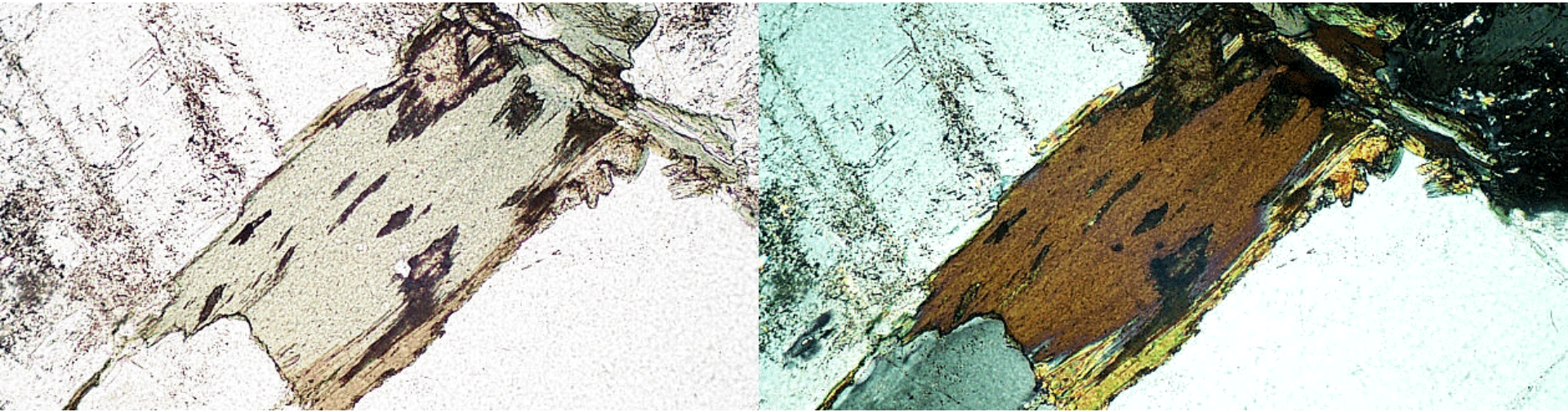


UE 503.2 - MÉTAMORPHISME

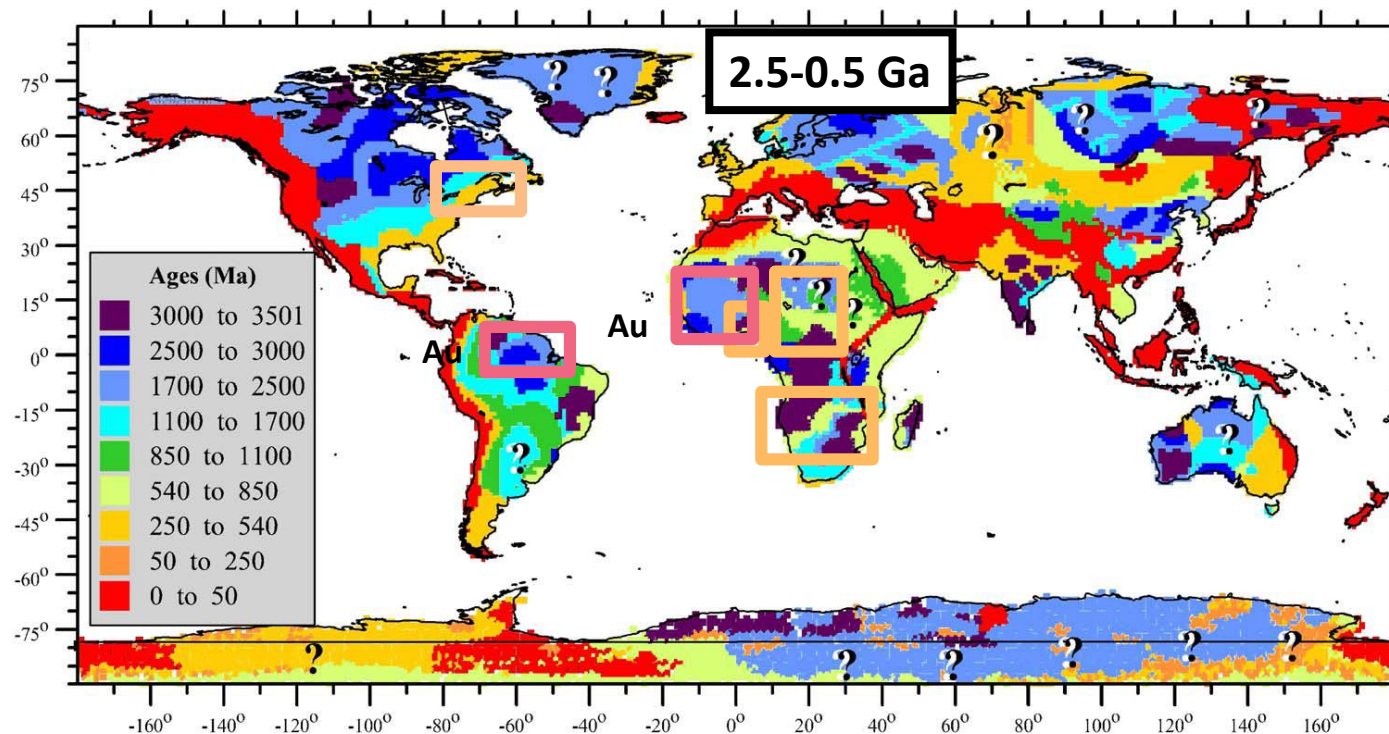


Alexandre TARANTOLA / Aurélien EGLINGER

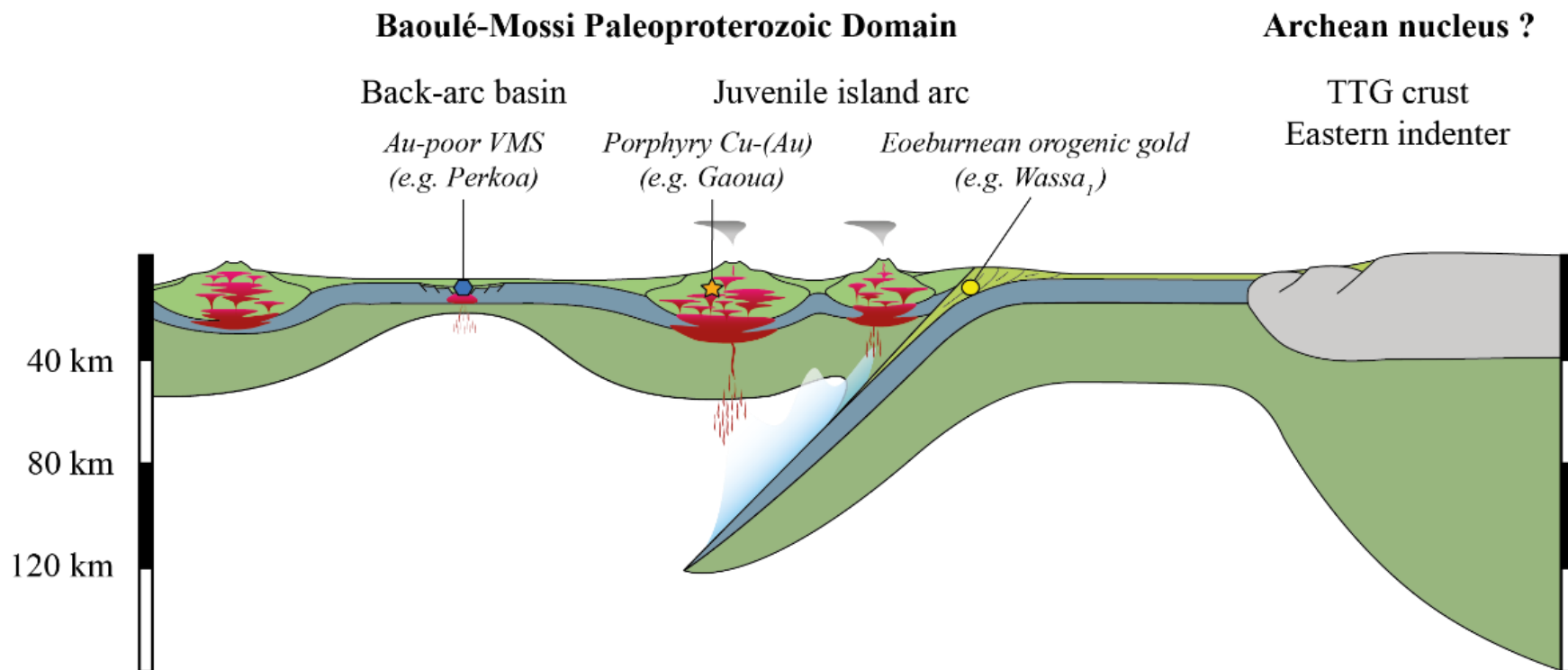
GeoRessources : bureau A610

aurelien.eglinger@univ-lorraine.fr

	Eonothem Eon	Erathem Era	System Period	Age Ma
Precambrian	Proterozoic	Neo-proterozoic	Ediacaran	542
			Cryogenian	~630
			Tonian	850
		Meso-proterozoic	Stenian	1000
			Ectasian	1200
			Calymmian	1400
		Paleo-proterozoic	Statherian	1600
			Orosirian	1800
			Rhyacian	2050
			Siderian	2300
	Archean	Neoarchean		2500
				2800
		Mesoarchean		3200
				3600
		Paleoarchean		
		Eoarchean	Lower limit is not defined	



a Eoeburnean gold deposits: ca. 2180 - 2130 Ma



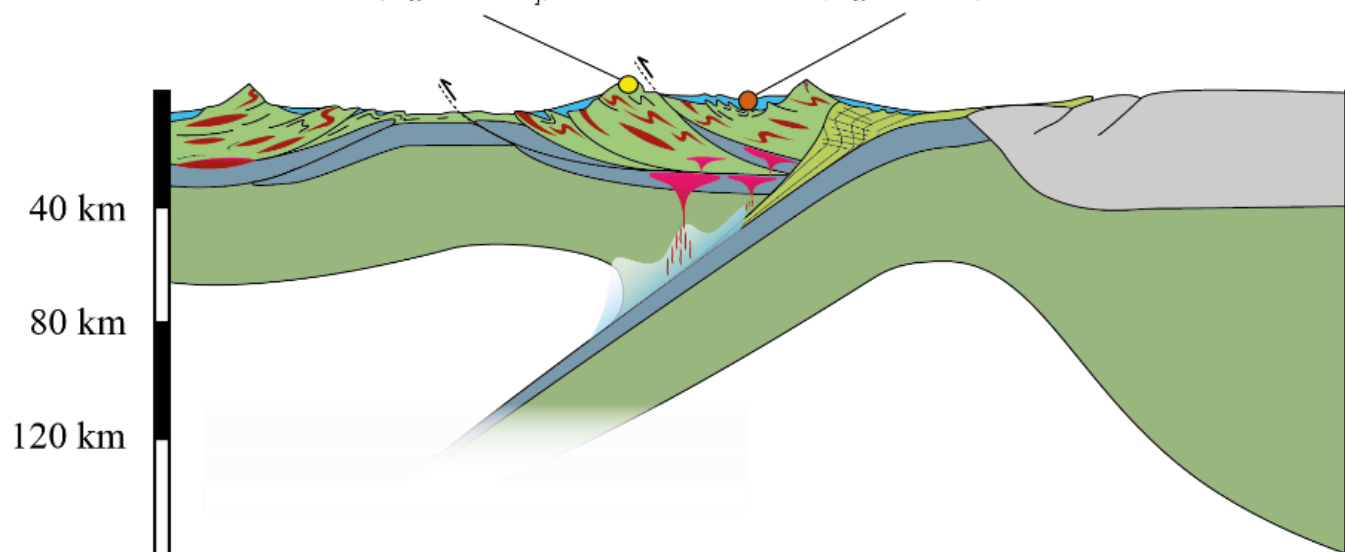
Stade de déformation D₁

b Early Eburnean gold deposits: ca. 2110 - 2090 Ma

Syn-orogenic basins

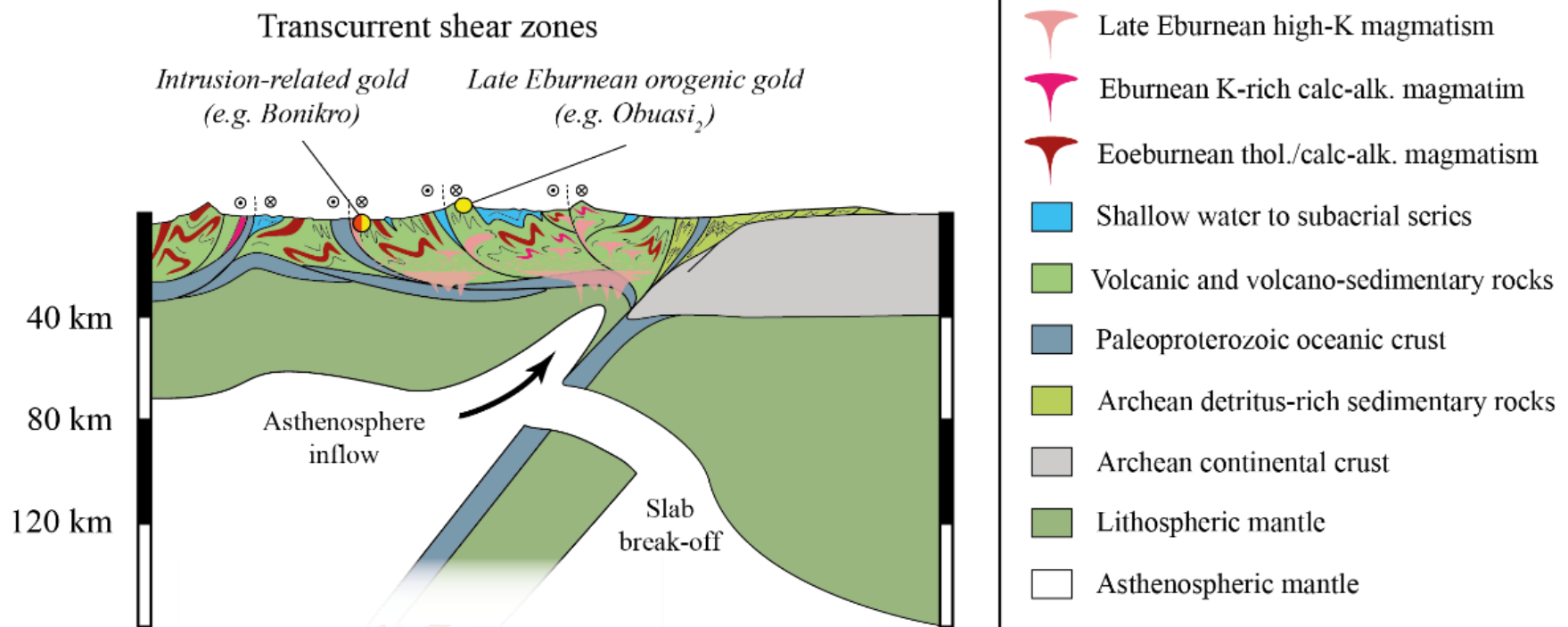
*Early Eburnean orogenic gold
(e.g. Obuasi₁)*

*Paleoplacer gold
(e.g. Tarkwa)*



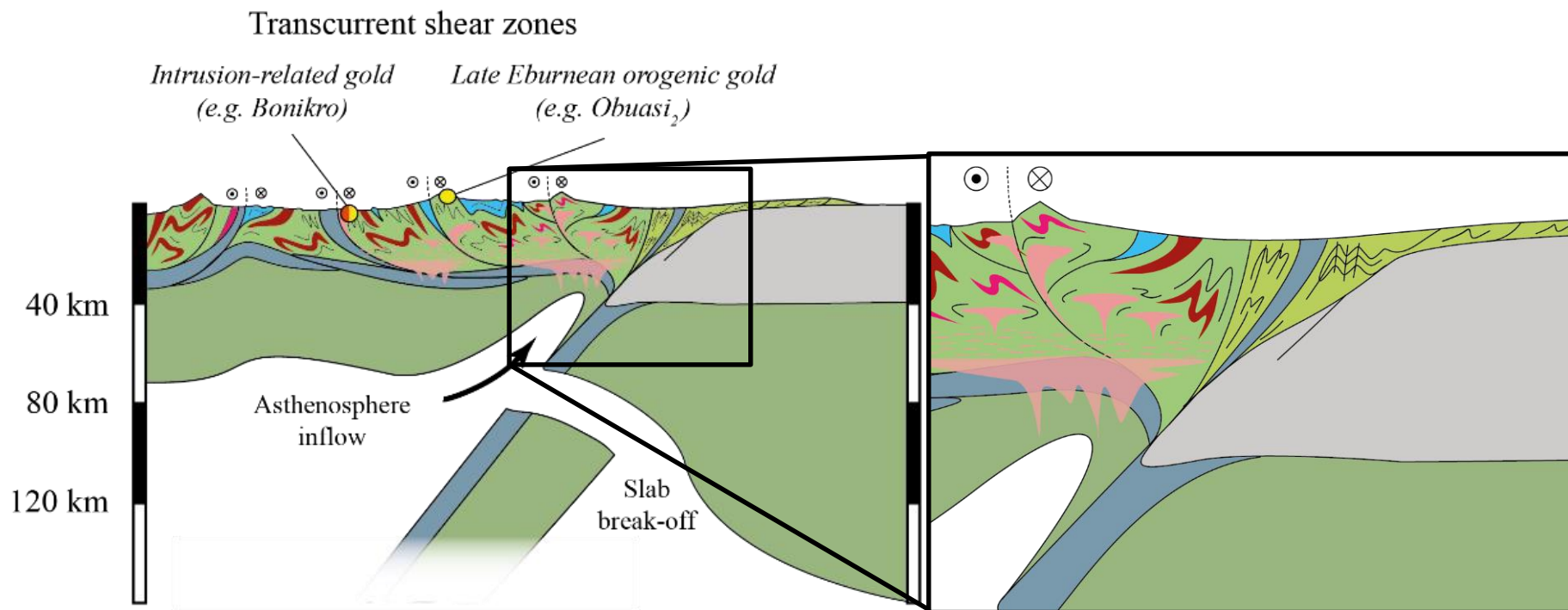
Stade de déformation D₂

c Late Eburnean gold deposits: ca. 2090 - 2050 Ma

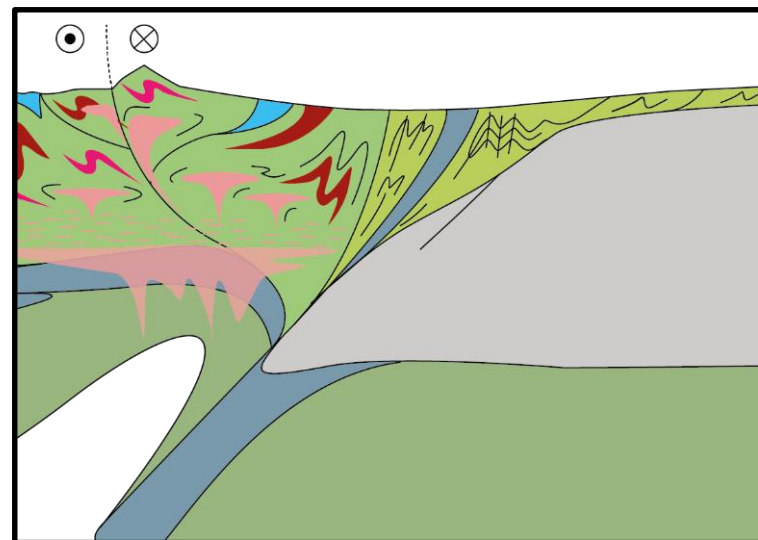
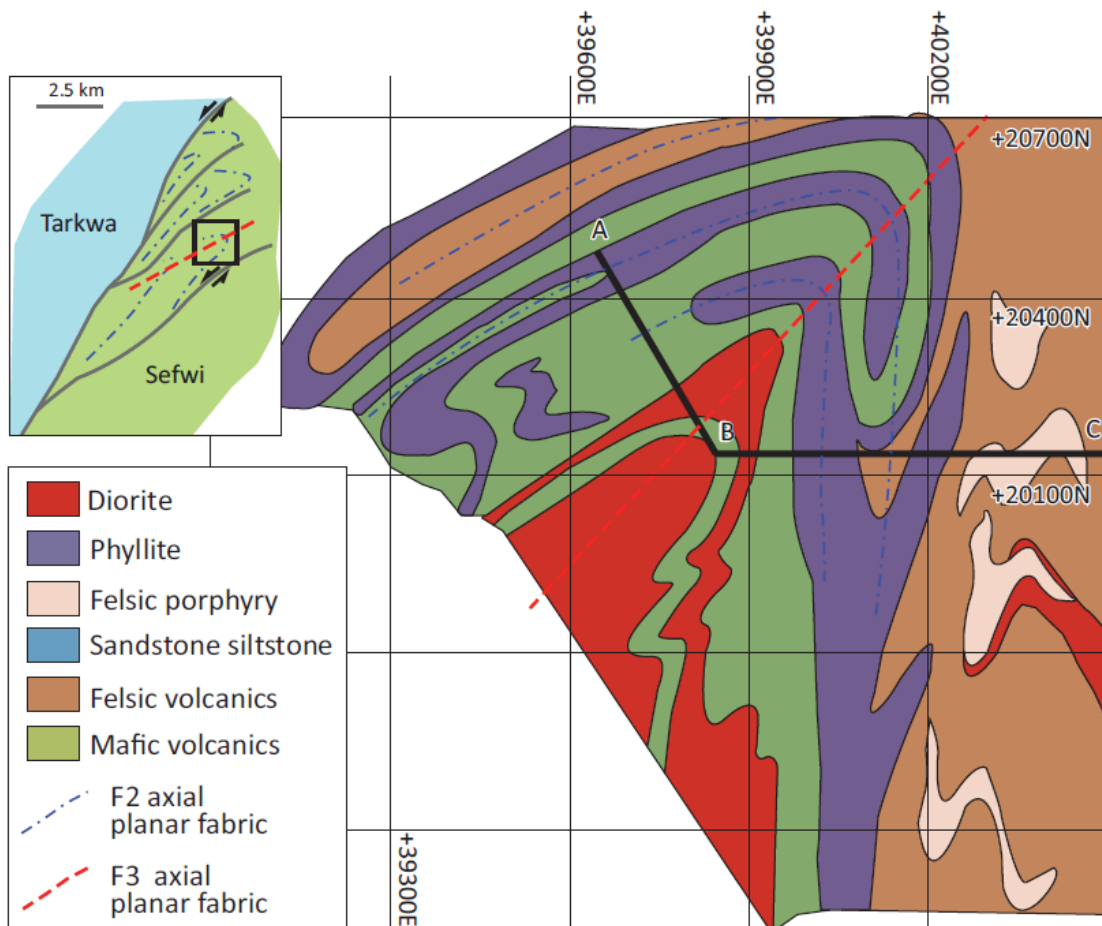


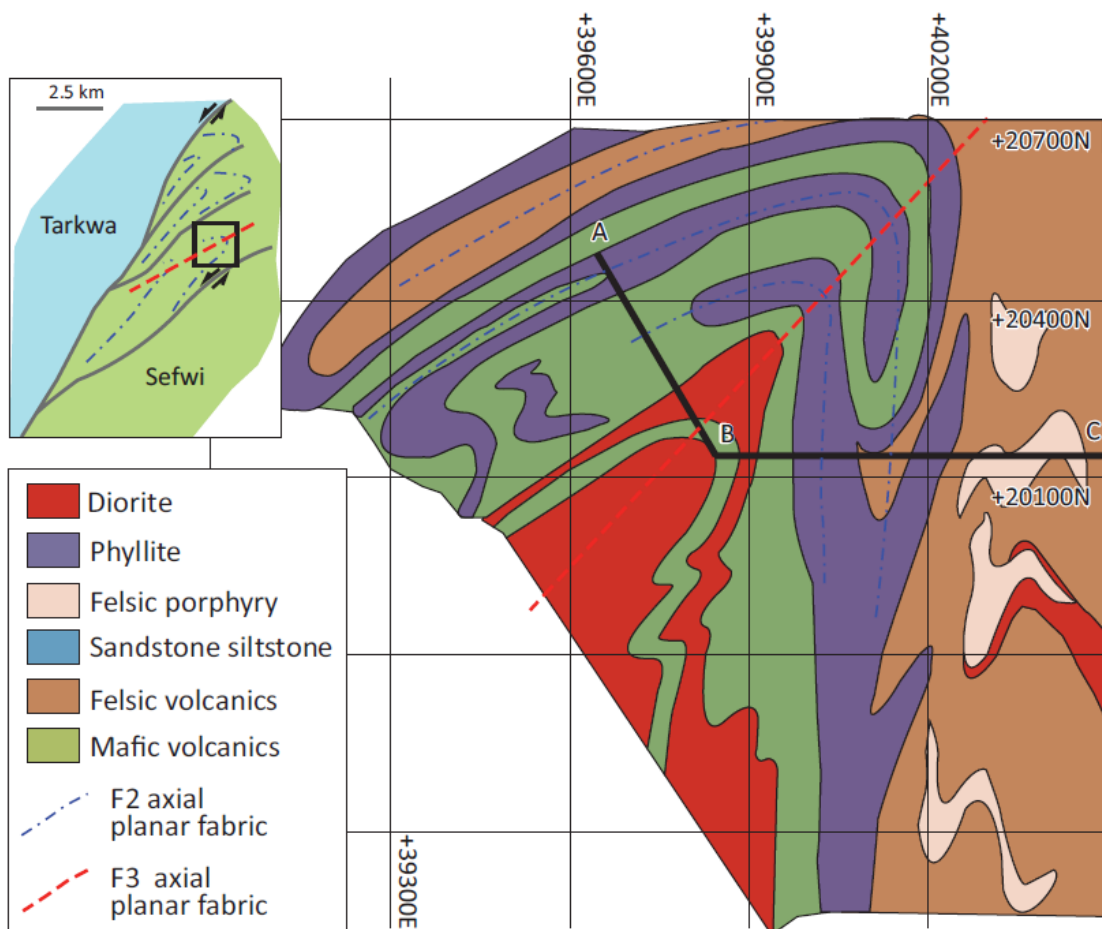
Stade de déformation D₃

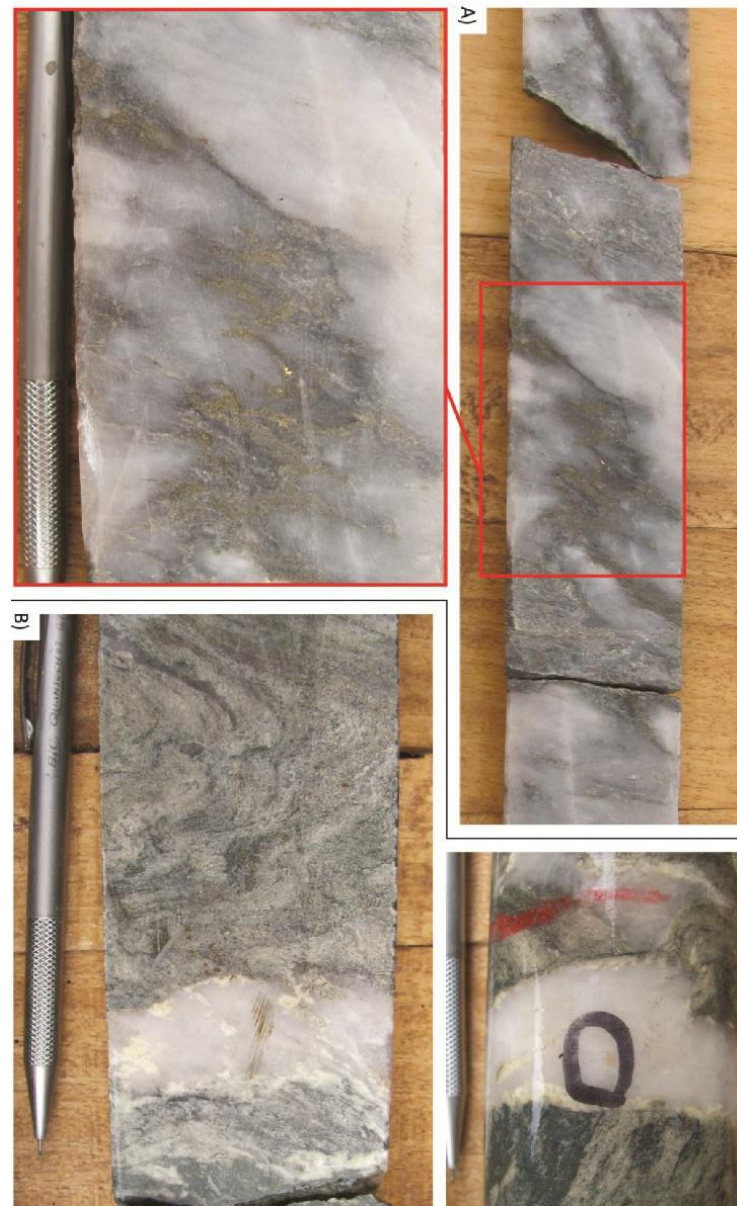
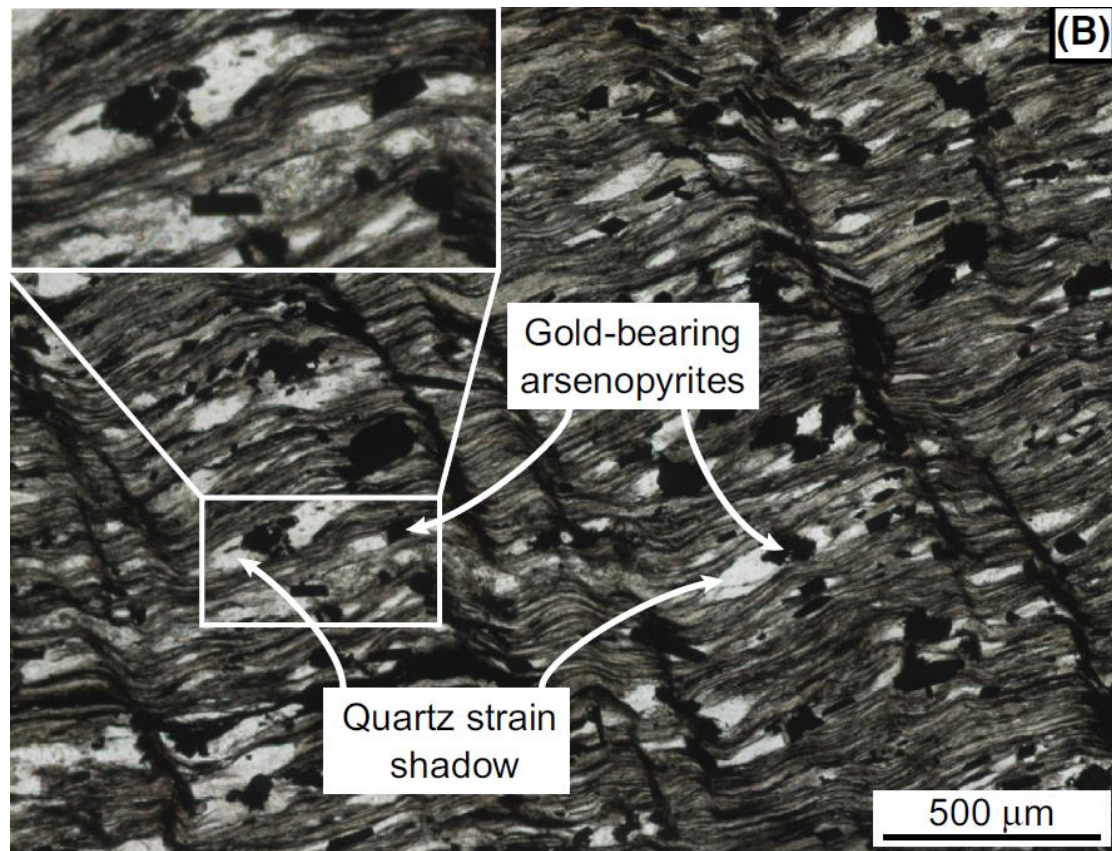
c Late Eburnean gold deposits: ca. 2090 - 2050 Ma

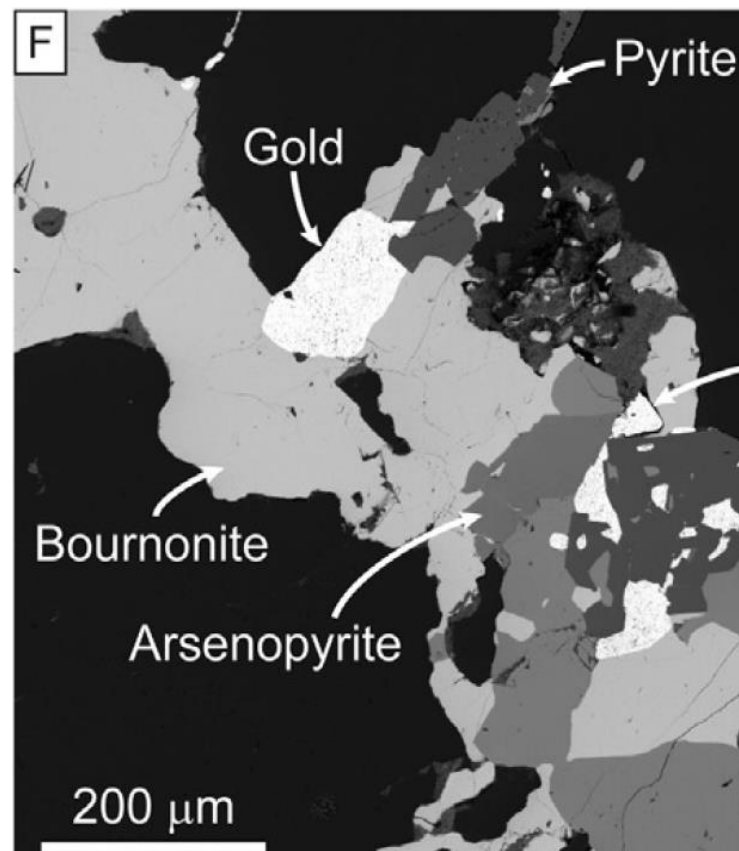
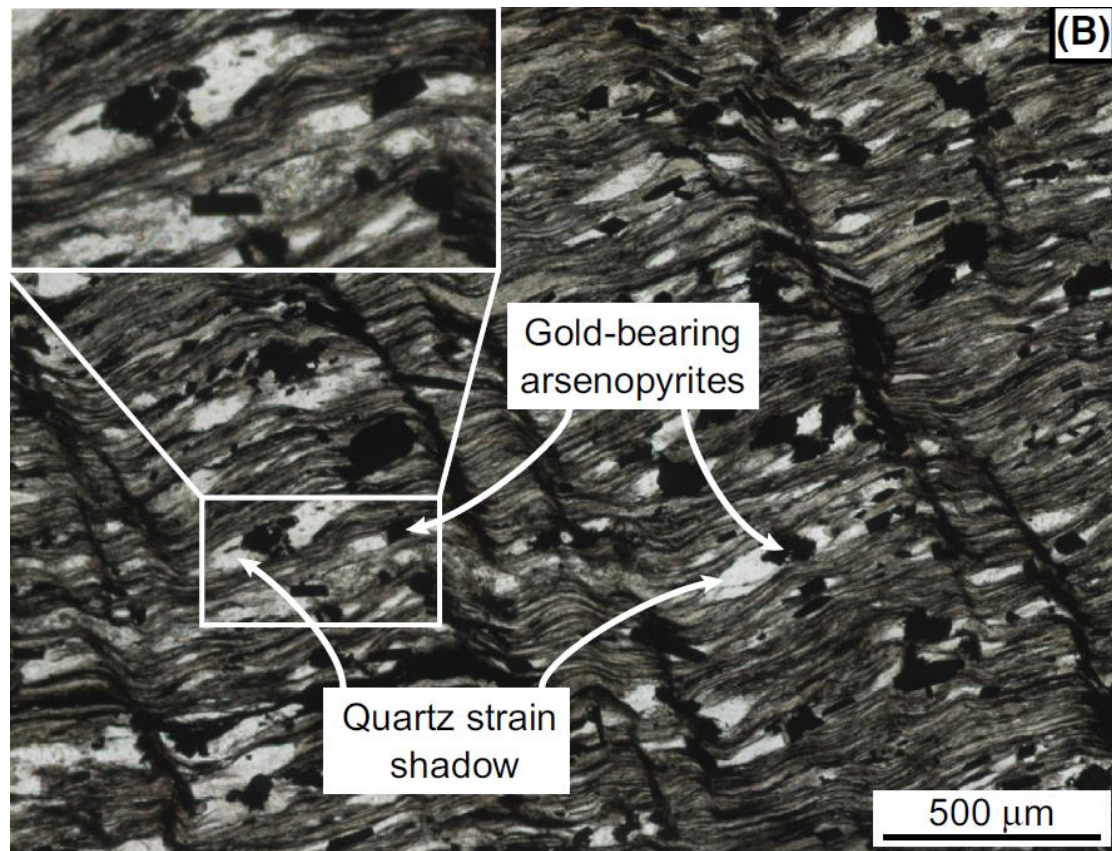


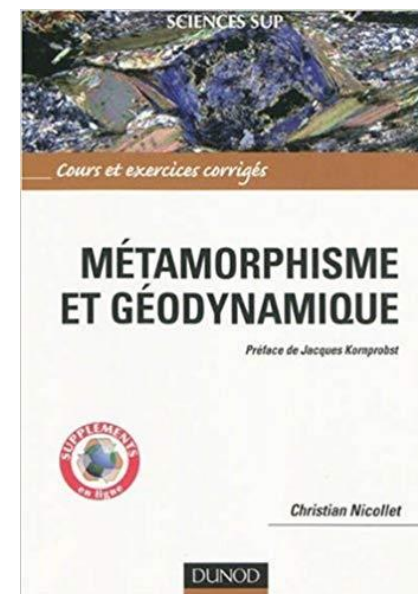
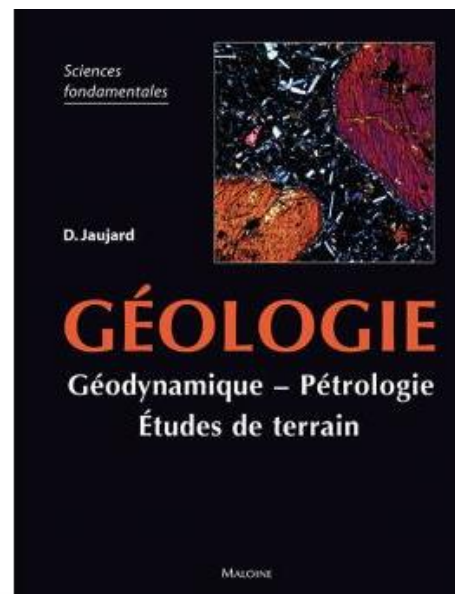
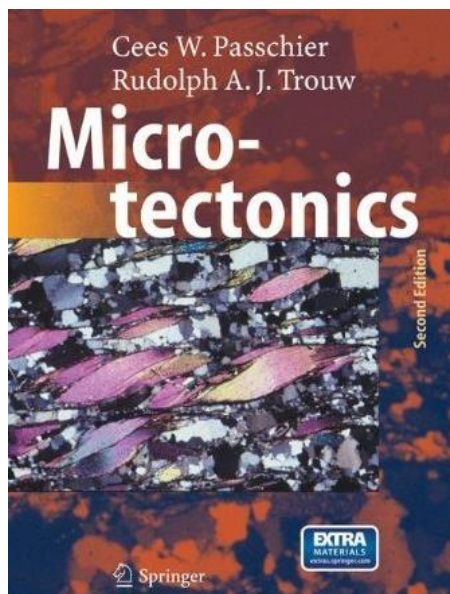
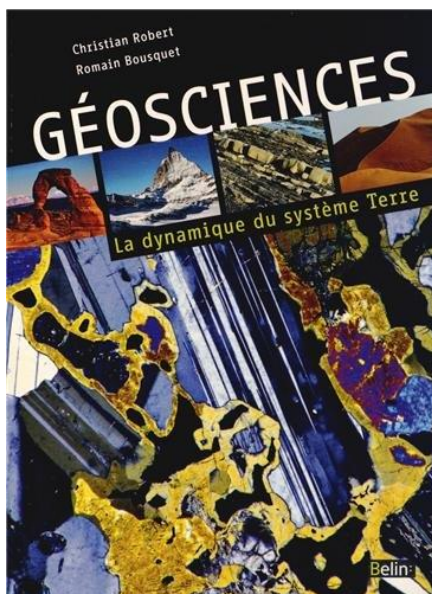
Stade de déformation D₃











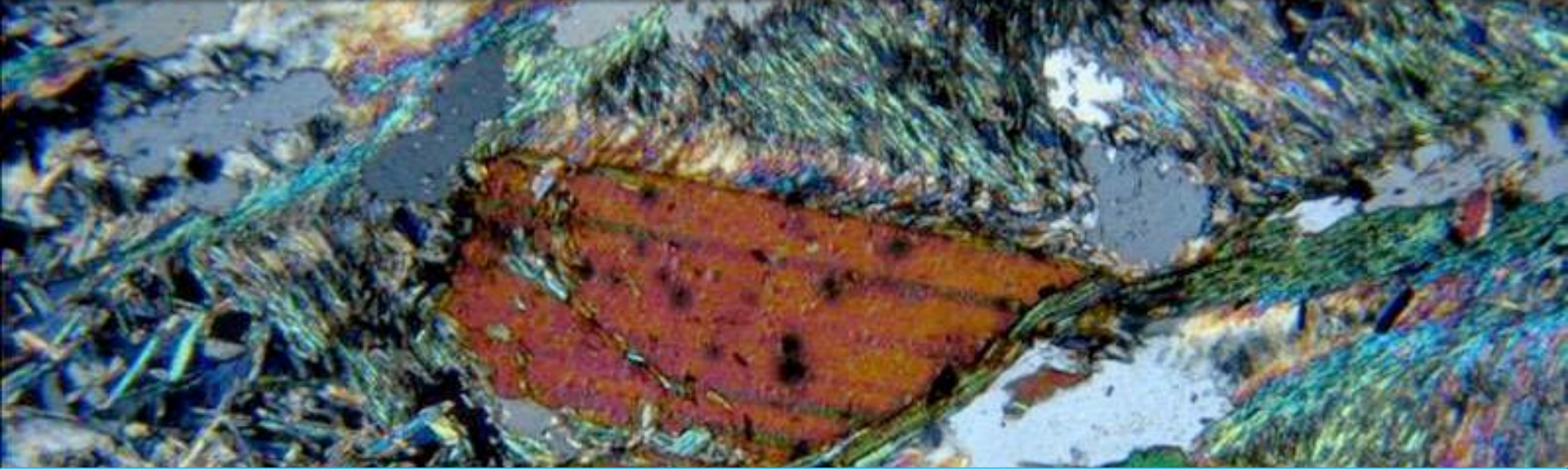
<http://planet-terre.ens-lyon.fr>

<http://christian.nicollet.free.fr>

<http://www.geol-alp.com>

<https://folk.uib.no/nglhe/StructuralGeoBookEmodules.html>

UE 503.2 - MÉTAMORPHISME



1. MICROSTRUCTURES DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. THERMODYNAMIQUE ET ÉQUILIBRES MINÉRAUX

3. EXPRESSIONS DU MÉTAMORPHISME DANS L'OROGÈNE ALPIN

⇒ OROGENÈSE ALPINE

⇒ Métamorphisme HP-BT (Alpes Occidentales)

⇒ Métamorphisme MP-HT (Alpes Centrales)

⇒ Métamorphisme de faible degré

⇒ Métamorphisme de contact

Roches métamorphiques:

⇒ Produits de la **recristallisation** et de la **déformation**,
à l'état solide, d'une **roche initiale** sous l'effet de **variations** :

?

?

?

?

?

...

INTRODUCTION: Rappels sur le métamorphisme

Roches métamorphiques:

⇒ Produits de la **recristallisation** et de la **déformation**,
à l'état solide, d'une **roche initiale** sous l'effet de **variations** :
de la **pression** (P)
de la **température** (T)
des **contraintes** (σ)
de la **composition des fluides** (libres ou liés)
des **conditions rédox**
...

⇒ Rôle de la **composition** (X) de la **roche initiale** (= **protolithe**)
Pour des **roches de compositions différentes**, différents
assemblages de minéraux en équilibre (**paragénèses**) sont
possibles pour de **mêmes conditions P - T** ;

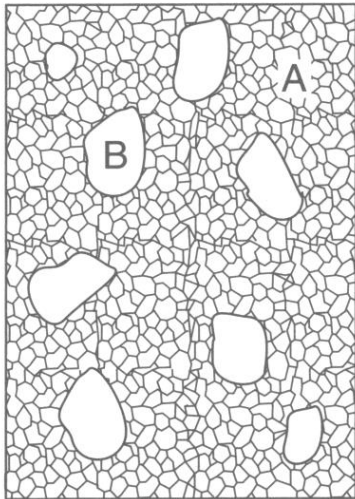
Comment décrire une **roche métamorphique** ?

Comment reconnaître une **paragenèse** ?

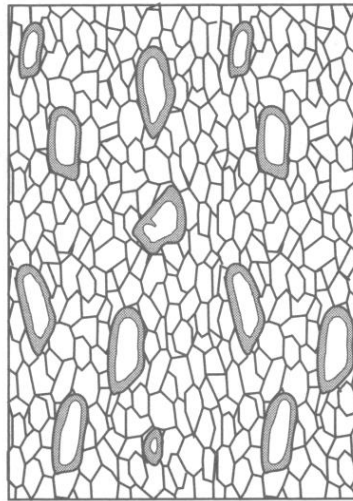
Comment établir une **chronologie relative** entre les paragenèses ?

INTRODUCTION: Recristallisation métamorphique

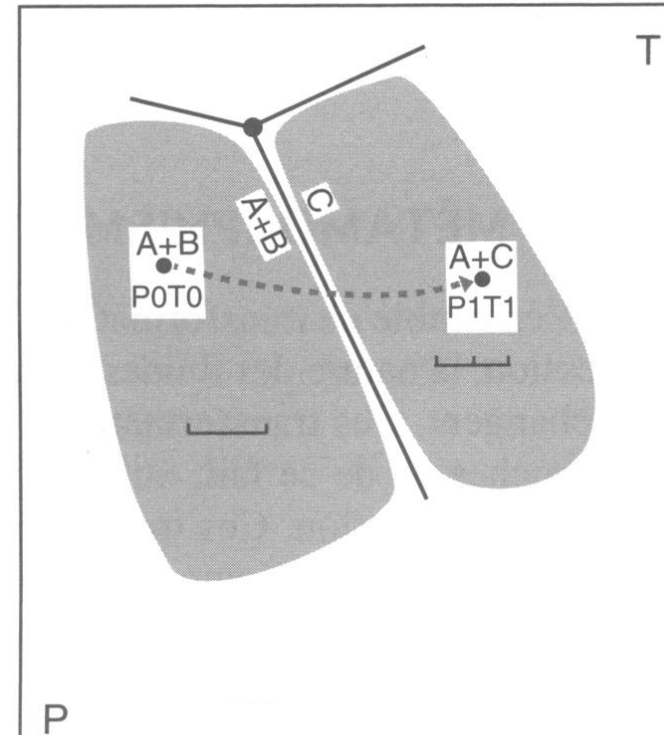
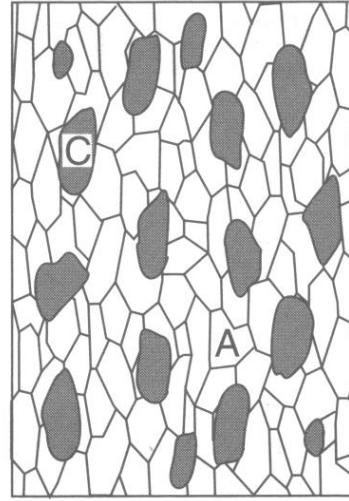
À P_0 - T_0 la roche contient les minéraux A + B



À P_1 - T_1 , la réaction $A + B = C$ intervient...



... jusqu'à disparition de B.



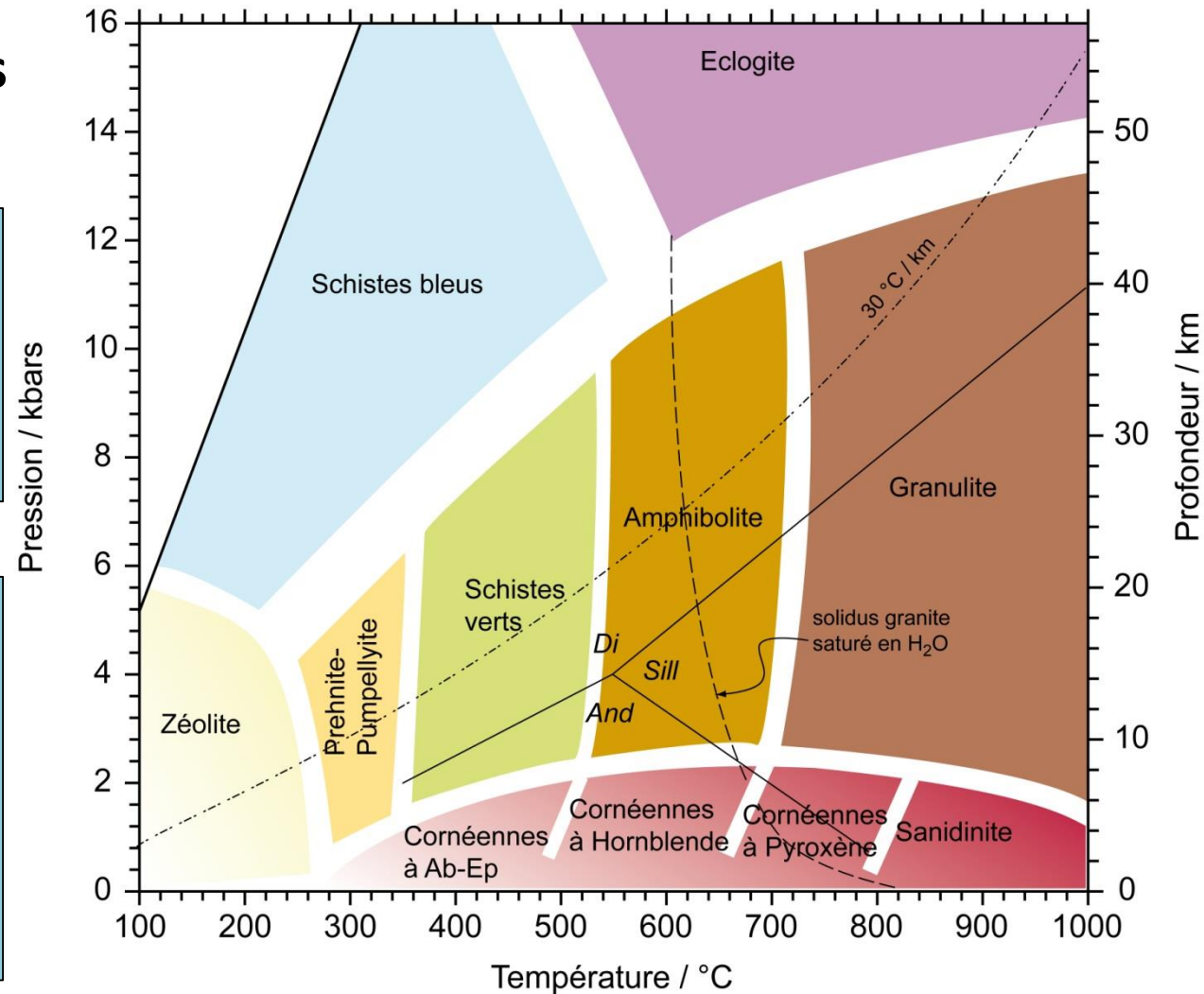
Principes de la recristallisation métamorphique (d'après Nicollet, 2010).

INTRODUCTION: Faciès métamorphiques

Faciès métamorphiques

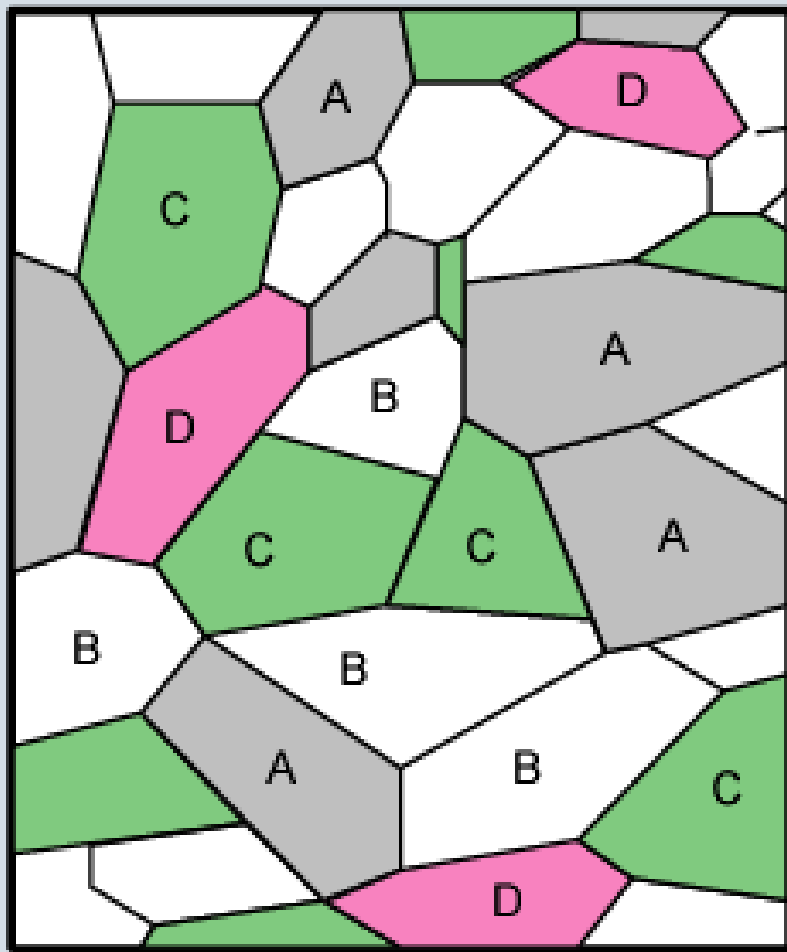
Regrouper des roches soumises à des intervalles de P et T données, indépendamment de leur composition chimique.

Les **noms de faciès** correspondent aux noms des **roches de composition basaltique**, métamorphisées dans les intervalles P - T définis pour ce faciès.

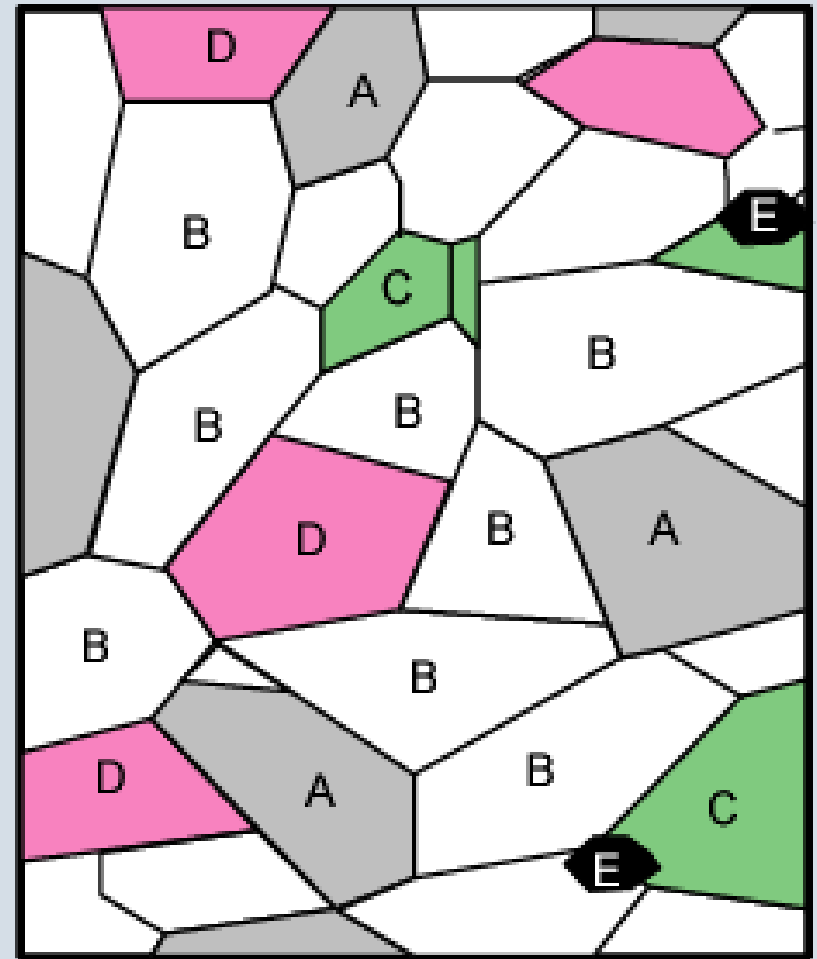


INTRODUCTION: Faciès métamorphiques

Équilibre général et équilibre local



équilibre général
 $A+B+C+D$



équilibre local
 $A+B+D$ et $B+C+E$



INTRODUCTION à *la pétrologie métamorphique*

1. TRANSFORMATIONS MÉTAMORPHIQUES

1. Domaine de déformation des roches métamorphiques
2. Influence du protolithe

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques des roches métamorphiques
2. Microstructures
3. Recristallisation du quartz

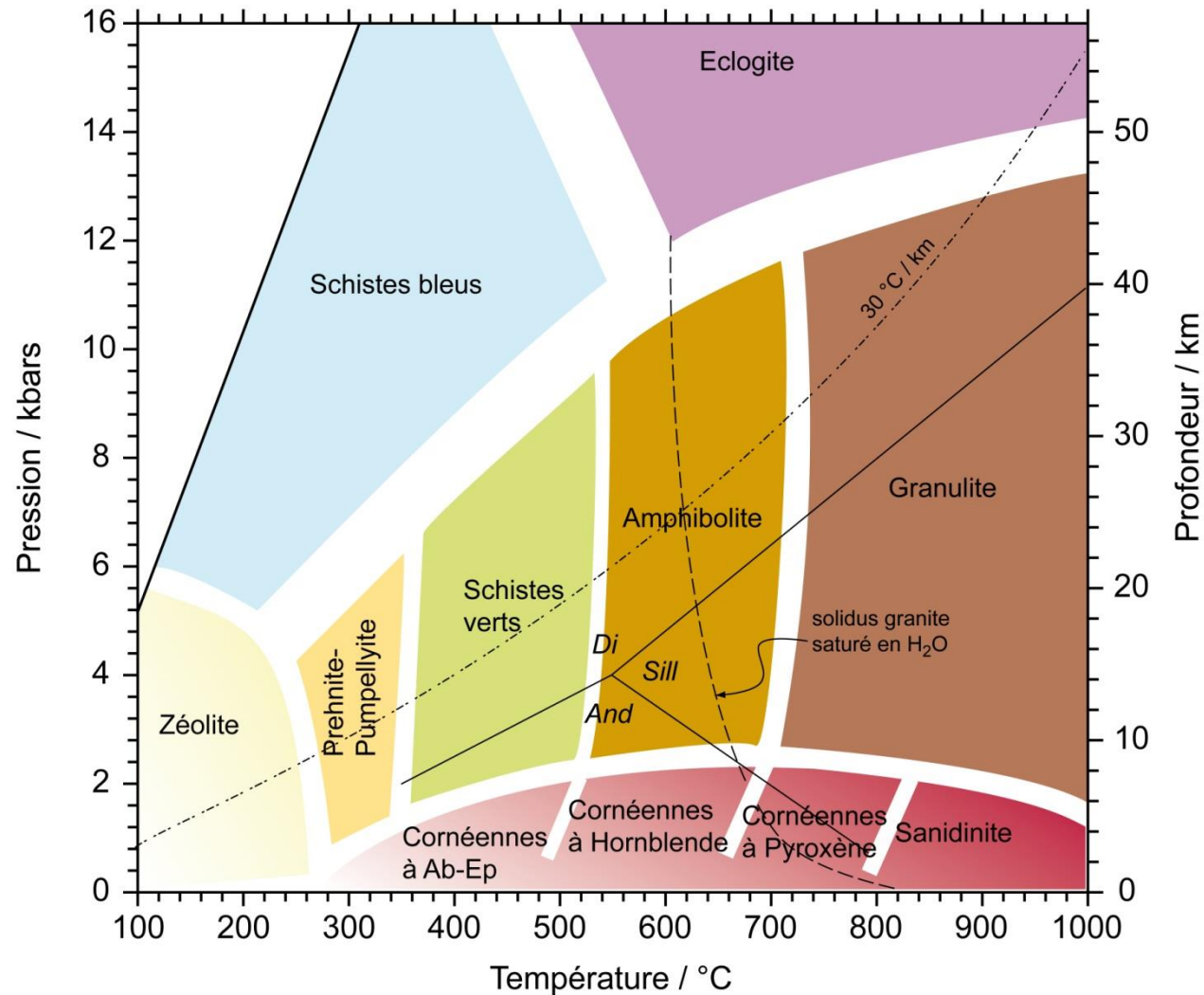
3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité
2. Critères cinématiques du cisaillement

1. TRANSFORMATIONS MÉTAMORPHIQUES

1. Domaine de déformation des roches métamorphiques

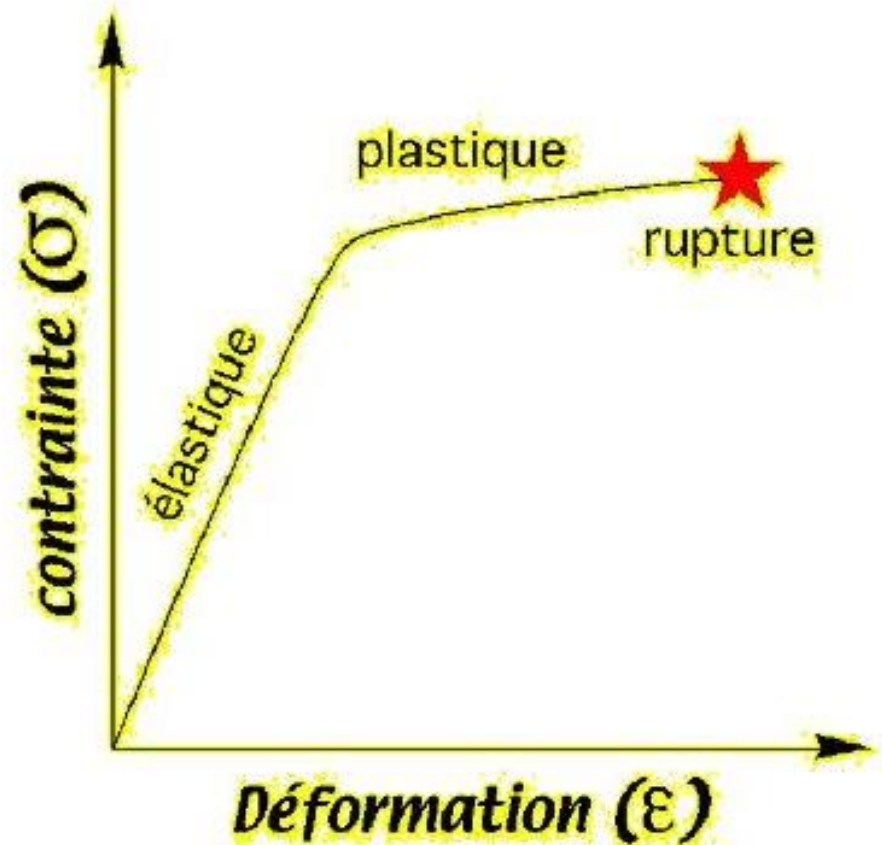
1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes



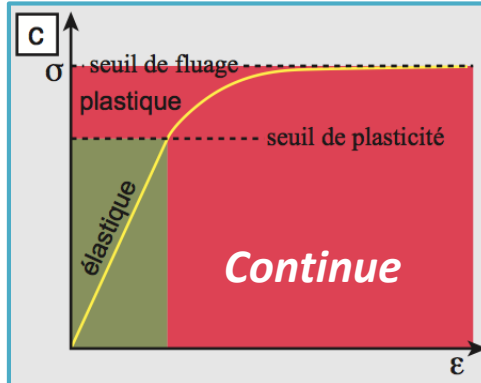
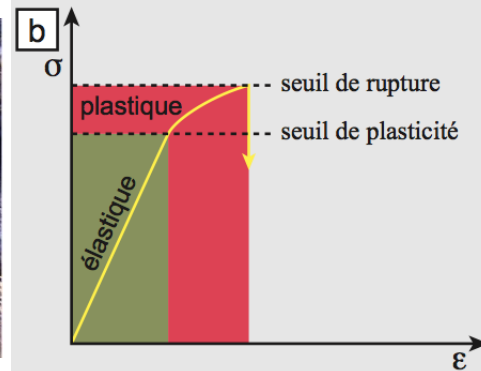
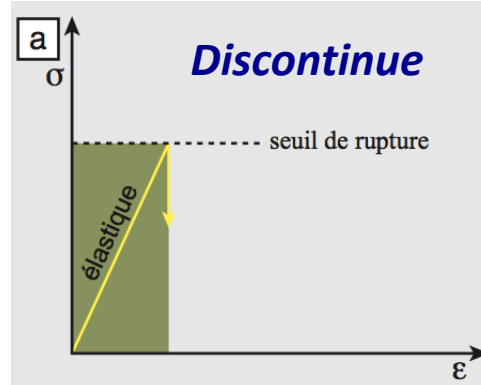
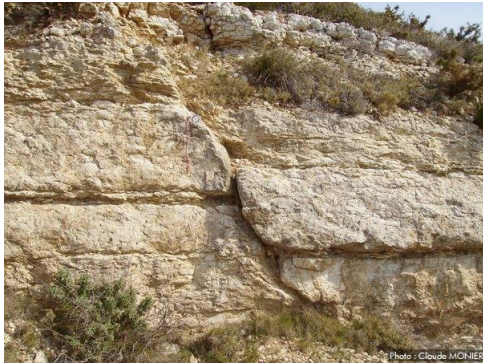
1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes

Il existe **trois principaux types de déformation**:

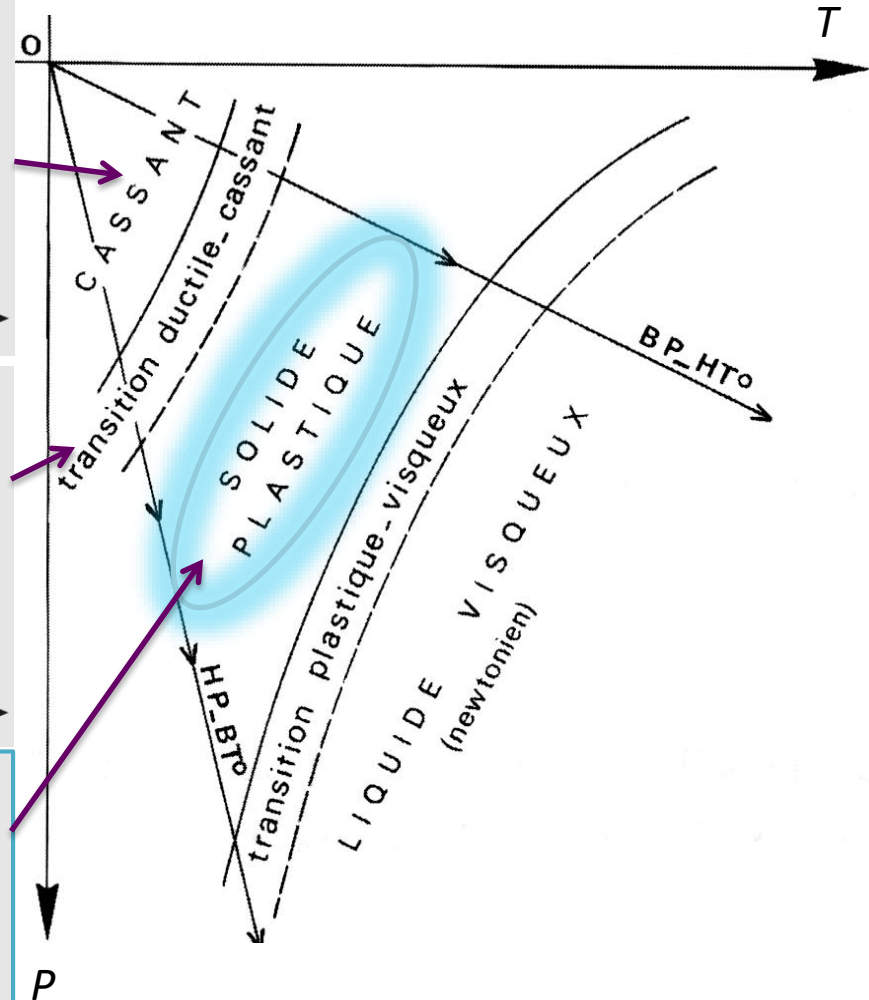
- La **déformation élastique** est déformation réversible des matériaux.
- La **déformation plastique** et le **fluage** sont des déformations irréversible des matériaux.
- La **rupture** est la formation d'un plan de fracture permanent dans le matériau.



1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes



(Huet, 2010)



Représentation schématique des domaines de déformation naturelle en fonction de la pression hydrostatique P et de la température T

1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes

Discontinue

charriages synsédimentaires-
tectonique cassante

plis isopaques

plis anisopaques-
schistosité

foliation

dômes migmatitiques

cisaillements ductiles

Continue

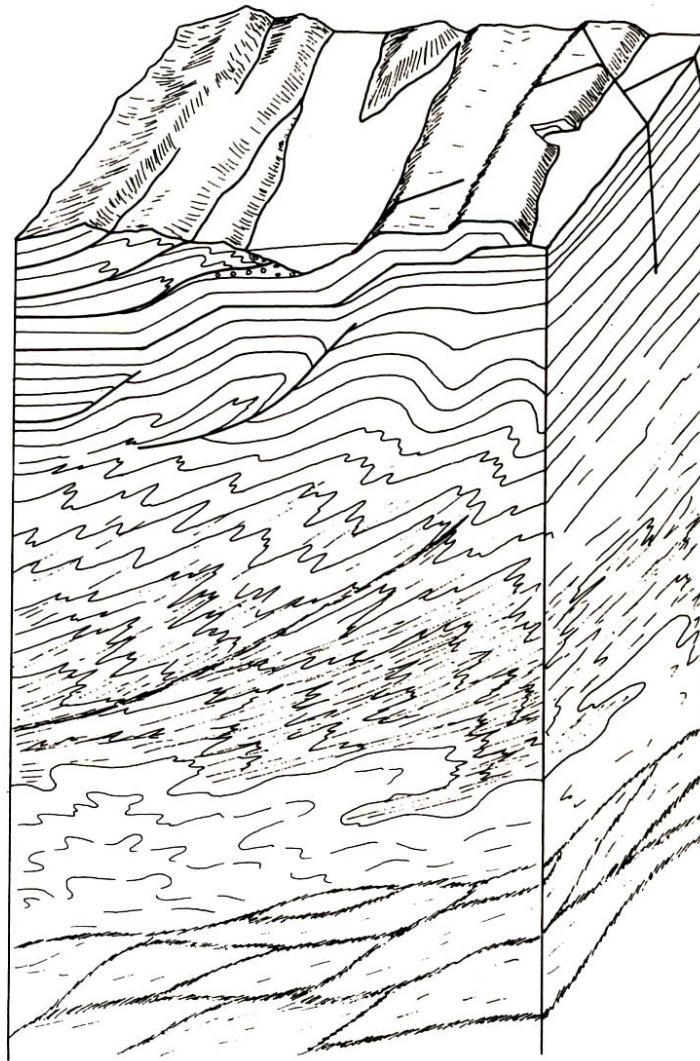
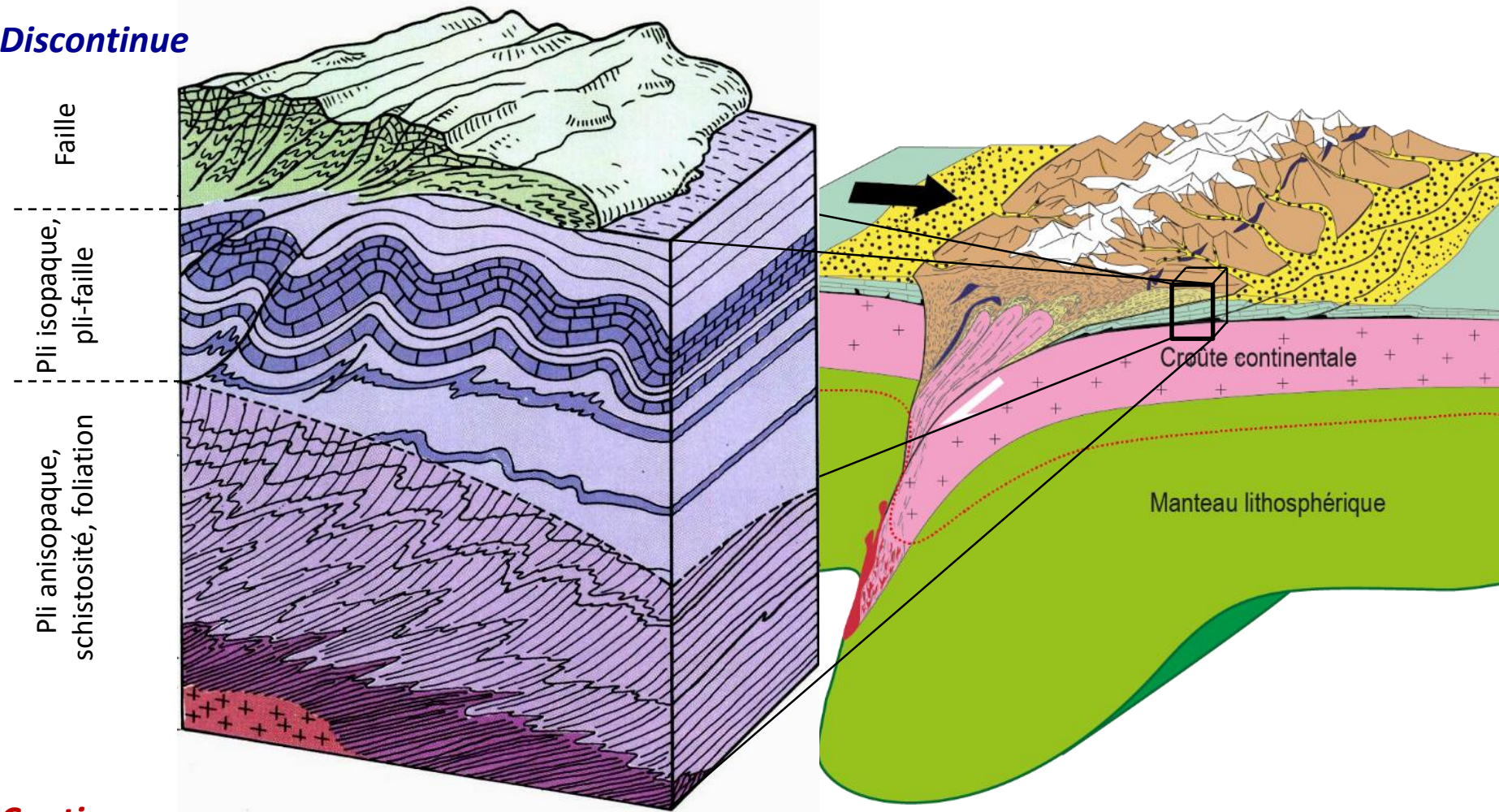


Fig. 109 Niveaux structuraux (d'après Mattauer).
Schéma théorique de répartition des structures en niveaux étagés, à un moment de la déformation de la croûte.

1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes

Discontinue



Continue

1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes

Discontinue

niveau structural
supérieur

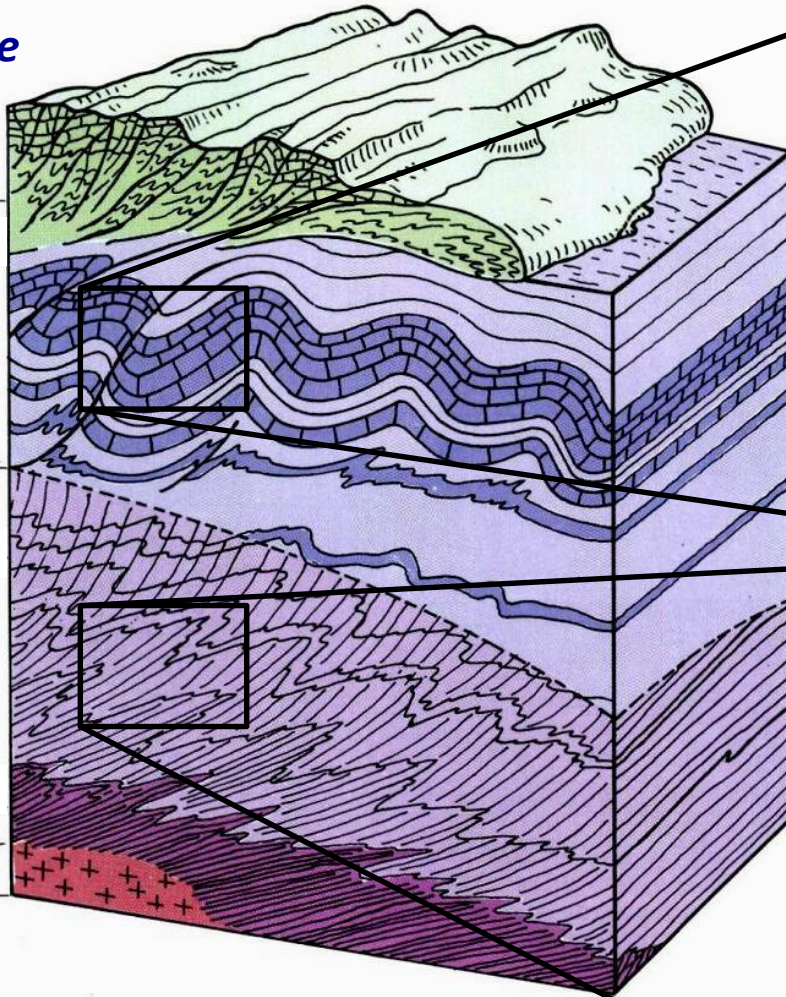
niveau structural
moyen

front supérieur
de schistosité

niveau structural
inférieur

limite supérieure
de la foliation

début de la fusion
(granite d'anatexie)



Pli de Sassenage – Alpes françaises



Echelle déca- à kilométrique

Pli de la Dent de Morcles – Alpes suisses

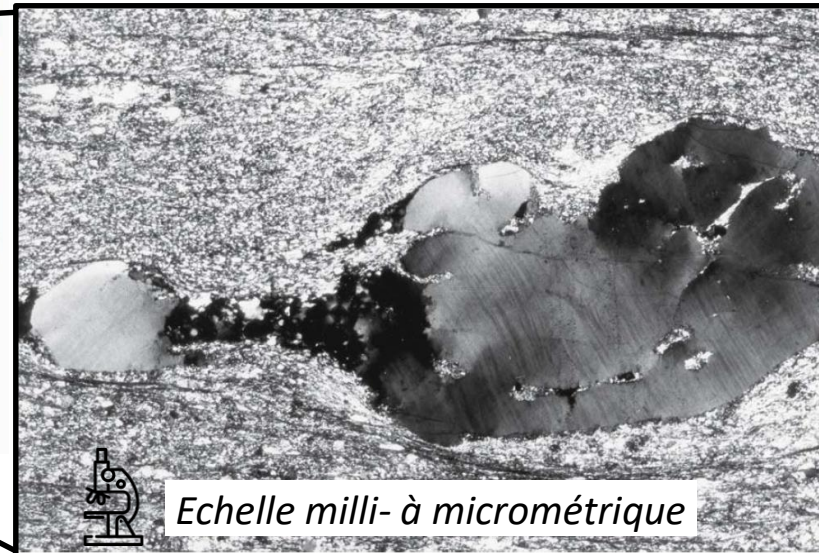
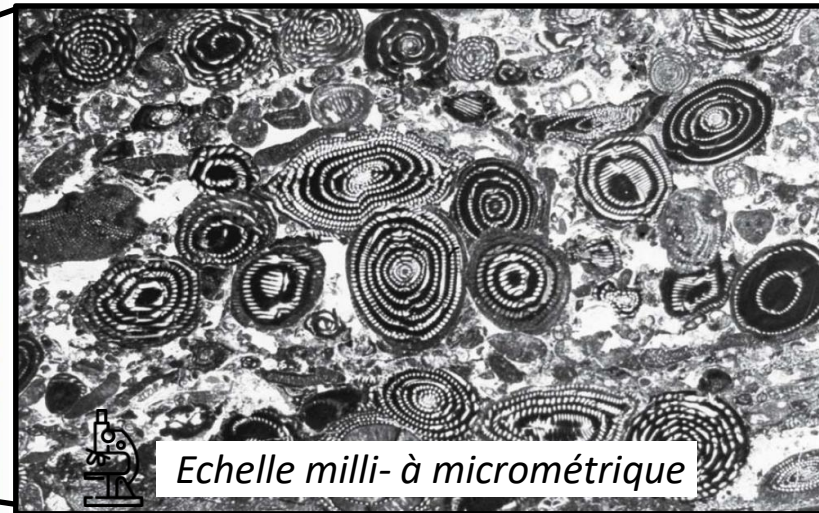
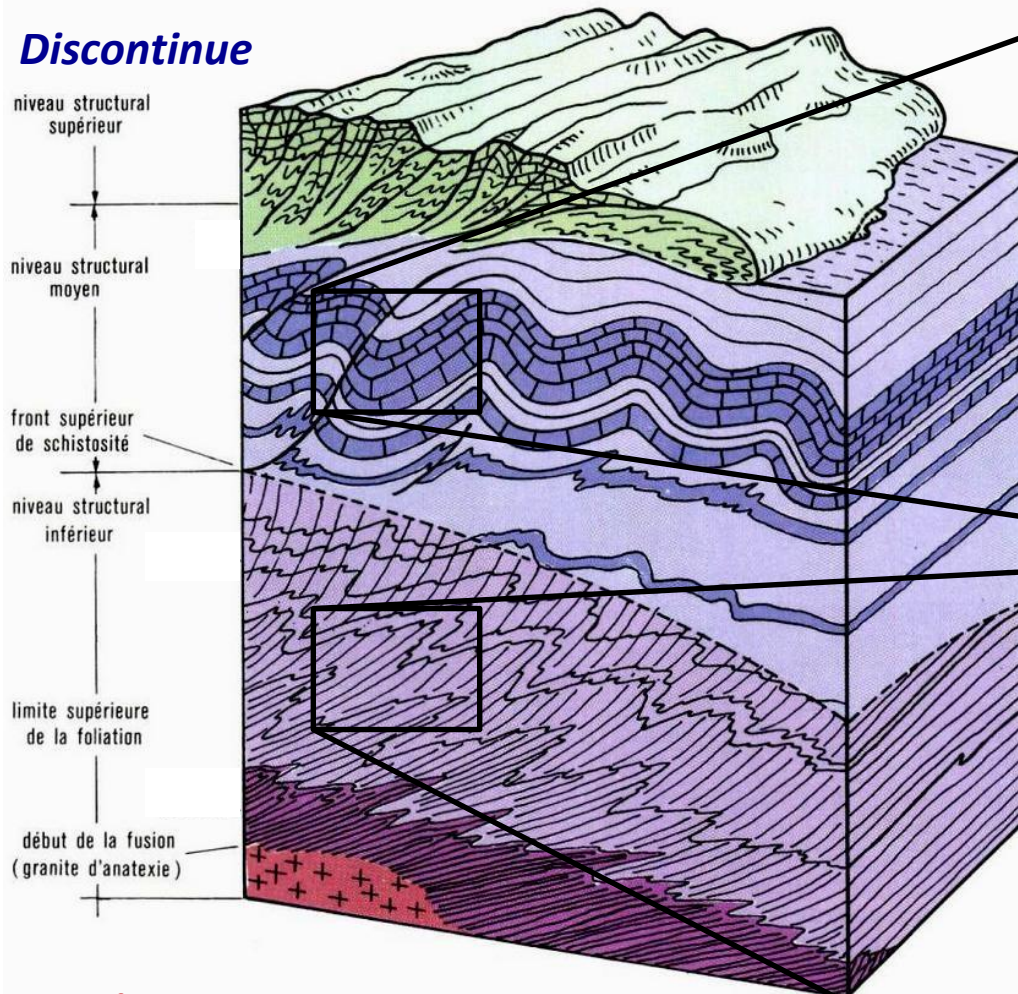


Echelle déca- à kilométrique

Continue

1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes

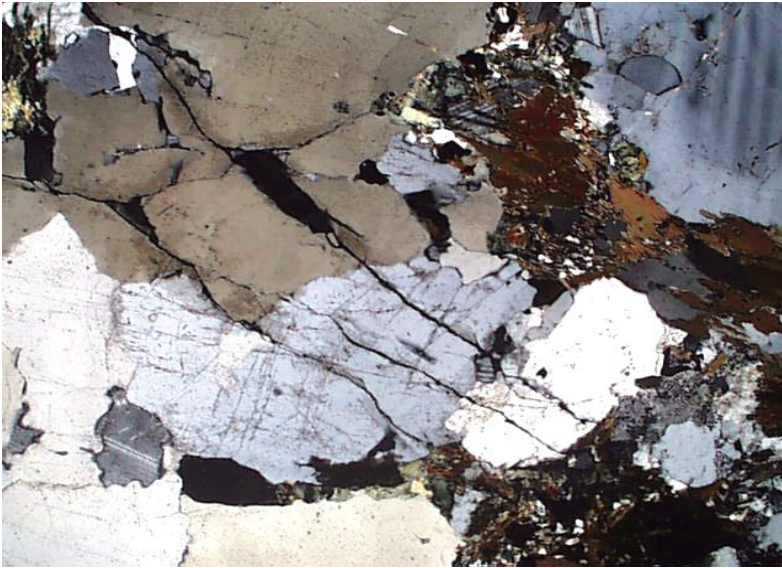
Discontinue



Continue

1.1 Domaine de déformation: P , T , contraintes

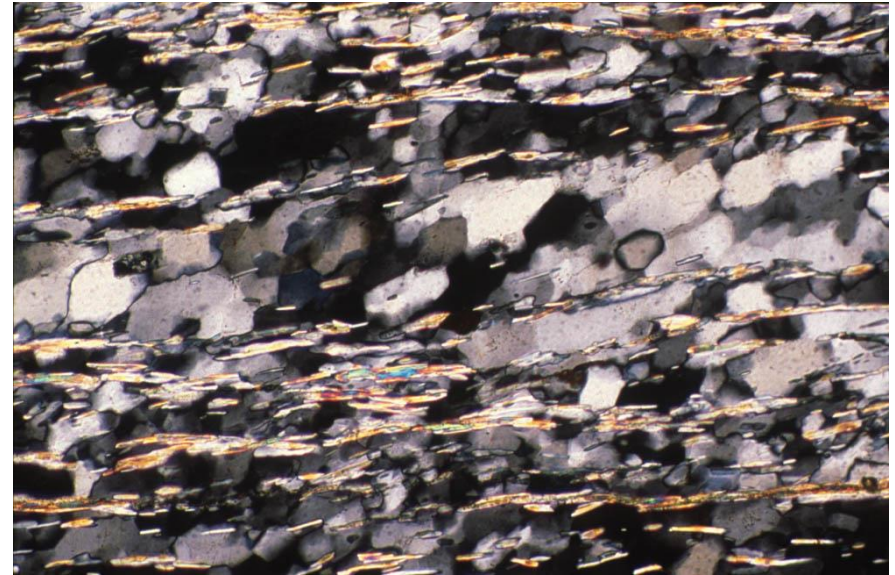
Discontinue !



Rupture
Microfissures
Localisée
Rapide
 P - T faibles

Structure anguleuse hétérogène

Continue !



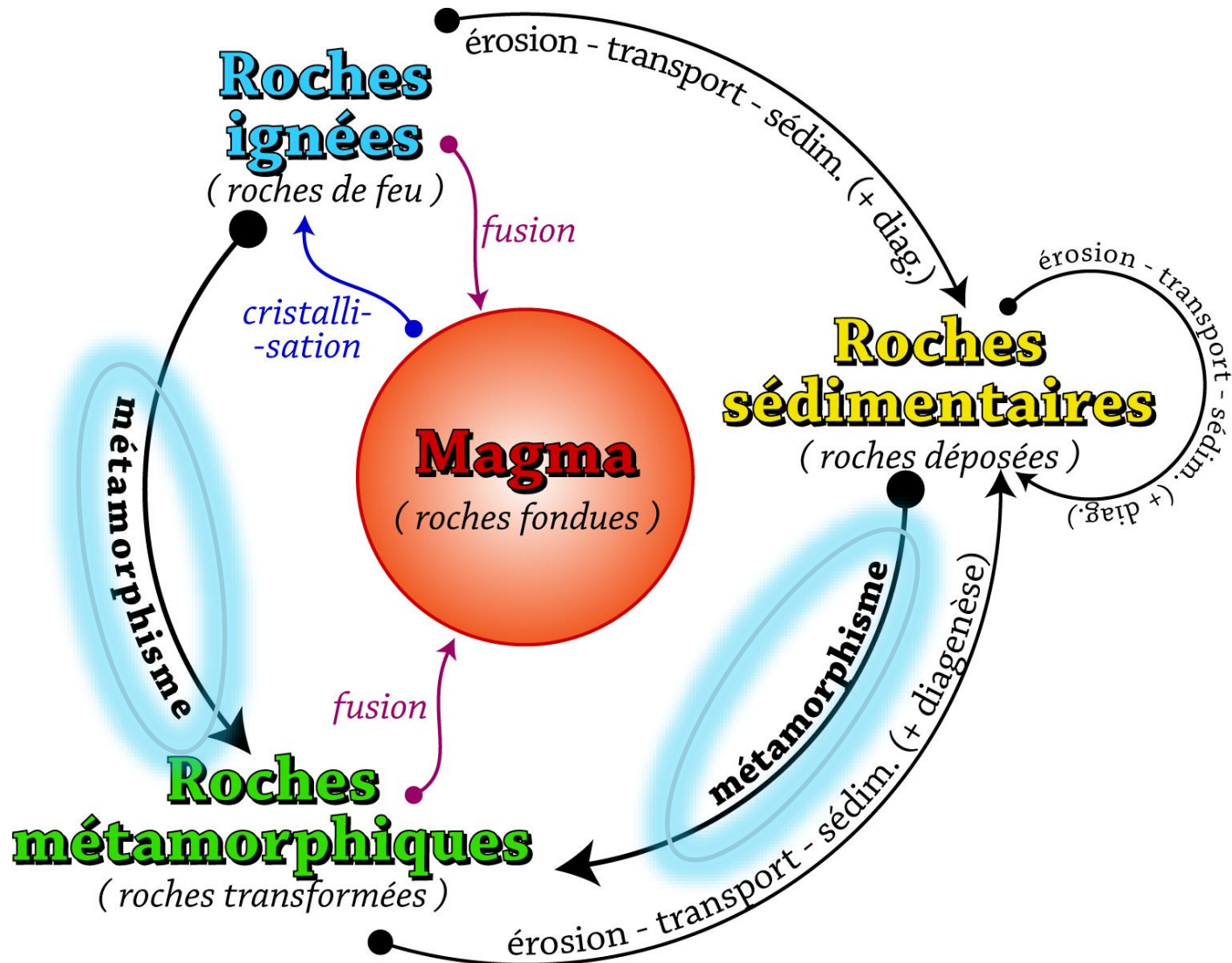
Pas de rupture
Extinction ondulante, recristallisation
Pénétrative: gros volumes affectés
Lente
 P - T élevées

Structure polygonale homogène

1. TRANSFORMATIONS MÉTAMORPHIQUES

2. Influence du protolithe

1.2 Influence du protolithe: *Héritage des structures originelles*



1.2 Influence du protolithe: *Héritage des structures originelles*

PROTOLITHE SÉDIMENTAIRE

Carbonate ⇒
Grès ⇒
Grauwacke ⇒
Argile, pélite, marnes
 ⇒



Micaschiste à grenat
(Île de Groix, Morbihan), *photo T. Ribière*

PROTOLITHE MAGMATIQUE

Basalte ⇒
Rhyolite ⇒
Gabbro ⇒
Granite ⇒



Orthogneiss œillé
(Villadossola, Italie)

1.2 Influence du protolithe: *Héritage des structures originelles*

PROTOLITHE SÉDIMENTAIRE

Carbonate ⇒ **Marbre**
Grès ⇒ **Quartzite**
Grauwacke ⇒ **Paragneiss**
Argile, pélite, marnes
 ⇒ **Micaschiste, Métapélite**



Micaschiste à grenat
(Île de Groix, Morbihan), *photo T. Ribière*

PROTOLITHE MAGMATIQUE

Basalte ⇒ **Amphibolite**
Rhyolite ⇒ **Métarhyolite**
Gabbro ⇒ **Métagabbro**
Granite ⇒ **Orthogneiss**



Orthogneiss œillé
(Villadossola, Italie)

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques des roches métamorphiques

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Schistosité*



Schistosité = *Débit en feuillets acquis par la roche sous l'effet de contraintes tectoniques*

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Schistosité de flux*

La **schistosité** est l'aptitude d'une roche à se débiter en feuillets qui ont tous la même composition minéralogique. Il s'agit d'une structure mécanique avec des plans de débit préférentiel (*cleavage or schistosity* en anglais).

Ex : l'ardoise ou schiste ardoisier



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Schistosité de flux*

La **schistosité** est l'aptitude d'une roche à se débiter en feuillets qui ont tous la même composition minéralogique. Il s'agit d'une structure mécanique avec des plans de débit préférentiel (*cleavage or schistosity* en anglais).

Ex : les micaschistes



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Schistosité de crénulation*

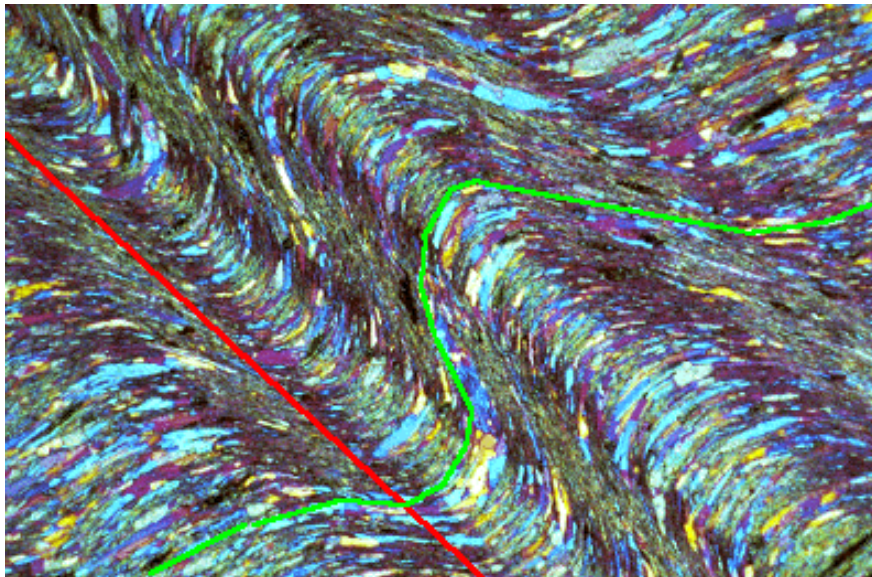
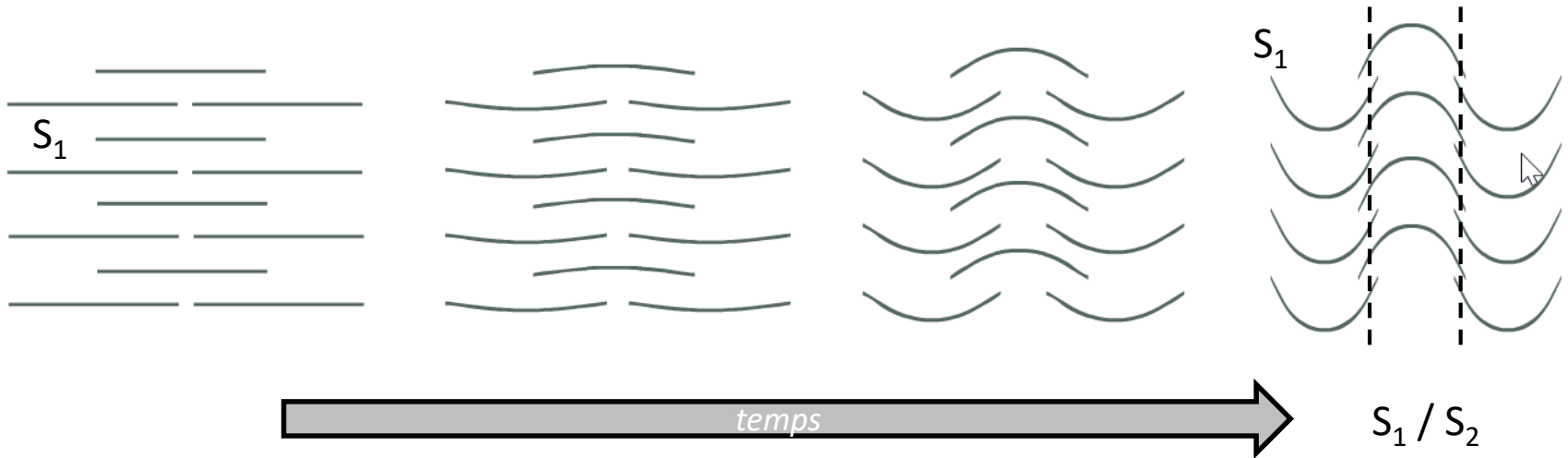
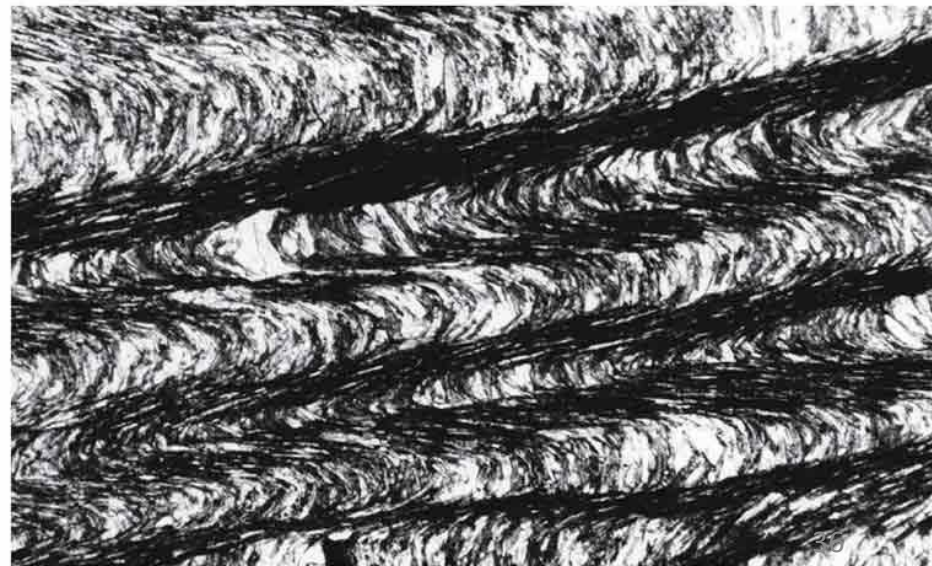


Photo credit: John Ramsay

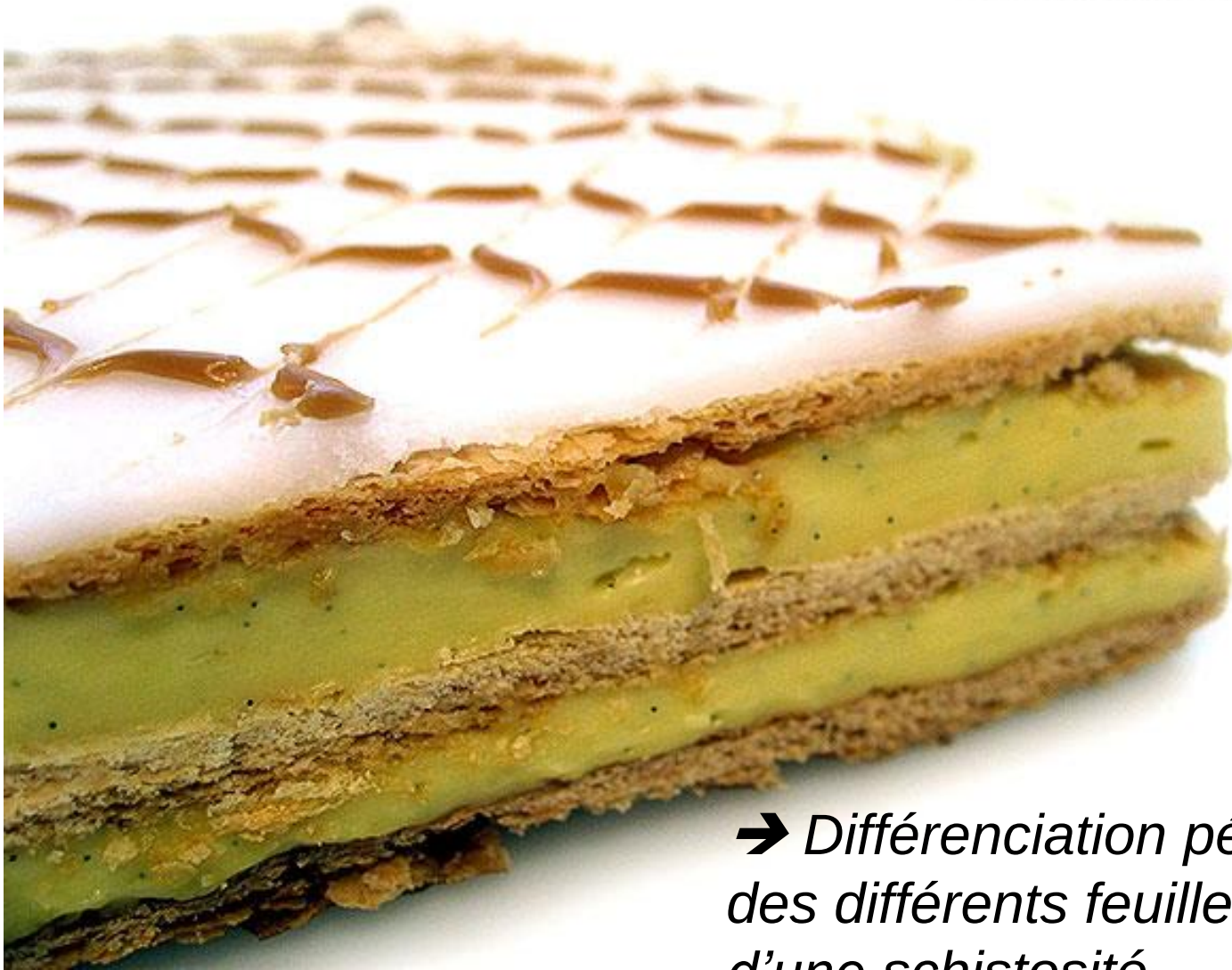


<http://geoclass.wordpress.com/2010/11/03/761/>

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Foliation*

© www.meilleurduchef.com



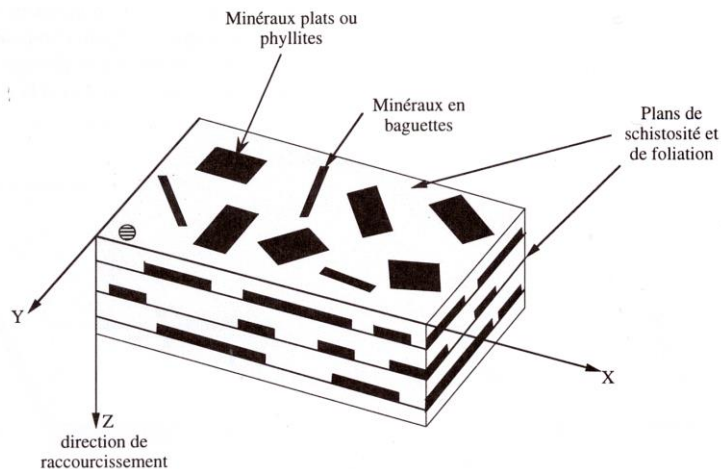
→ Différenciation pétrographique
des différents feuillets
d'une schistosité

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Foliation*

La **foliation** (gneissique) est l'aptitude d'une roche à se débiter en lits marqués par des niveaux de composition minéralogique contrastée ou par l'arrangement des minéraux individuels recristallisés (*gneissic foliation* en anglais).

Ex : les gneiss



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

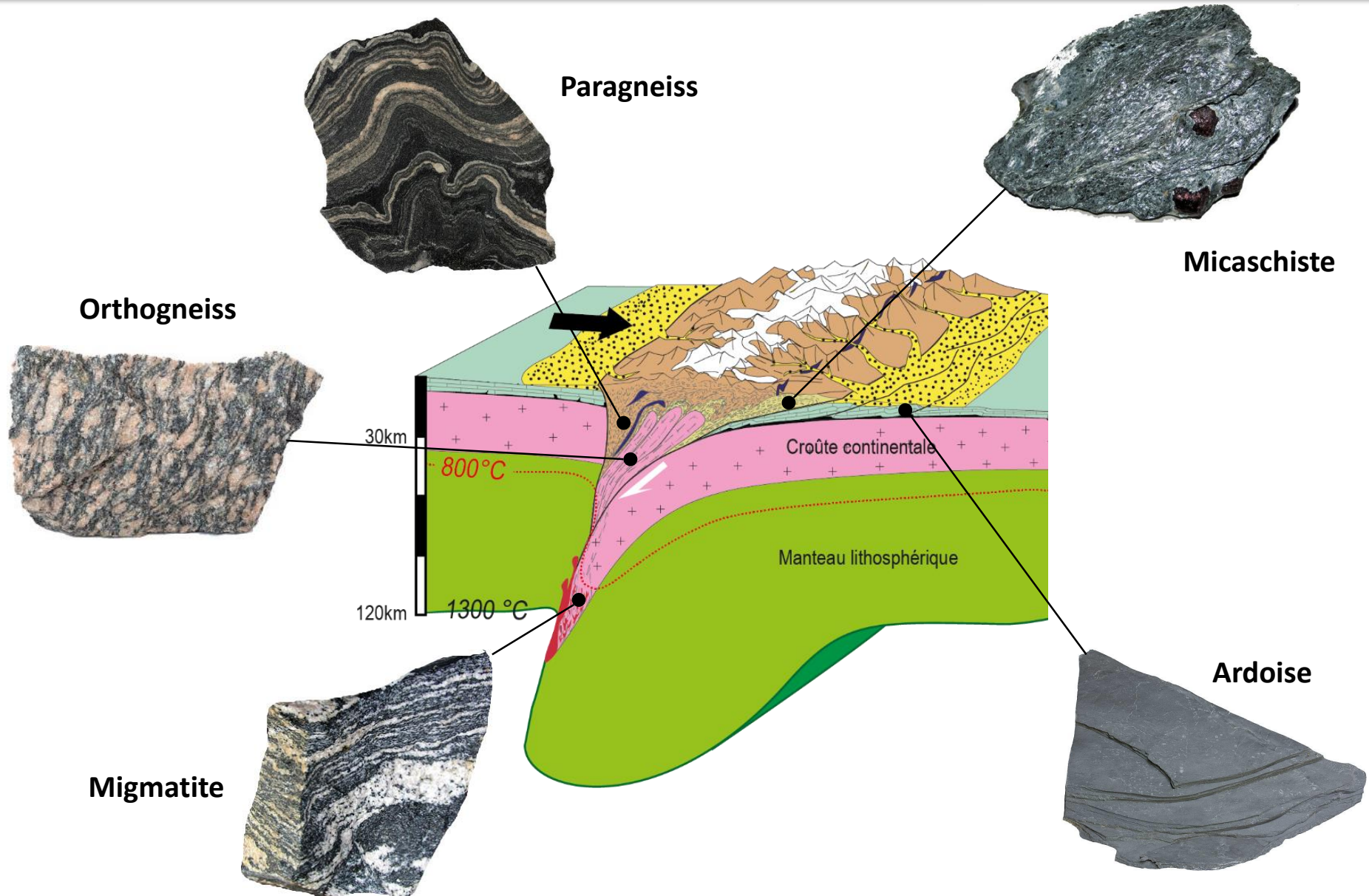
1. Fabriques: *Foliation*



Orthogneiss œillé (Villadossola, Italie)

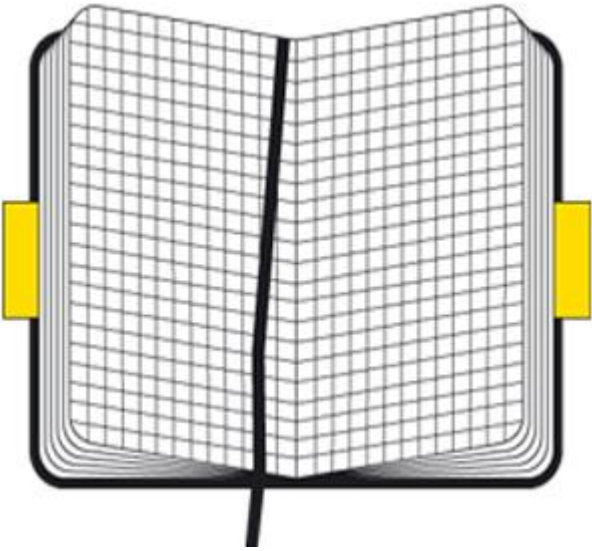
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques planaires



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Linéation*



*Ensemble de lignes parallèles
portées par un plan*

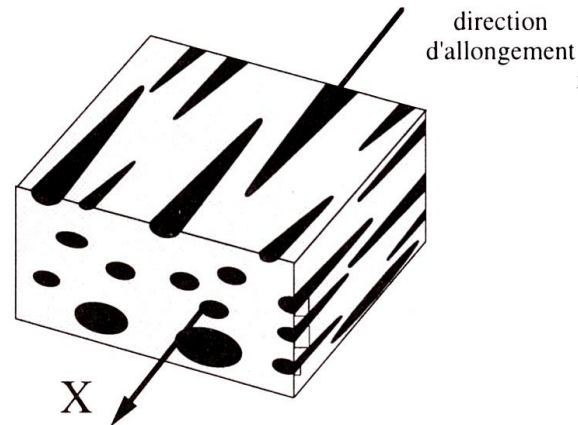
- *d'intersection*
- *d'étirement*
- *minérale*
- *de crénulation*



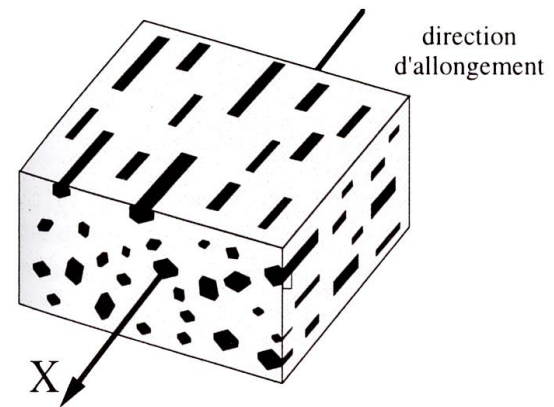
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

1. Fabriques: *Linéation*

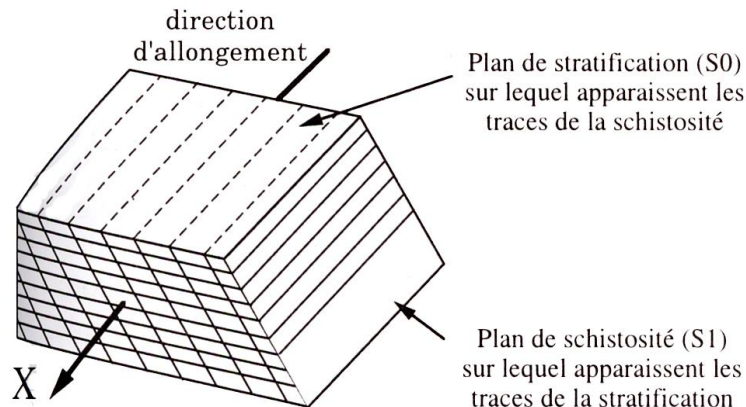
La **linéation** est une structure acquise également tectoniquement se traduisant par des lignes/objets linéaires parallèles entre elles/eux (*lineation* en anglais).



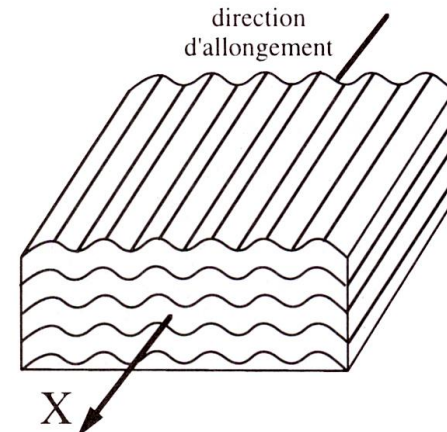
Linéation d'allongement
(cas d'objets figurés, galets par exemple)



Linéation minéralogique
(cas de minéraux en baguettes, feldspaths par exemple)



Linéation d'intersection: plans de stratification et plans de schistosité non parallèles se recoupent selon des lignes parallèles.



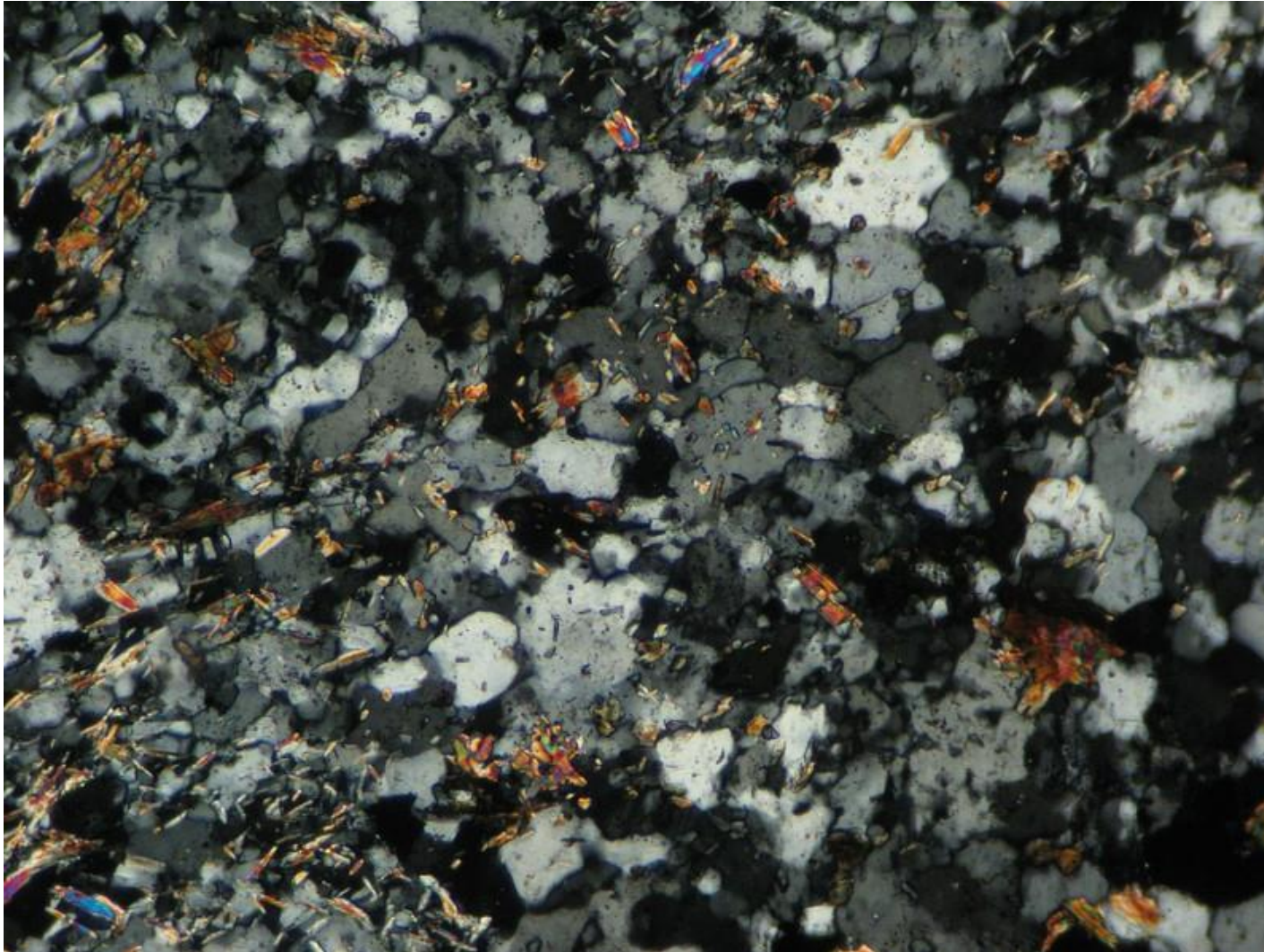
Linéation de microplissement

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture granoblastique*

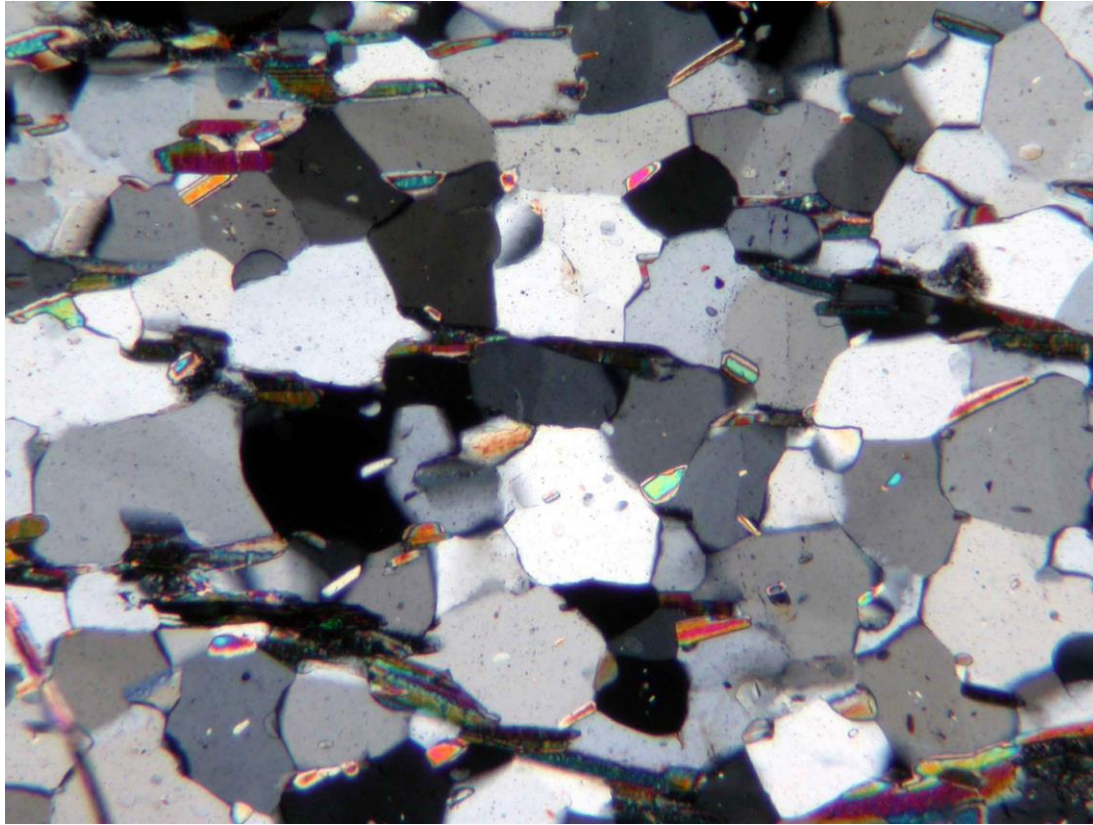


*Grains de tailles ~ =
imbriqués les uns
dans les autres*

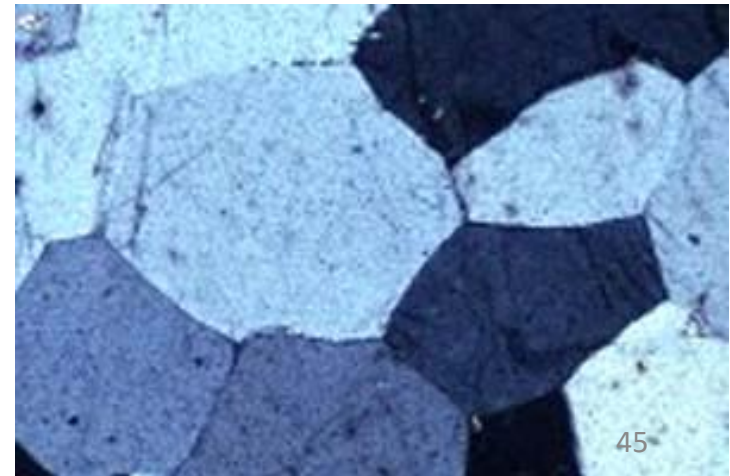
*Pas d'orientation
préférentielle*

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture granoblastique*



granoblastic (less common crystalloblastic) – a mosaic of approximately equidimensional subhedral or anhedral grains. Inequant grains, if present, are randomly oriented.



<http://jan.ucc.nau.edu/~tdh5/GLG315%20meta%20textures.htm>

<http://academic.brooklyn.cuny.edu/geology/powell/courses/eesc3000/Textures/textures.htm>

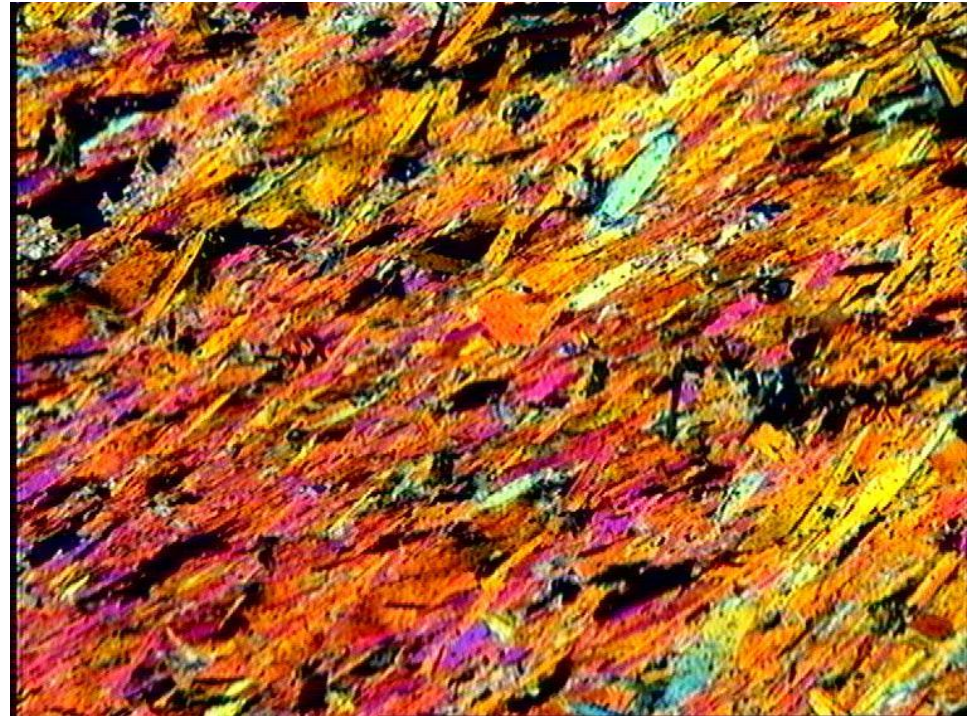
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture lépidoblastique*

gr. lepidos = écaille
blastos = bourgeon



(J.M. Bardintzeff)



Giraudet, Uni Toulon

LPA

lepidoblastic – a predominance of tabular mineral grains with strong planar preferred dimensional orientation.

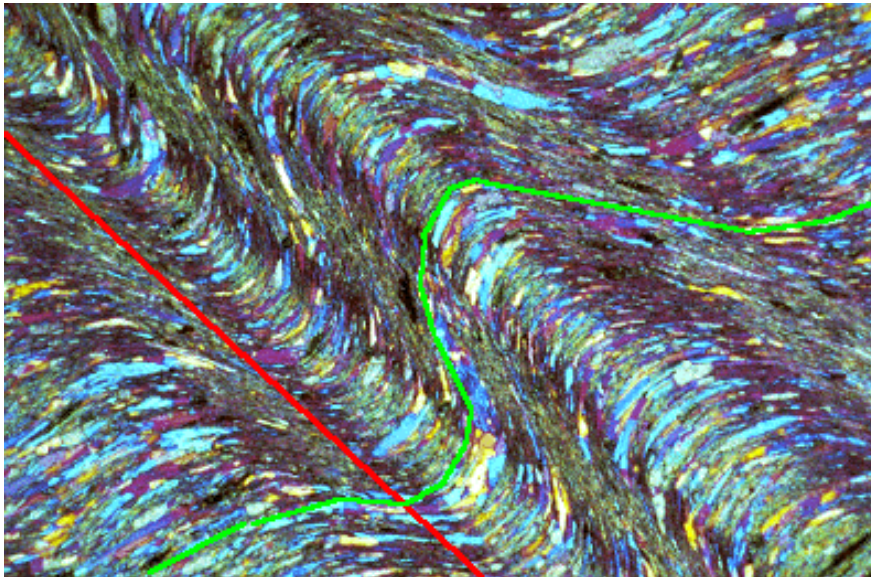
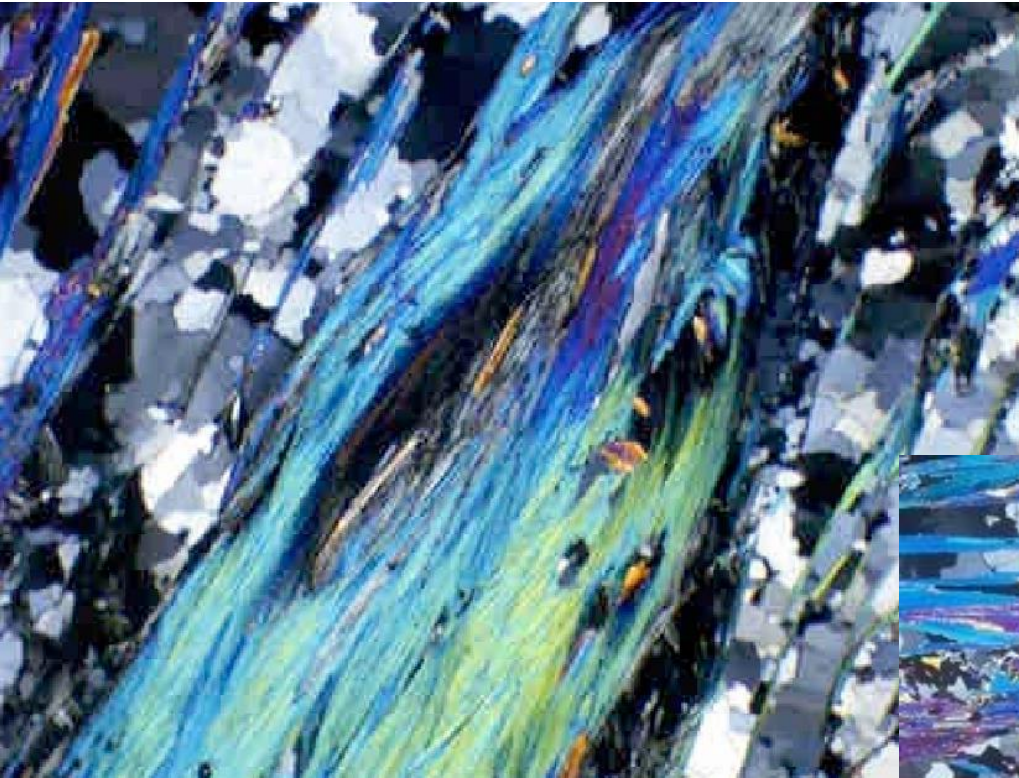


Photo credit: John Ramsay

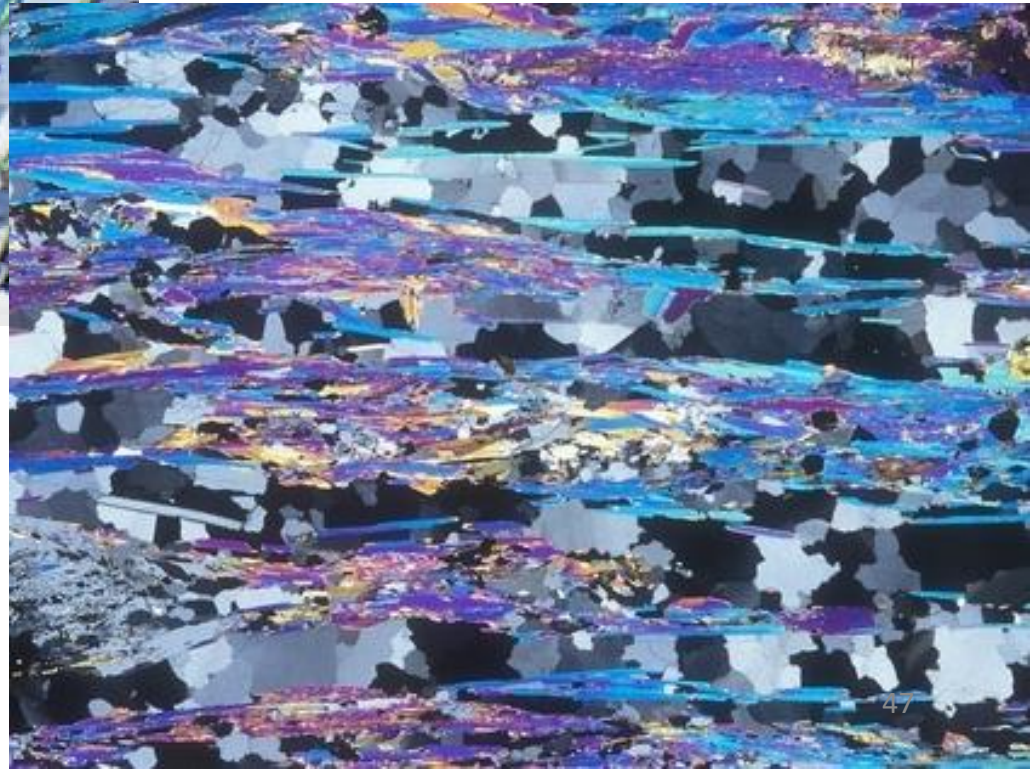
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture grano-lépidoblastique*



granolepidoblastic – a combination of granoblastic and lepidoblastic fabric in the same rock.

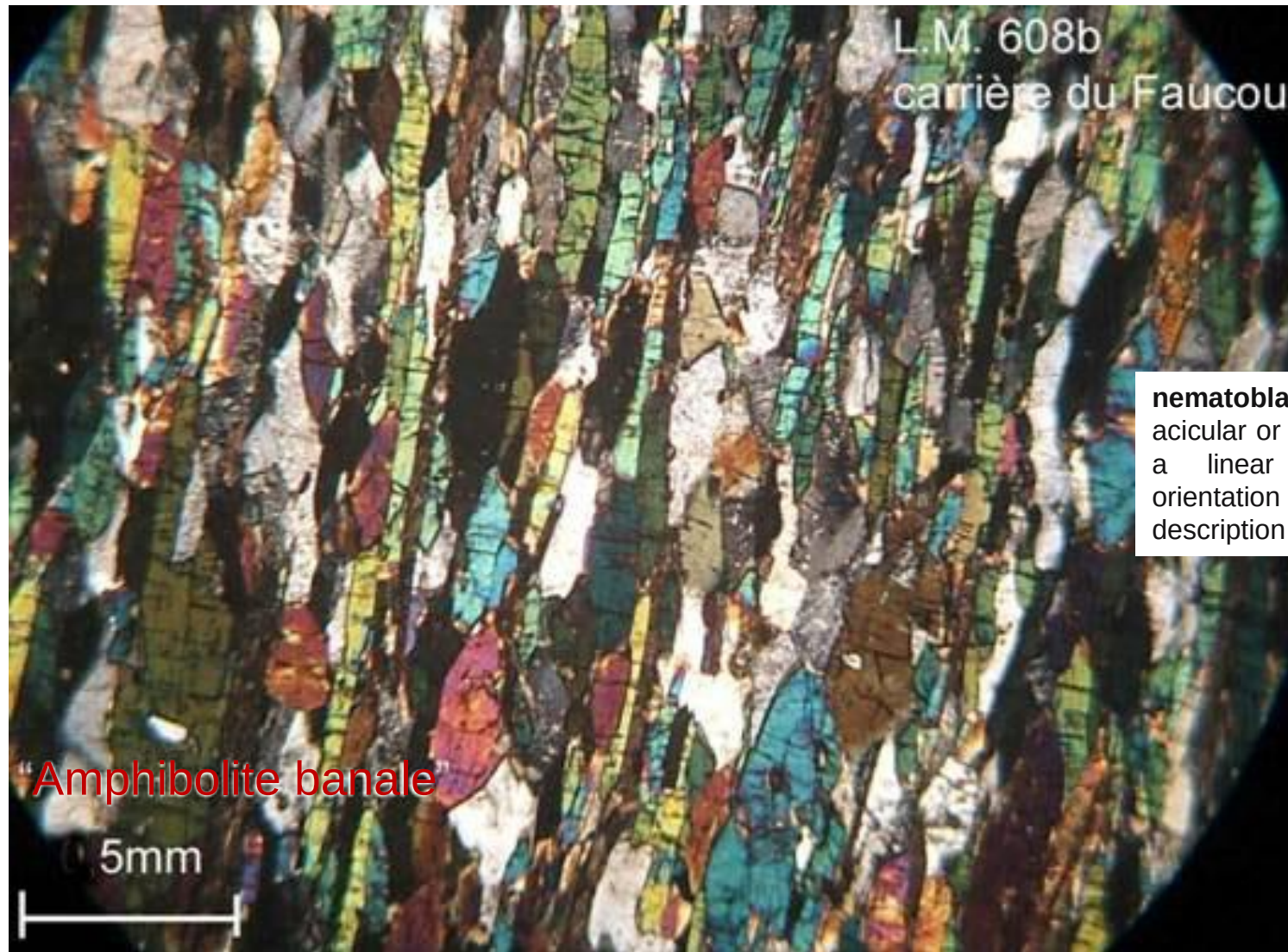
<http://www.sciencephoto.com/media/169414/view>



<http://dc152.4shared.com/doc/utTEhQBG/preview.html>

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture nématoblastique*

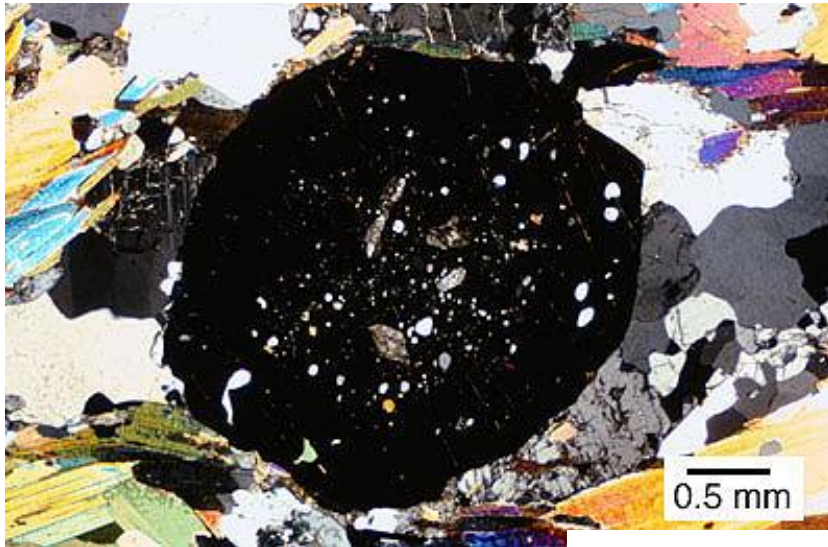


gr. nêma = fil

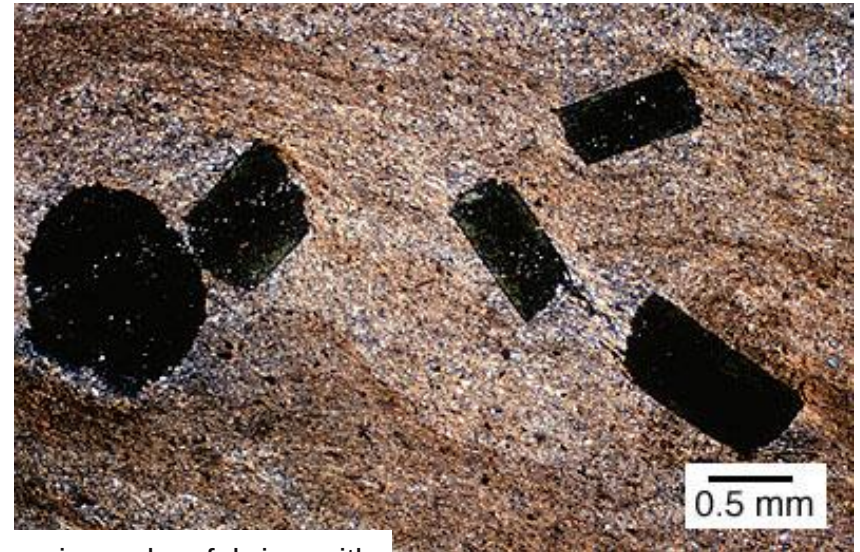
nematoblastic – a predominance of acicular or elongate grains displaying a linear preferred dimensional orientation (substituted by a description of the mineral lineation).

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture porphyroblastique*



porphyroblastic – inequigranular fabric, with large grains that grew during metamorphism and which are embedded in a finer-grained matrix.



gr. blastos = bourgeon

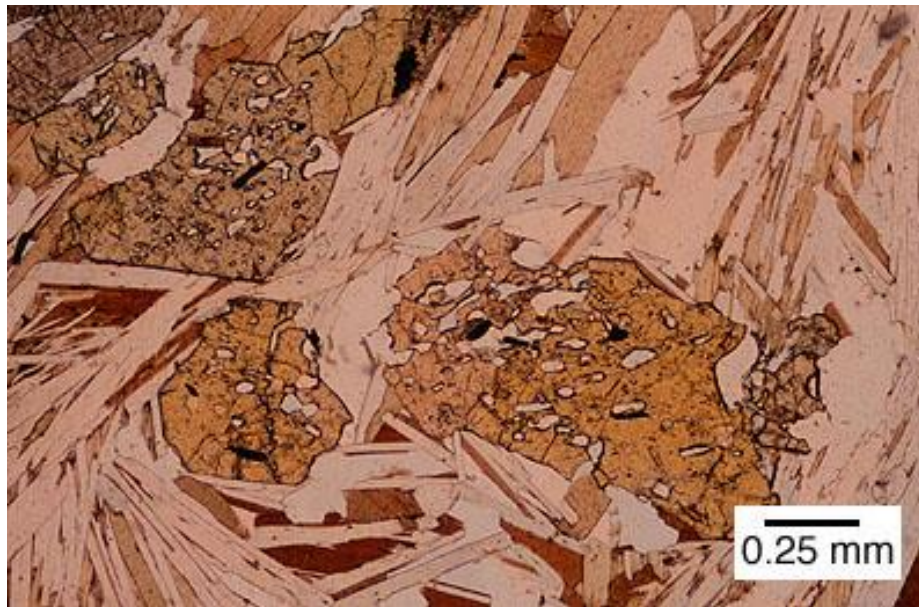


2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture poëciloblastique*

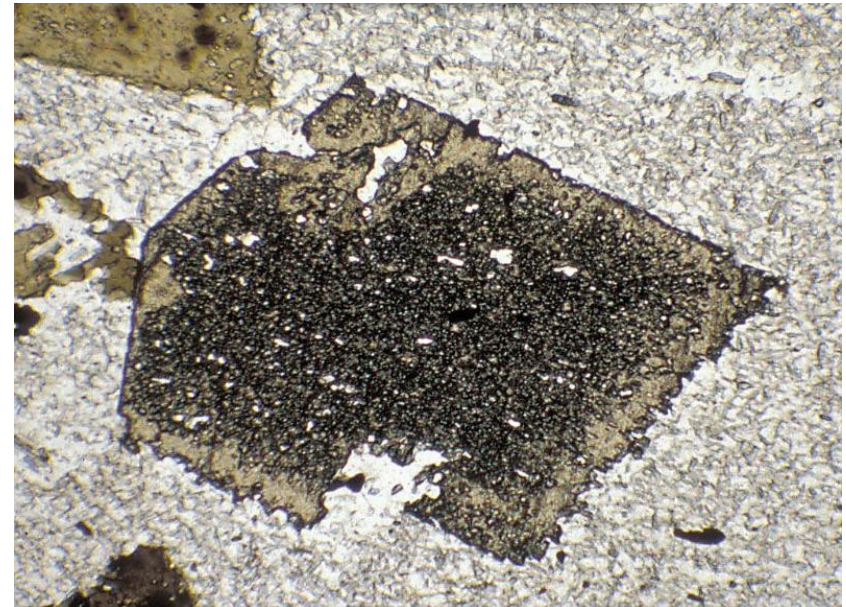
gr. poikilos = varié

Poeciloblastes de staurotide



<http://lifeinplanelight.files.wordpress.com/2011/03/staurolite-ux.jpg>

Atlas of metamorphic minerals

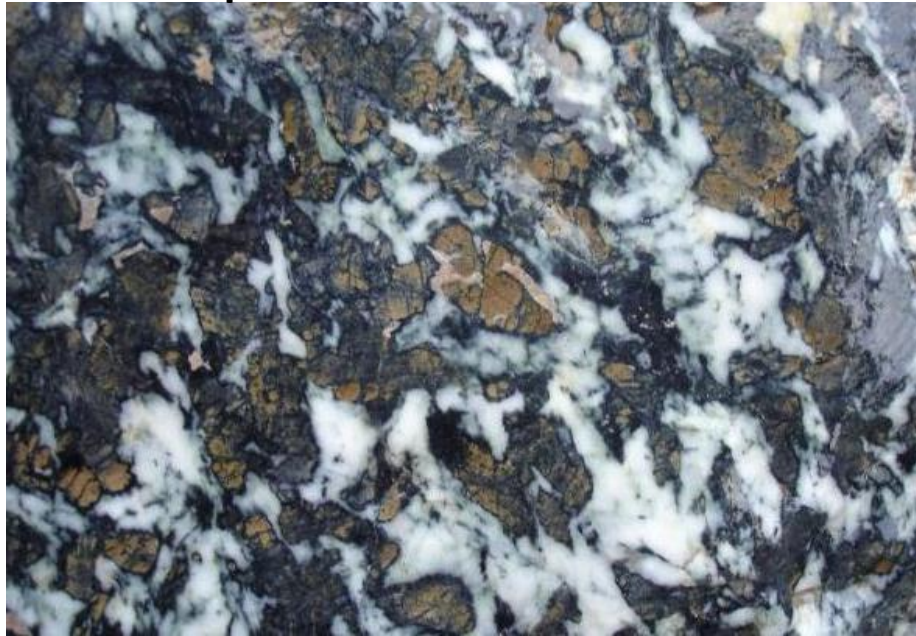


http://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/atlas/metmins/#staurolite3_ppl_pm01-03.jpg

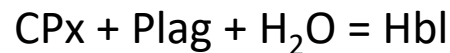
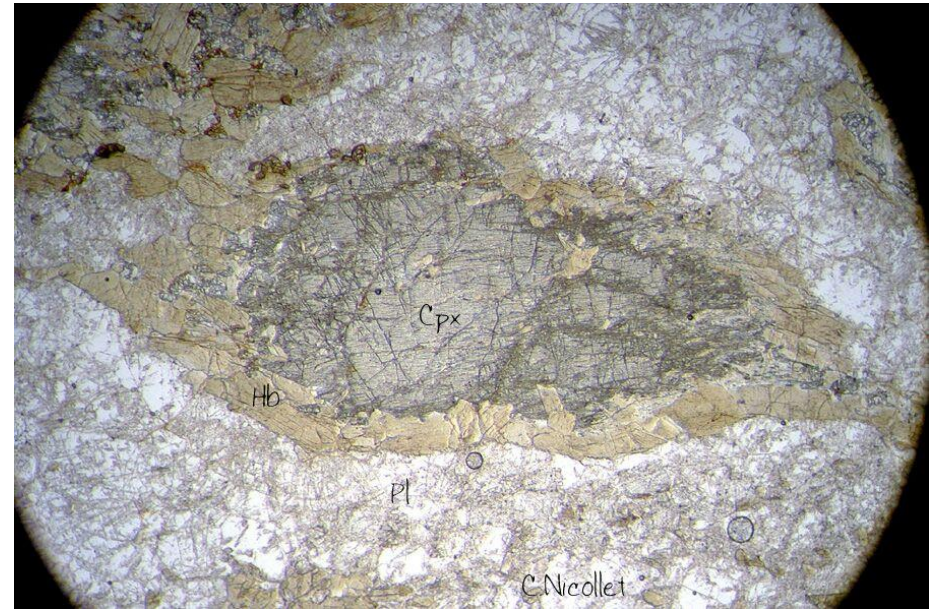
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture coronitique*

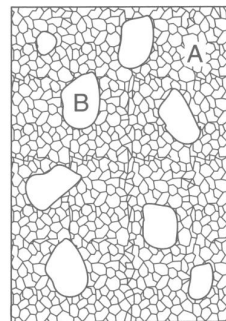
Faciès Amphibolite



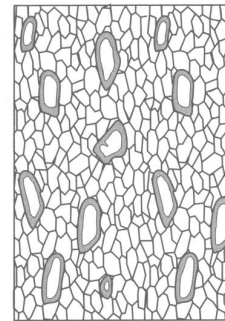
C. Nicollet



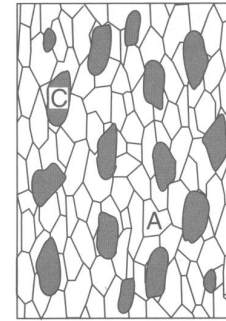
À P0-T0 la roche contient les minéraux A + B



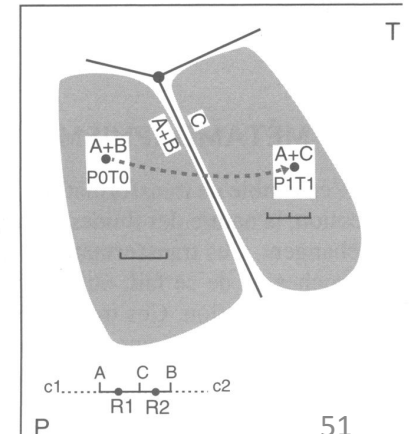
À P1-T1, la réaction $A + B = C$ intervient...



... jusqu'à disparition de B.



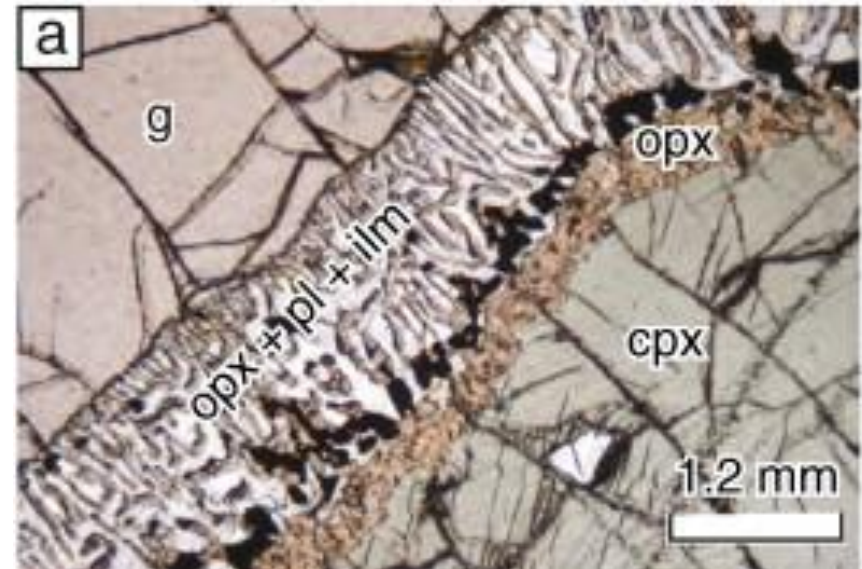
Principes de la recrystallisation métamorphique (d'après Nicollet, 2010).



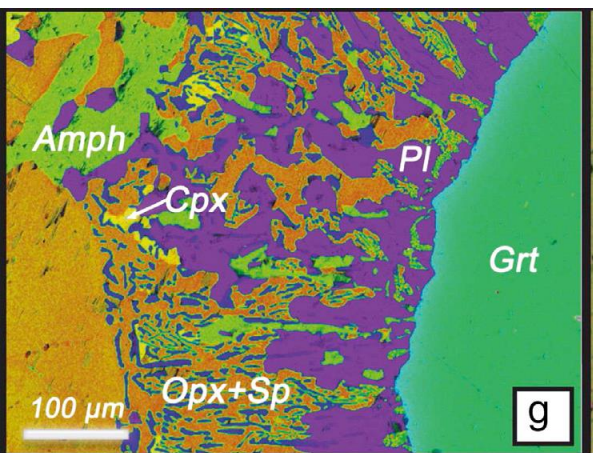
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Texture coronitique*, *Symplectite*

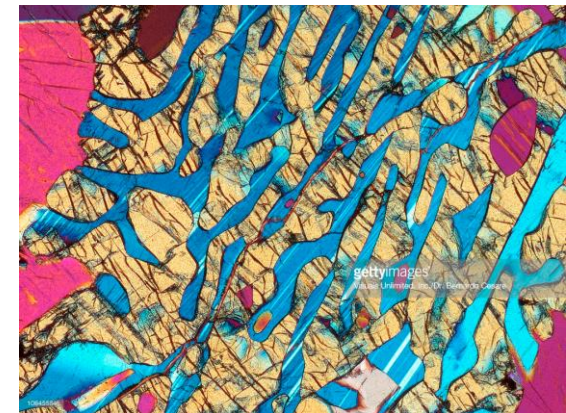
Décompression d'une éclogite (HT)



Kelsey (2007)



Symplectite :
intercroissance de 2
(ou +) minéraux



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Queues de (re) cristallisation*



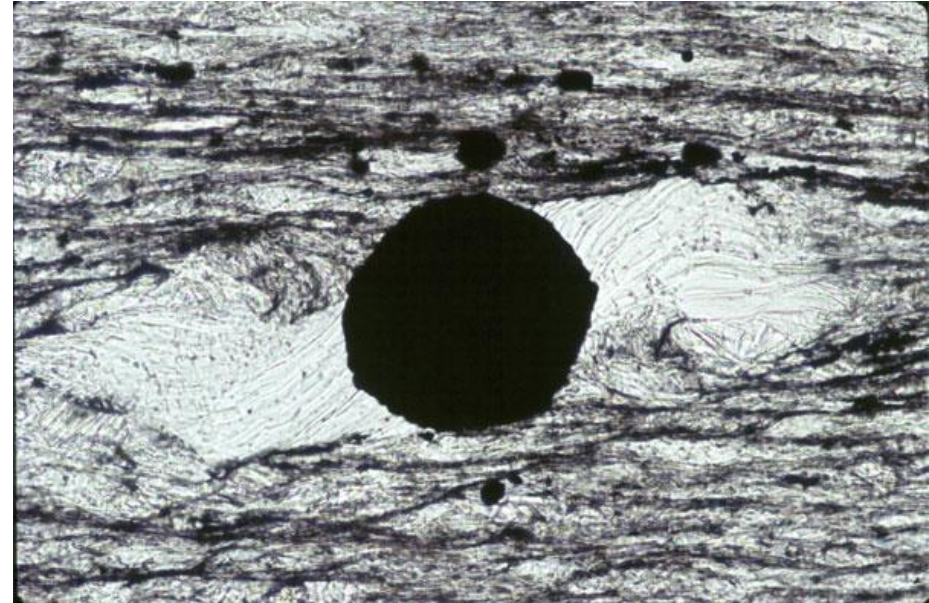
Orthogneiss à tourmaline (El Campico, Andalousie)

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

2. Microstructures: *Queues de (re) cristallisation*

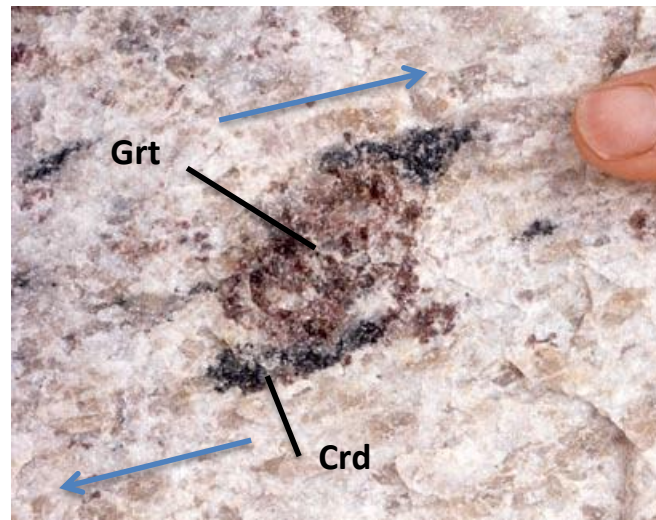


<http://virtualexplorer.com.au/special/meansvolume/contribs/jessell/glossary/glossary4.html>



<http://www3.geosc.psu.edu/people/faculty/personalpages/dfisher/figure8D.html>

Ombre de pression



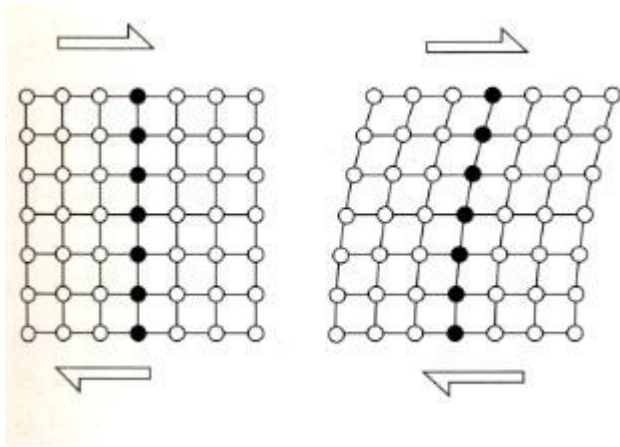
C. Nicollet

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

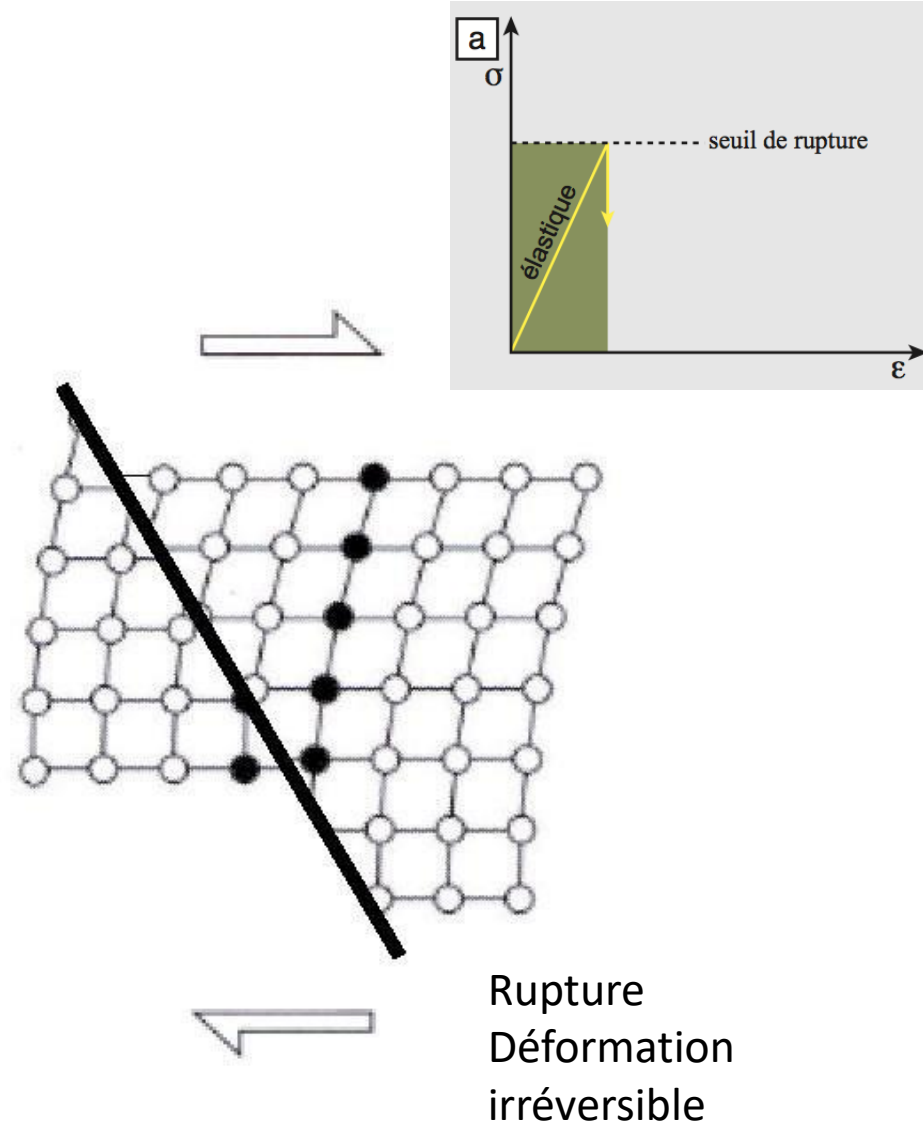
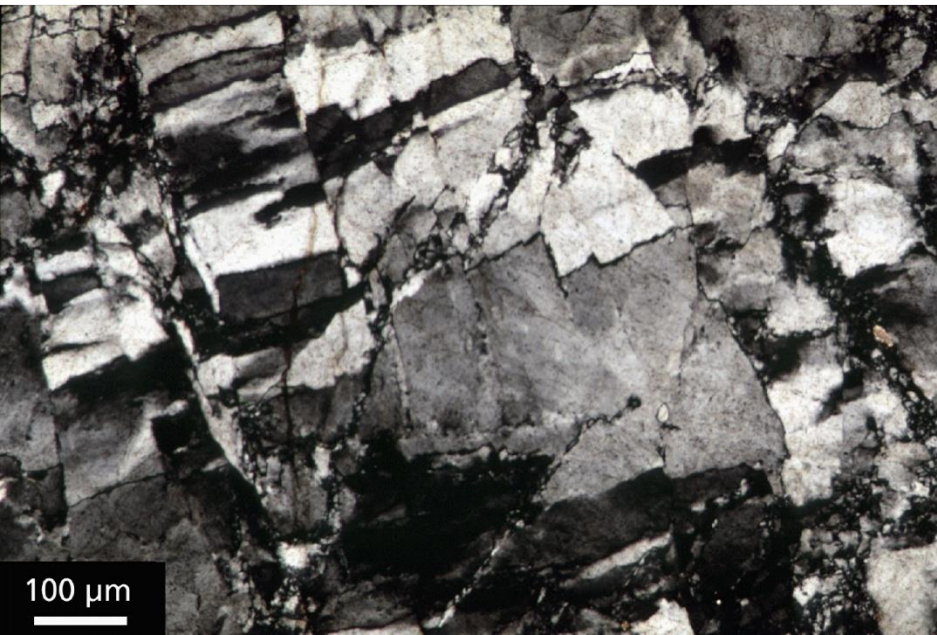
3. Recristallisation du quartz

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation cassante*

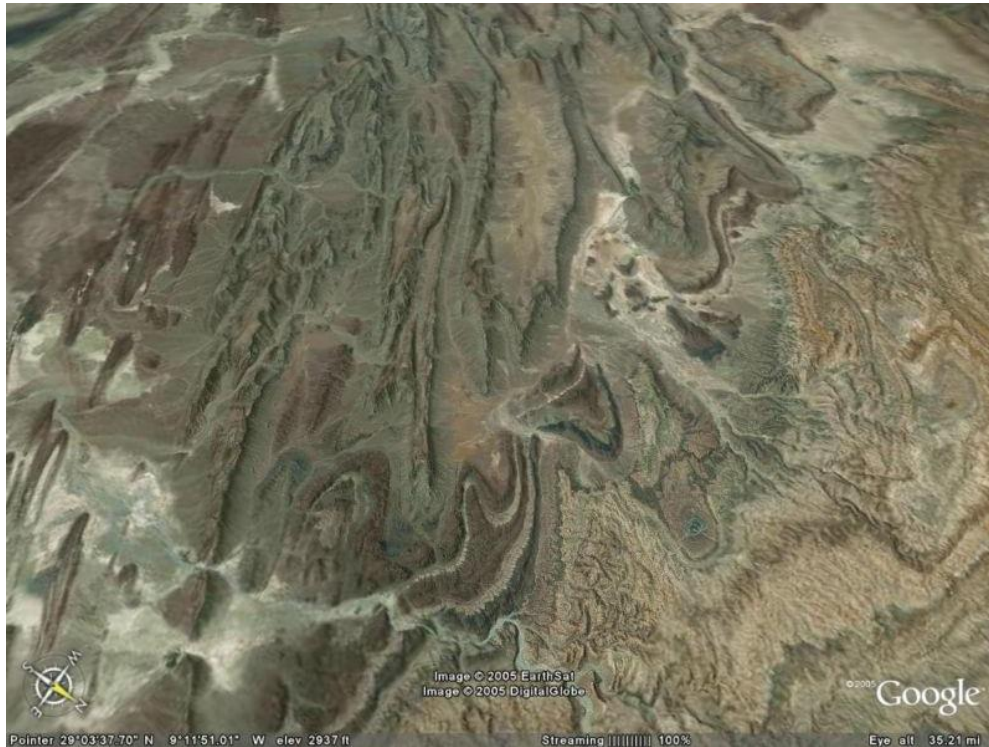


Déformation élastique réversible



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

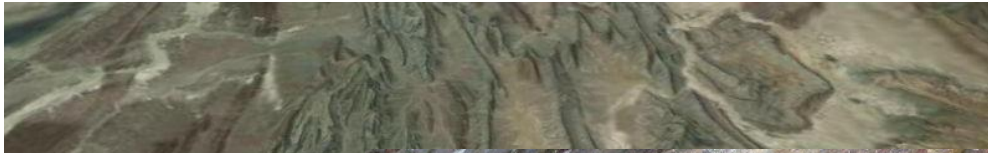
3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile*



**Observations
satellite**

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile*



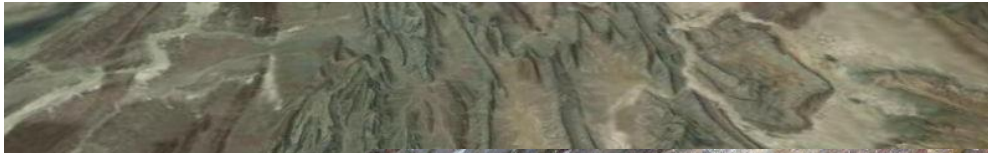
Observations
satellite



Observations de
terrain

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile*

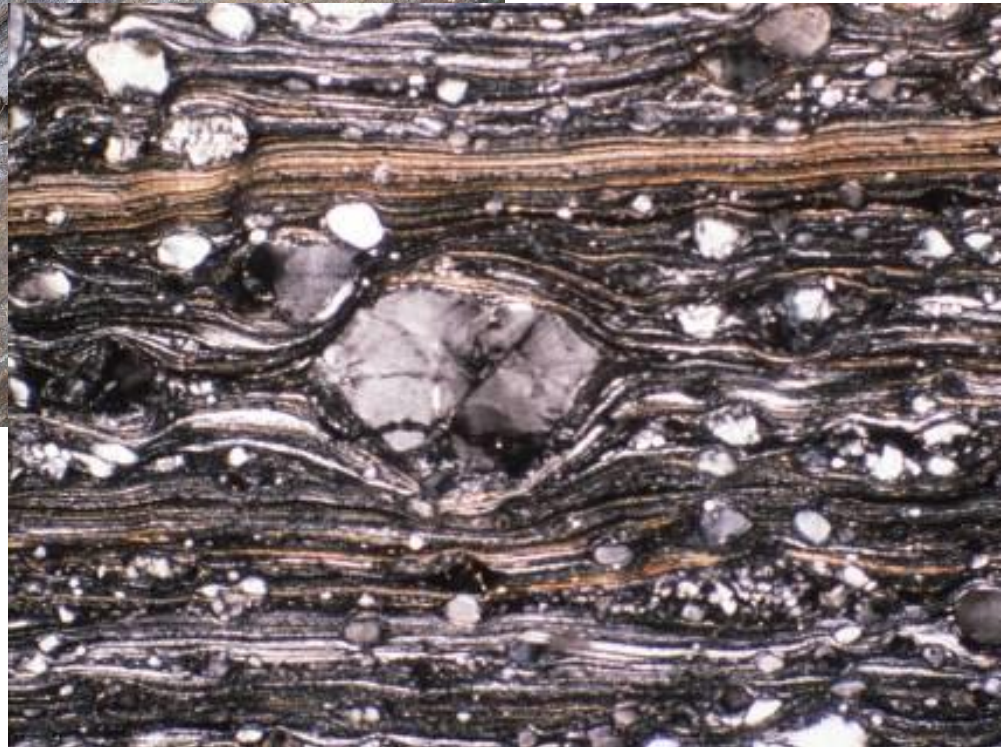


Observations
satellite



Observations de
terrain

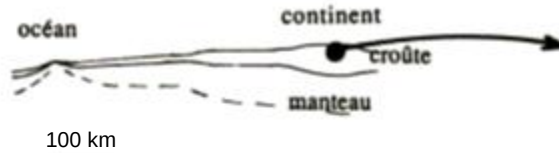
Observations en
laboratoire



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile*

à l'échelle de la lithosphère



à l'échelle de la région



La déformation est assurée par l'activation de mécanismes de déformation à l'échelle macroscopique, microscopique et nanoscopique !

à l'échelle de l'affleurement



à l'échelle de la roche

1 cm

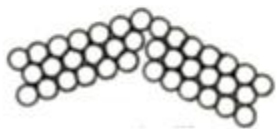


à l'échelle du minéral

0,1 à 1 mm



10^{-9} m



à l'échelle du réseau cristallin

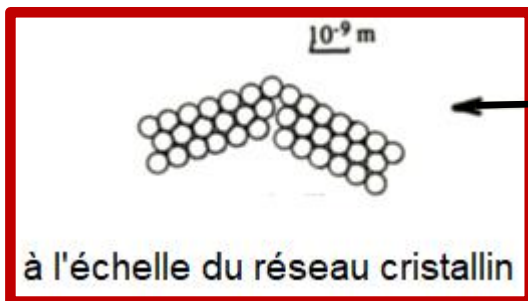
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

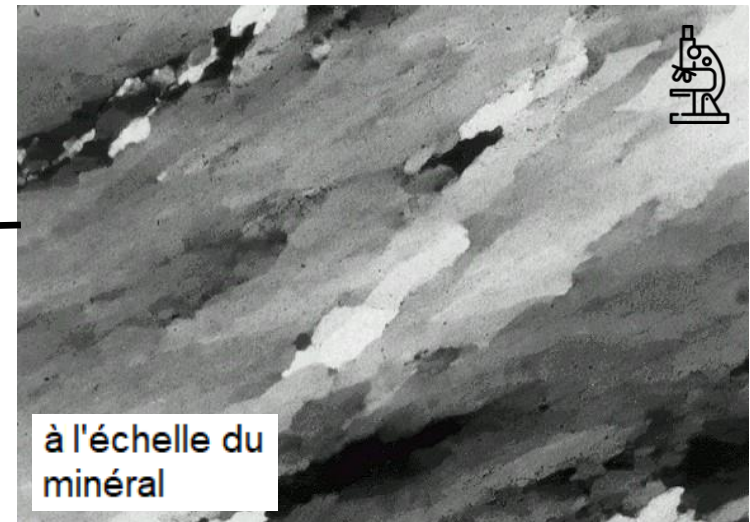
Tous les cristaux sont composés d'atomes, d'ions ou de molécules qui sont arrangés de manière symétrique et périodique. Cependant, la nature n'est pas parfaite et certains cristaux peuvent contenir différents défauts/irrégularités:

- Défauts ponctuels
- Défauts linéaires
- Défaut planaires

La **migration** de ces **défauts/irrégularités** joue un rôle fondamental dans la déformation **plastique** et caractérise la **déformation** dite **intracristalline**.



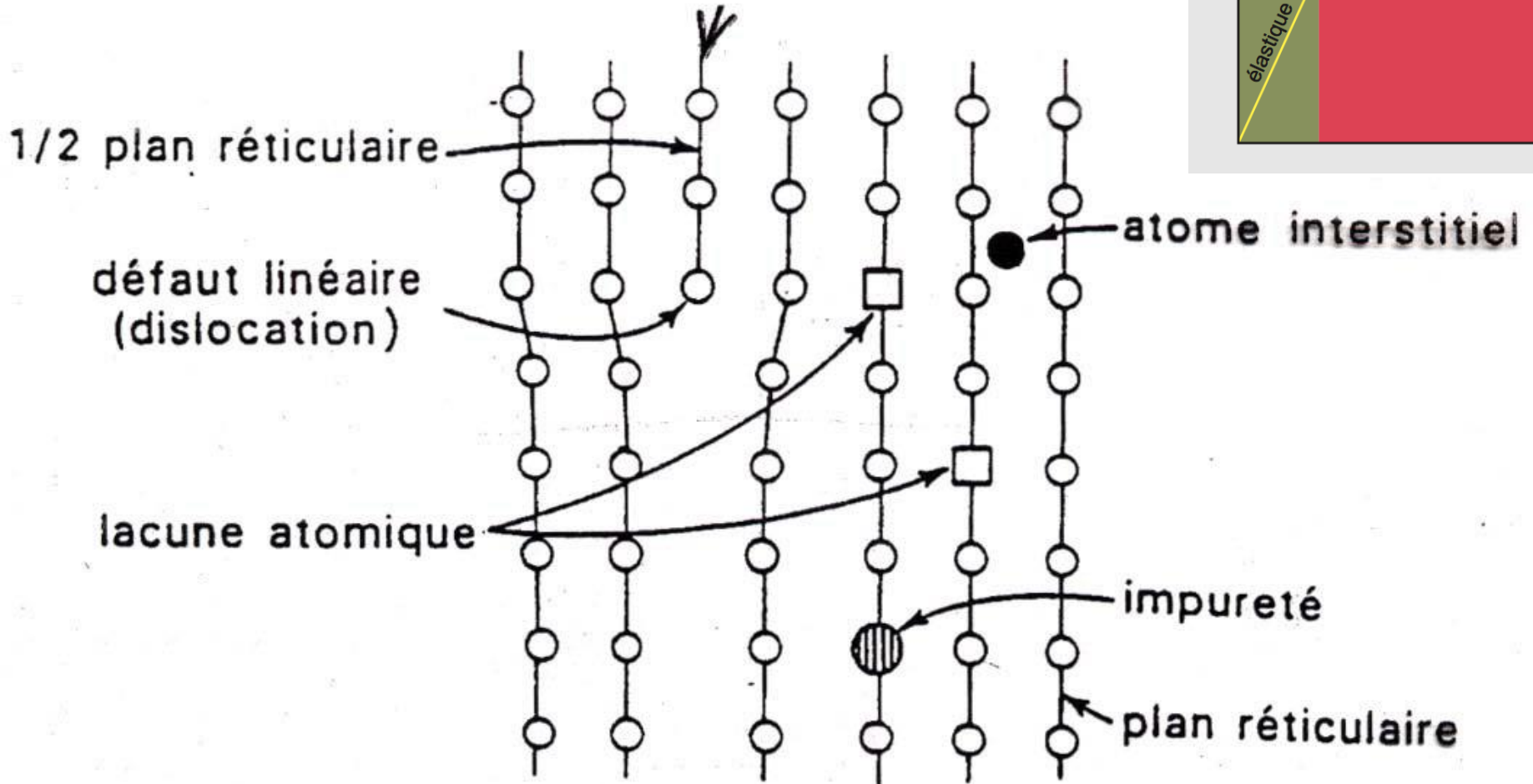
???



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

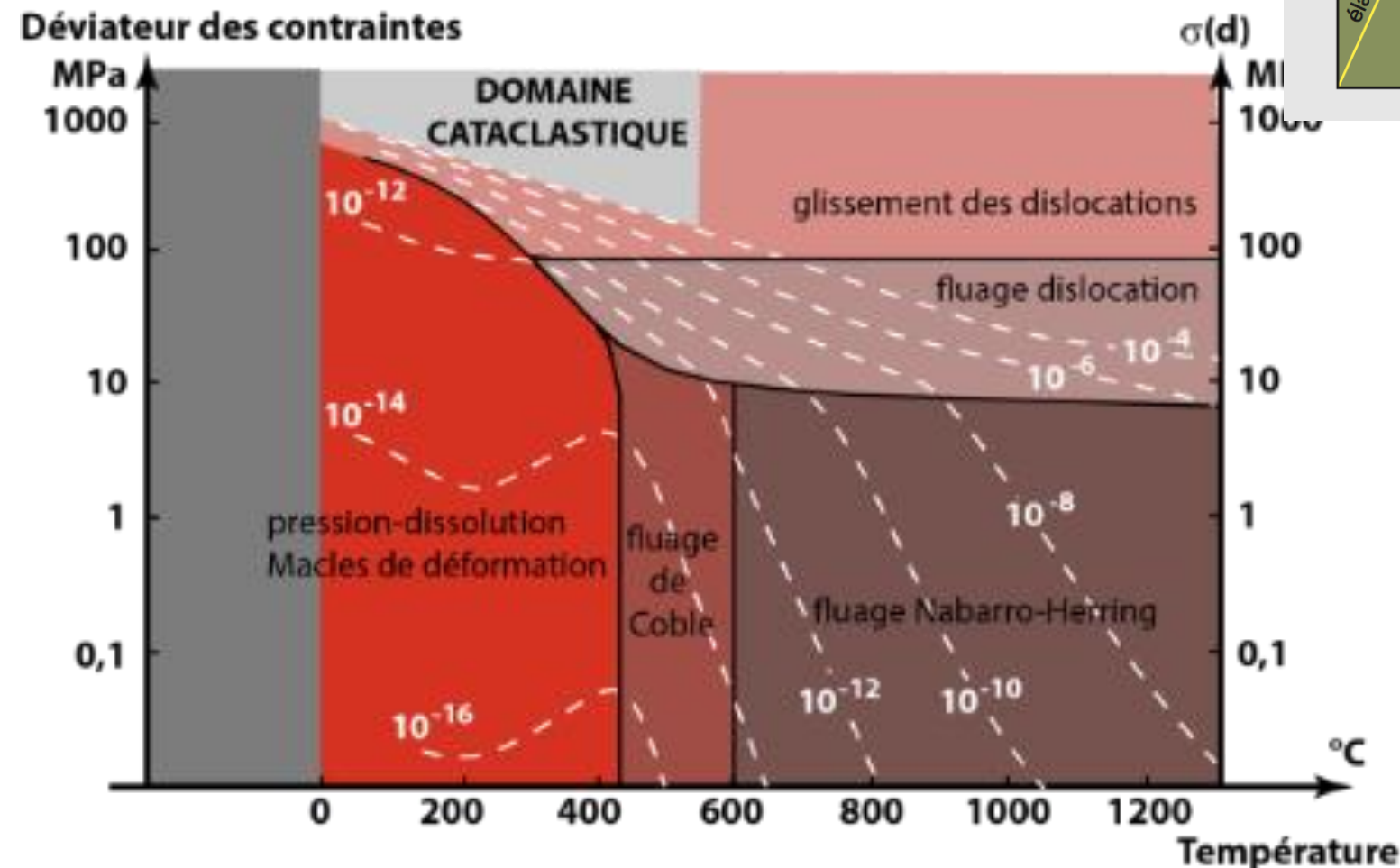
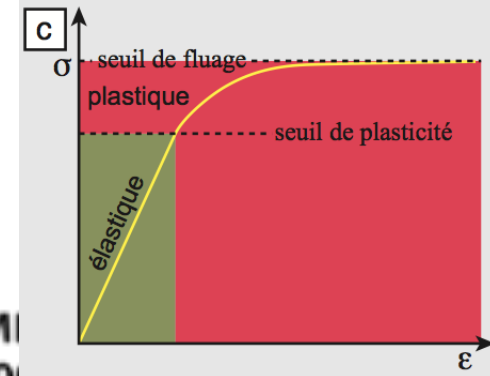
Reseau cristallin; défauts; **dislocation**



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

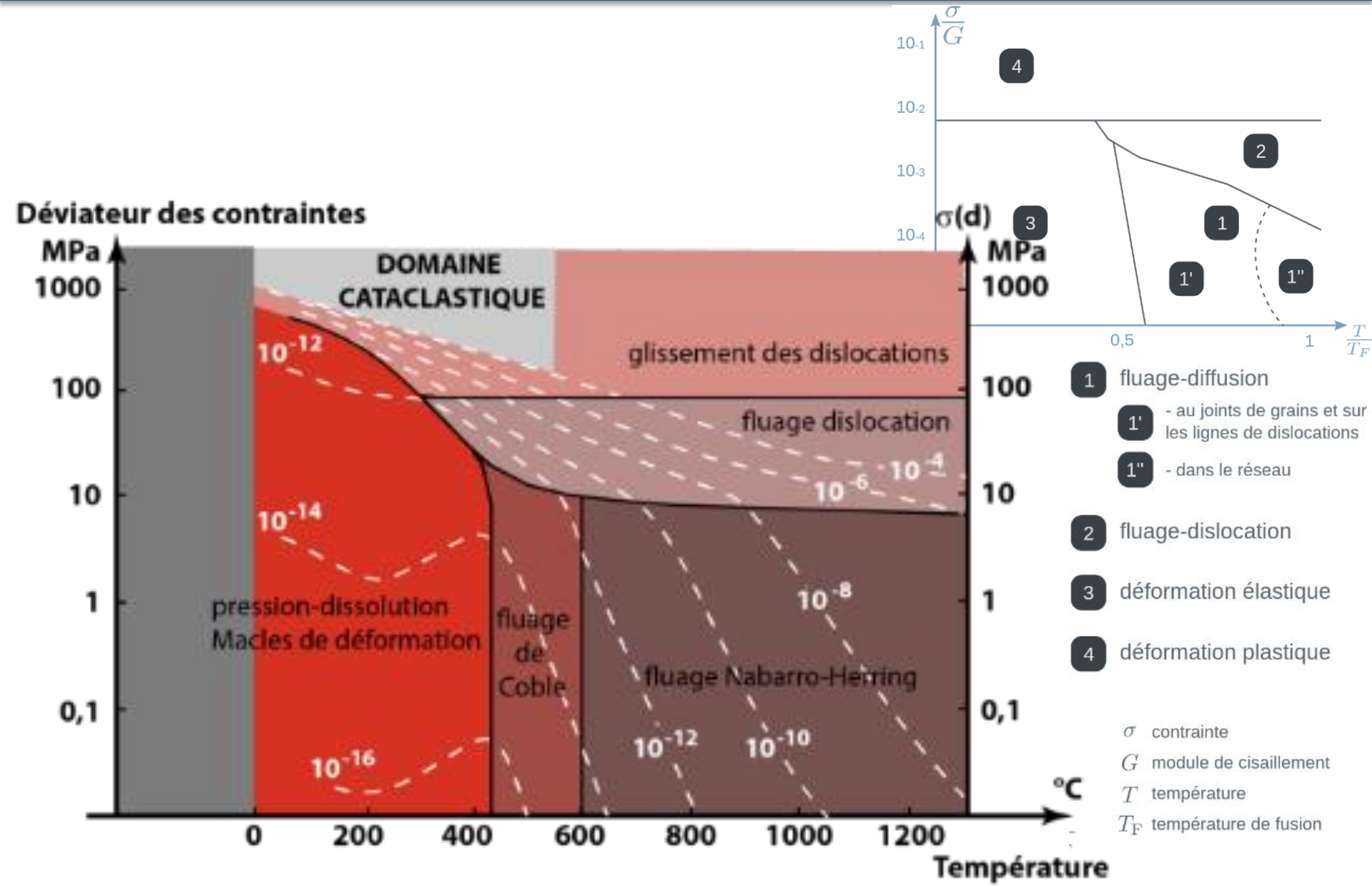
3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

Fluage = déformation plastique irréversible d'une roche soumise à des Δ de σ et de T dans le temps



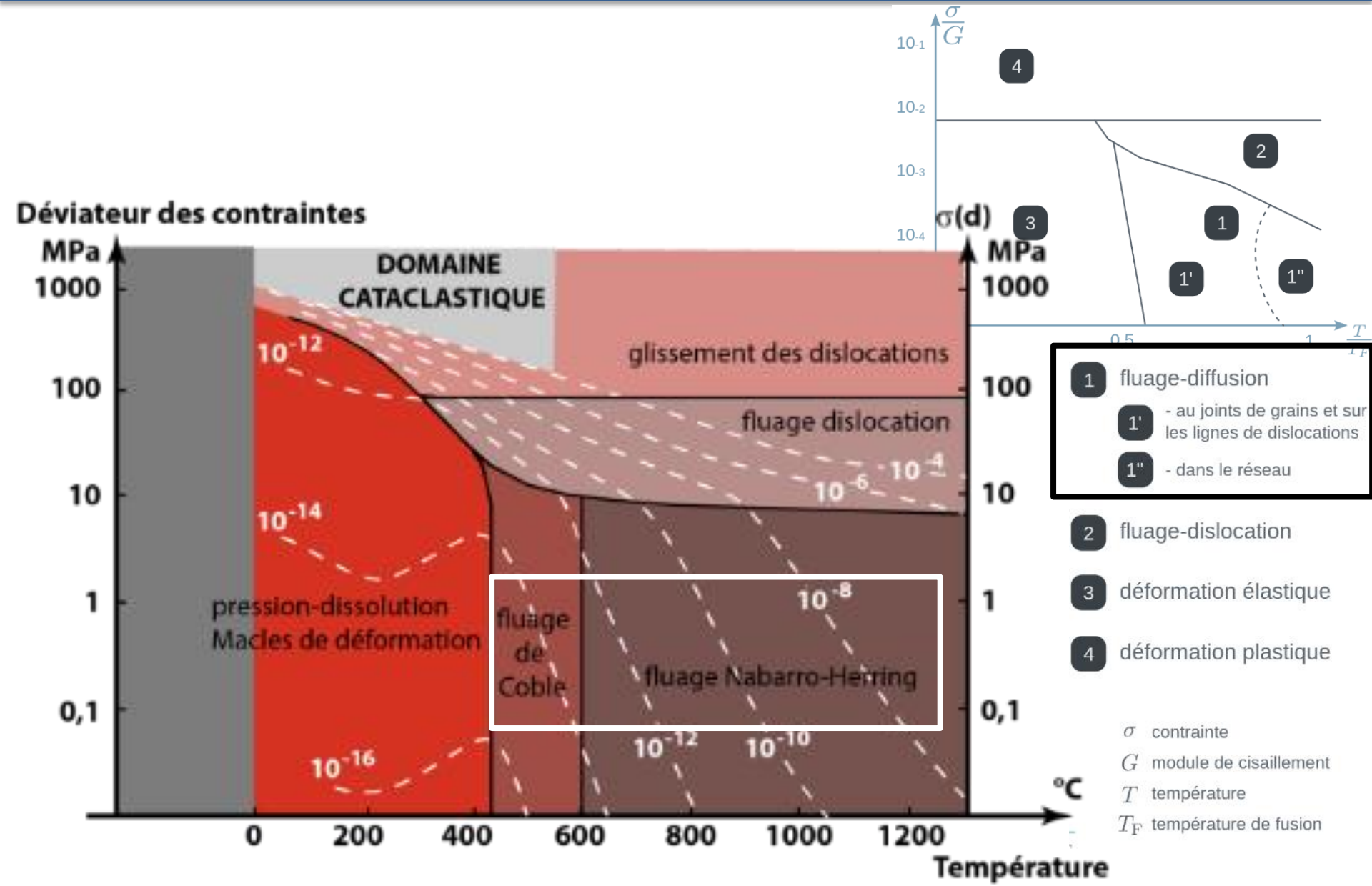
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

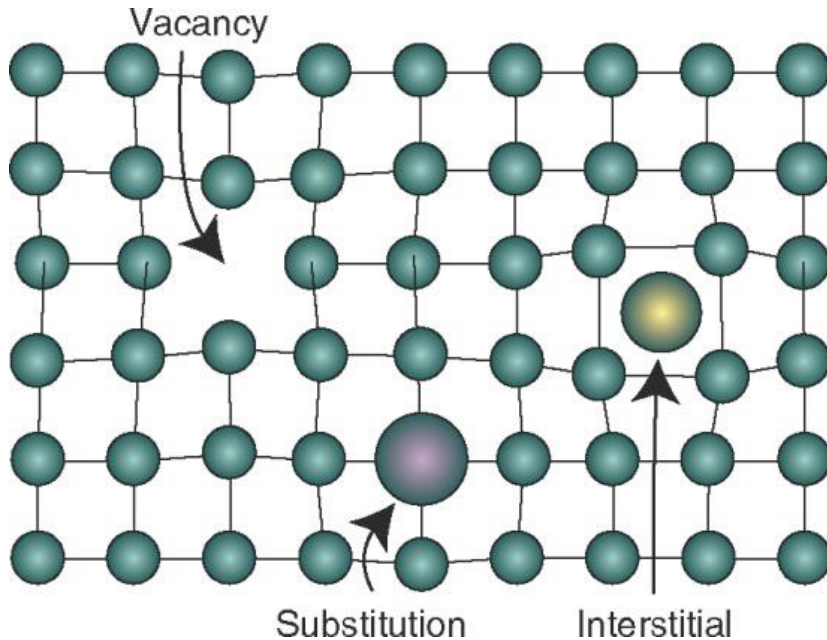
3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

⇒ **Fluage diffusion: Coble ou Nabarro-Herring**



⇒ **Défauts ponctuels**

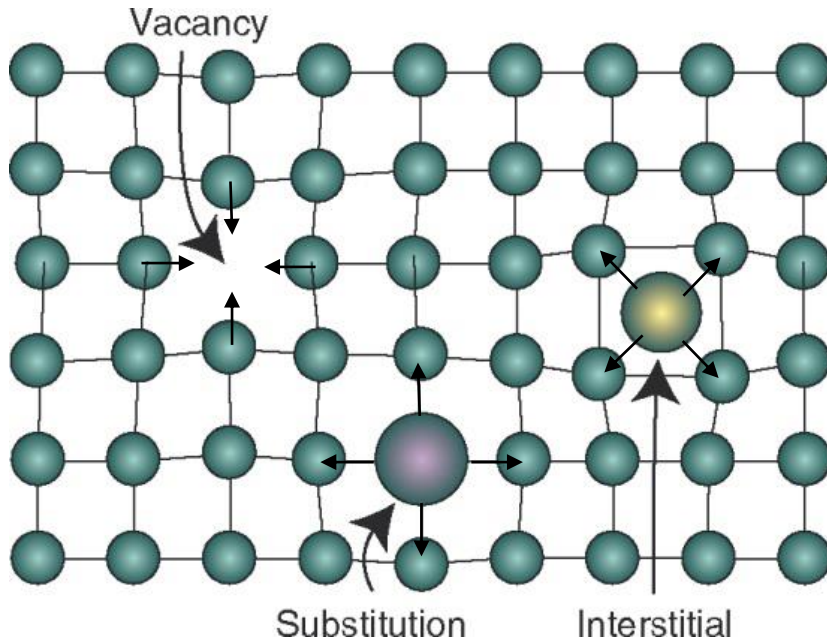
La **déformation intracristalline** met à contribution les **défauts** du **réseau cristallin**:

- **Lacune** (*vacancy*): site inoccupé dans la structure,
- **Atome interstitiel**: atomes présents dans les espaces vides interstitiels du réseau cristallin,
- **Substitution d'atome**: atomes étrangers qui se placent à un nœud du réseau cristallin.

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

⇒ **Fluage diffusion: Coble ou Nabarro-Herring**



⇒ **Défauts ponctuels**

La **déformation intracristalline** met à contribution les **défauts** du **réseau cristallin**:

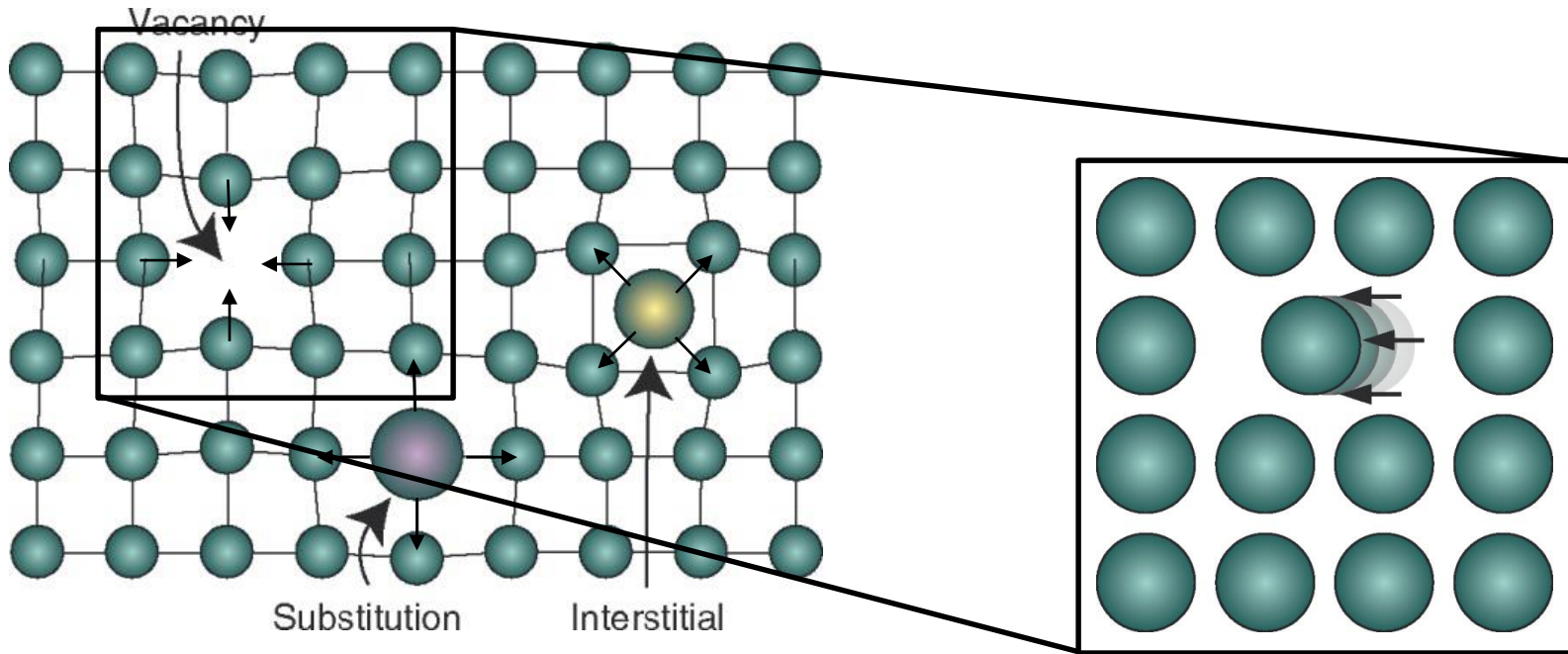
- **Lacune** (*vacancy*): site inoccupé dans la structure,
- **Atome interstitiel**: atomes présents dans les espaces vides interstitiels du réseau cristallin,
- **Substitution d'atome**: atomes étrangers qui se placent à un nœud du réseau cristallin.

La présence de **défauts ponctuels** entraîne une **distorsion locale** du **réseau cristallin** et engendre un **champs de contraintes** dans un volume du cristal supérieur à celui du défaut lui-même.

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

⇒ **Fluage diffusion: Coble ou Nabarro-Herring**



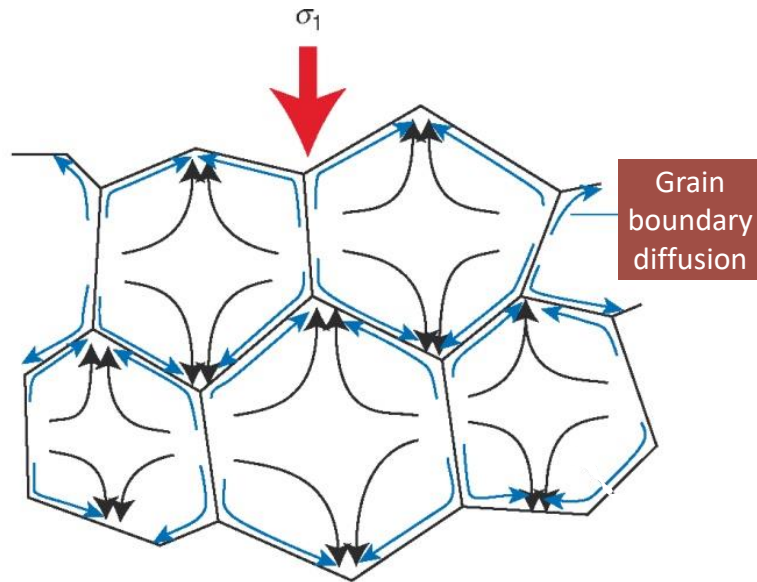
⇒ **Défauts ponctuels**

La présence de **défauts ponctuels** entraîne une **distorsion locale** du **réseau cristallin** et engendre un **champs de contraintes** dans un volume du cristal supérieur à celui du défaut lui-même.

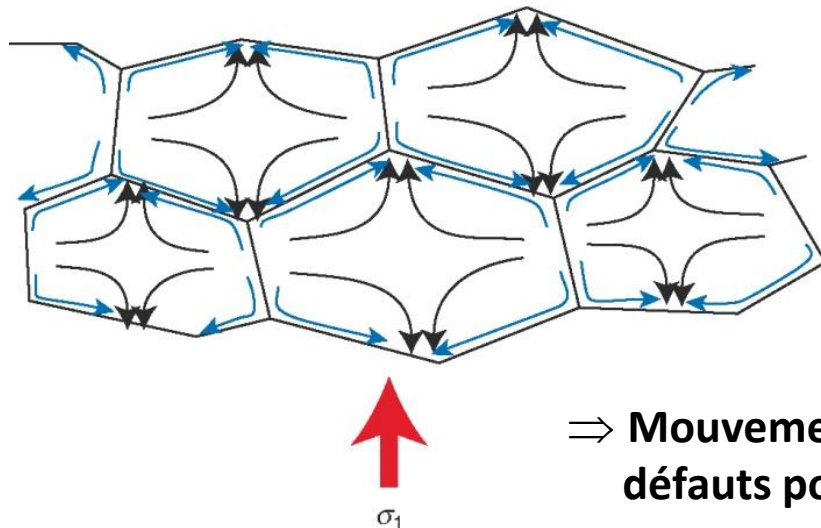
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

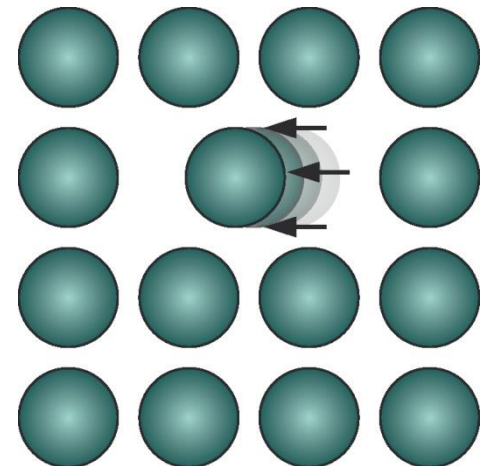
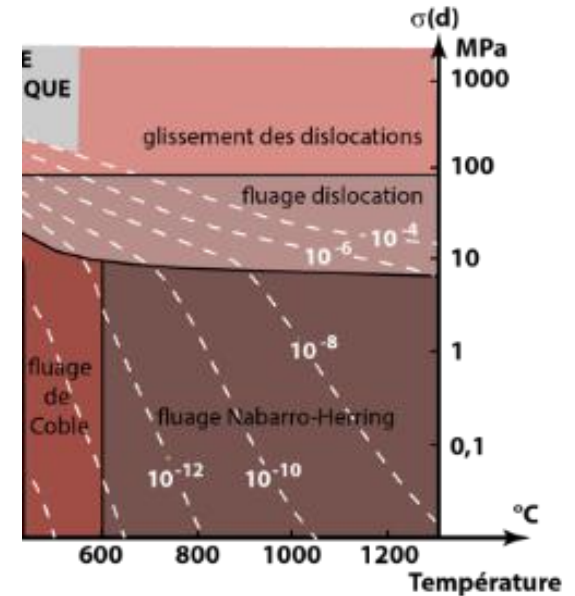
⇒ **Coble:** *Grain boundary diff.: vacancies move between crystals (T and stress controlled)*



⇒ Basse T°C



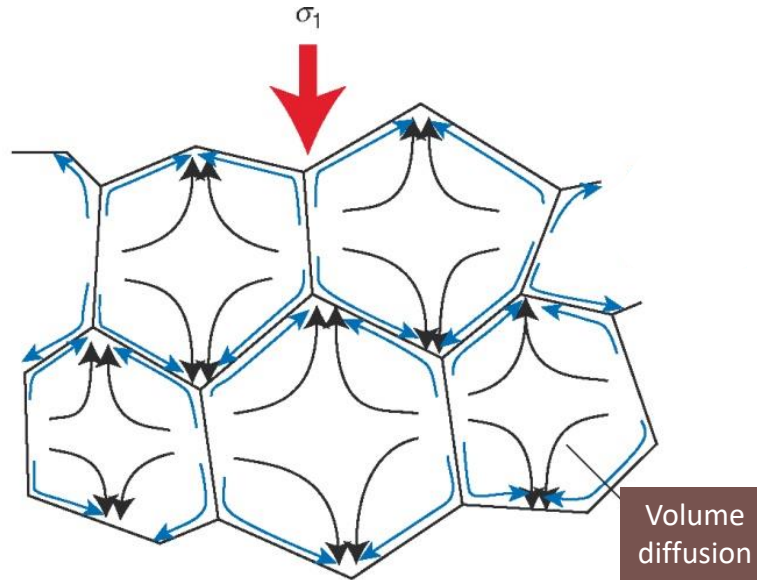
⇒ Mouvements de défauts ponctuels



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

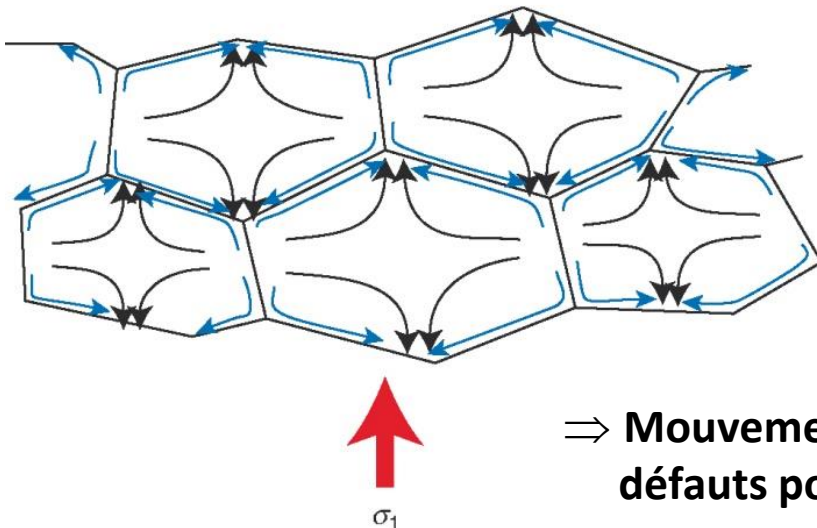
3. Recristallisation du quartz: *Déformation ductile, fluage*

⇒ **Nabarro-Herring: Volume diff.: vacancies move through crystals (T and stress controlled)**

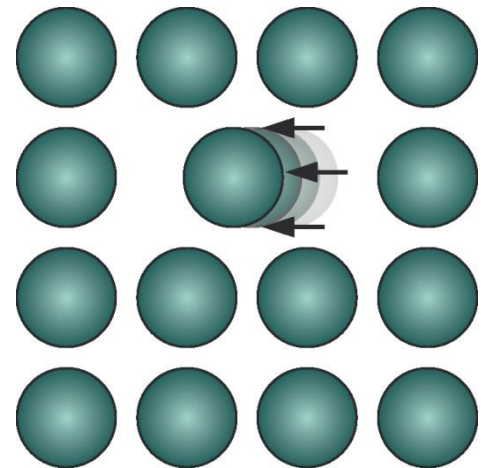
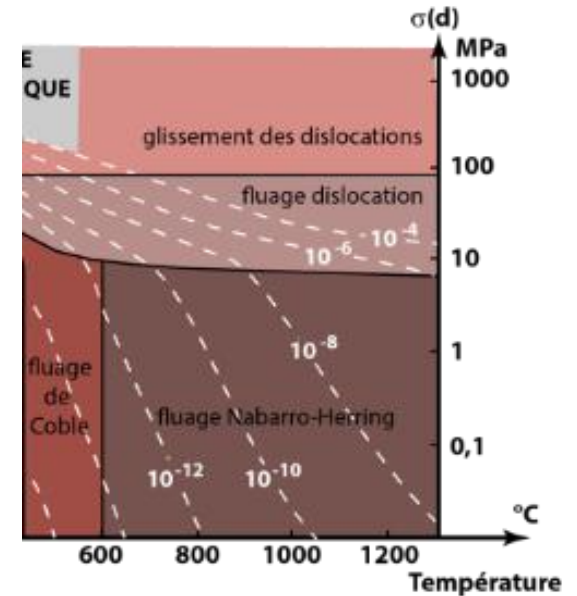


Volume diffusion

⇒ Haute $T^{\circ}\text{C}$

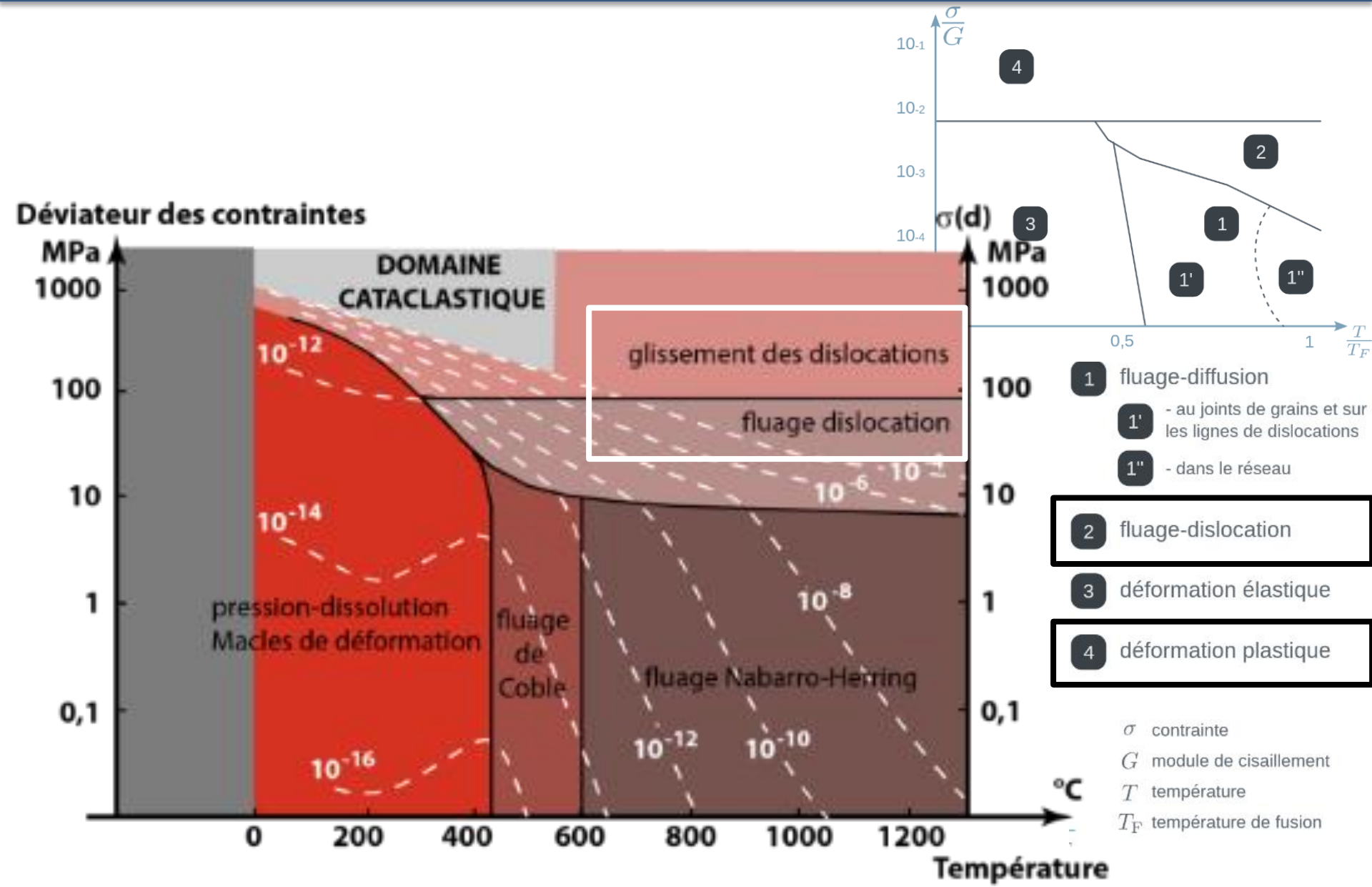


⇒ Mouvements de défauts ponctuels



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

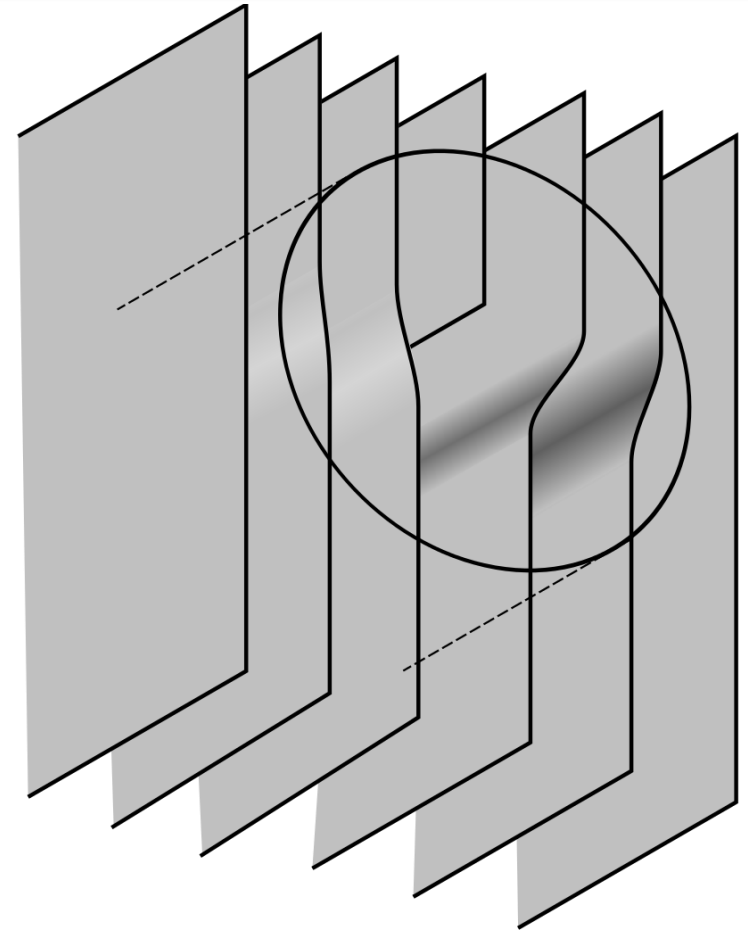
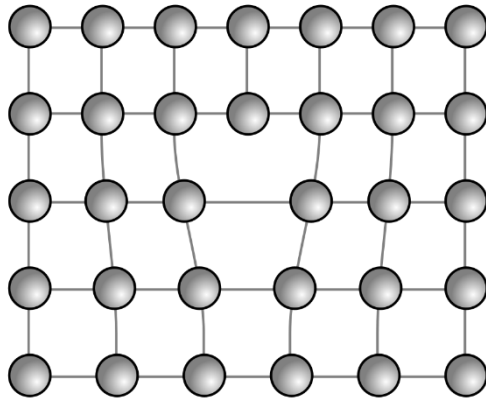
3. Recristallisation du quartz: *fluage* et *glissement dislocation*



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

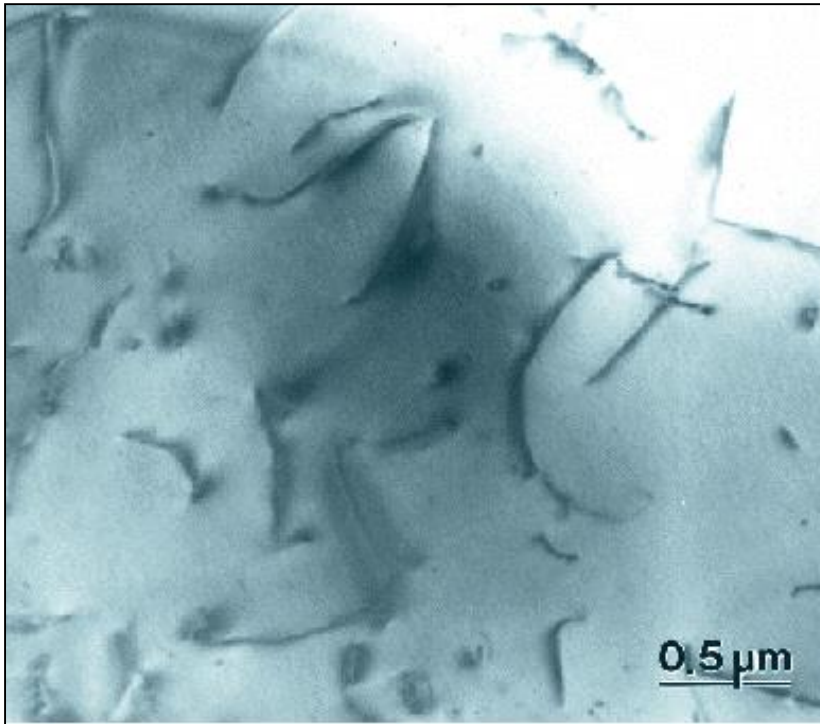
3. Recristallisation du quartz: *fluage* et *glissement dislocation*

**Dislocation
coin**



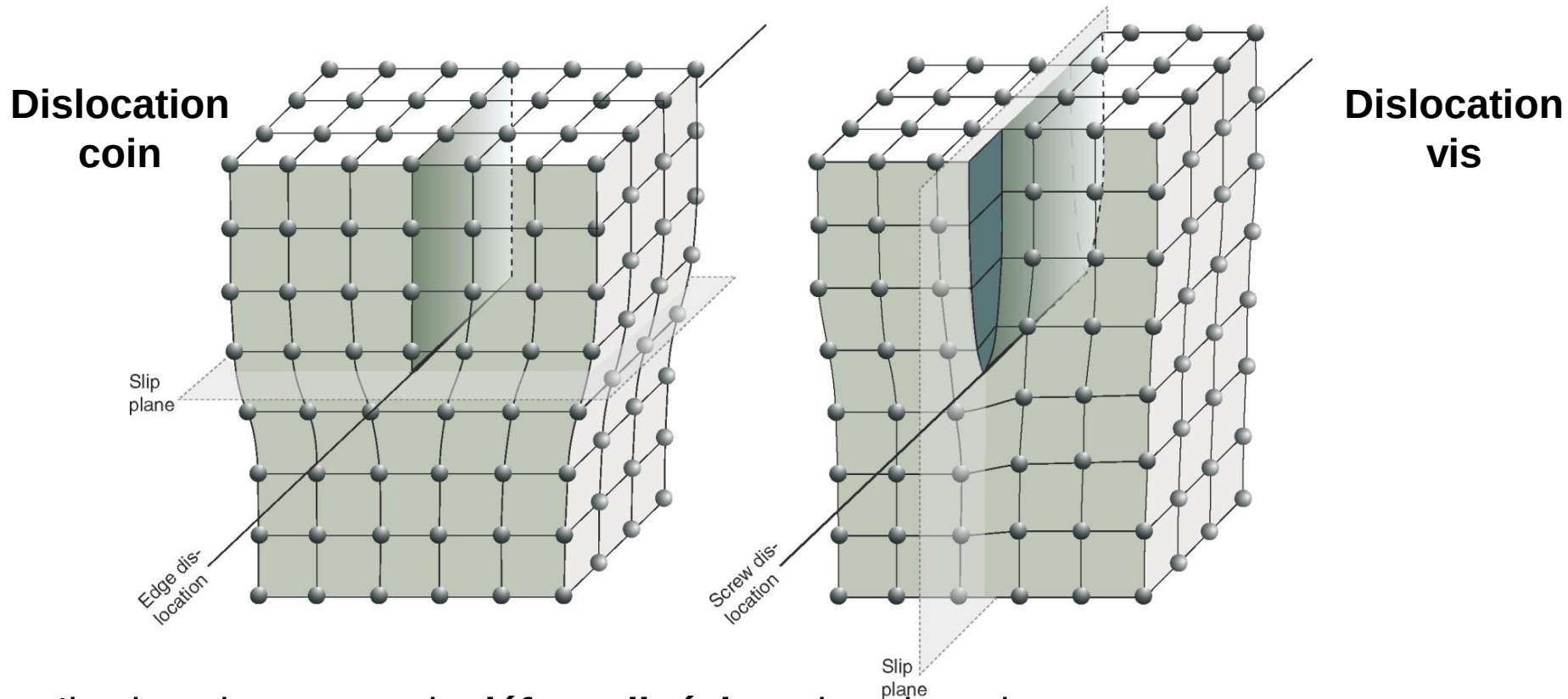
**Dislocations = discontinuités linéaires
dans l'organisation de la structure
cristalline**

Dislocations dans un grain de quartz
par TEM (Transmission Electron Microscopy)



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *fluage* et *glissement dislocation*

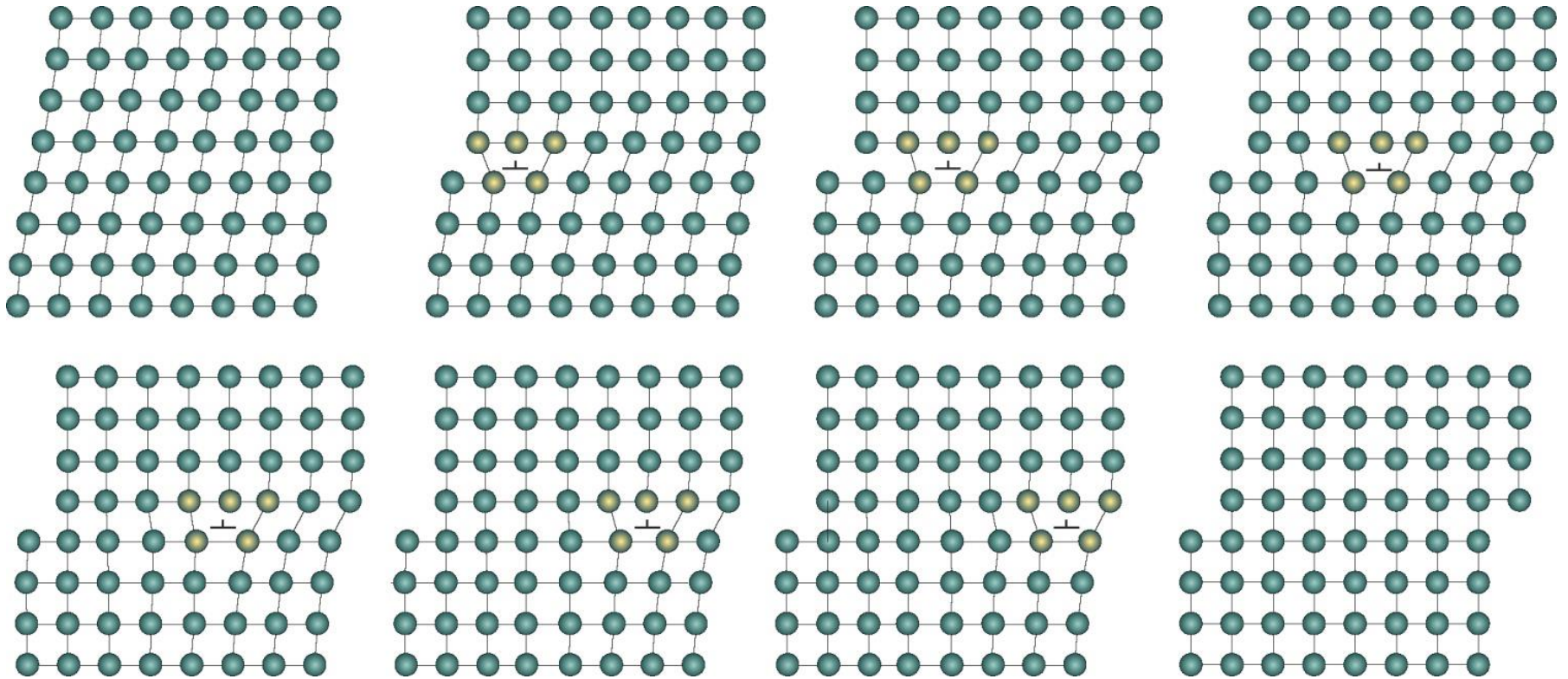


Il existe deux types de **défauts linéaires** dans les cristaux:

- Dislocation coin (*edge dislocation*): considérées comme un demi-plan atomique supplémentaire inséré dans une structure parfaite.
- Dislocation vis (*screw dislocation*): implique une torsion de la structure parfaite.

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *fluage* et *glissement dislocation*

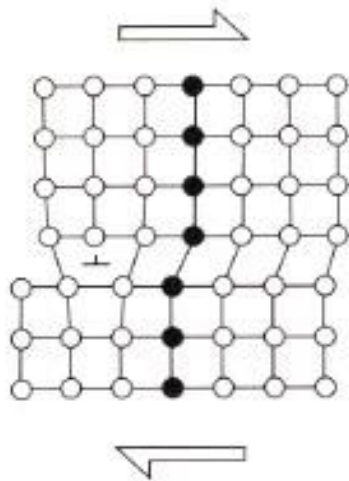


⇒ **Glissement de défauts linéaires (*dislocation glide*)**

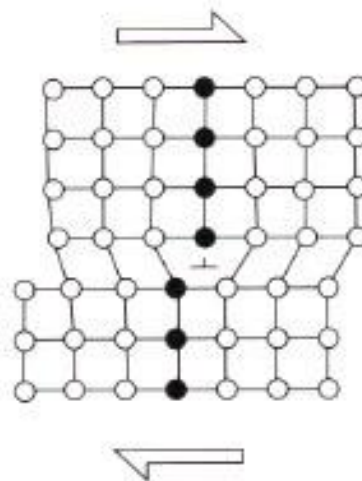
Les dislocations sont donc des défauts linéaires qui, en glissant dans le cristal (*dislocation glide*), propagent la déformation **plastique** dite **irréversible**.

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

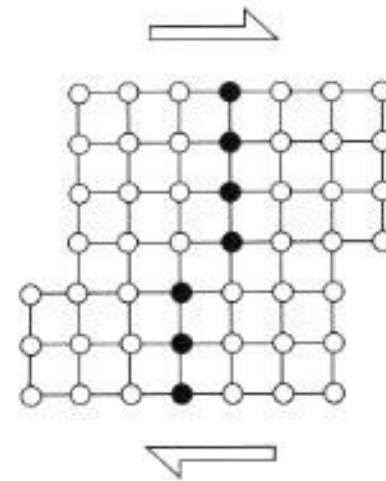
3. Recristallisation du quartz: *fluage et glissement dislocation*



introduction
of
dislocation



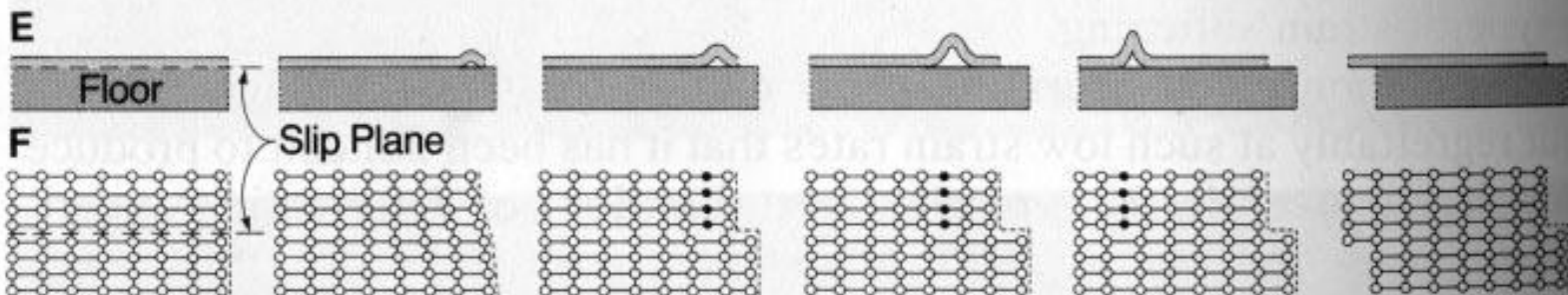
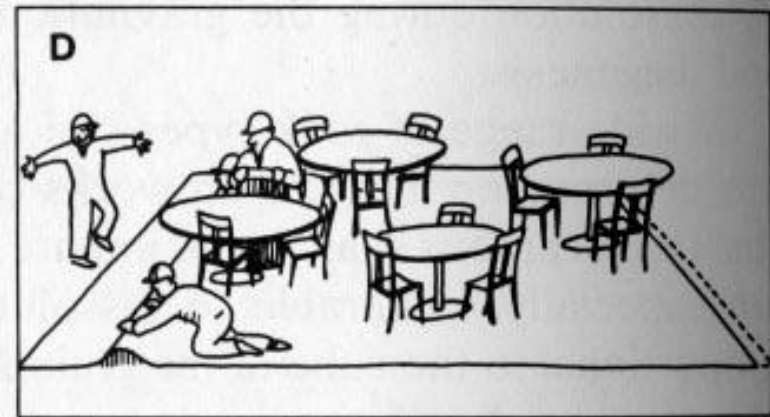
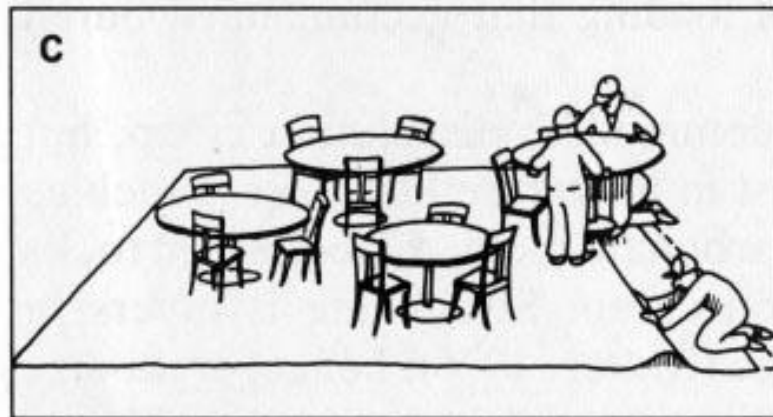
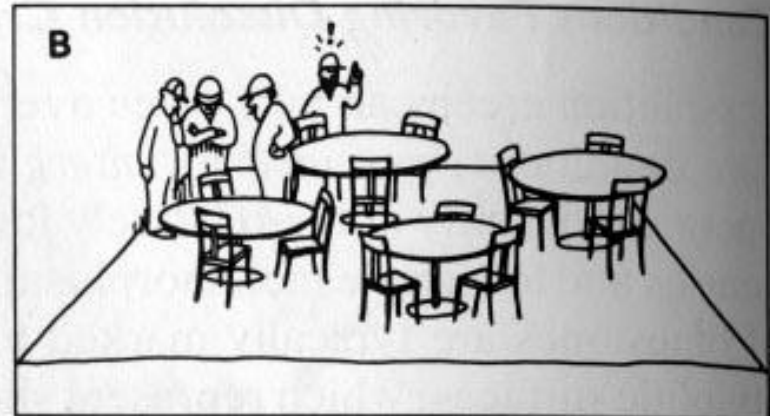
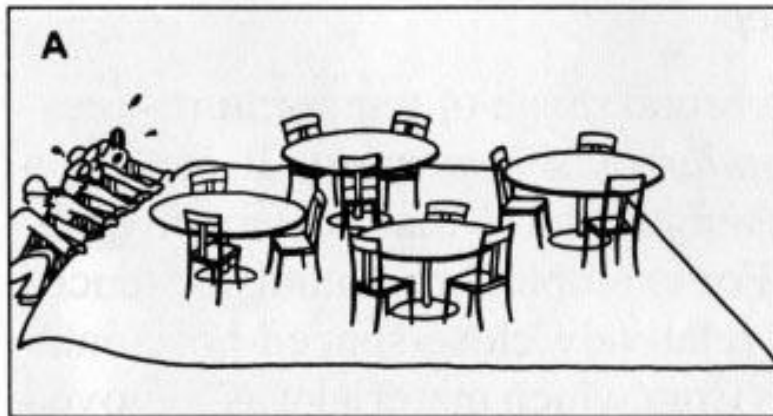
migration
of
dislocation



crystal shape has changed
without mechanical
fracturing or loss of crystal
structure

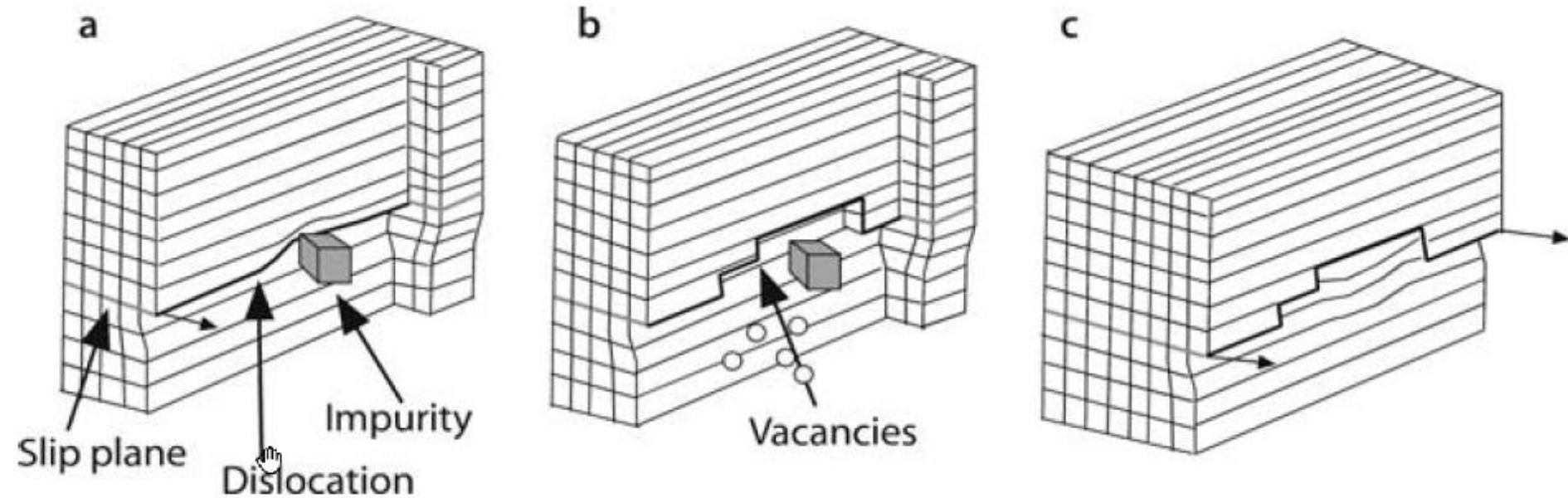
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *fluage* et *glissement dislocation*



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *fluage* et *glissement dislocation*



⇒ **Fluage de défauts linéaires (*dislocation creep*)**

- ✓ Les dislocations peuvent se déplacer d'une quantité élémentaire (distance interatomique)
- ✓ Les mouvements de dislocation n'affaiblissent ou ne fracturent pas le cristal mais le déforment

Dans ce cas, les dislocations peuvent glisser (*glide*) et monter (*climb*) au travers de la structure cristalline. Le cristal est alors « soigné » de ses défauts cristallins.

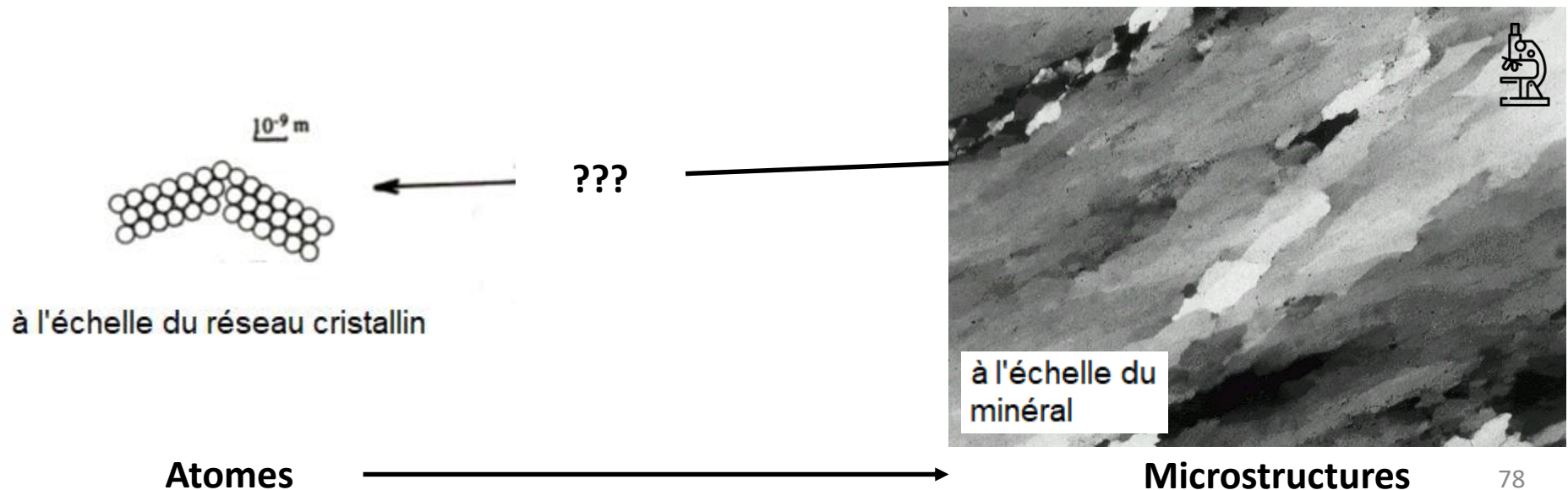
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*

Les mécanismes responsables de la déformation plastique ont lieu à **très petite échelle** (atomique) et les observations directes de cette déformation ne peuvent se faire qu'avec un microscope électronique en transmission (MET).

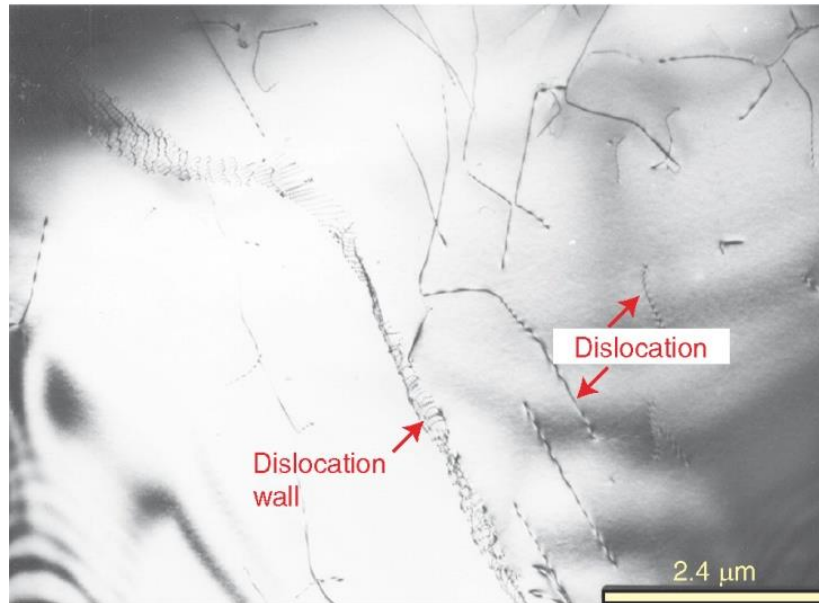
Cependant, ces mécanismes entraînent la formation de **microstructures** qui sont observables avec un microscope optique classique!

Ces microstructures témoignent de processus de **restauration** (redistribution des dislocations) et **recristallisation** en nouveaux grains.

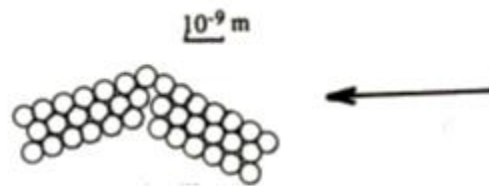


2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*



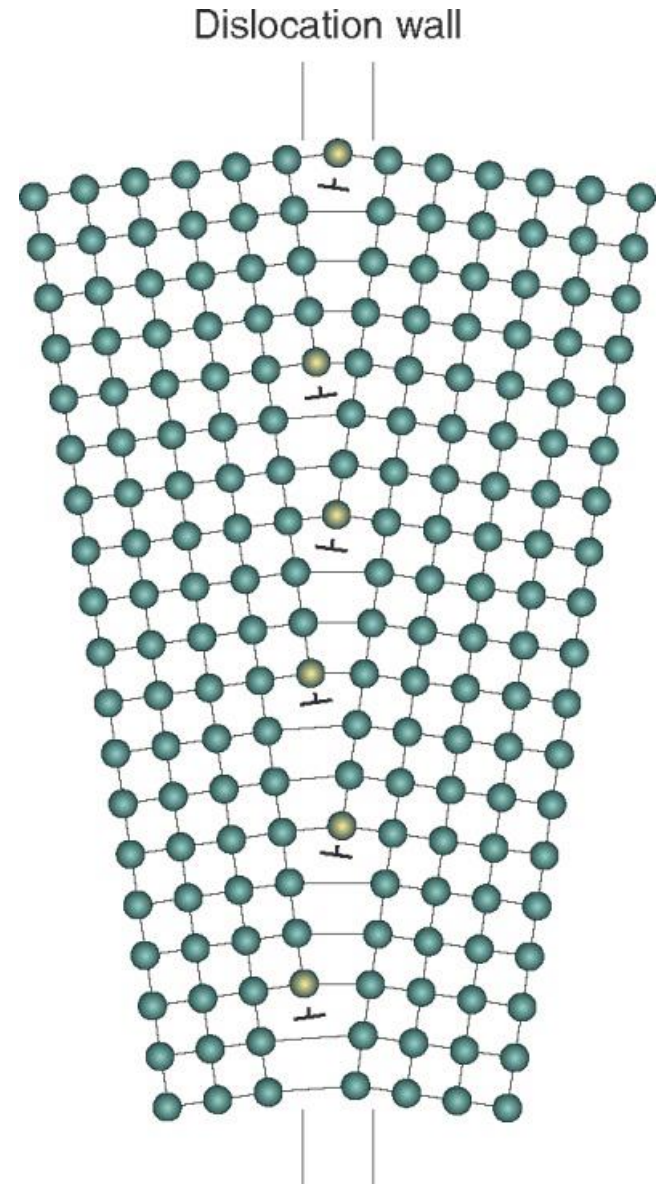
Dislocations dans un grain de quartz
par TEM (Transmission Electron Microscopy)



???

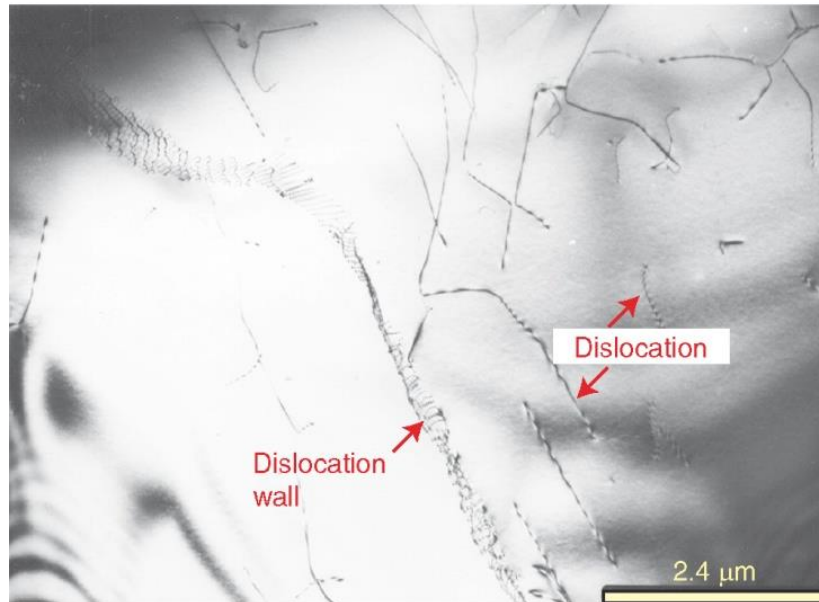
à l'échelle du réseau cristallin

Atomes

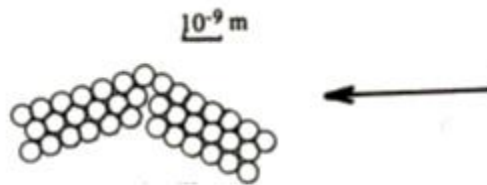


2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*



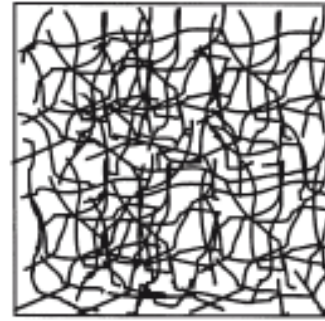
Dislocations dans un grain de quartz
par TEM (Transmission Electron Microscopy)



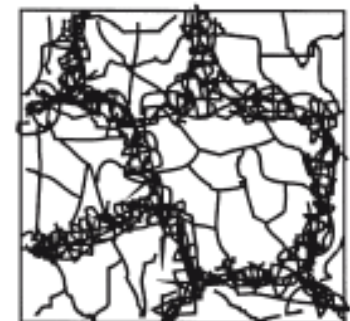
???

à l'échelle du réseau cristallin

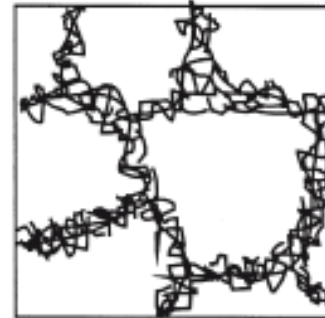
Atomes



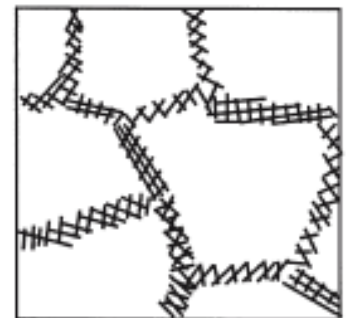
(a) Dislocation tangles



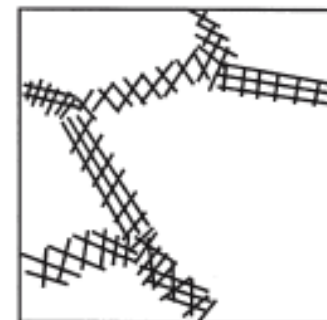
(b) Cell formation



(c) Annihilation of
dislocations within cells



(d) Subgrain formation

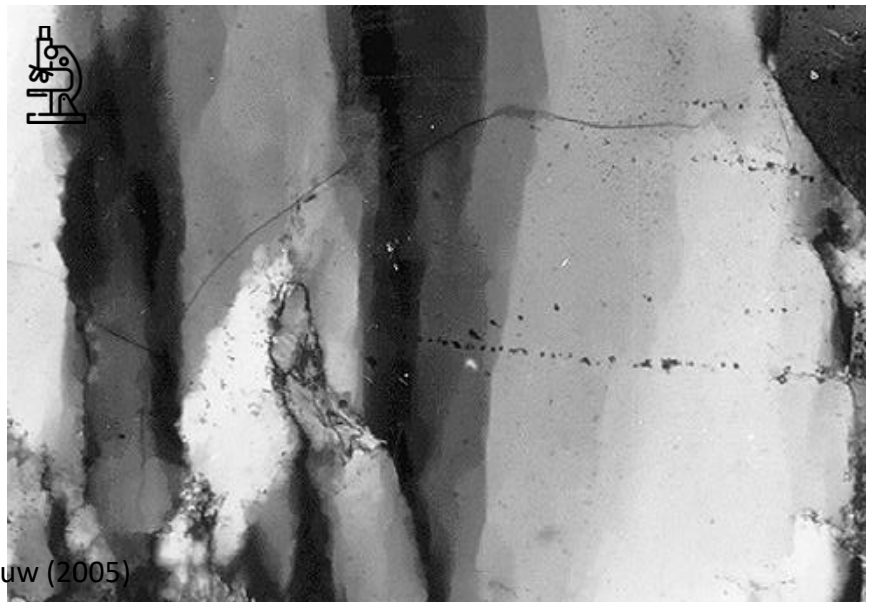
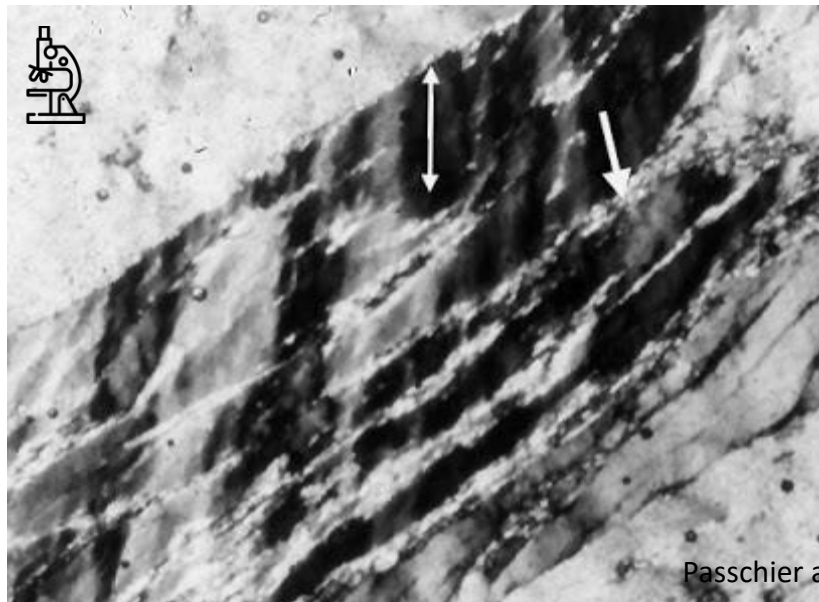
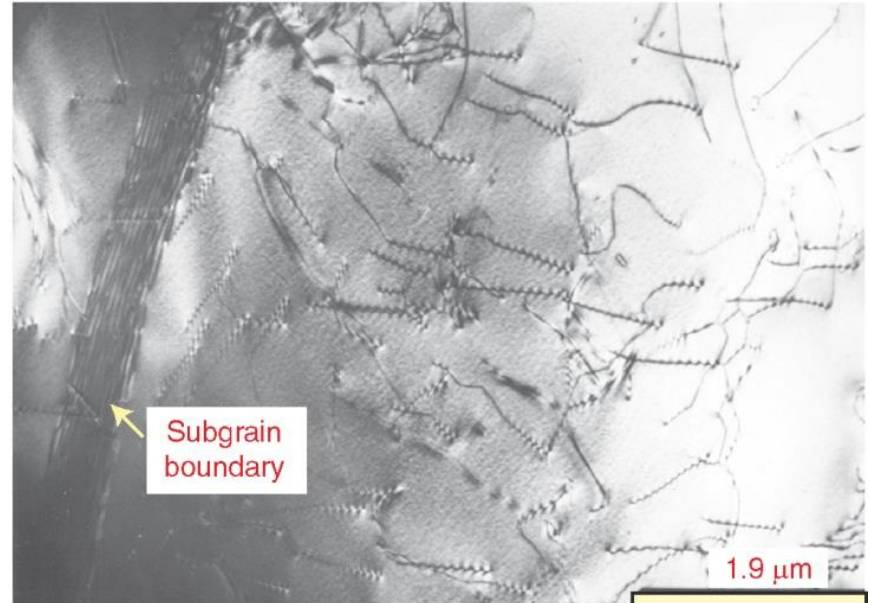
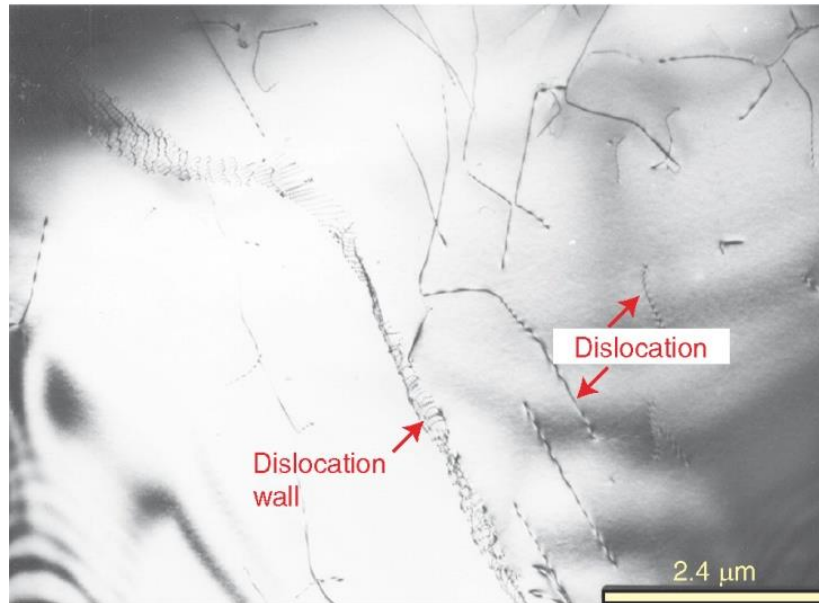


(e) Subgrain growth

Formation de
sous-grains

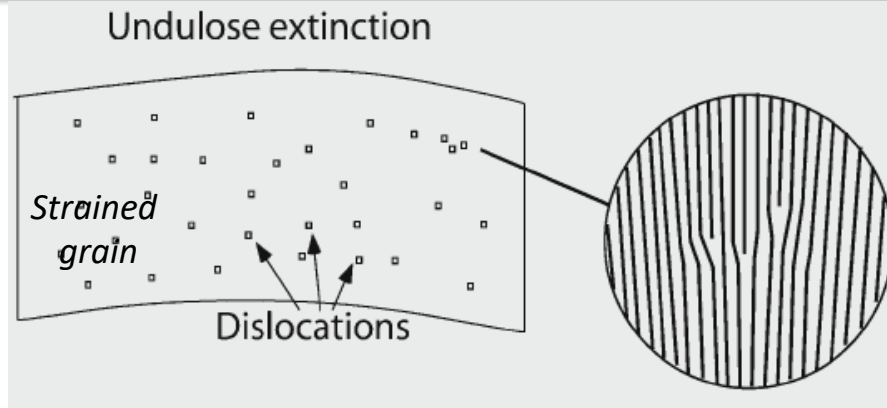
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*

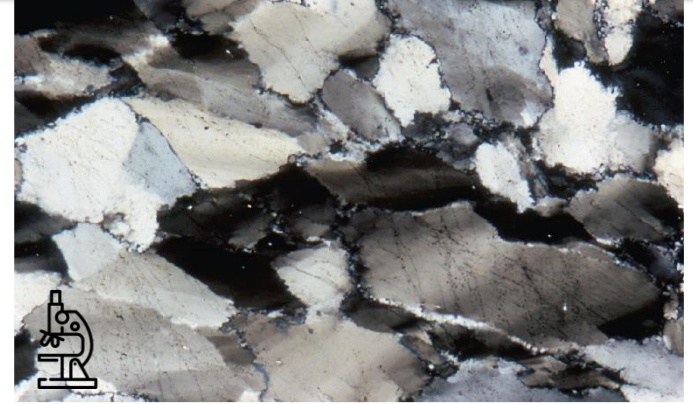


2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*



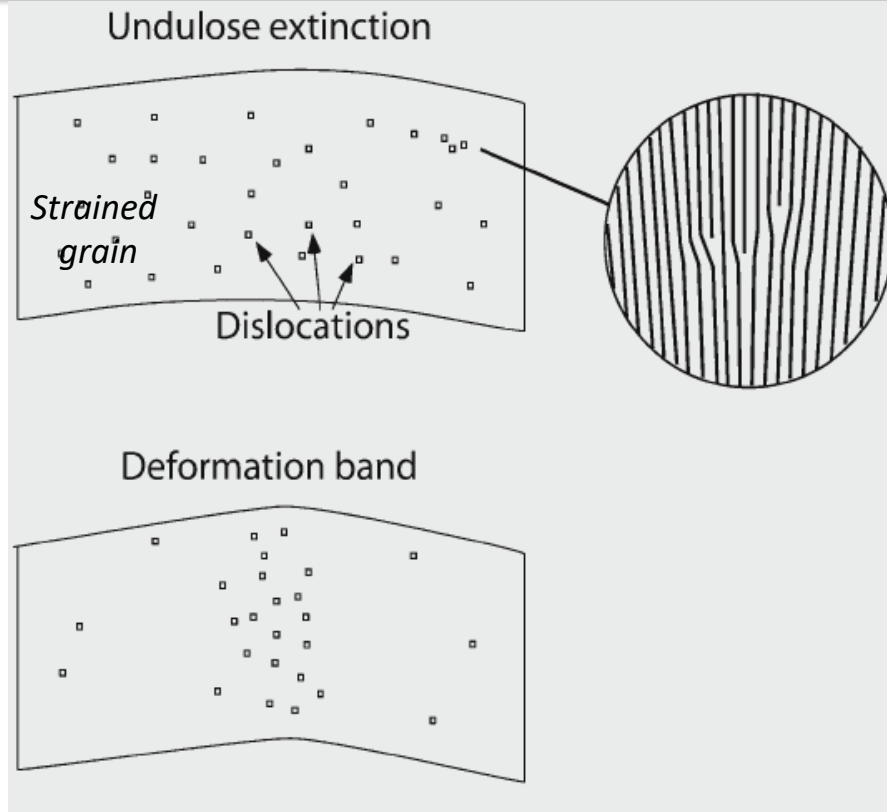
Extinction ondulante



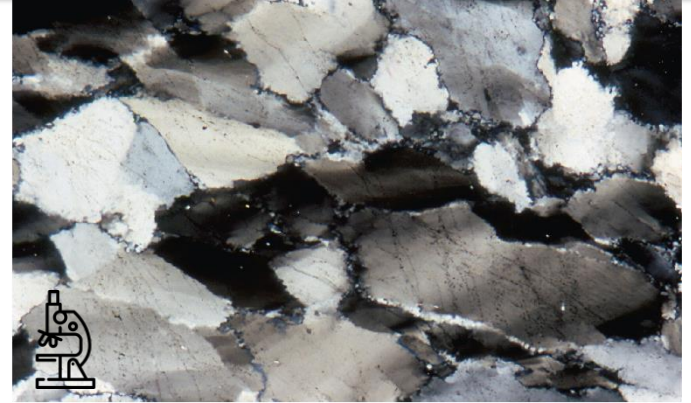
Taille des images: 1,8 mm

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*



Extinction ondulante



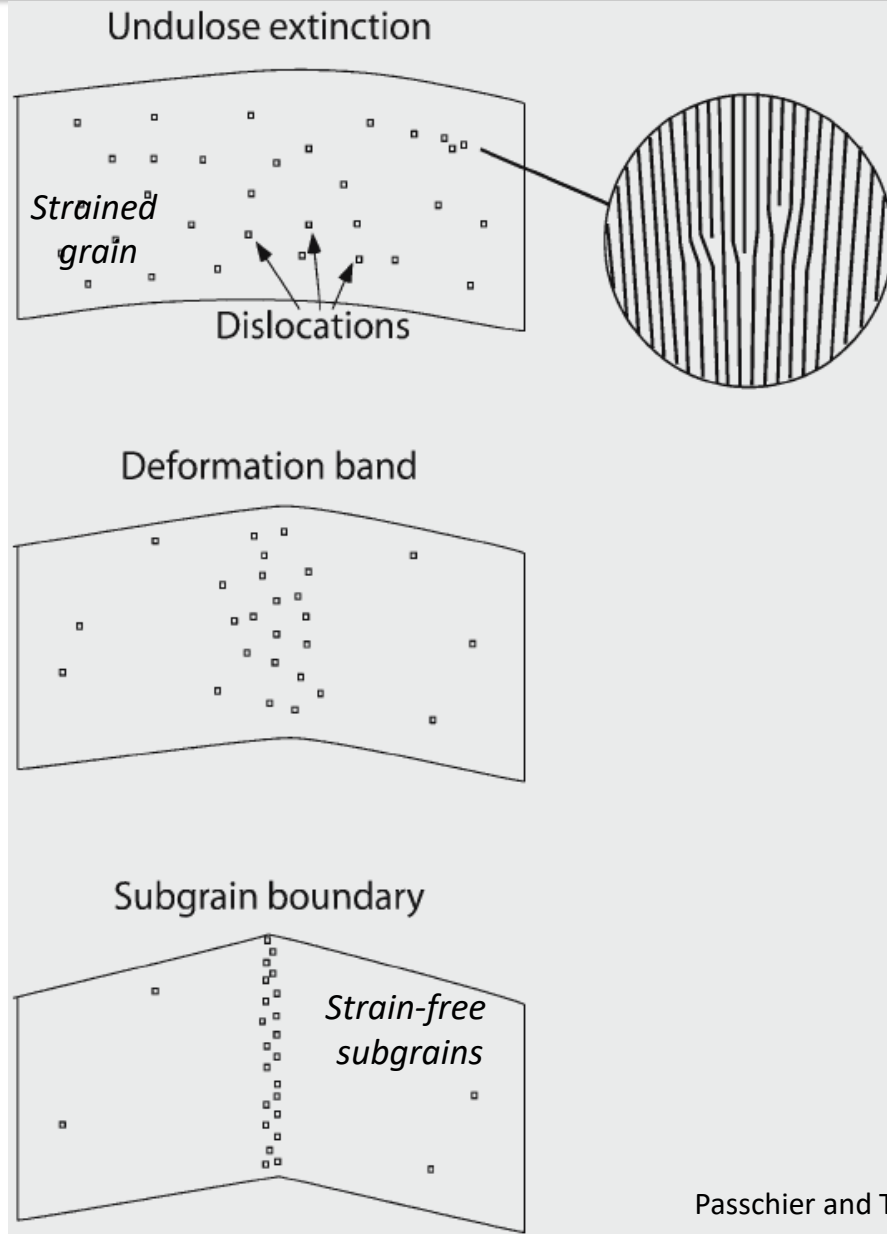
Déformation lamellaire



Taille des images: 1,8 mm

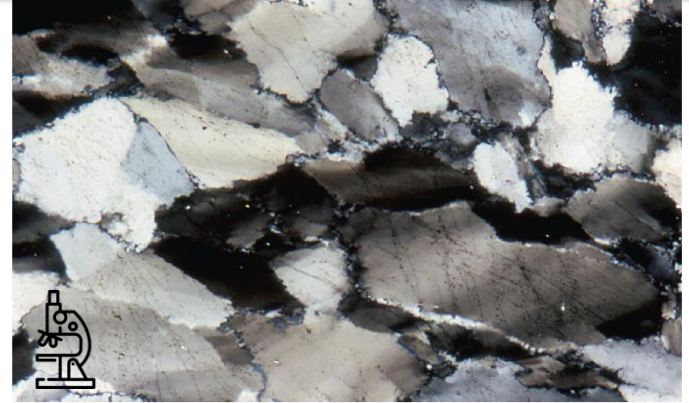
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *microstructures*



Restauration (recovery)

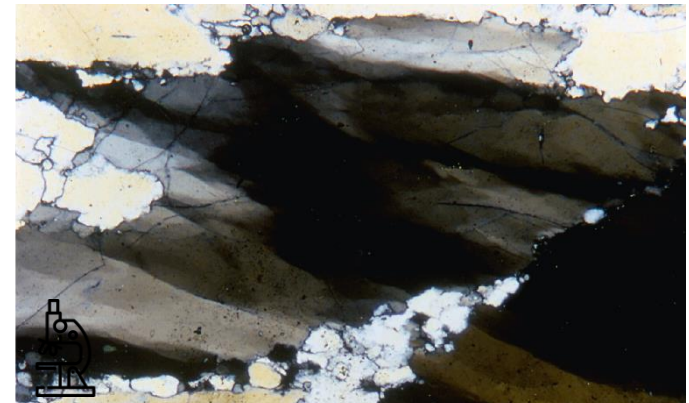
Extinction ondulante



Déformation lamellaire



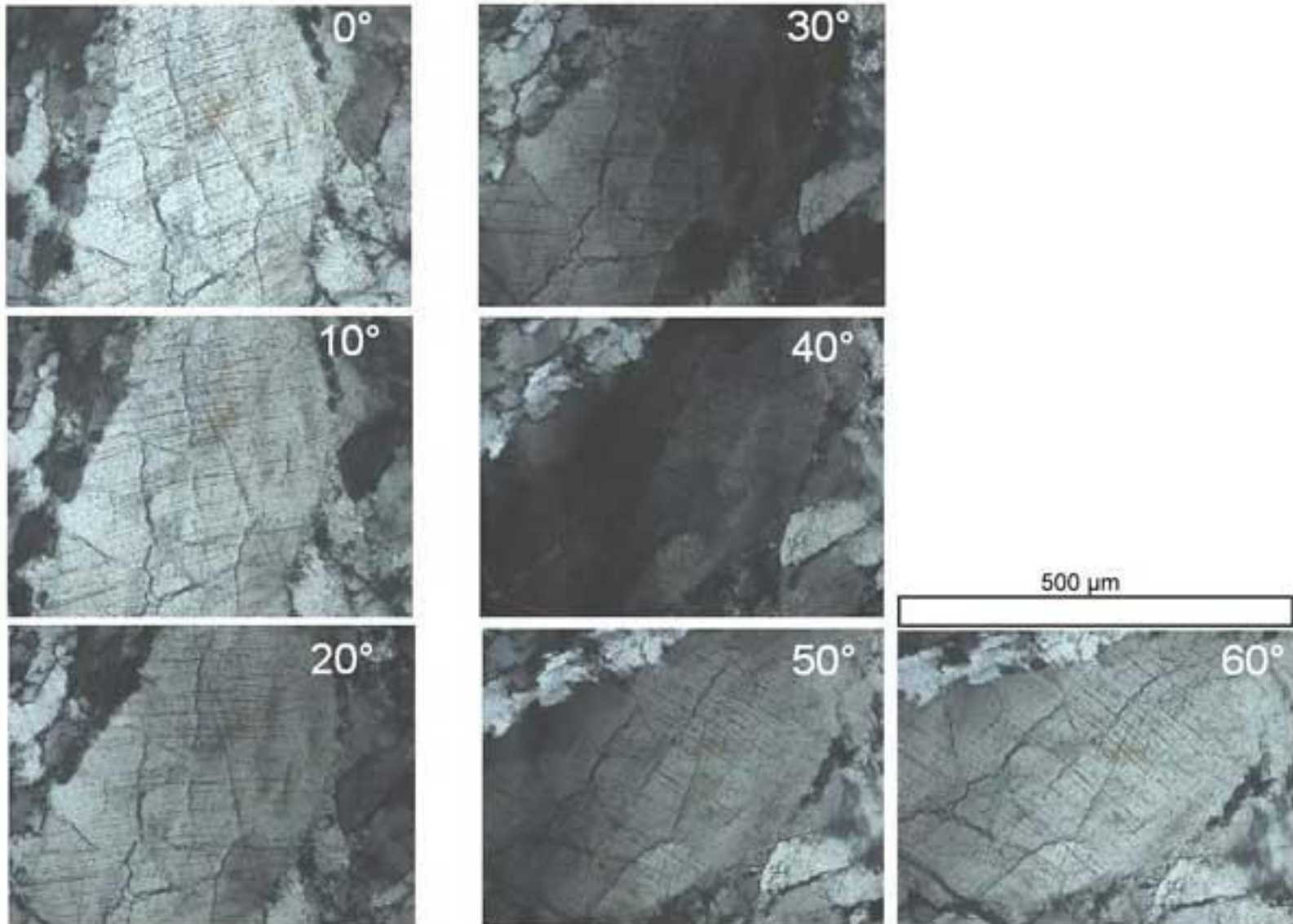
Formation de sous-grains



Taille des images: 1,8 mm

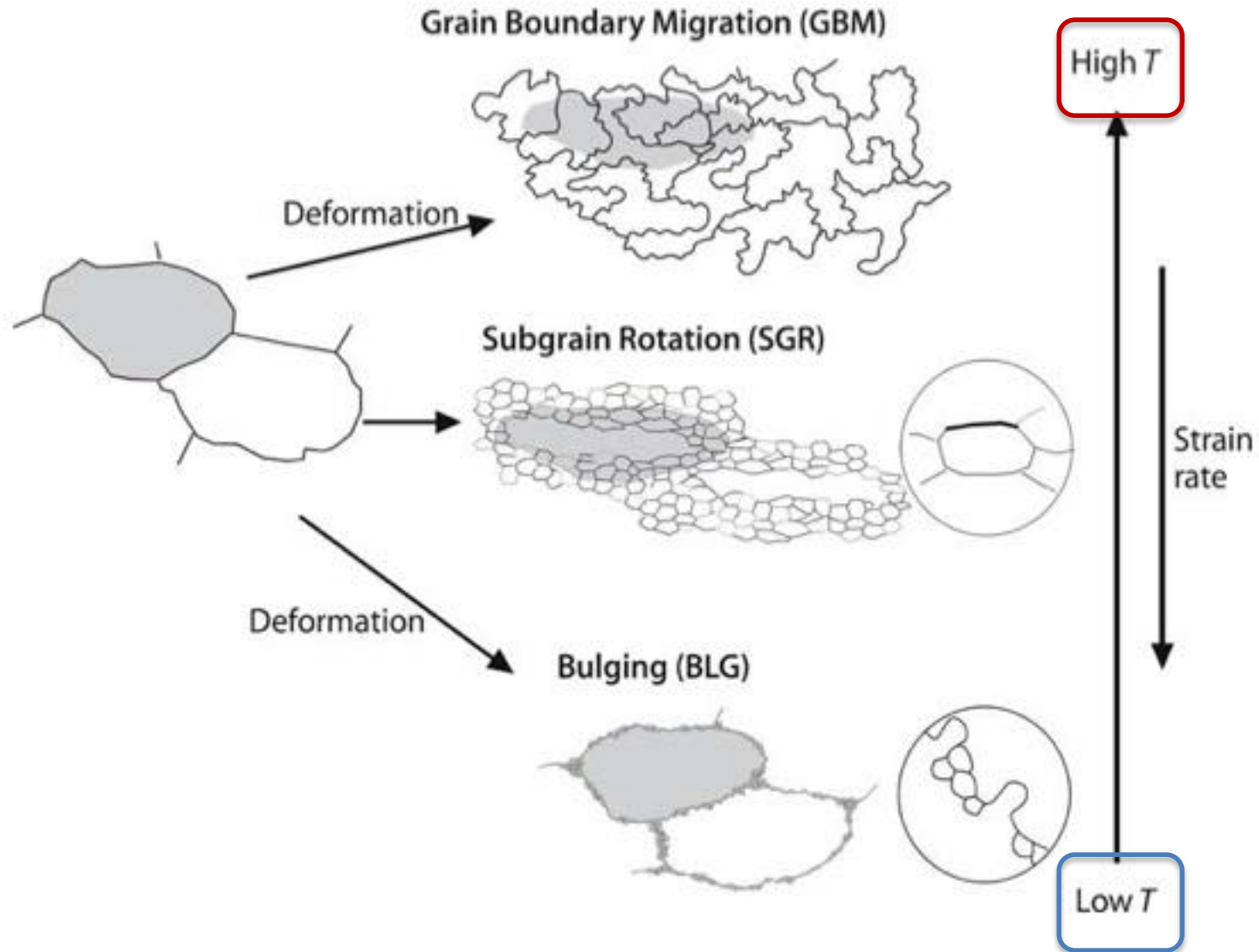
2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *extinction ondulante*



2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *fonction de T / vitesse de déformation*)

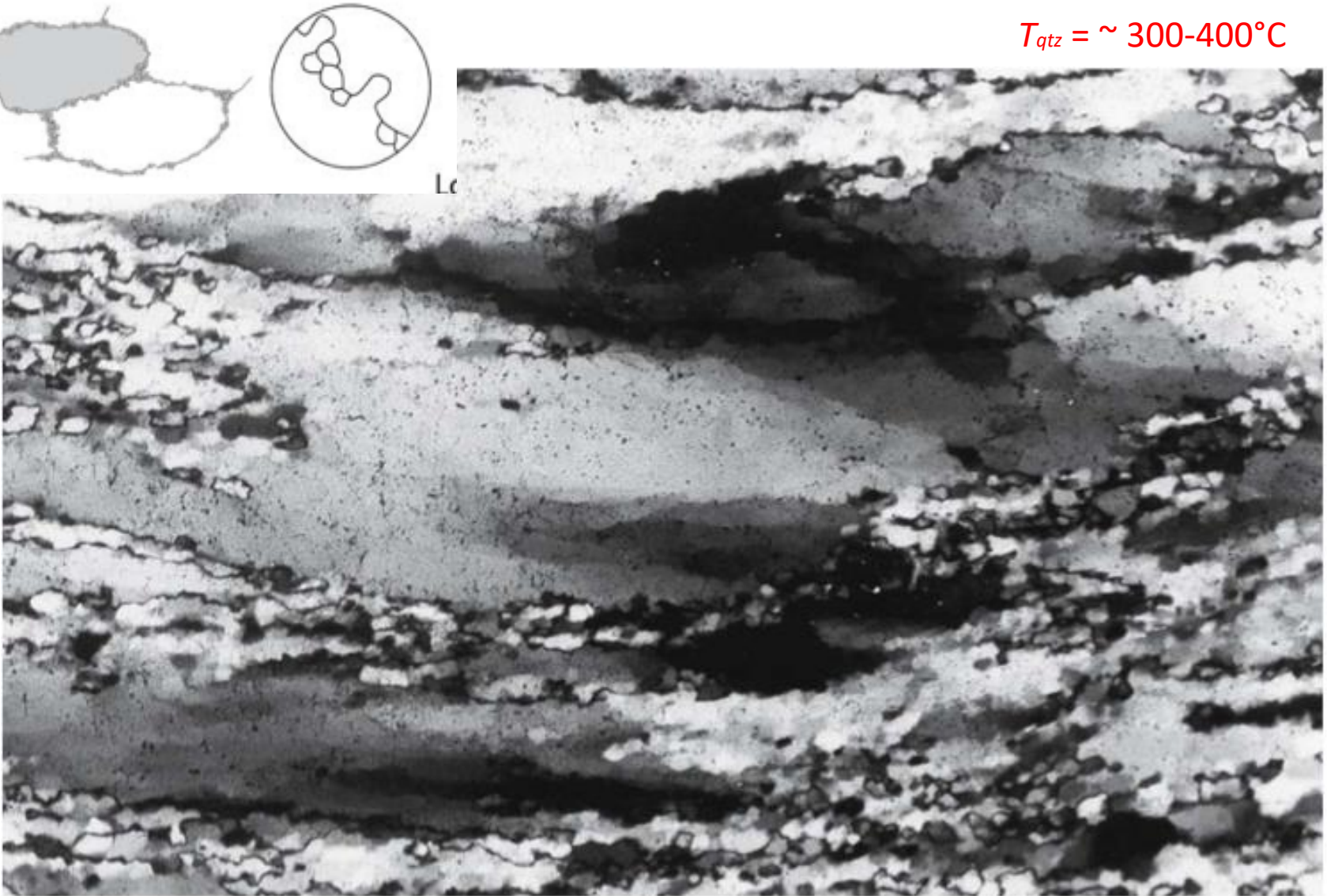


2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *recristallisation bulging (BLG)*

$T_{qtz} = \sim 300-400^{\circ}\text{C}$

Passchier & Trouw, 2005

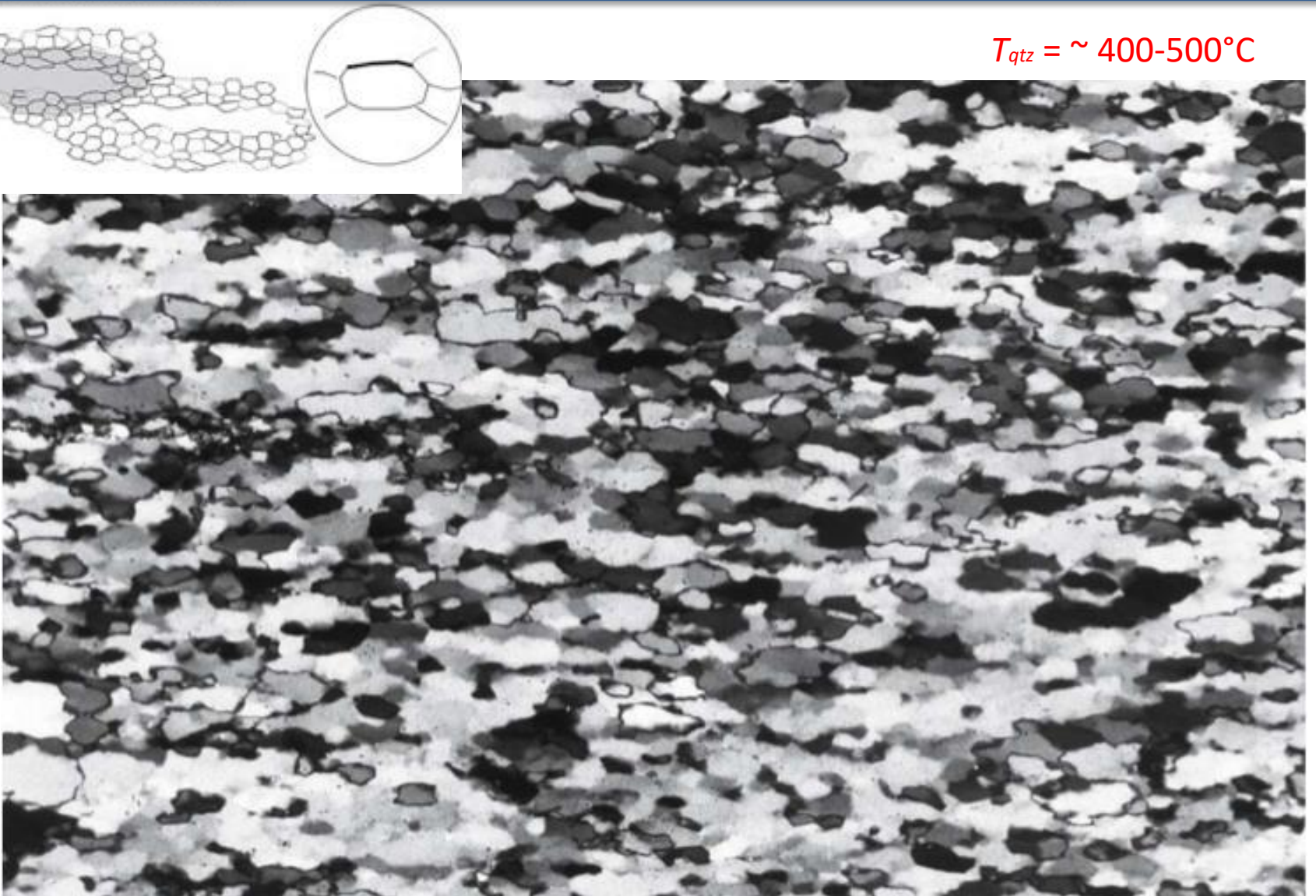


$T_F = \sim 450-600^{\circ}\text{C}$

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *rotation des sous-grains (SGR)*

$T_{qtz} = \sim 400-500^{\circ}\text{C}$

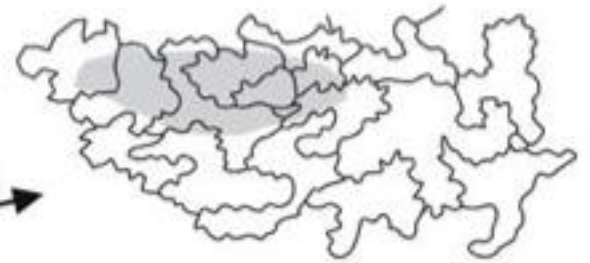


Passchier & Trouw, 2005

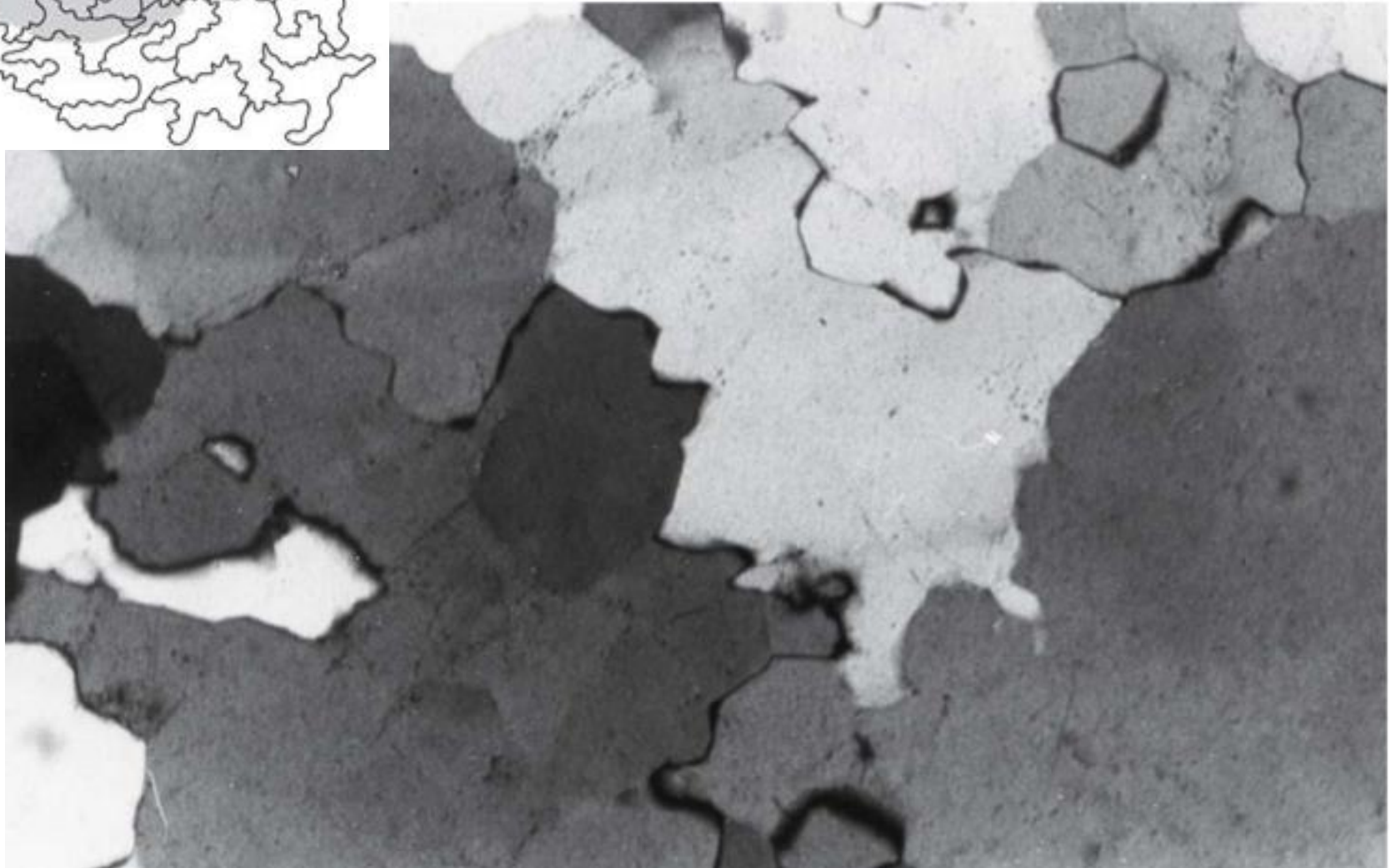
$T_F = \sim 600-800^{\circ}\text{C}$

2. DESCRIPTION DES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

3. Recristallisation du quartz: *migration joints de grains (GBM)*



$T_{qtz} > 500-550^{\circ}\text{C}$

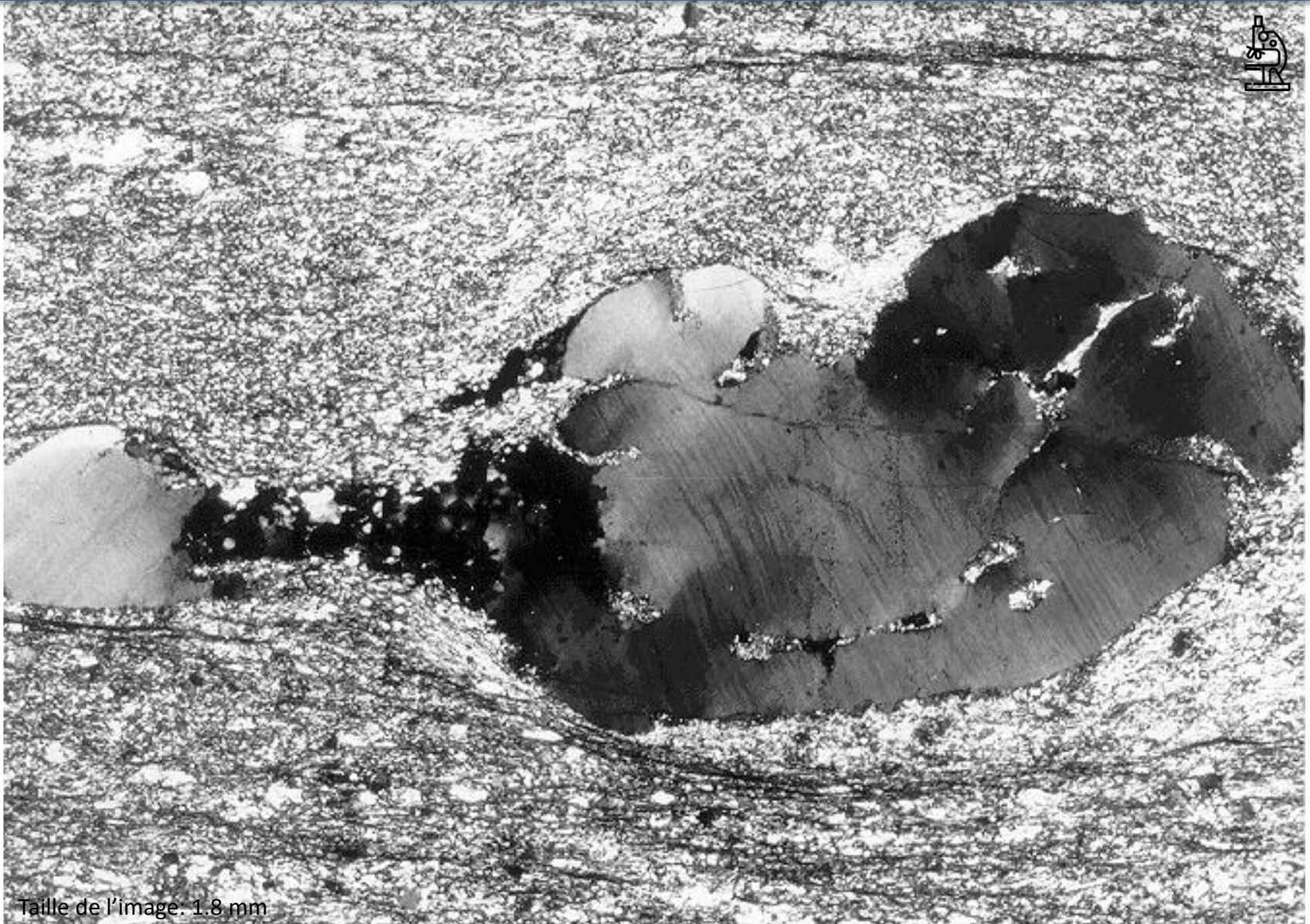


Passchier & Trouw, 2005

$T_F > 800-850^{\circ}\text{C}$

2.3 Recristallisation du quartz: exemples de microstructures

Passchier & Trouw, 2005

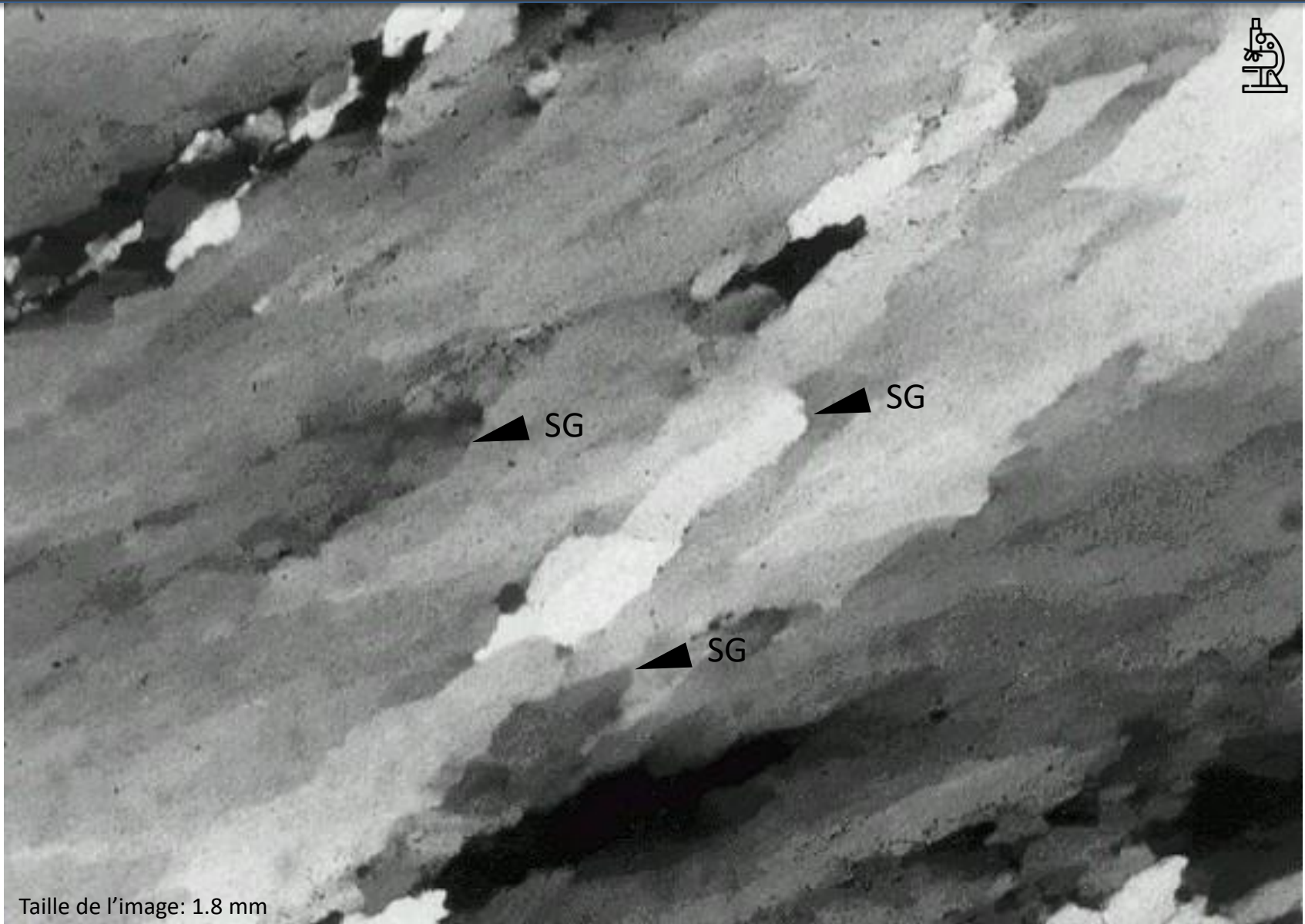


Taille de l'image: 1.8 mm

Le cristal est boudiné et montre des lamelles de déformation et une extinction ondulante

2.3 Recristallisation du quartz: exemples de microstructures

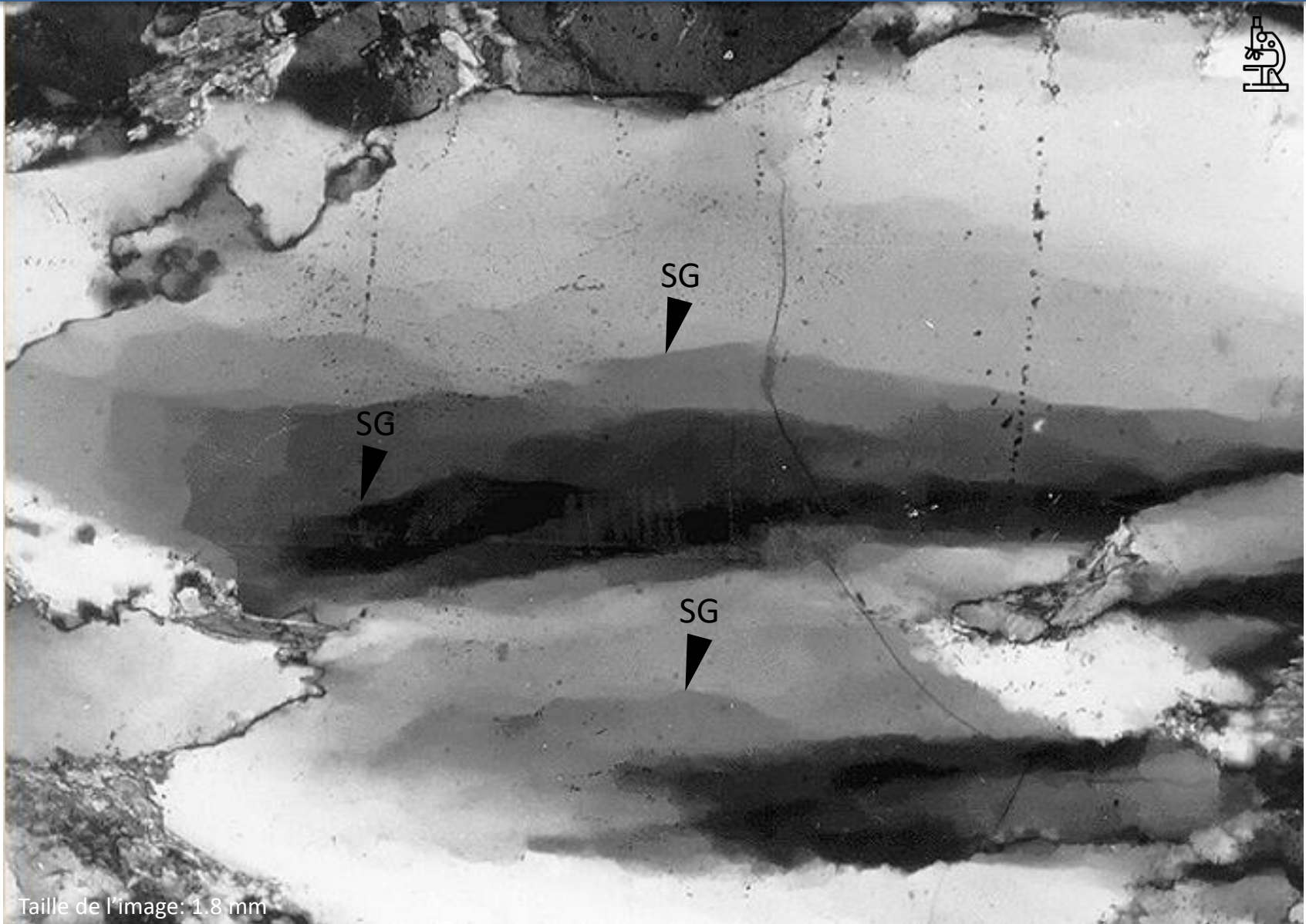
Passchier & Trouw, 2005



Accumulation de dislocation et formation de sous-grains (SG) de quartz (LPA)

2.3 Recristallisation du quartz: exemples de microstructures

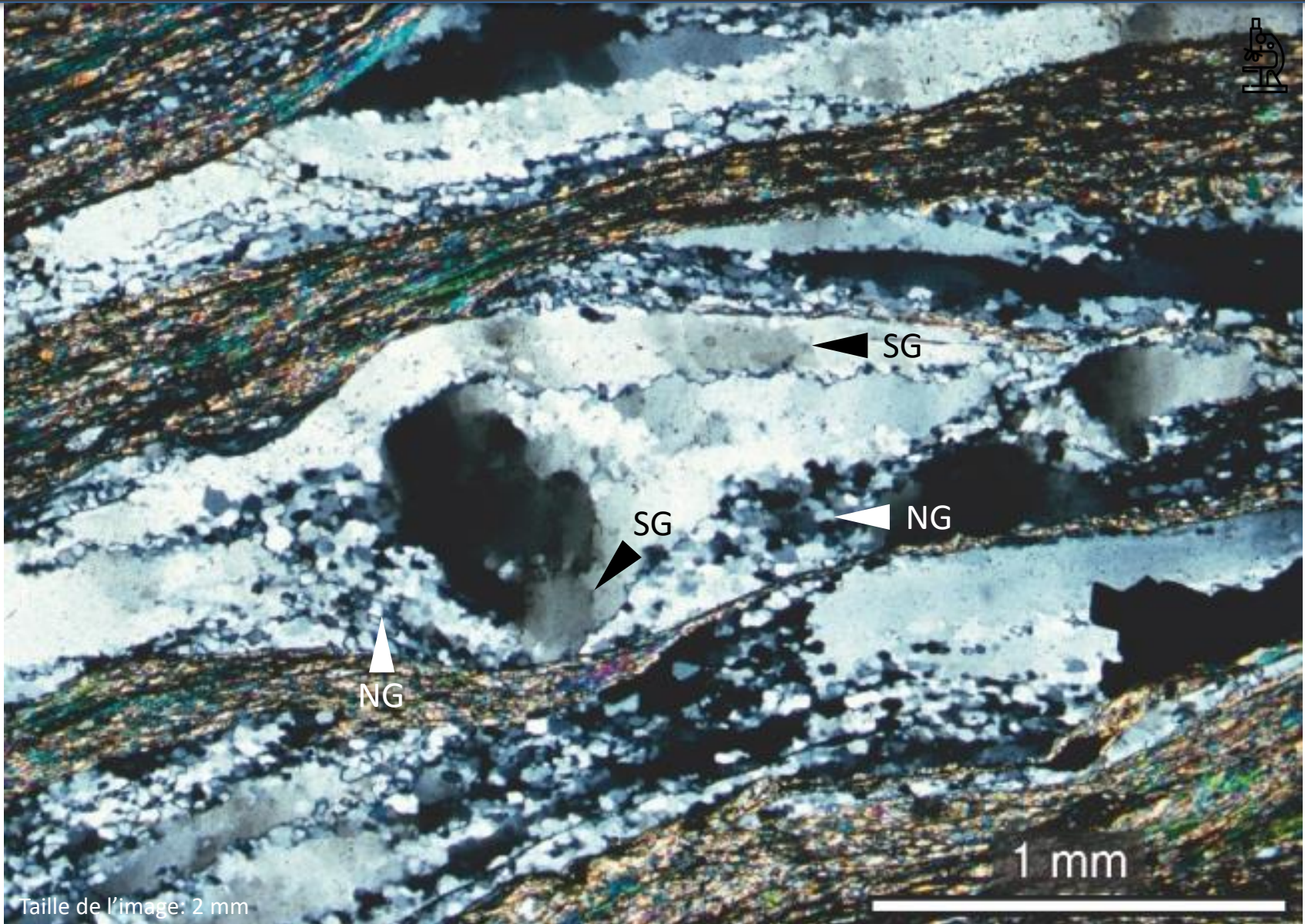
Passchier & Trouw, 2005



Sous-grains (SG) horizontaux dans une quartzite (LPA)

2.3 Recristallisation du quartz: exemples de microstructures

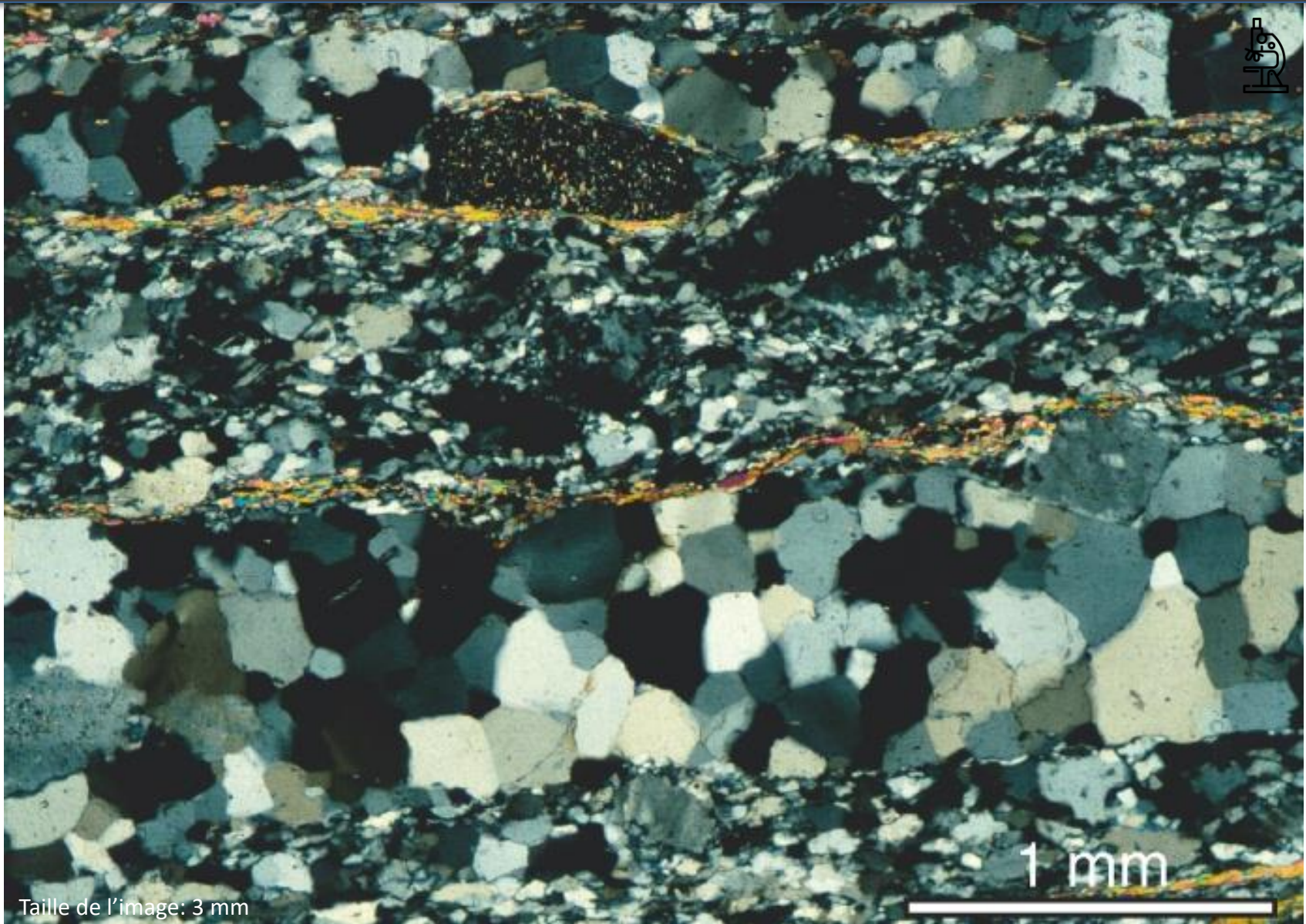
Passchier & Trouw, 2005



Formation de sous-grains (SG) et de nouveaux grains (NG) de quartz par recristallisation

2.3 Recristallisation du quartz: exemples de microstructures

Passchier & Trouw, 2005



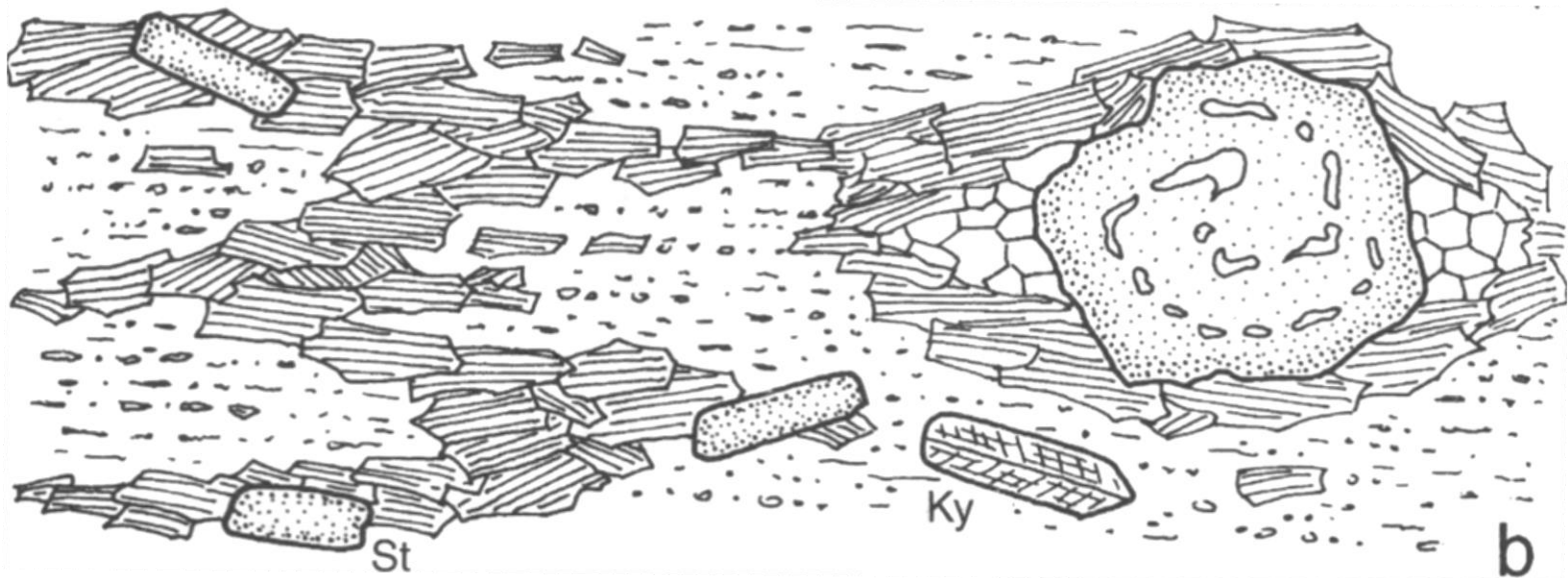
Recristallisation de grains de quartz (taille quasi égale)

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses syn-schistosité*

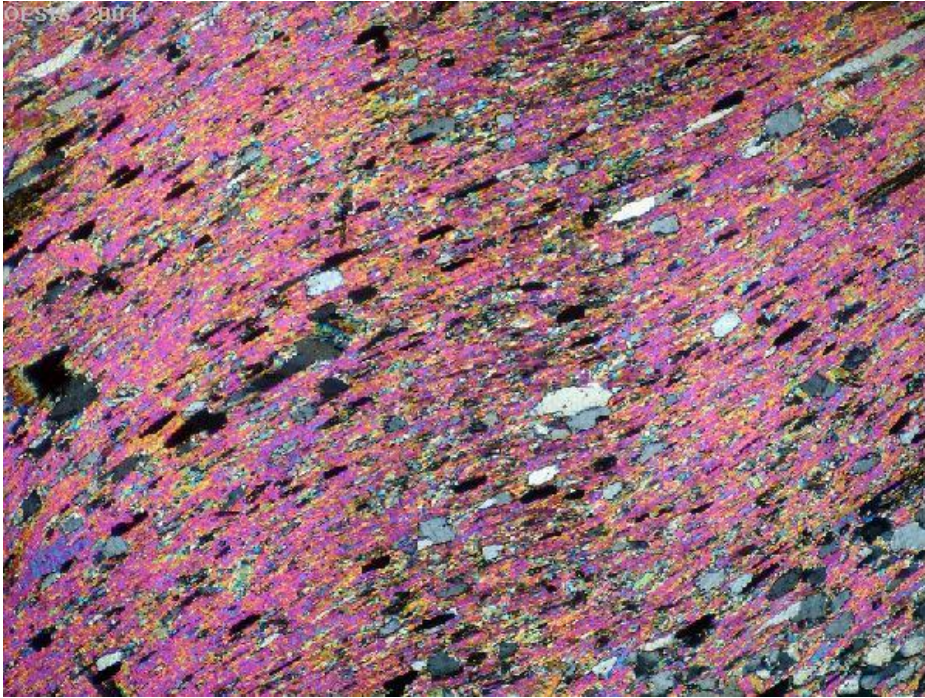


Minéraux syn-cinématiques/syn-tectoniques/syn-déformation:

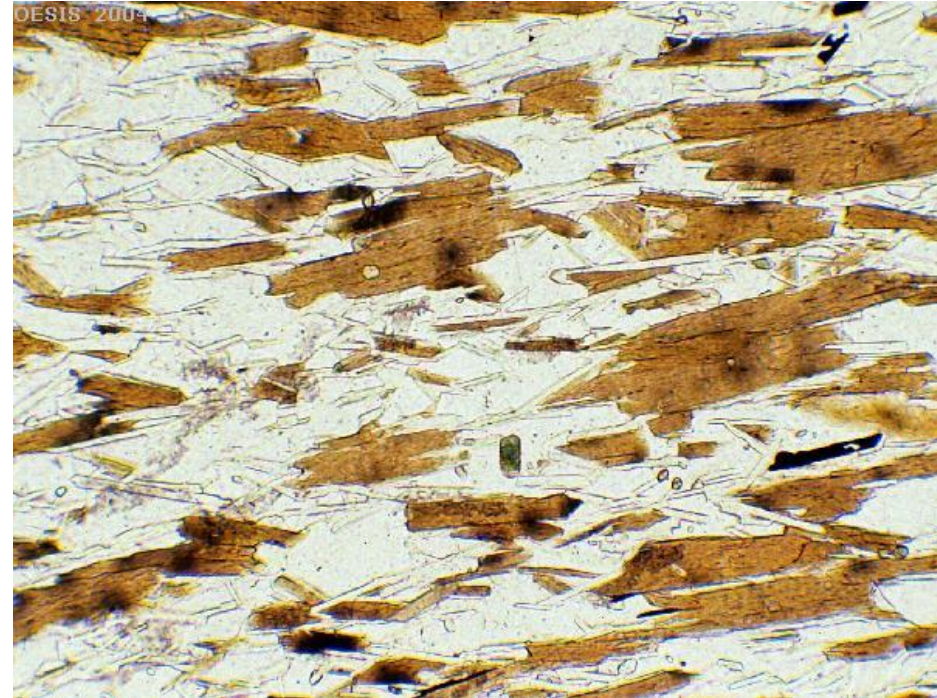
- Plans de clivage de biotite parallèles à la schistosité
- Contrôle par la schistosité de l'orientation de Ky et Std, sans ombre de pression
- Hélicité du grenat (inclusions dans le cristal)

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses syn-schistosité*



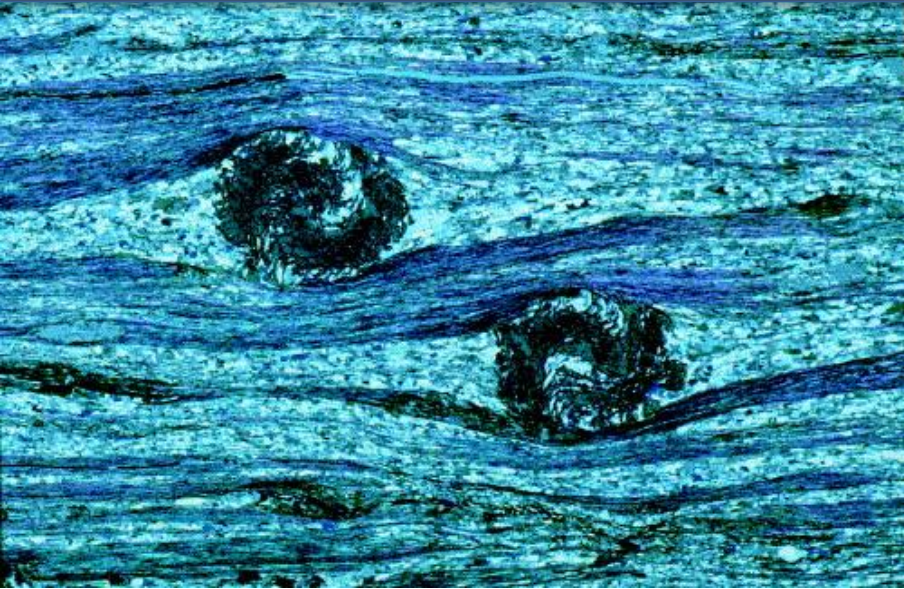
http://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/micro/medium/phyllite_pm20-10.jpg



http://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/micro/medium/schist2_pm04-13.jpg

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses syn-schistosité*



Moore et al 2001

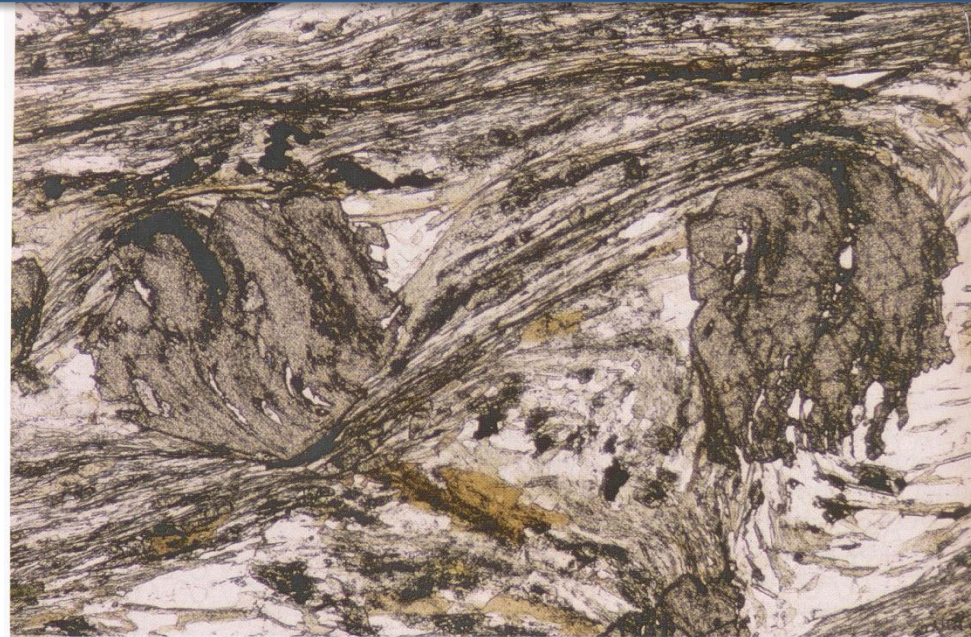
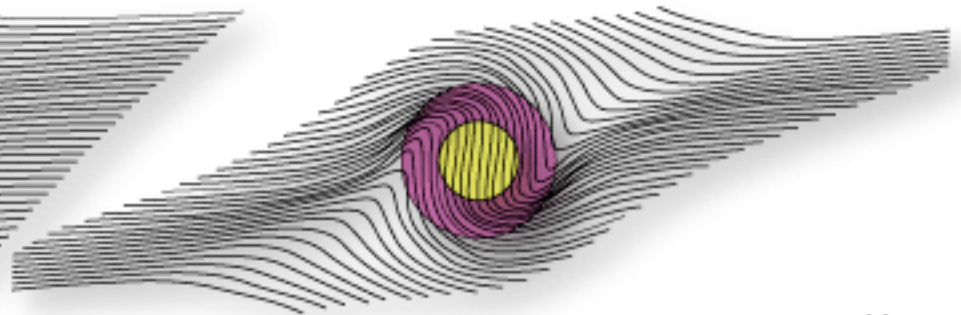
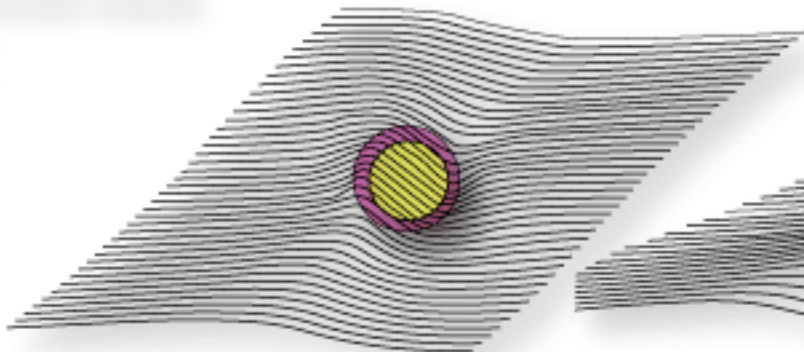


Fig. 5.74: Two garnet porphyroblasts with curved inclusion trails ('spirals') that are mainly continuous with the matrix foliation, suggesting growth during microfolding (crenulation) of the foliation; Chiwaukum Schist, Cascade Range, Washington, USA. Plane-polarized light; base of photo 4 mm.

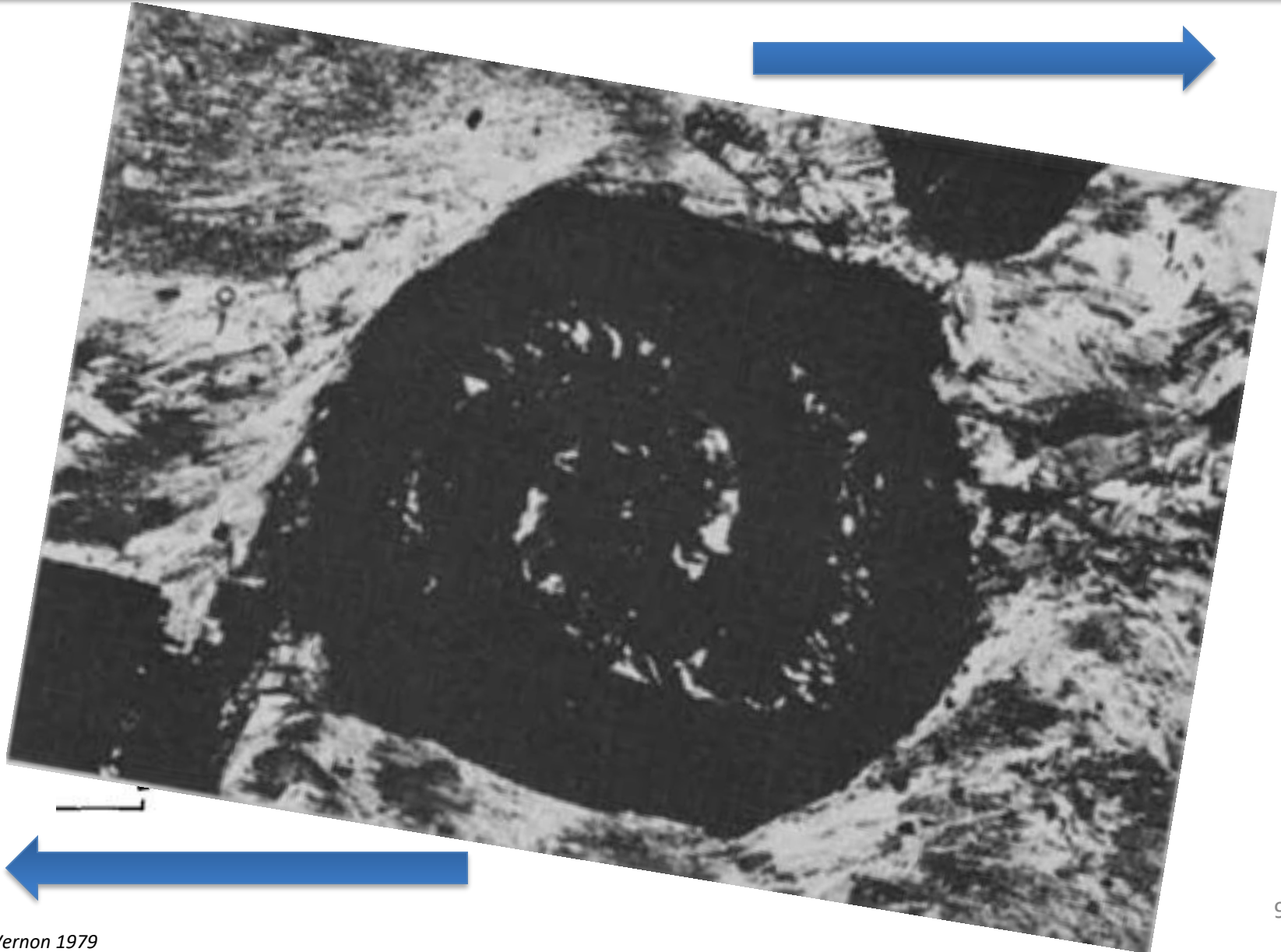
Vernon 2004

Rotation of syn-kinematic minerals



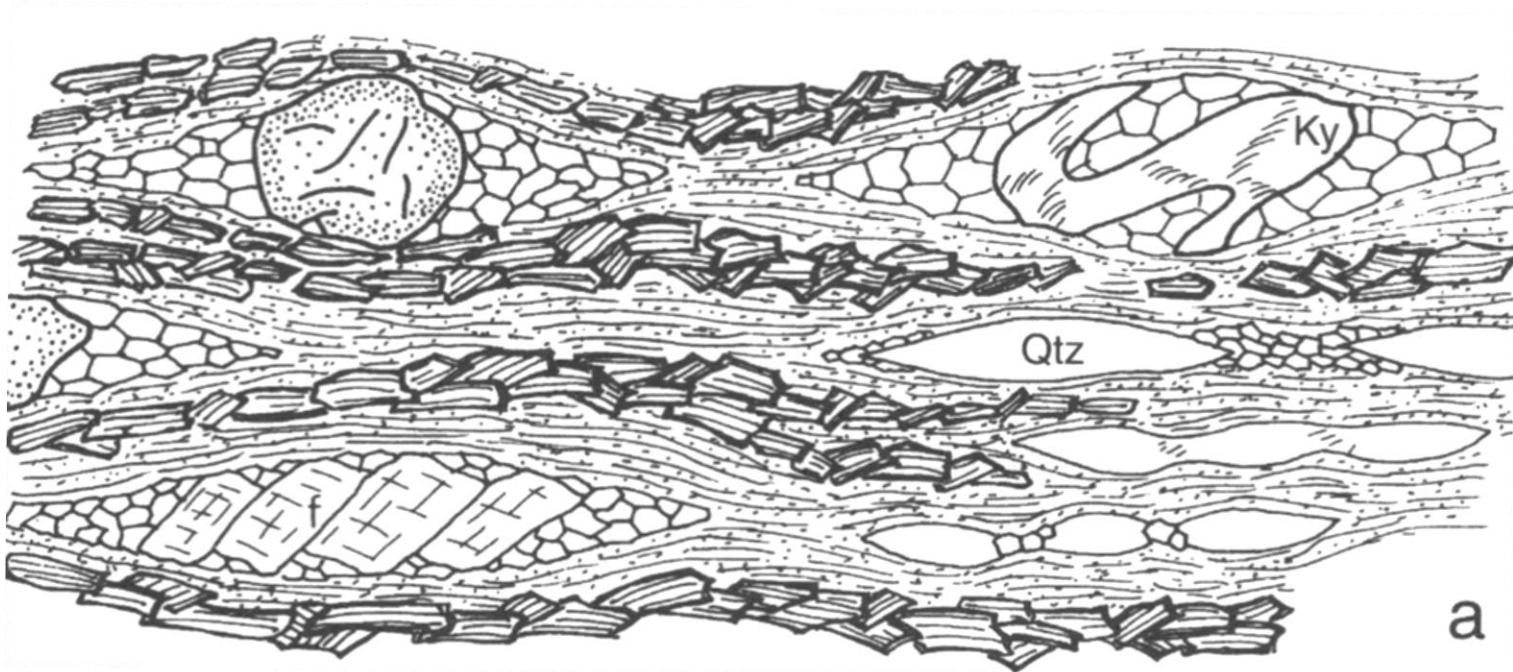
3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses syn-schistosité*



3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses anté-schistosité*



Minéraux antécinématiques/anté-tectoniques/anté-déformation:

- Déformation des cristaux (Ky, Feld-K), fracturation, extinction ondulante
- Boudinage des amandes de Qz
- Ombres de pression avec recristallisation syn-cinématique

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses anté-schistosité*



Fig. 5.47: Imbricated K-feldspar porphyroblast, Wyangala Batholith, central-western New South Wales, Australia. Crossed polars; base of photo 11 mm.

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

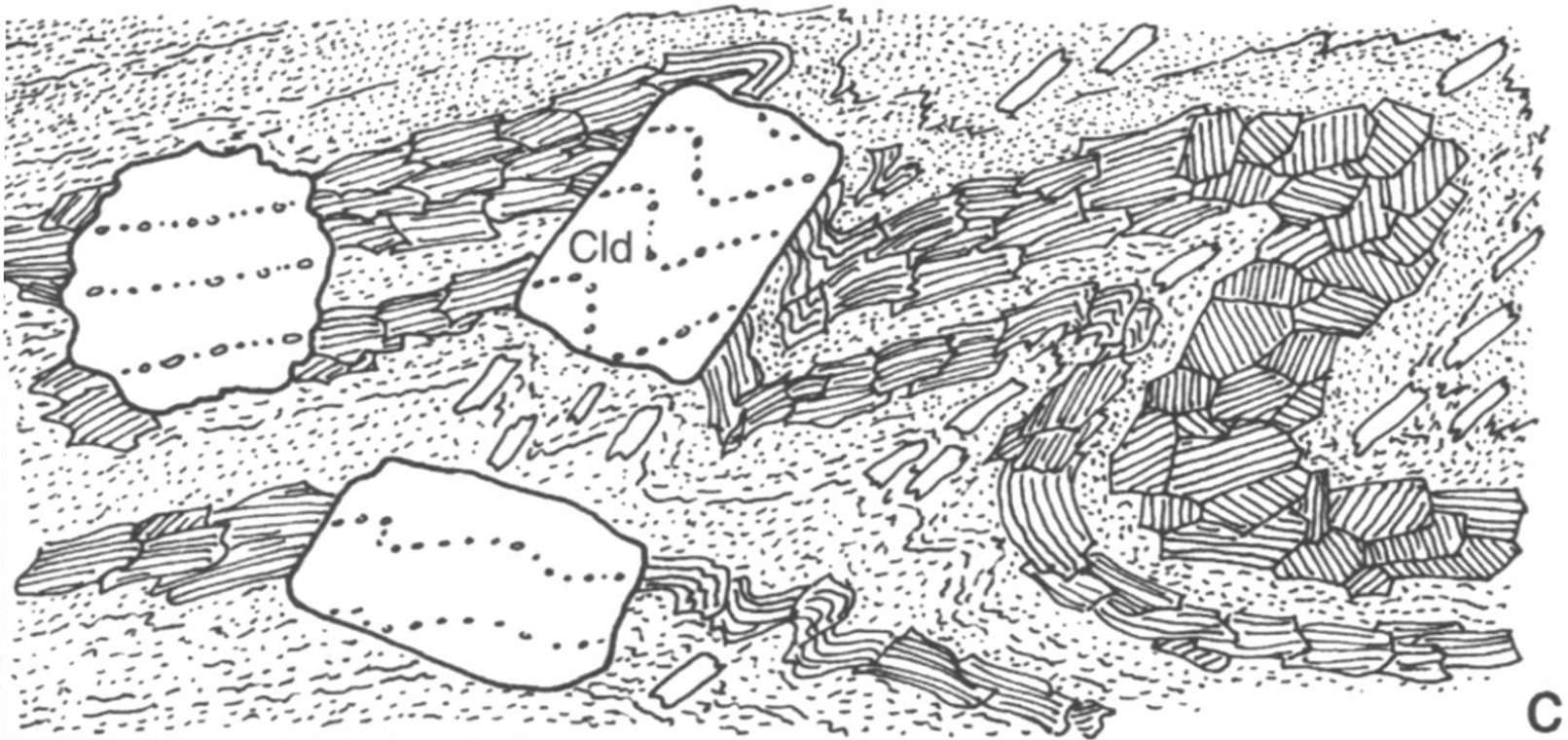
1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses anté-schistosité*



Fig. 5.45: Mantled porphyroblast (δ -type) of K-feldspar with folded 'wings' indicating a dextral sense of shear, in a fine-grained mylonite (ultramylonite) from the Wyangala Batholith, central-western New South Wales, Australia. Plane-polarized light; base of photo 4 mm.

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses post-schistosité*



D'après Nicollet (2010)

Minéraux post-cinématiques/post-tectoniques/post-déformation:

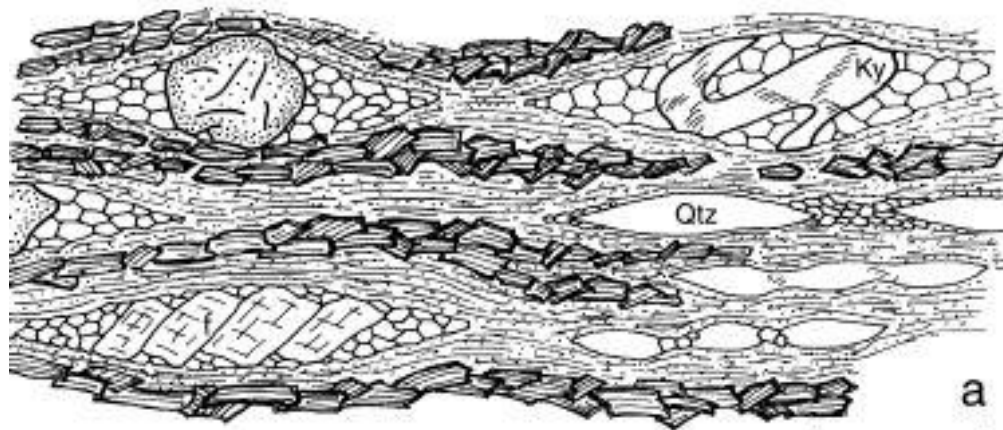
- Superposition des nouveaux cristaux sur les structures antérieures
- Inclusions minérales dans les porphyroblastes de Cld matérialisent une schistosité interne qui fossilise la schistosité précoce de la roche

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

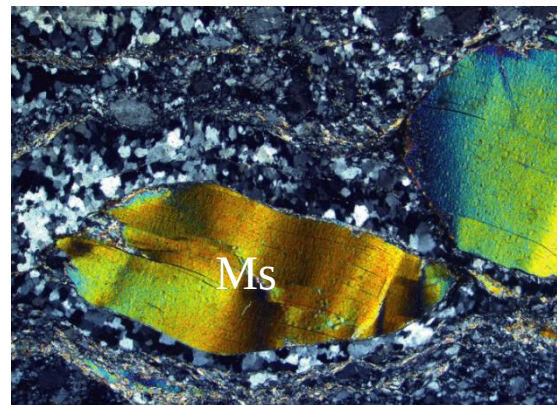
1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses post-schistosité*



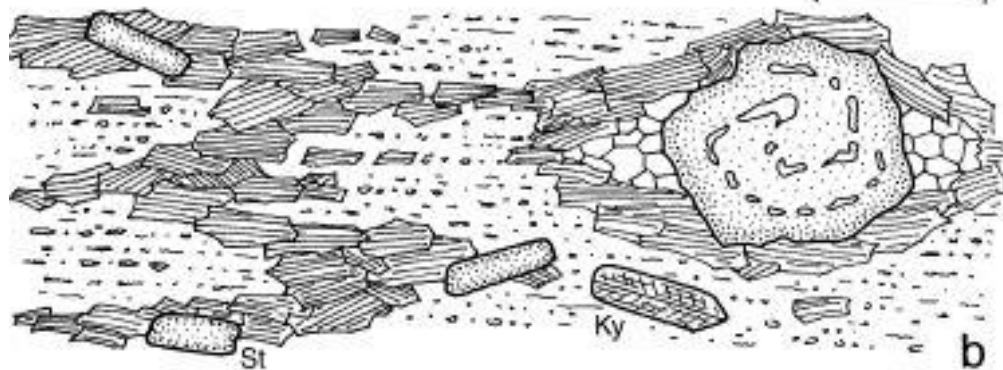
Fig. 5.53: Schist from the Picuris Range, New Mexico, USA, with (1) inferred bedding (shown by broad compositional variations: quartz-rich versus mica-rich) trending from the upper left towards the lower right of the photo, (2) an early, fine-grained, tectonic foliation (slaty cleavage) crenulated by later folds, but trending from the lower left to the upper right, and (3) a crenulation cleavage (more spaced, anastomosing, strongly compositionally differentiated foliation) trending steeply from upper left to lower right. Also shown are porphyroblasts of staurolite, biotite and garnet. Crossed polars; base of photo 1.8 cm.



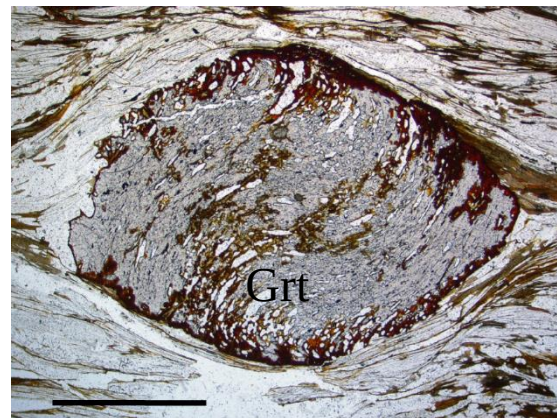
Anté-déformation
(porphyroblast, porphyroblast S_{x-1})



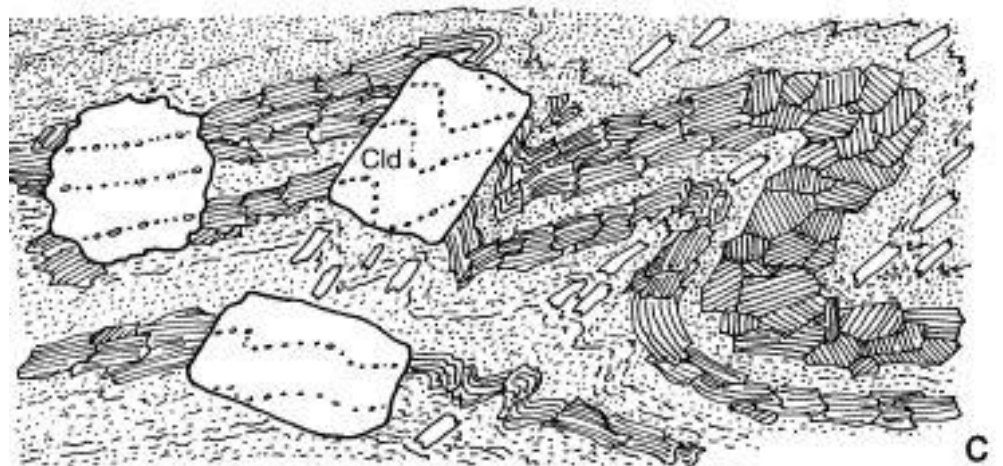
Nicollet (2015)



Syn-déformation
(porphyroblast S_x)



Nicollet (2015)



Post-déformation
(porphyroblast S_{x+1})



Barbey (2013)

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

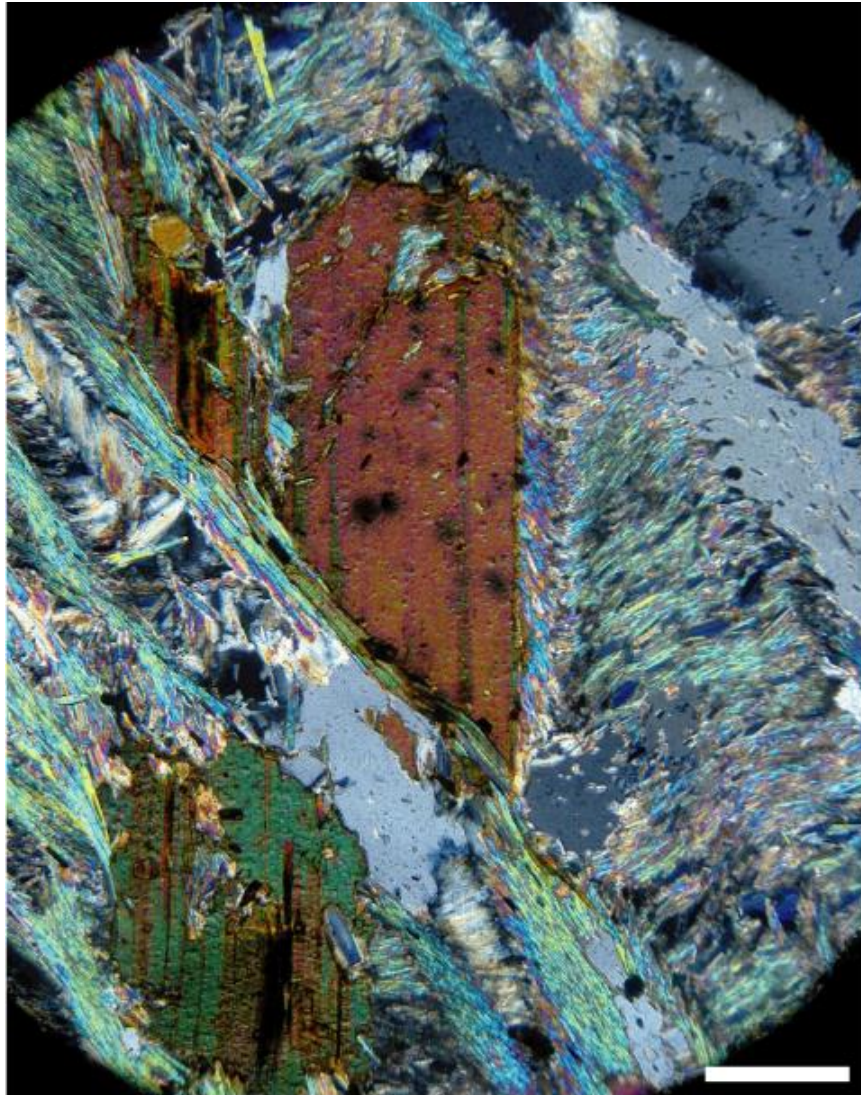
1. Relations avec la schistosité: *synthèse*

Passchier & Trouw, 2005

Pre-tectonic	Inter-tectonic	Syn-tectonic	Post-tectonic	
$P < D_1$	$D_n < P < D_{n+1}$	$D_n \supset P$	$D_n < P$	
a	c	e	g	Deformation does not cause folding of matrix foliation
b	d	f	h	Deformation causes folding of matrix foliation
– Presence of strain shadows common – Deflection of S_e around porphyroblasts – Distinction between pre-, inter- and syn-tectonic porphyroblasts is only possible if inclusions are present				– No strain shadows – No deflection of S_e around porphyroblasts

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Exemple*

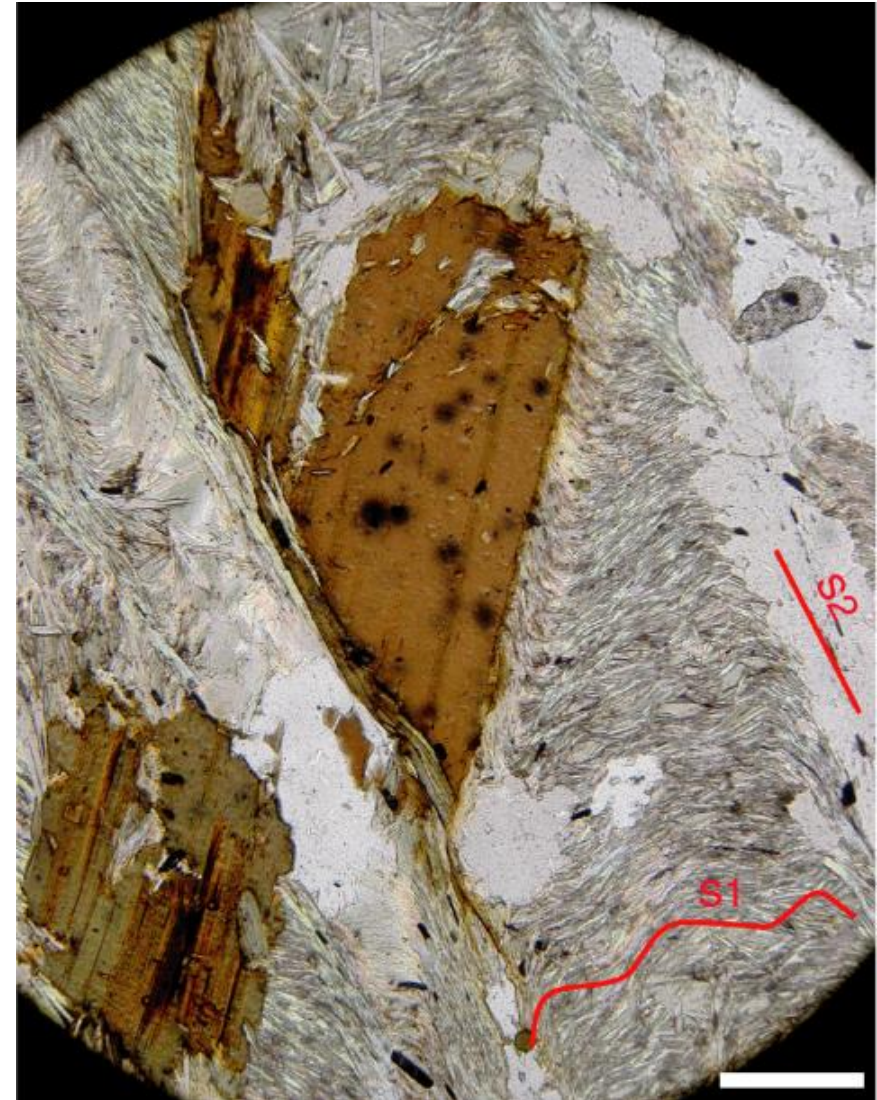
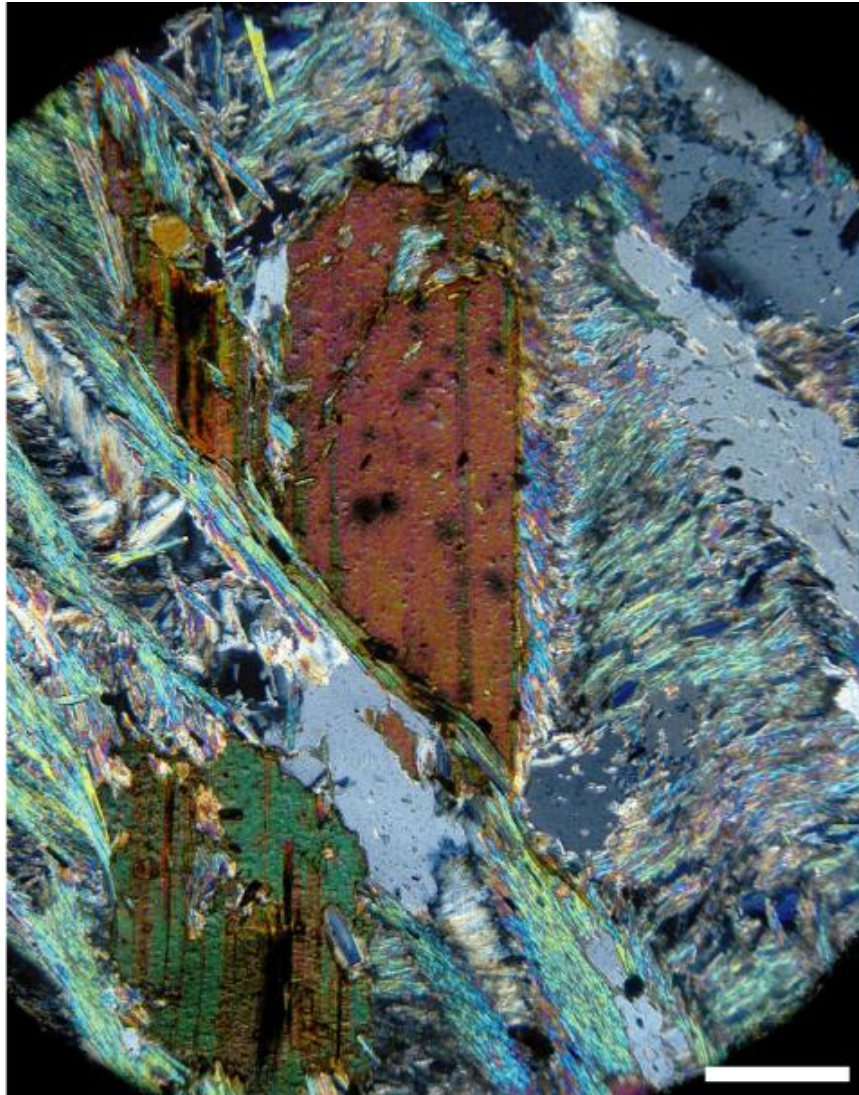


Nicollet (2015)

A vous de jouer !

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

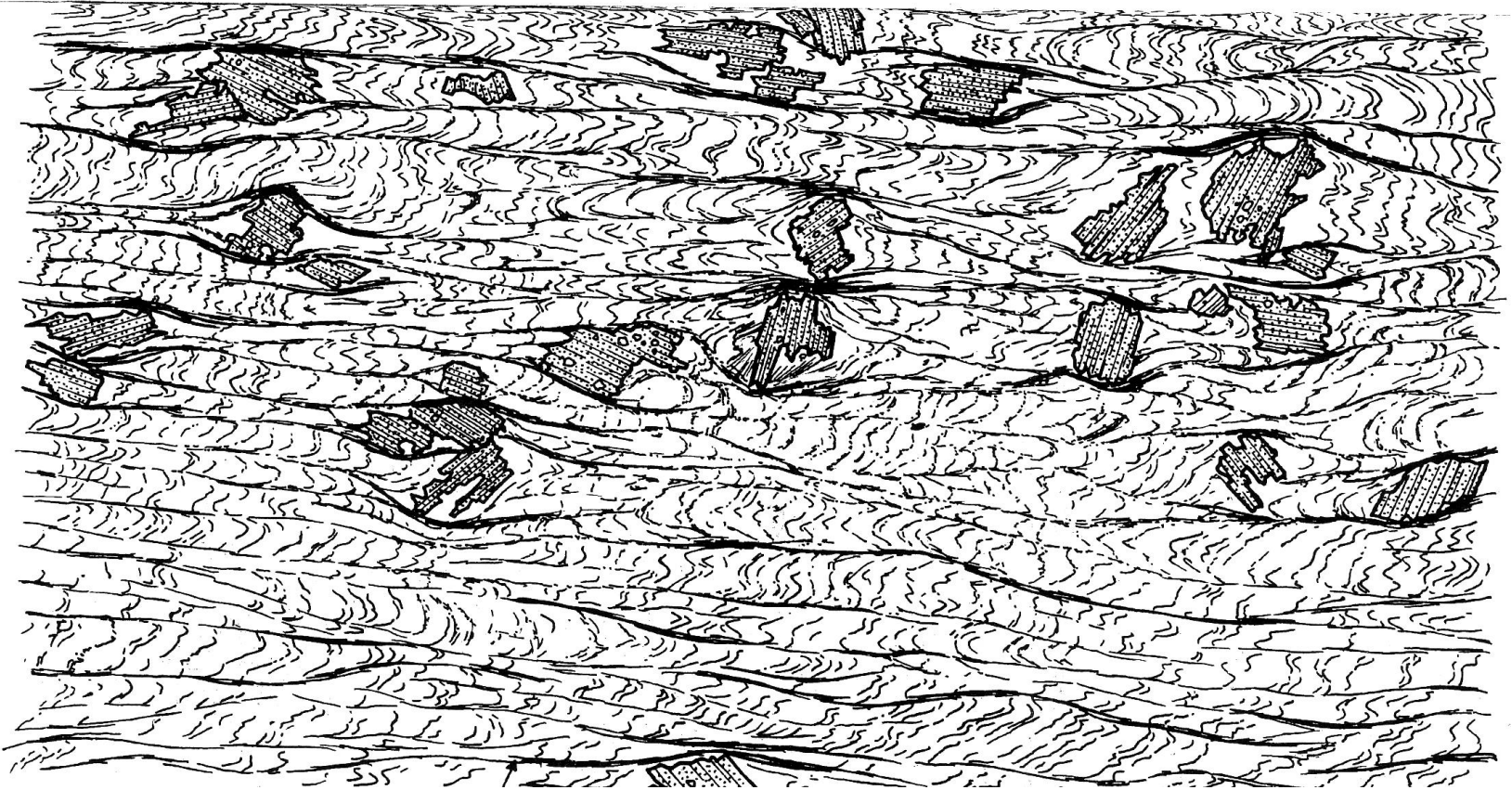
1. Relations avec la schistosité: *Exemple*



Biotite intertectonique (entre S1 et S2)

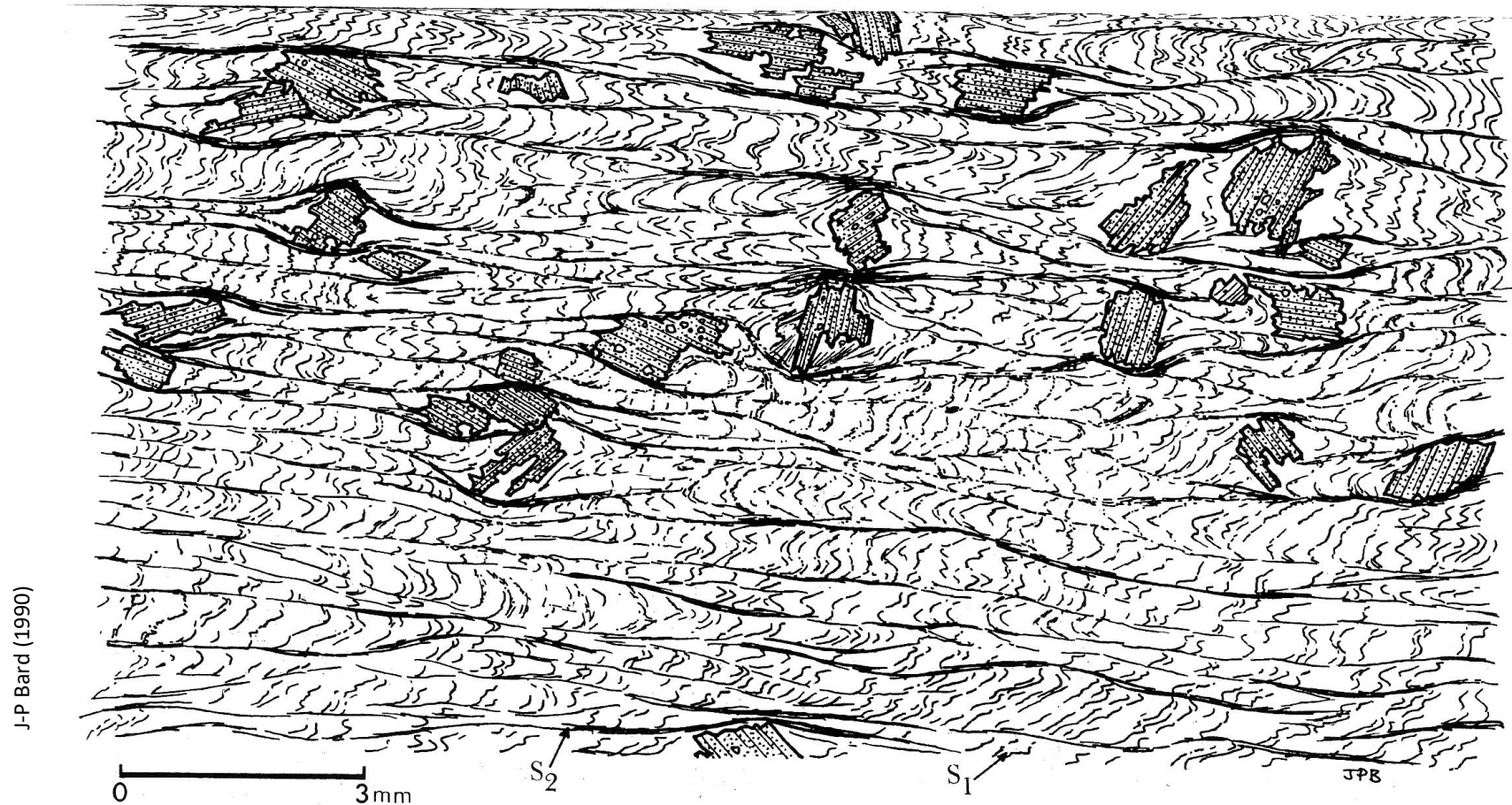
3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Exemple*



3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Exemple*



J-P Bard (1990)

Fig.2-36 : Schistosités superposées. Micaschiste à biotite-muscovite, région de Puebla de Sanabria (Galice), Espagne. Ce micaschiste montre clairement la superposition de deux phases de déformation synschisteuses. La seconde phase (fréquemment la plus évidente) se traduit par le développement d'une schistosité S_2 de crénulation (strain - slip cleavage) qui délimite des microlithons et moule une génération de poeciloblastes de biotite. Ces microlithons présentent des microplis qui affectent une schistosité primaire S_1 ; les phyllosilicates qui dessinent cette schistosité sont plissés et tordus. On notera que les poeciloblastes de biotite étaient statiques sur S_1 (dont post- S_1) ; ces micas sont donc post- S_1 et ante- S_2 . Dans le cas présent ils témoignent d'un métamorphisme de contact en bordure d'un massif granitique ante- S_2 à bords diffus (plutono-métamorphisme).

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

1. Relations avec la schistosité: *Paragenèses post-schistosité*



Schistes bleus, glaucophanite (île de Groix, Morbihan)

Pseudomorphose de lawsonite

décompression:

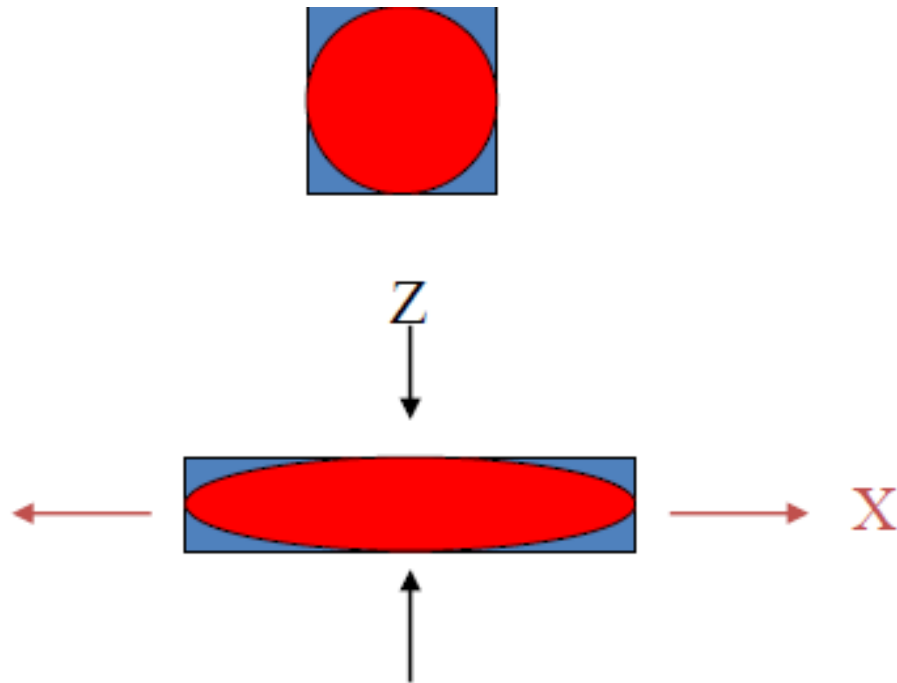
lawsonite → *phengite (ms) + épidote ± chlorite*

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

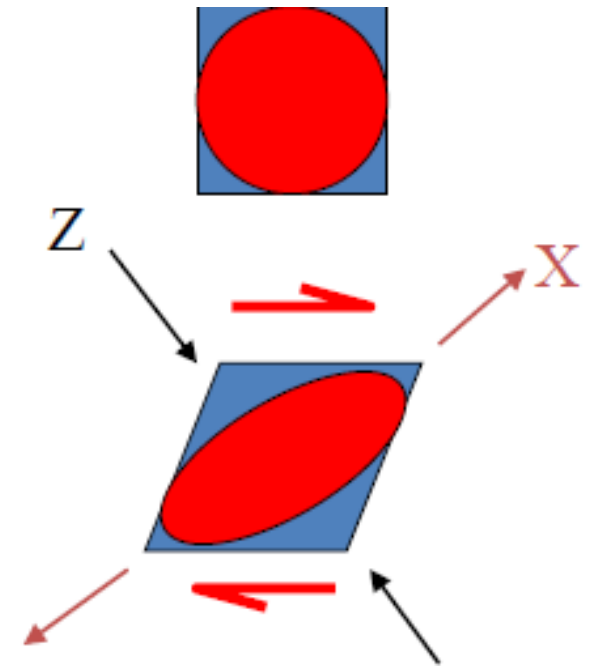
2. Critères cinématiques du cisaillement

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

2. Critères de cisaillement: *Déformation coaxiale* / *non-coaxiale*



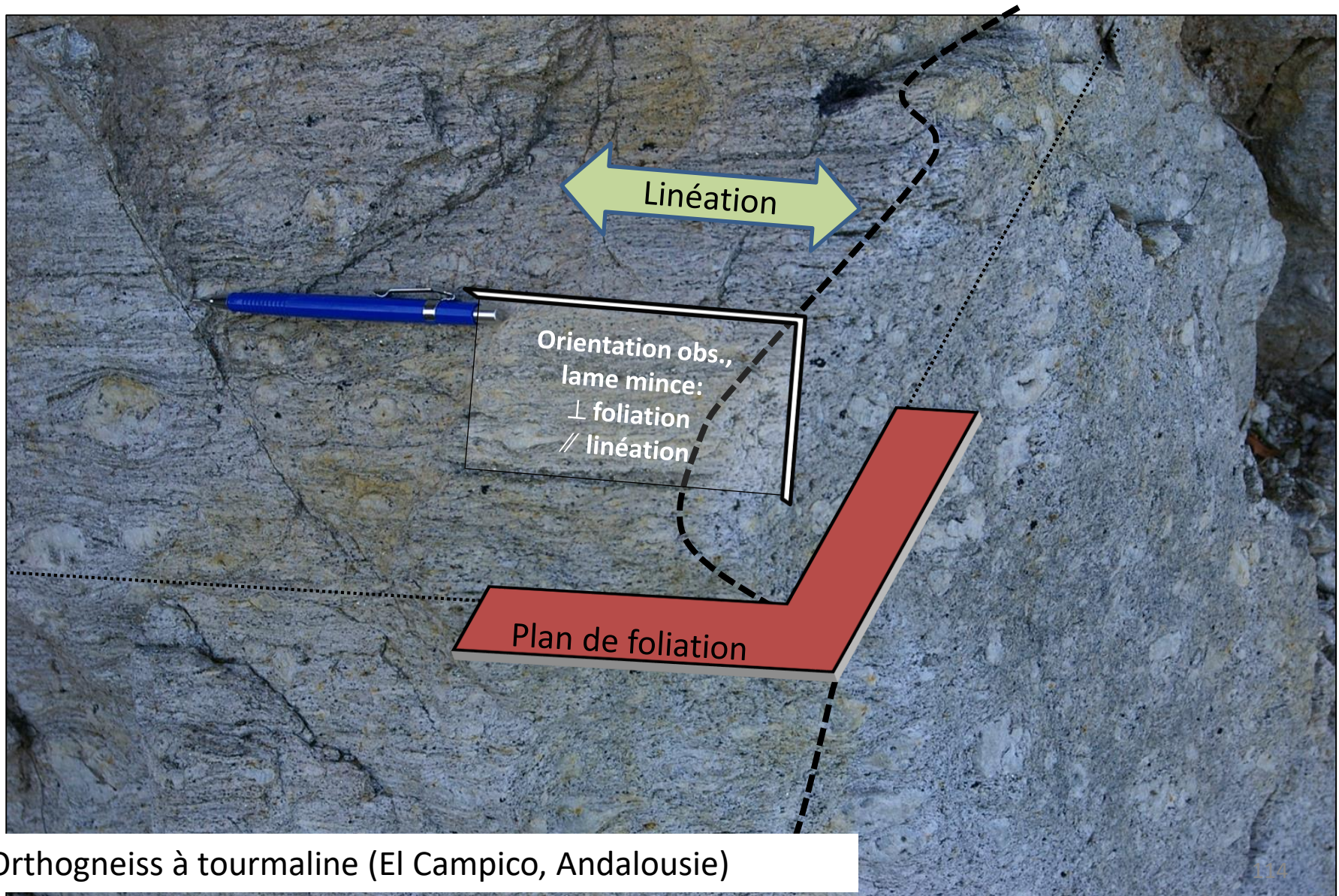
Déformation coaxiale
ou cisaillement pur



Déformation non coaxiale ou
cisaillement simple

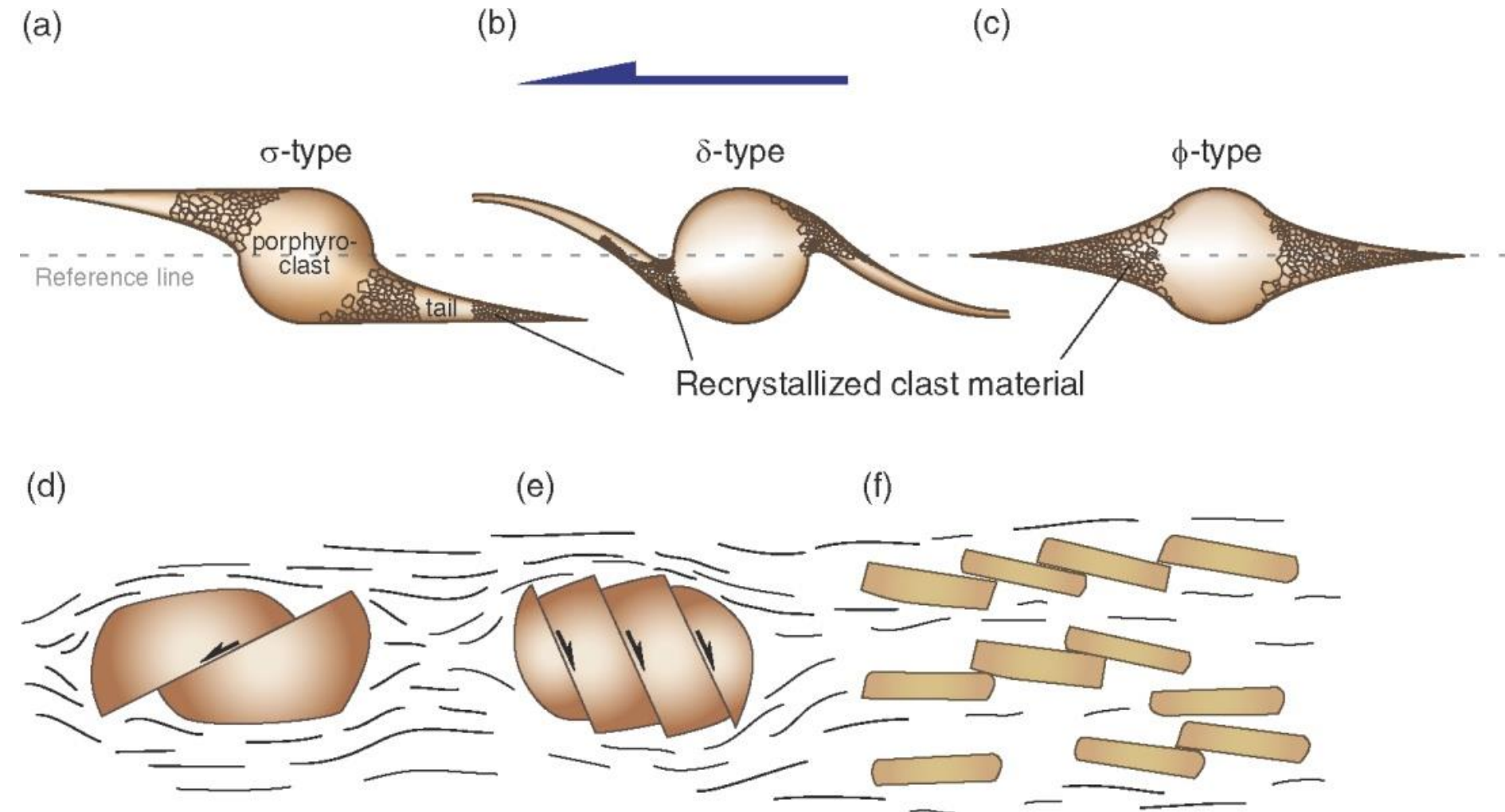
3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

2. Critères de cisaillement: *Orientation du plan d'observation*



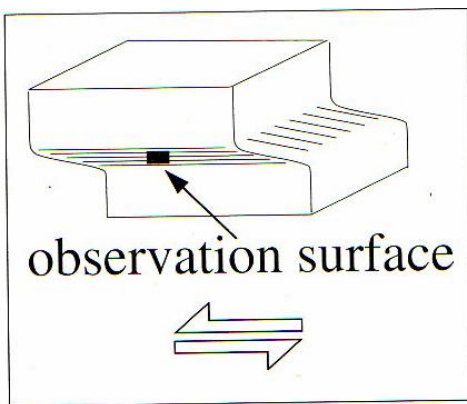
3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

2. Critères de cisaillement

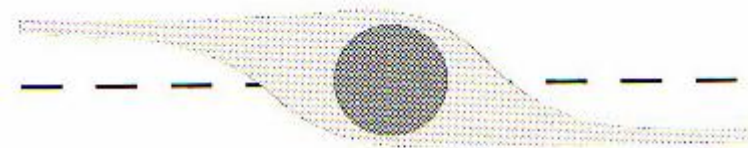


3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

2. Critères de cisaillement: *Présence d'objets rigides*

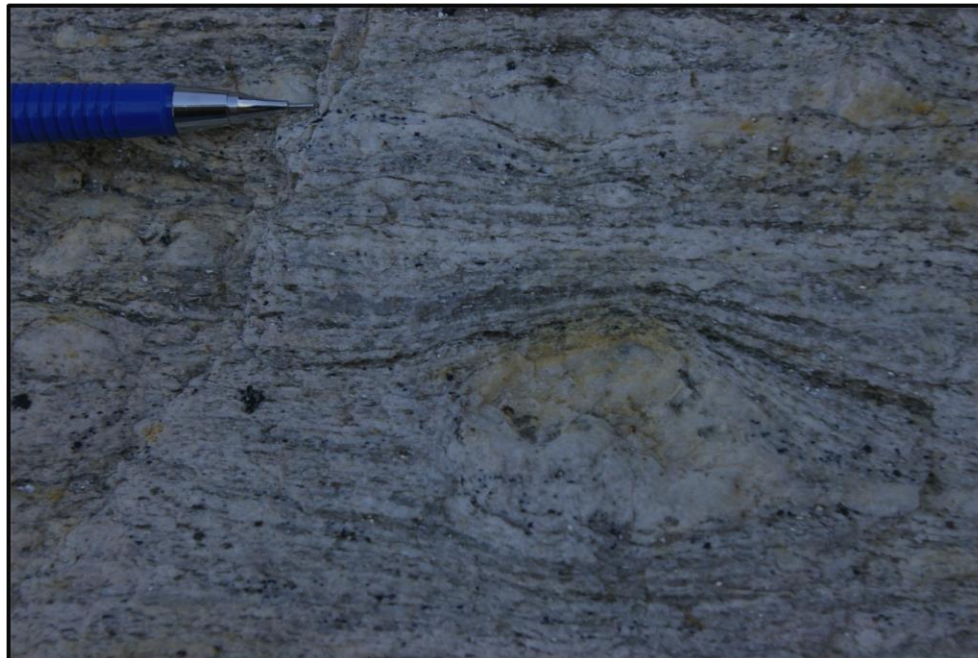


Type σ



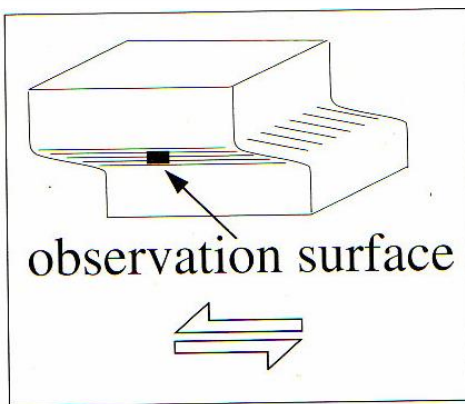
⇒ Zone de cristallisation (queue)

⇒ Rotation de la zone de cristallisation dans le sens du cisaillement

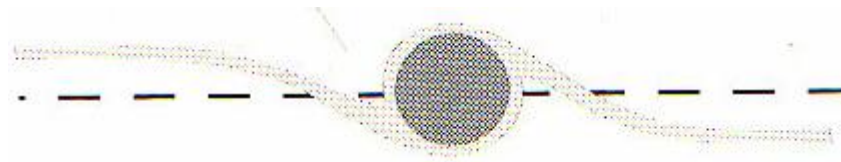


3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

2. Critères de cisaillement: *Présence d'objets rigides*



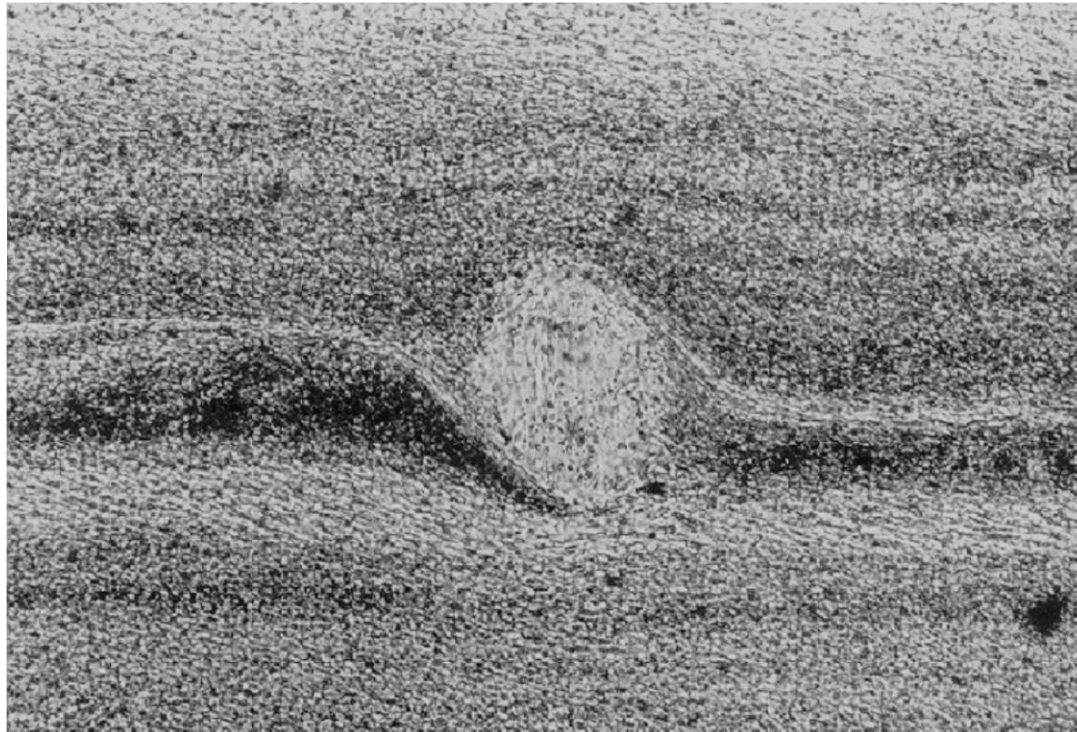
Type δ



⇒ Zone de cristallisation peu importante

⇒ Rotation rigide du claste

Feldspath K



Ultramylonite à quartz-feldspaths-micas

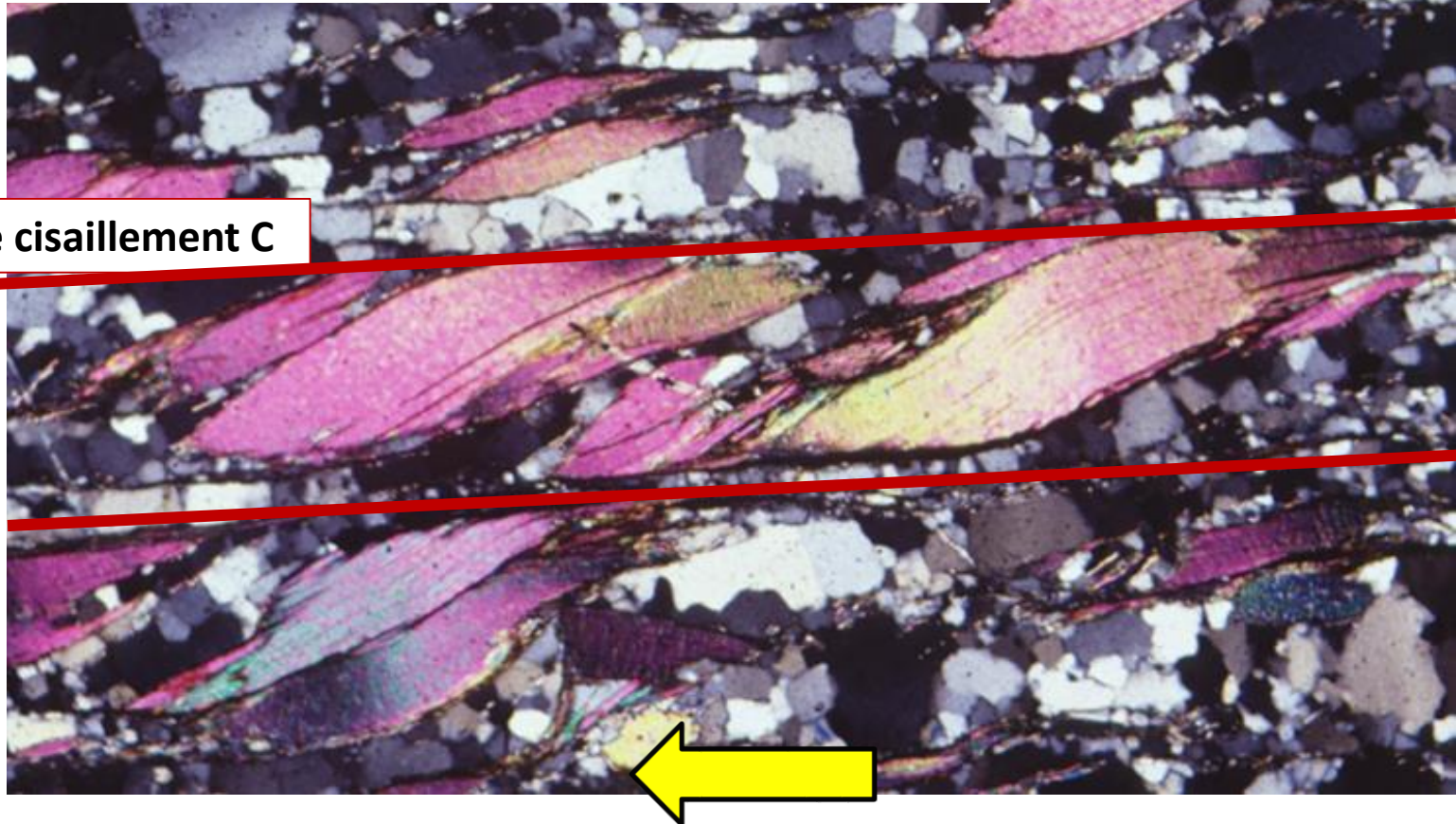
Passchier and Trouw (2005)

3. CHRONOLOGIE RELATIVE DES PARAGENÈSES

2. Critères de cisaillement: *Mica fish*



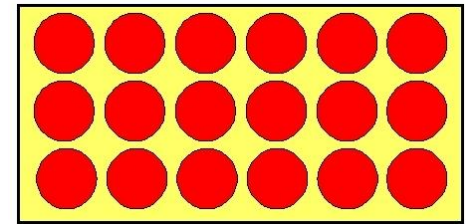
Quand les porphyroclastes ont une symétrie allongée.



Bande de cisaillement C

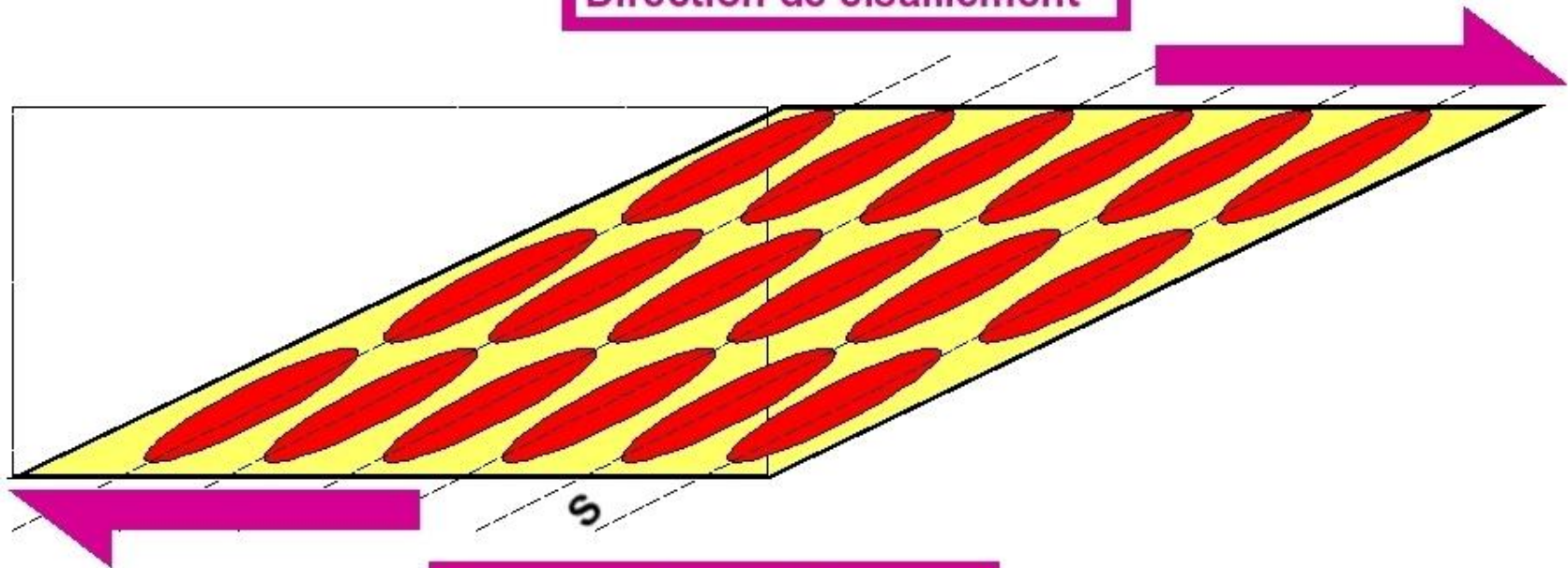
3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*

Déformation par cisaillement simple
Déformation continue importante



Etat initial

Direction de cisaillement



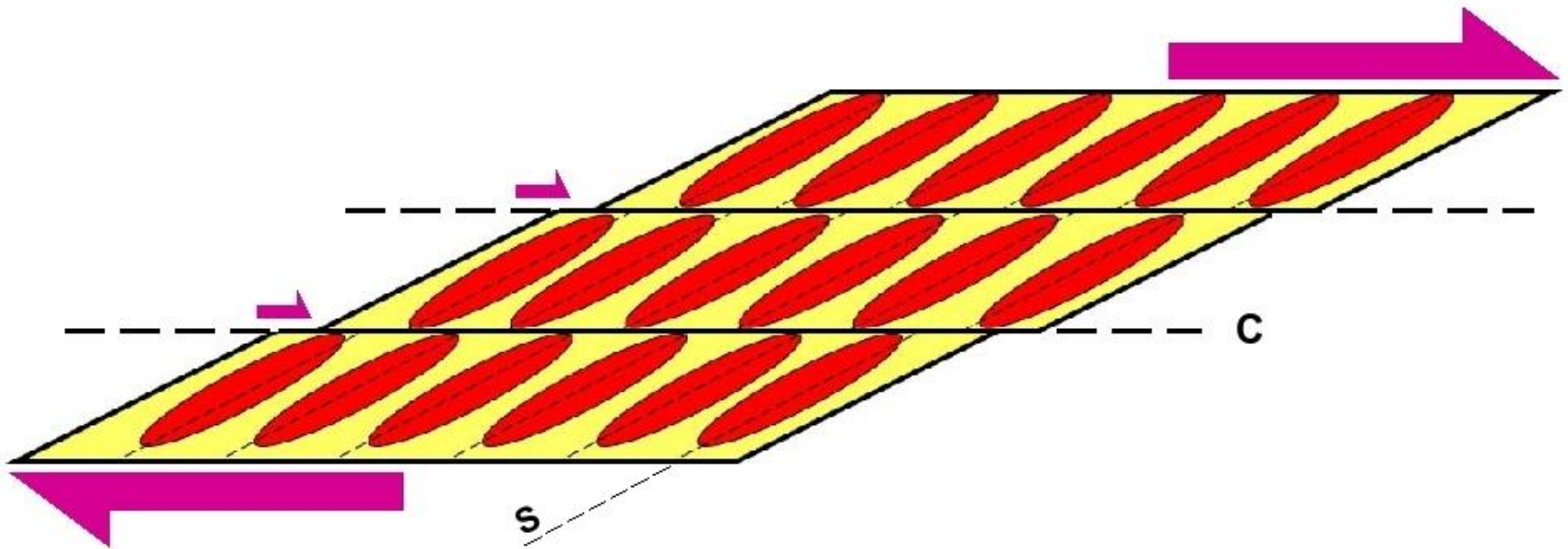
Direction de cisaillement

S = plan d'aplatissement = schistosité

Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*

Déformation par cisaillement simple
Déformation importante, partiellement discontinue



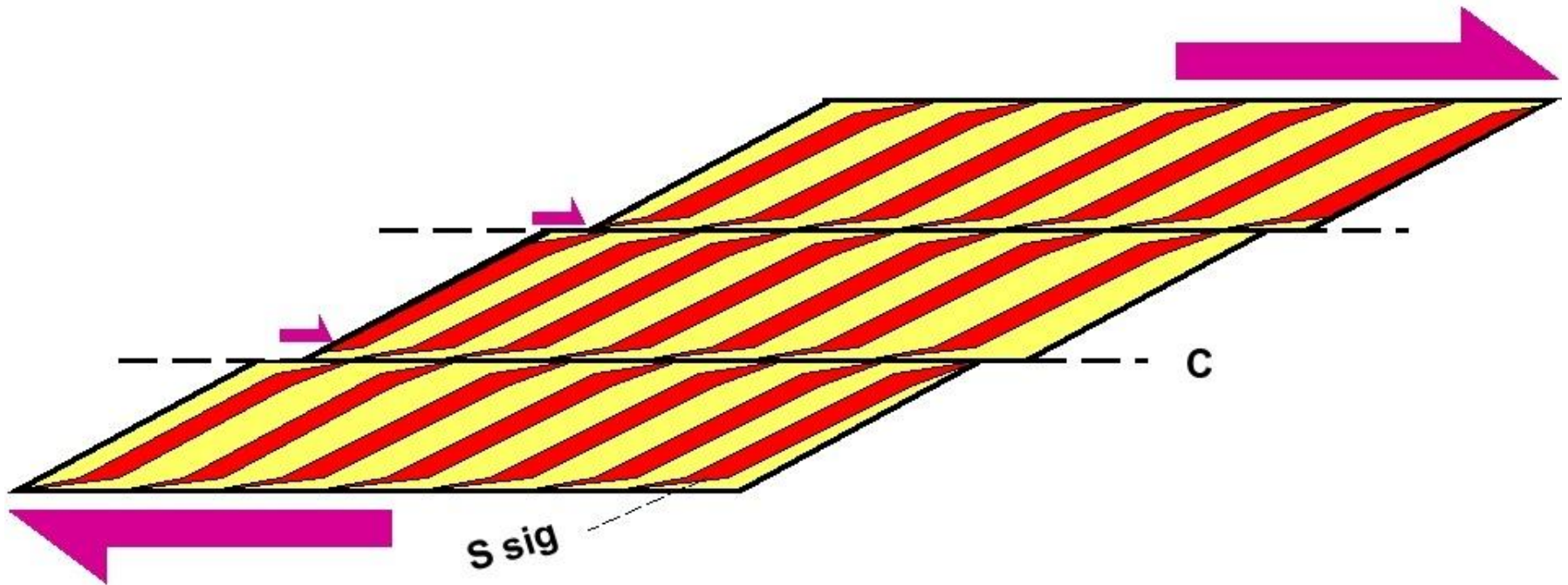
S = plan d'aplatissement = schistosité

C = plan de cisaillement

Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*

Déformation par « cisaillement pur »
Déformation importante, partiellement discontinue :
plans C et schistosité sigmoïde

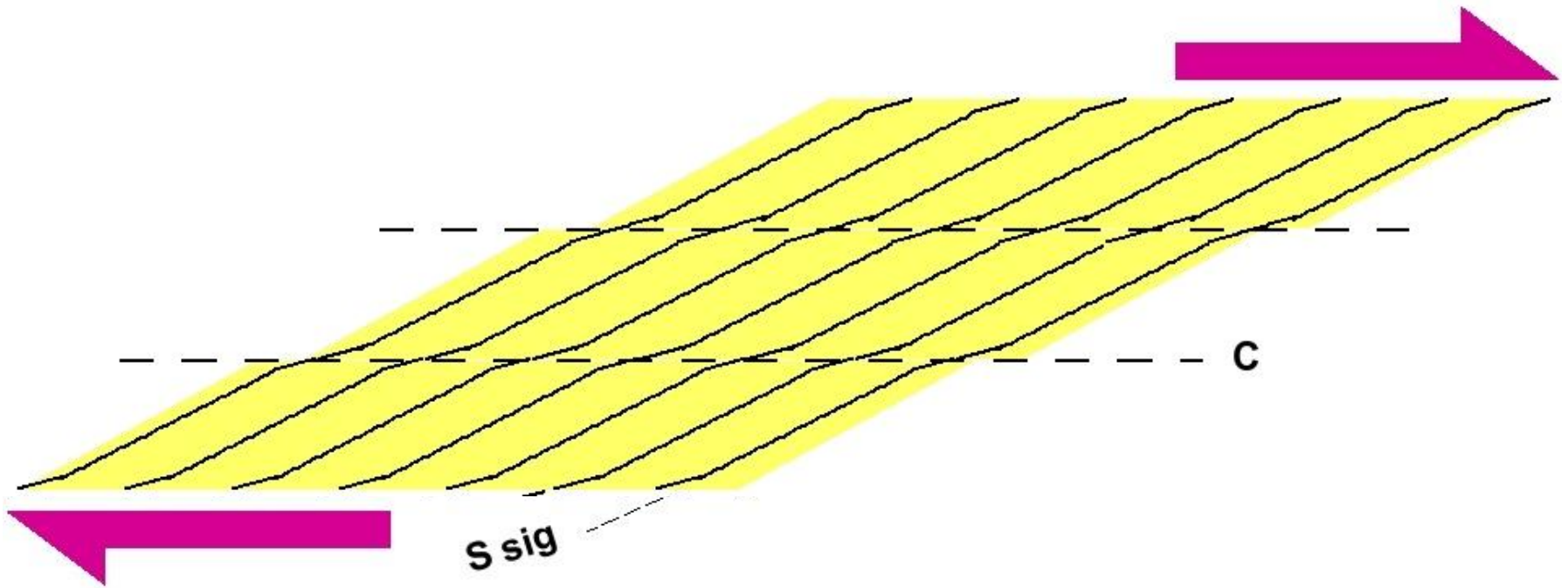


S sig = plan d'aplatissement cisailé = schistosité sigmoïde
C = plan de cisaillement

Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*

Déformation par « cisaillement pur »
Déformation importante, partiellement discontinue :
plans C et schistosité sigmoïde



S sig = plan d'aplatissement cisailé = schistosité sigmoïde
C = plan de cisaillement

Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*



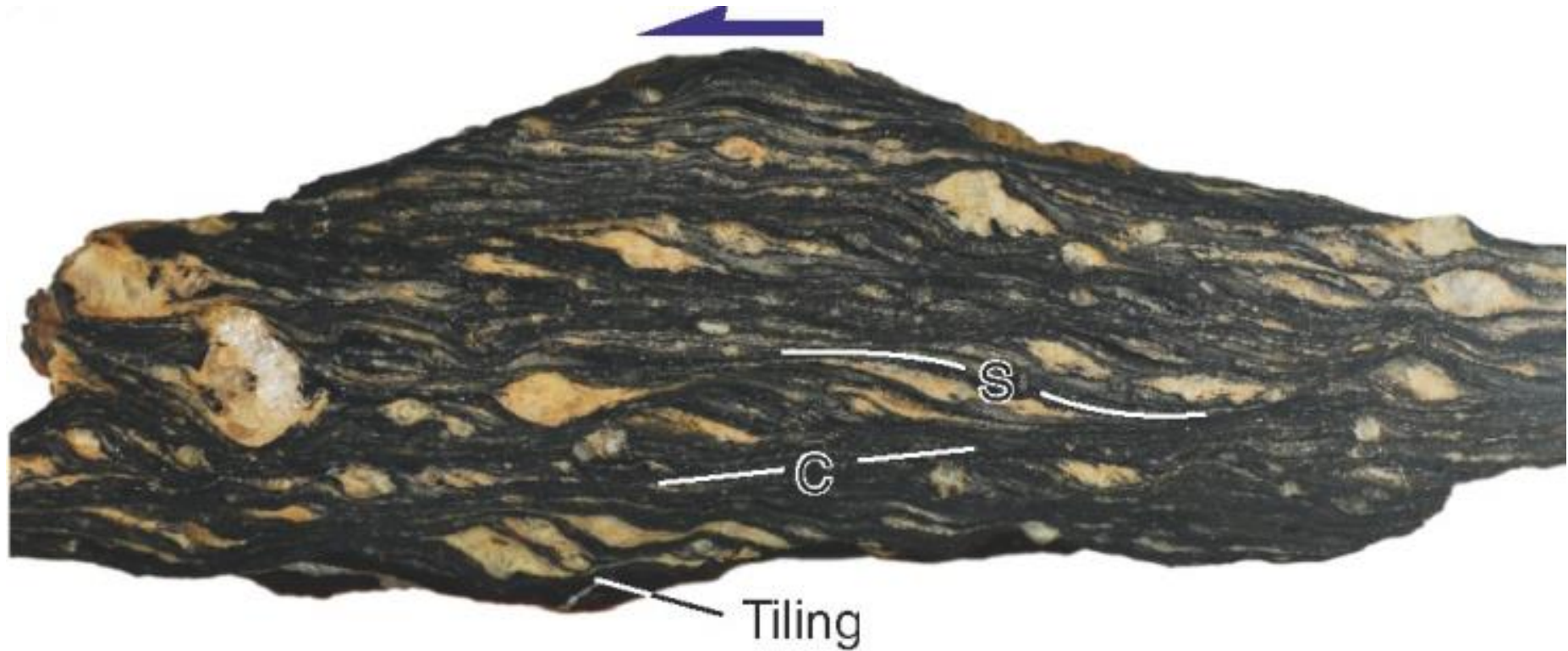
Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*



Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*



« imbrication », « tuilage » (voir diapo 115f)

Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)

3.2 Critères de cisaillement: *fabrique C/S*



Développement d'une fabrique C/S en cisaillement simple (*simple shear* en anglais)