

Métamorphisme et roches métamorphiques

Laurie BOUGEOIS

ST3 - Polytech' Paris UPMC

19 décembre 2014



1. Introduction

2. Genèse des roches métamorphiques

3. Quantification des conditions du métamorphisme

4. Trajets Pression-Température-temps-déformation (PTtd)

Un peu d'histoire...

► Jusqu'au 18^{ème} siècle

- ↪ roches cristallines (= magmatiques)
- ↪ roches sédimentaires



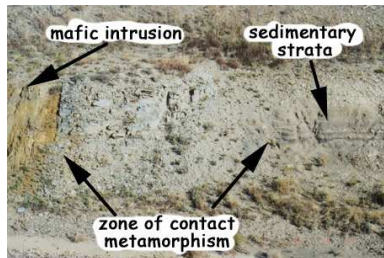
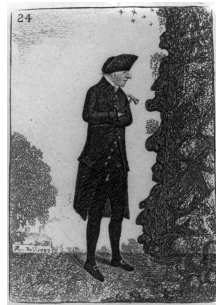
Un peu d'histoire...

► Jusqu'au 18^{ème} siècle

- ↪ roches cristallines (= magmatiques)
- ↪ roches sédimentaires

► Fin 18^{ème} - début 19^{ème} siècle

- ↪ **James Hutton** (Theory of the Earth, 1795) : observation en Écosse de roches issues de la transformation de roches magmatiques ou sédimentaires au contact de granite ou de basalte



Un peu d'histoire...

► Jusqu'au 18^{ème} siècle

- ↪ roches cristallines (= magmatiques)
- ↪ roches sédimentaires

► Fin 18^{ème} - début 19^{ème} siècle

- ↪ **James Hutton** (Theory of the Earth, 1795) : observation en Écosse de roches issues de la transformation de roches magmatiques ou sédimentaires au contact de granite ou de basalte
- ↪ proposition d'un 3^{ème} type de roches résultant de la transformation d'une des roches précédentes

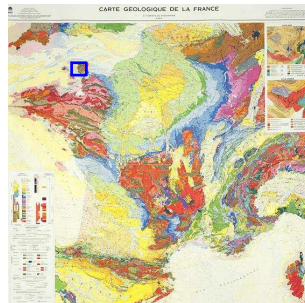
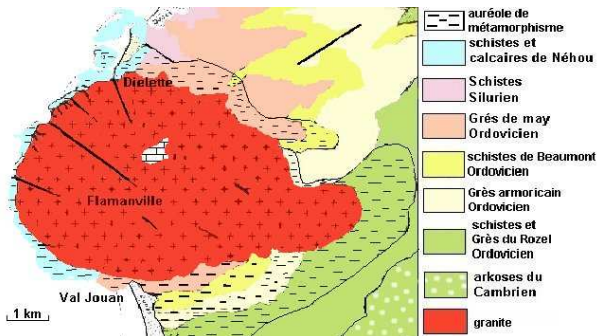


⇒ **ROCHES MÉTAMORPHIQUES**

Qu'est-ce qu'une roche métamorphique ?

► Le granite de Flamanville

↪ un exemple simple pour démontrer ce que sont les roches métamorphiques

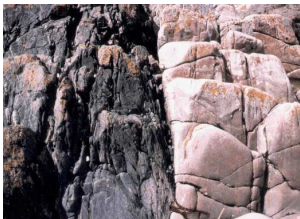


↪ pluton granitique daté vers 350 – 330 Ma

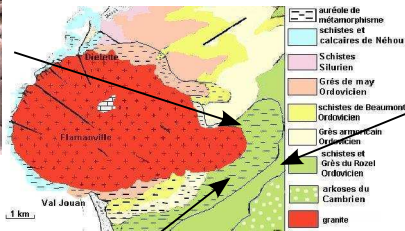
↪ intrusif dans les séries sédimentaires du Paléozoïque

Qu'est-ce qu'une roche métamorphique ?

► Le granite de Flamanville



Contact
Granite-Schistes



Grès argileux du Rozel



Schiste à
Andalousite

Les roches métamorphiques

Définition

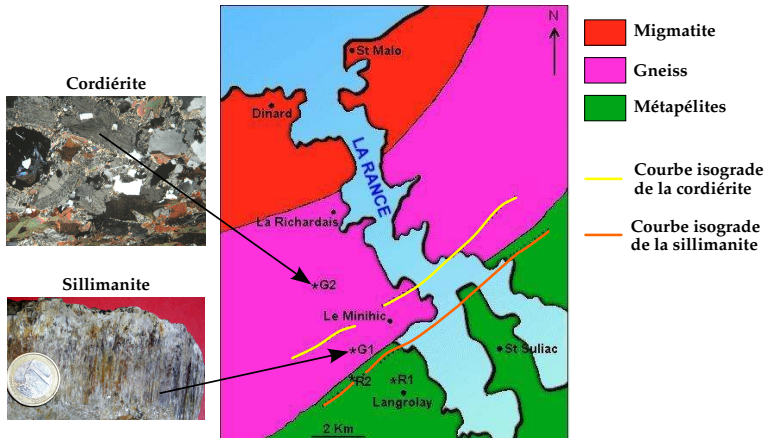
Le **métamorphisme** est la transformation à l'état solide des roches entraînant la cristallisation de nouveaux minéraux (dit néoformés) et un changement de la structure.

Comment se produit la transformation
Quels sont les facteurs à l'origine de celle-ci ?

1. Introduction
- 2. Genèse des roches métamorphiques**
3. Quantification des conditions du métamorphisme
4. Trajets Pression-Température-temps-déformation (PTtd)

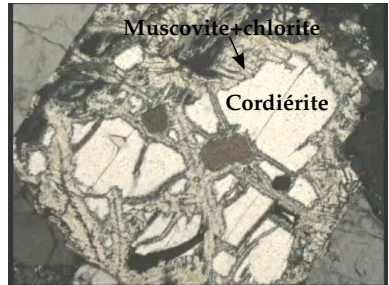
Changements minéralogiques

Notion d'isogrades de métamorphisme



Changements minéralogiques

Notion de réaction métamorphique



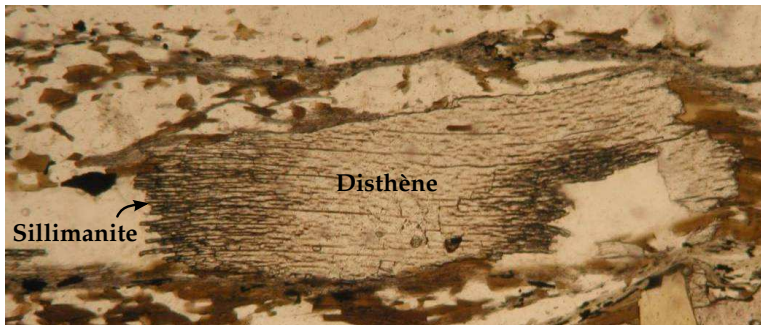
Changements minéralogiques

Notion de réaction métamorphique

► Réactions polymorphiques

↔ changement de phase

↔ exemple des Silicates d'alumine Al_2SiO_5



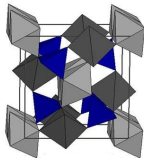
Changements minéralogiques

Notion de réaction métamorphique

► Réactions polymorphiques

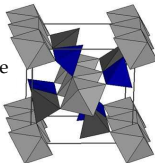
↔ changement de phase

↔ exemple des Silicates d'alumine Al_2SiO_5

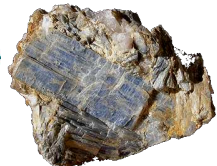
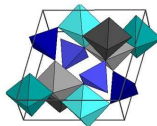


Andalousite
orthorhombique
a=7.79Å
b=7.90Å
c=5.56Å

Sillimanite
orthorhombique
a=7.48Å
b=7.67Å
c=5.77Å



Disthène
triclinique
a=7.12Å
b=7.85Å
c=5.57Å



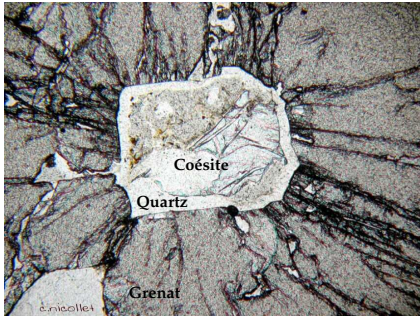
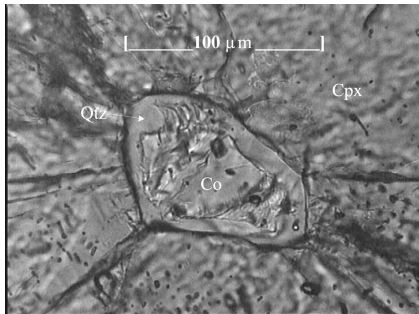
Changements minéralogiques

Notion de réaction métamorphique

► Réactions polymorphiques

↔ changement de phase

↔ exemple du système Quartz-Coésite SiO_2

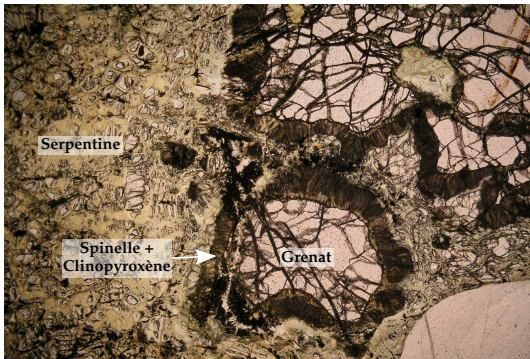


Changements minéralogiques

Notion de réaction métamorphique

► Réactions isochimiques

- ↪ changement de minéraux mais chimie globale de la roche conservée
- ↪ exemple : Grenat → Spinelle + Clinopyroxène

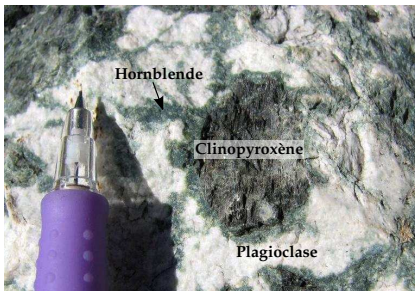
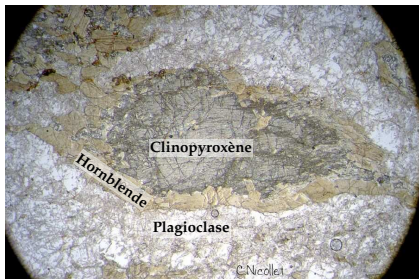


Changements minéralogiques

Notion de réaction métamorphique

► Réaction non isochimiques ou métasomatiques

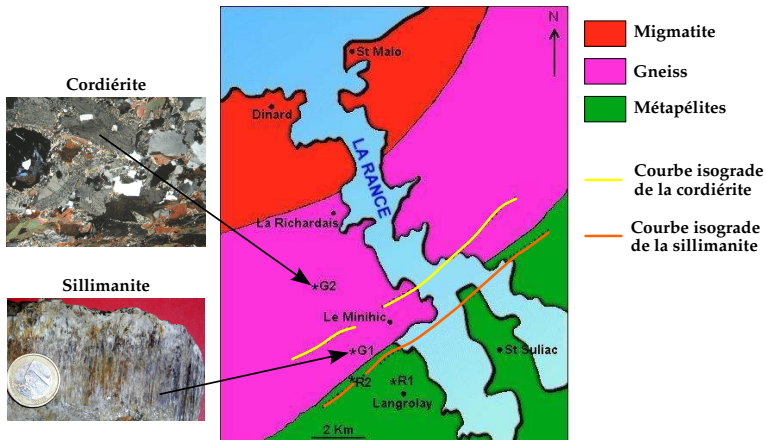
- ↪ modification de la chimie de la roche par un apport d' H_2O
- ↪ exemple : Plagioclase + Clinopyroxène + H_2O → Hornblende



Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche empirique

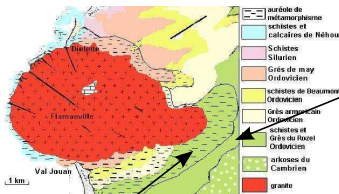
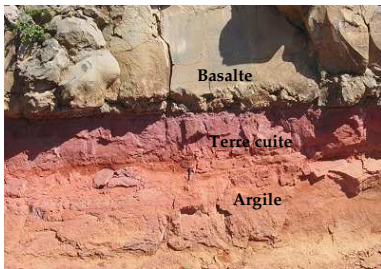
Effet de la température



Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche empirique

Effet de la pression



Grès argileux du Rozel

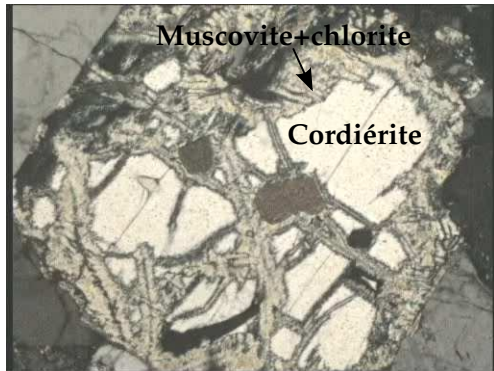


Schiste à Andalousite

Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche empirique

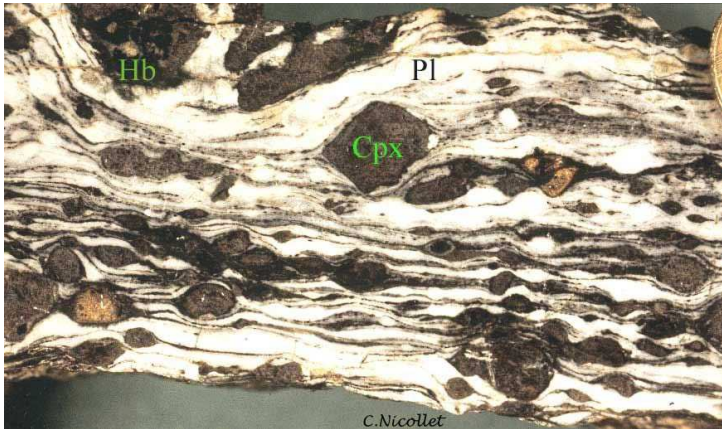
Effet de la circulation des fluides



Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche empirique

Effet de la déformation



Facteurs contrôlant le métamorphisme

- ▶ Approche thermodynamique

Étapes d'une réaction métamorphique

Dissolution → Transport (diffusion) → Nucléation → Croissance

⇒ le processus le plus lent contrôle la vitesse de la réaction soit la **diffusion**.

Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche thermodynamique

Paramètres contrôlant la vitesse de diffusion :

La diffusion dans un solide est contrôlée par la **loi de Fick**

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

Avec :

J : Flux

C : concentration

x : distance

D : coefficient de diffusion

→ détermine la vitesse surfacique de diffusion

Loi d'Aarhénus $D = D_0 e^{-Q/RT}$

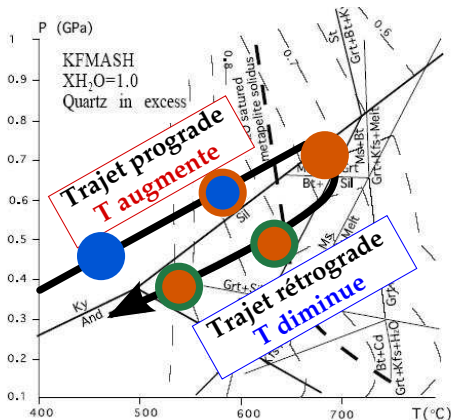
+ T est élevée \Rightarrow + la diffusion est efficace

Diffusion inefficace en dessous de 600°C

Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche thermodynamique

+ T est élevée \Rightarrow + la diffusion est efficace
 Diffusion inefficace en dessous de 600°C



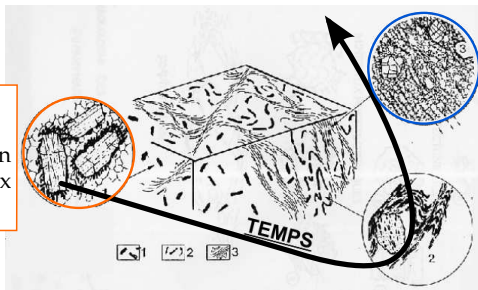
Facteurs contrôlant le métamorphisme

► Approche thermodynamique

⇒ Mécanisme accélérant le métamorphisme

- ↪ **déformation** : formations de plus petits grains → facilite la diffusion
- ↪ **fluides** : facilite le transport des éléments

Zone peu déformée
préservation de minéraux reliques



Zone très déformée
minéralogie à l'équilibre

Nouvelle définition

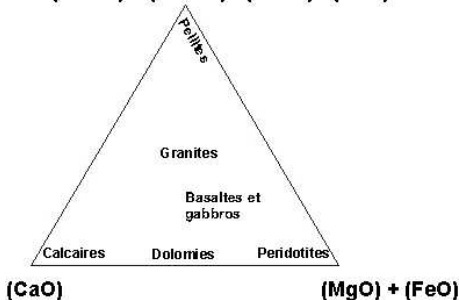
Le **métamorphisme** est la transformation à l'état solide de roches placées dans des **conditions de pression et de température différentes** de celles qui existaient au moment de leur formation

Facteurs contrôlant le métamorphisme

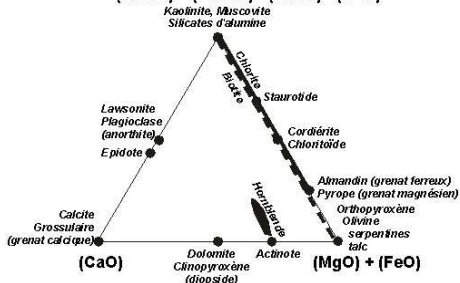
Importance de l'héritage chimique

⇒ Notion de protolithe

$(Al_2O_3) + (Fe_2O_3) - (Na_2O) - (K_2O)$



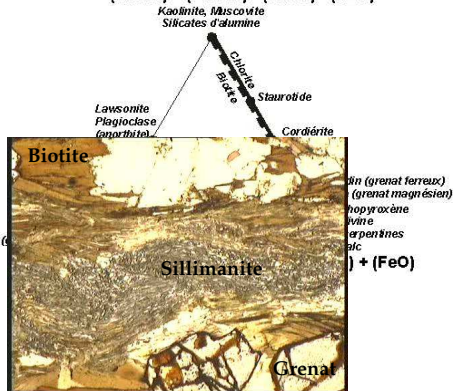
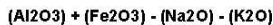
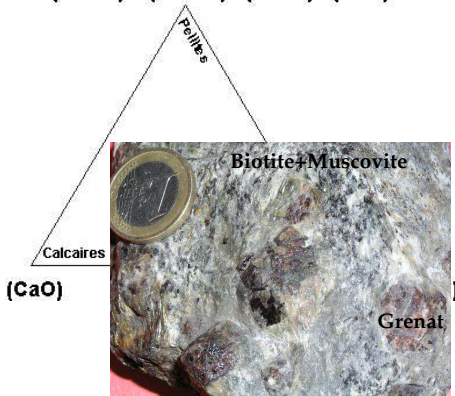
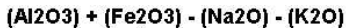
$(Al_2O_3) + (Fe_2O_3) - (Na_2O) - (K_2O)$



Facteurs contrôlant le métamorphisme

Importance de l'héritage chimique

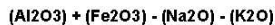
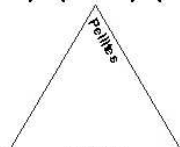
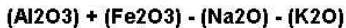
⇒ Notion de protolithe



Facteurs contrôlant le métamorphisme

Importance de l'héritage chimique

⇒ Notion de protolithe



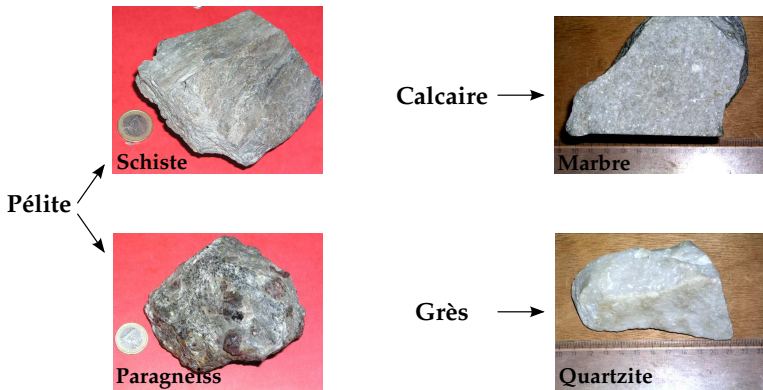
Roches	Minéraux caractéristiques
Pélitiques	muscovite, biotite, chlorite, chloritoïde, silicates d'alumine, grenat, cordiérite
Basiques	amphiboles, ortho et clinopyroxènes, grenat (Fe, Mg), épidote
Acides	biotite, muscovite, chlorite, feldspath, cordiérite, grenat clinopyroxène
Péridotites	ortho et clinopyroxènes, amphiboles, olivines, grenat, talc, serpentine, spinelle, plagioclase

Attention : il faut tenir compte des proportions !

Facteurs contrôlant le métamorphisme

Importance de l'héritage chimique

⇒ Notion de SÉRIE PARADÉRIVÉE



Facteurs contrôlant le métamorphisme

Importance de l'héritage chimique

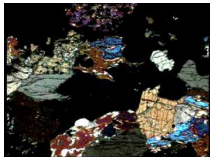
⇒ Notion de **SÉRIE ORTHODÉRIVÉE**

Acide →



Orthogneiss acide

Basique →



Métabasite + nom de faciès
(schiste bleu, schiste vert etc.)

Ultramafique →



Méta-ultramafique

Classification des roches métamorphiques

- ▶ Les critères permettant de classer et de nommer les roches métamorphiques sont variés et non uniformisés. Il peuvent faire référence à la :

Nature du protolithe

- ↪ métagranite
- ↪ metabasalte
- ↪ métasédiment
- ↪ métapélite
- ↪ ...

Classification des roches métamorphiques

- ▶ Les critères permettant de classer et de nommer les roches métamorphiques sont variés et non uniformisés. Il peuvent faire référence à la :

Structure de la roche

- ↪ micaschiste
- ↪ schiste bleu
- ↪ schiste vert
- ↪ gneiss œillé
- ↪ ...

Classification des roches métamorphiques

- ▶ Les critères permettant de classer et de nommer les roches métamorphiques sont variés et non uniformisés. Ils peuvent faire référence à la :

Composition minéralogique

- ↪ gneiss à andalousite
- ↪ micaschiste à grenat
- ↪ marbre à muscovite
- ↪ glaucophanite
- ↪ ...

Genèse des roches métamorphiques

- Bilan -

Les phénomènes métamorphiques sont relativement lents, d'où la préservation de minéraux ou d'assemblages de minéraux métastables, c'est-à-dire non à l'équilibre avec les conditions P – T environnantes.

La vitesse de transformation est activée par la température. Par conséquent lors d'une évolution avec augmentation de température (évolution prograde) seul les derniers assemblages seront préservés. Par contre lors de la baisse de température (évolution rétrograde), les assemblages anciens seront préservés.

Genèse des roches métamorphiques

- Bilan -

La vitesse des transformations est fortement accélérée par la déformation et les circulations de fluide.

La présence ou l'absence de certains minéraux est également contrôlée par la chimie et la minéralogie initiale de la roche. Par conséquent certaines roches seront "plus parlantes" que d'autres car elles exprimeront mieux le métamorphisme.

Les roches métamorphiques subissent une évolution au cours du temps marquée par des transformations minéralogiques.

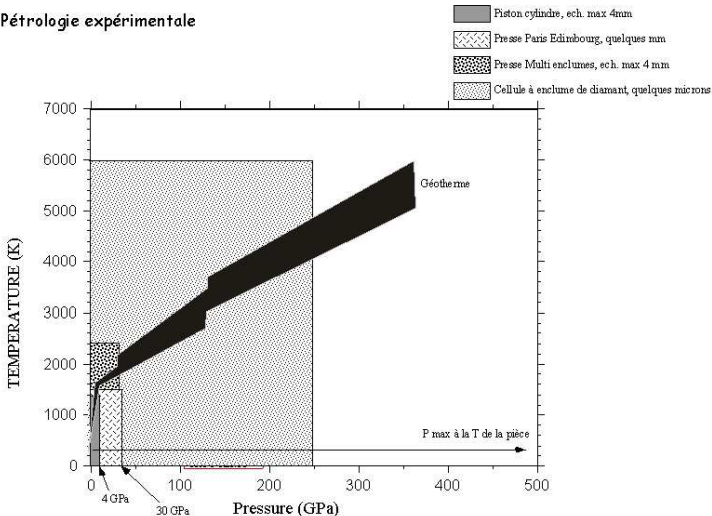
⇒ **Nécessité d'évaluer les conditions P-T subies**

1. Introduction
2. Genèse des roches métamorphiques
- 3. Quantification des conditions du métamorphisme**
4. Trajets Pression-Température-temps-déformation (PTtd)

Approche expérimentale

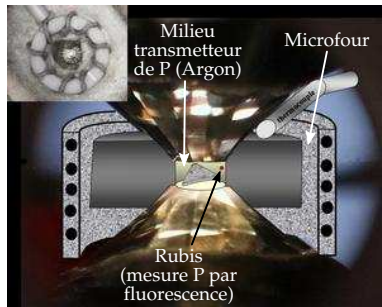
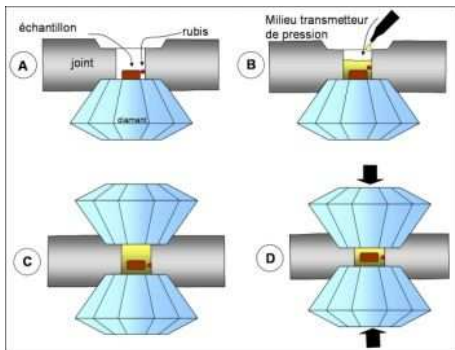
► Différents dispositifs utilisés

Pétrologie expérimentale



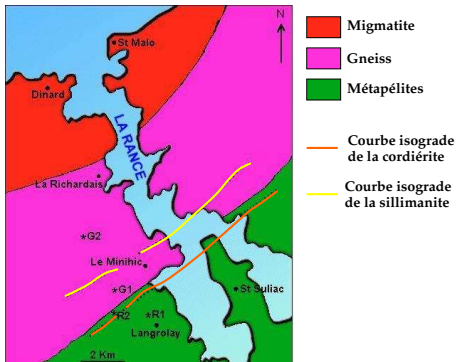
Approche expérimentale

► Cellule à enclume de diamant



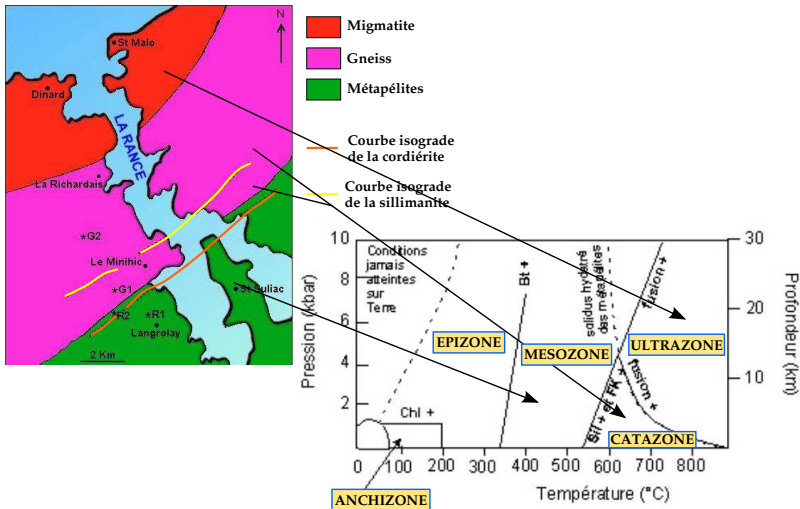
Zonéographie du métamorphisme

► Exemple des métapélites

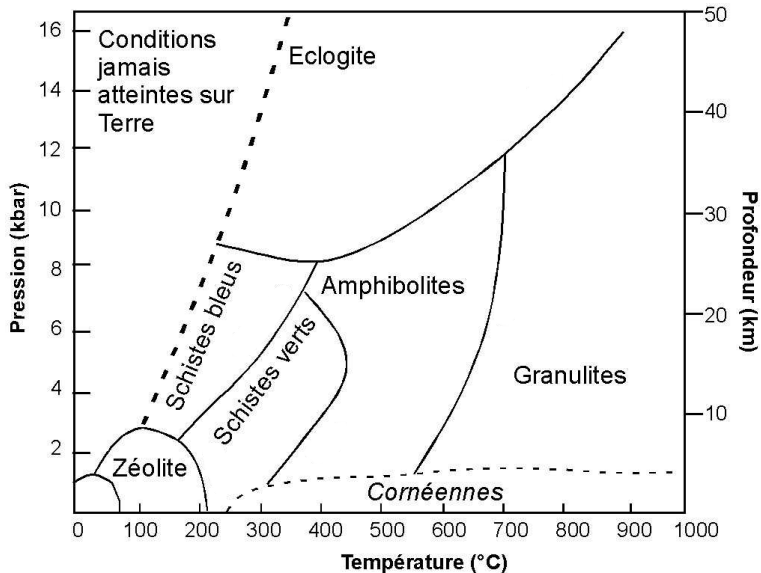


Zonéographie du métamorphisme

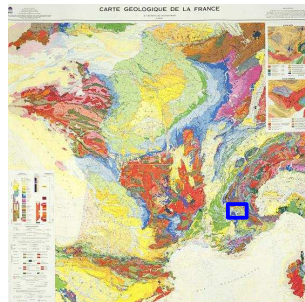
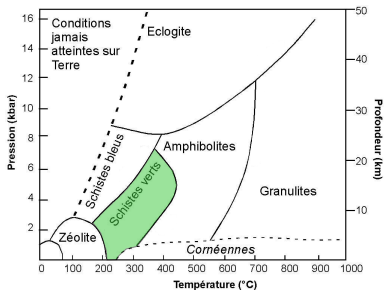
► Exemple des métapélites



Notion de Faciès métamorphiques



Notion de Faciès métamorphiques

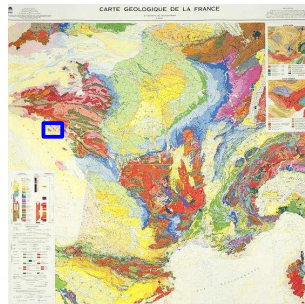
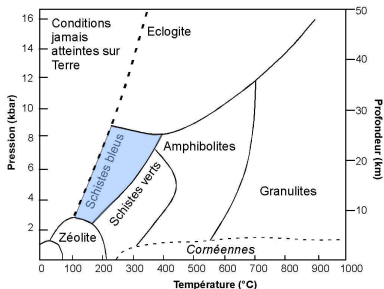


Schistes vert

Exemple du Chenaillet et du Briançonnais



Notion de Faciès métamorphiques

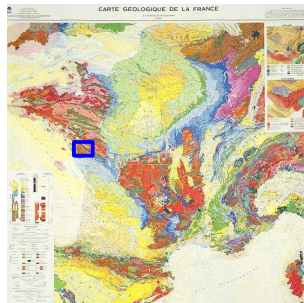
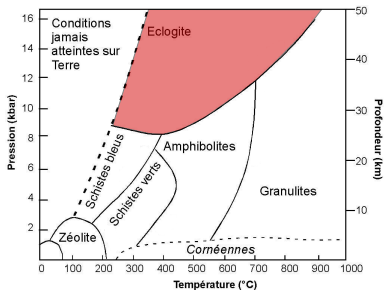


Schistes bleus

Exemple de l'Île de Groix

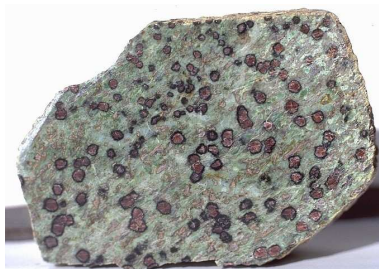


Notion de Faciès métamorphiques



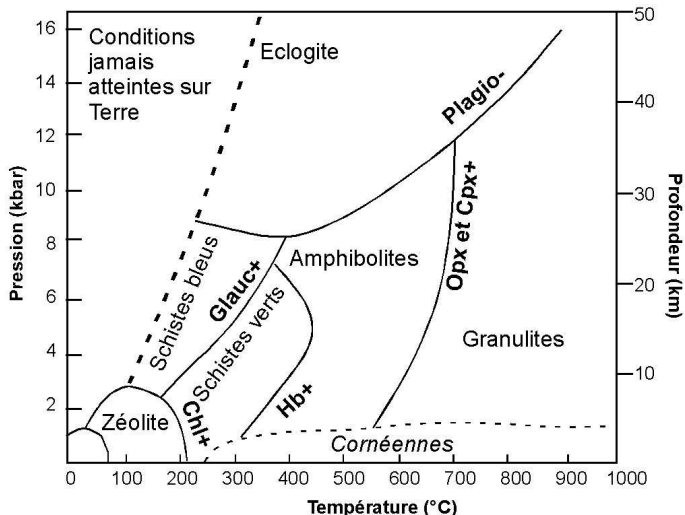
Éclogites

Exemple de Saint-Philbert-de-Grand-Lieu



Notion de Faciès métamorphiques

Signification des limites entre faciès métamorphiques



Aspect thermodynamique

► Équation de Clapeyron

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S + P\Delta V$$

(équation simplifiée car la réaction se fait à l'état solide)

À l'équilibre :

$$\Delta G = 0$$

$$P = \frac{\Delta S}{\Delta V} T - \frac{\Delta H}{\Delta V}$$

Fonction affine qui représente la

**COURBE D'ÉQUILIBRE MONOVIARIANT
= COURBE DE CHANGEMENT D'ÉTAT**

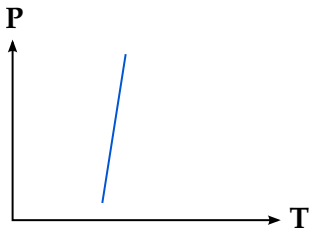
Aspect thermodynamique

► Équation de Clapeyron

$$P = \frac{\Delta S}{\Delta V} T - \frac{\Delta H}{\Delta V}$$

$$\Delta S \gg \Delta V$$

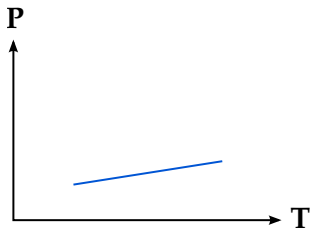
Bon **GÉOTHERMOMÈTRE**



Ex. : transition staurotide-grenat

$$\Delta V \gg \Delta S$$

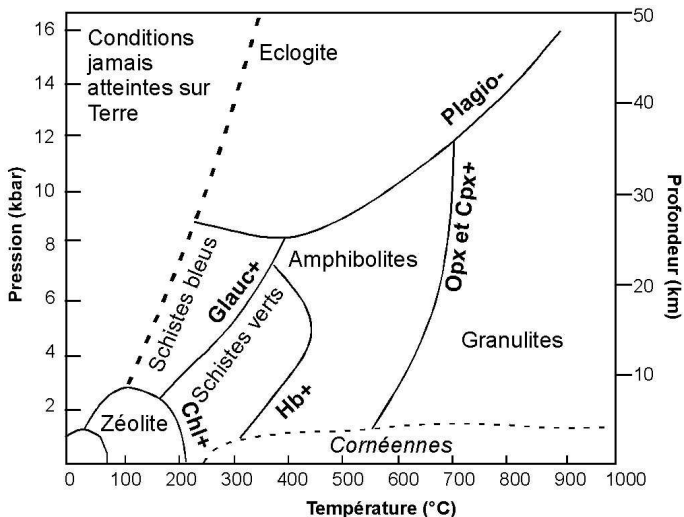
Bon **GÉOBAROMÈTRE**



Ex. : transition coésite-quartz

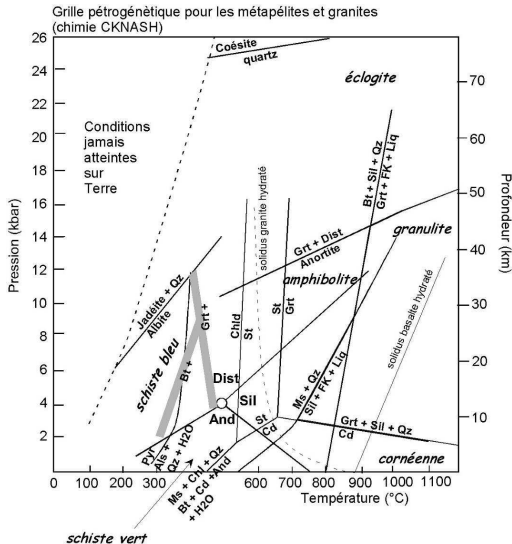
Grilles pétrogénétiques

Pour une chimie basique



Grilles pétrogénétiques

Pour une chimie alumineuse



Notion de paragenèse

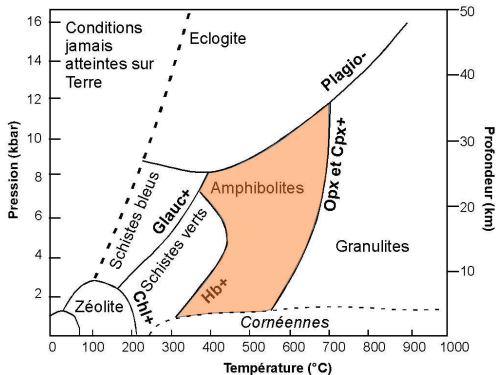
Paragenèse = assemblages minéralogiques à l'équilibre

Notion de paragenèse

Paragenèse = assemblages minéralogiques à l'équilibre

Exemple Faciès des amphibolites - Série basique

Hornblende + Epidote + Plagioclase + Grenat

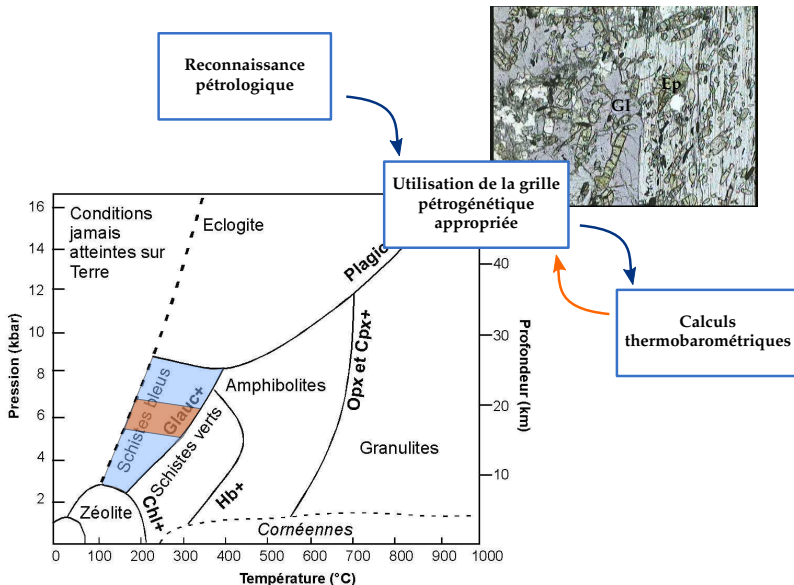


Notion de paragenèse

Paragenèse = assemblages minéralogiques à l'équilibre

	MÉTABASITE	METAPELITE
<i>Schistes Verts</i>	alb + ep + chl + act +/- grt	chl + ms + pl + and +/- grt +/- bt
<i>Amphibolites</i>	hb + ep + pl + grt +/- cpx	stau + dist ou sill + bt + grt +/- ms
<i>Granulites</i>	opx + cpx + gft	sill ou dist + fdK + grt +/- cord
<i>Cornéennes</i>	hb ou act + pl +/- chl +/- cpx +/- opx	cord + and ou sill + ms + bt + fdK +/- chl
<i>Schistes Bleus</i>	glauc + law ou ep + pl	phengite + chl + chld + dist + grt
<i>Éclogites</i>	cpx (omphacite) + grt	dist + phengite + grt + coesite

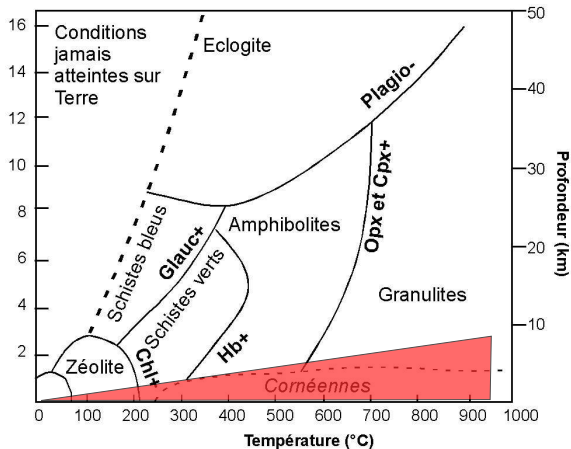
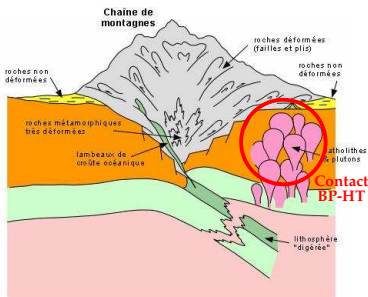
Bilan méthodologie



Localisation des roches métamorphiques

- ▶ À proximité des sources ponctuelles de chaleur :
 - ↪ Métamorphisme de contact

Basse pression - Haute température



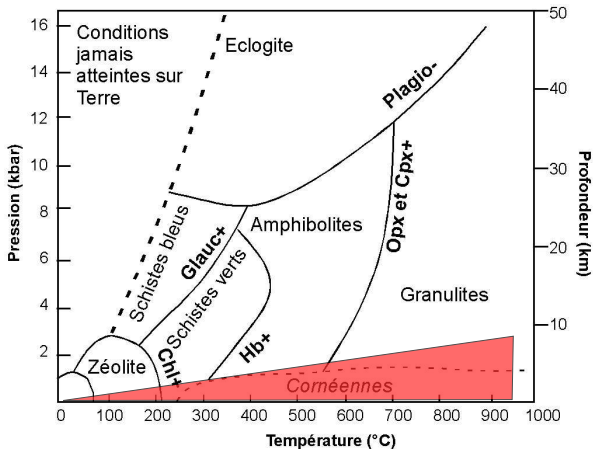
Localisation des roches métamorphiques

- ▶ À proximité des sources ponctuelles de chaleur :
 - ↪ Métamorphisme de contact

**Basse pression -
Haute température**



Cornéenne à andalousite



Localisation des roches métamorphiques

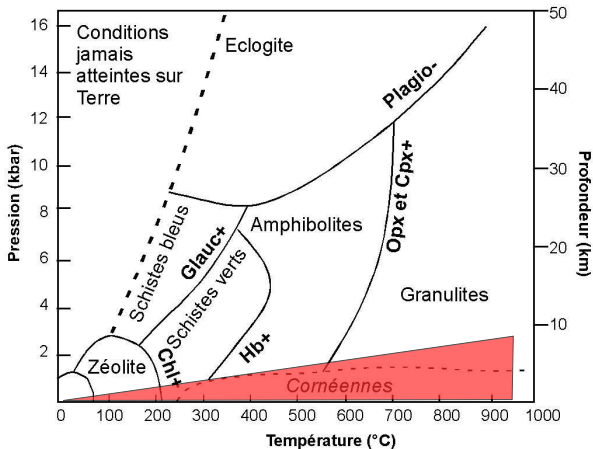
► À proximité des sources ponctuelles de chaleur :

- ↪ Métamorphisme de contact
- ↪ Hydrothermalisme lié aux intrusions

**Basse pression -
Haute température**



Skarn (Mexique)

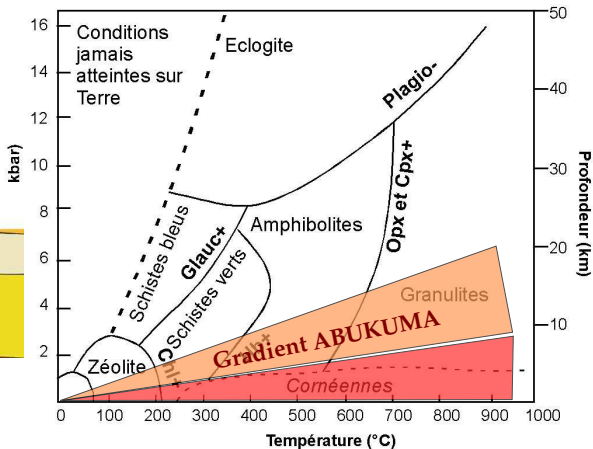
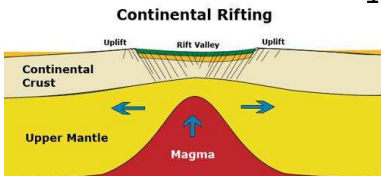


Localisation des roches métamorphiques

► Dans les zones d'extension

- ↪ Métamorphisme de rifting
- ↪ Métamorphisme de dorsale
- ↪ Métamorphisme près de failles normales syn à post-orogéniques

Basse à moyenne pression
Haute température



Localisation des roches métamorphiques

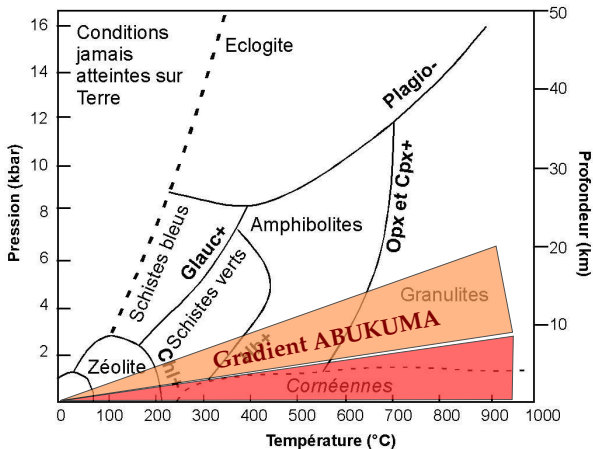
► Dans les zones d'extension

- ↪ Métamorphisme de rifting
- ↪ Métamorphisme de dorsale
- ↪ Métamorphisme près de failles normales syn à post-orogéniques

Basse à moyenne pression
Haute température



Granulite (grenat, disthène)

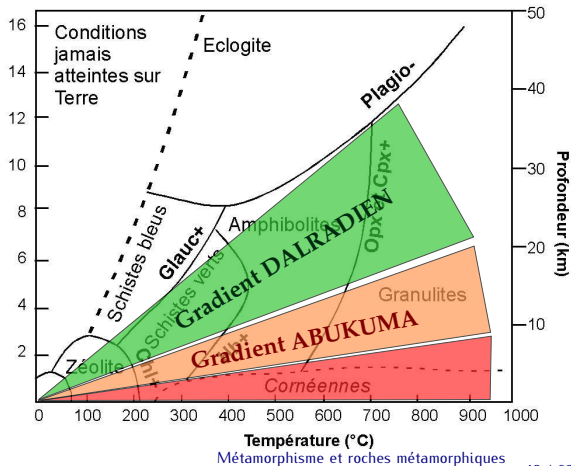
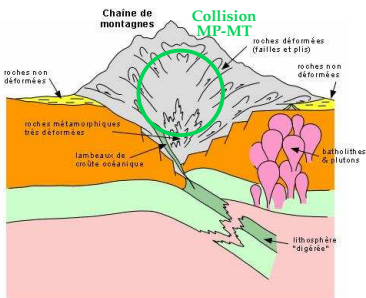


Localisation des roches métamorphiques

► Dans les zones de convergence

↪ Métamorphisme de collision

Moyenne pression -
Moyenne température



Localisation des roches métamorphiques

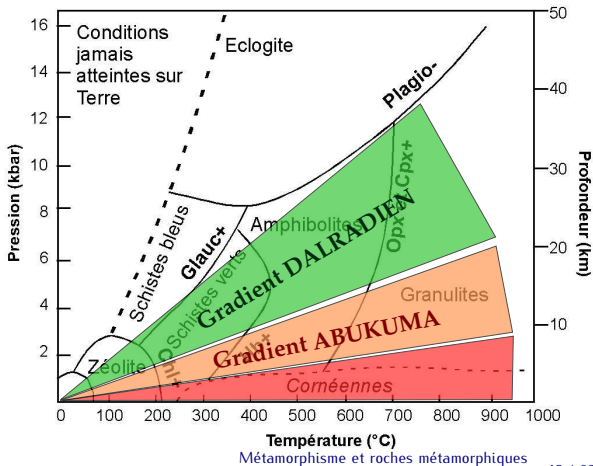
► Dans les zones de convergence

↪ Métamorphisme de collision

Moyenne pression -
Moyenne température



Amphibolite à disthène
et staurotide

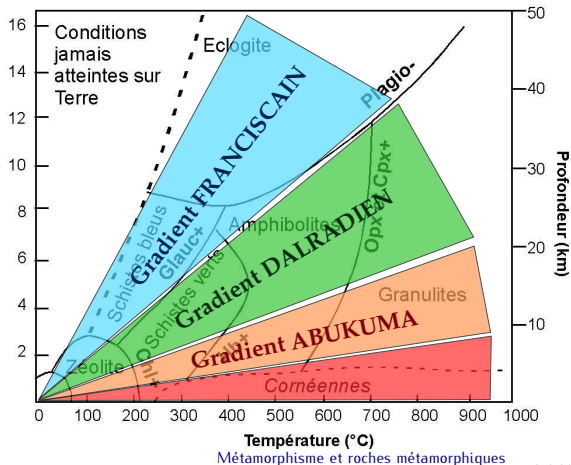
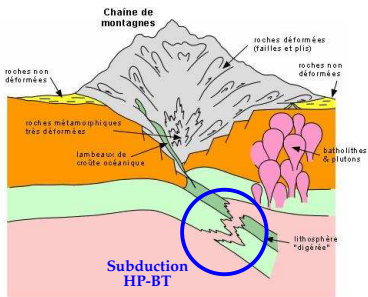


Localisation des roches métamorphiques

► Dans les zones de convergence

- ↪ Métamorphisme de collision
- ↪ Métamorphisme de subduction

Haute pression - Basse température



Localisation des roches métamorphiques

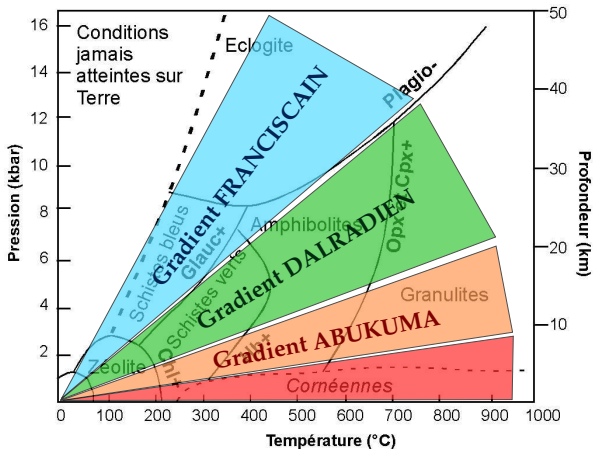
► Dans les zones de convergence

- ↪ Métamorphisme de collision
- ↪ Métamorphisme de subduction

Haute pression - Basse température

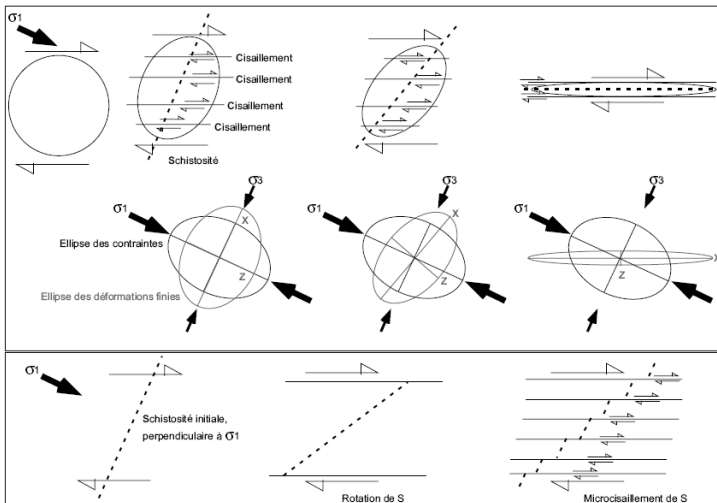


Schiste bleu (glaucophane, épidote, grenat)



1. Introduction
2. Genèse des roches métamorphiques
3. Quantification des conditions du métamorphisme
4. Trajets Pression-Température-temps-déformation (PTtd)

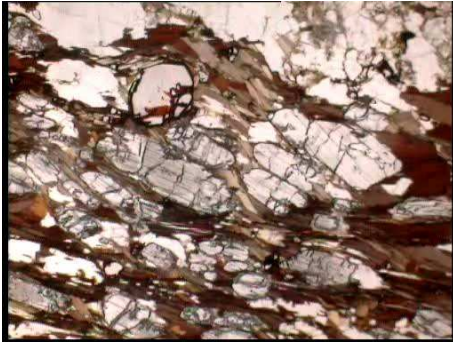
Reconstitution des contextes de déformation



**Relations entre contraintes et déformation
cas du cisaillement simple**

Reconstitution des contextes de déformation

Foliation



Linéation



Reconstitution des contextes de déformation

- ▶ Chronologie relative métam-déformation

Minéraux anté-tectoniques

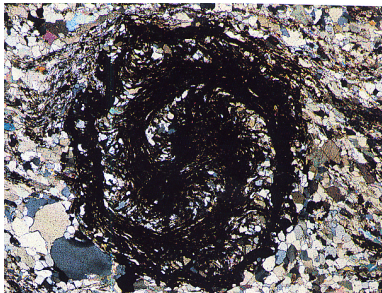


Crénulation

Reconstitution des contextes de déformation

- ▶ Chronologie relative métam-déformation

Minéraux syn-tectoniques



Grenat hélicitique

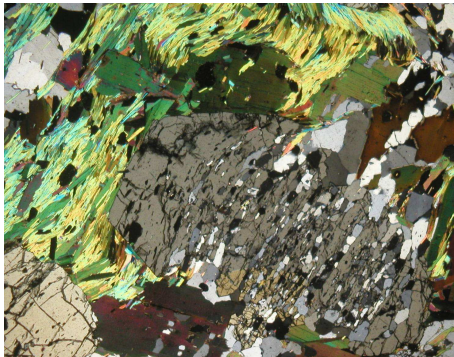


Cristallisation en zone d'ombre

Reconstitution des contextes de déformation

- ▶ Chronologie relative métam-déformation

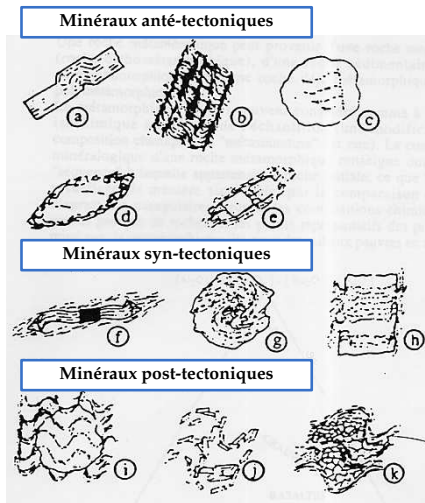
Minéraux post-tectoniques



Staurotide recoupant minéraux foliés

Reconstitution des contextes de déformation

► Chronologie relative métam-déformation



Datation du métamorphisme

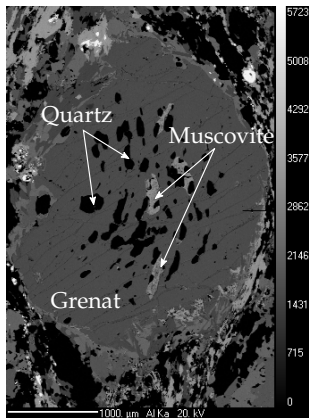
► Datation relative



Cas des auréoles de réaction

Datation du métamorphisme

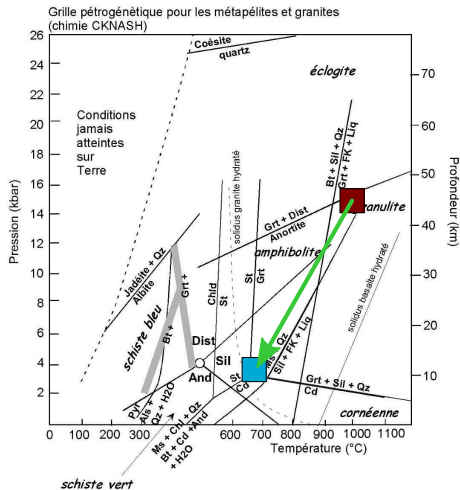
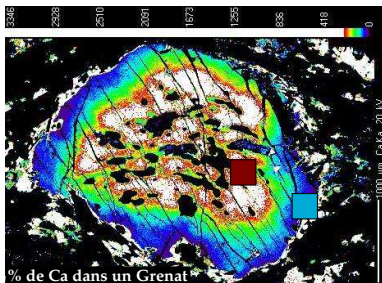
► Datation relative



Cas des inclusions minérales

Datation du métamorphisme

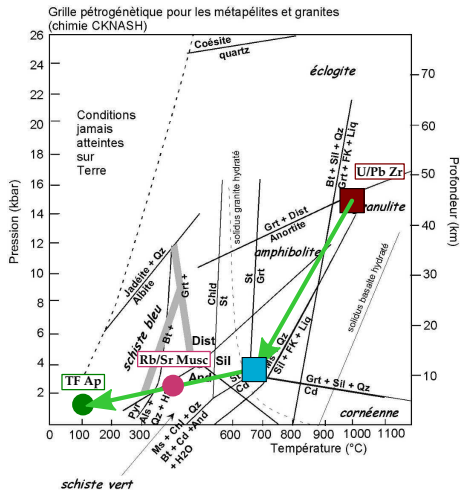
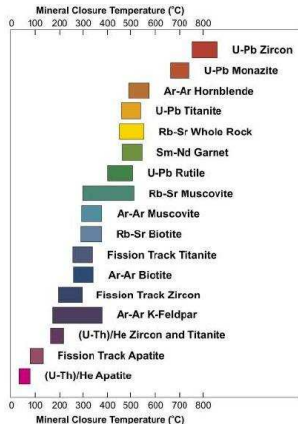
► Datation relative



Cas de la composition chimique

Datation du métamorphisme

► Datation absolue



Températures de fermeture des systèmes isotopiques

Datation du métamorphisme

Bilan

Obtention d'histoires

PRESSION – TEMPÉRATURE – TEMPS – DÉFORMATION

- ▶ Vitesses de refroidissement, de réchauffement
- ▶ Vitesses d'enfouissement ou d'exhumation
- ▶ Vitesses et nature de la déformation

Reconstitution du contexte de formation (compression, extension, décrochant) et d'exhumation

Bilan

