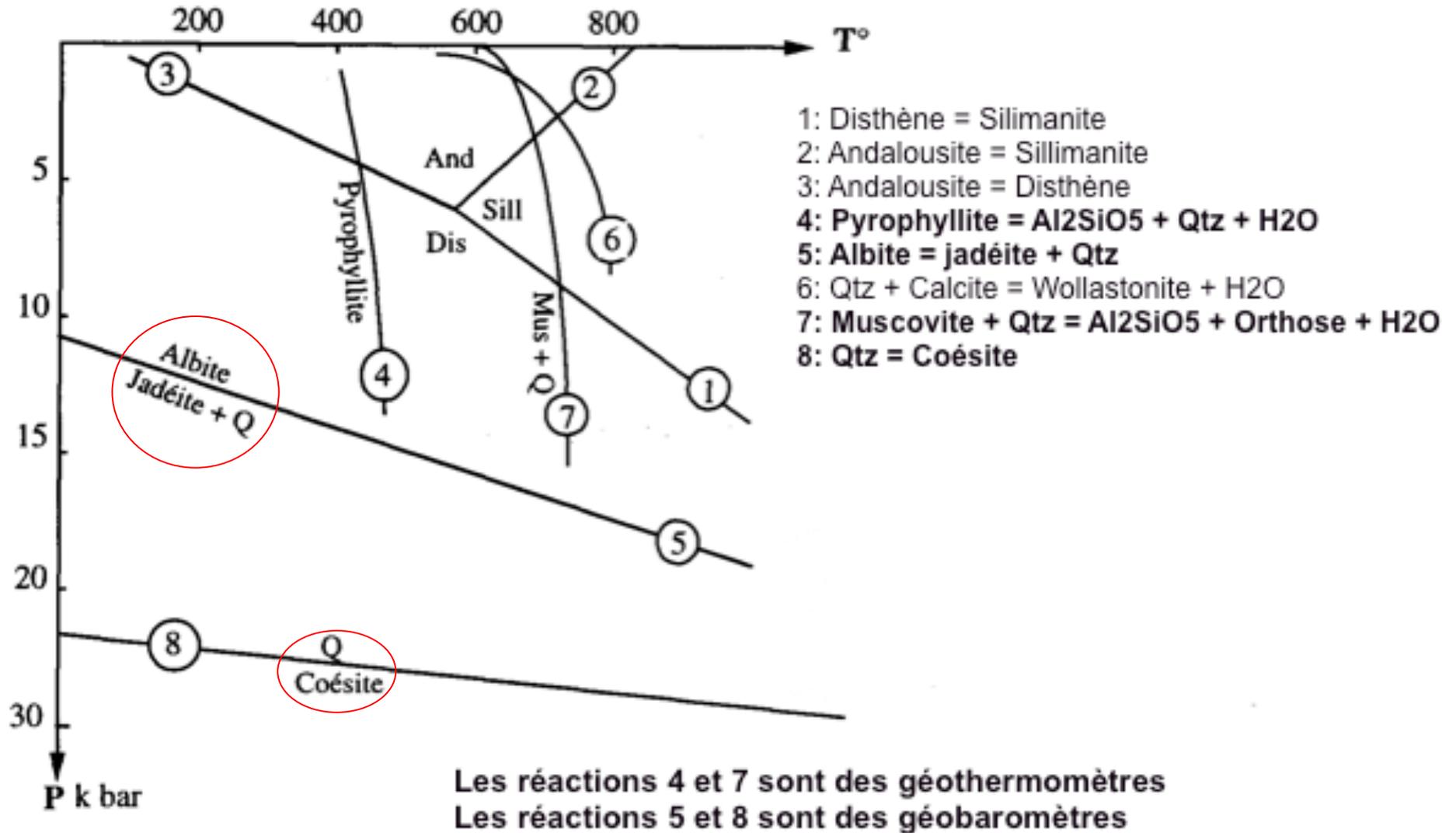


**Gabbro**

**Eclogite**

Orthopyroxènes	$(\text{Mg}_x\text{Fe}_{1-x})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Inosilicate
Plagioclases	$(\text{Na}_{1-x}\text{Ca}_x)\text{Al}_{1+x}\text{Si}_{3-x}\text{O}_8$	Tectosilicate
Grenats	$\text{X}_3\text{Y}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$	Nésosilicates
Clinopyroxènes	$\text{Ca} [\text{Mg}_x\text{Fe}_{(1-x)}] \text{Si}_2\text{O}_6$	Inosilicate

# Metam 19 Equilibres thermo et barodépendants



# IV. LES ENSEIGNEMENTS APPORTÉS PAR LES PARAGÉNÈSES

## IV.1 ZONES ET FACIÈS MÉTAMORPHIQUES

IV.1.1 Les zones métamorphiques

IV.1.2 Les faciès métamorphiques (1925)

*A. Définition*

*B. Les différents faciès*

*C. Les diagrammes triangulaires*

IV.1.3 Séries métamorphiques et systèmes chimiques (Poly)

## IV.2 LES GRADIENTS MÉTAMORPHIQUES

IV.2.1 Les gradients progrades

IV.2.2 Les gradients rétrogrades

Zone métamorphique (Eskola 1914) = volume de terrain présentant un certain degré de métamorphisme.

Ces # degrés de métamorphisme sont délimités par l'apparition ou la disparition dans les roches de minéraux index

**Isogrades** = lignes le long desquelles certains d'entre eux disparaissent tandis que d'autres apparaissent = lignes d'égale intensité du métamorphisme.

**Mais lecture peu précise car :**

P et T indépendants et ne varient pas tjs de la même façon avec la prof.

Présence de mx index significative, absence ne l'est pas tjs car dépend de la comp chimique de la zone

Un même minéral peut se former dans des assemblages minéralogiques #, par des réactions #, dans des conditions P et T #

Des zones métamorphiques voisines caractérisées par des assemblages indiquant des conditions P et T trop # pour que l'on puisse envisager un passage continu de l'une à l'autre = un contact anormal tectonique → ligne séparant les deux zones # isograde.

## Metam 20 : Les zones métamorphiques selon Eskola

Série pelito-gréseuse : roche « acide »			Faciés équivalents pour roches basiques
<b>Diagenèse</b> Passage du sédiment à la roche	Compaction Déshydratation Recristallisation		
<b>Anchizone</b> T° 100 à 200° P = 0,1 GPa	Kaolinite, Illite et/ou Chlorite	Ardoises	Faciés à zéolite
<b>Epizone</b> T°C = 500° ou plus P = 0,6 à 0,8 GPa	Minéraux blancs hydroxylés Séricite, Talc-Chlorite Epidote	Schistes sériciteux Chloritoschistes Talschistes	Faciés à schistes verts
<b>Mésozone <i>Isograde biotite</i></b> T°C < 650°	Biotite coexistant fréquemment avec la Muscovite Disthène Staurotide	Micaschistes à 2 micas Gneis à 2 micas	Faciés amphibolite
<b>Catazone <i>Isograde sillimanite</i></b> T°C < 700° Limite de l'anatexie partielle	Fk Sillimanite Pyroxènes et Grenats	Gneiss à sillimanite Gneiss à Fk	Faciés amphibolite
<b>Ultrazone</b> T°C > 700° Fusion partielle	Cordiérite Grenat	Leptynite	Faciés à éclogite
<b>Anatexie</b> : Début du magmatisme	Magma acide	Granite par refroidissement	

Termes anciens peu  
usités

Amphibolite = Amphibole + plagioclase

**Faciès métamorphique** : un ensemble de roches métamorphiques, de composition chimique différente, contenant des minéraux qui se sont formés en même temps, dans un même intervalle étroit de P et T, i.e qui ont un domaine de stabilité commun étroit.

**Assemblage typomorphe** : ensemble des minéraux en équilibre formés pendant le même épisode de recristallisation qui permettent de caractériser et nommer un faciès métamorphique.

Pourquoi les noms des faciès sont-ils donnés d'après les paragénèses d'une roche magmatique basique métamorphisée ?

Chimie des roches basiques beaucoup plus variée que celle des pélites (Si, Al, K, Na)  
→ établissement d'une plus grande diversité de faciès

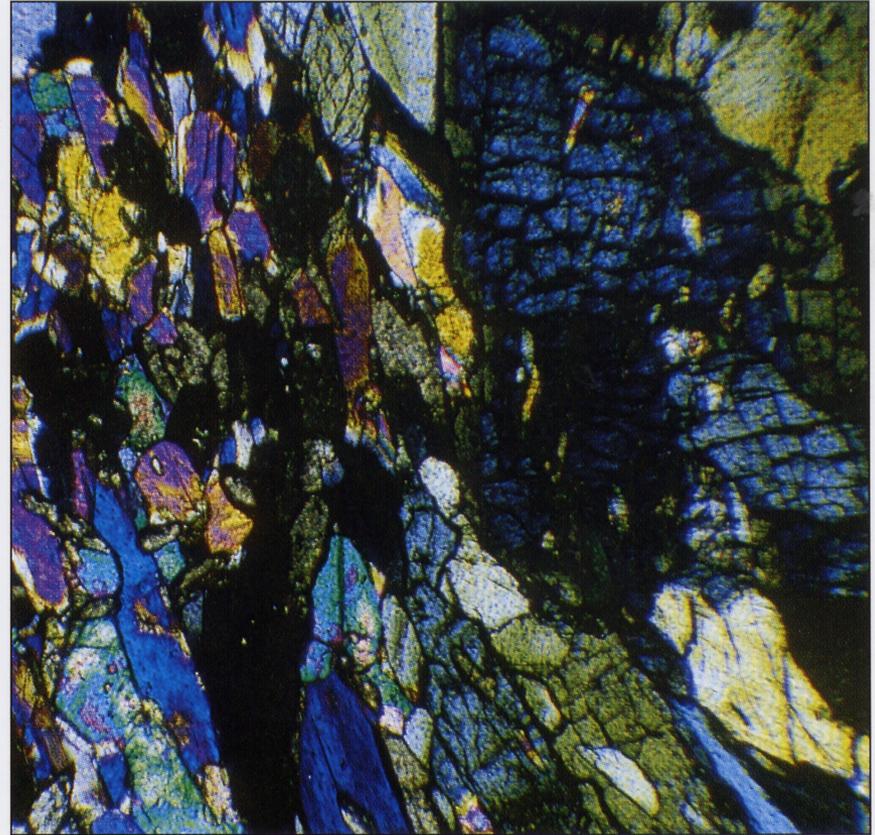
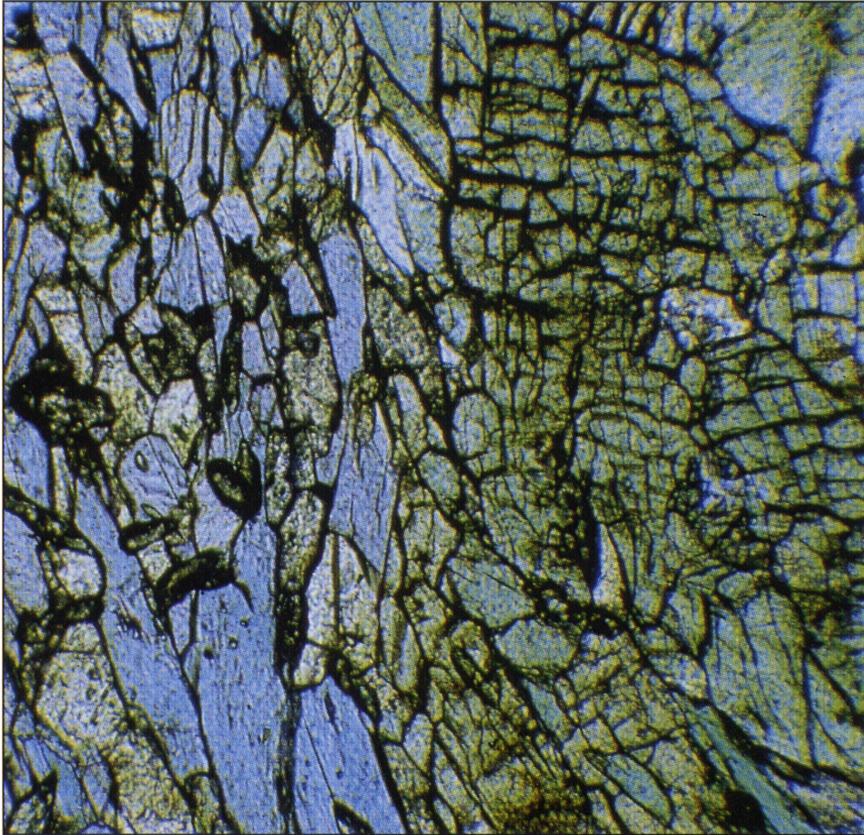
riches en Fe et Mg

pauvres en Si et Al → peu de micas et d'aluminosilicates (And, Dist et Sill)

pauvres en H<sub>2</sub>O et minéraux hydroxylés → peu ou pas de fusion partielle (FP)

**Faciès métamorphique = paragénèse (chimisme) + degré de métamorphisme**

# Glaucophane et jadéite



FZ: transition diagénèse-métamorphisme

FPP: Début du métamorphisme

FSV: actinote, épidote, chlorite, FPI

FC: métamorphisme de contact

FA: apparition de Hornblende

Domaine BP : au-dessous A → J + Q

Zéolites et Préhnites/pumpelleytes

Schistes verts (SV) et Amphibolites

Cornéennes et granulites : HT

• Thermodépendant: → F Granulite

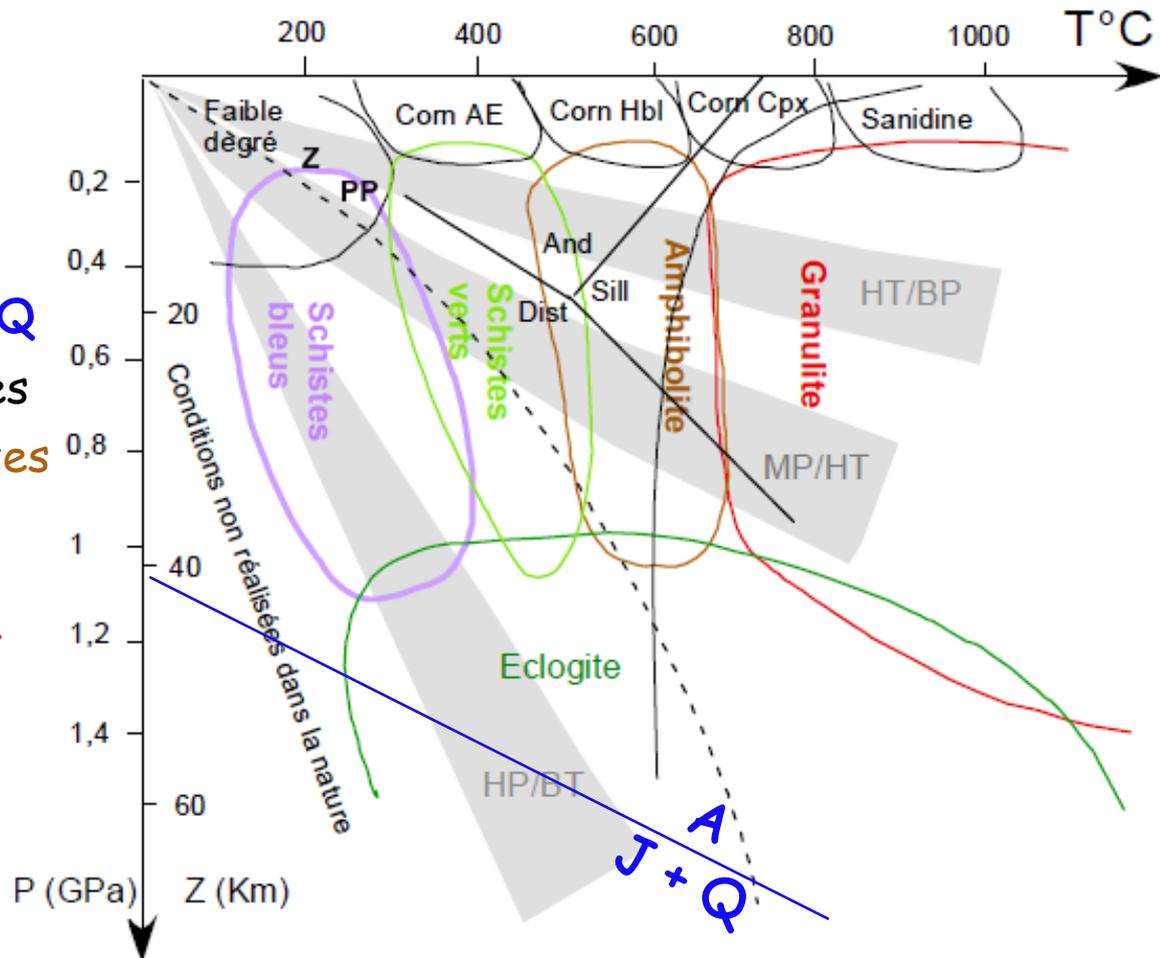


• Barodépendant: → F Eclogite



Métam 21

Les faciès métamorphiques  
dans un diagramme  
pétrogénétique



Domaine HP : au-dessus A → J + Q

FSB: Glaucophane + jadéite (< 400 ° C)

F Eclogites: Grenat + Omphacite  
(UHP à coésite)

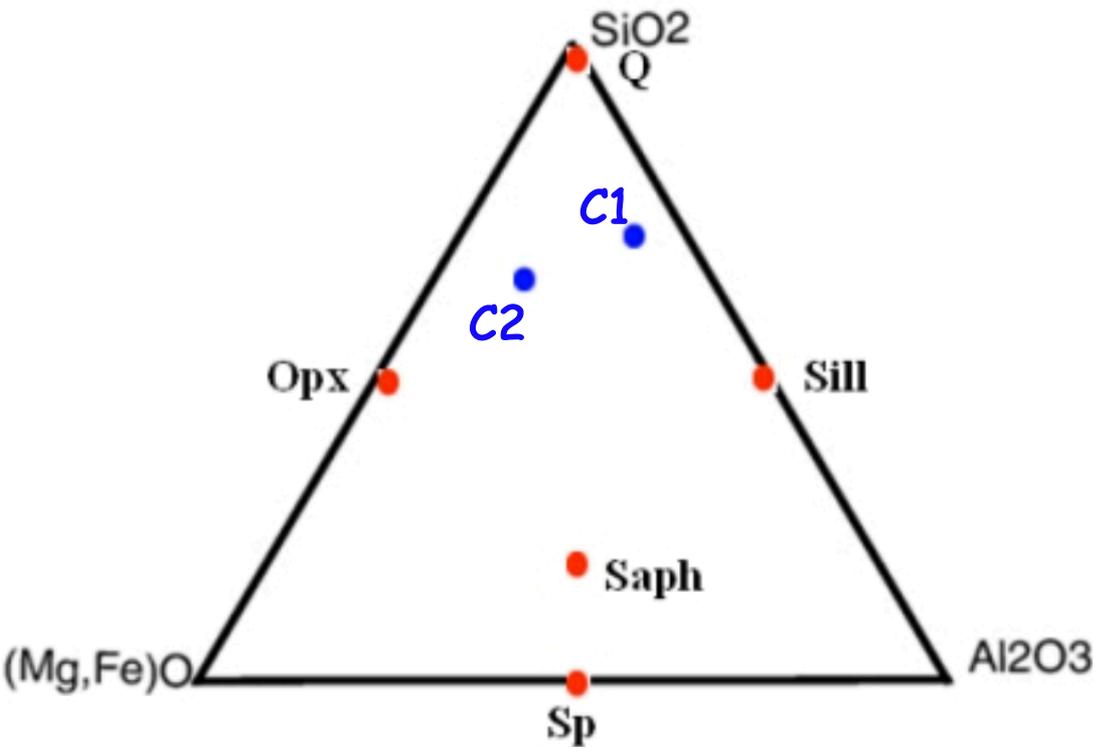
# Métam 22: Granulites alumineuses (région d'Andriamena Madagascar).

La roche C1 contient essentiellement Opx + Sill + Q

La roche C2 contient Opx + Saph + Q

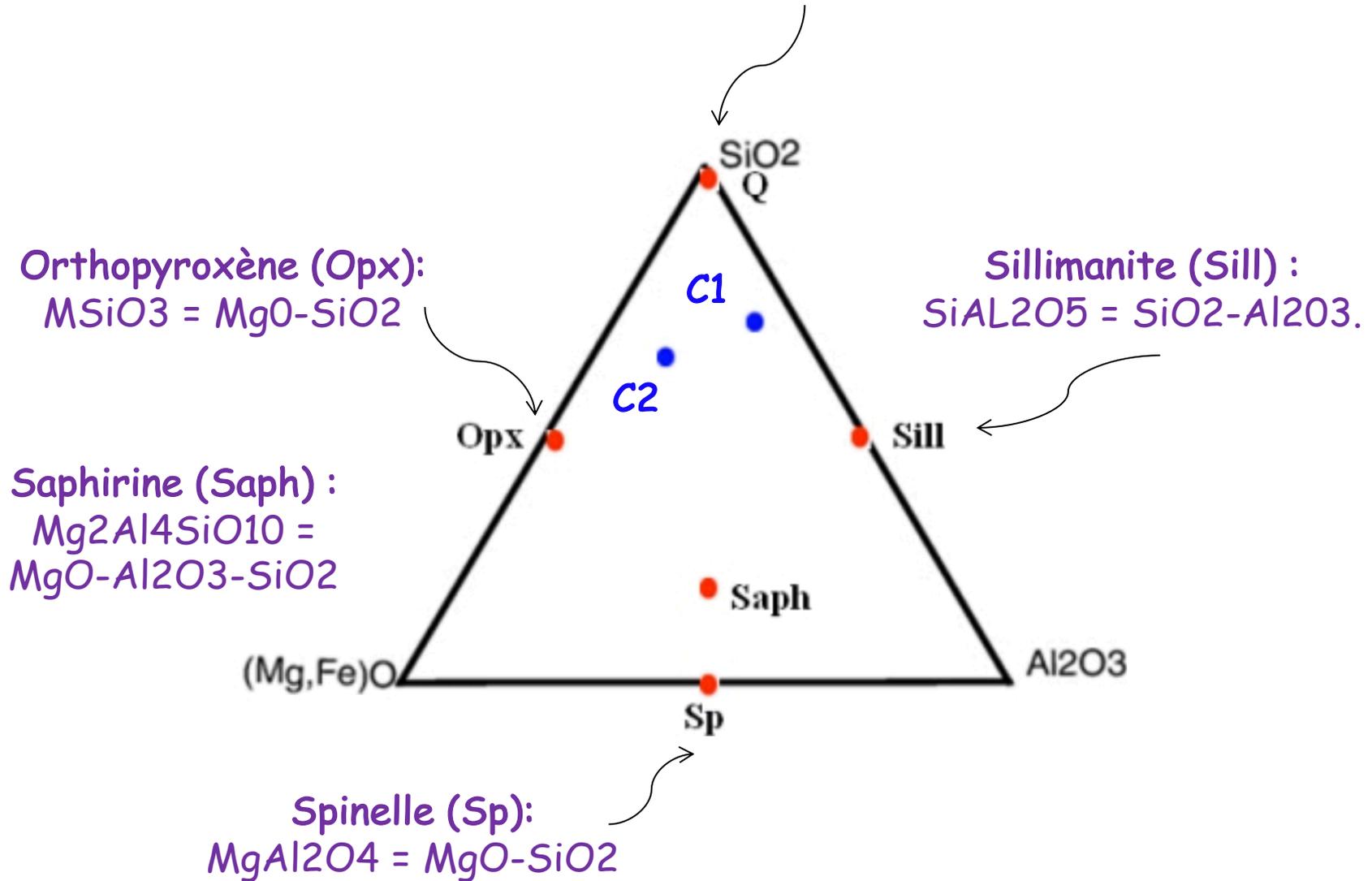
1. Définir le nombre de constituants chimiques indépendants : 4 éléments totalisent plus de 95% du total des analyses et on néglige tous les autres dont les teneurs sont inférieures à 1%.

	C 1	C 2
SiO2	66,00	66,30
Al2O3	27,00	12,00
FeO	3,00	12,27
MnO	0,02	0,07
MgO	4,00	7,40
CaO	0,36	0,12
Na2O	0	0,05
K2O	0,00	0,8
TiO2	0,50	1,10
P2O5	0,06	0,44
PF	0,09	0,20
Total	100,90	100,75



Les roches C1 et C2 sont représentées en fonction des proportions respectives des 3 éléments.

Quartz (Q) = SiO<sub>2</sub> occupe le sommet du triangle

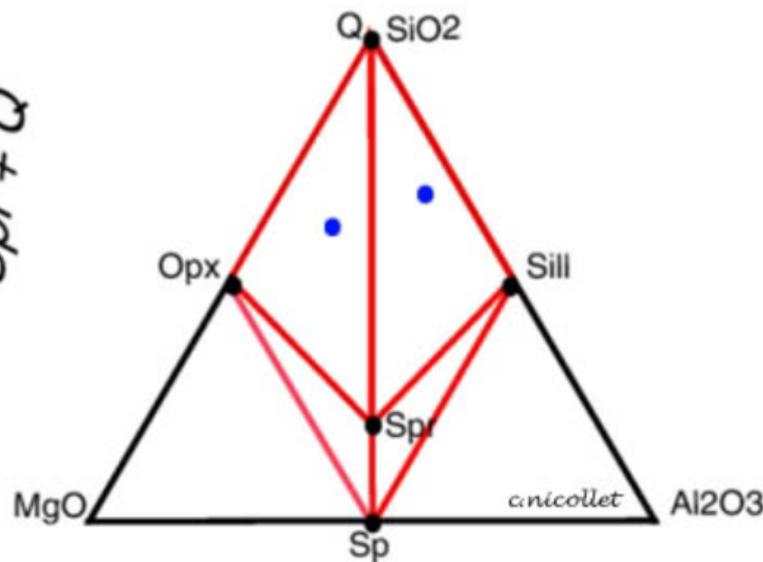
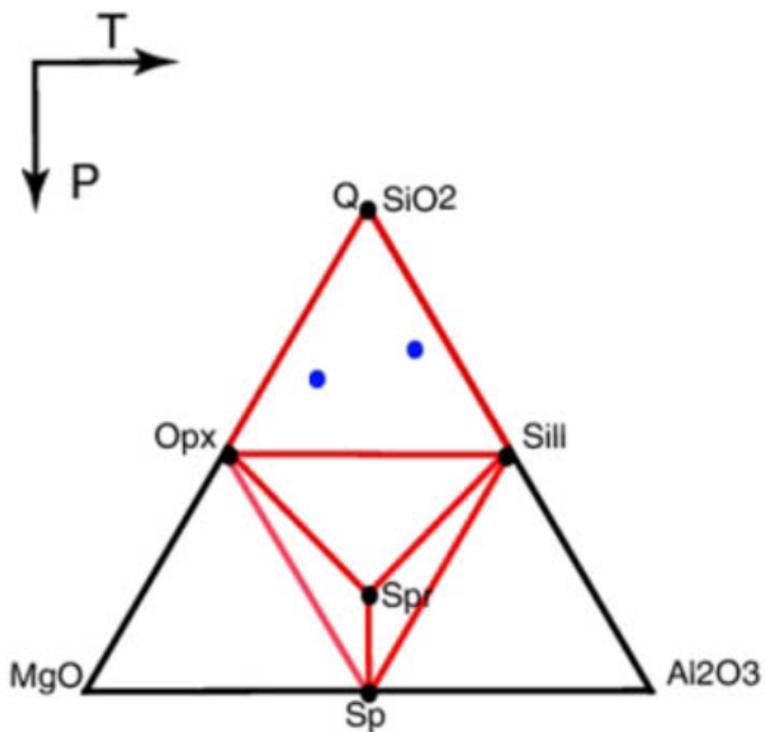


La Règle des Phases ( $V = C+2-M$ ) indique que la paragenèse (assemblage divariant donc  $V = 2$ ) d'une roche contient le même nombre de minéraux  $M$  que de constituants chimiques. Dans le cas présent,  $C=3$ , donc  $M= 3$ .

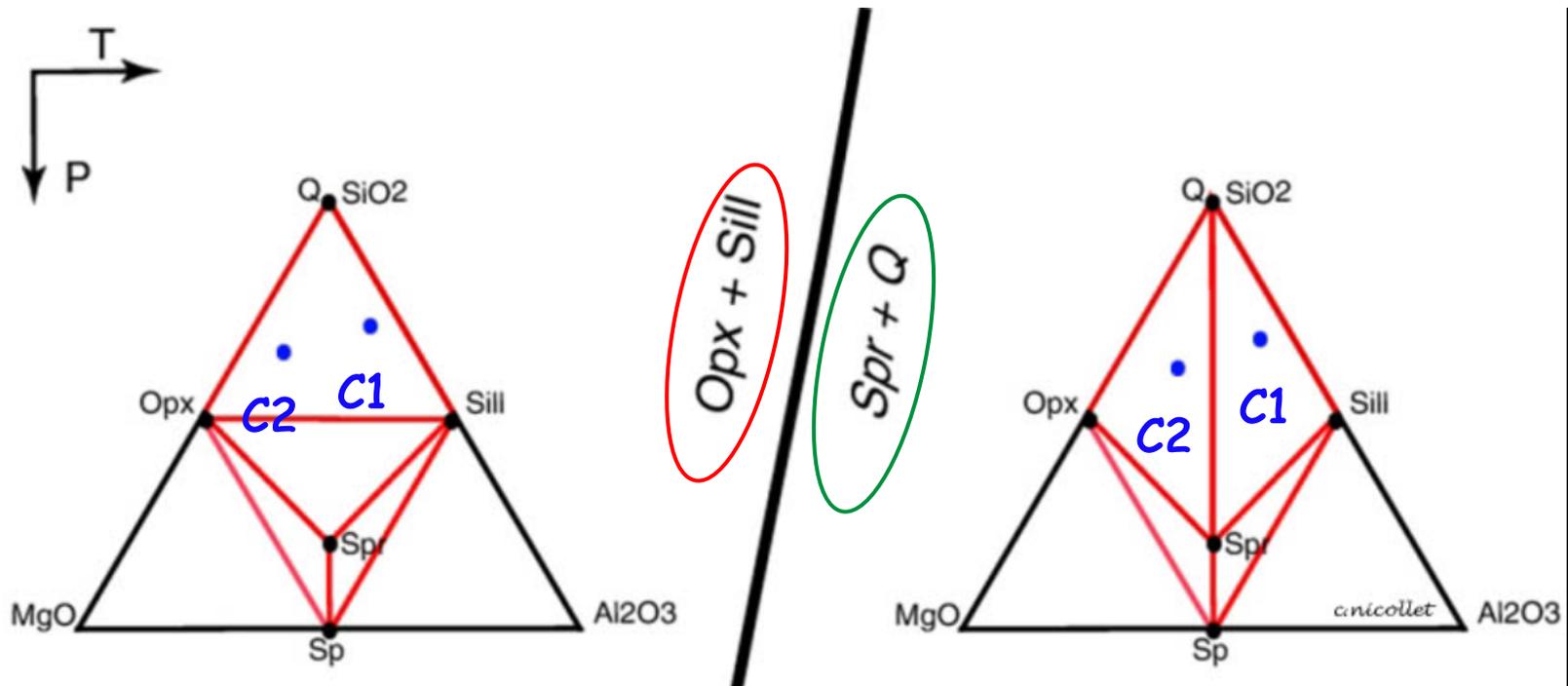
Triangles partiels dans le triangle  $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}, \text{Mg})\text{O}$  avec un minéral à chaque sommet : roche située dans un de ces triangles contient ces 3 minéraux.

C1 : Opx + Sill + Q

C2 : Opx + Spr + Q



Les lignes de liaison reliant les minéraux en équilibre ne doivent jamais se couper.

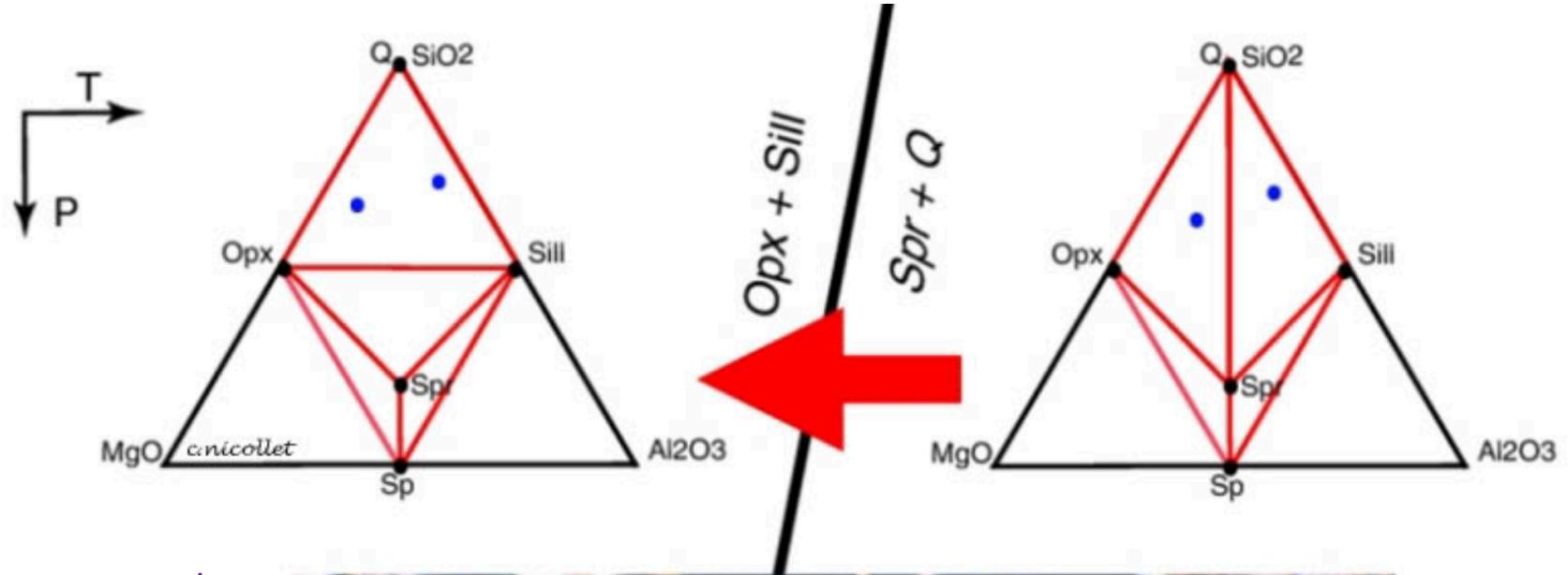


Selon les proportions des 3 constituants chimiques, les roches ont des paragenèses différentes : Q-Opx-Sill ; Opx-Sill-Spr ; Opx-Sp-Spr ; Sill-Sp-Spr. Q-Opx-Spr ; Q-Sill-Spr.

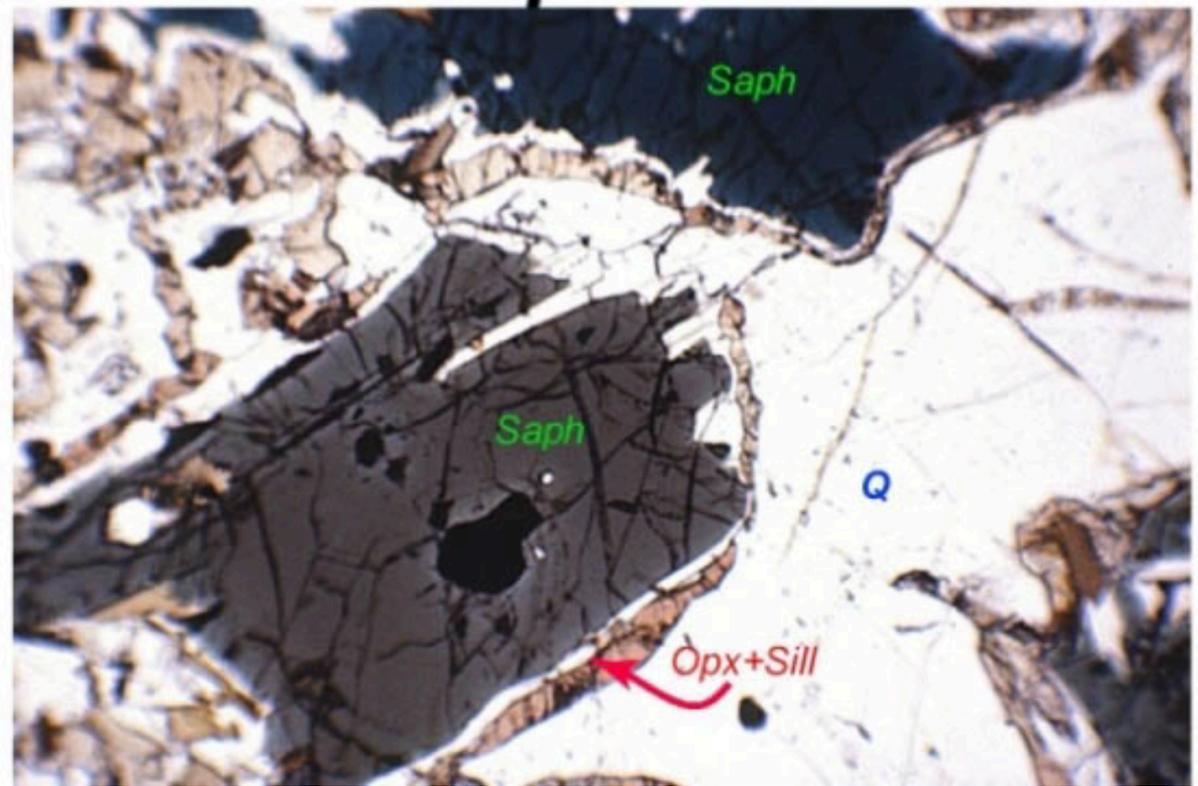
Roche C1 : paragenèse Opx + Sill + Q : formation dans les conditions P-T du domaine divariant de gauche.

Roche C2 : paragenèse Opx + Spr + Q : formation dans les conditions P-T du domaine divariant de droite.

Simple lecture de cette figure nous indique que ces 2 roches ne se sont pas formées dans les mêmes conditions P-T

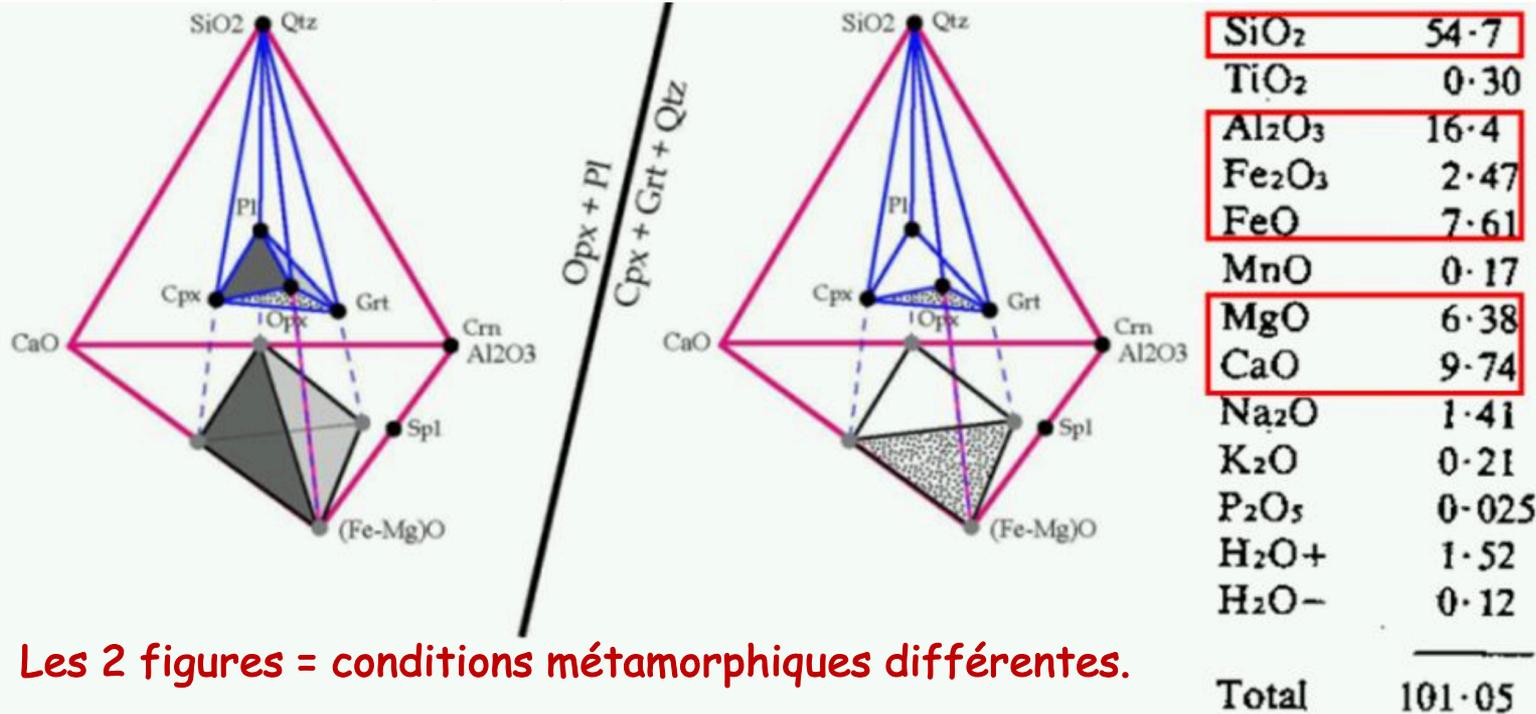


Les gros cristaux de saphirine et de quartz étaient, dans un premier temps, en contact, en équilibre dans le domaine divariant de droite. Ils sont maintenant séparés par une couronne de sillimanite et d'orthopyroxène, suggérant un passage dans le domaine divariant de gauche.



**Métam 23: Diagramme ACF**

Composition d'une métabasite ; 5 éléments totalisent près de 95%. Ce sont SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, CaO. Pour simplifier, nous négligeons les autres. On considère FeO et MgO comme un seul constituant (Fe+Mg)O. Il reste 4 constituants dont on peut représenter les variations dans un tétraèdre.



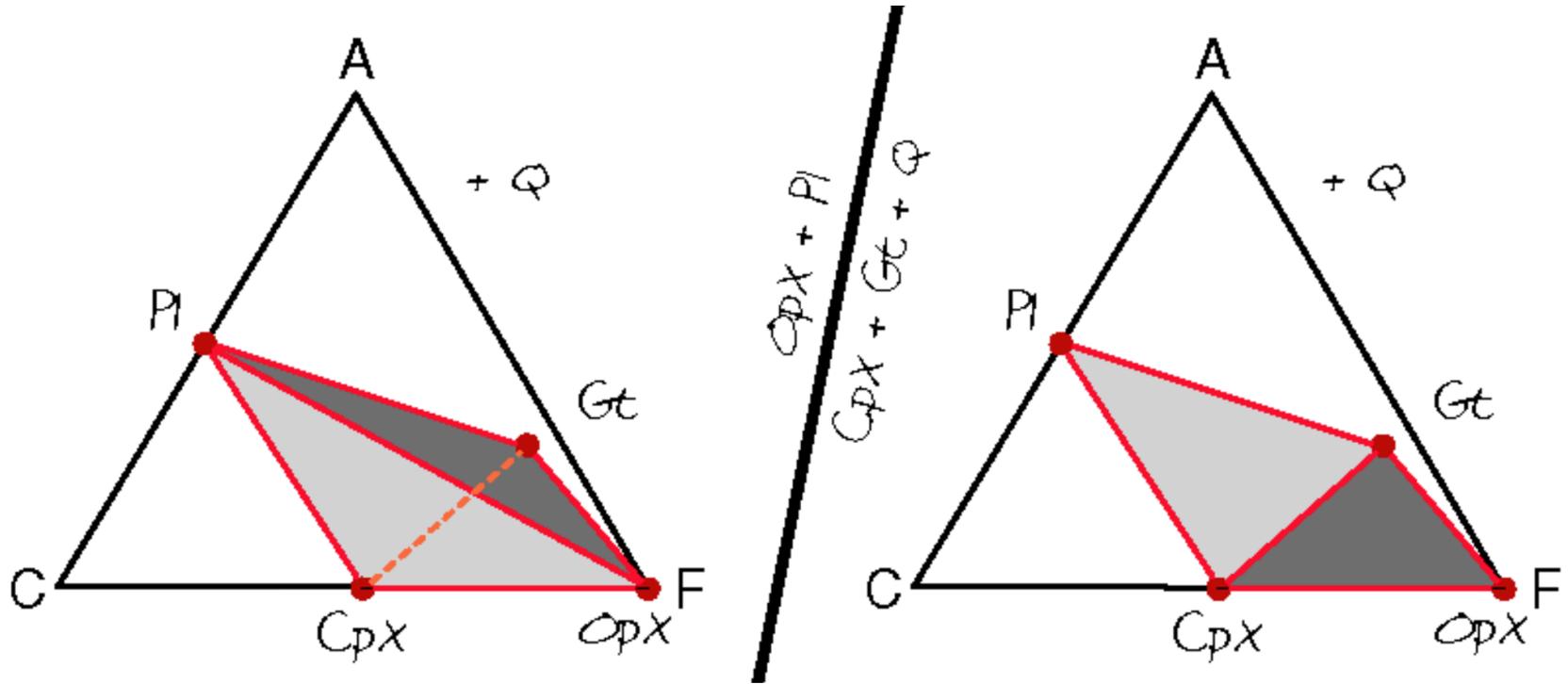
**Les 2 figures = conditions métamorphiques différentes.**

Le tétraèdre A(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) - C(CaO) - F(FeO+MgO)- S(SiO<sub>2</sub>) est représentatif de la composition des roches magmatiques basiques. Quelques minéraux de ces roches sont portés sur la figure : Qtz, Opx, Cpx, Pl, Grt et Spl pour spinelle. Les lignes de liaisons entre ces différents minéraux permettent de définir des paragenèses à 4 minéraux.

Fig de gauche: Qtz-Opx-Grt-Pl ; Qtz-Cpx-Opx-Pl ; Opx-Cpx-Pl-Grt ; Spl-Opx-Grt-Cpx ; Spl-Cpx-Grt-Pl.

Fig de droite: Qtz-Opx-Grt-Cpx ; Qtz-Cpx-Grt-Pl ; Opx-Cpx-Pl-Grt ; Spl-Opx-Grt-Cpx ; Spl-Cpx-Grt-Pl. **Les lignes de liaisons faisant intervenir le Spl ne sont pas représentées pour plus de clarté, à moins d'utiliser la visualisation 3D.**

Nécessité de diminuer le nombre de constituants.  $\text{FeO}$  et  $\text{MgO}$  = un seul constituant ( $\text{Fe}+\text{Mg})\text{O}$ . Il reste 4 constituants dont on peut représenter les variations dans un tétraèdre, figure difficile à visualiser en 2 dimensions  $\rightarrow$  projection du volume de ce tétraèdre sur un triangle en choisissant un des minéraux de la paragenèse comme pôle de projection (Quartz dans le cas du triangle  $\text{ACF}$  utilisé pour représenter les roches basiques). C'est pourquoi, ce minéral doit faire partie de la paragenèse des roches représentées dans ce diagramme. On rappelle cette condition en écrivant  $\text{Q}$  à côté du diagramme.



Le diagramme triangulaire  $\text{A}(\text{Al}_2\text{O}_3) - \text{C}(\text{CaO}) - \text{F}(\text{FeO}+\text{MgO})$  est une projection du tétraèdre  $\text{S}(\text{SiO}_2)\text{ACF}$  depuis le sommet  $\text{S}$  où se trouve le quartz ( $\text{Q}$ ). La ligne jointive en pointillé  $\text{Cpx-Gt}$  est "caché" par les plans  $\text{Opx-Cpx-Pl}$  et  $\text{Opx-Gt-Pl}$ .

Les 2 triangles correspondent respectivement aux faciès granulite de Basses  $\text{P}$  et de  $\text{P}$  Intermédiaires. On passe de l'une à l'autre en remplaçant la ligne de liaison  $\text{Opx-Pl}$  par la ligne  $\text{Cpx-Gt}$ ; On franchit l'équilibre univariant  $\text{Opx} + \text{Pl} = \text{Cpx} + \text{Gt} + \text{Q}$ .

## Les séries métamorphiques et les systèmes chimiques

Les roches métamorphiques possédant les mêmes constituants majeurs peuvent être regroupées en cinq séries, décrites respectivement par cinq systèmes chimiques. Chaque système est désigné par l'ensemble de chacune des premières lettres du symbole chimique de ses éléments majeurs.

### **Les roches pélitiques : le système KFMASH (K, Fe, Mg, Al, Si, H).**

La roche initiale est riche en minéraux argileux. Un métamorphisme régional de telles roches aboutit à des **micaschistes** et/ou des **gneiss** qui sont alors des paragneiss. Attention, un gneiss ne correspond pas à un métamorphisme de degré plus élevé qu'un micaschiste, mais à une composition initiale différente de celle qui aboutit aux micaschistes. Par un métamorphisme de contact, des pélites sont transformées en schistes noduleux et en cornéennes.

### **Les roches quartzo-feldspathiques : le système CKNASH (Ca, K, Na, Al, Si, H).**

Si la roche initiale est un sable ou un grès, il se forme un quartzite métamorphique (s'il s'agit d'un sable siliceux pur) ou un gneiss (s'il y a des feldspaths)

Les granites, les rhyolites sont peu modifiés dans un métamorphisme d'intensité faible. Si l'intensité est plus forte, ces roches peuvent être transformées en gneiss (orthogneiss). Les gneiss œillés sont presque toujours d'anciens granites.

### **Les roches basiques : le système NCFMASH (Na, Ca, Fe, Mg, Al, Si, H).**

La roche initiale est souvent une roche magmatique du type gabbro ou basalte ; il se forme alors des roches métamorphiques orthodérivées. De rares roches sédimentaires peuvent néanmoins appartenir à ce système. Les roches métamorphiques basiques sont celles qui ont donné leurs noms aux faciès métamorphiques .

### **La série carbonatée.**

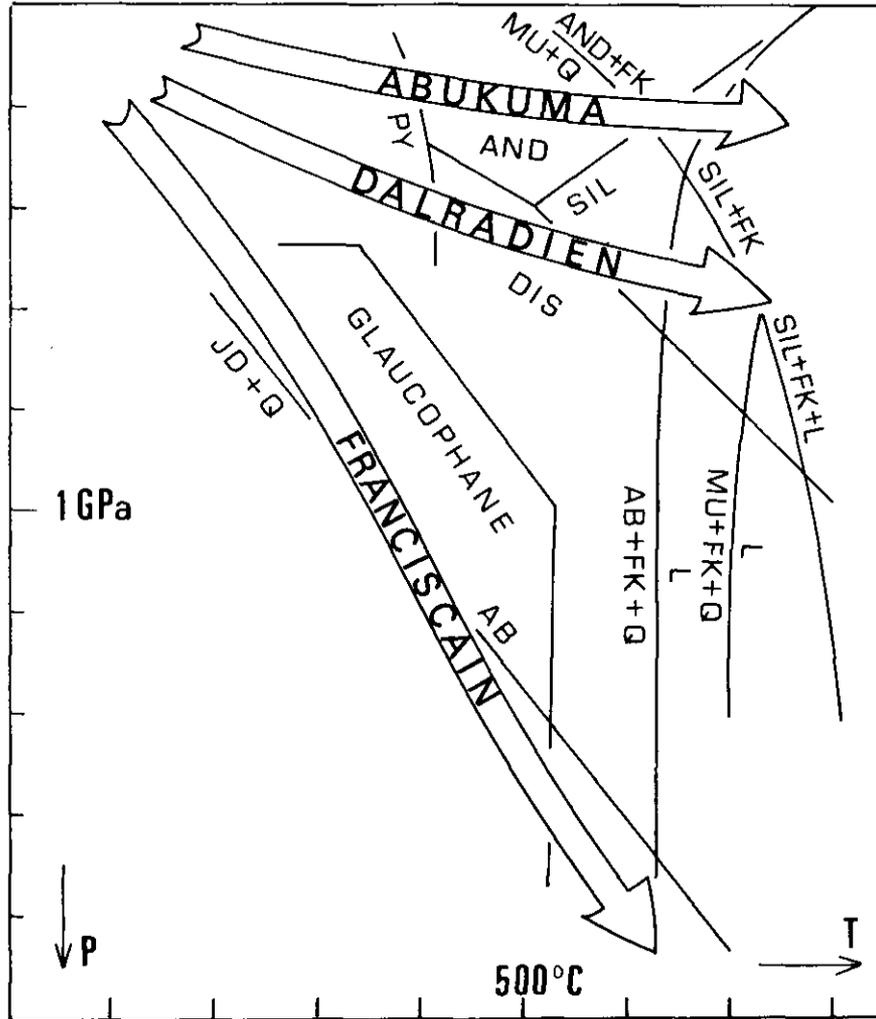
La roche initiale est un calcaire, une marne ou une dolomie. Son évolution varie avec le type de métamorphisme et avec la pureté du matériau initial. Par exemple, dans un métamorphisme de contact, un calcaire pur évolue en marbre, un calcaire impur évolue en cipolin (marbre impur).

### **Les roches ultrabasiques.**

Elle comprend les péridotites et les serpentinites, produits de leur hydratation. Comme la minéralogie des péridotites dépend des conditions (P, T) et que les transitions de phase du manteau se font à l'état solide, les péridotites peuvent être considérées comme des roches métamorphiques.

Faciès	Série basique	Série péritique
<b>Cornéennes</b>	<b>Hornblende</b> (amphibole Ca) ou <b>pyroxènes</b>	<b>Andalousite</b> (néosilicate, $Al_2SiO_5$ ) <b>Cordiérite</b> (cyclosilicate)
<b>Schistes verts</b>	<b>Albite</b> (plagioclase Na) Épidote (sorosilicate) <b>Actinote</b> (amphibole Ca) <b>Chlorite</b> (phyllosilicate) Grenat Fe (néosilicate)	Pyrophyllite (phyllosilicate) Chlorite (phyllosilicate) Chloritoïde (néosilicate)
<b>Amphibolites</b>	Plagioclase <b>Hornblende</b> (amphibole Ca) Grenat Fe, Mg (néosilicate)	<b>Biotite</b> (mica noir) Grenat (néosilicate) Staurotide (néosilicate) Sillimanite ou disthène ( $Al_2SiO_5$ )
<b>Schistes bleus</b>	<b>Glaucophane</b> (amphibole Na) Épidote (sorosilicate) ou <b>Lawsonite</b> (sorosilicate)	<b>Phengite</b> (mica blanc) <b>Carpholite</b> (inosilicate) Chloritoïde (néosilicate) Disthène (néosilicate, $Al_2SiO_5$ )
<b>Eclogites</b>	<b>Grenat Mg</b> (néosilicate) <b>Omphacite</b> (solution solide de clinopyroxènes dont la jadéite) Zoïsite (variété d'épidote)	<b>Phengite</b> (mica blanc) Disthène (néosilicate, $Al_2SiO_5$ ) <b>Grenat</b> (néosilicate) Talc (phyllosilicate) <b>Coésite</b> pour faciès Ultra Haute Pression
<b>Granulites</b>	<b>Pyroxènes</b> <b>Plagioclase</b>	Cordiérite Sillimanite (néosilicate, $Al_2SiO_5$ ) Feldspath K Grenat Disthène

## Metam 24. Les 3 principaux types de gradients progrades du métamorphisme régional (selon Miyashiro, 1961).



Gradient métamorphique = ligne selon laquelle  $T/P = \text{constante}$

$25^{\circ} \text{ C. Km}^{-1}$

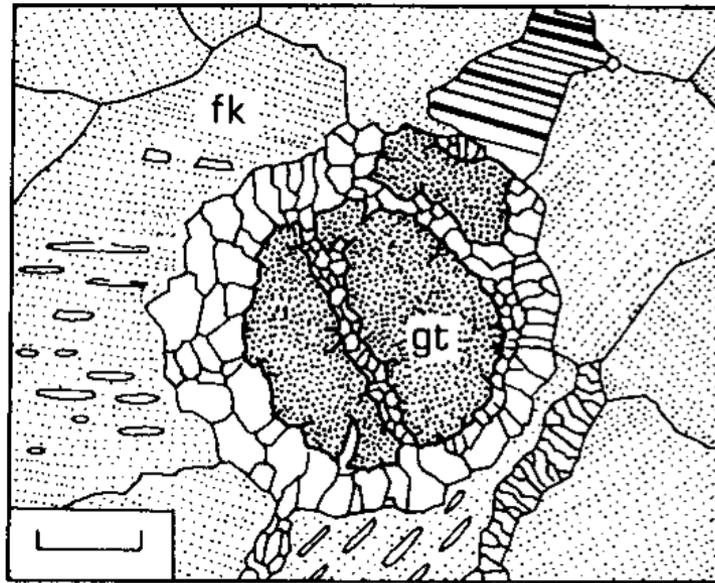
$50^{\circ} \text{ C. Km}^{-1}$

$75^{\circ} \text{ C. Km}^{-1}$

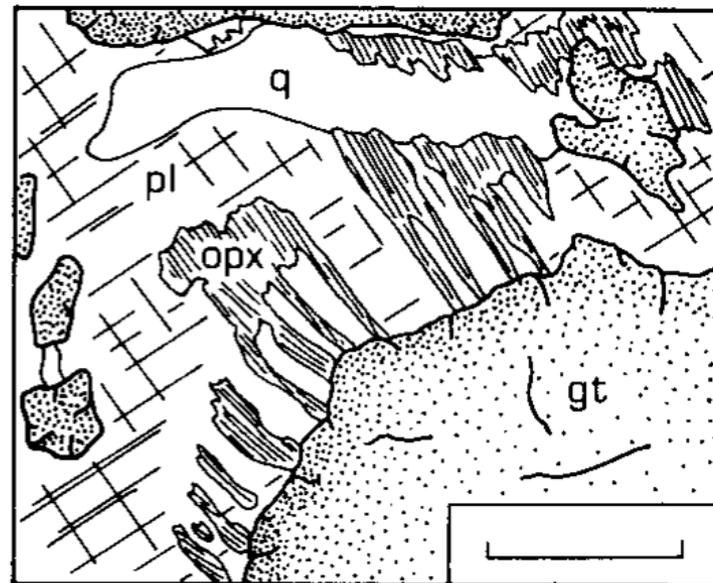
Pour une région métamorphique donnée, il faut que:

- La série soit homogène.
- Pas de contact anormaux
- Paragénèses formées lors de la même phase métamorphique donc de même âge
- Paragénèses de valeurs P et T les plus élevées passées successivement par les stades représentés.

Metam 25 Exemples de recristallisations hétérogènes permettant la caractérisation des gradients rétrogrades.



a



b

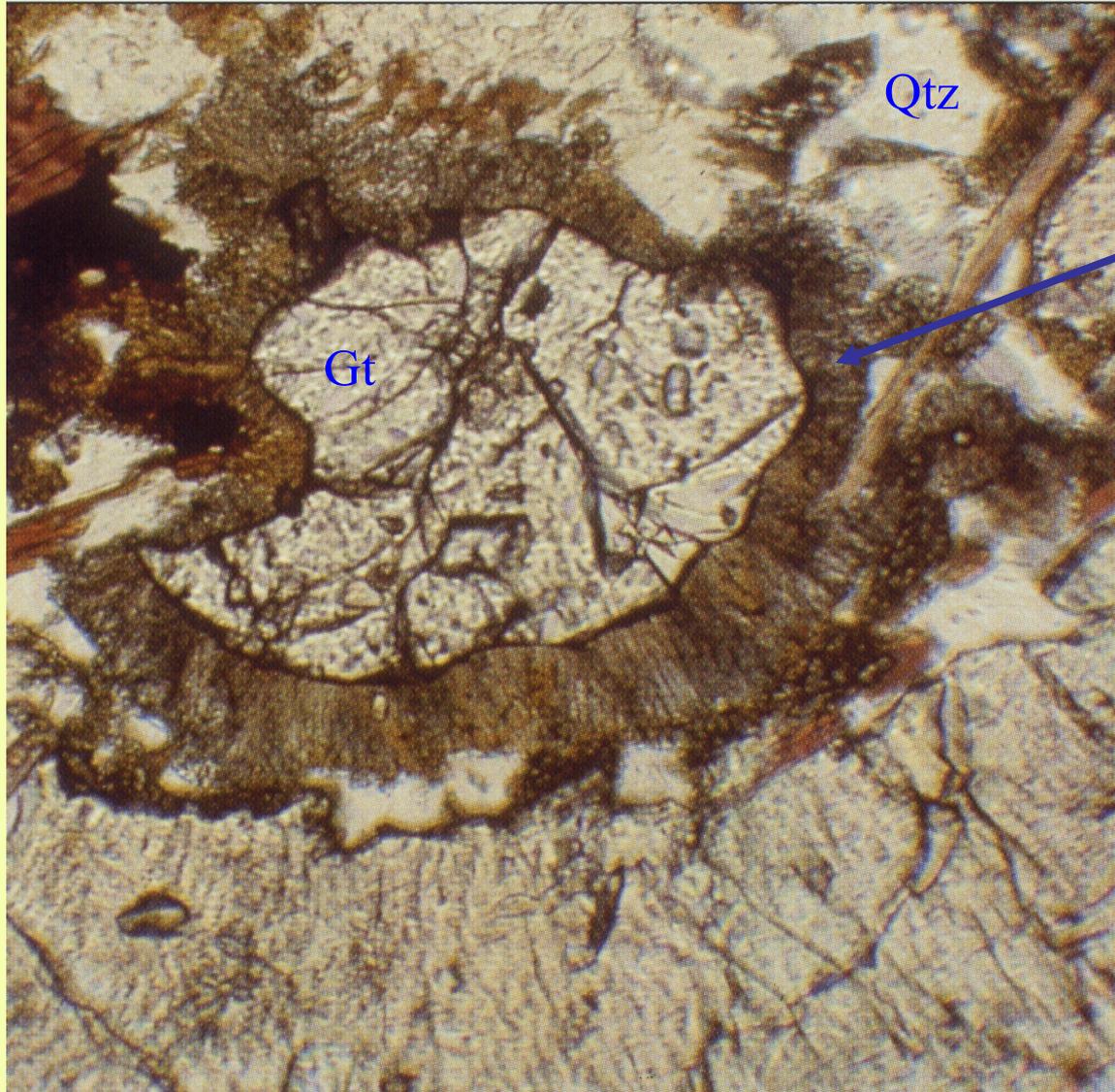
} Kélyphyte

**a. Granulite métapélitique de la zone nord-pyrénéenne (d'après Vielzeuf, 1984).** Échelle = 0,25 mm. Développement d'un assemblage finement granoblastique à cordiérite, biotite et quartz aux dépens du grenat (gt; pointillé gras) et du feldspath potassique (fk ; pointillé léger). Cette recristallisation localisée (noter en particulier le rôle d'une fissure ayant permis la circulation d'un fluide riche en eau) correspond au **fonctionnement rétrograde** (dans le sens d'une diminution de P et T) de la réaction :



**b. Méta- grauwacke granulitique du Rif (d'après Komprobst, 1974).** Échelle = 0,1 mm. Cristallisation d'orthopyroxène (opx) et de plagioclase (pl) aux dépens de l'association HP-HT grenat (gt) + quartz (q). Le grenat est un minéral **relique** s'il avait complètement disparu nous ne pourrions pas mettre en évidence ce phénomène.

Grenat coronitisé : Cas d'un métamorphisme rétrograde  
 $Fpl + Opx \leq Gr + Q$



Qtz

Gt

Kélyphyte

# V. MÉTAMORPHISME ET HISTOIRE GÉODYNAMIQUE

## V.1 MÉTAMORPHISME ET SUBDUCTION

## V.2 MÉTAMORPHISME ET OBDUCTION

V.2.1 Les données cartographiques et pétrologiques

V.2.2 Le chemin P-T-t et son interprétation géodynamique

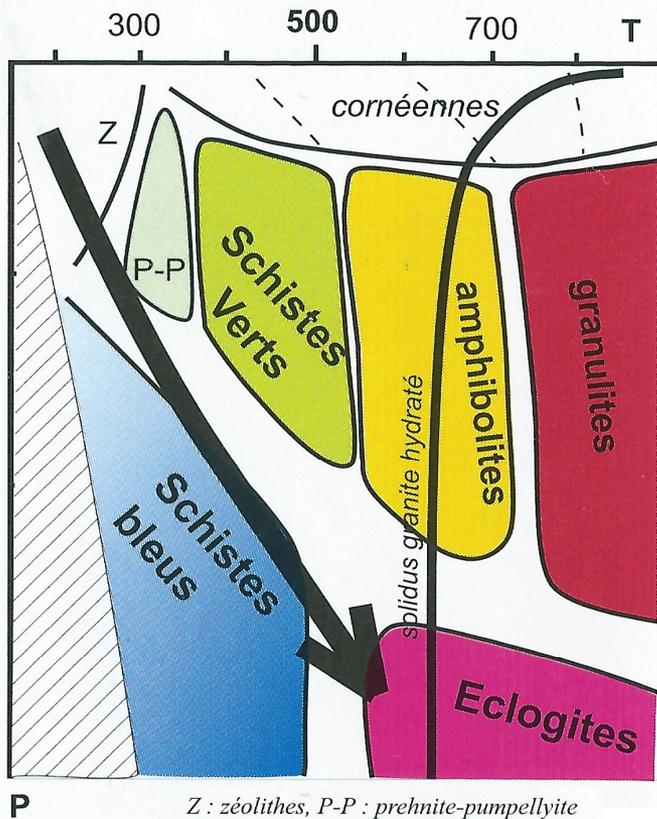
## V.3 MÉTAMORPHISME ET COLLISION

## V.4 LE MÉTAMORPHISME DE CONTACT

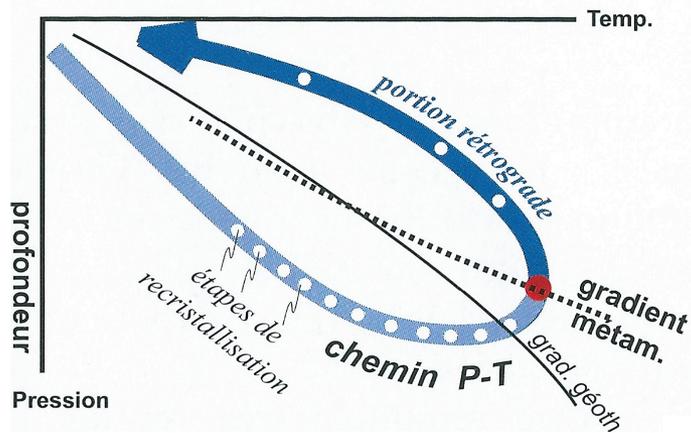
V.4.1 Etude d'un exemple : l'auréole du massif de Ballachulish

V.4.2 Modélisation du métamorphisme de contact

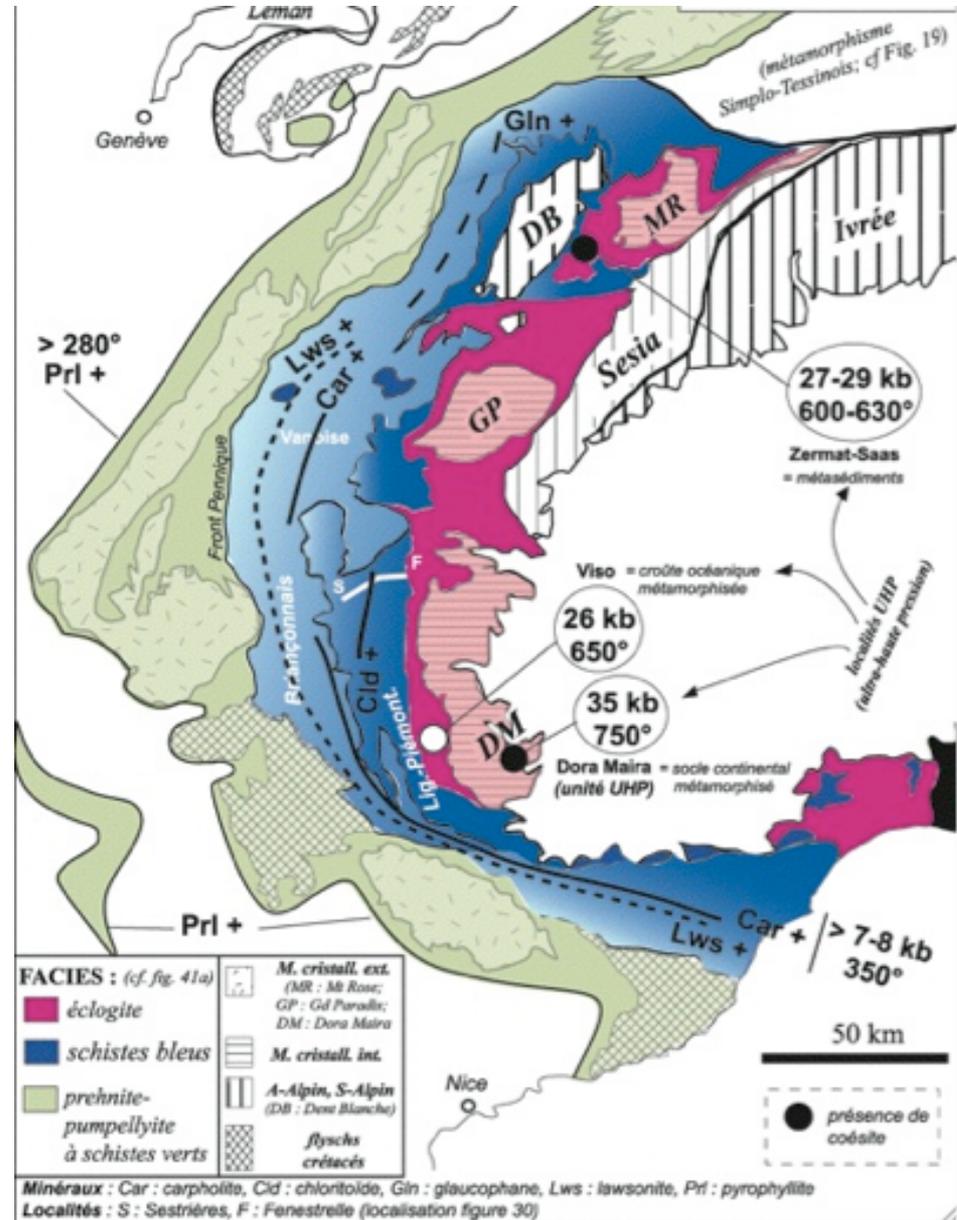
V.4.2 Mise en place dynamique d'une intrusion



Z : zéolithes, P-P : prehnite-pumpellyite



Metam 26 Diagramme pétrogénétique, chemin PTt et faciès métamorphiques enregistrés dans les Alpes occidentales



**FACIES :** (cf. fig. 41a)

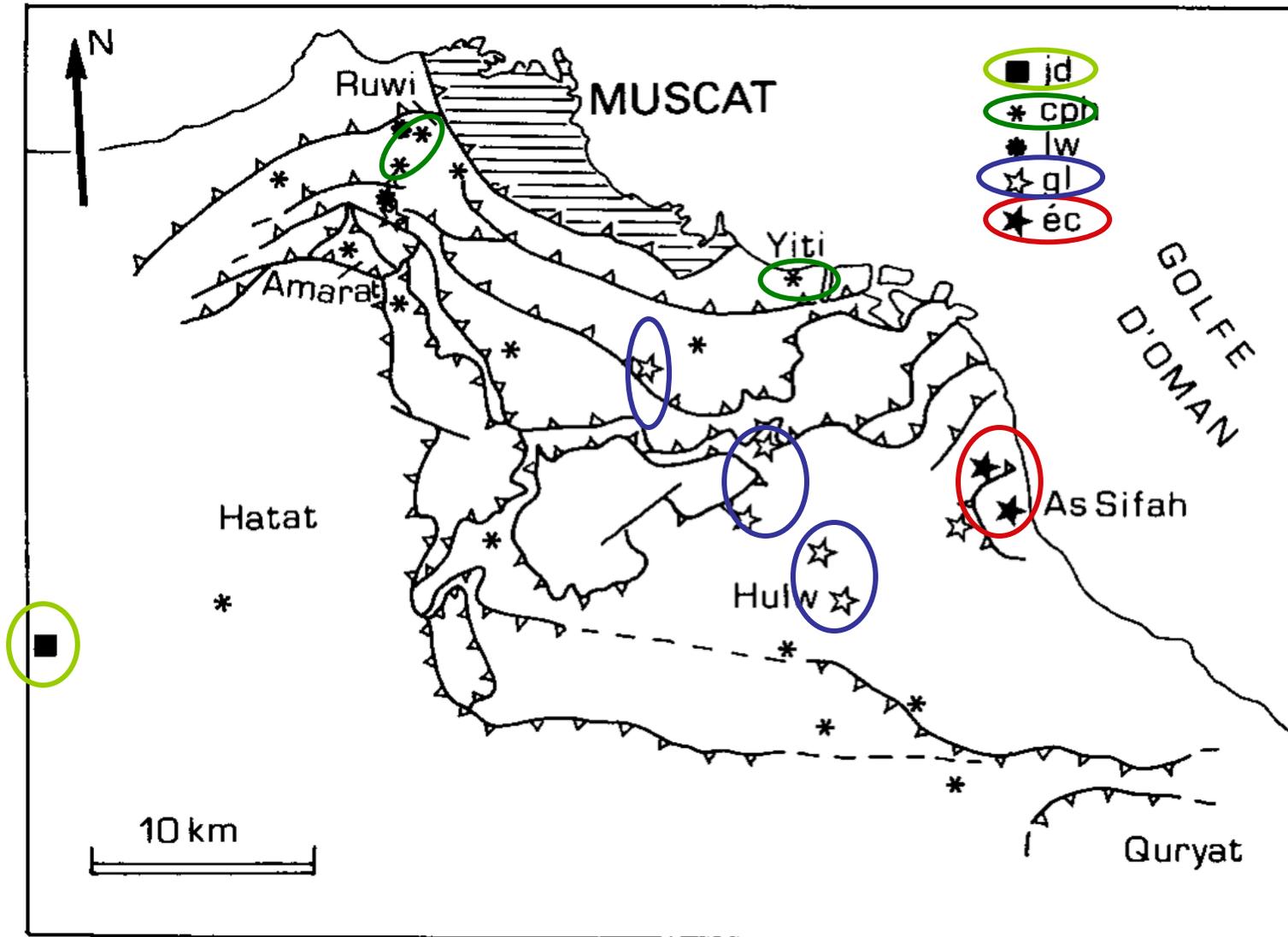
	écolite		M. cristall. ext. (MR : Mt Rose; GP : Gd Paradis; DM : Dora Maira)
	schistes bleus		M. cristall. inc.
	prehnite-pumpellyite à schistes verts		A-Alpin, S-Alpin (DB : Dora Blanche)
			flyschs crétacés

Minéraux : Car : carpholite, Cld : chloritoïde, Gln : glaucophane, Lws : lawsonite, Prl : pyrophyllite  
Localités : S : Sestrières, F : Fenestrelle (localisation figure 30)

## Métamorphisme et obduction: exemple de l'Oman



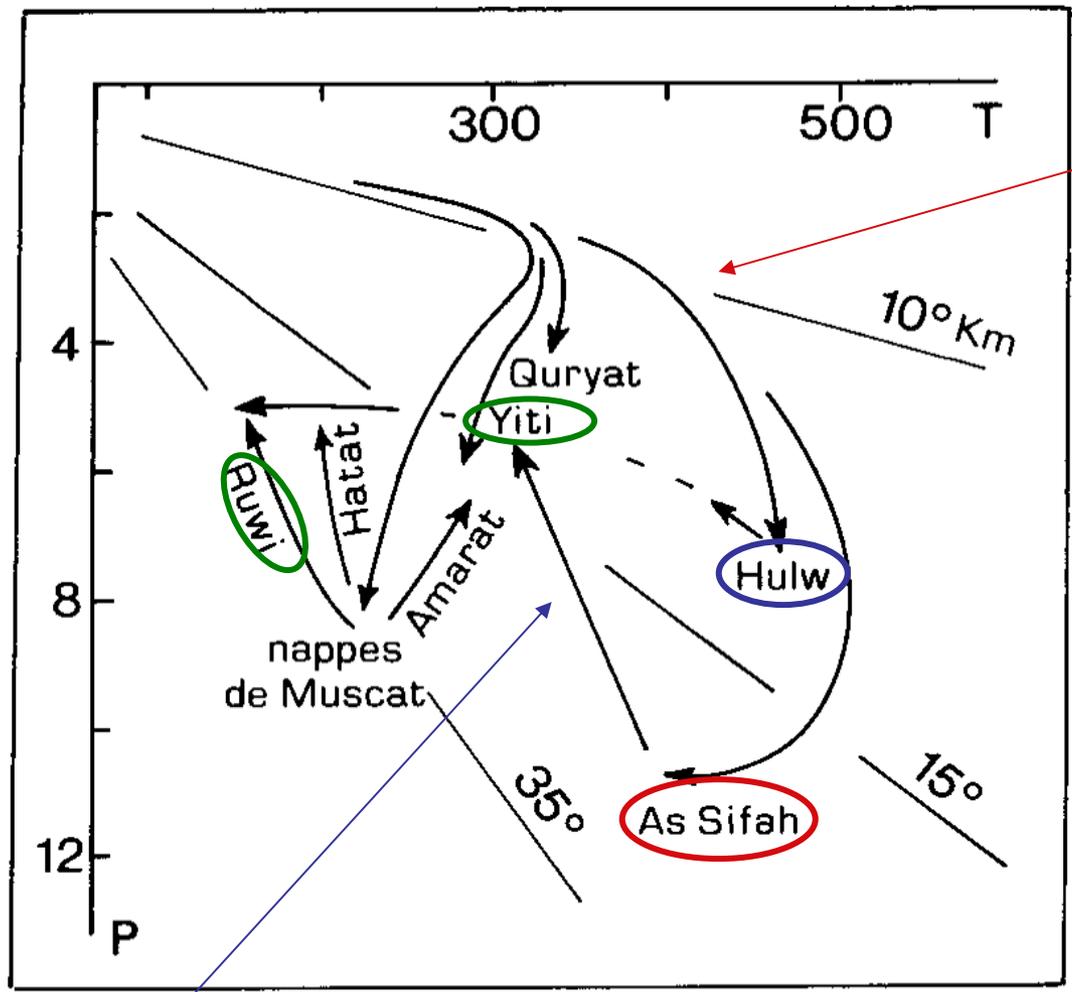
# Métam 27 : Cartographie des unités tectoniques imbriquées sous la nappe ophiolitique de Muscat (Oman)



Hachuré : nappe ophiolitique de Muscat.

Metam 28 Évolution prograde et rétrograde des unités continentales (métapélitiques et metabasaltiques) situées sous le chevauchement de la nappe ophiolitique de Muscat (Oman)

Exhumation  
=  
arrêt de la tectonique tangentielle + rééquilibrage isostatique



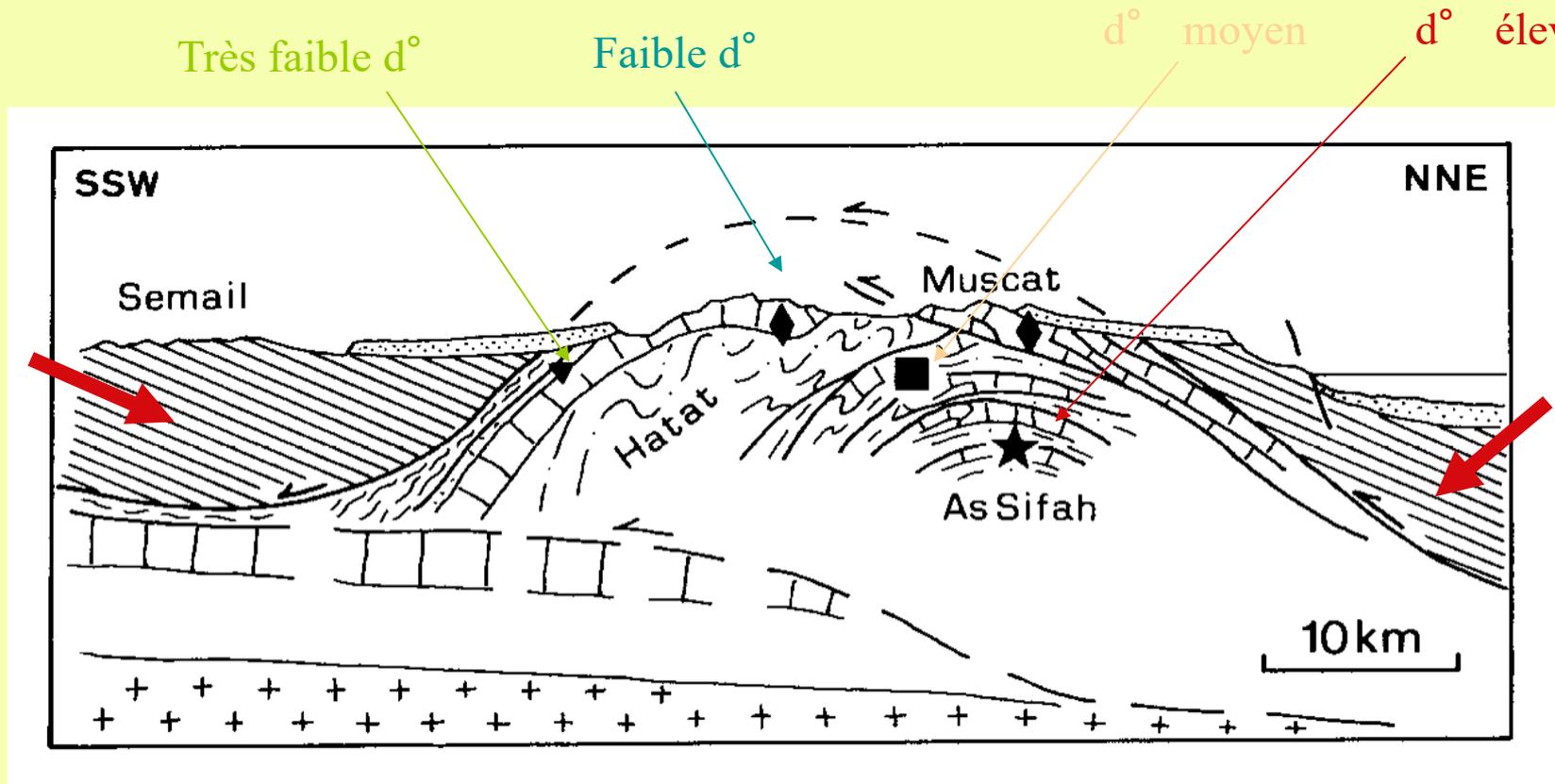
Gradient prograde HT-BP

Chevauchement de LO à HT

Gradient rétrograde HP-BT

Dissipation de chaleur par conduction + augmentation de la charge suite à l'empilement des unités chevauchantes

Métam 29 Coupe schématique des unités continentales situées sous les nappes ophiolitiques d'Oman (hachuré : à droite nappe de Muscat : à gauche nappe de Semail)

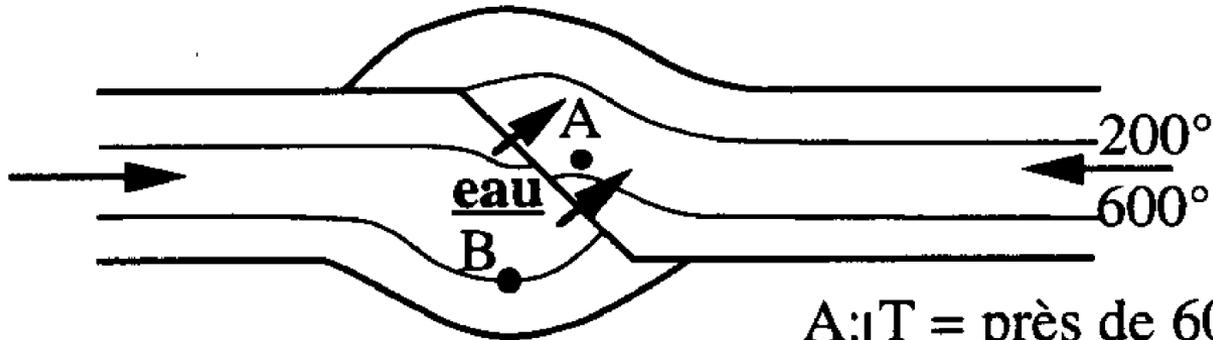


Paragénèses les plus précoces: HT-BP. Obduction de LO jeune donc chaude sur la marge arabe

Evolution dans le temps vers HP-BT; raccourcissement → chevauchements → P augmente et T diminue (dissipat° par conduct° de la chaleur)

Décompression liée à l'exhumation à BT: arrêt de la tectonique tangentielle + rééquilibrage isostatique à BT

Metam 30 Le métamorphisme associé à la collision  
Les points A (CC sup) et B (CC inf) sont sur l'isotherme 600° C

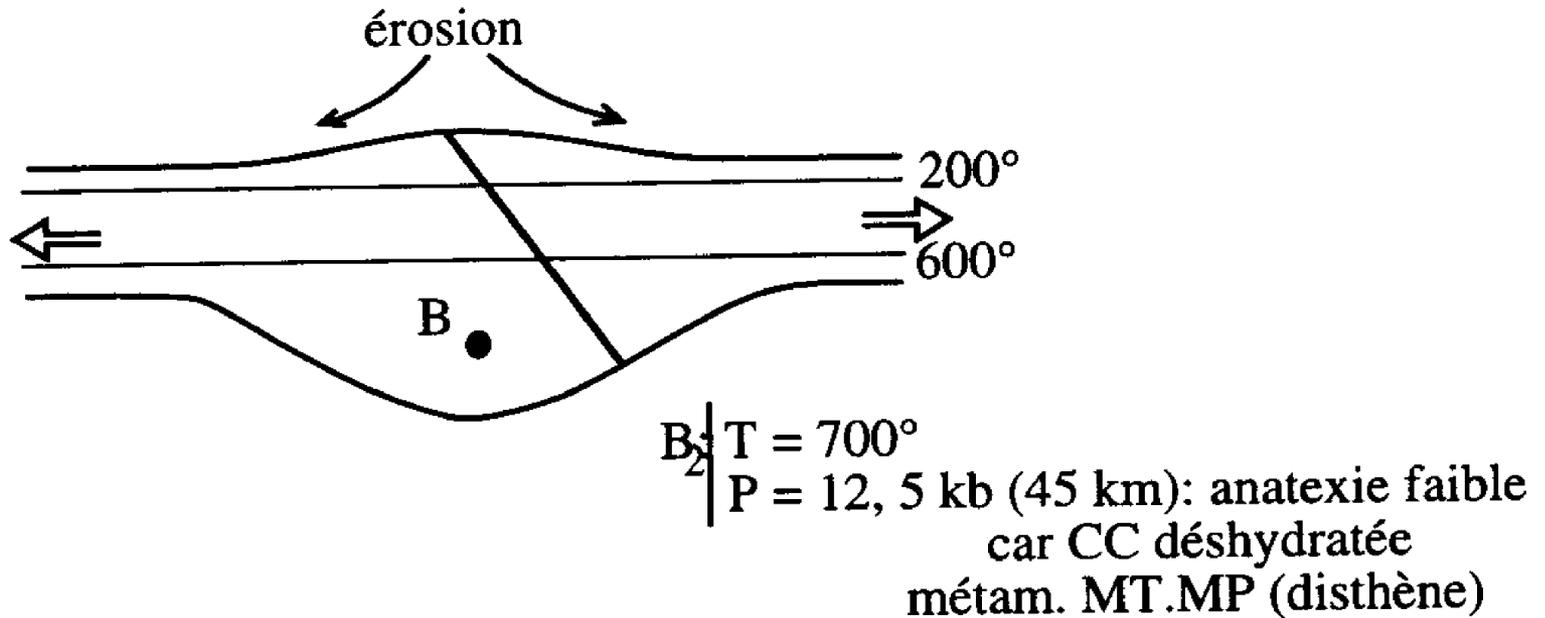


A: | T = près de 600°  
| P = de 5 à 10 kb

B: | T = 600°  
| P = 13,5 kb (50 km):  
métam. faciès éclogite

1<sup>er</sup> temps: collision: superposition de 2 CC → pression lithostatique élevée → CC inf se déshydrate → métamorphisme en A et anatexie (H<sub>2</sub>O abaisse T de FP).  
B déshydraté ne fond pas mais subit un métamorphisme HP-MT (faciès éclogite possible).

Metam 30 Le métamorphisme associé à la collision  
Les points A (CC sup) et B (CC inf) sont sur l'isotherme 600° C

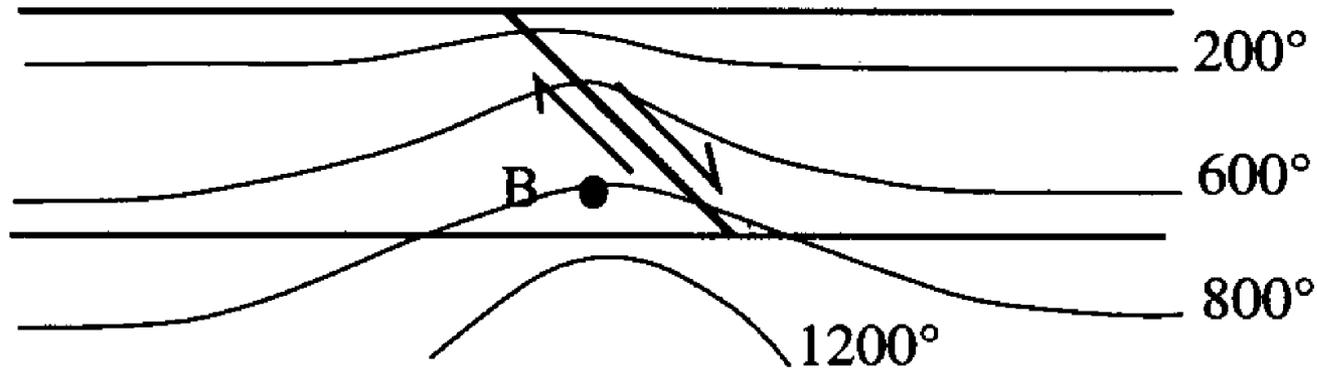


**2<sup>e</sup> temps : début de détente post-collisionnelle:**

Arrêt des contraintes compressives horizontales (= forces aux limites) → rééquilibrage isostatique et thermique, plus rapide → B, toujours en profondeur à  $T > 600^\circ$  (env 45 km).

CC déshydratée donc anatexie difficile (voire impossible) → métamorphisme MP-MT (apparition possible du disthène).

Metam 30 Le métamorphisme associé à la collision  
Les points A (CC sup) et B (CC inf) sont sur l'isotherme 600° C



B:  $\begin{cases} T = 800^\circ \\ P = 7,5 \text{ kb (25 km)} \end{cases}$  : anatexie importante  
et métam. HT.BP (And-Sil)

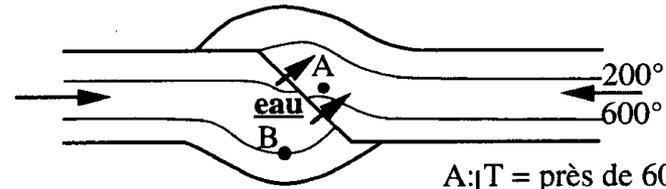
3<sup>e</sup> temps : fin de la détente post-collisionnelle : rééquilibrage isostatique → isothermes se rapprochent de la surface, B à 25 km env  $T = 800^\circ$  → métamorphisme BP-HT (And et sill).

Dans ces conditions, anatexie importante → nbrx granites d'anatexie.

Métamorphisme BP-HT = détente post-collisionnelle = tectonique d'extension.

Metam 30 Le métamorphisme associé à la collision  
 Les points A (CC sup) et B (CC inf) sont sur l'isotherme 600° C

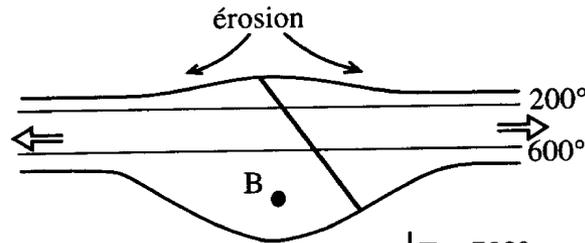
**1<sup>er</sup> temps: collision: superposition de 2 CC →**  
 pression lithostatique élevée → la CC inf se déshydrate → métamorphisme en A qui atteint l'anatexie (H<sub>2</sub>O abaisse T de FP).  
 B déshydraté ne fond pas mais subit un métamorphisme HP-MT (faciès éclogite possible).



A:  $\left. \begin{array}{l} T = \text{près de } 600^\circ \\ P = \text{de } 5 \text{ à } 10 \text{ kb} \end{array} \right\}$

B:  $\left. \begin{array}{l} T = 600^\circ \\ P = 13,5 \text{ kb (50 km):} \\ \text{métam. faciès éclogite} \end{array} \right\}$

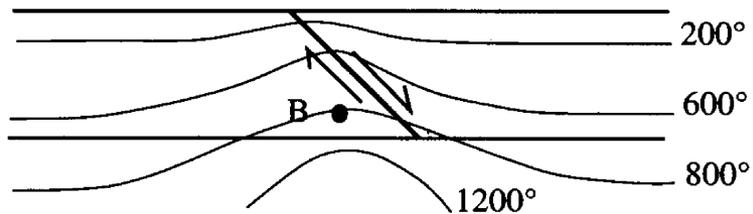
**2<sup>e</sup> temps : début de détente post-collisionnelle:**  
 Arrêt des contraintes compressives horizontales → rééquilibrage isostatique et thermique, plus rapide → B, toujours en profondeur, se trouve porté à une température supérieure à 600° (environ 45 km).  
 CC déshydratée donc anatexie difficile (voire impossible) → métamorphisme MP-MT (apparition possible du disthène).



B:  $\left. \begin{array}{l} T = 700^\circ \\ P = 12,5 \text{ kb (45 km): anatexie faible} \\ \text{car CC déshydratée} \\ \text{métam. MT.MP (disthène)} \end{array} \right\}$

**3<sup>e</sup> temps : fin de la détente post-collisionnelle:** Au cours du rééquilibrage isostatique, les isothermes se rapprochent de la surface, B se situe alors à la profondeur de 25 km environ, T° C 800° → métamorphisme BP-HT (domaines de l'andalousite, de la sillimanite).

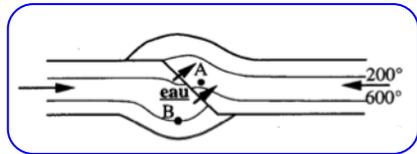
Dans ces conditions l'anatexie est importante, les granites d'anatexie ainsi formés sont nombreux. Le métamorphisme BP-HT caractérise la détente post-collisionnelle. Il caractérise aussi une tectonique d'extension.



B:  $\left. \begin{array}{l} T = 800^\circ \\ P = 7,5 \text{ kb (25 km): anatexie importante} \\ \text{et métam. HT.BP (And-Sil)} \end{array} \right\}$

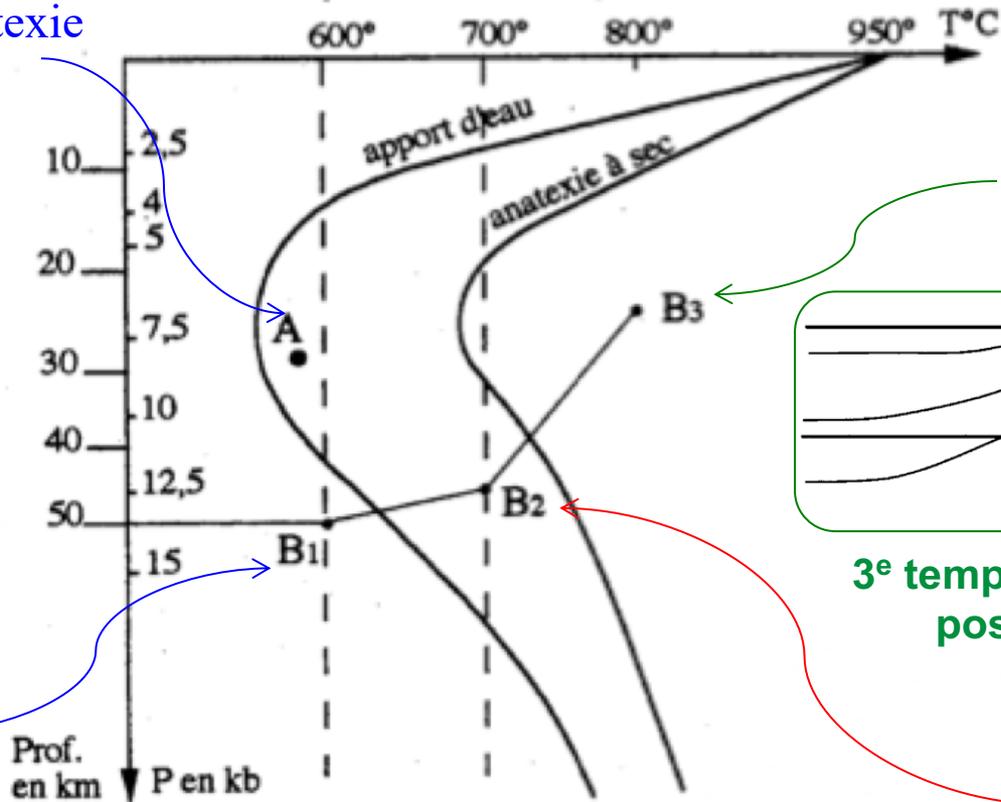
Évolution de la température et pression subies par les points A et B au cours de la collision puis de la détente (positions B1, B2, B3)

Anatexie



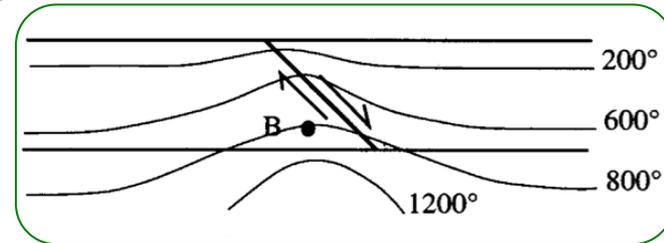
1<sup>er</sup> temps: collision:  
superposition de 2  
CC

HP-BT



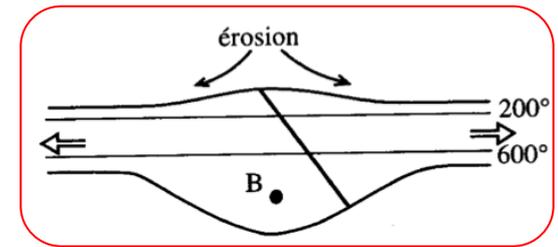
Les Positions du point B replacées sur ce diagramme au cours du rééquilibrage de la croûte continentale

BP-HT  
Anatexie

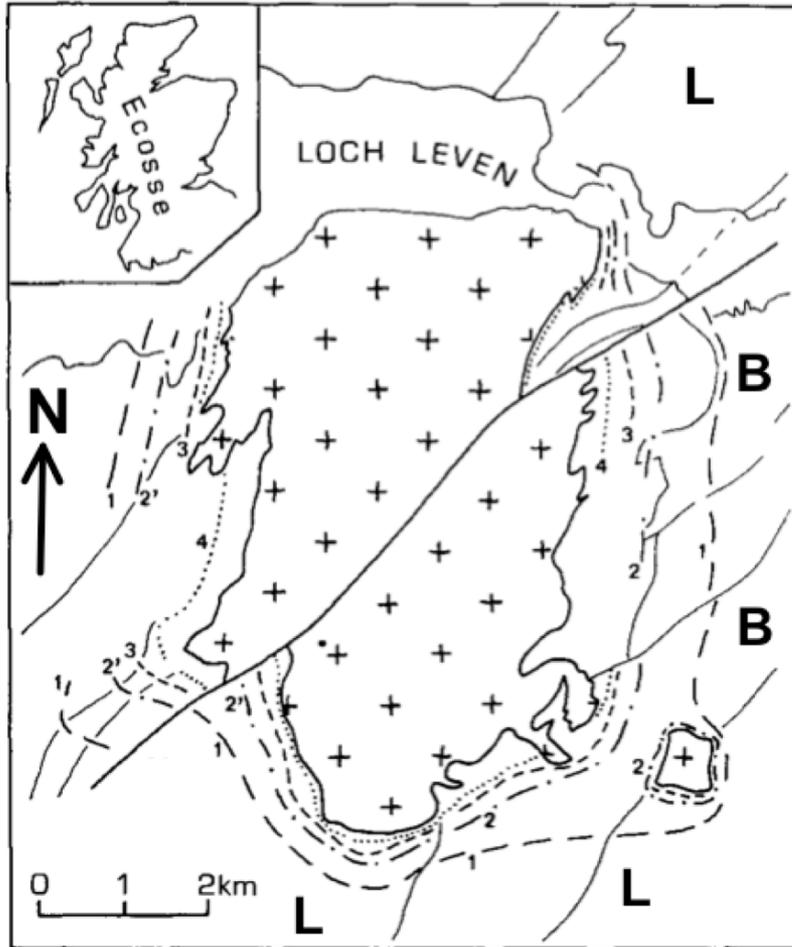


3<sup>e</sup> temps : fin de la détente  
post-collisionnelle

MP-MT



2<sup>e</sup> temps : début de détente  
post-collisionnelle



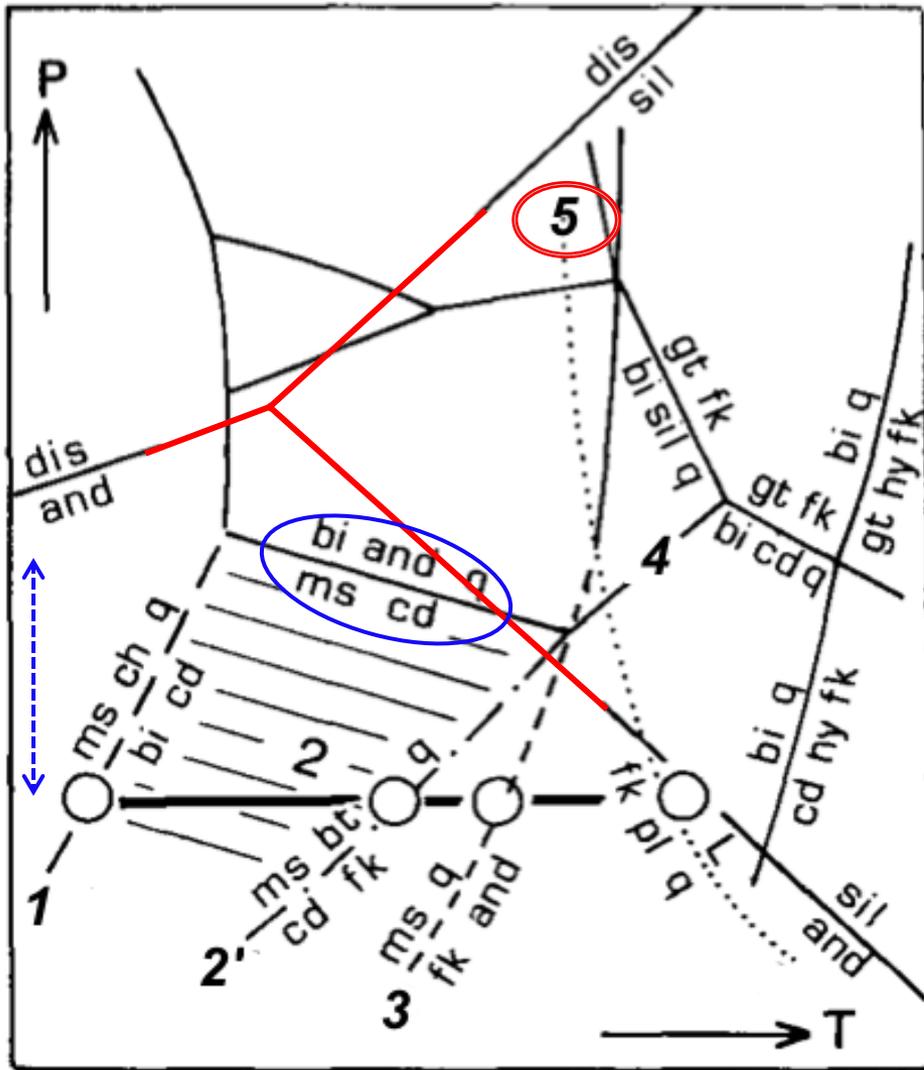
**Metam 31a : Exemple de métamorphisme de contact.  
L'auréole thermique du batholite granodioritique de  
Ballachulish (Écosse).**

Le massif de Ballachulish, sur la côte ouest de l'Écosse, est une intrusion complexe de roches granitoïdes variées (croix) mise en place il y a 425 Ma (Dévonien), à une profondeur correspondant à une pression de 0,3 GPa. Les granitoïdes ont été injectés dans une série sédimentaire quartzopélitique.

Six isogrades principaux (dont cinq sont représentés) ont été mis en évidence sur la base des réactions suivantes :

- 1)  $Ms + Chl + Qtz = Bt + Crd + V$
- 2)  $Ms + Crd = Bt + And + Qtz + V$
- 2')  $Ms + Bt + Qtz = Crd + Kfs + V$
- 3)  $Ms + Qtz = Kfs + And + V$
- 4)  $Bt + And + Qtz = Crd + Kfs + V$
- 5)  $Kfs + Qtz (\pm Bt, Pl) = liq (\pm \text{silicate d'alumine} \pm Crd)$ .

**Les réactions 2 et 2' ont fonctionné dans deux formations différentes (schistes de Leven (L) et pélites de Ballachulish (B), respectivement) qui n'ont pas la même composition chimique et, sans doute, pas la même composition de la phase fluide. Les traits fins dans l'encaissant marquent les limites lithologiques ; figuré pointillé : quartzite.**



- 1)  $Ms + Chl + Qtz = Bt + Crd + V$
- 2)  $Ms + Crd = Bt + And + Qtz + V$
- 2')  $Ms + Bt + Qtz = Crd + Kfs + V$
- 3)  $Ms + Qtz = Kfs + And + V$
- 4)  $Bt + And + Qtz = Crd + Kfs + V$
- 5)  $Kfs + Qtz (\pm Bt, Pl) = \text{liquide} (\pm \text{silicate d'alumine} \pm Crd)$

**Metam 31b : Représentation des conditions de recristallisation dans l'auréole, dans le système KMAH (K<sub>2</sub>O-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O).**

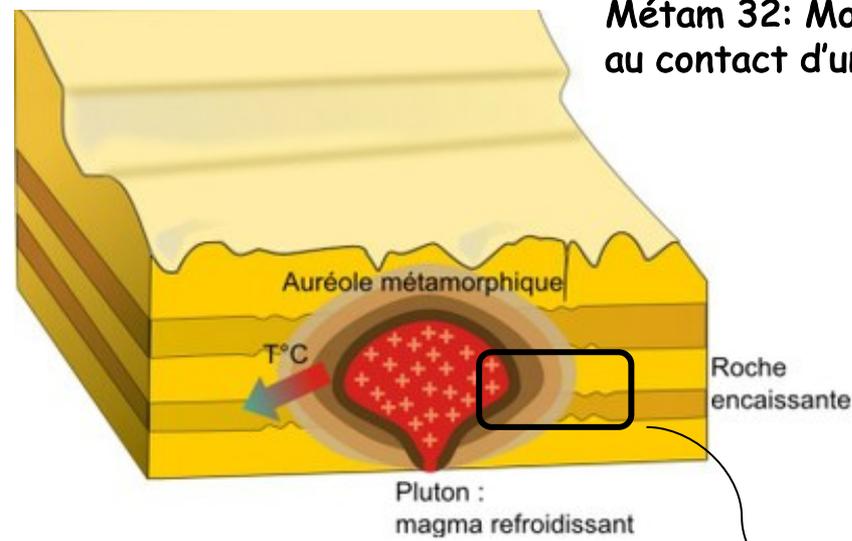
La disparition de la muscovite (réaction 3) et l'apparition du liquide (L dans la réaction 5) dans le champ de stabilité de l'andalousite indiquent des conditions de mise en place à faible pression (< 0,4 GPa, c'est-à-dire à moins de 12 km de profondeur).

Les successions des réactions 1-2-3-4 ou 1-2'-3-4 pourraient s'expliquer, dans les mêmes conditions de pression, par des concentrations en fer (XFe) plus élevées dans les schistes que dans les pélites : **le domaine hachuré représente le glissement divariant de la réaction 2 vers les basses pressions, en fonction de l'augmentation de XFe.**

Le champ divariant Fe-Mg de la réaction 2 montre que les roches les plus ferrifères franchissent cette réaction tandis que les roches les plus magnésiennes franchissent la réaction 2'.

Les deux réactions (2 et 2') qui se réalisent dans des conditions de température similaire, sont impliquées l'une ou l'autre en différents lieux de l'auréole. La réaction 2 se place à des pressions supérieures à celles de la réaction 2'.

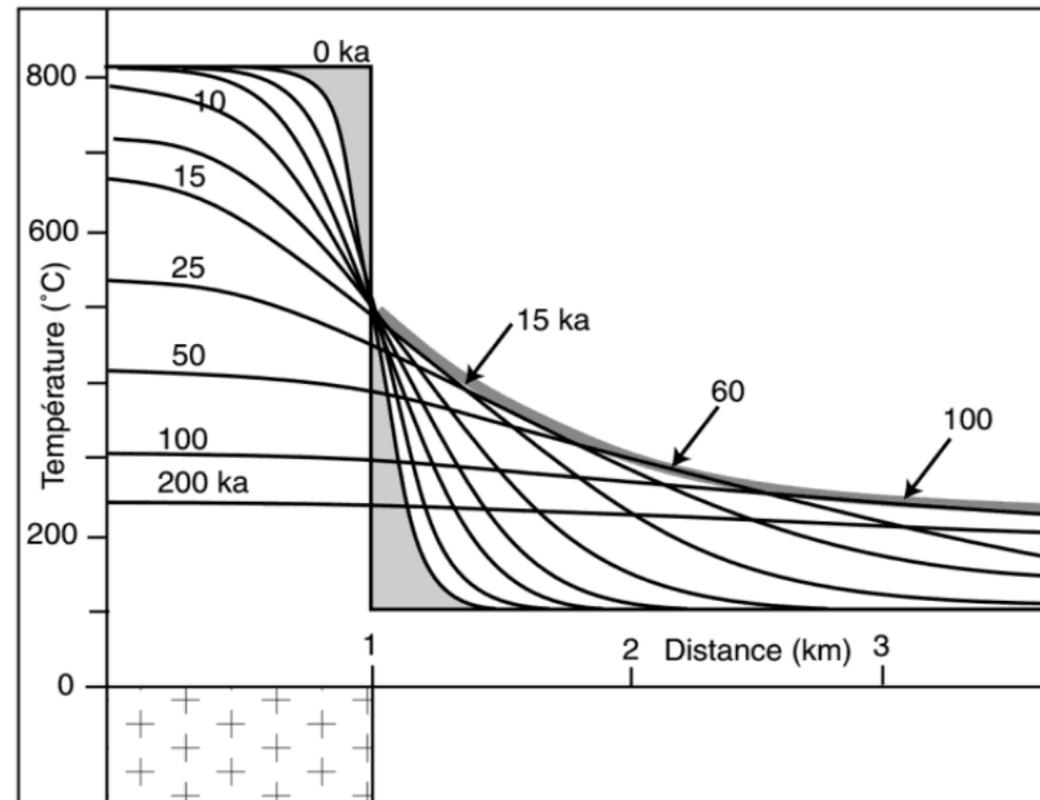
## Métam 32: Modélisation numérique à 1 dimension de l'évolution thermique au contact d'une lame granitique de 2 km d'épaisseur (in Nicollet, 2010)



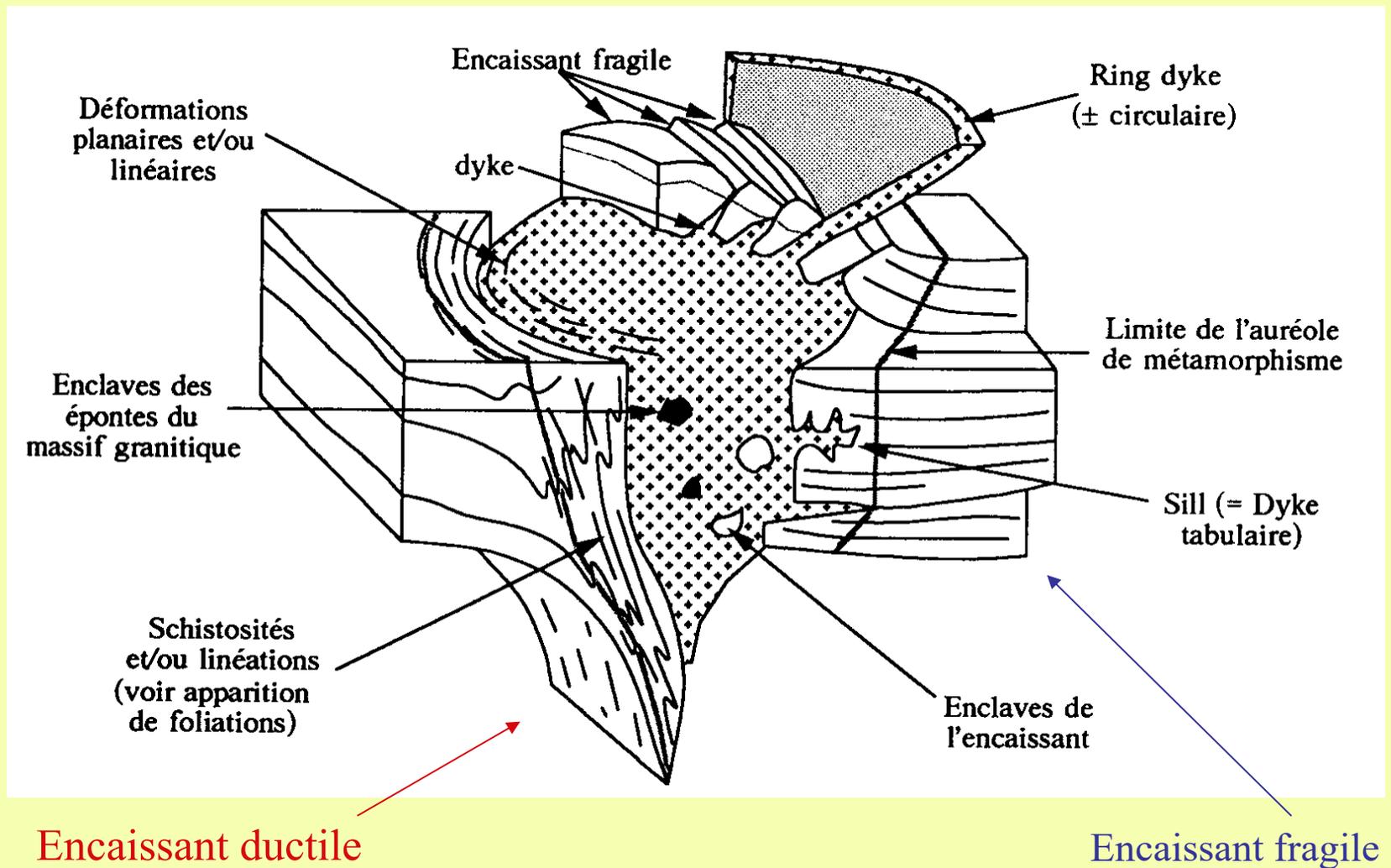
Refroidissement rapide en périphérie de la roche magmatique  
Encaissant : augmentation de température localisée au contact puis se déplace vers l'extérieur → pics thermiques atteints à # moment au sein de l'auréole. C'est ce que représente la courbe Tmax.

Les 2 champs gris montrent que le champ de réchauffement de l'encaissant > champ de refroidissement dans l'intrusion. La différence reflète la chaleur latente de cristallisation du magma. Cette chaleur libérée dans l'encaissant est transformée en augmentation de température de celui-ci → # entre les 2 surfaces.

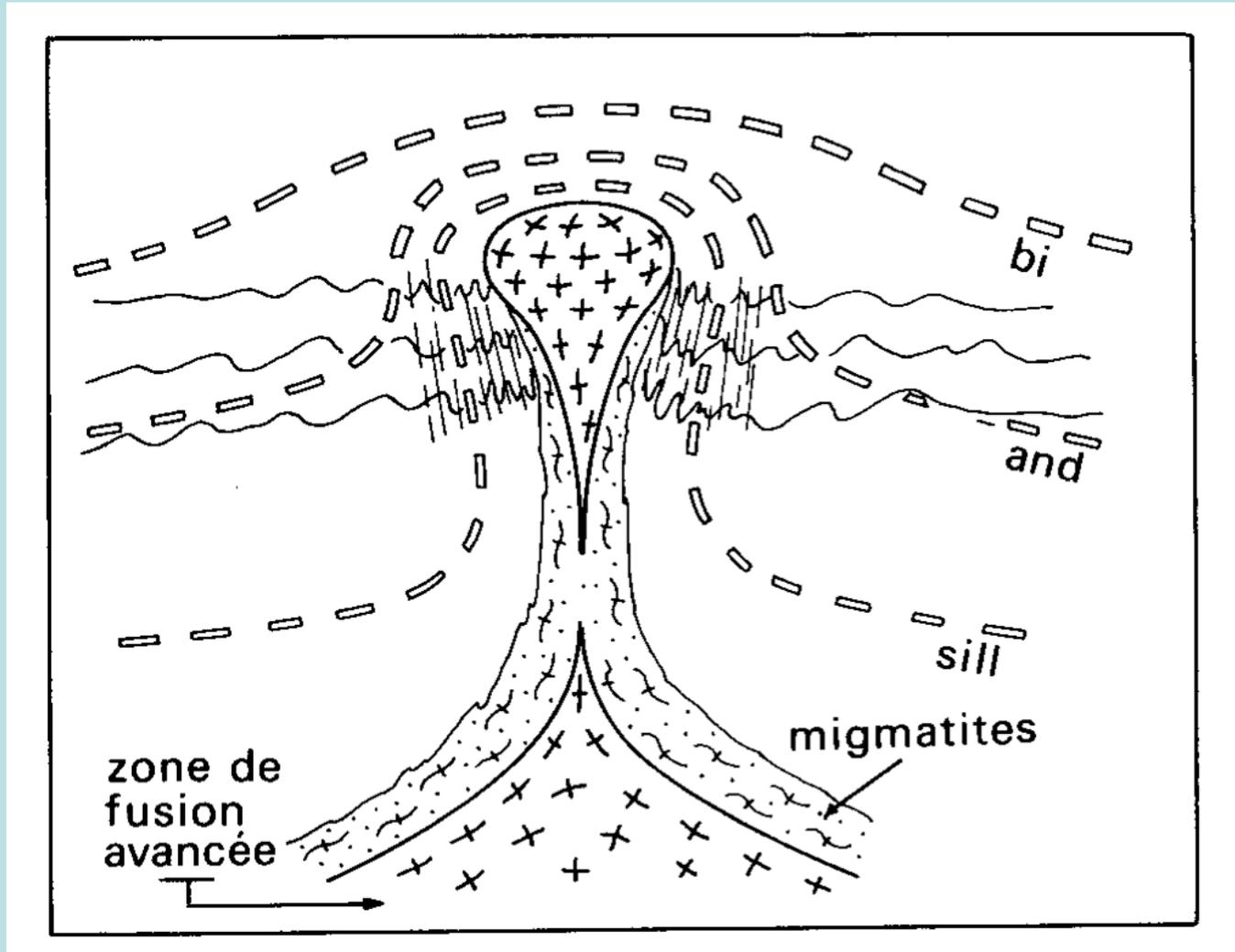
L'intrusion est mise en place à  $825^{\circ}\text{C}$  dans un encaissant à  $100^{\circ}\text{C}$ .  
Distance mesurée depuis le milieu de la lame: bord gauche = centre de l'intrusion.  
Temps indiqué en kilo-année = 1000 ans.  
Les 2 champs gris matérialisent l'échange de chaleur par refroidissement/réchauffement.  
La courbe grisée enveloppe les Tmax atteintes au cours du temps en fonction de la distance au contact: elle matérialisent les conditions que les roches sont susceptibles d'enregistrer pétrographiquement avec leur paragenèse



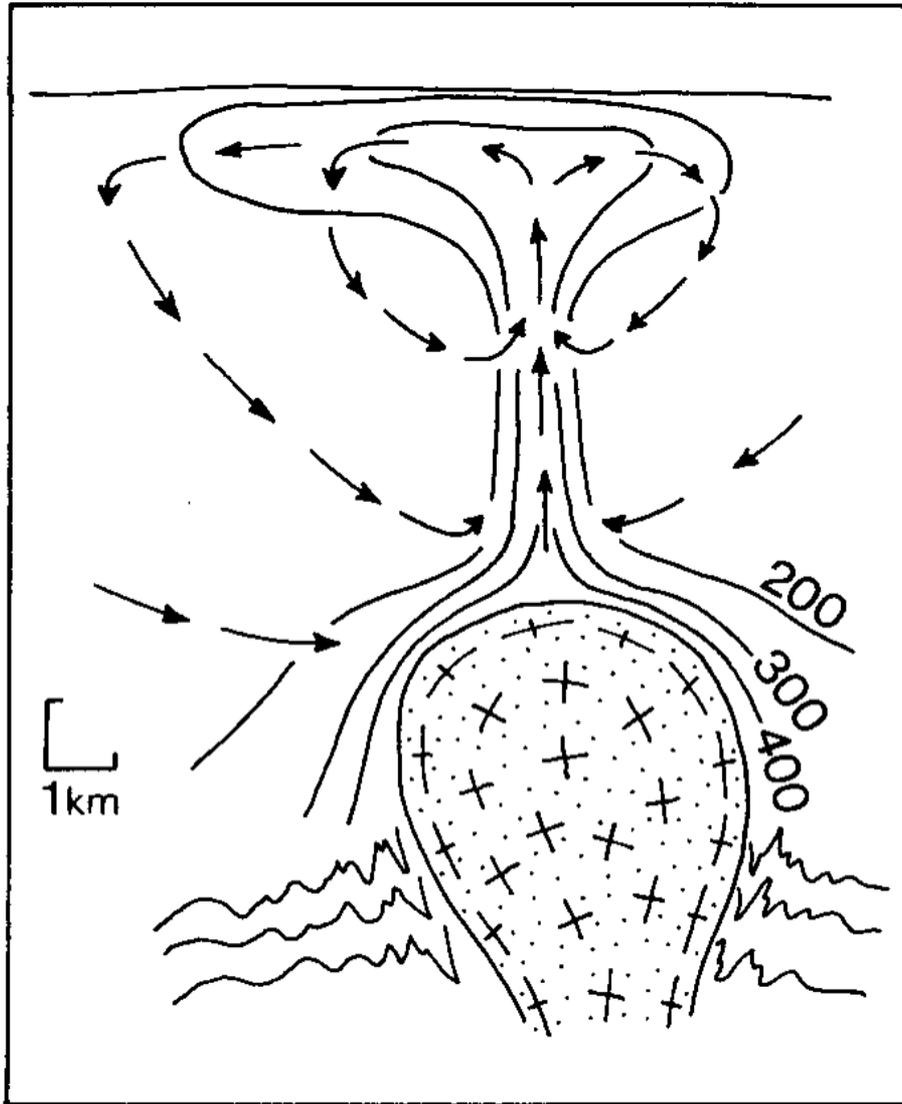
## Metam 33: Mise en place d'une intrusion



Metam 34 Représentation schématique de la mise en place dynamique d'un pluton (dans l'hypothèse diapirique) dans les niveaux supérieurs de la croûte continentale (d'après Flood et Vernon, 1978).



Représentation schématique d'un système hydrothermal convectif développé au toit d'une intrusion (croix) (d'après Fyfe et Henley, 1973).

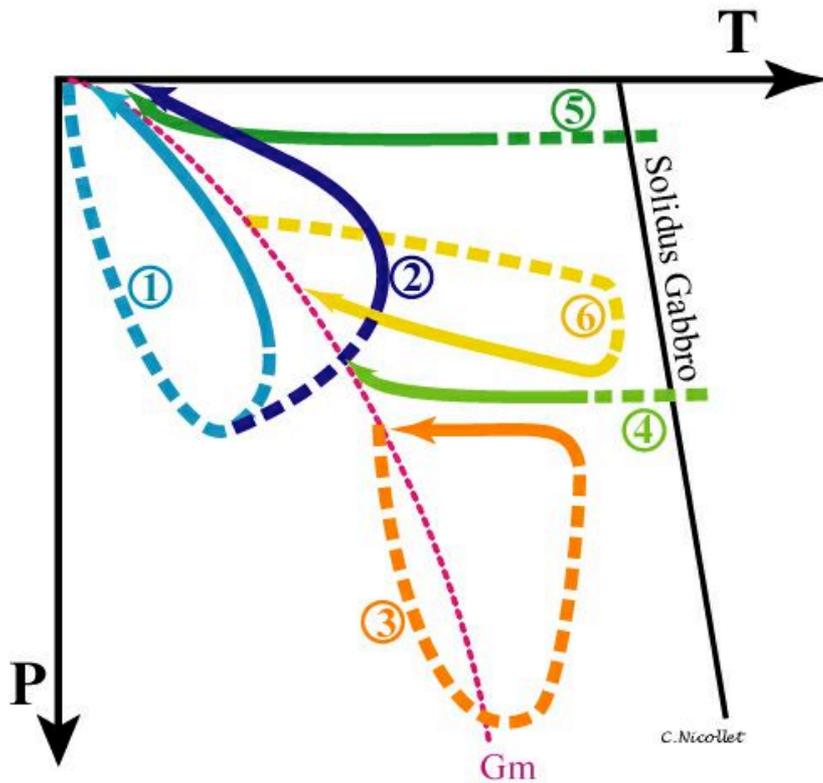


Fugacité élevée des fluides

Panache hydrothermal au-dessus de l'intrusion.

Dissolution des silicates par les fluides à HT

Précipitation des cations en solution à BT le long des filons



**Metam 35: Quelques Exemples de trajectoires P-T-t produites dans différents contextes géodynamiques.**

1 et 2 : roches au sommet de la croûte continentale chevauchée lors d'une collision continent - continent et remontant à des vitesses variables ( $v_1 > v_2$ ).

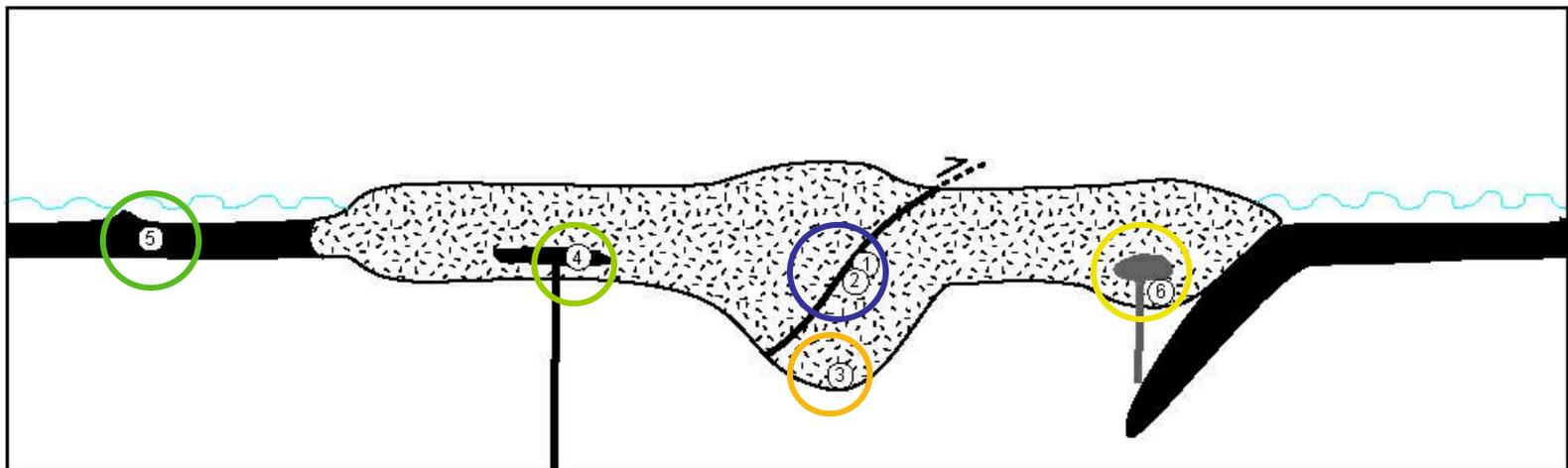
3: Roche à la base de cette même croûte.

4 : roche magmatique (basique) mise en place et refroidissant à la base d'une croûte continentale en extension ou sous un arc insulaire. Un nouvel événement orogénique est nécessaire pour ramener les roches 3 et 4 à la surface.

5 : gabbro mis en place et refroidissant dans la croûte océanique.

6 : épaissement accompagné d'intrusions magmatiques.

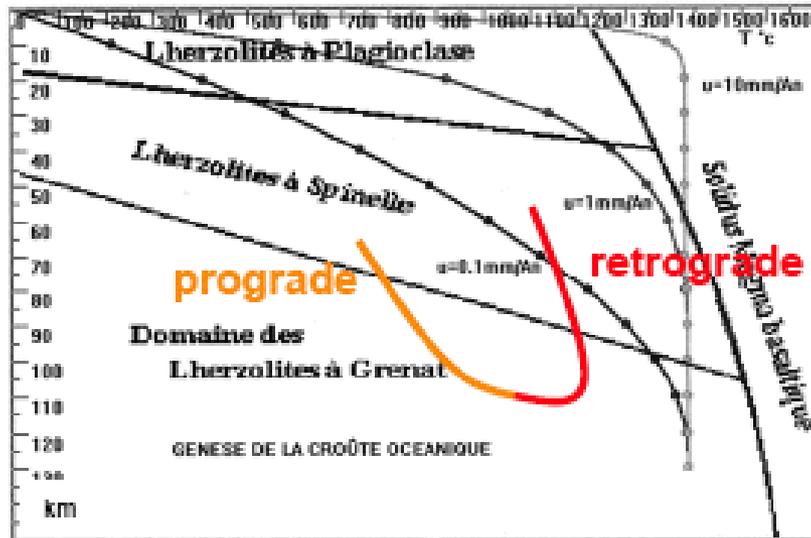
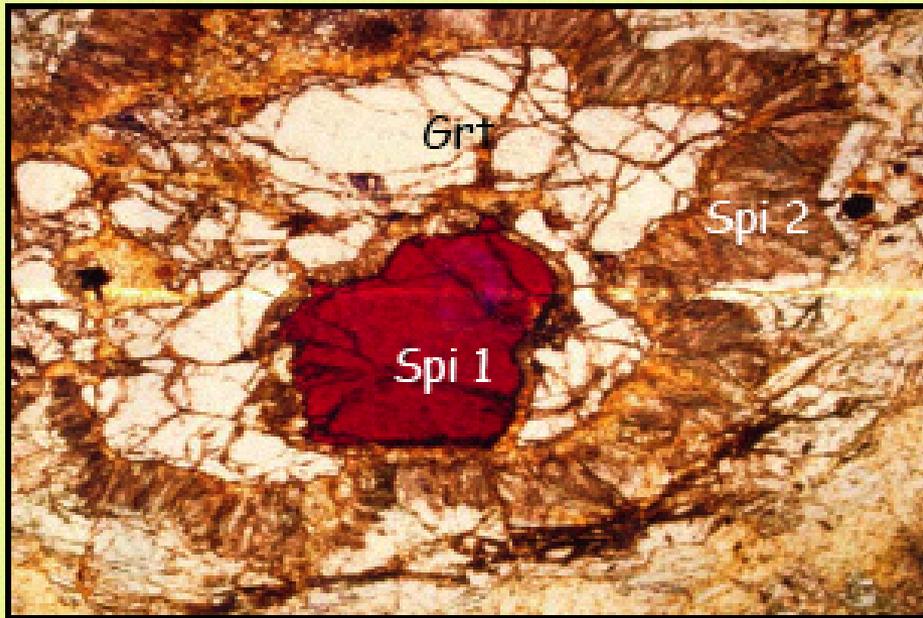
Gm : géotherme moyen..



# La démarche du géologue

1. Echantillonnage
2. Détermination des paragenèses
3. Connaissant les champs de stabilité des minéraux dans le diagramme P-T (diagramme pétrogénétique), il pourra estimer les conditions dans lesquelles se sont formées les roches contenant les assemblages

Il pourra ainsi définir le trajet prograde (augmentation de P et/ou T = enfouissement) et rétrograde (diminution de P et/ou T = exhumation)



## Cas (1) : altération hydrothermale :

*olivine + eau = serpentine + brucite.*

Autohydratation dans les dernières phases de cristallisation du magma basique ou ultrabasique lorsque la phase résiduelle du magma est enrichie en eau L'altération hydrothermale océanique a lieu au niveau de la dorsale par circulation d'eau de mer. Elle peut être continentale comme dans une nappe ophiolitique prise en "sandwich" entre deux éléments de croûte continentale, hydratée



Serpentinite



Antigorite (paillettes vertes) et chrysotile (fibres blanchâtres)

Pour chaque cliché, le trait représente 1 cm environ

## Cas (2) : métamorphisme de faible degré ou *Métasomatose*.

Réactions HT entre des eaux très magnésiennes (circulat° dans des dolomies) avec des roches riches en quartz (exple un granite).

*Quartz + eaux magnésiennes = silicate de magnésium hydraté.*

Ce genre de réaction fabrique la plupart du temps du talc [ $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ ] ou des serpentines [ $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ ],. On en trouve dans les PO, là où des failles mettent en contact des dolomies du Jurassique et des granitoïdes hercyniens: massif de l'Agly



Serpentinite



Antigorite (paillettes vertes) et chrysotile (fibres blanchâtres)

Pour chaque cliché, le trait représente 1 cm environ