

# ST G : Le métamorphisme, marqueur de la géodynamique interne



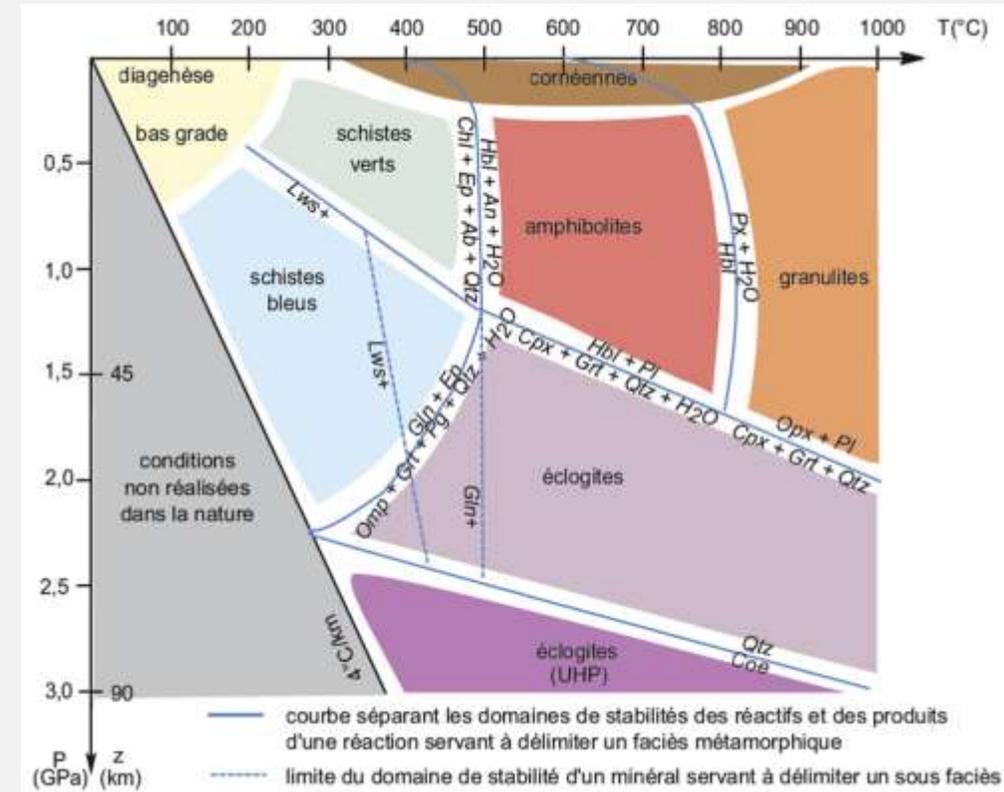
Photographie Pierre Thomas  
Echantillon ENS Lyon



Photographie Pierre Thomas

**Gneiss de la nappe de la Dent Blanche (Alpes italiennes)**

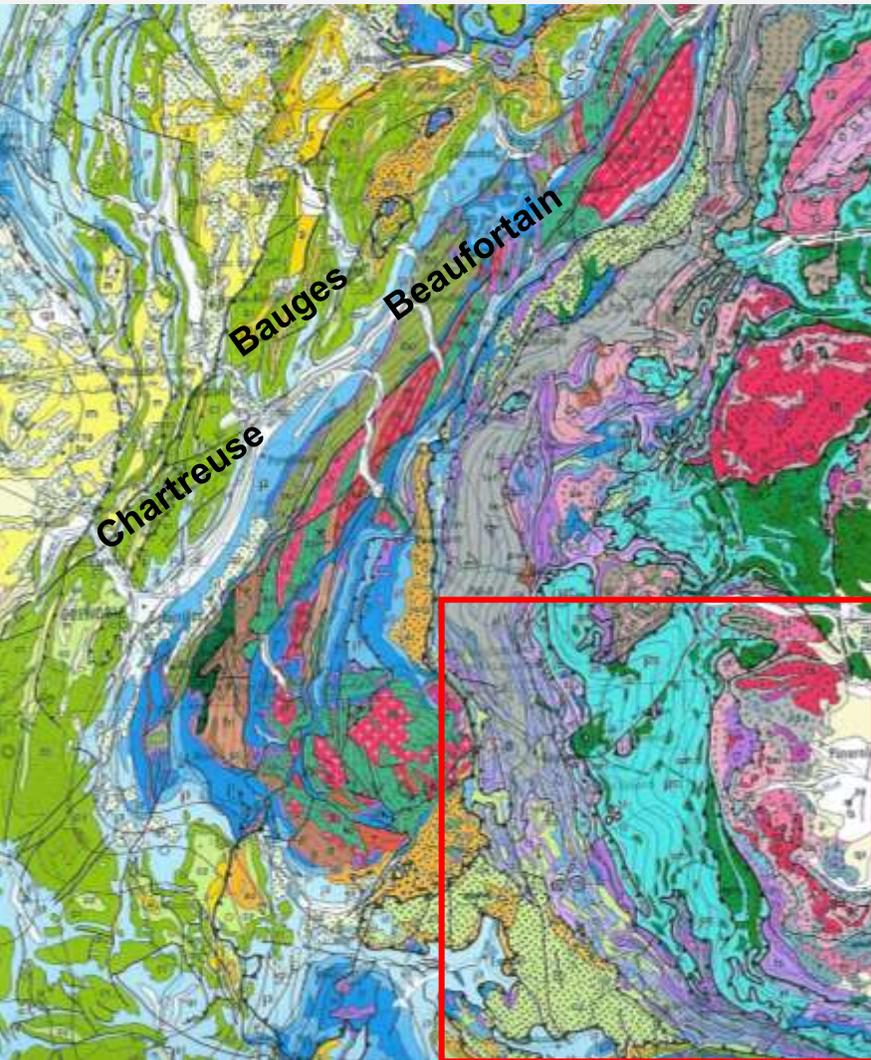
**Méta-basite éclogitique hercynienne de Loire Atlantique**



<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg56-2003-10-20.xml>

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg57-2003-10-27.xml>

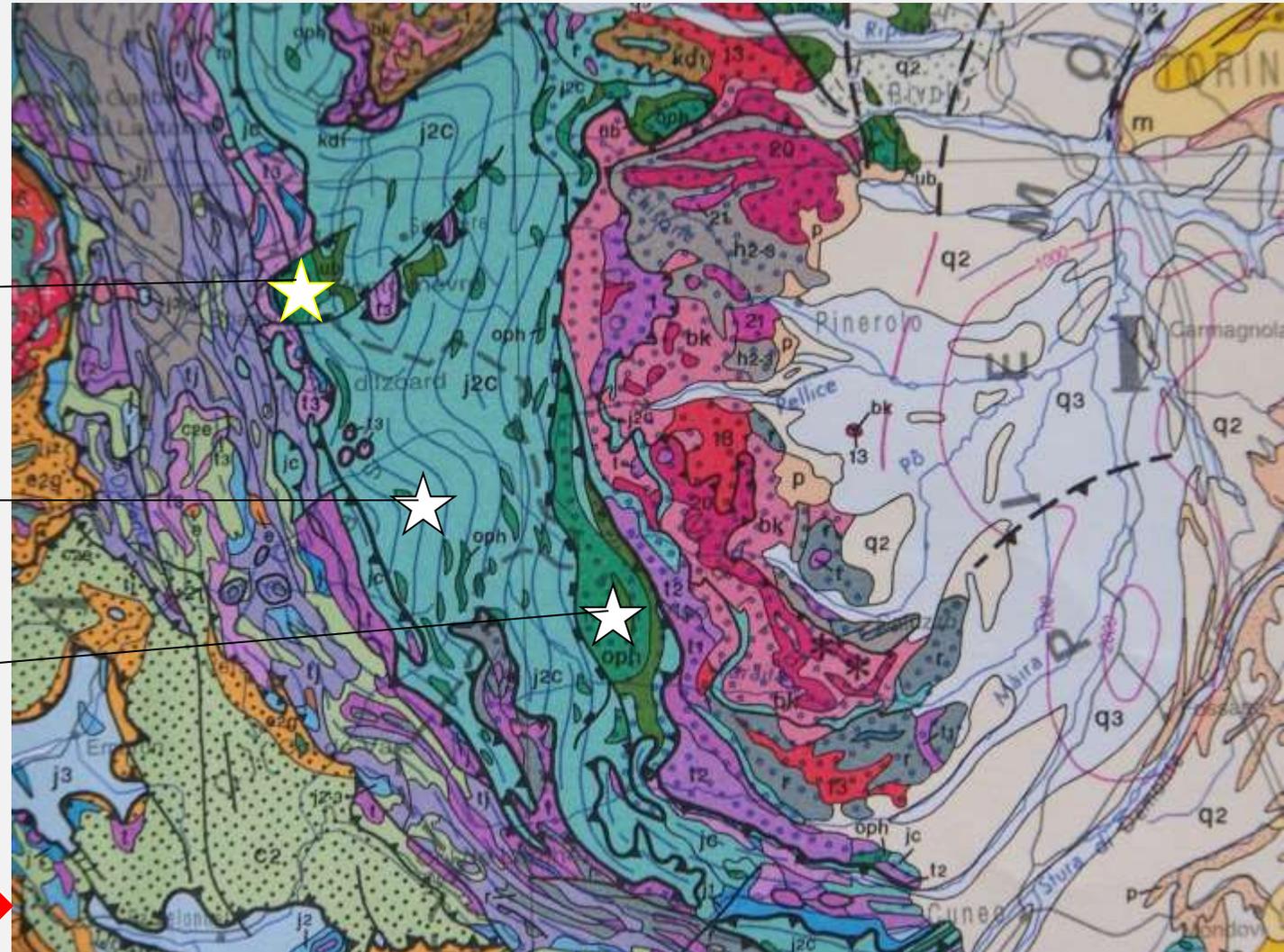
# Localisation de l'affleurement étudié



Chenaillet

Queyras

Viso



Extraits de la carte de France

# Observation d'une roche métamorphique à l'affleurement

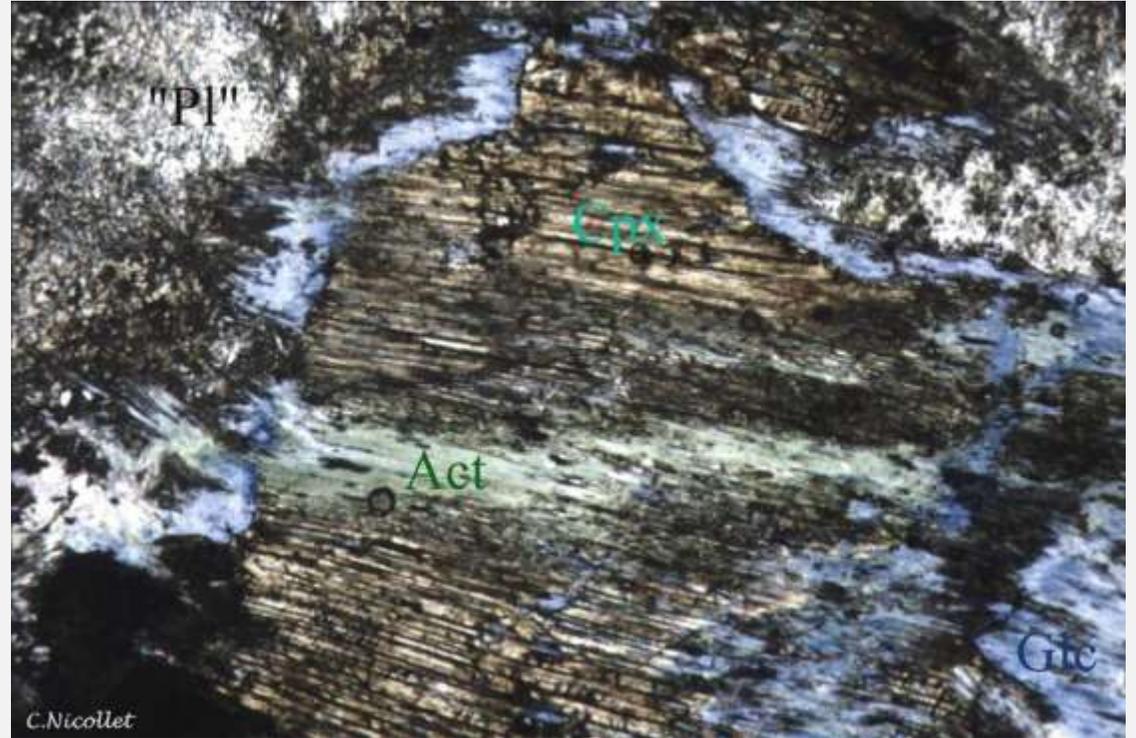


# Observations à la loupe et en lame mince

À la loupe



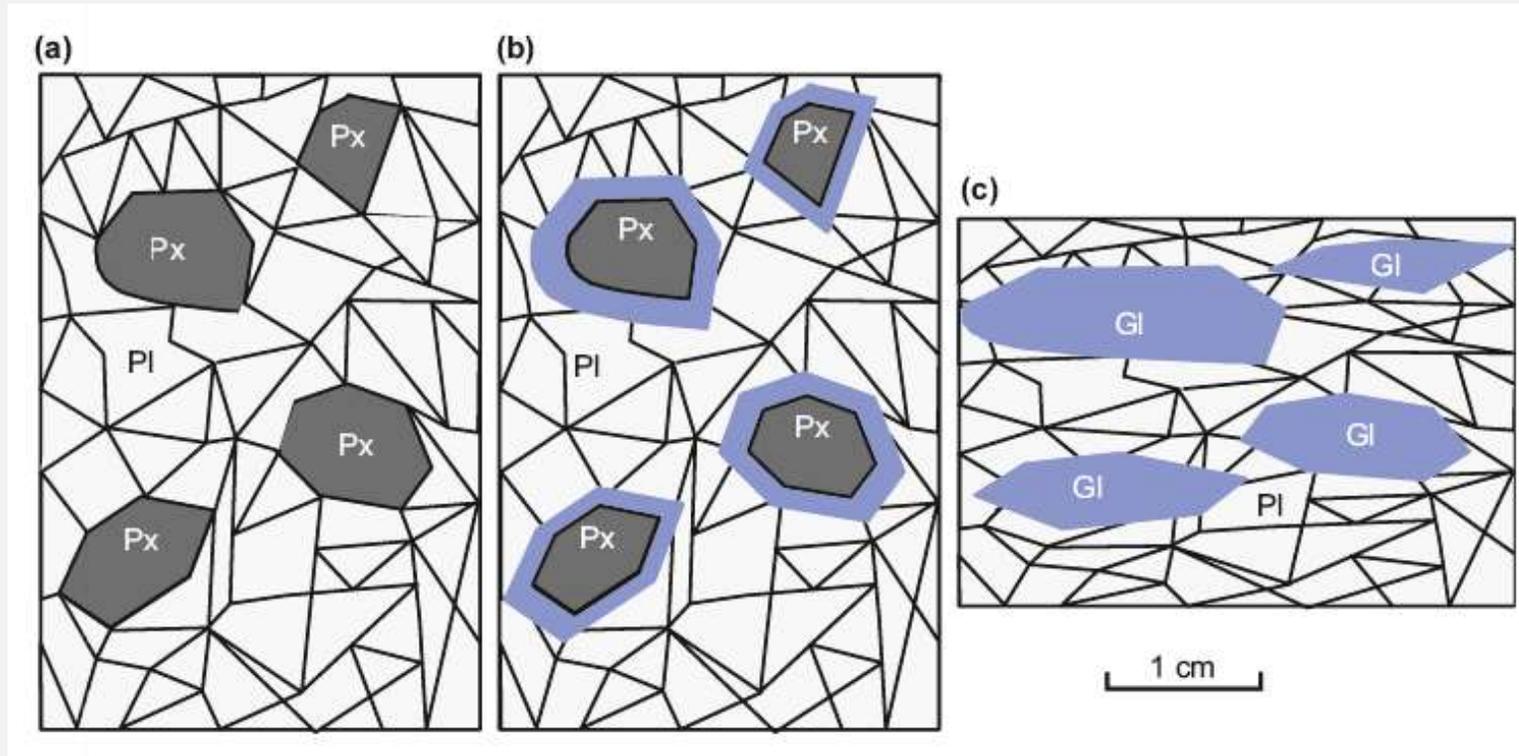
Lame mince



CPx : clinopyroxène ; Gl : glaucophane

# Évolution de l'assemblage pyroxène et plagioclase lors du métamorphisme d'un gabbro

Clinopyroxène ferromagnésien + Plagioclase +  $\text{H}_2\text{O}$  → Glaucophane

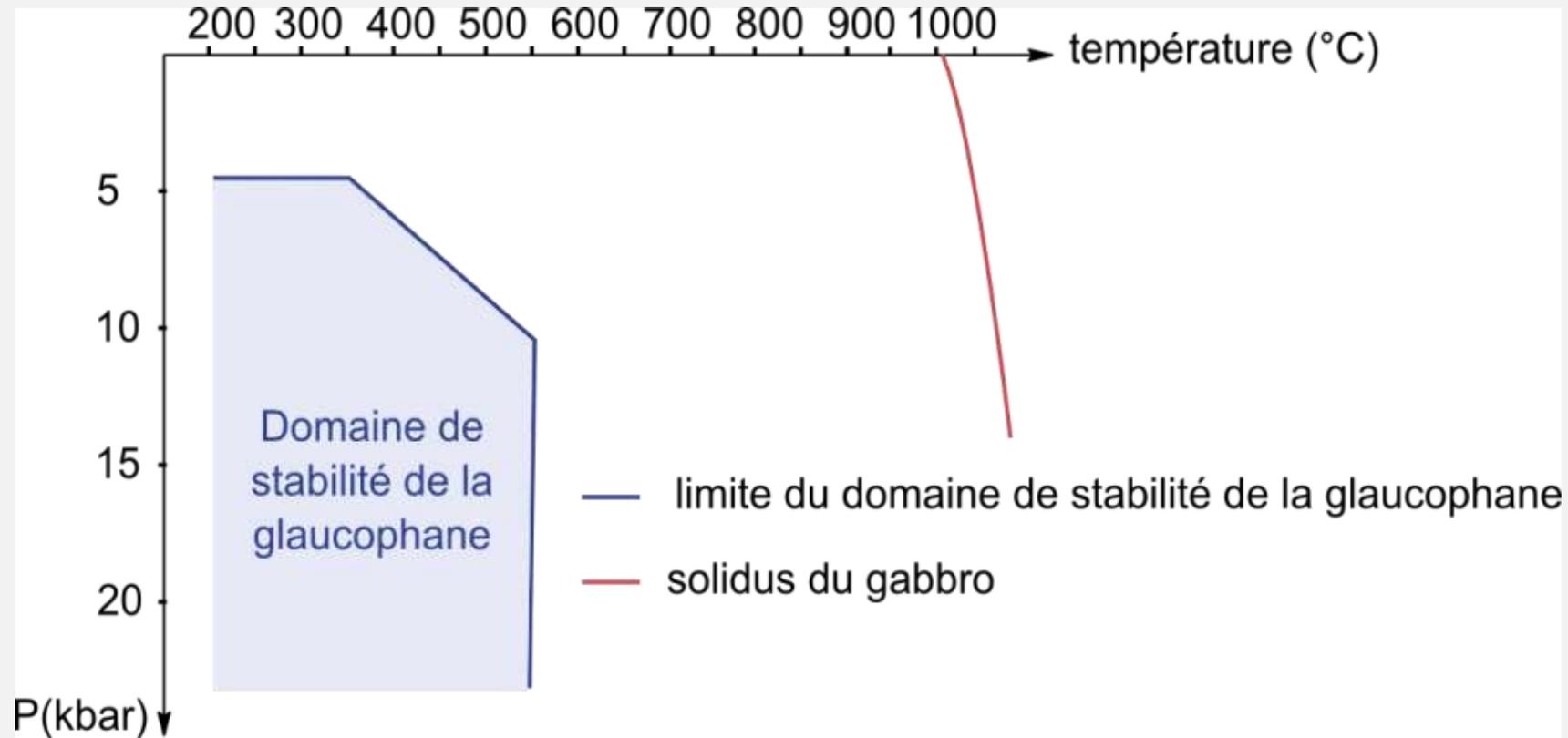


(a) État initial : conditions ( $P_0, T_0$ ) de cristallisation du gabbro

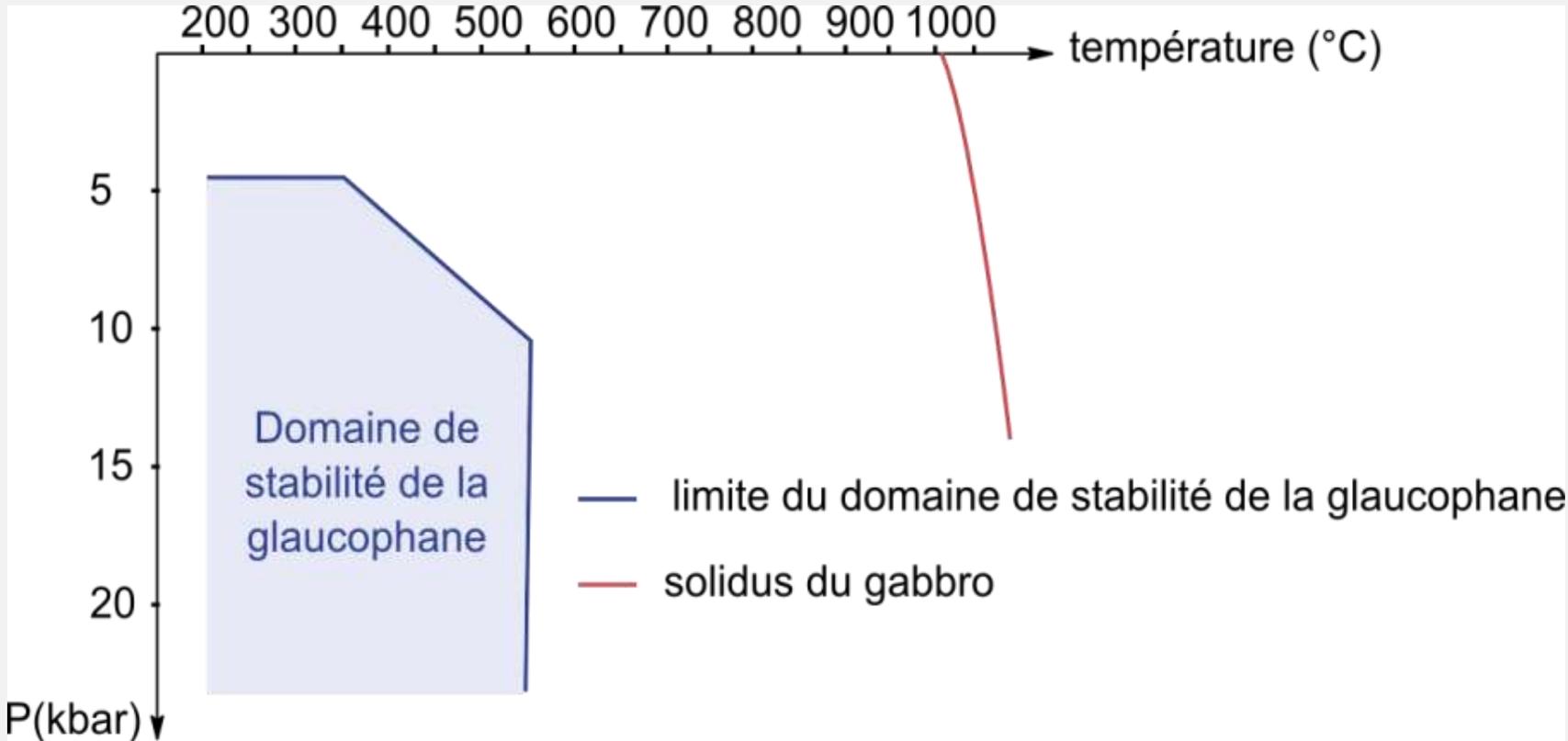
(b) Début de la réaction lorsque les conditions de P et T changent, en présence d'eau

(c) Achèvement de la réaction (cette étape peut ne jamais être atteinte)

# Document 1. Extrait d'une grille pétrogénétique.



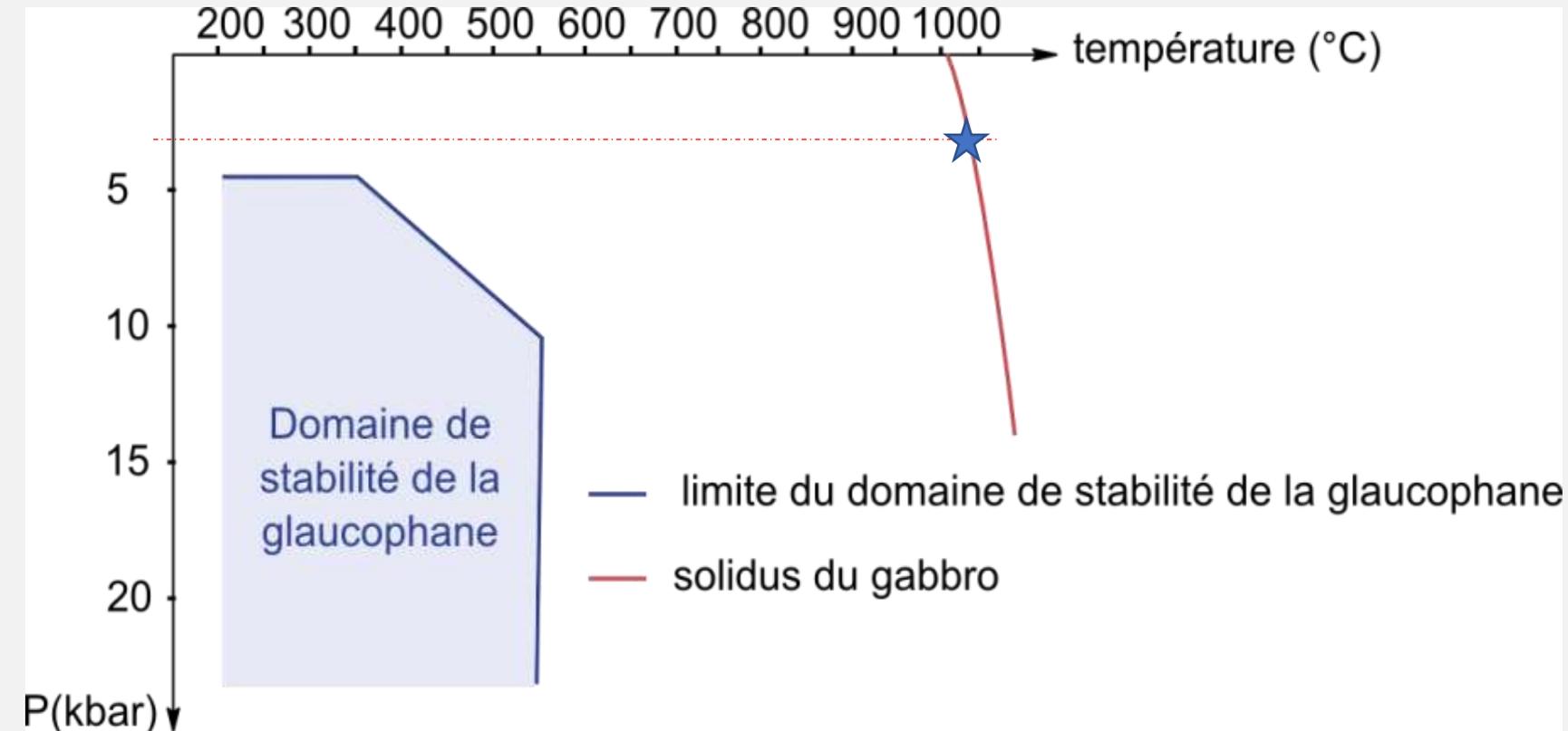
# Document 1. Extrait d'une grille pétrogénétique.



**Principe d'actualisme :**  
Profondeur de cristallisation  
d'un gabbro < 10 km

**Gradient de pression  
lithostatique = 0,3 kbar/km**  
→ placer la cristallisation du  
gabbro sur la grille

# Document 1. Conditions de stabilité de la glaucophane.



★ Cristallisation d'un gabbro

**Principe d'actualisme :**  
Profondeur de cristallisation  
d'un gabbro < 10 km

**Gradient de pression  
lithostatique = 0,3 kbar/km**  
→ placer la cristallisation du  
gabbro sur la grille

**Quelles conditions  
pour l'apparition de  
glaucophane ?**

# Rappel : Les roches, des systèmes contenant plusieurs phases

Une roche = association de plusieurs phases

Une roche =  
un système



Ensemble  
des  
cristaux  
d'orthose =  
une phase

Une phase est caractérisée par sa composition chimique

Ex : orthose  $KAlSi_3O_8$

# L'outil fondamental : règle des phases ou loi de Gibbs

$$v = k + 2 - \varphi$$

$v$  : variance (ou degrés de liberté) du système

$k$  : nombre de constituants chimiques indépendants  
(ex :  $\text{SiO}_2$  pour la silice)

$\varphi$  : nombre de phases (ici nb de minéraux)

2 : nb de paramètres qui définissent l'état du système, ici P et T

**La règle des phases impose la relation entre le nombre de minéraux et le nombre de constituants chimiques de la roche**

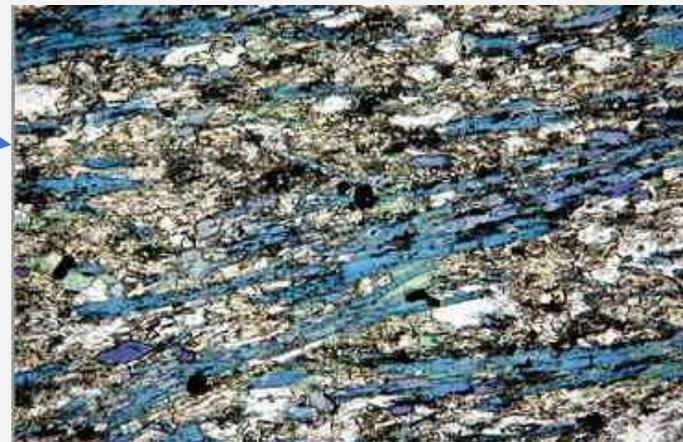
# **L'utilisation de la règle des phases et les données thermodynamiques permettent de déterminer :**

- Les domaines de stabilité des différents assemblages minéralogiques
- Les conditions (P, T) des transformations minérales
- La nature des réactions possibles

# Importance de la déformation dans la cinétique des réactions métamorphiques



Zone peu déformée :  
auréole de  
glaucophane autour  
du pyroxène



Zone très déformée :  
le pyroxène  
magmatique est  
complètement  
déstabilisé

Lames minces, observation en LPNA

# Echantillon d'une roche métamorphique issue de plusieurs protolithes sédimentaires

Quartzite (claire)

Cornéenne  
(noire)

Cornéenne  
(noire)

andalousite



→ La nature du protolithe influence le résultat du métamorphisme

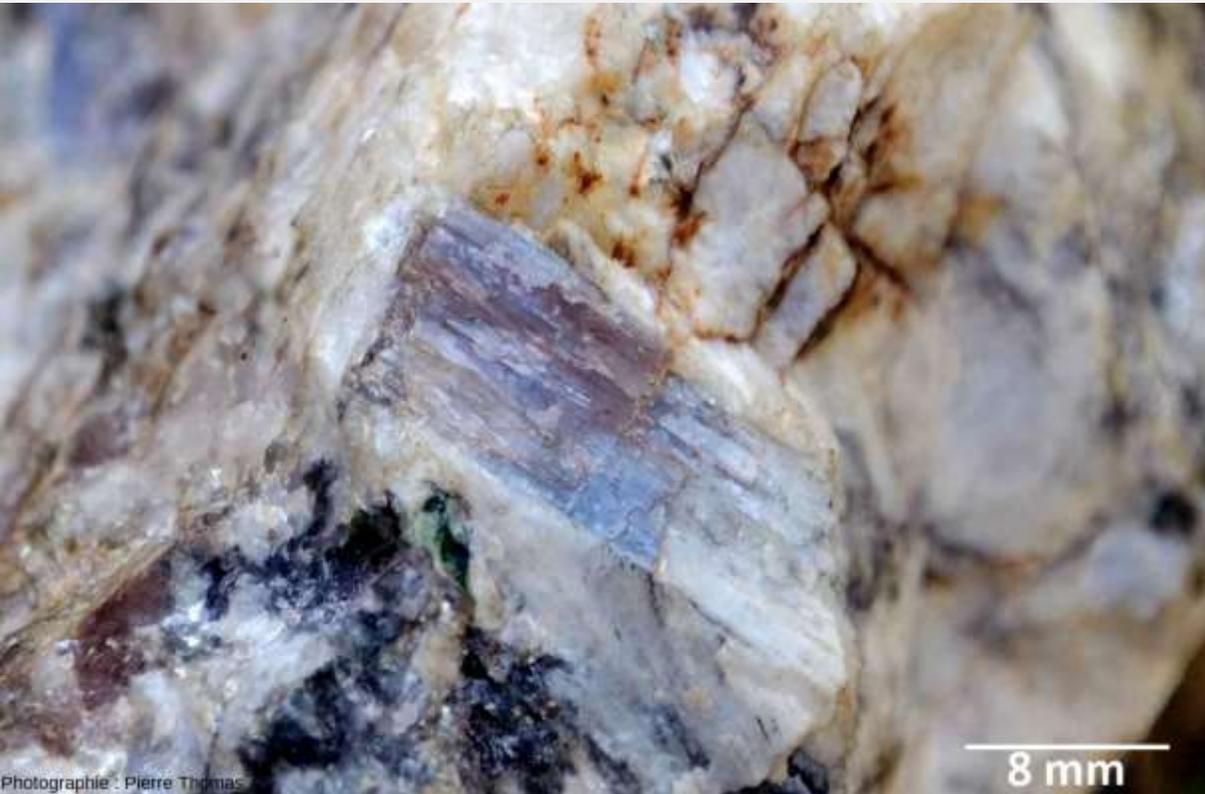
# Document 2. Les principales séquences de roches métamorphiques.

| Séquence                     | Éléments majeurs   | Protolithes  | Roches métamorphiques  | Exemples de minéraux représentatifs  |
|------------------------------|--|--|--|--|
| <b>pélitique</b>             | Si (60 %), Al (15%)<br>Quelques % : K, Fe, Mg et OH (hydroxyle)                  | Roche sédimentaire riche en argiles (argilite, pélite) | METAPELITES<br>Micaschistes<br>Gneiss                                  | micas (biotite, muscovite)<br>silicates d'alumine (andalousite, disthène, sillimanite), staurotide, grenat |
| <b>quartzo-feldspathique</b> | Si (75 %), Al (10%)<br>Na + K : 10%<br>Quelques % : Ca, Fe, Mg et OH (hydroxyle) | Sable ou grès<br>Granite ou rhyolite                   | Quartzite<br>Gneiss  | quartz,<br>micas, amphiboles,<br>grenat  |
| <b>basique</b>               | Si (45-55 %),<br>Al (15%),<br>Fe + Mg ~ 15%                                      | Gabbro ou basalte                                      | METABASITES<br>Schiste vert<br>Amphibolite<br>Schiste bleu<br>Éclogite | amphiboles (hornblende, glaucophane)<br>mica blanc (phengite)<br>grenat, pyroxènes                         |
| <b>ultrabasique</b>          | Si (40-45 %),<br>Mg (40 %)<br>Fe (5-10 %)<br>OH : variable                       | Péridotite   | Péridotite<br>Serpentinite (si OH abondant)                            | olivine, pyroxène, grenat,<br>spinelle, feldspath plagioclase<br>+/- serpentine                            |
| <b>carbonatée</b>            | Ca, C en majorité<br>Mg variable   | Calcaire,<br>marne ou dolomie                          | Marbre   | calcite,<br>amphiboles, grenat   |

# Document 2. Les principales séquences de roches métamorphiques.

| Séquence                     | Éléments majeurs  | Protolithes  | Roches métamorphiques  | Exemples de minéraux représentatifs  |
|------------------------------|---|--|--|--|
| <b>pélitique</b>             | <b>Si (60 %), Al (15%)</b><br>Quelques % : K, Fe, Mg et OH (hydroxyle)                  | Roche sédimentaire riche en argiles (argilite, pélite) | METAPELITES<br>Schistes<br>Micaschistes<br>Gneiss                      | micas (biotite, muscovite)<br>silicates d'alumine (andalousite, disthène, sillimanite), staurotide, grenat |
| <b>quartzo-feldspathique</b> | <b>Si (75 %), Al (10%)</b><br>Na + K : 10%<br>Quelques % : Ca, Fe, Mg et OH (hydroxyle) | Sable ou grès<br>Granite ou rhyolite                   | Quartzite<br>Gneiss  | quartz,<br>micas, amphiboles,<br>grenat  |
| <b>basique</b>               | <b>Si (45-55 %), Al (15%),</b><br>Fe + Mg ~ 15%   | Gabbro ou basalte                                      | METABASITES<br>Schiste vert<br>Amphibolite<br>Schiste bleu<br>Éclogite | amphiboles (hornblende, glaucophane)<br>mica blanc (phengite)<br>grenat, pyroxènes                         |
| <b>ultrabasique</b>          | <b>Si (40-45 %), Mg (40 %)</b><br>Fe (5-10 %)<br>OH : variable                          | Péridotite   | Péridotite<br>Serpentinite (si OH abondant)                            | olivine, pyroxène, grenat,<br>spinelle, feldspath plagioclase +/- serpentine                               |
| <b>carbonatée</b>            | <b>Ca, C en majorité</b><br>Mg variable   | Calcaire, marne ou dolomie                             | Marbre   | calcite,<br>amphiboles, grenat   |

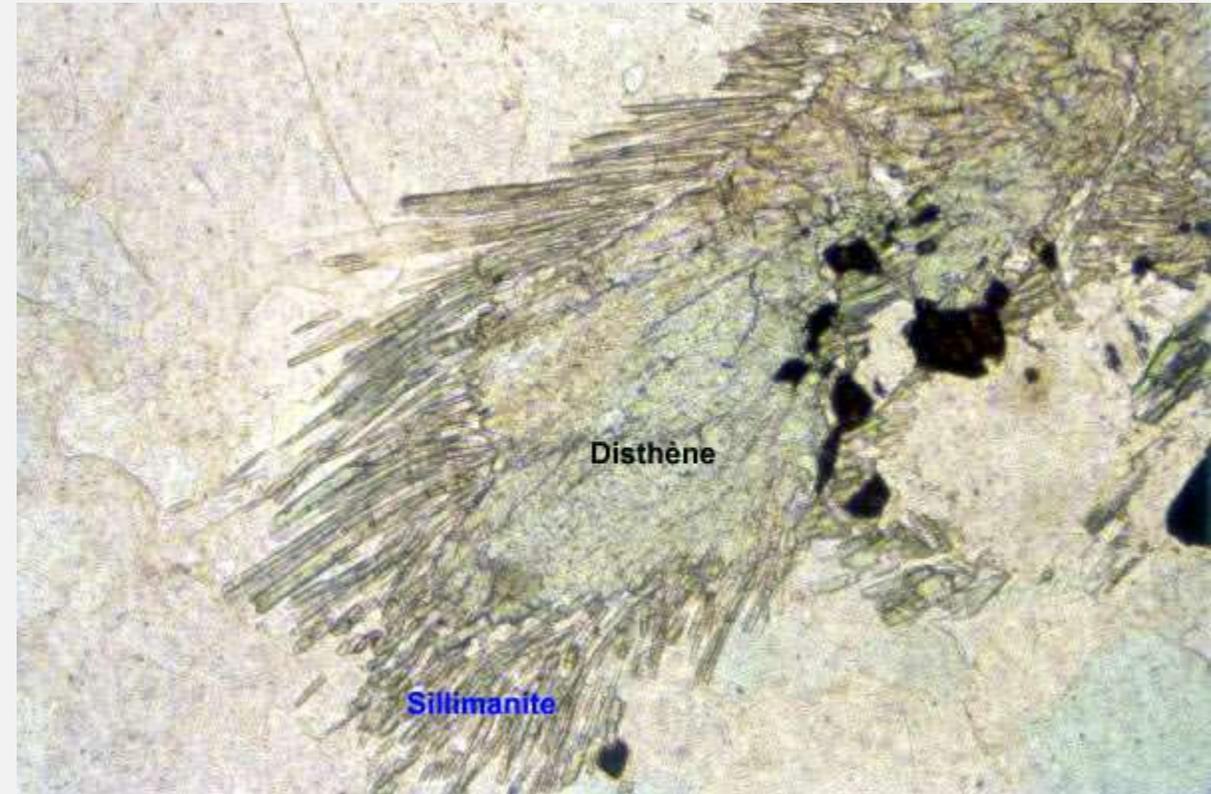
# Transformation polymorphique : cas des silicates d'alumine $\text{Al}_2\text{SiO}_5$



Photographie : Pierre Thomas

**A l'échelle de l'échantillon :  
cristal de disthène (bleu) en train de se transformer  
en andalousite (rose)**

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/lmg655-2019-11-11.xml>

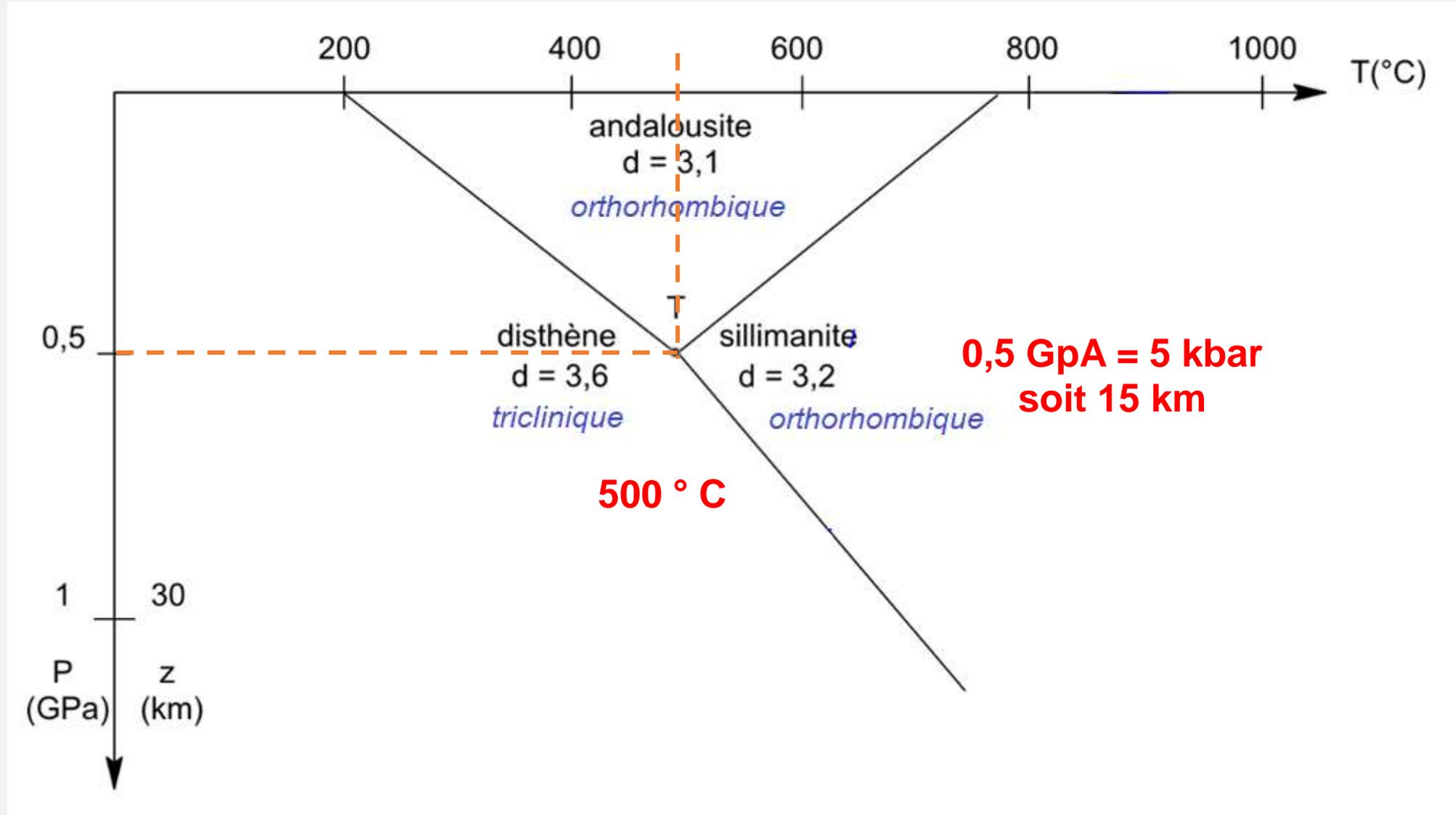


**A l'échelle de la lame mince :  
cristal de disthène (bleu) en train de se  
transformer en sillimanite**

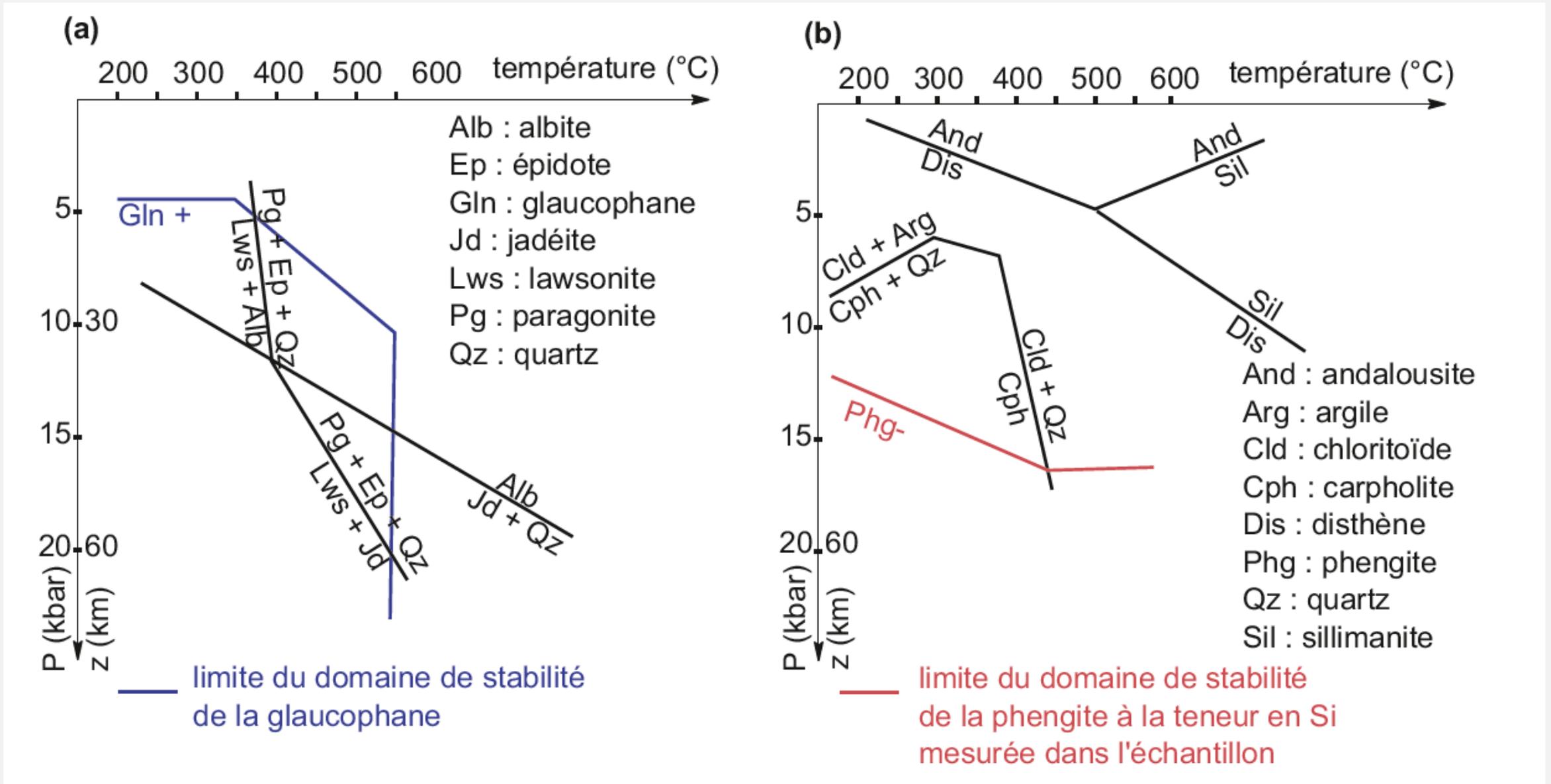
Photo Véronique Gardien

<https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/chronologie-relative.xml>

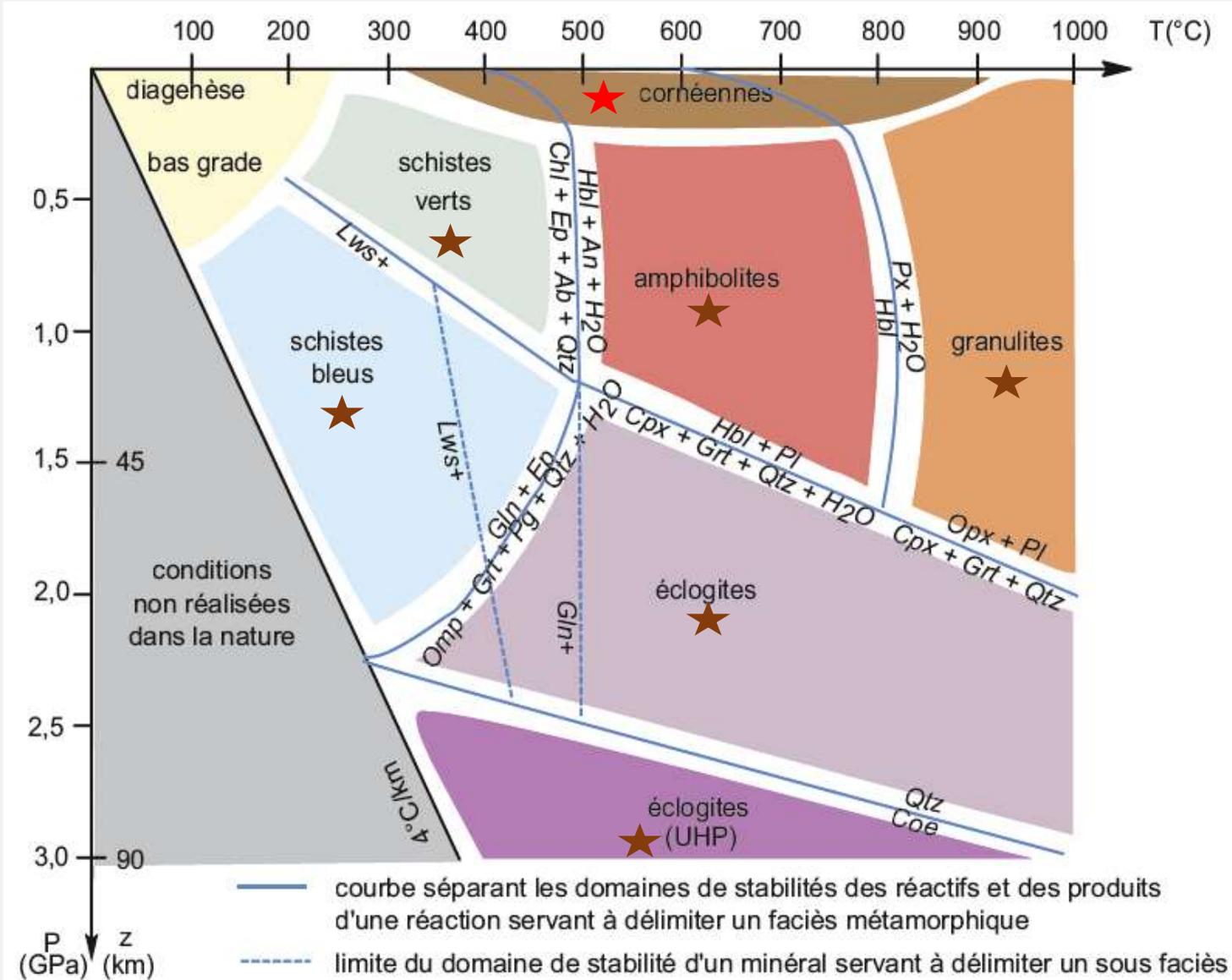
# Document 3. Domaines de stabilité des silicates d'alumine $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ .



# Document 4. Grille pétrogénétiques correspondant à des roches basiques (a) et à des schistes lustrés (b).



# Document 5. Domaines (P, T) des faciès métamorphiques.



Des amphibolites de composition basaltique et des métapélites à sillimanite sont toutes deux rangées dans le faciès amphibolite

| Faciès métamorphique                                | Domaine (P, T) correspondant |
|---|------------------------------|
| Faciès des zéolites<br>(métamorphisme de bas grade) | <b>BP – BT</b>               |
| Faciès des cornéennes                               | <b>TBP</b>                   |
| Faciès des schistes verts                           | <b>BP – BT</b>               |
| Faciès des amphibolites                             | <b>MP – MT</b>               |
| Faciès des granulites                               | <b>MP – HT</b>               |
| Faciès des schistes bleus                           | <b>HP – BT</b>               |
| Faciès des éclogites                                | <b>HP à THP – MT</b>         |

**Correspondance entre faciès et domaines (P, T)**

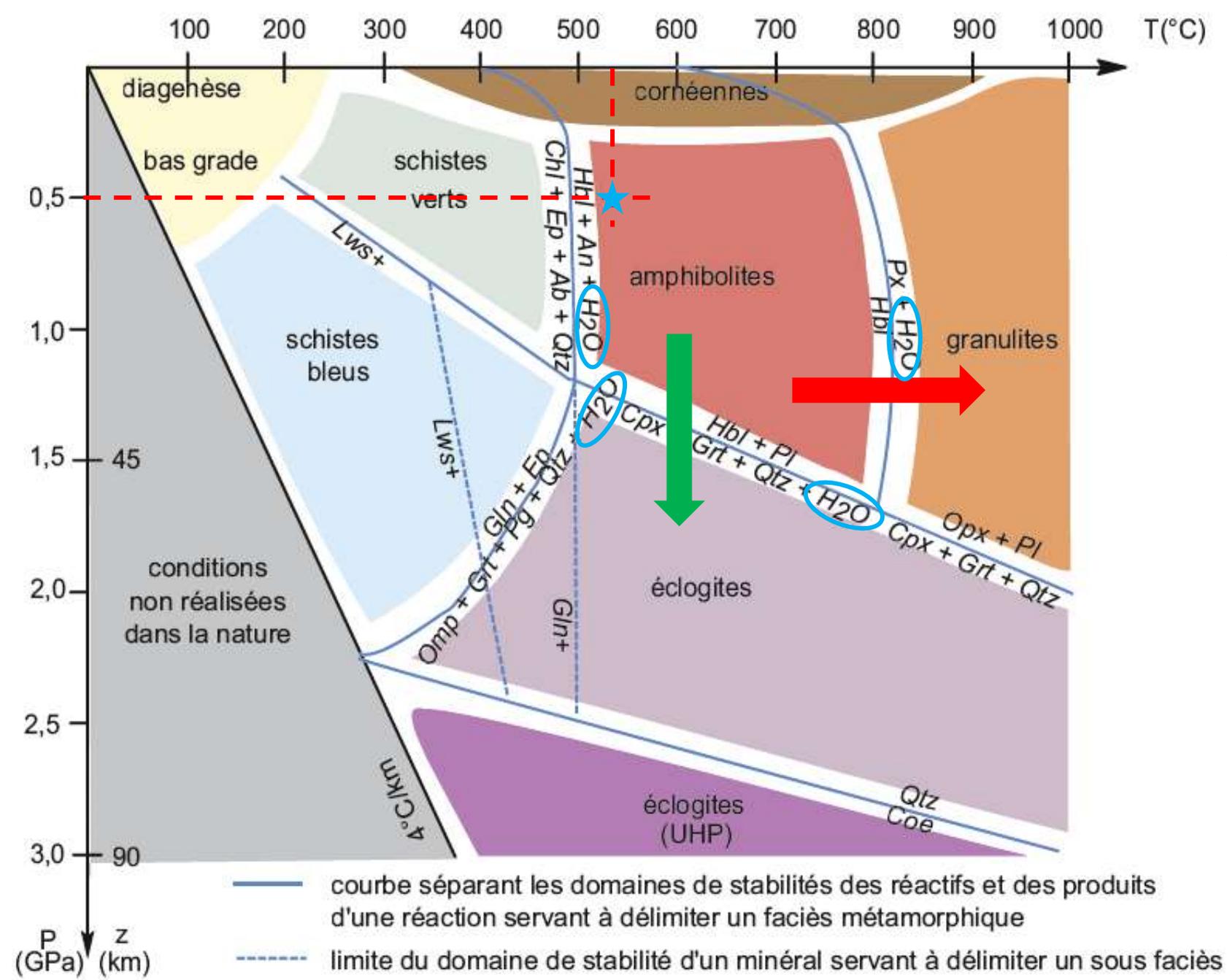
- ★ **Faciès du métamorphisme de contact**
- ★ **Faciès du métamorphisme régional**

## Document 5. Domaines (P, T) des faciès métamorphiques.

★ Point triple pour les silicates d'alumine

Changement de faciès thermodépendant

Changement de faciès barodépendant



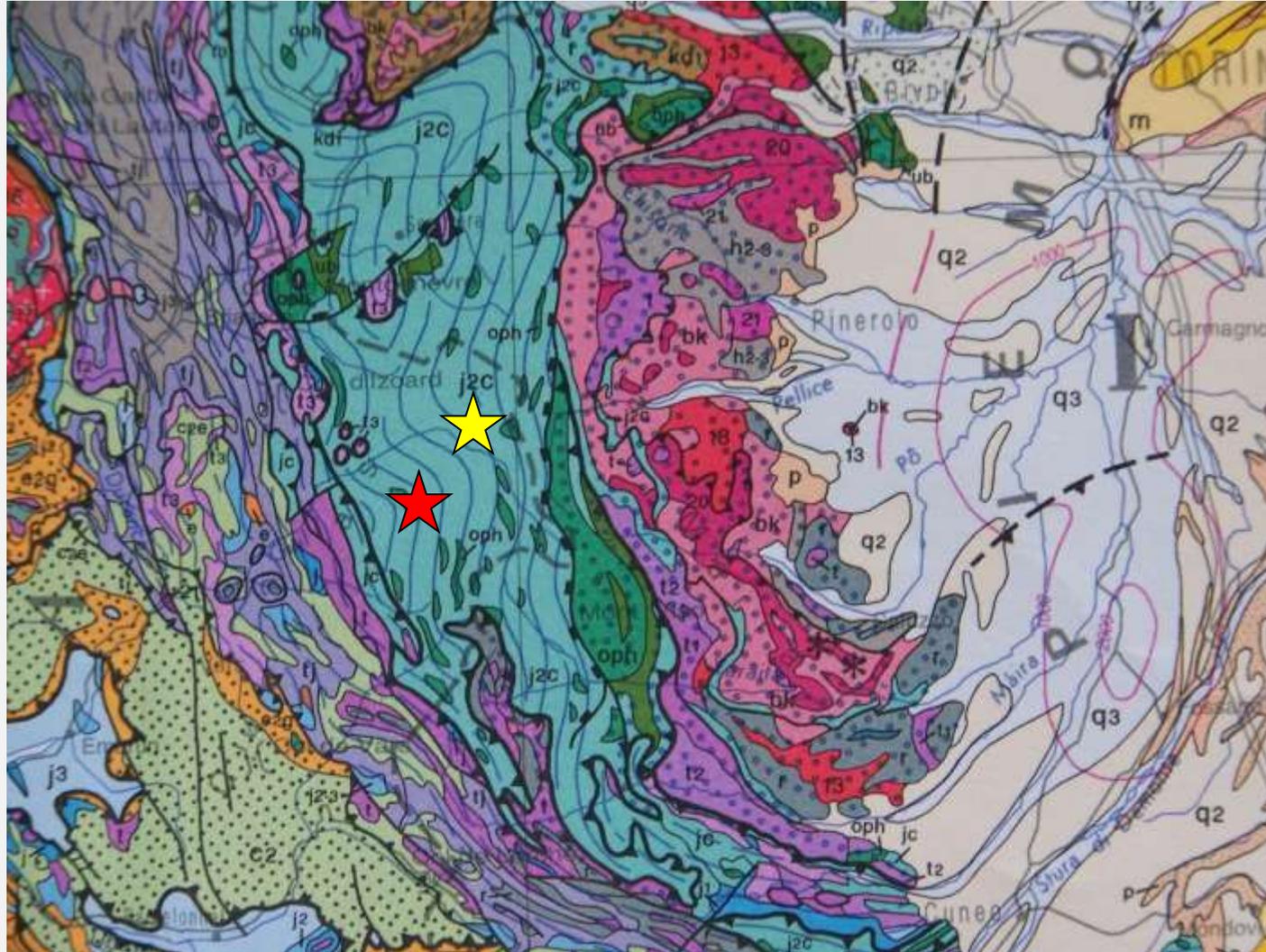
# Document 6. Paragenèses caractéristiques des faciès métamorphiques.

*Les formules des minéraux sont données uniquement pour faciliter le repérage des éléments majeurs.*

| Faciès                | Roches basiques   | Roches pélitiques   |
|-----------------------|---|---|
| <b>Cornéennes</b>     | Hornblende, amphibole Ca<br>+ oxydes (Fe, Ti)   | Andalousite, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$<br>+ Cordiérite, $(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \text{ nH}_2\text{O}$<br>+ Muscovite (mica blanc), $\text{K}[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{Al}_2(\text{OH})_2$   |
| <b>Schistes verts</b> | Albite (plagioclase Na)<br>+ Épidote, $\text{CaFe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$<br>+ Actinote, amphibole Ca<br>+ Chlorite, $(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  | Biotite (mica noir), $\text{K}[\text{Si}_{3-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}](\text{Mg, Fe, Al})_{2-3}(\text{OH})_2$<br>+ Chlorite, $(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$<br>+ Disthène, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$   |
| <b>Amphibolites</b>   | Hornblende, amphibole Ca<br>+ Plagioclases<br>+ Grenat Fe, Mg   | Biotite (mica noir), $\text{K}[\text{Si}_{3-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}](\text{Mg, Fe, Al})_{2-3}(\text{OH})_2$<br>+ Grenat Fe, Mg<br>+ Sillimanite ou disthène, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$<br>+ Muscovite, mica blanc, $\text{K}[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}]\text{Al}_2(\text{OH})_2$                                  |
| <b>Schistes bleus</b> | Glaucophane (amphibole Na)<br>+ Épidote, $\text{CaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ ou Lawsonite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$<br>+ Grenat Fe, Mg  | Phengite (mica blanc), $\text{K}[\text{Si}_{3+x}\text{Al}_{1-x}](\text{Mg, Fe, Al})_{2-3}(\text{OH})_2$<br>+ Carpholite, $(\text{Fe, Mg})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$<br>+ Disthène, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  |
| <b>Eclogites</b>      | Grenat Mg<br>+ Omphacite, solution solide de clinopyroxènes dont jadéite (pôle Na) ou Lawsonite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$<br>+ Zoïsite, variété d'épidote<br>+ Quartz<br>Rutile ( $\text{TiO}_2$ )<br>Coésite ( $\text{SiO}_2$ ) : faciès Ultra Haute Pression | Phengite (mica blanc), $\text{K}[\text{Si}_{3+x}\text{Al}_{1-x}](\text{Mg, Fe, Al})_{2-3}(\text{OH})_2$<br>+ Disthène, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$<br>+ Chloritoïde, $(\text{Fe, Mg})_2\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$<br>+ Grenat Mg<br><br>Coésite ( $\text{SiO}_2$ ) : faciès Ultra Haute Pression |
| <b>Granulites</b>     | Pyroxènes<br>+ Plagioclases<br>+ Quartz   | Cordiérite, $(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \text{ nH}_2\text{O}$<br>+ Sillimanite, $\text{Al}_2\text{SiO}_5$<br>+ Feldspath K<br>+ Grenat  |

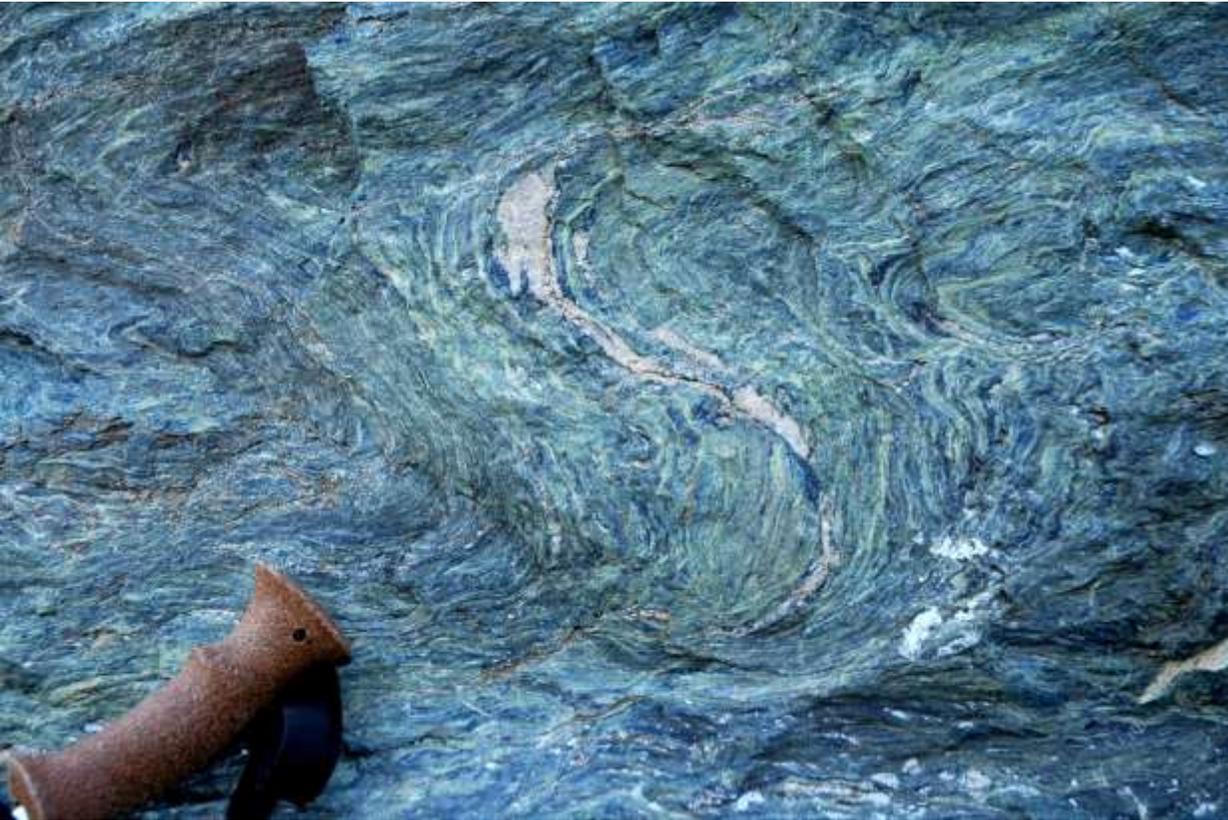
## Application :

*Trouver les faciès correspondant aux deux roches (diapos suivantes) dont la localisation est indiquée sur cet extrait de carte :*



**Extrait de la carte de France au 1 / 1 000 000**

★ **Métabasite** à glaucophane (bleue) et épidote (vert)



★ **Métopélite** à phengite (mica blanc), et carpholite (vert)



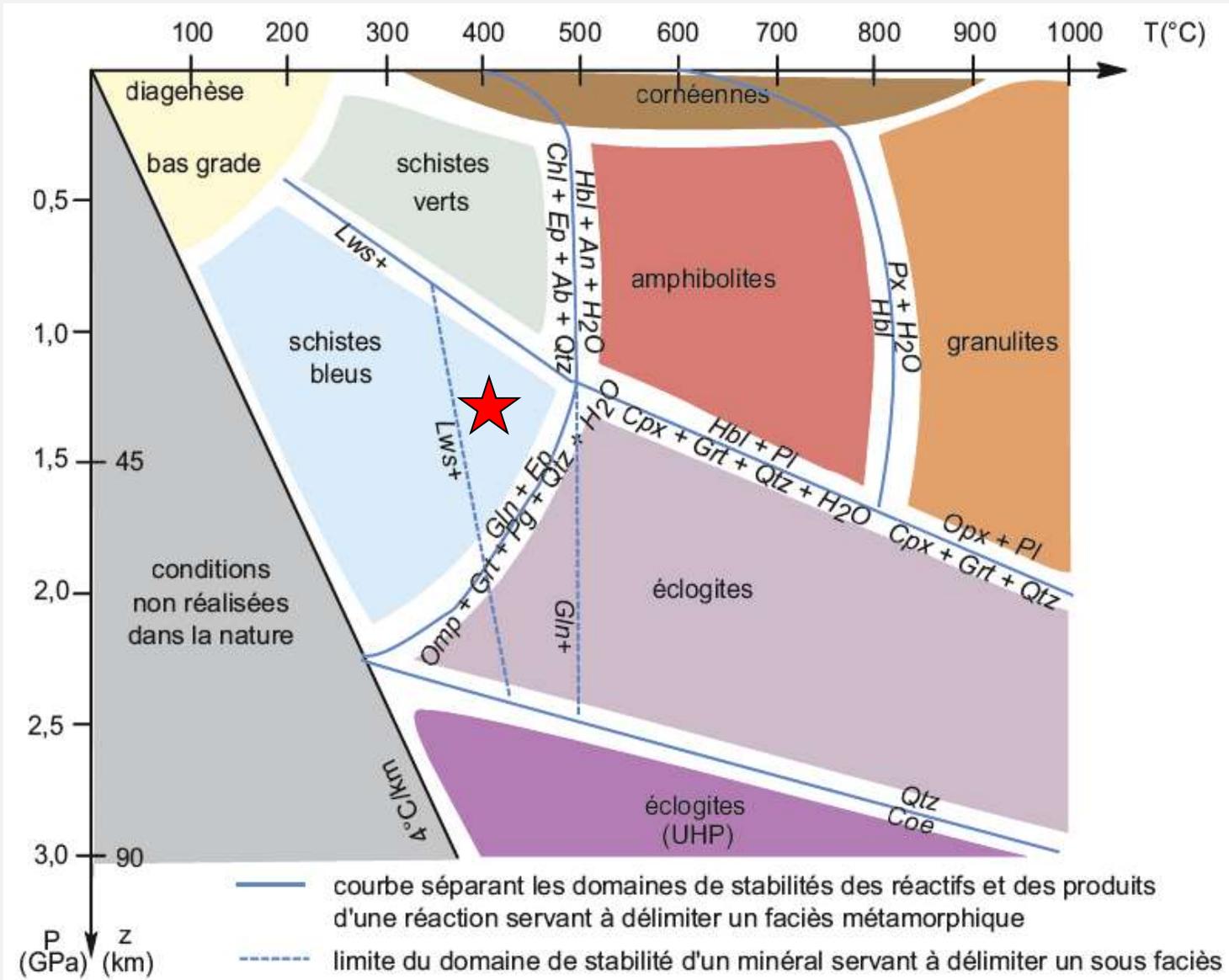
***Quel est le faciès de chacune de ces roches ?***

# Document 6. Paragenèses caractéristiques des faciès métamorphiques.

*Les formules des minéraux sont données uniquement pour faciliter le repérage des éléments majeurs.*

| Faciès                | Roches basiques   | Roches pélitiques  |
|-----------------------|---|--|
| <b>Cornéennes</b>     | Hornblende, amphibole Ca<br>+ oxydes (Fe, Ti)   | Andalousite, $Al_2SiO_5$<br>+ Cordiérite, $(Mg, Fe)_2Al_4Si_5O_{18} nH_2O$<br>+ Muscovite (mica blanc), $K[Si_3AlO_{10}]Al_2(OH)_2$  |
| <b>Schistes verts</b> | Albite (plagioclase Na)<br>+ Épidote, $CaFe_3Si_3O_{12}(OH)$<br>+ Actinote, amphibole Ca<br>+ Chlorite, $(Mg, Fe, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$  | Biotite (mica noir), $K[Si_{3-x}Al_xO_{10}](Mg, Fe, Al)_{2-3}(OH)_2$<br>+ Chlorite, $(Mg, Fe, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$<br>+ Disthène, $Al_2SiO_5$  |
| <b>Amphibolites</b>   | Hornblende, amphibole Ca<br>+ Plagioclases<br>+ Grenat Fe, Mg   | Biotite (mica noir), $K[Si_{3-x}Al_xO_{10}](Mg, Fe, Al)_{2-3}(OH)_2$<br>+ Grenat Fe, Mg<br>+ Sillimanite ou disthène, $Al_2SiO_5$<br>+ Muscovite, mica blanc, $K[Si_2AlO_{10}]Al_2(OH)_2$                                  |
| <b>Schistes bleus</b> | Glaucophane (amphibole Na)<br>+ Épidote, $CaAl_3Si_3O_{12}(OH)$ ou Lawsonite, $CaAl_2Si_2O_7(OH)_2, H_2O$<br>+ Grenat Fe, Mg  | Phengite (mica blanc), $K[Si_{3+x}Al_{1-x}](Mg, Fe, Al)_{2-3}(OH)_2$<br>+ Carpholite, $(Fe, Mg)Al_2Si_2O_6(OH)_4$<br>+ Disthène, $Al_2SiO_5$   |
| <b>Eclogites</b>      | Grenat Mg<br>+ Omphacite, solution solide de clinopyroxènes dont jadéite (pôle Na) ou Lawsonite, $CaAl_2Si_2O_7(OH)_2, H_2O$<br>+ Zoïsite, variété d'épidote<br>+ Quartz<br>Rutile ( $TiO_2$ )<br>Coésite ( $SiO_2$ ) : faciès Ultra Haute Pression | Phengite (mica blanc), $K[Si_{3+x}Al_{1-x}](Mg, Fe, Al)_{2-3}(OH)_2$<br>+ Disthène, $Al_2SiO_5$<br>+ Chloritoïde, $(Fe, Mg)_2Al_4Si_2O_{10}(OH)_4$<br>+ Grenat Mg<br><br>Coésite ( $SiO_2$ ) : faciès Ultra Haute Pression |
| <b>Granulites</b>     | Pyroxènes<br>+ Plagioclases<br>+ Quartz   | Cordiérite, $(Mg, Fe)_2Al_4Si_5O_{18} nH_2O$<br>+ Sillimanite, $Al_2SiO_5$<br>+ Feldspath K<br>+ Grenat  |

# Document 5. Domaines (P, T) des faciès métamorphiques.



**Faciès des schistes bleus**

# MÉTAMORPHISME

## Métamorphisme du socle océanique alpin

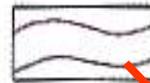
Âge : / cadomien / méso-varisque / néo-varisque / éo-alpin / **alpin**  
/ permo-triasique sud-alpin / mésocrétacé pyrénéen / oligo-miocène lépontin

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

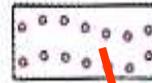
Faciès :

*l'orogénèse néo-varisque est prise comme exemple*

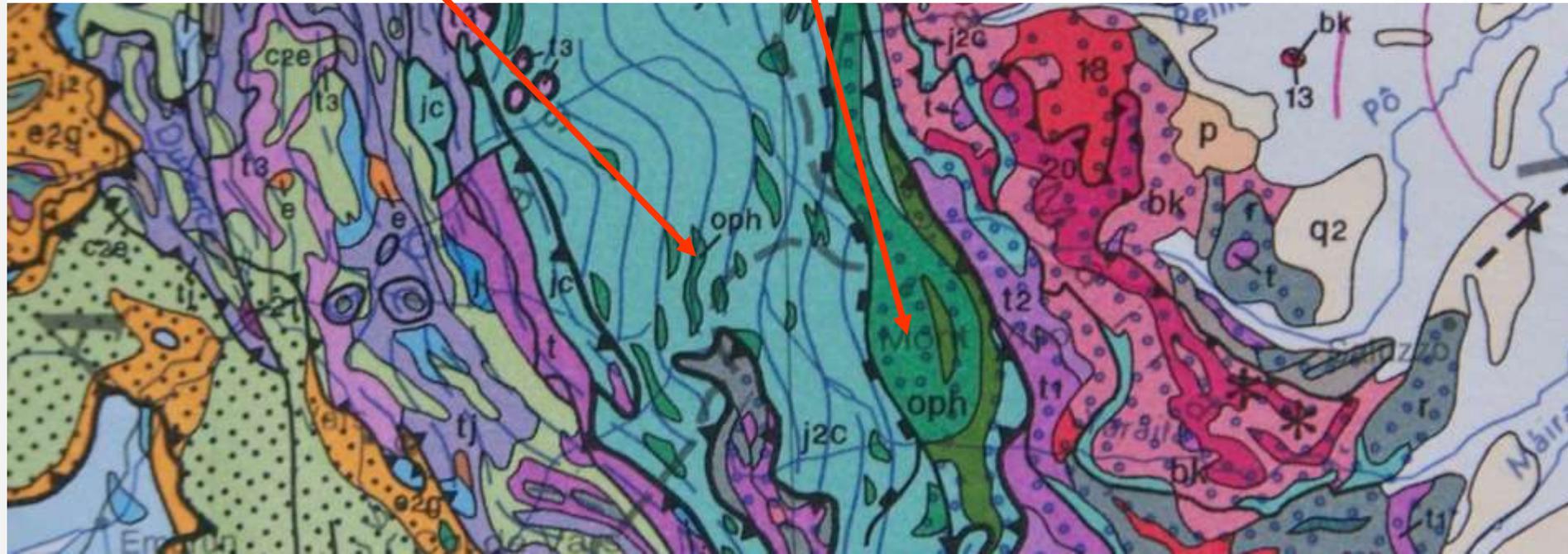
de haute pression



Faciès schiste bleu de basse température



Faciès éclogite (et schiste bleu de haute température)



# Métamorphisme varisque

Âge : / cadomien / méso-varisque / **néo-varisque** / éo-alpin / alpin  
 / permo-triasique sud-alpin / / mésocrétacé pyrénéen / / oligo-miocène lépontin

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

l'orogénèse néo-varisque est prise comme exemple

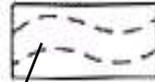
Faciès :

de basse et moyenne pression

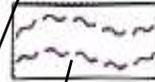
de haute pression



Faciès schiste vert en domaine de nappes



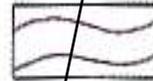
Faciès amphibolite (paragneiss, orthogneiss)



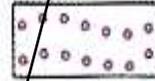
Zones anatectiques (migmatites)



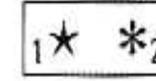
Faciès granulite de basse pression



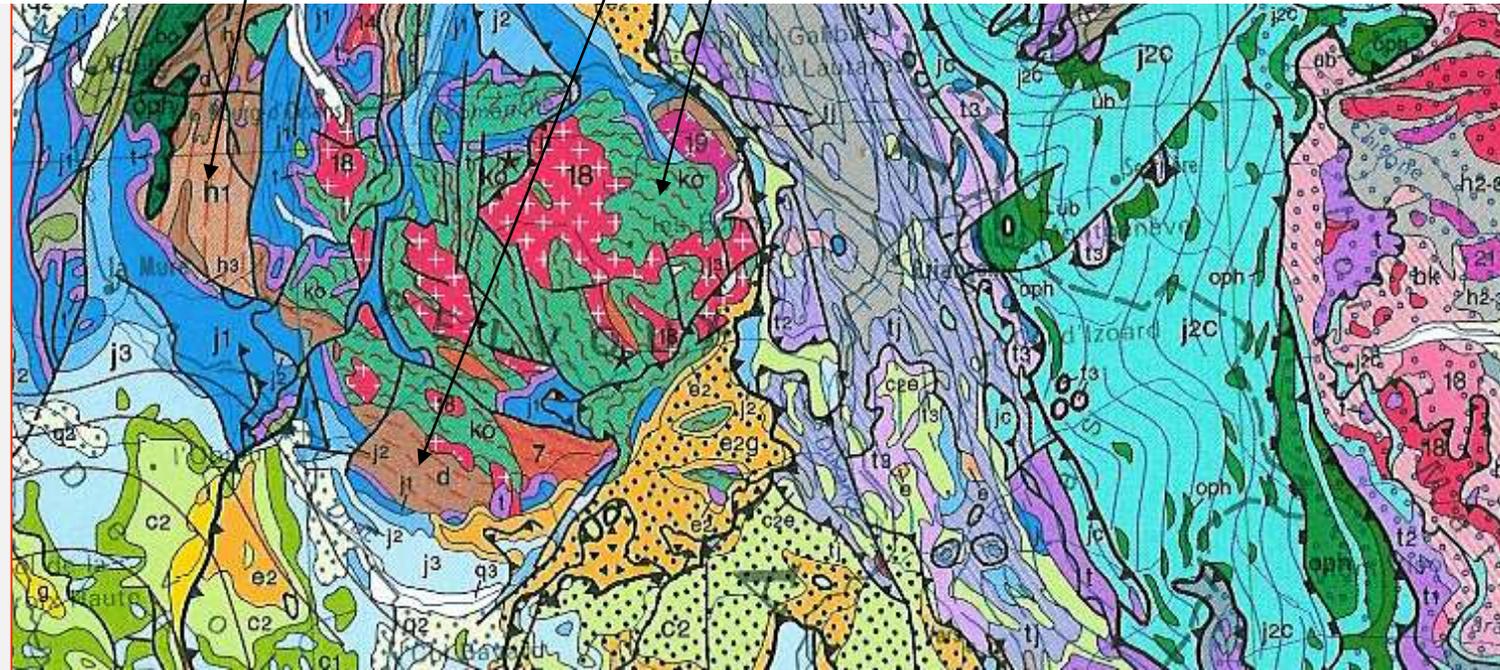
Faciès schiste bleu de basse température



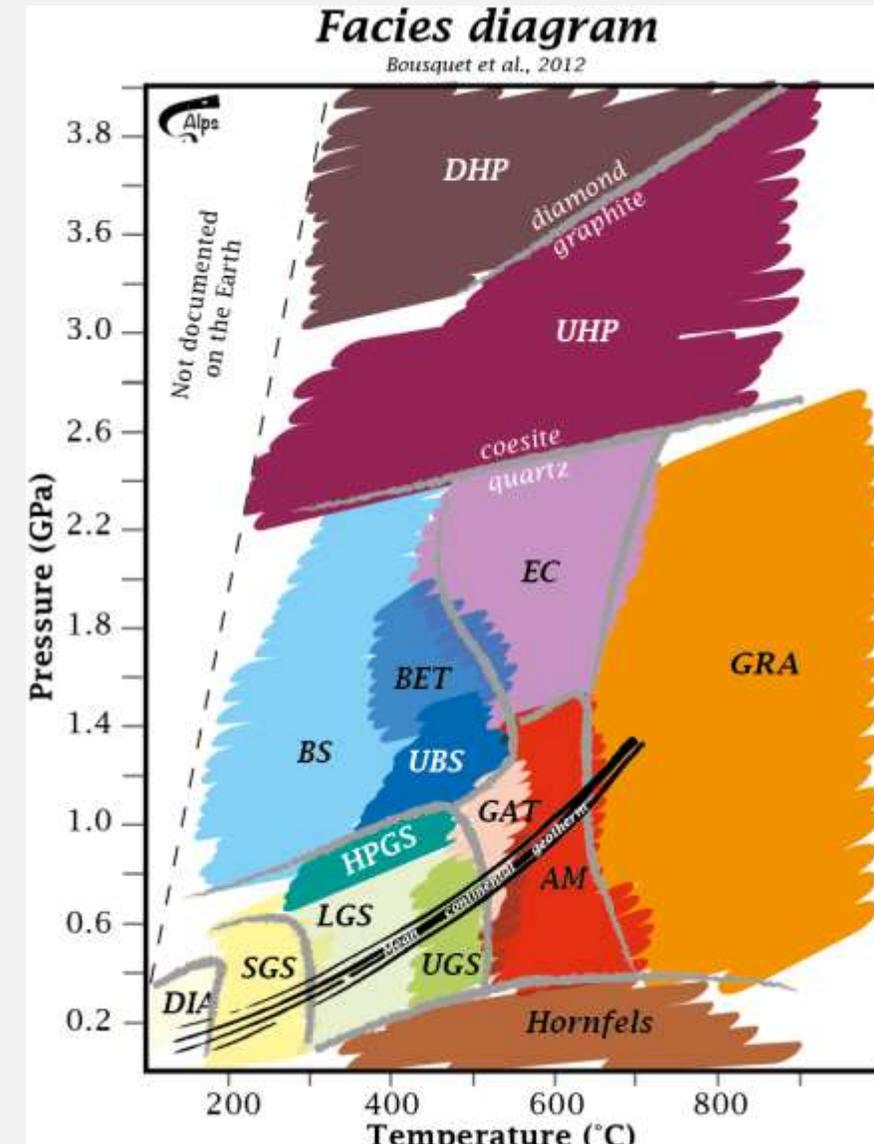
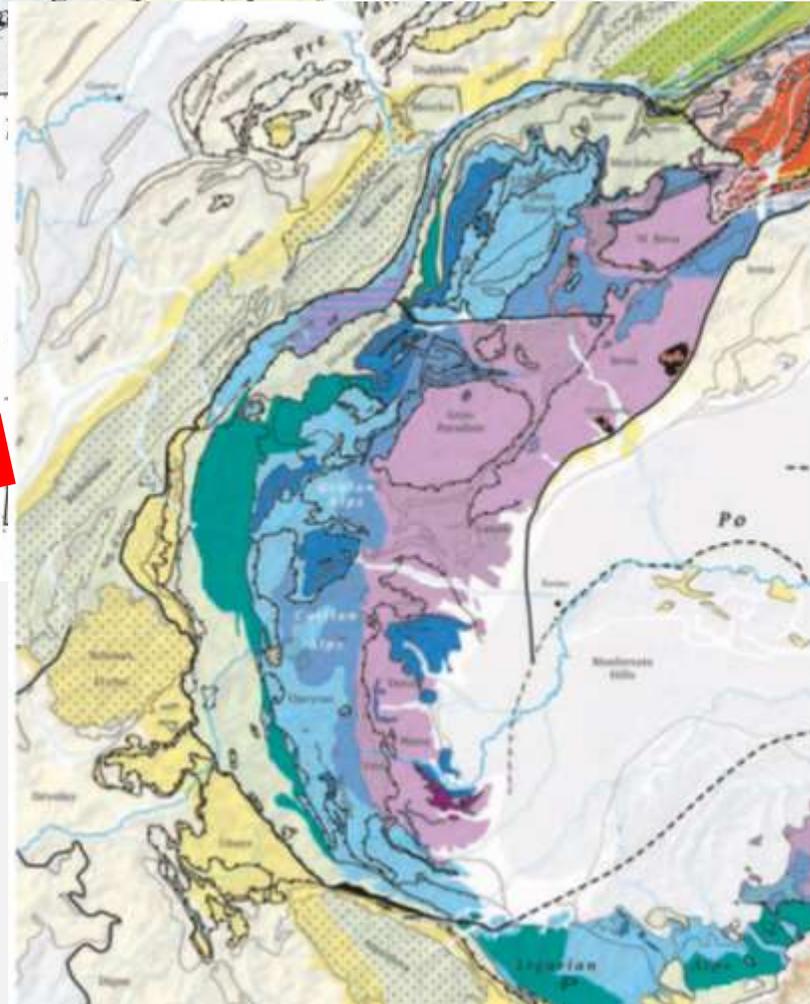
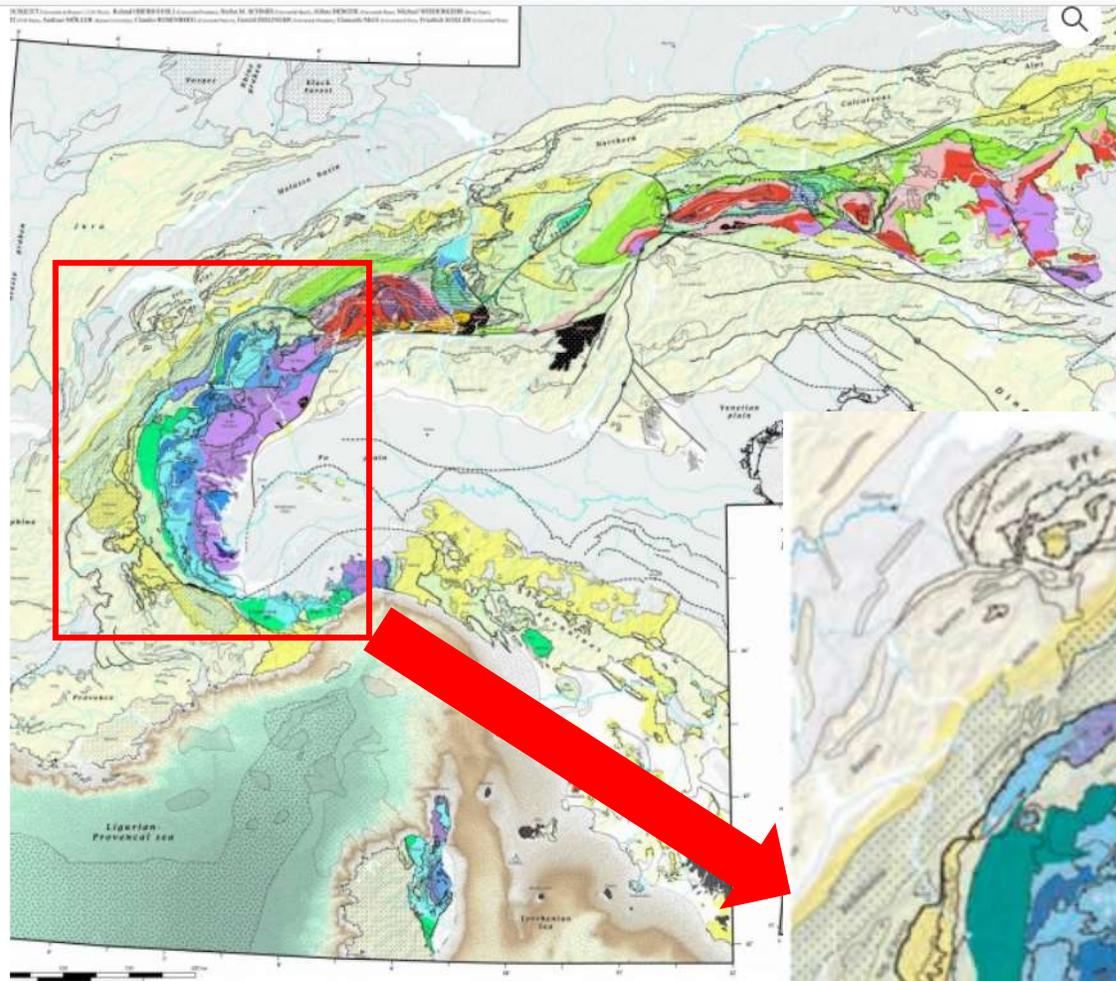
Faciès éclogite (et schiste bleu de haute température)



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



# Carte métamorphique des Alpes



# Minéraux repères et isogrades du métamorphisme

← Métamorphisme croissant d'Est en Ouest

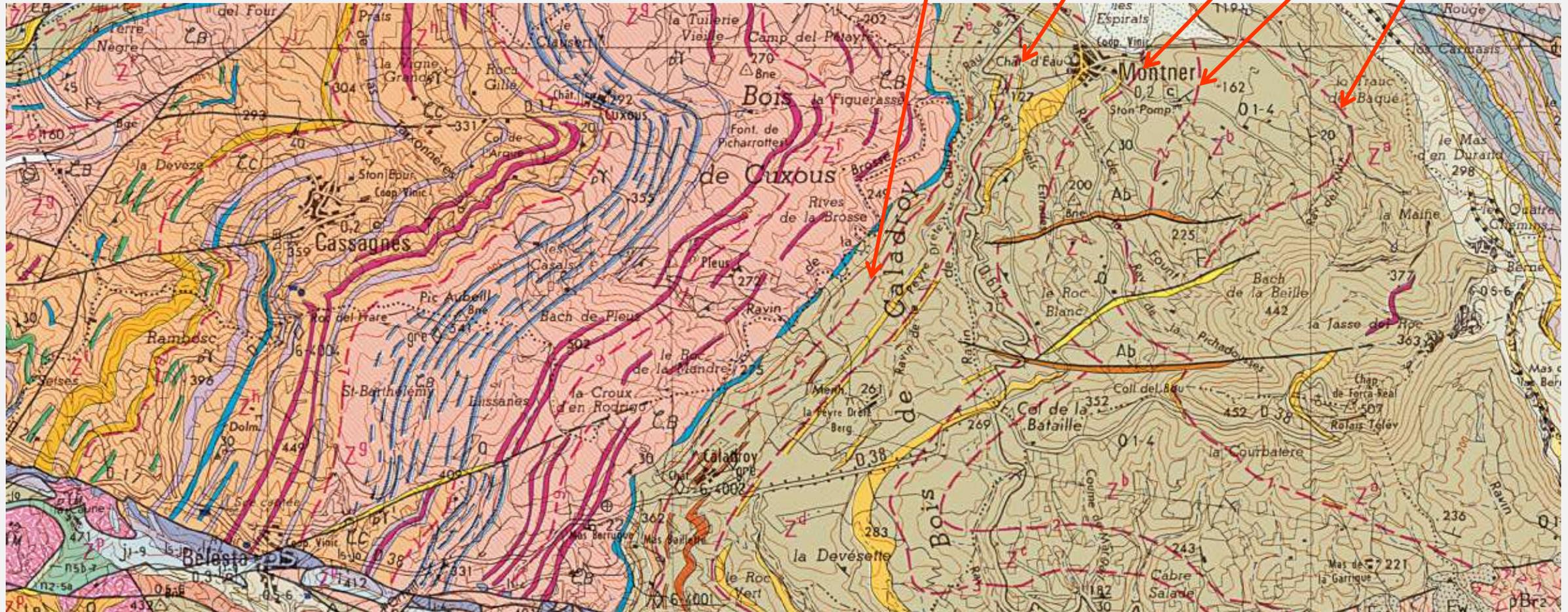
F<sub>K</sub> +

sil +

and +

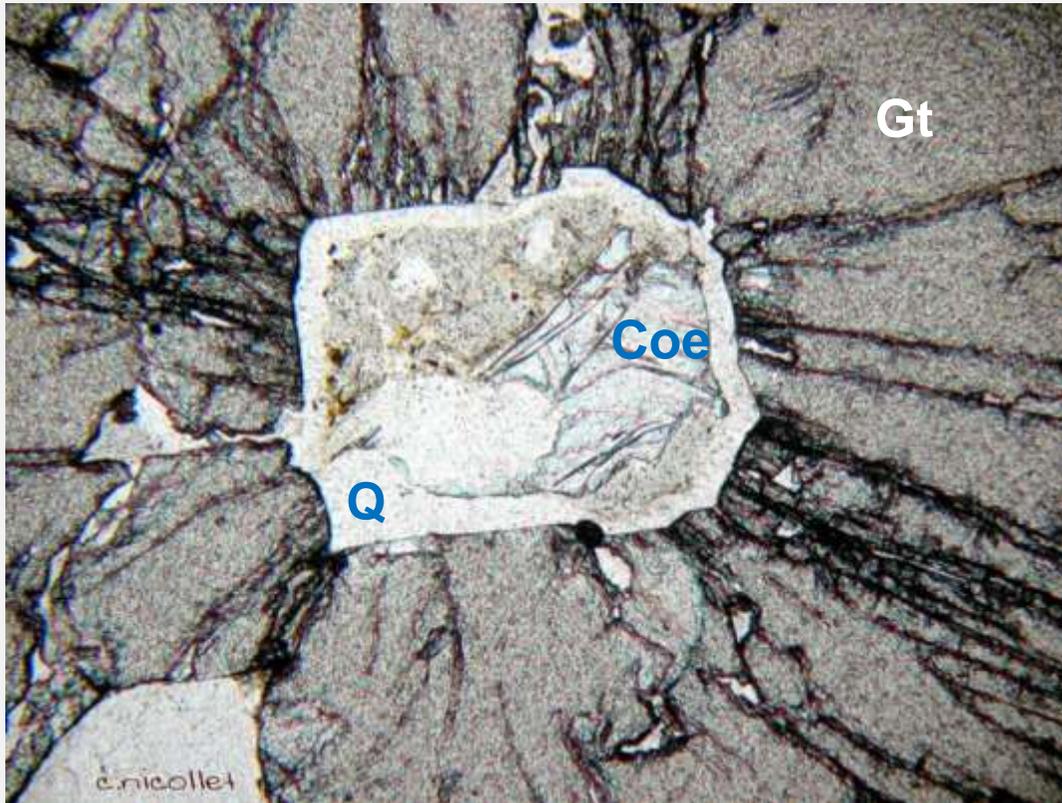
cor +

bio +



Extrait de la carte de Rivesaltes (1/50 000)

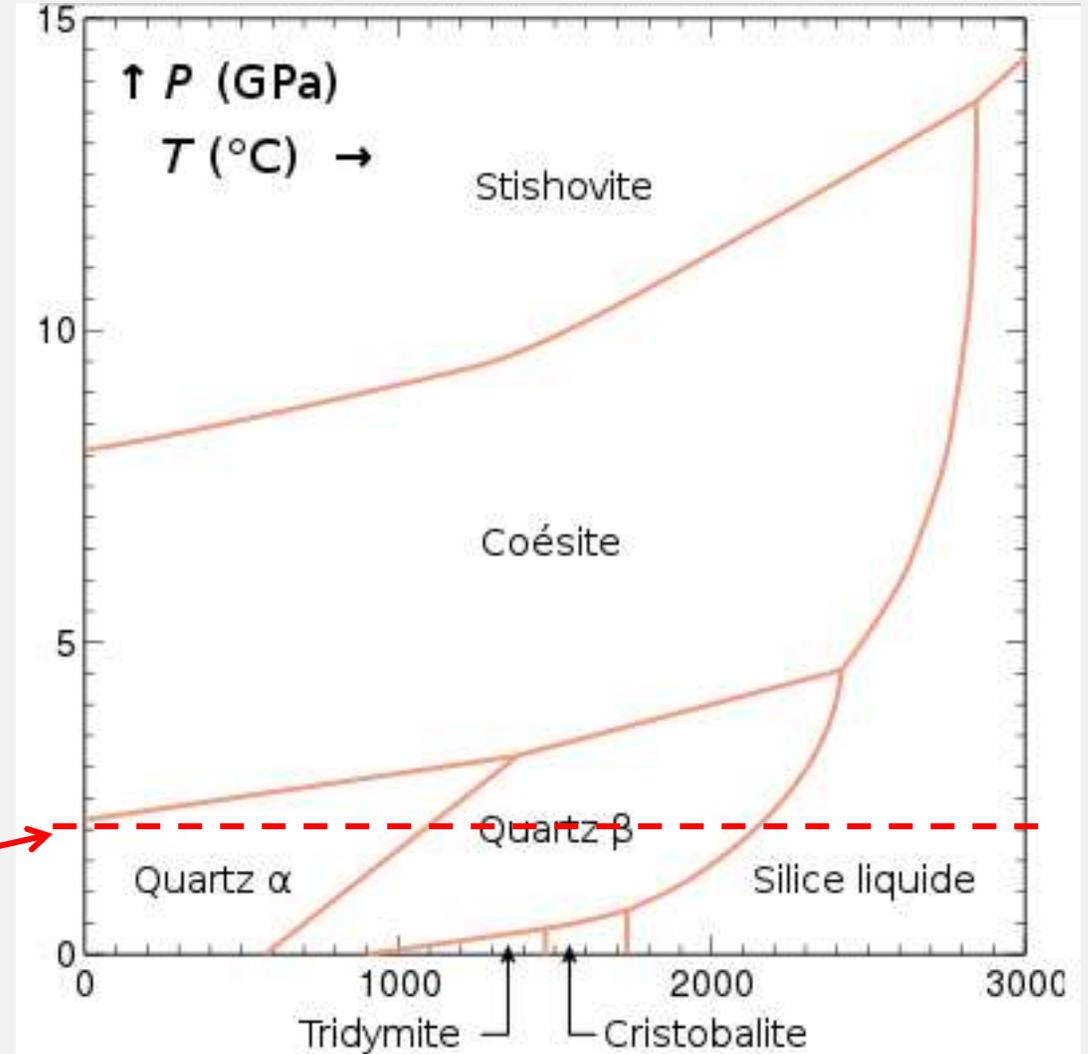
# La coésite, un géobaromètre



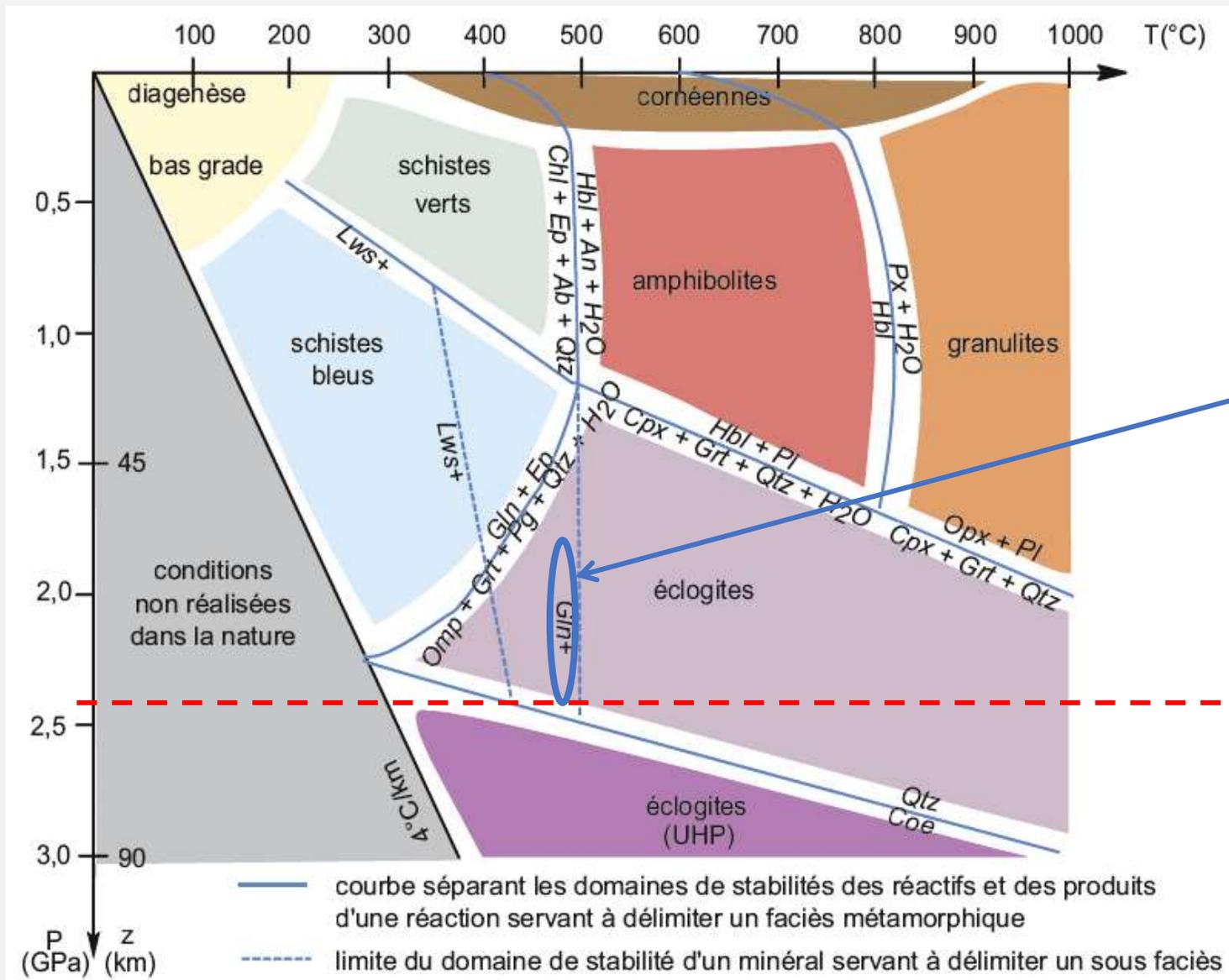
Quartzite à coésite de Dora Maira, LPNA

≈ 2,5 Gpa

Gradient de pression lithostatique = 0,3 kbar/km  
→ Profondeur > 75 km



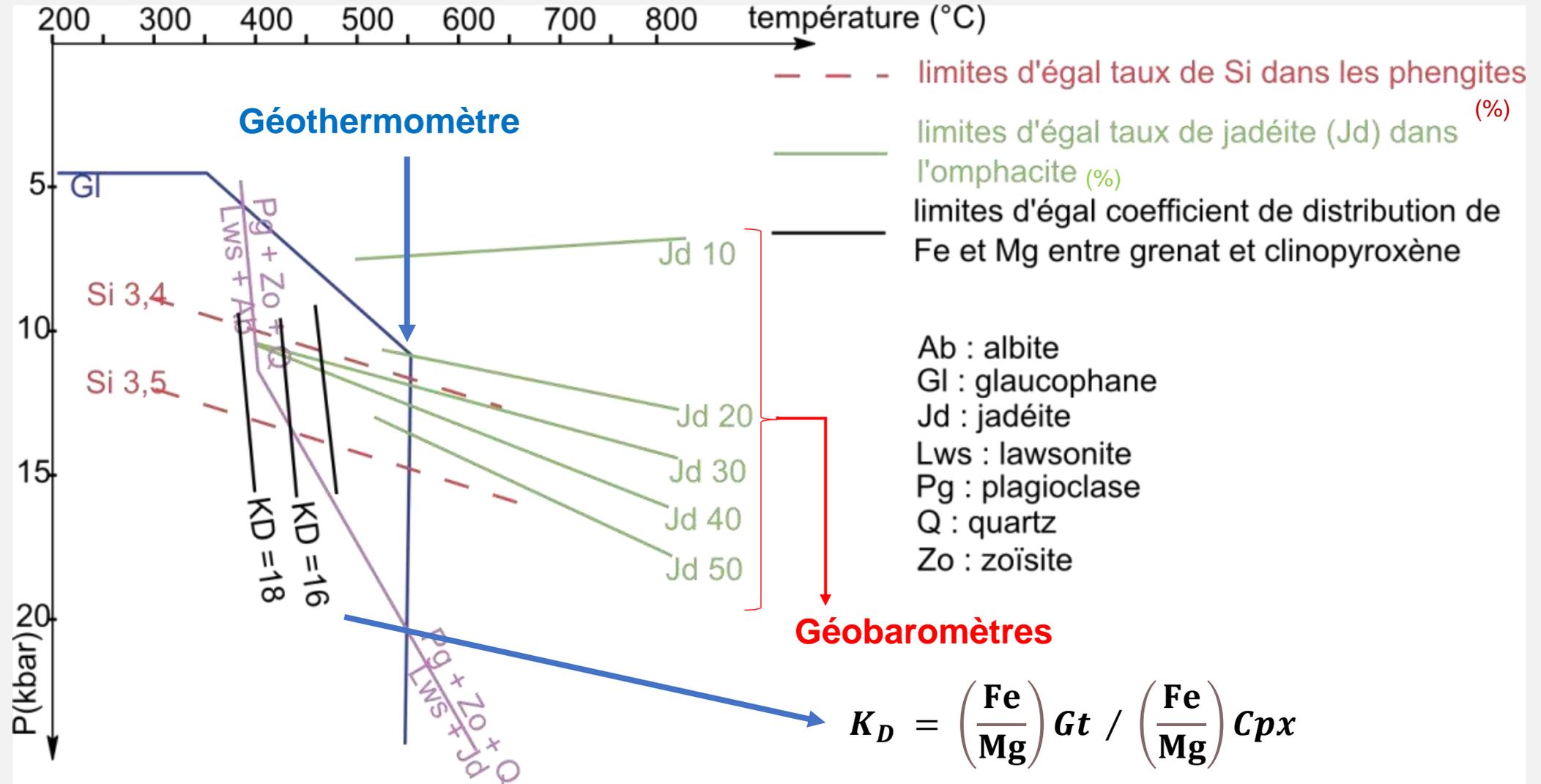
# Document 5. Domaines (P, T) des faciès métamorphiques.



Glaucophane : géothermomètre

Coésite : géobaromètre

# Document 7. Données géothermobarométriques relatives au métagabbro.



# Application :

## ***Quantification des conditions de métamorphisme d'un métagabbro du Viso***



On reconnaît le grenat rouge, l'omphacite verte, le glaucophane bleu marine, l'épidote vert-jaune, le quartz blanc...

**Paragenèse :**

|                    |                             |
|--------------------|-----------------------------|
| <b>grenat</b>      | <b>quartz</b>               |
| <b>omphacite</b>   | <b>phengite</b>             |
| <b>glaucophane</b> | <b>rutile,</b>              |
| <b>épidote</b>     | <b>zoïsite</b>              |
|                    | <b>absence de lawsonite</b> |

### Document 6. Paragenèses caractéristiques des faciès métamorphiques.

| <b>Faciès</b>         | <b>Roches basiques</b>  |
|-----------------------|---|
| <b>Cornéennes</b>     | Hornblende, amphibole Ca<br>+ oxydes (Fe, Ti)   |
| <b>Schistes verts</b> | Albite (plagioclase Na)<br>+ Épidote, $\text{CaFe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$<br>+ Actinote, amphibole Ca<br>+ Chlorite, $(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$  |
| <b>Amphibolites</b>   | Hornblende, amphibole Ca<br>+ Plagioclases<br>+ Grenat Fe, Mg   |
| <b>Schistes bleus</b> | Glaucophane (amphibole Na)<br>+ Épidote, $\text{CaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ ou Lawsonite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$<br>+ Grenat Fe, Mg  |
| <b>Eclogites</b>      | Grenat Mg<br>+ Omphacite, solution solide de clinopyroxènes dont jadéite (pôle Na) ou Lawsonite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$<br>+ Zoïsite, variété d'épidote<br>+ Quartz<br>Rutile ( $\text{TiO}_2$ )<br>Coésite ( $\text{SiO}_2$ ) : faciès Ultra Haute Pression |
| <b>Granulites</b>     | Pyroxènes<br>+ Plagioclases<br>+ Quartz   |

# Application :

## **Quantification des conditions de métamorphisme d'un métagabbro du Viso**



On reconnaît le grenat rouge, l'omphacite verte, le glaucophane bleu marine, l'épidote vert-jaune, le quartz blanc...

### Paragenèse :

**grenat**                      **quartz**  
**omphacite**                **phengite**  
**glaucophane**            **rutile,**  
**épidote**                    **zoïsite**  
**absence de lawsonite**

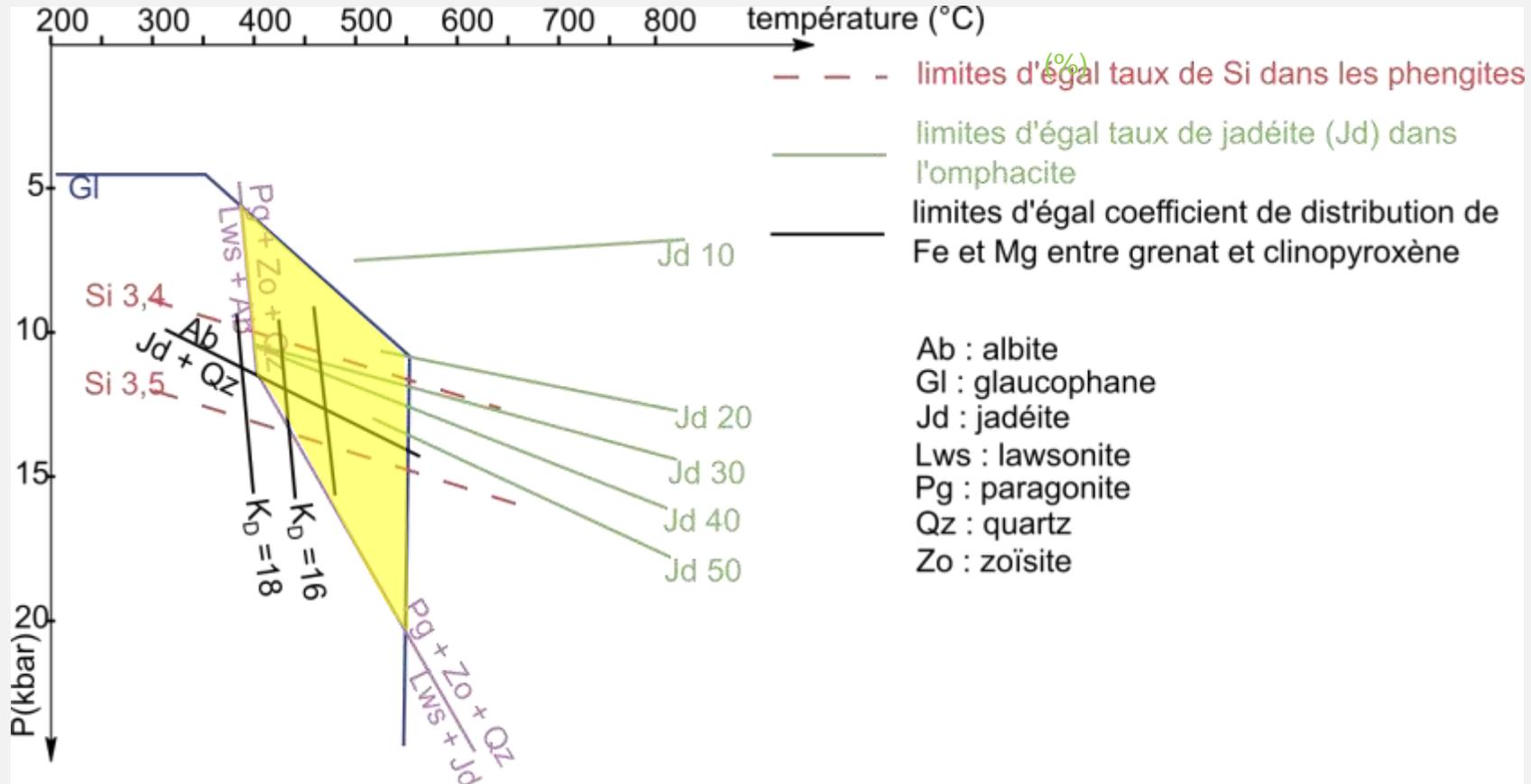
### Document 6. Paragenèses caractéristiques des faciès métamorphiques.

| Faciès                | Roches basiques  |
|-----------------------|--|
| <b>Cornéennes</b>     | Hornblende, amphibole Ca<br>+ oxydes (Fe, Ti)  |
| <b>Schistes verts</b> | Albite (plagioclase Na)<br>+ Épidote, $\text{CaFe}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$<br>+ Actinote, amphibole Ca<br>+ Chlorite, $(\text{Mg, Fe, Al})_6(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$   |
| <b>Amphibolites</b>   | Hornblende, amphibole Ca<br>+ Plagioclases<br>+ Grenat Fe, Mg  |
| <b>Schistes bleus</b> | <b>Glaucophane</b> (amphibole Na)<br>+ Épidote, $\text{CaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$ ou <b>Lawsonite</b> , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$<br>+ <b>Grenat</b> Fe, Mg   |
| <b>Eclogites</b>      | <b>Grenat</b> Mg<br>+ <b>Omphacite</b> , solution solide de clinopyroxènes dont jadéite (pôle Na) ou <b>Lawsonite</b> , $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$<br>+ <b>Zoïsite</b> , variété d'épidote<br>+ <b>Quartz</b><br><b>Rutile</b> ( $\text{TiO}_2$ )<br>Coésite ( $\text{SiO}_2$ ) : faciès Ultra Haute Pression |
| <b>Granulites</b>     | Pyroxènes<br>+ Plagioclases<br>+ <b>Quartz</b>   |

# Application :

## ***Quantification des conditions de métamorphisme d'un métagabbro du Viso***

### Données géothermobarométriques :



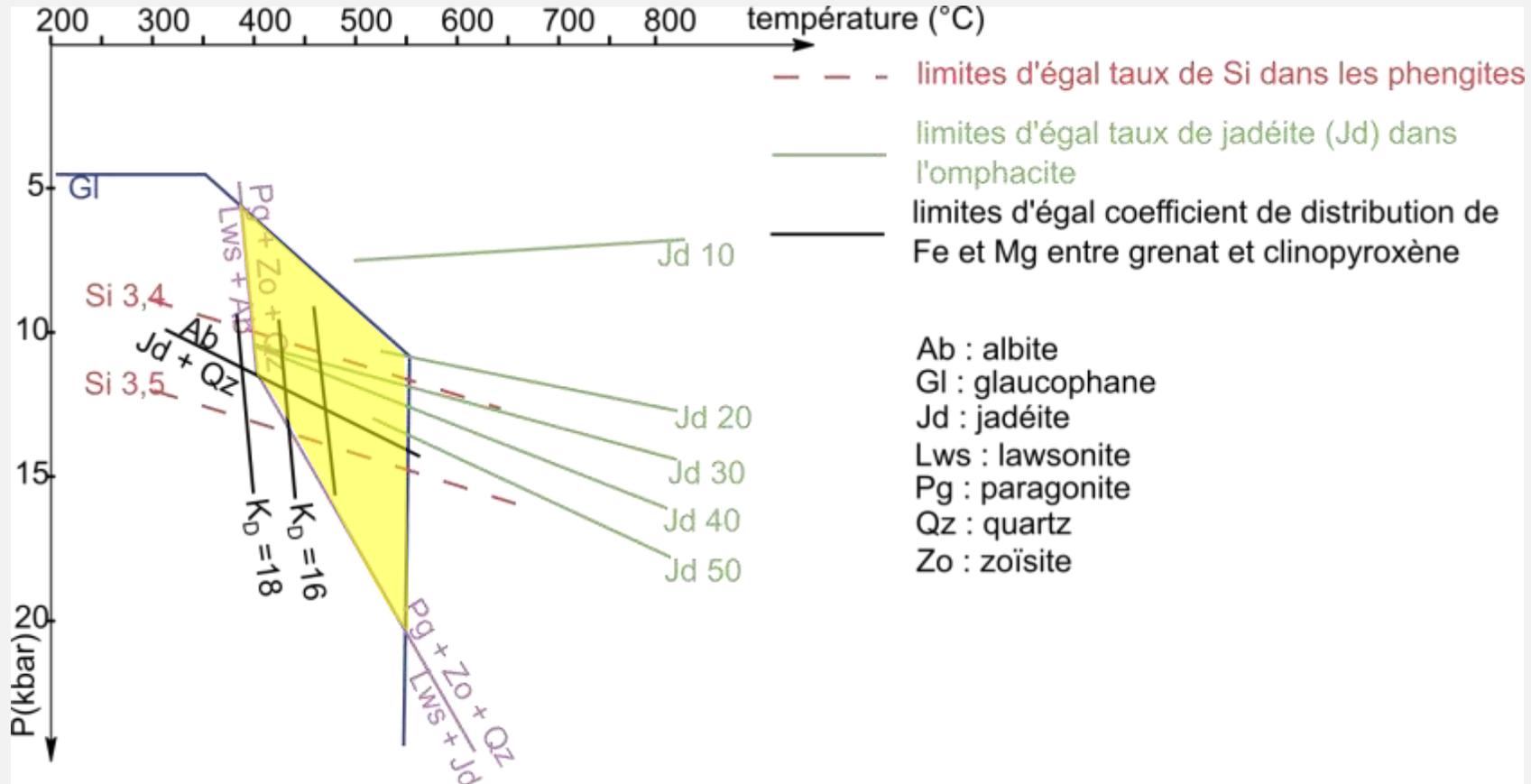
**Paragenèse** : glaucophane, grenat, omphacite (mélange de clinopyroxènes, dont la jadéite constitue le pôle sodique), phengite (mica blanc stable à haute pression), quartz, rutile (oxyde de titane), zoïsite (variété d'épidote) ; absence de lawsonite.

# Application :

## *Quantification des conditions de métamorphisme d'un métagabbro du Viso*

### Données géothermobarométriques :

$$X_{Jd} = 0,39$$
$$Si = 3,41$$
$$K_D = 16$$



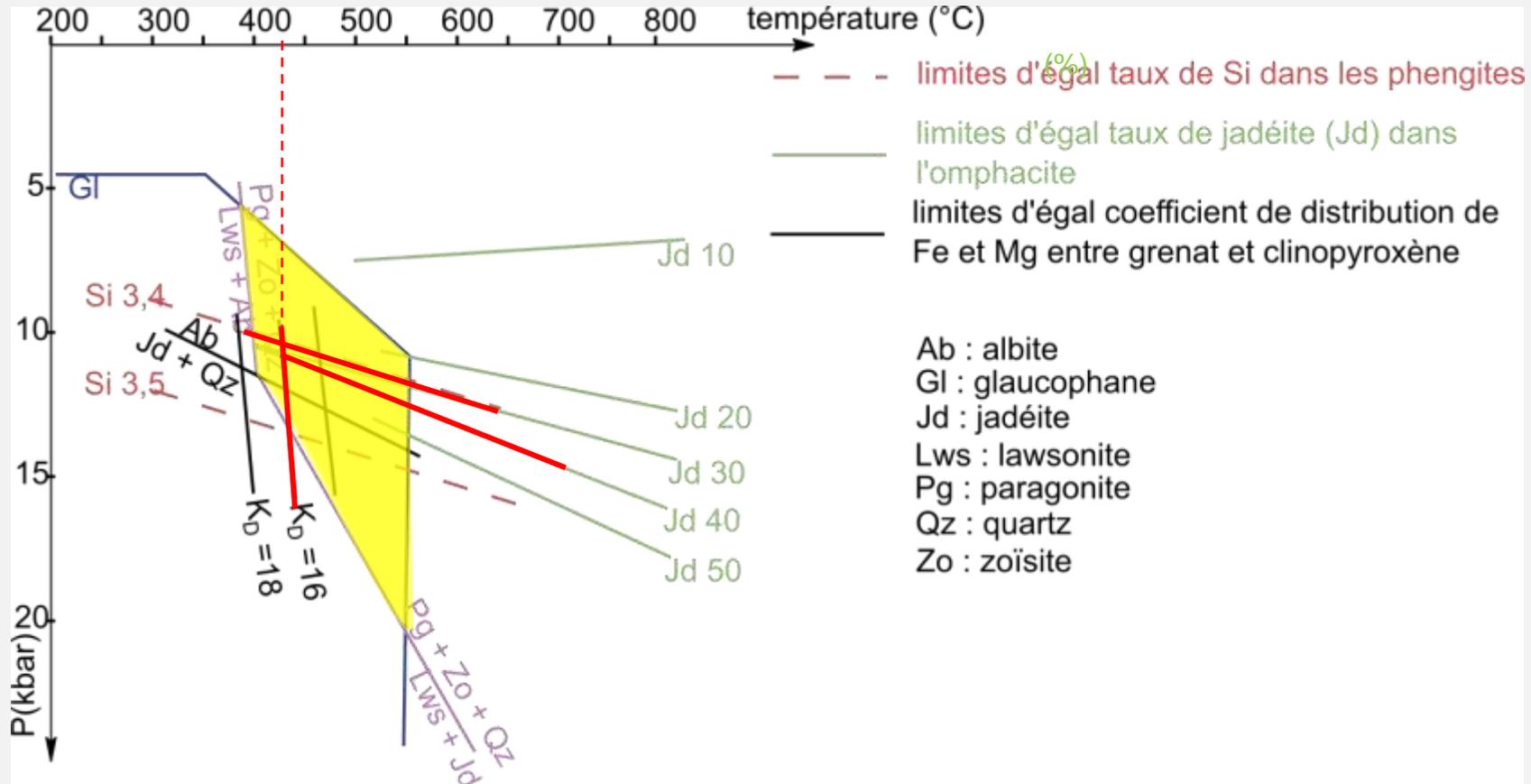
**Paragenèse :** glaucophane, grenat, omphacite (mélange de clinopyroxènes, dont la jadéite constitue le pôle sodique), phengite (mica blanc stable à haute pression), quartz, rutile (oxyde de titane), zoïsite (variété d'épidote); absence de lawsonite.

# Application :

## *Quantification des conditions de métamorphisme d'un métagabbro du Viso*

### Données géothermobarométriques :

$$X_{Jd} = 0,39$$
$$Si = 3,41$$
$$K_D = 16$$



**Paragenèse :** glaucophane, grenat, omphacite (mélange de clinopyroxènes, dont la jadéite constitue le pôle sodique), phengite (mica blanc stable à haute pression), quartz, rutile (oxyde de titane), zoïsite (variété d'épidote); absence de lawsonite.

# Une migmatite

Partie grenue,  
fondue puis  
recristallisée  
= **mobilitat**

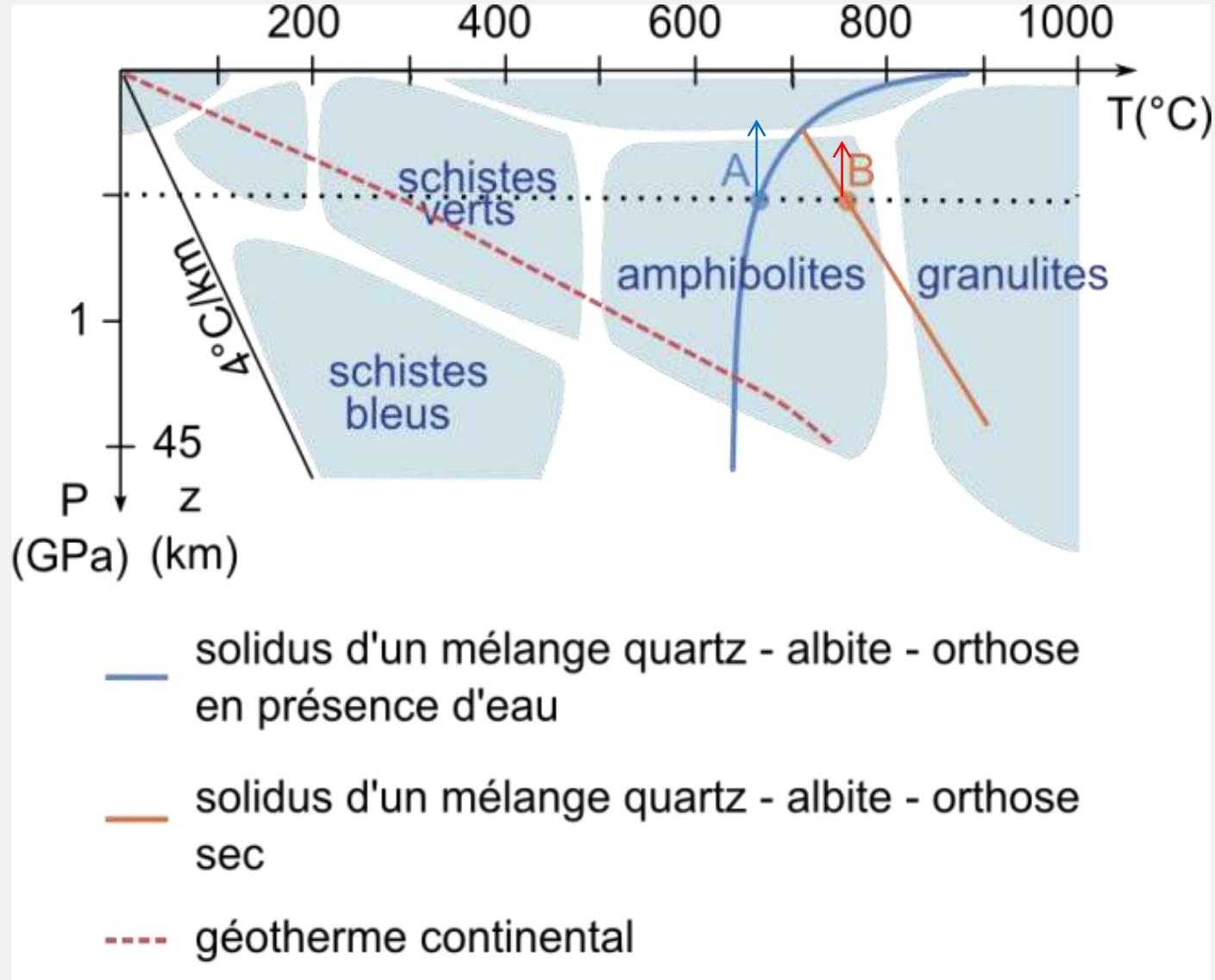


Partie foliée,  
non fondue  
= **restite**

## Document 8. Comparaison des domaines pression-température des faciès métamorphiques de haute température avec le solidus d'un mélange quartz-albite-orthose.

↑ Le magma A se solidifie dès qu'il remonte = migmatites

↑ Le magma B remonte sans se solidifier tout de suite



# Un exemple de métamorphisme en système ouvert : le métamorphisme hydrothermal

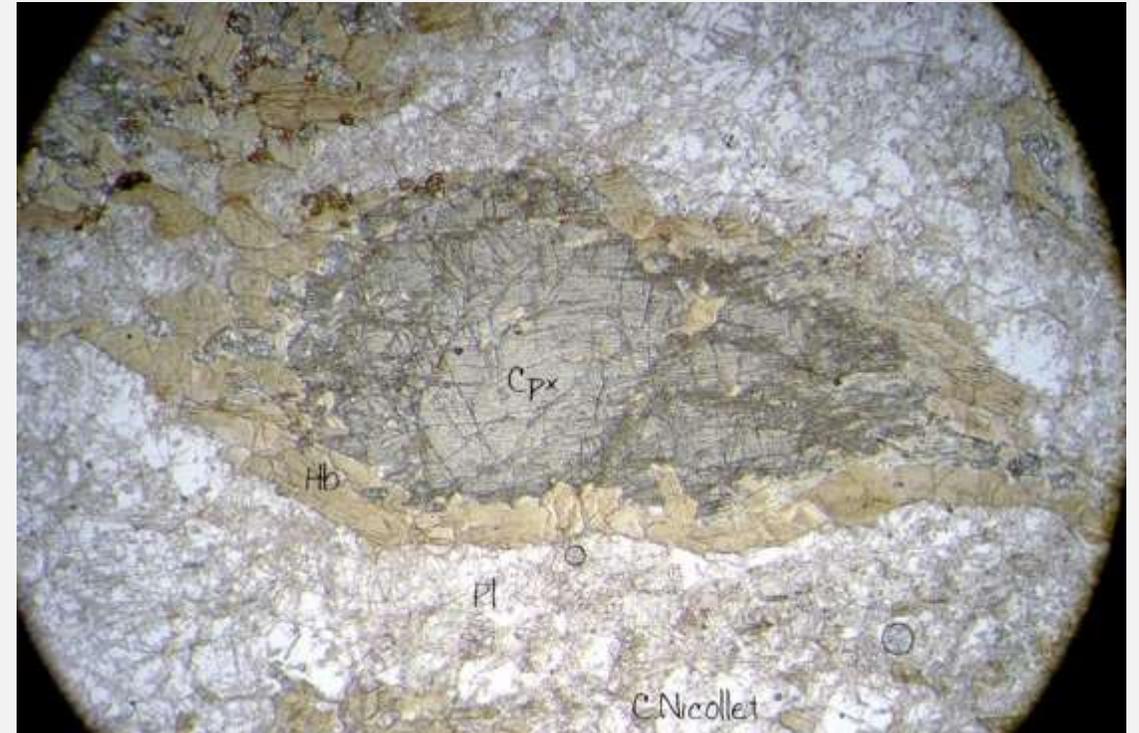
Métagabbro :

A l'échelle de l'échantillon

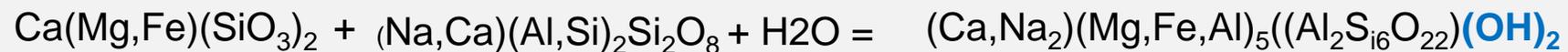
En lame mince (LPNA)

Couronne de  
hornblende  
(noire et mate)

Pyroxène  
(gris)



pyroxène + plagioclase + eau = **amphibole**



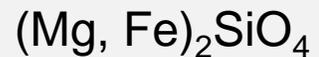
**Phase hydroxylée**

# Un exemple de métamorphisme en système ouvert : le métamorphisme hydrothermal



Une enclave de péridotite  
dans un basalte  
(Mont Briançon, 43)

**Formation de minéraux  
hydroxylés à partir de l'olivine :**



Photographie : Pierre Thomas

**Détail d'une partie du front de taille d'une carrière  
de serpentinite, Chatillon (Val d'Aoste, Italie)**

# Le métamorphisme hydrothermal : observations et données géophysiques



**Fumeur noir sur la dorsale Est Pacifique à - 2 600 m**

PHARE2002 Ifremer

270 à 380 °C

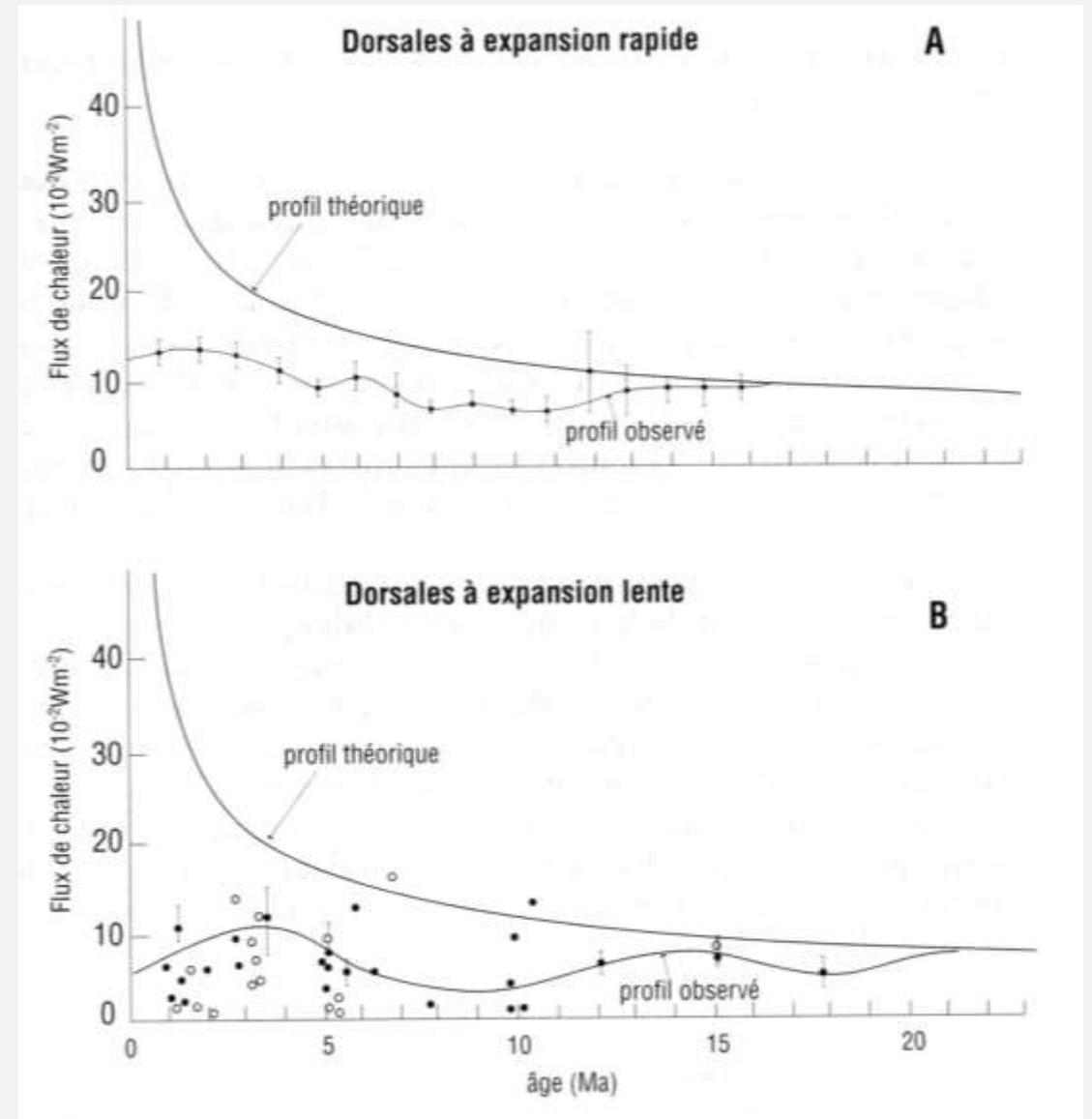
[H<sub>2</sub>S] très élevée

[O<sub>2</sub>] nulle



**Nodules précipités à proximité de fumeurs noirs**

UCSB, Univ. S. Carolina, NOAA, WHOI



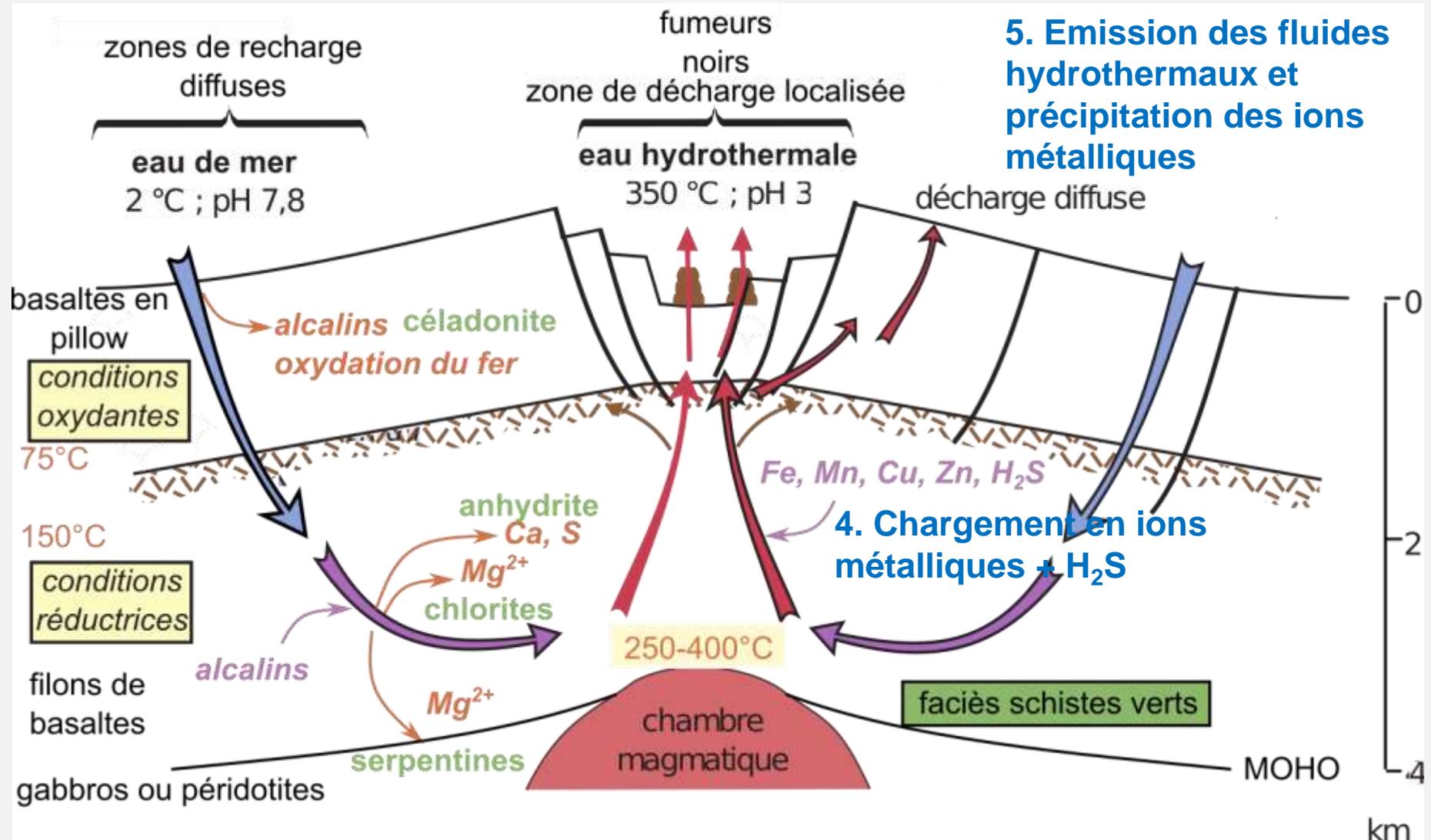
**Comparaison profil de flux de chaleur théorique** (calculé en supposant un refroidissement par conduction) **et flux de chaleur observé** (Juteau, Maury géologie de la croûte océanique)

# Document 9. Transformations minéralogiques associées à l'hydrothermalisme océanique.

1. Infiltration de l'eau de mer

2. Echanges d'ions alcalins, formation de minéraux hydratés, d'oxydes de Fe

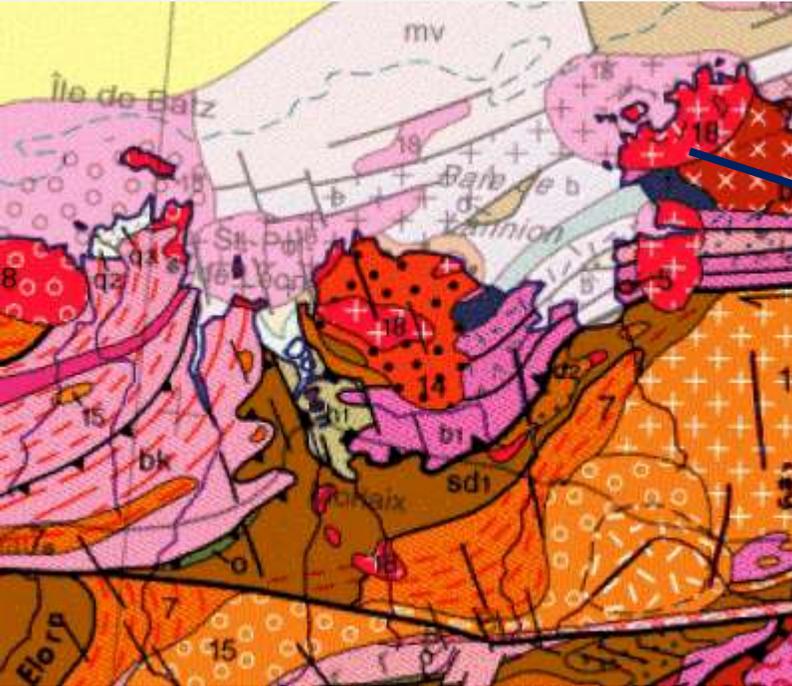
3. Précipitation  $\text{CaSO}_4$ , formation de  $\text{H}_2\text{S}$  et  $\text{FeS}$  entraînés par les fluides, formation serpentine, chlorite, soustraction  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$



5. Emission des fluides hydrothermaux et précipitation des ions métalliques

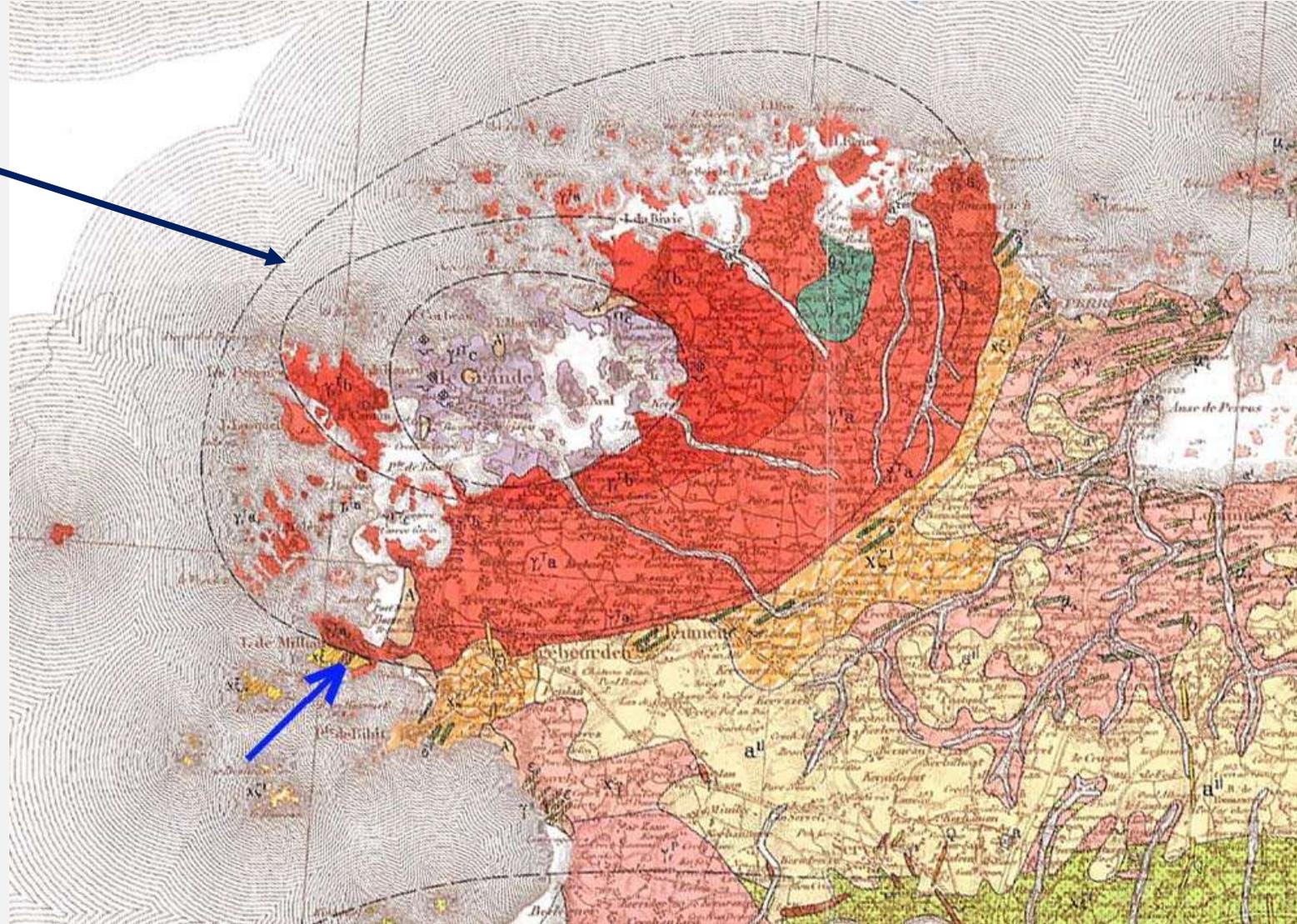
4. Chargement en ions métalliques +  $\text{H}_2\text{S}$

# Le contact Sud du granite de Ploumanac'h sur l'île Milliau (Côtes d'Armor)



Baie de Lannion (Massif Armoricain)

Complexe granitique de Ploumanach  
(carte au 1/80000<sup>e</sup>)  
et localisation du contact étudié





Photographie : Pierre Thomas

**Vue du contact entre le granite et son encaissant.**  
A gauche de la géologue, un filon de ce granite



Photographie : Pierre Thomas

**Gros plan sur le contact granite / encaissant**



Photographie : Pierre Thomas

Observation à quelques  
mètres du contact

## L'encaissant du granite de Ploumanac'h, une cornéenne

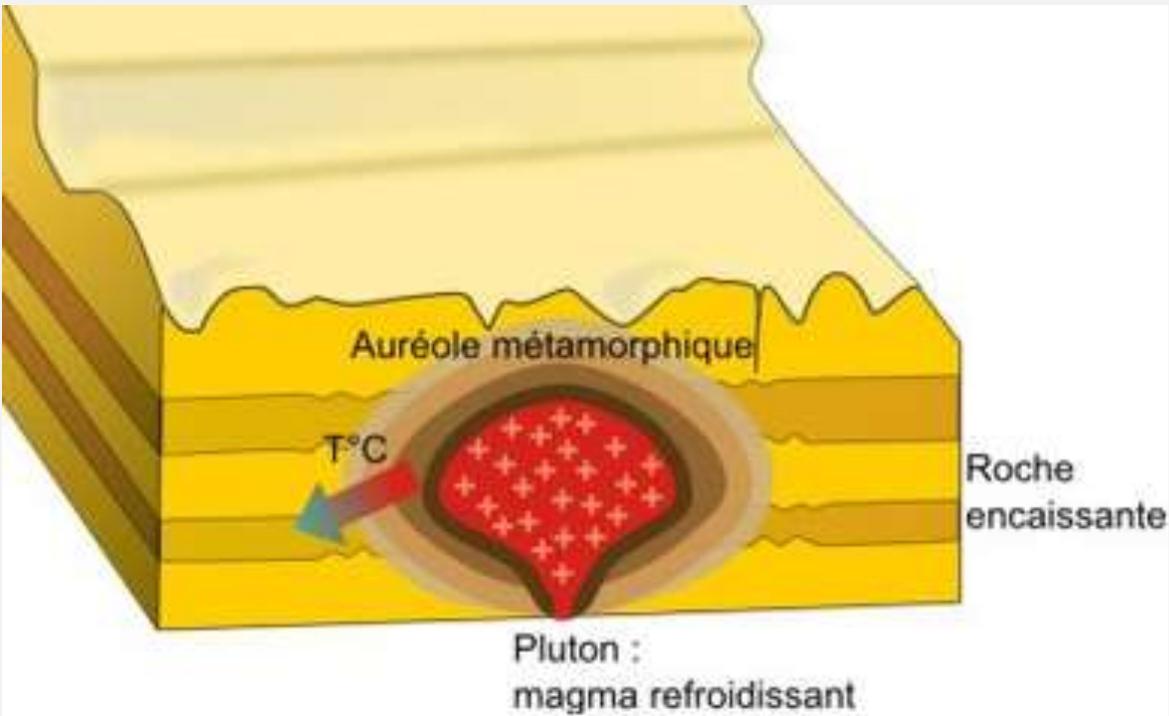
### Vue de détail

Les andalousites (section carrée, parfois losangique) ne se sont développées que dans les niveaux sombres, anciens niveaux argileux.

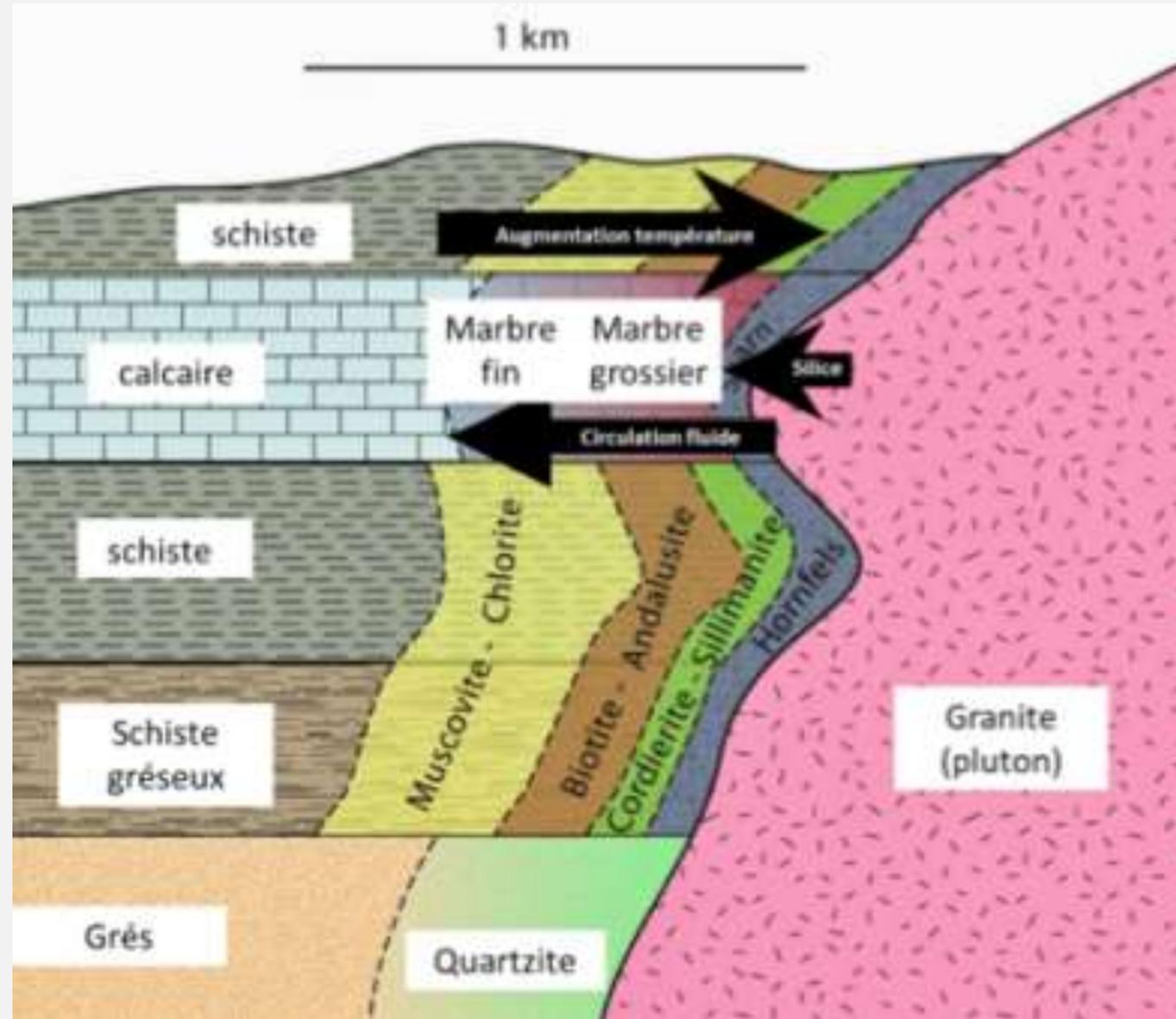


Photographie : Pierre Thomas

# Document 10. Les caractéristiques du métamorphisme de contact.

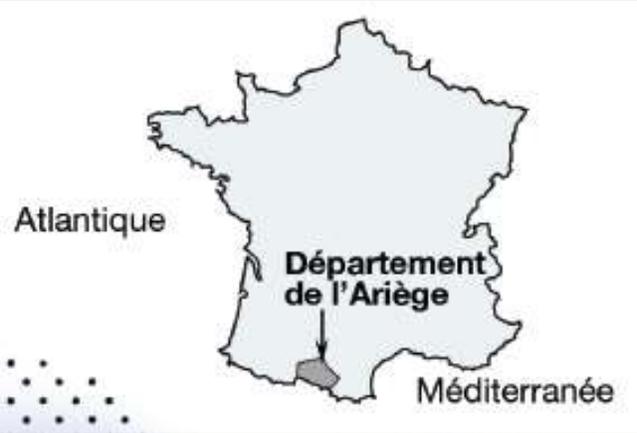


Auréole d'un métamorphisme de contact

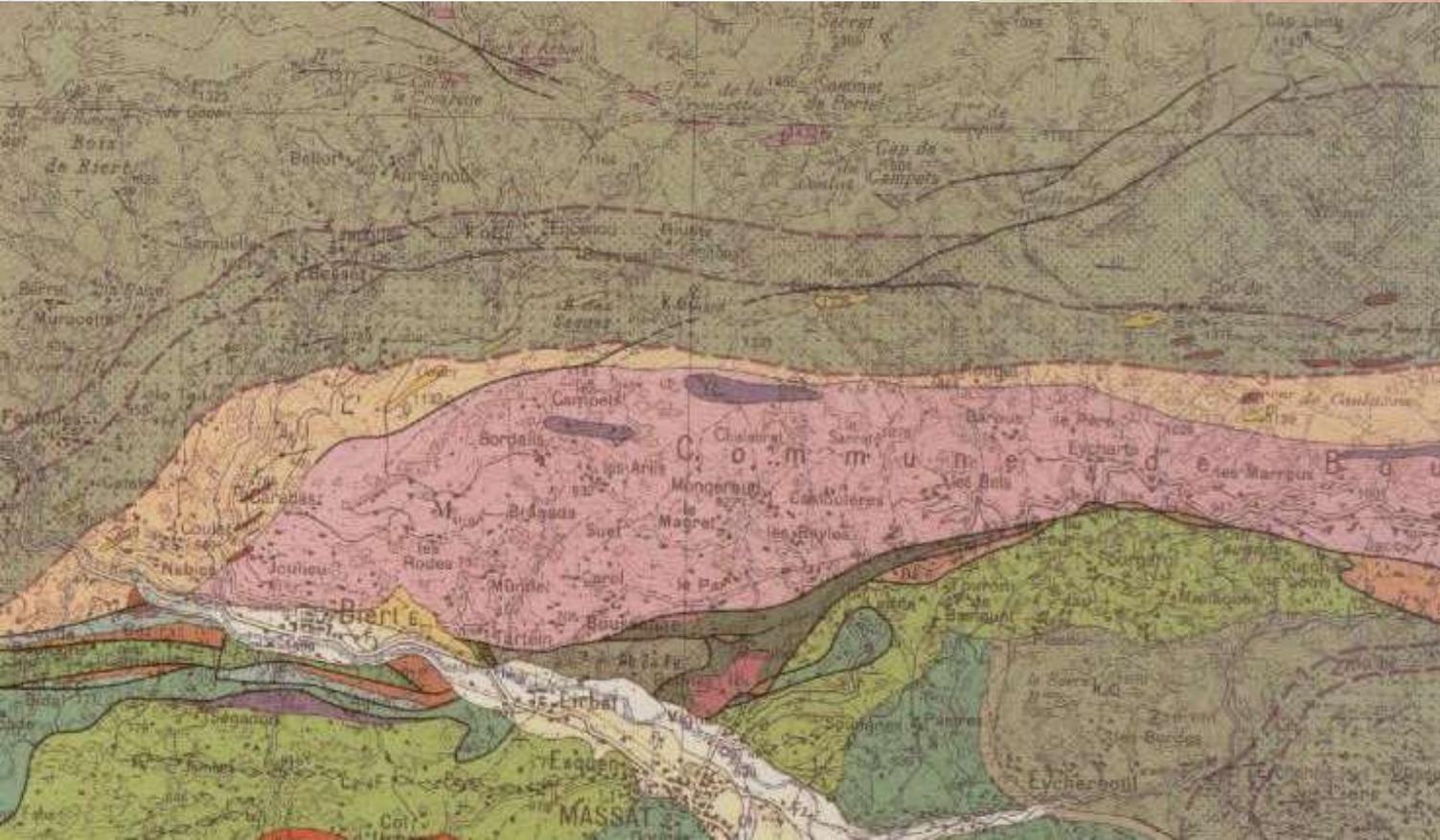


Zonation du métamorphisme autour d'une auréole

# Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize

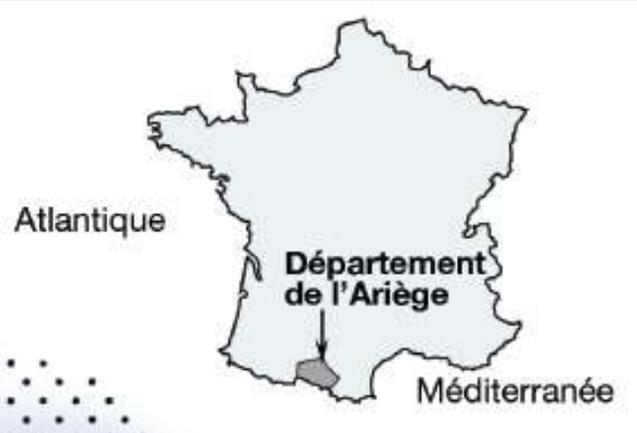


Extrait feuille de St Giron 1/50 000



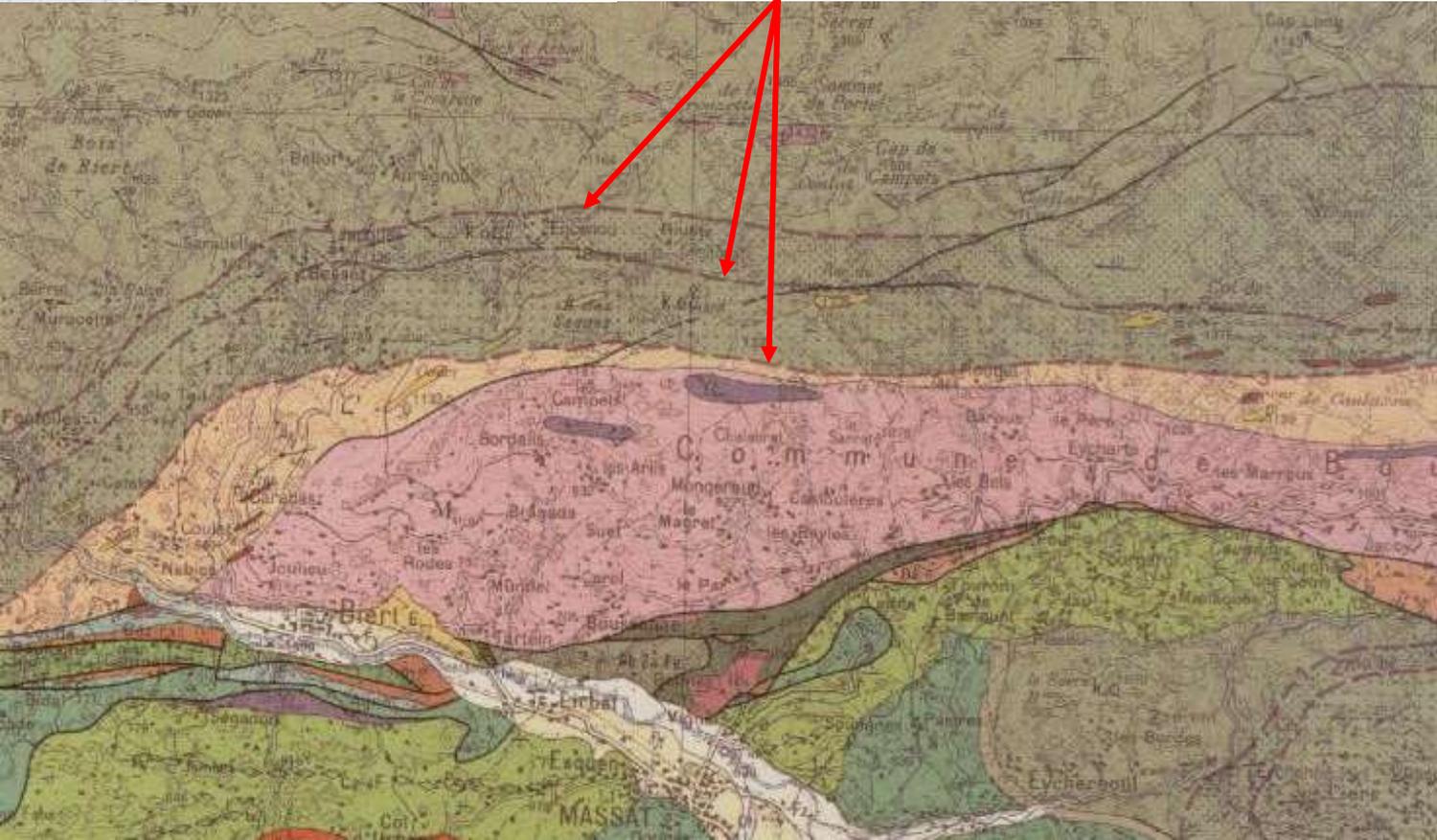
# Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize

## Document 11.

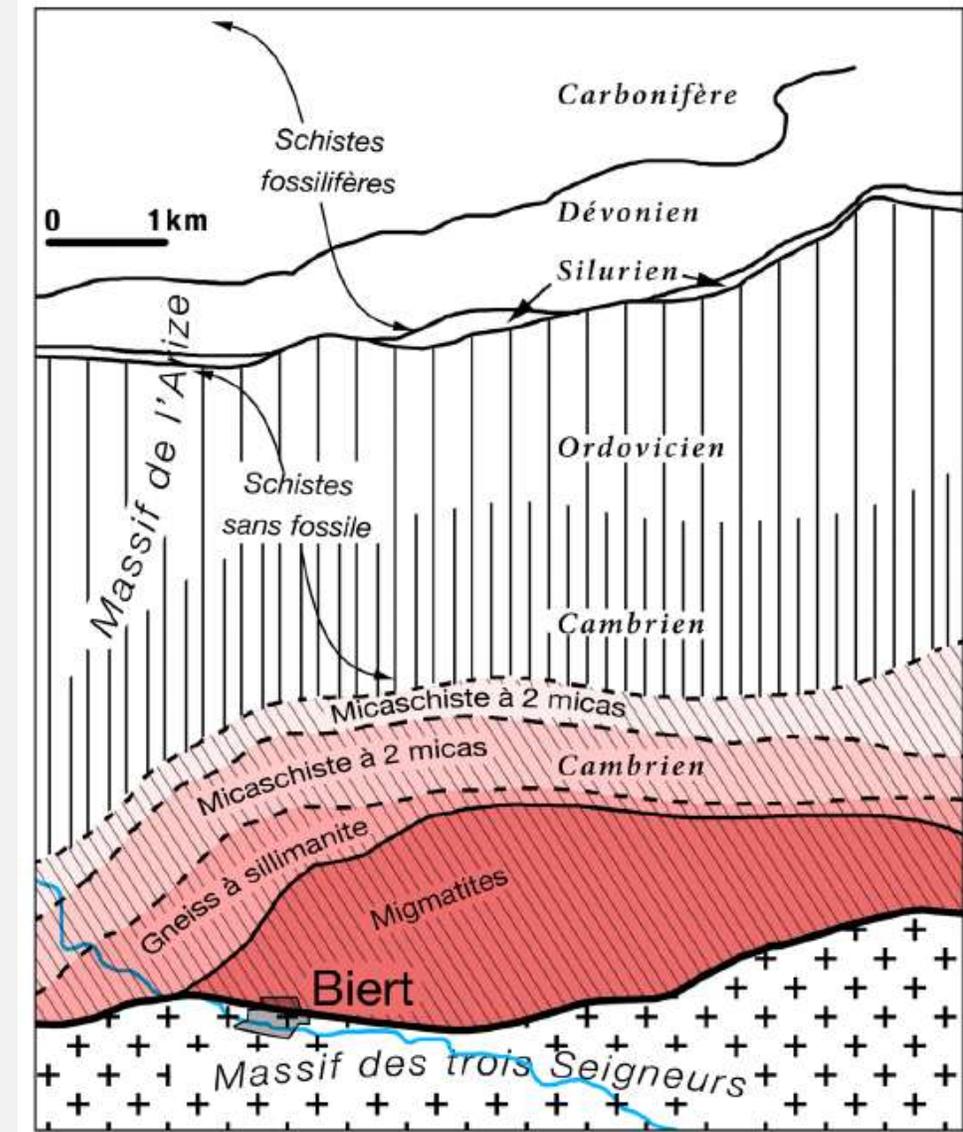


Extrait feuille de St Giron 1/50 000

**isogrades**



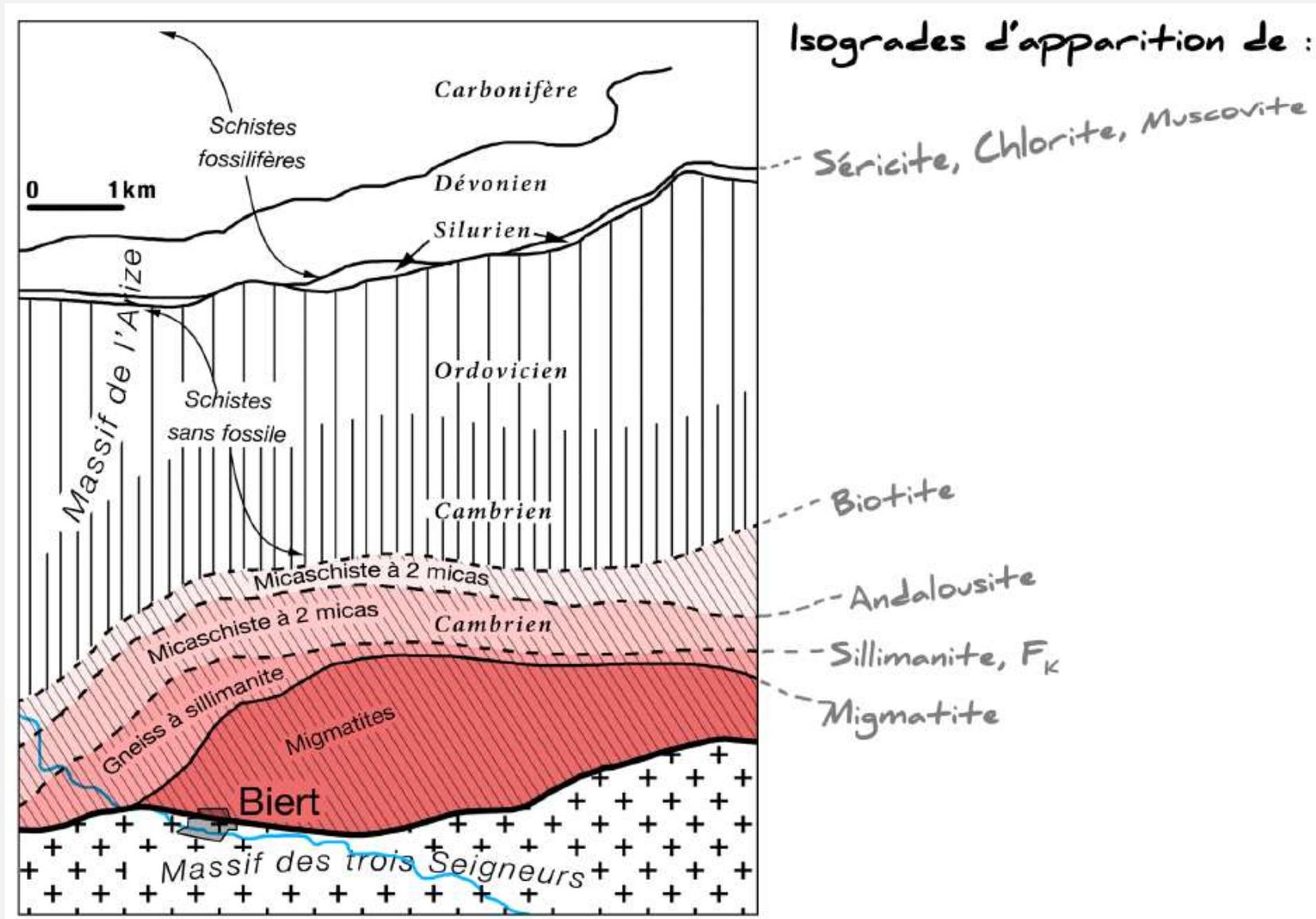
## Schéma structural



B. ANSELME, Professeur en BCPST2, Paris

# Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize

## Schéma structural



Document 11.

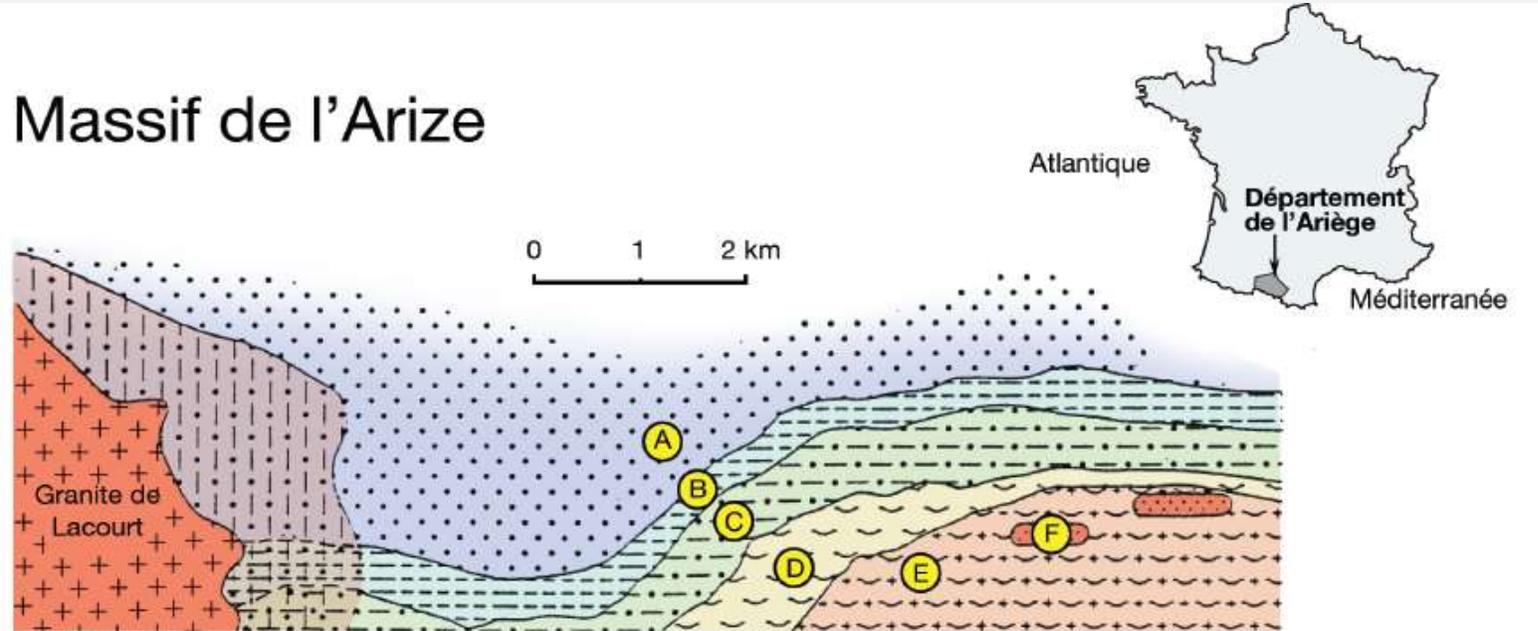


# Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize

## Document 11.

Schéma réalisé à partir de l'extrait de la feuille de St Giron 1/50 000

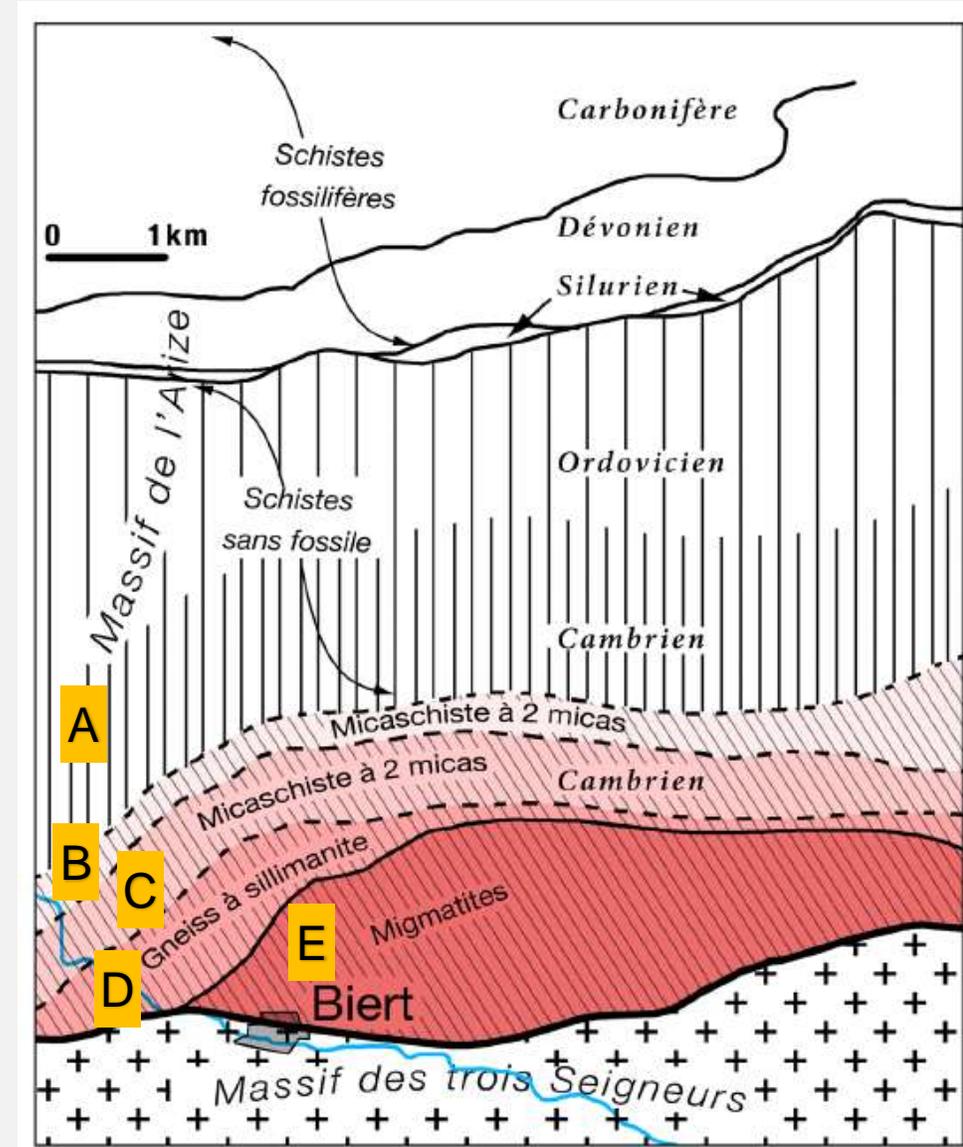
### Massif de l'Arize



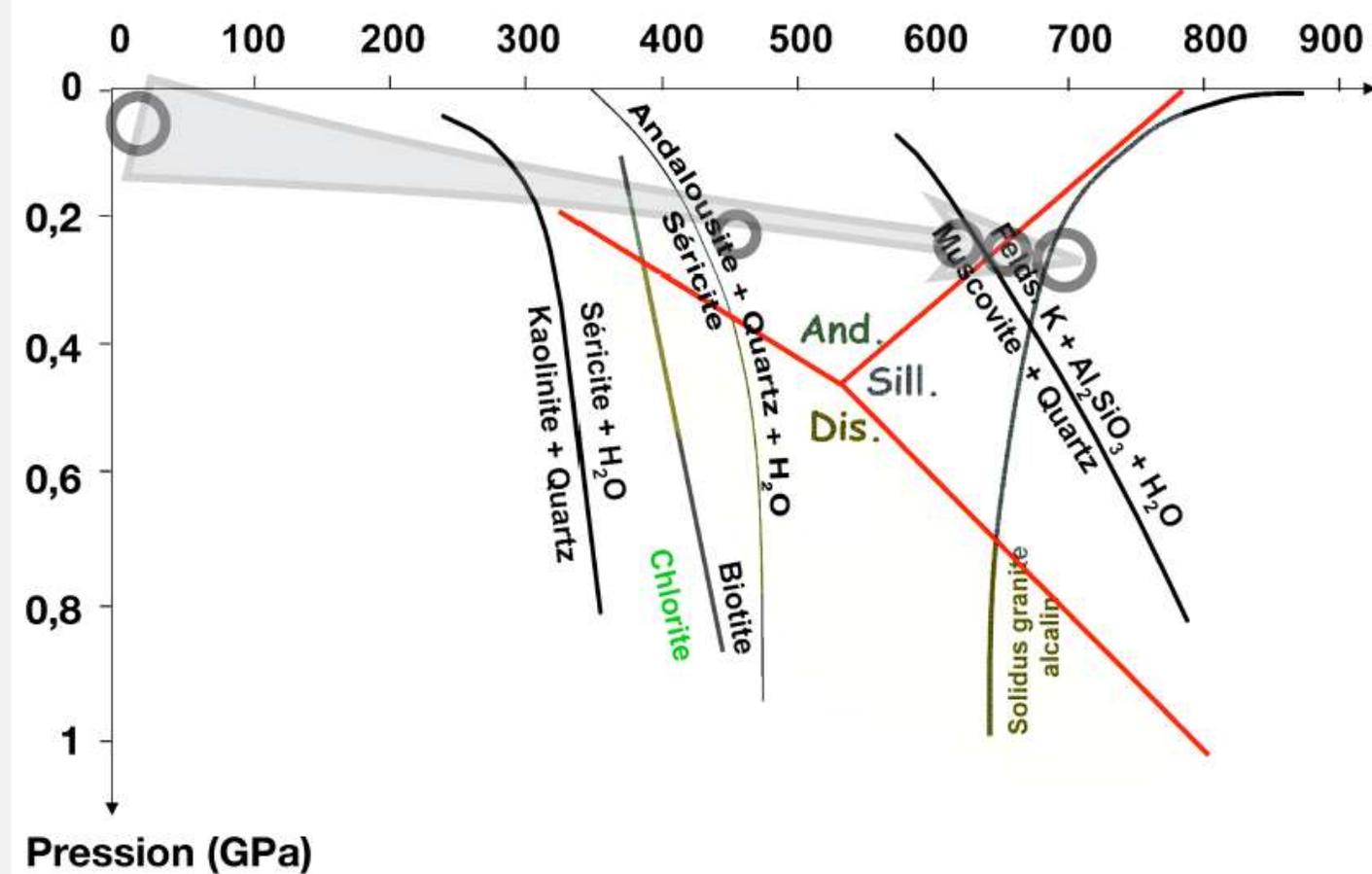
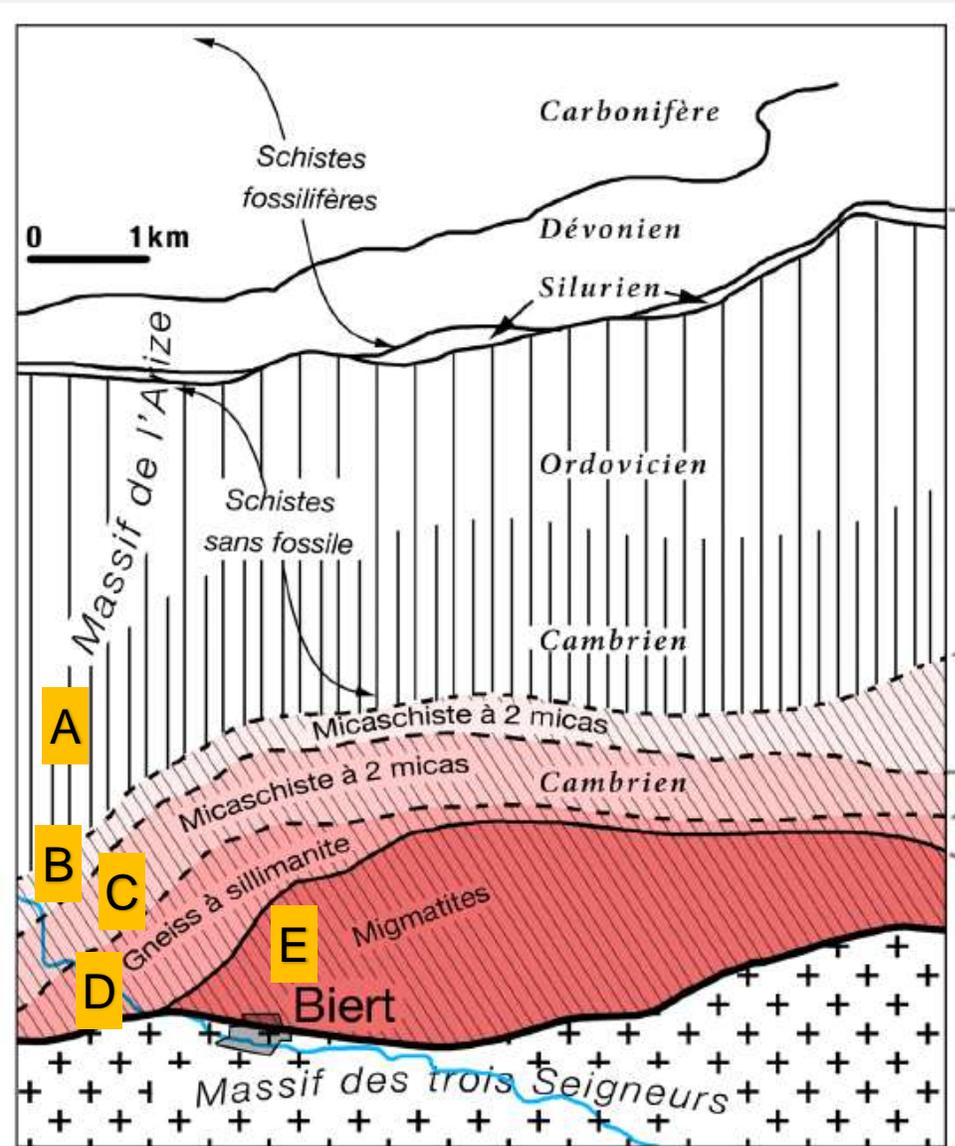
De A à F :  
La composition chimique des roches varie peu  
La teneur en eau diminue progressivement



### Schéma structural

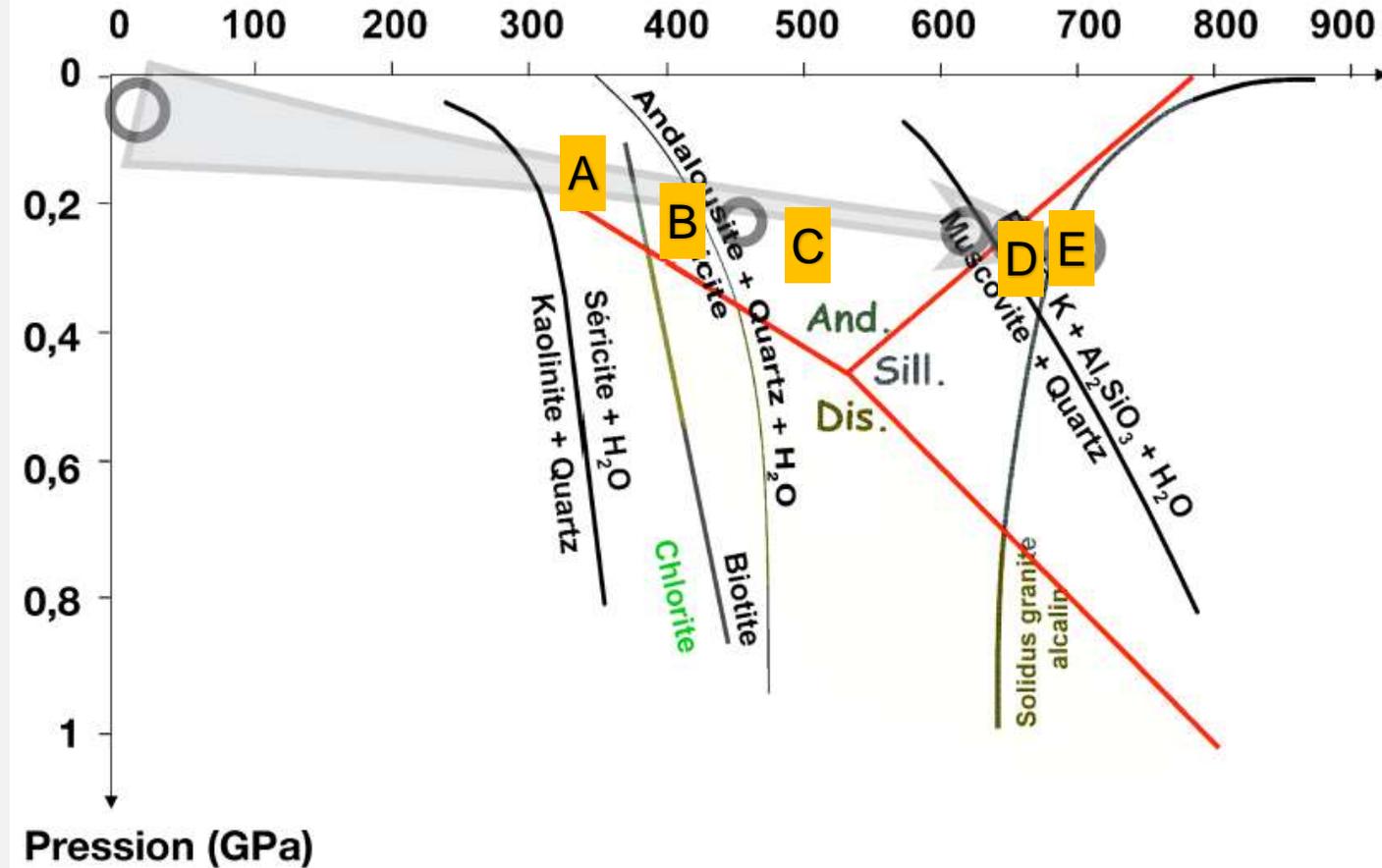
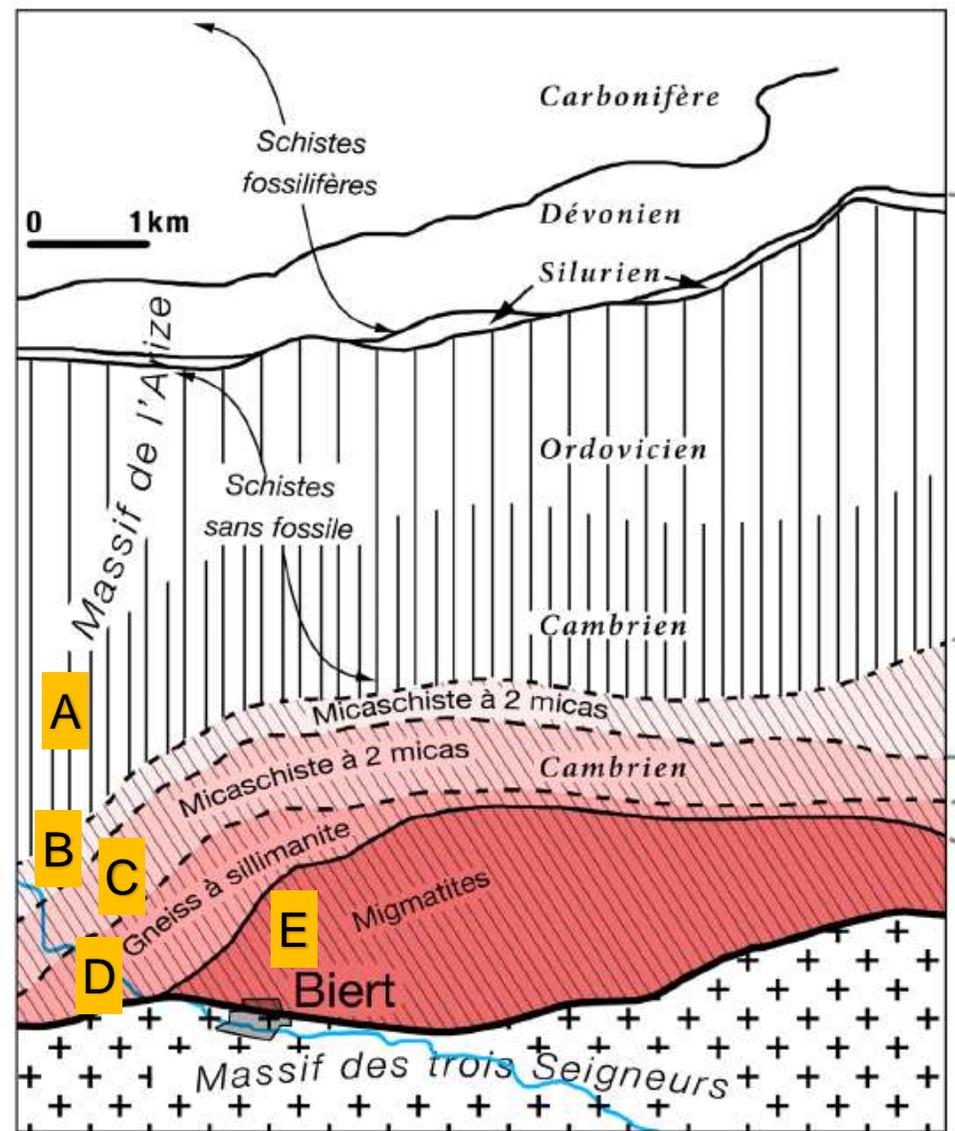


# Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize



**Document 12.** Grille pétrogénétique simplifiée de la séquence pélitique.

# Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize



**Document 12.** Grille pétrogénétique simplifiée de la séquence pélitique.

# Document 13. Les principaux gradients métamorphiques.

- **Le climat BP-HT** (ou série Abukum-Rioké ou type Abukuma) :

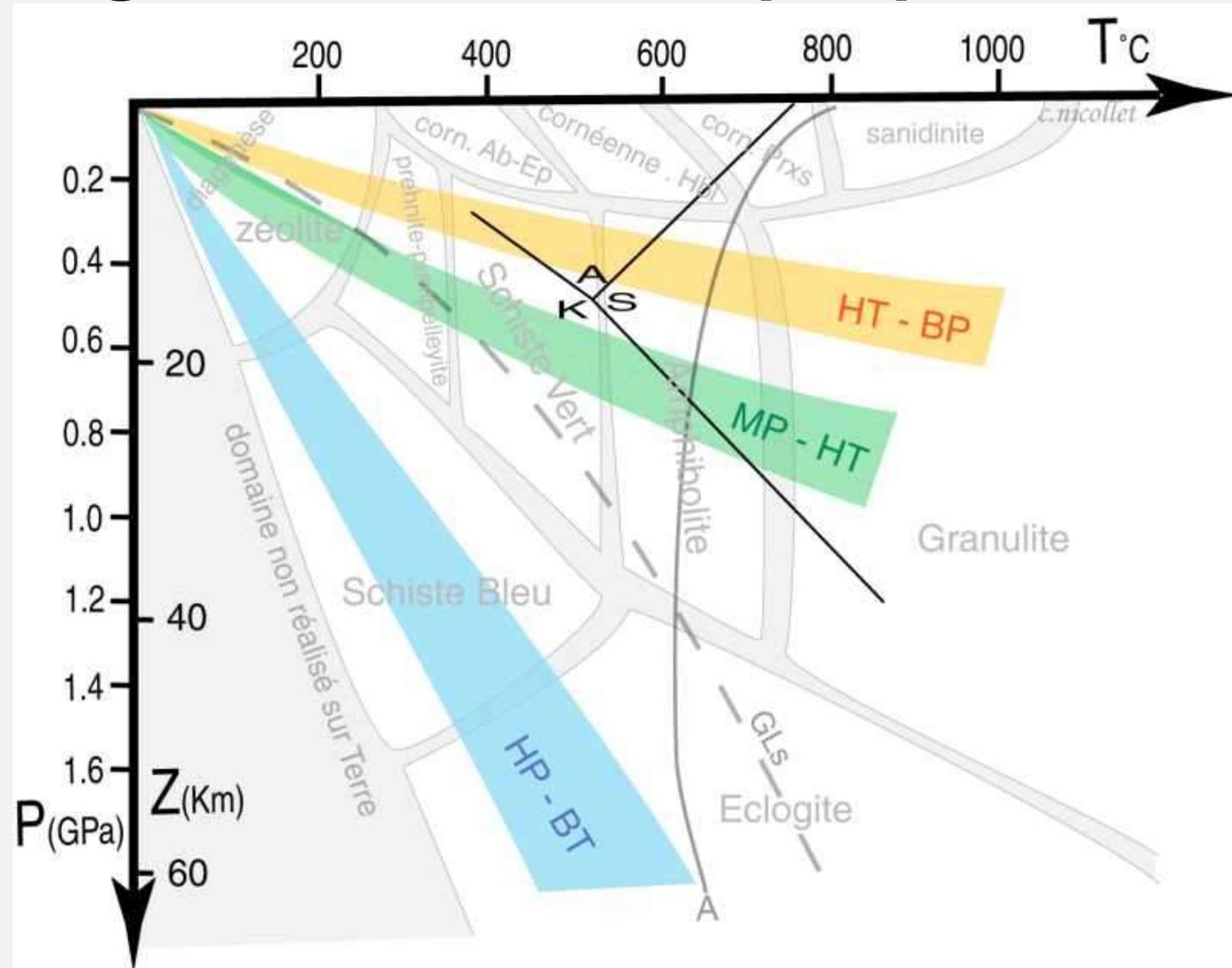
**gradient géothermique fort ( $75^{\circ}/\text{Km}$ )**

- **Le climat MP-MT** (ou série barrovienne) :

**gradient géothermique moyen ( $50^{\circ}/\text{km}$ )**

- **Le climat HP-BT** (ou série franciscaine) :

**gradient géothermique faible ( $25^{\circ}/\text{km}$ )**



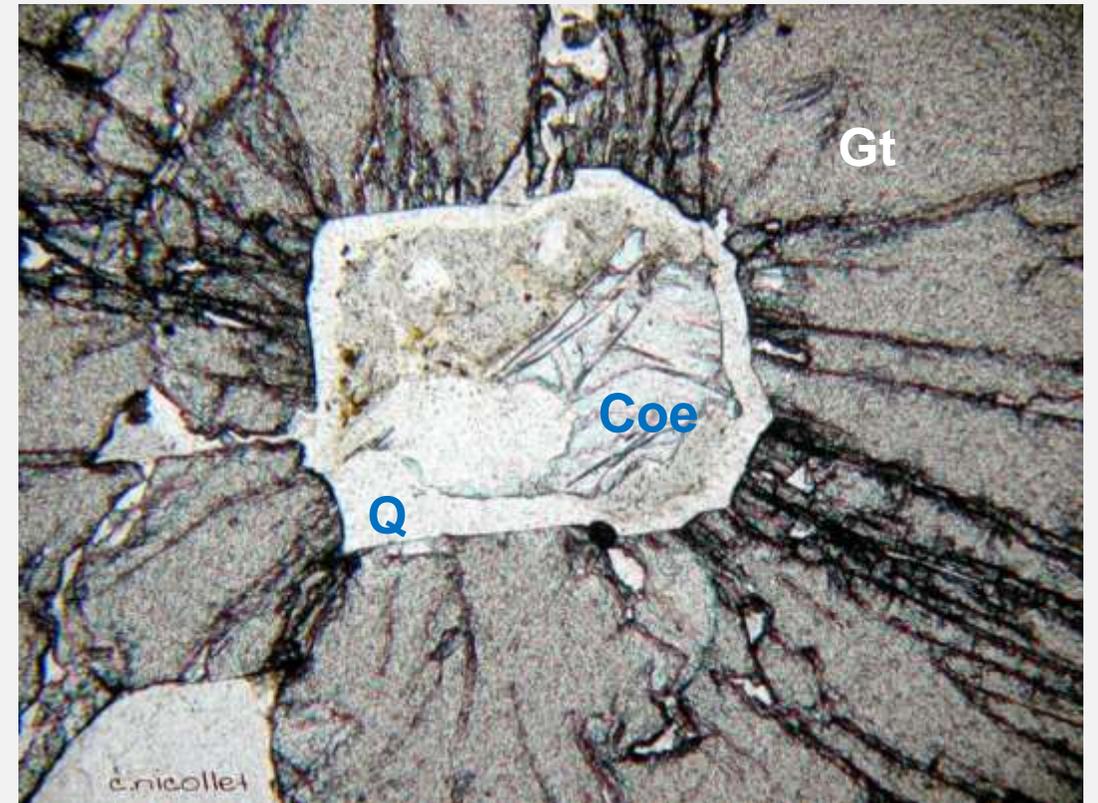
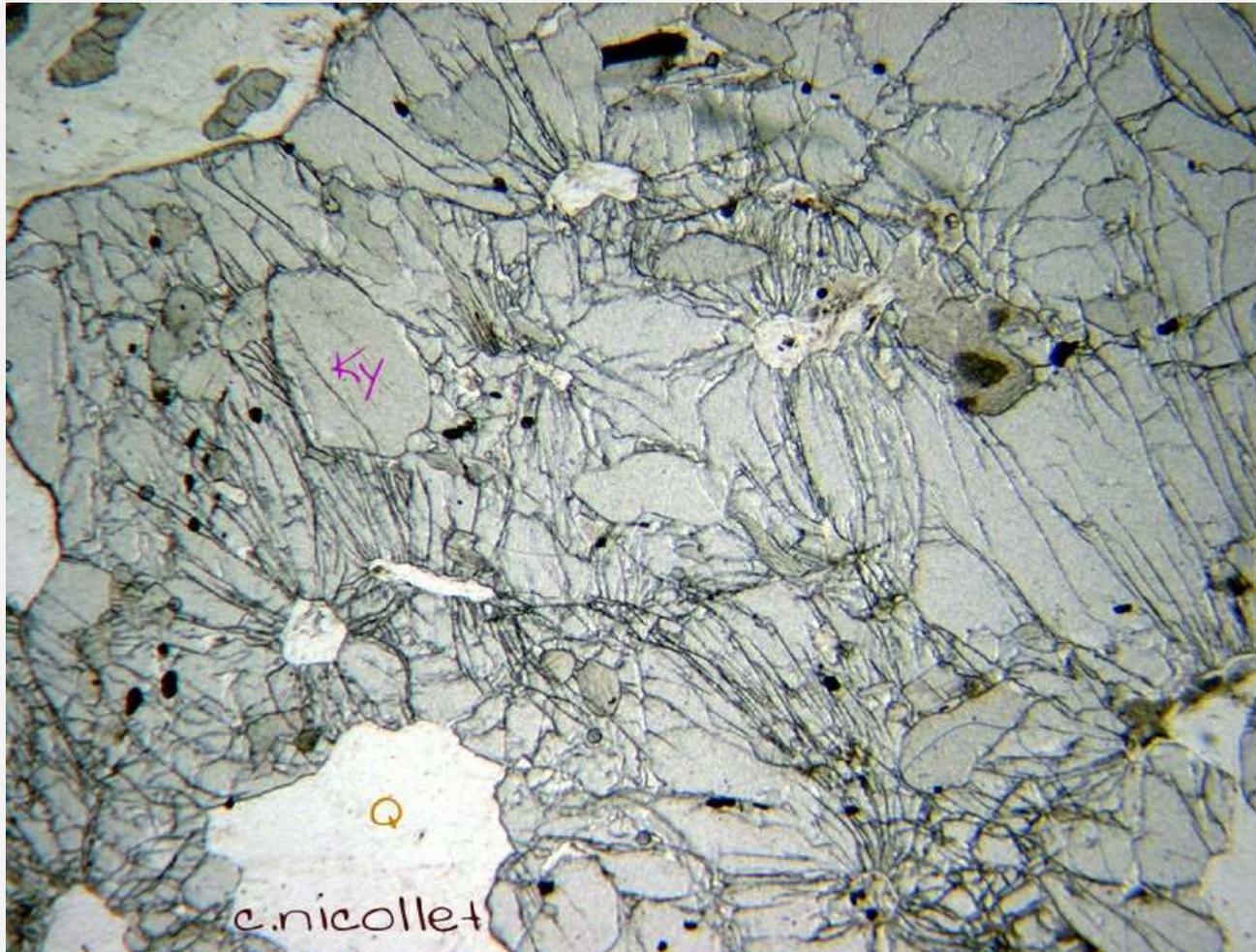
GLs : gradient géothermique moyen d'une lithosphère stable

A : andalousite ; K : disthène ; S : sillimanite

Courbe A : limite le domaine de l'anatexis hydratée

# Etablir une chronologie relative des phases minérales coexistantes : exemple 1

## Quartzite à coésite de Dora Maira, LPNA

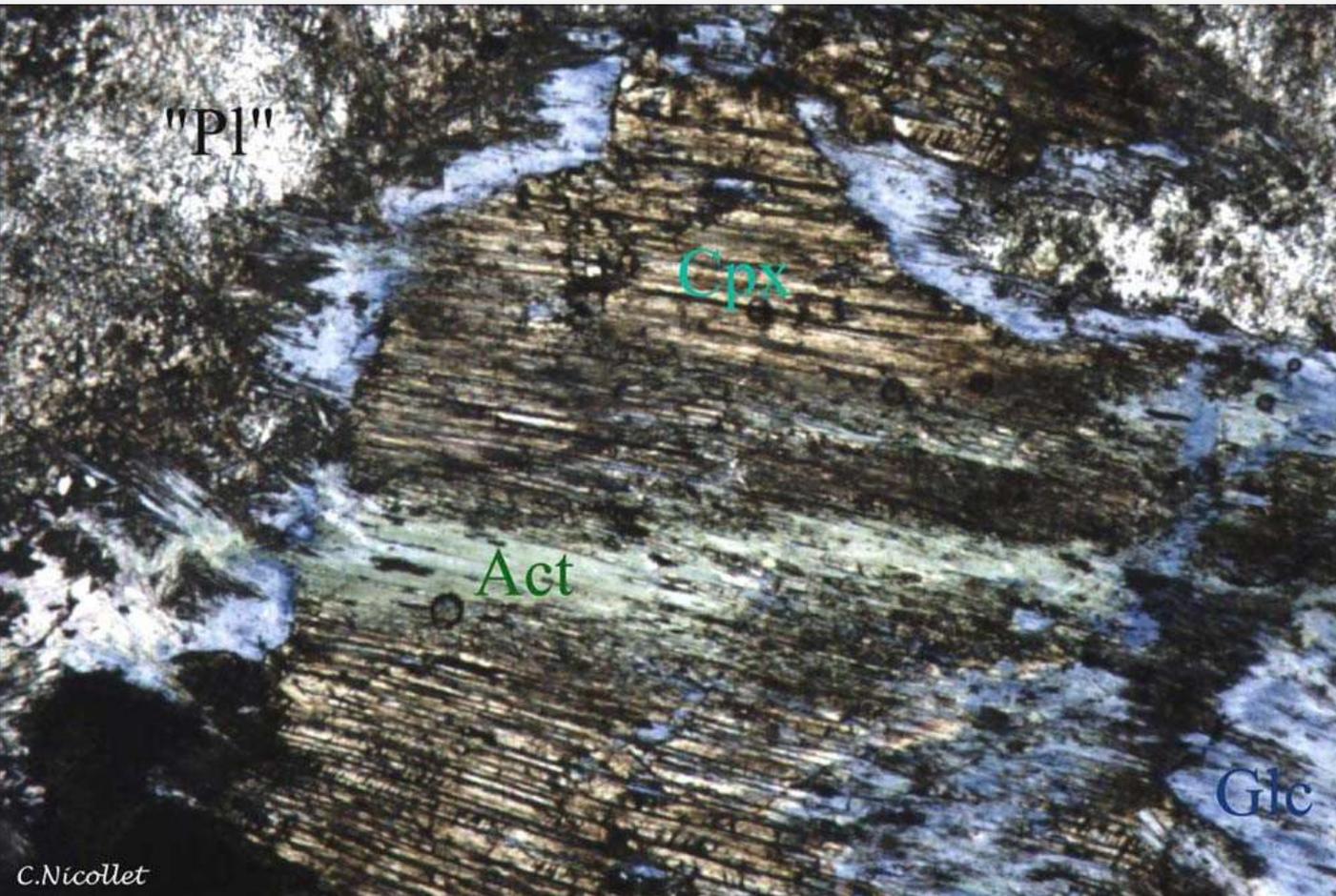


Noter la présence systématique de fractures radiales dans le grenat autour des inclusions de coésite.

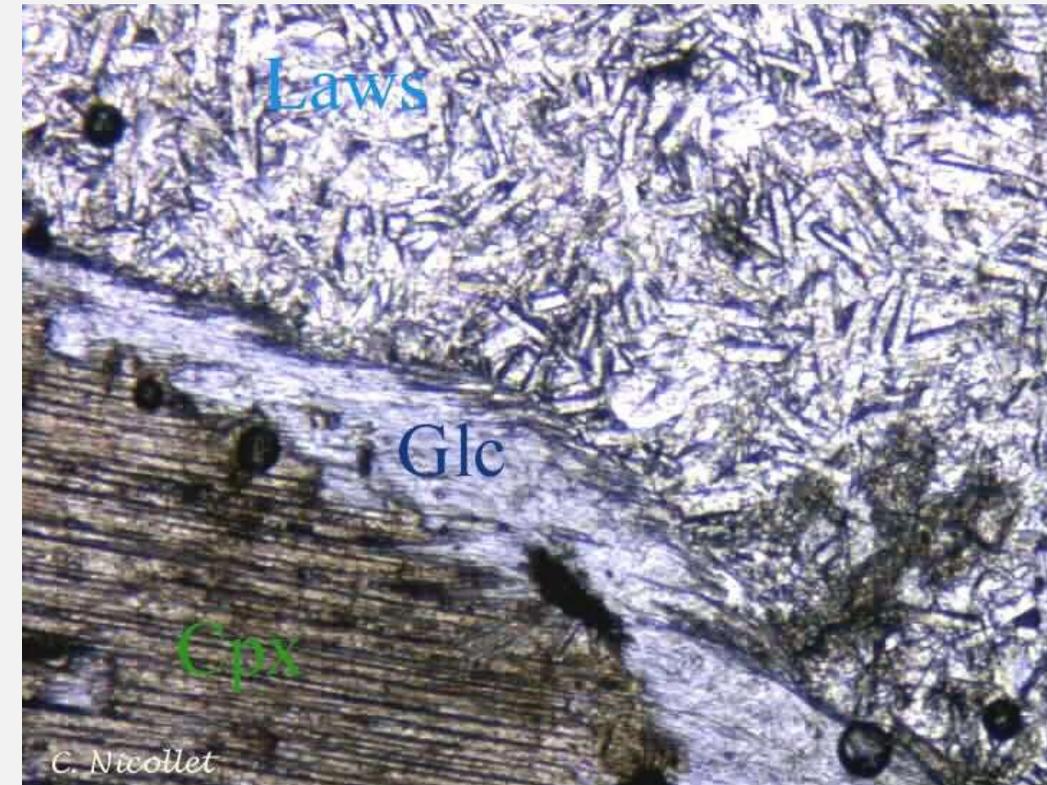
Quartz : volume molaire  $2,27 \text{ cm}^3$

Coésite : volume molaire  $2,06 \text{ cm}^3$

# Etablir une chronologie relative des phases minérales coexistantes : exemple 2



Métagabbro de la vallée du Guil, LPNA



Paragenèse glaucophane (amphibole sodique) – Lawsonite – Jadéite (Cpx) → faciès des schistes bleus  
+ Actinote (amphibole calcique) qui caractérise le faciès schistes verts

# Etablir une chronologie relative des phases minérales coexistantes : exemple 3

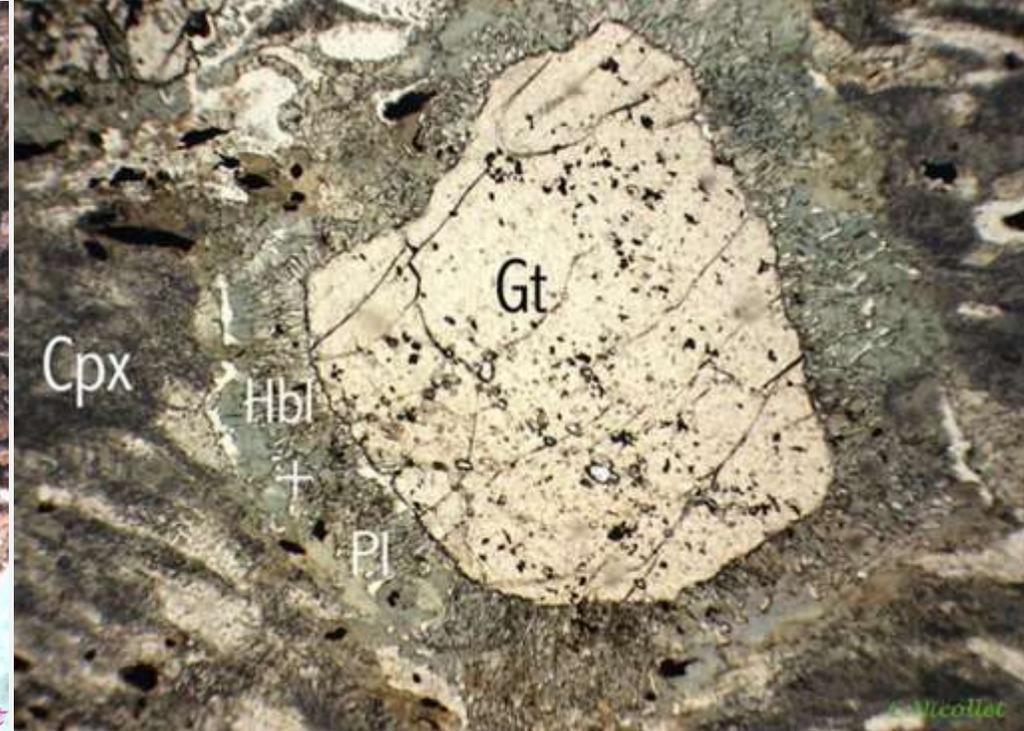


Métagabbro éclogitisé  
du Limousin

Échantillon en gros plan



Lame mince, LPNA

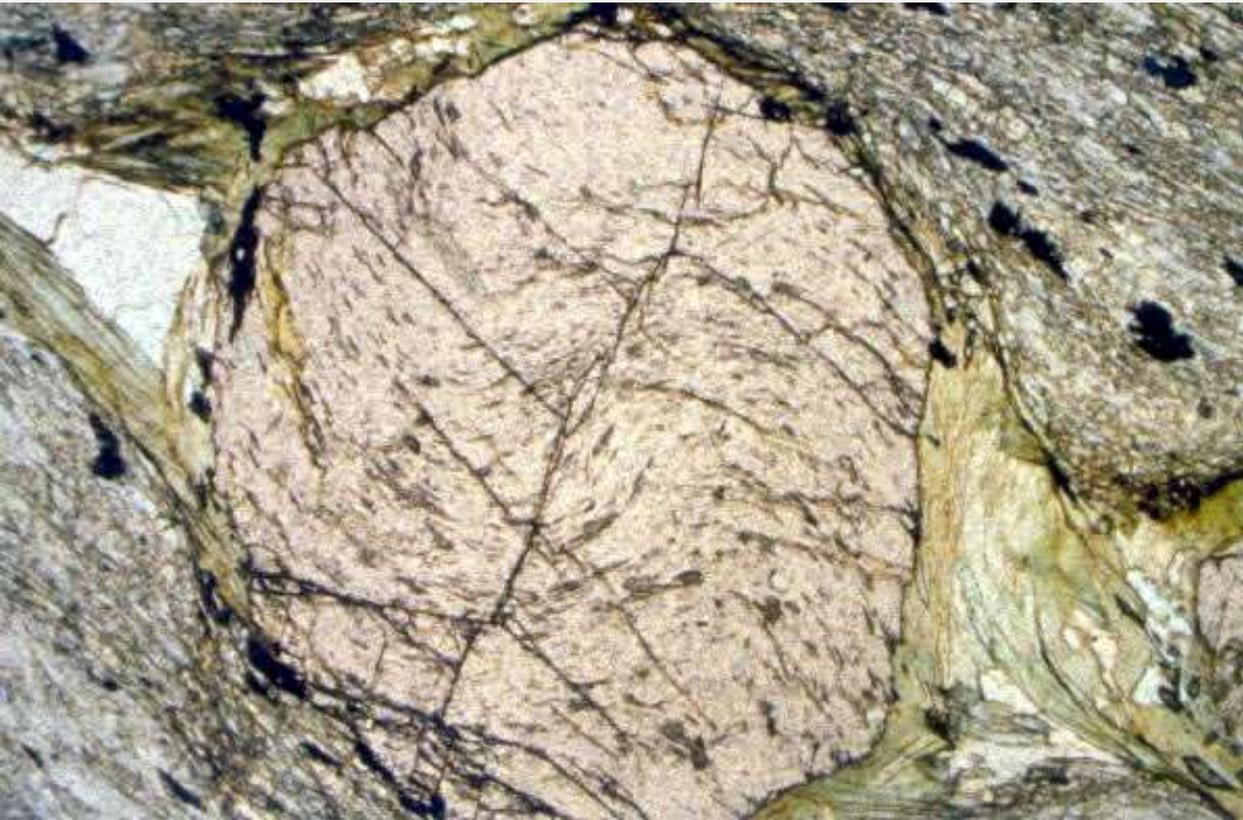


Couronne noire autour du grenat  
→ Gt et Cpx ne sont plus en équilibre

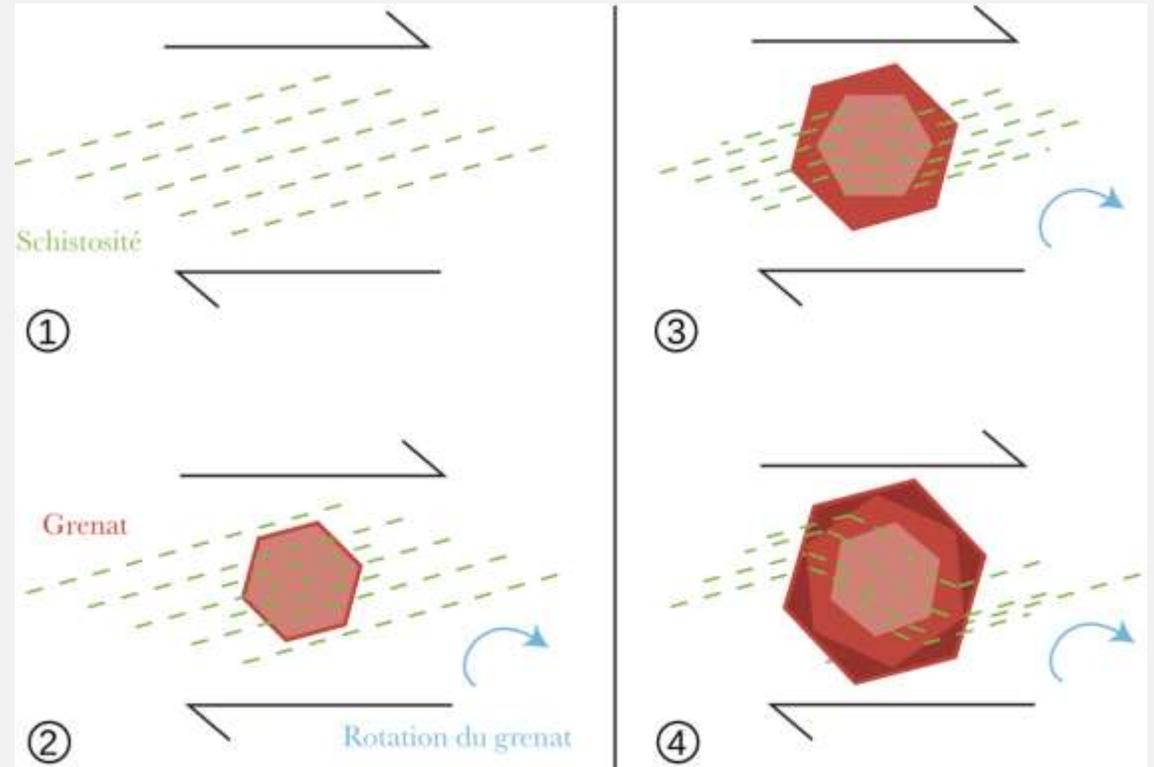
La réaction est :  
 $Gt + Cpx + Q = Hbl + Pl$

# Relations chronologiques entre minéraux et déformations

**Glaucophanite de l'île de Groix (Morbihan)  
en lame mince**

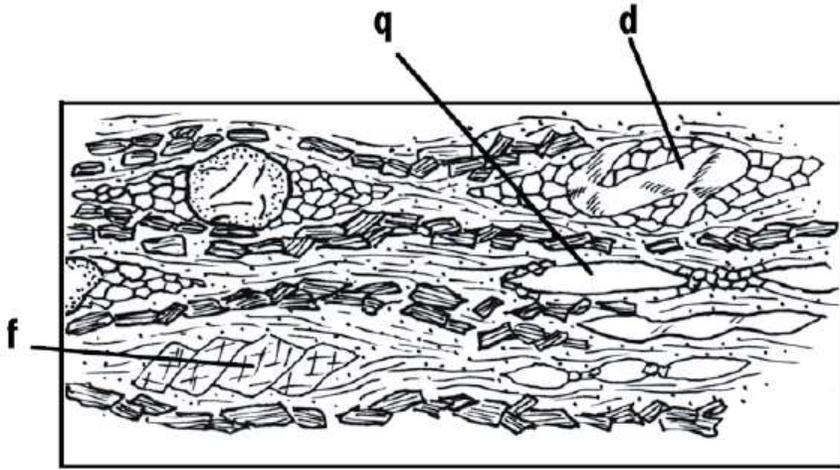


→ **Grenat anté-cinématique**



**Schéma théorique de formation des inclusions  
hélicitiques dans les grenats**

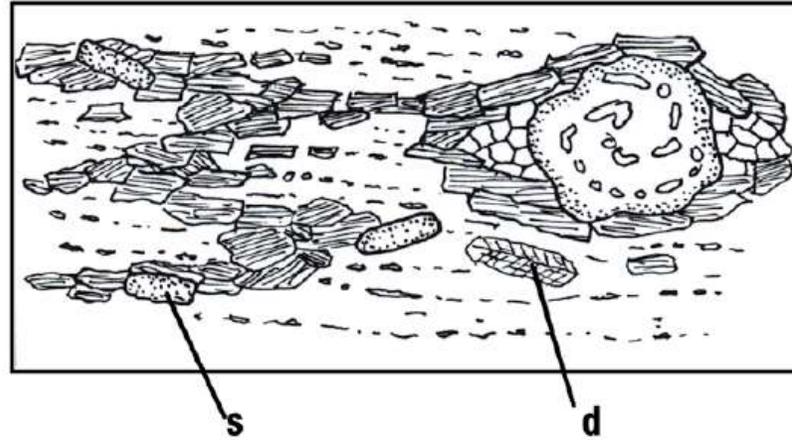
# Document 14. Relations entre paragenèses et schistosités.



## **Paragenèse anté-cinématique**

Certains minéraux sont déformés, d'autres sont boudinés.

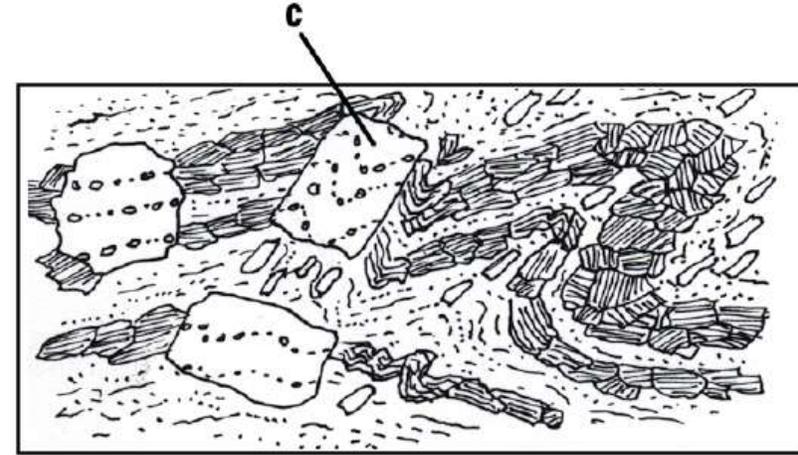
On peut voir des ombres de pression à l'abri de minéraux qui s'opposent à l'aplatissement.



## **Paragenèse syn-cinématique**

L'orientation des cristaux est contrôlée par la schistosité, sans ombre de pression.

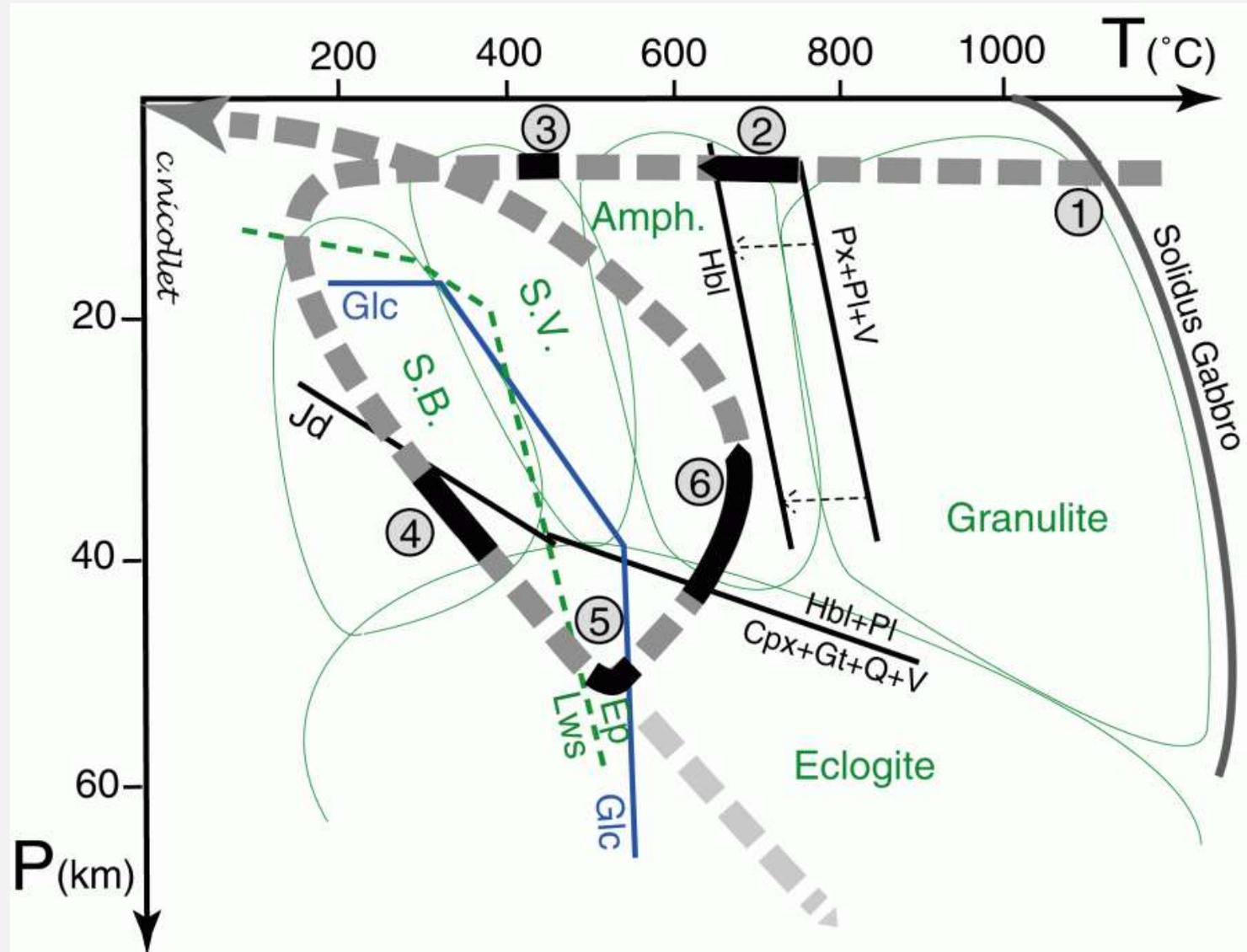
Le grenat est hélicitique.



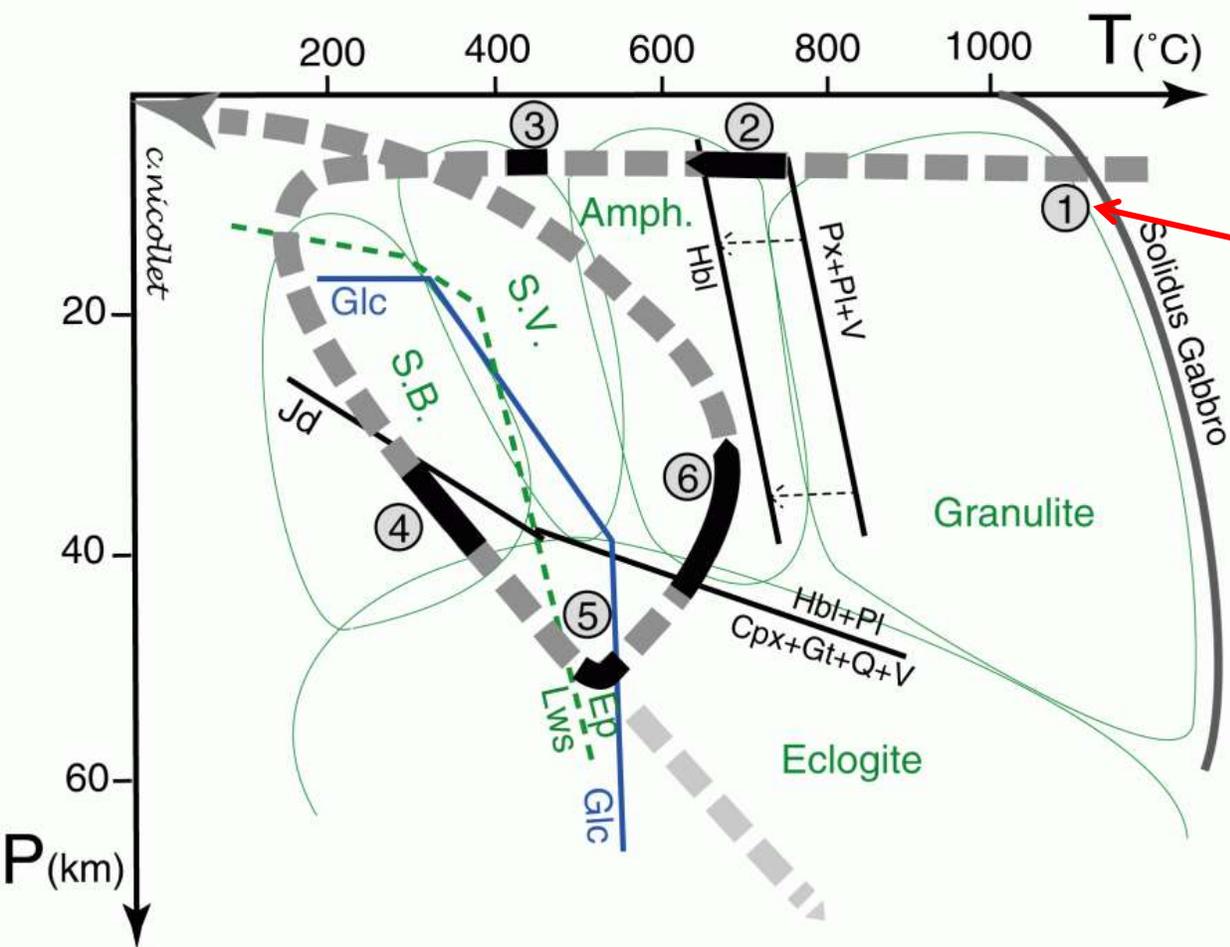
## **Paragenèse post-cinématique**

Les cristaux (c) sont superposés aux structures antérieures.

# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.



# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.

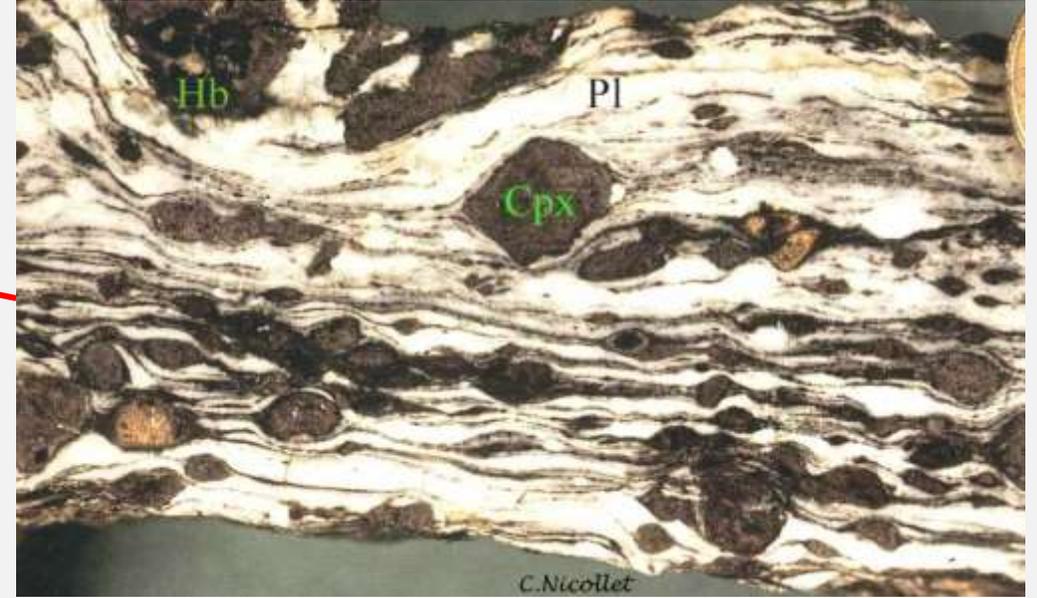
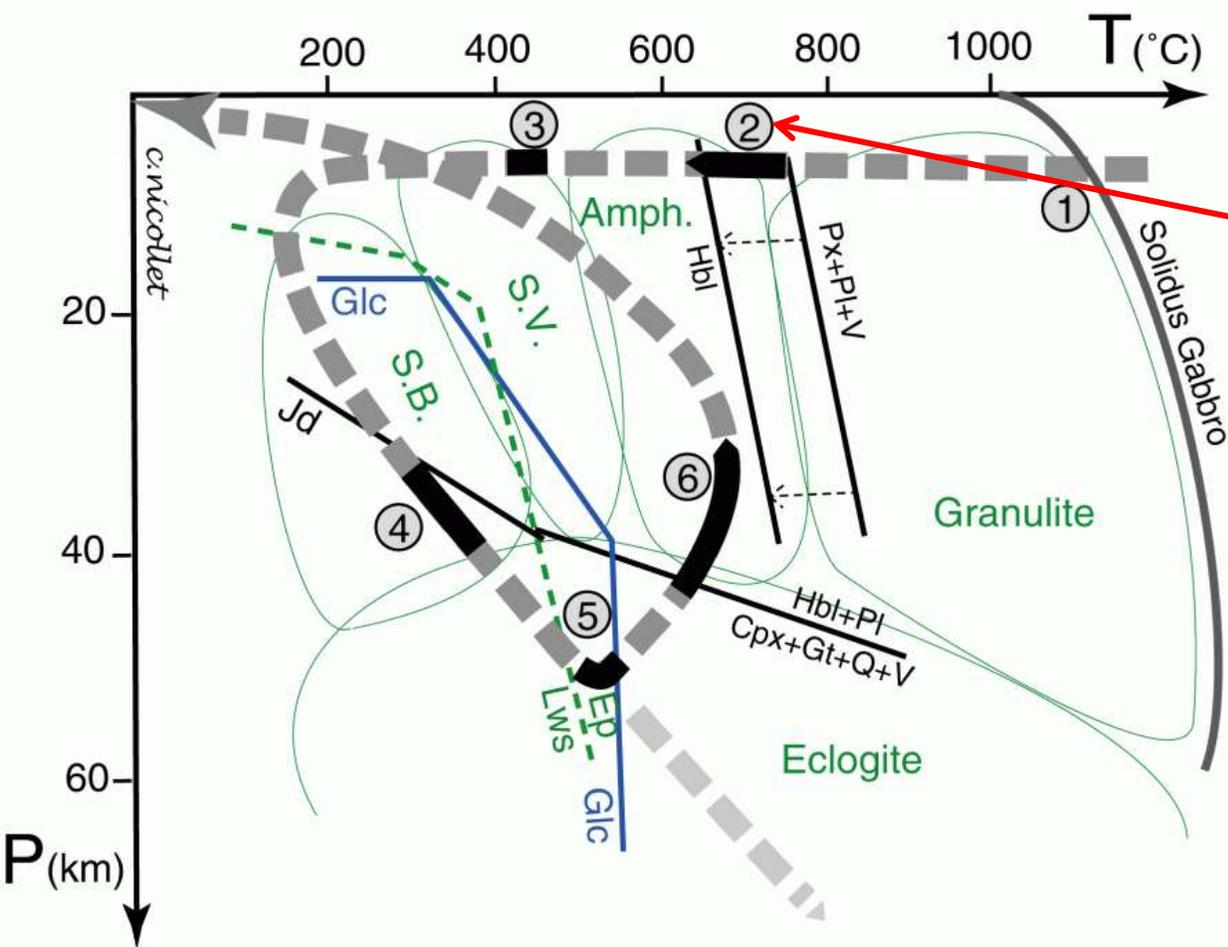


Un gabbro « frais »

<http://christian.nicollet.free.fr/page/CO/PTCO.html>

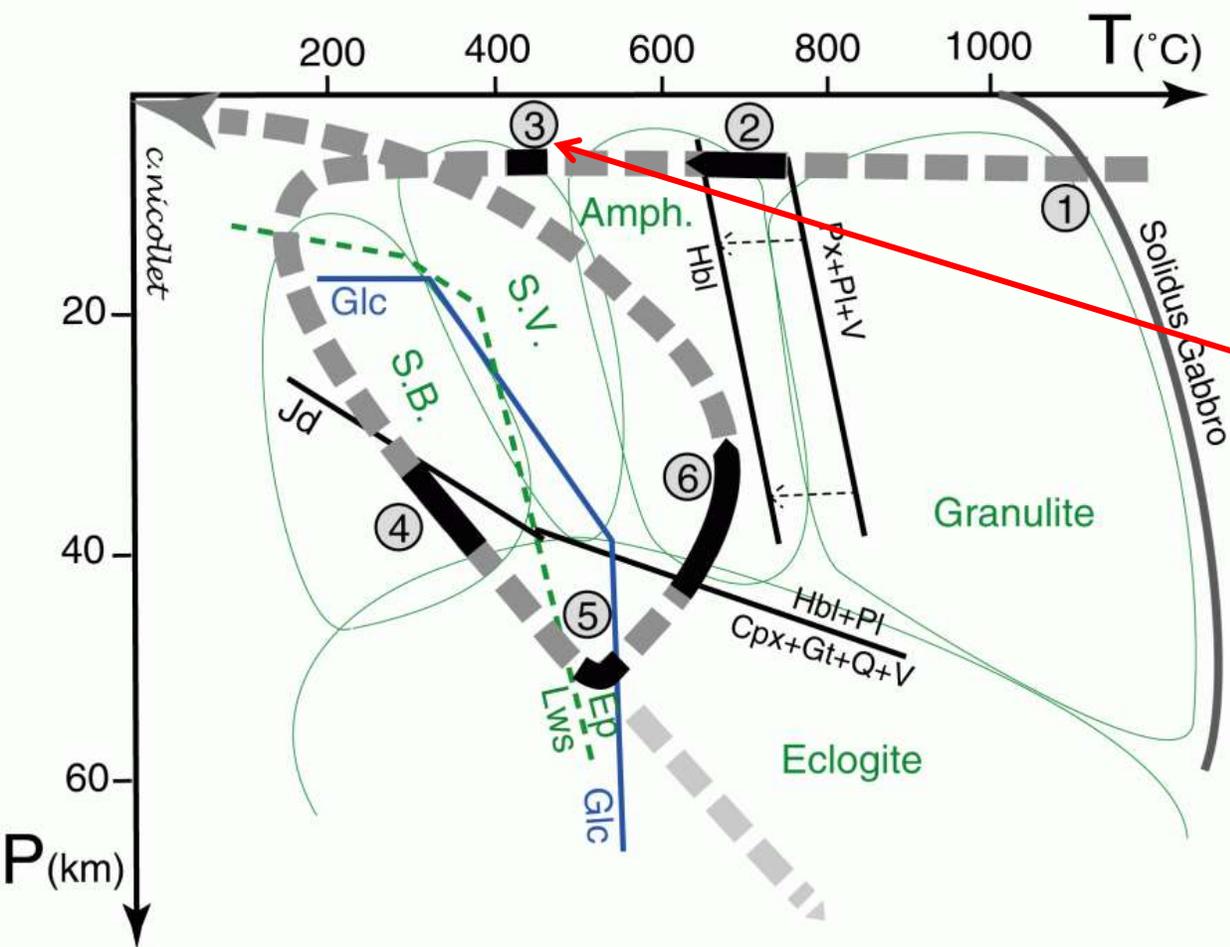
<http://christian.nicollet.free.fr/page/CO/gabbro.html>

# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.



Métagabbro  
faciès  
amphibolites

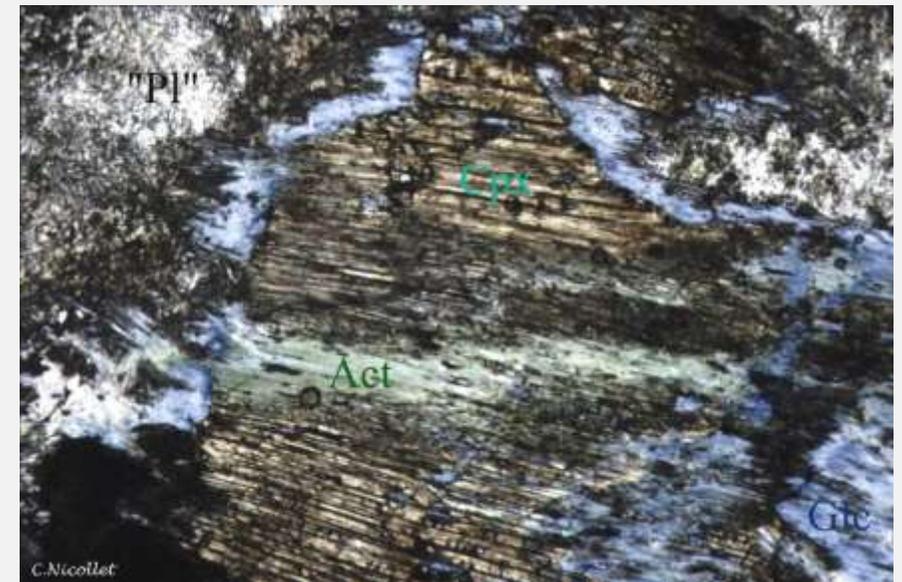
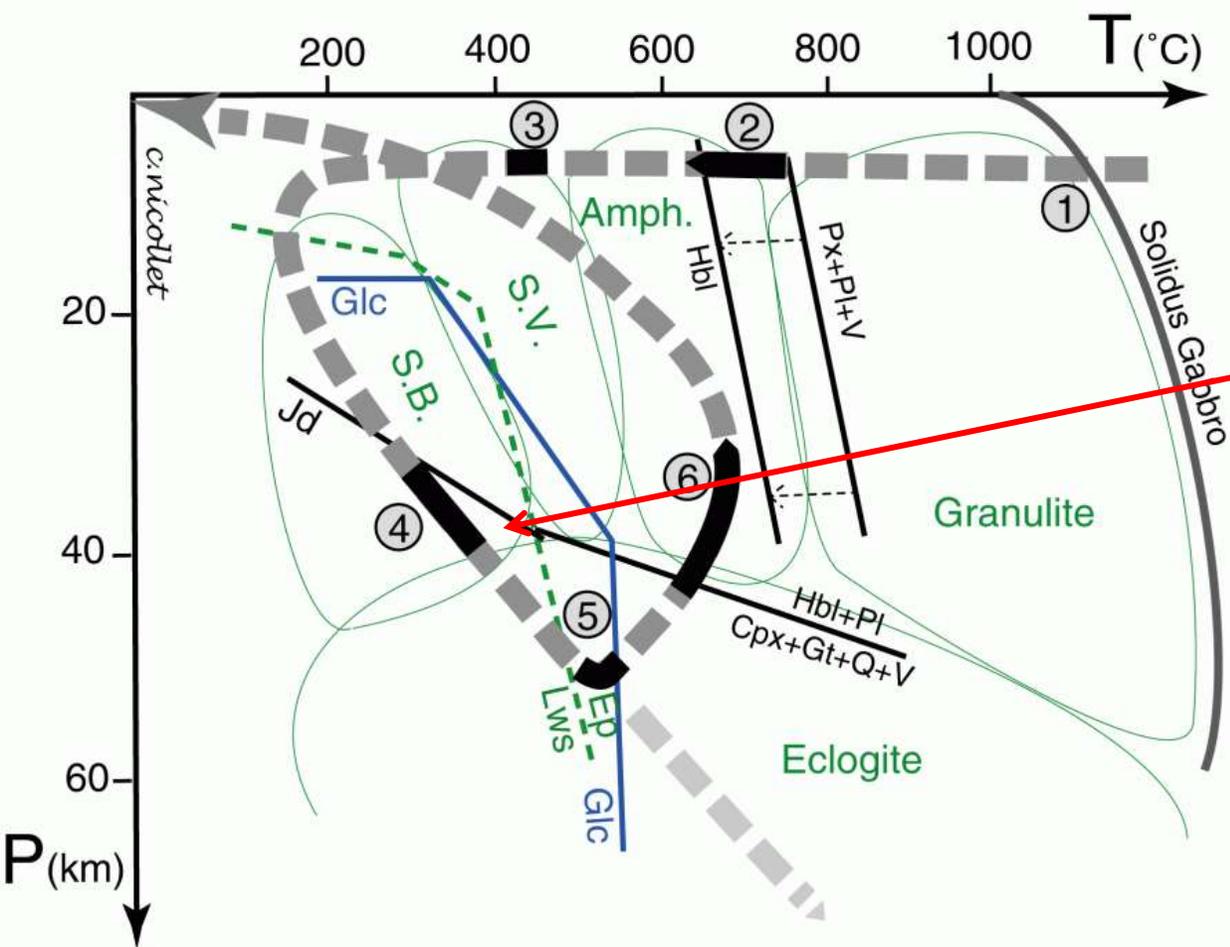
# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.



**Métagabbro  
faciès schistes verts**

**Px remplacés par actinote (amphibole vert pâle)**

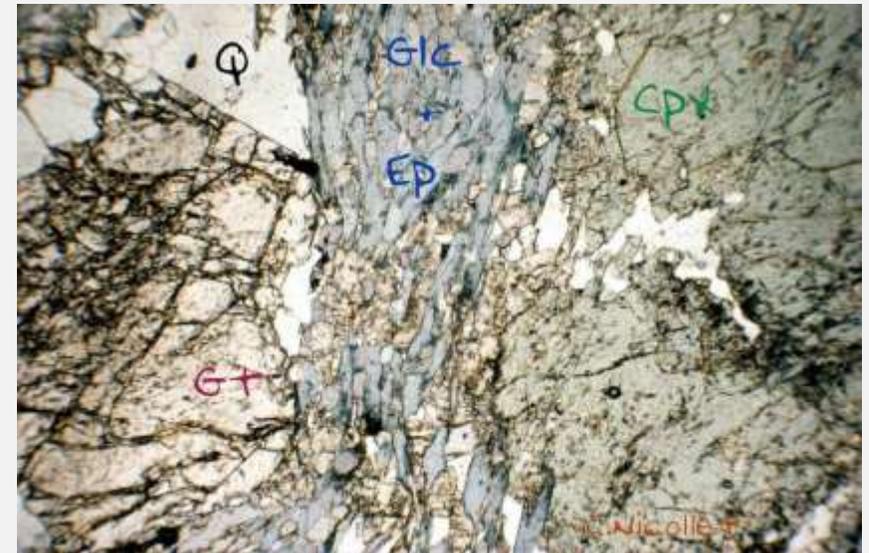
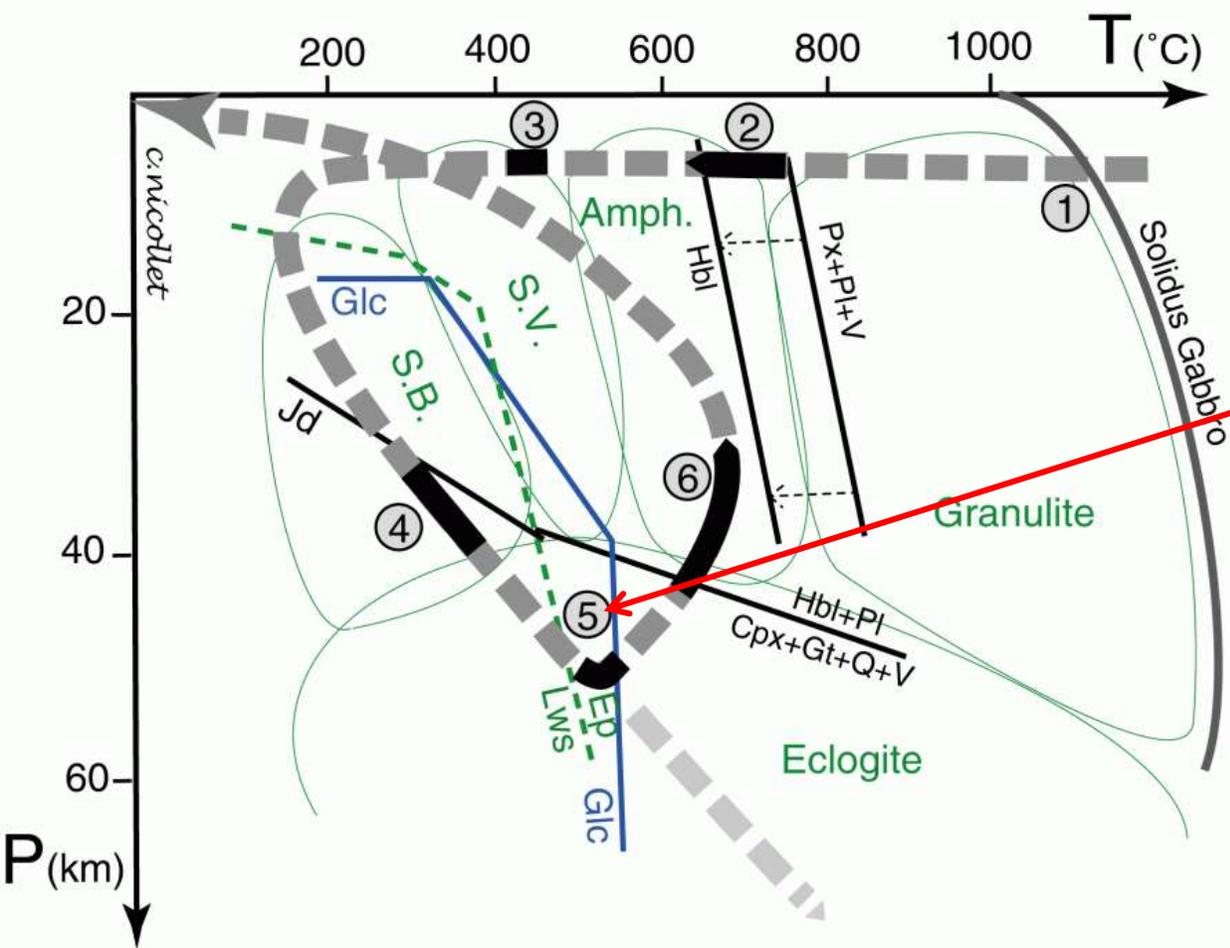
# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.



**Couronne de glaucophane autour du px  
(transformé en lawsonite + jadéite)**

**Métagabbro  
faciès schistes bleus**

# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.

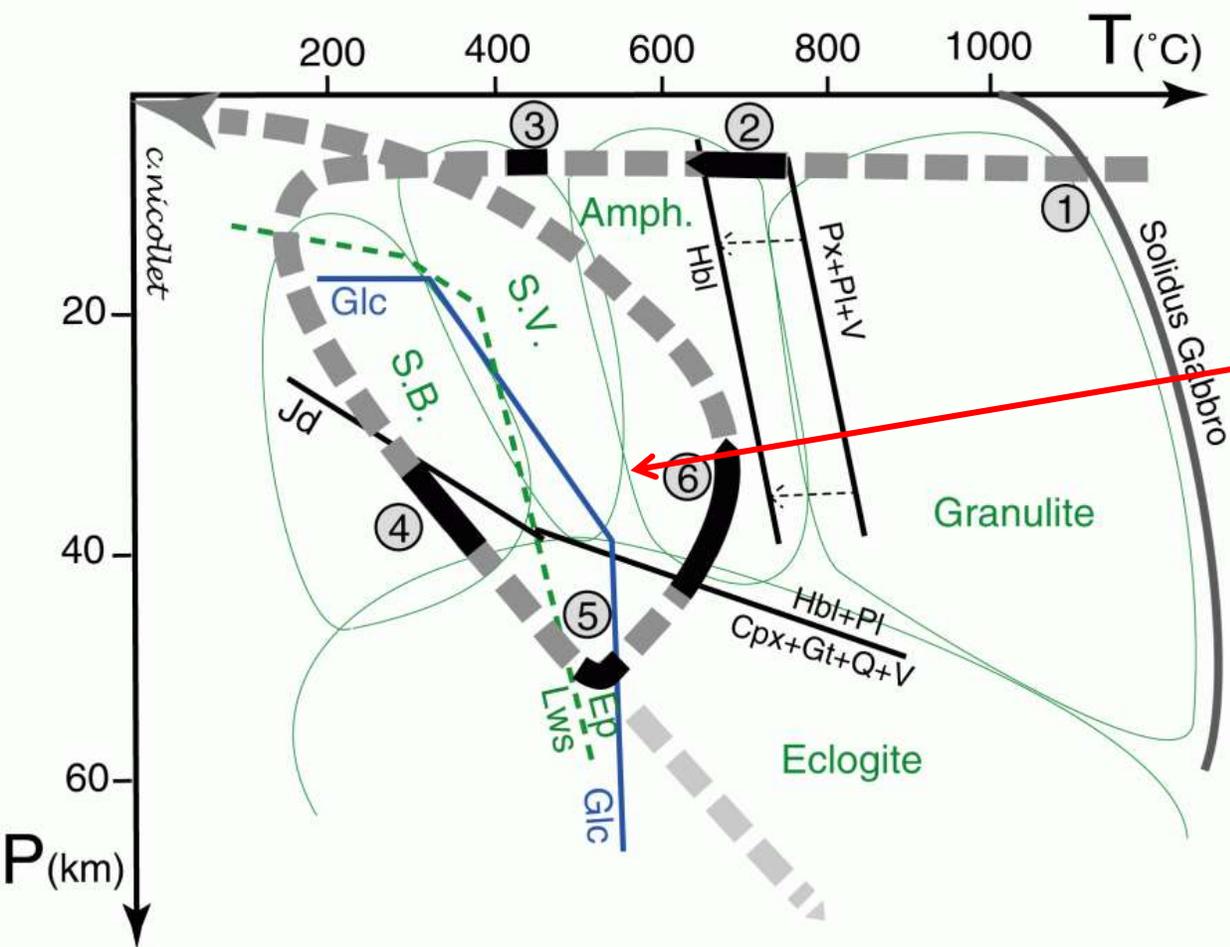


## Paragenèse :

**gt – omphacite – glaucophane – épidote – quartz**

**Métagabbro  
faciès éclogites**

# Document 15. Reconstitution du trajet P – T – t d'un gabbro.



Hb + Pg



Les minéraux de l'éclogite ont complètement disparu

Métagabbro  
faciès amphibolites

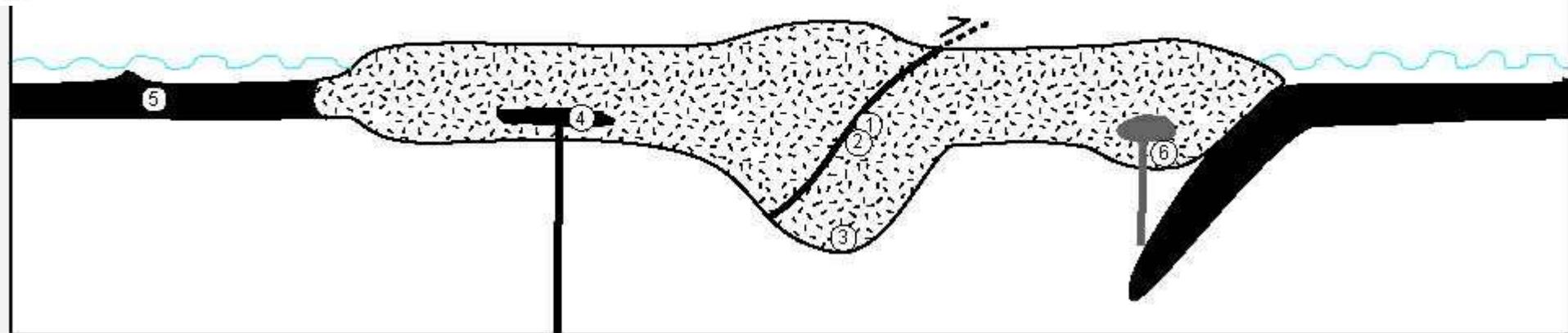
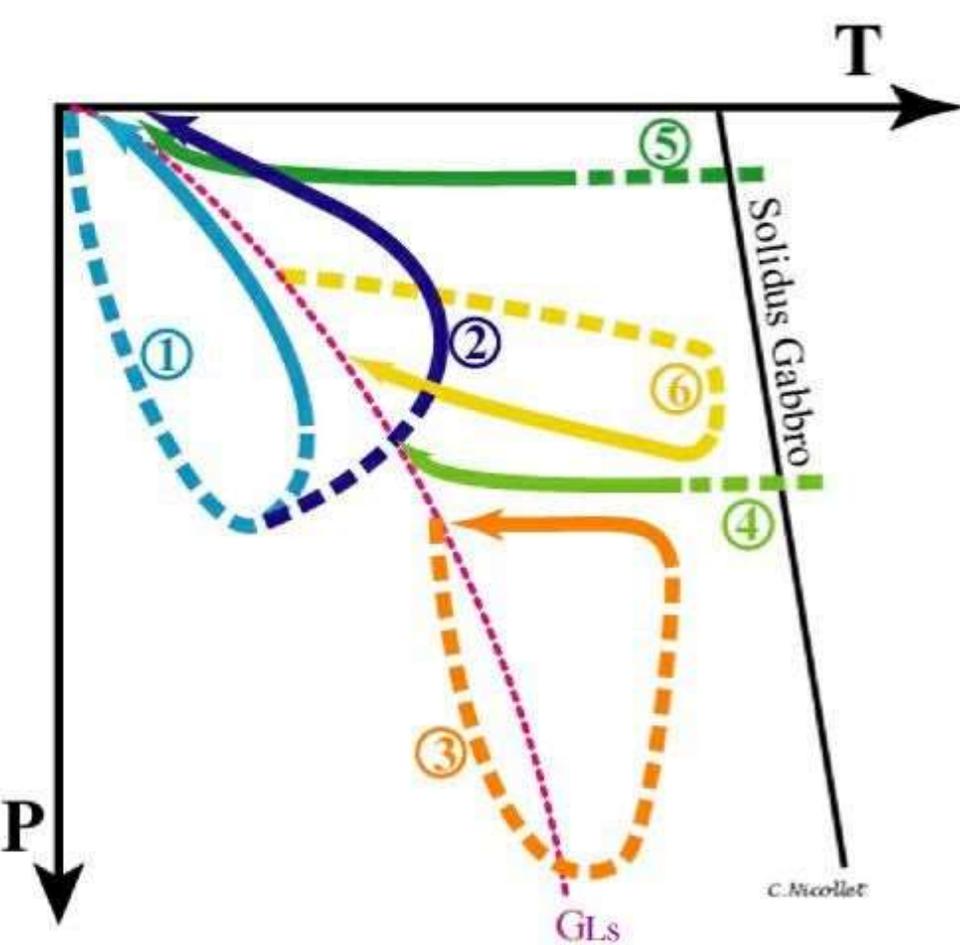
<http://christian.nicollet.free.fr/page/CO/PTCO.html>

<http://christian.nicollet.free.fr/page/CO/amphibolites.html#fant%C3%B4mes>

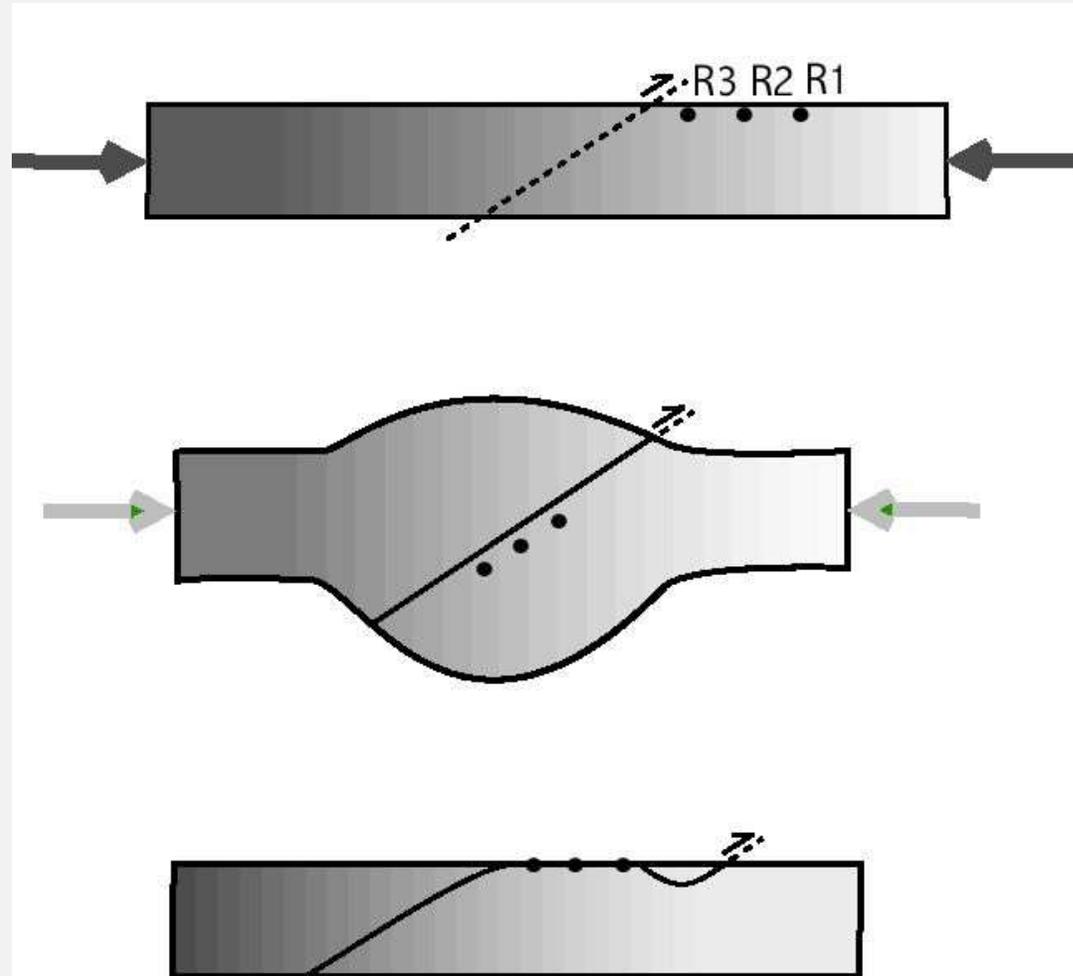
## Document 16. Quelques Exemples de trajectoires P-T-t produites dans différents contextes géodynamiques.

GLs : géotherme moyen à l'intérieur d'une lithosphère stable.

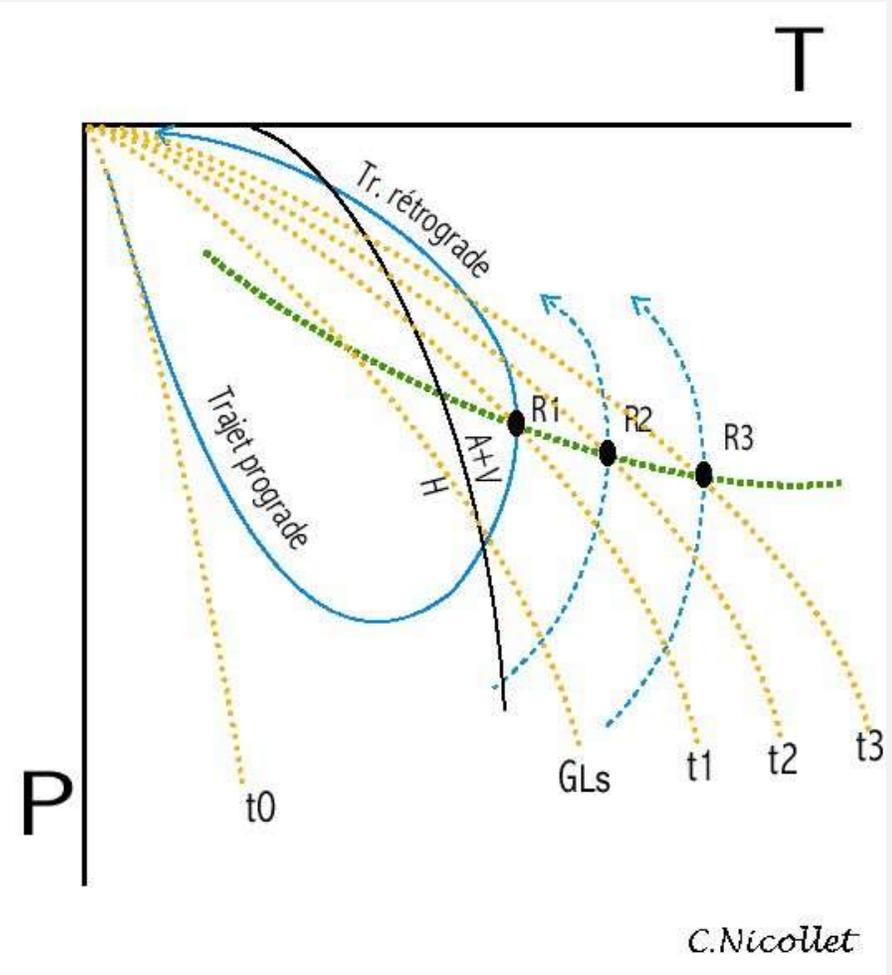
La position des roches 1, 2, 3 et 6 sur la figure ci-dessous correspond au pic en pression de leurs trajets respectifs dans le diagramme P, T ci-contre.



# Document 17. Trajet P-T-t d'une roche dans un contexte de collision.



Le schéma de gauche symbolise l'épaississement et l'amincissement d'une chaîne de montagne dans la croûte continentale.



GLs : géotherme moyen à l'intérieur d'une lithosphère stable  
t0, t1, t2, t3 : différentes positions du géotherme  
H : assemblage de minéraux hydratés  
A : assemblage de minéraux anhydres  
V : phase vapeur (H<sub>2</sub>O)  
Pointillés verts : gradient métamorphique

## Document 18. Modèle simplifié de l'évolution thermique et mécanique d'une chaîne de montagnes résultant de la collision de deux continents.

t5 et t6 : convergence et collision

t7 : la convergence cesse

t8 : effondrement gravitaire de la chaîne de montagnes

Les lignes en tirets épais matérialisent les gradients métamorphiques.

Courbe A : limite le domaine de l'anatexie hydratée.

Les 3 lignes qui convergent sur les diagrammes PT (de t4 à t8) délimitent les champs de stabilité des trois silicates d'alumine : disthène, sillimanite, andalousite.

