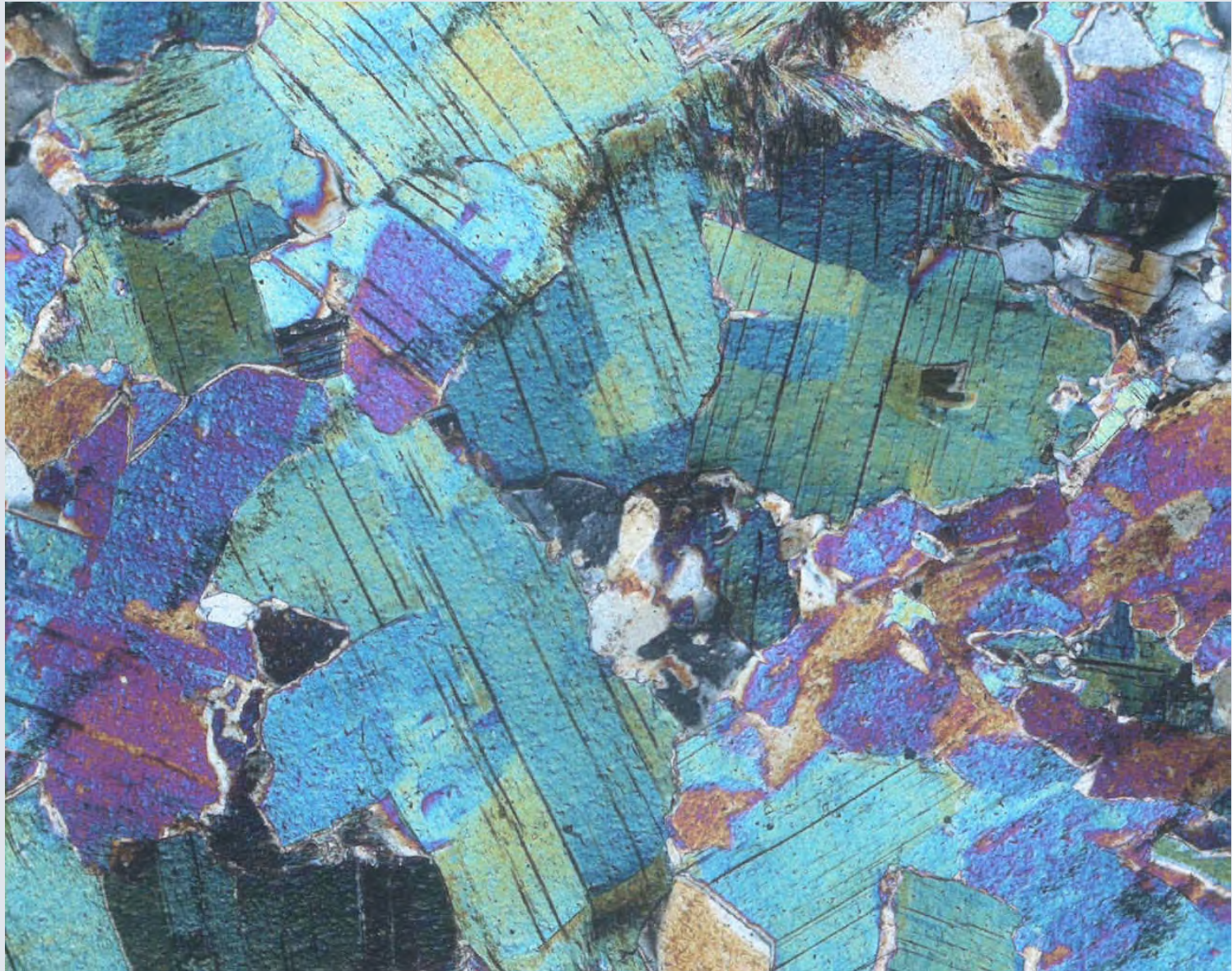


# Les minéraux des roches





## • Navigation

- Le passage d'une fiche à l'autre vers l'avant ou vers l'arrière se fait par la souris ou les touches avant – arrière du clavier ou par les signes  
- Le signe  ramène à l'index général
- Le signe  ramène à l'index de chacune des parties
- Le signe  envoie à une fiche particulière
- Le signe  ramène à la dernière diapositive affichée





Le caractère plus ou moins rare d'un minéral est indiqué sur les fiches :

TC = très commun

C = commun

AC = assez commun

AR = assez rare

R = rare

Cela dépend bien sûr des roches ou des problèmes étudiés : la wollastonite est assez commune dans les marbres métamorphiques, rarissime dans les granites. De même, certains faciès peuvent être beaucoup plus rares que le faciès commun du même minéral : les quartz automorphes sont assez peu fréquents alors que le quartz est un minéral très commun.

Les échantillons proviennent de la collection d'enseignement de pétrographie de l'Ecole des Mines de Paris (lames minces souvent anciennes, souvent sans provenance), de la collection personnelle de l'auteur, de la collection Fontailles – Guitard de l'université de Paris VI ; quelques échantillons ont été fournis par le Musée de l'Ecole des Mines, Mmes I. Cojan, C. Dérré, M. L. Pascal, MM. M. Besson, C. Chopin, D. Mercier, J. M. Le Cléach', J.-M. Schmitt, M. Thiry, J. Touret.

# Sommaire

## Introduction

### 1- Observations au microscope

### 2- Quartz, feldspaths, feldspathoïdes

### 3- Les minéraux ferromagnésiens majeurs

3a- Micas, chlorites, amphiboles

3b- Pyroxènes, olivine, serpentine

### 4- Les minéraux alumineux

Minéraux des roches peralumineuses, roches magmatiques et roches métamorphiques dérivant de roches sédimentaires riches en alumine (argiles...)

### 5- Les minéraux calciques et magnésiens

Minéraux des marbres métamorphiques plus ou moins impurs, des gneiss-à-silicates-calciques ; des skarns et de certaines roches magmatiques riches en chaux

### 6- Les minéraux accessoires

Minéraux banaux de roches saturés en silice, peralumineuses ou non

Minéraux accessoires des roches alcalines

### 8- Les minéraux des roches sédimentaires

### 9- Les minéraux d'intérêt métallogénique







# *Introduction*

- Classification des minéraux
- Facteurs de l'apparition des minéraux

Facteurs physiques

Facteurs liés à la phase fluide :

Fugacités  $f_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $f_{\text{CO}_2}$ ,  $f_{\text{S}_2}$  et  $f_{\text{O}_2}$

Composition chimique de la roche

Saturation en silice

Saturation en alumine



Classiquement, les minéraux sont répartis en 8 classes (9 avec les minéraux organiques). La plupart des minéraux constitutifs des roches sont des silicates.

- 1- Éléments natifs : graphite\*
- 2- Sulfures et sulfosels : pyrite\*, pyrrhotite\*
- 3- Halogénures : halite, fluorite
- 4- Oxydes : spinelles, dont magnétite\* et chromite\*, hématite\*, ilménite\*, rutil, périclase, corindon, pérovskite, cassitérite.  
et hydroxydes : *goethite, limonites, gibbsite, diaspore, boehmite*, brucite
- 5- Carbonates : calcite, dolomite
- 6- Sulfates : gypse, anhydrite, barytine
- 7- Phosphates : apatite, monazite
- 8- Silicates

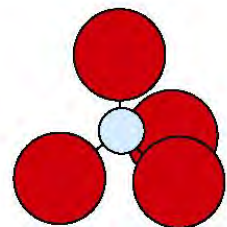
- » \* minéraux opaques qui ne se déterminent pas au microscope à transmission
- » *En italique gras : les minéraux non traités ici*

Les **silicates** constituent plus de 90% de la croûte terrestre.



Ils sont classés en fonction de la disposition des tétraèdres  $(\text{SiO}_4)^{4-}$

- Tétraèdres isolés (**nésosilicates**) : olivine, (monticellite, humites), zircon, sphène, andalousite, disthène, sillimanite, grenat, staurotide, chloritoïde, saphirine, topaze
- Deux tétraèdres reliés par la pointe (**sorosilicates**) : épidotes (pistachite, clinozoïsite, zoïsite, allanite, piémontite, lawsonite, pumpellyite), vésuvianite, axinite, mélilite, lāvenite
- Tétraèdres en anneaux (**cyclosilicates**) : cordiélite, tourmaline, béryl, eudyalite
- Tétraèdres disposés en chaînes (**inosilicates**) : amphiboles, pyroxènes, wollastonite, aenigmatite, astrophyllite
- Tétraèdres disposés en feuillets (**phyllosilicates**) : micas, chlorites, serpentine, talc, stilpnomélane, argiles, prehnite, apophyllite
- Tétraèdres formant un édifice à trois dimensions (**tectosilicates**) : quartz, feldspaths, feldspathoïdes, analcime, scapolites, *zéolites*



le motif de base  
tétraèdre  $(\text{SiO}_4)^{4-}$

### orthosilicates

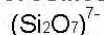


tétraèdres isolés  
les **néosilicates**

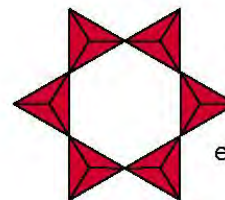
ex: olivine, grenat, andalousite..



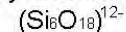
tétraèdres par paires  
les **sorosilicates**



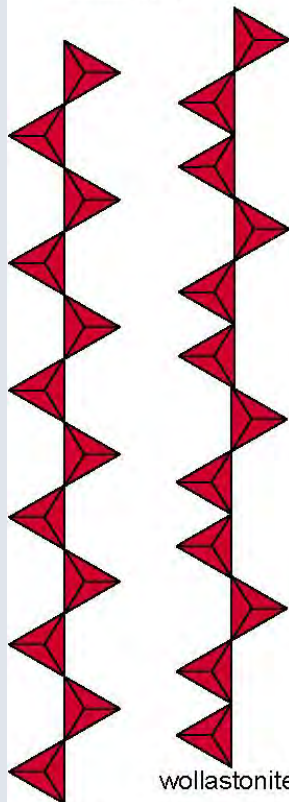
ex : épidotes



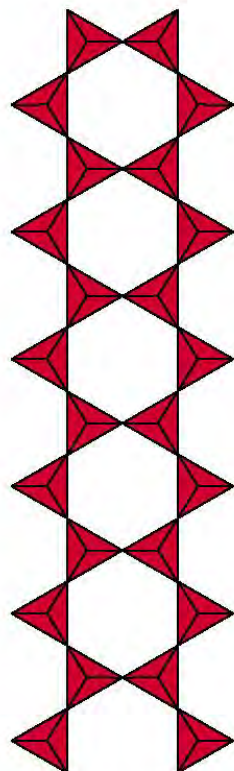
tétraèdres en anneau  
les **cyclosilicates**



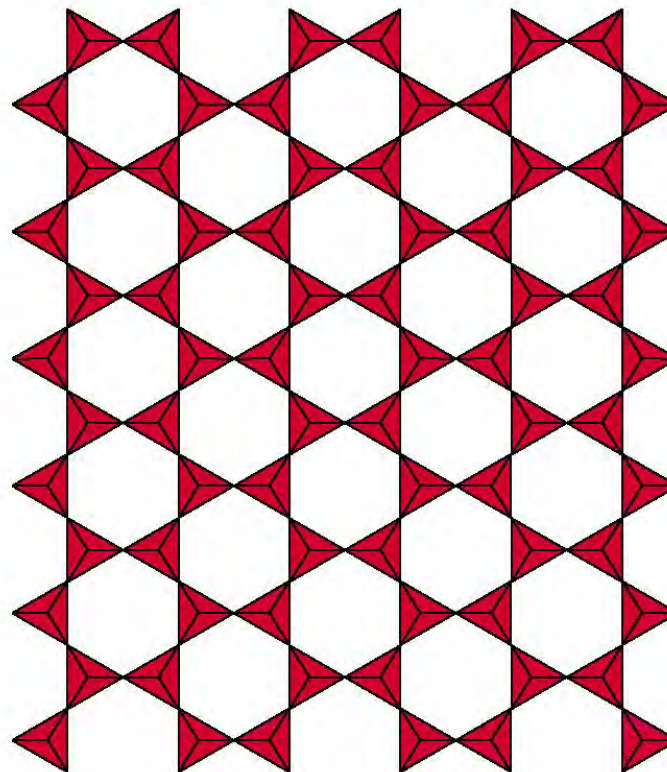
ex : tourmaline, cordièrite..



chaîne simple:  $(\text{SiO}_3)^{2-}$   
ex : pyroxènes



chaîne double :  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$   
ex : amphiboles



tétraèdres en feuillets : les **phyllosilicates**  
 $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$

ex : micas, chlorites, argiles..

tétraèdres en édifices  
tridimensionnels  
les **tectosilicates**

ex : quartz, feldspaths,  
feldspathoïdes  
scapolites, zéolites..

tétraèdres en chaînes : les **inosilicates**

# Structure des silicates





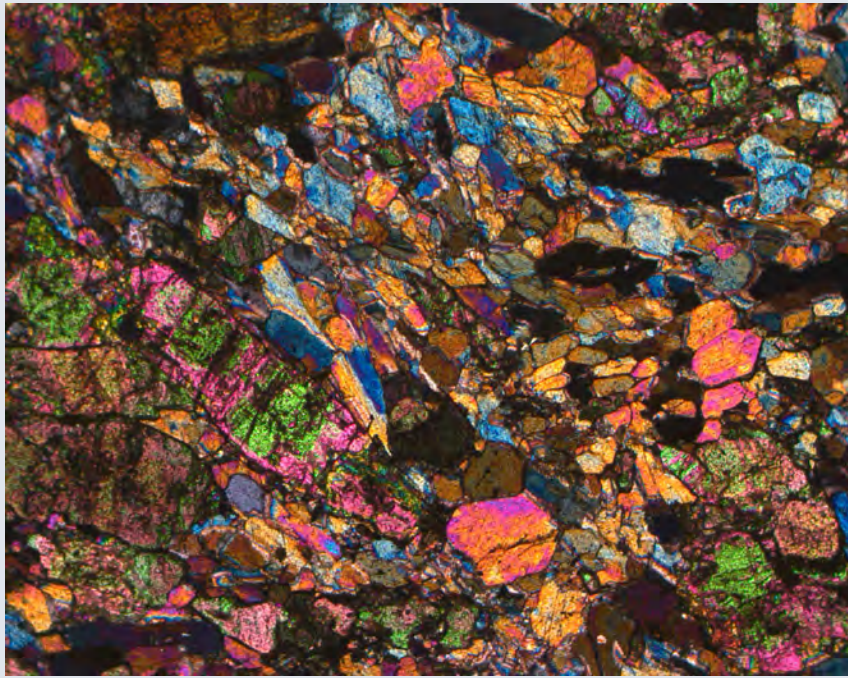
L'apparition des minéraux dans une roche dépend de facteurs physiques et de facteurs chimiques.

Les **facteurs physiques** sont des conditions imposées de l'extérieurs lors de la formation de la roche : température, pression (lithostatique et pressions orientées) et pression de fluide – ces deux derniers facteurs étant plus ou moins largement indépendants. La notion de **faciès minéralogique** intègre ces différents facteurs physiques. Cette notion a été introduite d'abord pour les roches métamorphiques (Eskola, 1920, 1927) mais peut être étendue sans difficultés aux roches magmatiques.

un schiste vert (trémolite, chlorite)

## Les facteurs d'apparition des minéraux

### 1- Facteurs physiques



un schiste bleu (glaucofane, épidote)

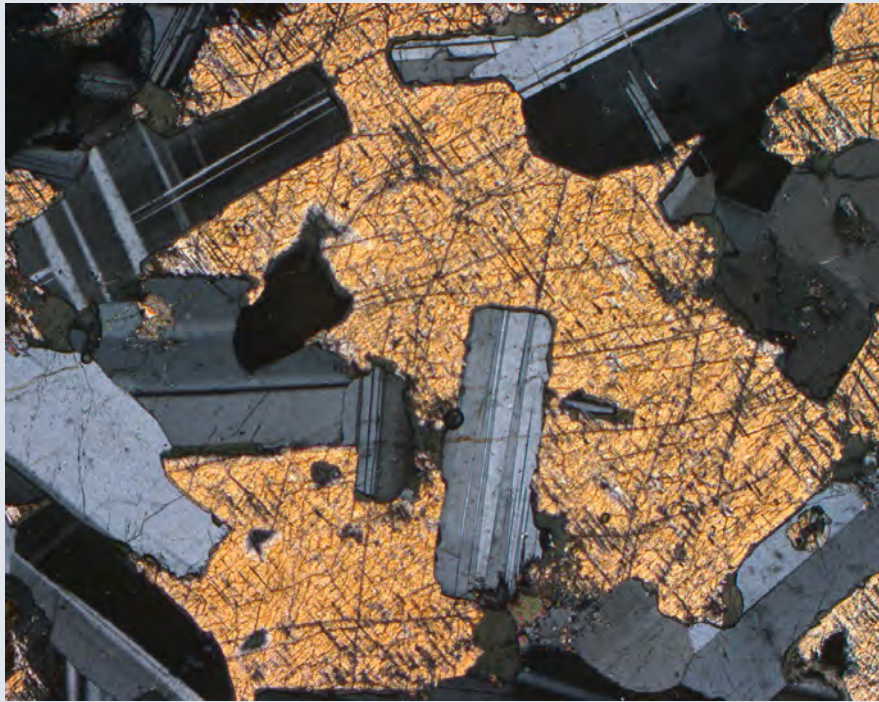
## Les facteurs d'apparition des minéraux

### 2- Facteurs chimiques

Les **facteurs chimiques** se séparent en paramètres plus ou moins liés à la **phase fluide** (ou du moins véhiculés par celle ci) et des paramètres directement liés à la **composition chimique de la roche** telle que nous l'observons aujourd'hui.

A la première catégorie appartiennent des paramètres tels que les **fugacités**  $f_{\text{H}_2\text{O}}$  ,  $f_{\text{CO}_2}$  ,  $f_{\text{S}_2}$  et  $f_{\text{O}_2}$  qui sont particulièrement importants dans les conditions de formation des roches et des minéraux qui les composent.





ophite : grands clinopyroxènes  
englobant des lattes de plagioclase  
calcique

## 2- Facteurs chimiques

### 2a- Roches magmatiques

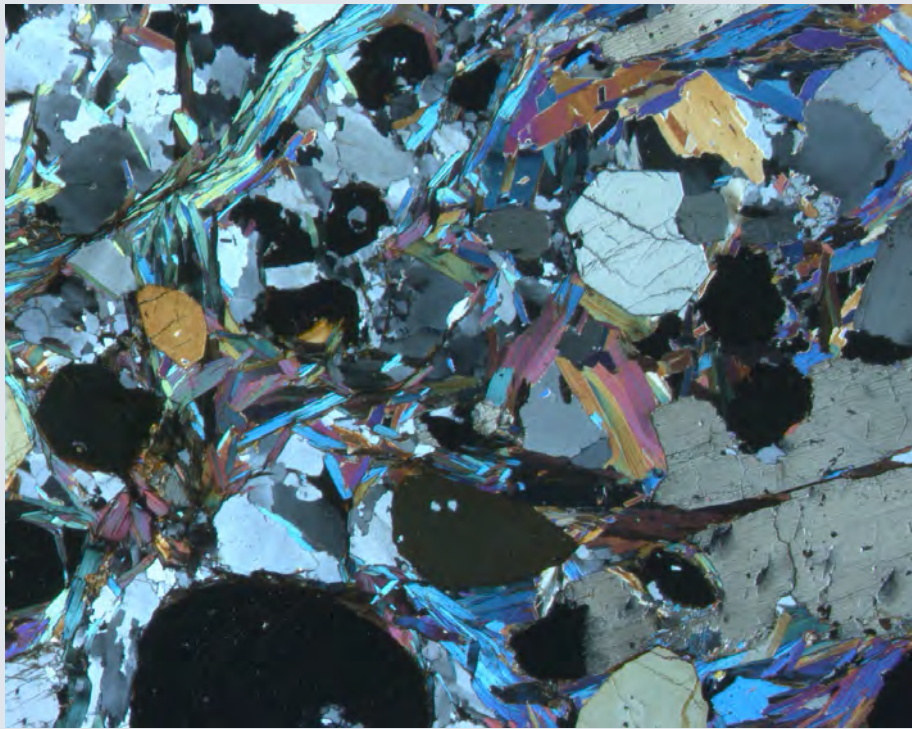
Les pétrographes s'intéressent surtout aux roches magmatiques et métamorphiques. Mais comme le métamorphisme n'est qu'une transformation sous l'influence de variations des conditions physiques, sans modification de composition chimique autre que celles des éléments volatils, la minéralogie des roches métamorphiques reflète la composition chimique des roches dont elles dérivent.

**La composition chimique des roches s'exprime par les minéraux qui les composent.**

*Les roches magmatiques acides* sont riches en silice et alcalins : quartz, feldspaths alcalins et micas.

*Les roches magmatiques basiques et ultrabasiques* sont au contraire riches en Ca, Fe, Mg, Ti : plagioclases plus ou moins calciques, amphiboles, pyroxènes, olivine.





Parmi les *roches sédimentaires détritiques* on distinguera les roches pélitiques souvent riches en argiles, où le métamorphisme développe des minéraux alumineux (silicates d'alumine, muscovite, grenat, cordiérite...) et les grès plus ou moins impurs où ces derniers minéraux apparaissent plus rarement ou de façon moins abondante.

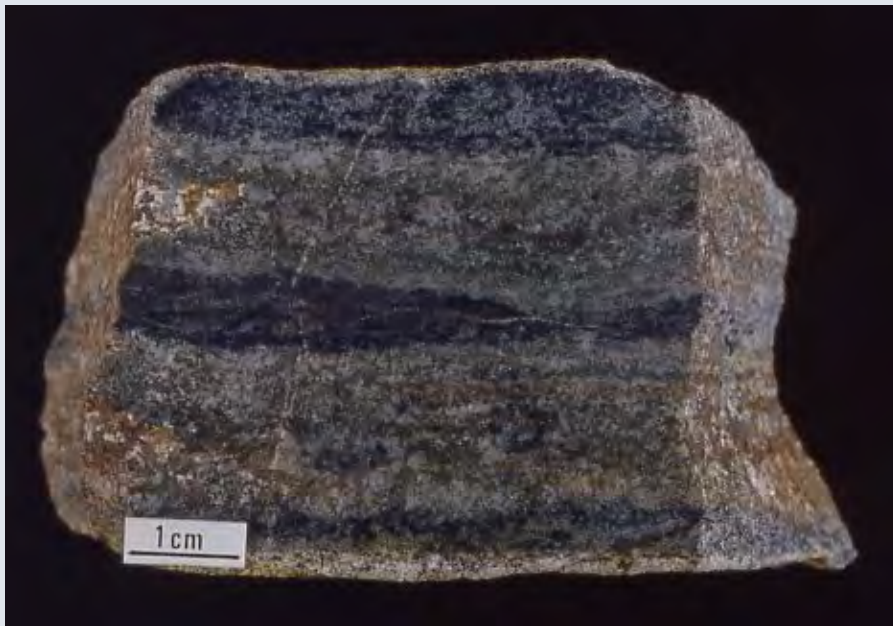
un micaschiste alumineux d'origine pélitique : biotite, muscovite, grenat, staurotide, disthène, tourmaline

Les *roches sédimentaires d'origine chimique* (évaporites, phosphates, minerais de fer ou de manganèse) ont une minéralogie particulière.

## 2- Facteurs chimiques

### 2b- Roches sédimentaires détritiques et chimiques





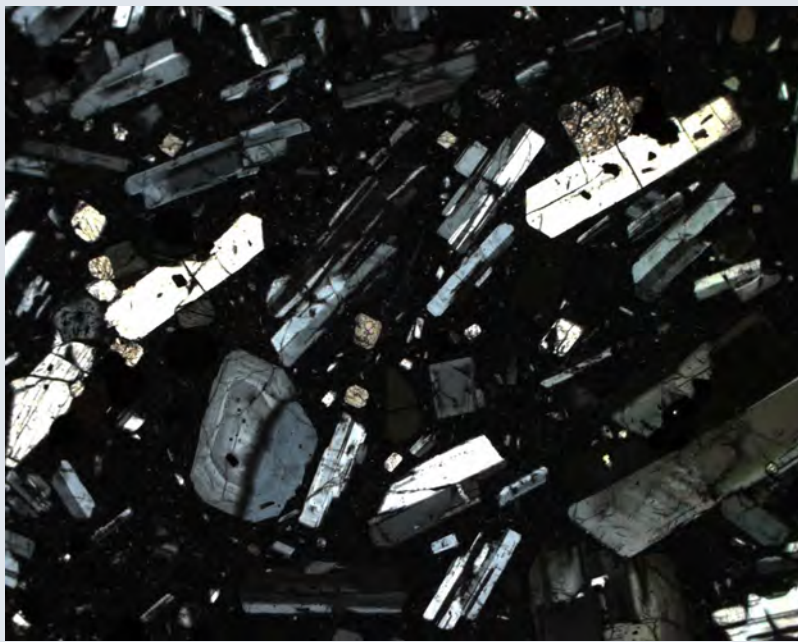
un gneiss-à-silicates-calciques

Les *roches carbonatées* initialement plus ou moins impures, contiendront lorsqu'elles sont métamorphisées, des silicates calciques alumineux ou non selon que la roche initiale était plus ou moins riche en silice (grès calcaireux, calcaires gréseux..) et/ ou en argiles (marnes..).

Les *roches métasomatiques*, développées à partir de carbonates (skarns) contiennent les mêmes minéraux calciques que les roches carbonatées impures métamorphiques.

## 2- Facteurs chimiques

### 2c- Roches carbonatées



une dacite : plagioclase, sanidine,  
orthopyroxène

On définit dans les roches magmatiques :

- les roches *sur-saturées* en silice (plus de 5% de quartz)
- les roches *saturées* (moins de 5% de quartz ou de feldspathoïdes)
- les roches *sous-saturées* en silice : feldspathoïdes (plus de 5%), olivine

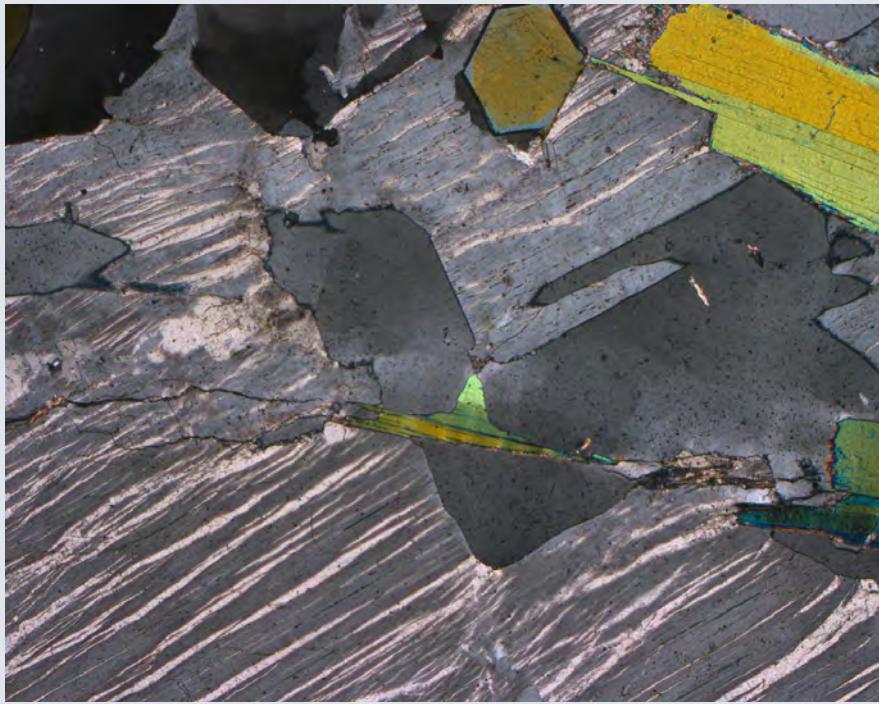
Cette notion peut être étendue à d'autres roches.

Les minéraux suivants sont des index de cette sous- ou sur-saturation :

## 2- Facteurs chimiques

### 2d- Saturation en silice

| sous-saturé                                      | saturé                                                  |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| néphéline $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$            | albite $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$                      |
| leucite $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$               | orthose $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$                      |
| olivine magnésienne<br>$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ | enstatite<br>$\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$         |
| pérovskite $\text{CaTiO}_3$                      | spène $\text{CaTiSiO}_4(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$ |



une pegmatite : quartz, perthite,  
muscovite, tourmaline

2- Facteurs chimiques

2e- Saturation en alumine

Dans une roche, les feldspaths sont les principaux minéraux alumineux, l'équilibre en alumine se traduit par

$$Al = Na + K + 2Ca$$

De telles roches sont appelées *méta-alumineuses*.

S'il y a excès d'alumine par rapport à cette somme, on parle de roches *peralumineuses* ; cet excès d'alumine se traduit par la présence de minéraux alumineux : grenat, muscovite, cordiérite, etc.

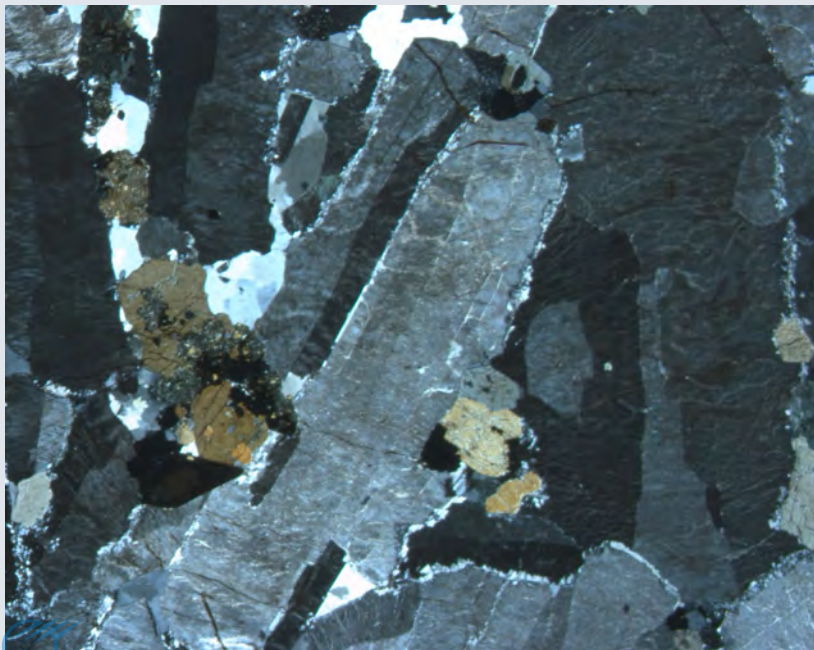
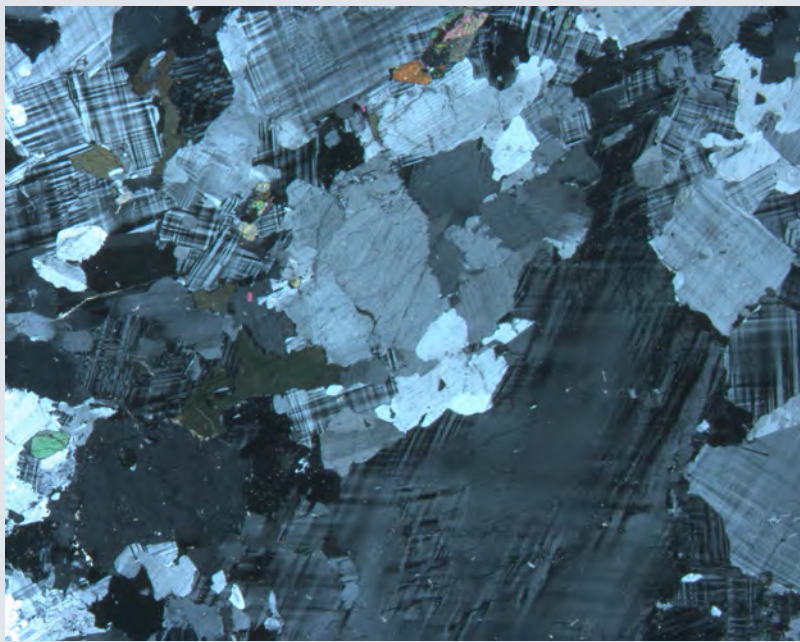




## 2- Facteurs chimiques

### 2e- Saturation en alumine

ci-contre un granite à riébeckite (Evisa, Corse) et une syénite quartzique à arfvedsonite (Piquiri, Brésil)



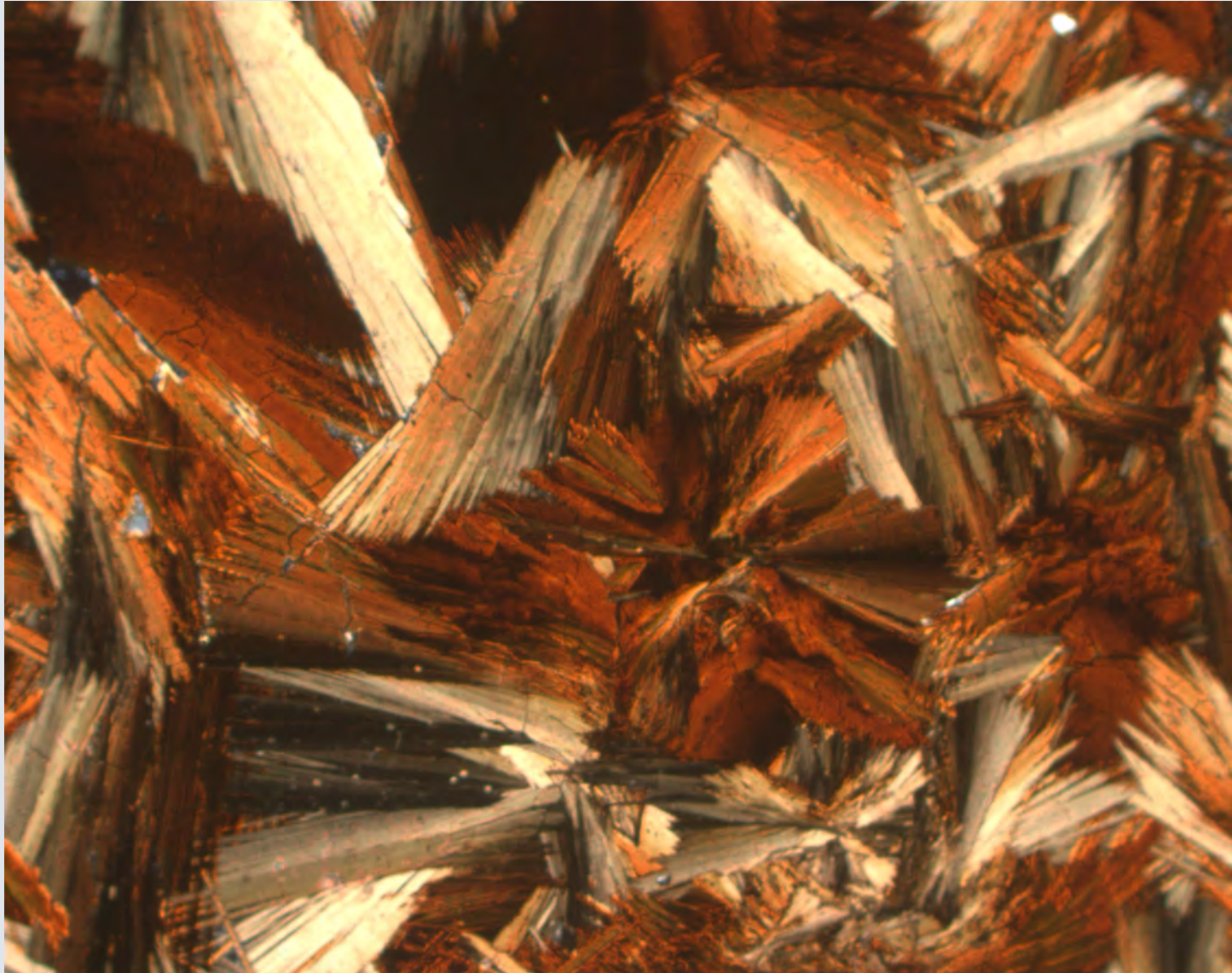
Les roches qui montrent un déficit en alumine par rapport aux oxydes alcalins et à la chaux sont appelées *roches alcalines* ; ce déficit se traduit par la présence de minéraux ferromagnésiens alcalins (à Na, K, comme les pyroxènes et amphiboles sodiques, des titano- ou zircono-silicates, etc). Un autre exemple est la présence de wollastonite qui traduit un déficit en alumine par rapport au feldspath calcique.

*Les notions de saturation en silice et de saturation en alumine sont indépendantes.* Initialement définies pour les roches magmatiques, elles peuvent être étendues à d'autres roches.





# 1- Observations au microscope





# 1- Observations au microscope



## Sommaire

- Optique cristalline – ellipsoïde des indices
  - Minéraux biaxes – minéraux uniaxes
- Le microscope polarisant
- Observations en lumière naturelle
  - Formes – clivages – cassures
  - Appréciation de la réfringence relative de deux minéraux : Liseré de Becke
  - Couleur – pléochroïsme
  - Inclusions – inclusions fluides
- Observations en lumière polarisée
  - Biréfringence : teintes de polarisation – l'abaque de Michel-Lévy
  - Minéraux dispersifs : teintes hors échelle de Newton
  - Position de l'indicatrice : Détermination de  $n_p$  et  $n_g$  : signe d'allongement
  - Macles
- Observations en lumière convergente
  - Sections perpendiculaires à un axe optique : uniaxes – biaxes
  - Sections perpendiculaires à la bissectrice d'un axe optique
  - Dispersion

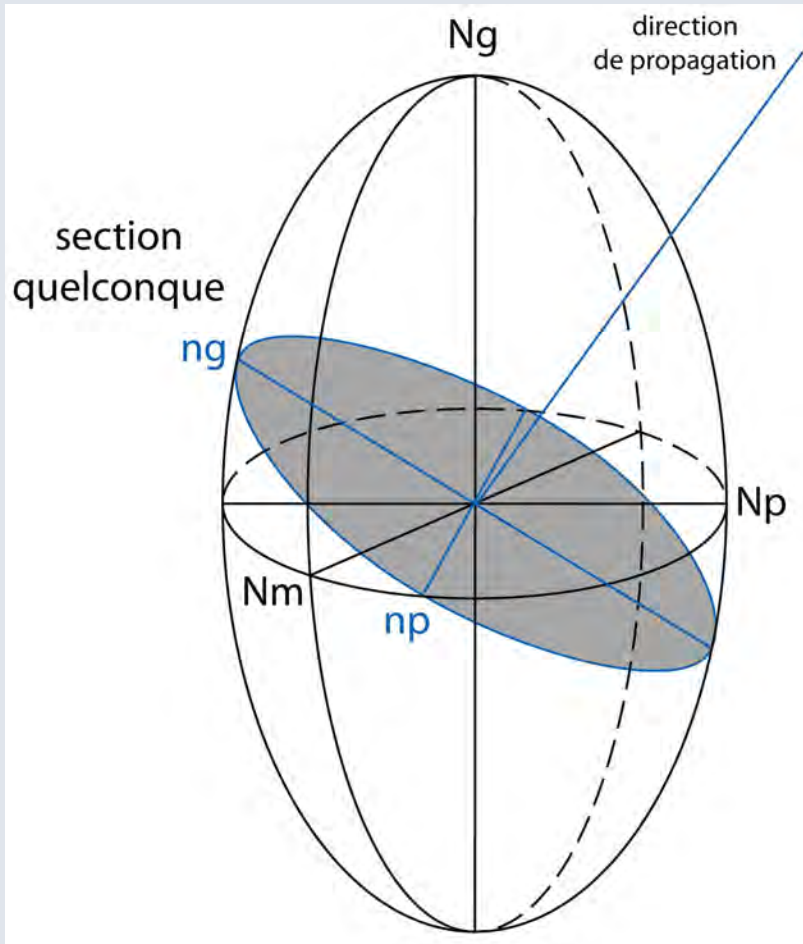
» Photo précédente : *stilpnomélane, Brunsjo Suède*





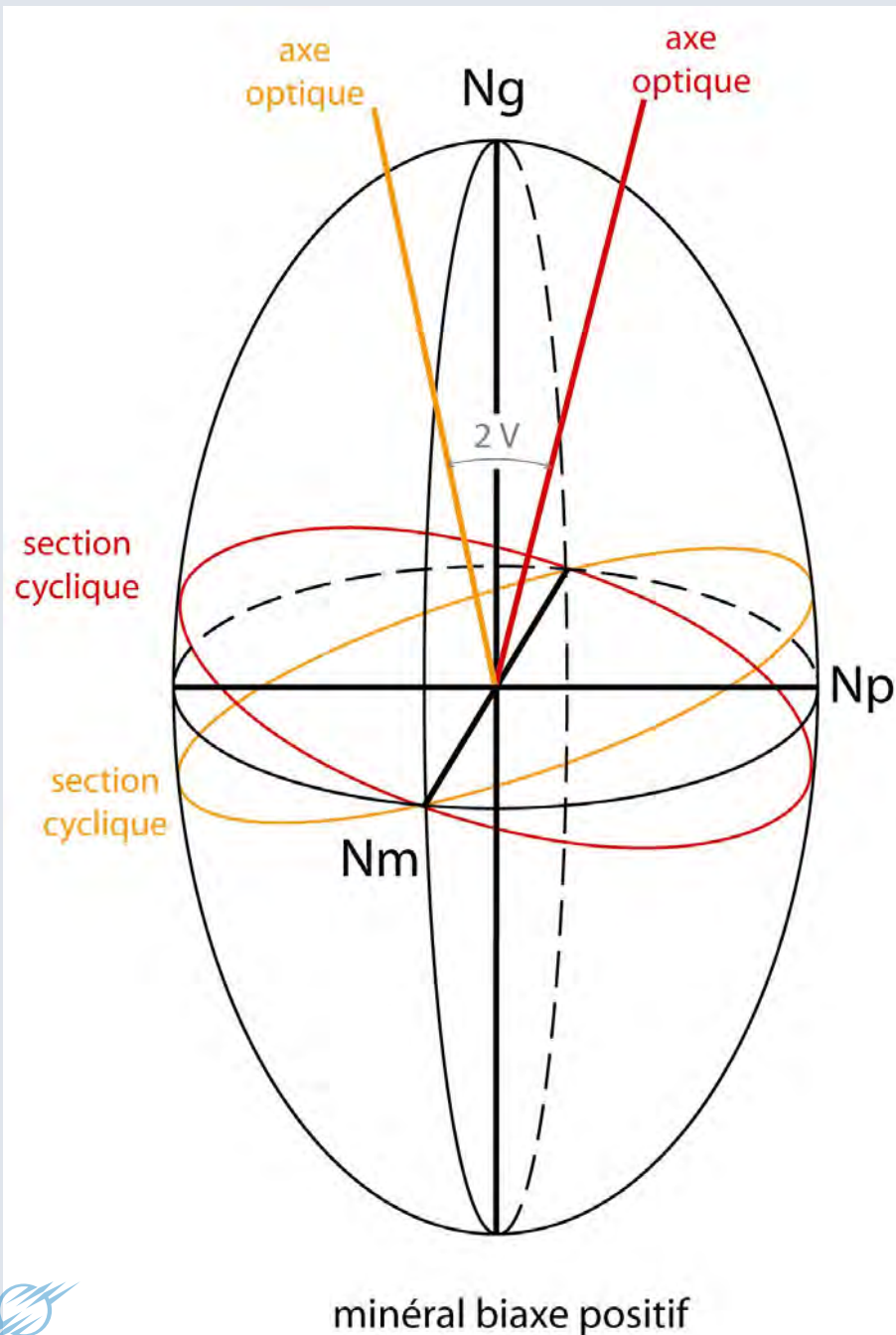
# Optique cristalline

## Ellipsoïde des indices



- La lumière est une vibration électromagnétique.
- Dans un milieu optiquement isotrope, la lumière se propage sans déformation, avec la même vitesse  $c/n$  dans toutes les directions ( $c$  = vitesse de la lumière,  $n$  = indice).
- Dans un milieu anisotrope, la vibration lumineuse ne se propage pas sans déformation. Les théorèmes de Fresnel démontrent que, pour une section quelconque, il existe deux directions perpendiculaires dans lesquelles la lumière se propage sans déformation à des vitesses  $c/ng$  et  $c/np$ .
- Si l'on fait varier cette section dans toutes les directions, le lieu des vecteurs  $ng$  et  $np$  est un ellipsoïde, appelé **ellipsoïde des indices**.
- Cet ellipsoïde est défini par ses trois axes principaux  $N_p$ ,  $N_m$  et  $N_g$  (notés parfois respectivement  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ).
- L'ellipsoïde des indices a la symétrie du milieu et ses axes de symétrie coïncident avec ceux du minéral :
  - Dans un minéral cubique,  $c$ 'est une sphère : un cristal cubique est optiquement isotrope,
  - Dans un minéral possédant un axes de symétrie d'ordre supérieur à 2 (systèmes hexagonal, rhomboédrique, quadratique), l'ellipsoïde des indices est de révolution,
  - Dans les systèmes orthorhombique, monoclinique et triclinique, l'ellipsoïde des indices est quelconque.

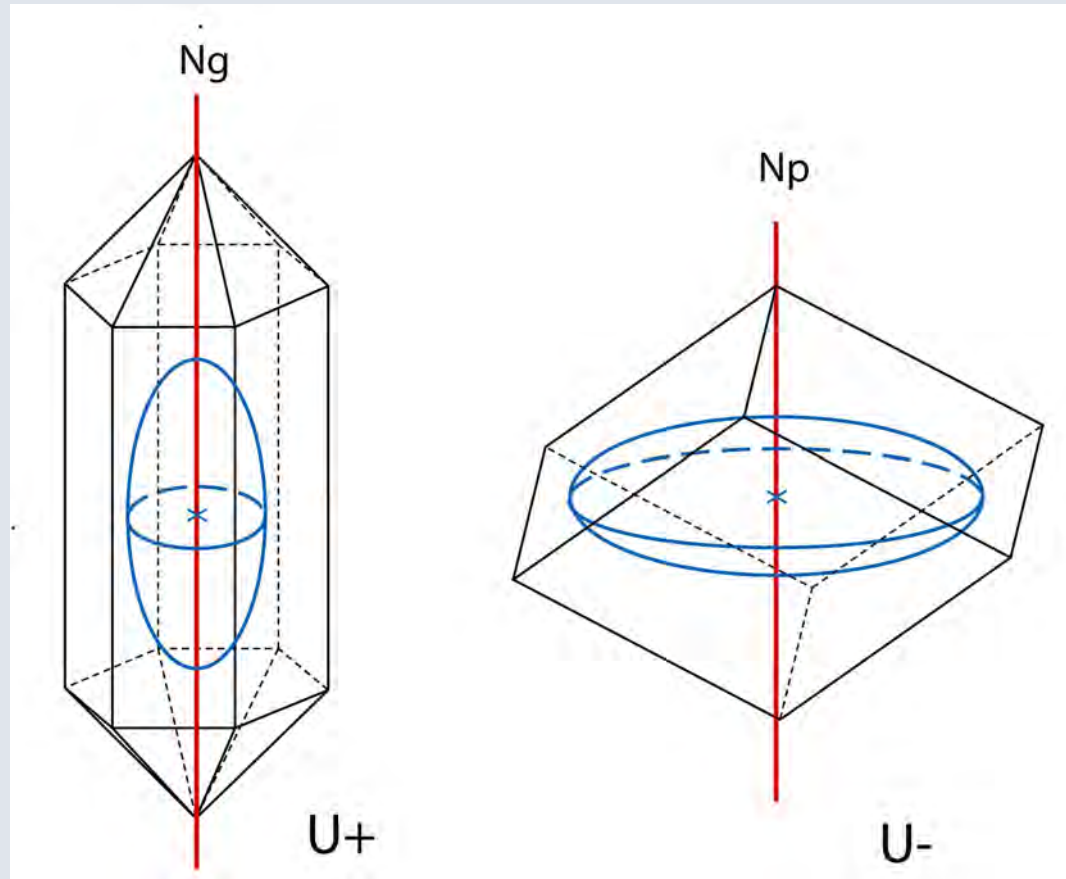




## Minéraux biaxes : systèmes triclinique, monoclinique, orthorhombique

- Lorsque l'ellipsoïde des indices est quelconque, il existe deux *sections cycliques*. Ces sections sont optiquement isotropes. Les directions perpendiculaires à ces sections sont appelées **axes optiques** : le minéral est **biaxe**.
- Si Ng est bissectrice de l'angle aigu des axes optiques, on dit que le minéral est **biaxe positif** ; Np est alors bissectrice de l'angle obtus des axes optiques.
- Si Np est bissectrice de l'angle aigu des axes optiques, on parle de minéral **biaxe négatif**.

# Minéraux uniaxes : systèmes hexagonal, rhomboédrique et quadratique



- L'ellipsoïde des indices est un ellipsoïde de révolution.
- Toute section perpendiculaire à cet axe de révolution/axe de symétrie principal est optiquement isotrope.
- Si Ng coïncide avec l'axe de révolution (ellipsoïde en cigare), on parle de minéral **uniaxe positif** (exemple: le quartz).

Si c'est Np (ellipsoïde en galette), le minéral est **uniaxe négatif** (exemples : la calcite, la tourmaline).



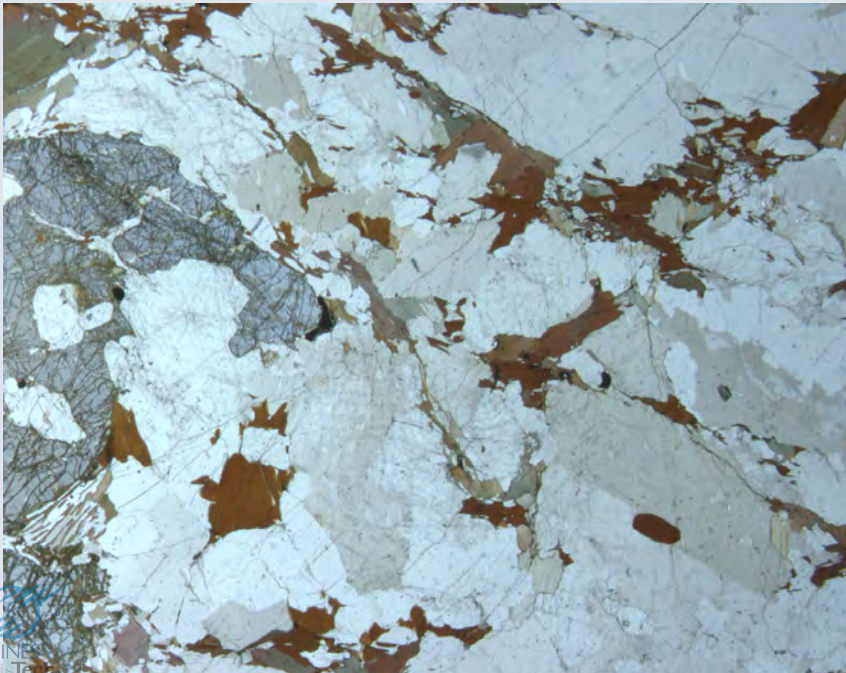
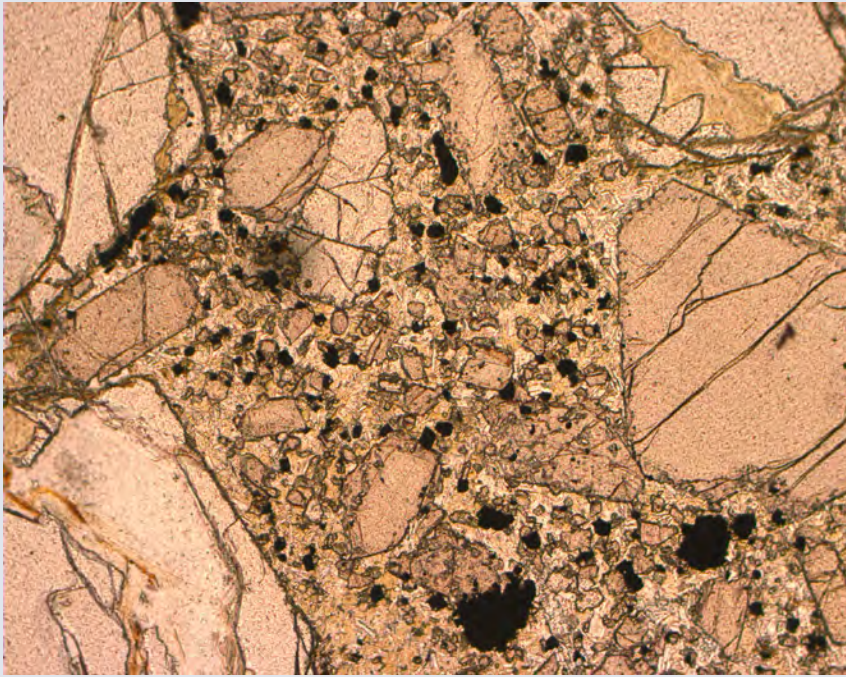
# Le microscope polarisant



- Observations avec un seul nicol, le polariseur : observations en lumière naturelle LN.
- Observations avec deux nicols, croisés à angle droit : observations en lumière polarisée LP.
- Ajout du condenseur (et de la lentille de Bertrand) : observations en lumière convergente.



# Observations au microscope



- Une roche est en général composée de plusieurs minéraux.
- Une lame mince montre différentes sections de chaque minéral.
- *Le plus difficile*, au début, est de reconnaître les différentes sections d'un même minéral.
- Les observations visent à reconstituer, à partir de ces différentes sections, une image 3D du minéral, de sa structure et de son ellipsoïde des indices.
- La photo du haut montre un basalte avec microlites et phénocristaux d'olivine et d'augite, et des microlites de magnétite.
- La photo du bas montre une charnockite avec quartz, deux feldspaths, biotite et hypersthène.

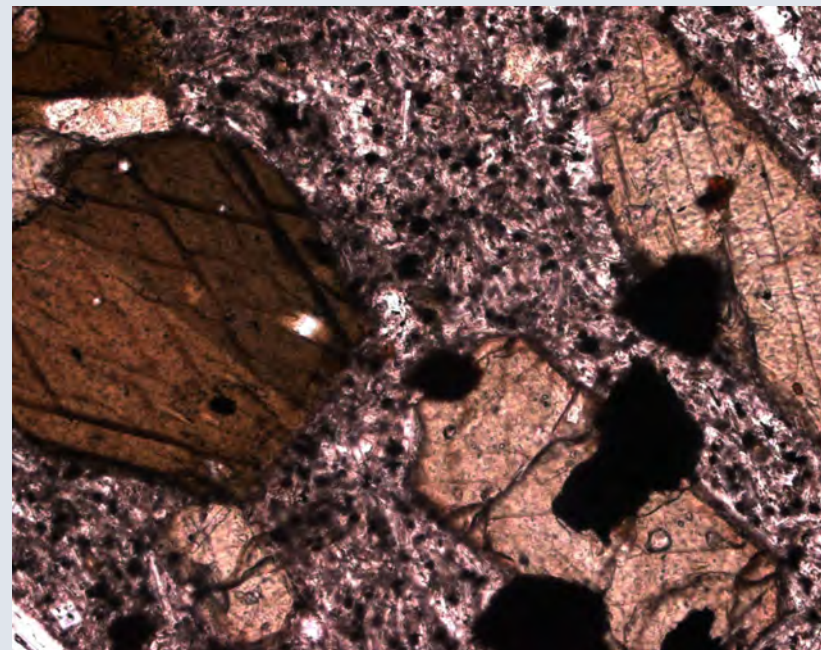
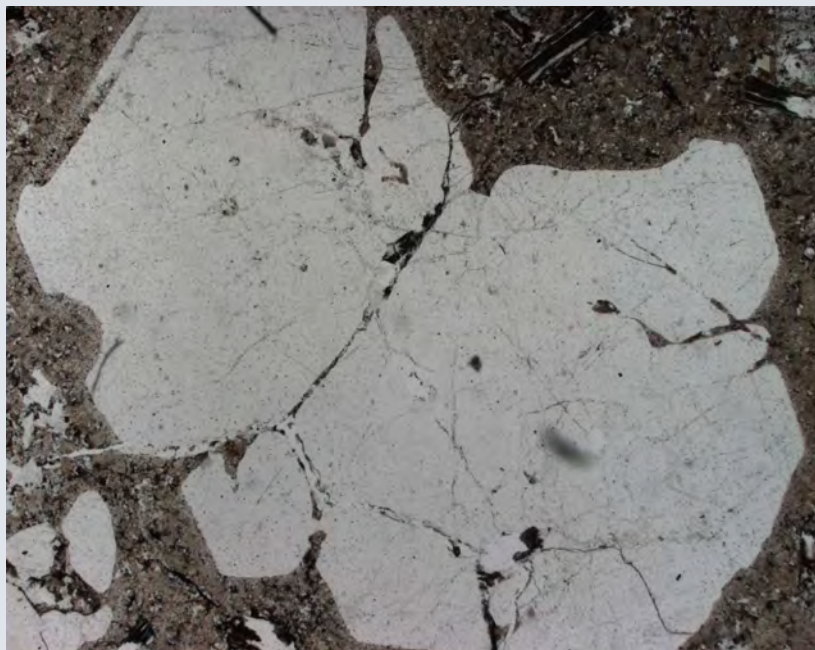




# Observations en lumière naturelle (LN)

- Formes – clivages – cassures 
- Réfringence – appréciation de la réfringence relative de deux minéraux par le liseré de Becke 
- Couleur – pléochroïsme 
- Inclusions 
- Inclusions fluides 
- Altérations





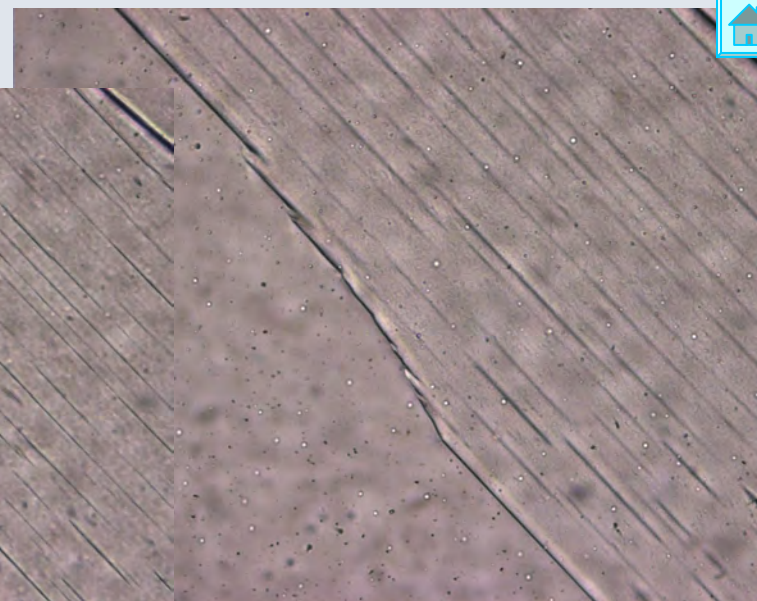
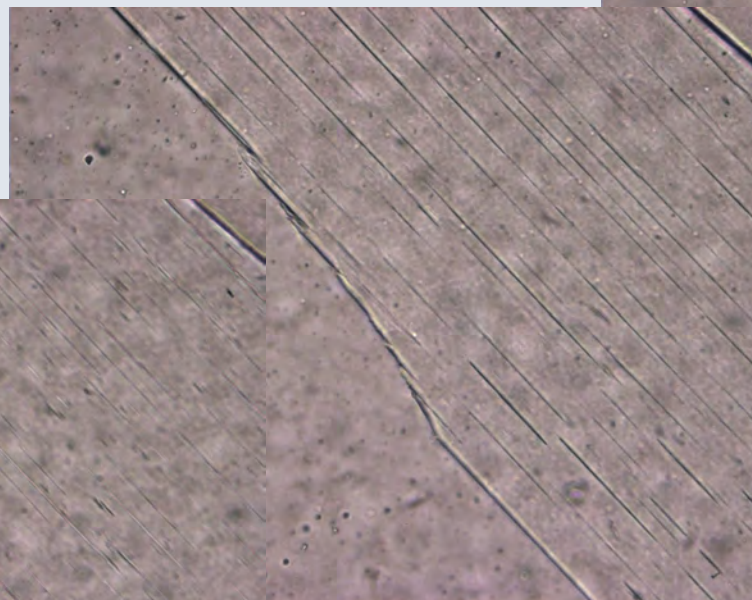
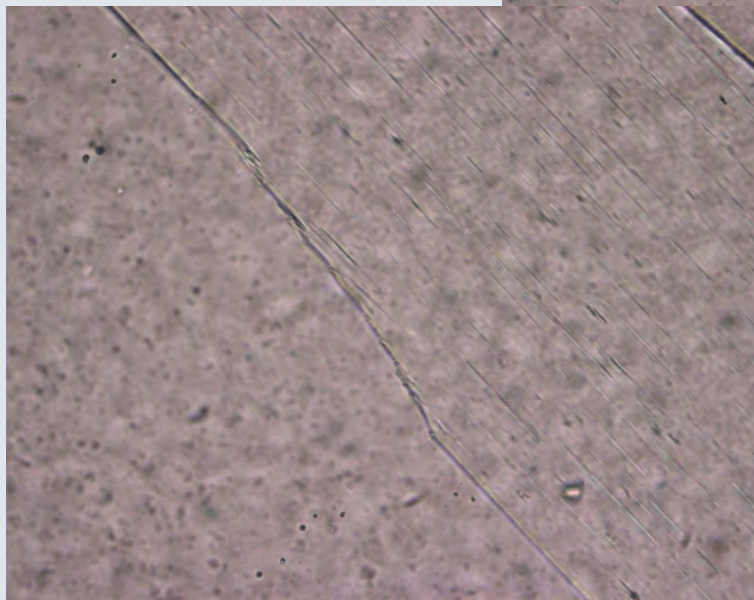
## Formes, cassures, clivages

*en haut à gauche* : section basale hexagonale de quartz dans une rhyolite , pas de clivage, des cassures (microgranite, Pouilly-en-Auxois, Yonne).

*en haut à droite* : pyroxènes et amphibole ; l'amphibole (brune, à gauche) présente une forme hexagonale et deux clivages à  $120^\circ$ ; à droite s'observent deux pyroxènes (brun jaune clair) : l'un en bas de forme octogonale avec deux clivages à angle droit, l'autre en section allongée ne montrant qu'un seul clivage.

*en bas à gauche* : section losangique de sphène.

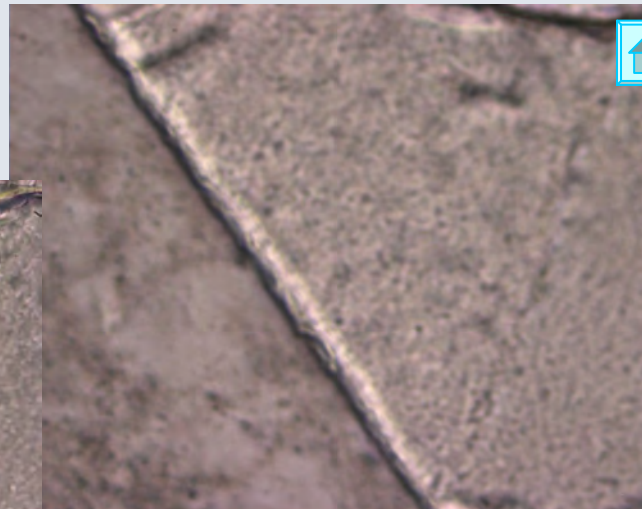
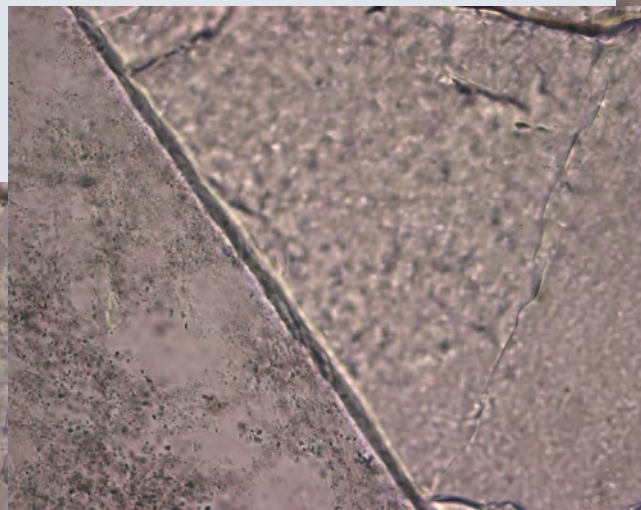
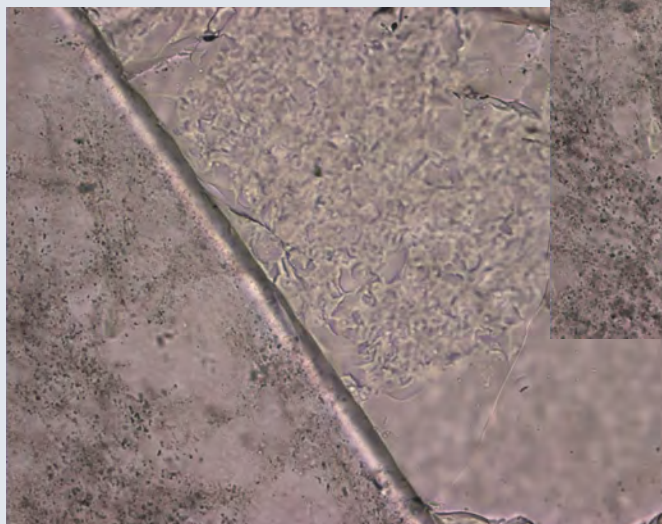




## Appréciation de la réfringence relative de deux minéraux

### Liseré de Becke

Contact quartz (au SW, limpide) – muscovite (au NE, clivages).  
La photo en bas à gauche a été prise avec mise au point sur le contact ;  
les deux photos suivantes ont été prises **en éloignant** progressivement l'objectif  
de la lame ; on voit apparaître une frange brillante qui se déplace vers le  
minéral **le plus réfringent** : la muscovite.



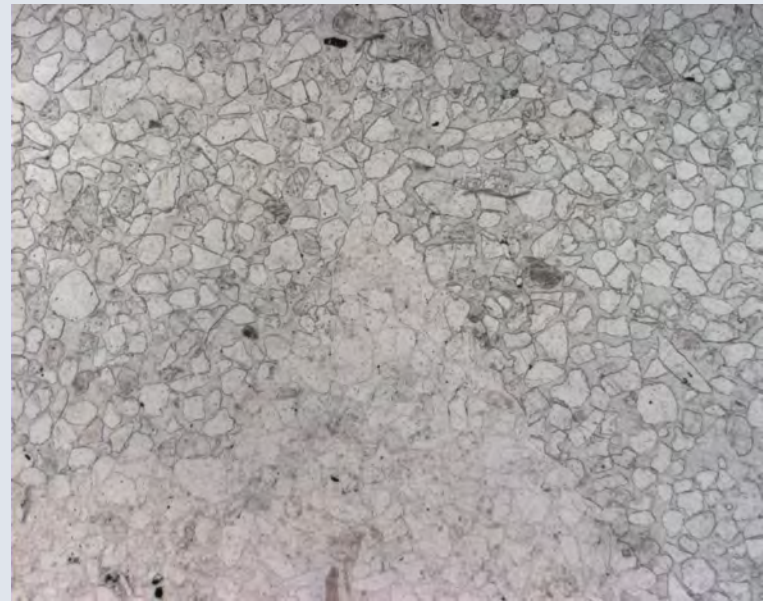
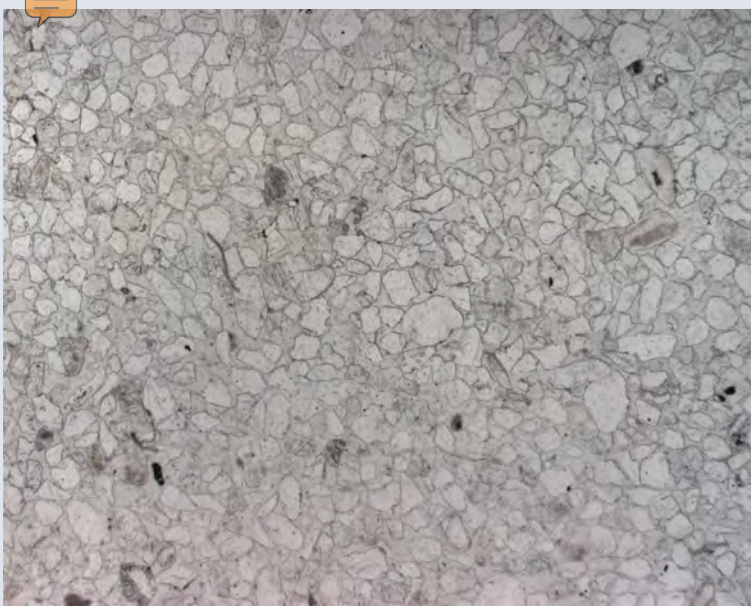
## Liseré de Becke

Contact apatite (au NE) – orthose (au SE)

photo du centre : mise au point

Le contact apparaît comme un trait noir surligné d'une frange brillante. A droite, on a défait la mise au point **en éloignant** l'objectif de la lame : il apparaît une frange brillante se déplaçant vers le minéral **le plus** réfringent : l'apatite. A gauche, on a défait la mise au point, **en rapprochant** cette fois l'objectif de la lame : la frange brillante se déplace vers le minéral **le moins** réfringent : l'orthose





## Le pléochroïsme de relief

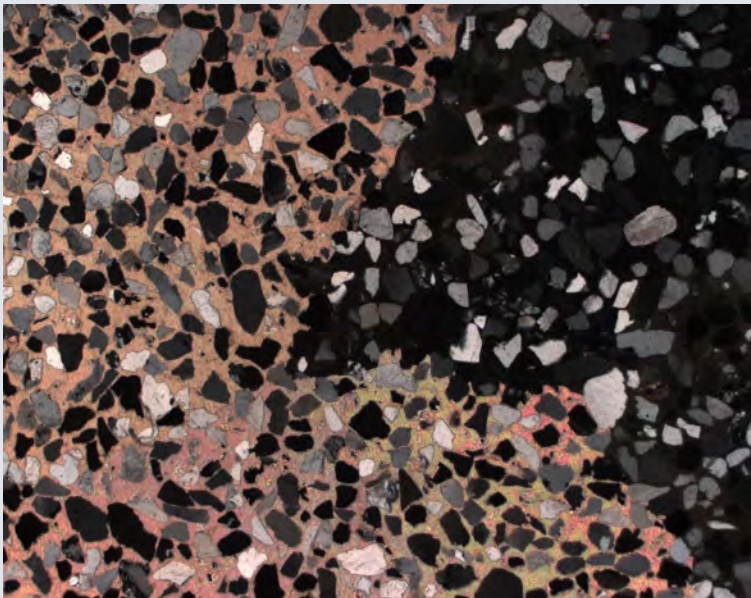
s'observe lorsque les indices d'un même minéral (ici la calcite) sont très différents.

Exemple des cristaux de Bellecroix dans les grès de Fontainebleau.

Les grains de quartz (gris et blanc du premier ordre sur la photo *bas gauche* en LP) sont cimentés par de grands cristaux de calcite (beiges des ordres supérieurs sur cette même photo). On notera un grand cristal en coin en position d'extinction dans la partie droite de cette photo.

La photo *supérieure gauche* a été prise en lumière naturelle dans la même position : les grains de quartz englobés dans ce cristal en coin ont un relief supérieur à celui de la calcite.

La photo *supérieure droite* a été prise après rotation de  $90^\circ$  de la lame : dans le cristal en coin, quartz et calcite, ont pratiquement le même relief.







**Pléochroïsme** : changement de couleur en fonction de la position par rapport au plan de polarisation : l'absorption varie en fonction de la position de l'onde incidente par rapport au réseau.

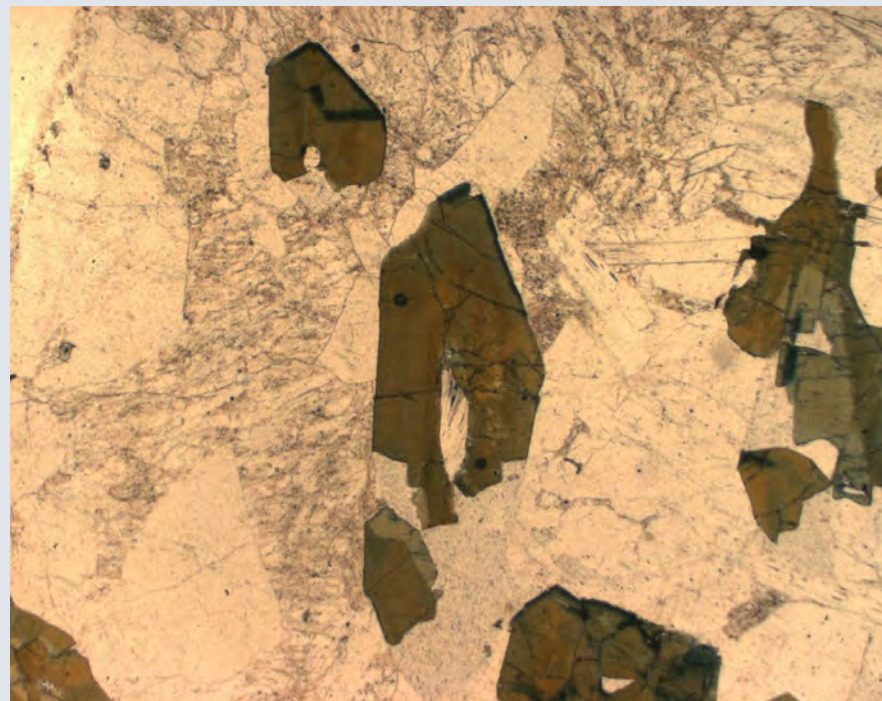
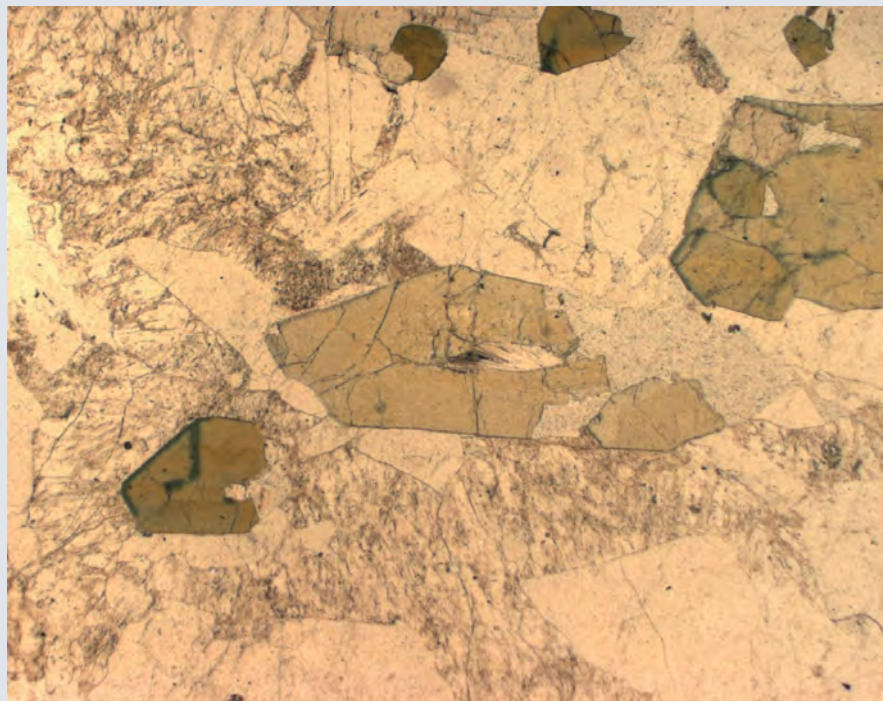


Exemple d'une biotite : pléochroïque de brun rouge à brun pâle.





# Pléochroïsme inverse

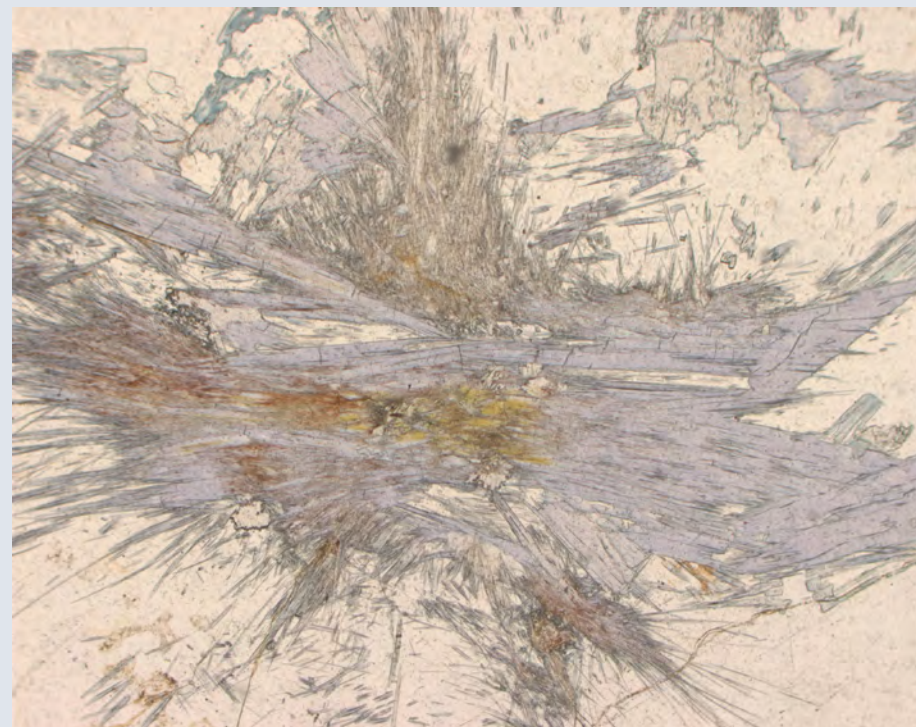
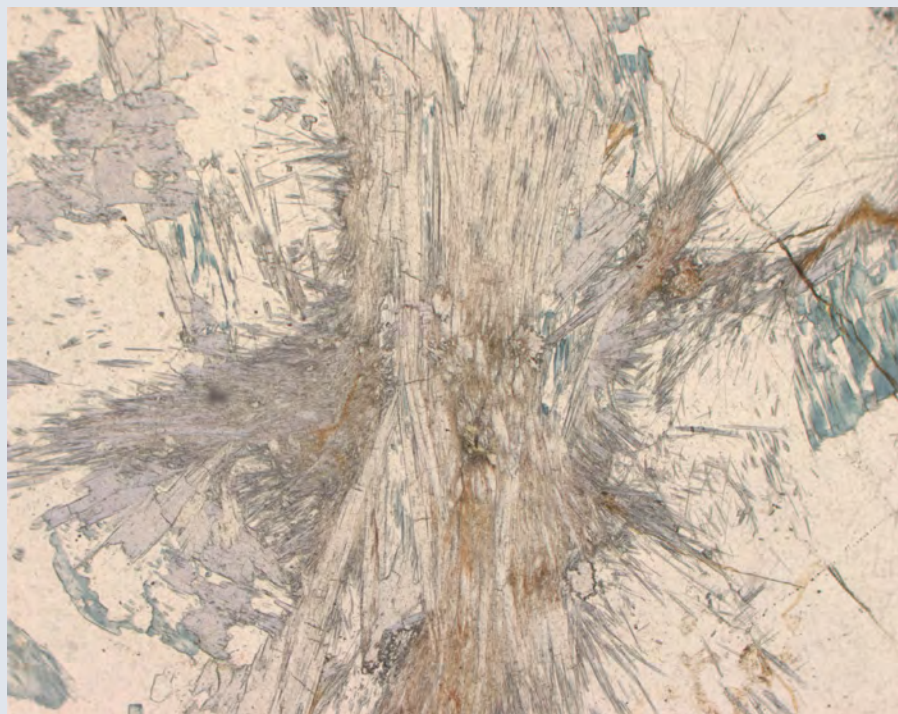


- Exemple d'une tourmaline.
- Les teintes les plus intenses sont observées à angle droit (ici NS) des teintes les plus intenses observées dans une biotite. Les teintes les moins intenses (ici EW) dans la tourmaline correspondent à la position où la biotite présente les teintes les plus intenses.
- La roche est une pegmatite avec quartz (limpide), feldspath potassique (chagriné) et muscovite (un feuillet au centre est de la photo de droite).





Pléochroïsme du bleu lavande au brun très pâle de la dumortiérite.  
La plage centrale présente des couleurs intenses vert jaune.



Dumortierite  $(\text{Al, Fe, Mg})_{27} (\text{SiO}_4)_{12} (\text{BO}_3)_4 (\text{OH})_3 (\text{O, OH})_9$

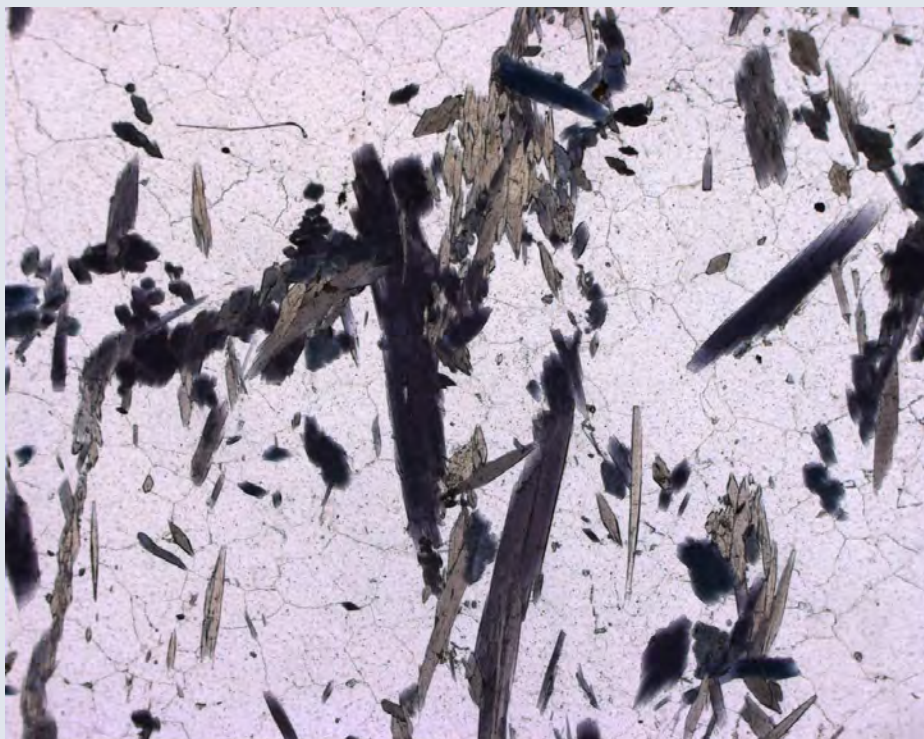
Le fond de la roche est du quartz.

San Juan, Argentine.





Pléochroïsme du bleu de Prusse au brun pâle de la dumortiérite.



Dumortierite  $(\text{Al, Fe, Mg})_{27} (\text{SiO}_4)_{12} (\text{BO}_3)_4 (\text{OH})_3 (\text{O, OH})_9$

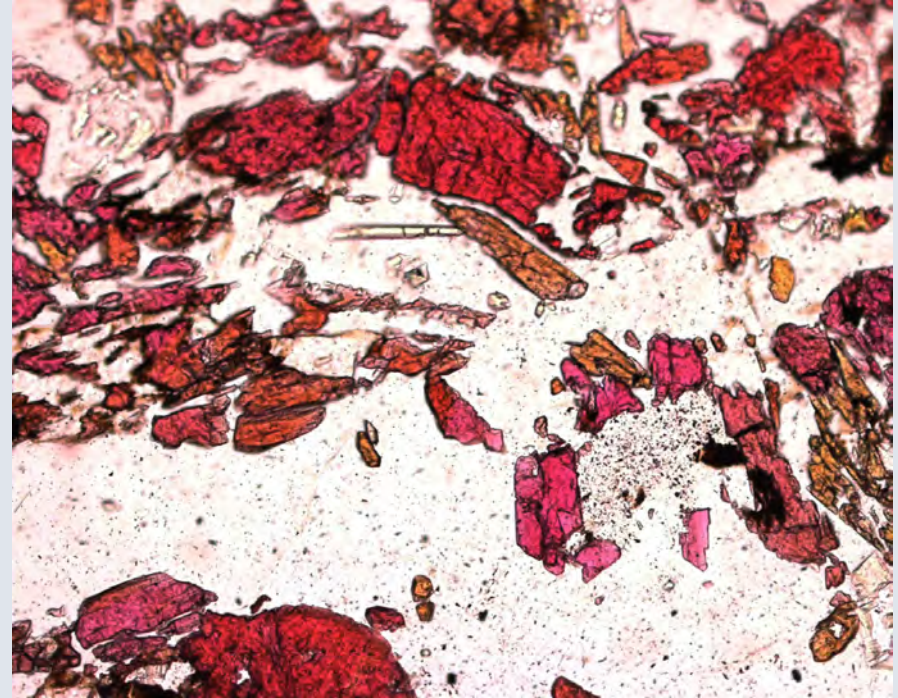
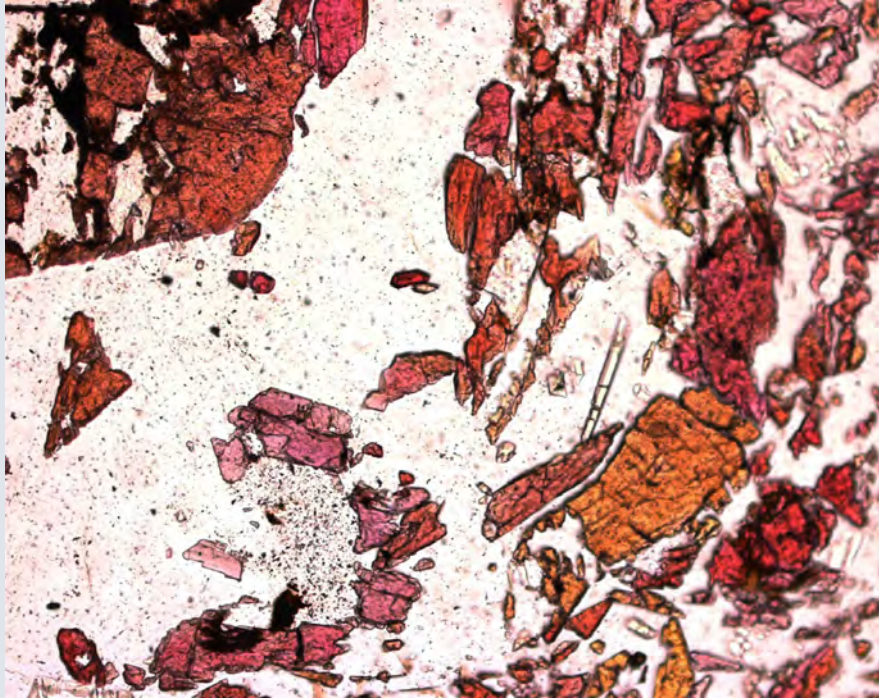
Le fond de la roche est du quartz.

San Juan, Argentine.





Pléochroïsme du carmin au rose et à l'orangé de la piémontite.



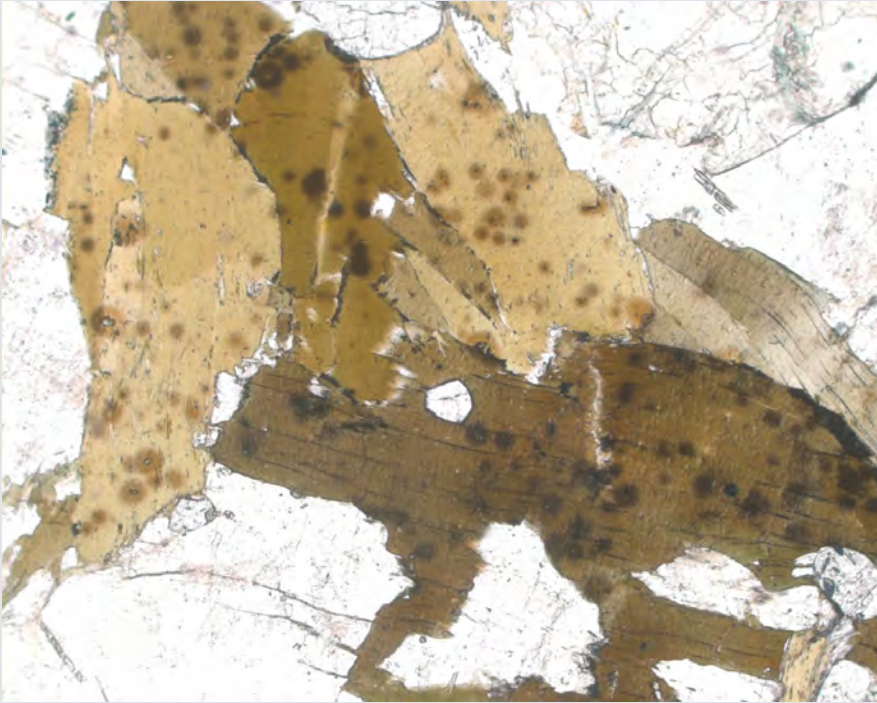
- Piémontite (groupe des épidotes)
- $\text{Ca}_2\text{MnAl}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{OH})_2$
- Le fond de la roche est du quartz. Bonneval-sur-Arc, Savoie, France.





# Inclusions

## Exemples d'inclusions de zircon



- *En haut* : inclusions pléochroïques de zircon dans des biotites.

Granite de Vire, Manche, France.



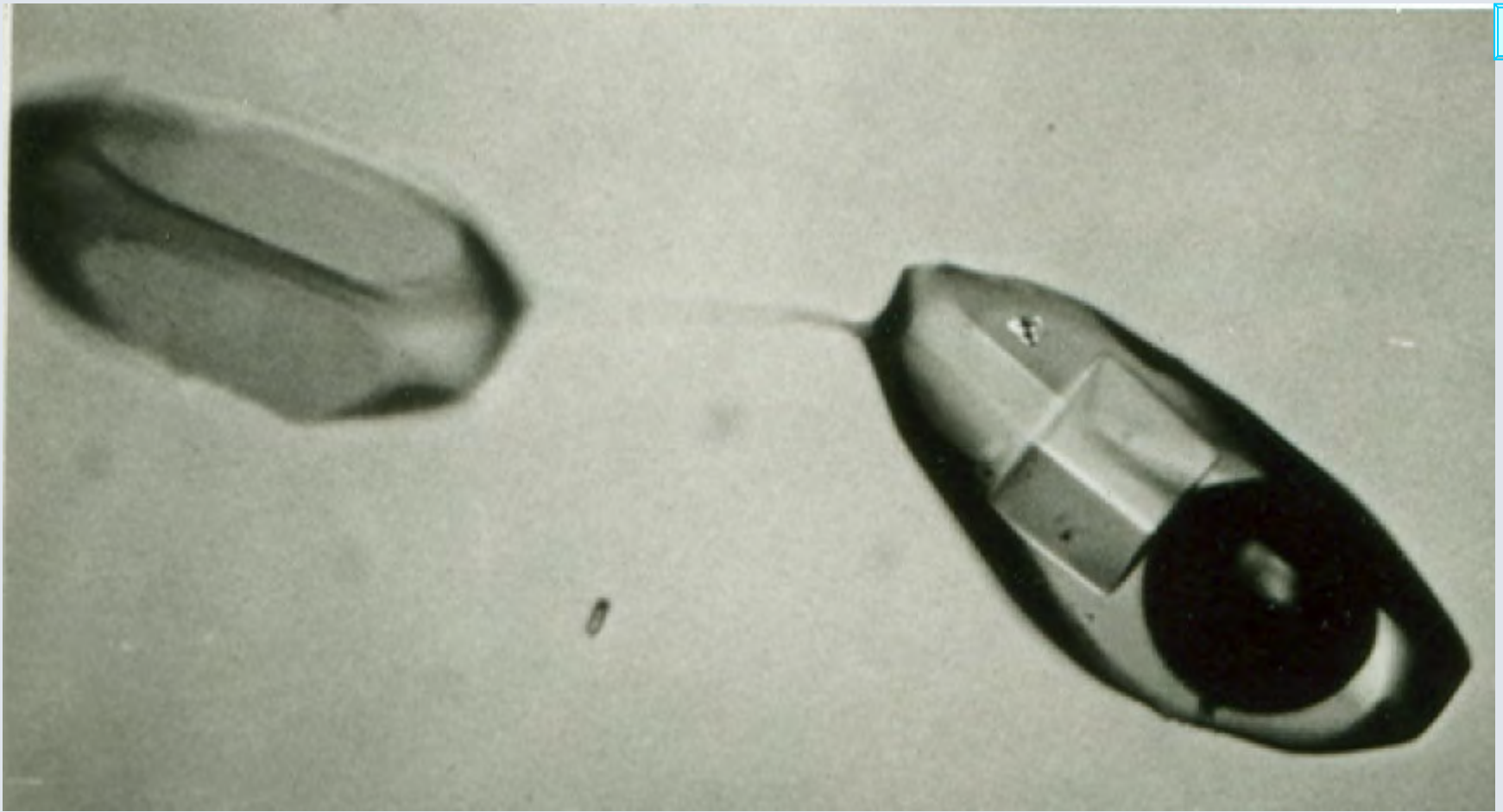
- *En bas* : inclusion pléochroïque (jaune) de zircon dans une cordiérite.

Sierra de Cordoba, Argentine.



## Inclusions fluides



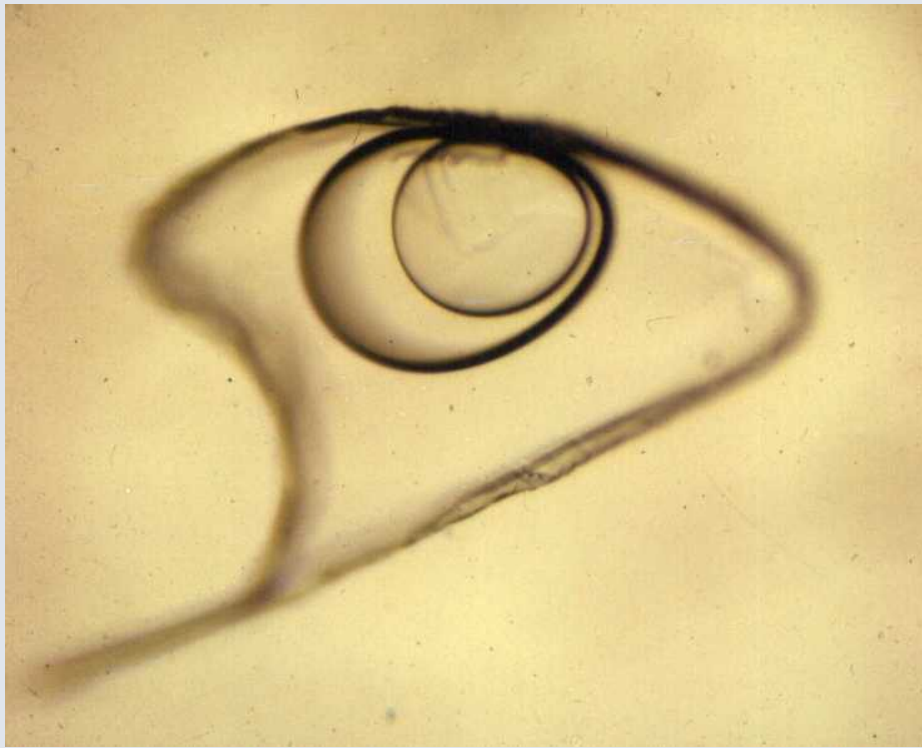


## Inclusions fluides

- Inclusion polyphasée dans un quartz avec un cube de halite et une bulle gazeuse.
- L'inclusion initiale a été divisée par étranglement (*necking down*).  
Bitsch, Valais, Suisse.



# Inclusions fluides



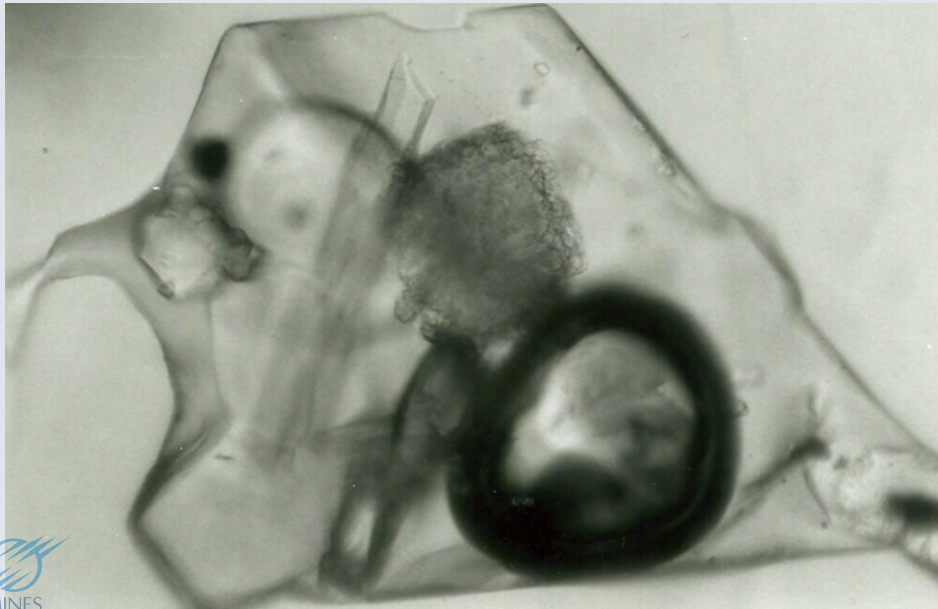
- Inclusion biphasee :  $\text{H}_2\text{O}$  liquide,  $\text{CO}_2$  liquide + gaz (essentiellement  $\text{CO}_2$ ) dans un beryl.

Norvège

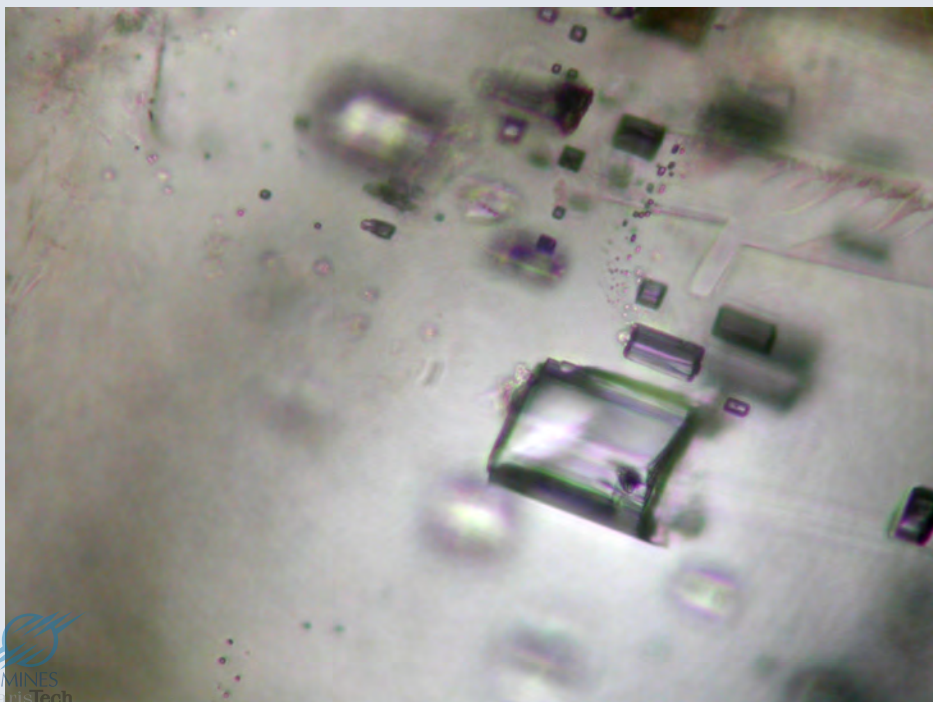
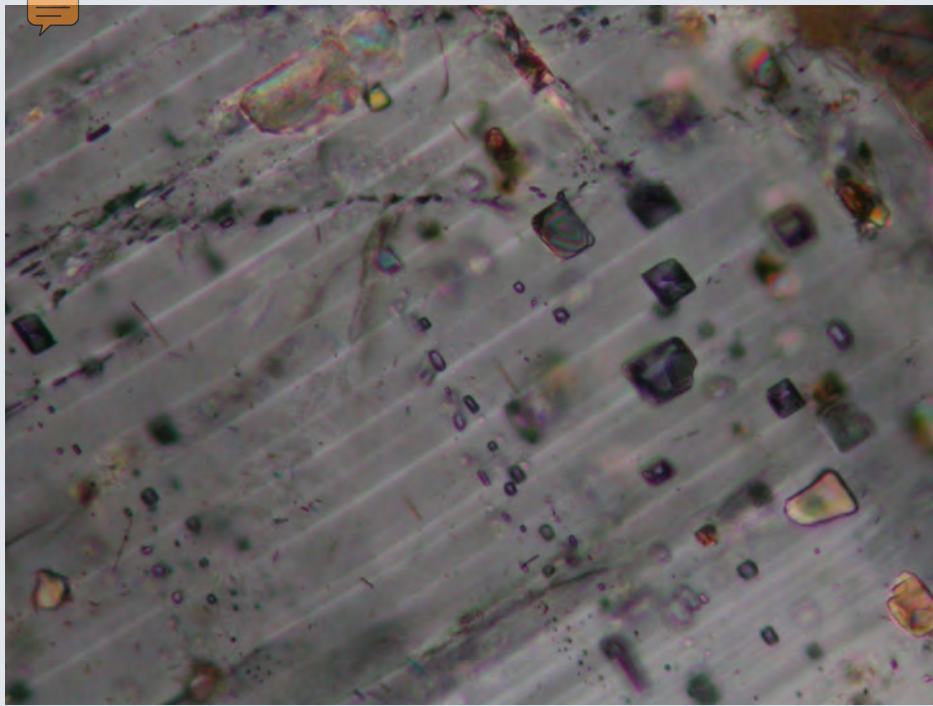
- Inclusions dans une topaze : fluide hydraté salin, bulle de gaz et plusieurs phases solides cristallisées par sursaturation lors du refroidissement (chlorures difficilement déterminables ; le minéral en baguette est vraisemblablement du gypse).

Brésil.

- Le taille de ces inclusions est de 10 à 20  $\mu$ .







# Inclusions fluides

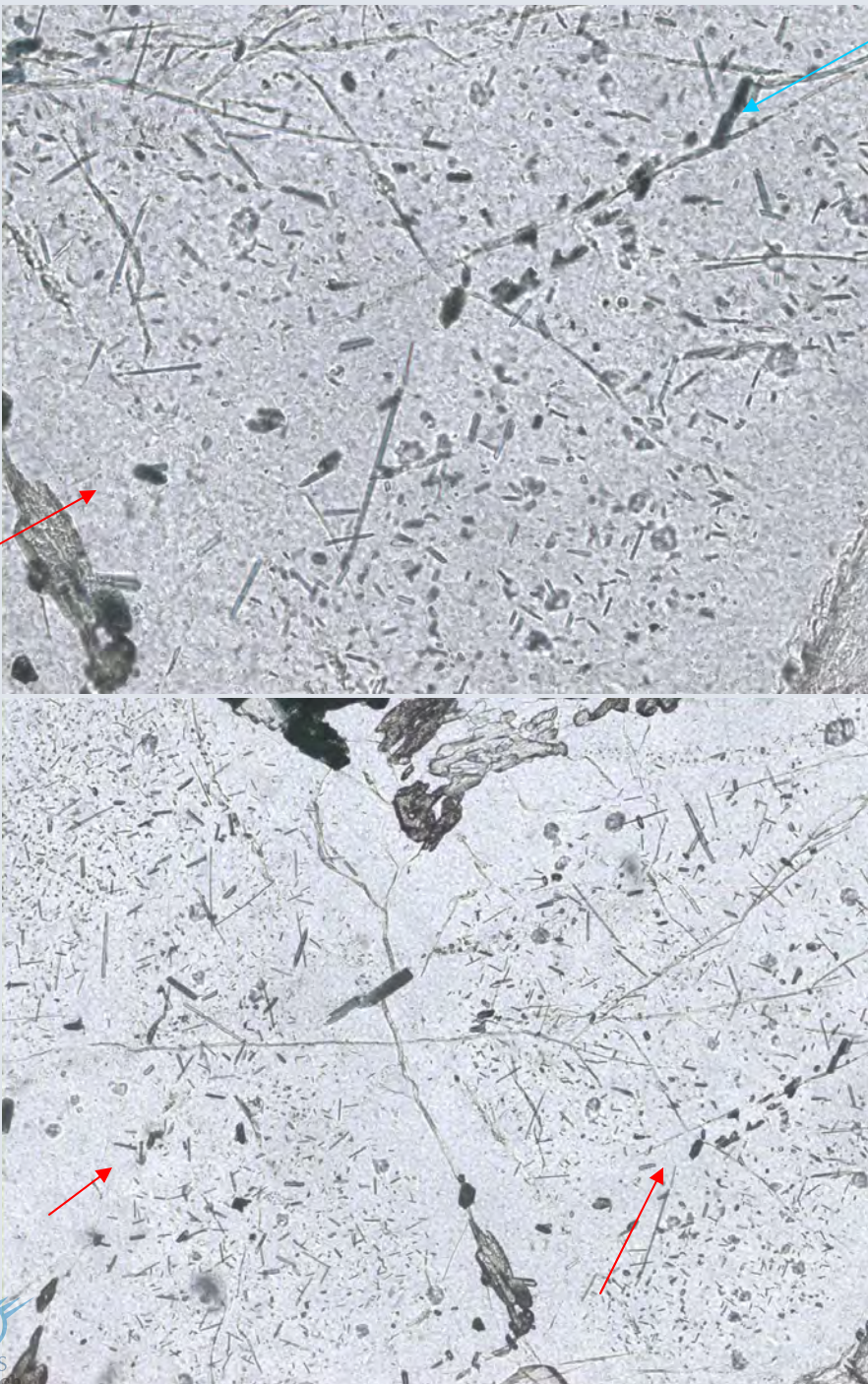
- Inclusions de  $\text{CO}_2$  supercritique dans les feldspaths, plagioclase en haut, feldspath potassique en bas.  
Granulites du sud de l'Inde.
- Vu la différence d'indice entre le  $\text{CO}_2$  et le feldspath, les inclusions ont un très fort relief négatif.
- La dimension de la plus grosse inclusion dans la photo du bas est d'environ  $30\ \mu$ .





# Inclusions fluides

- Traînées d'inclusions de méthane dans une néphéline.  
(La photo du haut est un grossissement de la photo du bas).
- Les autres inclusions formant un réseau plus ou moins hexagonal sont des baguettes d'aegyrine.
- Syénite néphélinique  
Illimaussaq, Groenland





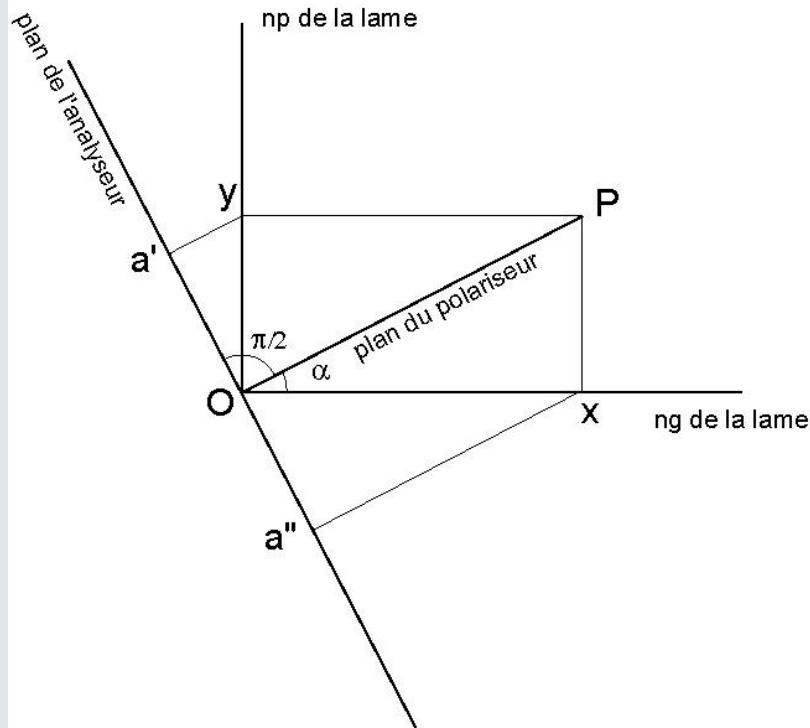
# Observations en lumière polarisée (LP)



- Biréfringence : teintes de polarisation. 
- Minéraux dispersifs : teintes hors échelle de Newton. 
- Position de l'ellipsoïde des indices : il y a extinction quand les  $n_g$  et  $n_p$  de la section coïncident avec les plans de polarisation des nicols ; la mesure des angles d'extinction par rapport à des éléments cristallographiques remarquables (formes, clivages..) permet donc de repérer l'ellipsoïde des indices par rapport au réseau.
- Signe d'allongement : détermination de  $n_p$  et  $n_g$ . 
- Associations : macles, syneusis. 
- Formes de croissance : exemples : plagioclases zonés , pyroxènes à texture en sablier , chialstolite 



# Lame cristalline à faces parallèles en lumière parallèle polarisée et analysée



\* amplitude à la sortie  $a \sin 2\alpha \sin(\pi e (n_g - n_p) / \lambda)$

\* ces ondes se recomposent dans le plan de l'analyseur (celui-ci à  $90^\circ$  du plan du polariseur OP)

à la sortie  $OA = Oa' + Oa''$

$$OA = OX \cos(\alpha + \pi/2) + Oy \sin(\alpha + \pi/2)$$

\* à la sortie de la lame

$$OX = a \cos \alpha \sin 2\pi(t/T - \phi)$$

$$Oy = a \sin \alpha \sin 2\pi t/T$$

$$\phi = e (n_g - n_p) / \lambda$$

$$\lambda = \text{longueur d'onde} \quad \lambda = cT$$

\* l'onde traverse la lame d'épaisseur  $e$  avec les vitesses  $c/n_p$  dans la direction  $np$   $c/n_g$  dans la direction  $ng$

\* on décompose cette onde sur les axes de  $np$  et  $ng$

$$OX = OP \cos \alpha$$

$$Oy = OP \sin \alpha$$

\* cette onde arrive sur la lame à faces parallèles caractérisée par ses directions  $ng$  et  $np$  et qui fait un angle  $\alpha$  avec l'onde incidente

\* onde incidente polarisée rectilignement

$$OP = a \sin 2\pi t/T$$

$$T = \text{période}$$

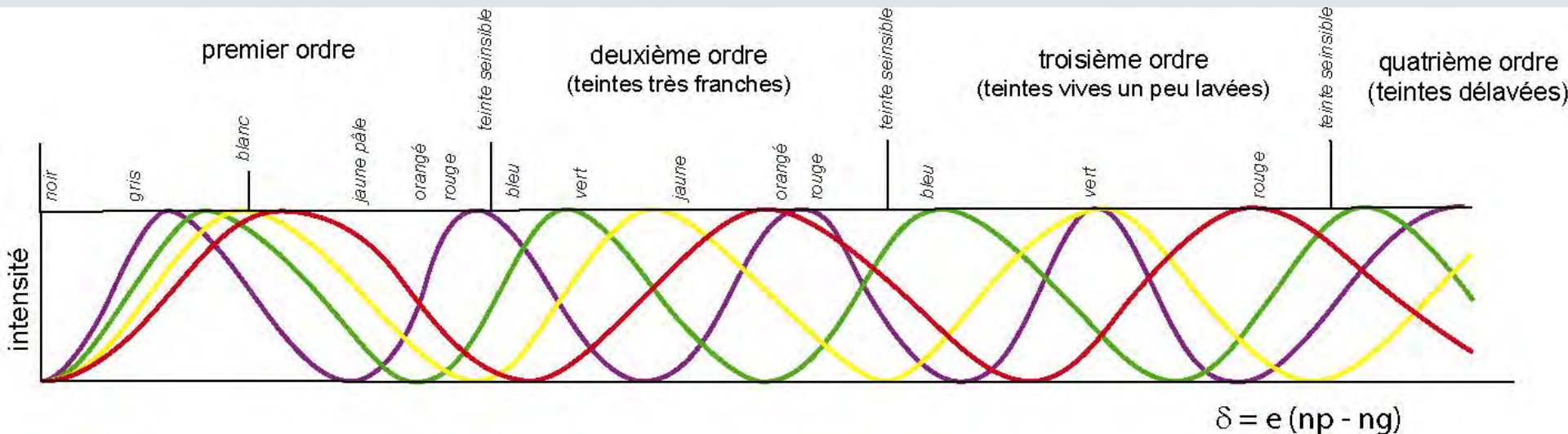






## Intensité à la sortie $a^2 \sin^2 2a \sin^2(\pi e (n_g - n_p)/\lambda)$

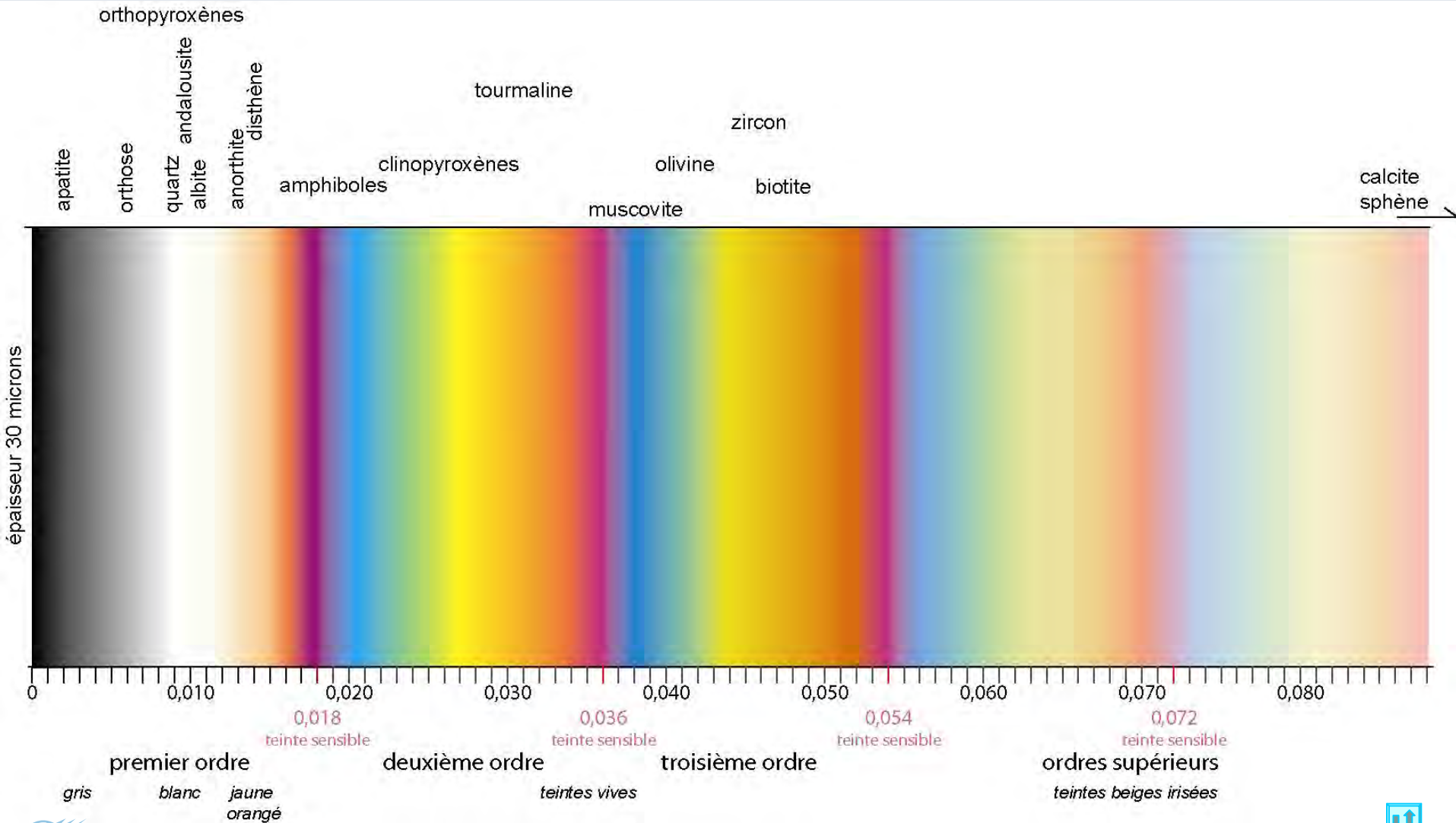
L'intensité à la sortie dépend de la longueur d'onde. La lumière incidente étant une lumière blanche, il faut donc intégrer sur la gamme des longueurs d'onde.



- A  $\delta$  croissant, on obtient une gamme de couleurs appelée **échelle de Michel-Lévy**.
- Dans certains minéraux, appelés minéraux **dispersifs** (chlorite, épidote, chloritoïde, etc. ) , l'ellipsoïde des indices dépend de la longueur d'onde : les teintes de polarisation n'appartiennent pas à l'échelle de Michel-Lévy .



# L'abaque de Michel-Lévy





## Intensité à la sortie $a^2 \sin^2 2\alpha \sin^2(\pi e (n_g - n_p)/\lambda)$

- \* Variation avec  $\alpha$  : 4 extinctions par tour  $\alpha = k \pi/2$

Extinction quand les  $n_g$  et  $n_p$  de la section correspondent avec les plans de polarisation du polariseur et de l'analyseur (fils du réticule).  
Intensité maximale à  $45^\circ$  de ces directions d'extinction.

- \* Variation avec  $e$  : les lames minces sont taillées à une épaisseur standard de 30 microns.

Si on connaît  $n_g - n_p$  du minéral, on peut utiliser cette donnée pour mesurer l'épaisseur de la lame  $e$ . C'est d'ailleurs ainsi que le lame-mincier sait que la lame est à la bonne épaisseur de 30 microns : le quartz doit polariser en blanc (entre les jaunes pâles et les gris du premier ordre).

- \* Variation avec  $n_p - n_g$  : c'est la caractéristique du minéral étudié.

Cette valeur varie pour les différentes sections d'un même minéral sa valeur maximum est

$$\Delta = N_g - N_p \quad \text{biréfringence du minéral}$$

Les teintes de polarisation (maximum) sont caractéristiques du minéral.

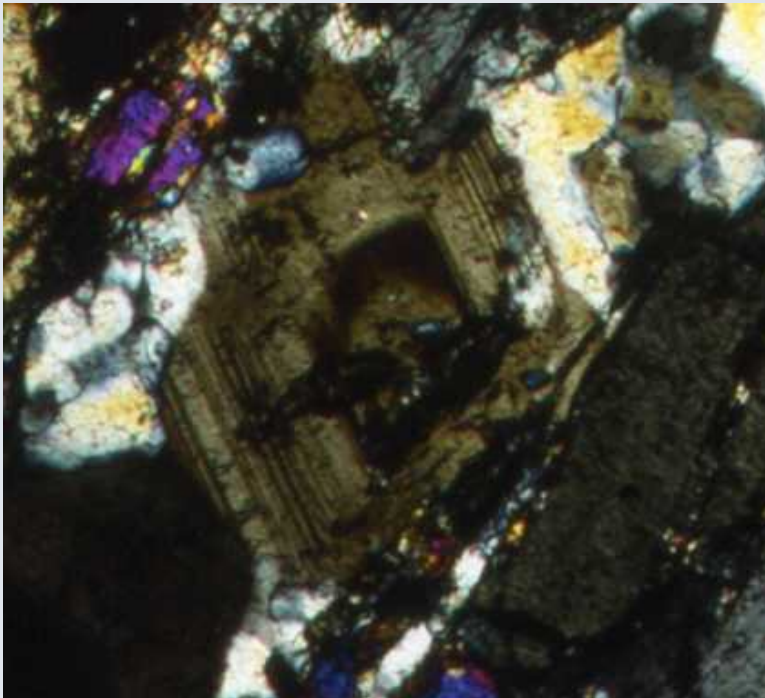
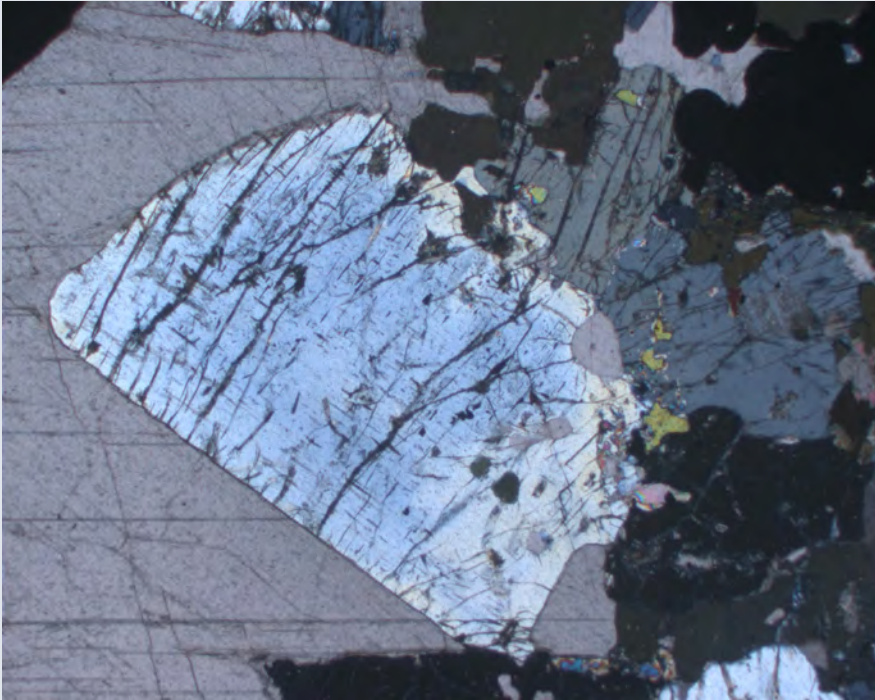




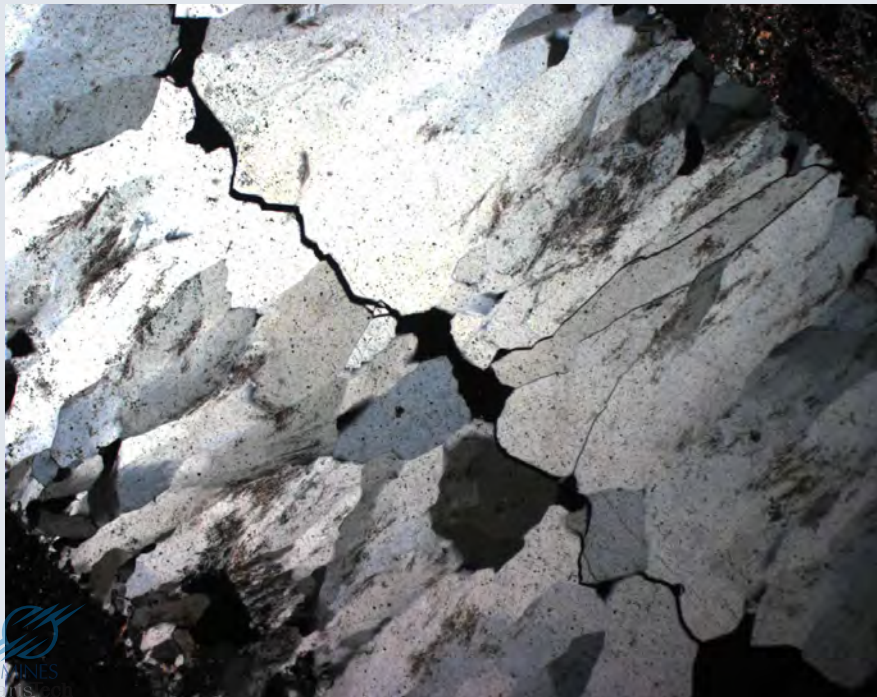
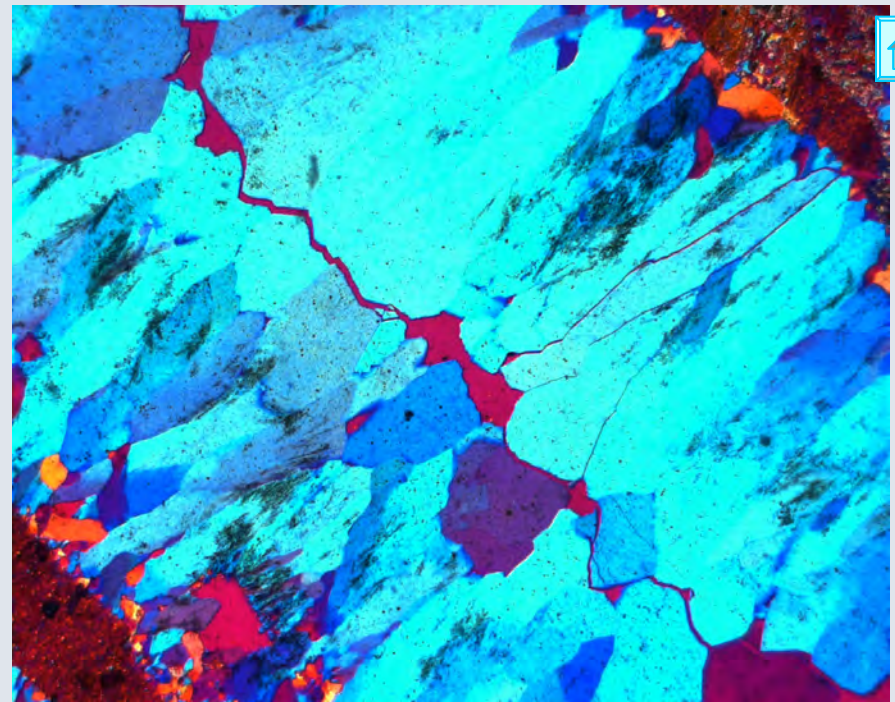
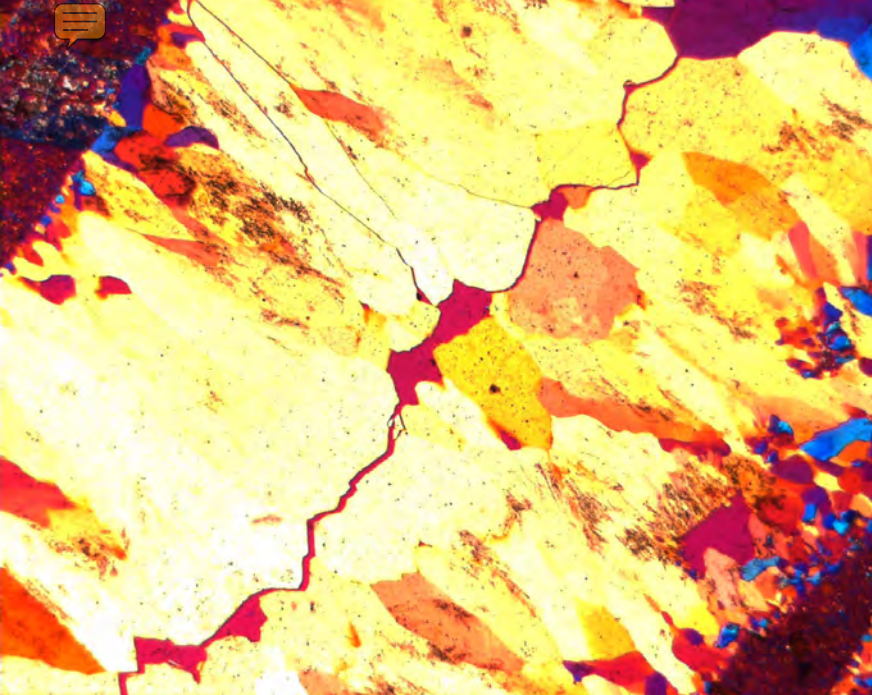
# Minéraux dispersifs

La position de l'ellipsoïde des indices dépend de la longueur d'onde : les couleurs obtenues sont hors échelle de Michel-Lévy.

- *En haut* : teintes gris bleu – gris jaune de la mélilite. 
- *En bas* : brun olivâtre de l'apophyllite ( $\text{KCa}_4\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{F} \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ )
- Autres exemples : chlorite   , clinozoïsite  , pistachite  , vésuvianite  , chloritoïde  ..







## Signe d'allongement

(Exemple de cristaux prismatiques de quartz SW-NW sur la photo *en bas à gauche*)

On ajoute une lame auxiliaire de Ng connu SE-NW et dont l'épaisseur correspond à la teinte sensible  
Si le ng du minéral correspond à celui de la lame auxiliaire, la teinte de polarisation monte dans l'échelle de Newton (*en haut à droite*)

Contre-épreuve : on tourne la lame mince de  $90^\circ$  (*en haut à gauche*) la teinte de polarisation descend dans l'échelle de Newton :

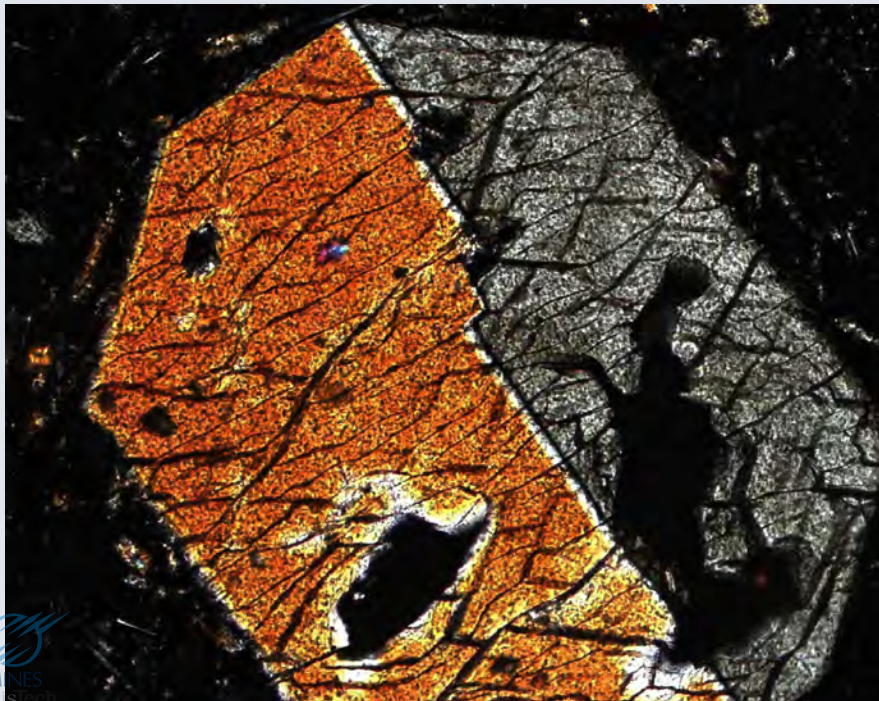
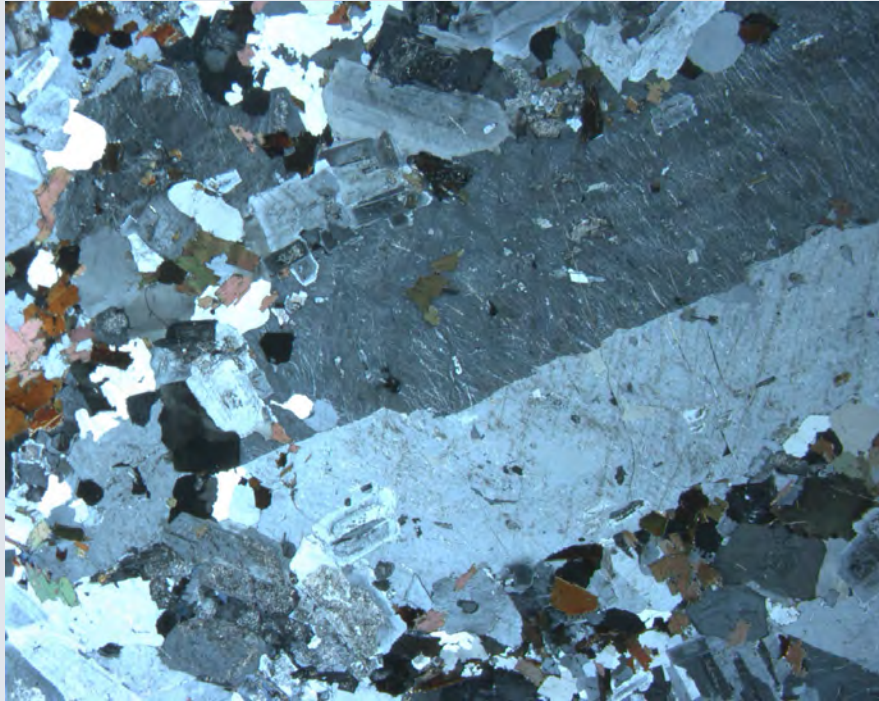
le quartz a un allongement positif







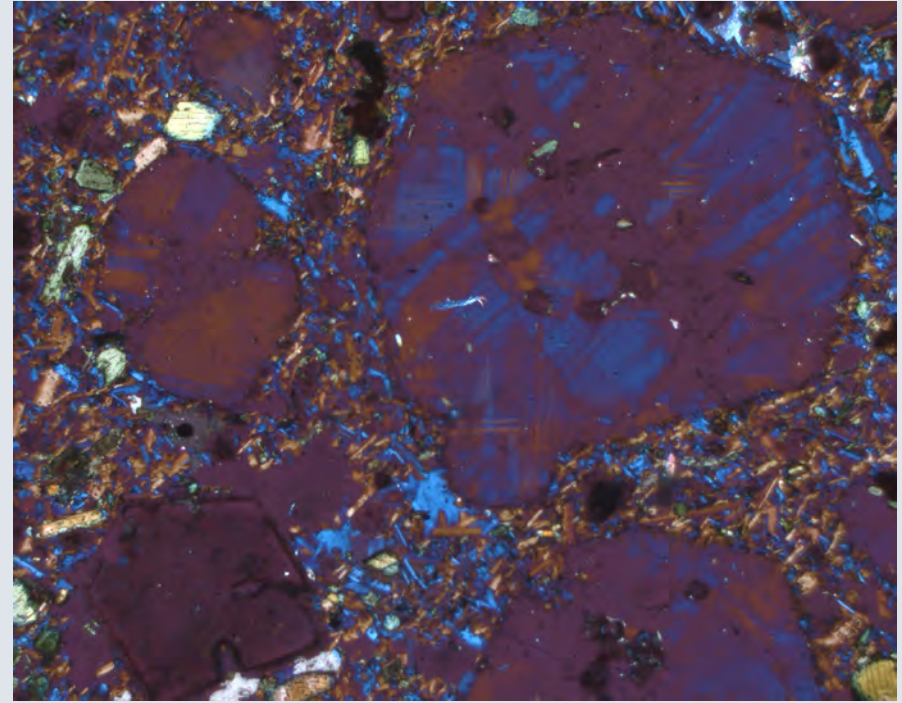
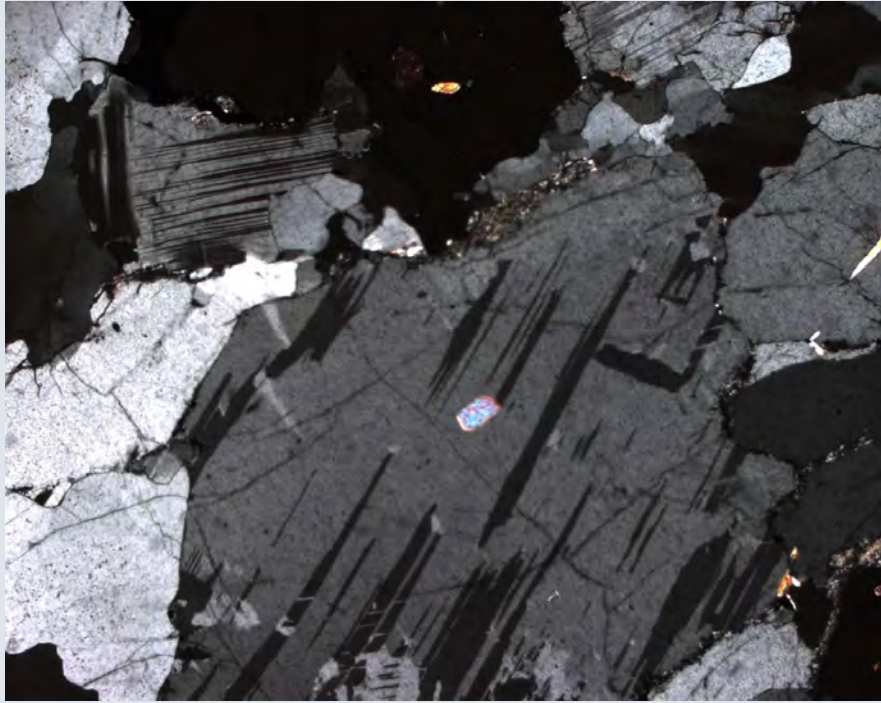
# Macles



- Une macle est une association d'un ou de plusieurs cristaux reliés par une loi de symétrie : par rapport à un plan, le **plan de macle**, ou par rapport à un axe, **axe de macle**.
- Les macles peuvent être simples ou répétées.
- Au microscope, les macles se manifestent par des différences de teintes de polarisation des deux individus.
- *En haut*, une macle simple à axe de macle : la macle de Carlsbad dans une orthose. **La surface d'accolement n'est pas un plan.**
- *En bas*, une macle simple à plan de macle dans un clinopyroxène.



# Macles répétées



Parmi les macles répétées on distingue :

- Les **macles polysynthétiques** où les différents individus forment des lamelles parallèles (*à droite* : macles de la cordiérite ; voir aussi les macles de l'albite et du péricline dans les plagioclases , la grunérite ).
- Les **macles cycliques** où les individus forment une association à peu près circulaire (*à gauche* : macles de la leucite, une lame auxiliaire a été ajoutée afin de mieux faire ressortir les macles).



# Observations en lumière convergente

La source de lumière est maintenant conique :

- les ondes lumineuses traversent la section selon des épaisseurs variables ;
- et rencontrent l'ellipsoïde des indices selon une incidence variable.

Il en résulte une figure d'interférence complexe composée de :

- lignes isochromatiques où les vibrations sont en phase,
- lignes neutres où l'amplitude de la vibration est nulle et qui apparaissent en noir.

Ce n'est que pour des sections particulières que ces figures sont facilement interprétables : sections perpendiculaires à un axe optique et sections perpendiculaires à la bissectrice d'un axe optique.





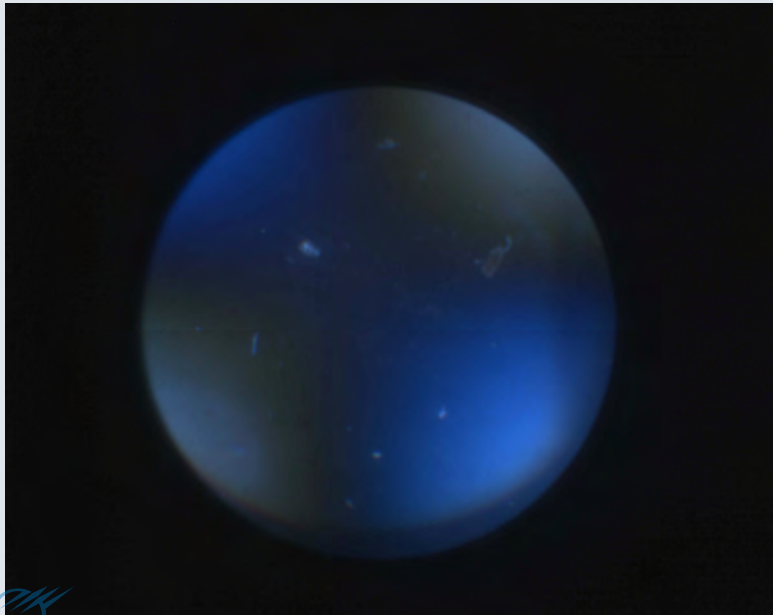
# Faire une figure de lumière convergente

1. Choisir la section étudiée, ce qui est le plus difficile.  
Une section perpendiculaire à un axe optique reste toujours éteinte.  
Si l'on cherche une section perpendiculaire à la bissectrice des axes optiques, il faut avoir une idée sur la nature du minéral et sa structure : par exemple pour les plagioclases sodiques ces sections sont pratiquement perpendiculaires aux deux clivages.
2. Utiliser le plus fort grossissement de sorte que le minéral étudié occupe tout le champ et mettre parfaitement au point.
3. Mettre l'analyseur, si ce n'est déjà fait.
4. Mettre le condenseur et le monter de sorte que sa lentille touche presque la lame.
5. Les observations se font soit en retirant l'objectif (et en utilisant éventuellement un œilleton), soit en mettant la lentille de Bertrand.



# Section perpendiculaire à l'axe optique

Un **minéral uniaxe négatif** : la tourmaline.

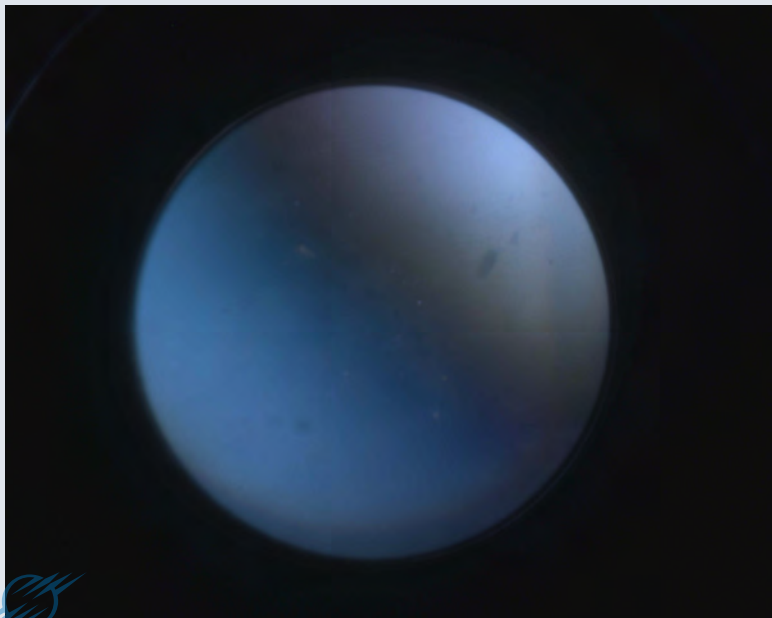
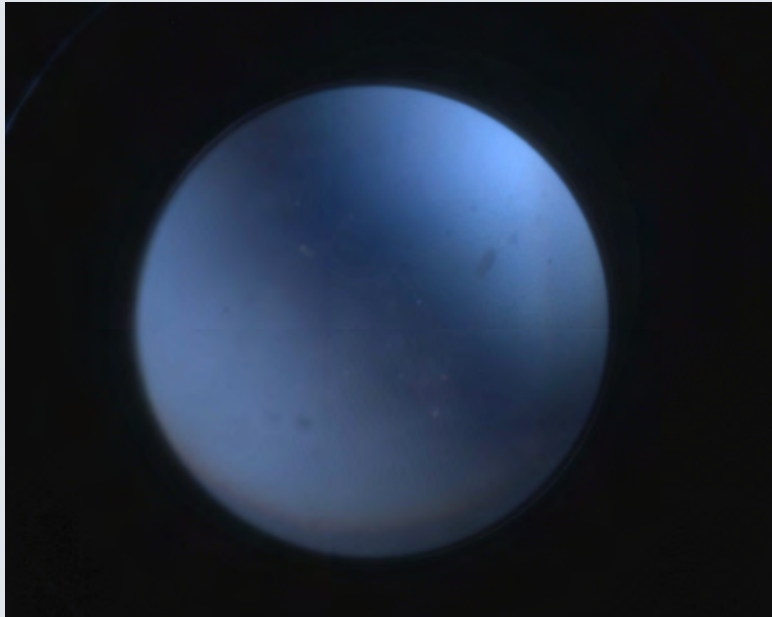


- Les lignes neutres sont deux droites parallèles aux plans de polarisation des nicols (donc selon les fils du réticule) et forment une **croix noire**, parfaitement centrée si la section est effectivement perpendiculaire à l'axe optique.
- Cette croix noire ne se déplace pas lorsque l'on tourne la platine.
- Les lignes isochromatiques sont des cercles centrés sur l'axe du microscope (invisibles ici).
- Si l'on ajoute une lame auxiliaire, les quadrants prennent des couleurs contrastées :
  - bleu au NE et SW et orange au NW et SE pour un minéral uniaxe positif,
  - l'inverse : bleu au NW et SE, orange au NE et SW, pour un uniaxe négatif (ce qui est le cas ici).

# Section perpendiculaire à l'axe optique



Un **minéral biaxe négatif** : une amphibole.



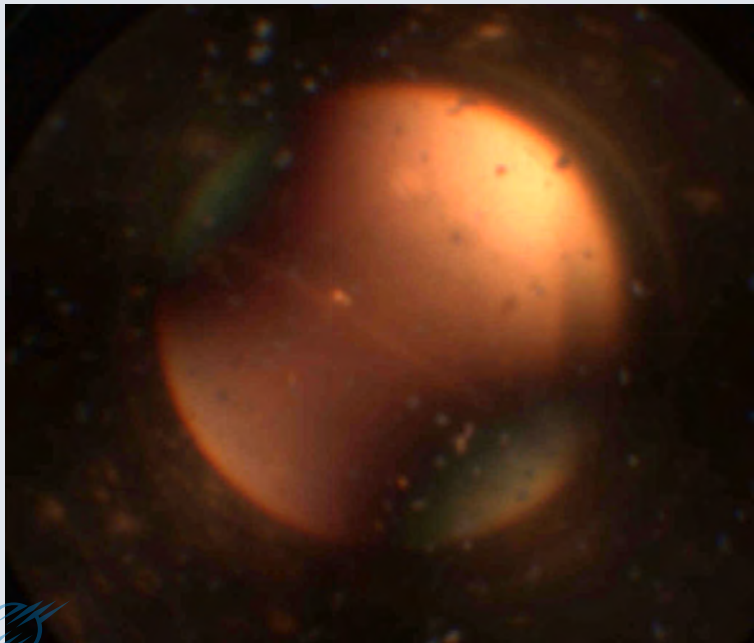
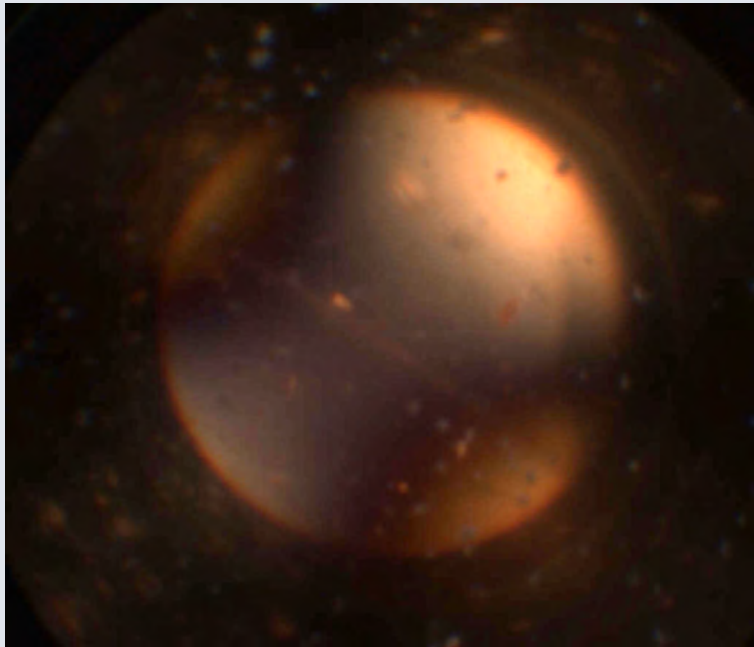
- La ligne neutre est une **branche d'hyperbole** passant par le centre du champ.
- Si l'on tourne la platine, l'hyperbole tourne en sens inverse, se réduisant 4 fois par tour à une droite parallèle à l'un des fils du réticule.
- Les lignes isochromatiques (invisibles ici) sont des courbes voisines d'ovales de Descartes.
- La courbure de l'hyperbole est fonction de  $2V$  : très forte pour  $2V$  petit, voisine de la courbure du champ pour  $2V = 45^\circ$ , presque droite pour  $2V$  voisin de  $90^\circ$ . Ici  $2V$  peut être estimé à  $70-80^\circ$ .
- Si l'on ajoute une lame auxiliaire, la concavité de la branche d'hyperbole étant dans le quadrant NE :
  - Si le minéral est biaxe positif, le quadrant NE prend des teintes bleues (plus élevées dans l'échelle de Newton), le quadrant SW des teintes orangé, jaune...
  - Si le minéral est biaxe négatif (ce qui est le cas ici), c'est l'inverse qui s'observe.





# Section perpendiculaire à la bissectrice de l'axe optique

Un **minéral biaxe négatif** : la biotite

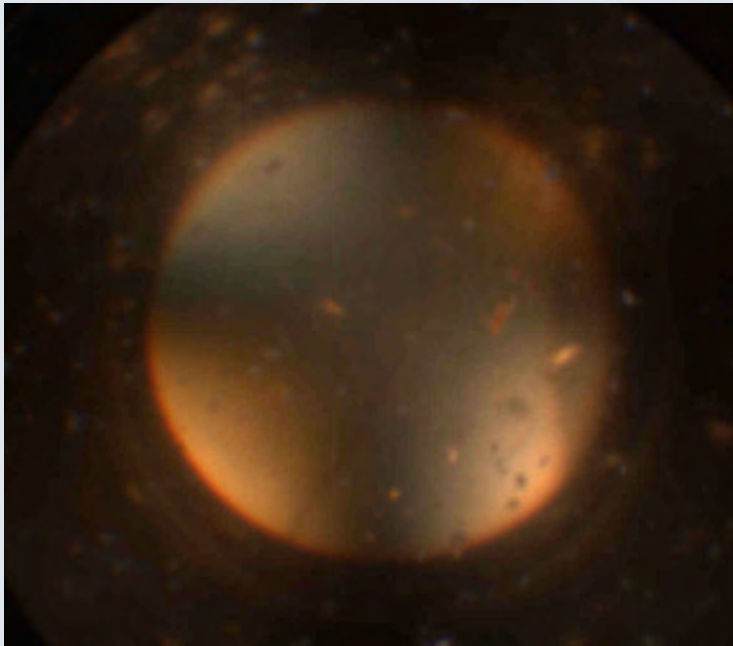


- Les lignes neutres sont une **hyperbole équilatère** qui admet les fils du réticule (plans de polarisation) pour asymptotes et passe par la trace des axes optiques dans le champ.
- L'excentricité de l'hyperbole dépend donc de  $2V$  : presque une croix pour  $2V$  petit, très ouverte, en limite du champ, pour  $2V$  voisin de  $45^\circ$  (ici on est voisin de  $20-25^\circ$ ).
- Si l'on tourne la platine, cette hyperbole se déforme et se réduit à une croix noire quatre fois par tour.
- Les lignes isochromatiques sont voisines d'ovales de Cassini (invisibles ici).

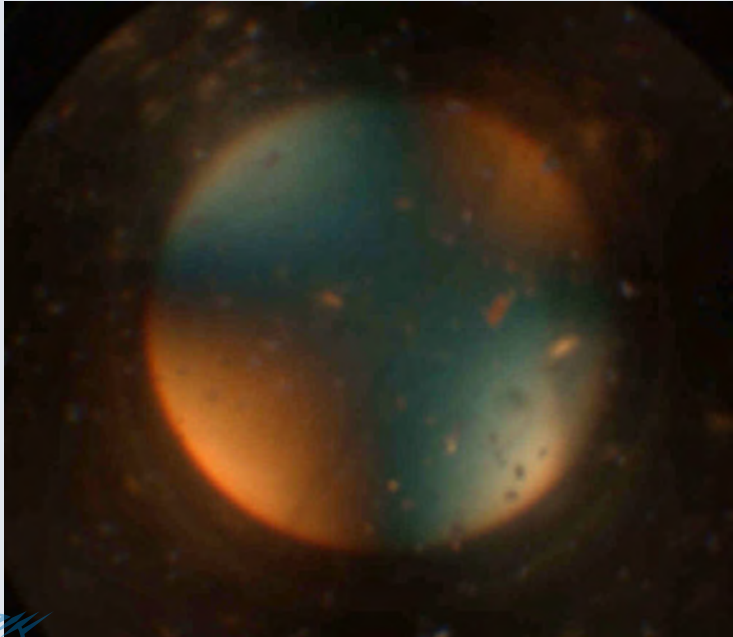


# Section perpendiculaire à la bissectrice de l'axe optique

Un **minéral biaxe négatif** : la biotite



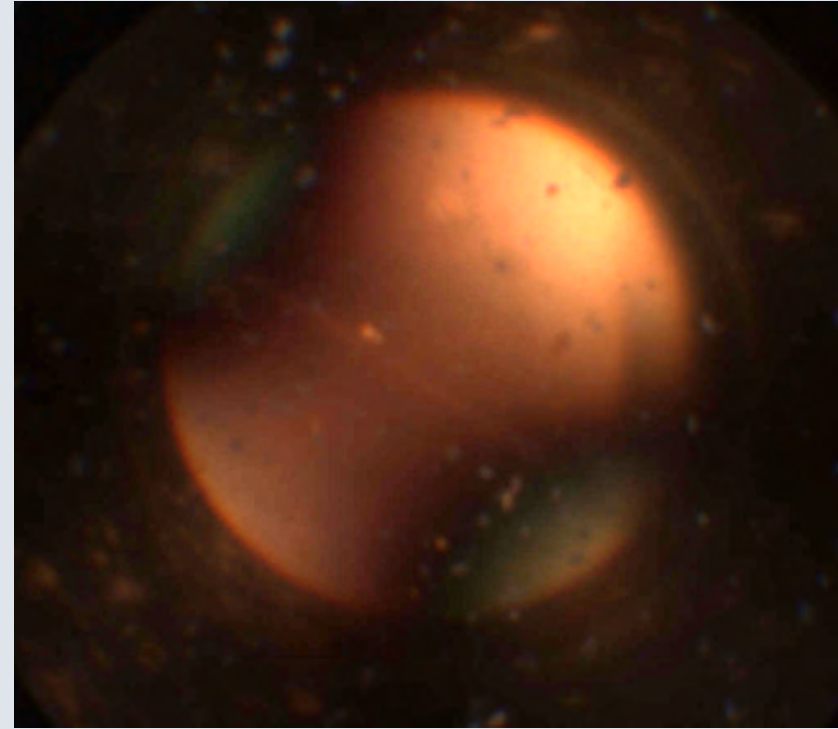
- La section précédente a été tournée de  $90^\circ$  de sorte que les deux branches d'hyperboles soient désormais dans les quadrants NE et SW (à vrai dire peu séparées).
- Si l'on ajoute une lame auxiliaire (image du bas) :
  - les quadrants NE et SW passent dans les bleus et les quadrants NW et SE dans les oranges si *Ng* est bissectrice des axes optiques : minéral **biaxe positif** ;
  - c'est l'inverse si *Np* est bissectrice des axes optiques : **minéral biaxe négatif** (ce qui est le cas ici).





# Dispersion

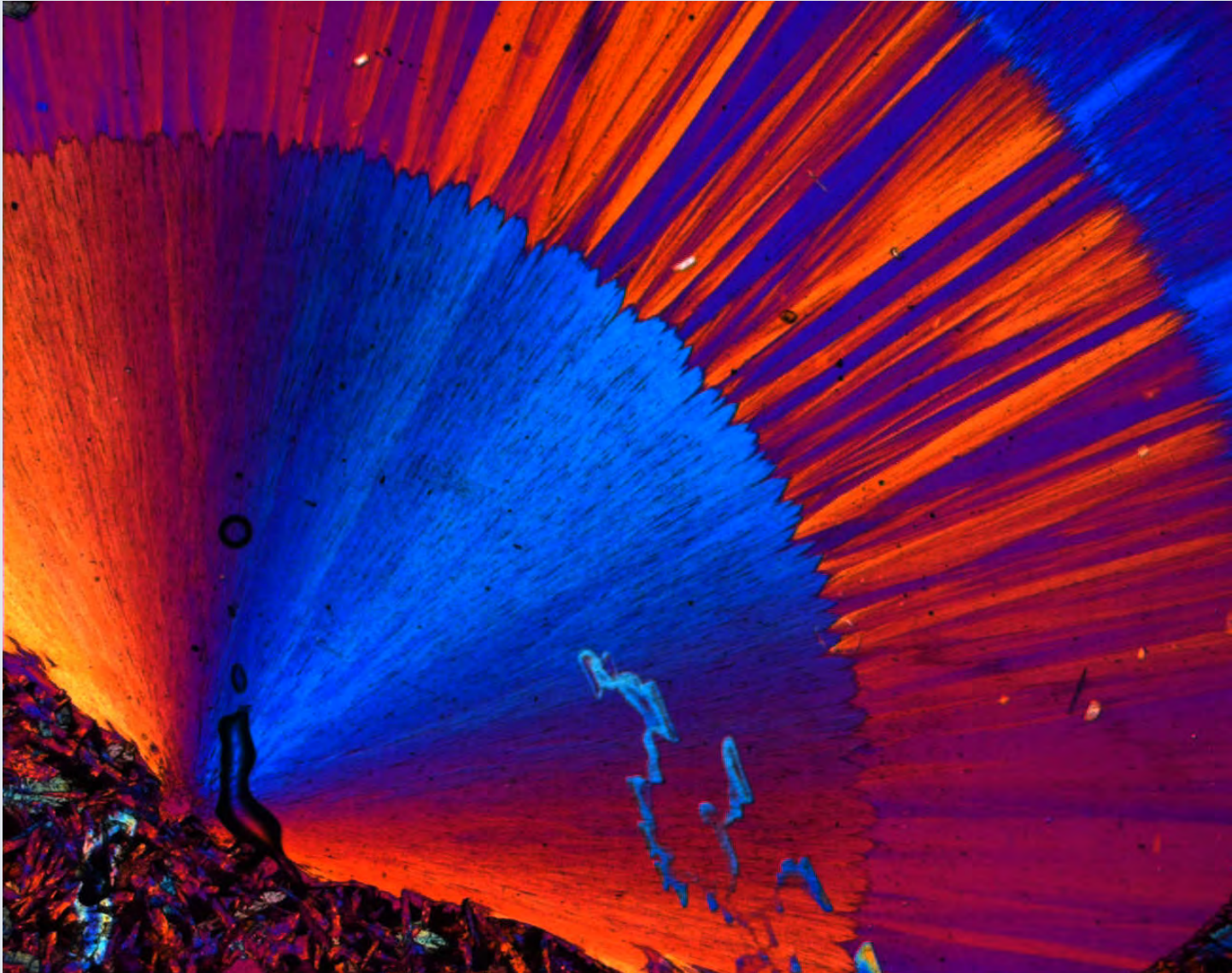
- Dans *certain*s minéraux biaxes, l'angle des axes optiques varie avec la longueur d'onde.
- La figure de lumière convergente faite sur une section perpendiculaire à la bissectrice des axes optiques est une hyperbole équilatère passant par la trace des axes. Dans les minéraux dispersifs, les branches d'hyperbole sont plus ou moins écartées en fonction de la longueur d'onde.
- Si  $2V$  est plus grand pour la lumière rouge que la lumière violette, que l'on note  $r > v$ , on observe une frange rouge dans la concavité des branches d'hyperbole, en une frange bleue dans la convexité de cette hyperbole.
- Dans le cas inverse, que l'on note  $v > r$  ou plus souvent  $r < v$ , la couleur des franges est inversée (*c'est le cas pour la photo ci-contre*).







## 2- Tectosilicates majeurs : quartz, feldspaths, feldspathoïdes





## 2- Quartz – feldspath – feldspathoïdes

### *Sommaire*

#### Groupe de la silice

- Quartz
- Texture granophyrique
- Texture graphique
- Myrmékites
- Calcédoine
- Tridymite
- Coésite

#### • Les feldspaths

- Orthose
- Perthites
- Mésoperthites
- Microcline
- Texture graphique
- Sanidine

Anorthose

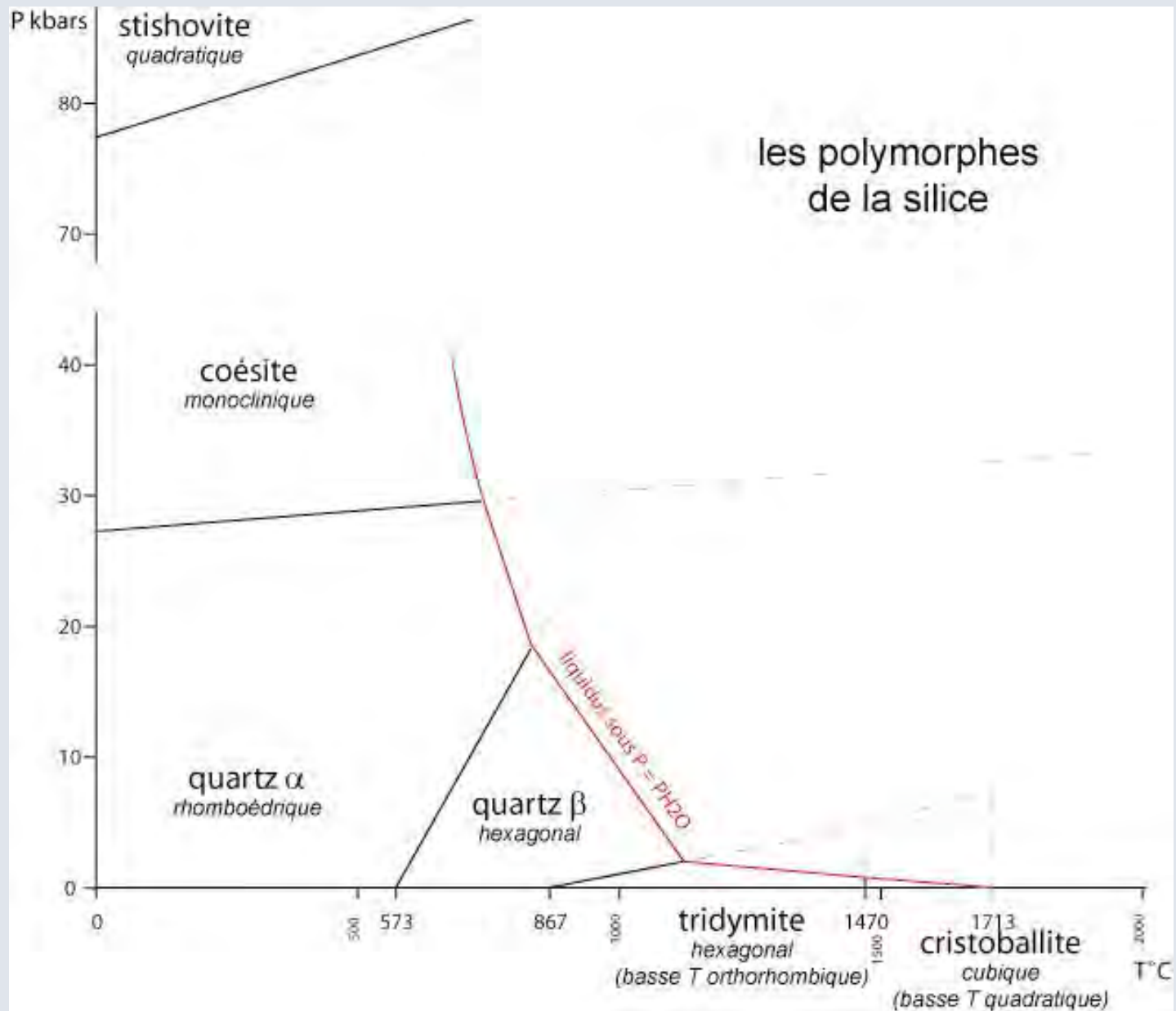
- Plagioclase
- Antiperthites
- Myrmékites
- Séricite
- Saussurite
- Albite en échiquier

#### Les feldspathoïdes

- Népheline
- Cancrinite
- Leucite
- Groupe de la sodalite : haüyne, noséane
- Analcime



# Groupe de la silice $\text{SiO}_2$



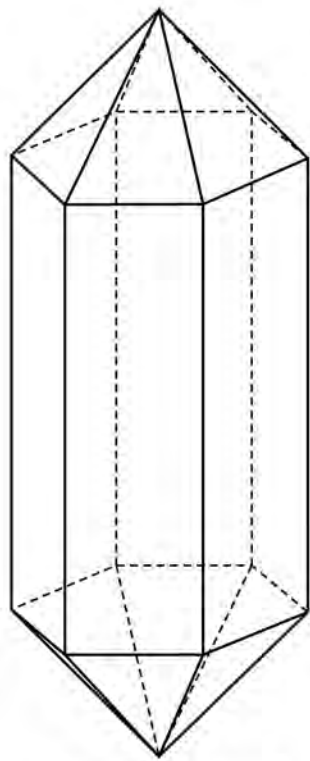




# Quartz

- Le plus souvent sans formes propres.
- A haute température (roches volcaniques), les formes sont des prismes courts bipyramidés.
- A basse température (par exemple les filons), le quartz cristallise en prismes allongés.
- Pas de clivage.
- Incolore.
- Pas d'altération.
- Ng 1,544      Np 1,553  
=> indices voisins de celui du Baume (1,54).
- Biréfringence  $\Delta = 0,009$   
=> polarise dans des gris – blancs du premier ordre.
- Uniaxe positif.

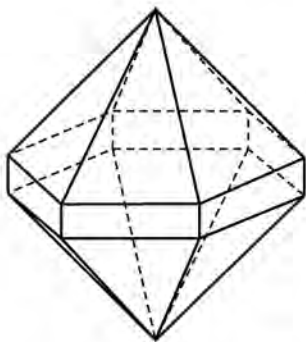
TC



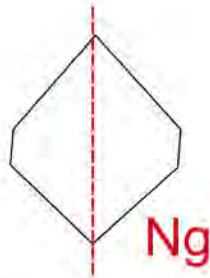
prisme hexagonal  
et pyramide



basse température  
prismes très longs



quartz  
bipyramidé

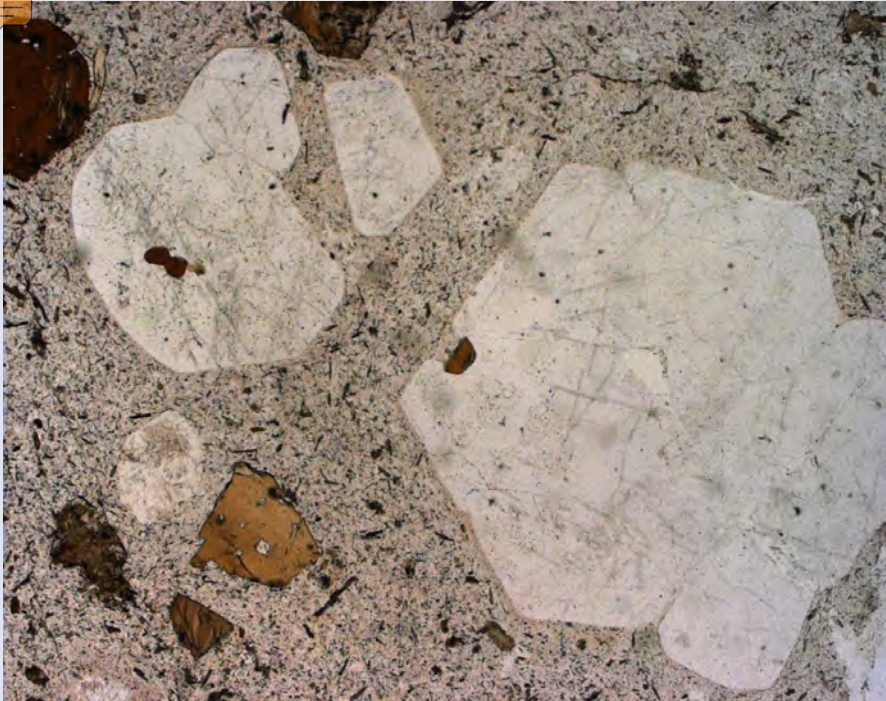


Ng



golfes de  
corrosion

section basale



# Quartz

- Section basale automorphe (hexagonale) dans la partie droite de la photo. Cette section est éteinte en LP.
- La roche est une rhyolite avec d'autres cristaux de quartz et de la biotite en phénocristaux dans un fond microgrenu.

C





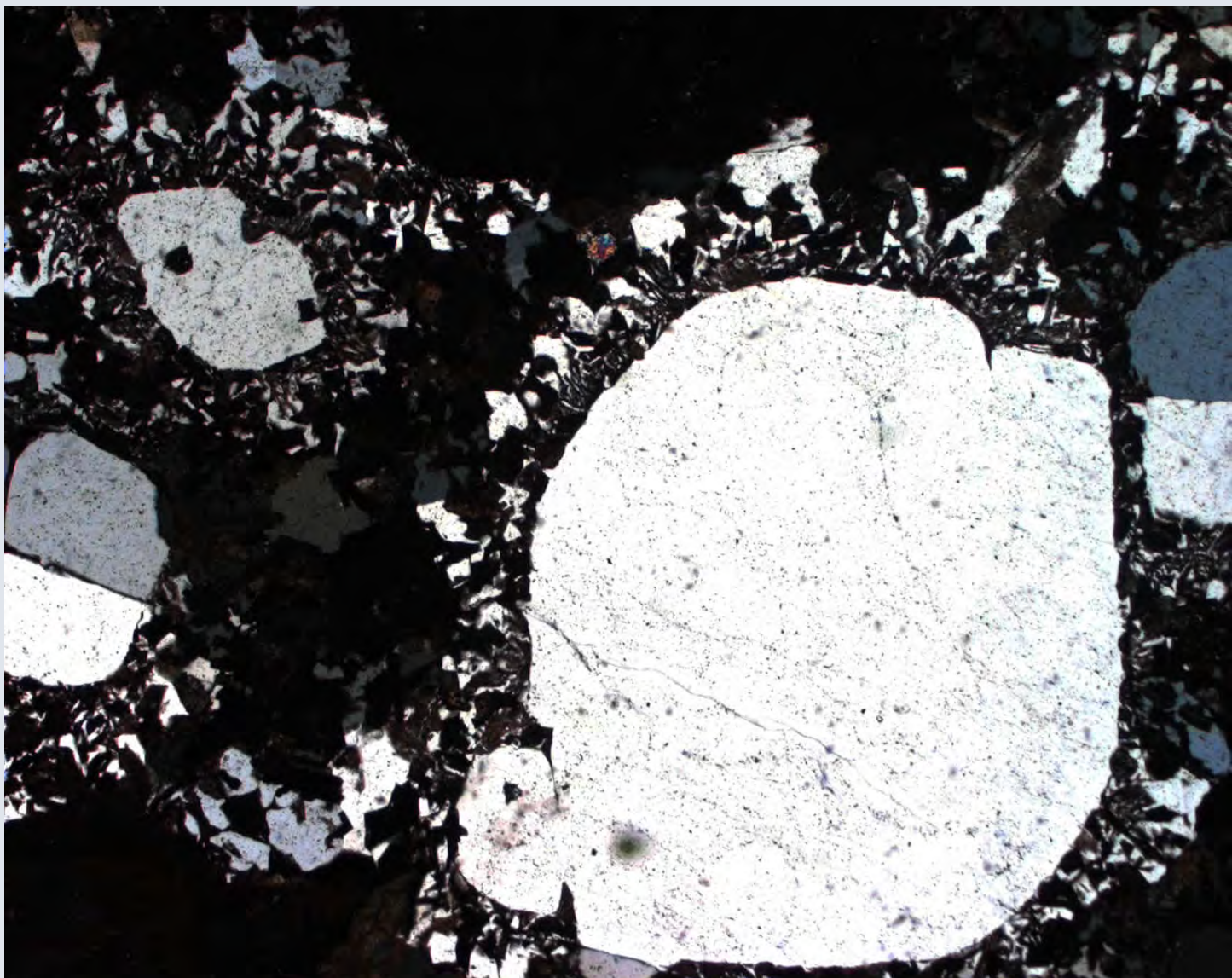
# Quartz



- Cristaux automorphes dans une rhyolite.
- Remarquez en particulier le cristal bipyramidé au centre gauche en LN. Ce cristal est au centre, après rotation de la platine en LP.
- Certains cristaux montrent des golfes de corrosion.

C





## Quartz : texture granophyrique ou micropegmatite

Ce microgranite montre des phénocristaux de quartz dans une matrice à grain fin composée d'orthose, un peu de plagioclase et de quartz ; les phénocristaux de quartz ont servi de germe pour la cristallisation de quartz de la matrice, qui se développent en dendrites orientées de la même façon que les phénocristaux.





Texture granophyrique

Bushveld, Transvaal





# Quartz



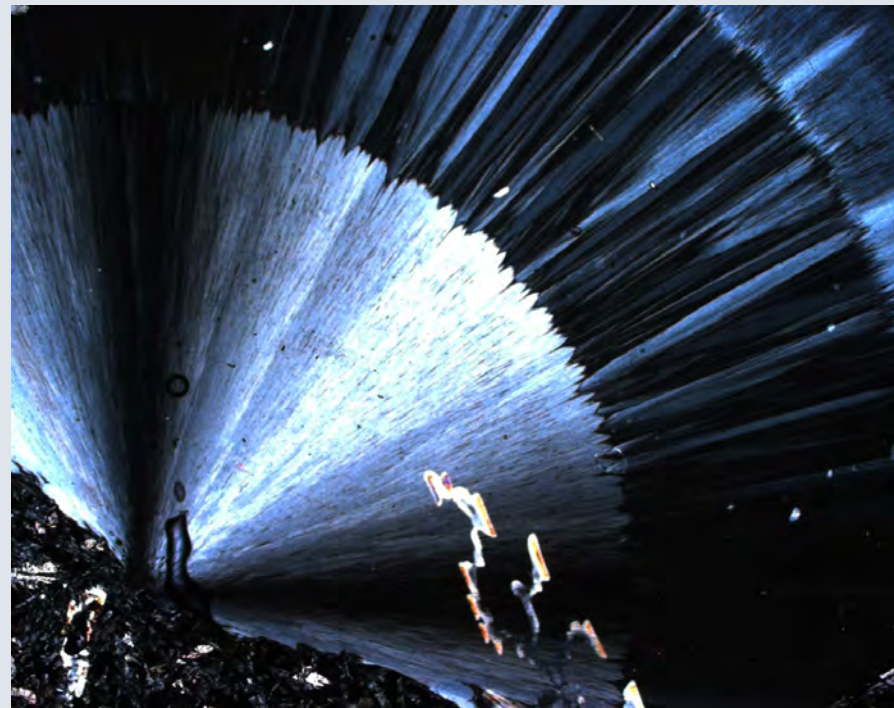
- A basse température, ce sont les formes en prisme, surmontées par une pyramide, qui tendent à prévaloir. Dans les filons (ici une veinule millimétrique), ces prismes poussent perpendiculairement aux épontes, produisant le faciès de « quartz en peigne ».

C





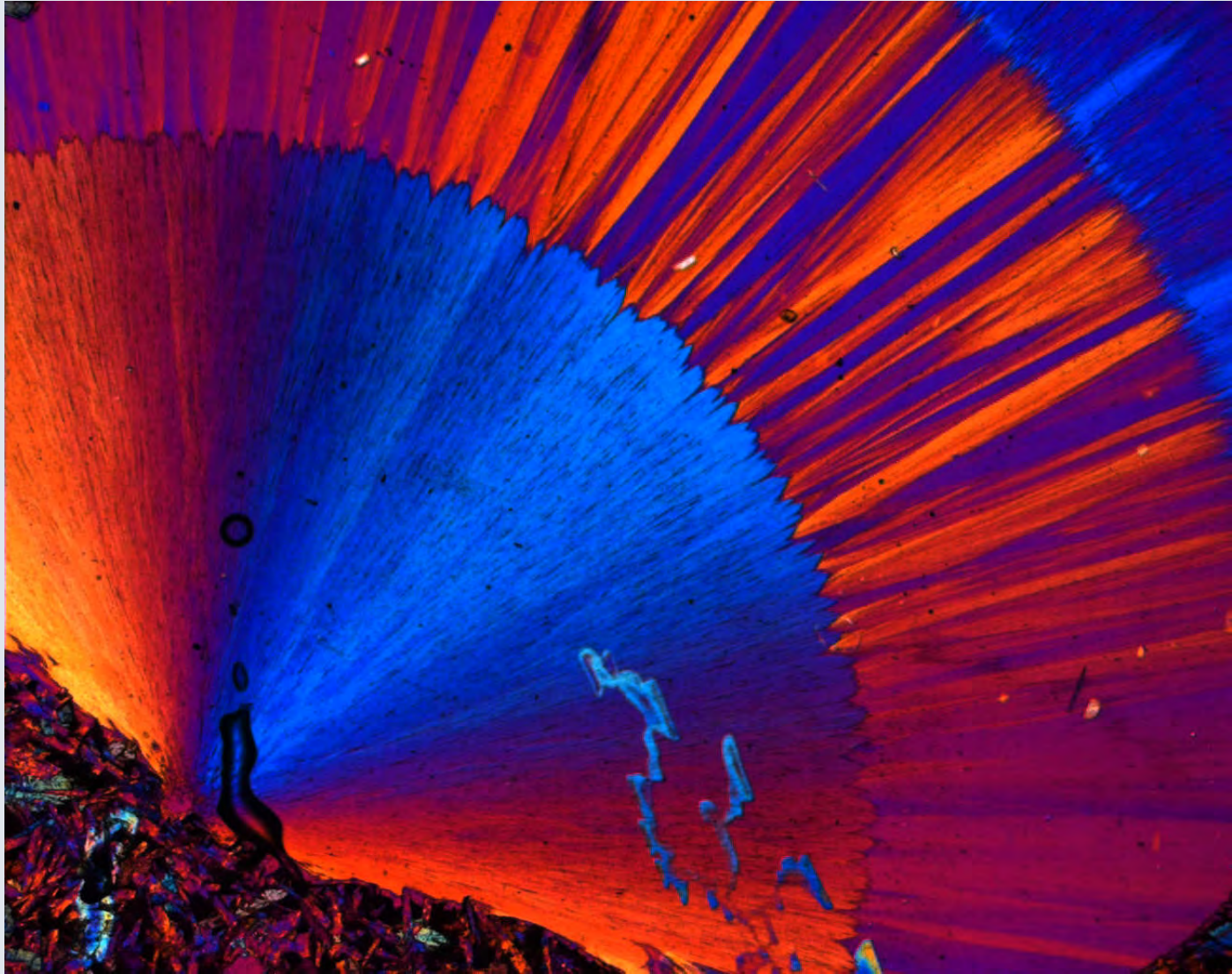
# Calcédoine



- La calcédoine est une variété fibreuse de très basse température du quartz.
- Elle se présente souvent en agrégats fibroradiés donnant lieu en LP au phénomène de croix noire : les fibres sont éteintes en position droite (N-S et E-W) présentent l'éclairement maximum à 45°.
- La calcédoine ci-dessus s'est développée dans une géode de roche volcanique, dont la texture microlithique est reconnaissable dans le coin bas gauche.



# Calcédoine

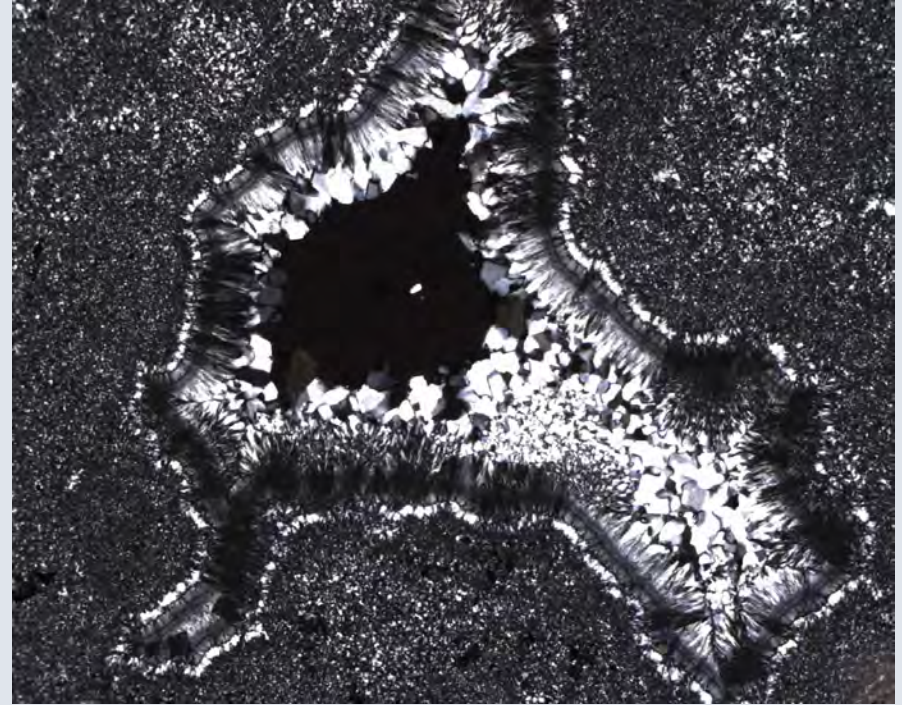
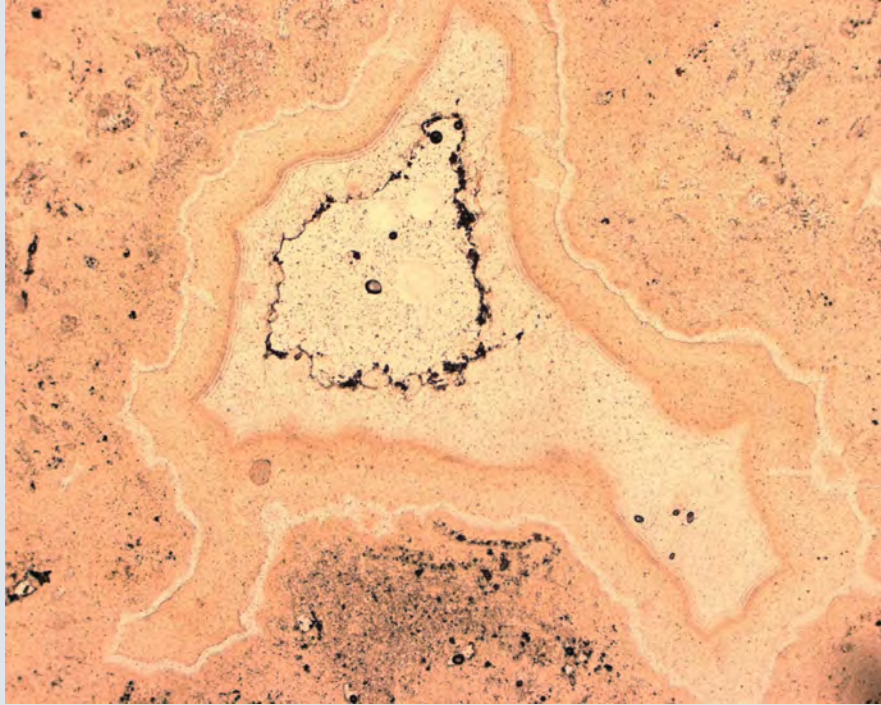


Une lame auxiliaire a été ajoutée à la préparation précédente : les fibres de calcédoine ont un allongement tantôt positif (partie interne et externe : **quartzine**) tantôt négatif (partie médiane : **calcédoine s.s.**).





# Calcédoine



- Une meulière.
- Dans les géodes de ce calcaire silicifié se dépose une première couche de quartz finement cristallin, puis de la calcédoine. Le centre de la géode est partiellement rempli de quartz fin.

C

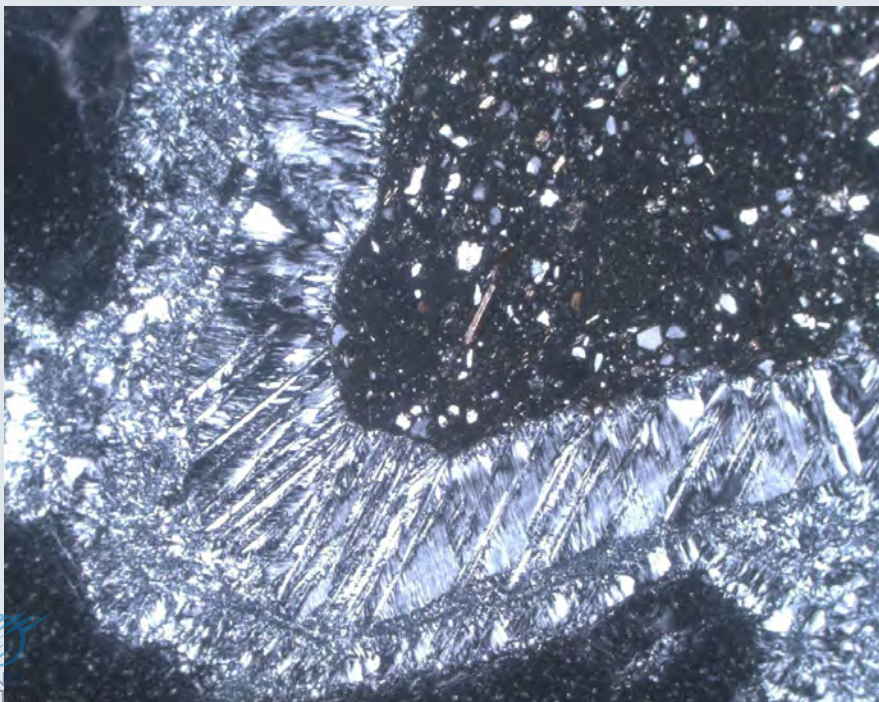
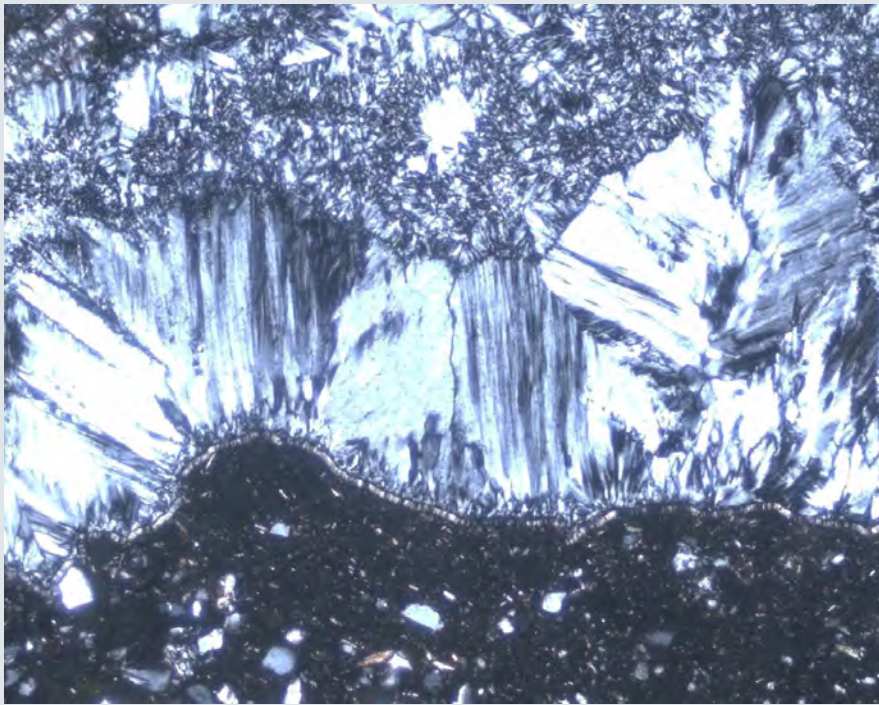




## Lutécite

- Forme fibreuse de silice de basse température mais dont les fibres sont allongées obliquement sur l'axe c (contrairement à la calcédoine et la quartzine) et forment un réseau avec deux directions à  $60^\circ$ .
- Allongement des fibres positif.
- La lutécite dérive ici d'opale.
- Stuart Creek, Australie

R





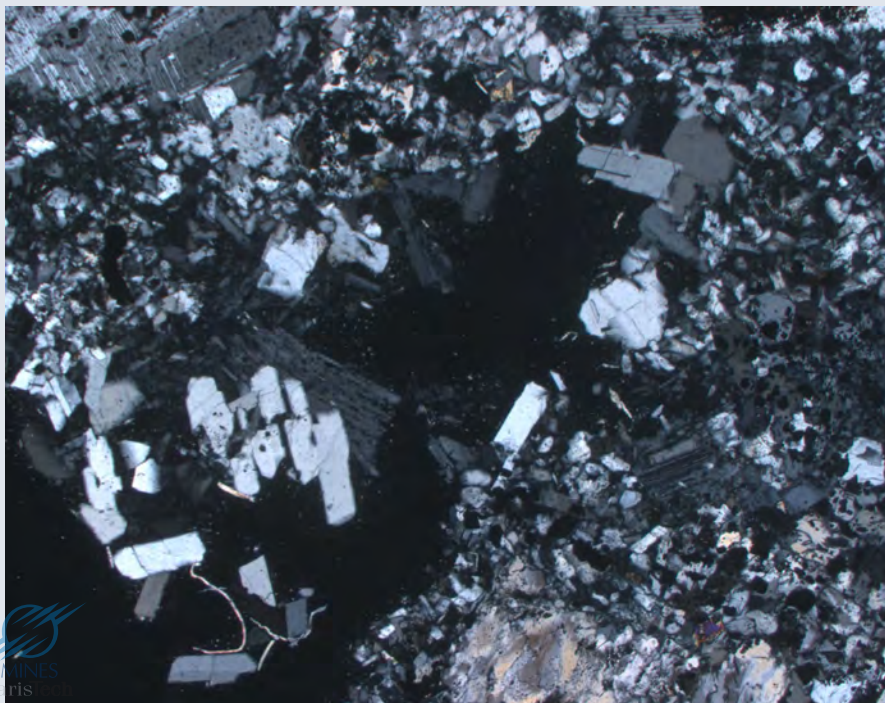
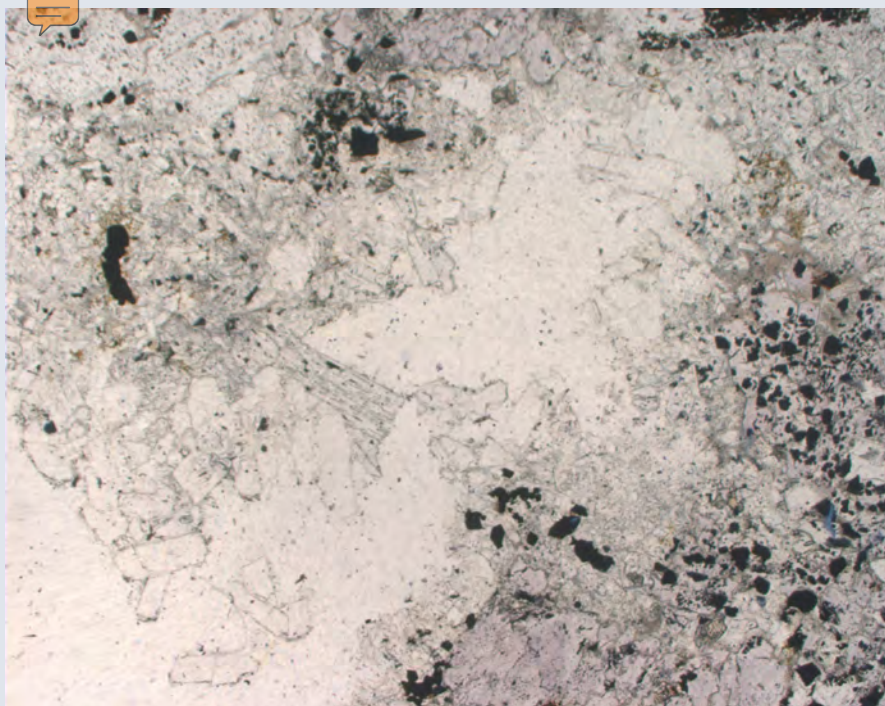
# Quartz – extinction roulante



- Sous l'effet de contraintes, le réseau du quartz est déformé de sorte que la position de l'ellipsoïde des indices varie et que l'extinction ne se produit pas simultanément dans un même cristal, l'extinction progresse comme une onde à travers le cristal . A un taux de déformation plus fort apparaissent des joints de grain (photo de droite) qui préfigurent la rupture. Les contacts entre les cristaux sont marqués de petits cristaux qui proviennent d'une telle rupture : on parle de granulation.
- Le quartz n'est pas le seul minéral à présenter une extinction roulante ; d'autres minéraux comme les micas ou le disthène se déforment ainsi avant de se rompre.







# Tridymite



- Orthorhombique pseudo-hexagonal (hexagonal dans la forme de haute température).
- Tablettes aplaties selon (001).
- Macles en coin (110) commune (pas présente sur l'image).
- Clivage (100) et (010) mauvais, non visible en lame mince.
- Incolore - pas d'altération.
- Ng 1,481 Np 1,477  
=> indices inférieurs à celui du Baume (1,54), nettement inférieurs à ceux du quartz;
- Biréfringence  $\Delta = 0,004$   
=> polarise dans des gris du premier ordre;
- biaxe positif  $2V = 40 - 90^\circ$

## AR

- L'image montre une géode dans un trachyte avec cristaux automorphes de tridymite et de sanidine (Puy de Sancy, Puy de Dôme, France);



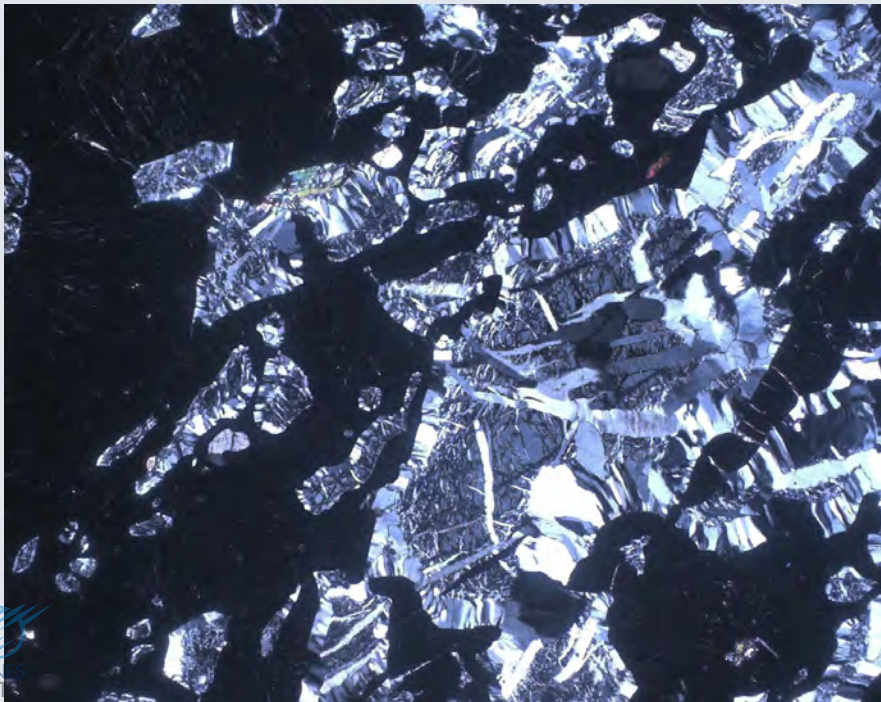




# Coésite



- Monoclinique.
- Pas de formes, généralement en inclusion dans d'autres minéraux.
- Pas de clivage, des cassures curvilignes
- Incolore - pas d'altération.
- Ng 1,599      Np 1,593  
=> indices nettement supérieurs à ceux du quartz.



- L'image montre de la coésite en inclusion dans un grenat. La coésite est largement transformée en quartz, dont elle se distingue par son fort indice. La transformation de coésite en quartz crée une augmentation de volume et provoque la formation de fissures radiales dans le grenat.
- Parigi, massif de Dora Maira, Piémont, Italie;

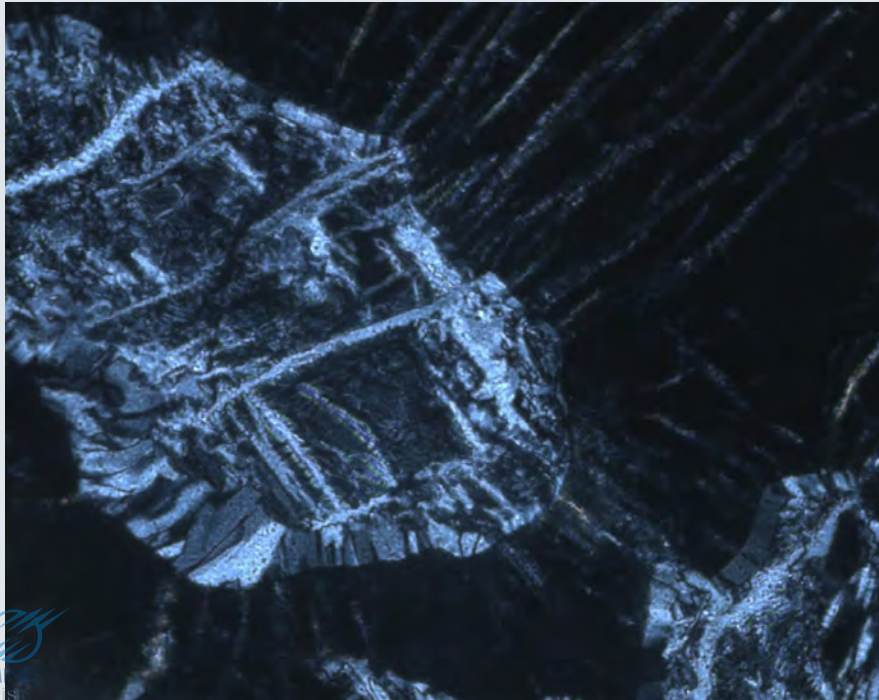
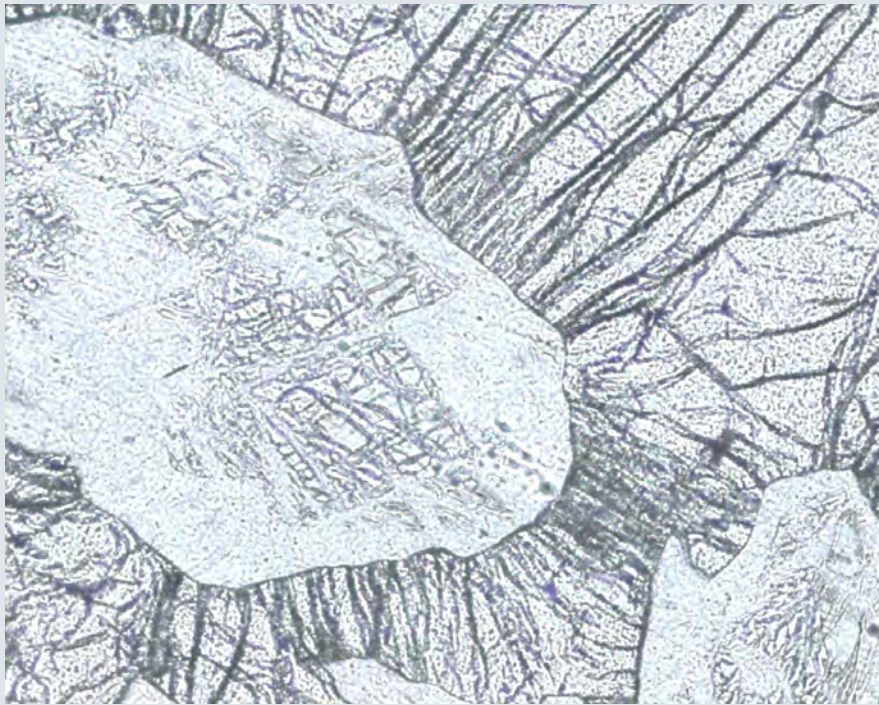
TR







# Coésite



- Biréfringence  $\Delta = 0,005 - 0,006$   
=> polarise dans des gris du premier ordre, nettement plus sombre que le quartz.
- Biaxe positif  $2V = 54 - 64^\circ$
- $r < v$  faible
- Même échantillon que la photo précédente, mais plus fort grossissement : inclusions de coésite (partiellement transformée en quartz) dans un grenat. La coésite se distingue du quartz par son fort indice et sa plus faible biréfringence : elle polarise en gris foncé alors que le quartz polarise dans des gris plus clairs à blanc.

TR



# Les feldspaths

tectosilicates

monocliniques (orthose, sanidine)  
ou tricliniques  
(microcline, anorthose, plagioclases)

Trois pôles

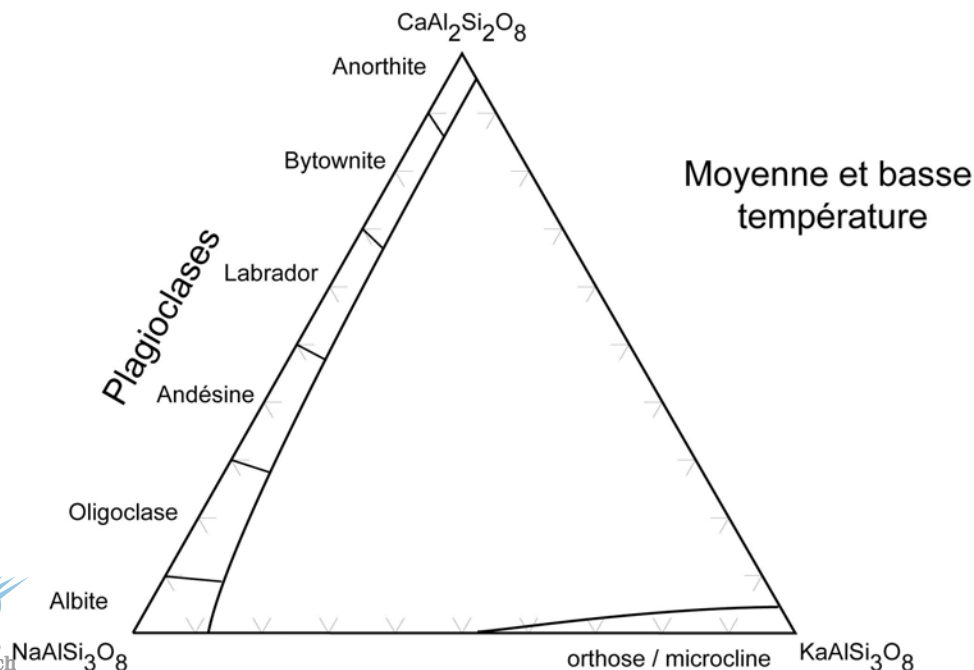
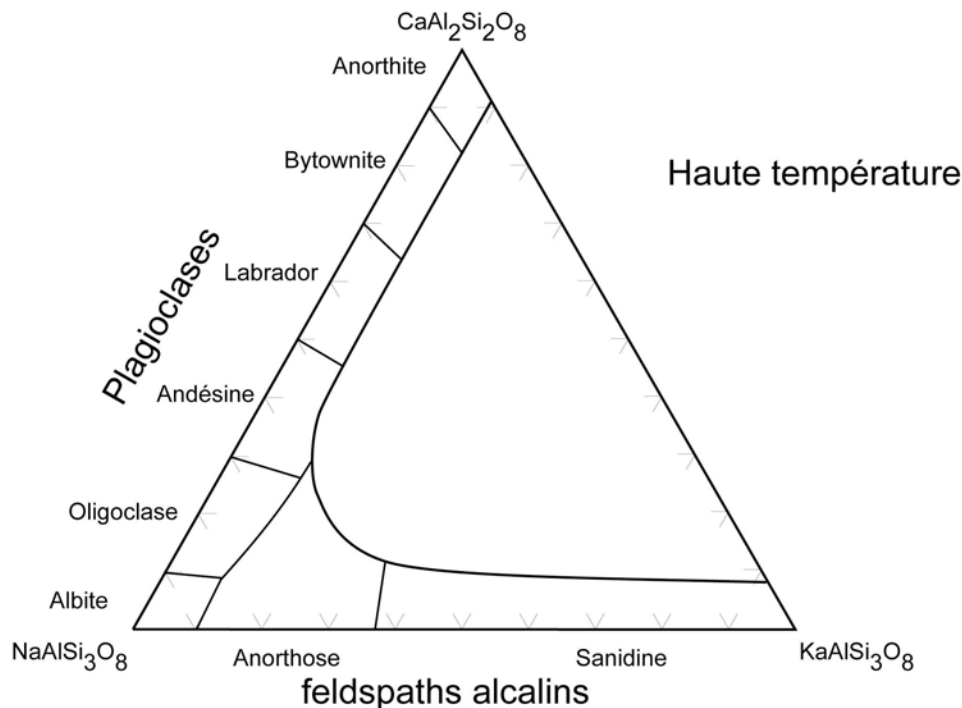


Substitutions



TC

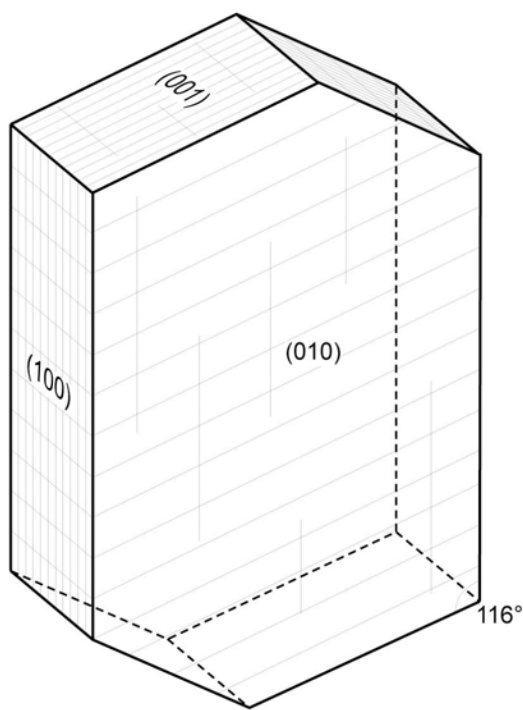
Les feldspaths forment 60 à 65 % de la croûte terrestre.



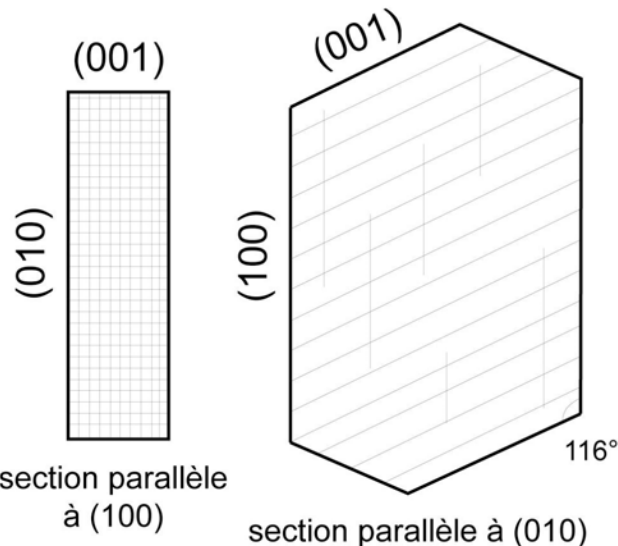




# Feldspaths



formes (traits épais) et clivages (traits fins)  
des feldspaths

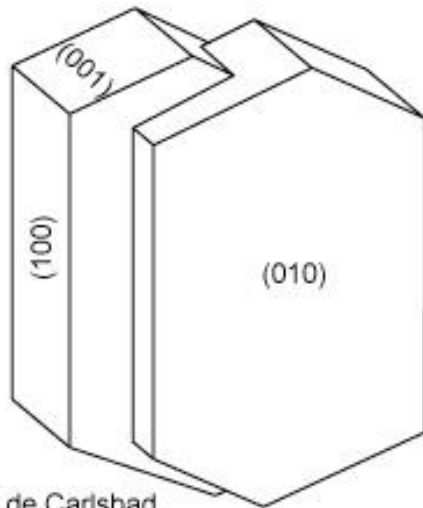


section parallèle  
à (100)

section parallèle à (010)

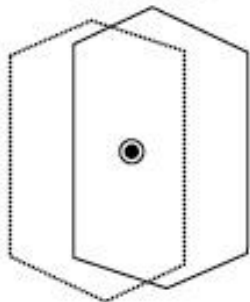
- Tablettes à section hexagonale.
- Sections plus ou moins perpendiculaires à (010) rectangulaires.
- Clivages (010) et (001) parfaits, (100) mauvais.
- Angle entre les clivages :
  - 90° orthose et sanidine (monocliniques)
  - 90° 39' microcline (triclinique)
  - 93-94° plagioclases (tricliniques)
- Dans la sanidine, les clivages demeurent invisibles en lame mince ; il existe des cassures transverses aux tablettes.
- Incolore.
- Altérations :
  - rubéfaction des feldspaths potassiques
  - développement de muscovite sur les feldspaths potassiques
  - séricitisation (muscovite fine) dans les plagioclases
  - saussuritisation (épidote) des plagioclases





**macle de Carlsbad**

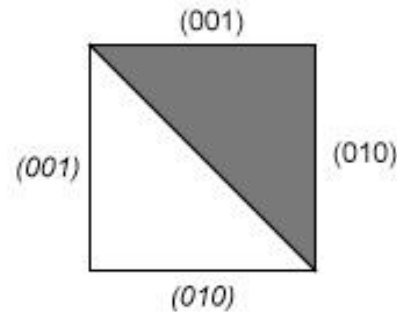
les deux individus se déduisent l'un de l'autre par une rotation autour d'un axe perpendiculaire à la face (010)



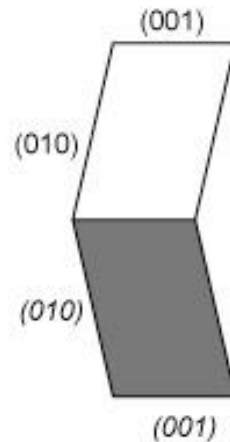
la surface d'accolement des deux individus n'est pas un plan elle montre souvent des décrochements caractéristiques



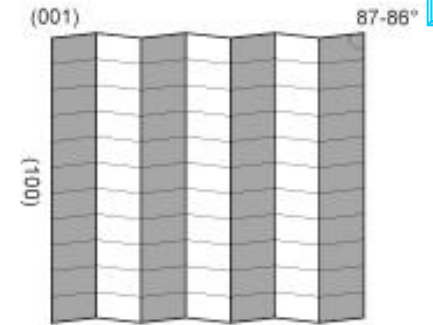
**Macles simples (non répétées)**  
communes à tous les feldspaths



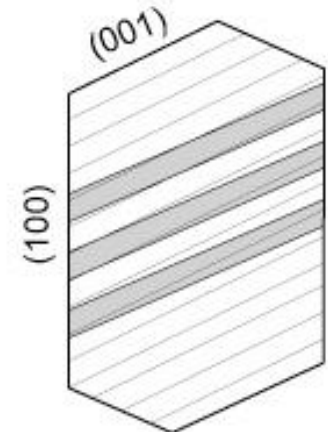
**Macle de Baveno**



**Macle de Manebach**



**Macle de l'albite**  
les deux individus se déduisent l'un de l'autre par une symétrie par rapport au plan (001)



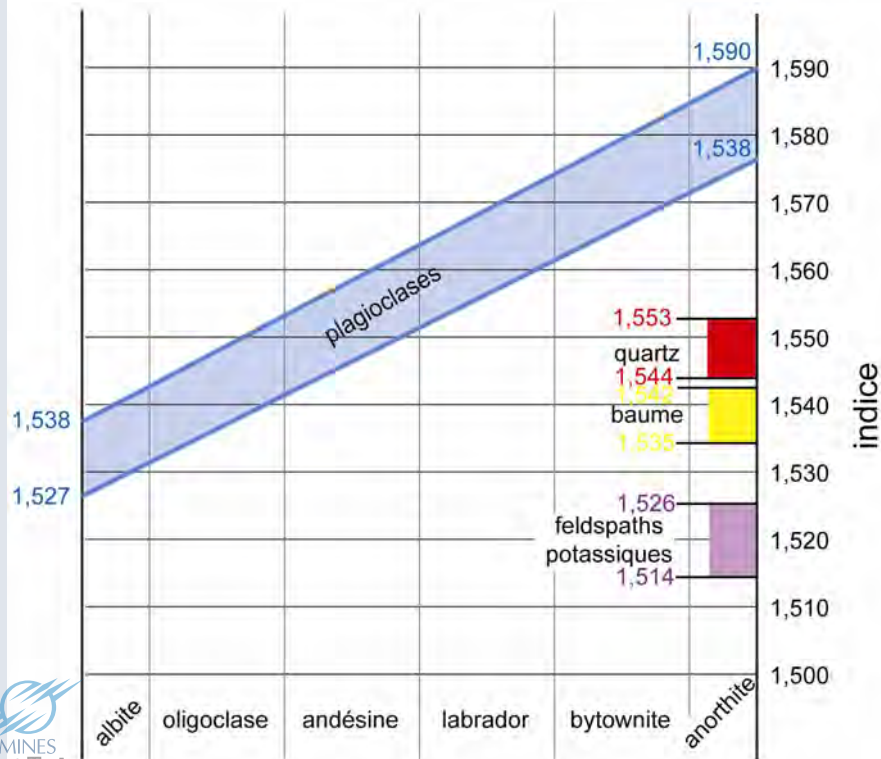
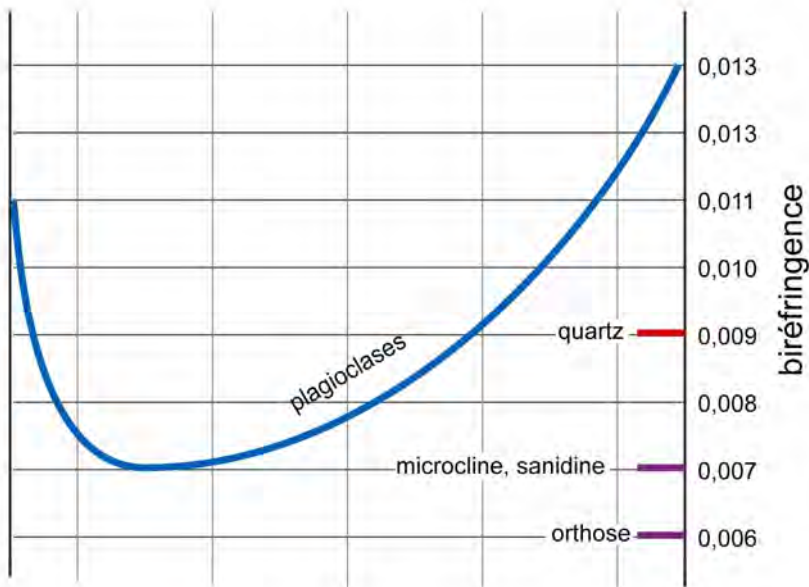
**macle du péricline**  
symétrie autour de l'axe [010]

**Macles répétées**  
dans les plagioclases

# Les macles des feldspaths

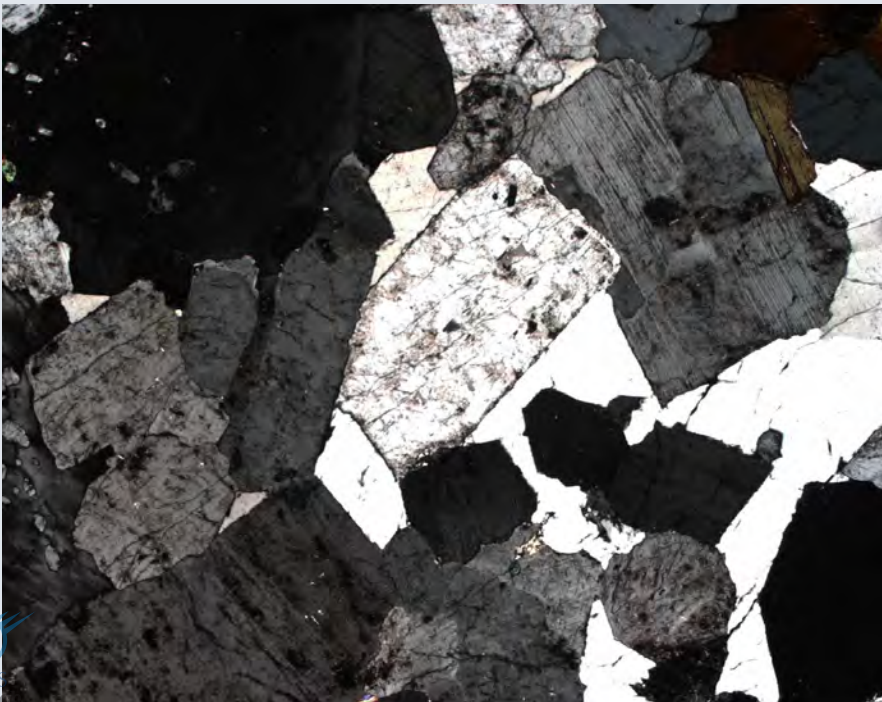
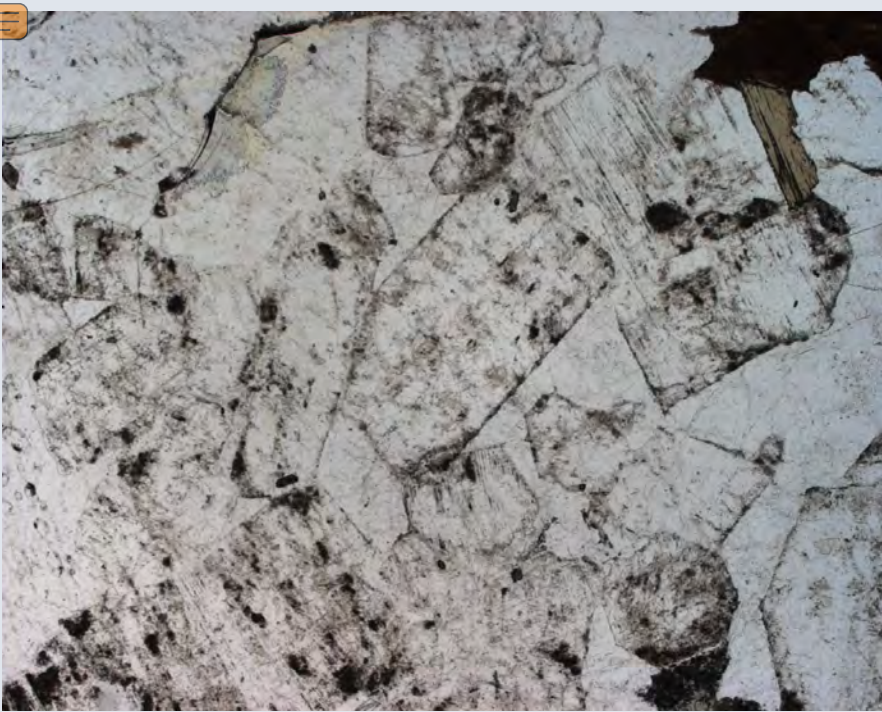


# Feldspaths



- Les indices des feldspaths potassiques sont très nettement inférieurs à ceux du quartz, du Baume et des plagioclases. C'est l'un des caractères de reconnaissance les plus importants.
- Les indices des plagioclases croissent avec la teneur en anorthite : l'albite a un indice nettement inférieur à celui du quartz, l'anorthite très supérieur.
- Les biréfringences des feldspaths potassiques sont très basses : l'orthose polarise en gris foncé du premier ordre, microcline et sanidine atteignent des gris clairs.
- La biréfringence des plagioclase varie avec le teneur en anorthite : l'albite polarise en blanc, l'oligoclase dans des gris foncé, l'anorthite en jaune pâle de la fin du premier ordre.
- Les feldspaths potassiques sont biaxes positifs ; les plagioclases biaxes positifs ou négatifs selon la composition.



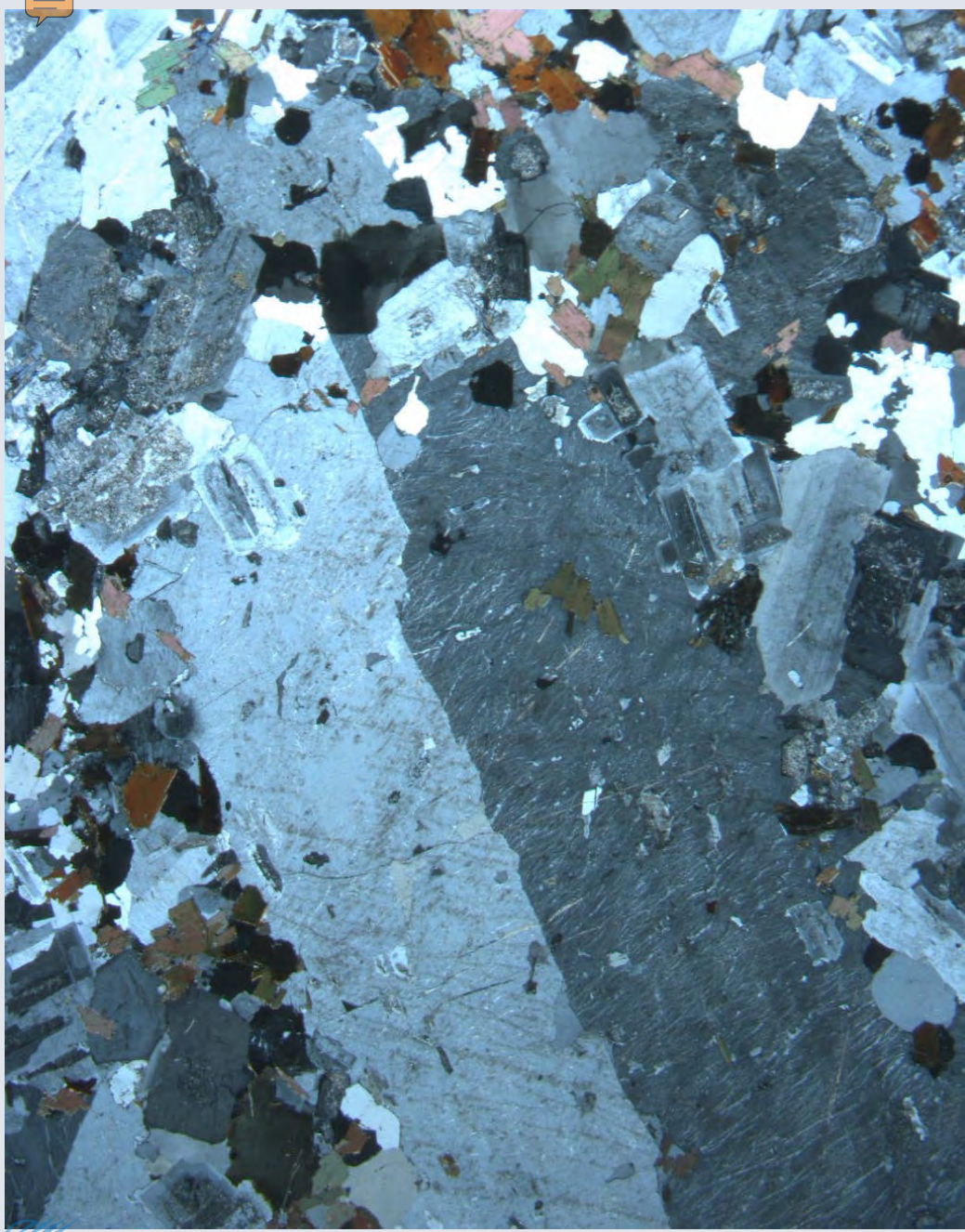


## Feldspaths automorphes dans une roche grenue

- Les feldspaths (orthose et plagioclase, celui-ci reconnaissable aux macles) sont cimentés par du quartz (incolore, limpide, polarisant en blanc).
- Les feldspaths présentent leurs formes propres avec certaines sections rectangulaires et d'autres hexagonales.
- Ils se distinguent du quartz par leurs clivages, altérations, différence d'indice et de biréfringence.

C





# Orthose



Un phénocrystal dans un granite (LP).

Le cristal présente ses formes propres en tablette ; il est formé de deux individus accolés par la macle de Carlsbad (décrochements caractéristiques).

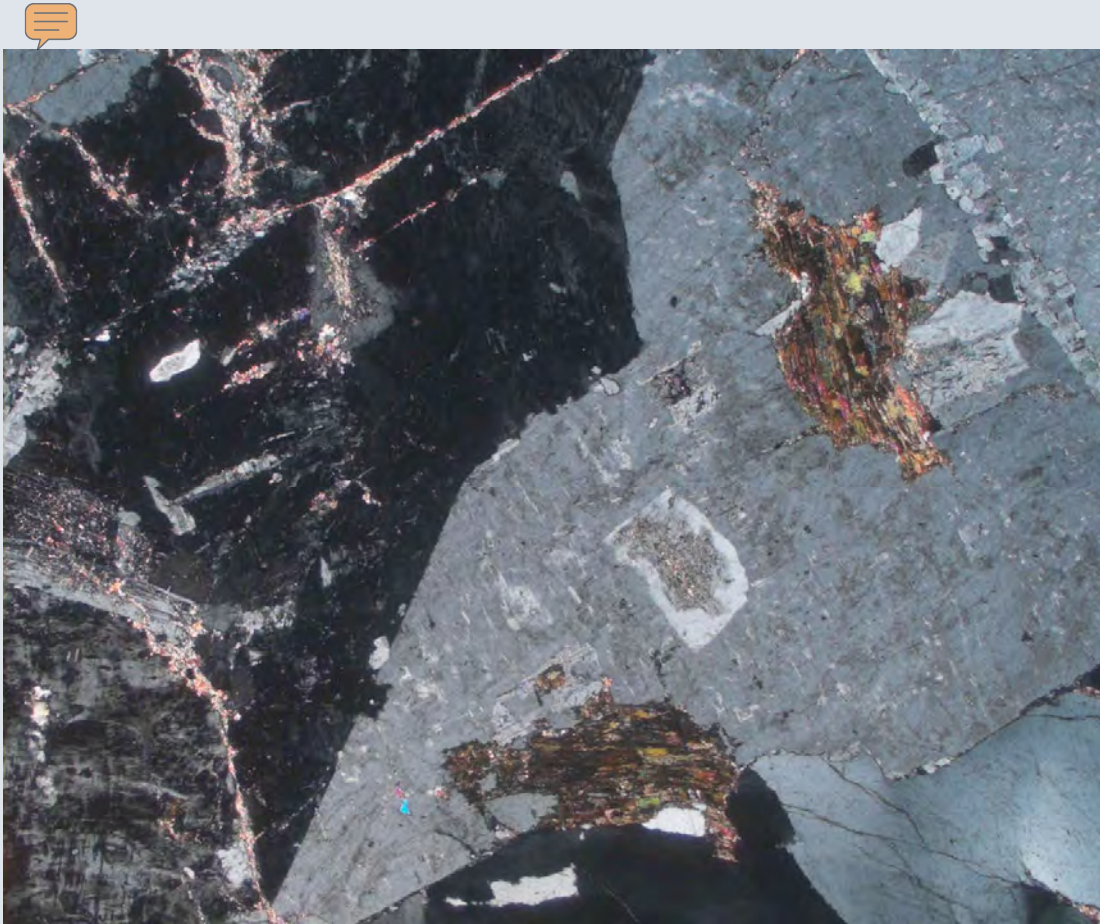
Les teintes de polarisation sont dans les gris : la partie gauche de l'individu maclé apparaît gris sombre, la partie inférieure plus claire ; cette partie inférieure est nettement plus sombre que le quartz de la matrice (blanc).

Perthites fines et peu développées.  
Inclusions automorphes de plagioclase.

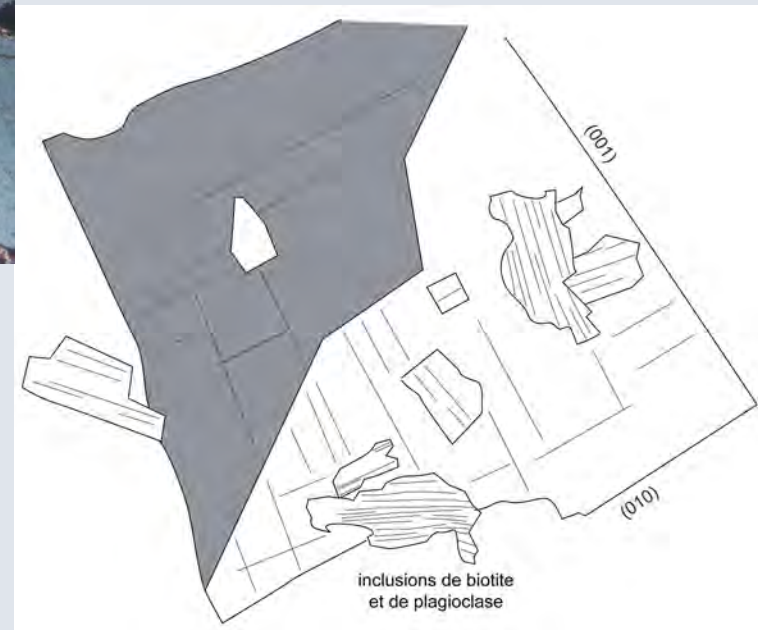
Matrice grenue, équigranulaire.  
Granite du Sidobre, Tarn, France.

TC

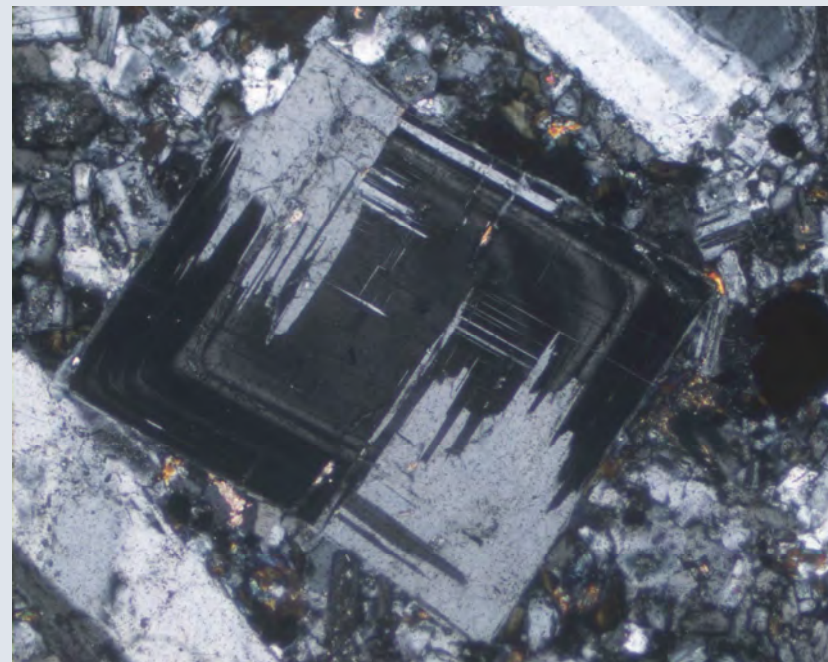
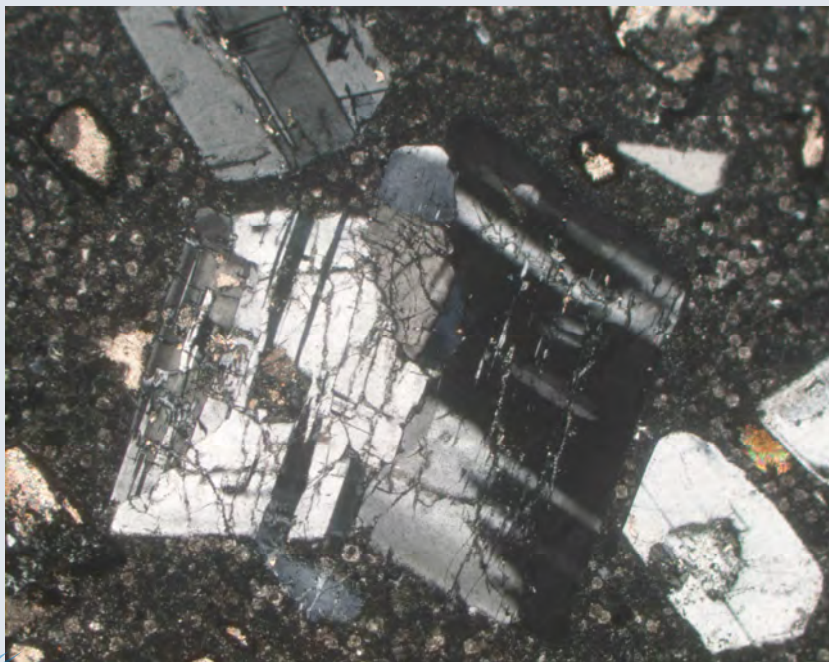
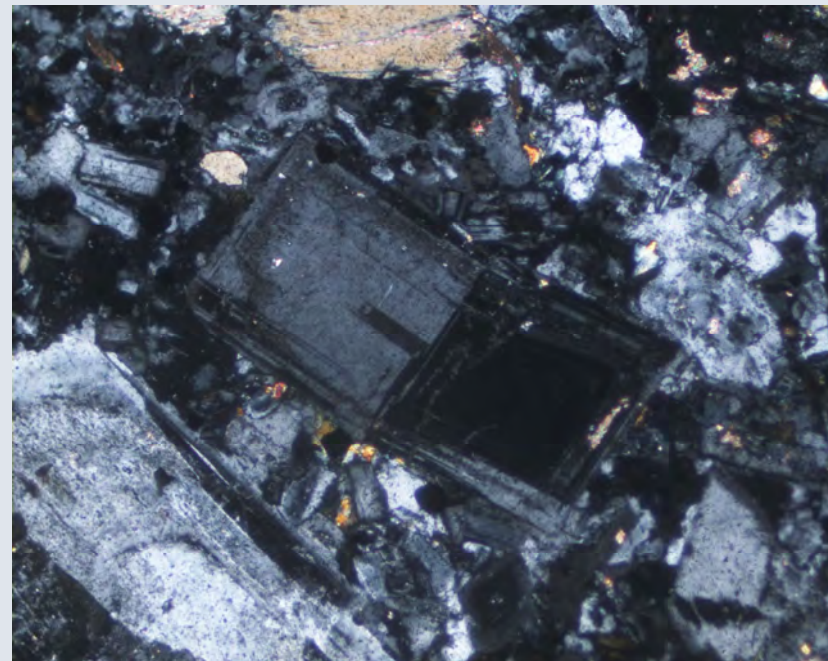




**Macle de Baveno dans une orthose**  
granite de Saint-Arnac, Pyrénées Orientales, France.







Macle de Manebach (dans plagioclase)

Esterellite, Var, France.



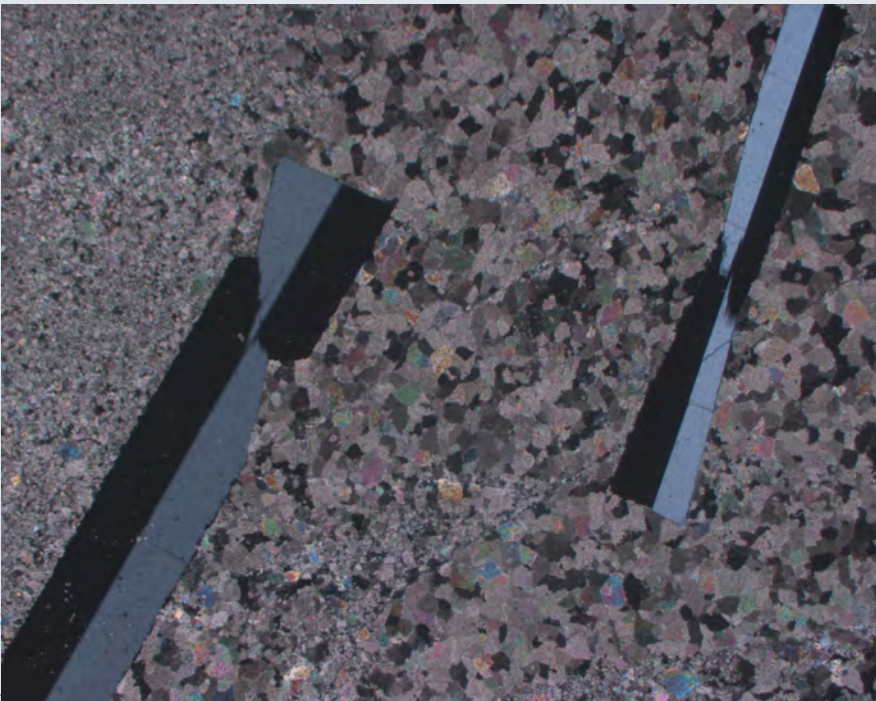




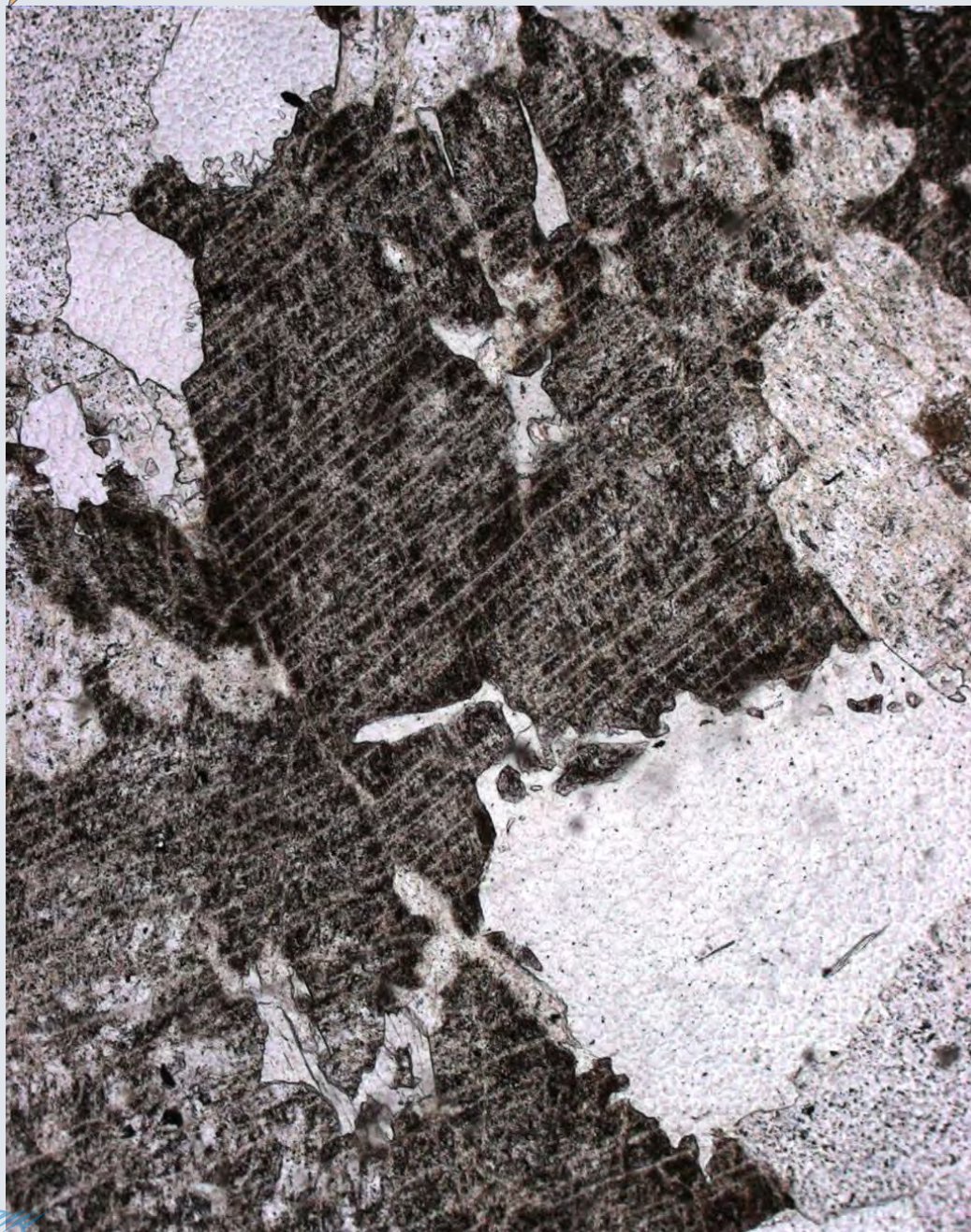
# Albite

Macle du Roc Tourné

Modane, Savoie, France







# Orthose rubéfiée (LN)

- La rubéfaction est une altération commune et caractéristique de l'orthose.
- Elle provient du développement dans la masse du feldspath d'une poussière d'un minéral non déterminable au microscope, qui peut être de la kaolinite ou parfois de l'hématite.
- La roche est un granite : plagioclase (gris clair, chagriné, sans doute séricitisé), quartz (blanc limpide) et muscovite secondaire formant des vermicules dans l'orthose.

C





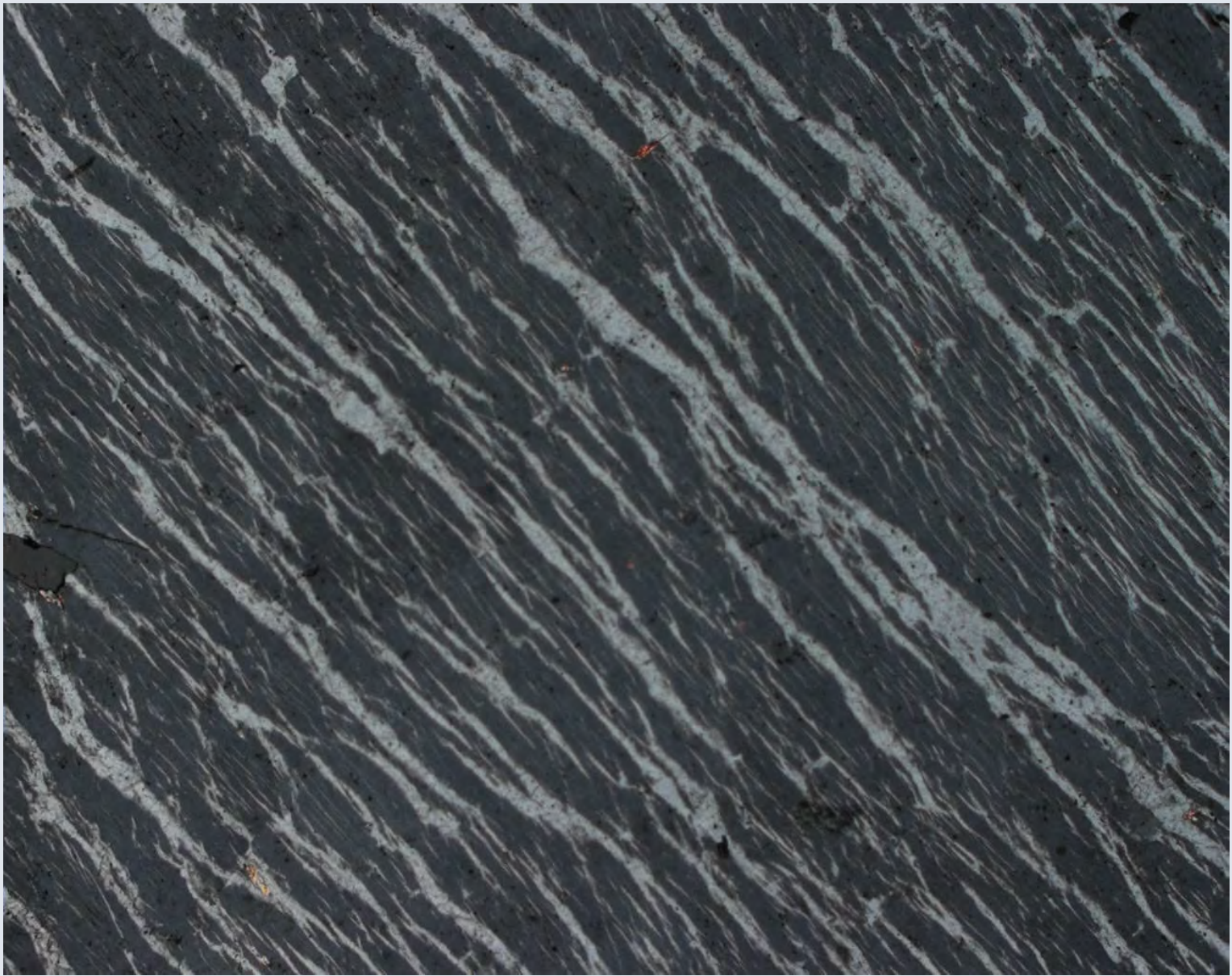
# Perthites

- Les perthites sont des exsolutions d'albite dans un feldspath potassique (ici de l'orthose).
- A haute température, il y a solution solide continue entre feldspath potassique et orthose ; mais cette solubilité diminue très fortement quand la température s'abaisse ; cela produit une démixtion de l'albite (polarisant en blanc) dans l'orthose (polarisant en gris sombre).
- Il existe différents faciès de perthites. On remarque ici que les lamelles d'albite sont guidées par les figures d'accroissement du cristal d'orthose.

TC







**Perthites.** On distingue deux générations de perthites : les unes fines lamellaires (*perthites en film*), d'autres plus grossières plus irrégulières (*perthites en rods*).

Perthite dans une pegmatite

La Chaumette, Lozère, France.

TC







# Orthose



- Noter en LN la différence de limpidité (et d'indice) avec le quartz qui forme la partie supérieure de la photo.
- Légère rubéfaction.
- En LP, macle de Carlsbad et deux familles de perthites : en film et en rods.
- Le coin inférieur gauche de la photo est aussi une orthose. Quartz et apatite apparaissent dans le coin supérieur gauche.



TC





# Mésoperthites

- L'aspect des perthites dépend de la proportion initiale de feldspath potassique et d'albite dans le minéral qui a initialement cristallisé (et par là de la température).
- On parle de mésoperthite lorsque la proportion de feldspath potassique et d'albite deviennent équivalentes.
- Grands cristaux de perthites présentant la macle de Carlsbad.
- La roche est une syénite alcaline ; le minéral brun des biotites.

AR





## Mésoperthites

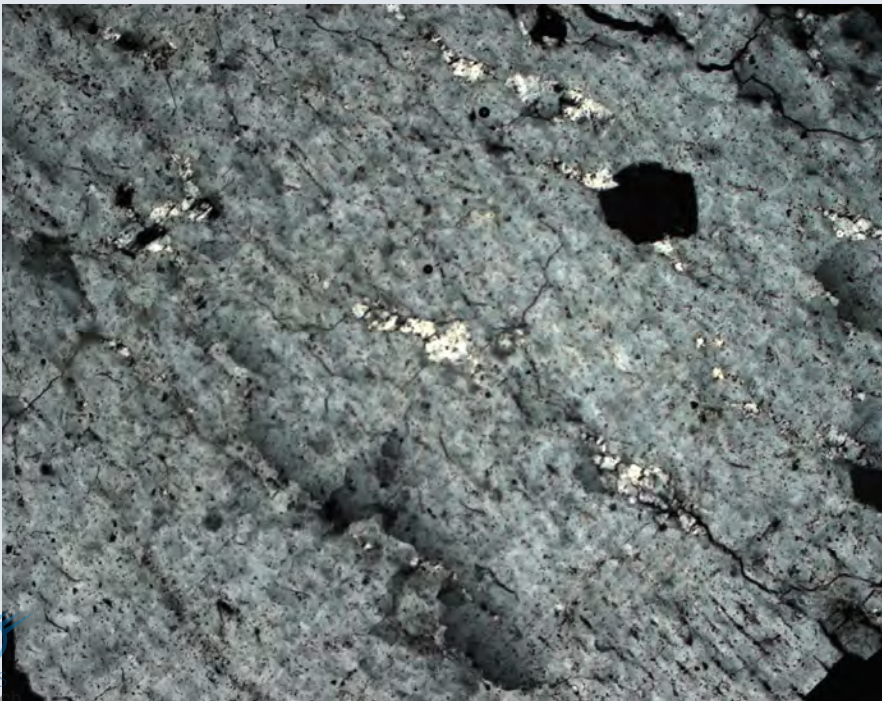
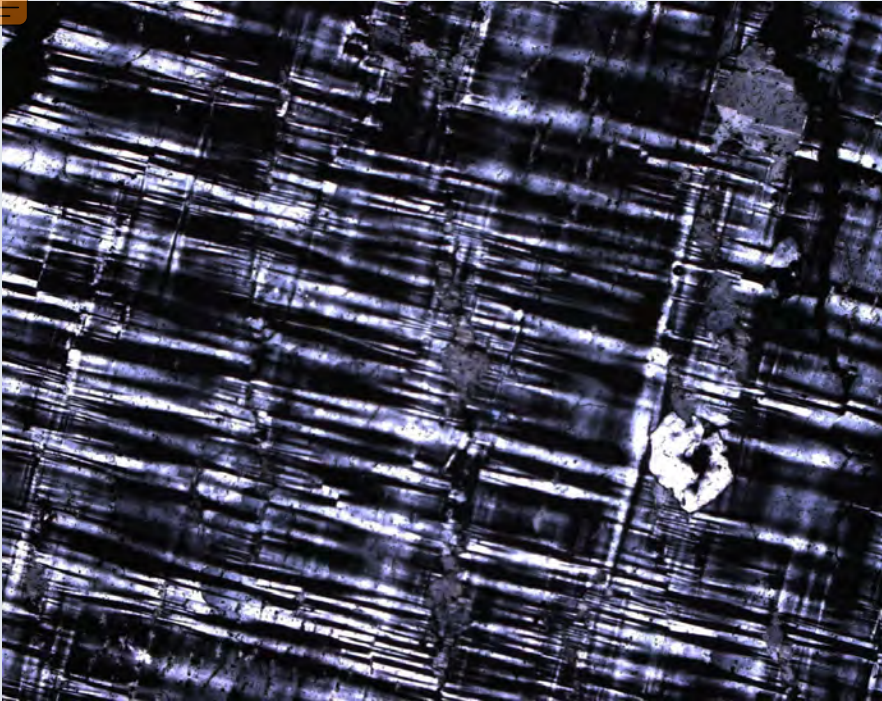
- Autre faciès de perthite encore plus riche en albite que la photo précédente.
- Cette roche ne contient pas de plagioclase : le feldspath a cristallisé dans des conditions hypersolvus.
- Le minéral qui apparaît sombre en LN est de l'aegyrine. 
- La roche est une syénite alcaline.

AR



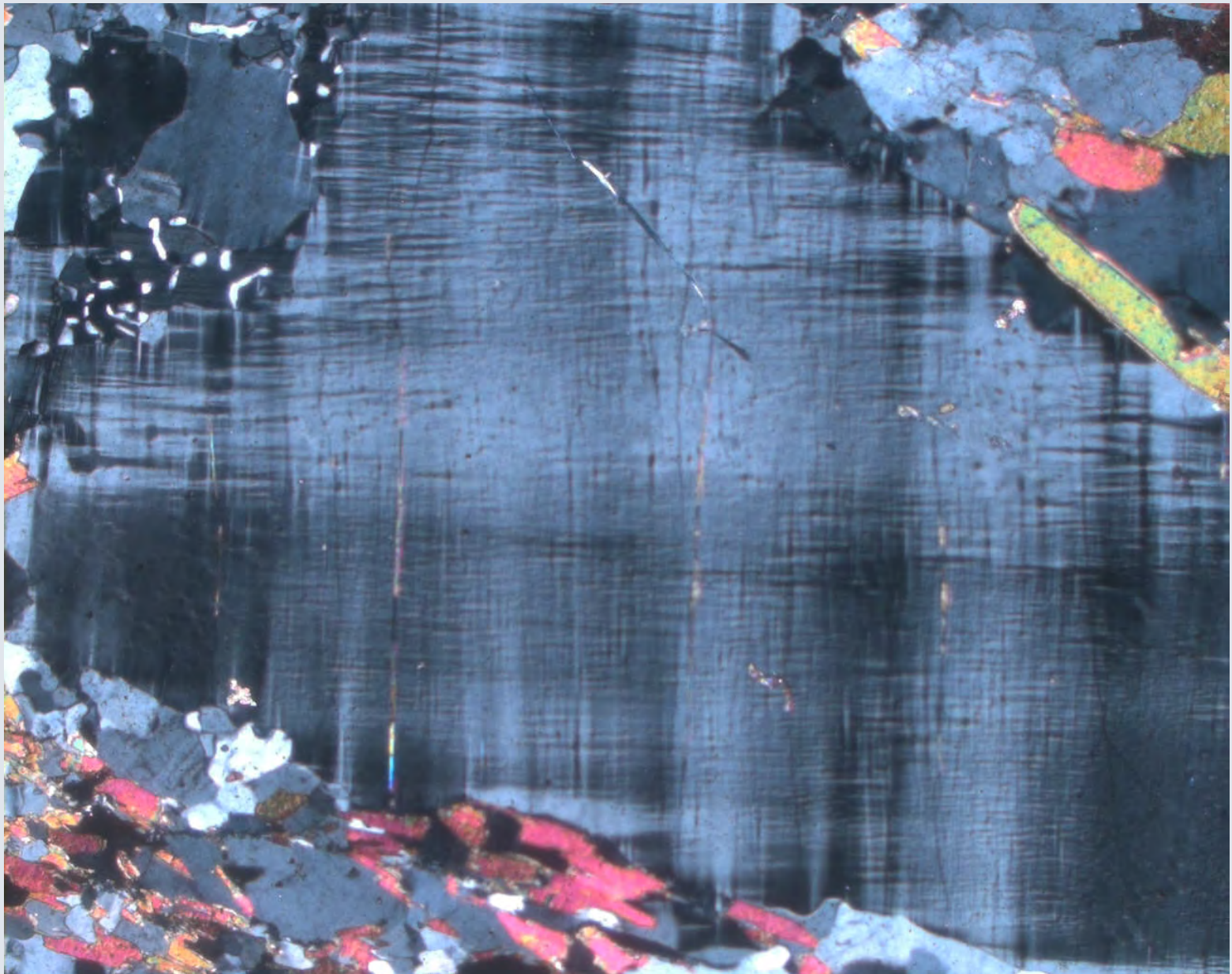


# Microcline



- Le microcline est le polymorphe de relativement basse température du feldspath potassique.
- Il est triclinique et présente simultanément les macles de l'albite et du péricline en fines lamelles qui forment un quadrillage remarquable « en tissu écossais ».
- Dans les sections parallèles à (001), si l'on place ces macles à  $45^\circ$  des fils du réticule, il y a **éclaircissement commun** à la fois des lamelles macrées albite et de celles macrées péricline de sorte que les deux systèmes de macles disparaissent simultanément (photo du bas).





## Microcline

Notez les myrmékites au coin haut gauche  
Yaoundé, Cameroun

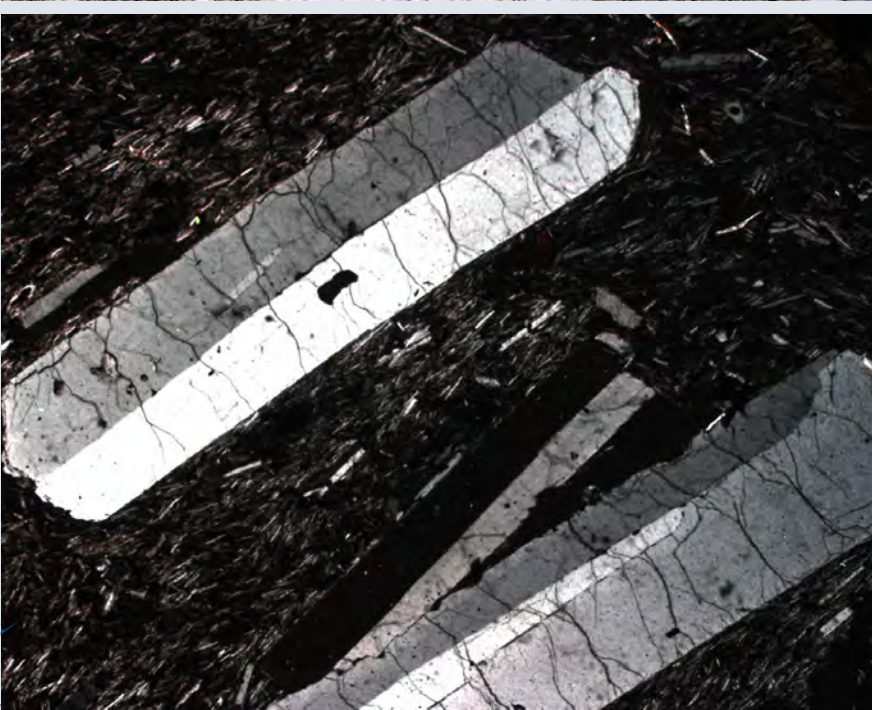




# Sanidine

- Cristaux en tablettes aplaties selon (010).
  - Incolore, limpide.
  - Les clivages ne sont pas visibles.
  - Cassures transverses.
  - Polarise dans les gris et blancs du 1<sup>er</sup> ordre.
  - Macle de Carlsbad.
- 
- La roche est une phonolite avec une mésostase microlithique montrant une texture fluidale.

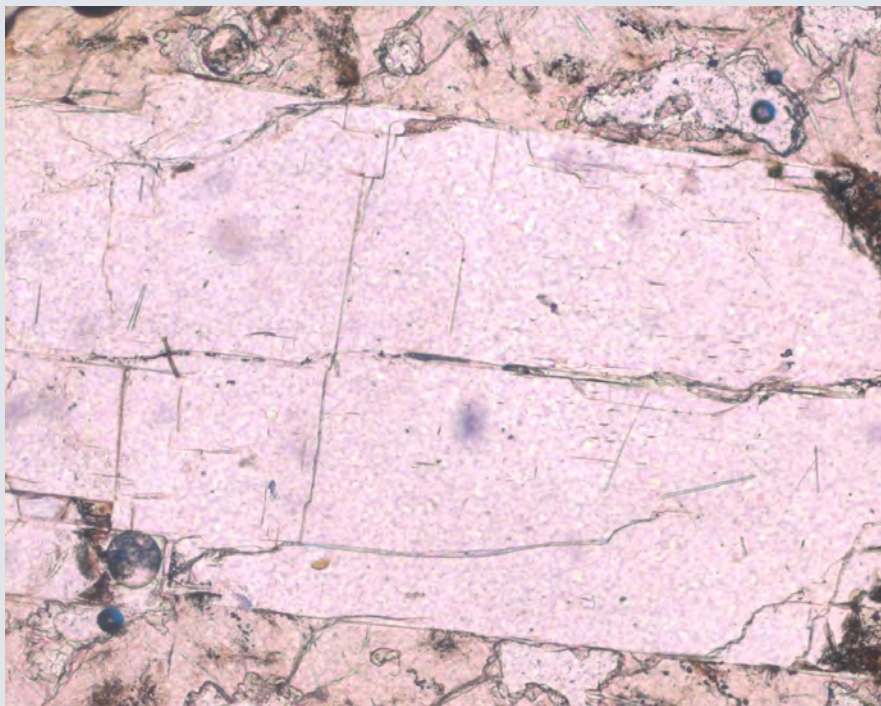
C



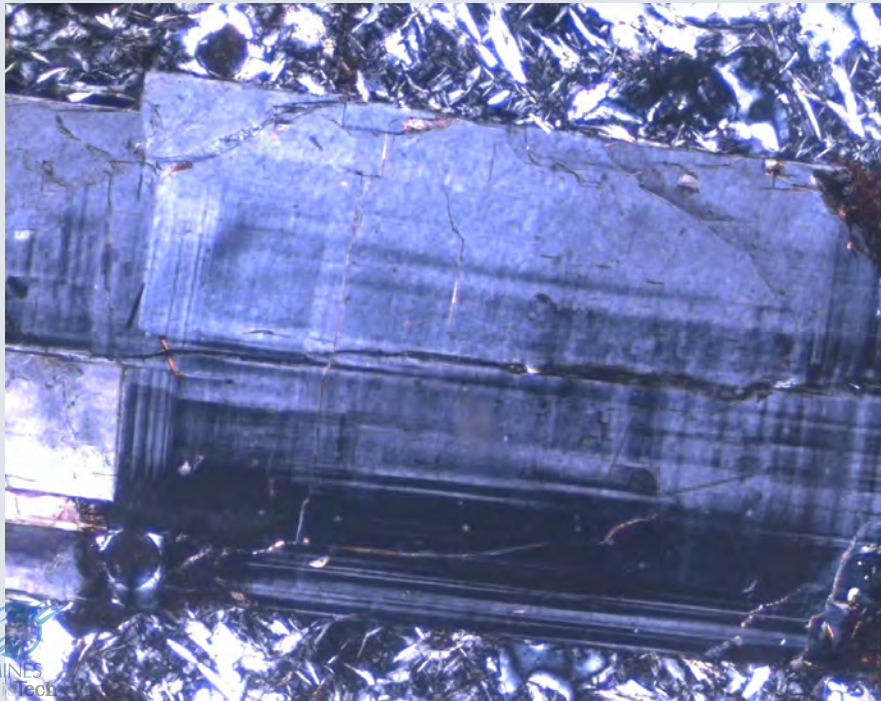




# Anorthose



- Triclinique.
- Clivage peu visibles.
- Macles de l'albite et du péricline beaucoup plus fines que dans le microcline, formant un tissu écossais.



- Phonolite  
Ténériffe

R





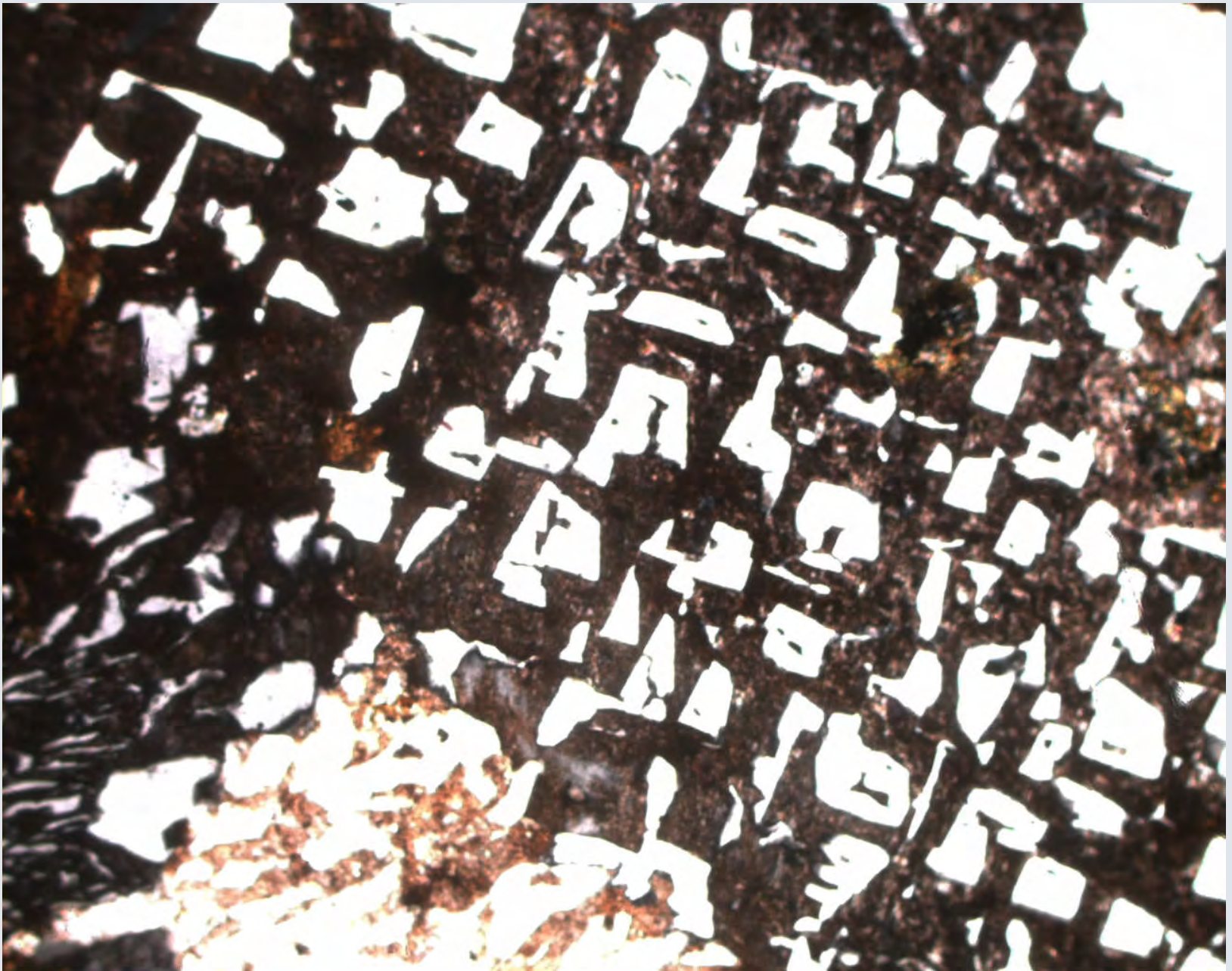
# Texture graphique

- Cette texture résulte d'une syncristallisation de quartz et d'orthose (ici partiellement albitisée).
- L'orthose forme un grand cristal qui englobe le quartz.
- Les quartz présentent une même orientation : ils sont ici éteints simultanément.

C







Texture graphique LP

Bushveld, Transvaal

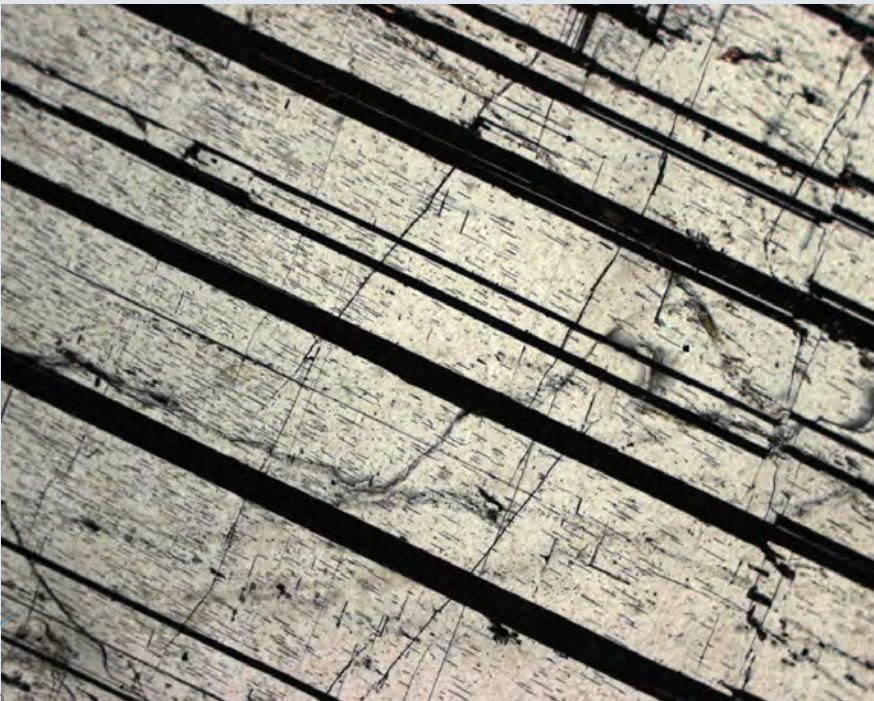




# Plagioclase

- Deux clivages pratiquement perpendiculaires (010) et (001).
- Macle de l'albite parallèle au clivage (010).

TC







# Plagioclase

- En haut : macles de l'albite et de Carlsbad.
- En bas, macles de l'albite (parallèle au clivage 010) et du péricline (très légèrement oblique sur le clivage (001)).

TC





# Plagioclase

- Forme en tablettes rectangulaires et sections basales plus moins arrondies (/hexagonales).
- Clivages.
- Macles albite et dans certaines plages (coin NE), albite et Carlsbad.
- Zonation du cristal : en particulier dans la grande plage au centre bas.
- Les bordures des cristaux sont un plagioclase sodique limpide.
- Le minéral gris, à relief assez fort en LN, polarisant gris sombre en LP est un orthopyroxène. 
- Il existe aussi de très petites biotites, qui se repèrent surtout en LP par leurs teintes de polarisation vives
- La roche est une norite.

TC







# Plagioclase

- Forme propre en tablette rectangulaire.
- Clivages.
- Altérations.
- Macles albite et Carlsbad.
- Zonation du cristal : changement de composition chimique en cours de cristallisation. Ici une zonation globalement normale non récurrente.
- Le reste de la roche est formé de quartz (limpide, polarisant en blanc), orthose (polarisant en gris clair), muscovite (incolore, polarisant dans des teintes vives), biotite brune partiellement chloritisée (coin inférieur gauche).

TC





## Plagioclase zoné zonation récurrente



- La roche est une microdiorite quartzique.
- Le minéral brun vert polarisant en brun jaune dans le coin inférieur droit est une amphibole.
- Aiguebonne, Esterel, Var, France.

TC

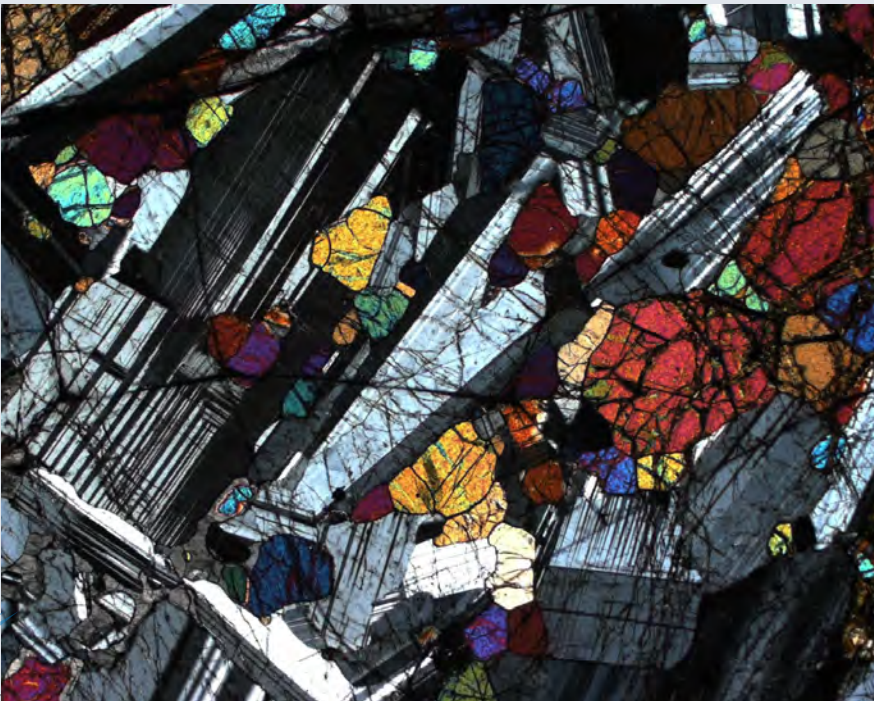
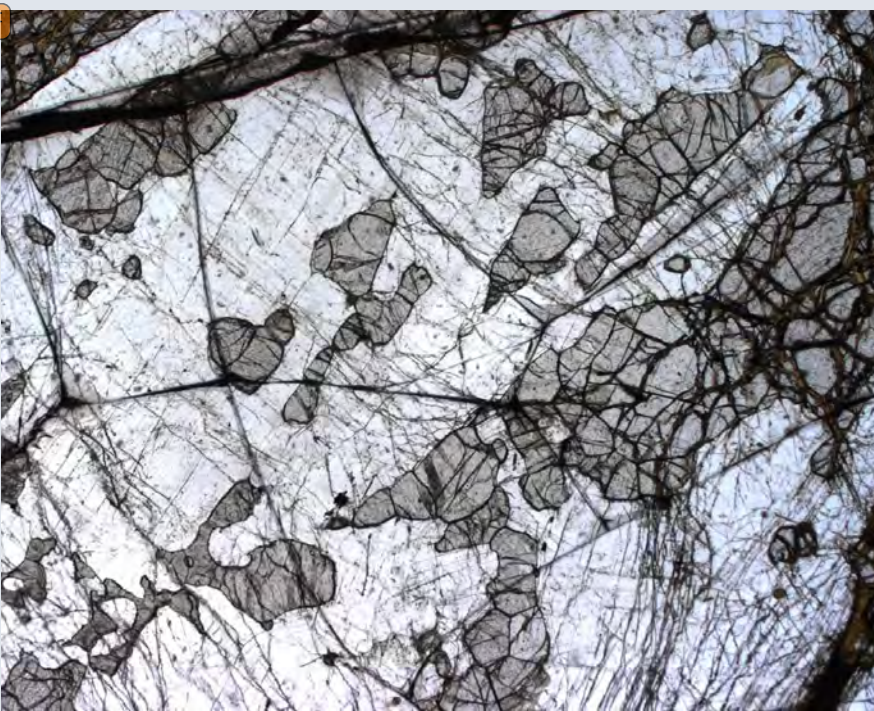




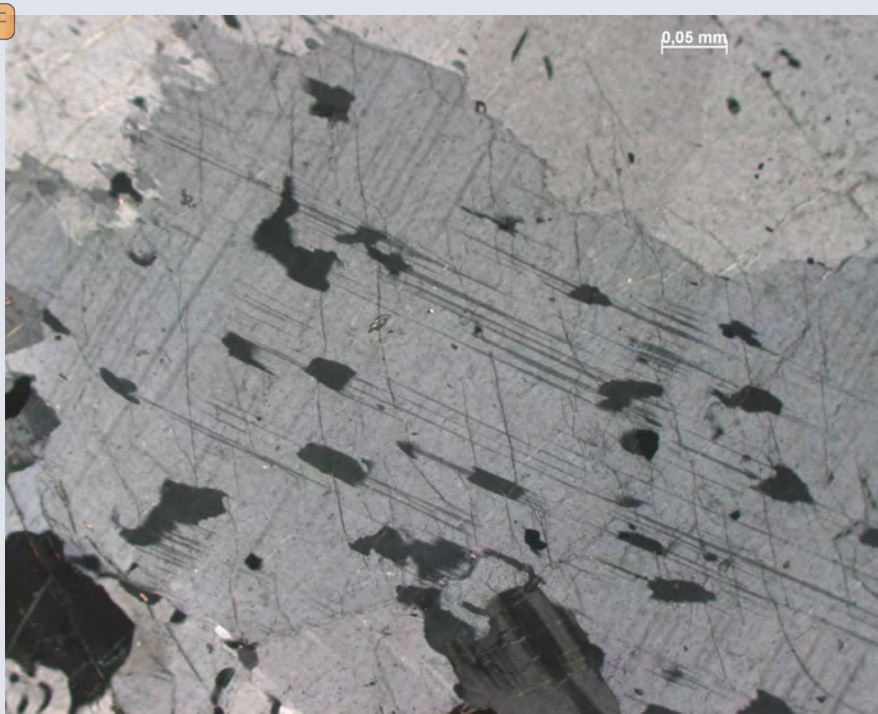
# Plagioclase

- Formes propres en tablettes rectangulaires.
  - Clivages.
  - Altérations.
  - Macles complexes (en particulier dans le grand cristal à gauche).
- 
- Le minéral à fort relief, sans clivage, polarisant dans des teintes vives est de l'olivine : la roche est un gabbro riche en olivine (ou allivalite).

TC



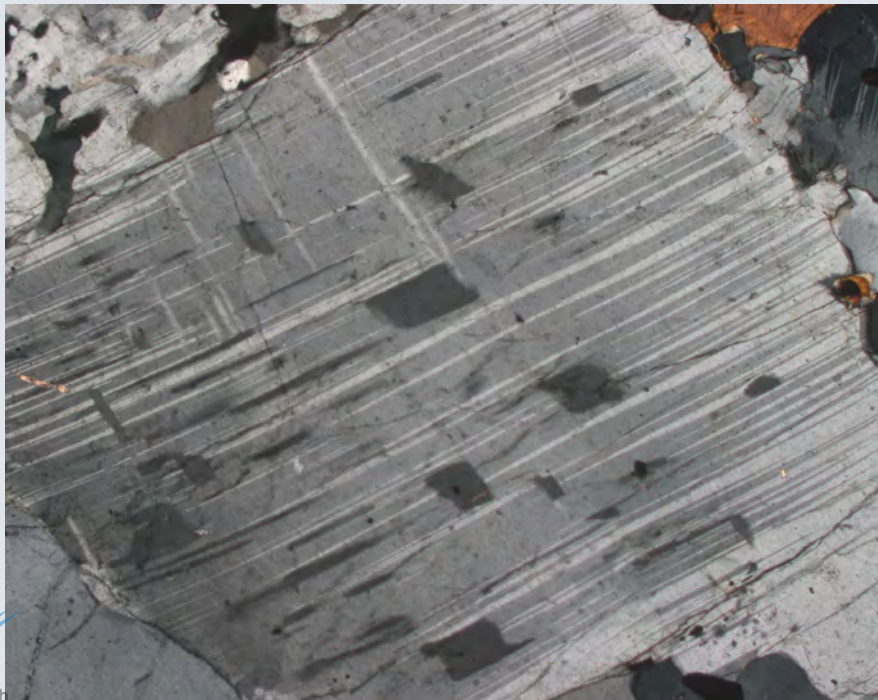




# Antiperthites

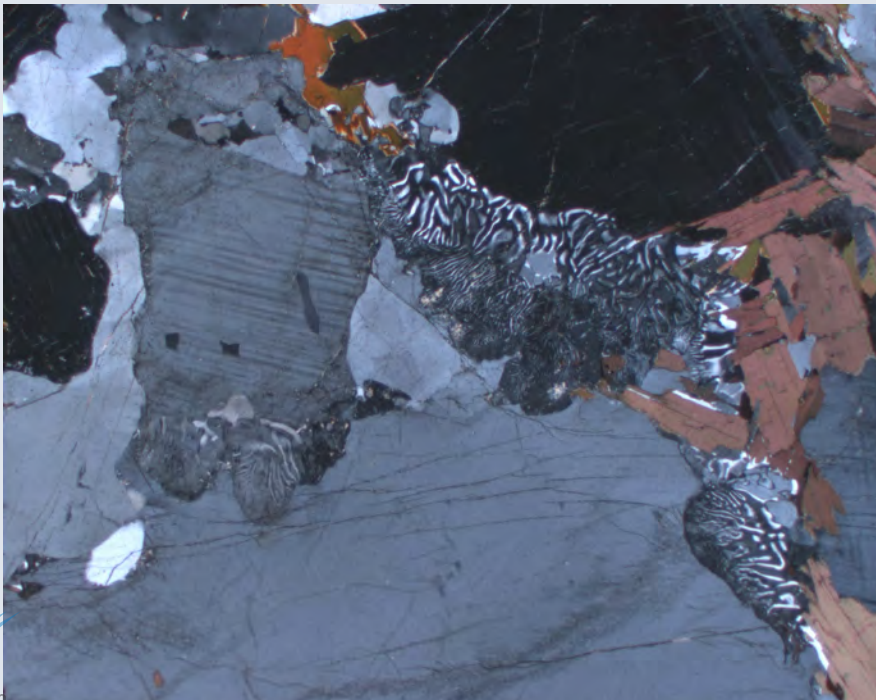
- Les exsolutions de feldspath potassique dans le plagioclase se présentent sous forme de petits rectangles.
- Anorthosite de Morin, Québec, Canada

AR





# Myrmékites (LP)



- Les myrmékites sont des bourgeons de plagioclase acide contenant des vermicules de quartz, qui se développent sur du feldspath potassique (microcline dans la photo du haut ; orthose en position éteinte dans la photo du bas) à partir de plagioclase.
- Les myrmékites résultent du remplacement de K dans le feldspath potassique par Ca-Na (plagioclase) avec libération de silice.
- Dans la photo du bas, on reconnaît plagioclase, quartz et biotite.

C





## Plagioclase séricitisé (LP)

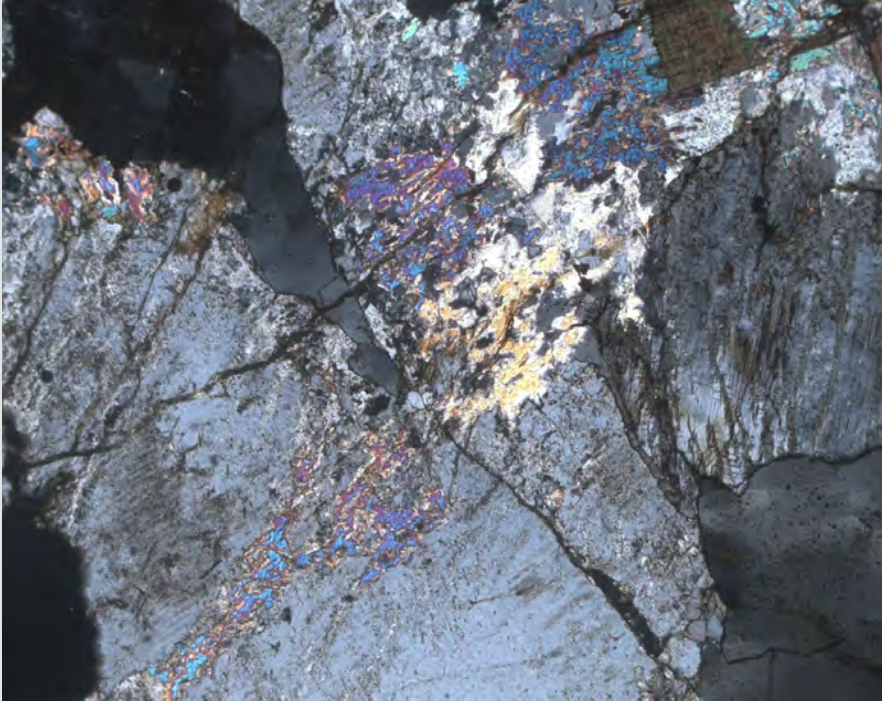
- Altération du plagioclase en une muscovite fine, la séricite.
- Par rapport à la muscovite, la séricite est souvent déficitaire en potassium et enrichie en silice.
- La séricitisation se développe souvent en suivant la zonation du plagioclase.
- Le plagioclase de la photo du haut montre une macle de Manebach.
- Granite de Saint-Arnac  
Pyrénées orientales, France.

C





# Altération du feldspath potassique en muscovite



- La muscovite présente un faciès en grands cristaux, « en éponge » (dits aussi parfois « squelettiques »).
- *En haut*, sur un phénocristal d'un granite porphyroïde.
- *En bas*, sur plusieurs cristaux d'un granite à grain fin.



- LP
- Granite de la Margeride  
Saint-Chély-d'Apcher, Lozère, France.

AC

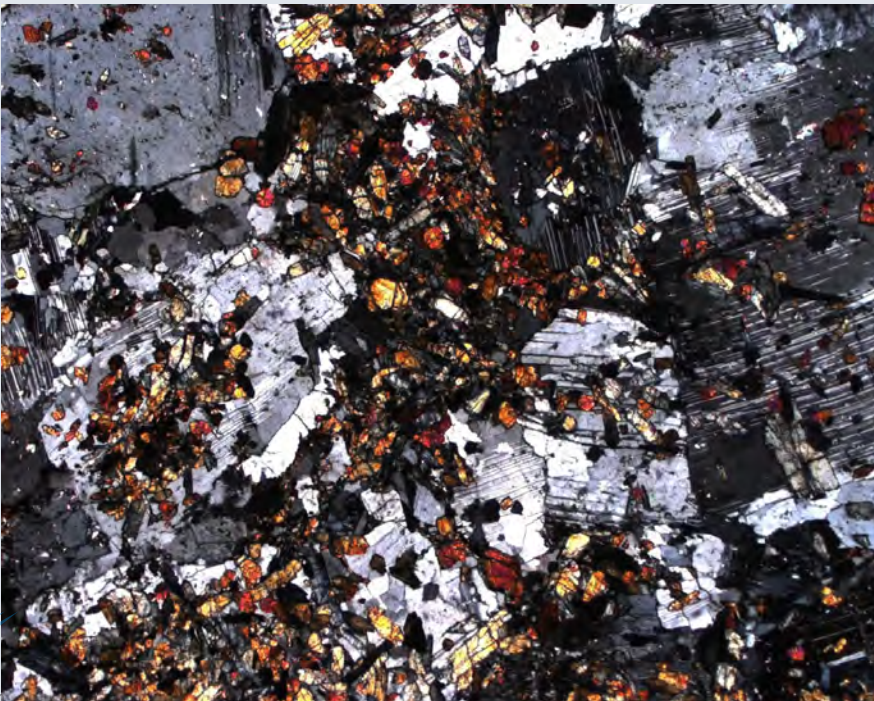




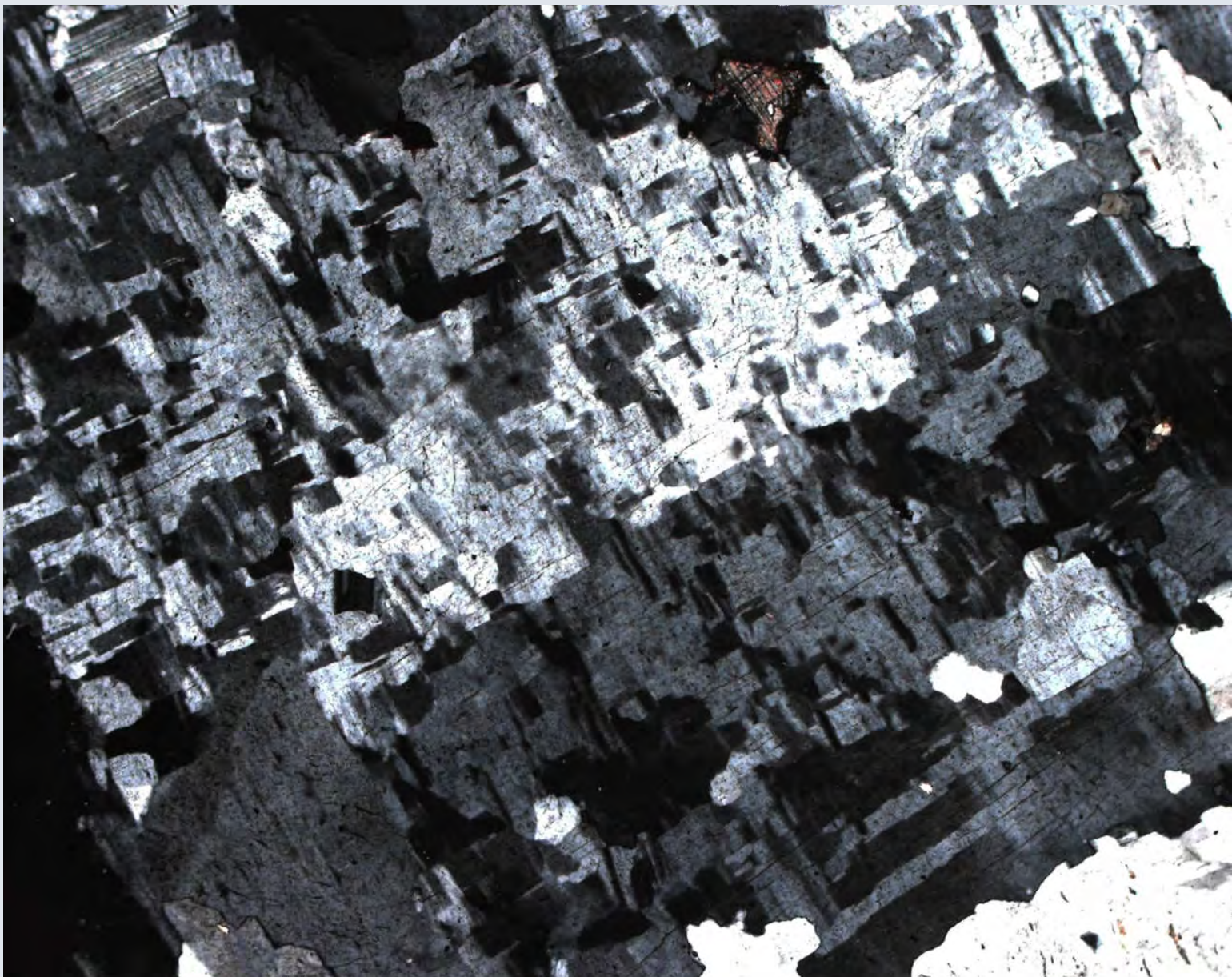
# Saussurite

- La saussuritisation est une altération provoquant le développement d'épidote dans le plagioclase.
- L'épidote  $\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_2)(\text{OH})$  est le minéral en baguettes, gris vert, à fort relief, polarisant dans des teintes vives.
- La saussuritisation traduit un lessivage de Ca et un apport d'eau (et de fer ferrique). Elle traduit une baisse de température. C'est une altération hydrothermale souvent associée aux gîtes métallifères.

AR







L'albite en échiquier est un faciès d'albite, remplaçant un feldspath potassique, dont les macles (albite et péricline) sont courtes et discontinues.

On remarque également la macle de Carlsbad

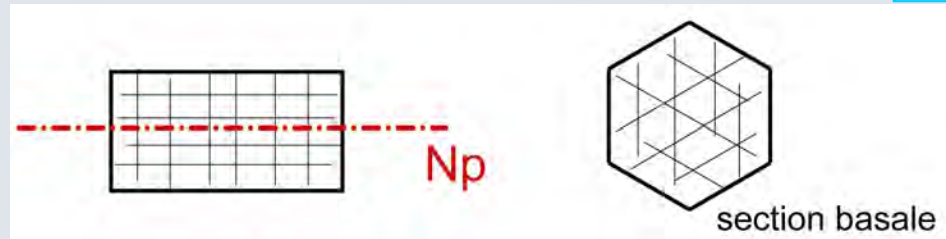
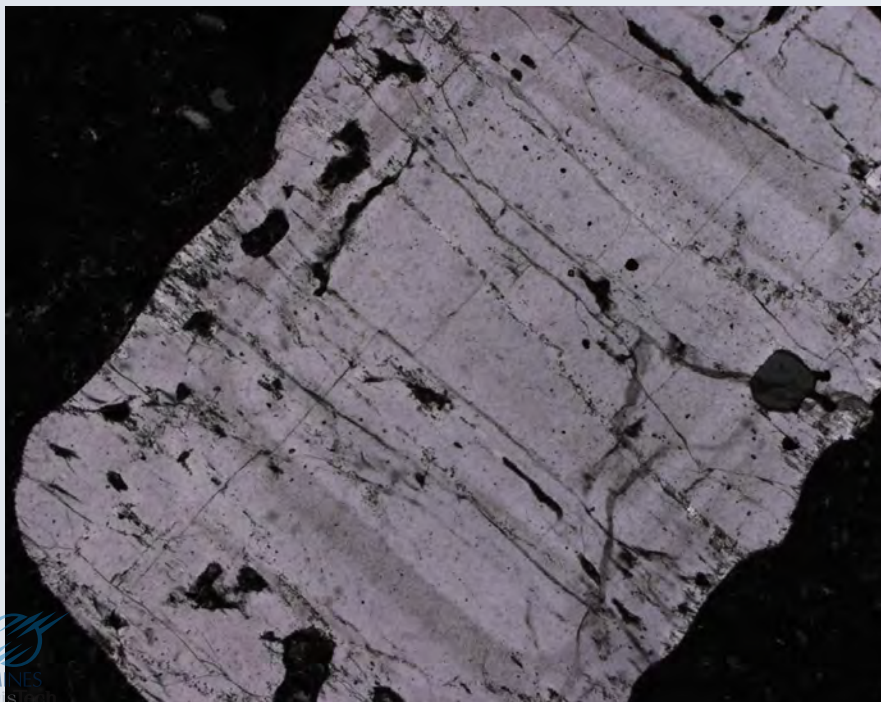
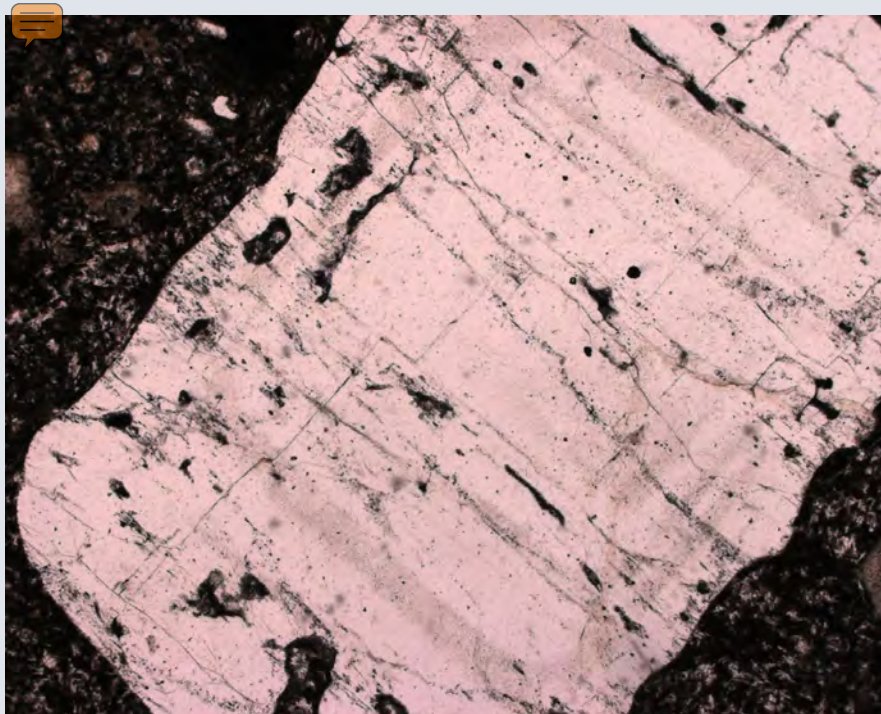
Vareilles, Lozère, France. AR





# Les feldspathoïdes

- Néphéline  $\text{Na}_3(\text{Na},\text{K})(\text{AlSiO}_4)_4$   $\text{NaAlSiO}_4$
- Leucite  $\text{KAlSi}_2\text{O}_6$
- Groupe de la sodalite (indistinguables en lame mince)
  - Sodalite  $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{Cl}_2$
  - Noséane  $\text{Na}_8(\text{AlSiO}_4)_6\text{SO}_4$
  - Häüyne  $(\text{Na},\text{Ca})_{4-8}(\text{AlSiO}_4)_6(\text{SO}_4,\text{S})_{1-2}$
- Analcime  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 
  - Leucite, häüyne et noséane n'existent que dans les roches volcaniques.
  - Néphéline et sodalite se rencontrent dans les roches volcaniques et plutoniques.
  - L'analcite n'est pas un feldspathoïde mais s'en rapproche par sa composition chimique et ses gisements.



## Néphéline $(\text{Na},\text{K})\text{AlSiO}_4$

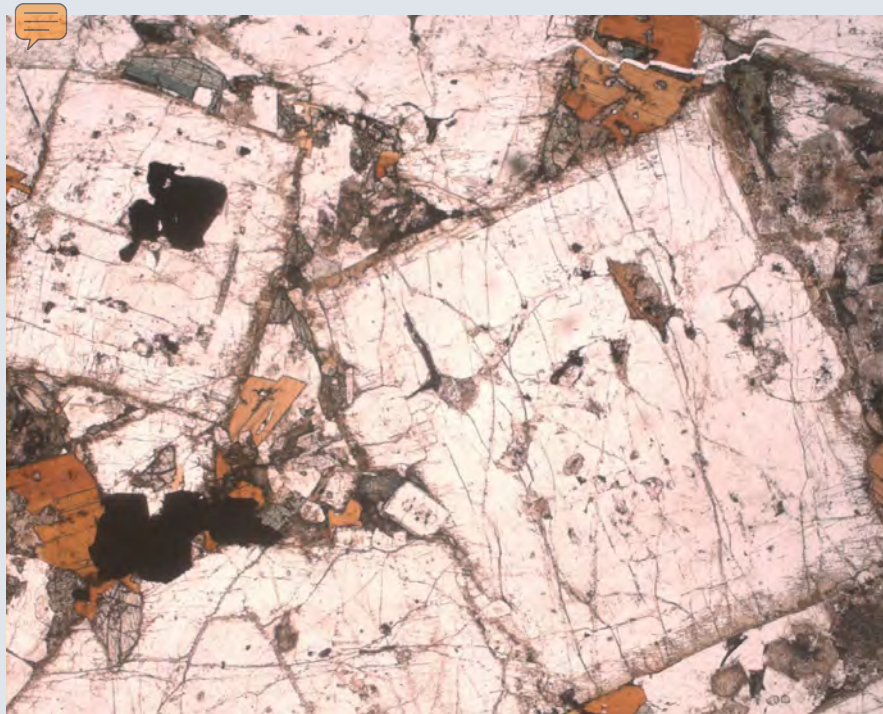
- Hexagonal
- Cristallise en prismes hexagonaux dans les roches volcaniques (ici).
- Souvent sans formes propres dans les roches plutoniques
  - Clivages : basal (0001) et selon les faces du prisme (1010), mauvais.
- Incolore
- Indices faibles

Np 1,526 – 1,542

Ng 1,529 – 1,546

mais supérieurs à ceux de l'orthose.

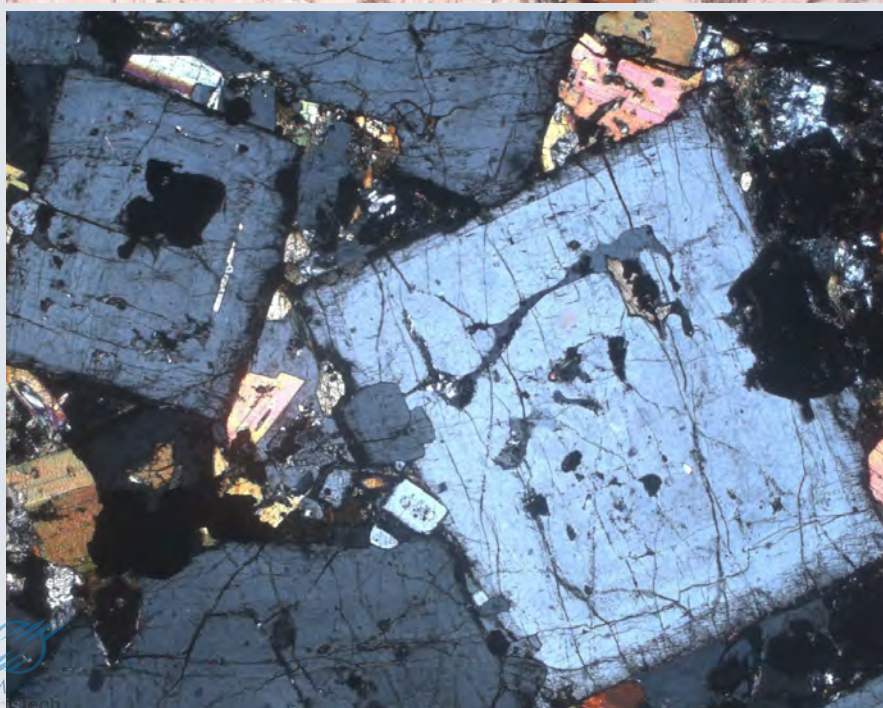




# Néphéline

$(\text{Na},\text{K})\text{AlSiO}_4$

- Biréfringence  $\Delta = 0,003 - 0,005$   
très faible, polarise en gris foncé
- Extinction droite.
- Allongement négatif.
- Uniaxe négatif.
- Prismes automorphes zonés montrant les clivages dans une essexite (monzodiorite à néphéline).



AC



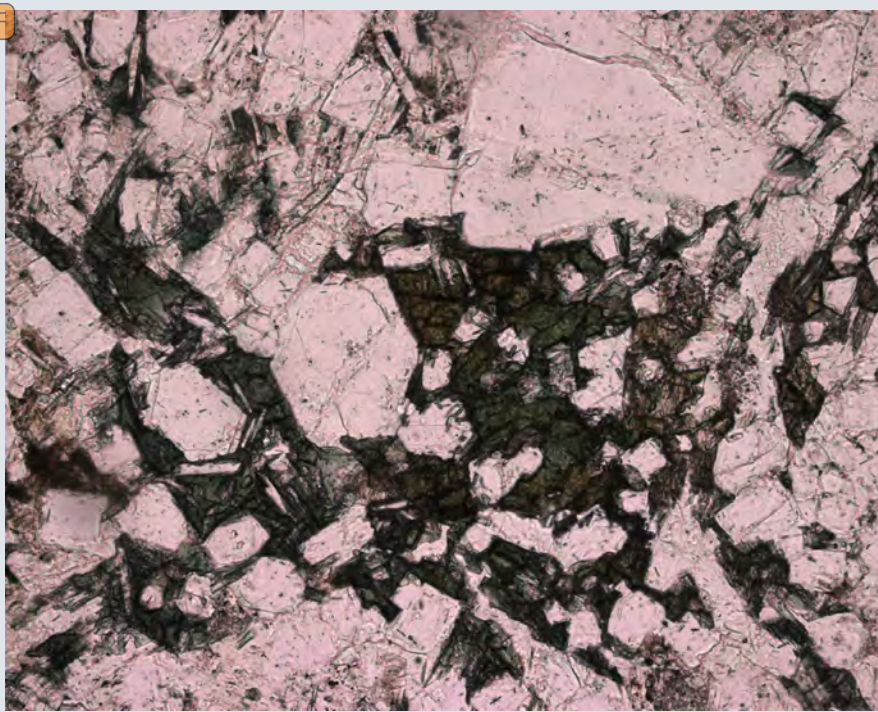


# Néphéline

- Cristaux automorphes dans une phonolite (téphritique).
- Avec, en particulier, des sections basales hexagonales (teintes de polarisation gris très sombre).
- Le minéral à relief plus fort polarisant dans des teintes vives est de l'olivine. 

AC

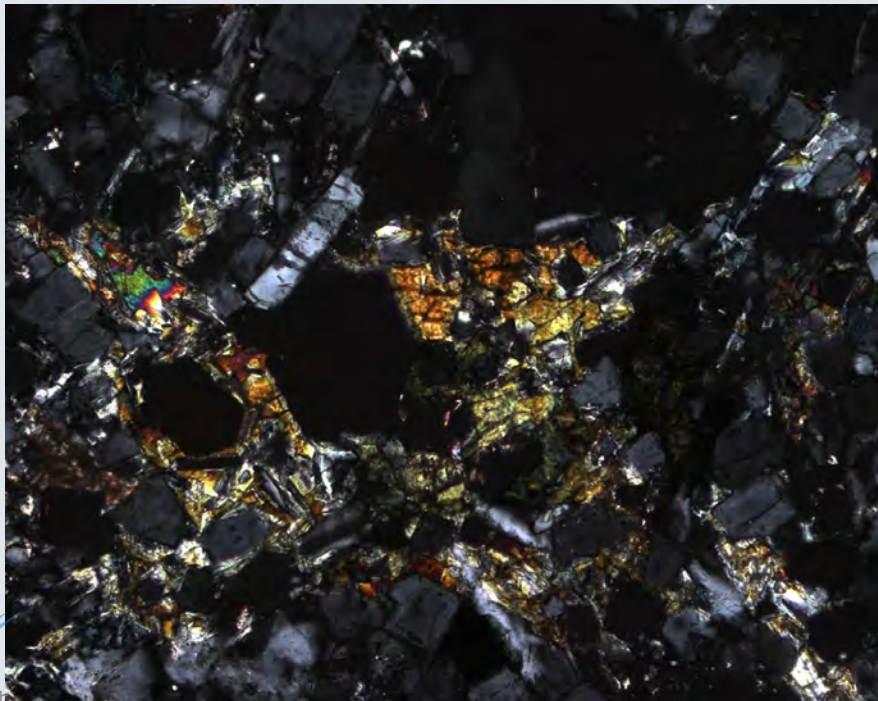




# Néphéline

## Aegyrine

- Cristaux automorphes hexagonaux dans une microsyénite néphélinique.
- Les tablettes polarisant des gris plus clairs que la néphéline sont du feldspath alcalin.
- Le minéral ferro-magnésien vert sombre, polarisant dans des teintes vives est de l'aegyrine (pyroxène ferrique sodique). Celle-ci cristallise de façon interstitielle entre les prismes de néphéline.



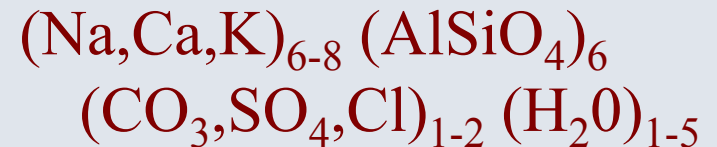
AR





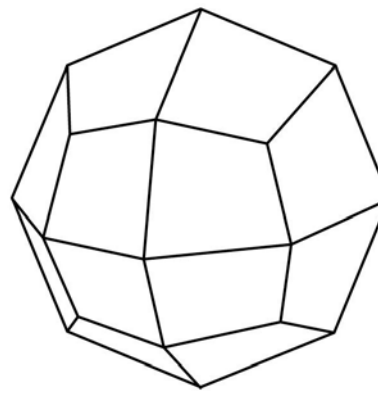
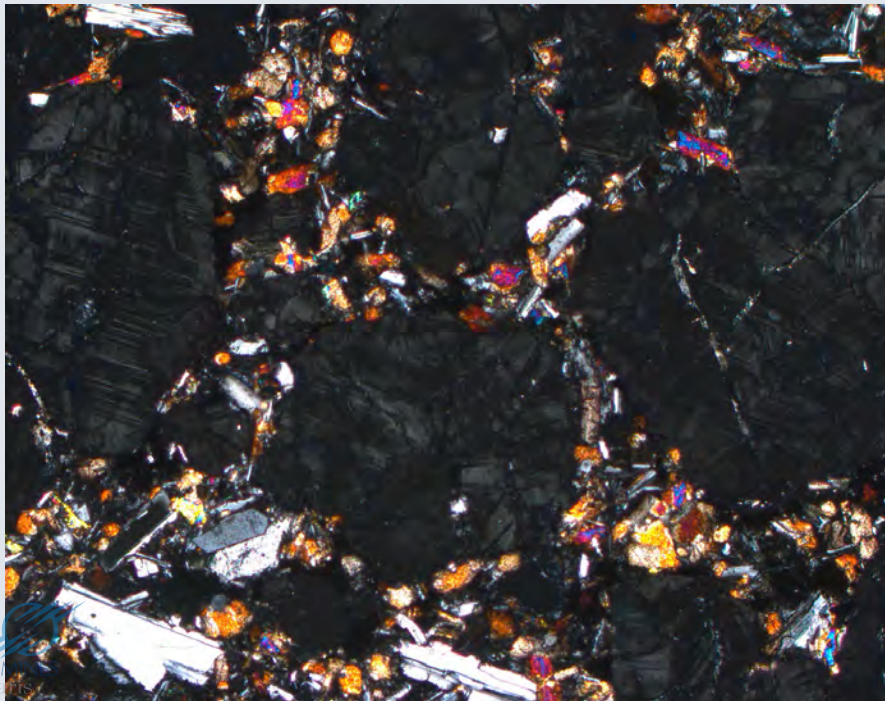
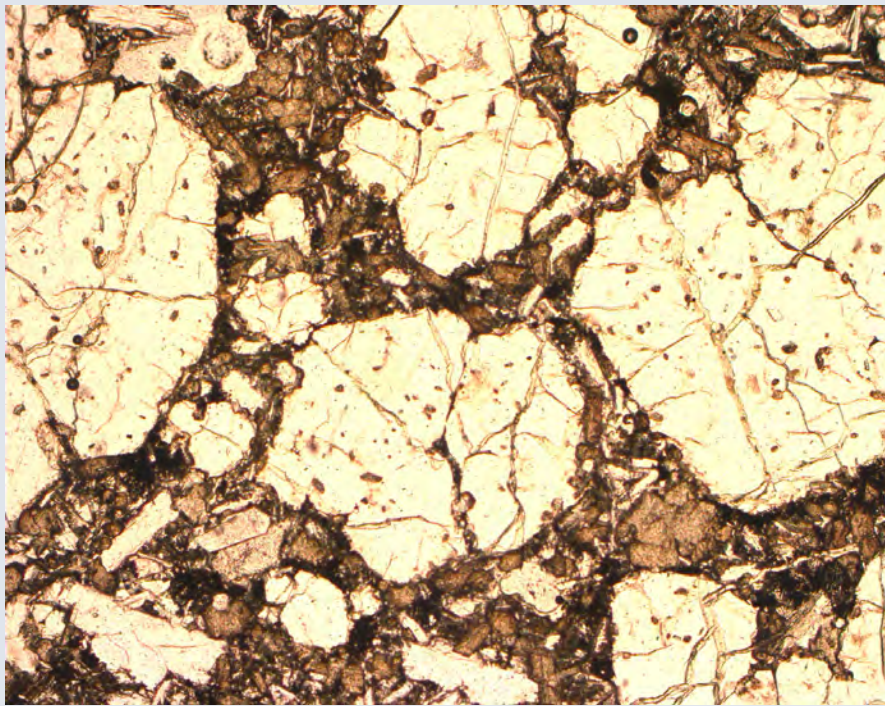
## Néphéline Cancrinite

- Syénite néphélinique où la néphéline forme des cristaux à tendance automorphe dans un fond de feldspath alcalin (qui se distingue par son indice et des teintes de polarisation plus claires).
- La néphéline s'altère en un minéral incolore, d'indice plus faible, polarisant dans des teintes vives : la cancrinite.

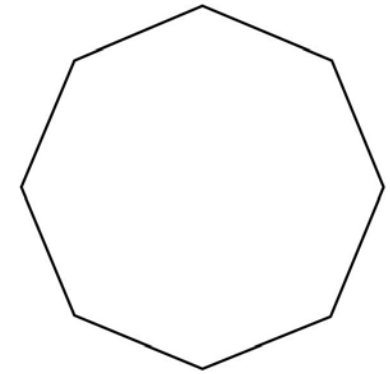


R





trapézoèdre



## Leucite

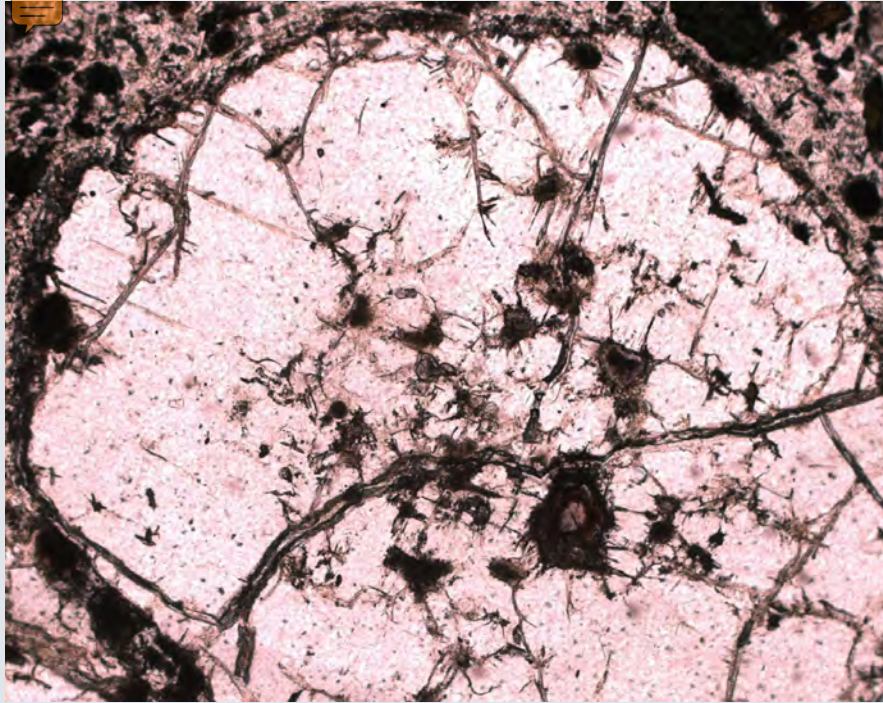
- Quadratique pseudocubique.
- Les individus quadratiques s'associent pour former des trapézoèdres. (leucitoèdre) ; les macles sont visibles en LP.
- Indice très faible  $n = 1,508 - 1,511$
- Biréfringence  $\Delta = 0,001$
- Incolore.

La matrice est formée de verre, de feldspath alcalin et d'augite aegyrinique.  
Téphri-phonolite du Vésuve, Italie

AR

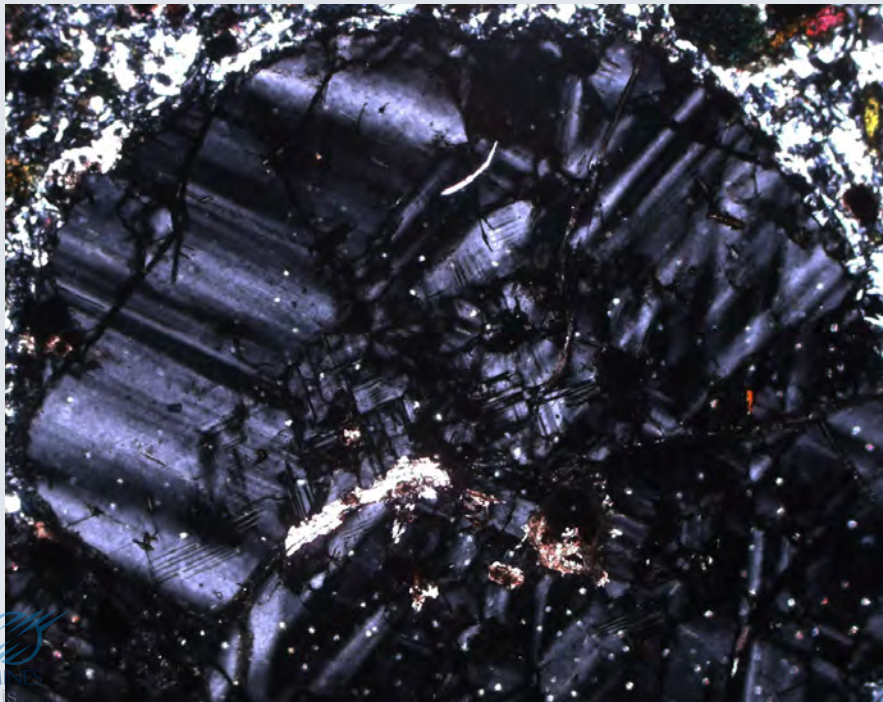




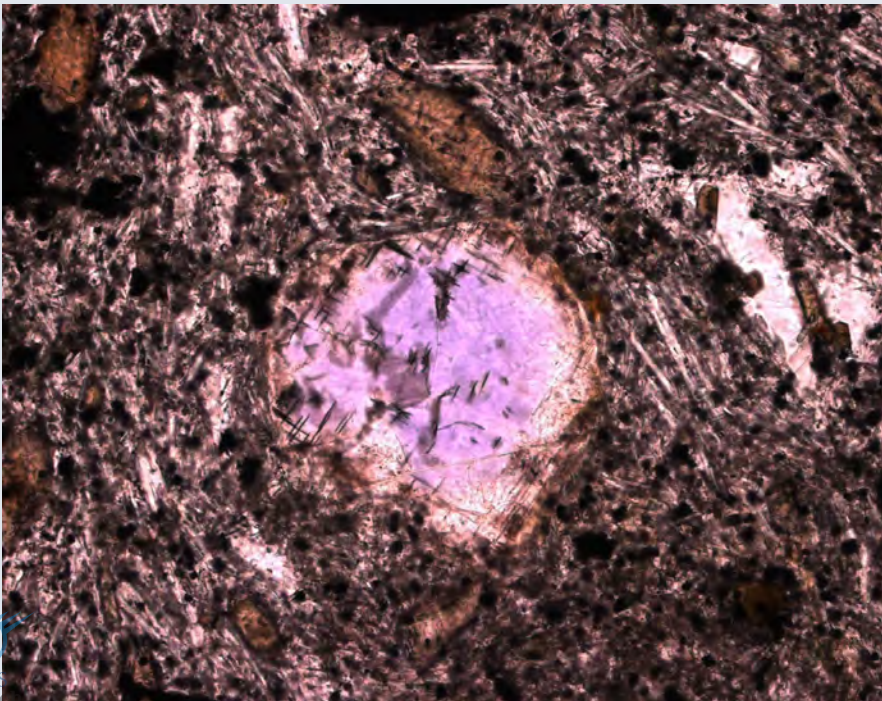
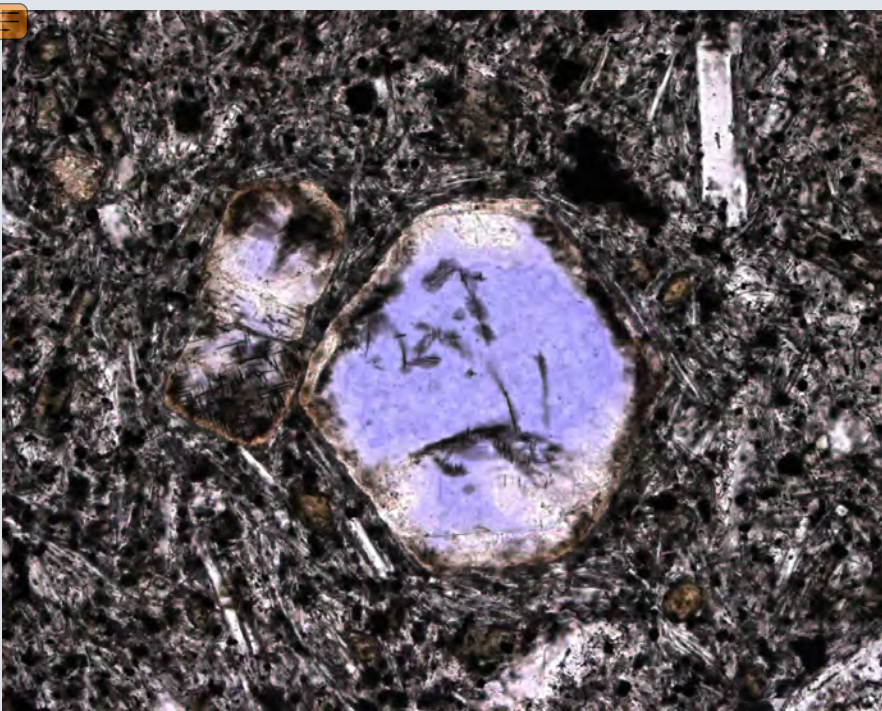


# Leucite

- Macles polysynthétiques.
- Eifel, Allemagne.







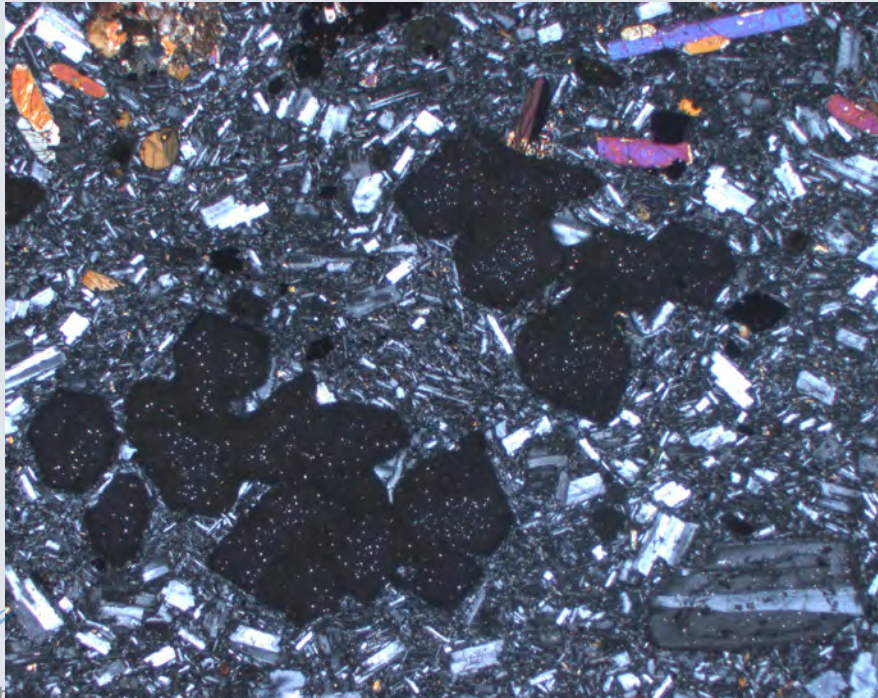
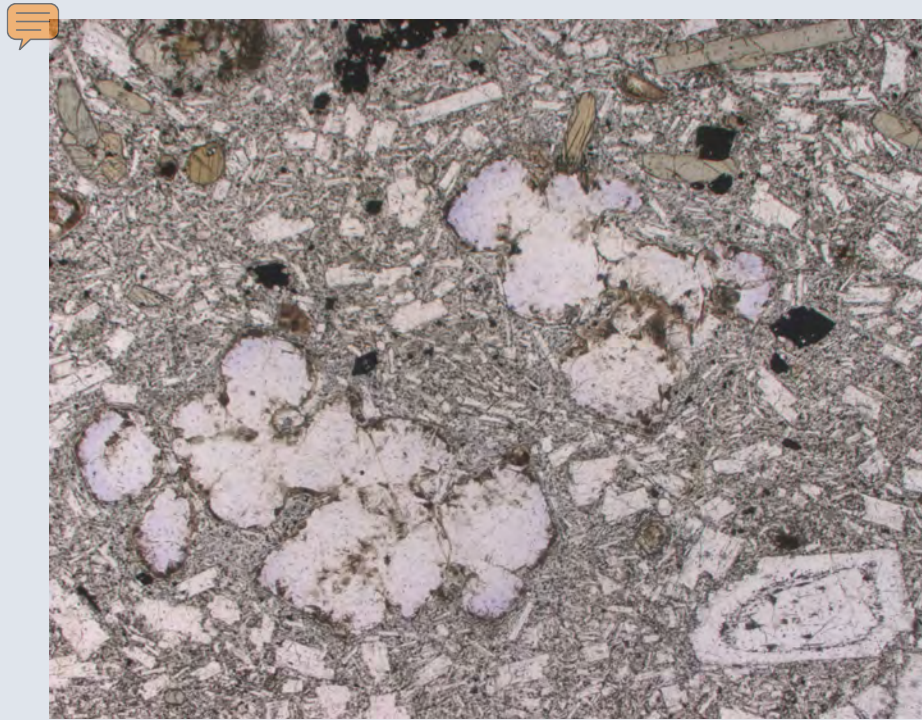
# Groupe de la sodalite

ici : haüyne (LN)

- Cubique.
- Formes cubiques dans les laves
- Clivage (110) (visibles sur la photo du bas).
- Incolore, gris, bleuté.
- Présente souvent des inclusions opaques en particulier sur les bords.
- Indices très faibles, inférieurs à ceux de l'orthose
- Sodalite N 1,483 – 1,487
- Noséane N 1,488 - 1,495
- Haüyne N 1,496 – 1,507

R



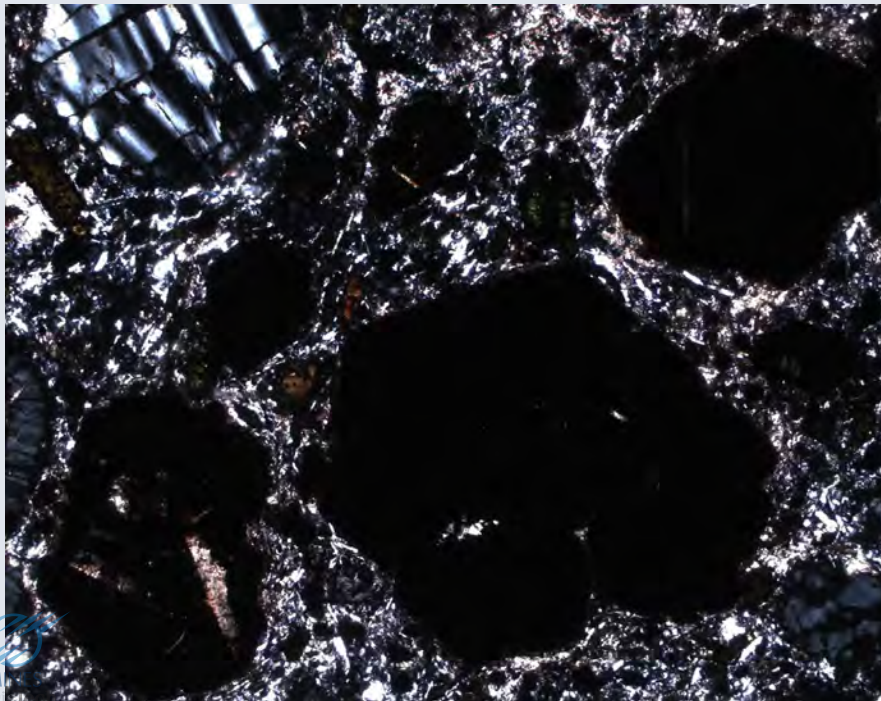
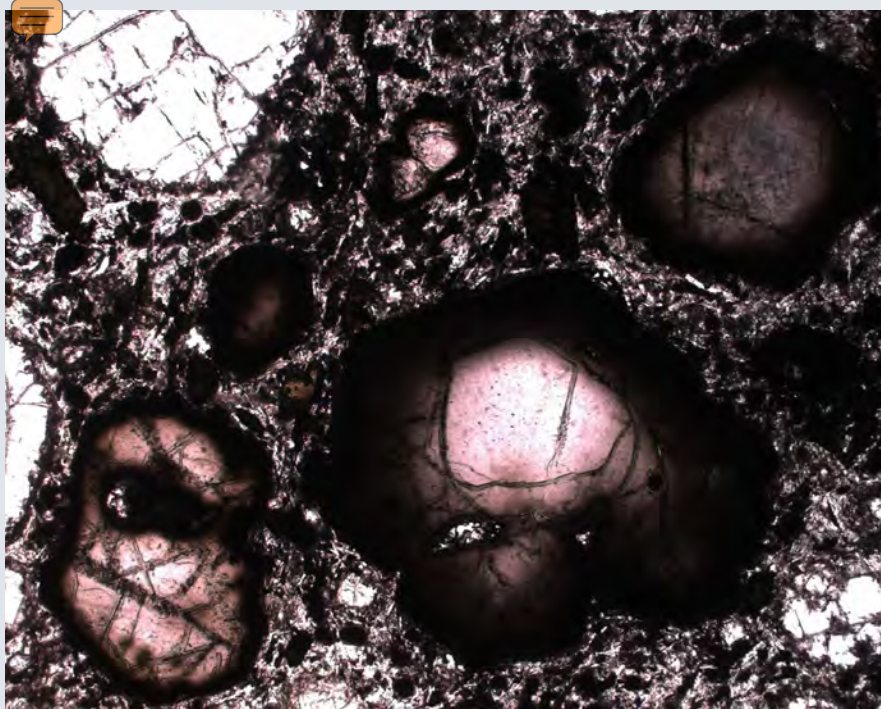


# Häuyne

- Phénocristaux de häuyne dans une téphrite.
- Cubiques, isotropes, teinte bleutée, inclusions opaques sur les bords.
- Phénocristaux d'augite aegyrinique et de plagioclase.
- Fond de la roche microlithique, feldspaths alcalins.

R





# Noséane

- Cristaux cubiques zonés, bordure pratiquement opaque.
- Leucite dans le coin supérieur gauche.
- Fond de la roche microlithique , feldspaths alcalins.
- Téphrite  
Eifel, Allemagne

R





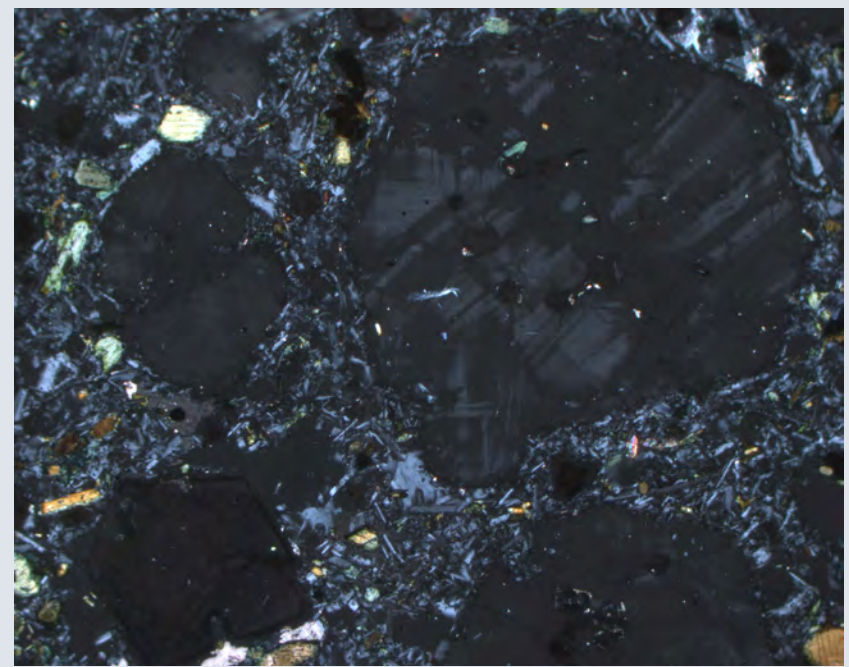
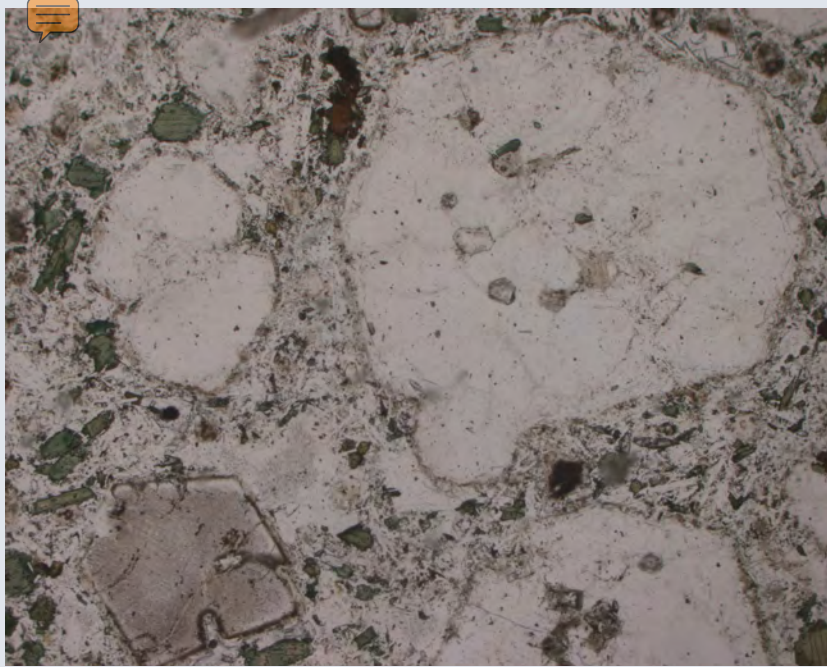
# Néphéline Noséane Olivine

- Noséane : cristaux cubiques, isotropes, clivages, inclusions zonées qui donnent au minéral une couleur grise.
- Néphéline : incolore, limpide, formes hexagonales, polarise en gris.
- Olivine : incolore, fort relief, polarise ici en jaune.
- La roche est une téphrite

R

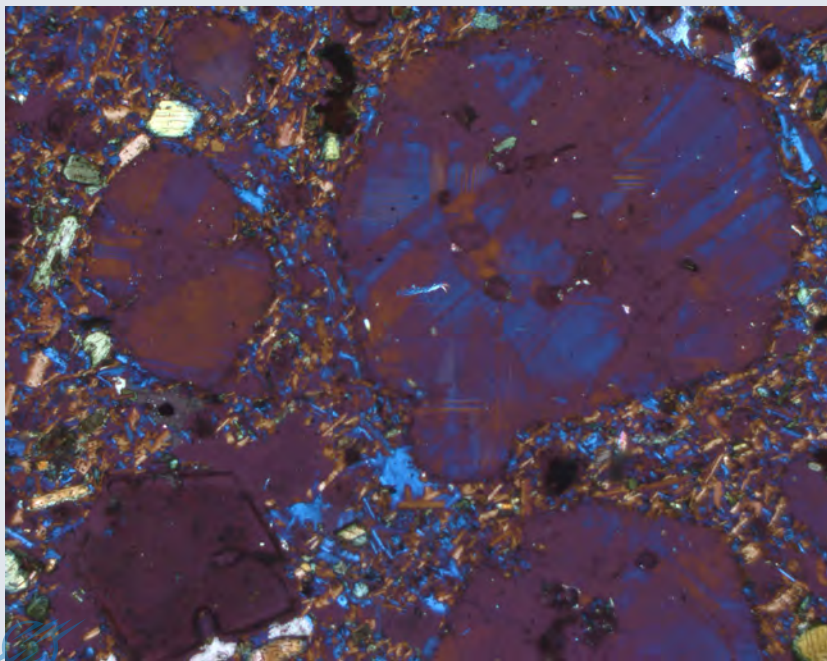






## Leucite et Noséane

- La roche est une phonolite à texture microlithique : fond vitreux, microlithes de feldspath alcalin et de pyroxène.
- *En haut à gauche* LN : distinction entre la leucite limpide, globulaire et la noséane apparaissant grise, avec des formes cubiques.
- *En haut à droite* : LP : leucite et noséane apparaissent noires.
- *En bas à gauche* : l'ajout d'une lame auxiliaire fait apparaître les macles dans la leucite.



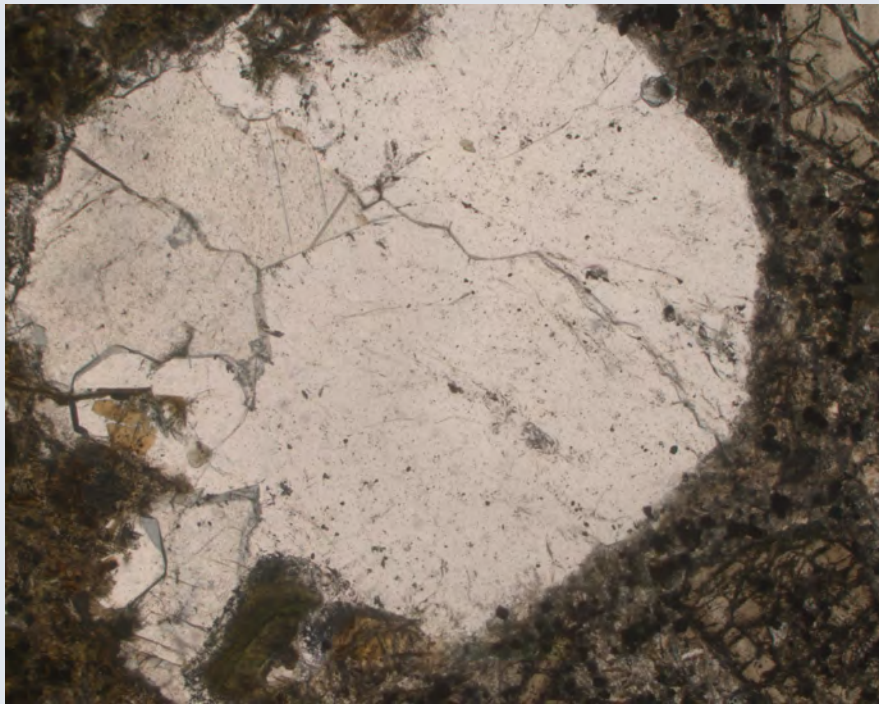
R







# Analcime



- Cubique.
- Trapézoèdres, grains, ou xénomorphe dans la matrice des laves.
- Clivage (001) (cubique) mauvais.
- Incolore.
- Indice très faible  $N = 1,479 - 1,493$  (fort relief négatif).
- Isotrope.
- Mais montre parfois une très faible biréfringence ( $\Delta < 0,001$ ) ce qui fait ressortir les macles (001), (110) lamellaires répétées.

Difficile à distinguer de la leucite, ci ce n'est par son gisement.

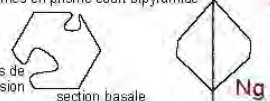
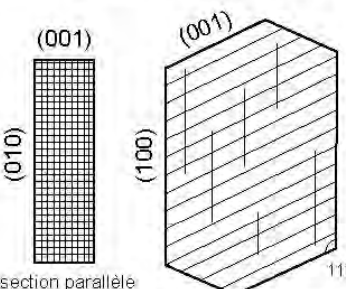
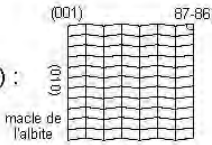
Ici en géode dans un basalte, la partie gauche de la géode est remplie par de la calcite.

Puy de Marman, Cantal.

AR

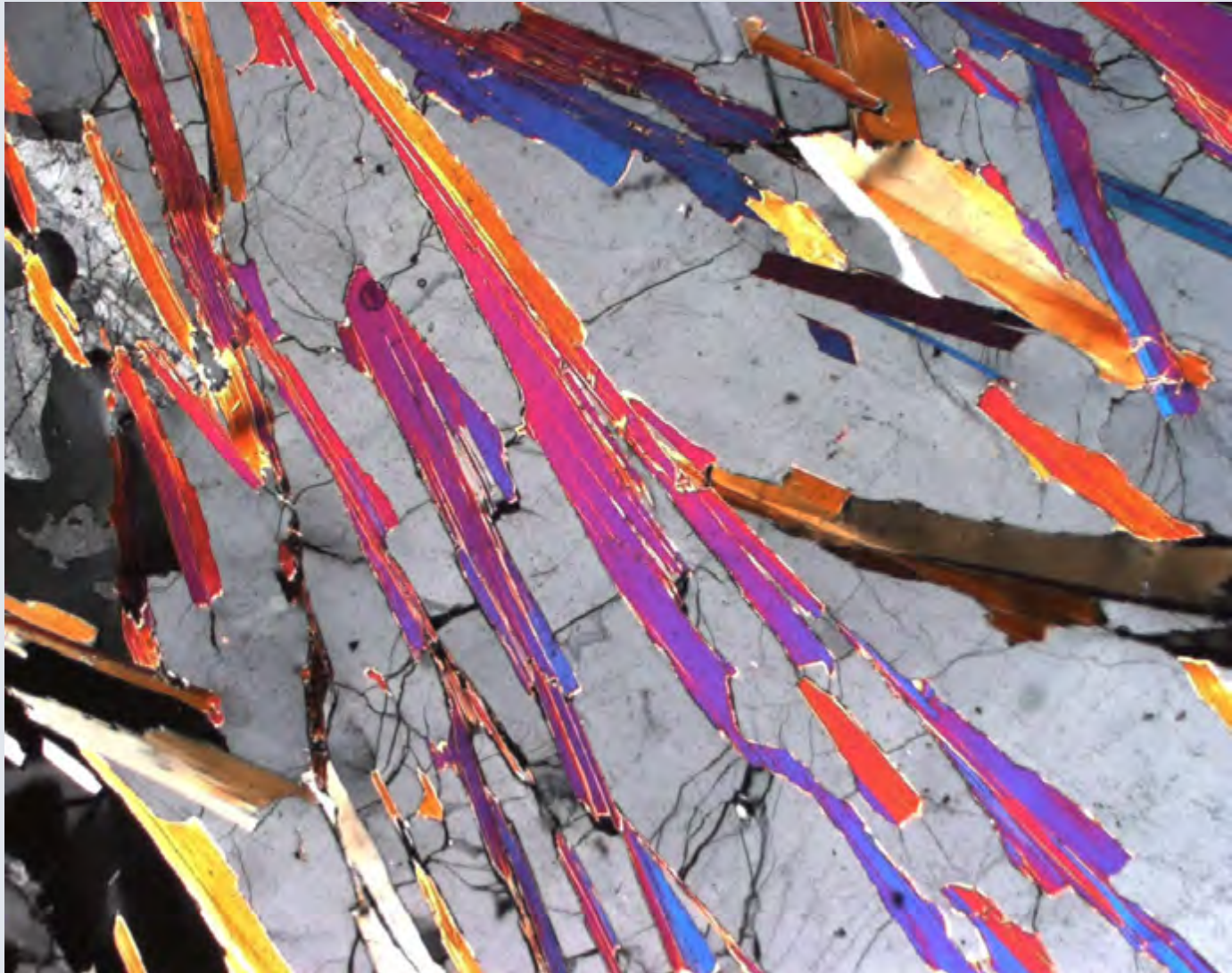




| Nom<br>formule chimique                                                                                                                                                                                                                                                              | symétrie                              | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Indice                                                                                    | Couleur<br>Altérations                                                                 | Biréfringence                             | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------|
| Quartz<br>$\text{SiO}_2$                                                                                                                                                                                                                                                             | hex<br><br>(rhomb à $T > 573^\circ$ ) | le plus souvent sans forme pas de clivage<br>haute température (roches volcaniques)<br>formes en prisme court bipyramide<br><br>Ng                                                                                                                                                                                                                                                          | 1,45<br>baume<br>quartz 1,54<br>1,5442<br>1,5533<br>journaline 1,85<br>grenat 1,75<br>2,8 | incolore<br><br>pas d'altérations                                                      | 0,0081                                    | U+                         |
| Feldspaths<br><br>feldspaths potassiques<br>$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$<br><br>sanidine<br>orthose<br>microcline<br><br>plagioclases<br>$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$<br>albite<br>oligoclase<br>andésine<br>labrador<br>bytownite<br>$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$<br>anorthite | mnoctricl                             | perthites (dans les FK)<br><br>angle entre les clivages (001) - (010)<br>90°<br>90°<br>90° 39'<br><br>section parallèle à (100)<br>section parallèle à (010)<br><br>macles simples : Carlsbad, Baveno, Manebach<br>polysynthétiques (plagioclases) : albite (010) péricline [010]<br><br>macle de l'albite | 1,518<br>1,524<br>1,528<br>1,538<br>1,575<br>1,588                                        | incolore<br><br>altérations :<br>rubéfaction<br><br>séricitisation<br>saussurification | 0,005<br>0,007<br>0,010<br>0,008<br>0,013 | B-<br><br>B-               |
| Néphéline<br>$\text{NaAlSiO}_4$                                                                                                                                                                                                                                                      | hex                                   | prismes hexagonaux courts<br><br>Np<br>section basale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,528<br>1,547                                                                            | incolore<br>très altérable<br>cancrinite                                               | 0,003<br>0,005                            | U-                         |
| Leucite<br>$\text{KAlSi}_2\text{O}_6$                                                                                                                                                                                                                                                | quadr<br>pseudo<br>cub                | trapézoèdre = leucitoèdre<br><br>macles polysynthétiques                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 1,508<br>1,508                                                                            | incolore                                                                               | 0,001                                     |                            |
| Sodalite - Haüyne -<br>Noséane<br>$(\text{Na}, \text{Ca})_8(\text{AlSiO}_4)_6(\text{Cl}, \text{SO}_4)_{1-2}$                                                                                                                                                                         | cub                                   | clivage (110)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1,483<br>1,507                                                                            | incolore<br>(bleu pâle)                                                                |                                           |                            |

# Minéraux ferro-magnésiens majeurs :

## 3a – micas, chlorites, amphiboles







# 3a- les minéraux ferro-magnésiens majeurs : micas, chlorites, amphiboles

## *Sommaire*

- **Les micas et minéraux voisins**

Muscovite

- extinction en œil d'oiseau

Biotite

- altération en chlorite

Phlogopite

Micas lithinifères, lépidolite

Micas durs : margarite

Stilpnomélane

- **Les chlorites**

- **Les amphiboles**

- **Amphiboles calciques**

Hornblende brune

Hornblende

Trémolite

Actinote

- **Amphiboles sodiques**

Glaucophane

Riébeckite

Arfvedsonite (eckermannite)

- **Amphiboles ferro-magnésiennes**

Anthophyllite

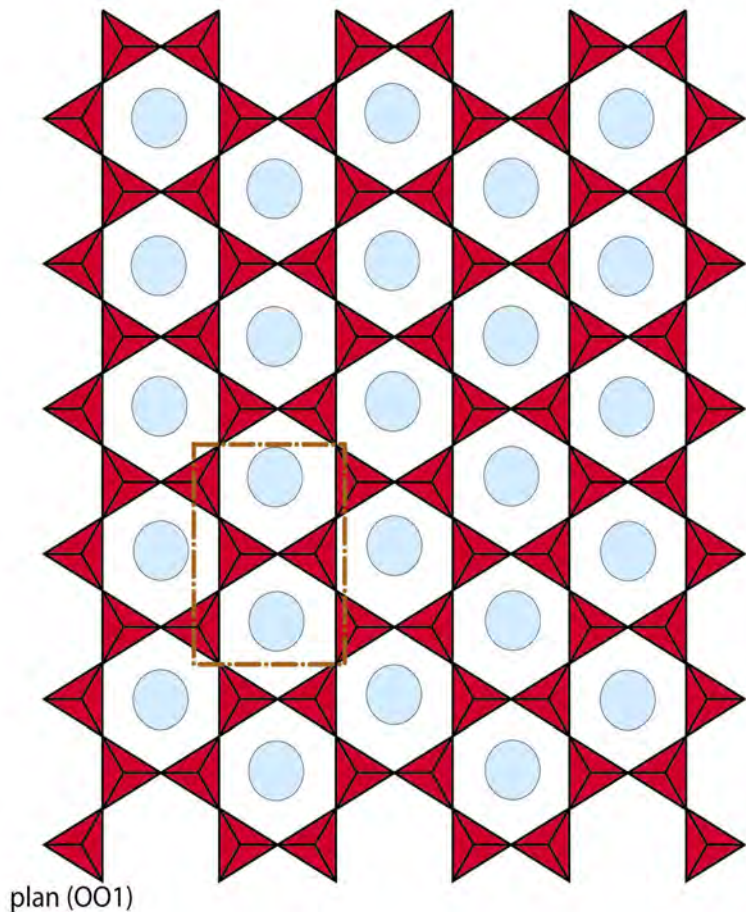
Cummingtonite

Grunérite

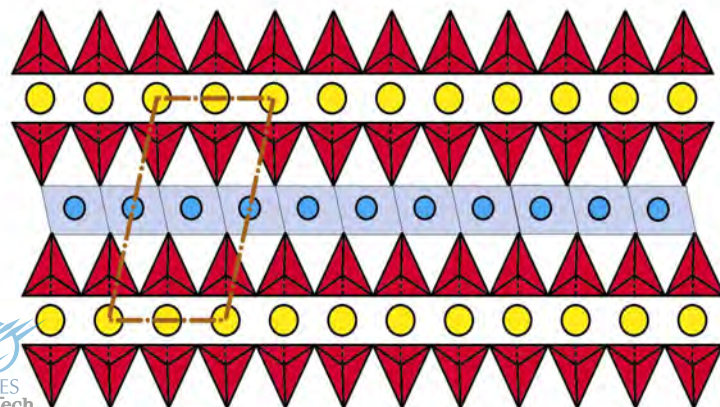


# Structure des micas

- Phyllosilicates
- Feuilletés constitués de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique
- Reliés par une couche d'ions K
- Phlogopite
- $\text{K}_2\text{Mg}_6\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}(\text{OH})_4$



maille  
 $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$



|          |             |
|----------|-------------|
| 2K       | 6 O         |
| 4 Si, Al | 2 O, 2 (OH) |
| 6 Mg     | 2 O, 2 (OH) |
| 4 Si, Al | 6 O         |
| 2K       |             |
| 4 Si, Al |             |



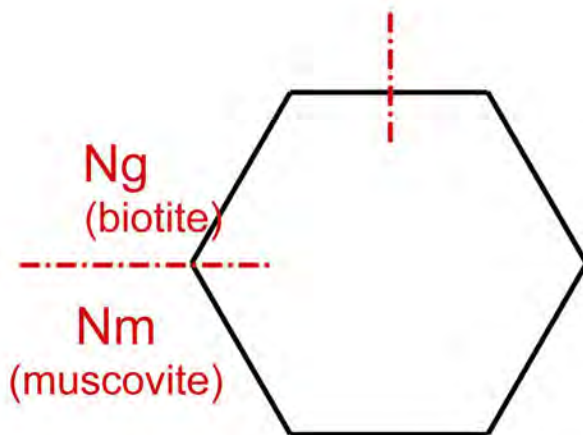
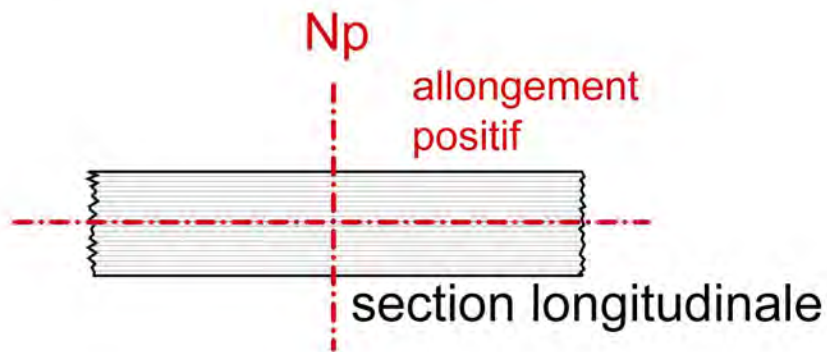
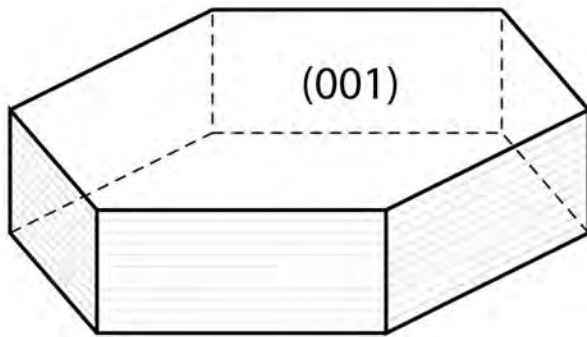


# Les micas

- Phyllosilicates.
- Système monoclinique (pseudo-hexagonal).
- $K Y_{2-3} Z_4 O_{10} (OH)_2$
- Y = site octaédrique : Fe, Mg, Al, Ti, Mn, Li, etc.
- Z = site tétraédrique : Si, Al
- Selon le remplissage de la couche octaédrique on distingue les micas
  - dioctaédriques dont le type est la muscovite  $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
  - les micas trioctaédriques dont le type est la biotite  $K(Fe,Mg)_3Si_3AlO_{10}(OH)_2$
- Il existe des micas sodiques (paragonite = équivalent sodique de la muscovite) et des micas calciques (ou micas durs).
- Substitutions :
  - $Fe \Leftrightarrow Mg$  (Fe/Mg at.  $> 2/3$  = biotite ;  $< 2/3$  phlogopite)
  - $Al^{VI} Al^{IV} \Leftrightarrow Mg Si$  substitution tchermackitique (/ phengitique)
  - $2 Al^{VI} \Leftrightarrow 3 Mg$  substitution muscovitique
  - $2 Al^{VI} \Leftrightarrow (Fe,Mg) Ti$   $2 (Fe, Mg) \Leftrightarrow Ti$   $Si Al^{VI} \Leftrightarrow Al^{IV} Ti$
  - $K \Leftrightarrow Na$
  - $OH \Leftrightarrow F \Leftrightarrow Cl$
  - On passe des muscovites aux illites (argile) par la substitution  $K Al^{IV} \Leftrightarrow Si$ .



## Caractères communs aux micas



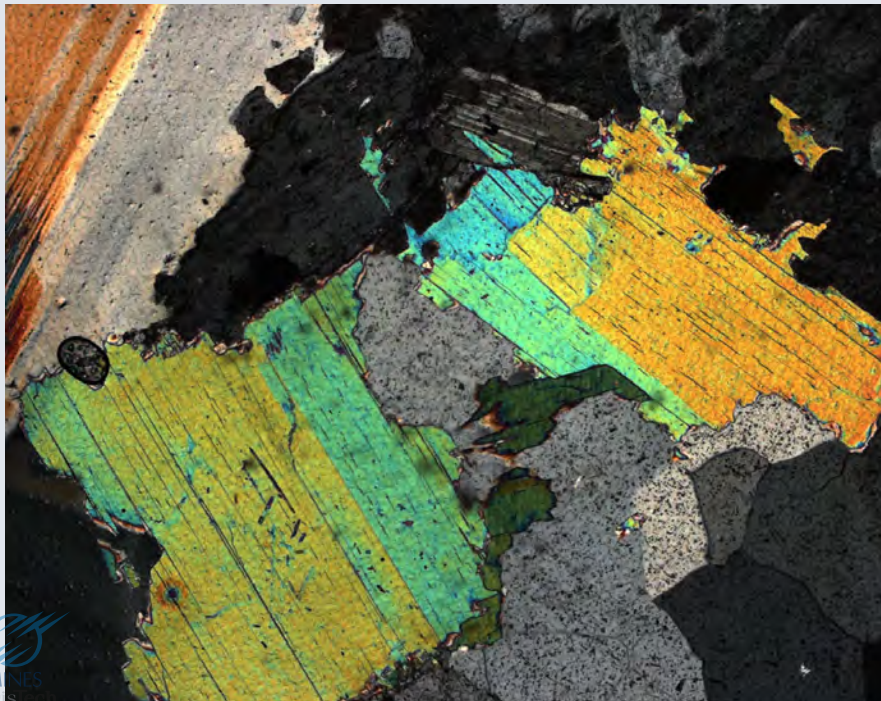
section basale

- Monoclinique pseudohexagonal.
- Tablettes hexagonales aplaties selon (001) : lamelles (001) minces, flexibles, élastiques– formes hexagonales rares.
- Clivage (001) parfait, fin.
- Extinction droite sur le clivage.
- Allongement selon le clivage positif.





# Muscovite



- La substitution



conduit aux phengites.

- Incolore – les phengites sont vert pâle.

- Np 1,552 – 1,574

Ng 1,587 – 1,616

Indices supérieurs à ceux du quartz,  
inférieurs à ceux des amphiboles.

- Biréfringence  $\Delta = 0,036 - 0,049$

Teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre.

- Biaxe négatif.

- $2V = 30 - 47^\circ$   $r > v$

- La roche est un granite : quartz, orthose (rubéfiée), plagioclase.

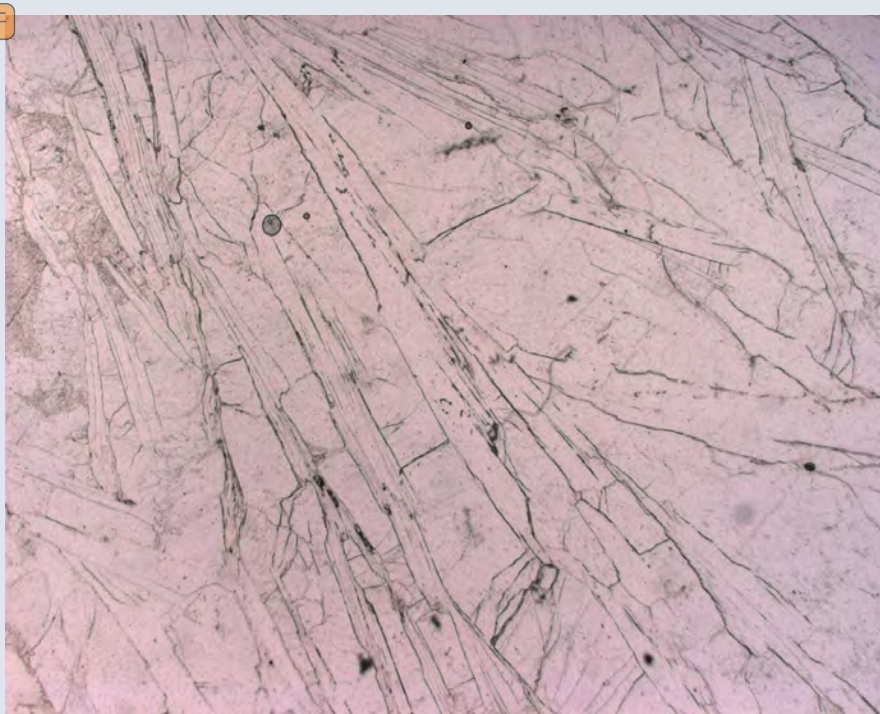
TC





# Muscovite

- Grandes lamelles en gerbes dans une pegmatite.
- Le fond de la roche est ici du quartz.
- Pegmatite  
La Chaumette, Lozère, France.



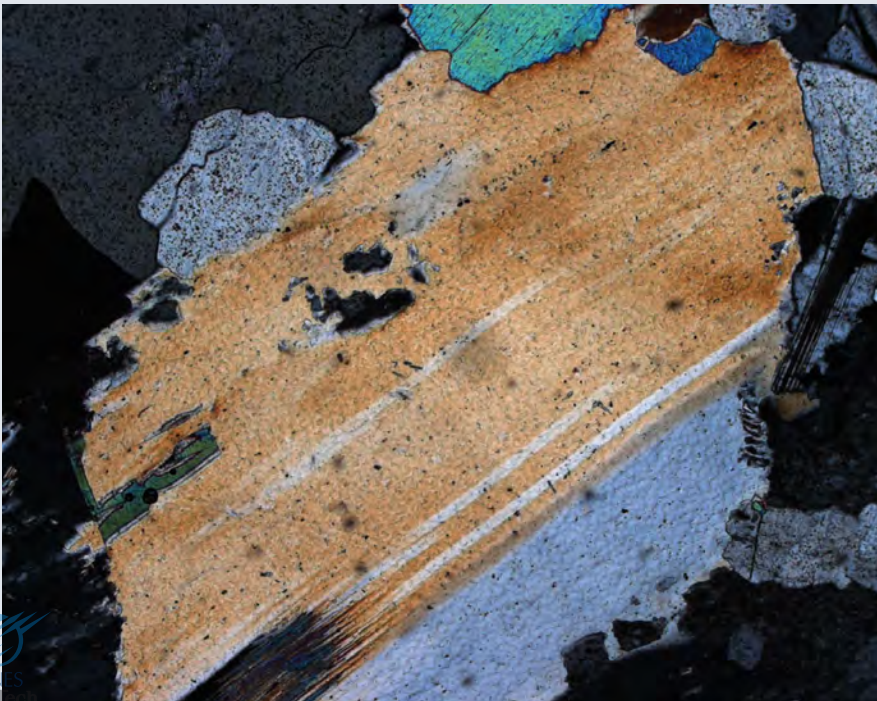
TC





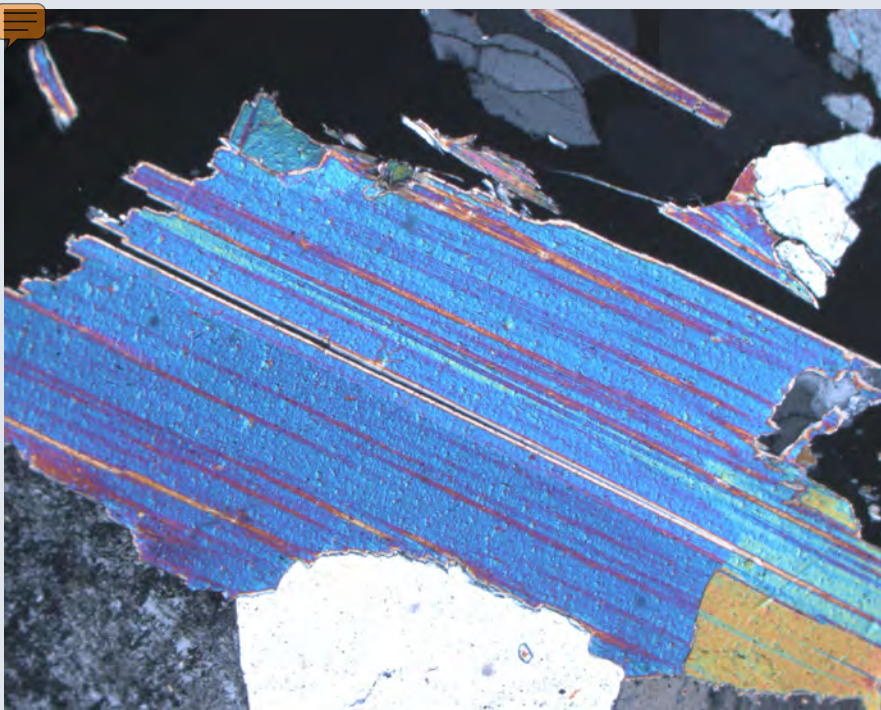
# Muscovite

## section basale



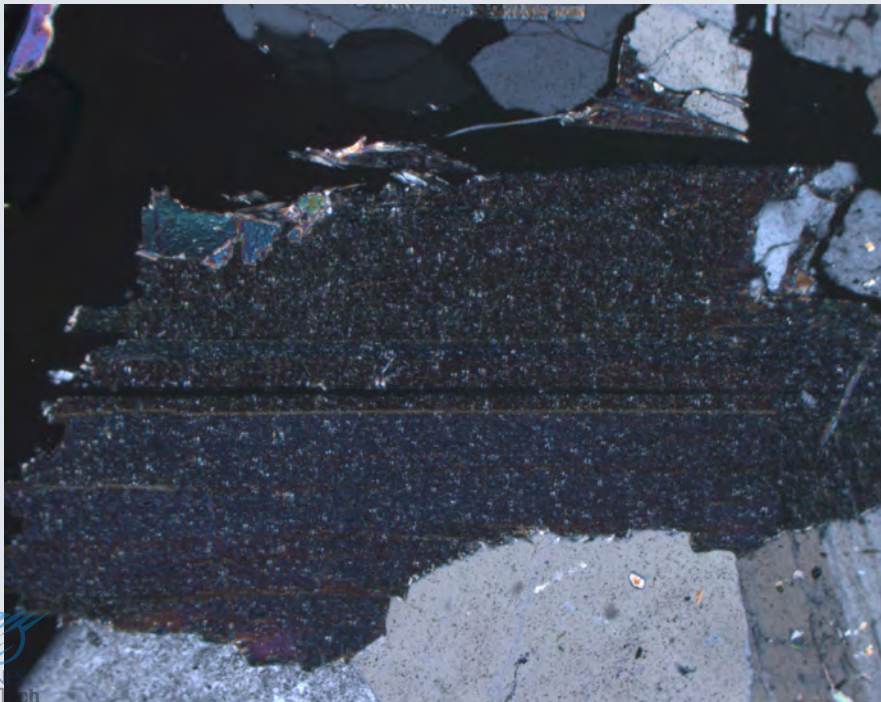
- Lorsque les micas sont coupés selon le plan (001) ou au voisinage de ce plan, les clivages ne sont pas visibles et les teintes de polarisation sont basses : jaune, blanc, gris du 1<sup>er</sup> ordre (on est proche de l'axe optique).
- C'est un piège courant !





## Extinction en œil d'oiseau des micas

- Lors de l'extinction, les micas (ici une muscovite) ne sont pas uniformément éteints mais montrent des petites plages qui restent éclairées. Cela est dû à des défauts dans le réseau. Cette extinction en œil d'oiseau est caractéristique des micas.

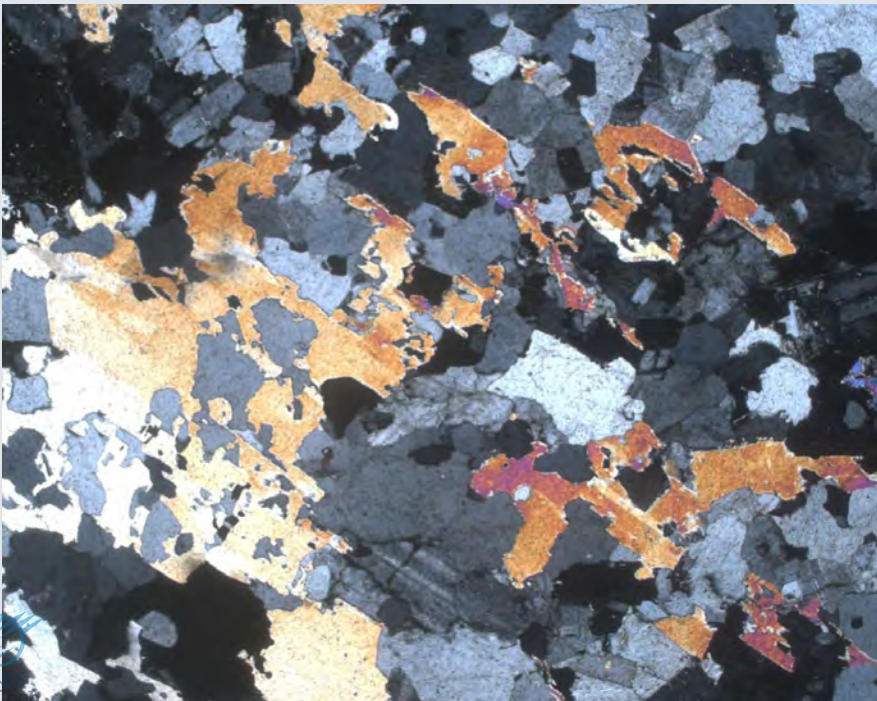






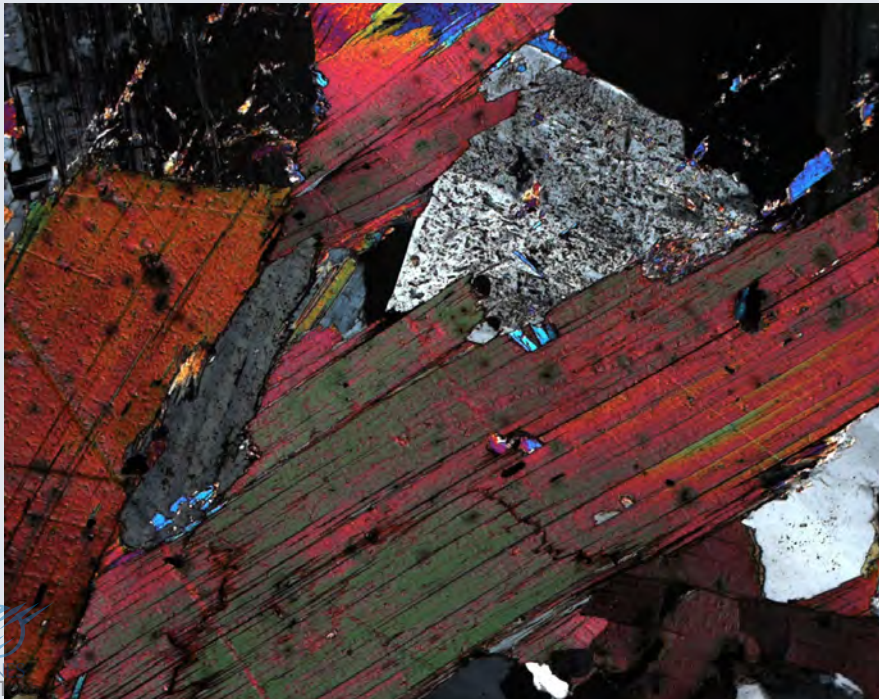
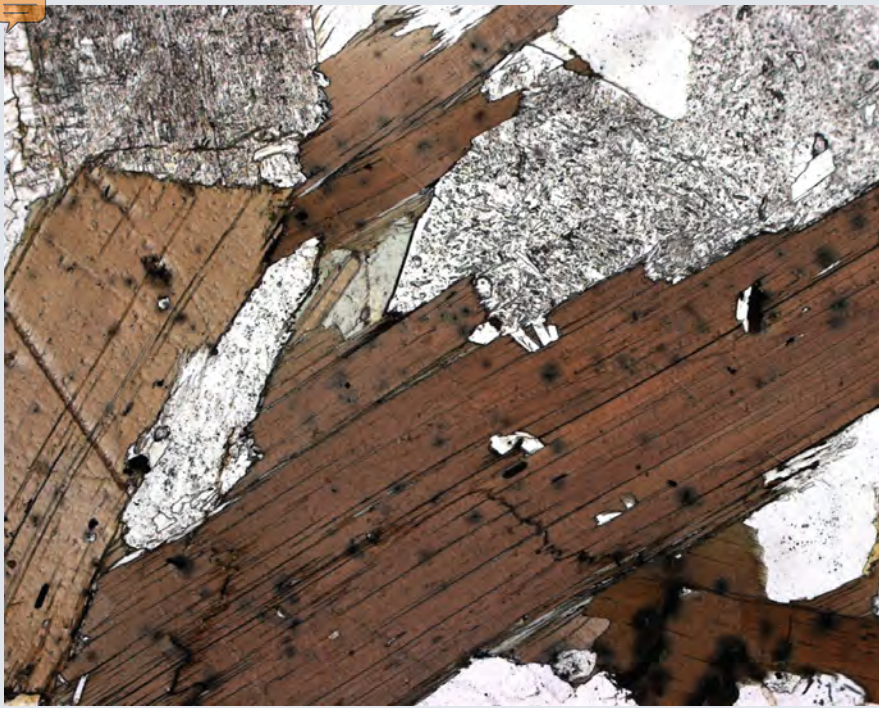
## Muscovite « en éponge »

- Grands monocristaux lacunaires en altération des cristaux de feldspath potassique d'un granite.
- En lumière naturelle, le feldspath potassique est rubéfié , le plagioclase plus légèrement altéré.
- Granite de la Margeride  
Saint-Chély-d'Apcher, Lozère, France.





# Biotite



- Section longitudinale.
- Clivages parallèles à l'allongement.
- Inclusions pléochroïques de zircon.
- Pléochroïsme dans les bruns.

(les biotites peuvent être brun plus ou moins intense, brun rouge, brun jaune, vert, brun noir).

- Np 1,571 – 1,616
- Ng 1,610 – 1,697

Indices plus forts que ceux de la muscovite.

- Biréfringence  $\Delta = 0,039 - 0,081$   
Polarise dans les teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre ;  
teintes souvent masquées par la couleur propre.
- Biaxe négatif  $2V = 0 - 30^\circ$  presque uniaxe.
- $r >$  ou  $< v$  selon le rapport Fe/Mg
- La roche est un granite : quartz, orthose (coin NE), plagioclase (séricitisé). Légère chloritisation de la biotite (plage verdâtre vers le centre). Un peu de muscovite secondaire sur biotite.

TC







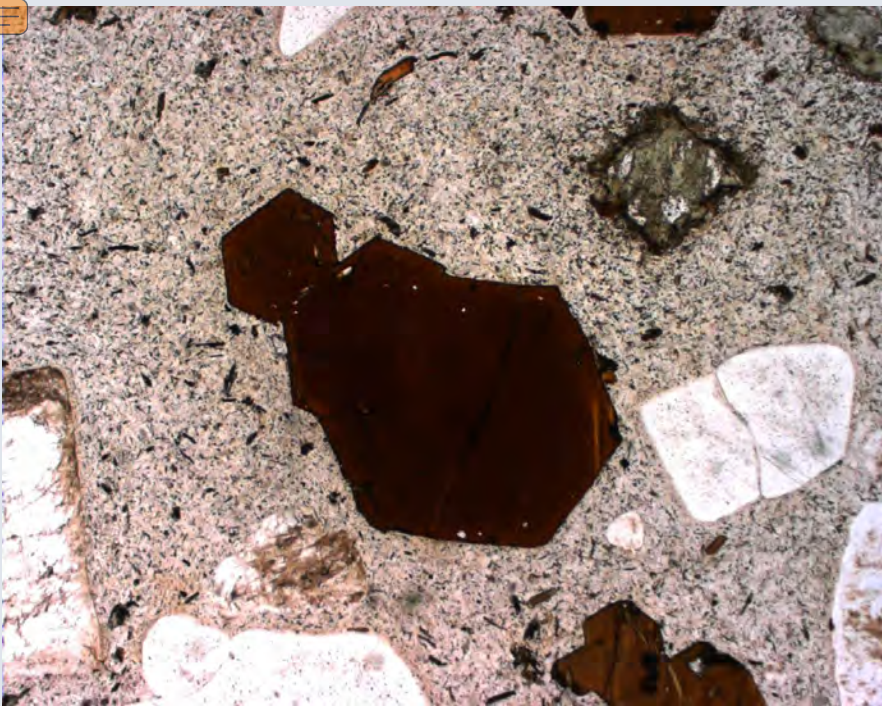
# Biotite

- Section longitudinale.
- Clivages parallèles à l'allongement.
- Inclusions pléochroïques de zircon.
- Pléochroïsme de brun pâle (cristal principal) à brun rouge foncé (cristaux à droite de la photo). 
- Muscovite en bordure du cristal principal de biotite, provenant en partie de l'altération de celui-ci.
- Le cristal NNE-SSW dans le coin NW est une biotite chloritisée.
- La roche est un granite : quartz, orthose, plagioclase et une matrice grenue

TC







## Biotite

- Section basale hexagonale.
- Section pratiquement éteinte en LP (presque perpendiculaire à l'axe optique).
- La roche est un microgranite avec des phénocristaux de quartz, orthose, plagioclase et une matrice microgrenue.



TC





## Biotite

- Section basale hexagonale.
- Inclusions pléochroïques de zircon.
- Section presque perpendiculaire à l'axe optique, d'où les teintes de polarisation très faibles, masquées par la couleur propre de la biotite.
- Cristal en inclusion dans une orthose.
- Granite de Vire, Manche, France.

TC





# Phlogopite

- Terme magnésien des biotites.
- Les termes purement magnésiens sont incolores ; l'augmentation de la teneur en fer produit des teintes jaunâtres, brun jaune, etc.

• Np 1,522 – 1,568

Ng 1,549 – 1,650

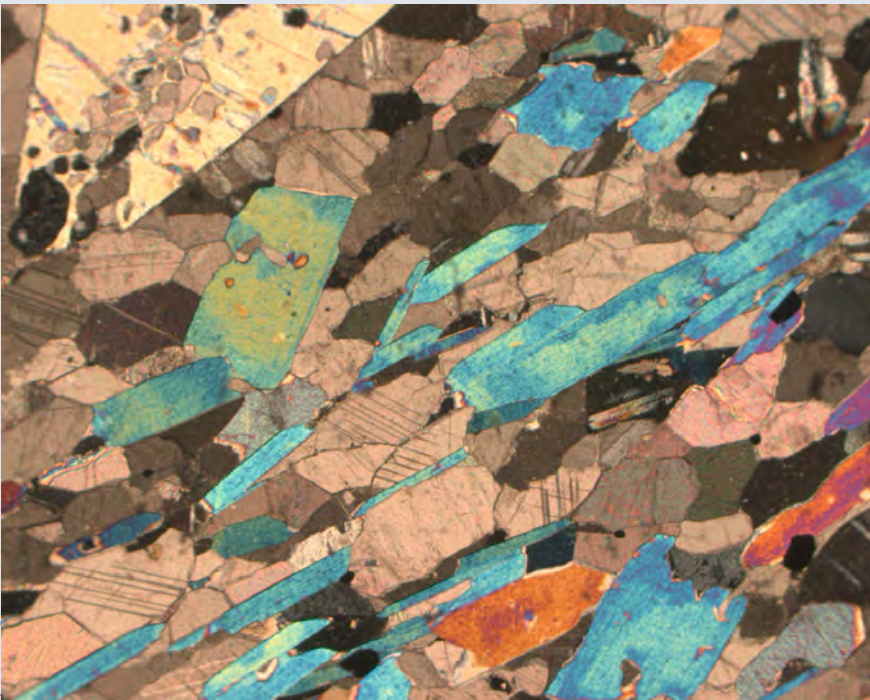
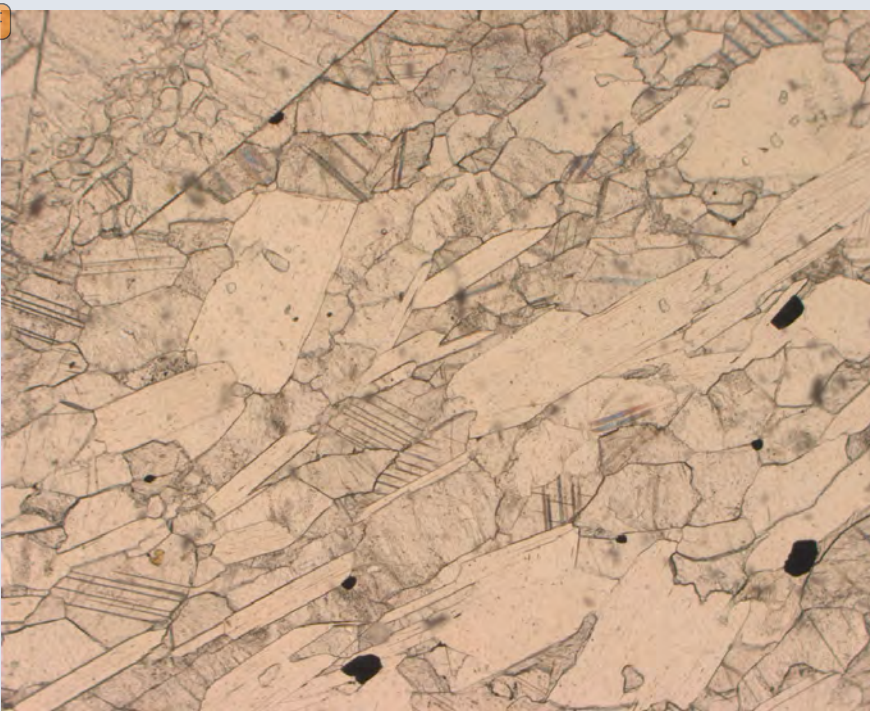
Indices plus faible que les biotites ferrifères, voisin de ceux des muscovite.

- Biréfringence  $\Delta = 0,027 - 0,045$

La phlogopite peut ressembler beaucoup à la muscovite

- La roche est un marbre magnésien : fond de carbonate ; le minéral triangulaire dans le coin NW est de la tourmaline (magnésienne).
- Binnental, Suisse

C



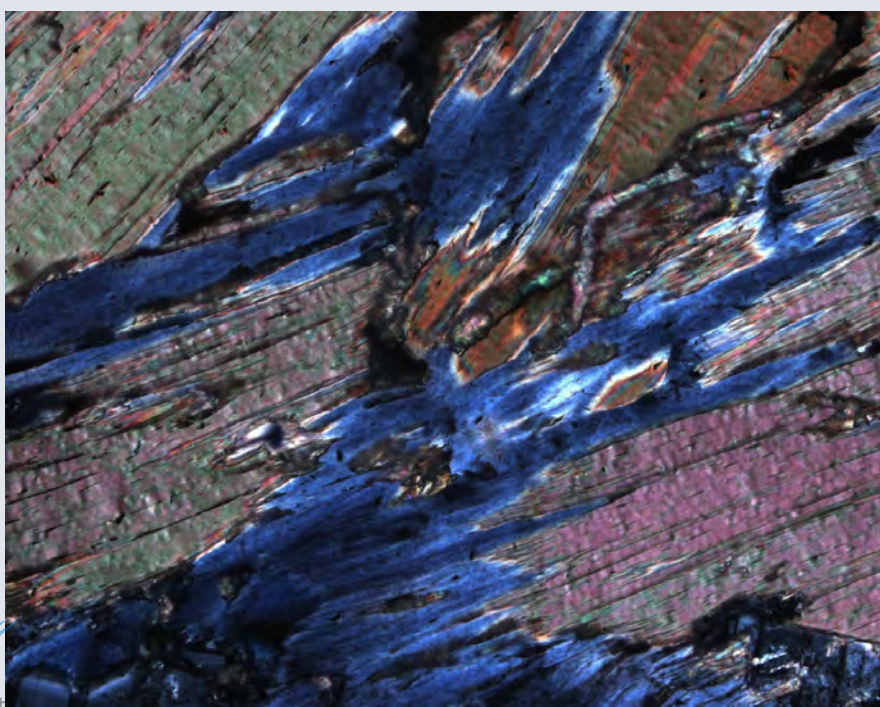


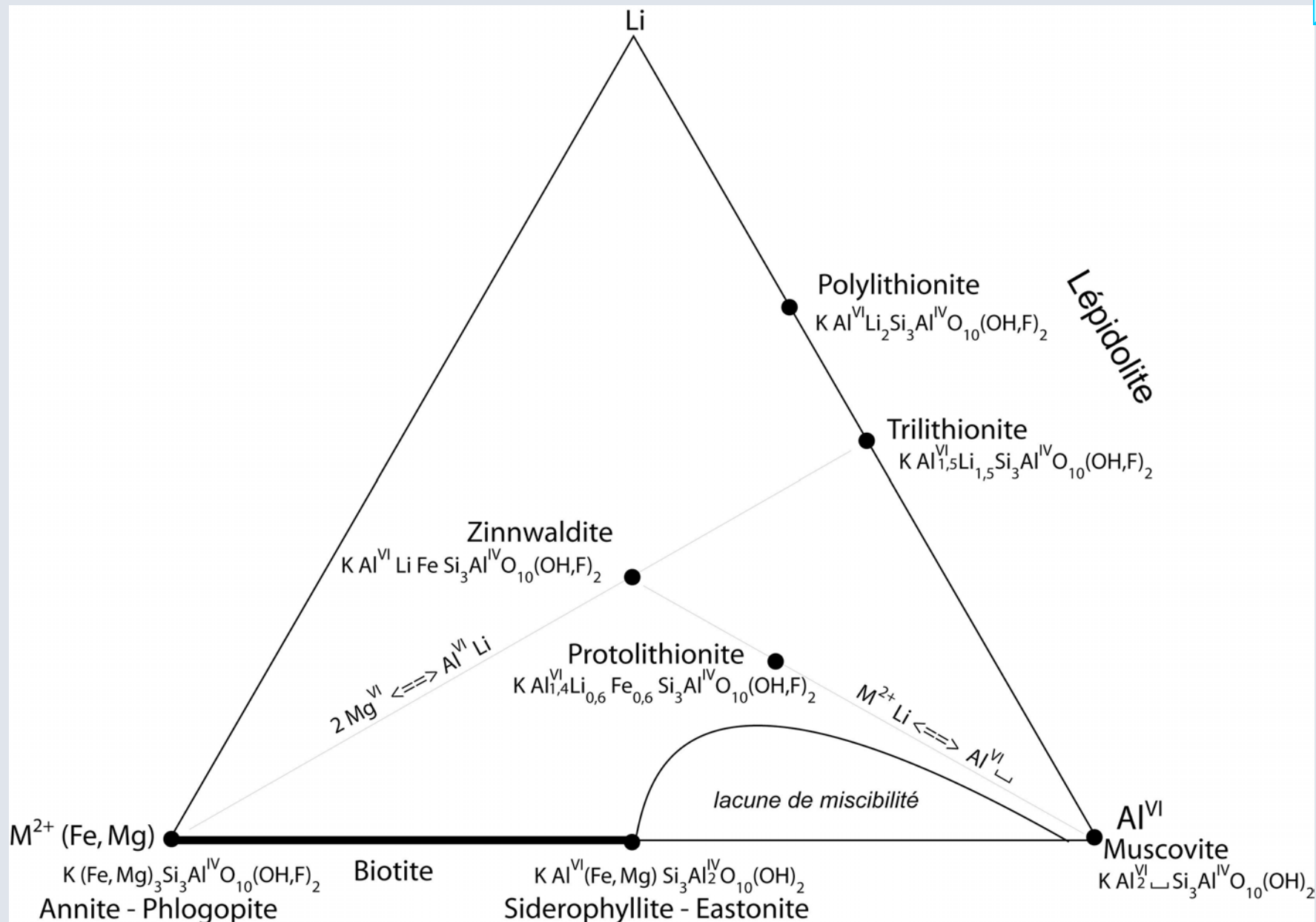


## Biotite en voie de chloritisation

- La chlorite gris vert se développe le long des clivages de la biotite.
- La chlorite polarise dans des bleu violacé, bleu de Prusse, hors échelle de Michel-Lévy.
- Les minéraux brunâtres à fort relief en mouches dans la chlorite sont des produits titanés (« leucoxène ») ; le titane était initialement contenu dans la biotite mais ne rentre pas dans le réseau de la chlorite.
- Col de Fontfroide, Hérault, France.

TC





## Micas lithinifères

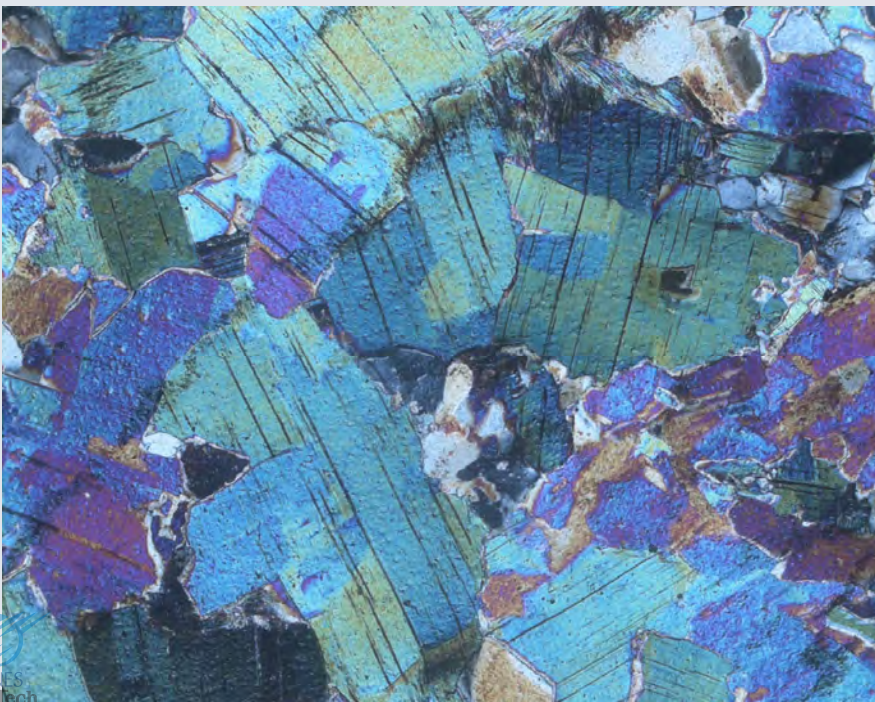




# Lépidolite



- Incolore.
- $N_p$  1,525 – 1,548  
 $N_g$  1,554 – 1,587
- Biréfringence  $\Delta = 0,018 - 0,038$   
Teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre.
- Biaxe négatif.
- $2V = (5^\circ) - 18^\circ - 41^\circ - (58^\circ)$
- $r > v$



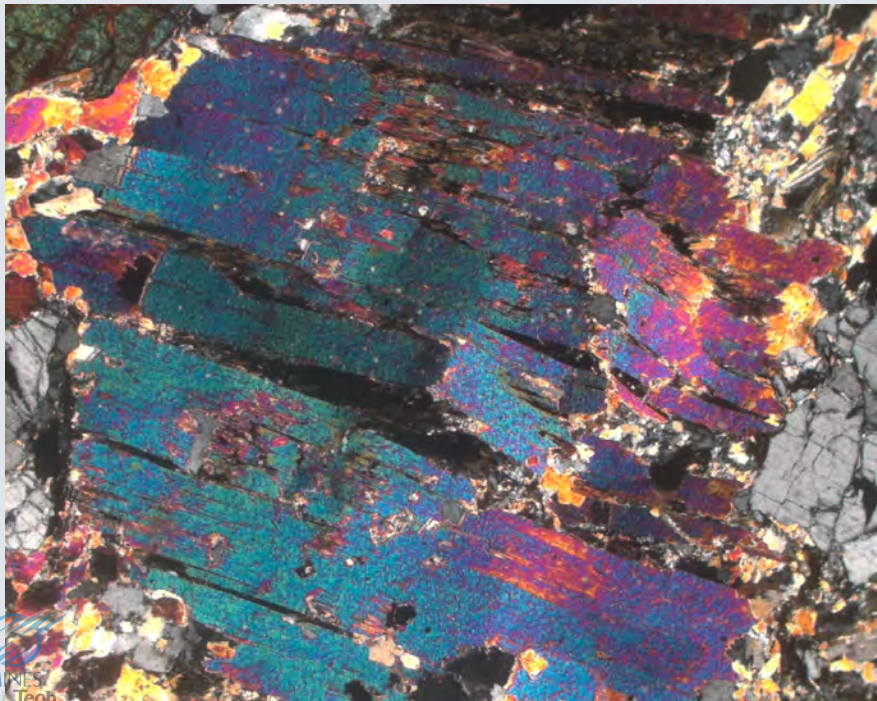
- Ne se distingue de la muscovite que par le fait que la lépidolite est **souvent zonée** (zonation observable en LP) et que  $2V$  est souvent plus faible.
- Monts d'Ambazac, Haute Vienne, France.

AR





# Zinnwaldite



- Incolore à brun pâle.
- $N_p$  1,535 – 1,558  
 $N_g$  1,572 – 1,590
- Biréfringence  $\Delta = 0,035$   
Teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre.
- Biaxe négatif.
- $2V = 0^\circ - 41^\circ$
- $r > v$
- Il s'agit ici d'un cristal zoné depuis un cœur brun rouge plus voisin d'une zinnwaldite à une périphérie vert pâle plus proche d'une trilithionite.
- Le minéral incolore à fort relief sur les bords de la photo est de la topaze. 
- Pedra Branca, Goiás, Brésil.

R







# Margarite



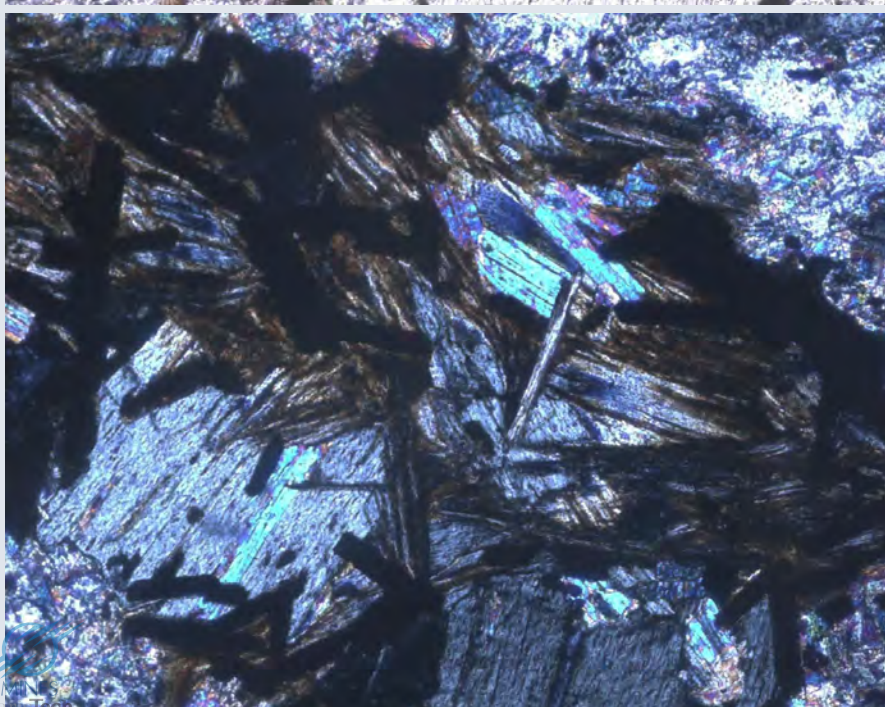
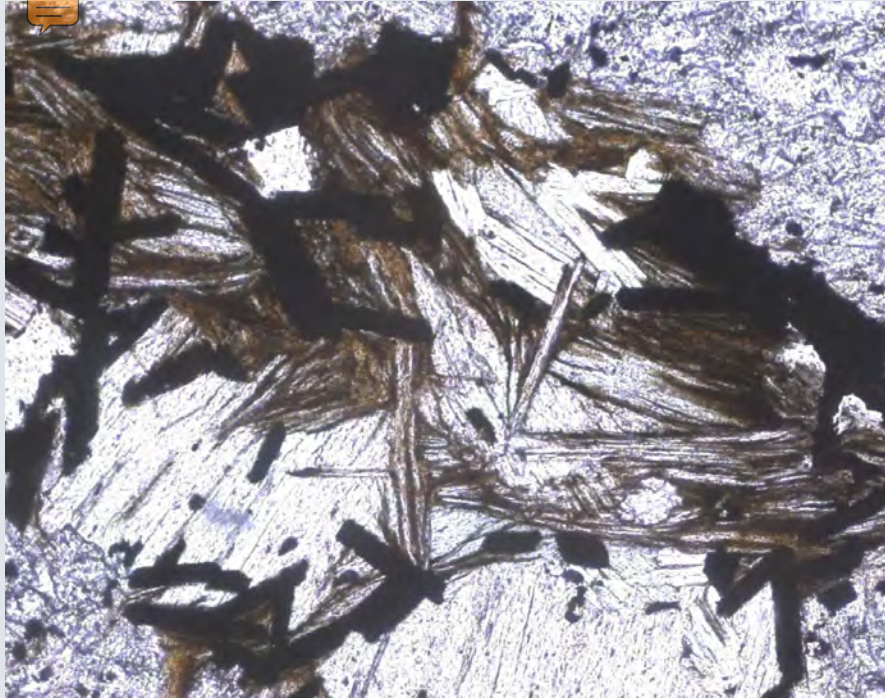
Le groupe des micas durs se distingue des micas communs par la présence de Ca au lieu de K en site interfoliaire.

- La margarite est l'équivalent de la muscovite.
- Elle s'en distingue par des indices plus élevés (Np 1,630 – 1,638 ; Ng 1,644 – 1,650).
- Une biréfringence plus faible ( $\Delta = 0,012 - 0,014$ ) : elle polarise dans les jaunes de la fin du premier ordre.
- Les cristaux ne sont pas flexibles comme dans les micas communs.
- La macle (001) est commune.
- Le fond de la roche est constitué de plagioclase calcique et de quartz. Les grains à fort relief dans le coin supérieur gauche sont du disthène. Quelques cristaux de biotite au centre.
- Ouala, Gabon

R







# Margarite



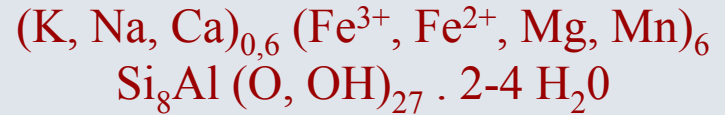
- Margarite dans un émeri de Naxos, Grèce.
- La margarite apparaît dans des zones plus largement cristallisées dans un fond de corindon (incolore, fort relief, polarisant en blanc)  et de diaspore (petits cristaux enchevêtrés, teintes de polarisation vives)  . Ce dernier est sans doute secondaire sur le corindon (coin supérieur droit et inférieur gauche).
- Elle est associée à de l'hématite (opaque, en lamelles) et de la magnétique (cristaux polygonaux plus équants).
- Une limonite tardive se développe dans les clivages des micas.
- Quelques cristaux de muscovite (teintes de polarisation dans les bleu vert). 
- Les deux cristaux incolores, polarisant en gris vert dans le bas de la photo sont du chloritoïde. 







# Stilpnomélane



- Monoclinique.
- Aspect voisin de celui de la biotite.
- Formes plus aciculaires. Parfois en rosettes.
- Clivage basal (001) parfait et (010) imparfait – ce dernier clivage étant perpendiculaire au premier.
- Pléochroïsme de brun jaune à brun foncé (stilpnomélane).
- Np 1,543 – 1,634
- Ng 1,576 – 1,745
- L'indice croît avec la teneur en fer.
- Se distingue de la biotite par le fait qu'il *ne présente pas l'extinction en œil d'oiseau*.
- Le fond de la roche est constitué de quartz – muscovite – chlorite dans le coin supérieur gauche.
- Modane, Savoie, France.

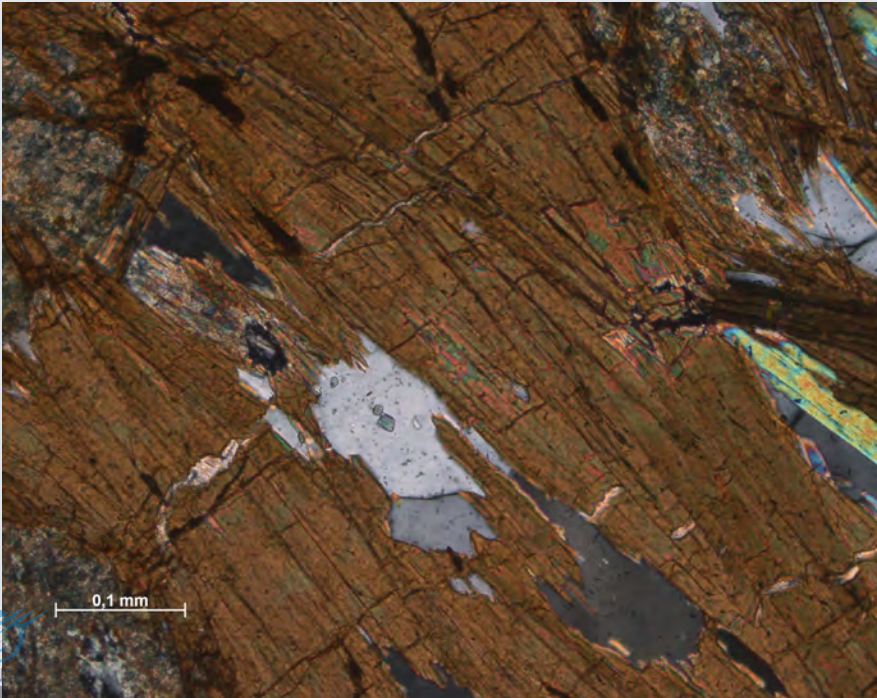
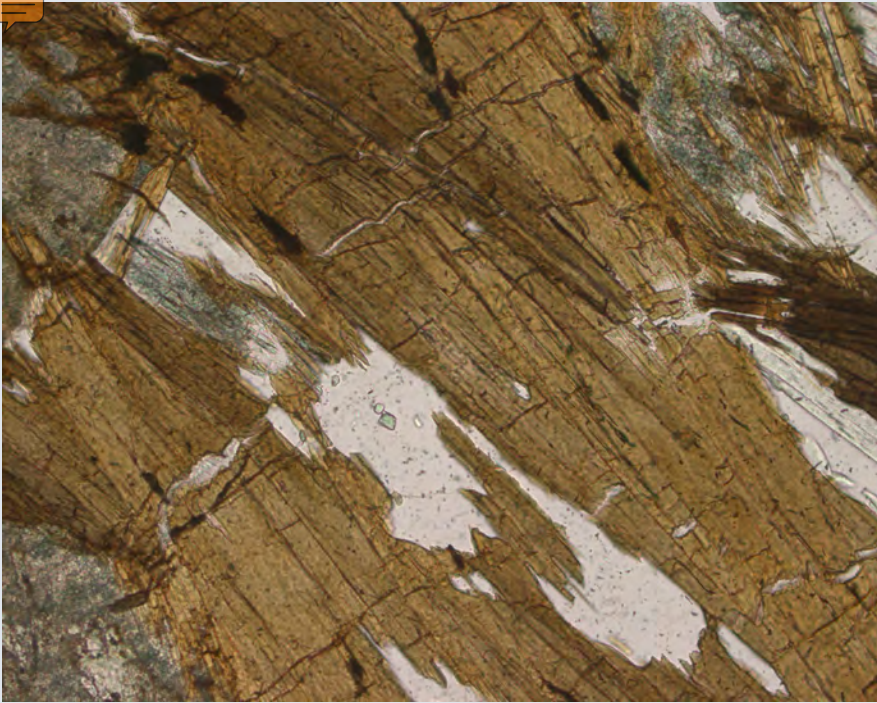
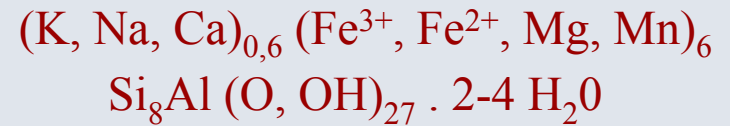
R







# Stilpnomélane

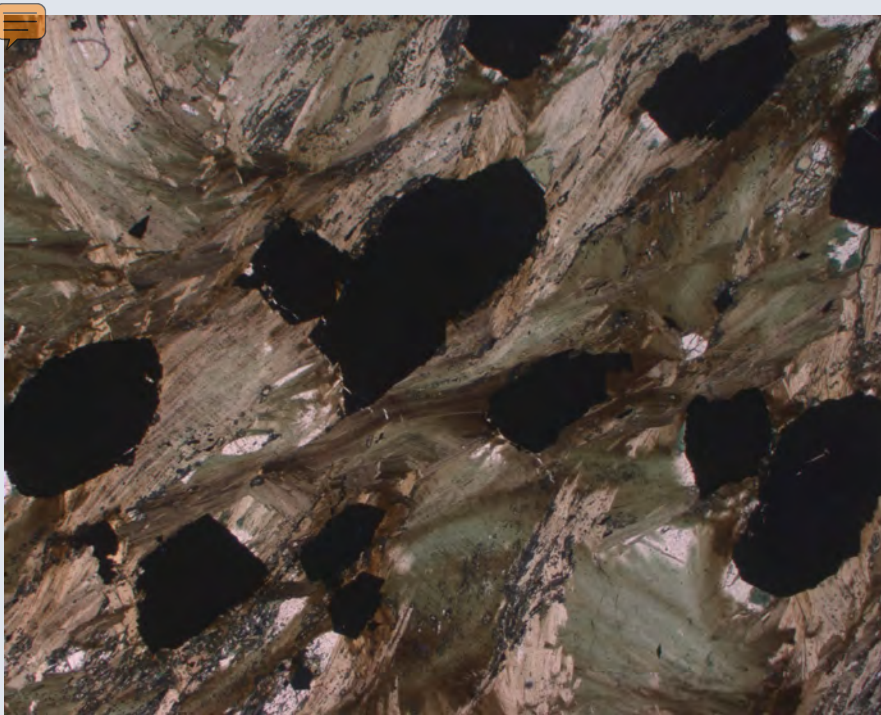


- Clivage basal (001) parfait et clivage (010) perpendiculaire à (001), imparfait, apparaissant ici plutôt comme des cassures.
- Biréfringence  $\Delta = 0,030-0,110$
- Les teintes de polarisation sont masquées par la teinte propre du minéral.
- Quartz, chlorite et un cristal de muscovite interstitiels
- Savoie, France.

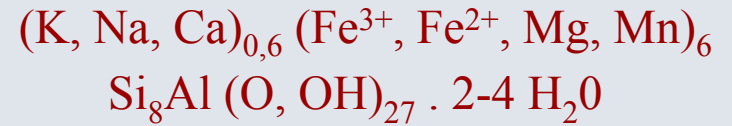
R



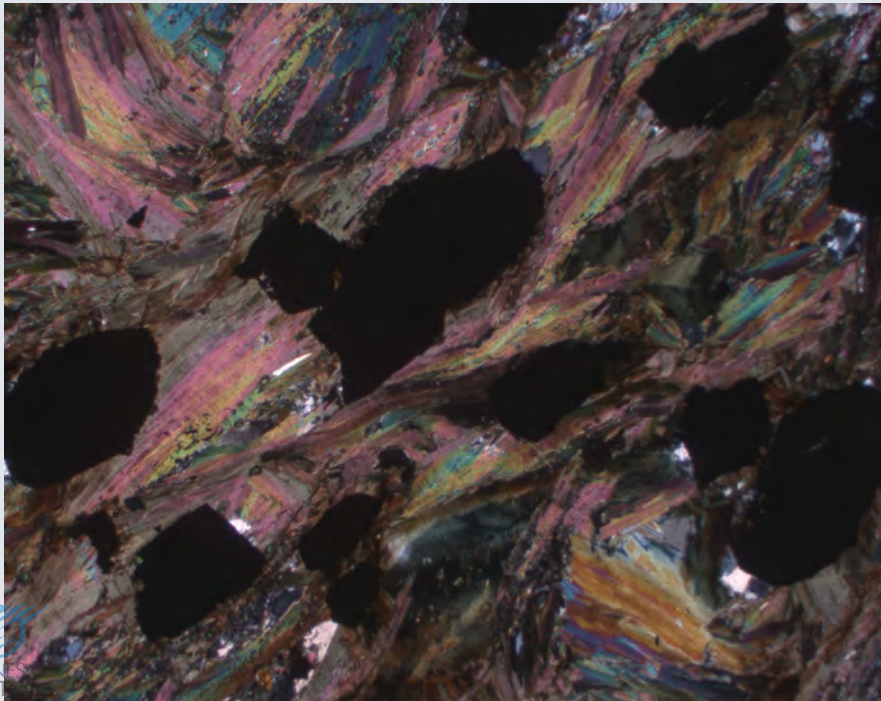




# Ferrostilpnomélane

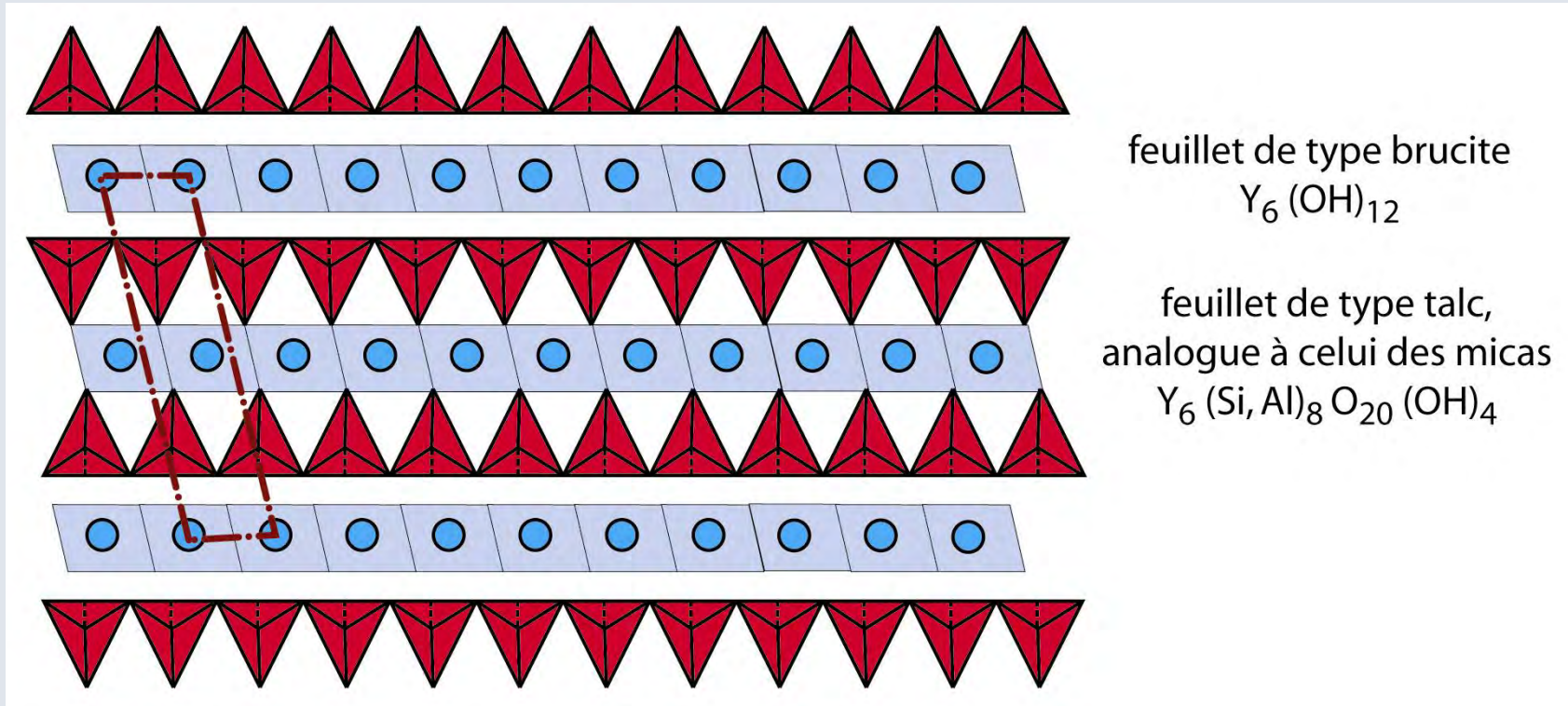


- Stilpnomélane riche en fer ferrique, caractérisé par des couleurs vert - brun vert.
- Les minéraux opaques sont de la magnétite
- Sarazé, Japon.



R

# Les chlorites



- Phyllosilicates : superposition de feuillets de type talc, analogues à ceux des micas, et de feuillets de type brucite (qui jouent le rôle des feuillets K dans les micas).
- $(Mg, Fe, Al)_{12} (Si, Al)_8 O_{20} (OH)_{16}$
- Substitutions  $Mg \Leftrightarrow Fe$  et  $Si (Fe, Mg) \Leftrightarrow Al^{IV} Al^{VI}$
- Contrairement aux micas, les chlorites ne contiennent pas ou très peu de Ti, F ou Cl. Les oxychlorites contiennent du fer ferrique en substitution à l' $Al^{VI}$ .





# Chlorite

- Monoclinique pseudohexagonal.
- **Formes analogues à celles des micas** : lamelles flexibles non élastiques.
- **Clivage (001) facile et parfait** comme les micas.
- Macle (001) souvent répétée.
- **Incolore, vert jaune, vert.**
- Assez faiblement pléochroïque.
- $N_p \quad 1,562 - 1,665$
- $N_g \quad 1,565 - 1,675$

L'indice croît avec la teneur en fer.

Les oxychlorites ont des indices analogues à ceux des biotites.

Eseka, Cameroun.

TC





# Chlorite

- Biréfringence  $\Delta = 0 - 0,010$   
gris du premier ordre.
- Minéral dispersif : teintes de polarisation anormales : gris (fiche précédente), olive (ici), gris bleu, bleu violacé (□), pourpre, etc.
- Biaxe + ou - en fonction de la composition.
- $2V$  varie de  $-20^\circ$  à  $60^\circ$ .
- $r < v$  fort.
- Les grains brun gris à fort relief sont du sphène.

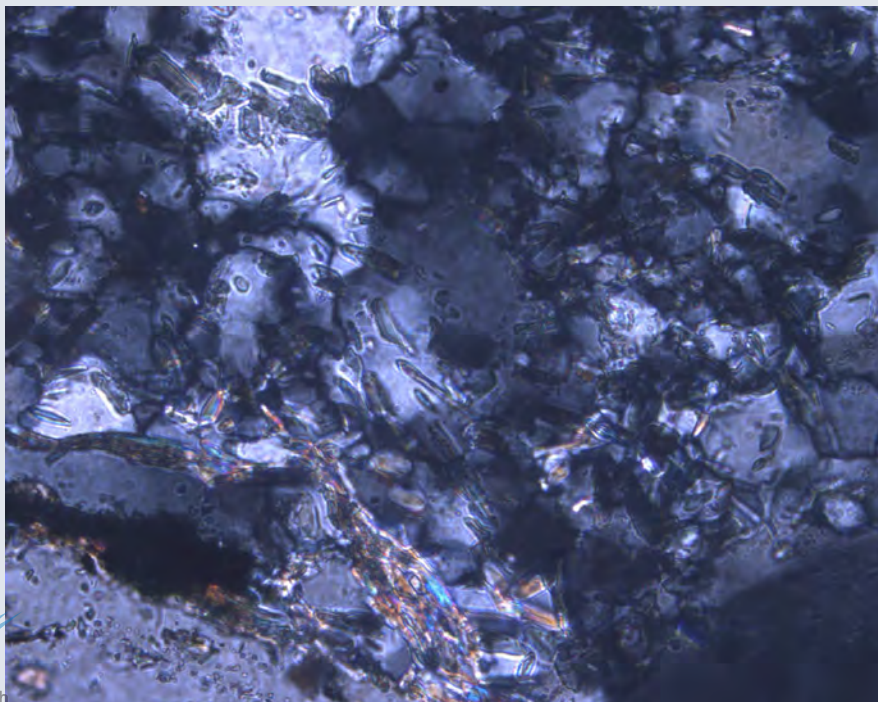
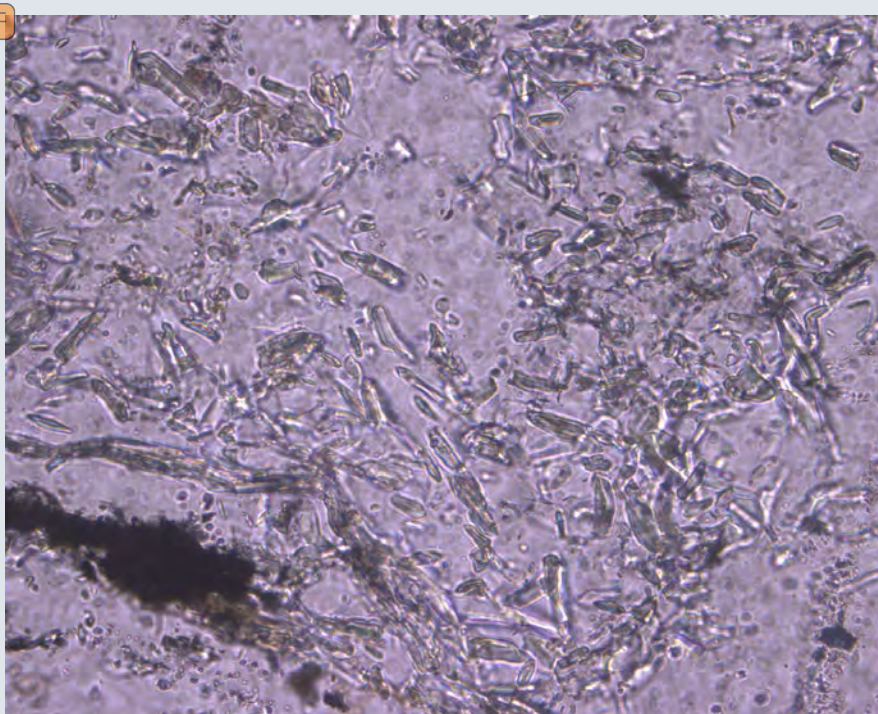
TC







# Chlorite



- A faible degré de métamorphisme, la chlorite apparaît en très petits cristaux polarisant en gris ; il faut un fort grossissement pour l'observer.
- Les minéraux polarisant dans des teintes vives sont des micas : muscovite (incolore en lame mince) et biotite (brune). Le fond de la roche est du quartz. Du plagioclase (non maclé) dans apparaît l'angle SW
- Prémian, Hérault, France.

TC

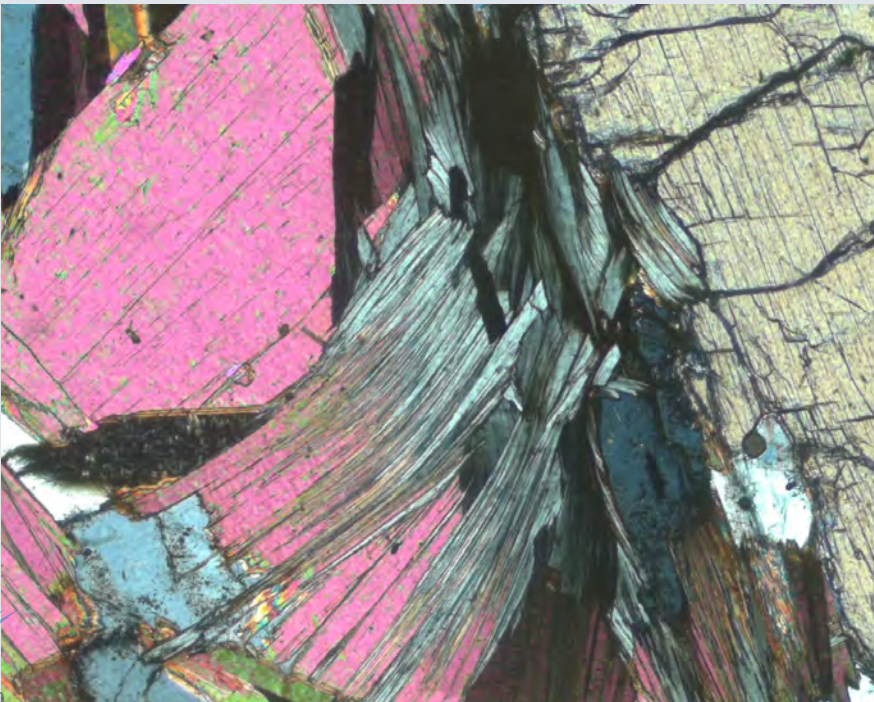
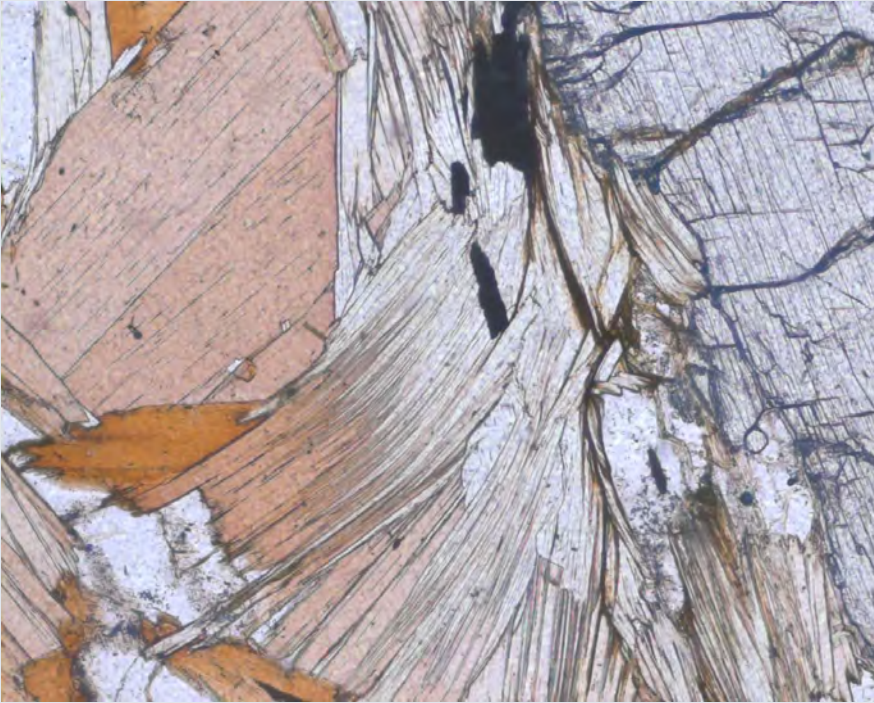




# Chlorite remplaçant une biotite

- La chlorite est incolore et polarise en gris vert.
- Le grand cristal dans la partie droite de la photo est du disthène. □
- Maures, France.

TC

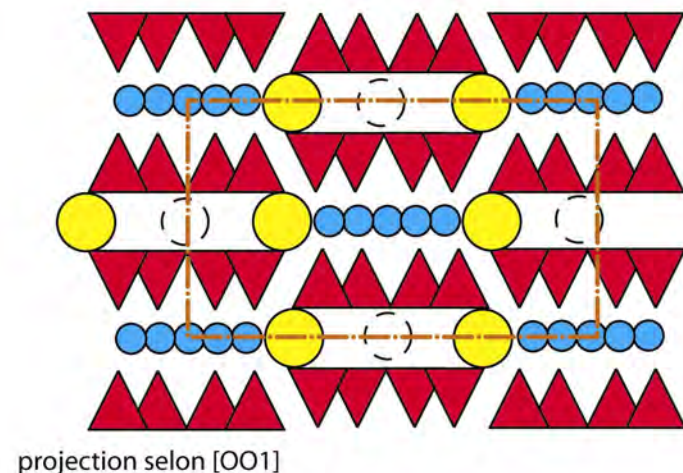
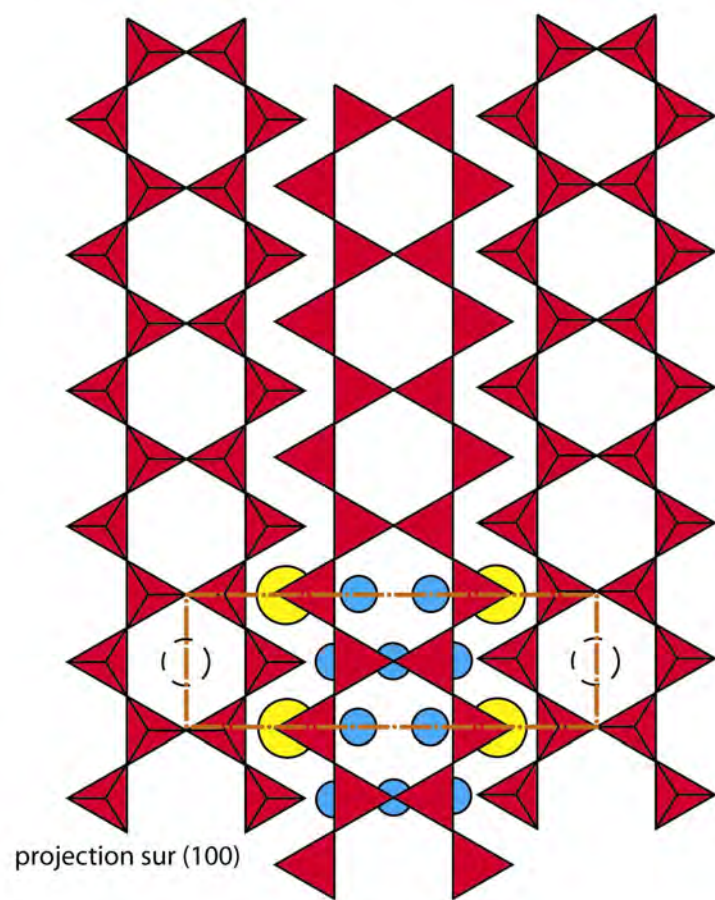






# Les amphiboles

## Structure des amphiboles



- Inosilicates : tétraèdres en chaînes doubles  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$
- Les ions OH (non représentés ici) se situent au centre des hexagones dans le plan des pointes des tétraèdres.
- 5 sites octaédriques Y (hexacoordonnés) (en bleu).
- 2 sites octocoordonnés X (en jaune)
- Un grand site A de coordinance 12 plein ou vide (rond incolore pointillé).
- Trémolite  
 $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  (site A vide)



# Les amphiboles

- $A_{0-1} X_2 Y_5 Z_8 O_{22} (OH)_2$ 
  - Z = site tétraédrique : Si, Al
  - Y = site octaédrique : Mg,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Al, Ti, Mn, (Cr, Li...)
  - X = site de coordinance 8 ou 6 : Ca, Na, K, Fe, Mg (Mn, Li..)
  - A = site de coordinance 12 : Na, K
- On classe les amphiboles selon le remplissage du site X :
- Amphiboles ferro-magnésiennes
  - série anthophyllite  $Mg_7Si_8$  – gédrite  $Mg_5Al_2Si_6$  orthorhombiques
  - série cummingtonite  $(Mg, Fe)_7Si_8$  – grunérite  $(Fe, Mg)_7Si_8$  monocliniques
- Amphiboles calciques
  - non alumineuses : série trémolite (Mg) – actinote  $Ca_2(Fe, Mg)_5 Si_8$
  - alumineuses : les hornblendes
- Amphiboles sodi-calciques
- Amphiboles sodiques





Le mot αμφιβολος veut dire trompeur : sous des aspects extérieurs très semblables les amphiboles montent une très large gamme de composition chimique. La détermination précise d'une amphibole nécessite la microsonde. Partant de la composition de la trémolite  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ , la composition des amphiboles (autres que ferro-magnésiennes) se déduit par les substitutions suivantes :

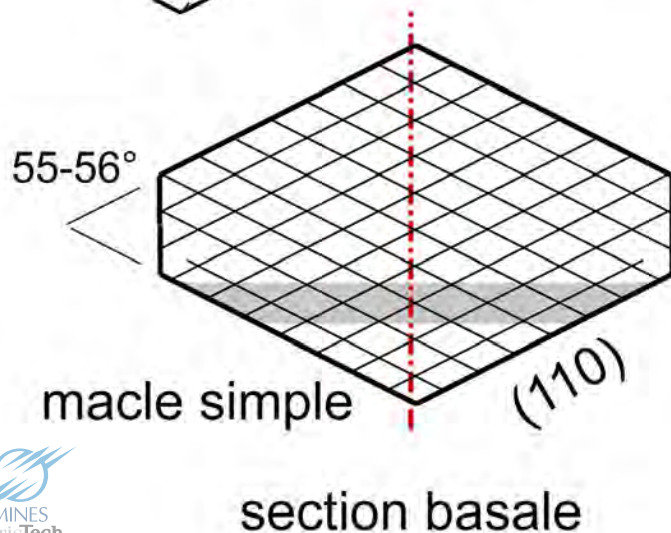
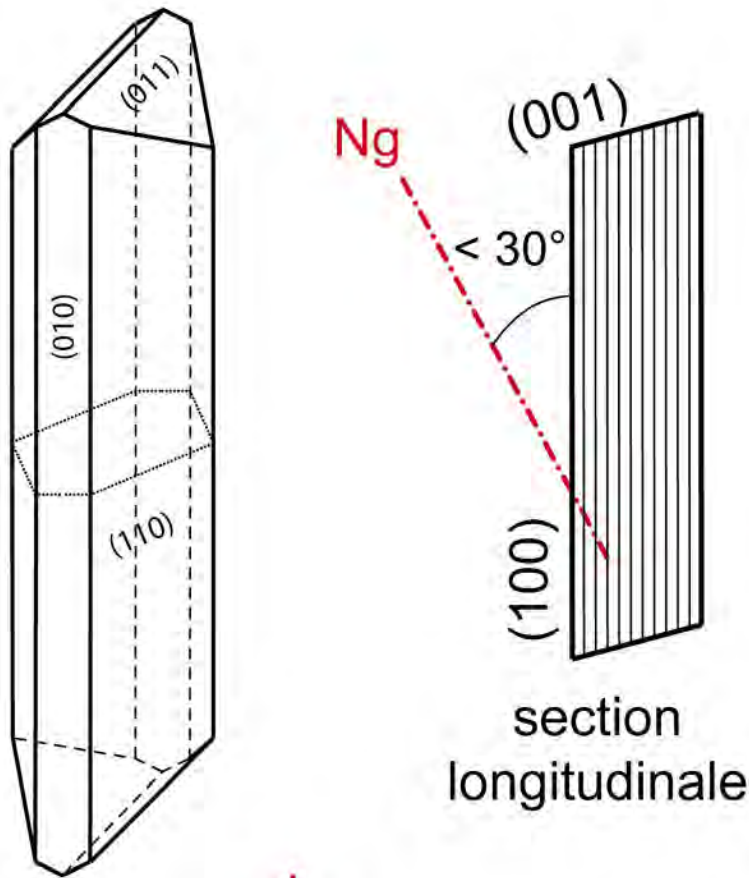
- $\text{R}^{2+} \text{Si} \Leftrightarrow \text{R}^{3+} \text{Al}^{\text{VI}}$
- $\text{Ca}_x \text{R}^{2+} \Leftrightarrow \text{Na}_x \text{R}^{3+}$
- $\text{Ca}_x \Leftrightarrow \text{Na}_x \text{Na}_A$
- $\text{Si} \Leftrightarrow \text{Al}^{\text{IV}} \text{Na}_A$
- $\text{Fe} \Leftrightarrow \text{Mg} \Leftrightarrow \text{Mn} \qquad \text{Al}^{\text{VI}} \Leftrightarrow \text{R}^{3+}$
- $\text{Na} \Leftrightarrow \text{K}$
- $\text{OH} \Leftrightarrow \text{F} \Leftrightarrow \text{Cl}$
- $2 \text{Al}^{\text{VI}} \Leftrightarrow (\text{Fe}, \text{Mg}) \text{Ti} \qquad 2 (\text{Fe}, \text{Mg}) \Leftrightarrow \text{Ti}$   
 $\qquad \text{Si Al}^{\text{VI}} \Leftrightarrow \text{Al}^{\text{IV}} \text{Ti}$
- $2 \text{R}^{2+} \Leftrightarrow \text{Al}^{\text{VI}} \text{Li} \qquad \text{Al}^{\text{VI}} \Leftrightarrow \text{R}^{2+} \text{Li}$

Ces substitutions (indépendantes) forment donc un espace à 15 degrés de liberté. Il existe certainement des lacunes de miscibilité dans cet espace mais toutes ne sont pas explorées...



# Les amphiboles

- Monocliniques  
(sauf la série anthophyllite –gédrite qui est orthorhombique).
- Prisme à base losange : sections basales en forme d'hexagone ou de losange, sections longitudinales en baguettes.  
Certaines amphiboles présentent un faciès fibreux.
- Deux clivages à environ  $60^\circ$ .
- $N_p$  1,599 – 1,705  
 $N_g$  1,622 – 1,730  
Indices supérieurs à ceux des micas, inférieurs à ceux des pyroxènes.
- Biréfringence  $\Delta = 0,014 - 0,026$   
Teintes de polarisation de la fin du 1<sup>er</sup> ordre, début 2<sup>ème</sup> ordre ; inférieures à celles des pyroxènes, très inférieures à celles des micas.

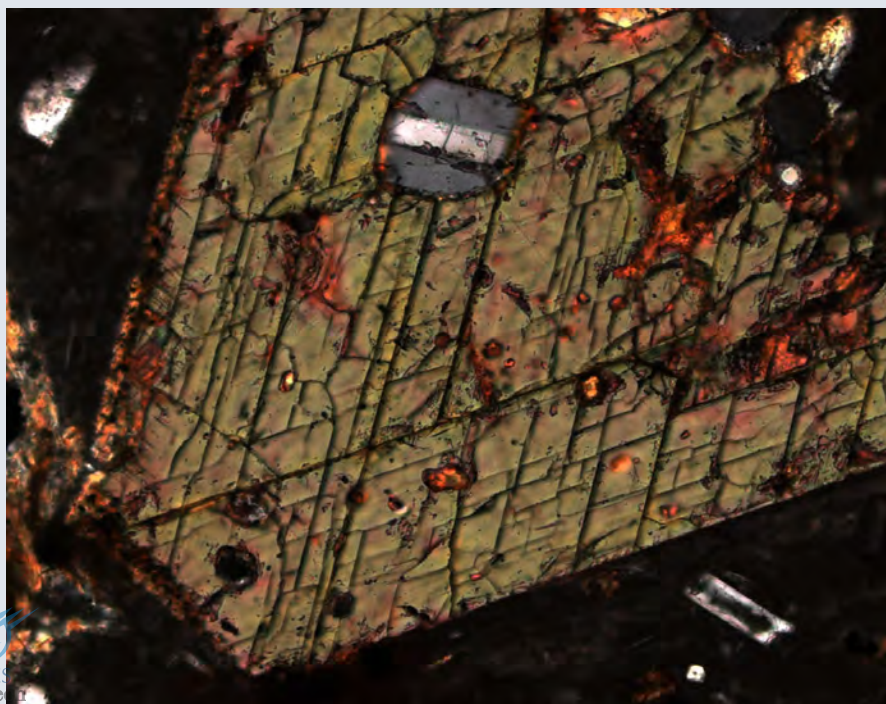
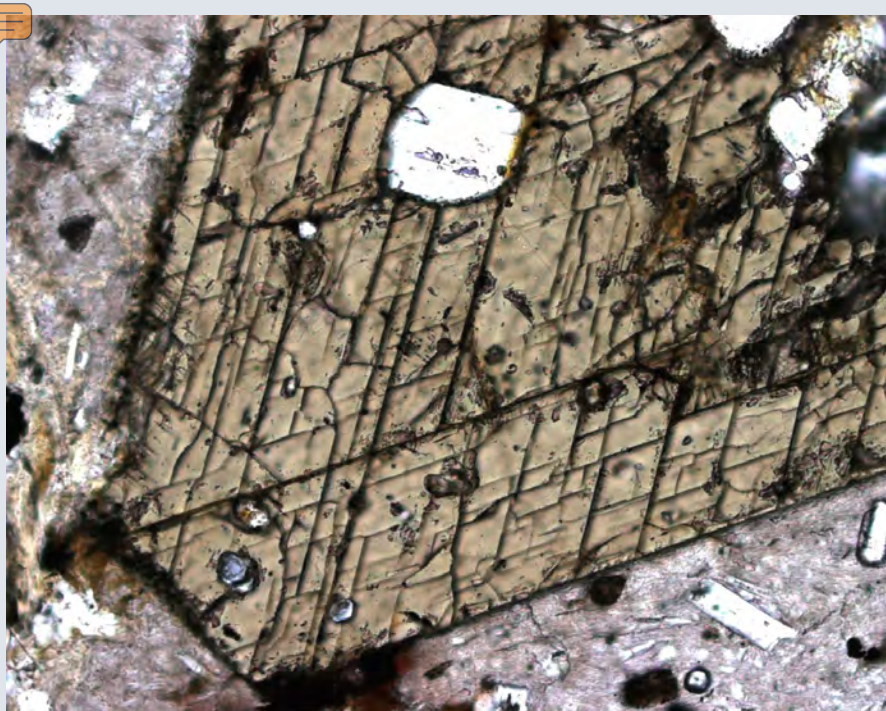






# Hornblende brune

- La couleur dépend de nombreux paramètres : la teneur en fer ferreux, fer ferrique (couleurs brunes), teneur en titane (couleurs rouge, brun rouge), température, etc.
- Les hornblendes peuvent être :
  - incolores
  - vert, bleu vert, vert olive
  - brun vert, brun rouge.
- Les couleurs bleu vert dominant à basse température, les verts aux températures moyennes, les bruns, brun rouge aux températures élevées (en particulier les roches volcaniques).
- Ici section basale de hornblende basaltique montrant les formes en losange tronqué (hexagone) et les clivages « à 60° ».
- andésite, Pergame, Turquie.







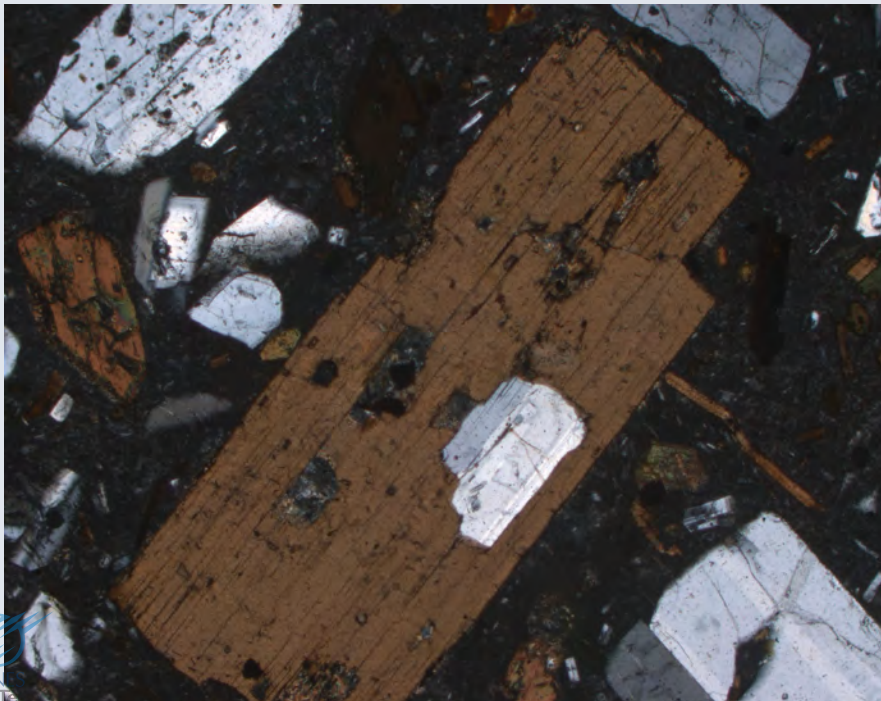
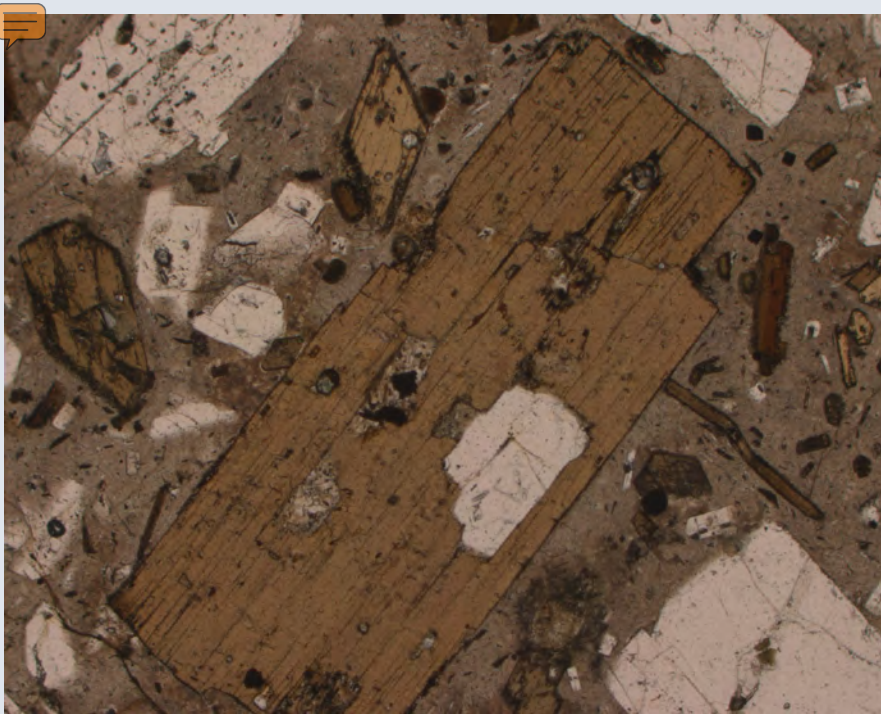
# Hornblende brune

- Section longitudinale ne montrant qu'un seul clivage d'une hornblende basaltique (brune, riche en fer ferrique).
- **L'angle d'extinction** des amphiboles varie avec les compositions chimiques mais est **toujours inférieur à 30°**.
- Allongement positif.
- Biaxe négatif avec  $2V$  grand ( $> 60^\circ$ ) en général. Une exception : la ferrohastingsite  $2V = 10^\circ$ .
- $r > v$  selon la composition.
- Andésite : matrice microlithique, phénocristaux de plagioclase – la hornblende contient une inclusion de biotite.

C







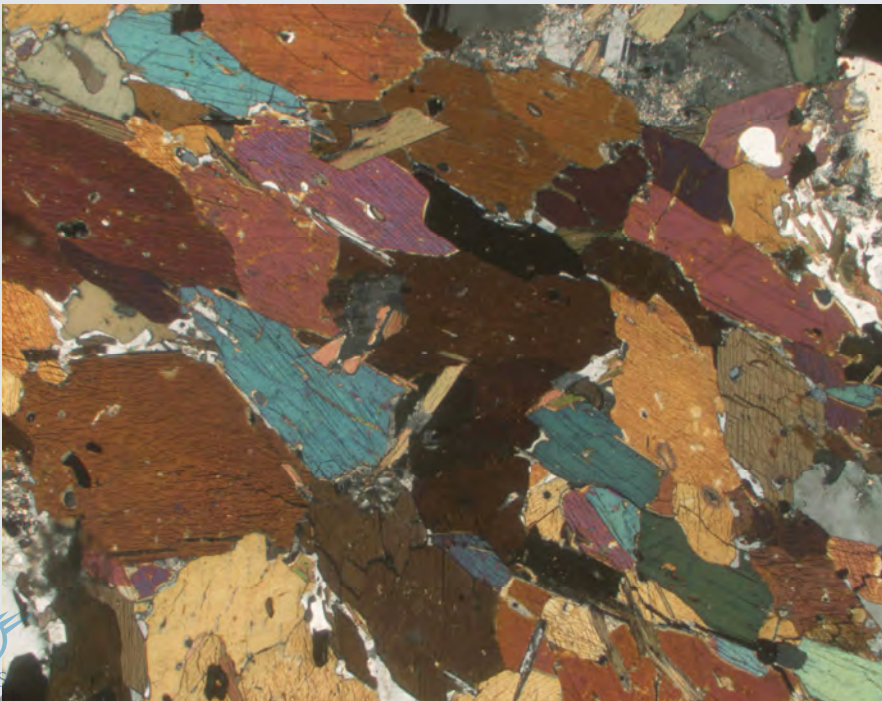
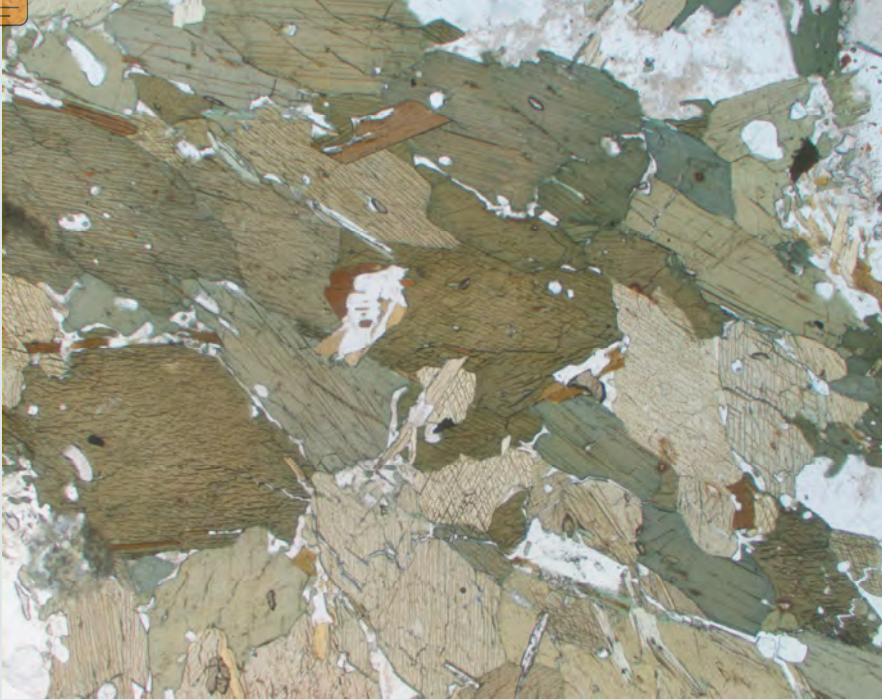
## Hornblende brune

- Section longitudinale ne montrant qu'un seul clivage d'une hornblende basaltique (brune, riche en fer ferrique).
- autres sections plus petites avec des formes losangiques.
- La roche est une andésite : matrice vitreuse, phénocristaux de plagioclase et de biotite.
- Andésite, Pergame, Turquie.

C



# Hornblende verte



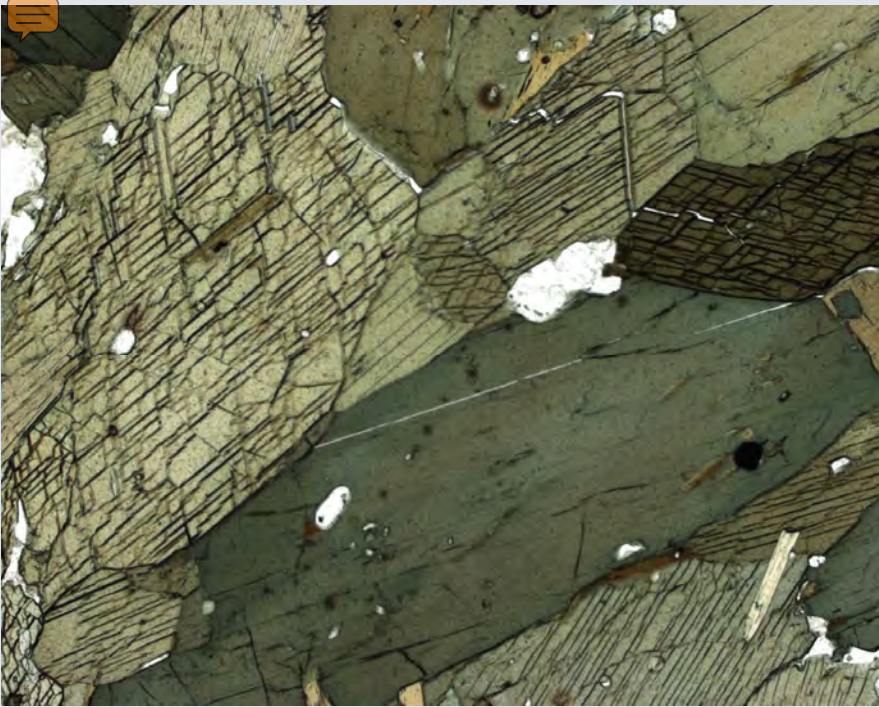
- Sections basales à deux clivages «à  $60^\circ$ » et sections longitudinales montrant un seul clivage.
- Couleur vert à brun vert ; les variations de couleur montrent le pléochroïsme.
- Les sections basales à deux clivages s'éteignent selon la bissectrice des clivages.
- Amphibolite : quelques cristaux de biotite (brun plus rouge que les amphiboles, teintes de polarisation rouge atténué du 3<sup>ème</sup> ordre) ; plagioclase (incolore, macles..) ; apatite et quartz.
- Loch Cluanie, Ecosse.

TC

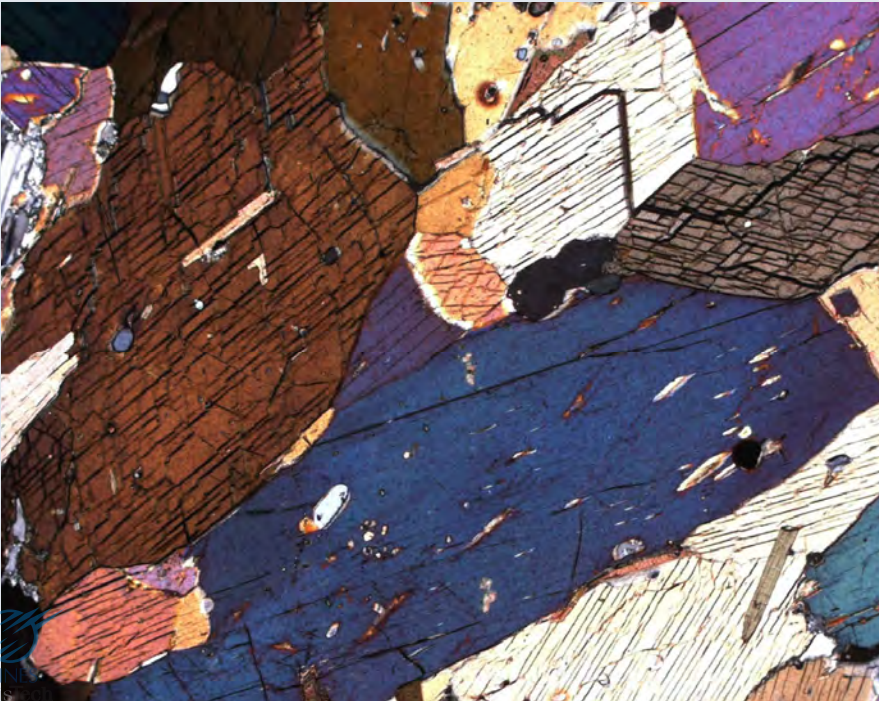




# Hornblende verte

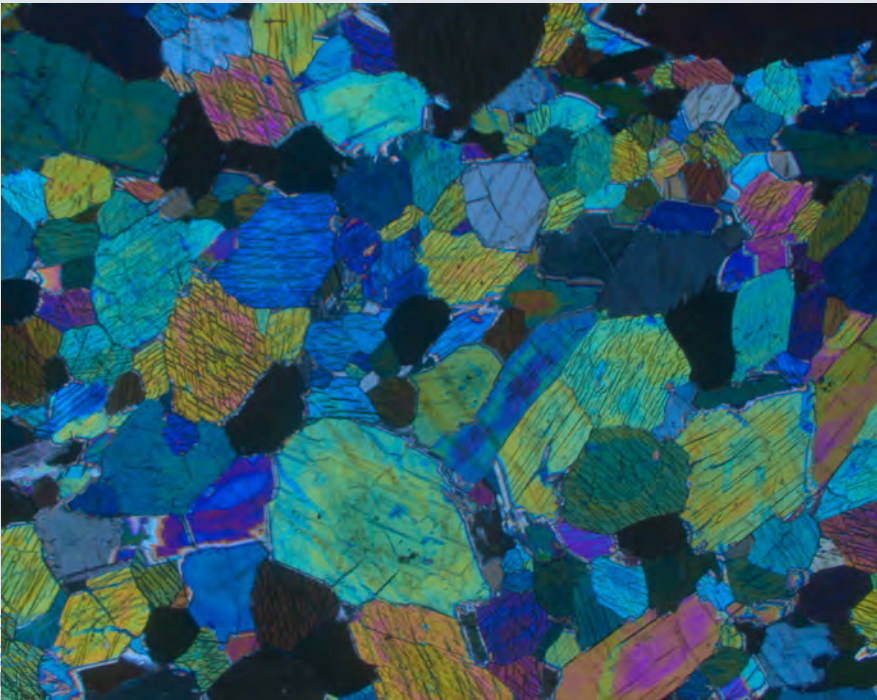


- Couleur brun verdâtre.
- Sections basales à deux clivages et sections longitudinales à deux clivages.
- Amphibolite : quelques cristaux de biotite – les minéraux incolores en LN sont de l'apatite.



TC





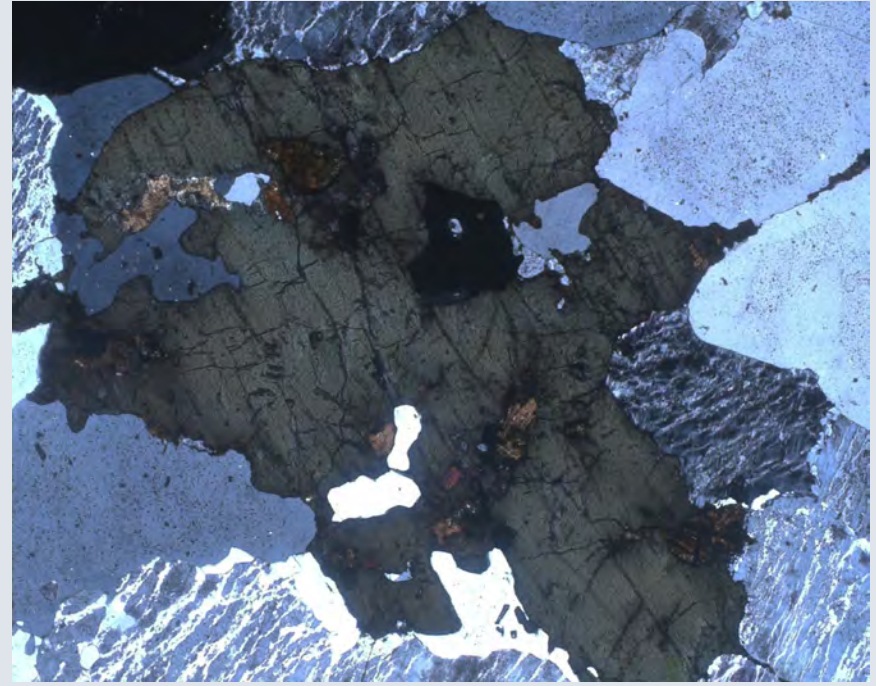
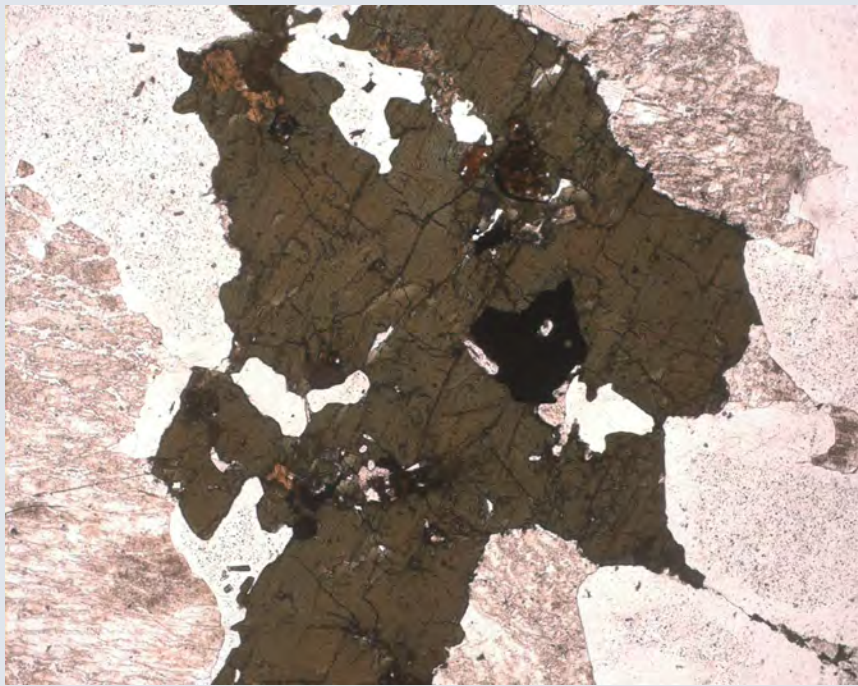
## Hornblende verte

- Couleur verdâtre à incolore.
- Sections basales à deux clivages et sections longitudinales de prismes courts à deux clivages.
- Teintes de polarisation vives (la lame est un peu épaisse).

TC







## Ferrohastingsite



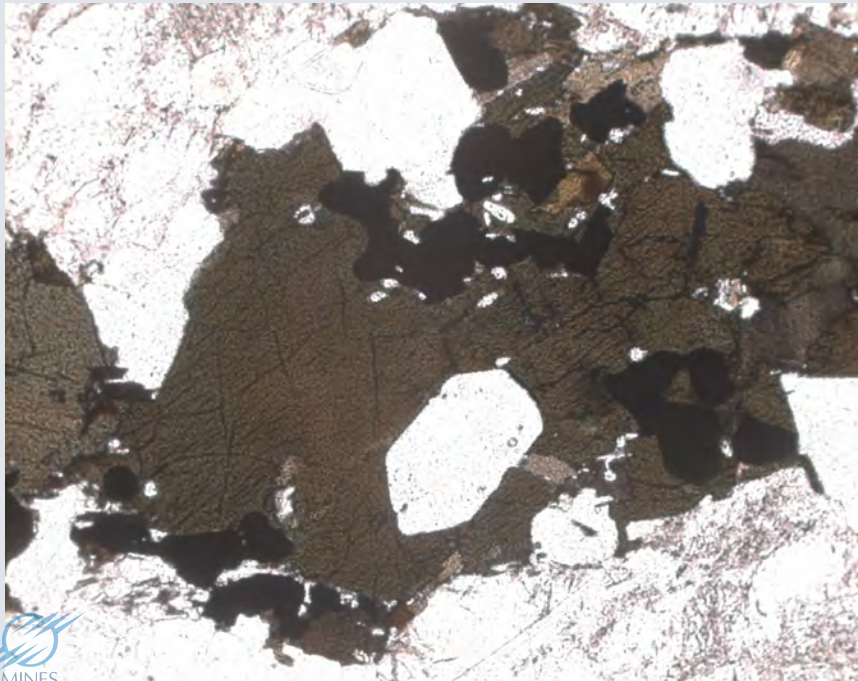
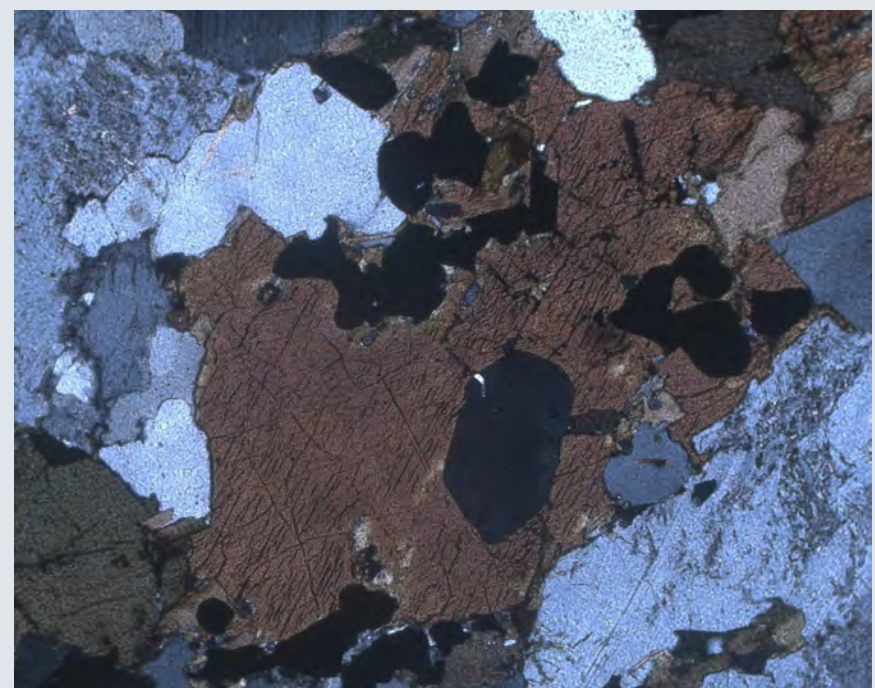
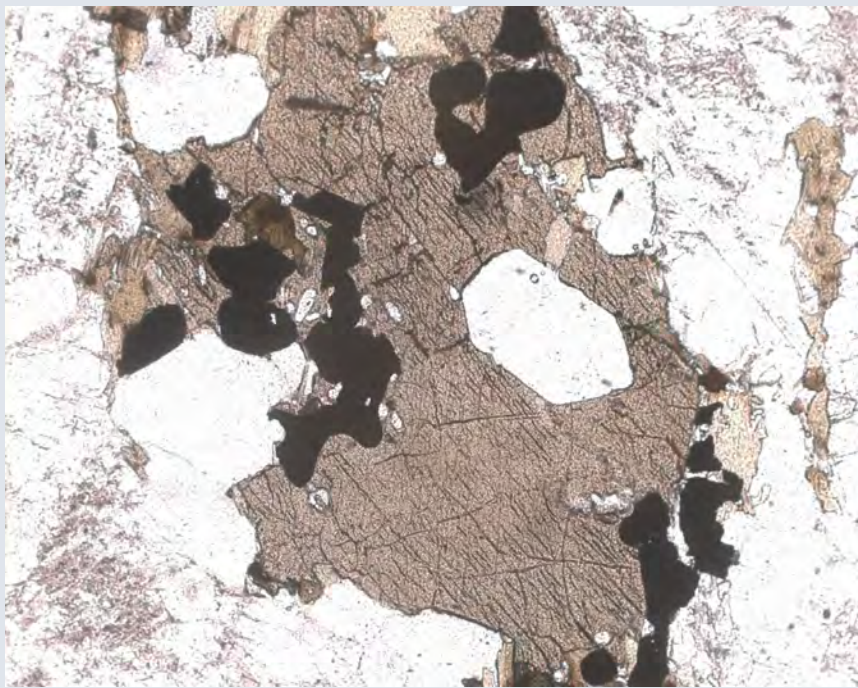
Les hornblendes riches en fer présentent souvent des couleurs sombres ; les hastingsites – ferrohastingsites en particulier.

Les photos ont été prises de façon à montrer le préochroïsme et les teintes de polarisation (à l'éclairement maximum) masquées par les couleurs propres.

Lebowa granite (quartz, mésoperthites, plagioclase, Fe-biotite, zircon, magnétite).

Bushveld, Transvaal.





## Ferrohastingsite



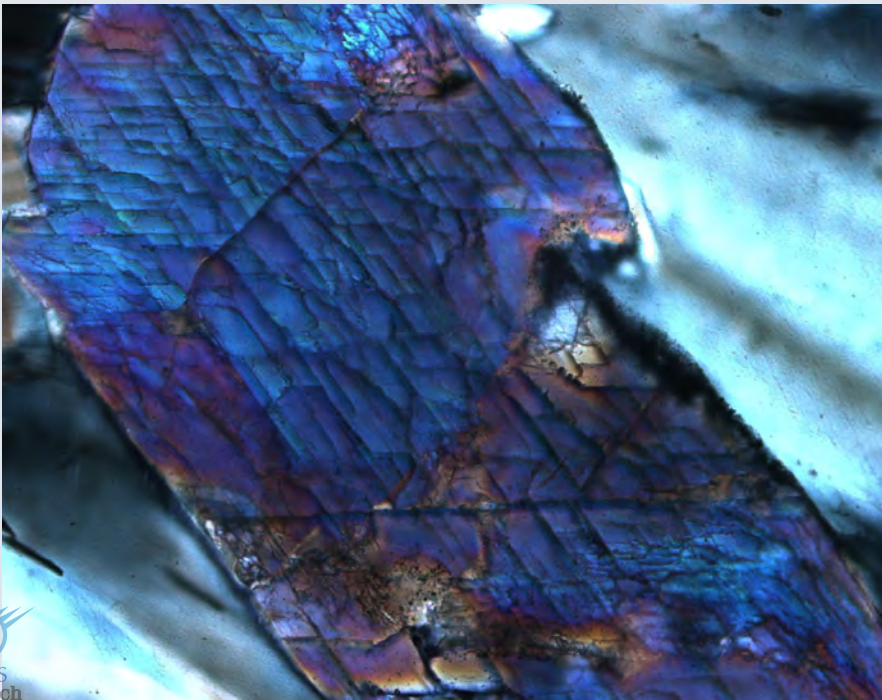
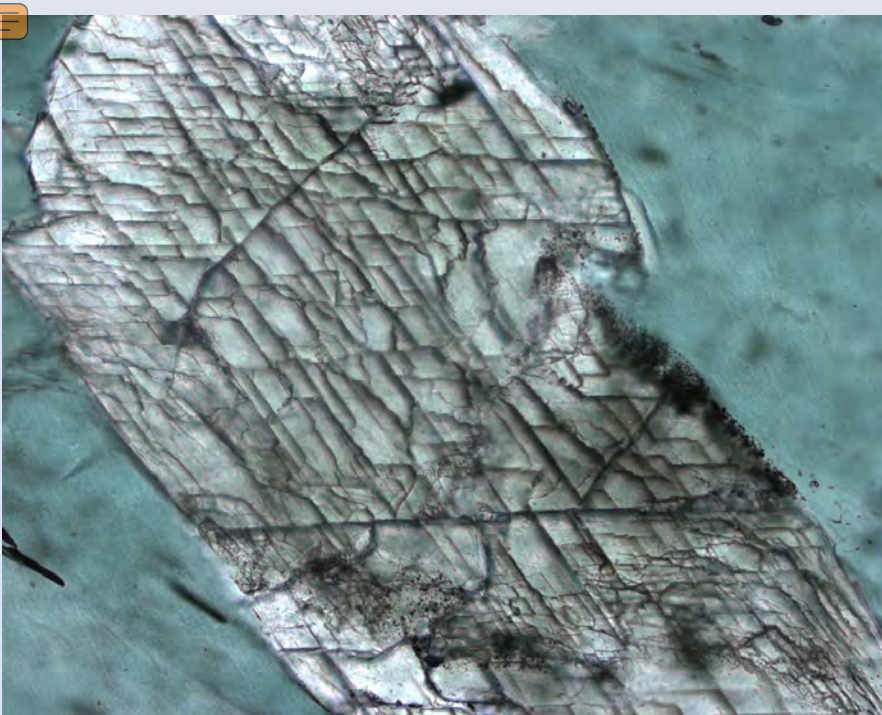
Les photos ont été prises de façon à montrer le pléochroïsme et les teintes de polarisation (à l'éclairement maximum) masquées par les couleurs propres

Granite rapakiwi (quartz, plagioclase, perthites (pas sur les photos), biotite, magnétite).

Finlande

série pargasite  - hastingsite - ferrohastingsite





# Trémolite

$$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$$

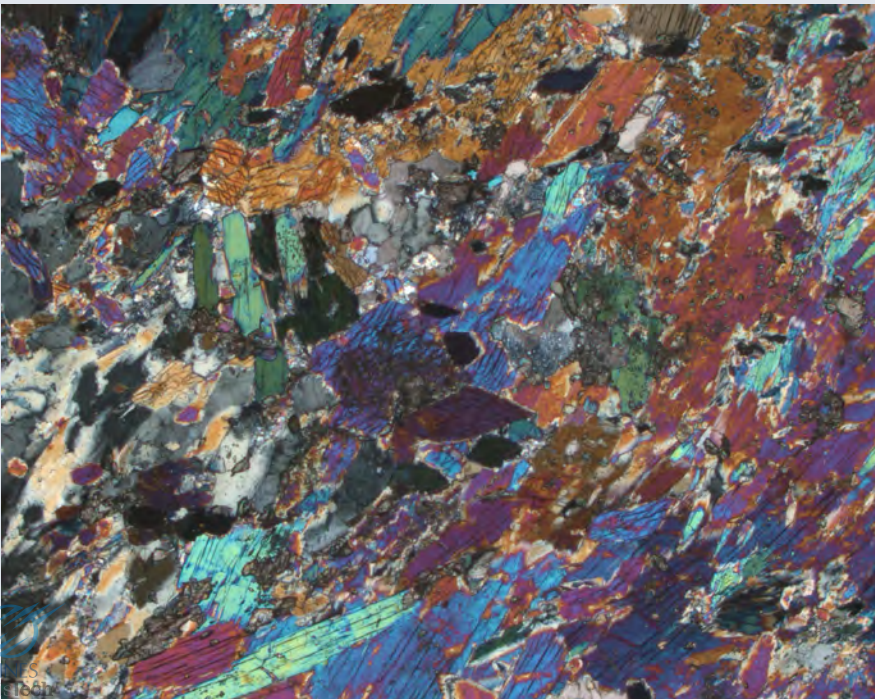
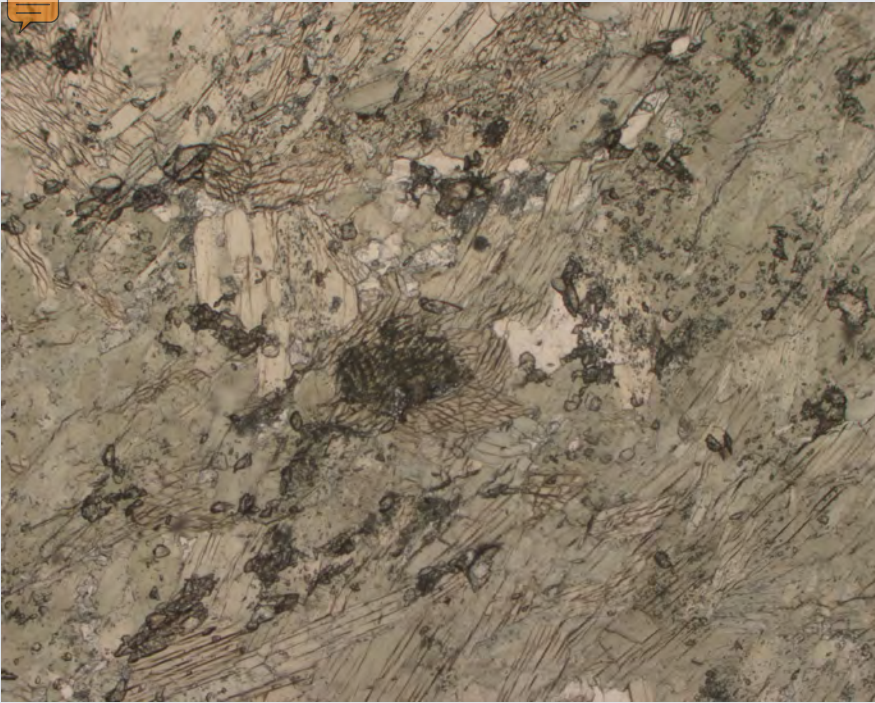
- Les amphiboles calciques non alumineuses sont incolores (termes magnésiens : trémolite), vert pâle (actinote) à vert plus soutenu (termes ferrifères : ferro-actinote).
- Ici section basale d'une trémolite légèrement zonée.
- Le fond de la roche est formé de chlorite (verdâtre).
- Eseka, Cameroun.

C





# Actinote

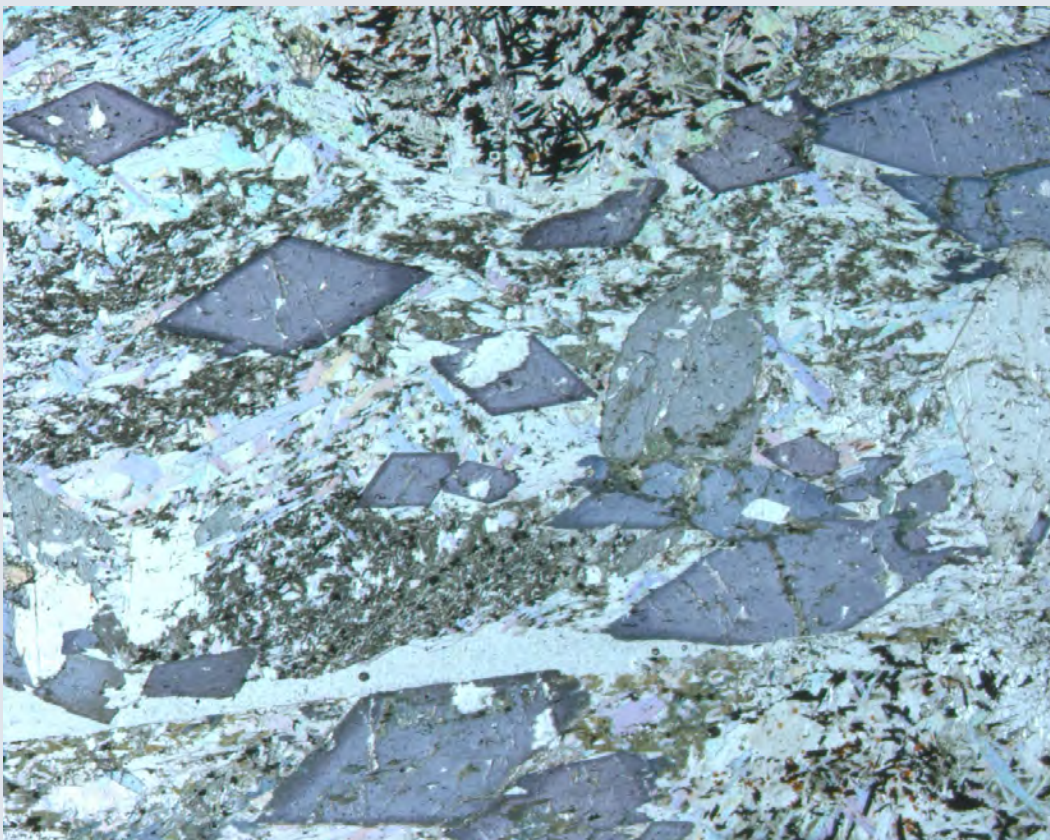


- L'actinote, amphibole calcique non alumineuse ferro-magnésienne, est vert pâle.
- Les actinotes sont souvent en prismes allongés, parfois fibreuses (les hornblendes sont en prismes plus ou moins courts).
- [Les termes ferrifères (ferro-actinote) sont d'un vert plus soutenu].
- Ici actinote associée à épidote (minéral fort relief) et albite (plages incolores), association caractéristique du faciès des schistes verts.

C







## Les amphiboles sodiques

- Deux séries
- Glaucophane  $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  – Riebeckite  $\text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_3\text{Fe}^{3+}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$   
Les termes intermédiaires sont appelés crossites.  
Minéraux du métamorphisme de haute pression  
(équivalents à albite + chlorite).
- Riebeckite - Arfvedsonite  $\text{Na}_A\text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_4\text{Fe}^{3+}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$  –  
(Eckermannite  $\text{Na}_A\text{Na}_2\text{Mg}_4\text{AlSi}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ )  
Minéraux des roches plutoniques alcalines.



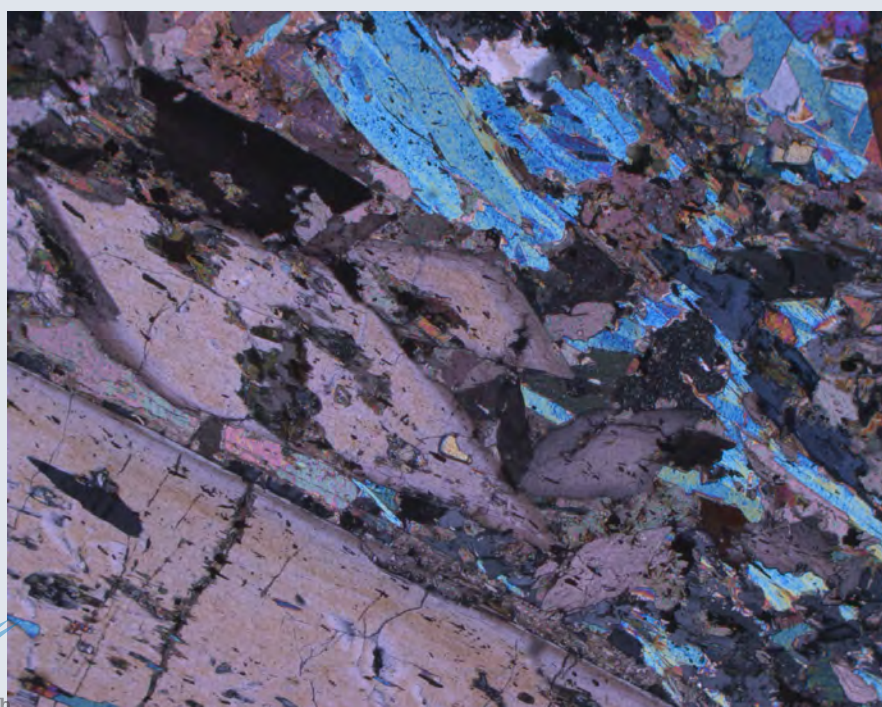


# Glaucophane



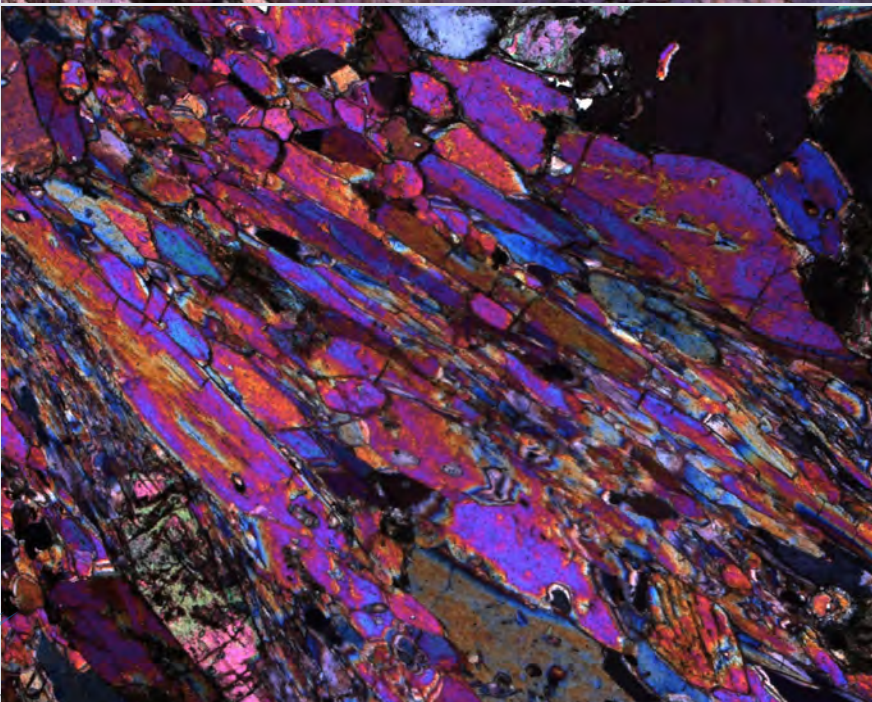
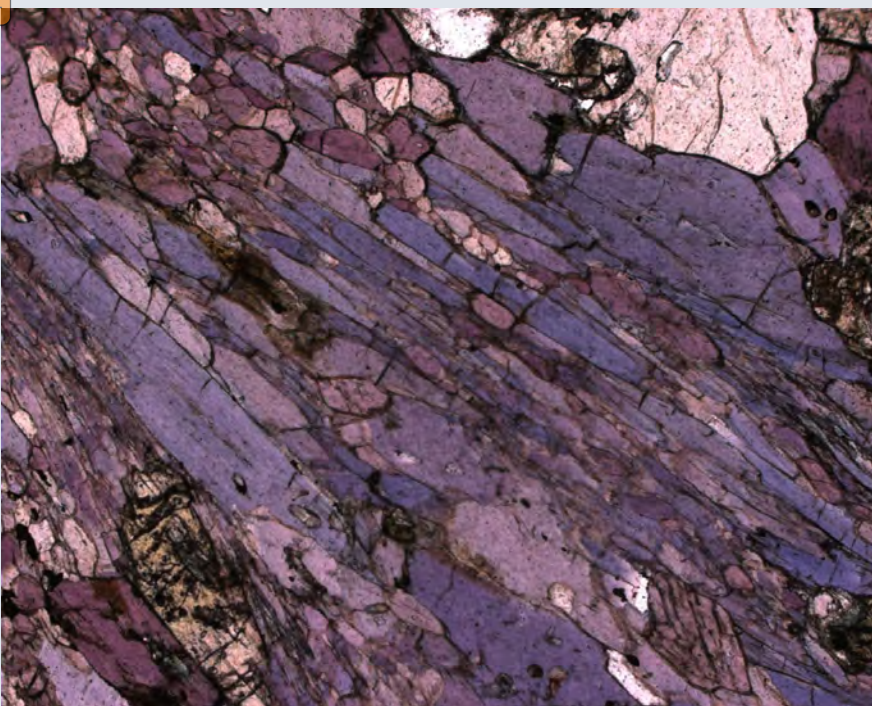
- Formes et clivages comme les hornblendes : ici sections basales losangiques et section longitudinale dans le coin SW.
- Pléochroïque dans les bleus – bleu lavande – violacé – parfois incolore (ici zoné).
- Indices comme les hornblendes :  
N 1,606 – 1,670
- Biréfringence faible 0,010 – 0,015 teintes du 1<sup>er</sup> ordre.
- Le reste de la roche est occupé par du quartz, de la muscovite (incolore, teintes vives ; en fait des phengites) et de la chlorite (brun vert en LN, polarisant dans les gris).
- Oman

C





# Glaucophane



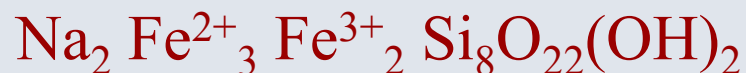
- Ici sections longitudinales (avec une section basale en losange, montrant les deux clivages dans le coin SE).
- La lame est un peu épaisse, les teintes de polarisation vives sont trop élevées.
- **Angle d'extinction faible  $2 - 5^\circ$ .**
- Biaxe négatif.
- $2V_x$   $0 - 50^\circ$
- $r >$  ou  $<$   $v$  en fonction de la composition
- Un grenat (coin NE) et quelques cristaux d'épidote (proximité du grenat et coin SW)
- Ile de Groix, Morbihan, France.

C





# Riébeckite



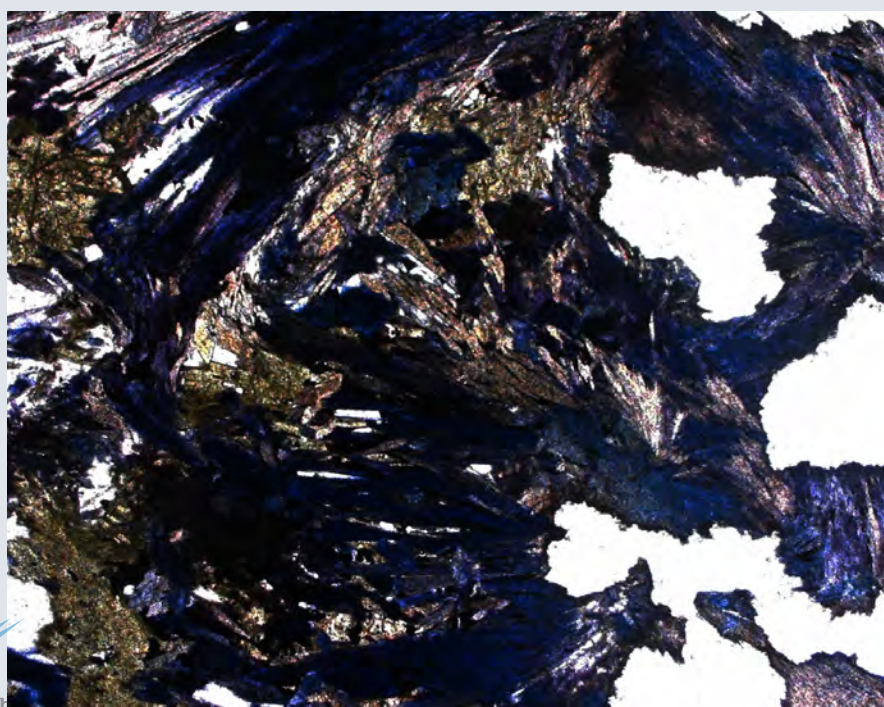
- Les deux photos sont en LN.
- Ici faciès fibreux.
- Très pléochroïque de brun jaunâtre à bleu de Prusse.
- Biréfringence  $\Delta = 0,004 - 0,010$

Gris du premier ordre.

Les teintes de polarisation sont masquées par les couleurs propres.

- Angle d'extinction faible 0 à 9°, peu visible à cause des couleurs.
- Le minéral vert jaune est de l'épidote. La lame montre de nombreux arrachements.
- Saint-Véran, Hautes Alpes, France.

R







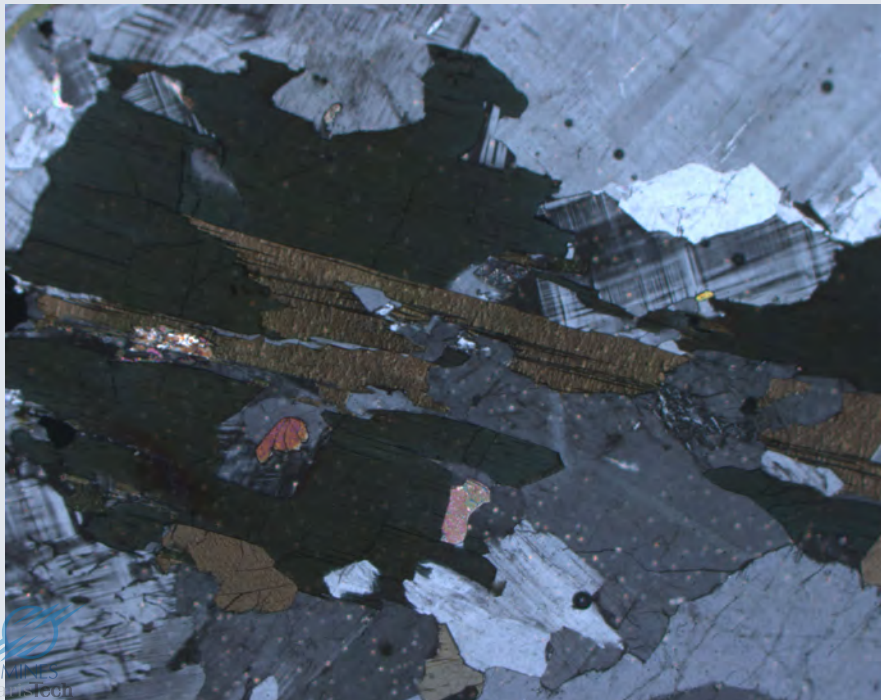
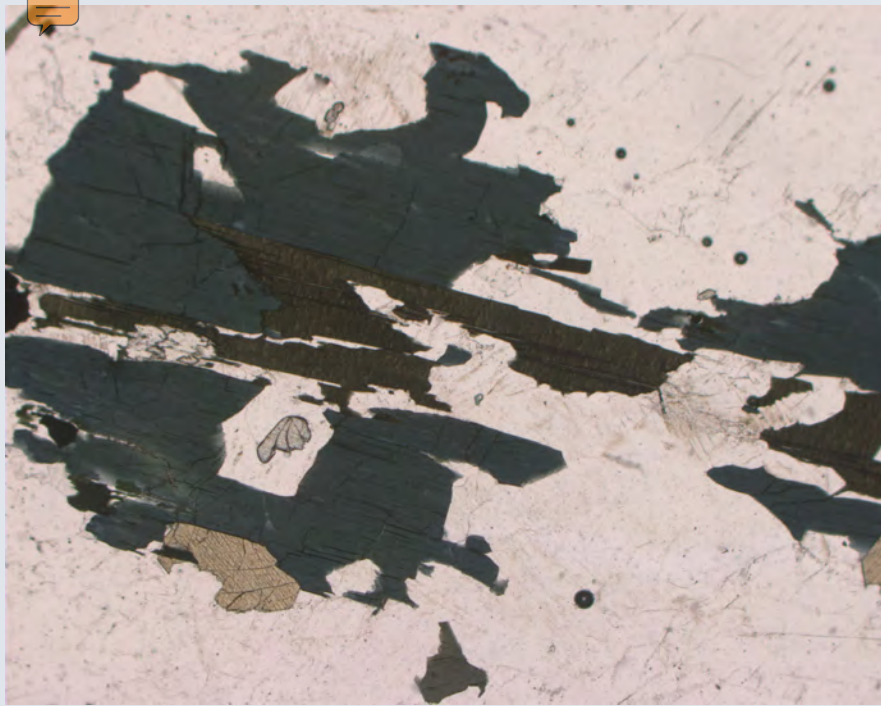
# Arfvedsonite

- Orthorhombique.
- Se distingue des autres amphiboles par sa couleur et son fort pleochroïsme : bleu vert foncé, bleu de Prusse, brun jaune, jaune vert, etc.

Ce pleochroïsme se voit en comparant la section longitudinale bleu de Prusse et la petite section basale à deux clivages brun jaune.

- Biréfringence faible :  $\Delta = 0,005 - 0,020$   
Les teintes de polarisation sont en général masquées par la couleur propre.
- Angle d'extinction  $10 - 25^\circ$ .
- Gisement : roches plutoniques alcalines avec ou sans quartz.
- Cette syénite néphélinique contient microcline, néphéline (coin SE) plagioclase, biotite ferrifère (grand cristal brun foncé associé à l'arfvedsonite) et zircon (grain à fort relief, teintes de polarisation vives).
- Rocher du Loup, Cameroun.

R



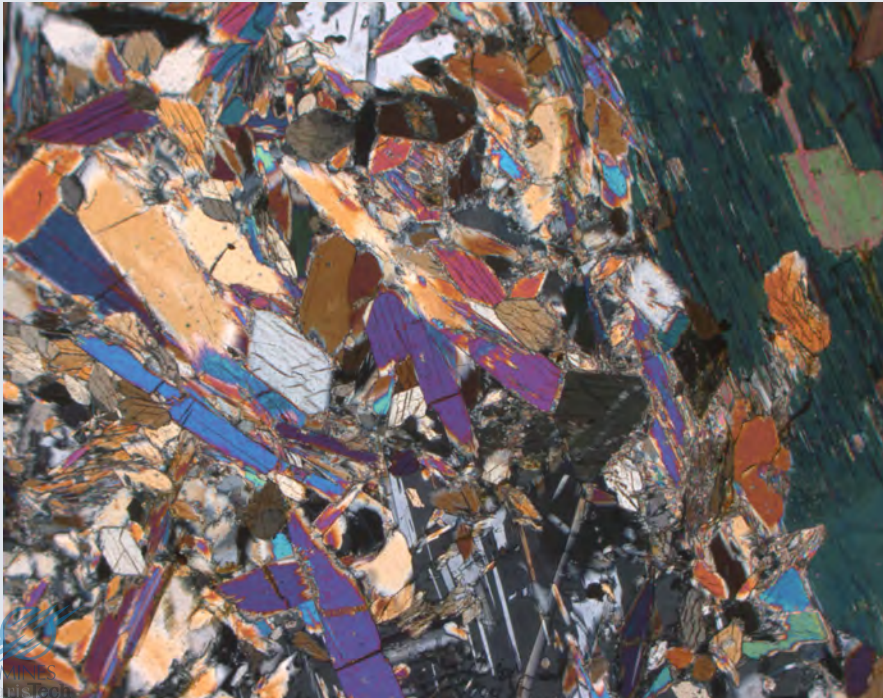




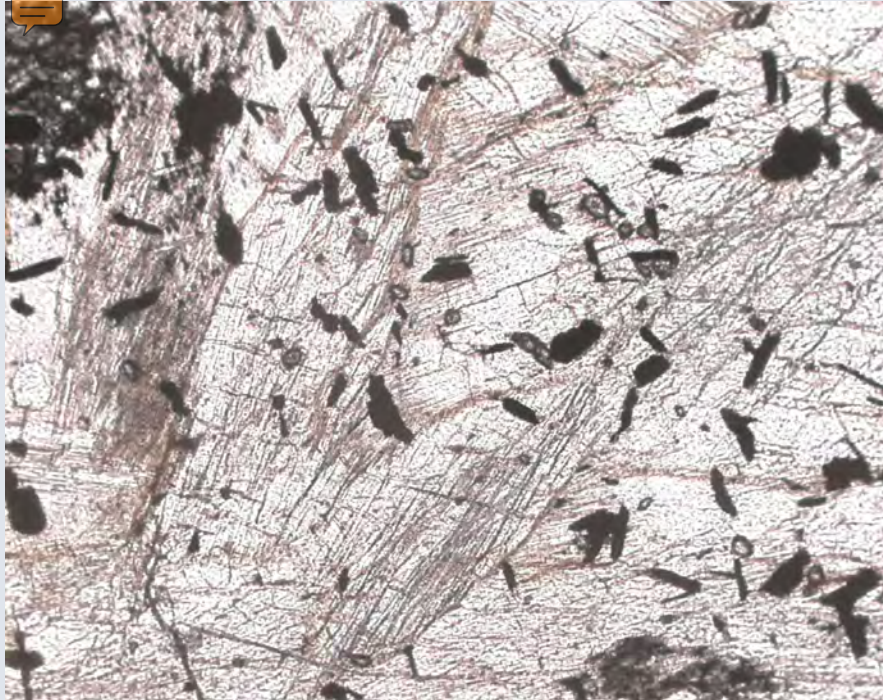
# Anthophyllite



- Série anthophyllite – gédrite.
- **Monoclinique** : se distingue des autres amphiboles par son **extinction droite**.
- Incolore
- Pas de macles.
- Biréfringence  $\Delta = 0,013 - 0,028$   
teintes vives du 2<sup>ème</sup> ordre.
- Biaxe + ou –
- $2V = 78 - 111^\circ$ .
- Sur la photo ci-contre, l'anthophyllite forme des baguettes allongées incolores, polarisant dans des teintes très vives. La hornblende qui occupe le bord droit de la photo, s'en distingue par des couleurs brun vert et des teintes de polarisation plus ternes. La lame montre aussi de la biotite brune et du plagioclase : méta-gabbro.
- Fraïsse-sur-Agout, Hérault, France.







# Gédrite



- Série continue avec l'anthophyllite.
- **Monoclinique** : se distingue des autres amphiboles par son **extinction droite**.
- Incolore à brun jaune / vert jaune pâle pour les termes ferrifères.
- Pas de macles.
- Np 1,642 – 1,674  
Ng 1,658 – 1,691  
En fonction du rapport Mg/Fe.
- Biréfringence  $\Delta = 0,016 - 0,017$
- Teintes de polarisation de la fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Biaxe + (Fe) ou – (Mg).
- $2V = 80^\circ$  (Mg) –  $120^\circ$  (Fe).
- Héas, Hautes Pyrénées France.

R





# Cummingtonite

$(\text{Mg, Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

- Monoclinique.
- Se distingue des autres amphiboles par la présence systématique de **macles lamellaires répétées**.
- Incolore.
- Biréfringence  $\Delta = 0,020 - 0,045$   
Teintes vives 2<sup>ème</sup> – 3<sup>ème</sup> ordre.
- Biaxe positif.  
 $2V_z \ 65 - 90^\circ$
- Roches métamorphiques souvent à un stade intermédiaire entre le faciès des amphibolites (hornblende) et le faciès des granulites (orthopyroxène)
- Fraïsse-sur-Agout, Hérault, France.

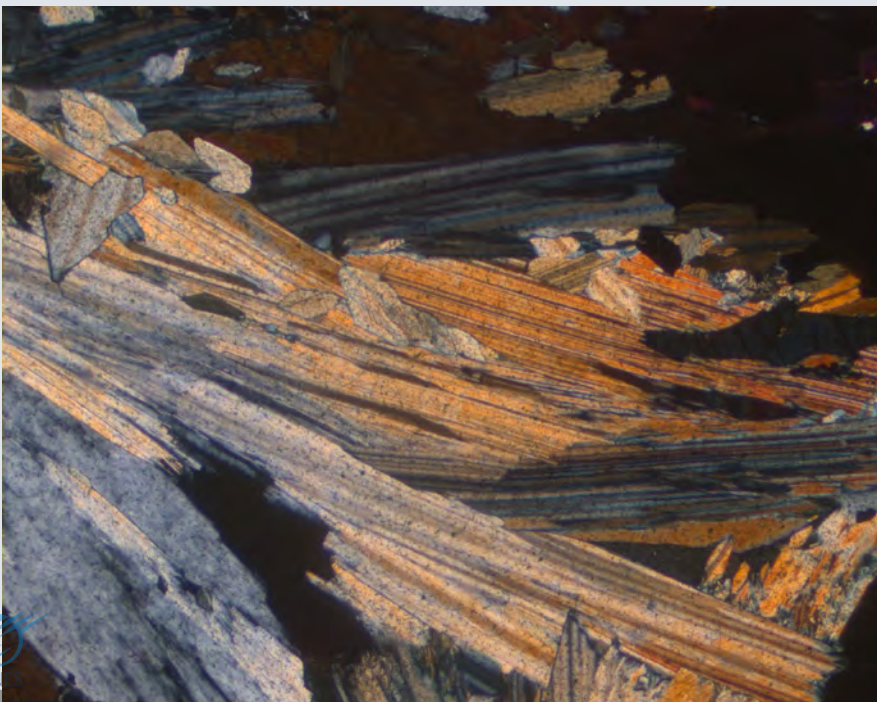
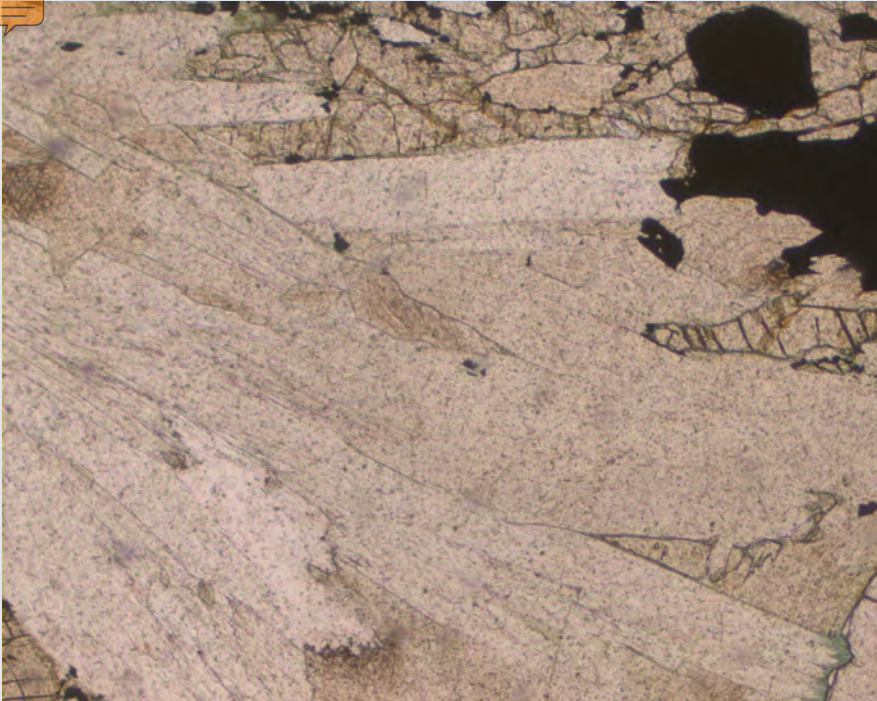
AR







# Grunérite

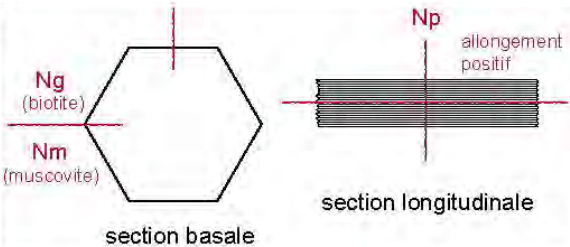
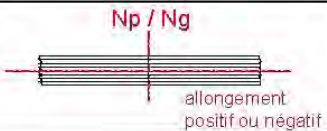
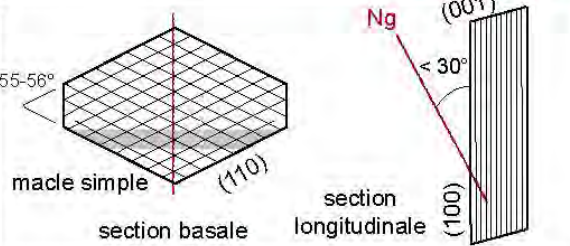
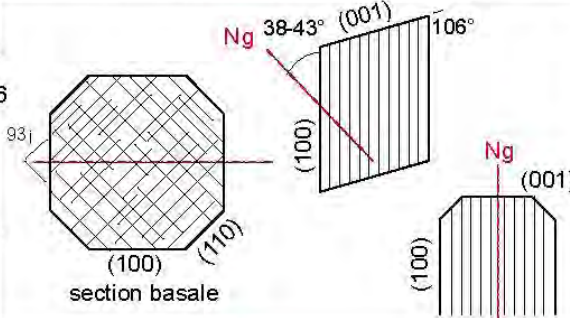
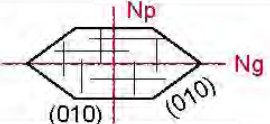


- Pôle riche en fer de la série cummingtonite – grunérite.
- La grunérite se reconnaît à ses **macles lamellaires répétées**.
- Ici incolore (les termes ferrifères peuvent être vert pâle).
- Biréfringence  $\Delta = 0,030 - 0,045$   
Teintes vives (ici un peu basses).
- Biaxes négatif  $2V_x 90 - 84^\circ$
- Le coin supérieurs droit de la lame est occupé par de **l'épidote** (limpide, fort relief, teintes vives) et du **grenat** (isotrope, fort relief). Le minéral opaque est de la **magnétite**.
- La grunérite se rencontre dans les gisements de fer métamorphisés (en particulier les formations ferrifères rubanées ou BIF).
- Collobrières, Var, France.

R





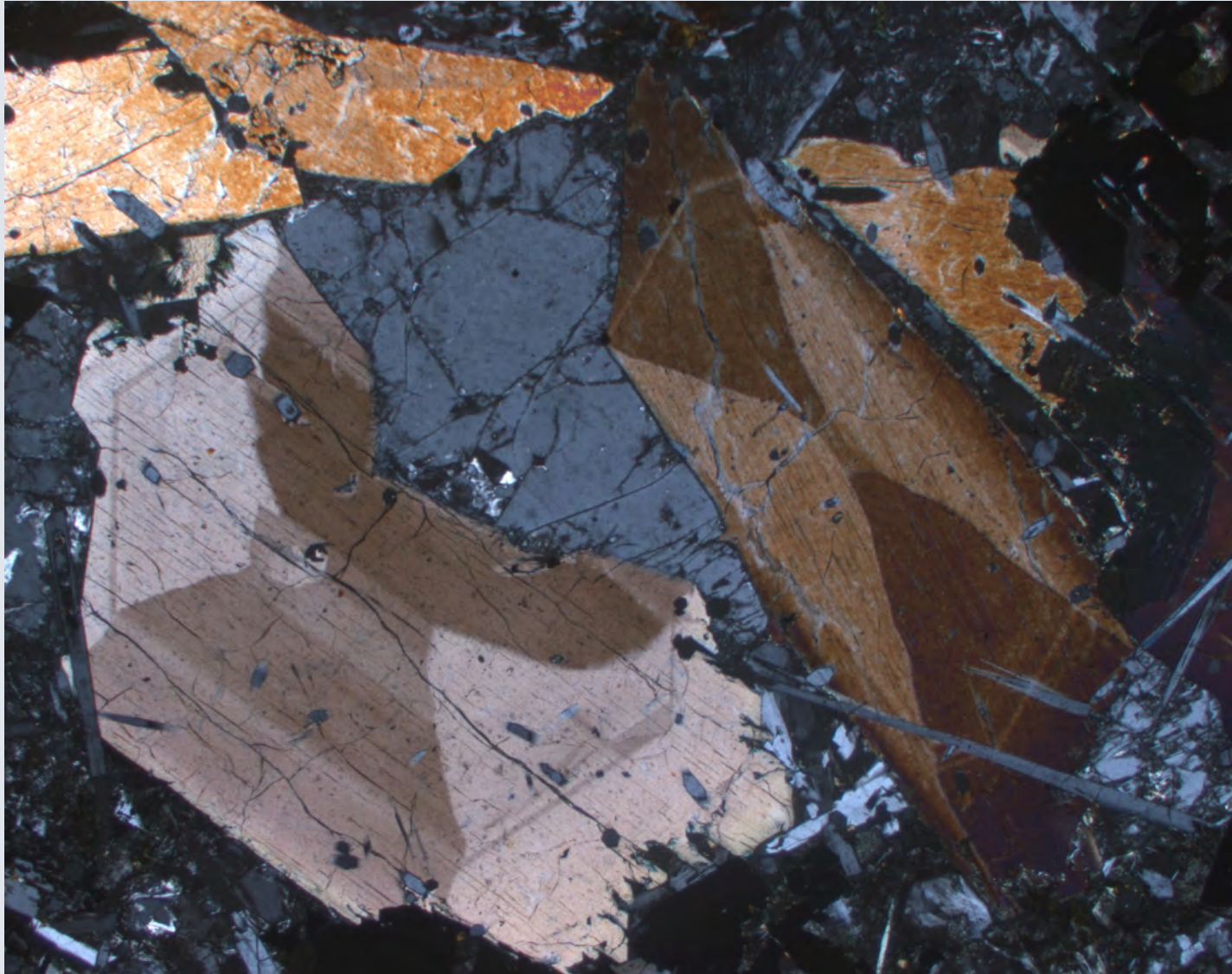
| Nom<br>formule chimique                                                                                                                                        | symétrie              | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice                                                                                    | Indice                                                                     | Couleur<br>Altérations                                                                                                  | Biréfringence                                                                                  | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Micas<br>Muscovite<br>$KAl_3Si_3O_{12}(OH)_2$                                                                                                                  | mnod<br>pseudo<br>hex | <br>section basale<br>section longitudinale                            | 1,45<br>baume 1,54<br>quartz 1,55<br>tourmaline 1,85<br>grenat 1,75<br>2,8 | incolore<br>(vert pâle :<br>phengites)                                                                                  | 1er ordre<br>gris<br>blanc<br>0,009<br>0,018<br>0,054                                          | B-<br>(2V=35-50°)          |
| Biotite<br>$K(Fe,Mg,Ti)_3Si_3O_{12}(OH)_2$<br>$Si(Fe,Mg) = Al^{IV}Al^M$                                                                                        |                       |                                                                                                                                                         | 1,552 (Mg)<br>1,624<br>1,687                                               | brun rouge<br>brun foncé<br>verdâtre<br>incolore<br>(Mg)                                                                | 0,027 (Mg)<br>0,036<br>0,054<br>0,081                                                          | B-<br>(2V=0-35°)           |
| Chlorites<br>$(Fe,Mg)_{6-x}Al_{2x}Si_{4-x}O_{10}(OH)_8$                                                                                                        | mnod                  | mêmes formes<br>que les micas<br><br>allongement<br>positif ou négatif | 1,562<br>1,667                                                             | vert<br>incolore                                                                                                        | dispersif : gris, gris vert<br>vert olive, bleu violacé<br>0 - 0,012                           | B+/-                       |
| Amphiboles<br>$A_{0-1}X_2Y_5Z_8O_{22}(OH)_2$<br>X = Ca amphiboles calciques<br>non Al : trémolite - actinote<br>Al : hornblendes<br>X = Na amphiboles sodiques | mnod                  | <br>section basale<br>section<br>longitudinale                         | 1,595<br>1,608<br>1,707<br>1,722                                           | incolore<br>(Mg)<br>vert (Fe)<br>brun rouge<br>brun jaune<br>(Fe <sup>3+</sup> , Ti)<br>bleu<br>bleu vert<br>vert foncé | 0,004<br>0,010<br>0,012<br>0,018<br>0,025<br>0,027<br>glaucofane<br>riétéckite<br>arfvedsonite | B-                         |
| Pyroxènes<br>Clinopyroxènes<br>$(Ca,Mg,Fe^{2+}(Na,Al,Fe^{3+}))_2Si_2O_6$                                                                                       | mnod                  | <br>section basale                                                    | 1,636<br>1,657<br>1,685<br>1,772<br>1,826 (aegyrine)                       | incolore<br>(Mg)<br>verdâtre<br>(Fe)<br>brun violacé<br>pôle<br>(Ti)                                                    | 0,023<br>0,031<br>0,034<br>0,052<br>aegyrine                                                   | B+                         |
| Orthopyroxènes<br>$(Mg,Fe^{2+})_2Si_2O_6$                                                                                                                      | orthor                |                                                                                                                                                         | 1,788                                                                      | incolore<br>(brun pâle<br>vert pâle<br>rosé)                                                                            | 0,008<br>0,0022                                                                                | B+/-                       |
| Olivines<br>$(Mg,Fe^{2+})_2SiO_4$                                                                                                                              | orthor                | <br>(010)                                                            | 1,636<br>1,678                                                             | incolore<br>serpentine<br>iddingsite                                                                                    | 0,033<br>0,052                                                                                 | B+/-                       |





# Minéraux ferro-magnésiens majeurs

## 3b - Pyroxènes, olivine, serpentine





# 3b- les minéraux ferromagnésiens majeurs : pyroxènes, olivine

## *Sommaire*

- **Les Pyroxènes**

- Clinopyroxènes calciques**

- Augite
    - Augite titanifère
    - Diopside
    - Hedenbergite

- Orthopyroxènes**

- Ouralite
    - Exsolutions

- Pyroxènes sodiques des  
roches alcalines**

- Aegyrine
    - Augite aegyrinique

- Jadéite

- Spodumène

- **Olivine et serpentine**

- Olivine

- Iddingsite

- Texture en spinifex

- Serpentine

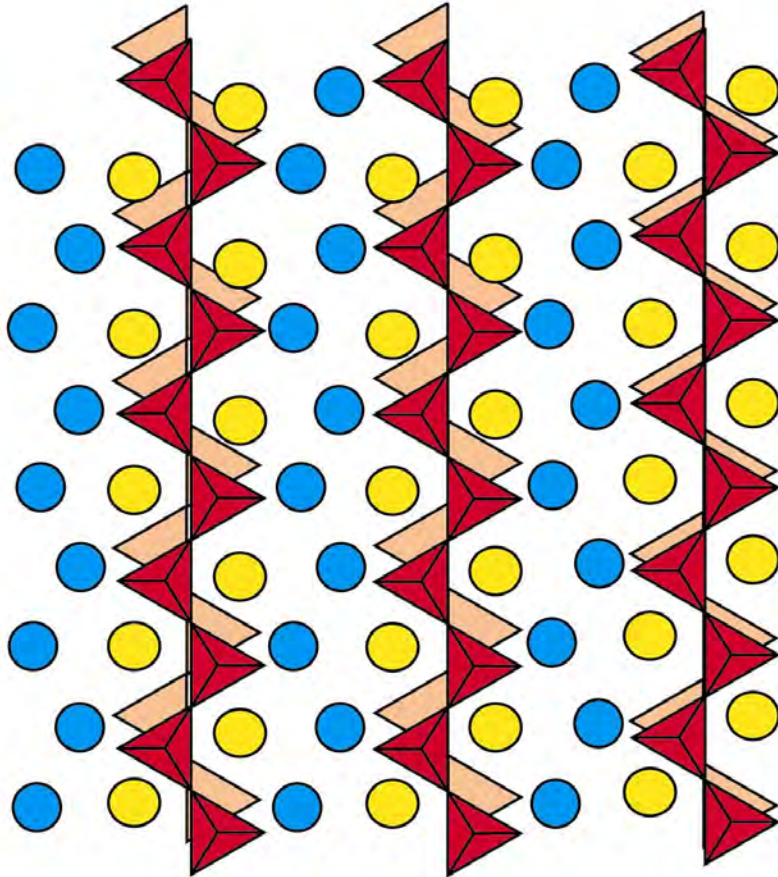
- Chondrite



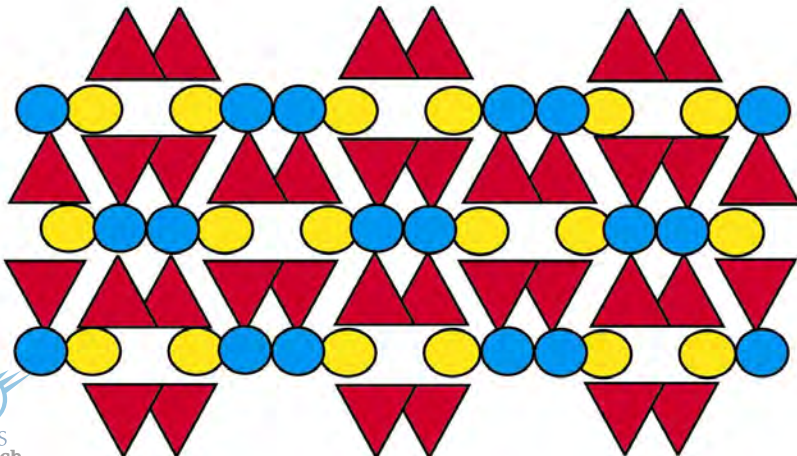


# Les Pyroxènes

## Structure des pyroxènes



- Inosilicates : tétraèdres en chaînes simples  $(\text{SiO}_3)^{2-}_n$
- Les chaînes sont reliées par des chaînes d'octaèdres : sites octaédriques Y (hexacoordonnés) (en bleu).
- Sites octocoordonnés X (en forme de cubes écrasés) (en jaune).





# Les pyroxènes

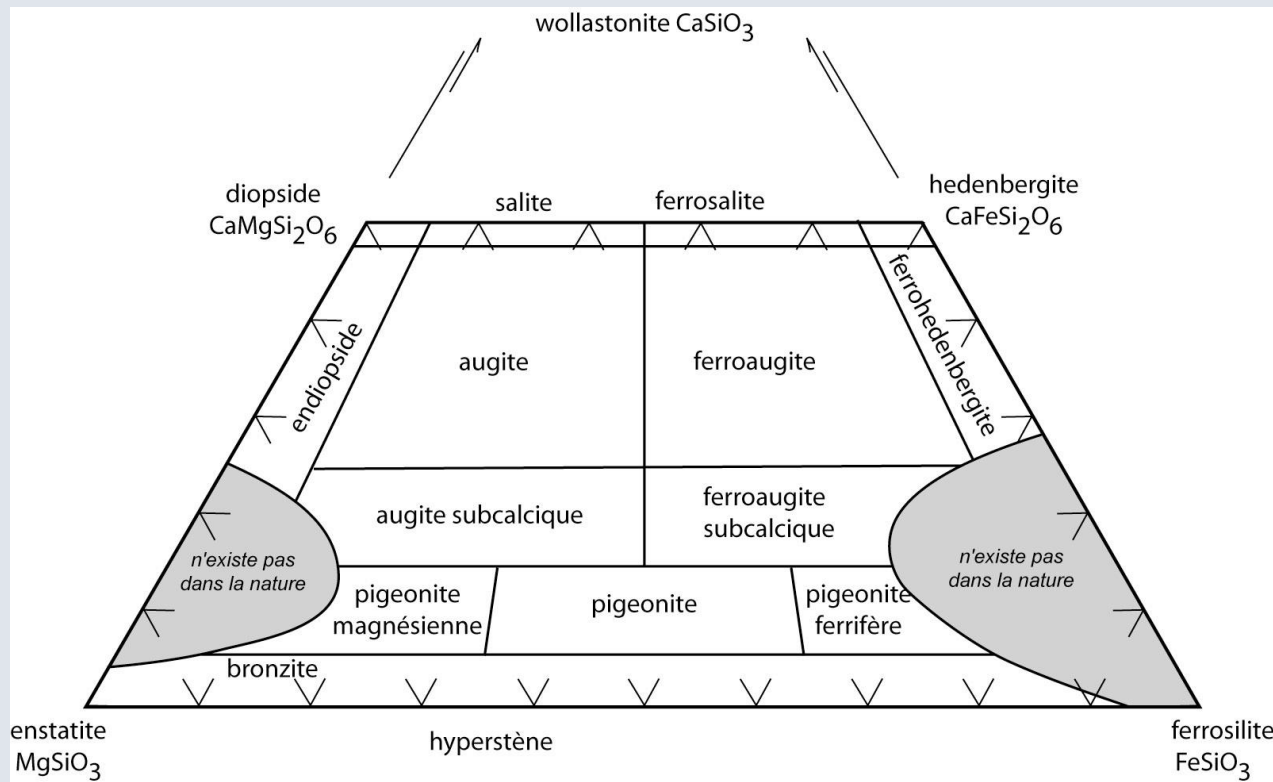
inosilicates à chaînes simples



$X = \text{Ca, Na}$

$Y = \text{Mg, Fe}^{2+}, \text{Mn, Al, Fe}^{3+}, \text{Ti, Li}$

$Z = \text{Si, Al}$



- orthopyroxènes (Opx) (*orthorhombiques*) :

- série enstatite MgSiO<sub>3</sub> – ferrosillite FeSiO<sub>3</sub>

- clinopyroxènes (Cpx) (*monocliniques*):

- série diopside CaMgSiO<sub>3</sub> – hedenbergite CaFeSiO<sub>3</sub> (les termes intermédiaires sont appelés salites) – johannsenite CaMnSiO<sub>3</sub> ;

- augites (augites titanifères) – augites subcalciues – pigeonite

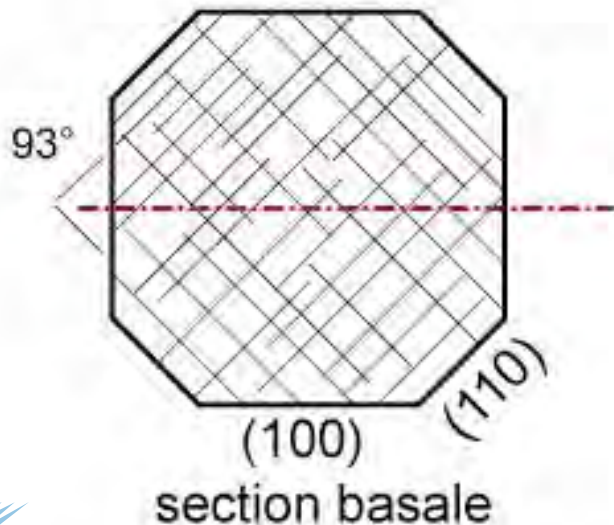
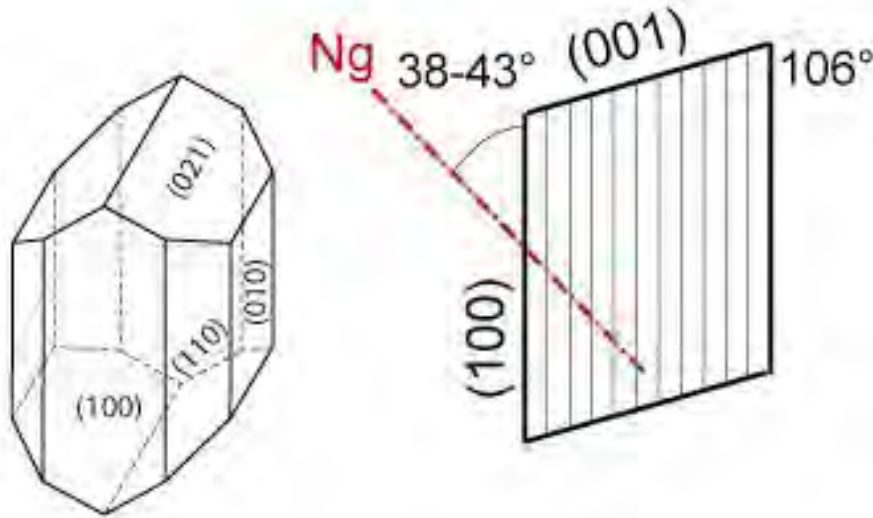
- série diopside – augite aegyrinique – aegyrine NaFe<sup>3+</sup>SiO<sub>3</sub> [Ca(Fe,Mg) ⇌ NaFe<sup>3+</sup>]

- série diopside – jadéite NaAlSiO<sub>3</sub> [Ca(Fe,Mg) ⇌ NaAl]

- (diopsides alumineux : pyroxènes contenant Al en site Z) – (clinoenstatite)



# Clinopyroxènes (Cpx)

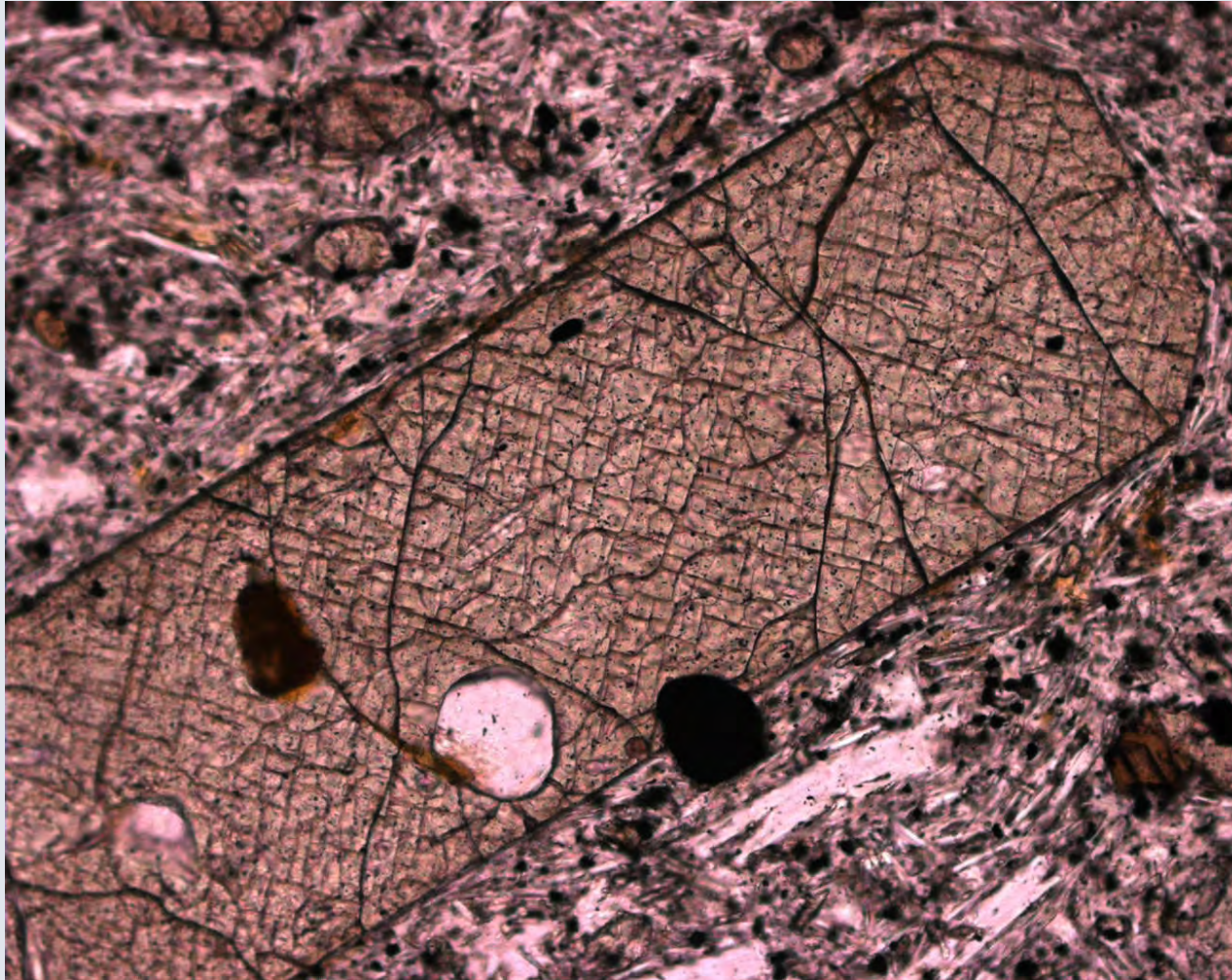


- Prismes courts à section octogonale.
- Souvent xénomorphes dans les roches plutoniques.
- **Deux clivages presque perpendiculaires ( $93^\circ$ )  $(110)$   $(\bar{1}\bar{1}0)$ .**
- Macle  $(001)$  le plus souvent simple.
- Np 1,67 – 1,74  
Ng 1,69 - 1,77  
Indices assez forts, nettement supérieurs à ceux des amphiboles.
- Incolores parfois brun rosé (augite titanifère) ou verdâtres (augite aegyriniques, pyroxènes riches en fer).
- Biréfringence  $\Delta = 0,024 - 0,031$   
Teintes vives du 2<sup>ème</sup> ordre, biréfringence supérieure à celle des amphiboles, inférieure à celle des micas.
- Les sections avec un seul clivage s'éteignent avec un **angle voisin de  $45^\circ$**  sur le clivage. Les sections à deux clivages perpendiculaires s'éteignent dans la bissectrice des clivages.
- Biaxes positifs  $2V$  voisin de  $60^\circ$  ( $r > v$ ).
- Sauf la pigeonite où  $2V$  va de 0 à  $25^\circ$  (critère distinctif).





# Augite



- Section basale octogonale allongée selon (010).
- La face (100) ferme le prisme au NE.
- Deux pans coupés (110) et (1 $\bar{1}$ 0).
- Les deux clivages presque perpendiculaires sont parallèles à ces plans.

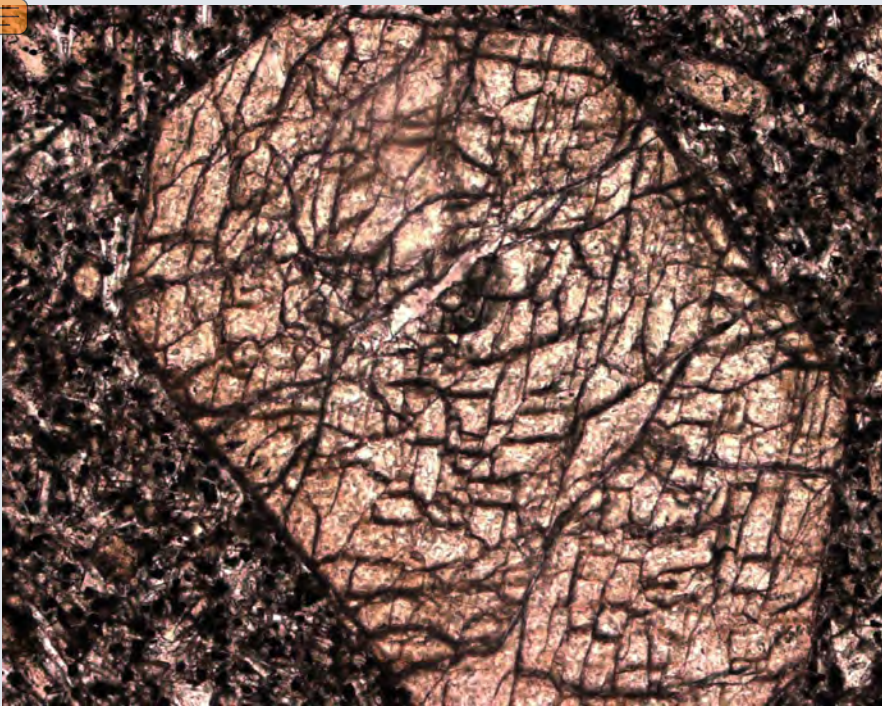
Basalte : fond microlithique à plagioclase, pyroxène, titano-magnétite.  
Cantal, France.

TC





# Augite



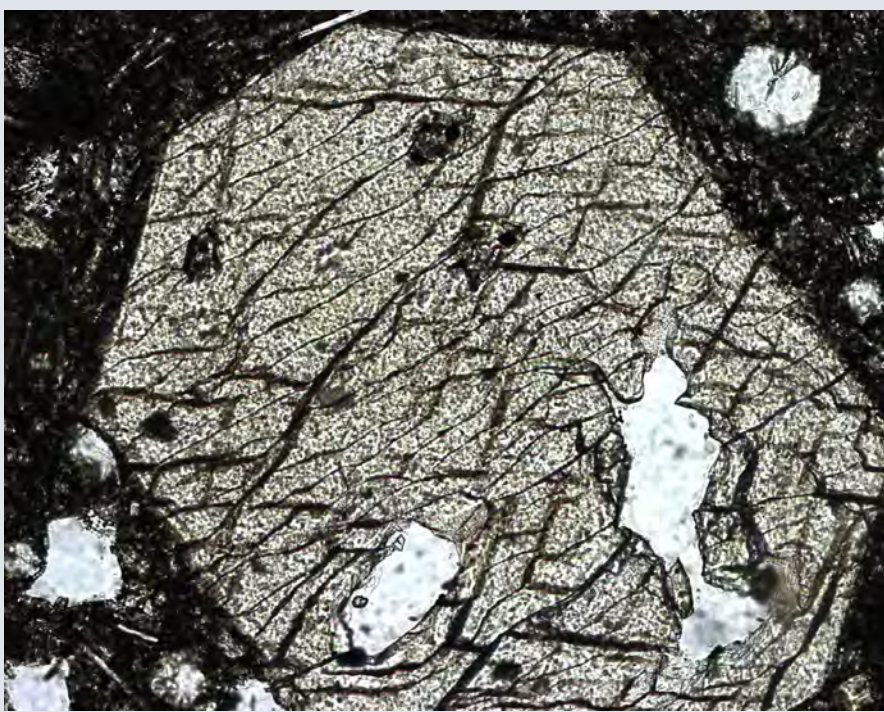
- Section basale : octogone avec les faces  $(100)$ ,  $(110)$  et  $(010)$  et les deux clivages  $(110)$   $(1\bar{1}0)$  pratiquement à angle droit.
- Basalte microlithique
- Saint-Thibery, Hérault, France.

TC

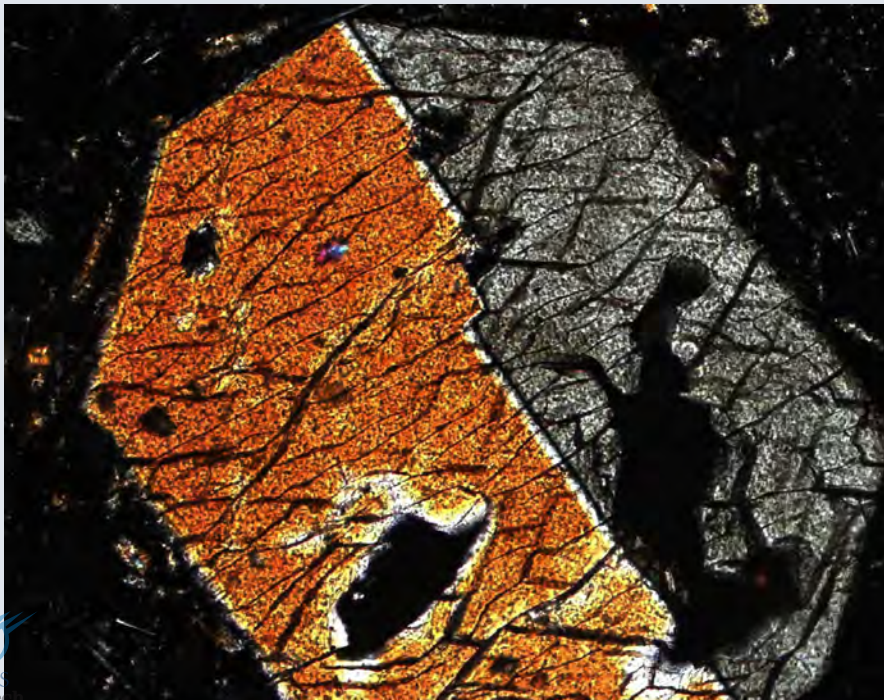




# Augite



- Section octogonale montrant les deux clivages.
- En fait, cette section est assez oblique sur l'intersection des deux clivages, ce qui fait que ces clivages n'apparaissent pas perpendiculaires.
- Macle selon le plan (100).
- Cantal, France.

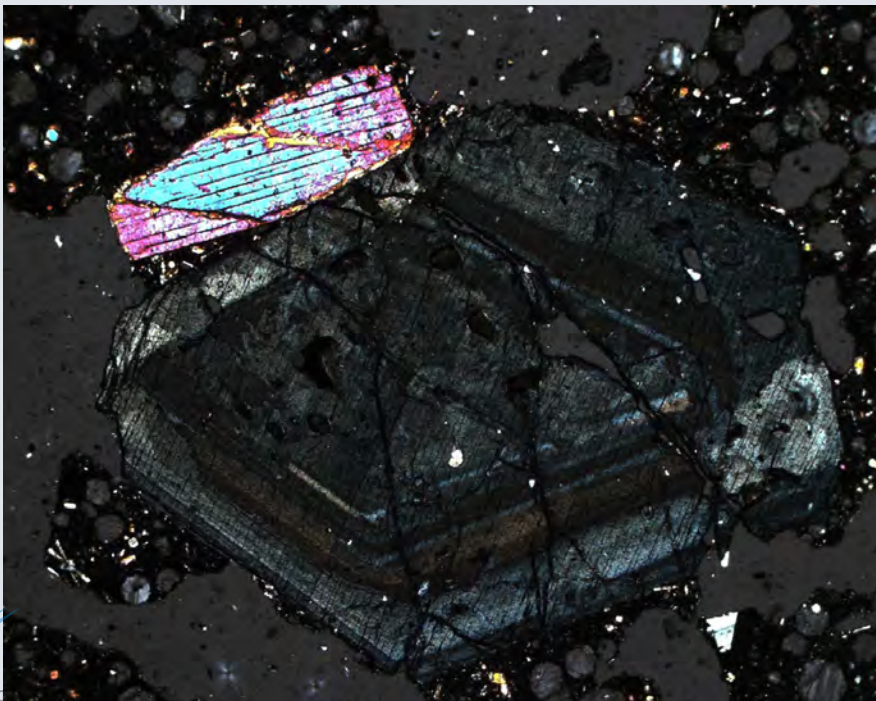
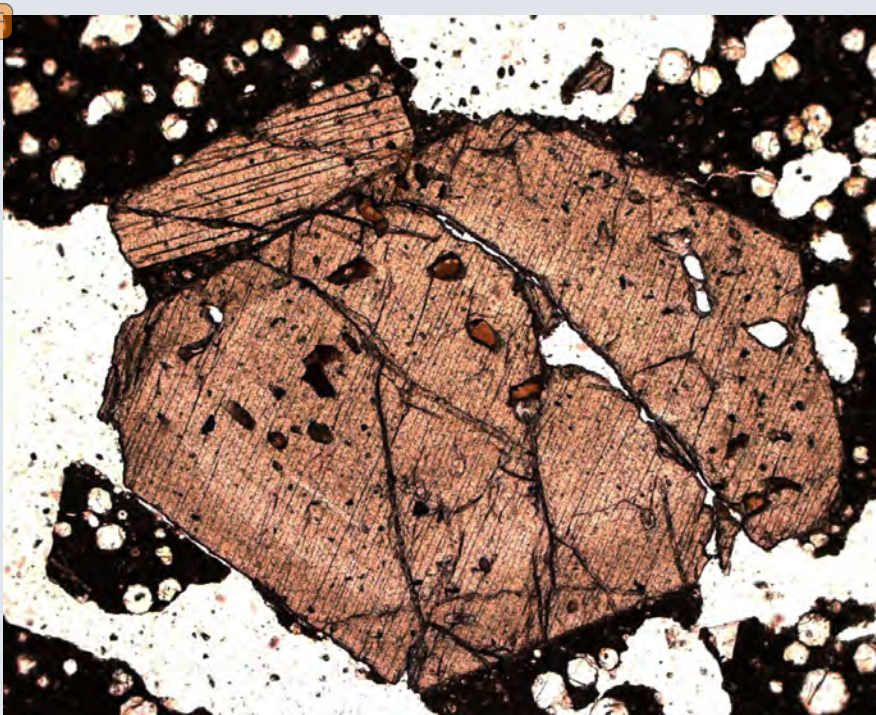


TC





# Augite

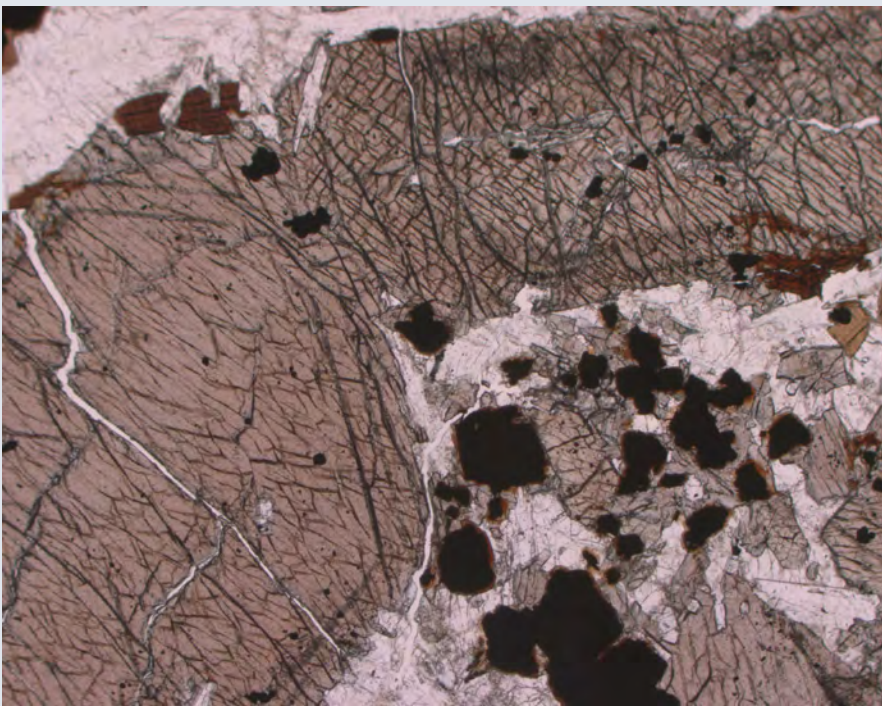


- Phénocristaux dans une téphri-phonolite bulleuse (on reconnaît des cristaux globulaires de leucite ).
- Les deux cristaux ne montrent qu'un seul clivage.
- L'un au NW montre des teintes d'interférence vives du 2<sup>ème</sup> ordre.
- L'autre, voisin de l'axe optique, est presque éteint mais montre des figures d'accroissement automorphes concentriques (et quelques inclusions de biotite).

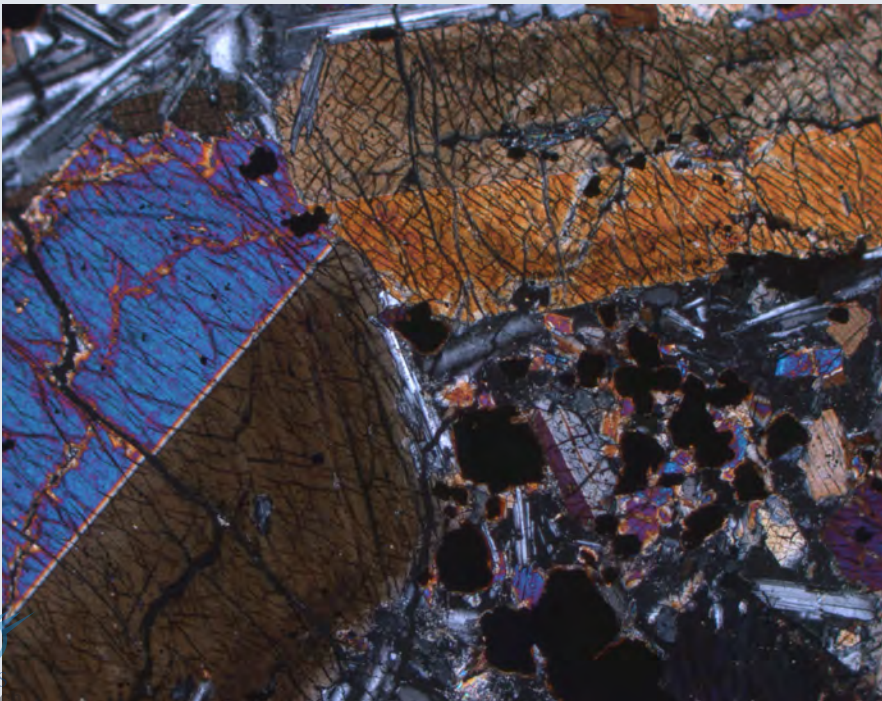




# Augite



- Deux phénocristaux dans une dolérite.
- Les grands cristaux d'augite automorphes montrent des figures d'accroissement et la macle (001).
- La matrice est formée de lattes de plagioclase, augite biotite et magnétite.







## Augite titanifère

- La roche est une ijolite roche plutonique, sans feldspath, formée de néphéline (incolore, polarisant dans des gris plus ou moins sombres), augite titanifère, apatite (cristaux en longues baguettes souvent creuses), biotite (brun très sombre) et magnétite (opaque).
- Jacupiranga, Brésil.

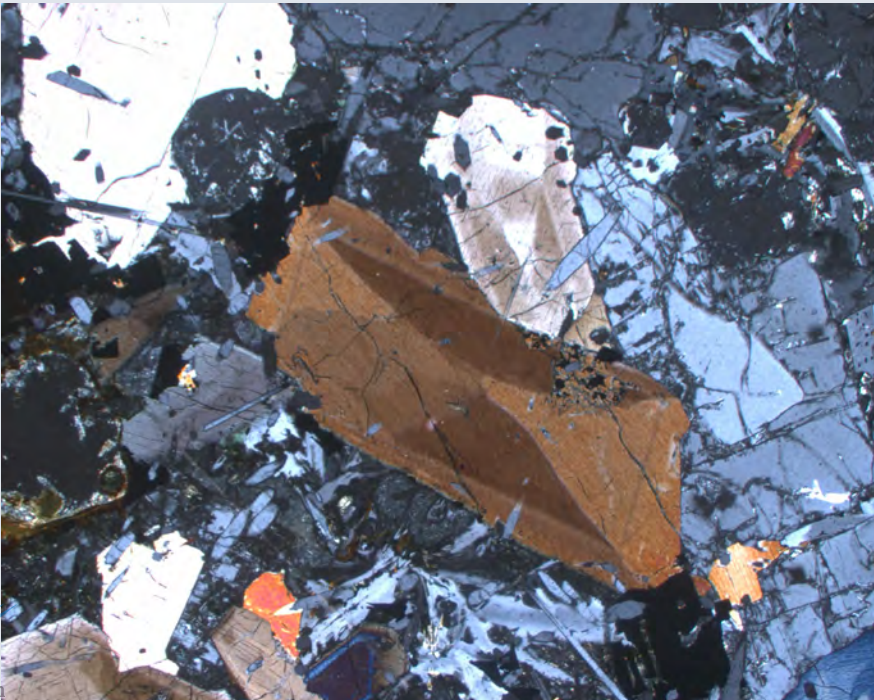
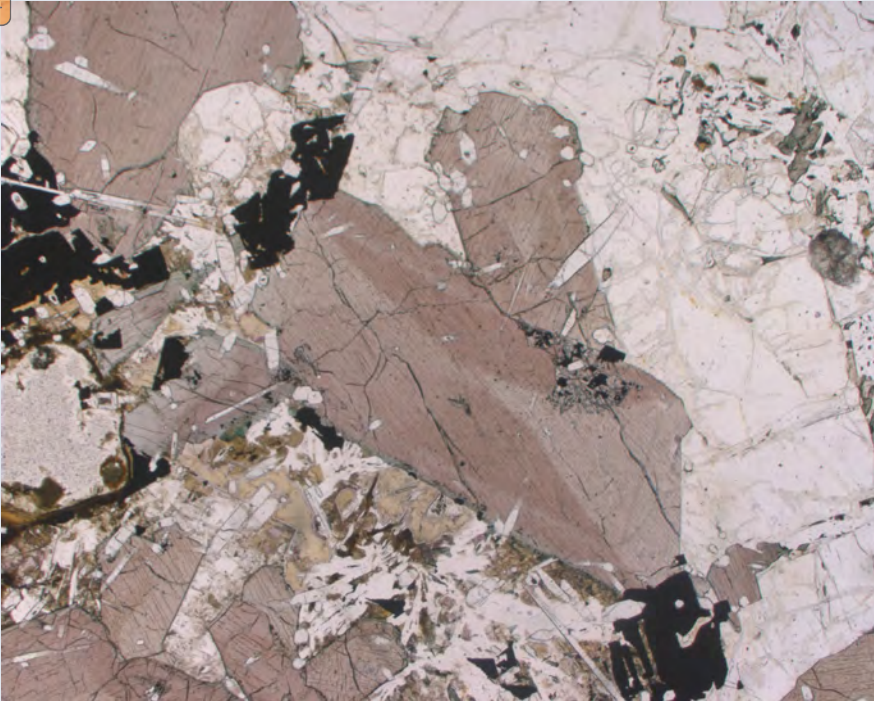
AR



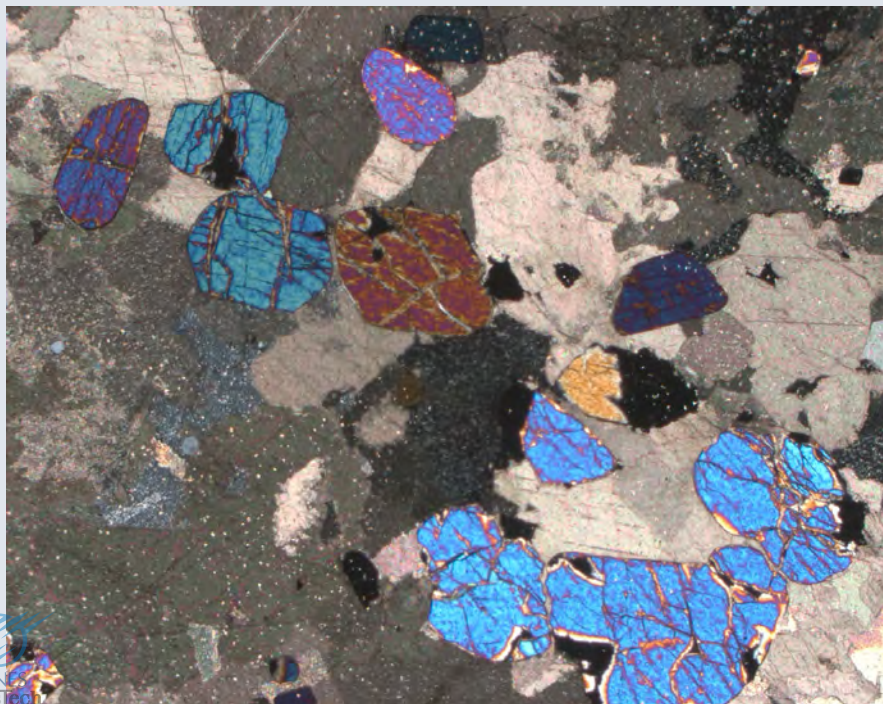
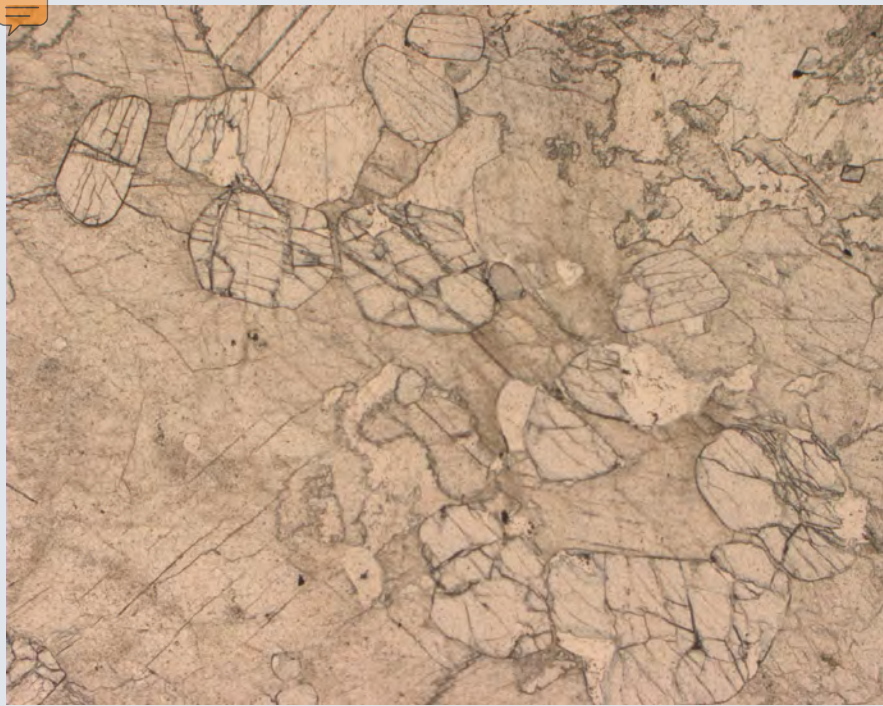


# Augite titanifère

- Même échantillon que pour la photo précédente.
- Les augites titanifères ont des couleurs brun violacé à rose.
- Les cristaux de cet échantillon montrent une zonation en sablier (*hour glass structure*).
- Les teintes vives de polarisation s'observent dans certains cristaux mais elles sont masquées dans les cristaux les plus remarquables (centre de cette photo et diapo précédente) par les teintes propres du minéral.
- Jacupiranga, Brésil.







# Diopside

## $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$



- La roche est un marbre magnésien (métamorphisme moyen).
- Le diopside, en cristaux subauto-morphes, se détache du fond de la roche, constitué de carbonates (clivages, faible relief, teintes de polarisation d'ordre supérieur ) , par son relief, ses clivages et les teintes vives de polarisation (2<sup>ème</sup> ordre).
- Diopside : incolore.
- $N_p$  1,665 –  $N_g$  1,696
- Biréfringence  $\Delta = 0,031$
- La Salvetat-sur-Agout, Hérault, France.

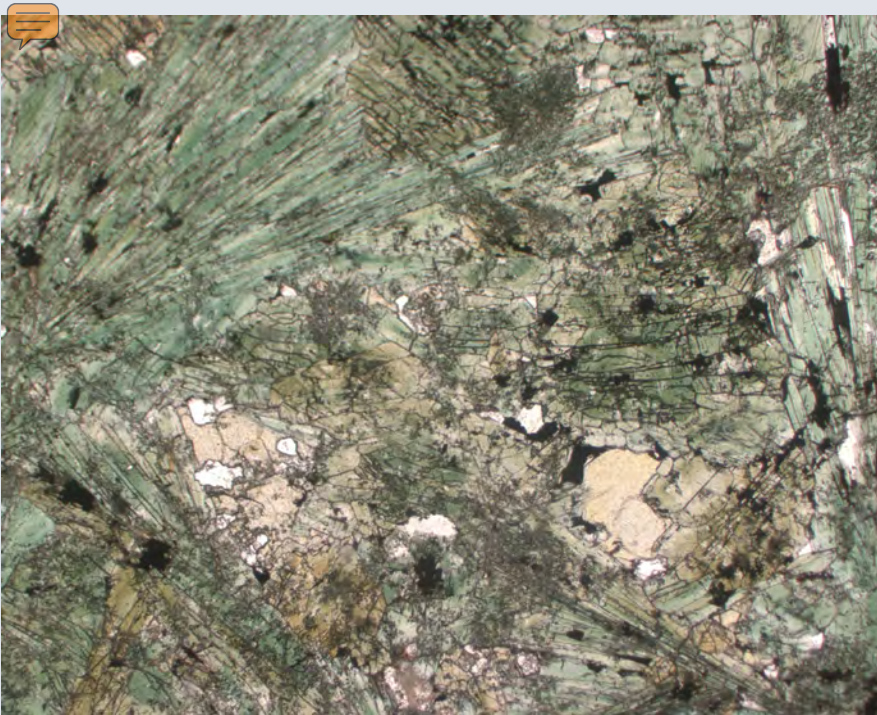
C



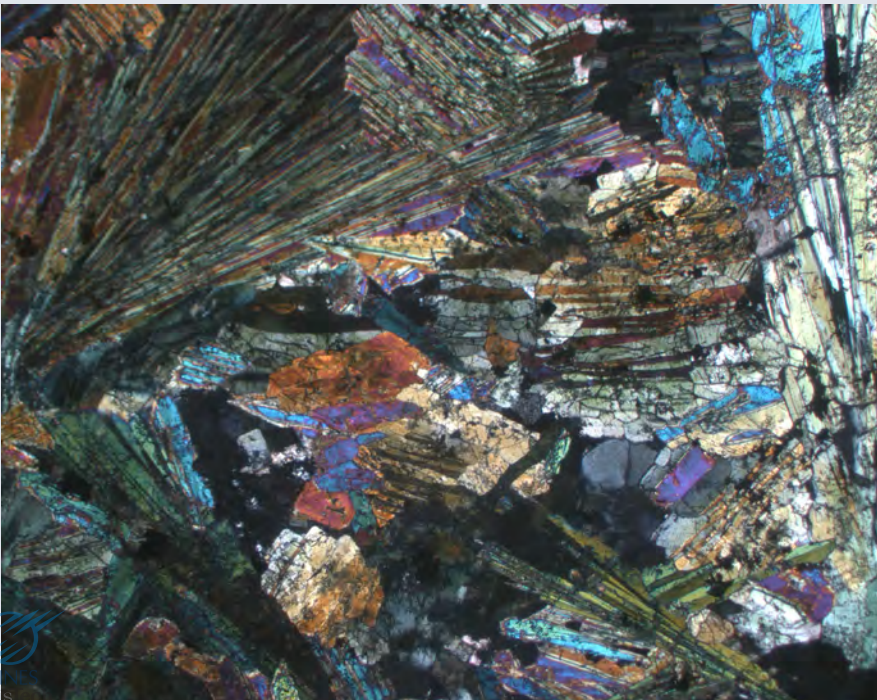


# Hedenbergite

$\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$



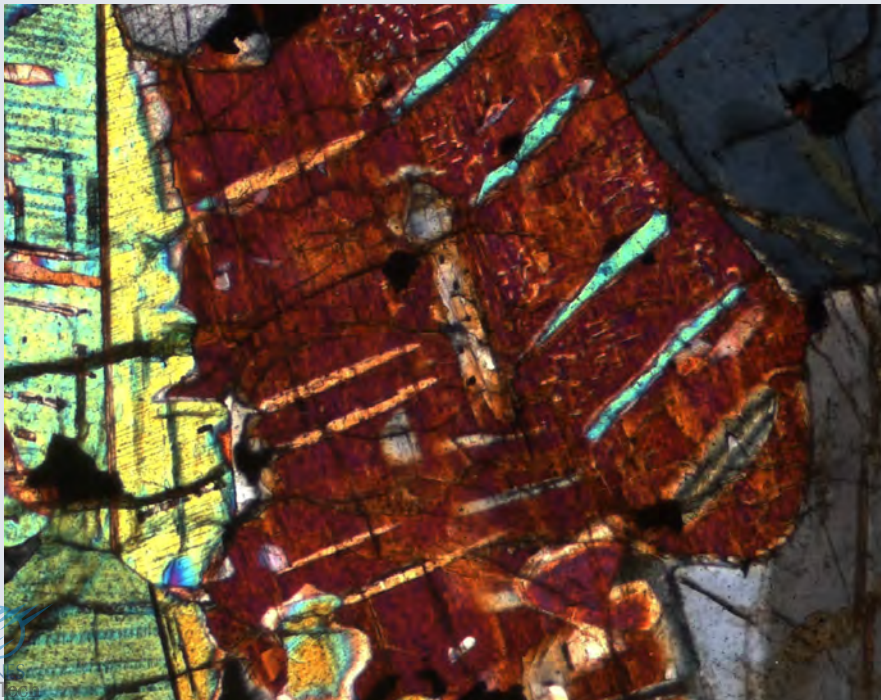
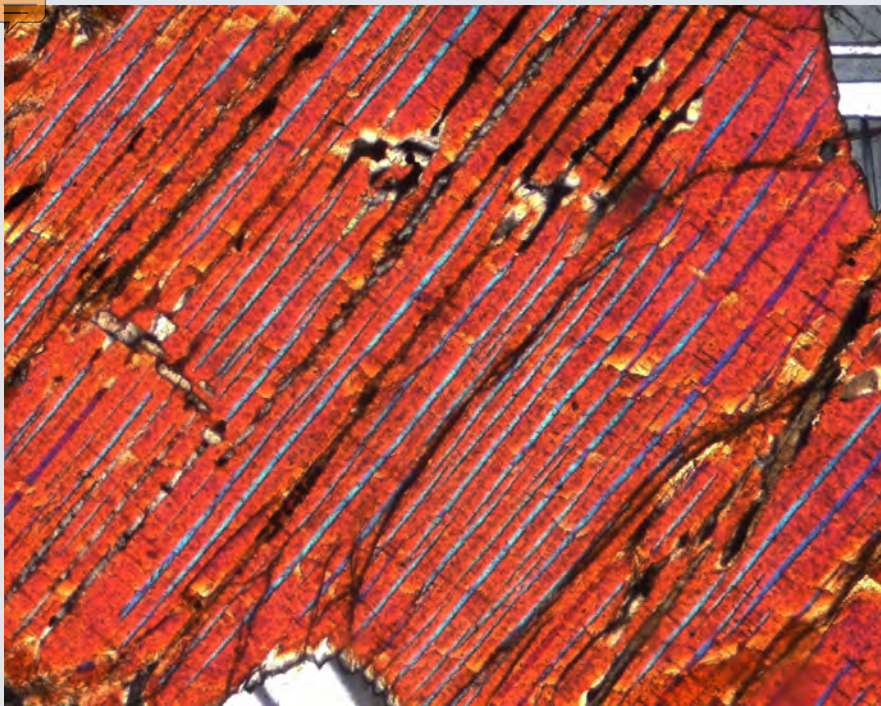
- Les termes ferrifères de la série diopside – hedenbergite se distinguent par leur couleur verte.
- Leurs indices sont plus forts :  
 $N_p 1,727 \quad N_g 1,756$ .
- Leur biréfringence légèrement plus faible ( $\Delta = 0,029$ ).



- Dans ce skarn, l'hedenbergite forme de grandes gerbes radiées. Les minéraux jaune – gris jaune polarisant dans des gris foncé dans la partie inférieure de la photo sont du grenat calcique.
- Île d'Elbe, Italie.

AR



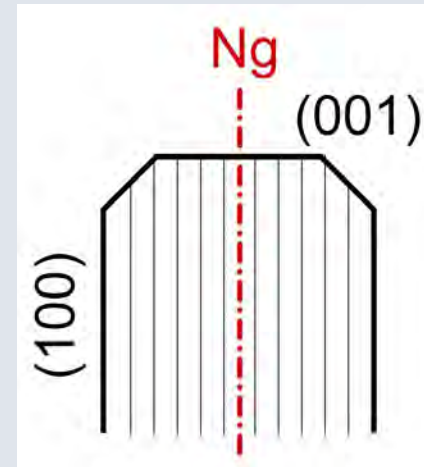
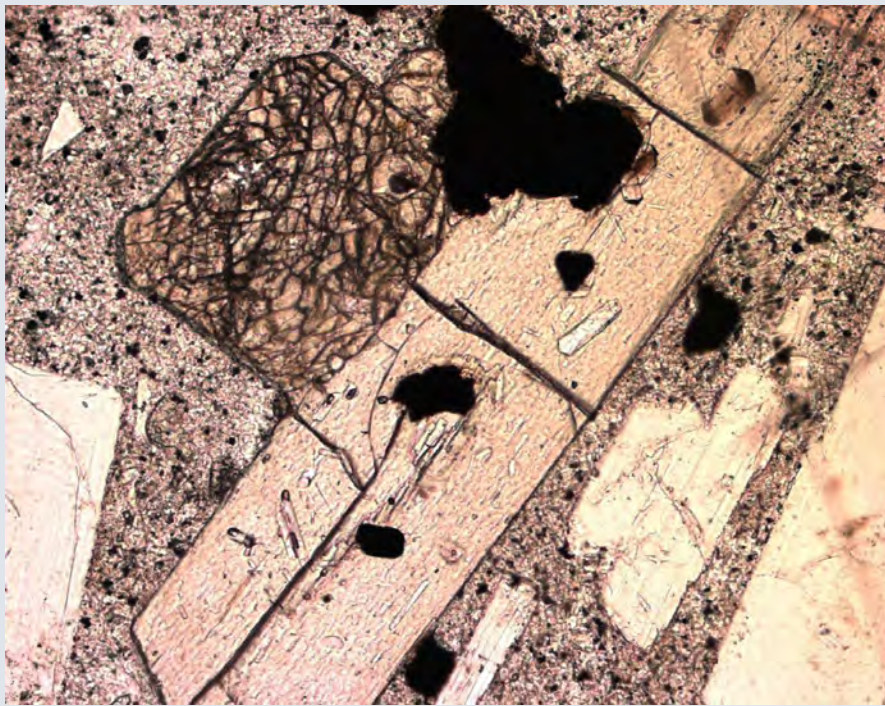


# Pigeonite inversée



- La pigeonite ne se distingue des autres clinopyroxènes que par un angle  $2V$  petit ( $0 - 30^\circ$ ).
- La pigeonite est un minéral de haute température qui n'est préservé que dans les laves.
- Dans les roches magmatiques, il se produit une **démixtion subsolidus** en orthopyroxène + augite.
- L'image du haut montre une **démixtion partielle de lamelles d'augite** selon le plan (001) dans une pigeonite.
- L'image du bas montre une **démixtion en bandes plus épaisses (« blebs »)** dans une pigeonite montrant une macle. Dans ce même cristal, des vermicules de teinte plus vive que le fond du cristal indiquent une **démixtion d'un autre type**.
- Bushveld, Upper zone, Rosenekal, Transvaal.





## Orthopyroxène (Mg, Fe) $\text{SiO}_3$

- Cette dacite (mésostase vitreuse et phénocristaux de plagioclase) montre deux phénocristaux automorphes d'orthopyroxène : section basale à deux clivages et section longitudinale à un seul clivage (comme chez les autres pyroxènes).
- Les indices sont moyens à forts comme ceux des autres pyroxènes :

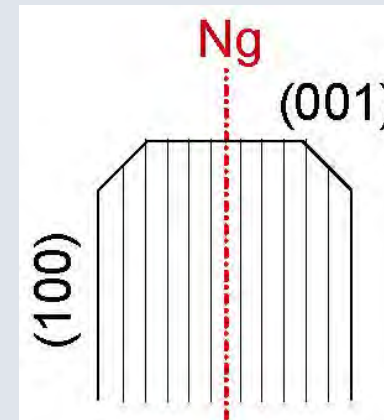
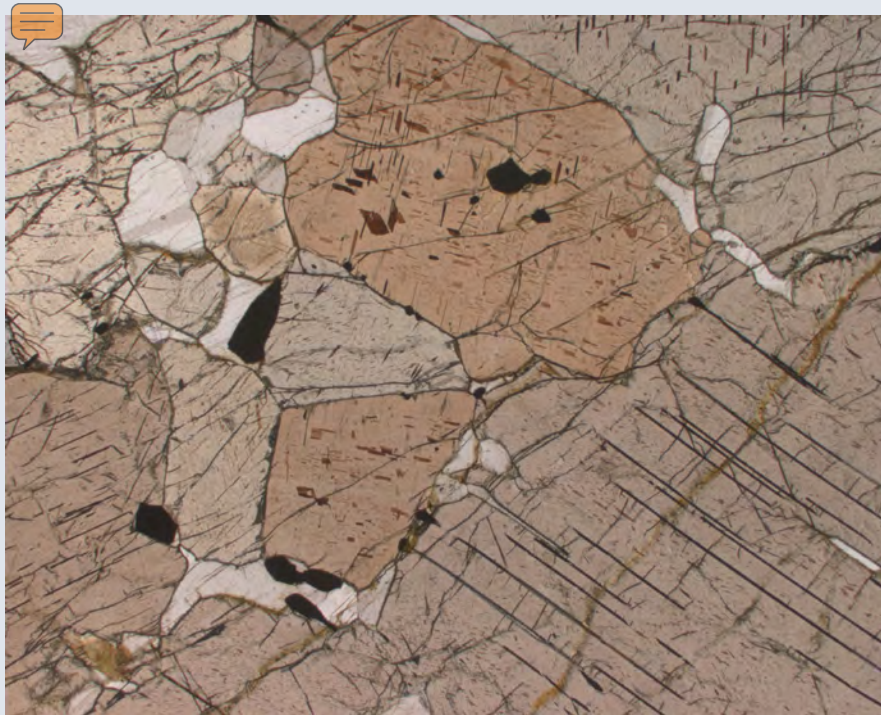
Np 1,650 – 1,768

Ng 1,658 – 1,788

C







## Orthopyroxène (Mg, Fe) SiO<sub>3</sub>

- Les orthopyroxènes magnésiens sont incolores en lame mince.
- Les orthopyroxènes ferrifères (ici dans une anorthosite) sont pléochroïques de brun pâle à rosé.
- anorthosite de Morin, Québec, Canada.

C



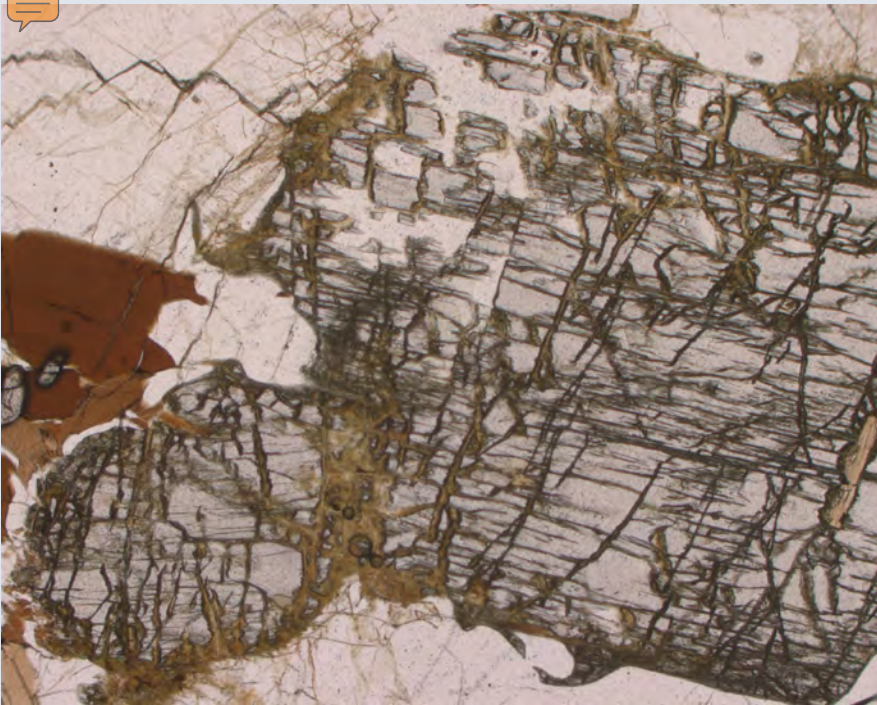


# Orthopyroxènes

Les orthopyroxènes se distinguent des clinopyroxènes par une **biréfringence faible**

$$\Delta = 0,007 - 0,020$$

Teintes de polarisation dans les gris, jaune orangé du 1<sup>er</sup> ordre



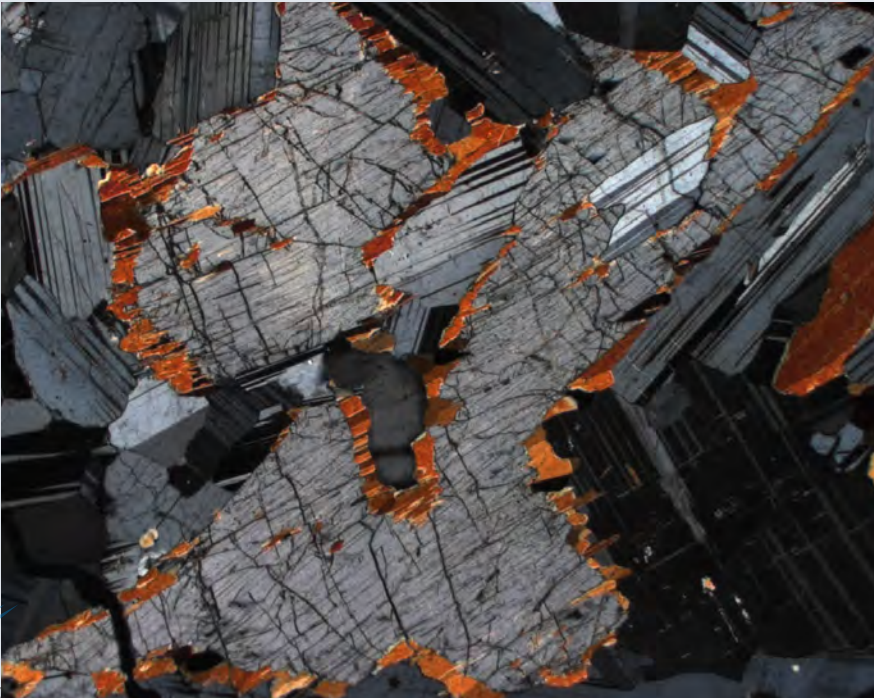
- **Extinction droite**
- Allongement positif
- Biaxe positif ou négatif selon la teneur en fer
- $2V \ 50 - 125^\circ$
- $r < v$  (termes Mg) –  $r > v$  (termes Fe)
- Charnockite
- Ansignan, Pyrénées orientales, France.

C





# Pyroxène ouralitisé



- L'ouralitisation est une **altération des pyroxènes** (ortho- et clinopyroxènes) **en amphibole** (par hydratation).
- La roche est une norite (gabbro à orthopyroxène) : tablettes de plagioclase maclées et orthopyroxène (section à un seul clivage ; polarise en gris).
- A sa périphérie l'orthopyroxène s'altère en amphibole brun vert (teintes de polarisation vives).
- L'ouralitisation est un phénomène **AC**

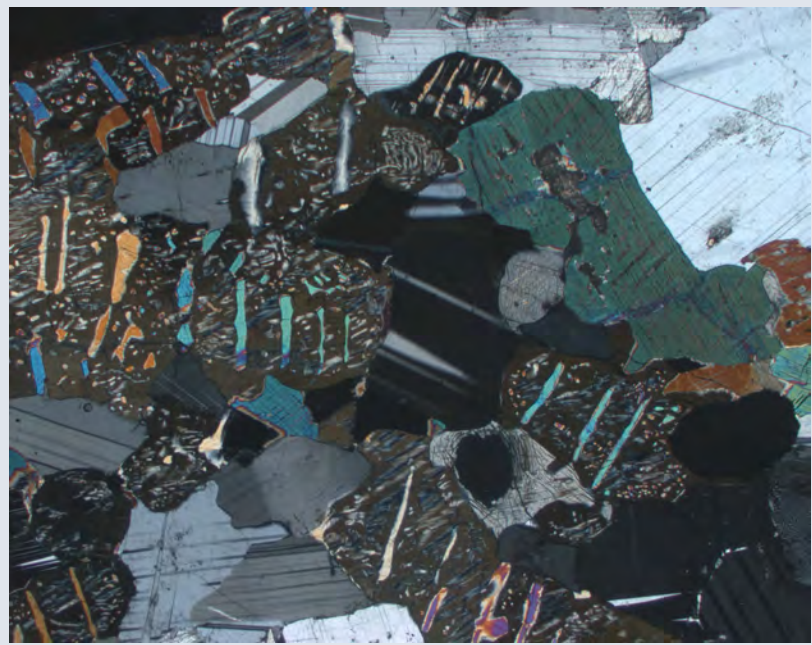
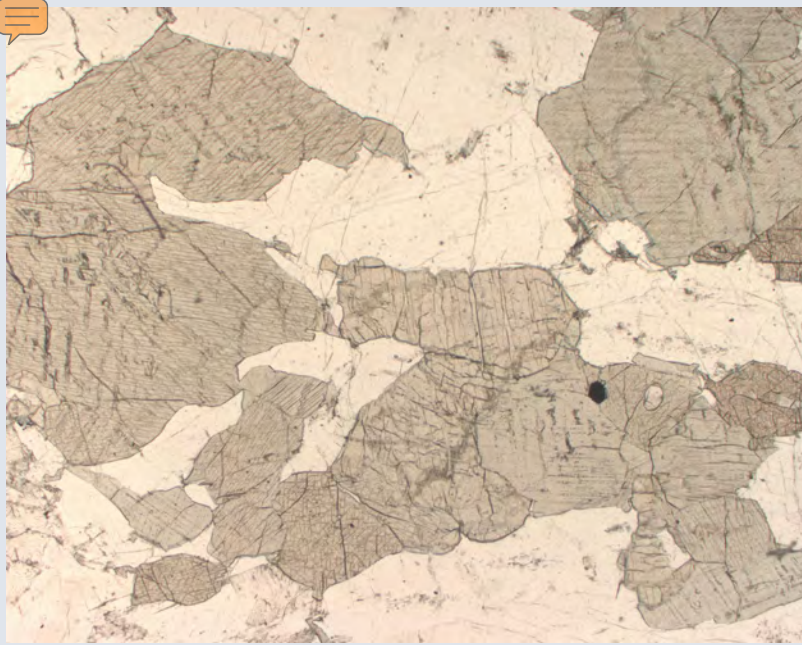


## Exsolutions de clinopyroxène dans un orthopyroxène

Il existe une solution solide partielle à haute température entre ortho- et clinopyroxène. Lors de la baisse de température, se produisent des exsolutions de l'un dans l'autre (ici de clinopyroxène (polarise en jaune) dans l'orthopyroxène, ici pratiquement éteint).

La roche est une péridotite : l'olivine (partiellement serpentinisée) forme le reste de la photo (Velay, France).

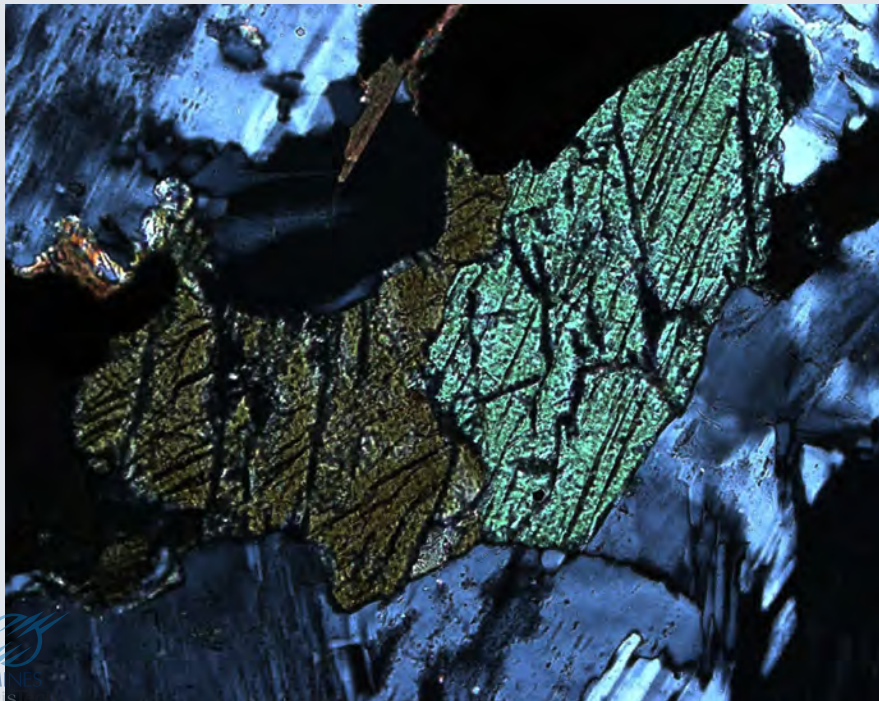
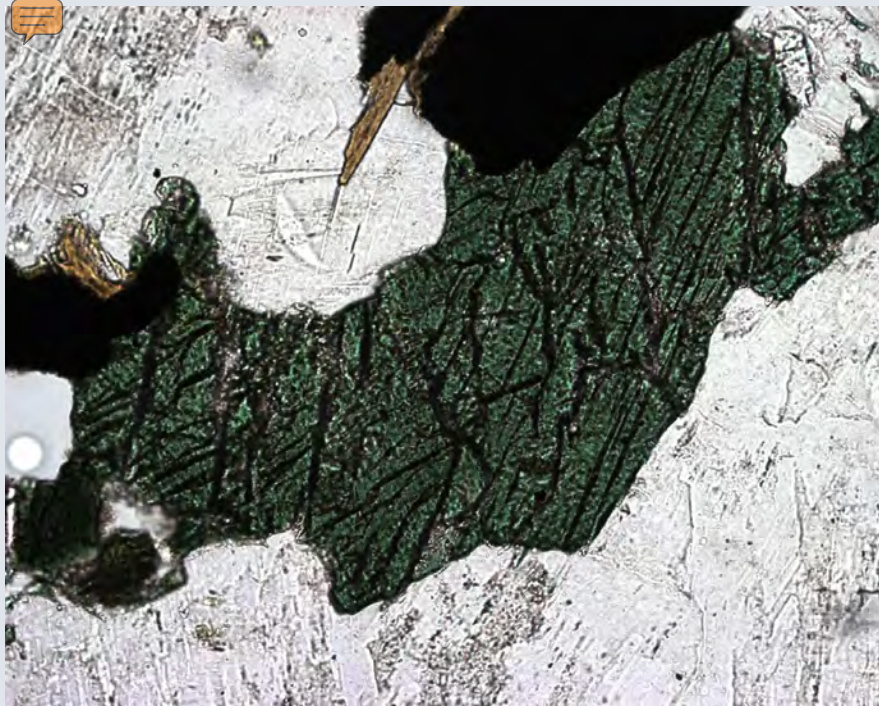




Exsolutions de Cpx dans des orthopyroxènes et d'Opx dans des clinopyroxènes.  
La roche est une norite.







## Aegyrine $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$

- Formes analogues à celles des autres pyroxènes ; la variété acmite montre des pointes très aiguës.
- Couleur vert jaune à vert bleu – très pléochroïque.
- $N_p$  1,750 – 1,776
- $N_g$  1,800 – 1,835
- Biréfringence  $\Delta = 0,040 - 0,060$

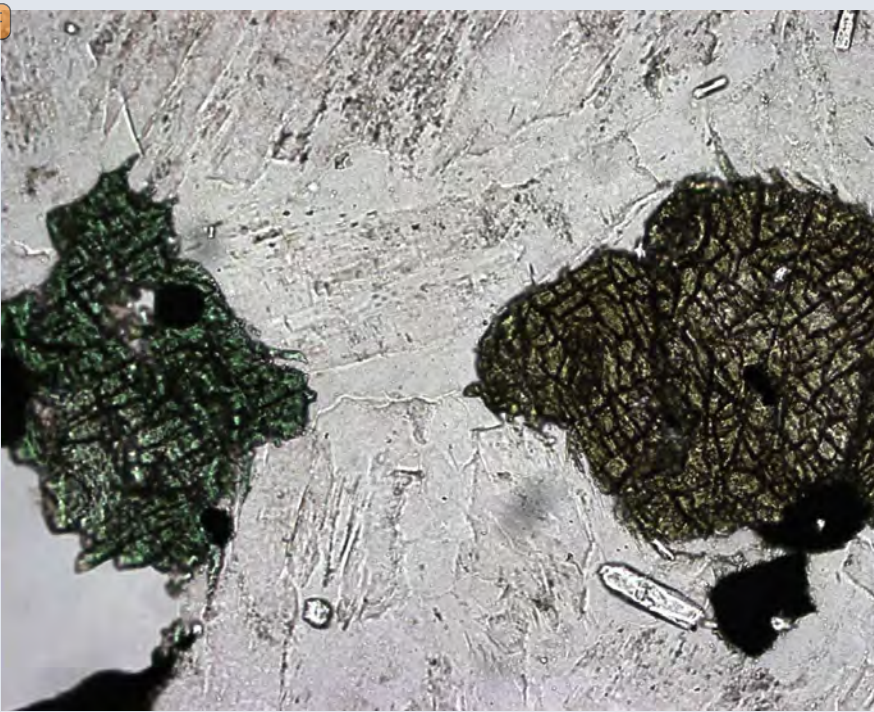
Teintes du 3<sup>ème</sup> ordre.

- Angle d'extinction faible 0 à 10°.
- Biaxe positif à négatif.
- $2V$  45 – 110°
- $r < v$
- Dans la série qui va des salites à l'aegyrine, les indices, la biréfringence et  $2V$  augmentent avec la teneur en aegyrine ; l'angle d'extinction diminue.

AR

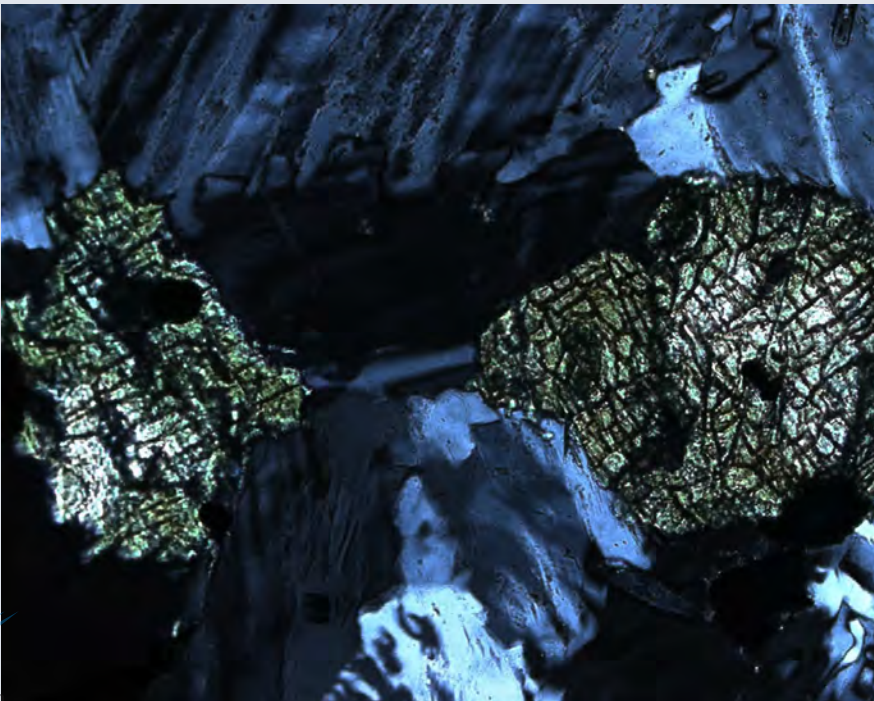


# Aegyrine $\text{NaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_6$



- Sections basales dans une syénite (même échantillon que pour la photo précédente).
- Le fond de la roche est formé de microcline.
- Le grain et la baguette incolore à fort relief (relatif) vers le bas de la photo, sont de l'apatite.

AR

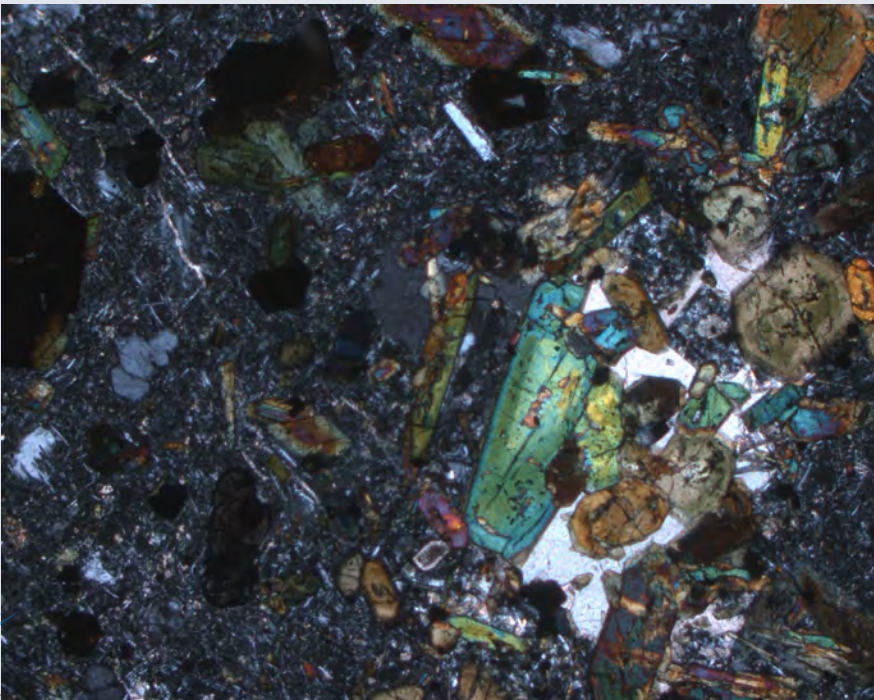
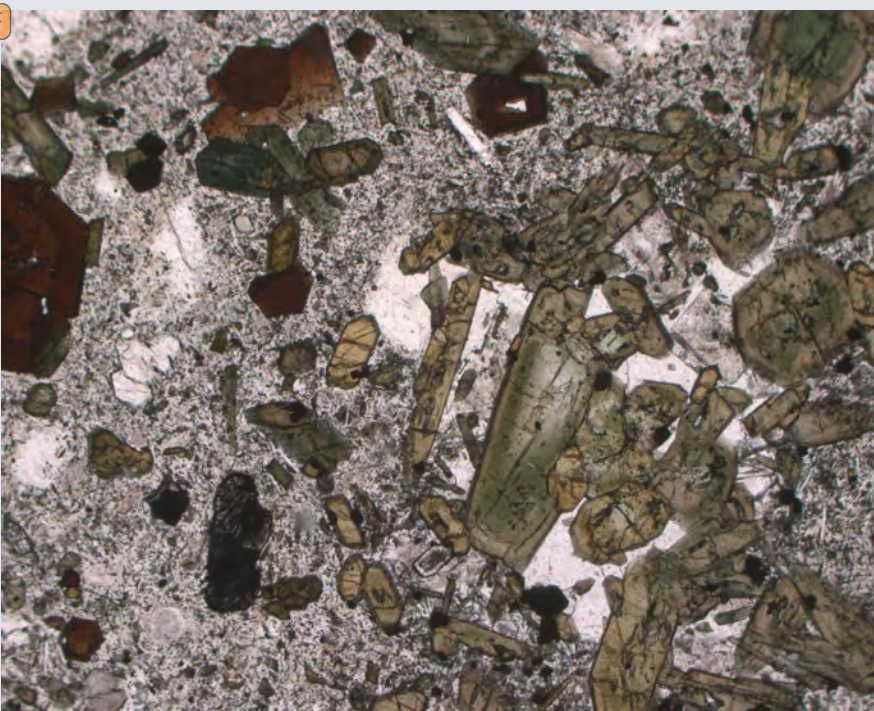




# Augite aegyrinique

- La substitution  $\text{Ca(Fe,Mg)} \Leftrightarrow \text{Na Fe}^{3+}$  permet une série continue depuis les salites (série diopside – hedenbergite) jusqu'à l'aegyrine.
- Les pyroxènes de cette phonolite ont évolué au cours de leur croissance depuis des augites (cœur des minéraux brun vert) jusqu'à des aegyrines (vertes, biréfringence plus élevée) à la périphérie (et dans les petits cristaux tardifs).
- Les autres phénocristaux sont de la biotite (brun foncé, section hexagonale au centre gauche), feldspath et néphéline (cristaux hexagonaux, polarisant en gris).

AC

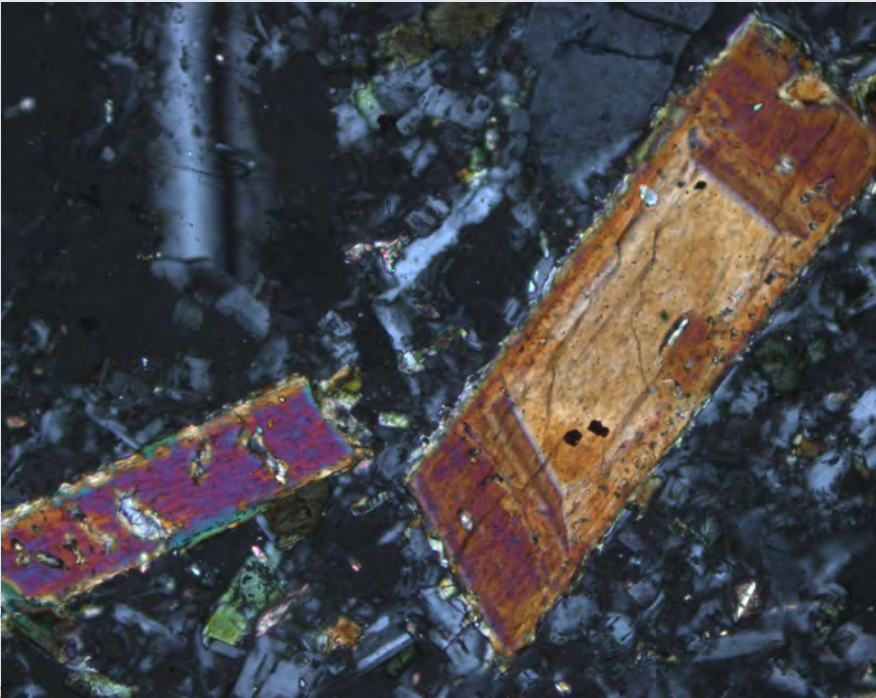
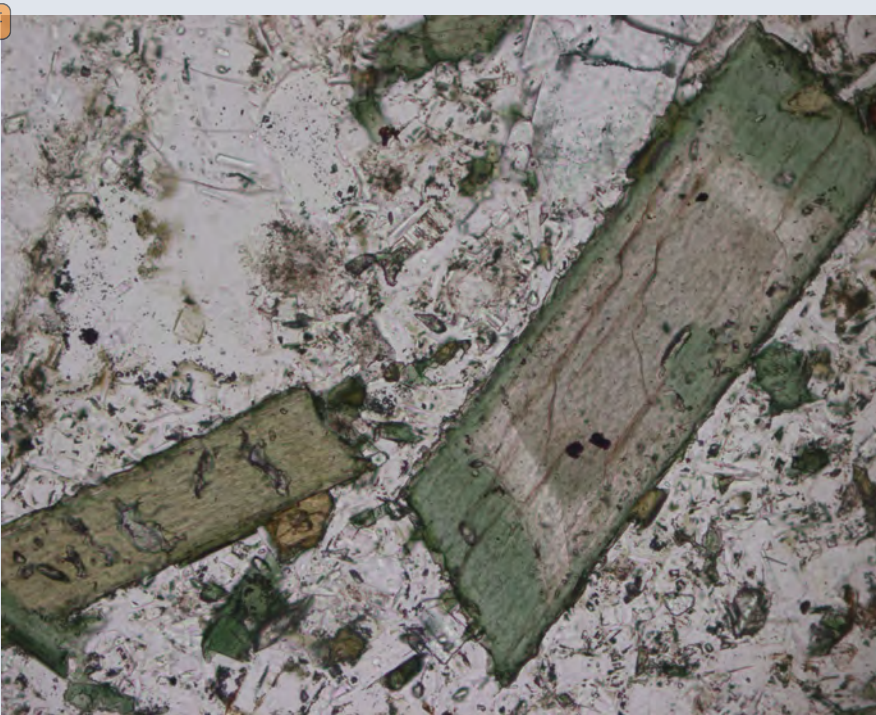






## Augite aegyrinique

Grossissement de l'échantillon précédent afin de mieux montrer la zonation salite (titanifère) – augite aegyrinique.







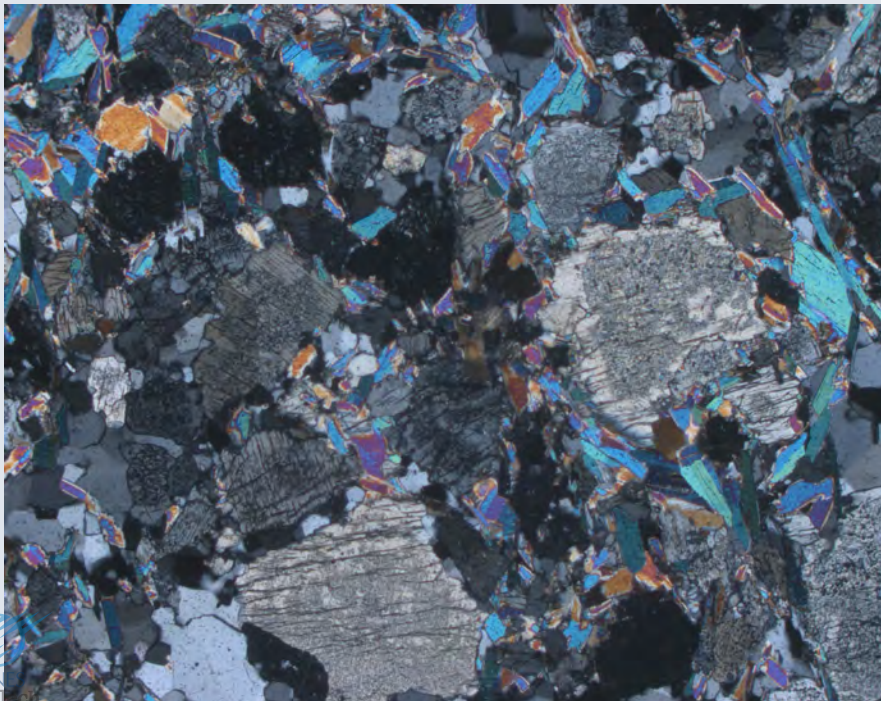
# Jadéite $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$



- Incolore
- Elle se distingue des autres pyroxènes par des indices plus faibles (Np 1,640 – 1,658 ; Ng 1,652 – 1,673) et une biréfringence plus faible ( $\Delta = 0,012 - 0,013$ ) (teintes de polarisation dans les gris – jaune pâle du 1<sup>er</sup> ordre).
- $2V \ 68-72^\circ$
- $r > v$
- L'image montre des sections à un seul clivage et quelques sections à deux clivages perpendiculaires.
- Birmanie.

AR





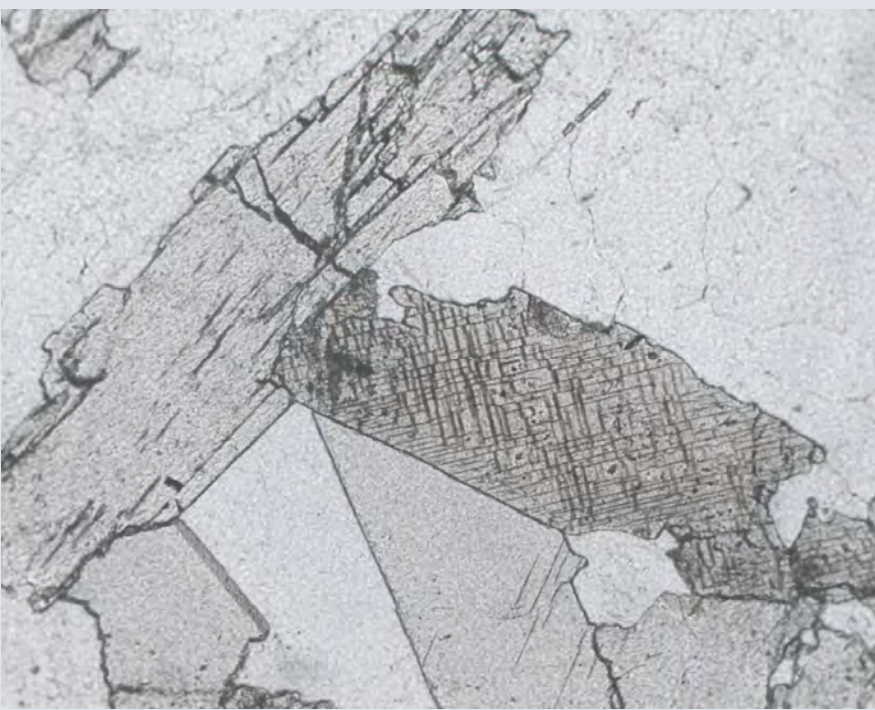
# Jadéïte $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$

- La jadéïte est un minéral de métamorphisme de haute pression qui remplace le plagioclase sodique : albite  $\Rightarrow$  jadéïte + quartz.
- L'image montre un association jadéïte + quartz + phengite.
- Corse.

AR

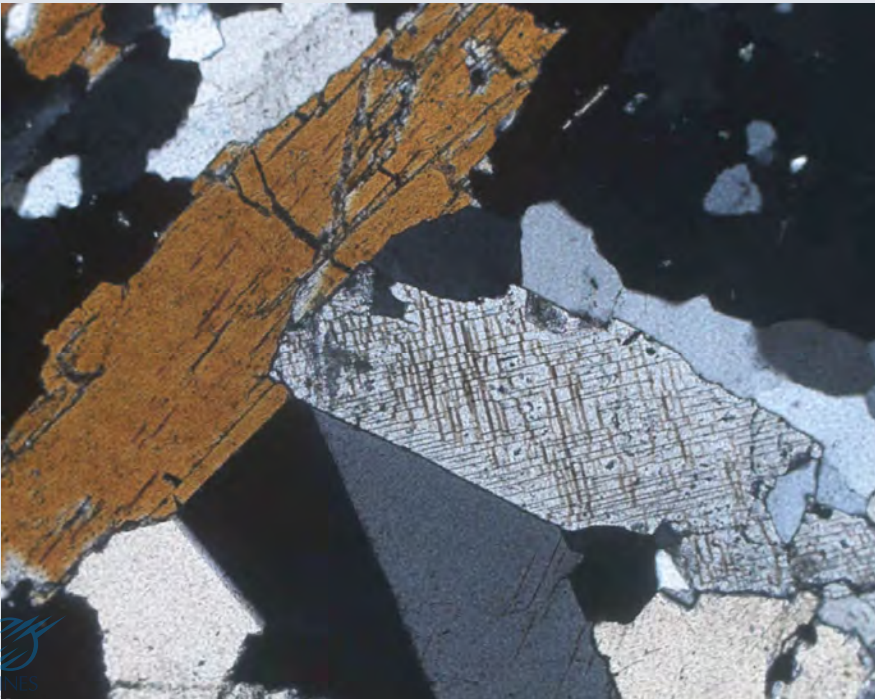


# Spodumène $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$



- Monoclinique.
- Formes et clivages comme les clinopyroxènes.
- Incolore en lame mince.
- Np 1,648 – 1,663  
Ng 1,662 – 1,679

Indices un peu moins forts que ceux des autres clinopyroxènes.



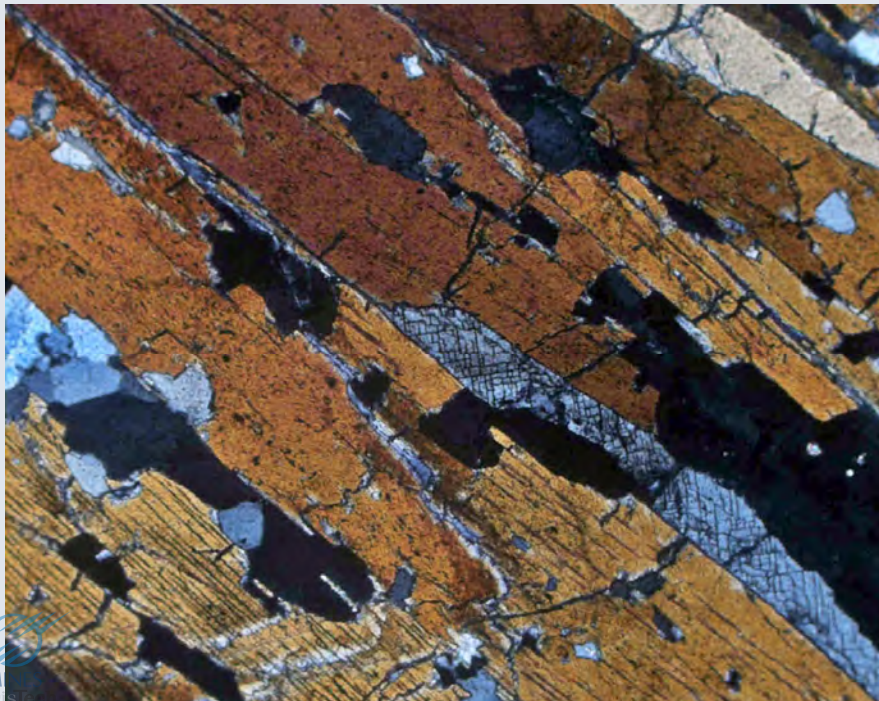
- Ici, section basale montrant les deux clivages à angle droit ( $93^\circ 45'$ ) et section longitudinale.
- Le fond de la roche est du quartz
- Fort Victoria, Zimbabwe.

R





# Spodumène $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$

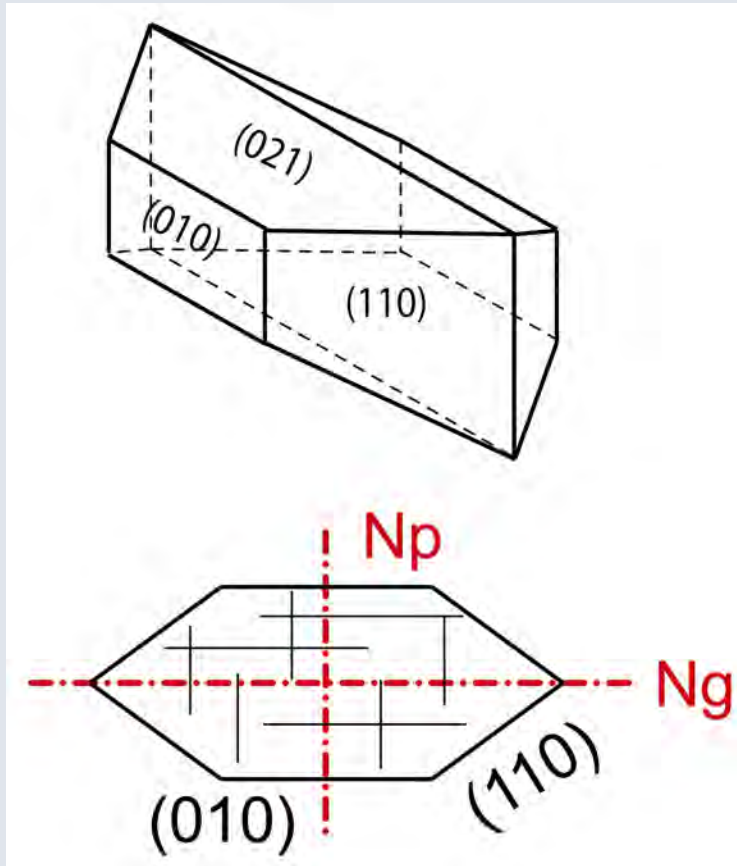


- Biréfringence  $\Delta = 0,014 - 0,027$
- Angle d'extinction : 3 à 7°
- $2V = 58 - 68^\circ$
- Biaxe positif  $r > v$
- Se distingue des autres clinopyroxènes par son angle d'extinction faible ; l'aegyrine et de l'augite aegyrinique sont colorées et pléochroïques.
- Gisement : pegmatites lithiques
- Fort Victoria, Zimbabwe.





# L'olivine



- $(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$  (contient aussi Mn, Ni, Co...)  
Pôle Mg : forstérite      pôle Fe : fayalite
- Orthorhombique
- Formes propres fréquentes (sections hexagonales) ou en grains arrondis.
- Deux clivages perpendiculaires : (010) moyen et (100) mauvais.
- Extinction droite sur le clivage et l'allongement de l'hexagone. Allongement positif.
- Indices forts :  
comme les pyroxènes ou amphiboles (forstérite) ou plus (fayalite) :  

|    |       |      |   |       |      |
|----|-------|------|---|-------|------|
| Np | 1,635 | (Fo) | – | 1,827 | (Fa) |
| Ng | 1,670 | (Fo) | – | 1,879 | (Fa) |
- Incolore.
- $\Delta = 0,035 \text{ (Fo)} - 0,052 \text{ (Fa)}$   
teintes vives de la fin 2<sup>ème</sup> ordre au début du 3<sup>ème</sup>
- Biaxe négatif       $2V = (134) - 82 - (44^\circ)$
- $r < v$  (termes Mg) –  $r > v$  (termes Fe).





# La serpentine

- $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  analogue aux chlorites magnésiennes non alumineuses.
- Trois variétés :
- **Antigorite**
  - Monoclinique pseudo-hexagonale : lamelles (001), clivage (001) (comme les chlorites).
  - Aspect maillé caractéristique.
  - La serpentine s.s. pseudomorphose l'olivine, la bastite l'orthopyroxène.
  - Indices 1,55 – 1,57 (comparable aux plagioclases, plus faible que les chlorites).
  - Incolore à vert très pâle.
  - Biréfringence :  $\Delta = 0,004 - 0,006$  gris du 1<sup>er</sup> ordre – pas de teintes anormales comme les chlorites.
  - Np perpendiculaire à (001) : extinction droite, allongement positif.
  - Biaxe + 2V 27-60°  $r > v$
- **Chrysotile** variété fibreuse (asbeste)
  - Propriétés analogues mais  $\Delta = 0,009 - 0,013$  blanc jaune du 1<sup>er</sup> ordre
- **Lizardite** variété à grain très fin, écailleuse.



# Autres produits d'altération de l'olivine

- Iddingsite : mélange d'hématite ( $\pm$  goethite) + argiles (smectites, saponite) + chlorite.
- Produits verdâtres formés d'un agrégat cryptocristallin de chlorites, smectites, talc, brucite, etc. (« bowlingite »).
- Chlorite bien cristallisée.

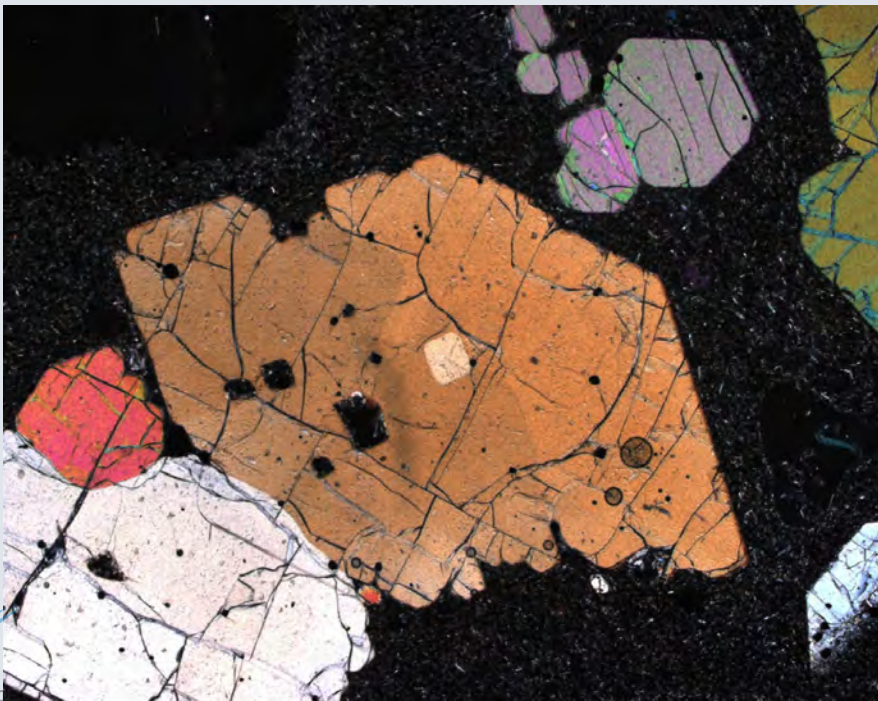
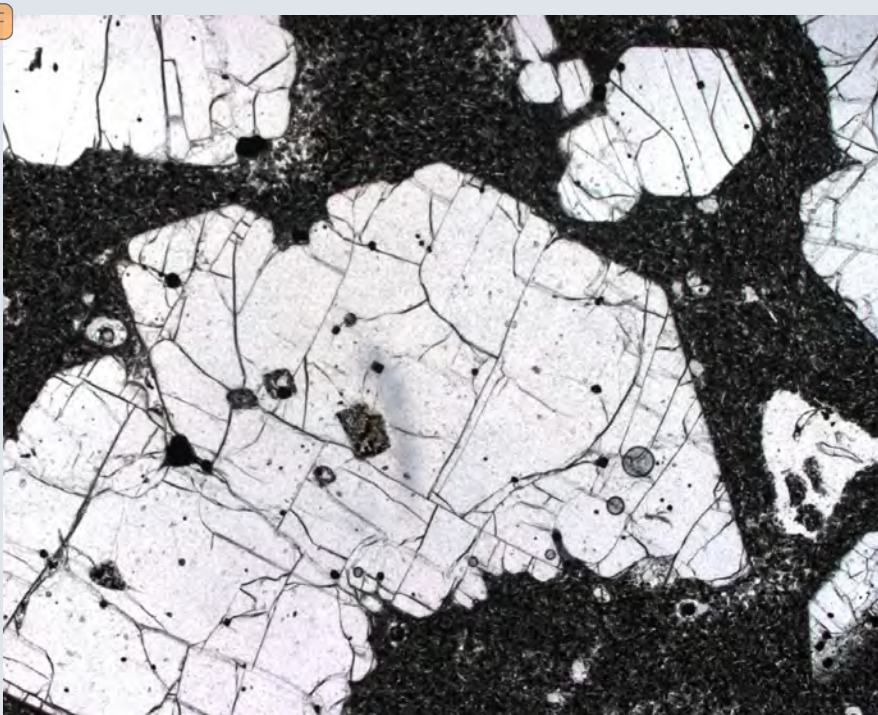




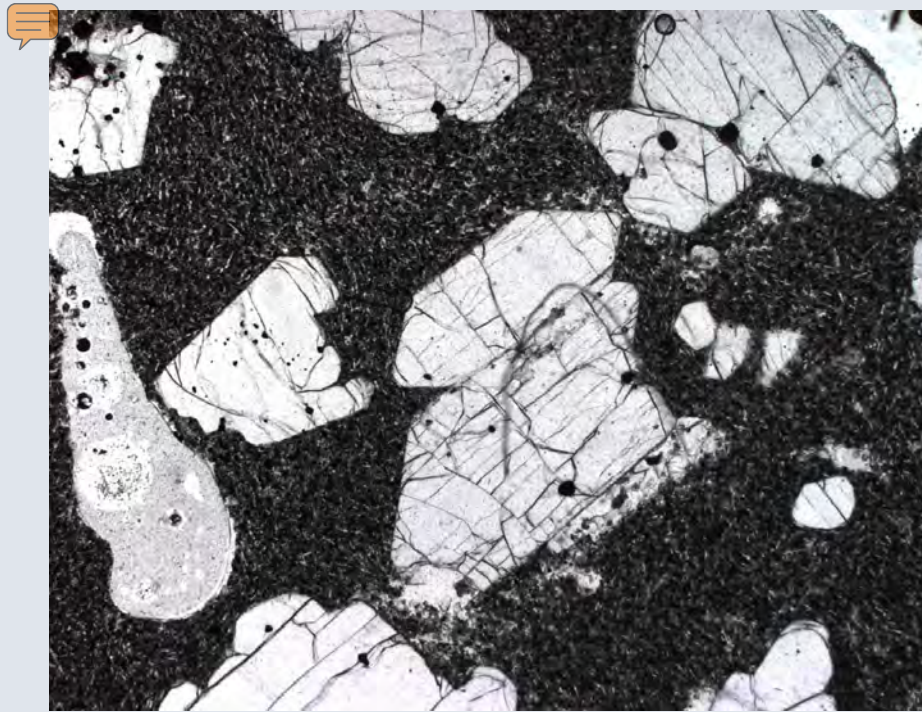
# Olivine

- Cristaux automorphes, en particulier le grand cristal central qui montre une forme en hexagone allongé et ses deux clivages
- Dans un basalte à matrice vitreuse microlithique.
- Les teintes de polarisation du cristal central et de celui au SW sont des blanc jaune du 1<sup>er</sup> ordre : on est proche de l'axe optique.
- Saint-Benoît, La Réunion.

TC



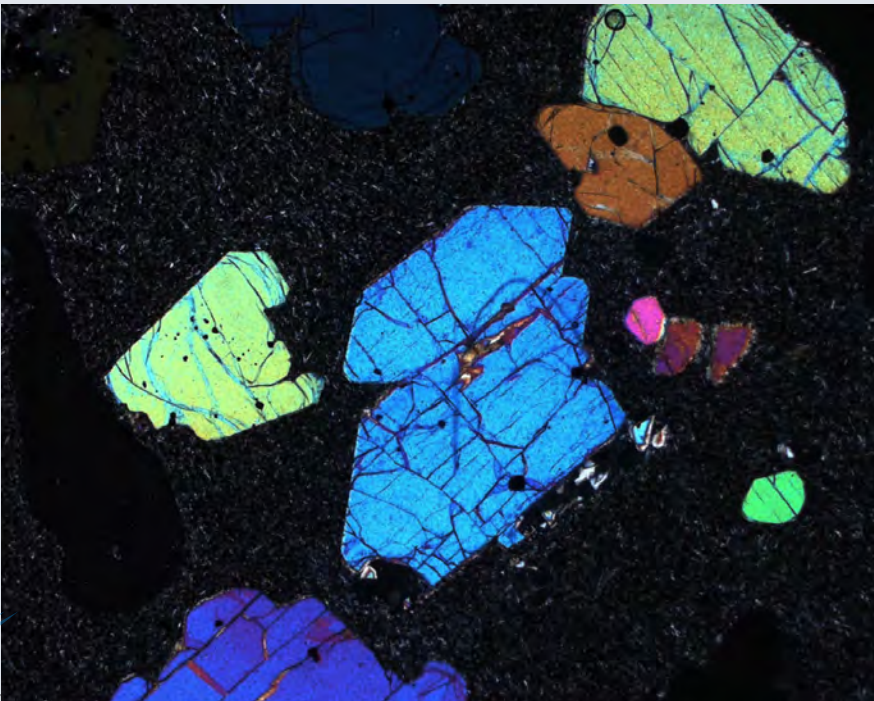




# Olivine

- Cristaux ayant leur formes propres (cristal hexagonal au centre) ou en grains arrondis, montrant le clivage (001).
- Teintes de polarisation vives des 2<sup>ème</sup> – 3<sup>ème</sup> ordre.
- Basalte : matrice vitreuse avec des microlithes de feldspath
- Cantal, France.

TC







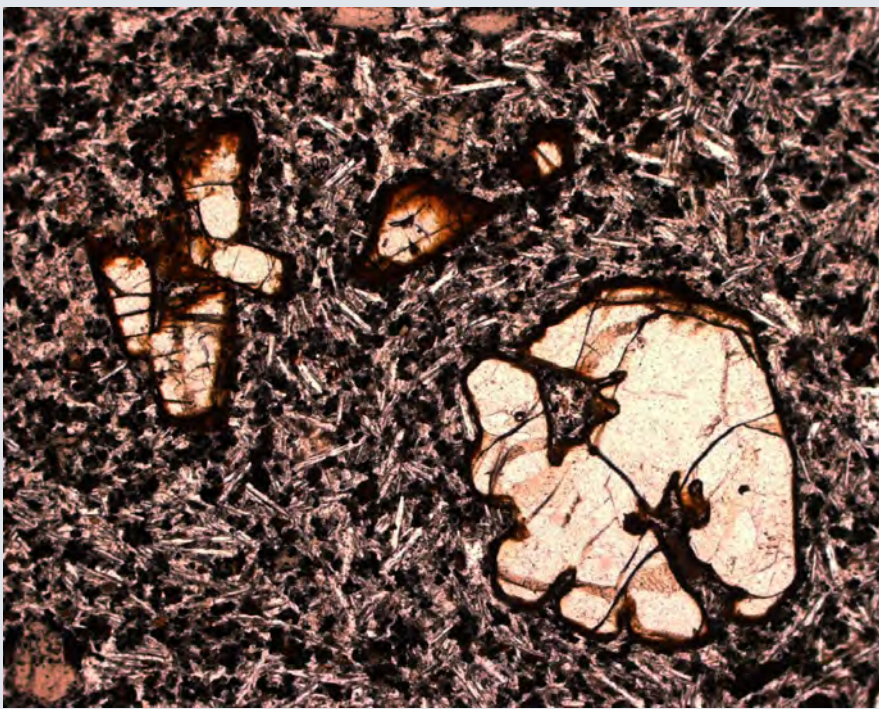
# Olivine iddingsitisée

- L'iddingsite est un mélange d'hématite ( $\pm$  goethite) + argiles.
- Elle forme ici une frange sur les cristaux d'olivine.
- Pléochroïque en brun rouge, orange foncé, parfois jaune orangé.
- Indice fort.
- Biréfringence élevée  
 $\Delta = 0,040 - 0,70$
- Les teintes de polarisation sont masquées par sa couleur propre.
- La roche est un basalte, le minéral gris entre les cristaux d'olivine est un pyroxène.
- Velay, France.

AC

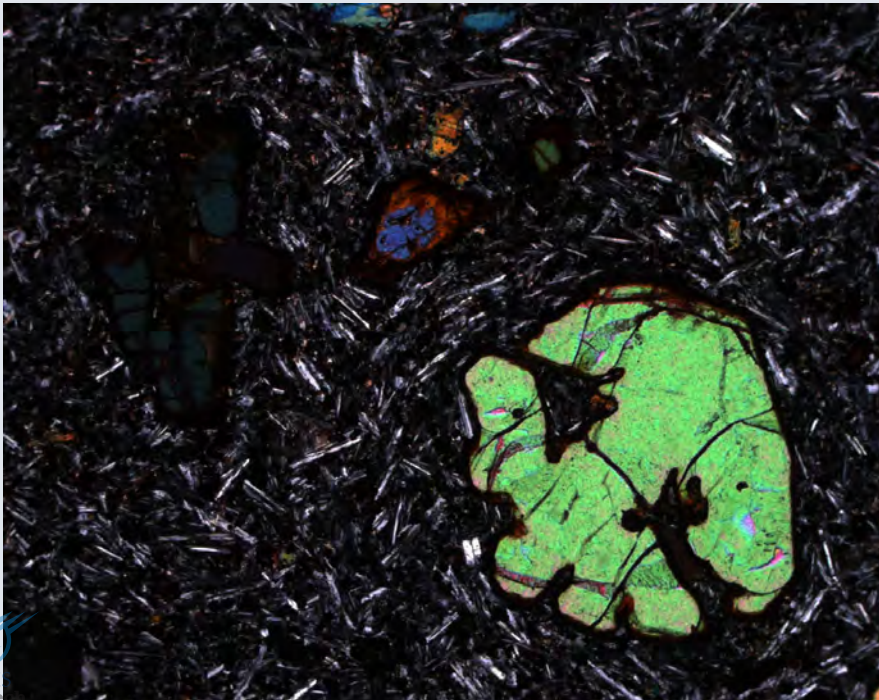






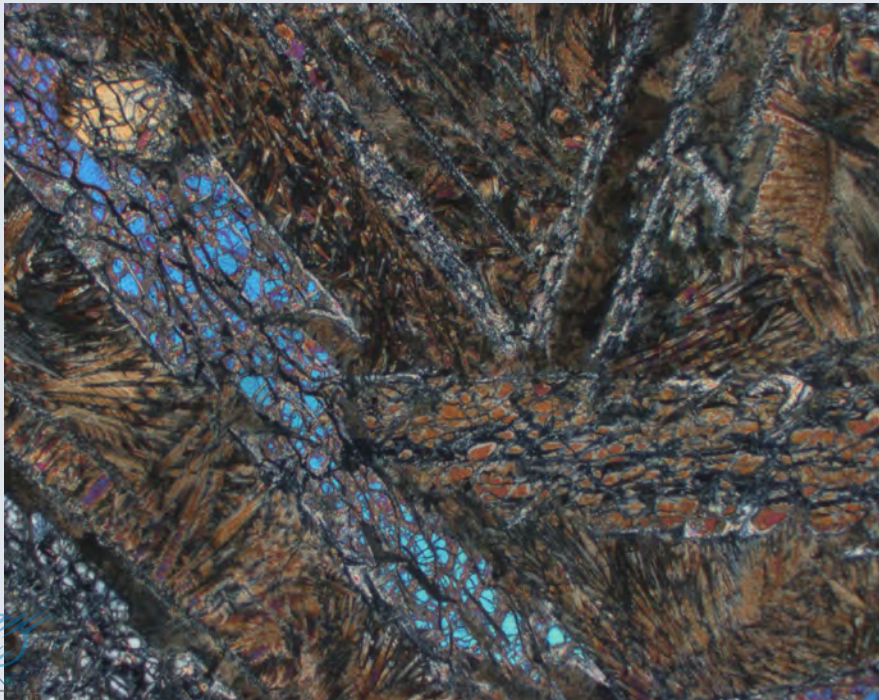
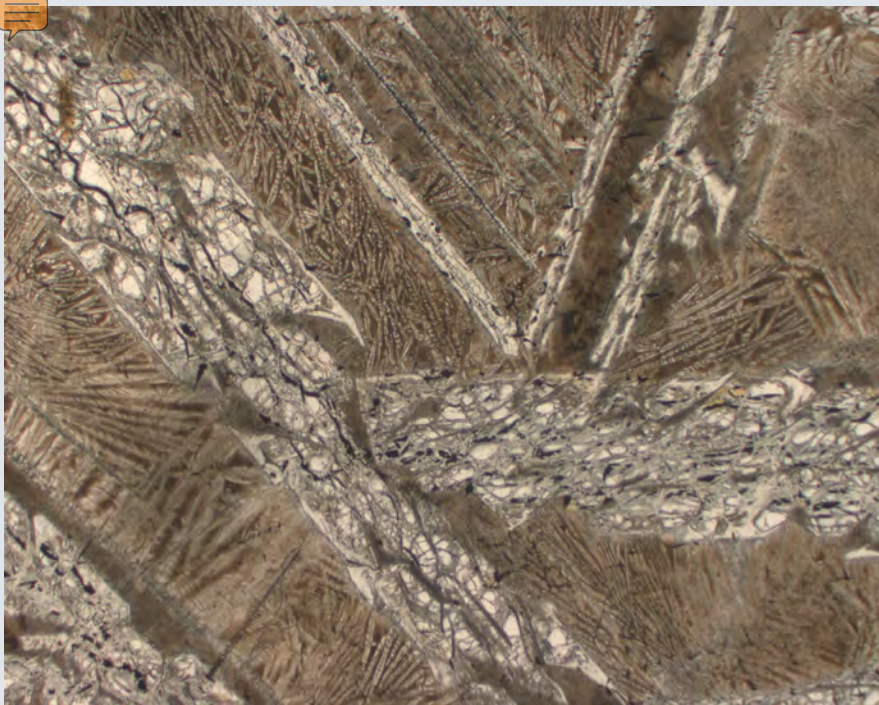
## Olivine

- Phénocristaux d'olivine montrant des golfes de corrosion et une range d'altération.
- Basalte microlithique.
- Saint-Thibéry, Hérault, France.



AC





## Olivine texture en spinifex

- La texture en spinifex est formée de grands cristaux allongés (en lames, plaques, etc.) entrecroisés.
- Cette texture est caractéristique de laves de péridotites confinées au Précambrien, les komatiites.
- Australie occidentale

R





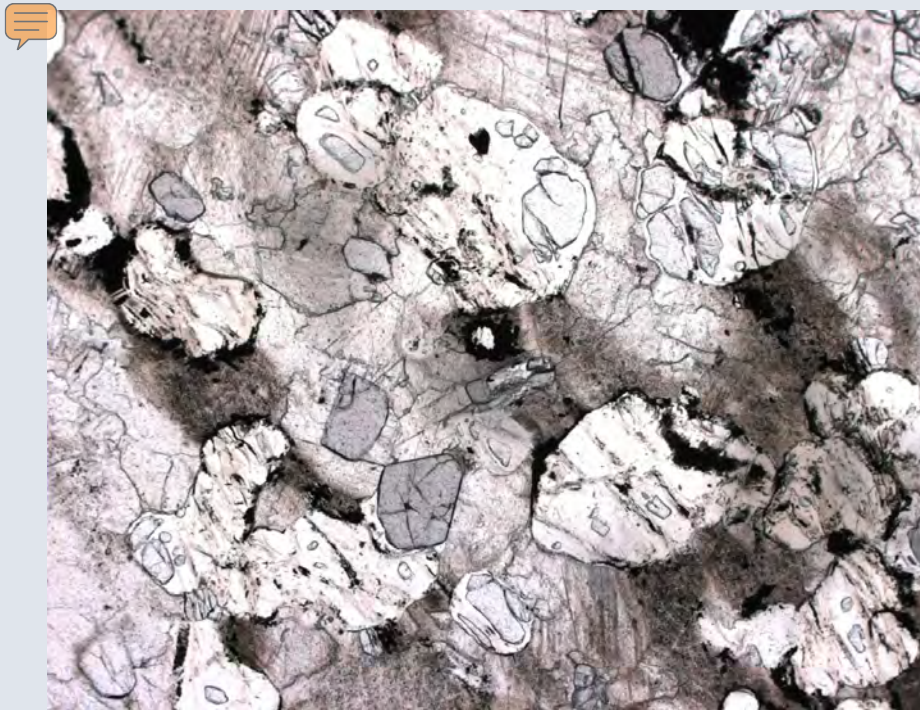
## Olivine serpentinisée dans un marbre magnésien

- Le fond de la roche est constituée de cristaux de carbonate (qui polarise dans des beiges d'ordres supérieurs).
- L'olivine forme des grains arrondis incolores, à fort relief, polarisant dans des teintes vives.
- Cette olivine s'altère en serpentine : incolore, indice faible, teintes de polarisation dans les gris du 1<sup>er</sup> ordre, texture maillée.
- Le minéral dans le coin NE à fort relief, incolore, chagriné, isotrope est du spinelle ( $\text{MgAlO}_4$ ). 
- La Salvetat-sur-Agout, Hérault, France.

AC





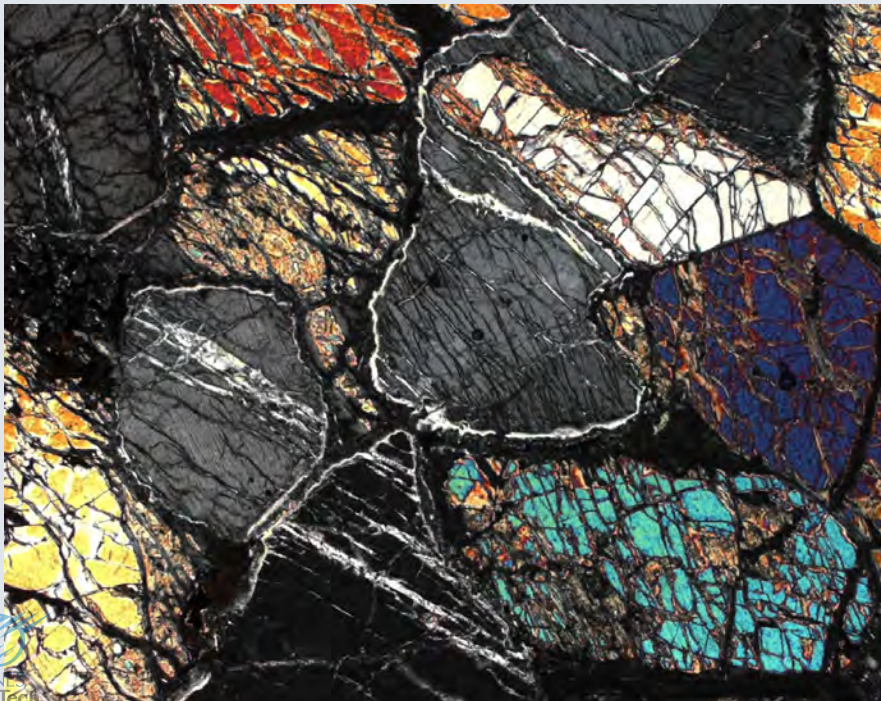


## Olivine serpentinisée et spinelle dans un marbre magnésien

- Roche analogue à la précédente mais la serpentinisation est plus intense : l'olivine ne subsiste plus qu'en îlots dans la trame de serpentine.
- Les grains de spinelle sont plus abondants.
- La Salvetat-sur-Agout, Hérault, France.

AC





# Olivine et orthopyroxènes serpentinisés

- La roche est une harzburgite, péridotite formée d'olivine (incolore, limpide, teintes de polarisation vives) et d'orthopyroxène (gris, clivages, teintes de polarisation dans les gris foncés).
- Ces deux minéraux sont altérés en serpentine qui progresse à la périphérie des cristaux.
- La serpentine qui se développe sur l'olivine apparaît brun vert en LN, presque isotrope en LP.
- Celle qui se développe sur l'orthopyroxène est plus claire, plus limpide et montre des teintes de polarisation dans les blancs.

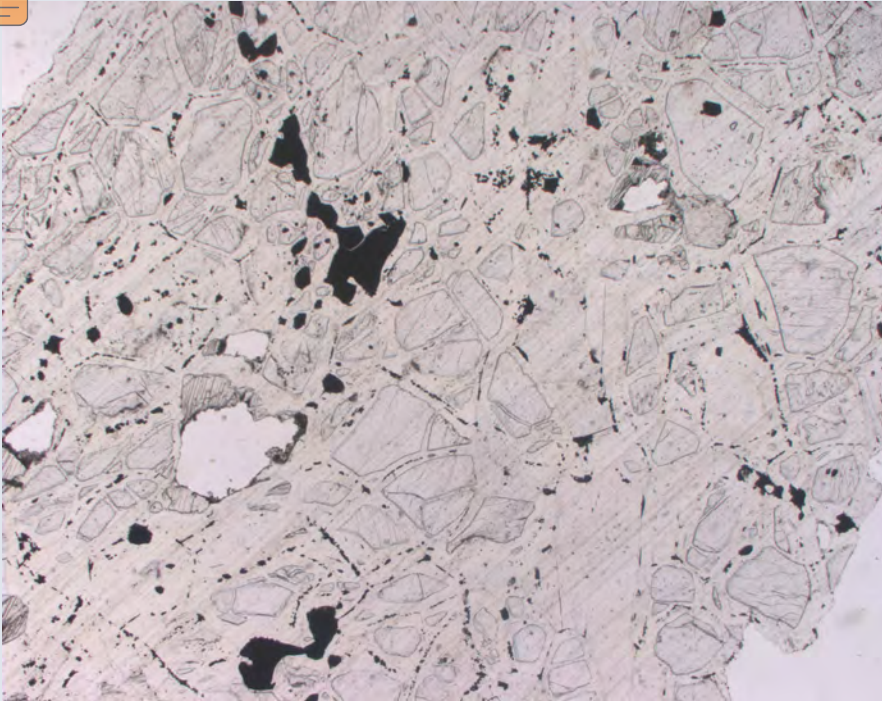
C





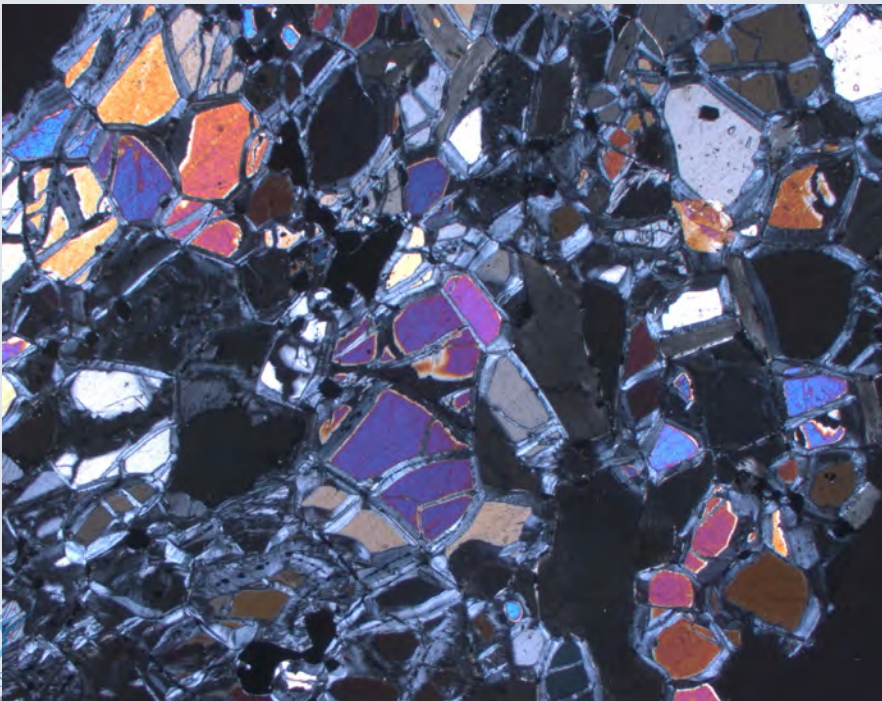


# Olivine serpentinisée



- La roche est une dunite, péridotite formée essentiellement d'olivine.
- L'olivine est très largement remplacée par de la serpentine et ne subsiste plus qu'en plages résiduelles.
- Quelques orthopyroxènes apparaissent gris, et se reconnaissent à leurs clivages (ils sont plus ou moins arrachés).
- Les minéraux opaques sont de la chromite (groupe des spinelles).

AC

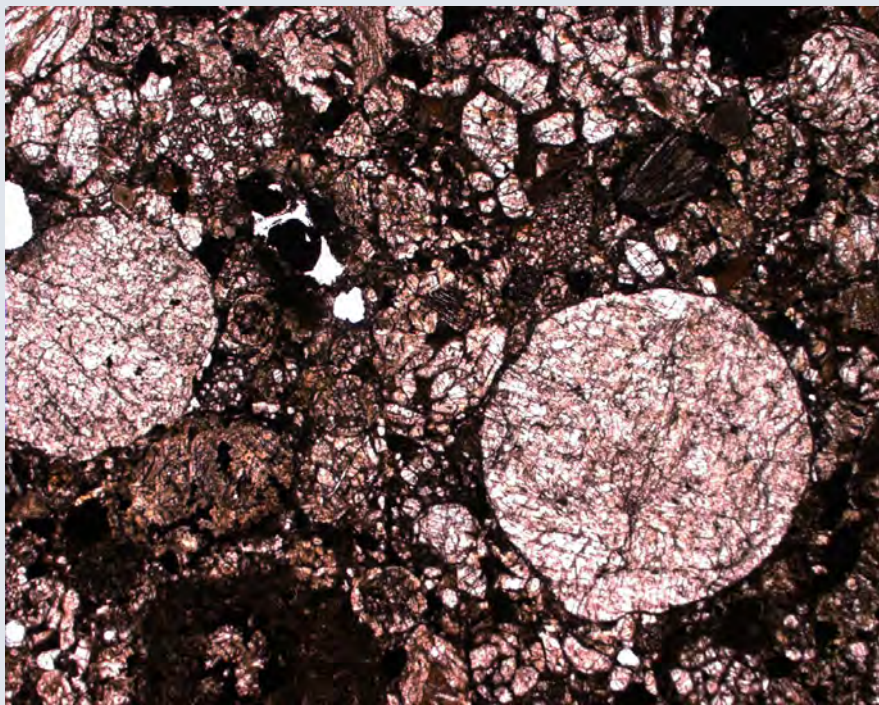




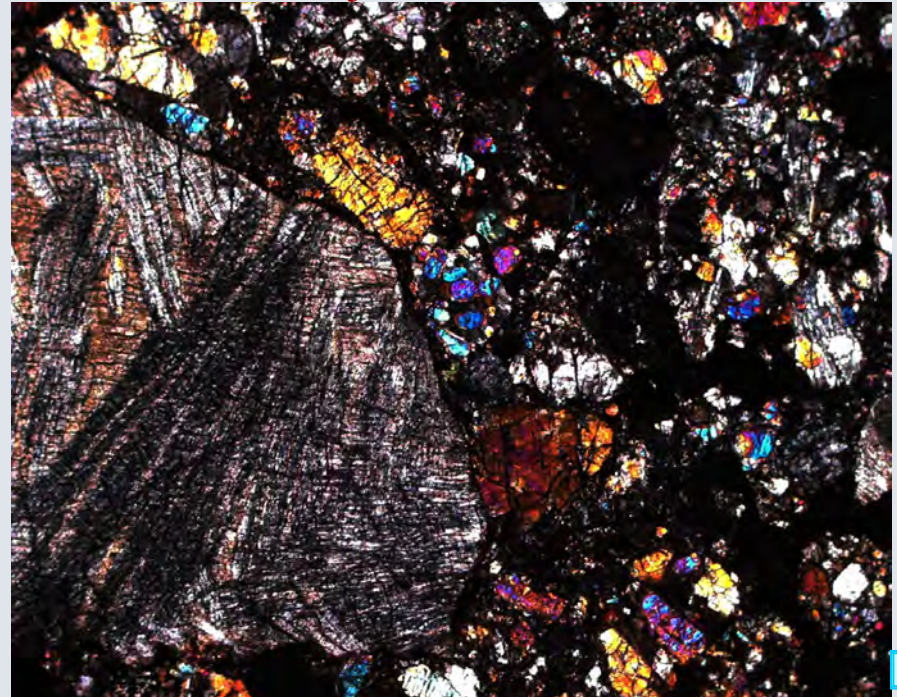
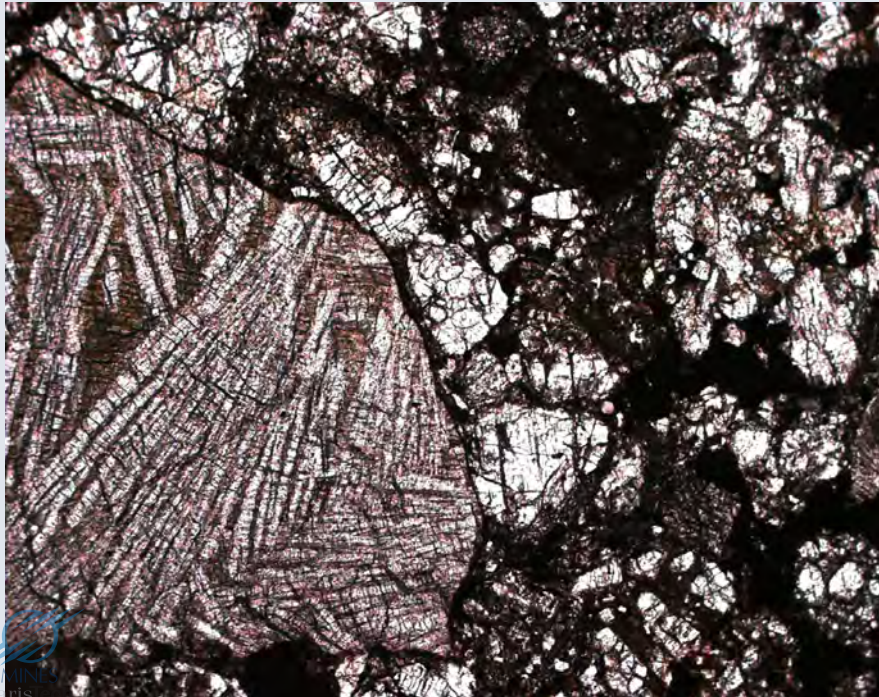


# Chondrite

Les chondrites sont le type le plus commun de météorites. Elles se caractérisent par la présence de chondrules objets sphériques composés d'orthopyroxène, d'olivine ou des deux. Ici les chondrules sont formés d'orthopyroxène en cristaux radiés. La matrice est formée d'olivine, d'orthopyroxènes et de minéraux opaques (essentiellement alliages Fe-Ni).

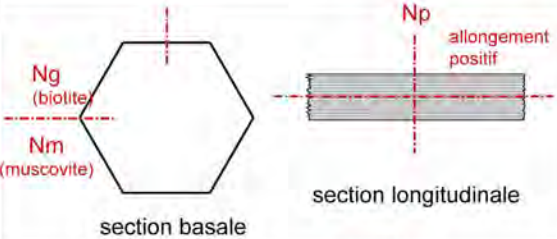
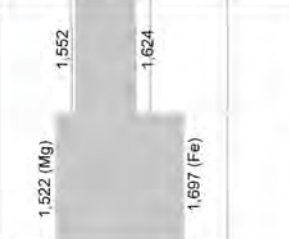
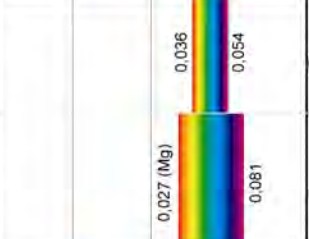
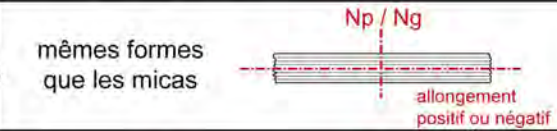
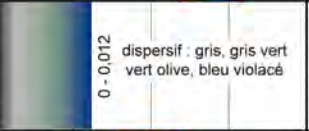
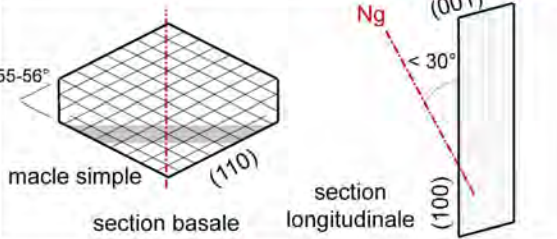
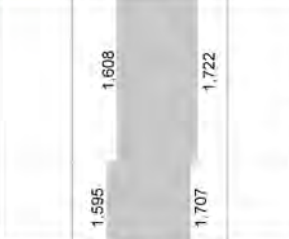
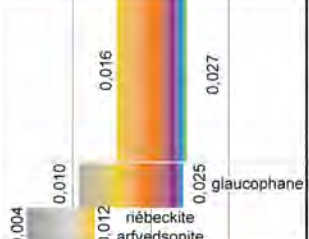
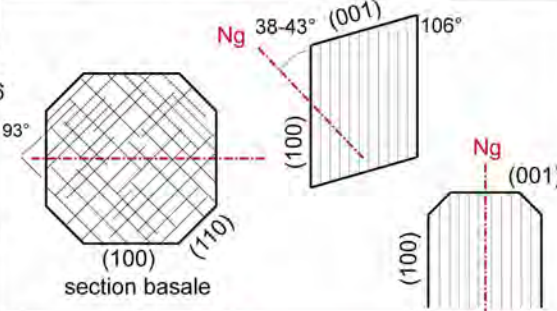
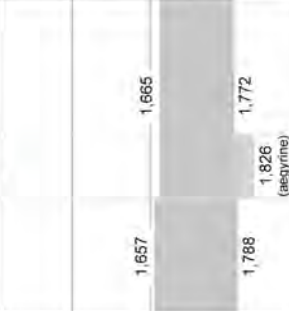
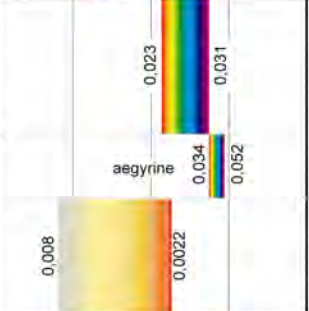
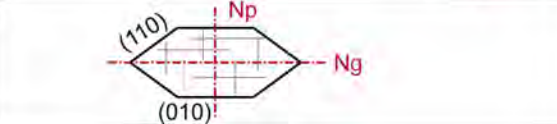


Météorite du Hedjaz, Arabie Saoudite







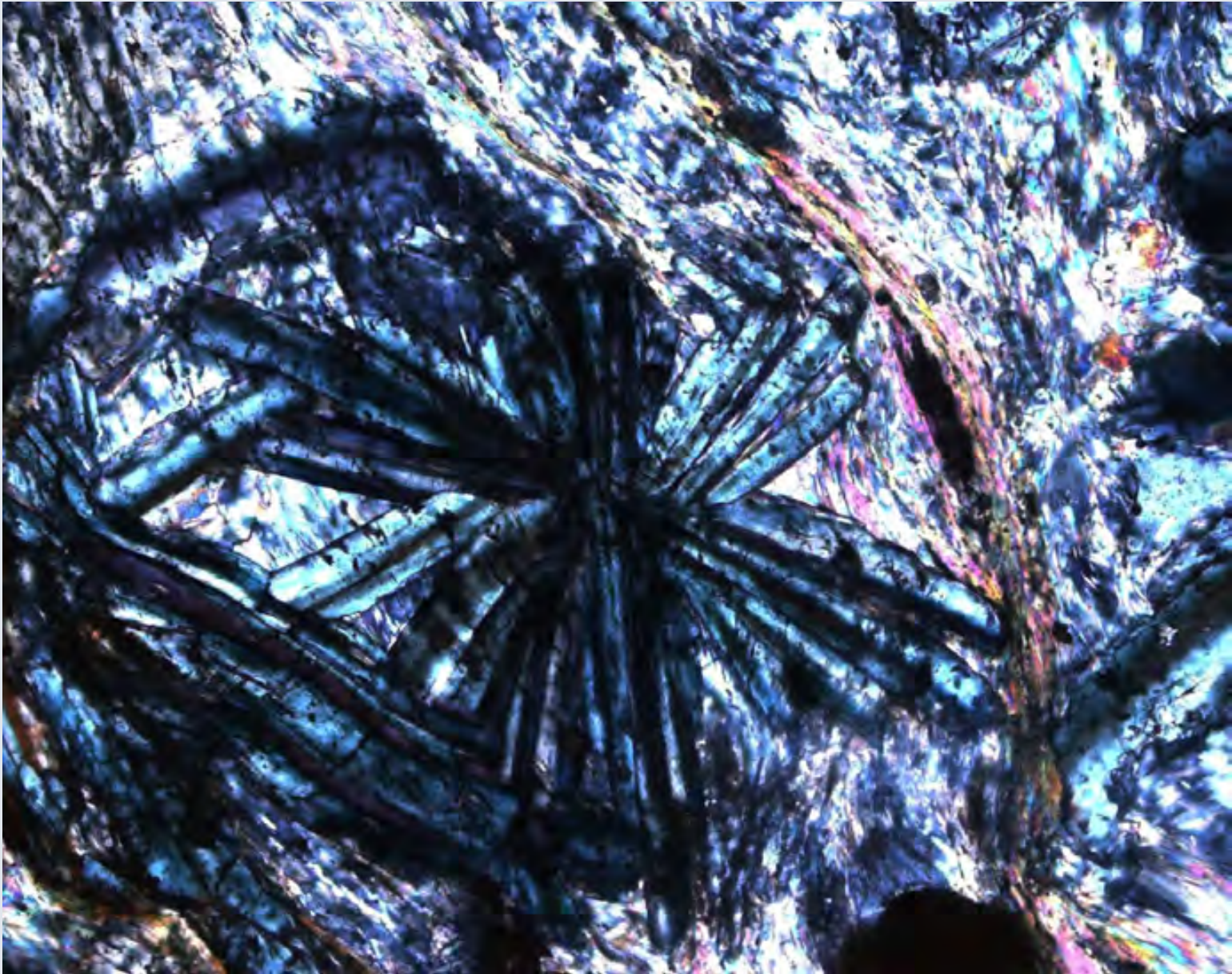
| Nom<br>formule chimique                                                                                                                                                                                     | symétrie               | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice                                                                            | Indice<br>baume 1,54<br>quartz 1,55<br>tourmaline 1,65<br>grenat 1,75                 | Couleur<br>Altérations                                                                                                  | Biréfringence<br>fer ordre<br>gris<br>blanc<br>0,009<br>tenite<br>sensibile<br>0,018<br>2e - 3e<br>ordres<br>teintes<br>vives<br>0,054 | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Micas<br>Muscovite<br>$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})_2$                                                                                                                                   | mnocl<br>pseudo<br>hex |  <p>section basale</p> <p>section longitudinale</p>            |    | incolore<br>(vert pâle :<br>phengites)                                                                                  |                                                     | B-<br>(2V=35-50°)          |
| Biotite<br>$\text{K}(\text{Fe},\text{Mg},\text{Ti})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})_2$<br>$\text{Si}(\text{Fe},\text{Mg}) = \text{Al}^{\text{IV}}\text{Al}^{\text{VI}}$                                |                        |                                                                                                                                                 |                                                                                       | brun rouge<br>brun foncé<br>verdâtre<br>incolore<br>(Mg)                                                                |                                                                                                                                        | B-<br>(2V=0-35°)           |
| Chlorites<br>$(\text{Fe},\text{Mg})_{6-x}\text{Al}_{2x}\text{Si}_{4-x}\text{O}_{10}(\text{OH})_8$                                                                                                           | mnocl                  | mêmes formes<br>que les micas<br> <p>section longitudinale</p> |    | vert<br>incolore                                                                                                        |                                                     | B+/-                       |
| Amphiboles<br>$\text{A}_{0-1}\text{X}_2\text{Y}_5\text{Z}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$<br>X= Ca amphiboles calciques<br>non Al : trémolite - actinote<br>Al : hornblendes<br><br>X = Na amphiboles sodiques | mnocl                  |  <p>section basale</p> <p>section longitudinale</p>            |    | incolore<br>(Mg)<br>vert (Fe)<br>brun rouge<br>brun jaune<br>(Fe <sup>3+</sup> , Ti)<br>bleu<br>bleu vert<br>vert foncé |                                                     | B-                         |
| Pyroxènes<br>Clinopyroxènes<br>$(\text{Ca},\text{Mg},\text{Fe}^{2+}(\text{Na},\text{Al},\text{Fe}^{3+}))_2\text{Si}_2\text{O}_6$                                                                            | lmnocl                 |  <p>section basale</p>                                        |   | incolore<br>(Mg)<br>verdâtre<br>(Fe)<br>brun violacé<br>pôle<br>(Ti)                                                    |                                                    | B+                         |
| Orthopyroxènes<br>$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_2\text{Si}_2\text{O}_6$                                                                                                                                       | orthor                 |                                                                                                                                                 |                                                                                       | incolore<br>(brun pâle<br>vert pâle<br>rosé)                                                                            |                                                                                                                                        | B+/-                       |
| Olivines<br>$(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$                                                                                                                                                      | orthor                 |  <p>section longitudinale</p>                                |  | incolore<br>serpentine<br>iddingsite                                                                                    |                                                   | B+/-                       |







## 4 - minéraux alumineux





# 4- les minéraux alumineux



## *Sommaire*

- **Andalousite** ☐
  - **Faciès chiastolite** ☐
  - **Faciès poecilitique** ☐
- **Disthène (Kyanite)** ☐
- **Sillimanite** ☐
  - **Faciès fibrolite** ☐
  - **Pseudomorphose d'andalousite** ☐
- **Grenats alumineux** ☐
  - **Kelyphite** ☐
- **Staurotide** ☐
- **Chloritoïde** ☐
- **Magnésiocarpholite** ☐
- **Cordiérite** ☐
- **Saphirine** ☐
- **Topaze** ☐
- **Béryl** ☐
- **Corindon** ☐
- **Diaspore** ☐
- **Pyrophyllite** ☐



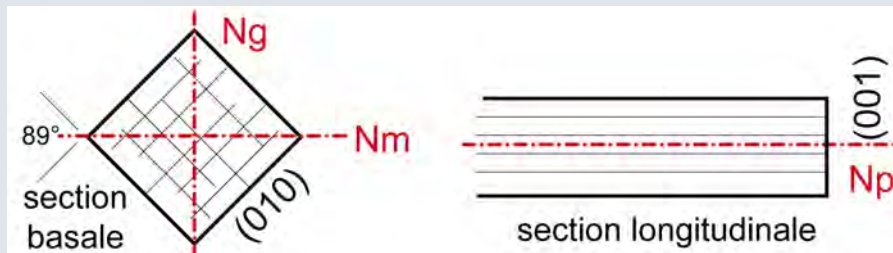
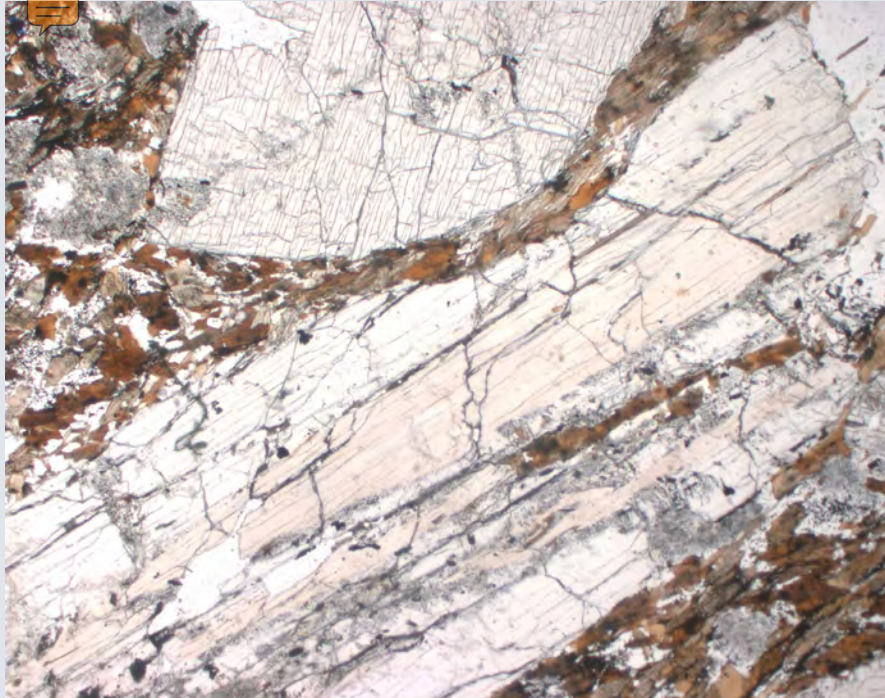
# Silicates alumineux

## communs dans les roches métamorphiques

- andalousite  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  forme de basse température, basse pression
- disthène  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  forme de basse température, haute pression
- sillimanite  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$  forme de haute température
- grenat  $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Ca})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- staurotide  $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Zn})_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- chloritoïde  $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$
- magnésiocarpholite  $(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$
- cordiérite  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$
- tourmaline  $\text{Na}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}, \text{Li})_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4(\text{BO}_3)_3$
- muscovite  $\text{KAl}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$







## Andalousite

- Orthorhombique pseudoquadratique.
- Souvent automorphe dans le métamorphisme de contact : prismes droits à base carrée.
- Clivage (110)
- Incolore ; parfois rosé dans l'allongement du prisme par substitution de fer ferrique à l'aluminium (ici cœur rose, minéral zoné). Dans ce cas, pléochroïsme de rose à incolore.
- Np 1,629 – 1,649  
Ng 1,638 – 1,660
- Indices assez forts, de l'ordre de ceux de la tourmaline et des amphiboles.
- Glomel, Côtes d'Armor, France.

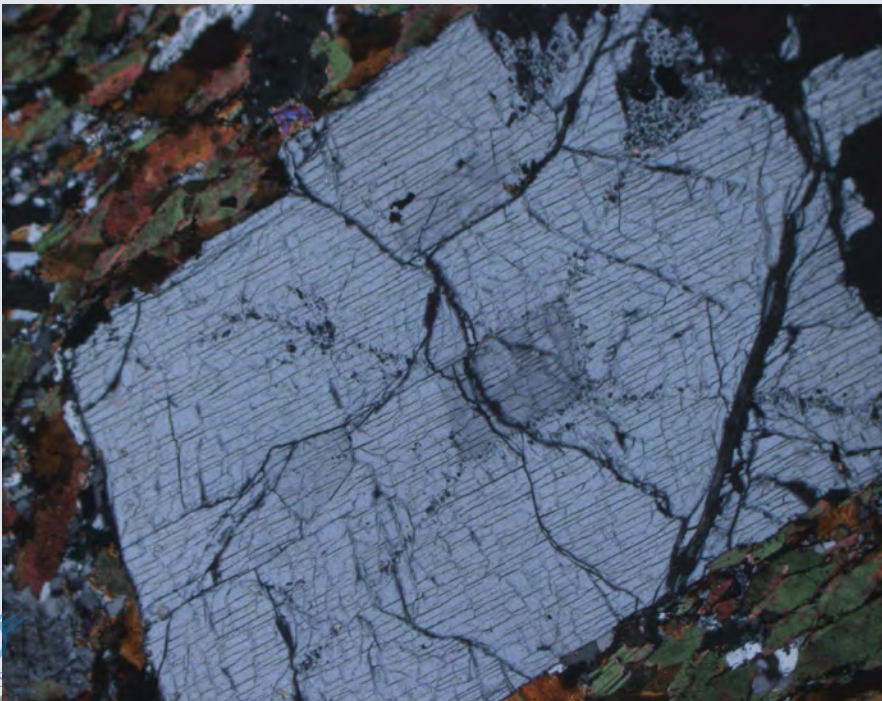
AC







# Andalousite



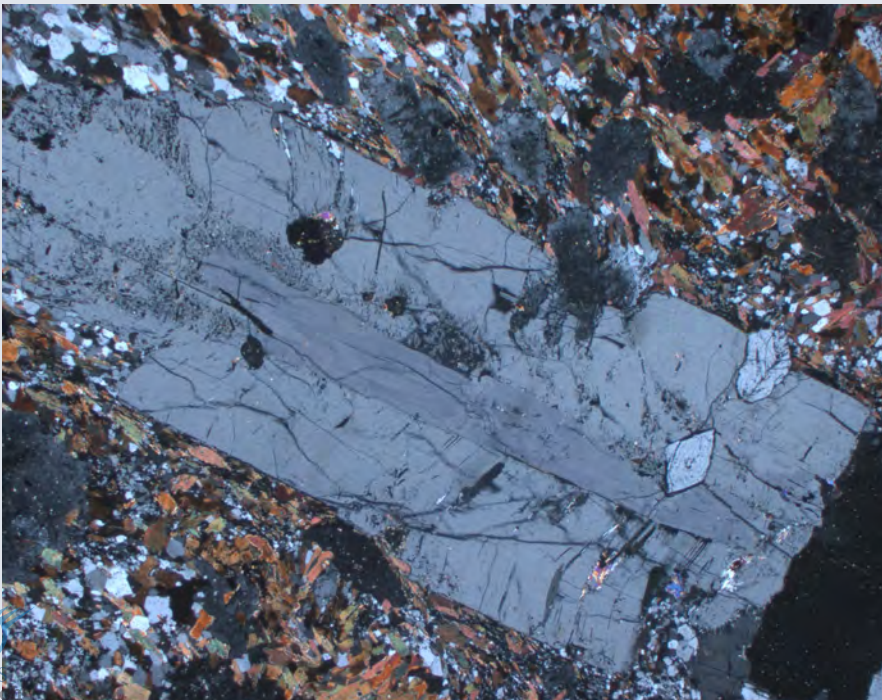
- Section basale montrant les deux clivages pratiquement orthogonaux
- Zoné avec un cœur rosé
- Inclusions de matière carbonneuse dans les diagonales du carré.
- Biréfrinence  $\Delta = 0,009 - 0,011$ 
  - Polarise dans les blanc, gris, jaunâtre de la fin du 1<sup>er</sup> ordre
- Biaxe négatif
- $2V_x \quad 73-86^\circ$
- $r < v$  faible
- Glomel, Côtes d'Armor, France.

AC





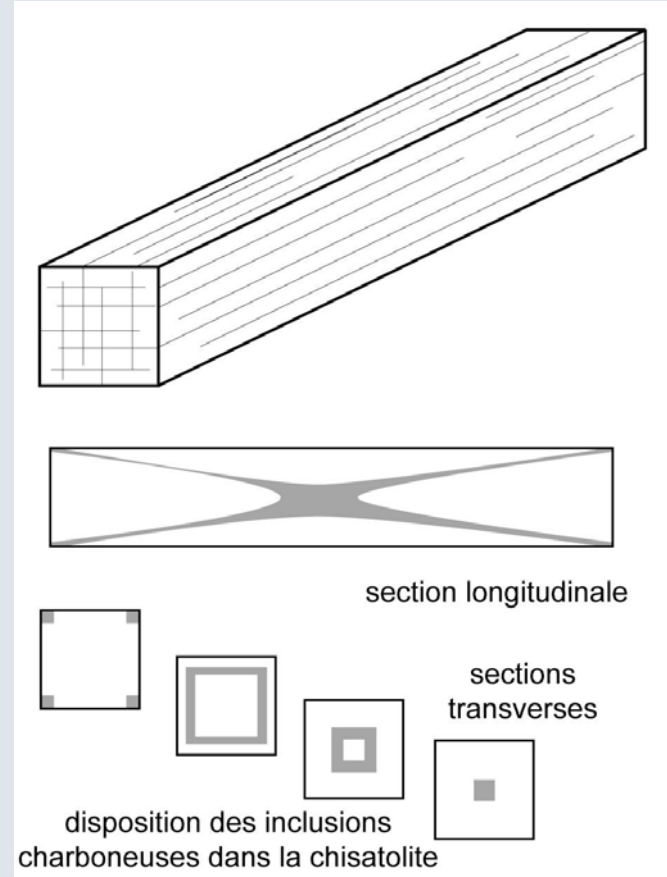
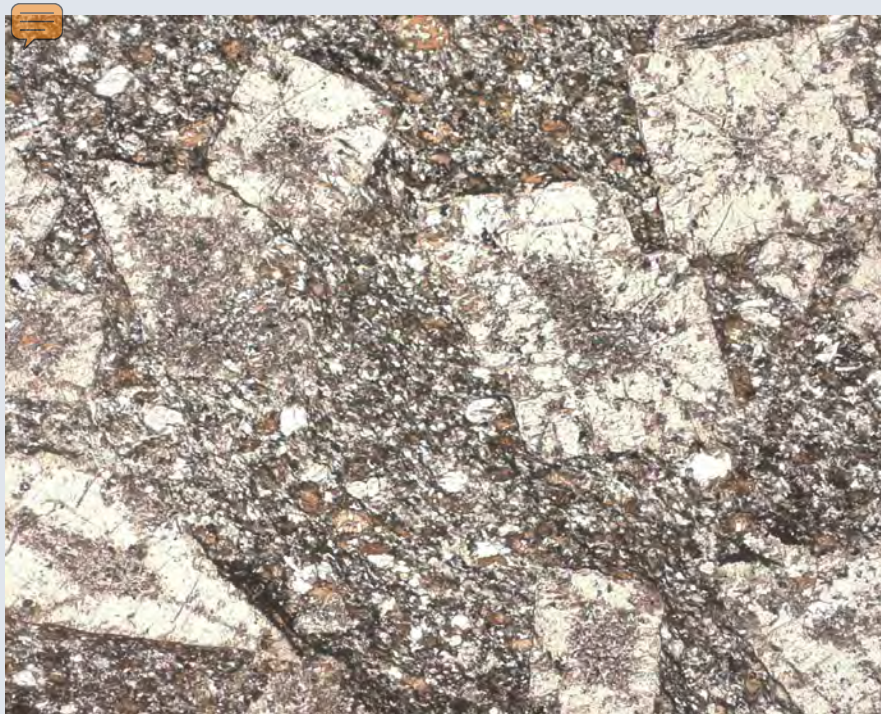
# Andalousite



- Section longitudinale prismatique montrant un seul clivage.
- Zoné avec un cœur rose.
- L'extinction est droite sur le prisme/le clivage.
- Allongement négatif.
- Même échantillon que les photos précédentes : cornéenne de métamorphisme de contact. Le fond de la roche est formé de quartz, biotite, plagioclase (non maclé, en nodules riches en inclusions opaques).
- Glomel, Côtes d'Armor, France.

AC





## Andalousite faciès chiastolite

Lors de leur croissance, les cristaux d'andalousite englobent des inclusions charbonneuses disposées selon les arêtes du prisme, dessinant une croix noire opaque : croix sur les sections longitudinales (photo du bas), carrés sur les sections basales (photo du haut).

Diélette, Manche, France

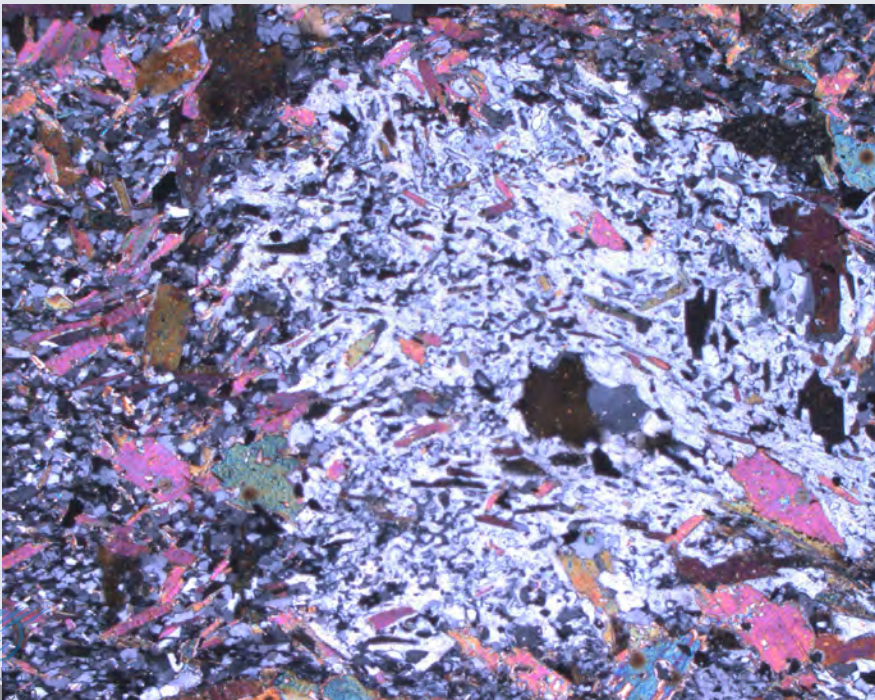
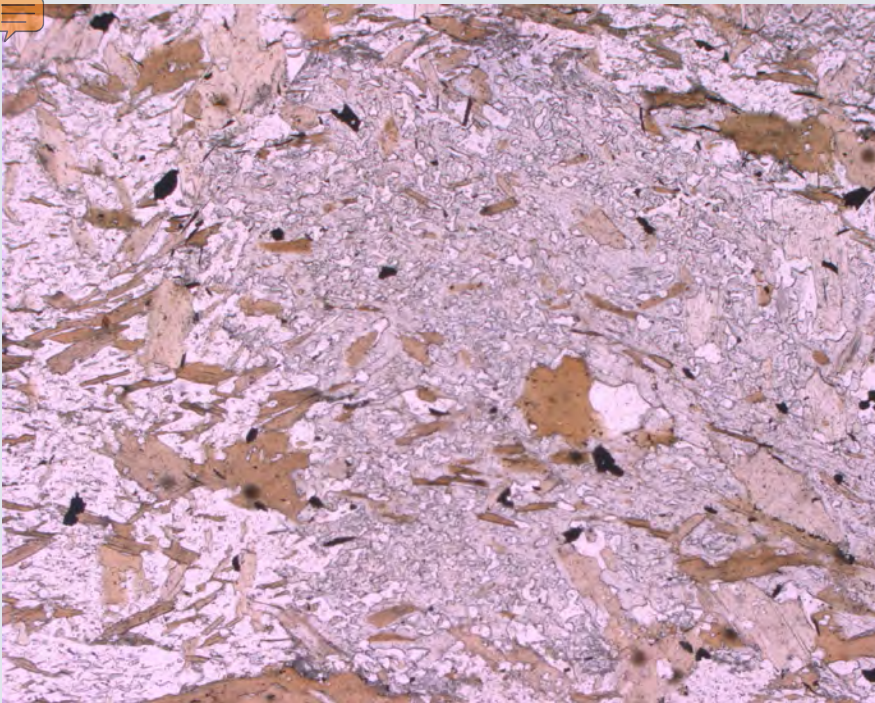
AC







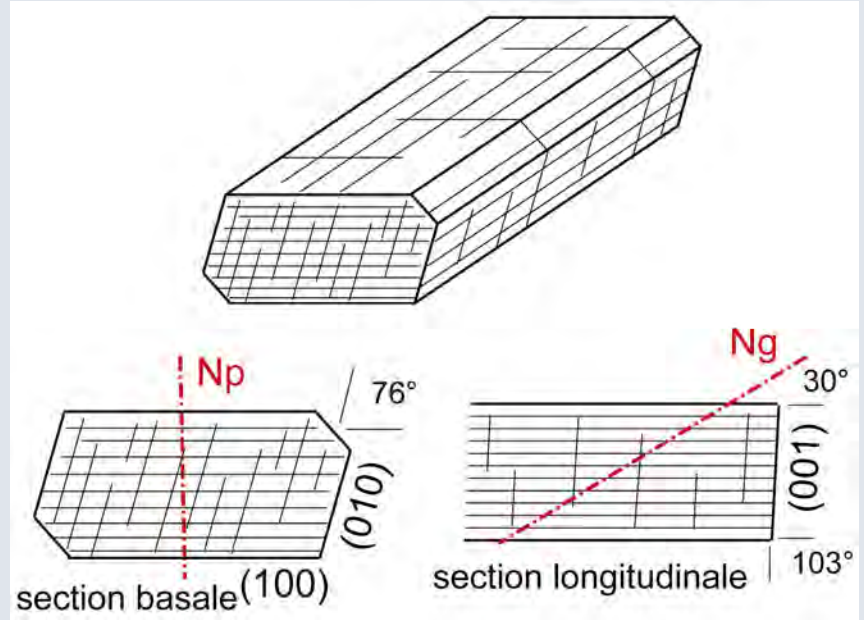
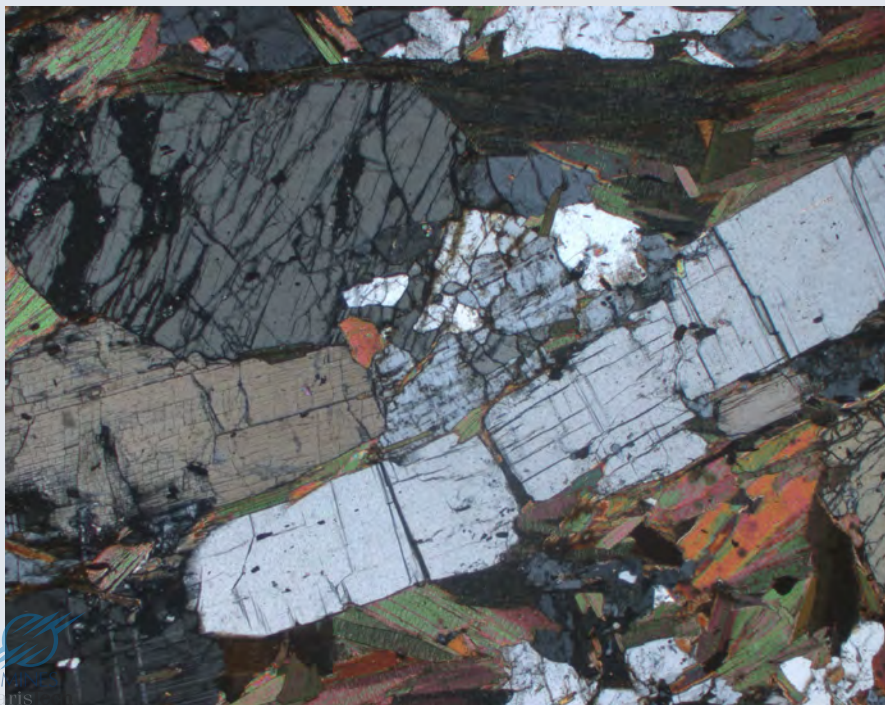
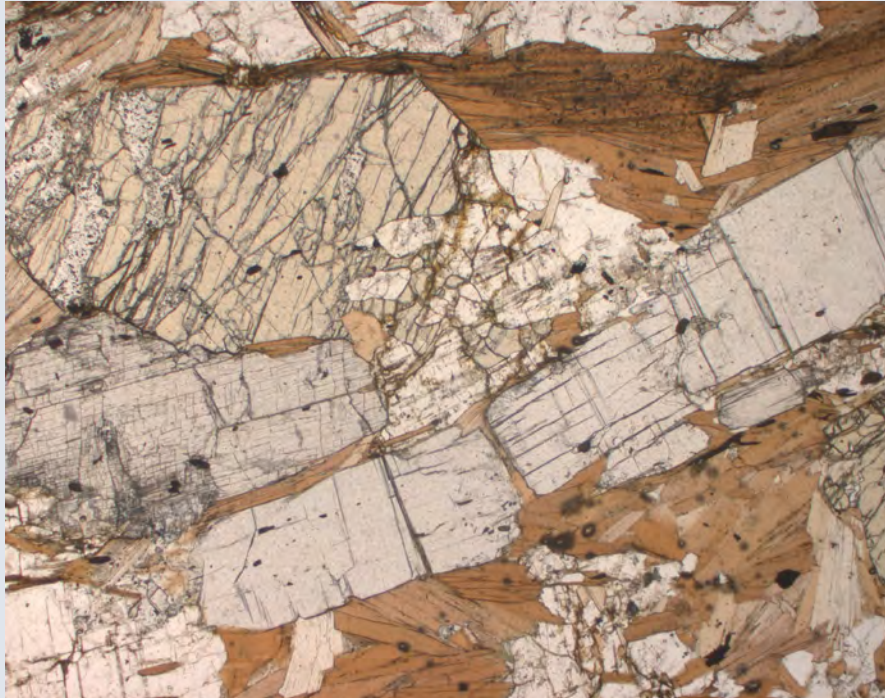
# Andalousite



- Dans le métamorphisme régional, l'andalousite se présente en nodules poecilolitiques (englobant lors de sa croissance les minéraux préexistants, ce qui lui donne l'aspect d'une éponge).
- Elle se reconnaît à son relief, ses clivages et ses teintes de polarisation.
- La roche est un micaschiste à biotite – andalousite – muscovite.
- Saint-Pons, Hérault, France.

C





## Disthène

- Triclinique. Prismes dont la section basale est un hexagone ou un losange aplati.
- Ces prismes sont flexibles (et montrent une extinction roulante).
- Clivages (100) parfait, (010) bon, (001) plan de séparation. Sections basales à deux clivages à 76° (centre gauche), sections longitudinales avec un bon clivage et des cassures transverses (diagonale de la photo).
- Le minéral jaune dans le coin NW est une staurotide
- Le Canadel, Var, France

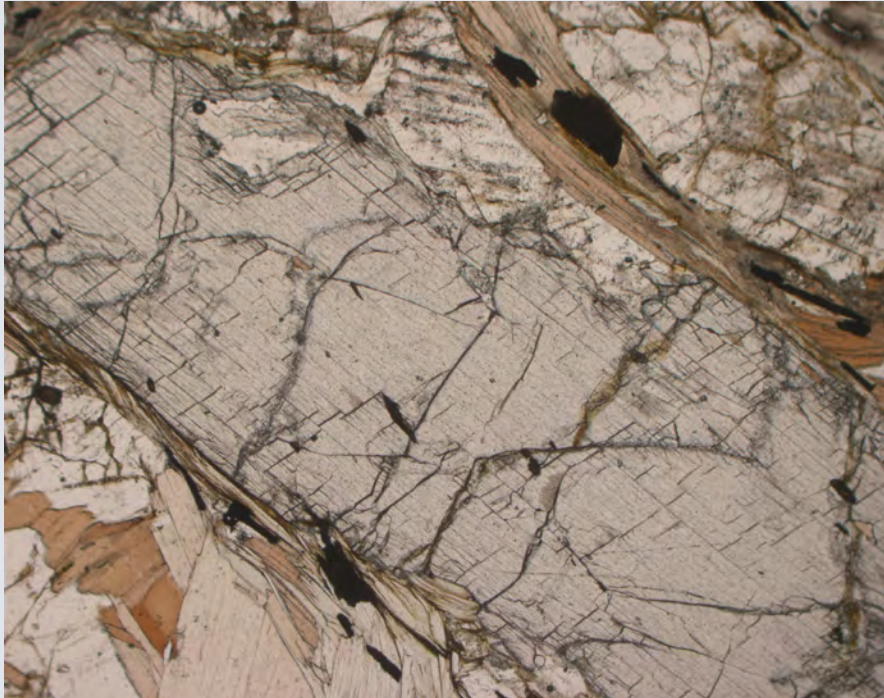
AC







# Disthène

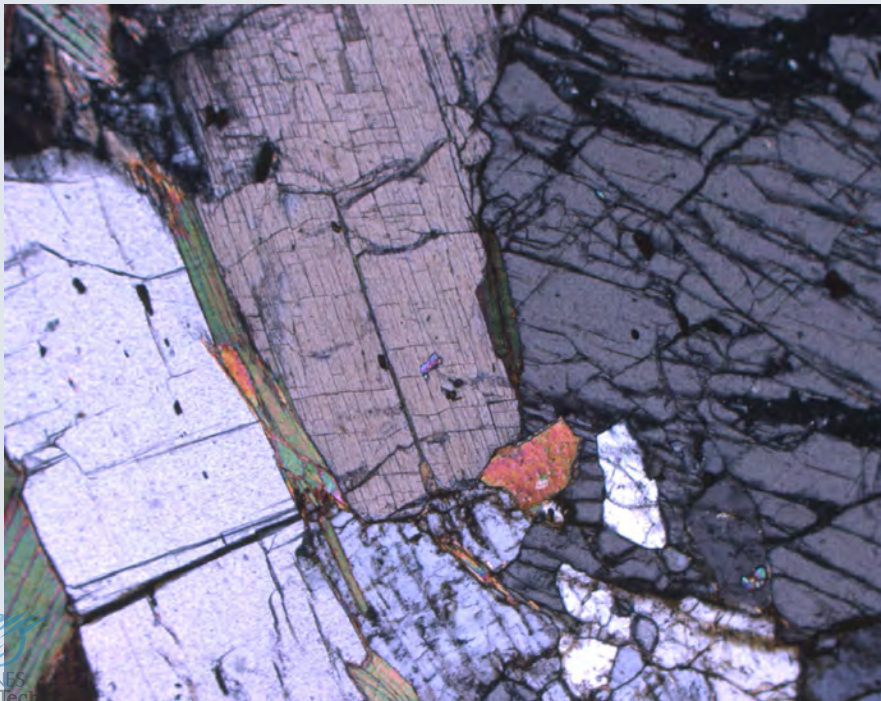
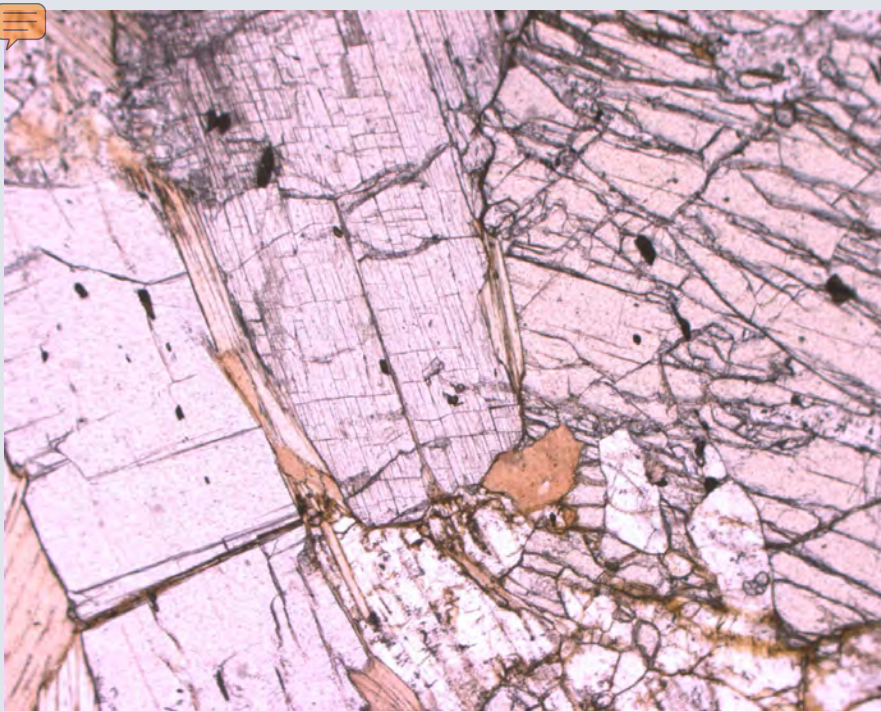


- Section basale montrant deux clivages à  $76^\circ$ .
- $N_p$  1,712 – 1,718
- $N_g$  1,727 – 1,734  
Indices assez forts de l'ordre de ceux des pyroxènes.
- Incolore (très rarement bleuté).
- Biréfringence  $\Delta = 0,012 - 0,016$   
Blanc, jaunâtre, orangé de la fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Angle d'extinction des sections allongées :  $30^\circ$ .
- Allongement positif.
- Macles lamellaire (001) commune ; macle répétée sur la plan (001).
- Biaxe négatif.
- $2V_x$   $82 - 83^\circ$
- $r > v$  très faible
- Le Canadel, Var, France.

AC







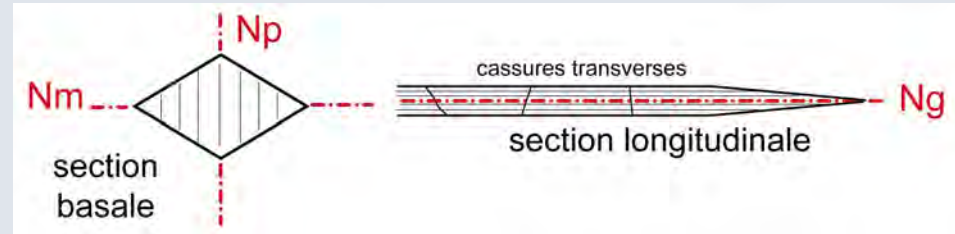
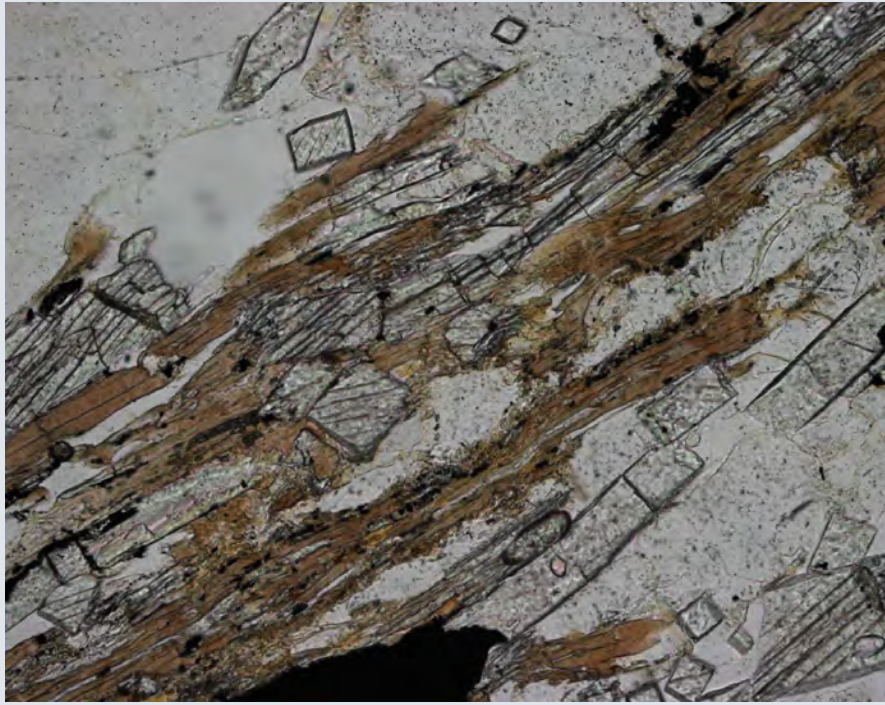
# Disthène

## [staurotide] □

- La partie gauche de la photo montre deux sections de disthène : l'une basale, à deux clivages, l'autre longitudinale avec un bon clivage et des cassures transverses.
- La partie droite de la photo est occupée par un cristal de staurotide, reconnaissable à sa couleur jaunâtre, l'absence de clivage, son indice fort, ses teintes de polarisation du 1<sup>er</sup> ordre.
- Biotite, quartz et plagioclase (plages incolores au centre bas).
- Chartreuse de la Vergne, Var, France.

AC





## Sillimanite faciès prismatique

- Orthorhombique.
- Prisme droit à base losange : sections basales losangiques avec un bon clivage dans la diagonale du losange, sections longitudinales en baguettes très longues, montrant un seul clivage ; la sillimanite contrairement au disthène, n'est pas un minéral flexible : le prisme montre des cassures transverses.
- Trilla, Pyrénées orientales, France.

AC

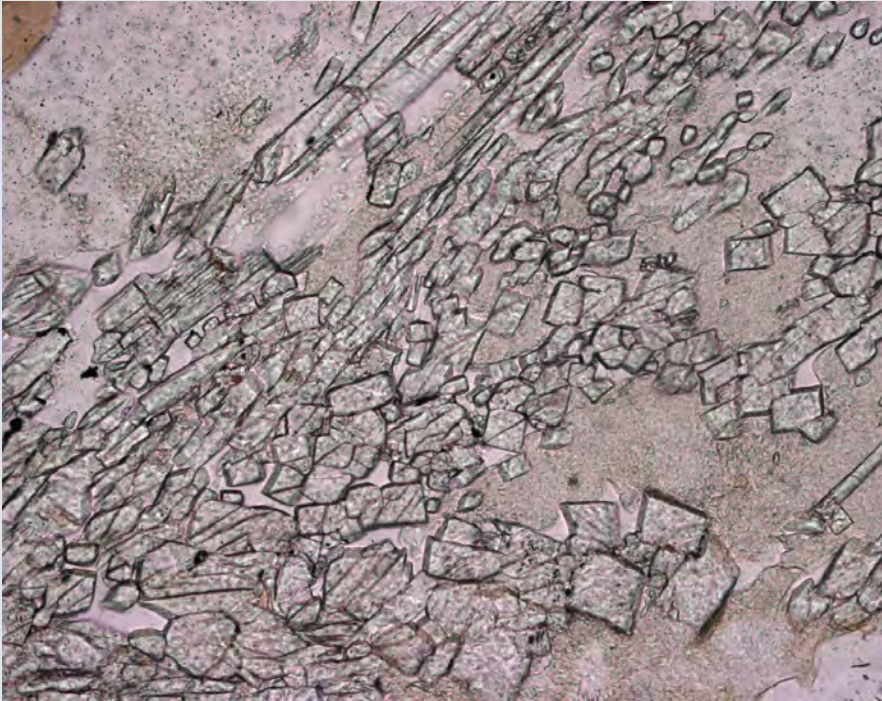






# Sillimanite

## faciès prismatique



- Np 1,654 – 1,661  
Ng 1,673 – 1,683  
Indices assez forts de l'ordre de ceux de l'andalousite.
- Incolore
- Biréfrinence  $\Delta = 0,020 - 0,022$
- Teintes de polarisation dans les rouges, rouge orangé, jaune, fin du 1<sup>er</sup> ordre - début du 2<sup>ème</sup> ordre.
- Extinction droite.
- Allongement positif.
- Biaxe positif.
- $2V_z$  21 – 30°
- $r > v$  fort
- Belestá, Pyrénées orientales, France.

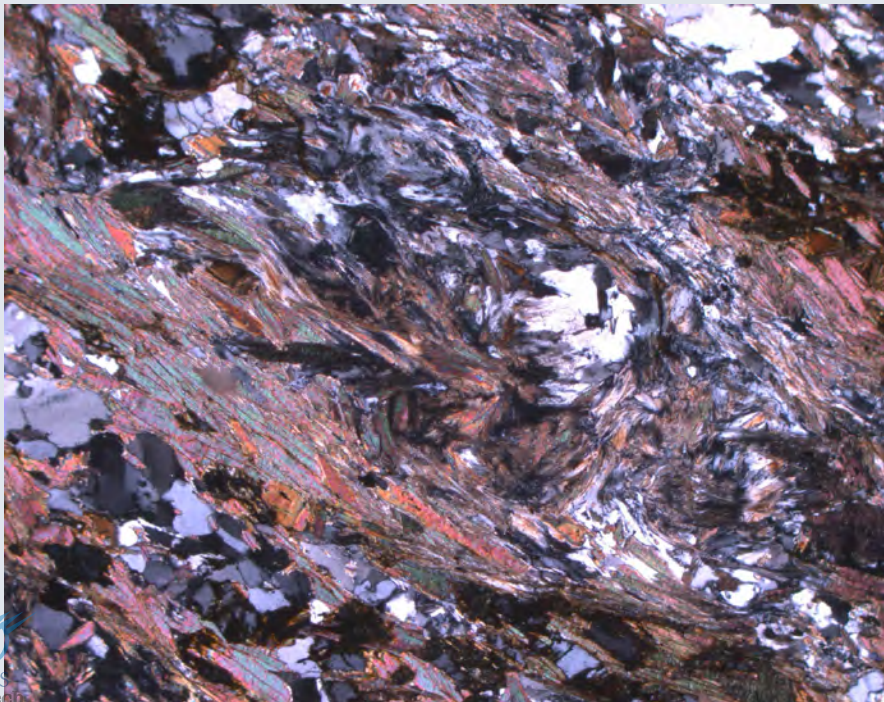
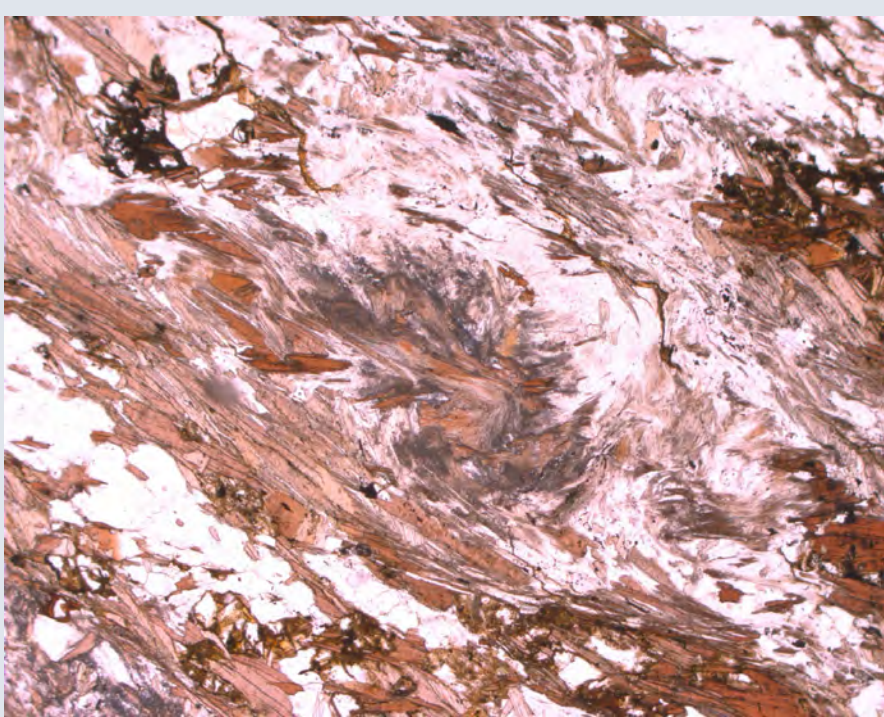
AC





# Sillimanite

## faciès fibrolite

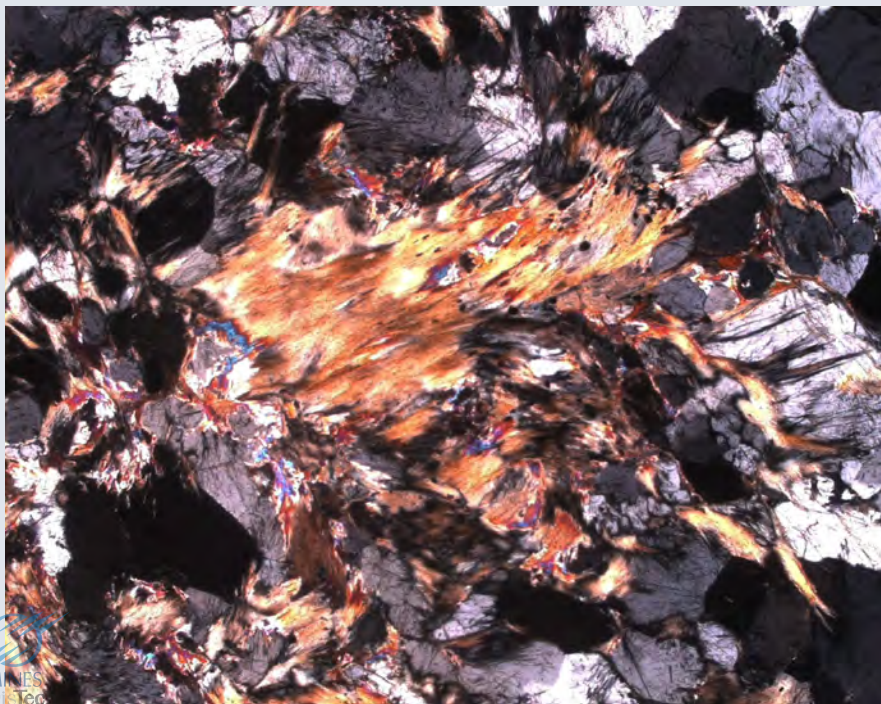


- Le faciès prismatique de la sillimanite ne s'observe que dans les domaines de métamorphisme fort.
- Vers l'isograde, la sillimanite apparaît sous un faciès fibreux, formant des paquets flexueux de fibres extrêmement fines : faciès fibrolite.
- L'épaisseur de ces fibres est souvent inférieur à celui de la lame.
- La fibrolite apparaît brunâtre , ses teintes de polarisation sont peu visibles.
- À métamorphisme prograde, la nucléation de la sillimanite se produit dans les lits micacés produisant un mélange de sillimanite et de biotite. Les autres silicates d'alumine (andalousite, disthène) demeurent quelque temps métastables, sans même être remplacés par la sillimanite.
- Murat-sur-Vèbre, Tarn, France.

C







## Nodule quartz - sillimanite

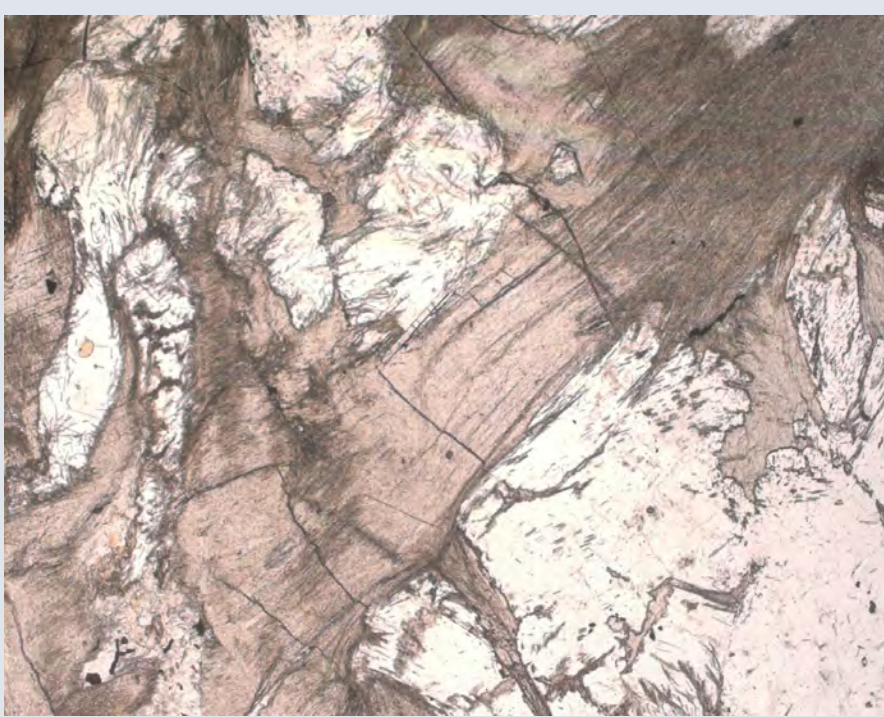
- Des placages et nodules de sillimanite fibreuse, dont la taille varie de 1 à 5 cm se rencontrent dans les gneiss quartzo-feldspathiques.
- Ces nodules semblent souvent se localiser au voisinage du front de migmatites.
- Ces nodules proviennent vraisemblablement de la destruction des feldspaths du gneiss par lessivage des alcalins.
- La Salvetat sur Agout, Hérault, France

AC

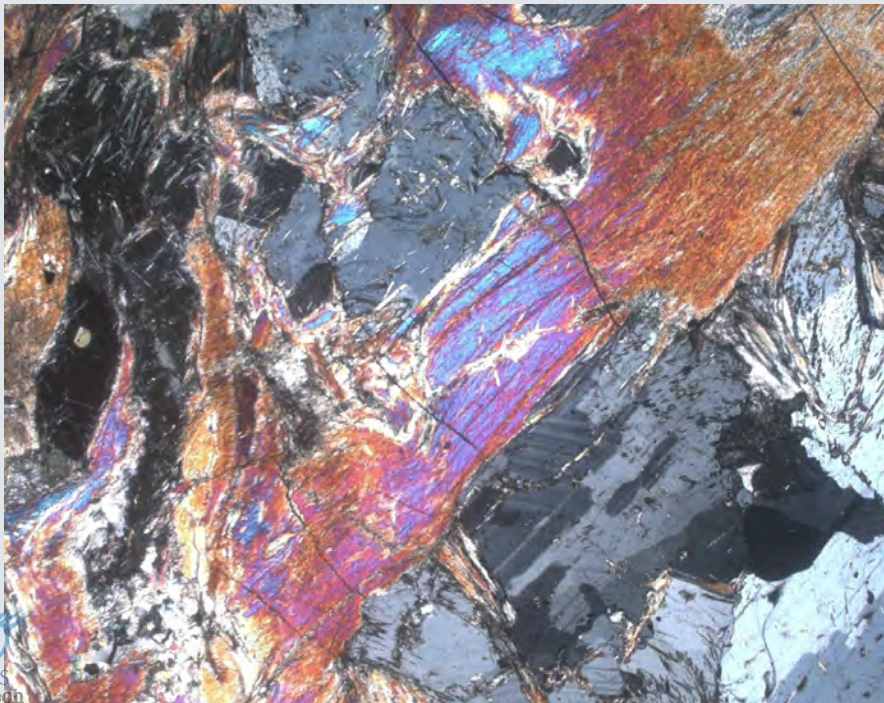




## Sillimanite fibreuse



- Développement de sillimanite fibreuse par lessivage d'alcalins à partir de feldspaths.
- Cette sillimanite est ultérieurement transformée en muscovite (teintes de polarisation vives).

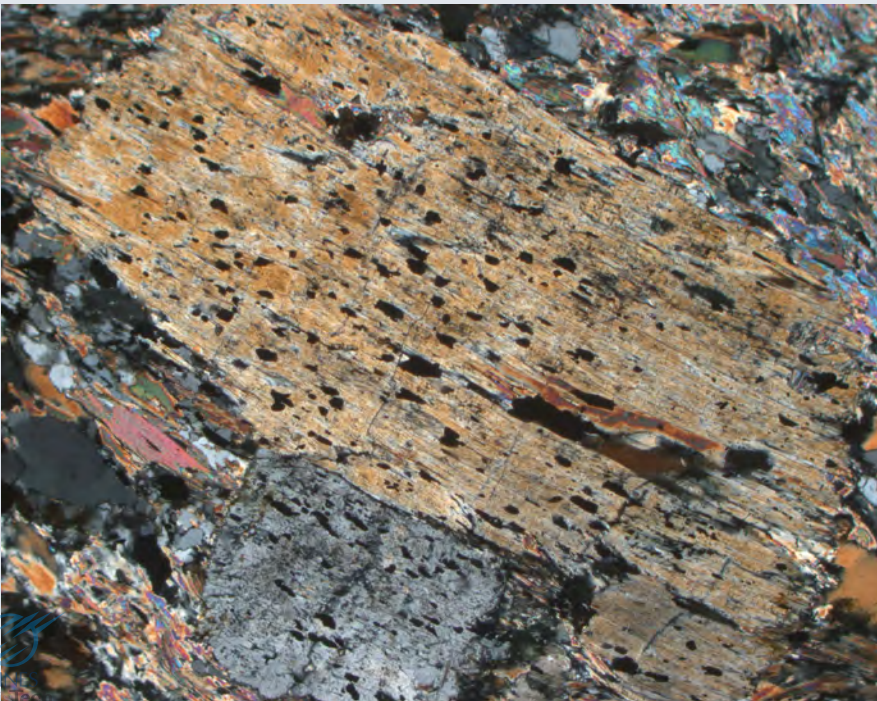


- Klegåssen, Norvège





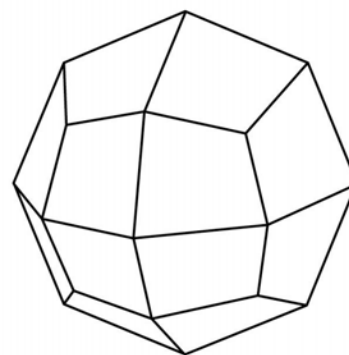
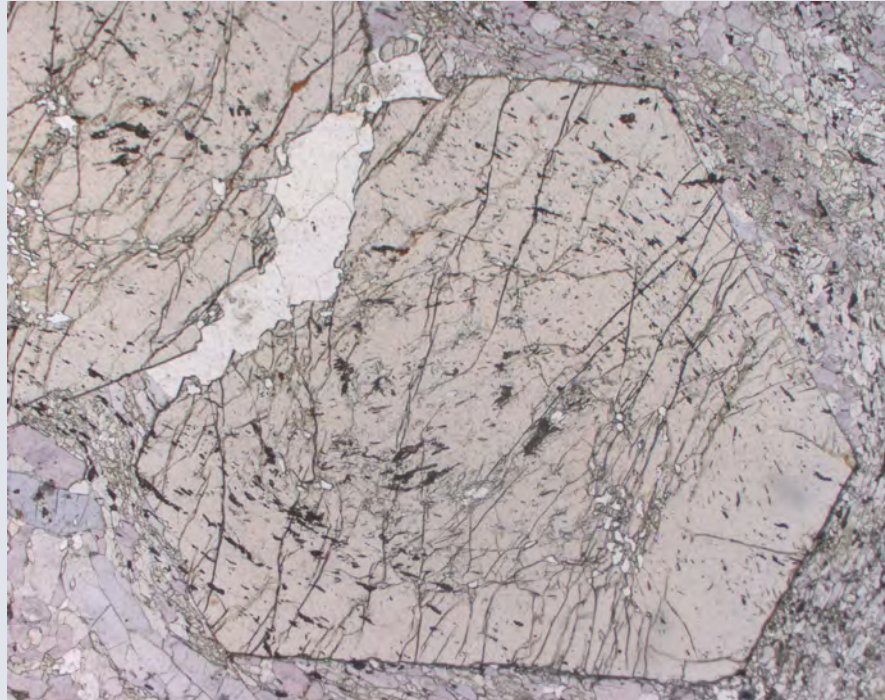
## Sillimanite en pseudomorphose d'andalousite



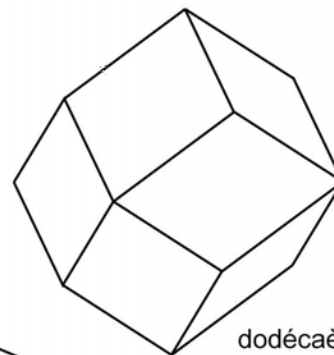
Il s'agit ici de métamorphisme de contact, où dans un premier temps se sont formés de grands cristaux automorphes d'andalousite, qui ont été ultérieurement remplacés par de la sillimanite prismatique. On reconnaît une section basale carrée et une section longitudinale.

Batère, Pyrénées orientales, France.

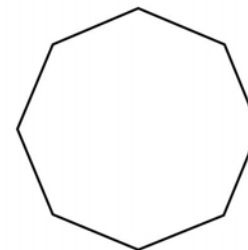




trapézoèdre



dodécaèdre  
rhomboïdal



## Grenats alumineux

pyrope  $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

almandin  $\text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

spessartine  $\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

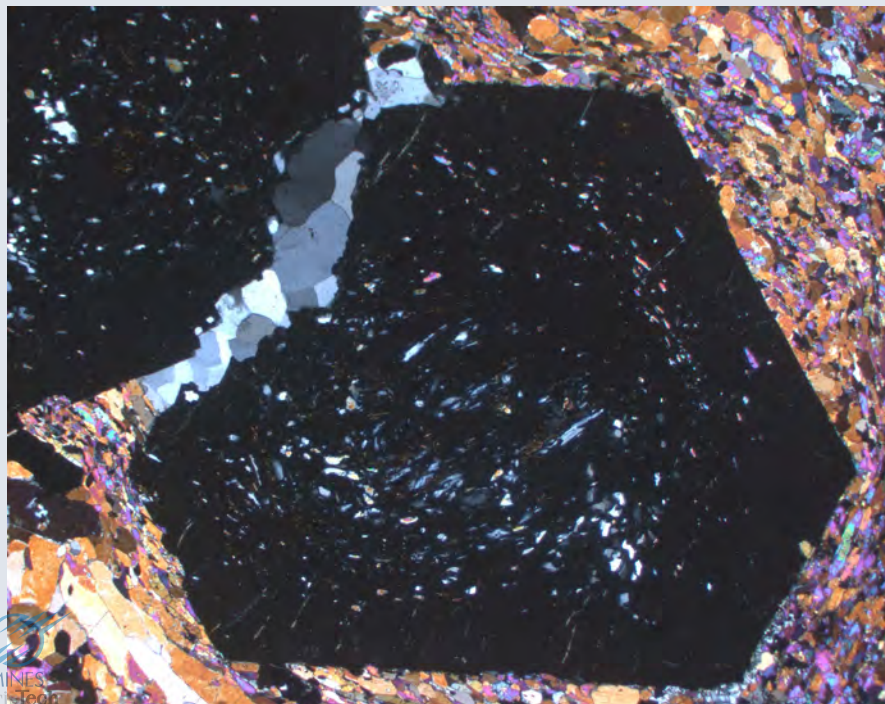
(grossulaire  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ )

cubique

les minéraux bleutés du fond de la roche  
sont du glaucophane . Le minéral incolore  
entre les grenats est du quartz.

Oman

C

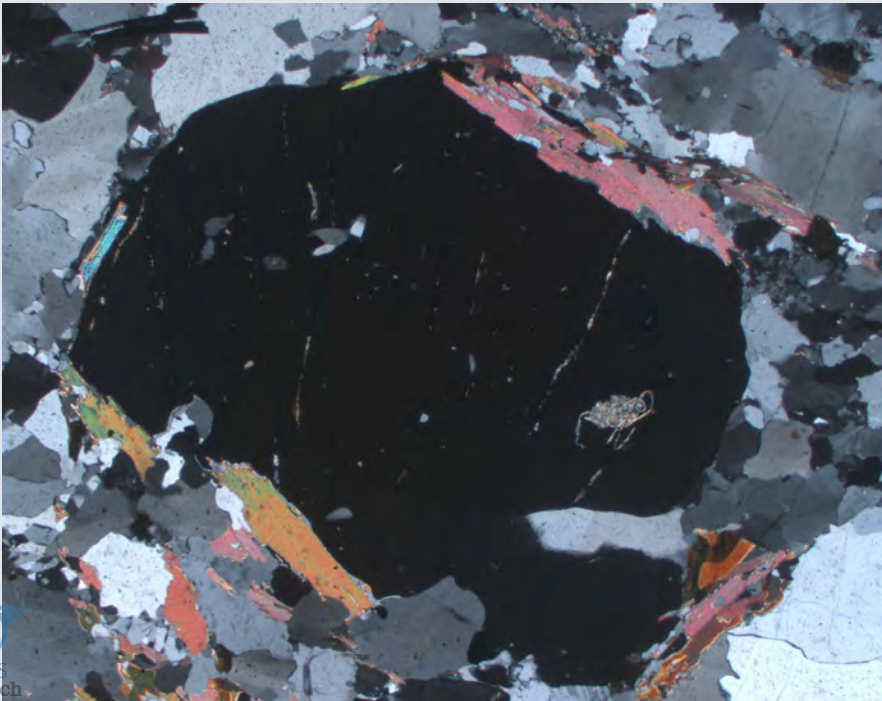
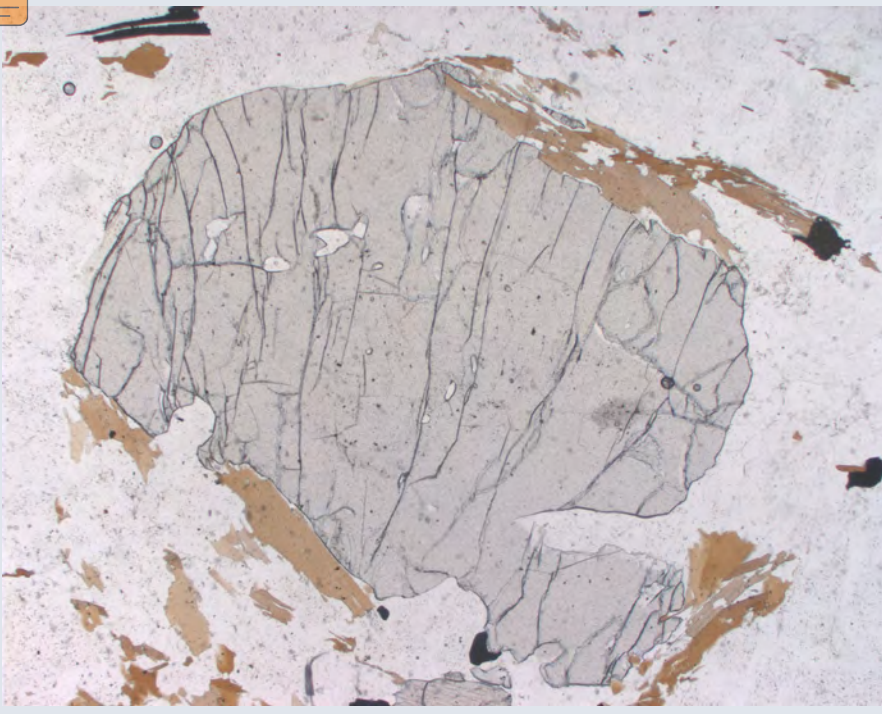




# Grenat

- Cubique
  - Formes polygonales, arrondies,
  - souvent poecilitique,
  - ou sans forme.
- Pas de clivage.
- Indices
  - Pyrope 1,714
  - Almandin 1,830
  - Spessartine 1,800
  - Grossulaire 1,734
- Indices forts, aspect chagriné
- Incolore, (rosé, brunâtre, jaunâtre)
- Yaoundé, Cameroun

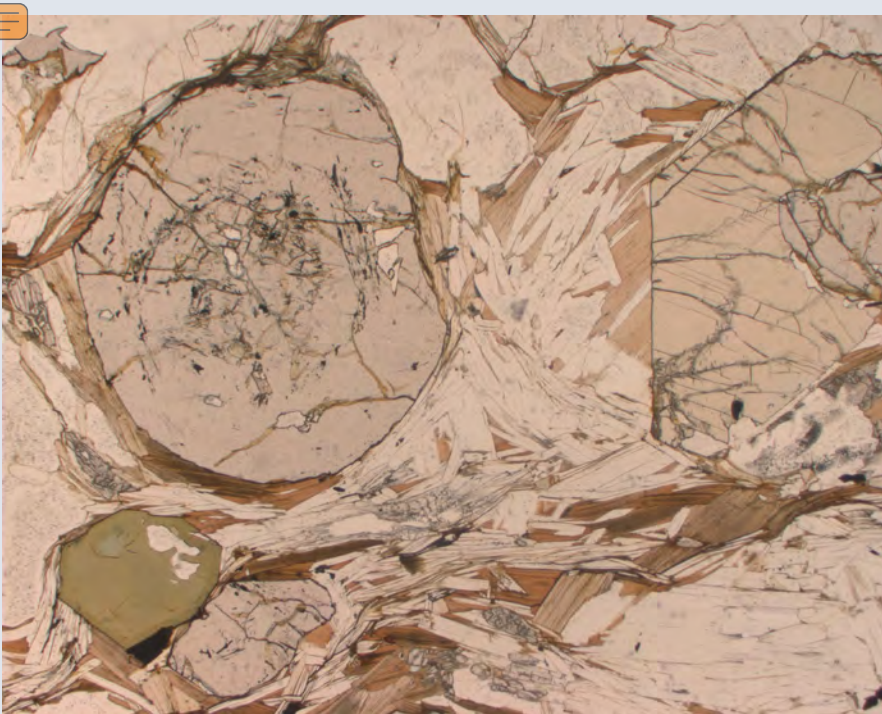
C





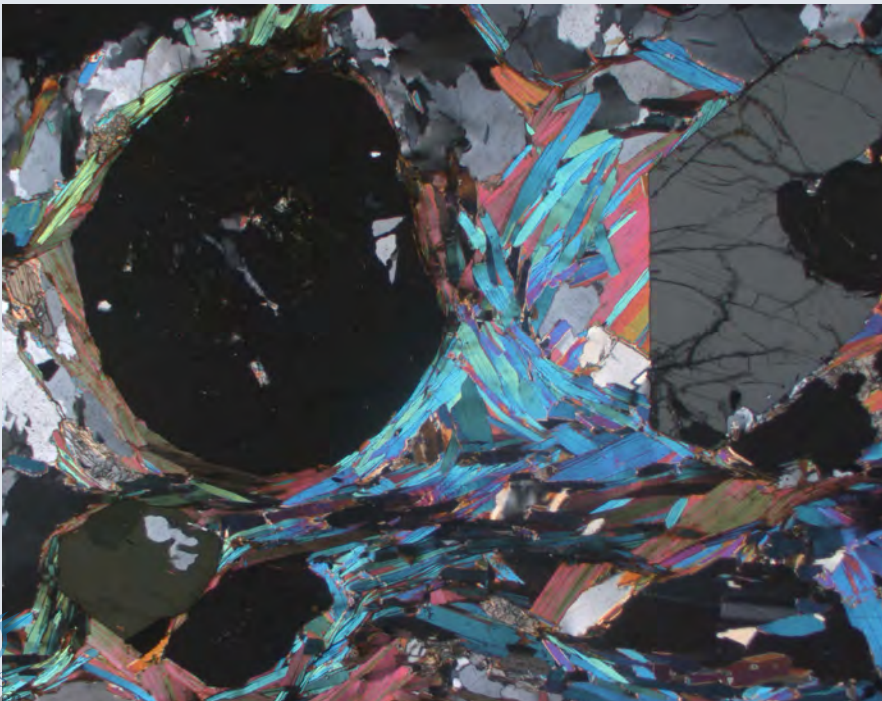


# Grenat - staurotide



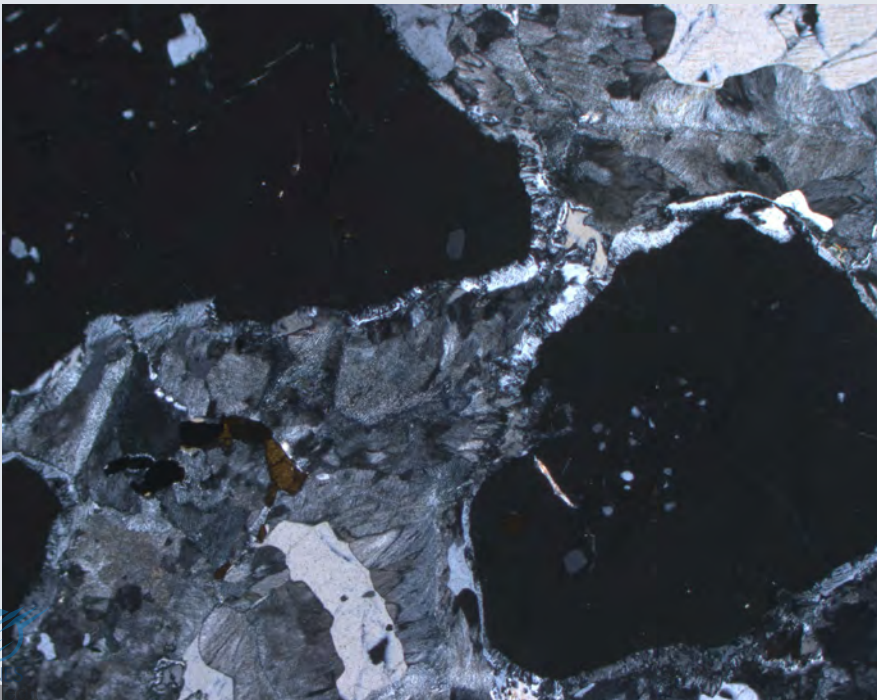
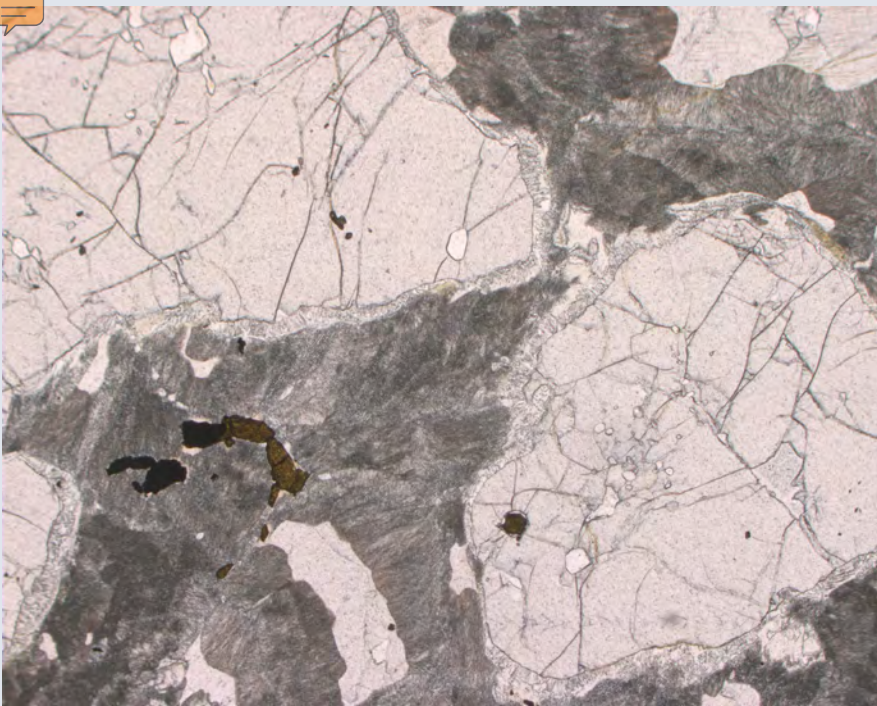
- Grenat au coin NW.
- Staurotide en bord droit. ☐
- Tourmaline au coin SW. ☐
- Fond de muscovite, biotite, quartz.
- Chartreuse de la Vergne, Var, France.

AC





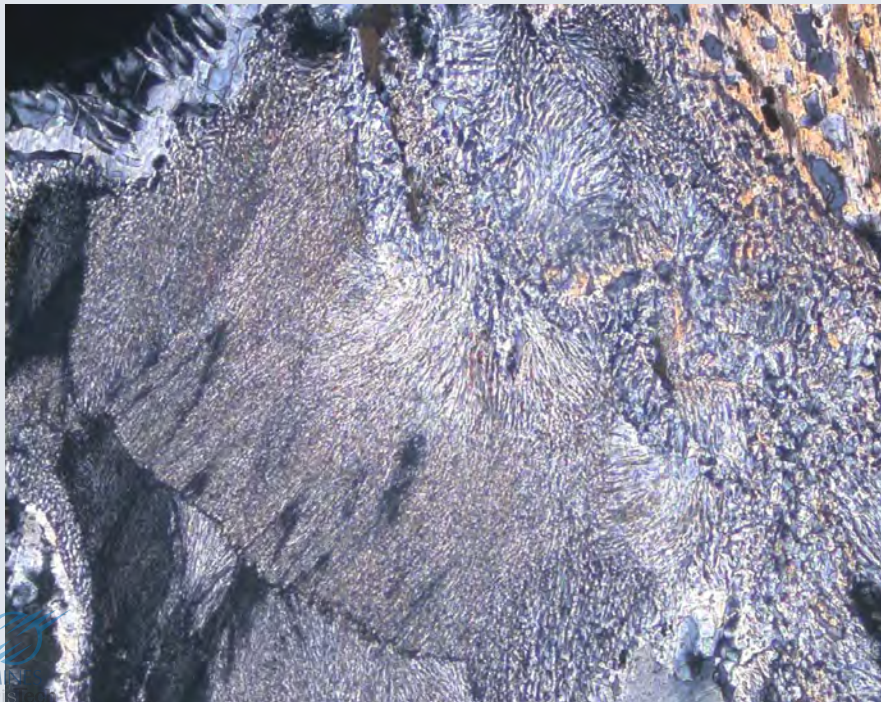
# Kelyphite



- Les grenats de haute pression, en particulier ceux du faciès éclogite se déstabilisent en agrégats fibroradiés de **plagioclase** + **amphibole** (hornblende) traduisant une rétromorphose en faciès amphibolite.
- Parfois, il y a formation dans un premier temps de l'association plagioclase + clinopyroxène (souvent diopside) ; dans un second temps, ce clinopyroxène se transforme en amphibole.
- La roche ci-contre est une éclogite avec grenat, clinopyroxène (incolore, polarisant dans des gris clair), rutile (brun rouge) . Grenat et clinopyroxène sont assez largement kélyphitisés.
- Le Jounié, Tarn, France.







## Kelyphite

- Un grossissement plus fort montre les très fins cristaux d'amphibole dans une matrice de plagioclase.
- Dans le coin supérieur gauche, un grenat avec une couronne de petits cristaux de plagioclase.
- Dans le coin supérieur droit, un pyroxène.
- La Souque, Tarn, France.

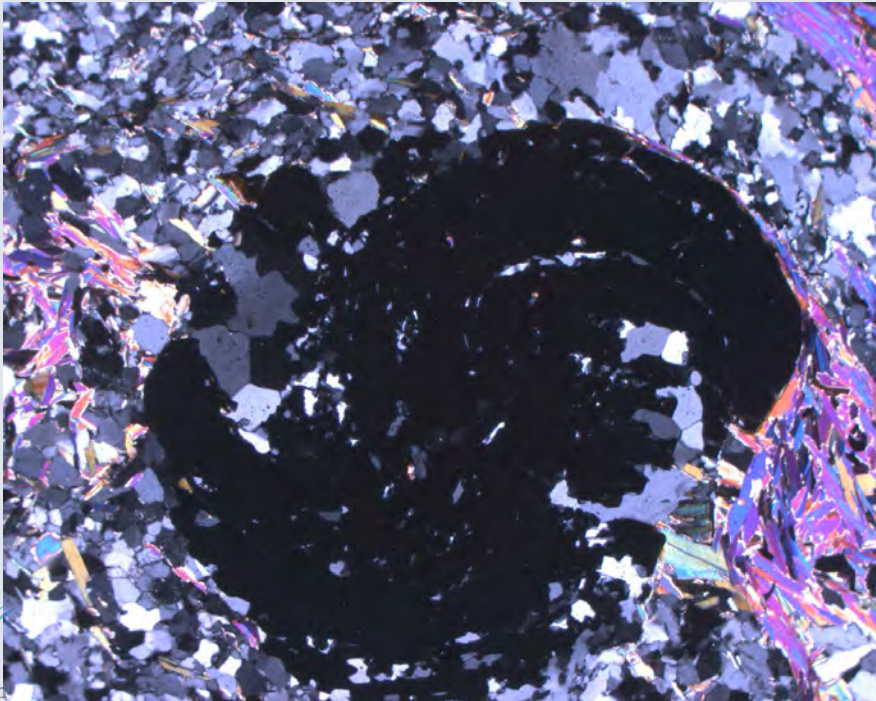




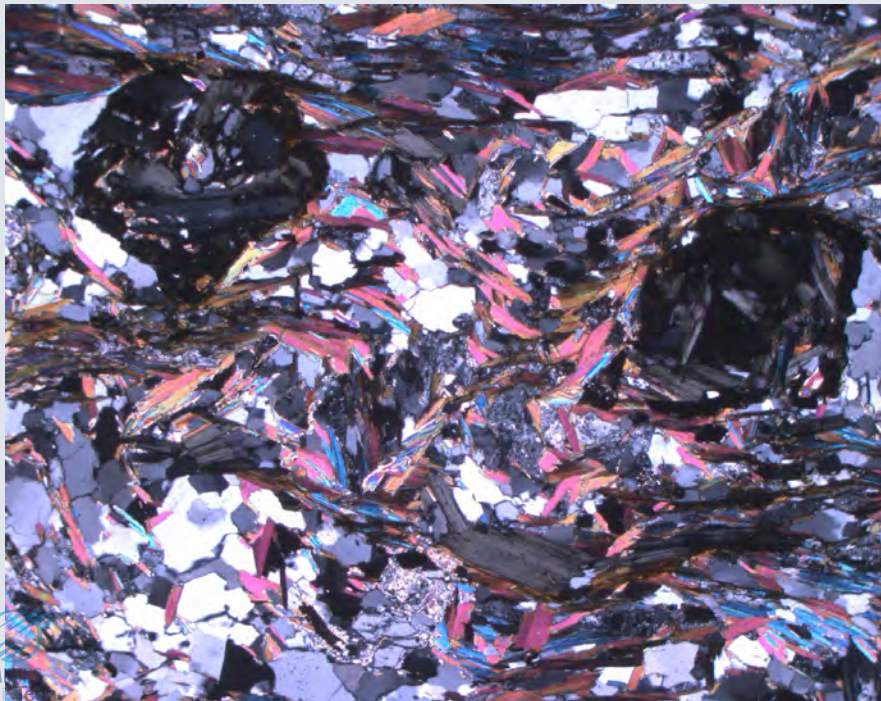
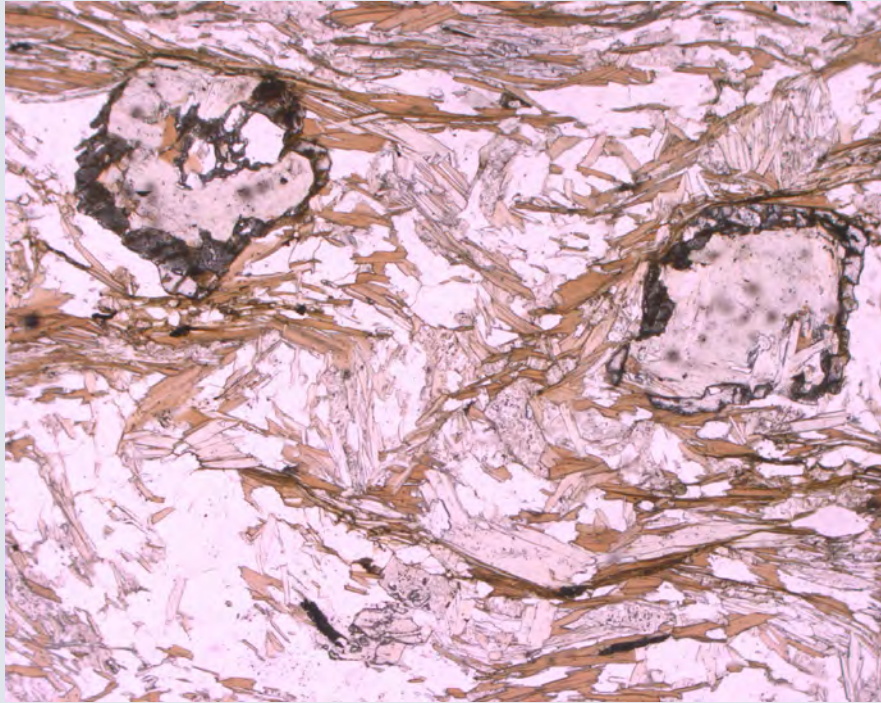


## Grenat hélicitique

- Structure en hélice caractéristique d'un grenat ayant cru au cours des mouvements tectoniques.
- La forme de l'hélice indique ici un mouvement anti-horaire.
- Prémian, Hérault, France.





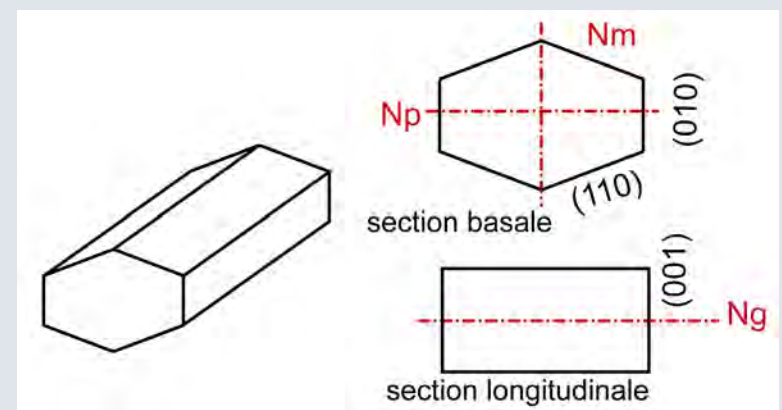
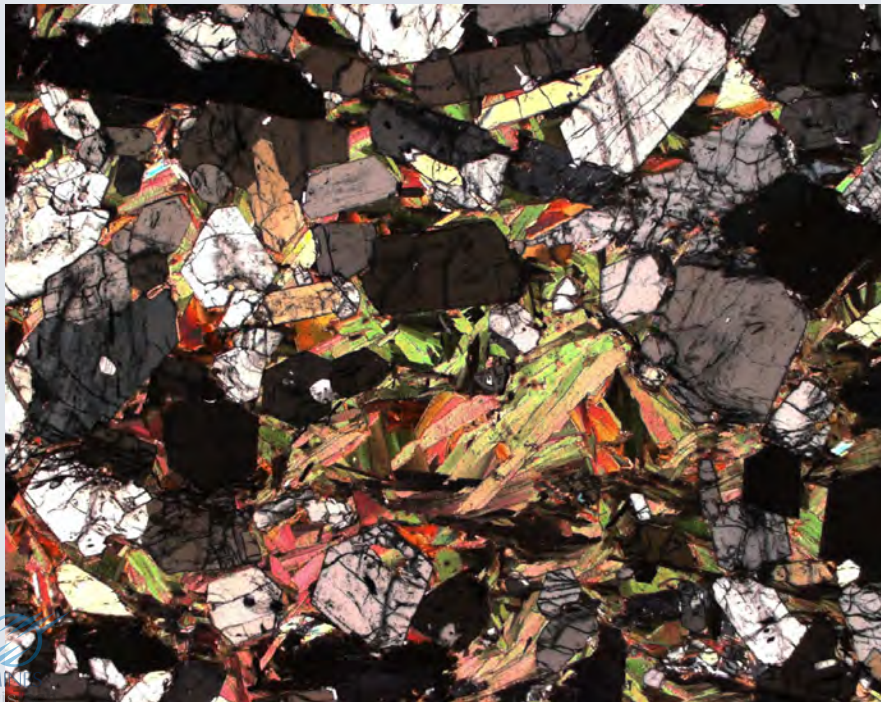
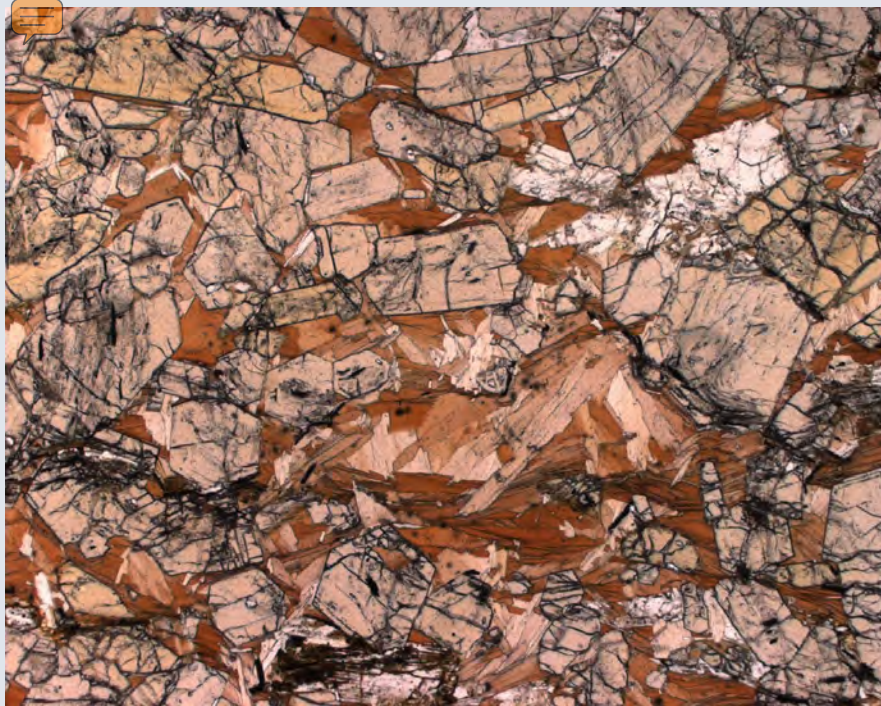


## Altération du grenat en chlorite

- Les grenats de ce micaschiste ont leur cœur altéré en chlorites (qui polarisent en gris olivâtre sombre).
- La périphérie du grenat est stabilisée par sa forte teneur en manganèse.
- Ce faciès est appelé « grenat en atoll ».
- Prémian, Hérault, France.







## Staurotite



- Monoclinique pseudo-orthorhombique.
- Prismes courts à base hexagonale.
- Souvent poecilitique. Clivage (010) mauvais, peu visible.
- Pléochroïque : incolore, jaune pâle, jaune d'or.
- Macles en croix (232) et en croix de Saint André (023) ; non visibles en lame mince.
- Indices forts

Np 1,739 – 1,747

Ng 1,752 – 1,762

- Prémian, Hérault, France

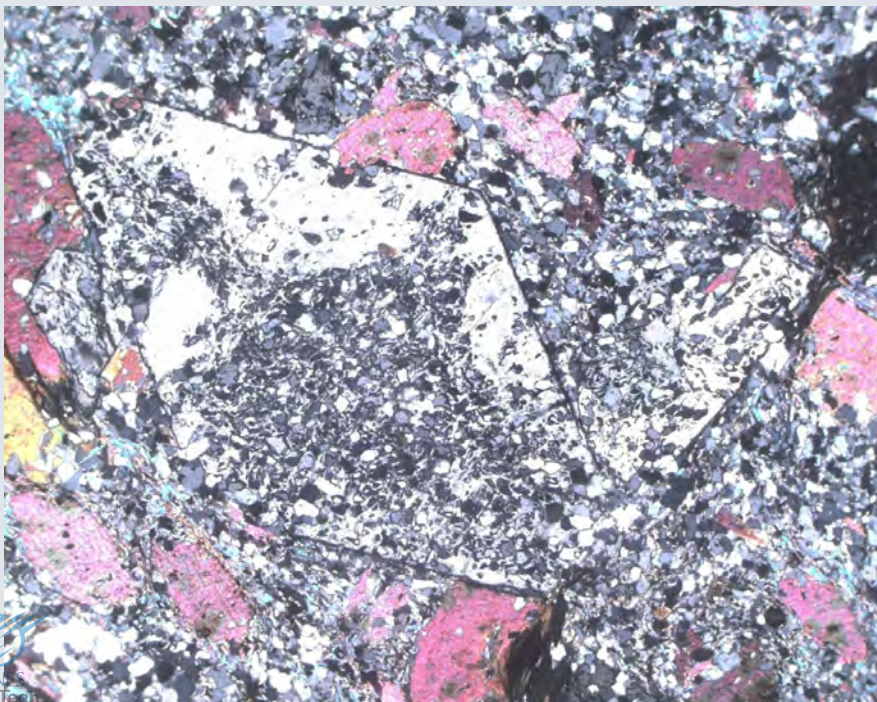
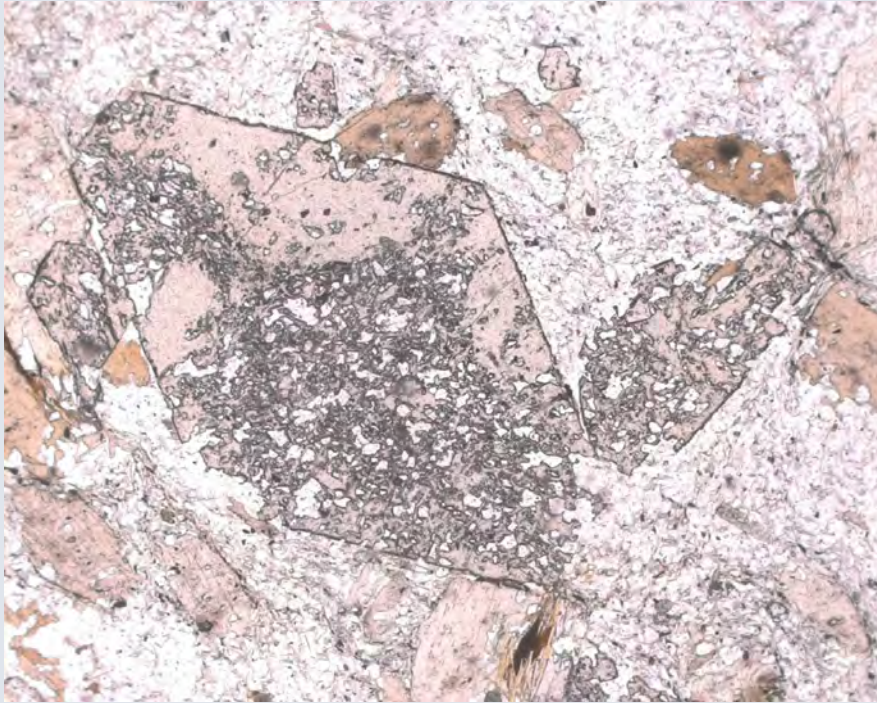
AC





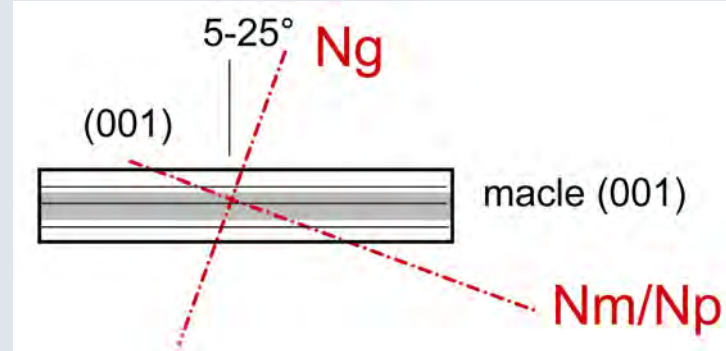
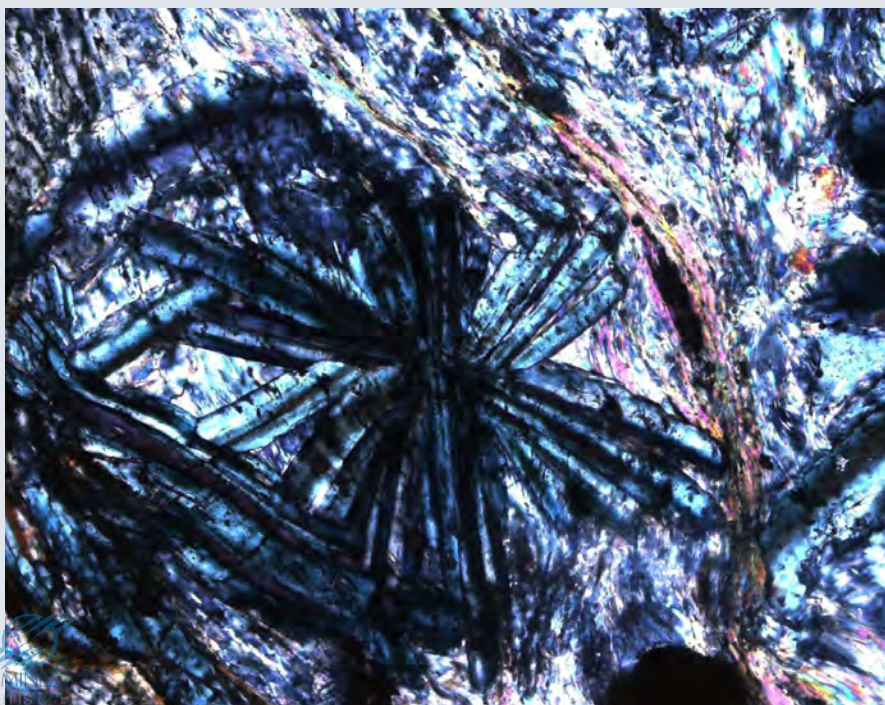
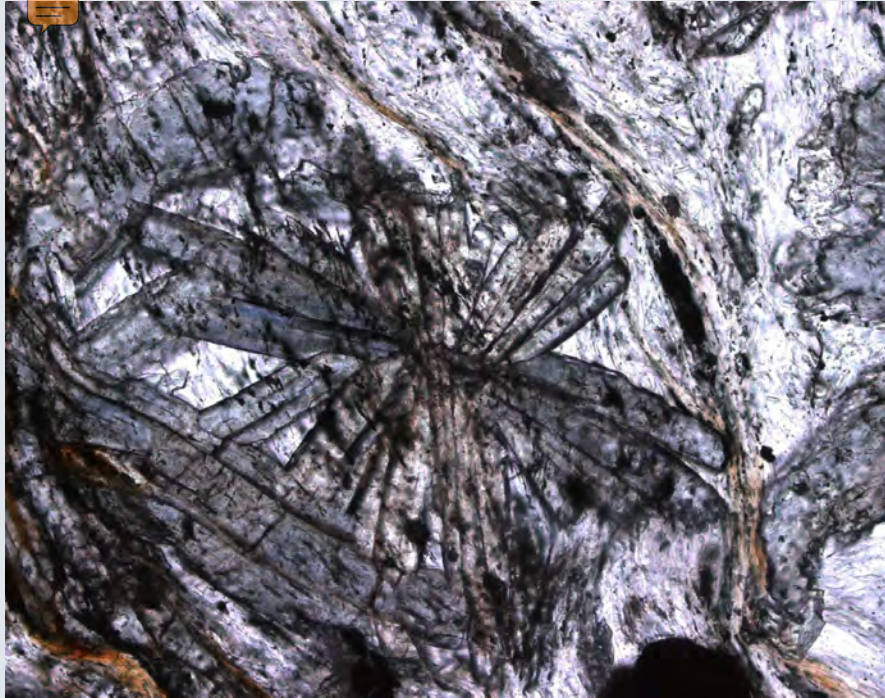


# Staurotide



- Extinction droite, allongement positif sur les sections prismatiques ; dans les diagonales de l'hexagone sur les sections basales.
- Biréfringence  $\Delta = 0,013 - 0,015$   
Polarise dans les blancs – jaunes fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Biaxe +
- $2V = 79 - 90^\circ$
- $r > v$  fort
- Ici grands cristaux automorphes poecilitiques dans micaschiste à muscovite, biotite.





## Chloritoïde

$(\text{Fe, Mg, Mn})_2(\text{Al, Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$

- Monoclinique (HT, HP) ou triclinique pseudo-hexagonal.
- Tablettes, souvent associations en rosettes.
- Clivage (001) bon, (110) moyen, (010) mauvais.
- Gris vert, vert olive, bleu violet.
- Macle (001) commune, répétée
- Indices forts

Np 1,713 – 1,728

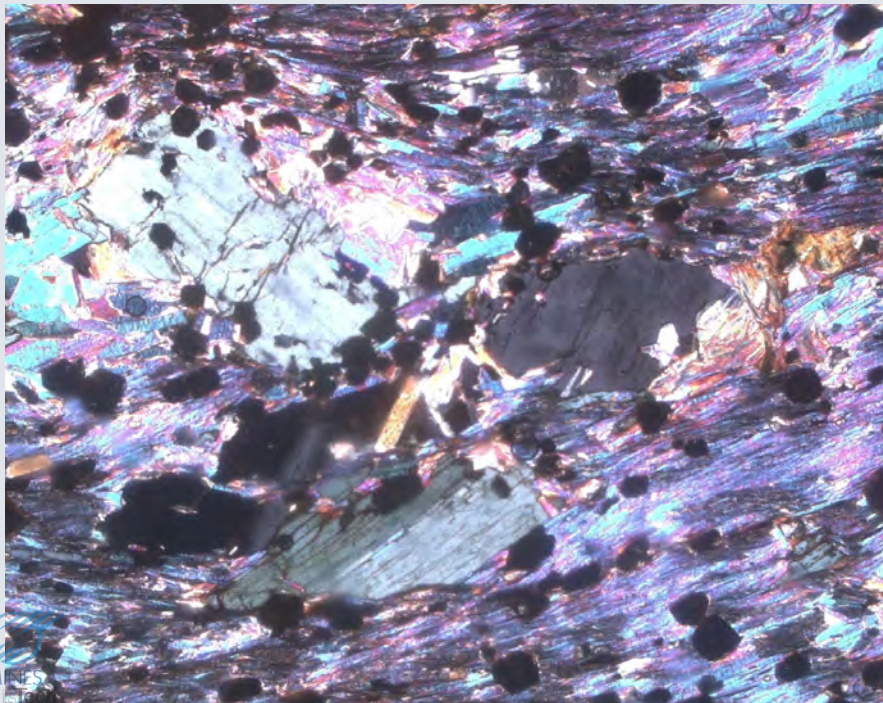
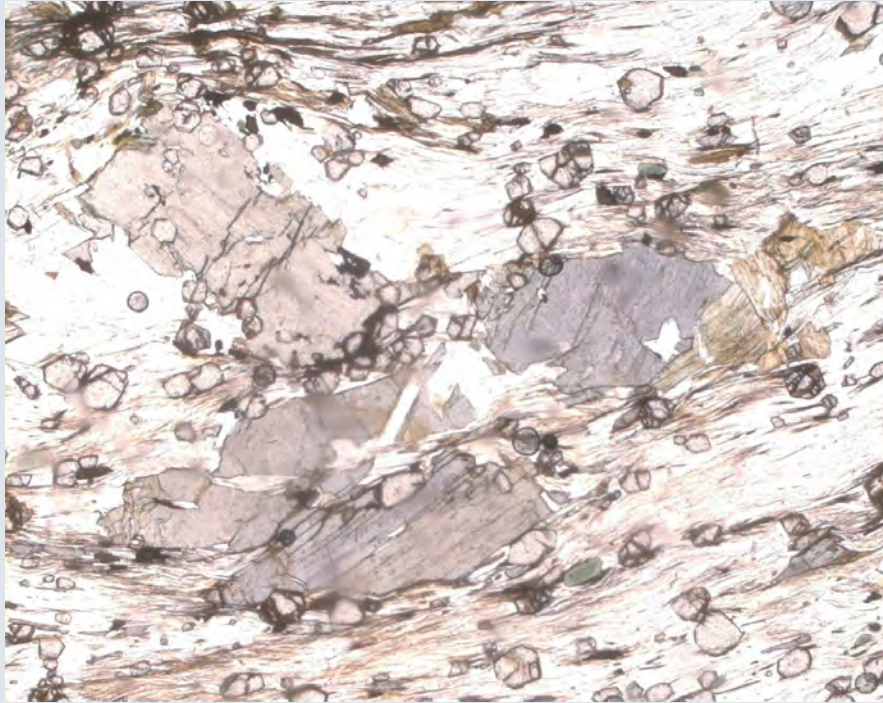
Ng 1,723 – 1,740

- Montner, Pyrénées orientales, France.

AC







# Chloritoïde



- Extinction oblique sur le clivage (jusque  $25^\circ$ ).
- Biréfringence  $\Delta = 0,010 - 0,012$
- Dispersif : teintes anormales, gris bleu / gris vert.
- Biaxe positif ou négatif .
- $2V = (36^\circ) - 58^\circ - (70^\circ)$
- $r > v$  fort
- Micaschiste à grenat, muscovite, chlorite (un petit cristal de tourmaline)
- Ile de Groix, Morbihan, France.

AC







# Ottrelite



- Variété manganésifère du chloritoïde, considéré comme une espèce valide
- Formes clivages, macles identiques à ceux du chloritoïde.
- Np 1,709 – 1,725  
Ng 1,716 – 1,732
- Biréfringence  $\Delta = 0,0070$
- Dispersif : teintes anormales, gris bleu / gris vert
- Biaxe positif ou négatif.
- $2V = 46 - 70^\circ$
- $r > v$  fort
- Schiste à ottrelite (muscovite, chlorite, quartz)
- Ottré, Ardennes belges

AC







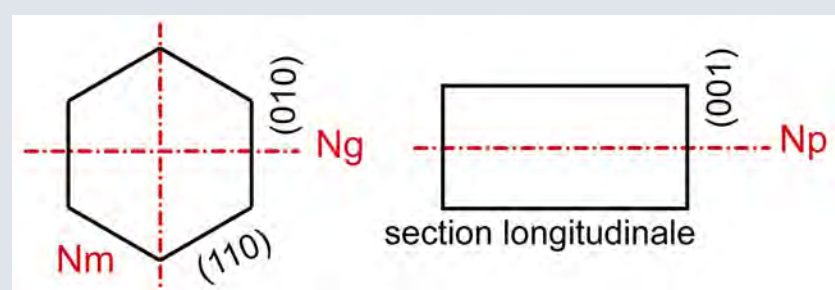
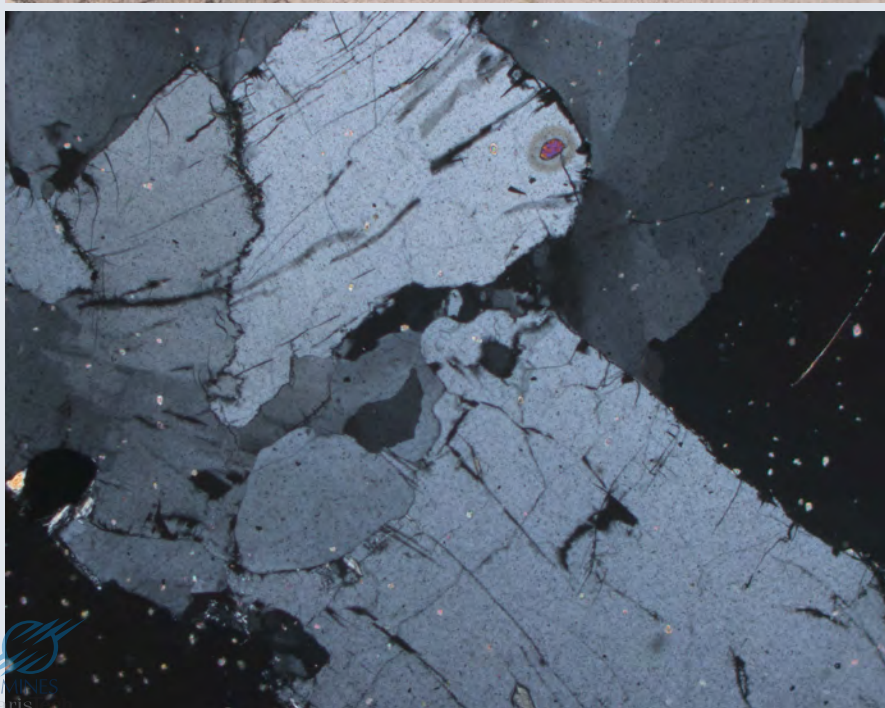
# Magnésiocarpholite

$(\text{Mg, Fe, Mn})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$

- Inosilicate.
- Orthorhombique.
- Fibreux, fibroradié.
- Mauvais clivages (100), (010), (110) (les deux premiers perpendiculaires).
- Incolore en lame mince.
- $N_p$  1,59 (Mg) – 1,61 (Fe)
- $N_g$  1,61 (Mg) – 1,635 (Fe)
- Biréfringence  $\Delta = 0,020 - 0,021$
- Biaxe négatif
- $2V$  50 – 60°
- $r > v$
- Oman

R





## Cordiérite

- Orthorhombique pseudohexagonal.
- En général xénomorphe ; parfois prismes à section hexagonale.
- Indices du même ordre que ceux du quartz :

Np 1,522 – 1,558

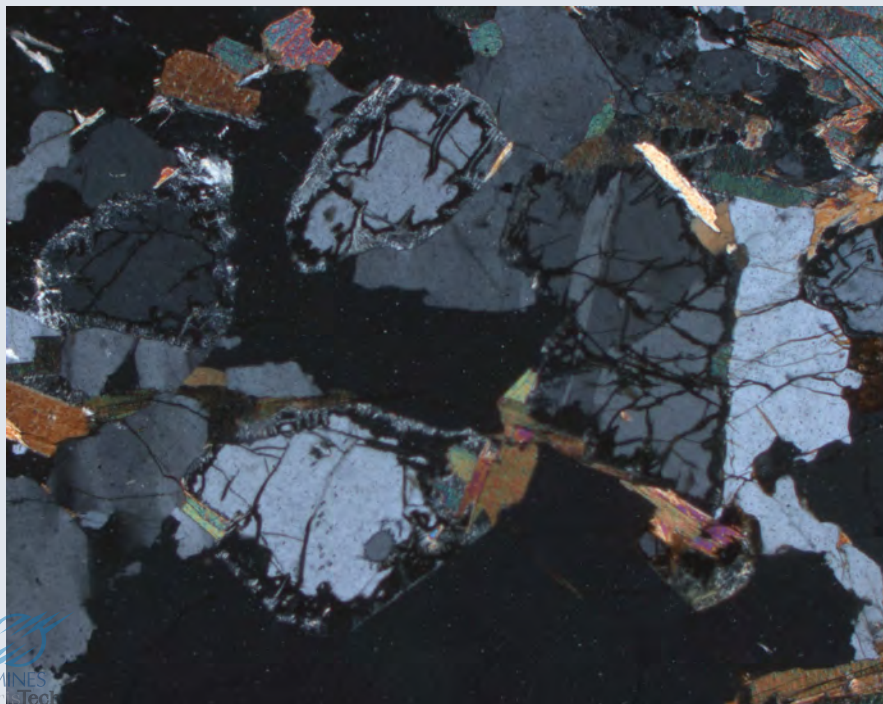
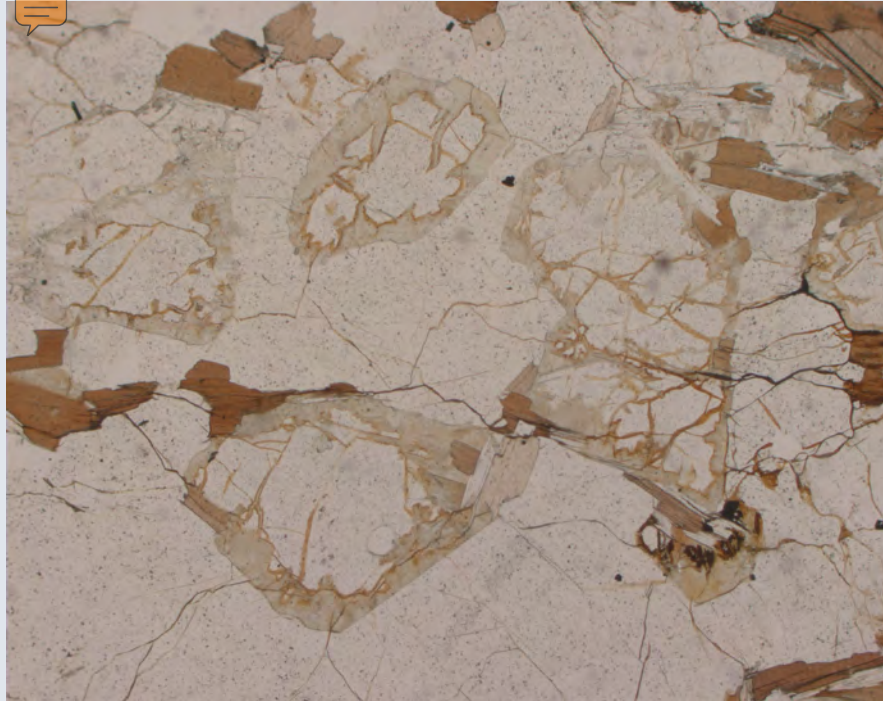
Ng 1,527 – 1,578

- Incolore
- Biréfringence  $\Delta = 0,005 - 0,008$   
Analogue à celle du quartz ou des feldspaths.
- Extinction droite sur le prisme.
- Biaxe positif ou négatif.
- $2V \ 42 - 104^\circ$
- $r < v$
- grenat dans le coin SW, quartz dans le reste de la lame.
- Sierra de Cordoba, Argentine.





# Cordiérite



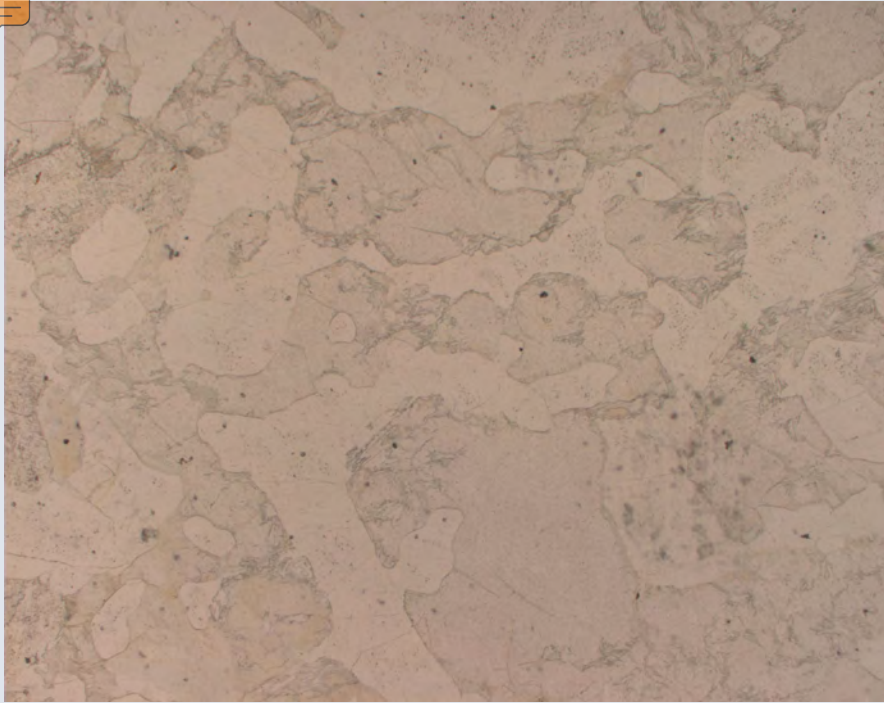
- La cordiérite est un minéral *difficile à reconnaître si elle est fraîche* ; elle peut se confondre avec le quartz et les feldspaths.
- Un critère distinctif est la présence **d'inclusions de zircon entourées d'un halo pl ochro ique jaune citron** (fiche précédente).
- Les altérations sont également caractéristiques ; elles progressent par tout ou rien à partir de la périphérie des cristaux.
- Ici le cœur des cristaux de cordiérite est frais ; leur périphérie est altérée en produits jaunâtres (jaune pâle à jaune d'or) pratiquement isotropes qui sont des chlorites.
- Nages, Tarn, France.

AC

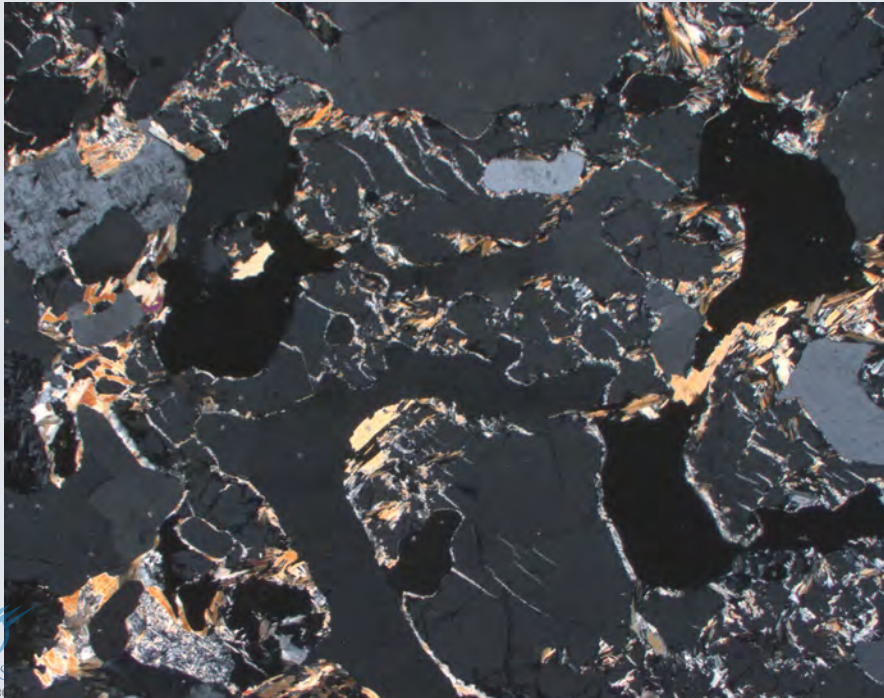




# Cordiérite

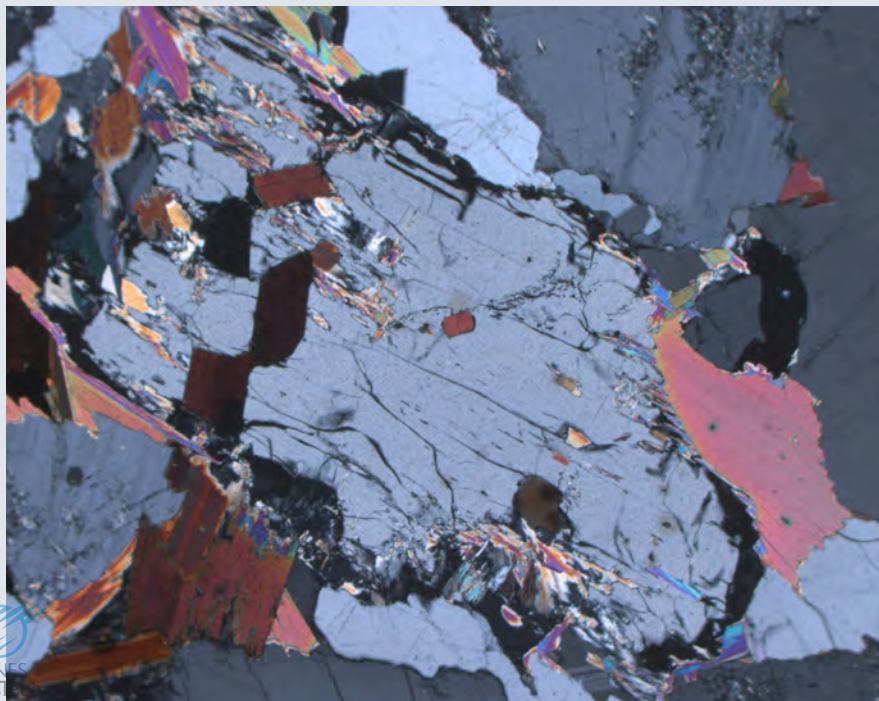
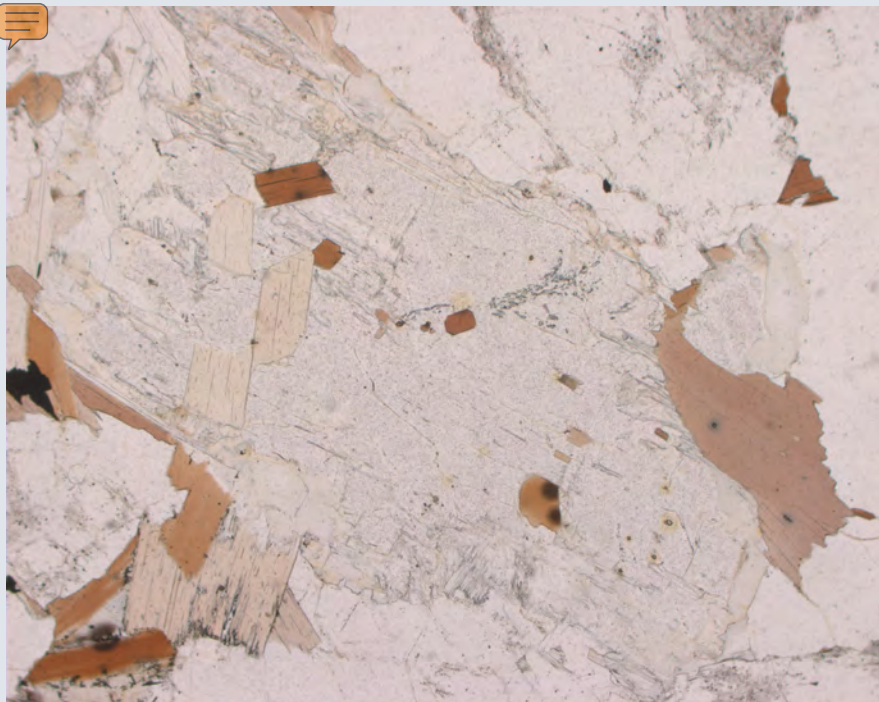


- La lame montre un grand cristal amibo ide de cordiérite dans un fond de quartz (et quelques feldspaths, en particulier vers le coin NW)
- La cordiérite est altérée sur sa bordure en mica blanc (pinite) reconnaissable aux teintes vives de polarisation.
- Nages, Tarn, France.



AC

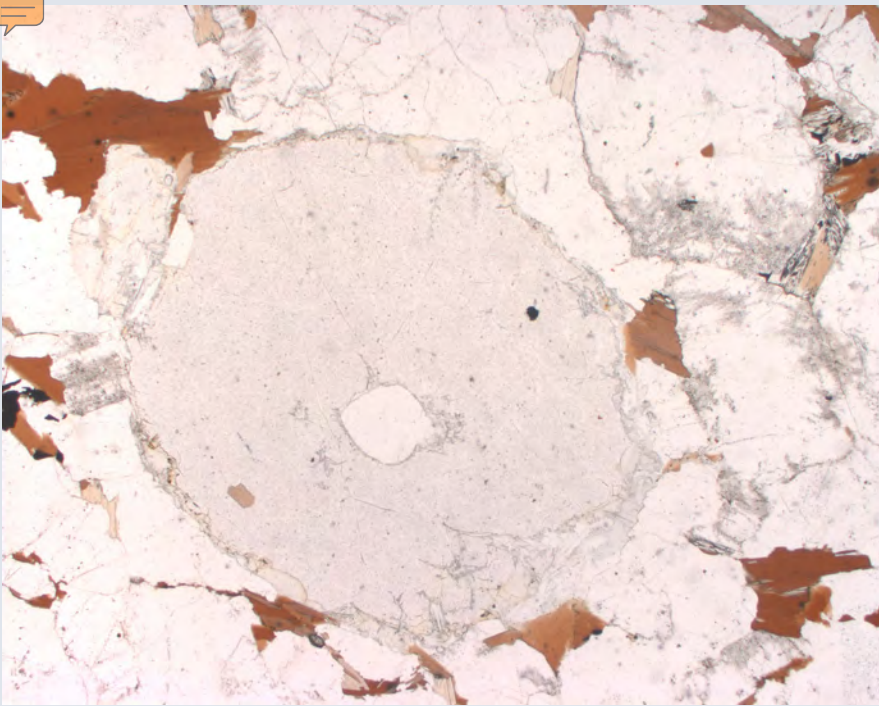




# Cordierite

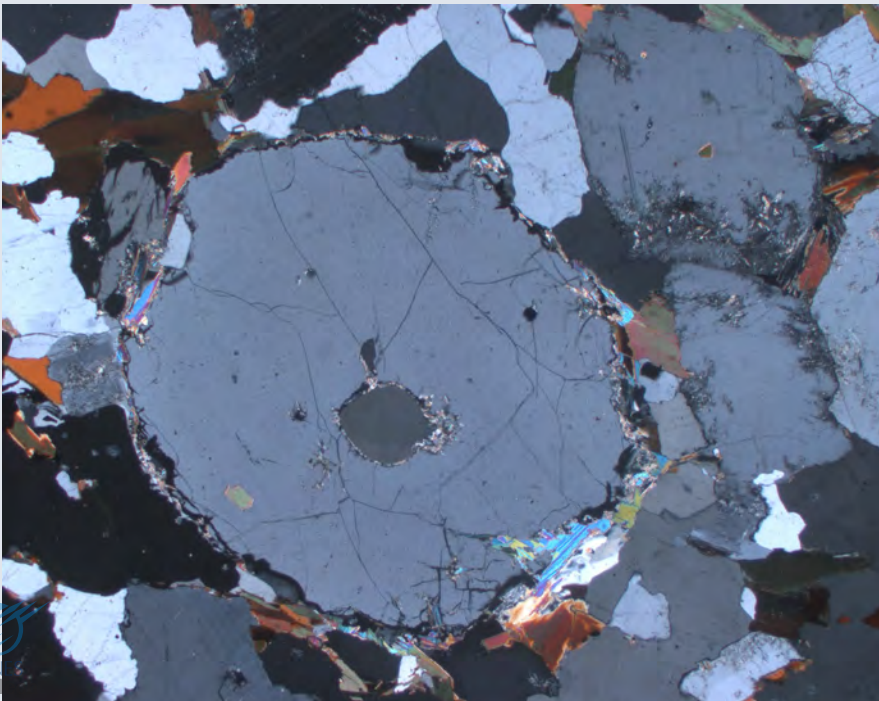
- Cette photo et la suivante montrent des cordiérites à tendance automorphe dans un granite.
- Ici section longitudinale d'un prisme court.
- Noter les inclusions de zircon à halo pléochroïque jaune (en particulier vers l'extrémité droite du prisme).
- Noter aussi l'altération des bordures en produits jaunes isotropes.
- Nages, Tarn, France.

AC



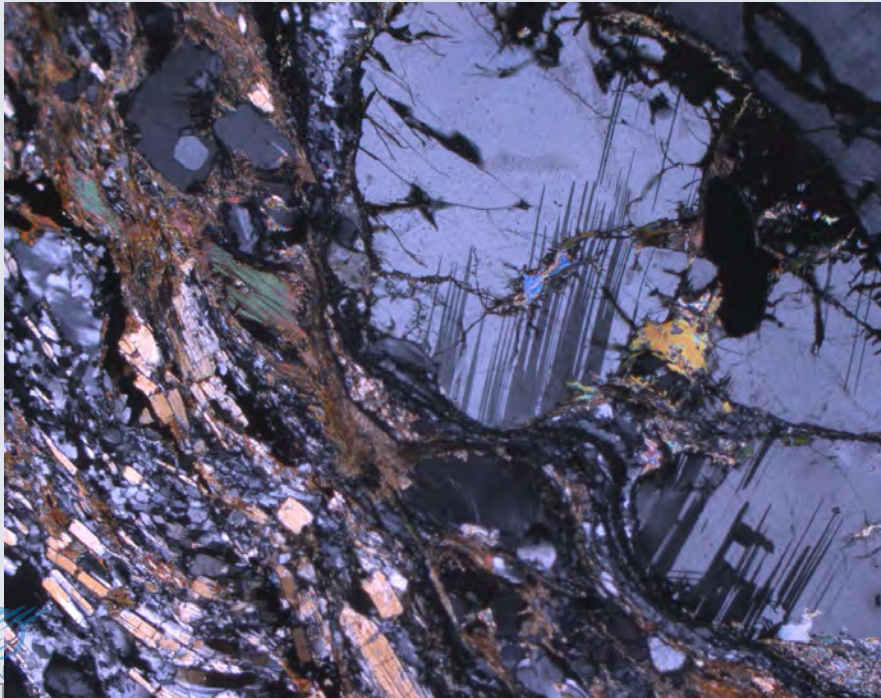
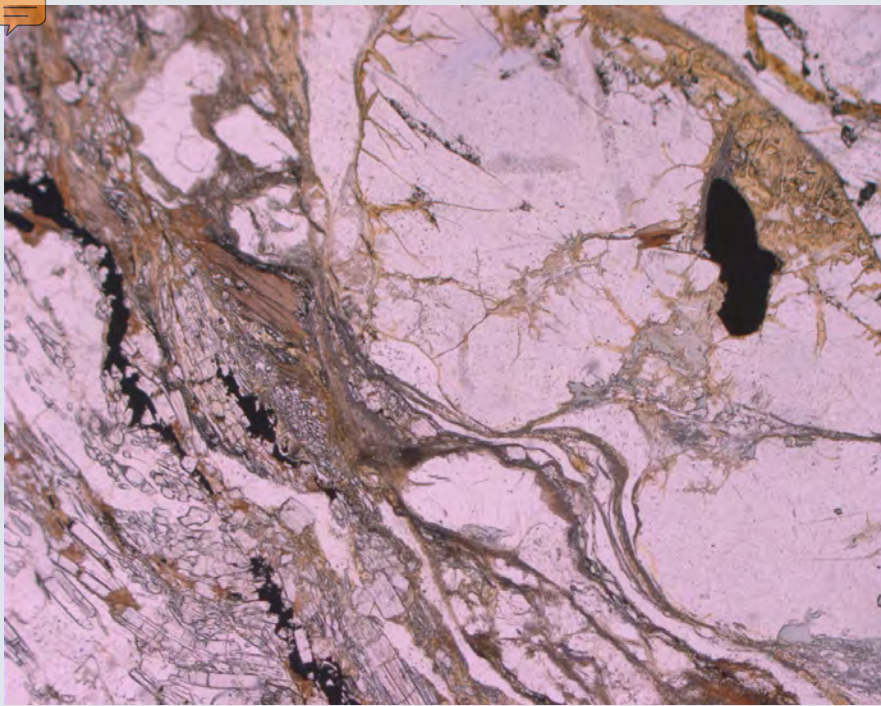
## Cordi  rite

- M  me   chantillon que pour la photo pr  c  dente.
- Section basale plus ou moins arrondie d'un prisme.
- Nages, Tarn, France.



AC





# Cordiérite Sillimanite

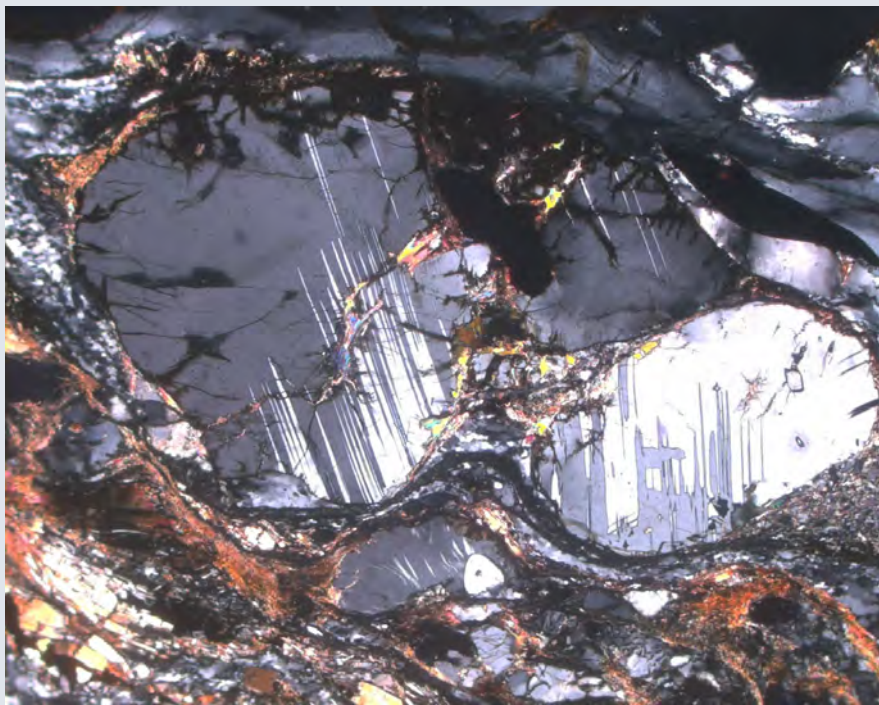


- A haute température (métamorphisme de faciès granulite, volcanisme), la cordiérite présente fréquemment des macles lamellaires répétées.
- A la différence des macles des plagioclases, ces macles se terminent fréquemment en pointe et présentent plusieurs directions disposées à 60 .
- La roche est une kinzigite. On reconnaît la biotite et la sillimanite prismatique (coin SW).
- Trilla, Pyrénées orientales, France.

AC

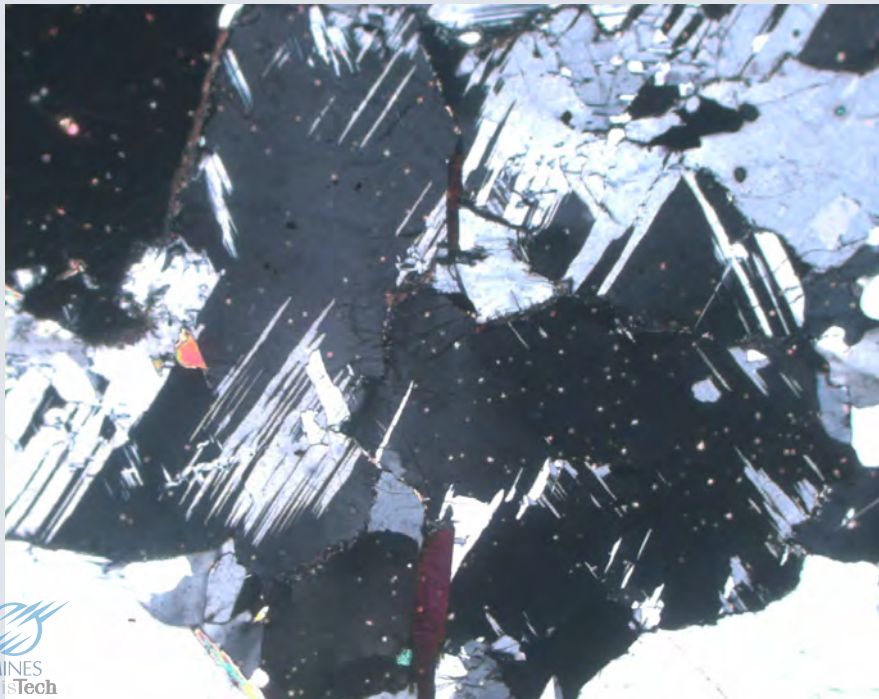






# Cordiérite

- Macles lamellaires dans les cordiérites de haute température.
- La photo du bas montre deux directions de macles   60 .
- *En haut* : Trilla, Pyrénées orientales, France (même échantillon que la photo précédente)
- *En bas* : Sierra de Cordoba, Argentine.



R





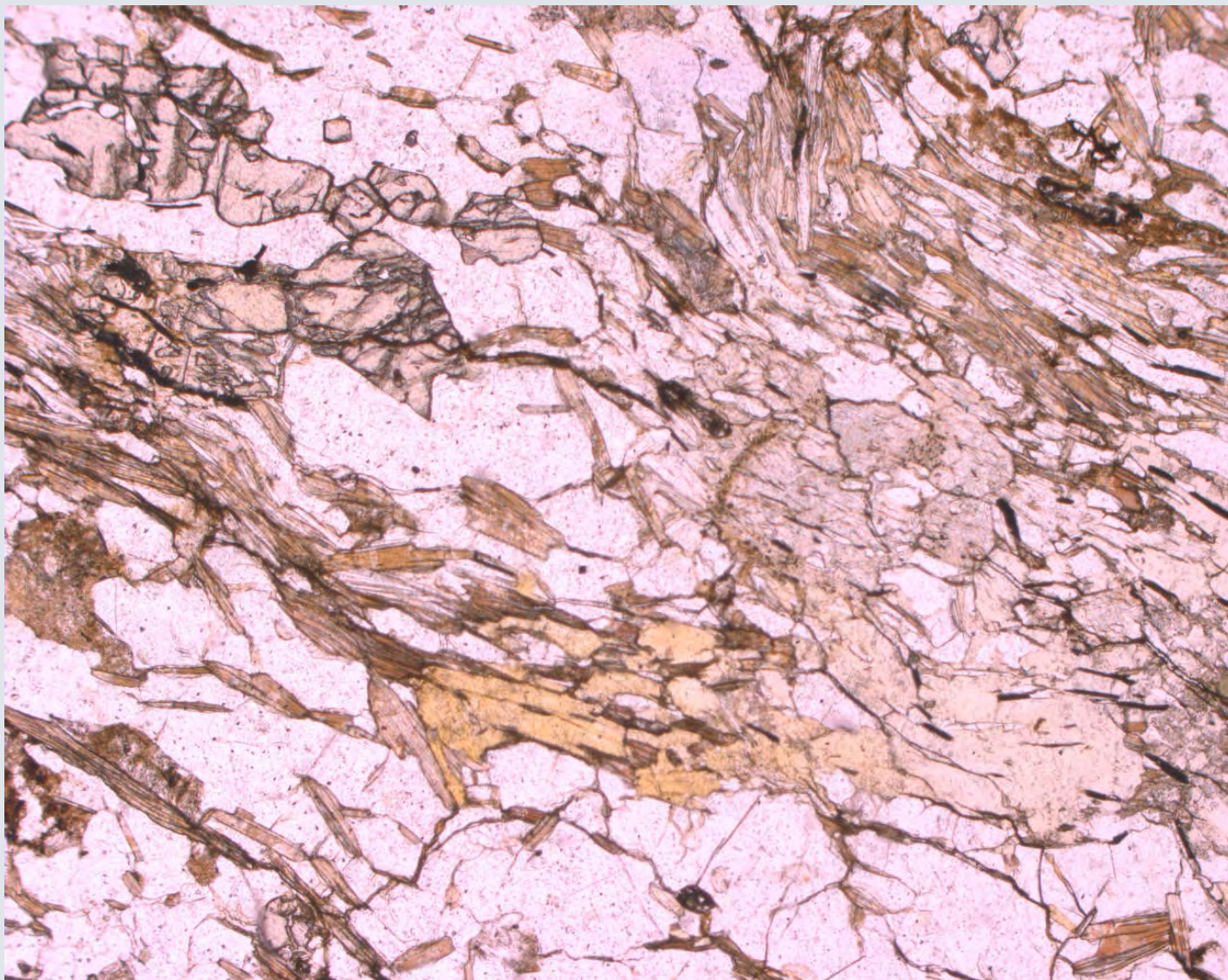
# Cordiérite



- Dans le métamorphisme régional, la cordiérite se présente en nodules poecilitiques.
- Ces nodules se distinguent sur le terrain, de ceux d'andalousite par une moindre dureté et une couleur gris - gris vert (alors que ceux d'andalousite sont noirs).
- Au microscope, la cordiérite se reconnaît par son moindre relief, ses teintes de polarisation dans les gris sombres et surtout ses altérations.
- Ici le cœur des nodules est relativement frais, la périphérie altérée.
- Milhas, Pyrénées orientales, France.

C

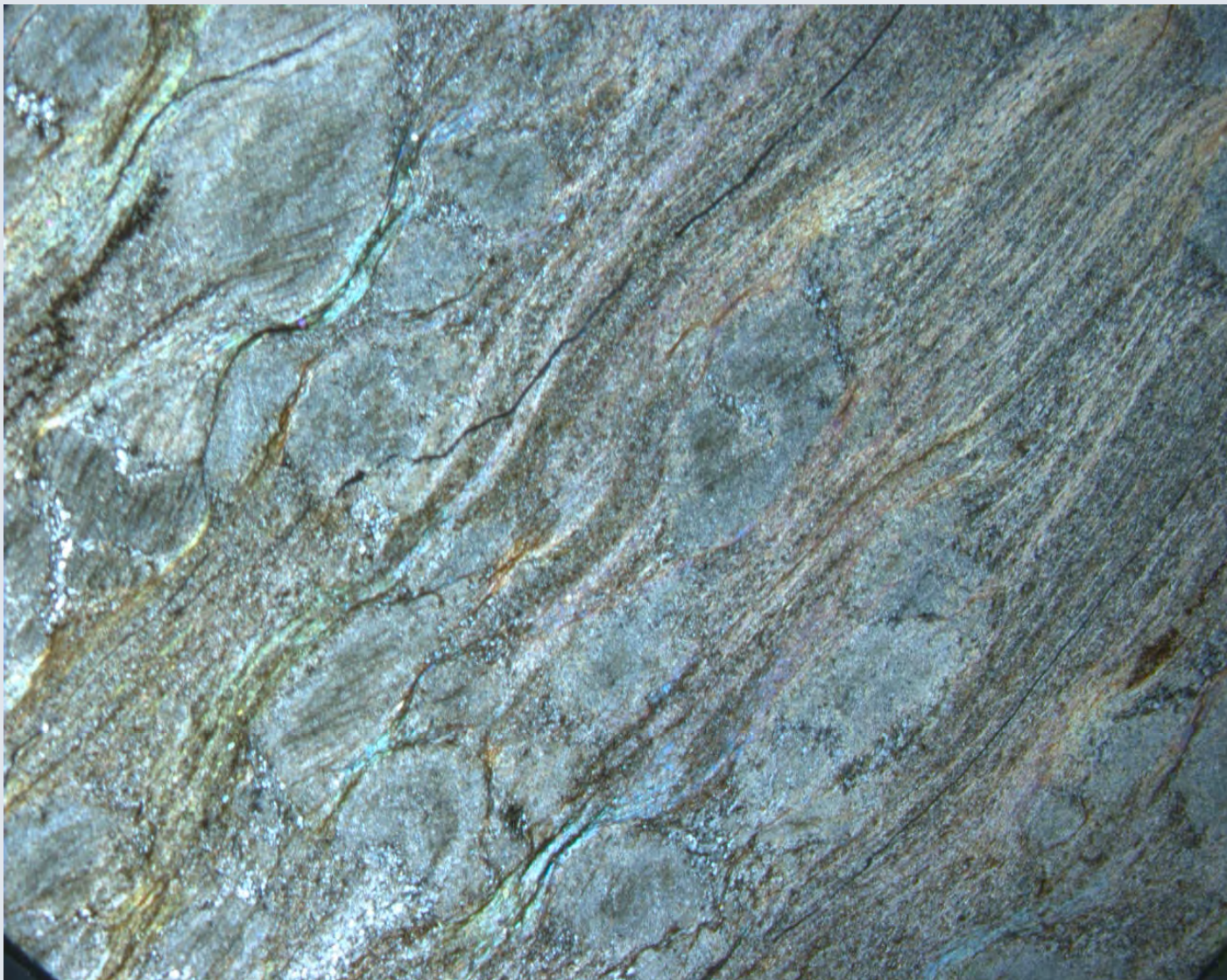




- Micaschistes à biotite – muscovite – staurotide (coin supérieur gauche) – cordiérite (poecilitique, teintes jaunâtres).
- Paragenèse peu fréquente ayant un domaine de stabilité très limité.
- Rouvials, Hérault, France.



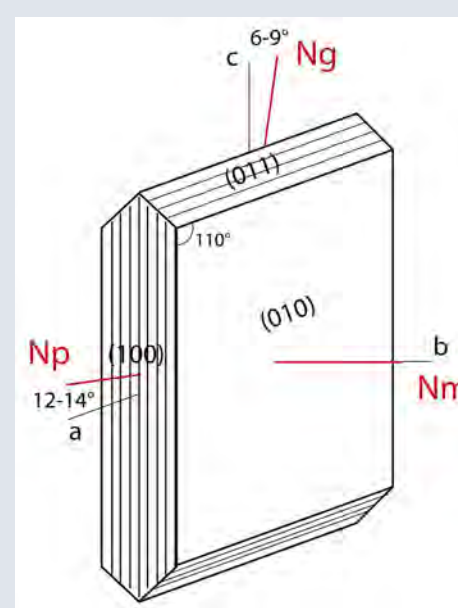
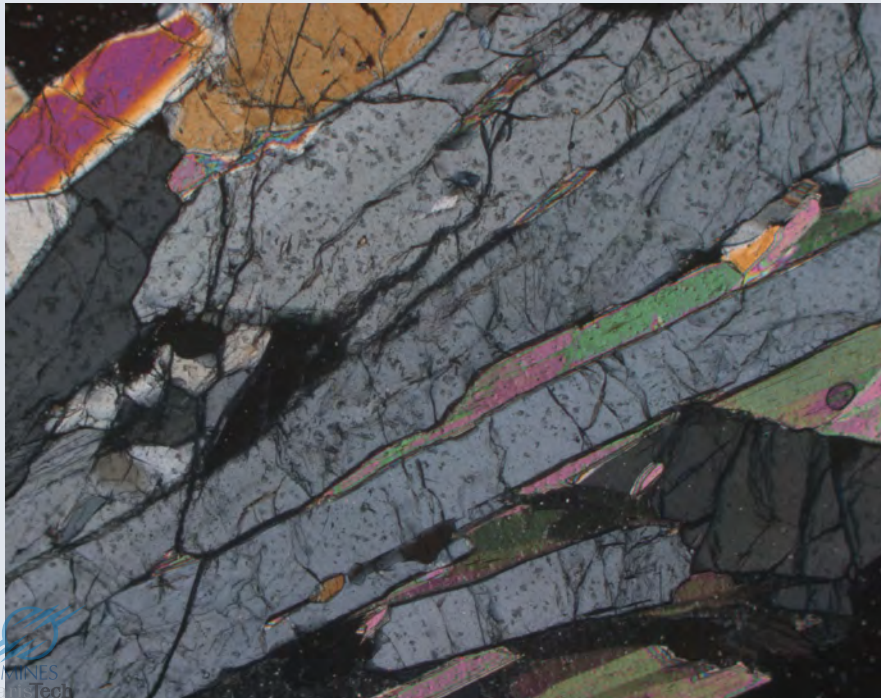
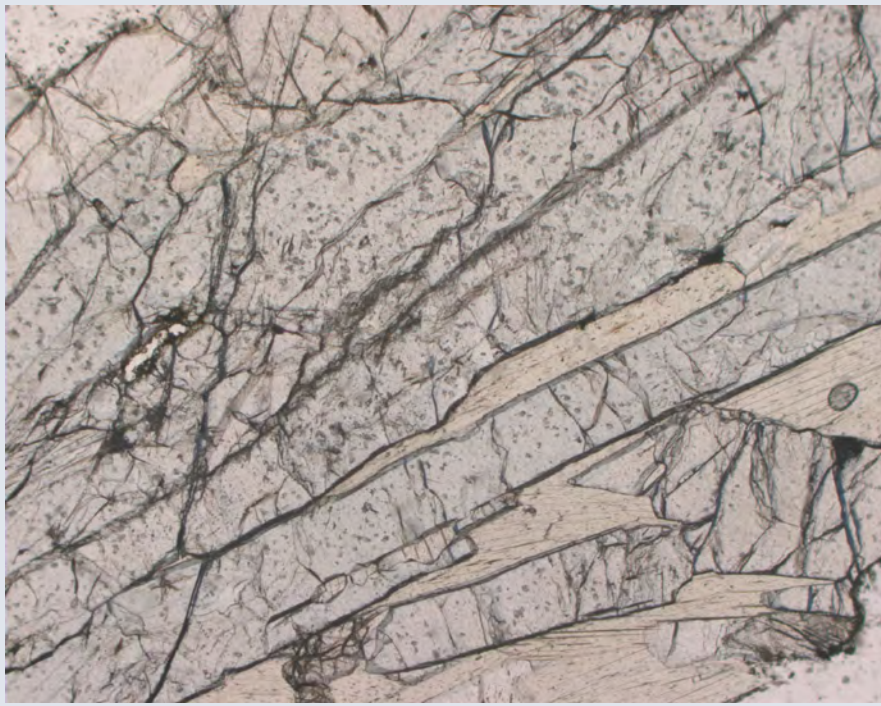




## Cordiérite

- Schiste tacheté à nodules de cordiérite dans l'auréole de métamorphisme de contact d'un granite.
- Granite de Saint-Arnac, Pyrénées orientales, France .





## Saphirine

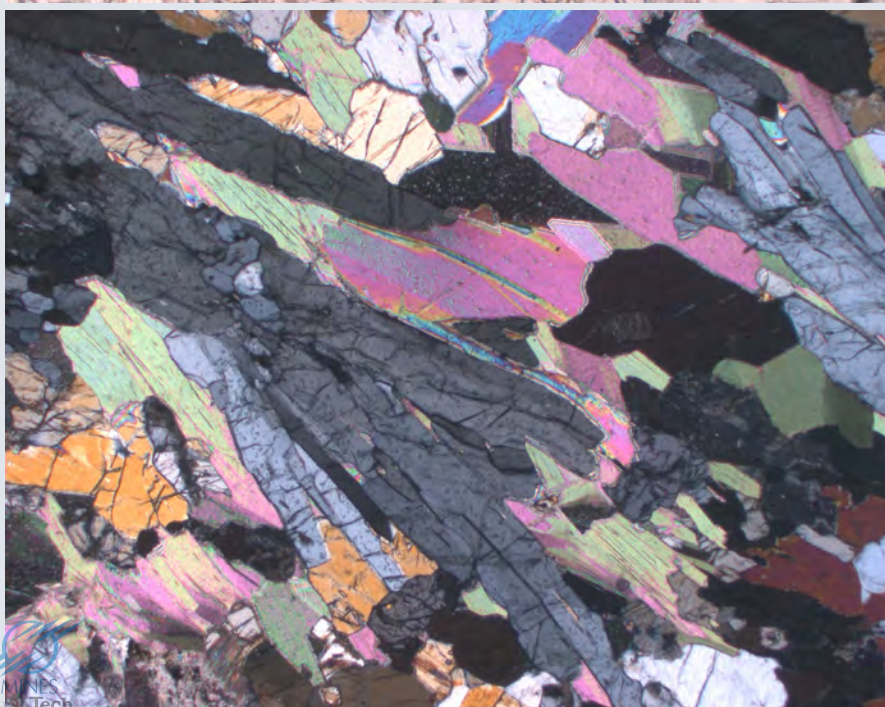
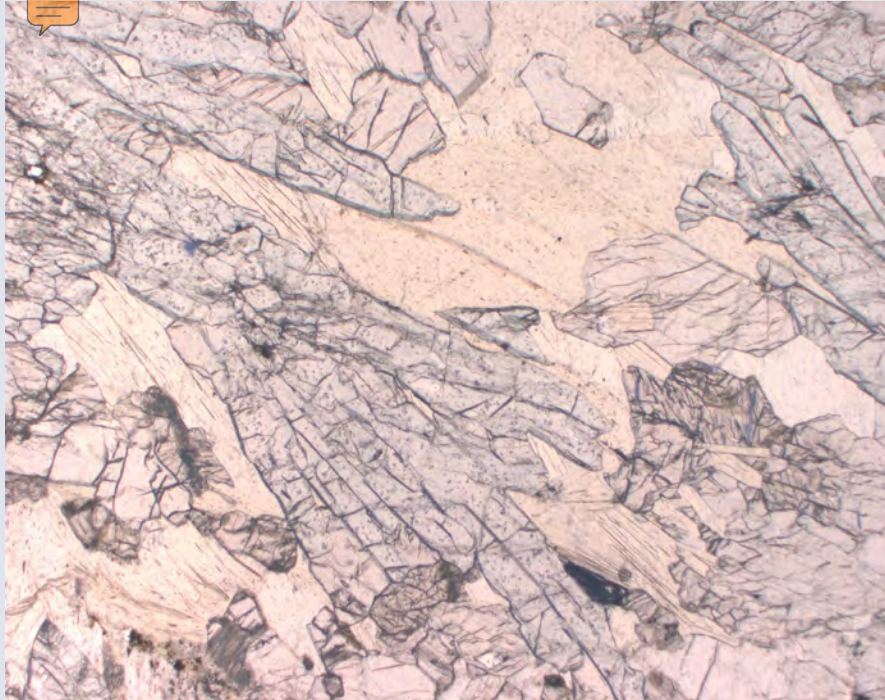
$(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{O}_6(\text{SiO}_4)$

- Monoclinique.
- Cristaux en tablettes selon (010), ou en grains.
- Clivage (010) mauvais, clivages (100) et (001) très mauvais.
- Angle (100) – (001) =  $110^\circ$

R







# Saphirine

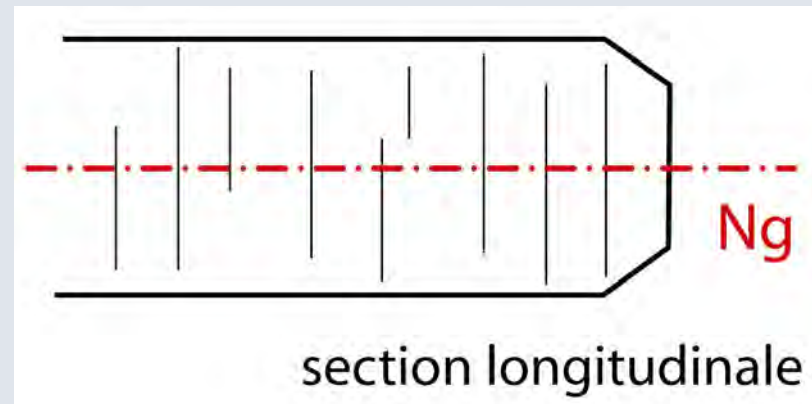
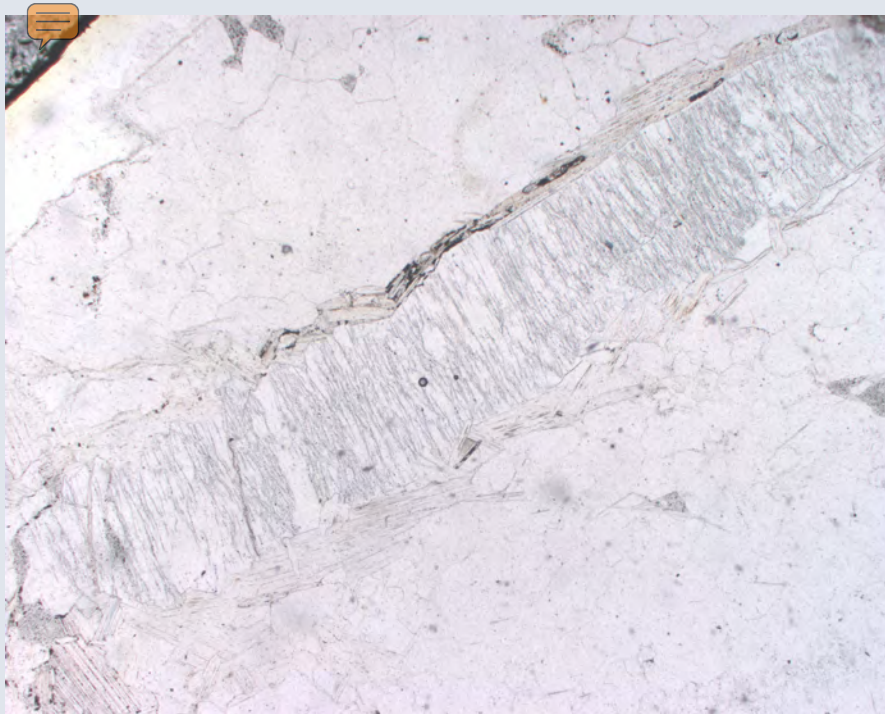


- En lame mince : incolore, bleu très pâle (image ci-contre) à bleu saphir, parfois rose orangé.
- Extinction droite sur les tablettes.
- Np 1,705 – 1,717  
Ng 1,711 – 1,724
- Indices forts du même ordre que celui du disthène ou des épidotes.
- Biréfringence  $\Delta = 0,006 - 0,007$
- Polarise dans les gris du premier ordre, parfois teintes anormales.
- Biaxe négatif  $2V = 50 - 70^\circ$
- $r < v$
- Le minéral rosé, avec un bon clivage formant le fond de la lame est de la gédrite  (amphibole orthorhombique).
- Fiskenaesset, Groenland.

R







## Topaze

$$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2$$

- Orthorhombique.
- Souvent en prismes, base en octogone (120), (110) (rarement net).
- Clivage (001) bon.
- Incolore
- Indices moyens
 

|    |               |
|----|---------------|
| Ng | 1,606 – 1,635 |
| Np | 1,616 – 1,644 |
- Pedra Branca, Goias, Brésil

**AR**

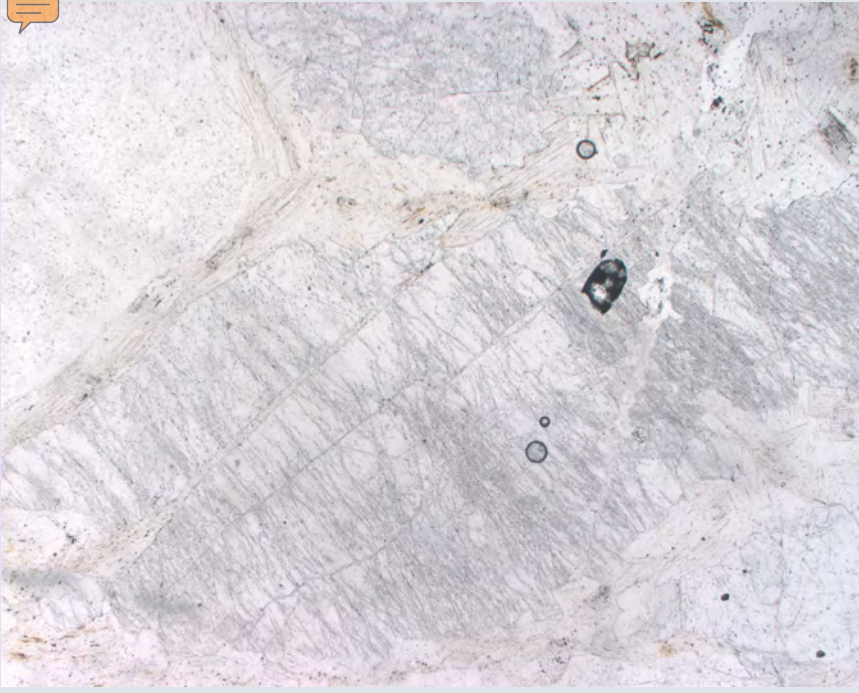




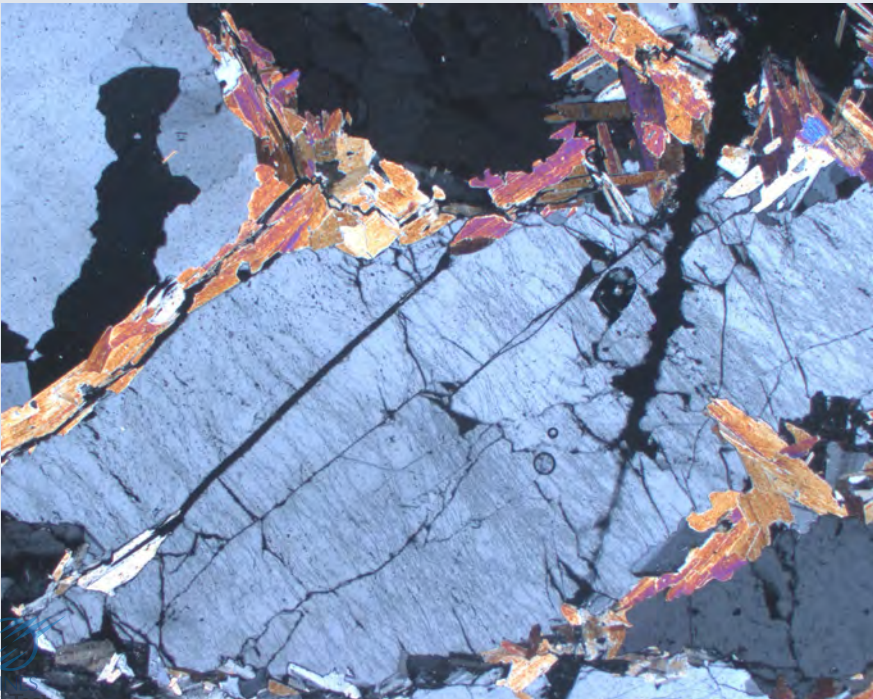


# Topaze

$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH}, \text{F})_2$



- Biréfringence  $\Delta = 0,008 - 0,011$   
Polarise dans les blancs du 1<sup>er</sup> ordre  
(comme le quartz).
- Extinction droite sur le prisme.
- Allongement négatif.
- Biaxe positif.
- $2V_z \ 48 - 68^\circ$   
 $r > v$



- Ressemble à l'andalousite mais en diffère par les clivages.
- La roche est un greisen avec quartz et mica lithinifère.
- Pedra Branca, Goias, Brésil.

AR



# Béryl $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$



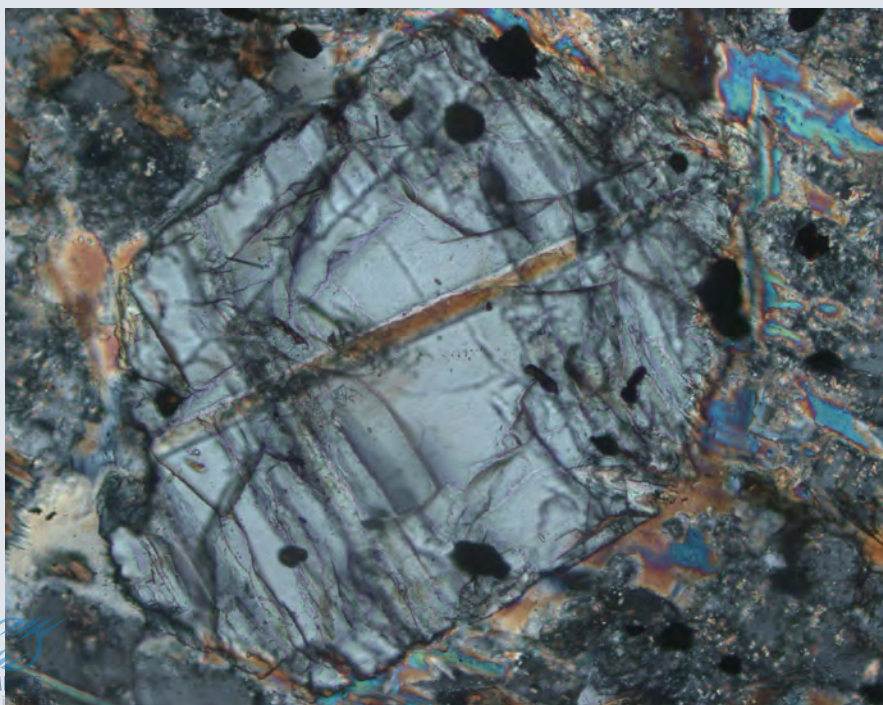
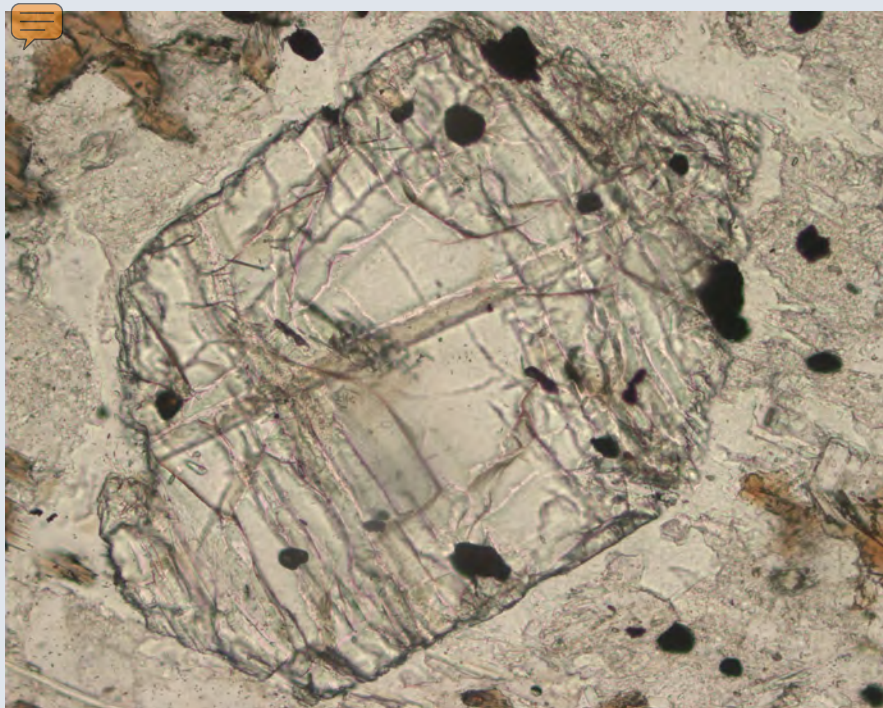
- Hexagonal.
- Prisme hexagonal ou plus souvent sans forme.
- Clivage basal (0001) mauvais.
- Incolore.
- Np 1,557 – 1,599  
Ng 1,560 – 1,602
- Allongement du prisme négatif.
- Biréfringence  $\Delta = 0,004 - 0,009$
- Uniaxe négatif.
- Ressemble au quartz mais indice plus fort (voisin de celui de la muscovite) et uniaxe négatif.
- L'apatite a un indice plus fort.
- Extrémité d'un grand cristal prismatique au contact de quartz (à gauche) et d'albite (coin inférieur droit).

AR





# Corindon $\text{Al}_2\text{O}_3$

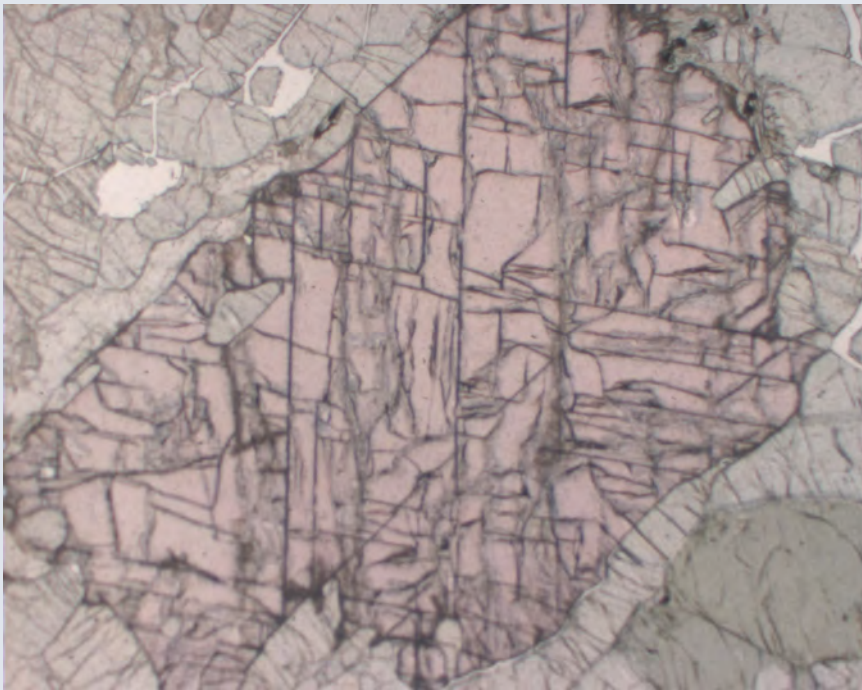


- Rhomboédrique.
- Souvent automorphe en cristaux en barillet ; également en grain.
- Incolore.
- Pas de clivage mais plans de séparation (0001).
- Très dur, souvent mal poli et plus épais que le reste de la lame.
- **Indices très forts** analogues à ceux du grenat.

Np 1,760 – 1,763

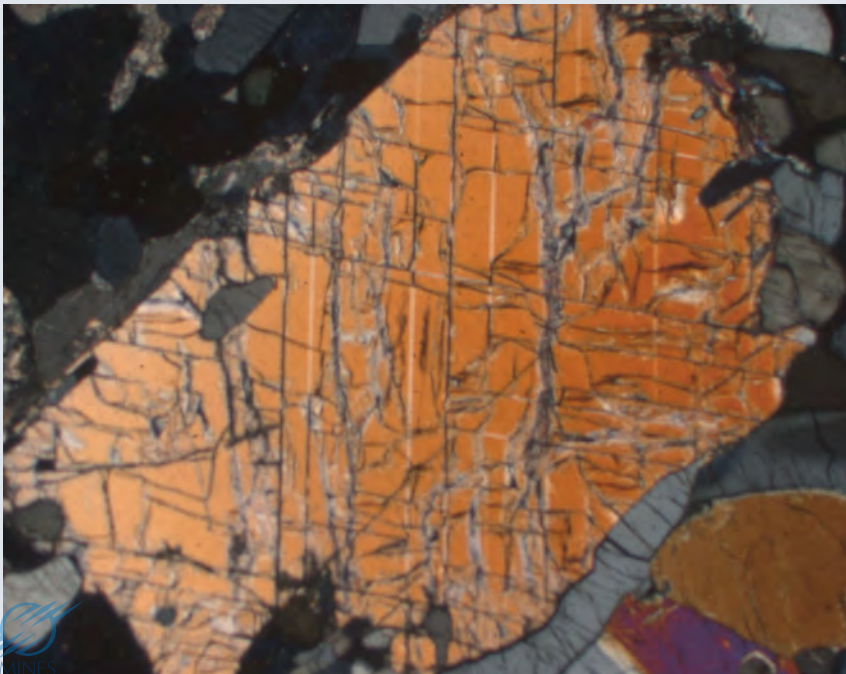
Ng 1,768 – 1,772

- Extinction droite, allongement négatif.
- Macle lamellaire ( $10\bar{1}1$ ) (rhomboèdre).
- Biréfringence  $\Delta = 0,008 - 0,009$   
Polarise dans les blancs du 1<sup>er</sup> ordre  
(analogue au quartz)
- Uniaxe négatif
- Batère, Pyrénées orientales, France.



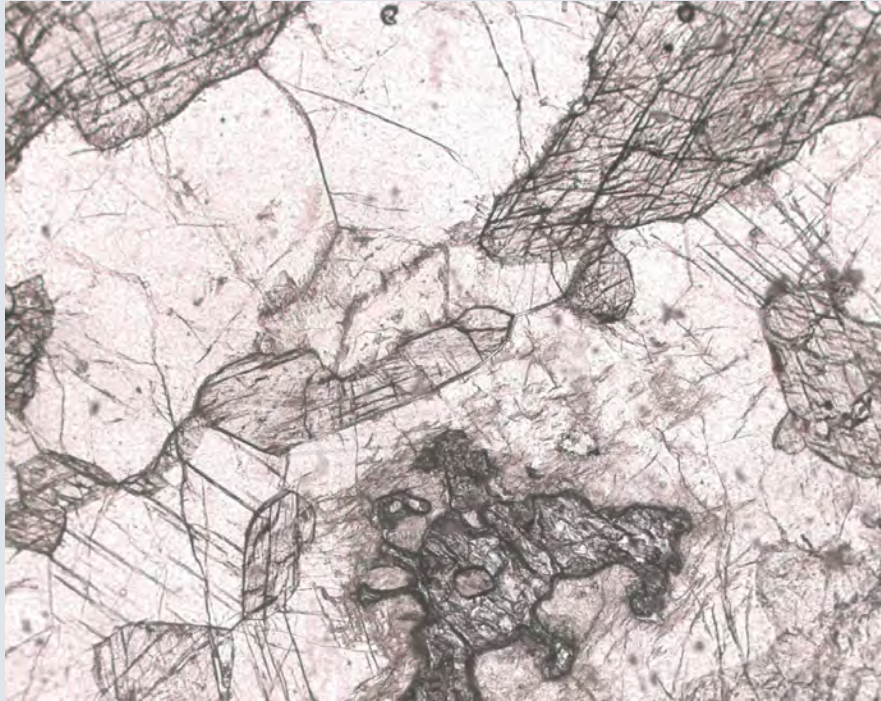
## Corindon $\text{Al}_2\text{O}_3$

- Section un peu épaisse de façon à faire ressortir la couleur rose.
- Les minéraux incolores du fond sont de la zoïsite. □
- Le minéral gris vert en bas à droite est de l'amphibole.
- Tanzanie.



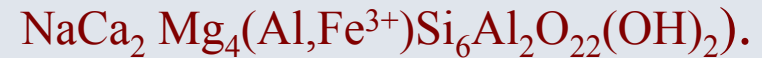
R





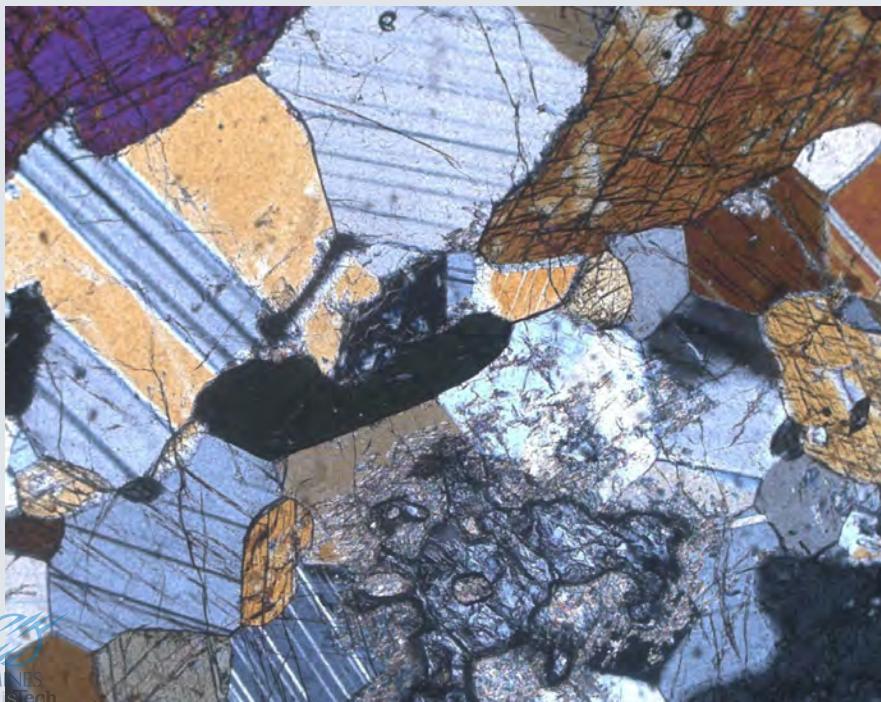
## Corindon $\text{Al}_2\text{O}_3$

- Amphibolite de haute pression à corindon et pargasite (hornblende de formule :



- Corindon xénomorphe dans la partie basse de la lame, au centre (fort relief).
- La lame est un peu épaisse (le plagioclase polarise en jaune).
- Chantelle, Haute Loire, France.

**R**



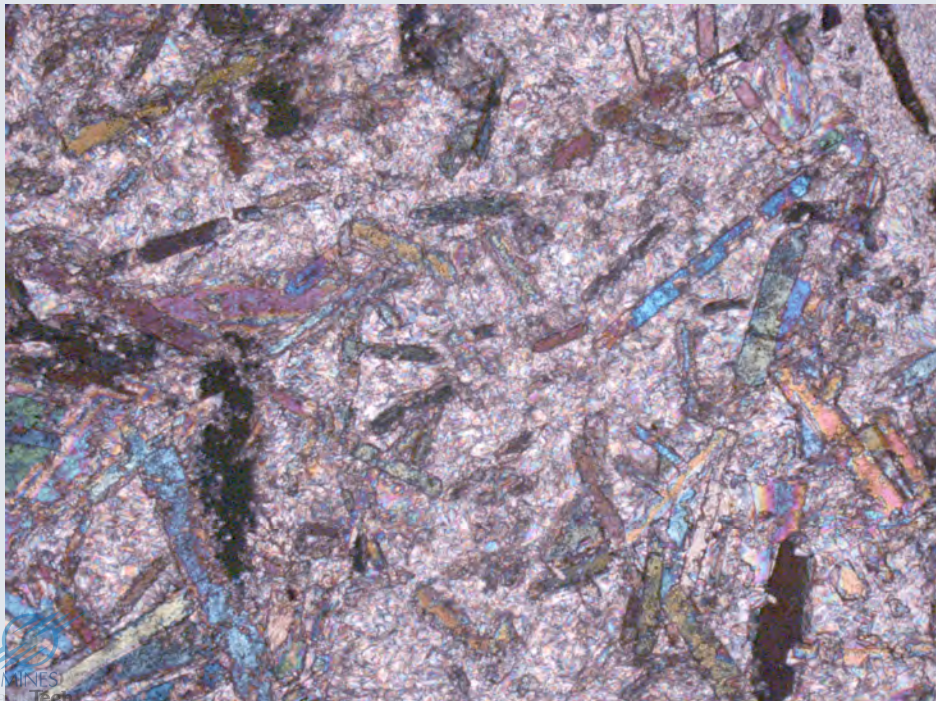




## Diaspore $\text{AlO}(\text{OH})$

- Orthorhombique.
- Tablette aplaties selon (010).
- Incolore.
- Clivages : (010) bon (peu visible ici), (110) moins net.
- Indices forts analogues à ceux des pyroxènes et des épidotes.
- Np 1,682 – 1,706
- Ng 1,705 – 1,725

AR







## Diaspore $\text{AlO}(\text{OH})$

- Biréfringence  $\Delta = 0,047 - 0,050$   
Teintes vives (un peu délavées) du 3<sup>ème</sup> ordre.
- Nm est perpendiculaire aux tablettes : extinction droite.
- Allongement positif ou négatif.
- Biaxe négatif.
- $2V = 84 - 86^\circ$
- $r < v$  faible.
- Zone d'altération hydrothermale développée sur une dacite.
- Le fond de la roche est constitué de pyrophyllite
- Tiouit, Maroc.

*Même échantillon que la photo précédente*

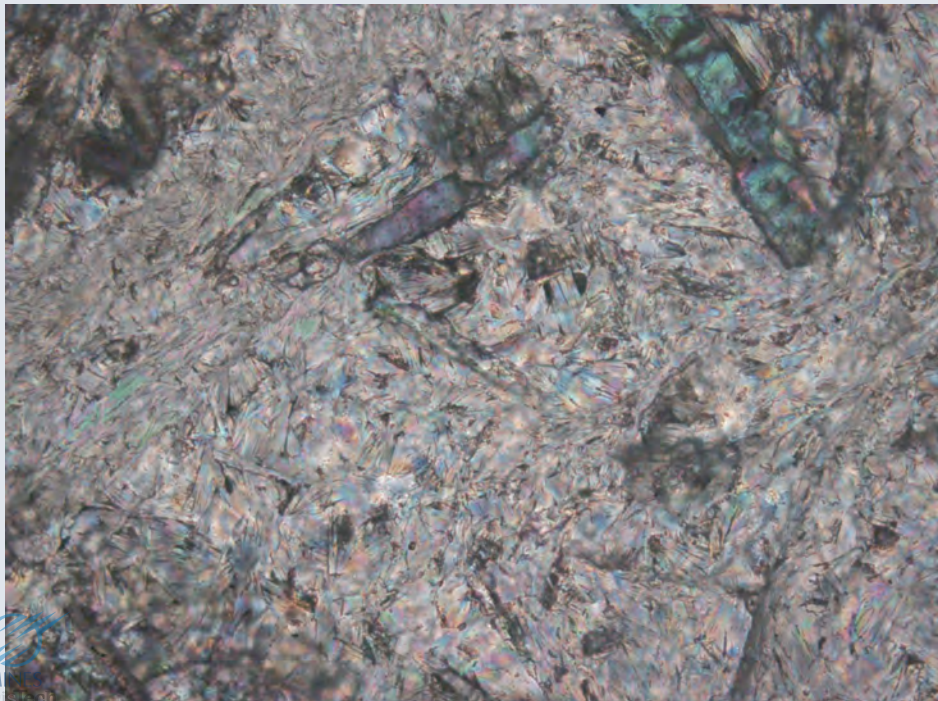
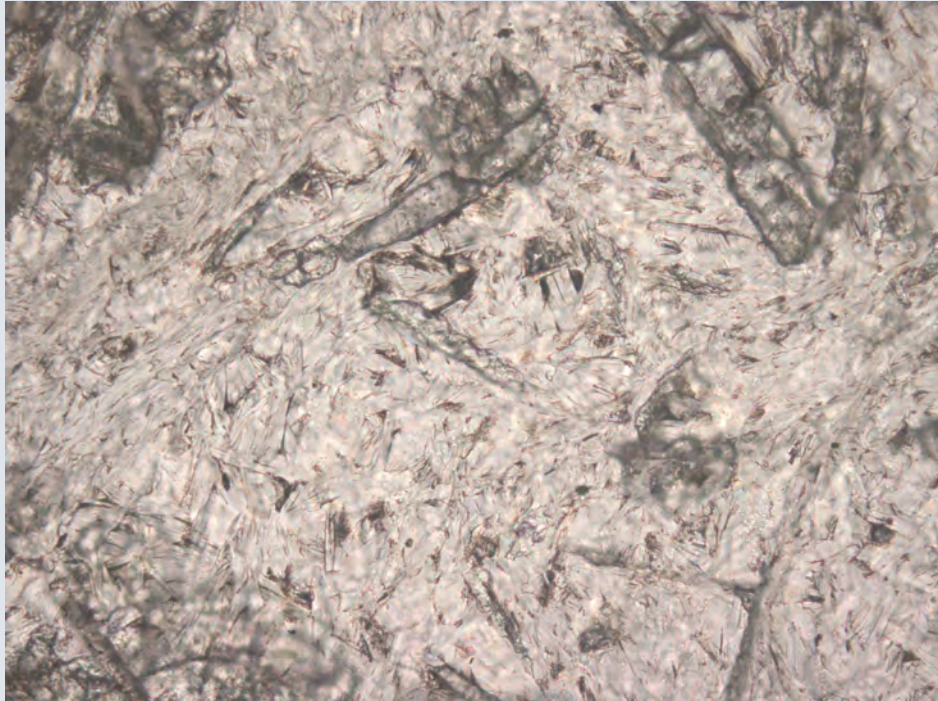
AR







# Pyrophyllite

$$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$$


- Monoclinique ou triclinique.
- Feuilletés analogues à ceux des micas, grain fin, gerbes, rosettes.
- Clivage (001) parfait.
- $N_p$  1,552 – 1,556  
 $N_g$  1,596 – 1,601
- Biréfringence  $\Delta = 0,048 - 0,050$
- Indices et teintes de polarisation analogues à ceux de la muscovite.
- Biaxe négatif.
- $2V$  53 – 63°
- Non dispersif.
- Tiouit, Maroc
- **Indistinguable de la muscovite** et du talc, si ce n'est par la valeur de  $2V$  et les gisements

R



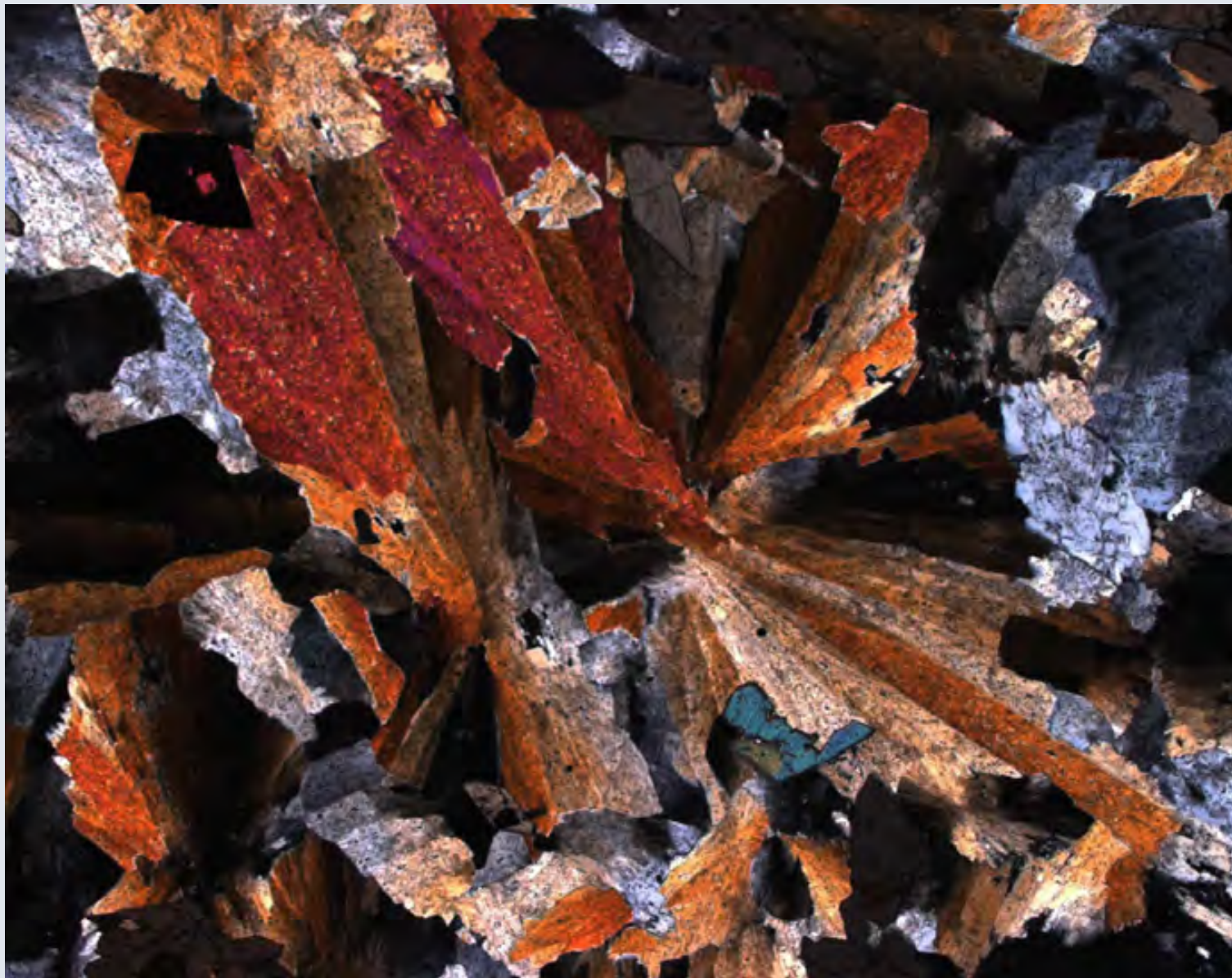




| Nom<br>formule chimique                                                                                   | symétrie                  | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice                      | Indice<br>baume 1.54<br>quartz 1.55<br>tourmaline 1.65<br>grenat 1.75<br>2.8 | Couleur<br>Altérations                                                                                   | Biréfringence<br>1er ordre<br>gris<br>blanc<br>0.009<br>0.018<br>0.054<br>2e + 3e<br>ordres<br>sensibles<br>faibles<br>vives | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Andalousite<br>$\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                                  | orthor<br>pseudo<br>quadr | poeciloblastes - faciès chialstolite<br><br>section basale (011)<br>section longitudinale | 1.629<br>1.651                                                               | incolore<br>(rose)                                                                                       | 0.009<br>0.011                                                                                                               | B-<br>(2V=83-85°)          |
| Sillimanite<br>$\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                                  | orthor                    | fibrolite<br><br>section basale (010)<br>section longitudinale                            | 1.657<br>1.682                                                               | incolore<br>(fibrolite<br>brunâtre)                                                                      | 0.020<br>0.022                                                                                                               | B+<br>(2V=21-30°)          |
| Disthène (Kyanite)<br>$\text{Al}_2\text{SiO}_5$                                                           | tricl                     | <br>section basale (100)<br>section longitudinale                                         | 1.712<br>1.729                                                               | incolore<br>(bleu<br>pâle)                                                                               | 0.015<br>0.017                                                                                                               | B-<br>(2V=82°)             |
| Staurolite<br>$(\text{Fe, Mg, Zn})_2\text{Al}_9\text{Si}_4\text{O}_{22}(\text{OH})_2$                     | orthor                    | poeciloblastes<br><br>section basale (010)<br>section longitudinale                       | 1.739<br>1.762                                                               | jaune<br>jaune pâle<br>jaune d'or                                                                        | 0.013<br>0.015                                                                                                               | B+<br>(2V=84-88°)          |
| Chloritoïde<br>$(\text{Fe, Mg, Mn})_2(\text{Al Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_4$ | mnocl<br>/tricl           | associations<br>en rosettes<br><br>section basale (001)<br>macle (001)                    | 1.682<br>1.723                                                               | gris vert<br>vert olive                                                                                  | 0.010<br>0.012<br>dispersif<br>teintes anormales<br>gris vert,<br>vert olive...                                              | B+<br>(2V=36-70°)          |
| Cordiérite<br>$(\text{Mg, Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$                                      | orthor<br>pseudo<br>hex   | poeciloblastes<br><br>section basale (010)<br>section longitudinale                       | 1.530<br>1.578                                                               | incolore<br>altération en<br>produits jaunes<br>isotropes<br>/muscovite<br>halos pléochr.<br>sur zircons | 0.018 (Fe)<br>macles<br>polysynthétiques<br>à 60°<br>à haute<br>température                                                  | B-<br>(2V=42 -<br>104°)    |
| Grenat<br>$(\text{Fe, Mg, Mn, Ca})_3(\text{Al, Fe}^{3+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$                       | cub                       | trapézoèdre<br>dodécaèdre..<br><br>section basale (001)<br>poeciloblastes                 | 1.710<br>2.00                                                                | incolore<br>(rose<br>brun<br>brun vert)                                                                  | isotrope<br>les grenats calciques<br>ont souvent une faible biréfringence                                                    |                            |



## 5 - minéraux calciques et magnésiens







# 5- les minéraux calciques et magnésiens

## *Sommaire (début)*

- Carbonates :

- Calcite  $\text{CaCO}_3$
- Dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
- Ankérite  $\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$
- Magnésite  $\text{MgCO}_3$
- Sidérite  $\text{FeCO}_3$
- Rhodocrosite  $\text{MnCO}_3$



## Groupe des épidotes

- Épidote – pistachite  $\text{Ca}_2(\text{Al, Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
- Clinozoïsité  $\text{Ca}_2\text{Al Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
- Piémontite  $\text{Ca}_2(\text{Mn}^{3+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}) \text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
- Zoïsité  $\text{Ca}_2\text{Al Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
- Allanite  $(\text{Ca,Ce,La})_2(\text{Al, Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
- Lawsonite  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2, \text{H}_2\text{O}$
- Pumpellyite  $\text{Ca}_2(\text{Al, Mg, Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})\text{Al}_2(\text{Si}_2(\text{O, OH})_7)(\text{SiO}_4)(\text{O, OH})_3$





# 5- les minéraux calciques et magnésiens

## *Sommaire (suite)*

- Anorthite  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
- Diopside  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
- Amphiboles calciques
  - Hornblende  $(\text{Na}, \text{K})_{0-1}\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al})_5(\text{Si}, \text{Al})_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2$
  - Trémolite – actinote  $\text{Ca}_2(\text{Fe}, \text{Mg})_5\text{Si}_8 \text{O}_{22}(\text{OH})_2$
- Grenats calciques  $\text{Ca}_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
- Vésuvianite  $\text{Ca}_{19}(\text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{Al}, \text{Fe})_{10}(\text{Si}_2\text{O}_7)_4(\text{SiO}_4)_{10}(\text{OH}, \text{F})_{10}$
- Prehnite  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
- Scapolites
  - Marialite  $3(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8), \text{NaCl}$
  - Meionite  $3(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8), \text{Ca}(\text{CO}_3, \text{SO}_4)$
- Wollastonite  $\text{CaSiO}_3$







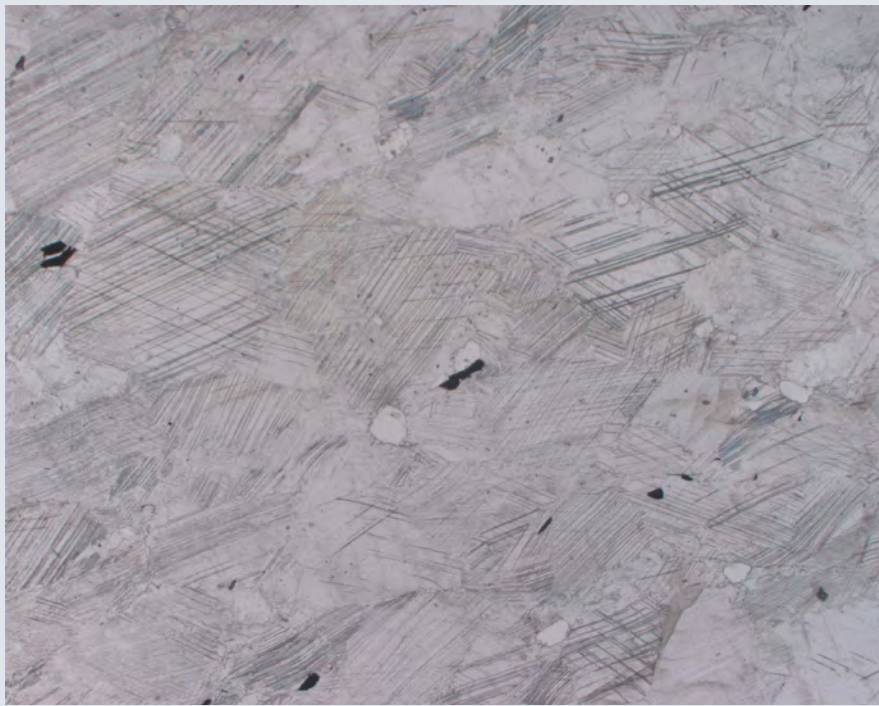
# 5- les minéraux calciques et magnésiens

## *Sommaire (fin)*

- Talc  $\text{Mg}_6(\text{Si}_8\text{O}_{20})(\text{OH})_4$  ☐
- Périclase  $\text{MgO}$  ☐
- Brucite  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  ☐
- Les humites  $(1 - 4) \text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$  ☐
- Mélilites  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Na Ca AlSi}_2\text{O}_7 - \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$  ☐
- Forstérite  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  ☐
- Monticellite  $\text{CaMgSiO}_4$  ☐
- Sphène  $\text{CaTiSiO}_4$  ☐
- Pérovskite  $\text{CaTiO}_3$  ☐



# Calcite

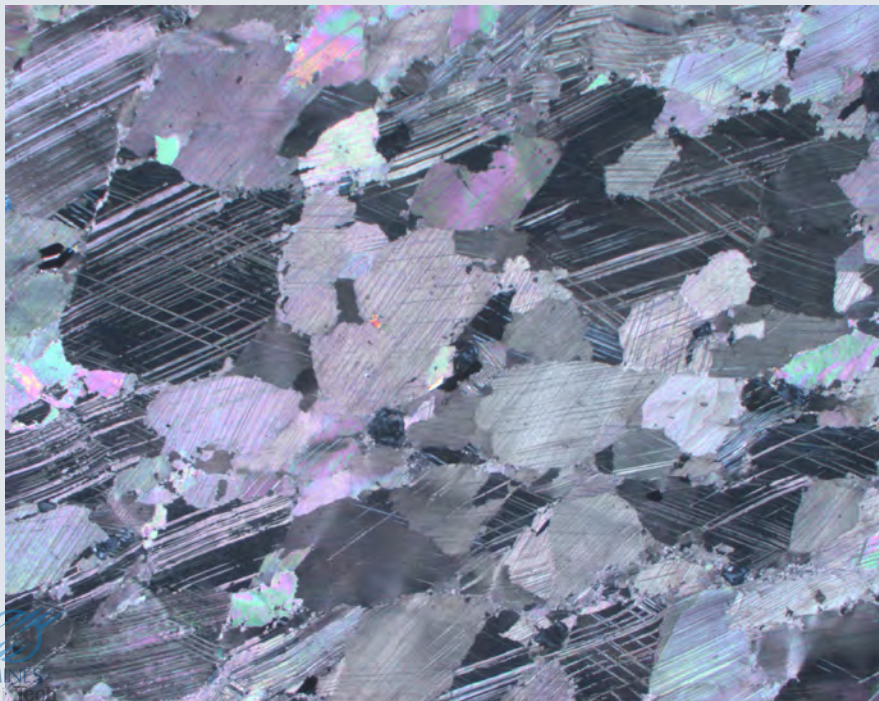


- Rhomboédrique.
- Rarement des formes propres.
- Clivages rhomboédriques ( $10\bar{1}1$ ).
- Incolore.
- Np 1,486 Ng 1,658

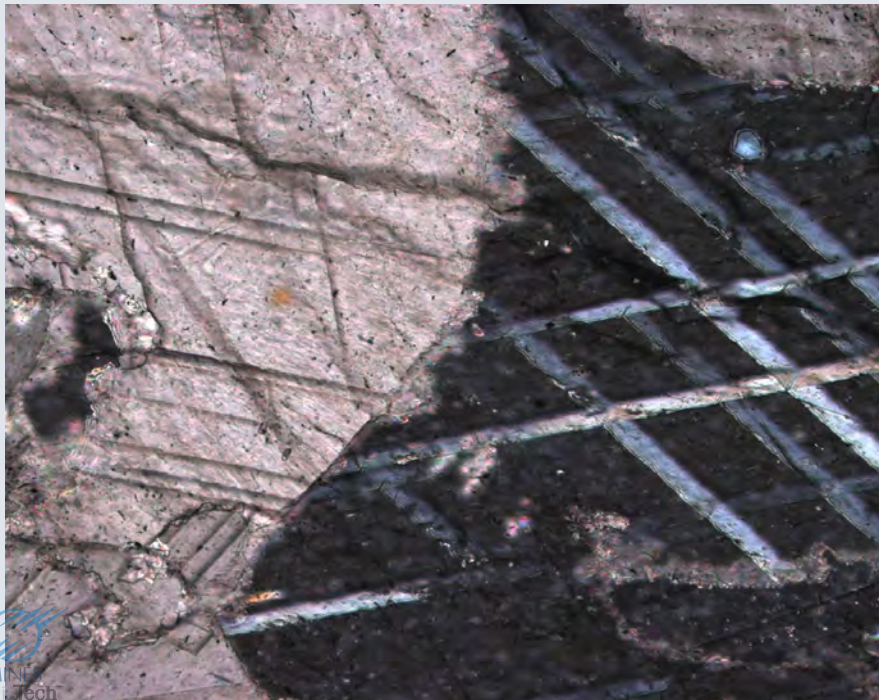
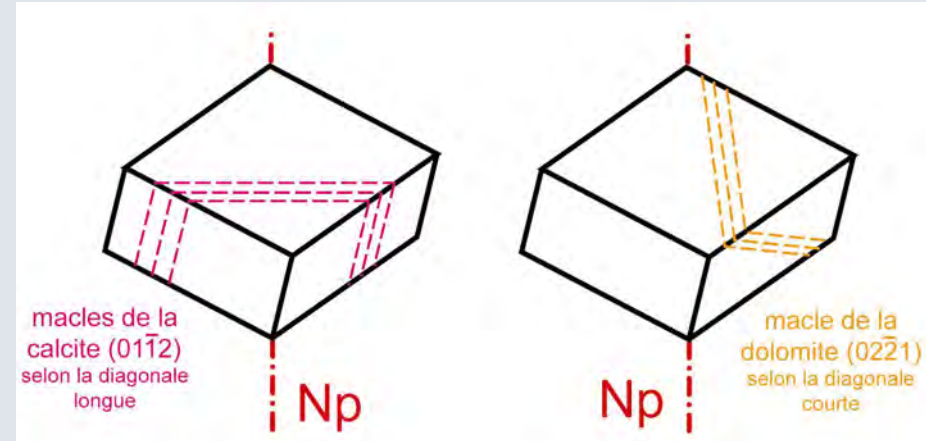
Très grandes variations de l'indice en fonction de l'orientation: indice inférieur à celui feldspath potassique à supérieur à celui du quartz : pléochroïsme de relief.

- Biréfringence  $\Delta = 0,172$   
Polarise dans les ordres supérieurs.
- Macle ( $01\bar{1}2$ ) très commune, (0001) commune.
- Uniaxe négatif.

TC

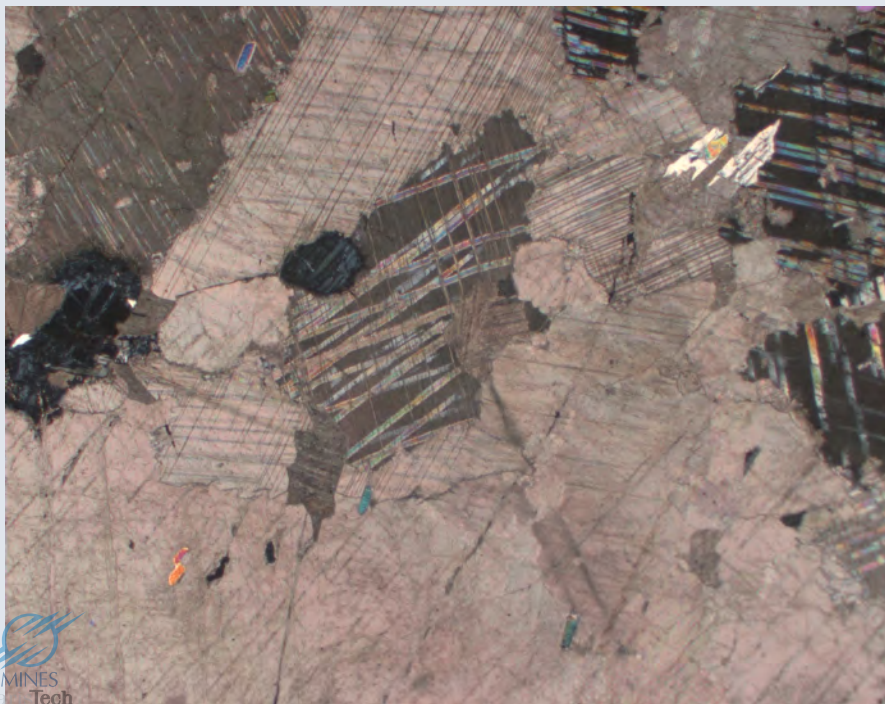
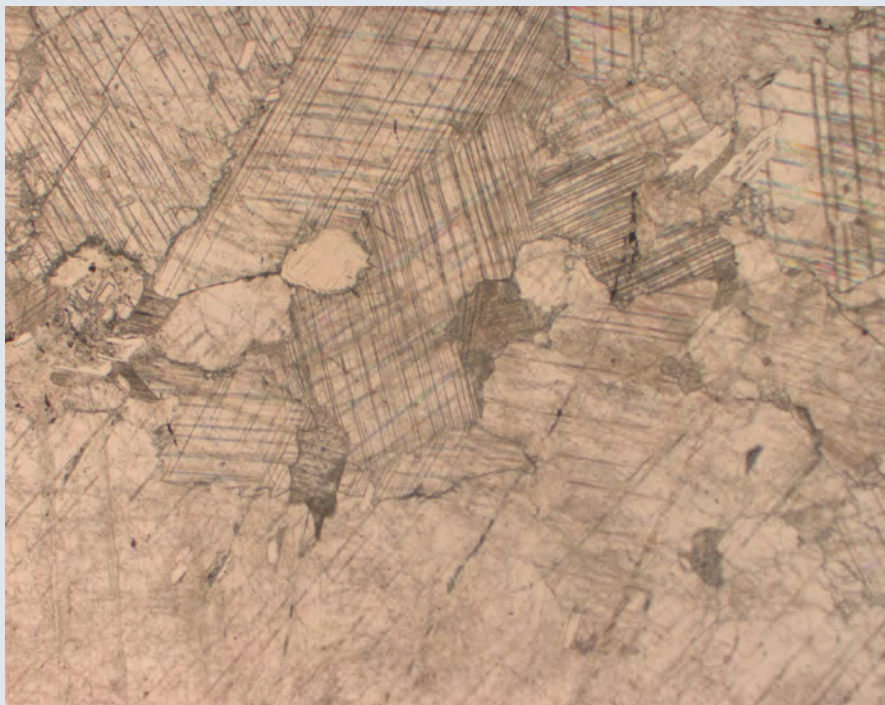






- Les macles de la **calcite** se disposent
  - $(10\bar{1}1)$  parallèlement aux clivages,
  - $(01\bar{1}2)$  dans la diagonale longue du losange des clivages (bien observable dans la plage de gauche).





# Dolomite



- Difficile à distinguer de la calcite au microscope.
- Rhomboédrique.
- Formes propres plus fréquentes que pour la calcite.
- Clivages rhomboédriques ( $10\bar{1}1$ ).
- Incolore.
- Indices un peu plus forts que ceux de la calcite :

Np 1,500

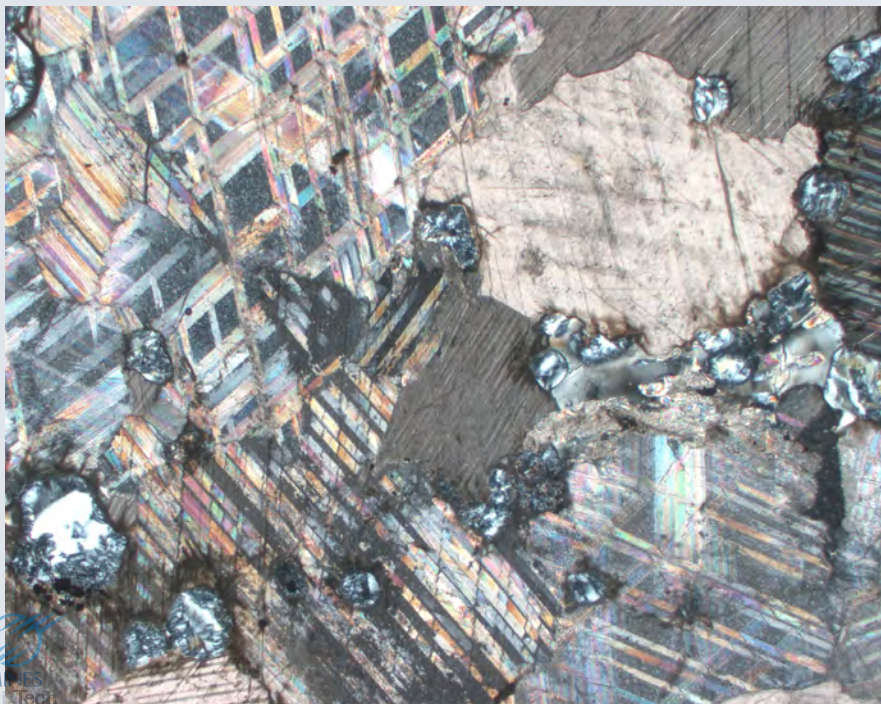
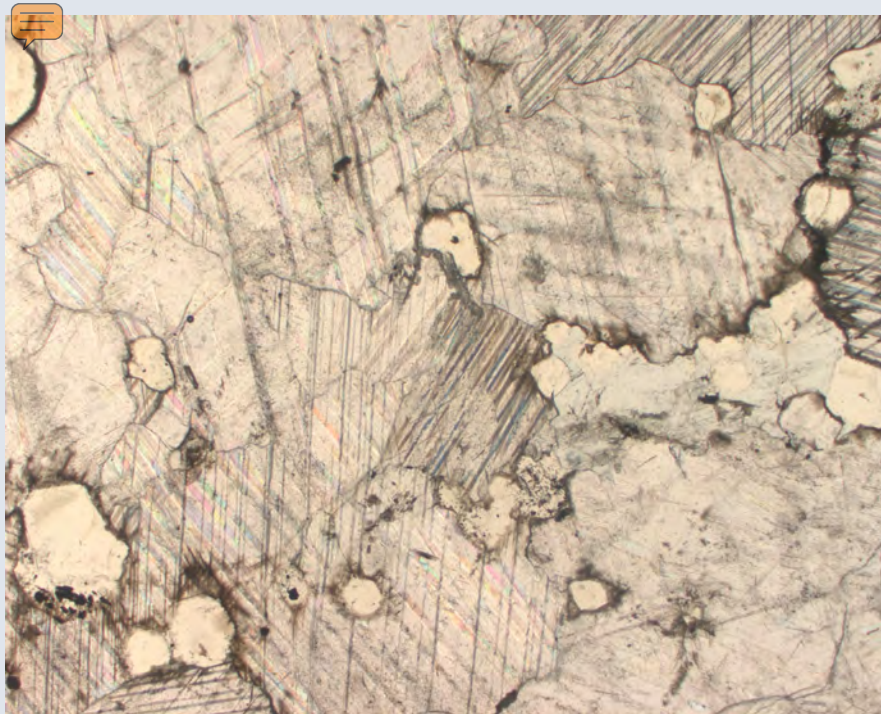
Ng 1,679

Pléochroïsme de relief.

- Biréfringence  $\Delta = 0,179$   
Polarise dans les ordres supérieurs.
- Macles (0001), (02-21) communes
- On retrouve les macles parallèles aux clivages de la calcite, mais la macle (02-21) se dispose selon la diagonale courte du losange des clivages (plage centrale)
- Uniaxe négatif





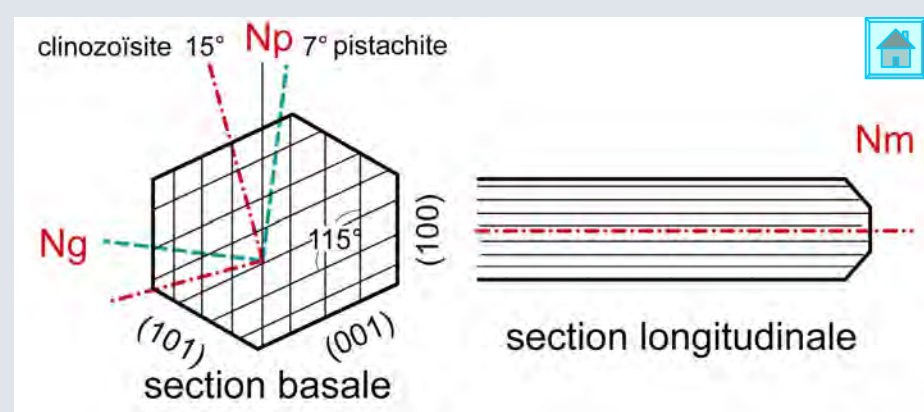


# Dolomite

- Dans les cristaux de ce marbre dolomitique s'observent des macles parallèles aux clivages.
- Les deux plages aux coins NW et SE montrent de plus des macles selon la petite diagonale des clivages, qui sont caractéristiques de la dolomite.
- Les plages incolores en LN sont du périclase ( $\text{MgO}$ ) altéré en brucite ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). □
- Costabonne, Pyrénées Orientales, France





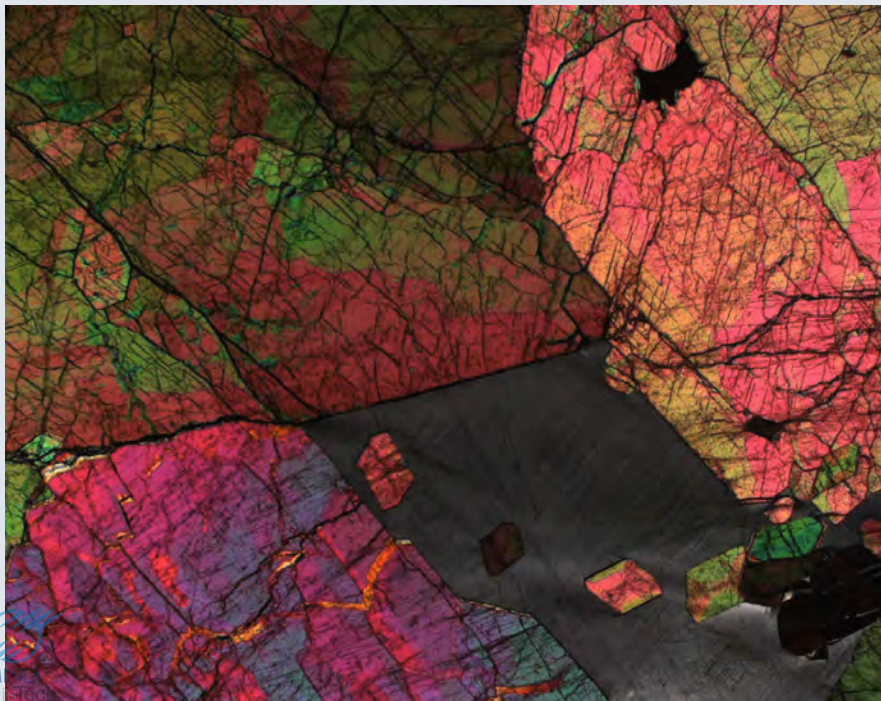


## Epidote (pistachite)

- Monoclinique.
- Série continue entre les termes purement alumineux (clinozoïsité) et le terme ferrifère (pistachite).
- Les propriétés optiques varient en fonction de la composition.
- Baguettes à sections losangiques ou hexagonales (cristaux inclus dans du quartz en haut de la photo) ; très souvent en grains.
- Clivages (001) bon, (100) net :  
sections longitudinales : un seul clivage  
sections basales 2 clivages à 115° (/65°)  
(cristal au SE).







# Epidote : pistachite

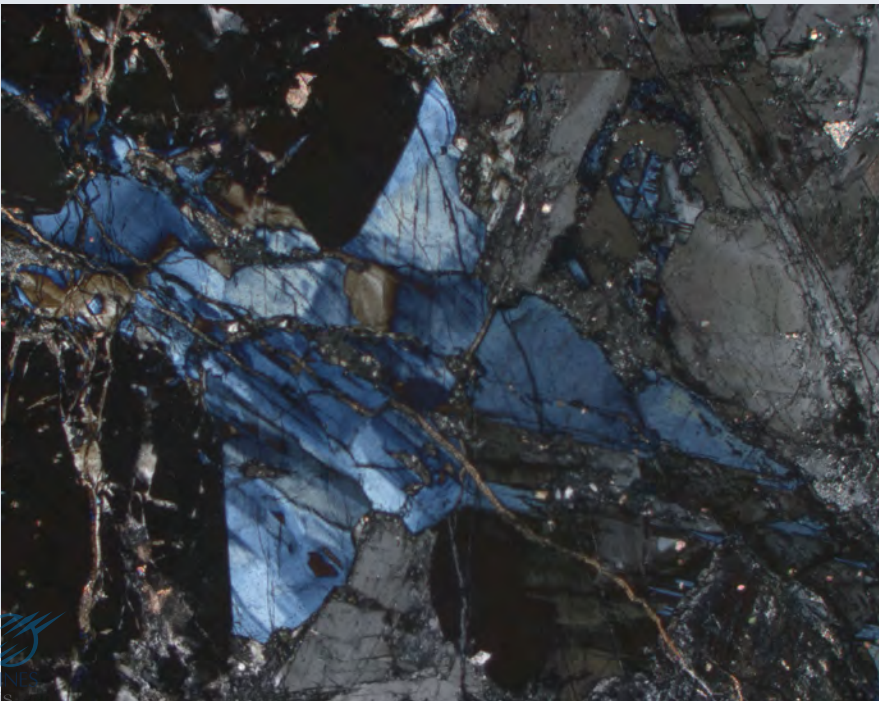
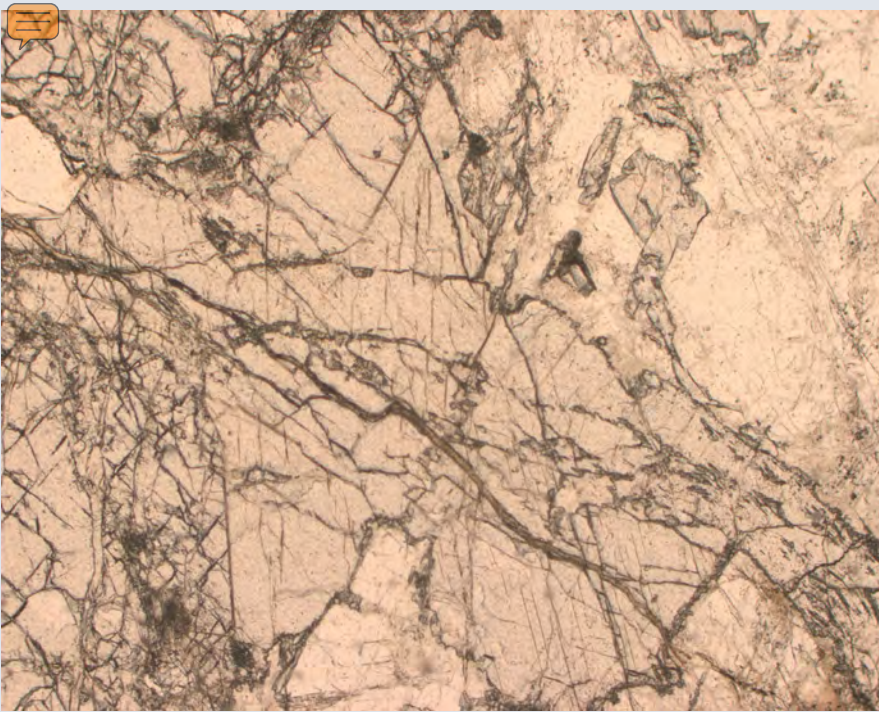


- Vert – vert jaune ; pléochroïsme net.
- Np 1,715 – 1,751  
Ng 1,725 – 1,797
  - Indices élevés de l'ordre de ceux du grenat
- Biréfringence  $\Delta = 0,015 - 0,049$ 
  - Teintes vives des 2<sup>ème</sup> – 3<sup>ème</sup> ordre.
  - Minéral dispersif.
  - Les teintes de polarisation varient rapidement au sein d'un même cristal (« manteau d'Arlequin »).
- Les sections longitudinales s'éteignent droit, les sections basales obliquement sur le clivage (100) ( $0 - 7^\circ$ ).
- Biaxe négatif  $2V \ 90 - 116^\circ$
- $r > v$
- Allous, Anti-Atlas, Maroc.

C







# Epidote : clinozoïsite



- Incolore.
- Np 1,670 – 1,715  
Ng 1,690 – 1,734
  - Indices élevés de l'ordre de ceux du grenat.
- Biréfringence  $\Delta = 0,005 - 0,015$ 
  - Minéral dispersif : polarise dans des gris, bleu violacé, parfois brunâtre.
- Les sections longitudinales s'éteignent droit, les sections basales obliquement sur le clivage (100) ( $0 - 54^\circ$ ).
- Biaxe positif  $2V \ 14 - 90^\circ$
- $r < v$

## C

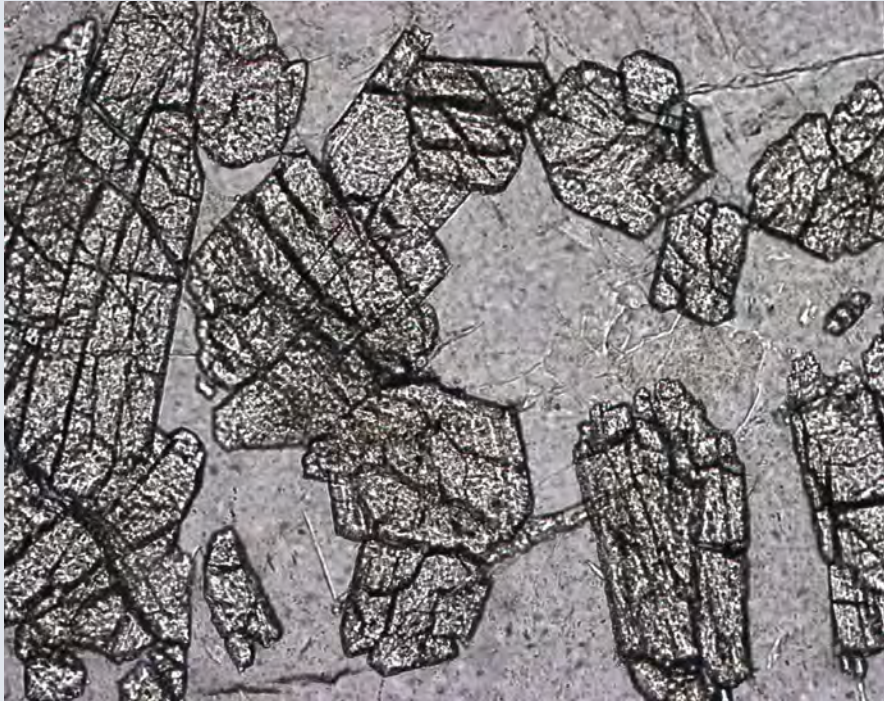
- La roche contient également du grenat (partie gauche : isotrope, indice analogue à celui de la clinozoïsite) et de la vésuvianite (à droite : indice un peu plus faible que l'épidote, polarise en gris sombre). 
- Prémian, Hérault, France .





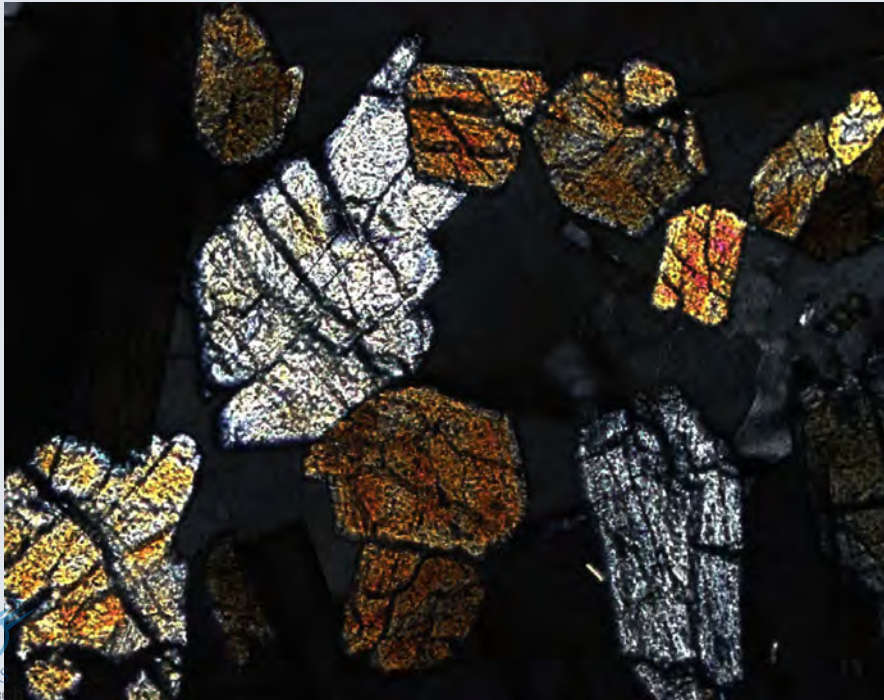


# Epidote



- Terme peu ferrière.
- Cristaux automorphes montrant les formes et clivages (en inclusion dans du quartz).
- Incolore ou légèrement jaunâtre.
- Teintes de polarisation dans les gris jaune, jaunâtre, orangé.
- Noter l'extinction oblique sur le clivage de la baguette en bord gauche (le plan de polarisation est N-S).

C





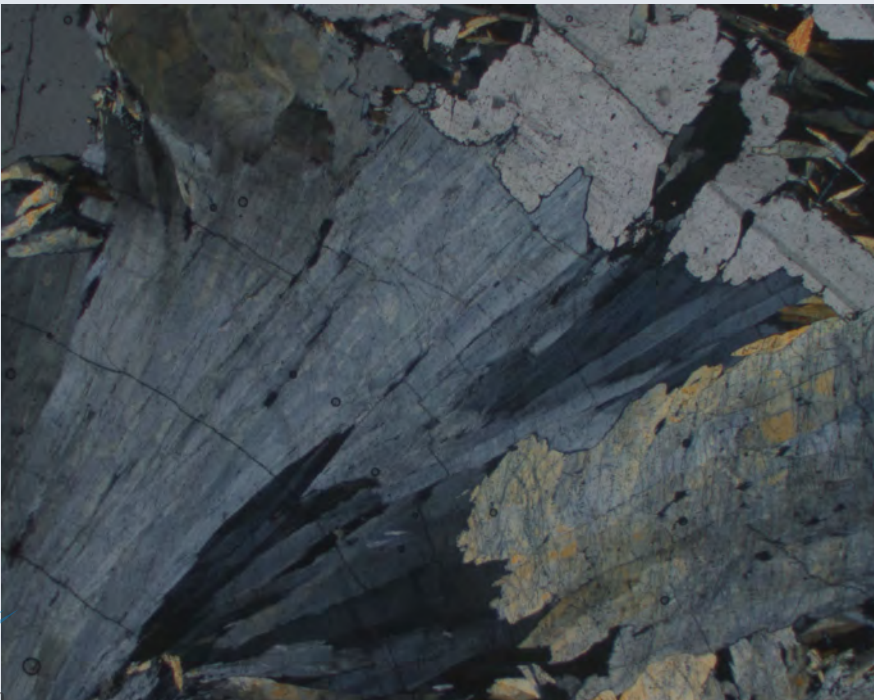
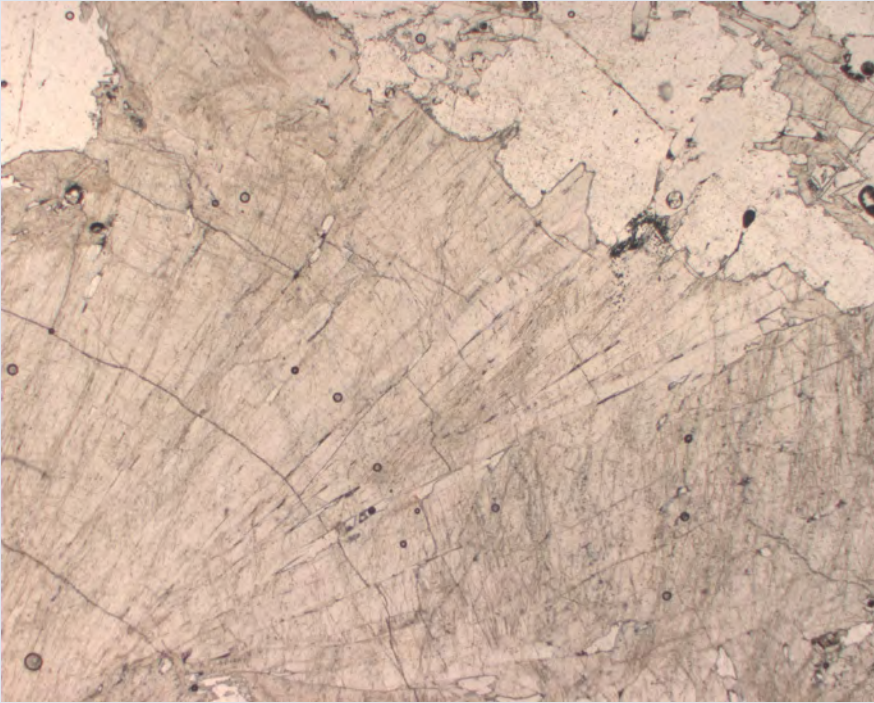


# Epidote

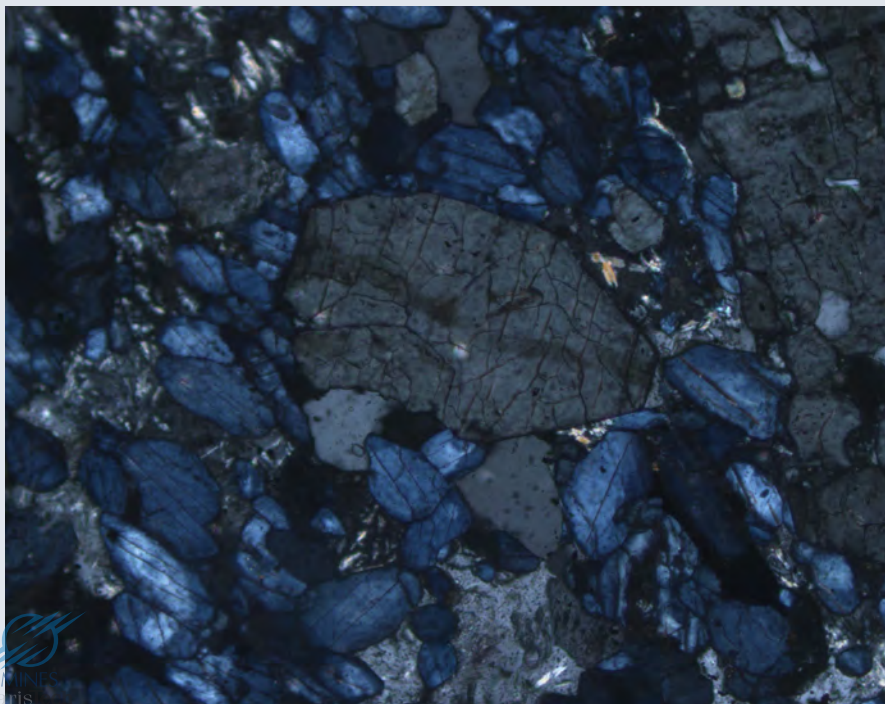
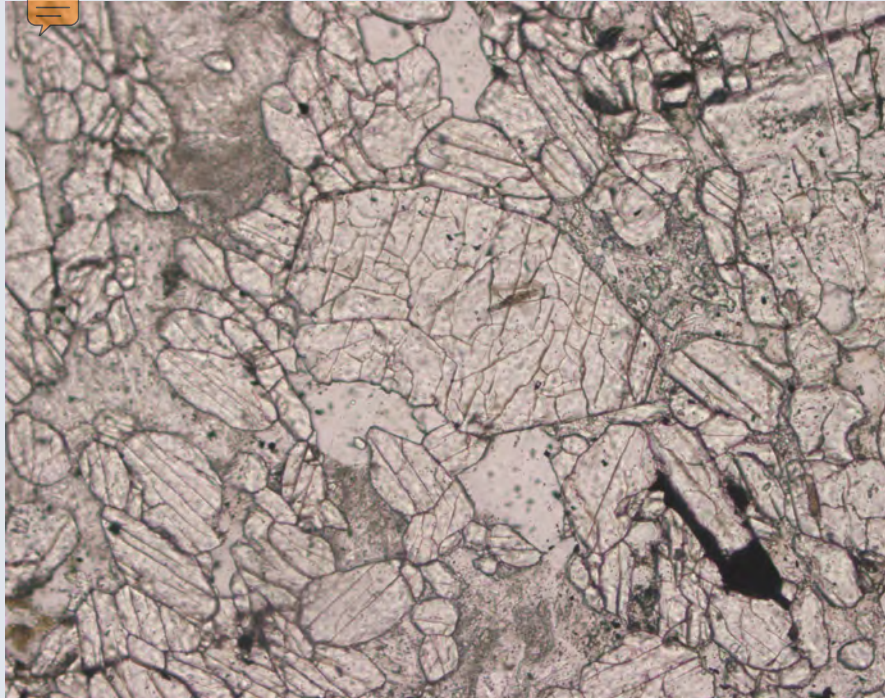
- Épidote peu ferrifère voisine du pôle clinozoïsite.
- Cristaux en baguettes allongées disposés en gerbes (en bordure d'un filon).
- Incolore.
- Teintes de polarisation gris bleu, jaune pâle.

C

- Les plages incolores polarisant en gris dans la partie supérieure de la photo sont de l'axinite. 
- Le Bourg d'Oisan, Isère, France.







# Zoïsite

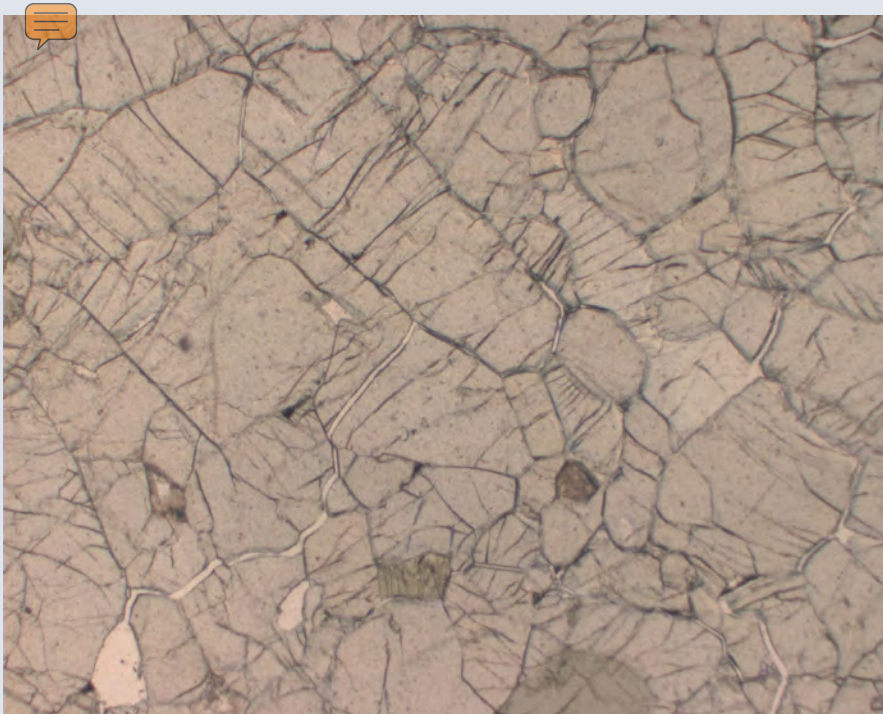


- Orthorhombique.
- Polymorphe (de haute pression) de la clinozoïsite.
- Comme la clinozoïsite :
  - Incolore
  - Indices forts .
    - Np 1,685 – 1,705
    - Ng 1,697 – 1,72
  - Teintes de polarisation anormales dans le gris, gris brun.
- En diffère par les clivages à angle droit et une extinction droite sur les clivages.
- L'image montre une association zoïsite (polarise en gris) – clinozoïsite (polarise en bleu de Prusse).

R





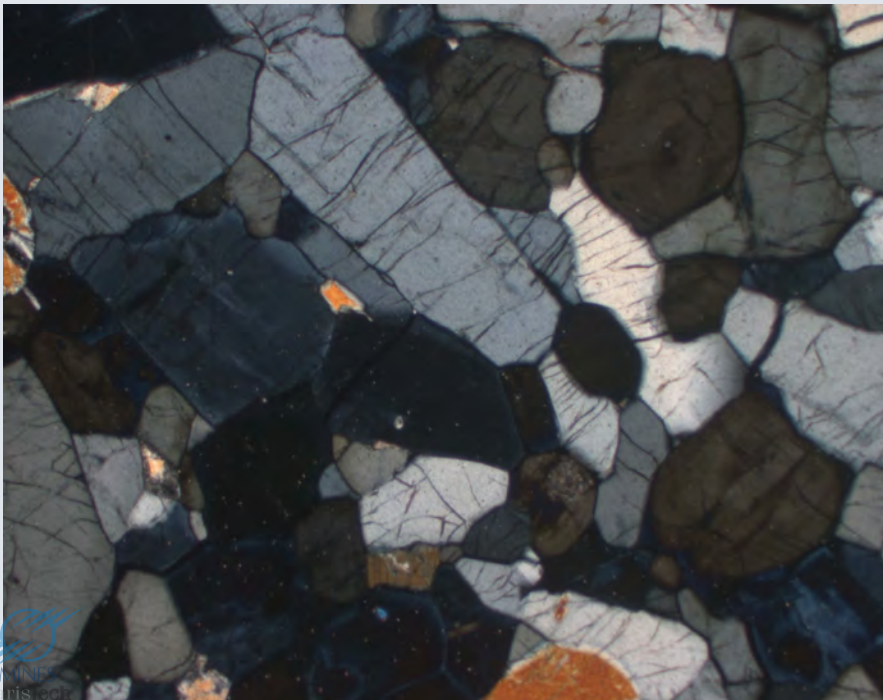


# Zoïsite

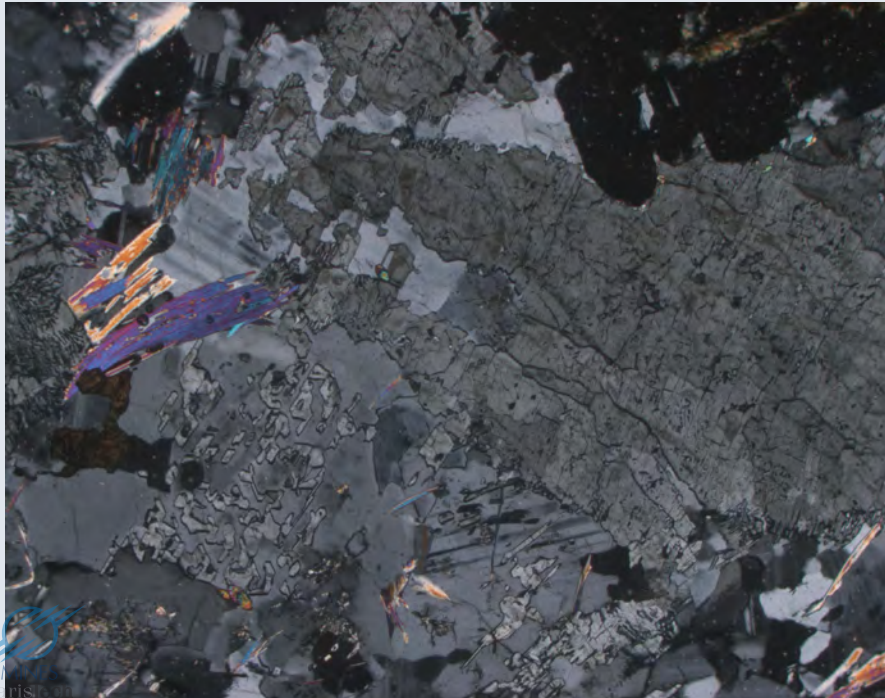
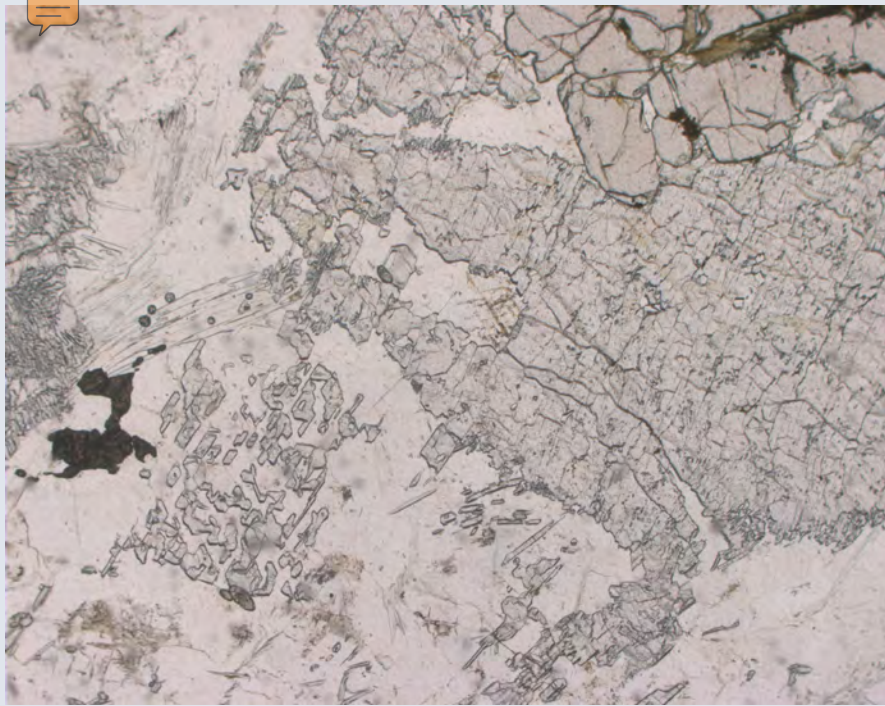


Le minéral brun vert, qui polarise dans des teintes vives en bas de l'image, est une amphibole.

Tanzanie.







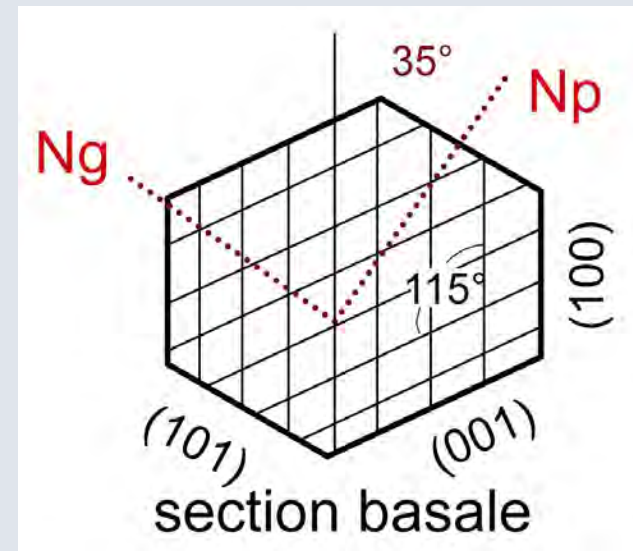
## Zoïsite



- Association symplectite zoïsite – andésine.
- Grenat (coin supérieur droit),
- Rutile (bord gauche),
- Phengite (coin supérieur gauche).





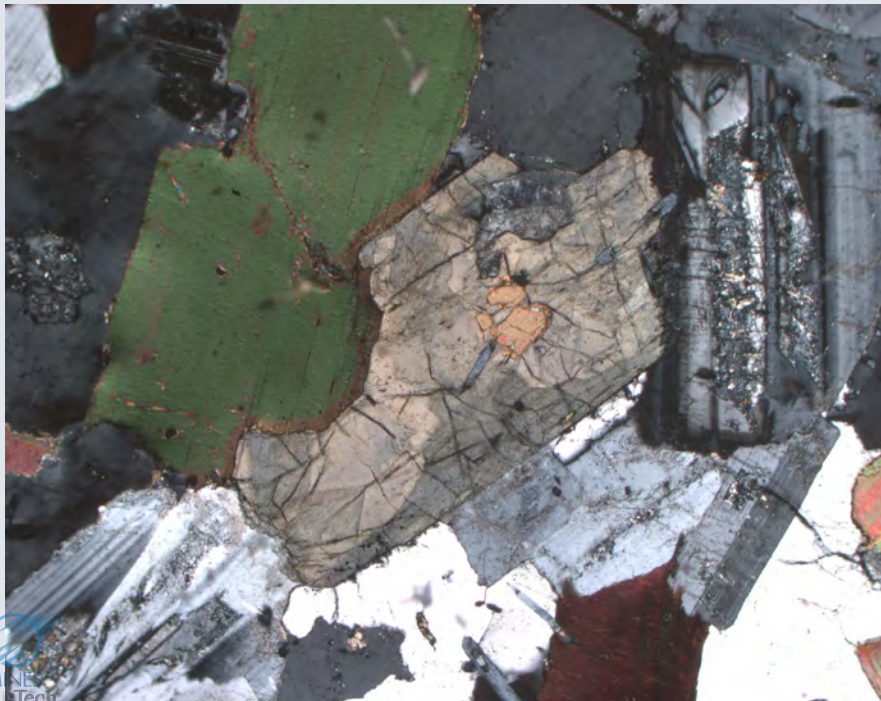


## Allanite

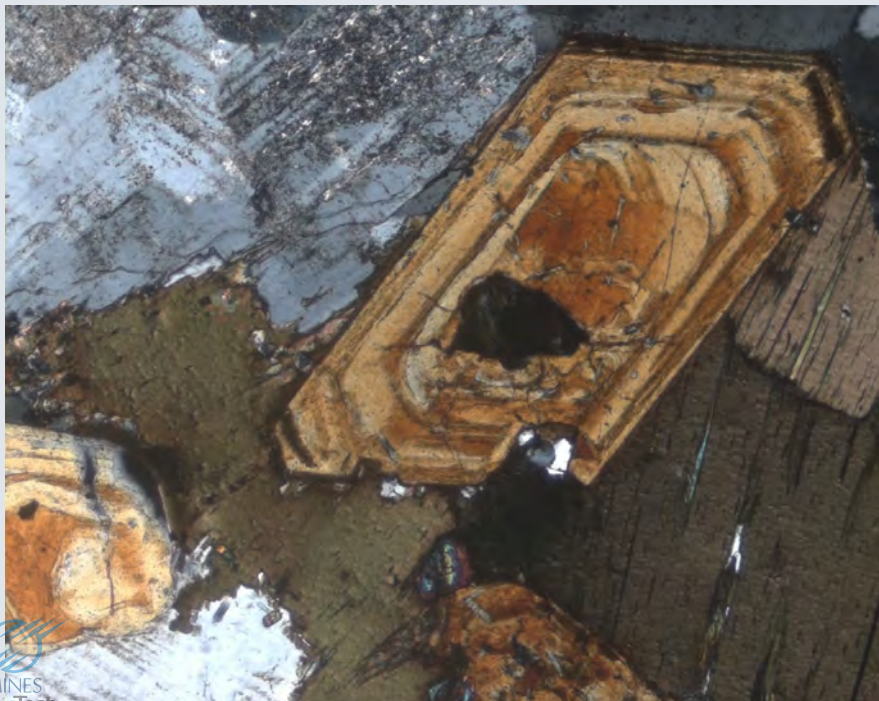


- Epidote à terres rares.
- Formes, clivages, indices (Ng 1,690 – 1,791 ; Np 1,706 – 1,828) analogues à ceux des autres épidotes.

AC







# Allanite



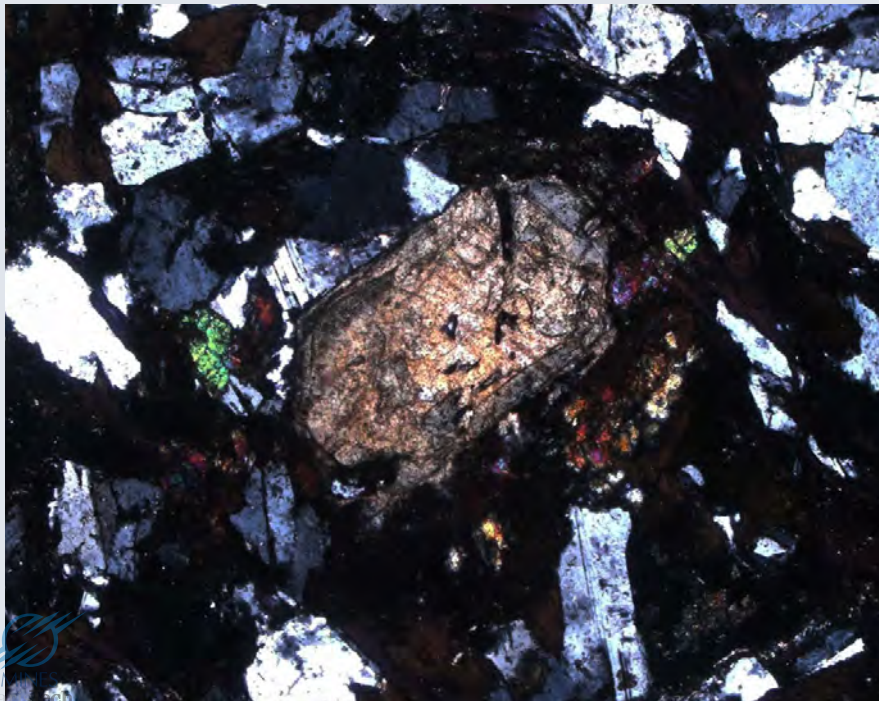
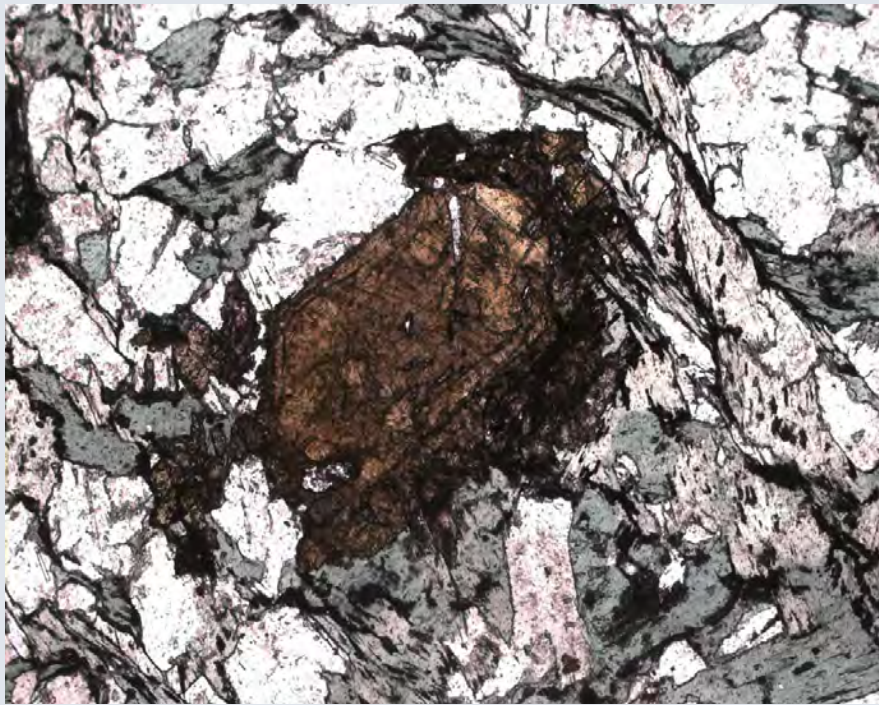
- Couleur brun jaune, brun violacé (« foie de veau »).
- Teintes de polarisation voisines des couleurs en LN.
- Ici allanite fortement zonée dans une granodiorite (sur la photo : biotite, plagioclase, apatite).

AC





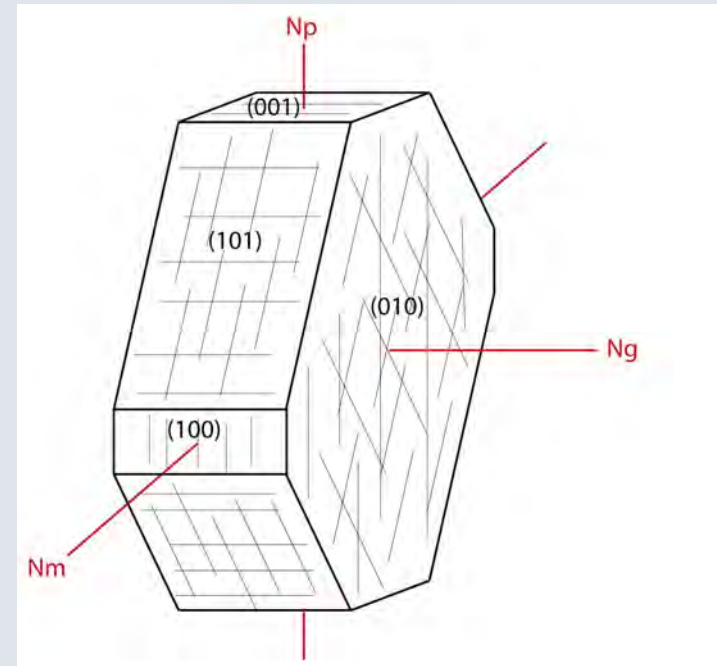
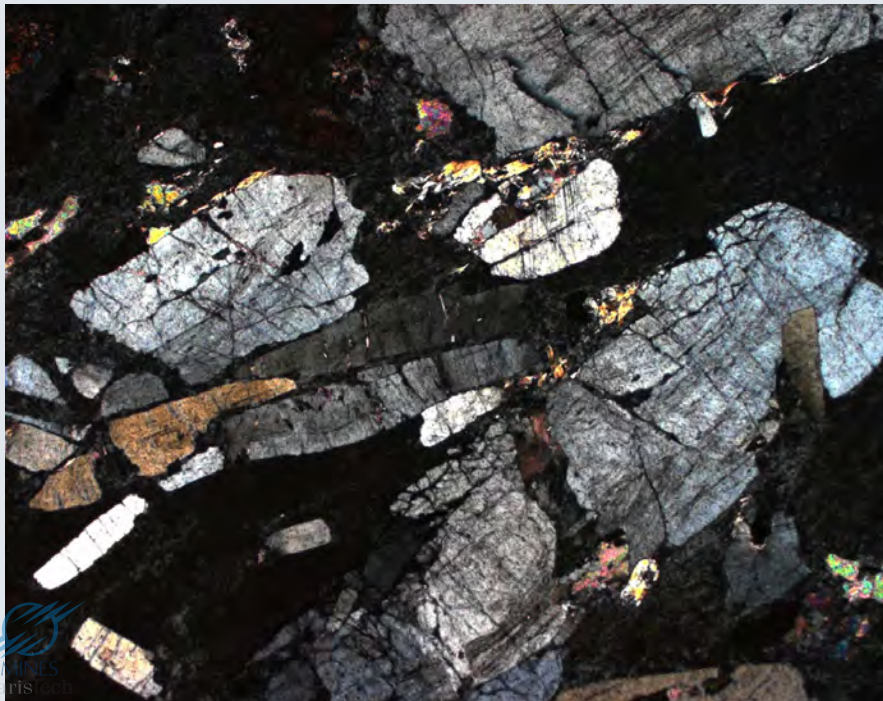
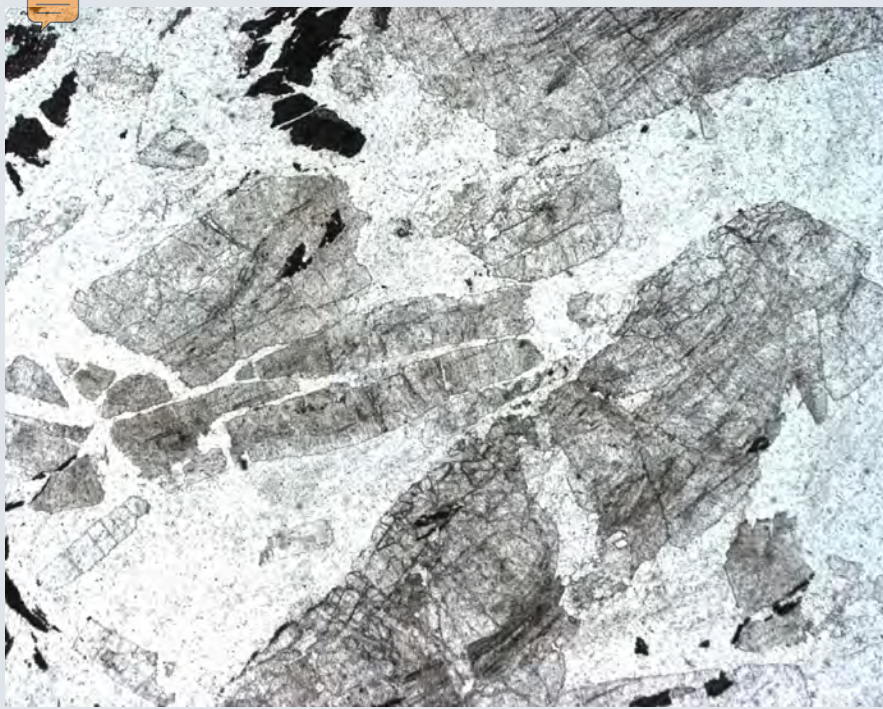
# Allanite métamict



- L'allanite contient des éléments radioactifs : très couramment son réseau est détruit par le rayonnement  $\alpha$  ; l'allanite est remplacée par des produits isotropes (**allanite métamict** : frange sombre isotrope autour du cristal sain). Fréquemment, cette destruction s'accompagne d'un gonflement qui induit des craquelures dans les minéraux voisins.
- L'allanite est ici entourée de grains d'épidote.
- La roche est ici un granite altéré : quartz, feldspaths et chlorite dérivant de biotite.
- Granite de Saint-Arnac, Pyrénées Orientales, France.







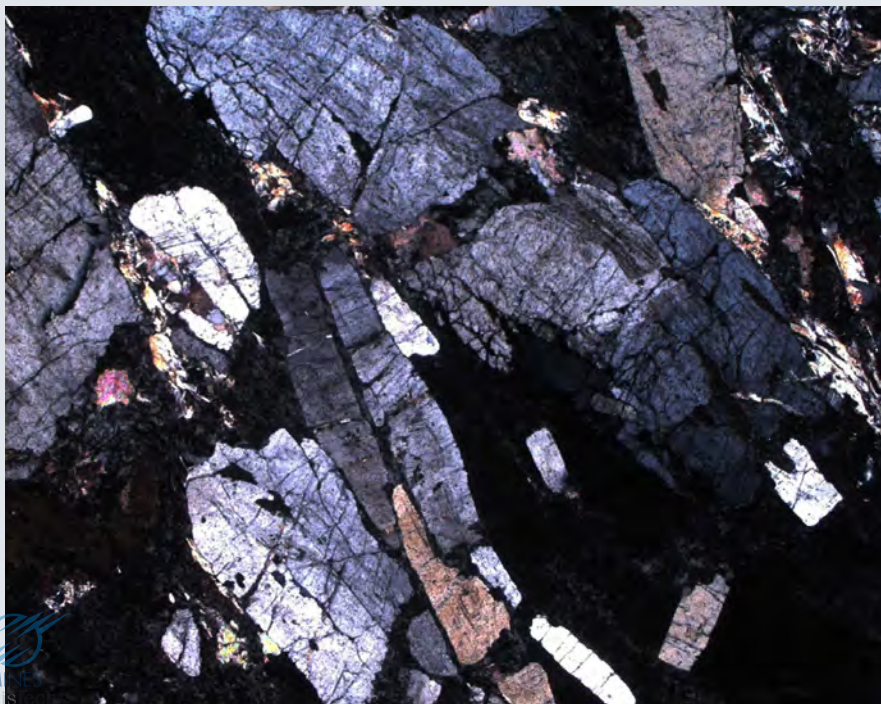
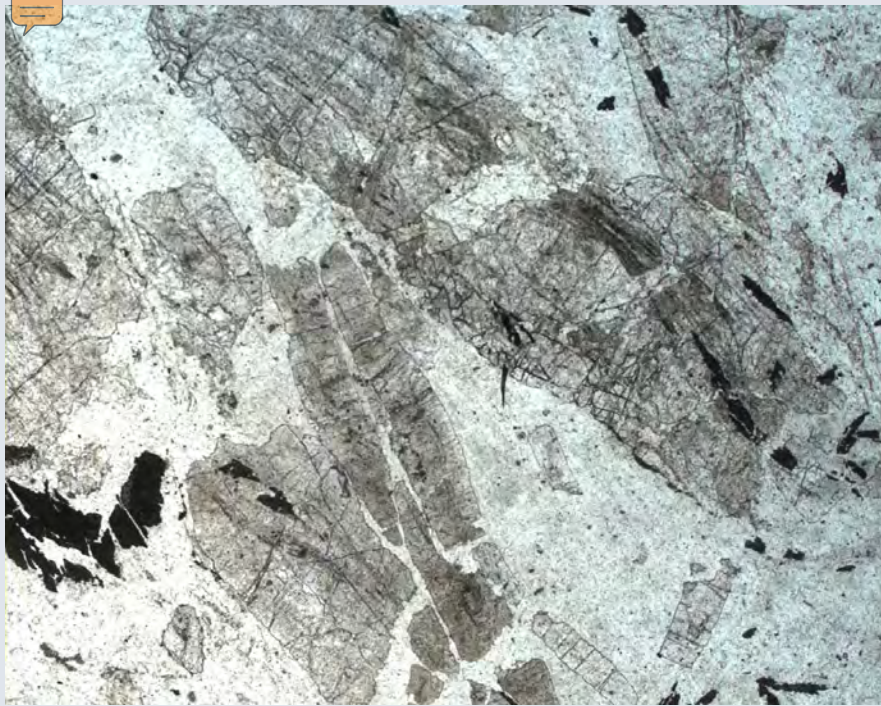
## Lawsonite



- Orthorhombique.
- Tablettes selon (010).
- Clivages (100) et (010) parfaits, (101) moyen ; l'angle entre (100) et (101) est de  $67^\circ$ .
- En général sections très obliques sur (010) : tablettes rectangulaires avec deux clivages perpendiculaires.







# Lawsonite

- Incolore.
- Indices moyens :  
Np 1,665      Ng 1,685
- Biréfringence  $\Delta = 0,019 - 0,021$
- Gris, jaunes orangés, rouges de la fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Les sections en tablettes présentent une extinction droite sur le clivage.
- Allongement négatif.
- Macle (101) lamellaire.
- Biaxe positif  $2V \ 79 - 85^\circ$
- $r > v$  fort
- Caractéristique du métamorphisme de haute pression - basse température.
- Très analogue à un plagioclase calcique (mais indices et biréfringence plus forts). Se distingue de la zoïsite par sa biréfringence.
- Saint-Véran, Hautes Alpes, France.

AR



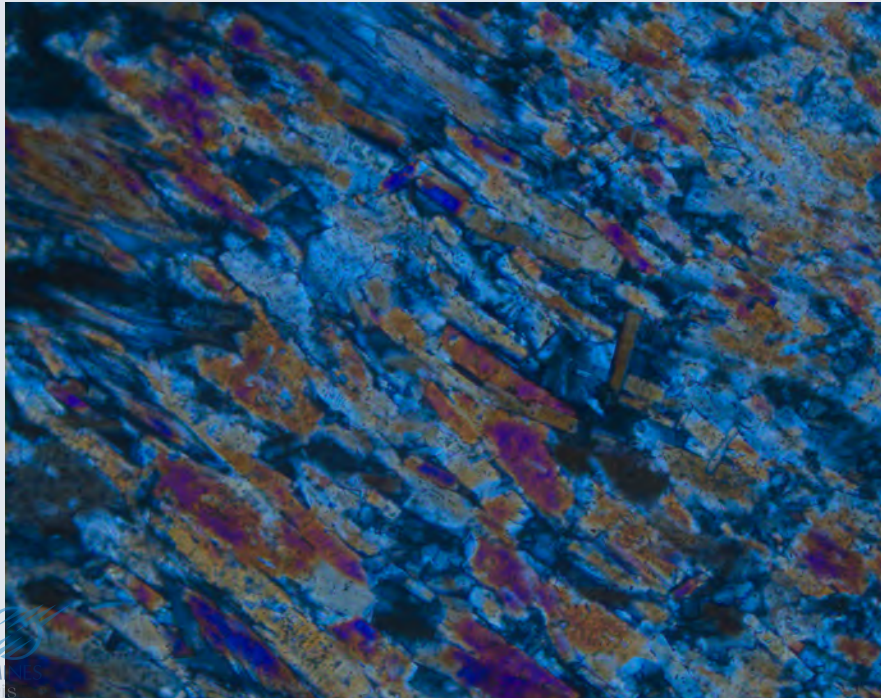




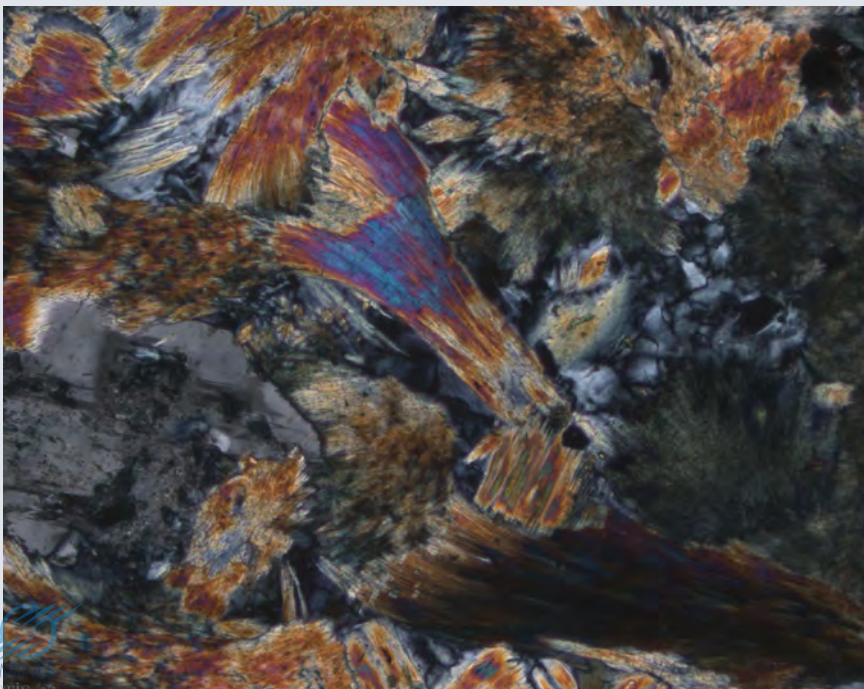
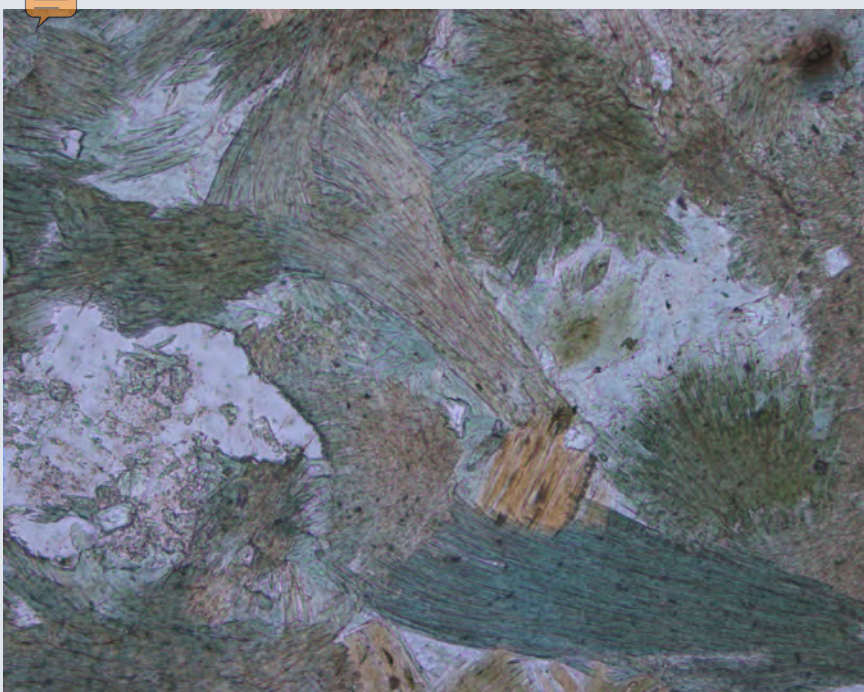
# Lawsonite



- La lawsonite forme des tablettes rectangulaires polarisant dans des rouges, rouge orangé, violacé.
- Quelques cristaux de glaucophane (coin supérieur gauche). □
- Saint-Véran, Hautes Alpes, France.



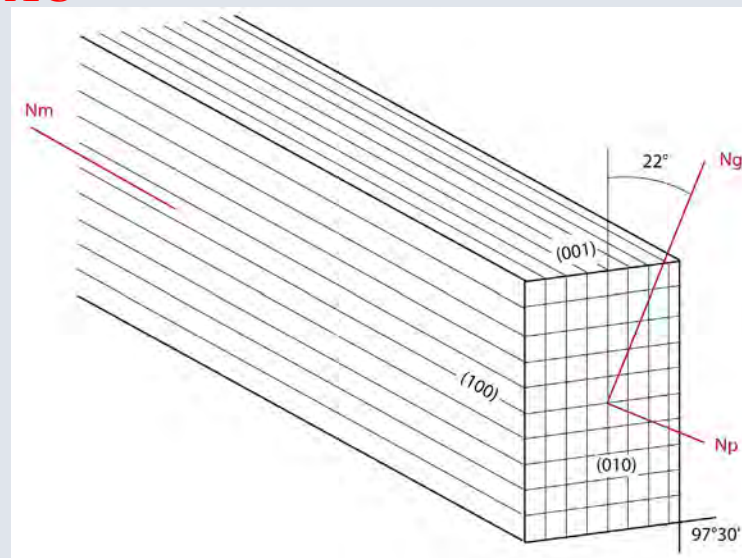




# Pumpellyite

- Monoclinique
- Prismes à sections basales polygonales.
- Très souvent fibreux, parfois en rosettes
- Sections selon le prisme : un seul clivage, extinction droite (Nm).
- Sections basales : deux clivages (100) et (001), modérés, à  $97^{\circ}30'$ .
- Extinction à  $22^{\circ}$  sur le clivage (cristaux en bas, à droite).
- Eyerhalde, Pyrénées atlantiques, France.

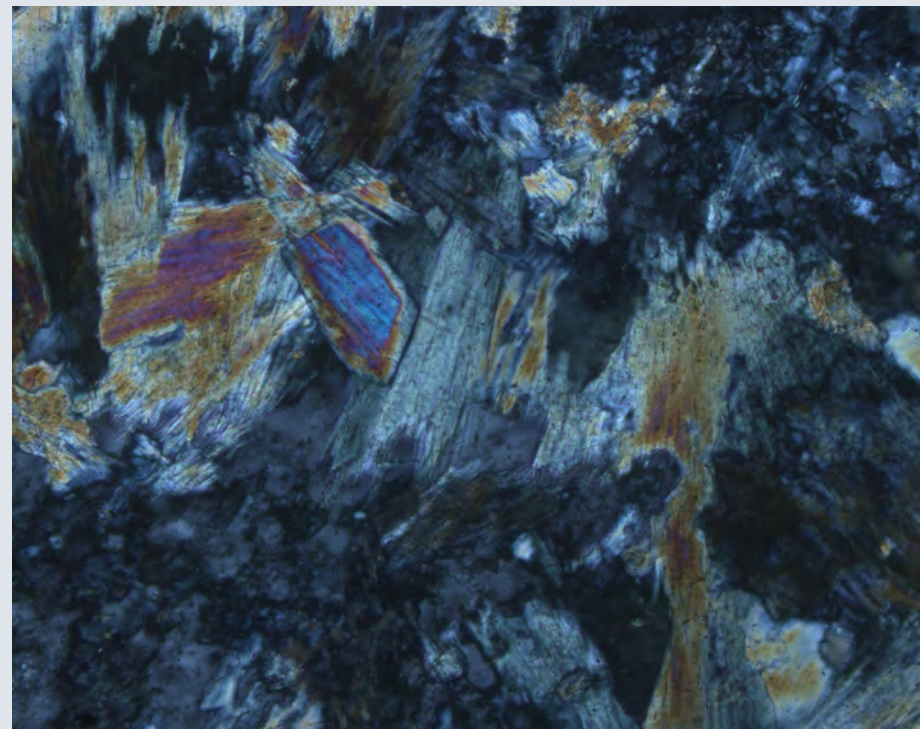
AC





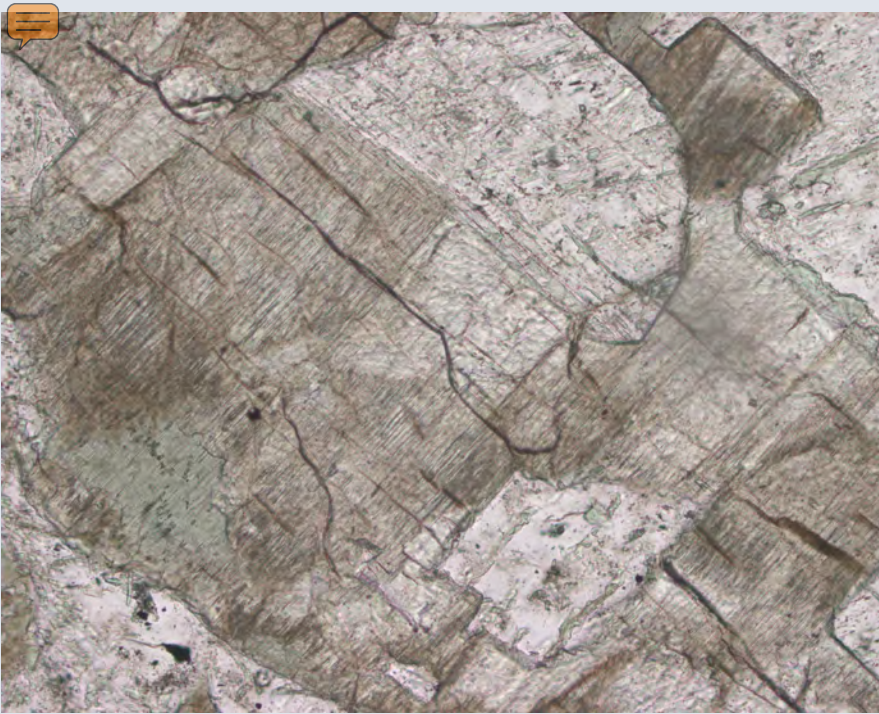


# Pumpellyite



- Pléochroïque : incolore, brun jaune, vert, bleu vert.
- $N_p$  1,665 – 1,702       $N_g$  1,683 – 1,722
  - Indices élevés un peu plus faibles que celui des épidotes.
- Biréfringence  $\Delta = 0,012 - 0,022$  Polarise dans la fin du 1<sup>er</sup> ordre, début 2<sup>ème</sup> ordre.
- Biaxe positif  $2V$  10 - 85°.
- $r < v$
- AC
- Eyerhalde, Pyrénées atlantiques, France.





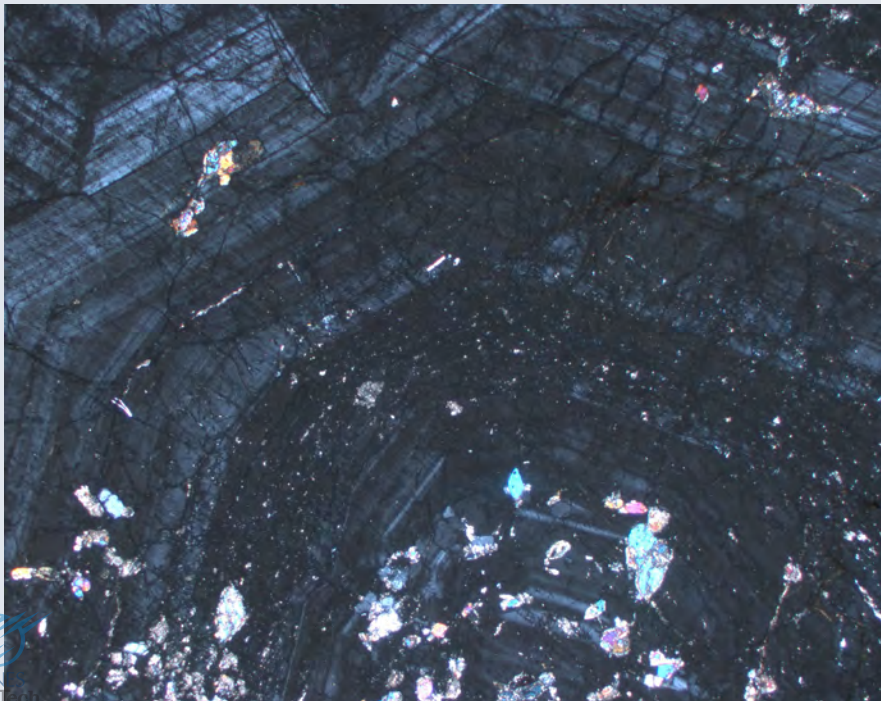
## Pumpellyite



- La pumpellyite remplace ici les clinopyroxènes d'une dolérite.
- Noter les clivages presque à angle droit ( $97^\circ 30'$ ).
- Le minéral incolore est de l'albite remplaçant les plagioclases.
- Eyerhalde, Pyrénées atlantiques, France.

AC





## Grenats calciques

grossulaire  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

andradite  $\text{Ca}_3(\text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

hydrogrossulaire  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_x$

- Cubiques – souvent pseudocubiques
- N 1,734 grossulaire, hydrogrossulaire  
1,887 andradite
  - Indices forts, aspect chagriné
- Les grenats calciques montrent une faible biréfringence (gris du premier ordre) ce qui met en évidence des structures d'accroissement et des macles plus ou moins complexes.
- Les taches polarisant dans des teintes vives sont de la calcite (secondaire).
- Demir Tepe, Bursa, Turquie.

AC





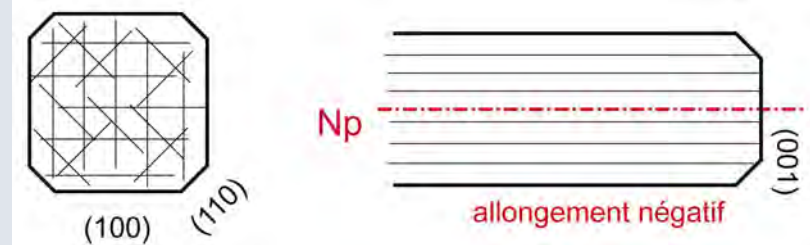
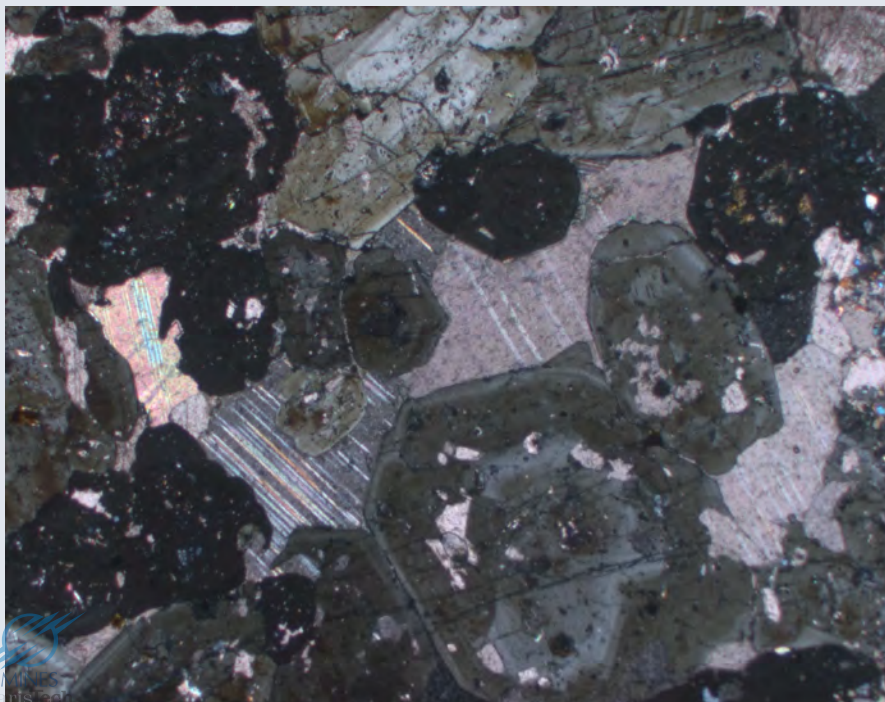
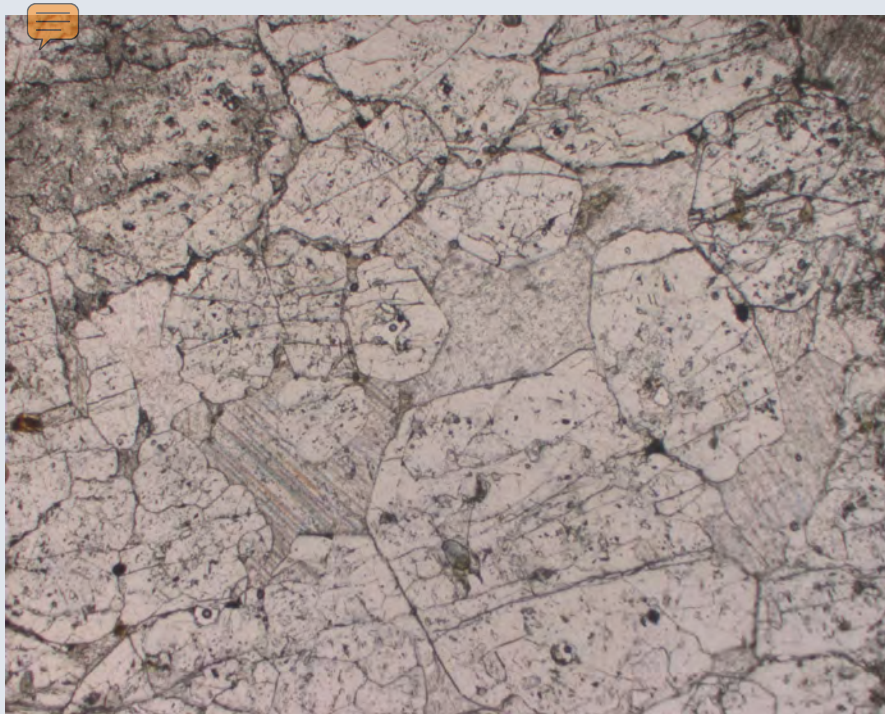


# Grenat calcique

- Les structures d'accroissement en bastion sont bien mises en évidence en LP.
- Le minéral polarisant dans les teintes vives est du diopside. 
- La roche est un skarn
- ..... Noter qu'il existe des grenats calciques isotropes...
- Demir Tepe, Bursa, Turquie.

AC





## Vésuvianite (idocrase)



- Quadratique.
- Prismes quadratiques à base octogonale (100) et (110) – terminaisons rarement visibles en lame mince.
- Clivages : (110) mauvais, (100) et (001) très mauvais.
- Incolore (parfois brunâtre, brun verdâtre).
- Np 1,700 – 1,746  
Ng 1,703 – 1,752
- Indices forts, un peu en dessous de ceux du grenat.
- La lame ci-contre montre des sections basales (et quelques sections longitudinales au bord supérieur) très zonées. Carbonates en fond de lame.

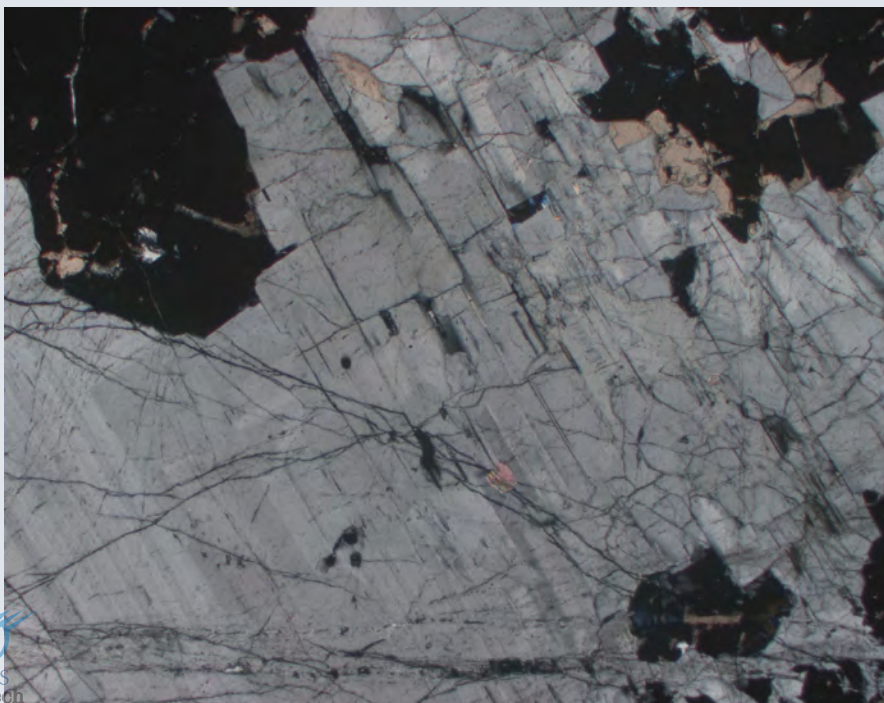
AR





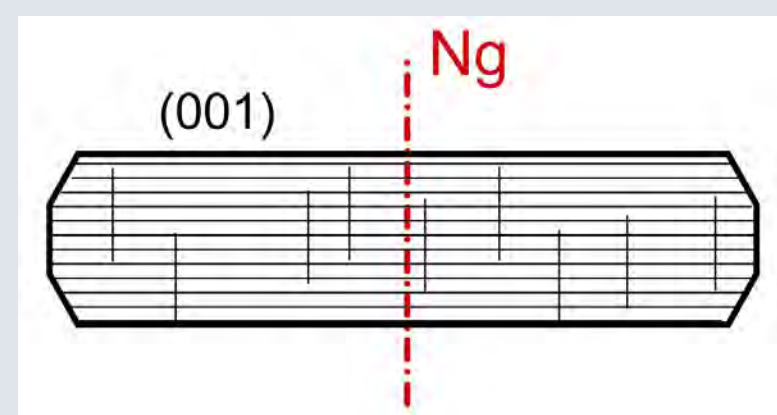
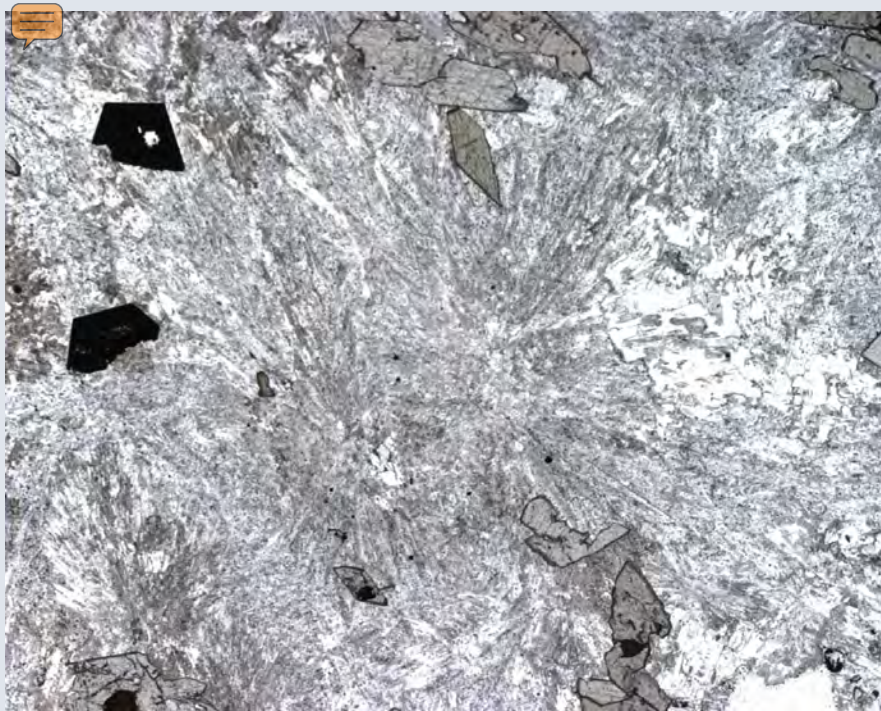


# Vésuvianite



- Sections parallèles au prisme montrant les clivages longitudinaux (100) et (110) ainsi que le clivage basal (001) ; ici plutôt une cassure qu'un clivage.
- Biréfringence  $\Delta = 0,004 - 0,006$   
Polarise dans les **gris** du 1er ordre.  
Minéral **dispersif** : souvent des teintes anormales, gris, olivâtre (fiche précédente), bleu de Prusse.
- **Extinction droite**
- **Uniaxe négatif**
- $2V_x \quad 17 - 33^\circ$
- La lame montre également du grenat (isotrope) et de petites plages de calcite (polarise en beige d'ordre supérieur).
- Prémian, Hérault, France.



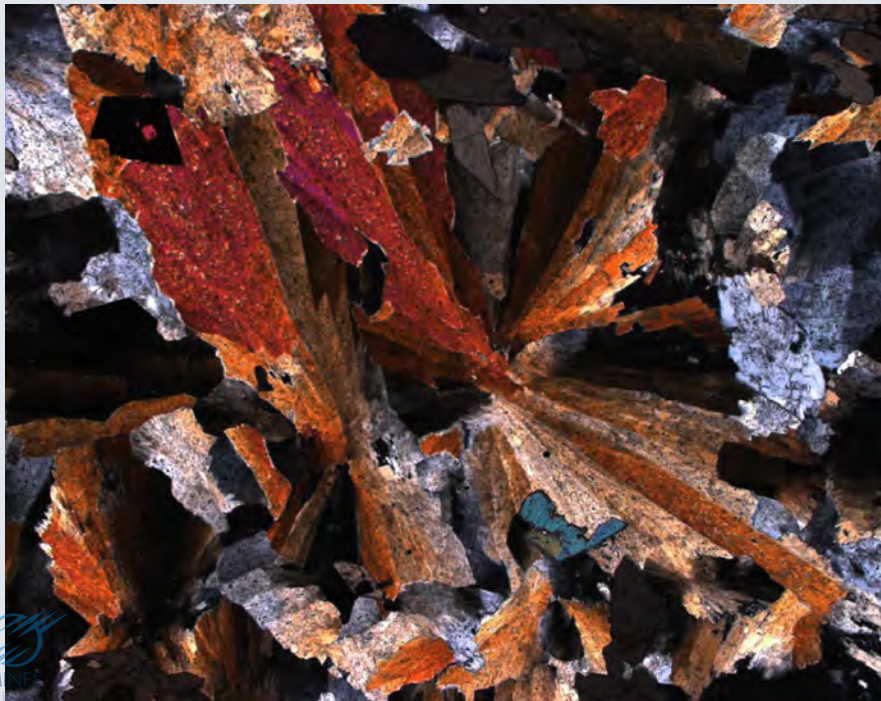


## Prehnite $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

- Orthorhombique.
- Tablettes selon (001) ; **association en nœud papillon** fréquente et **caractéristique**.
- Clivages : (001) bon ; (110) mauvais.
- Incolore.
- Indices moyens :

Np 1,611 – 1,632

Ng 1,632 – 1,665



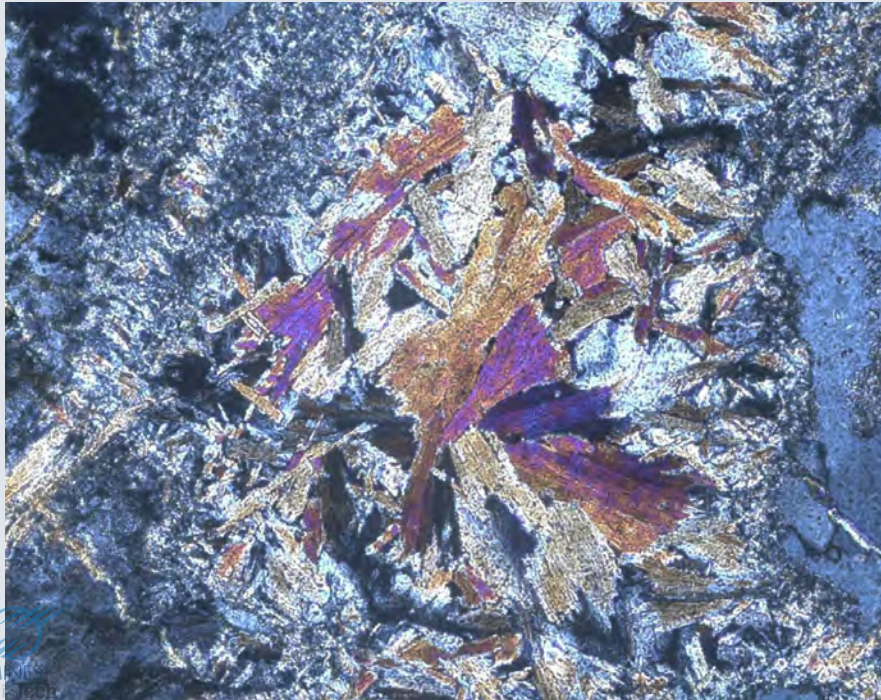




## Prehnite $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

- Biréfringence  $\Delta = 0,021 - 0,039$   
Teintes vives du 2<sup>ème</sup> ordre.
- Extinction droite
- Allongement négatif
- Biaxe positif  $2V_z 65 - 69^\circ$

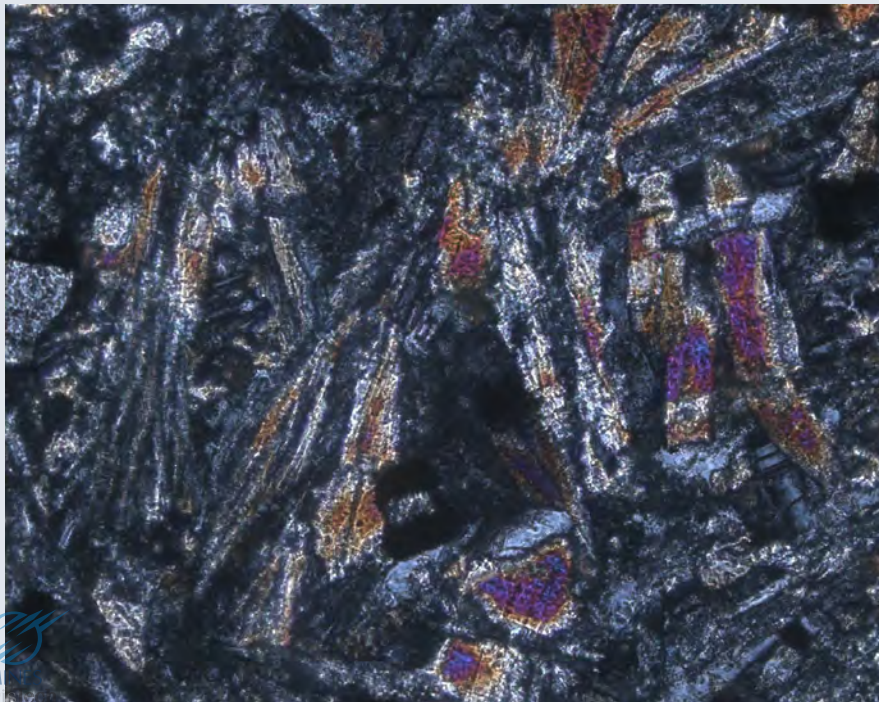
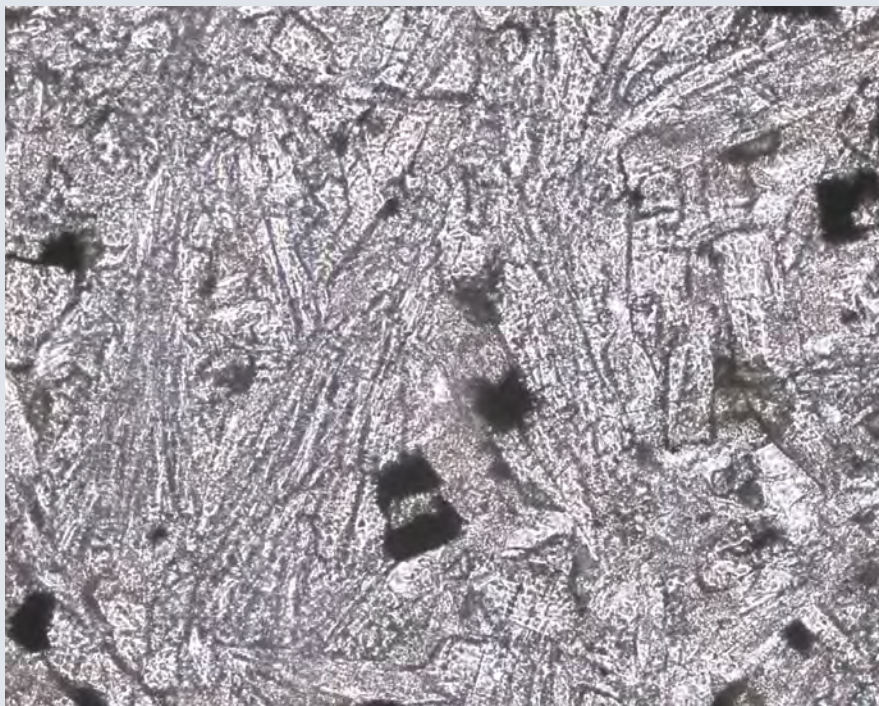
### AR



- Se distingue de la muscovite  par des indices plus forts et une biréfringence plus faible et de la lawsonite  par une biréfringence plus forte.
- Dans la photo ci-contre, la prehnite remplace un plagioclase (partie gauche de la photo) soit le long de veines, soit en masse ; le quartz (partie droite de la photo) permet d'apprécier l'indice de la prehnite.
- Gourma, Burkina Faso.







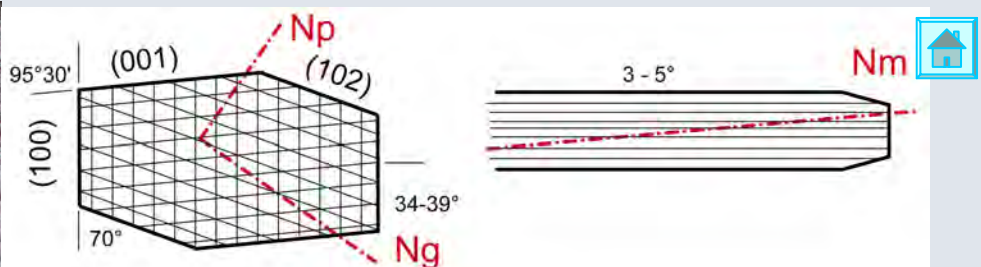
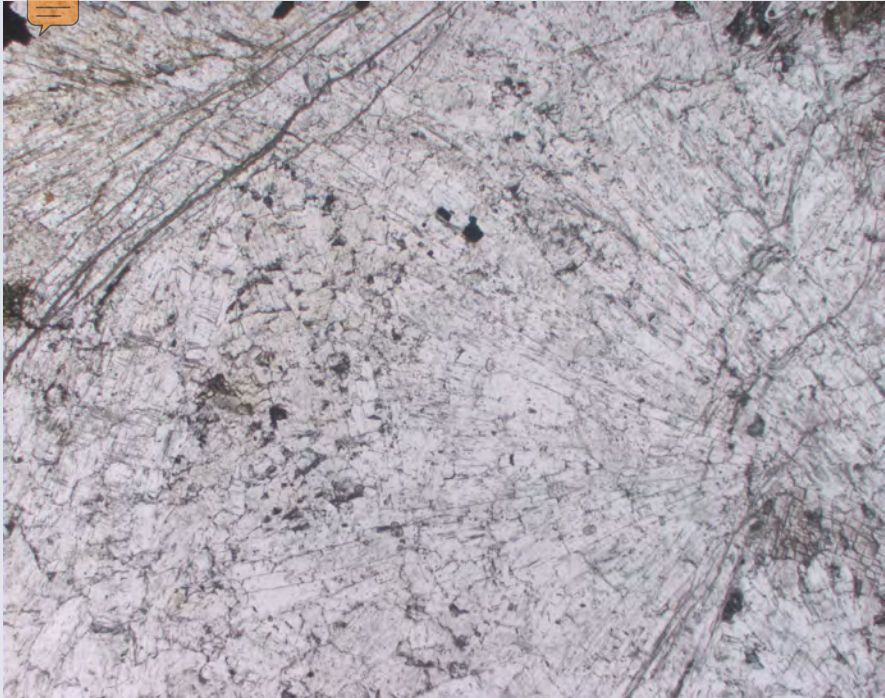
## Prehnite

$$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$$

- L'échantillon est une dolérite à grain fin.
- La texture intersertale de la dolérite est préservée mais les plagioclases sont remplacés par albite + prehnite, les minéraux ferromagnésiens par chlorite et/ou pumpellyite (pas reconnaissables sur la photo), du sphène se développe sur les ilménites, les minéraux opaques cubiques sont des magnétites.
- Gourma, Burkina Faso.

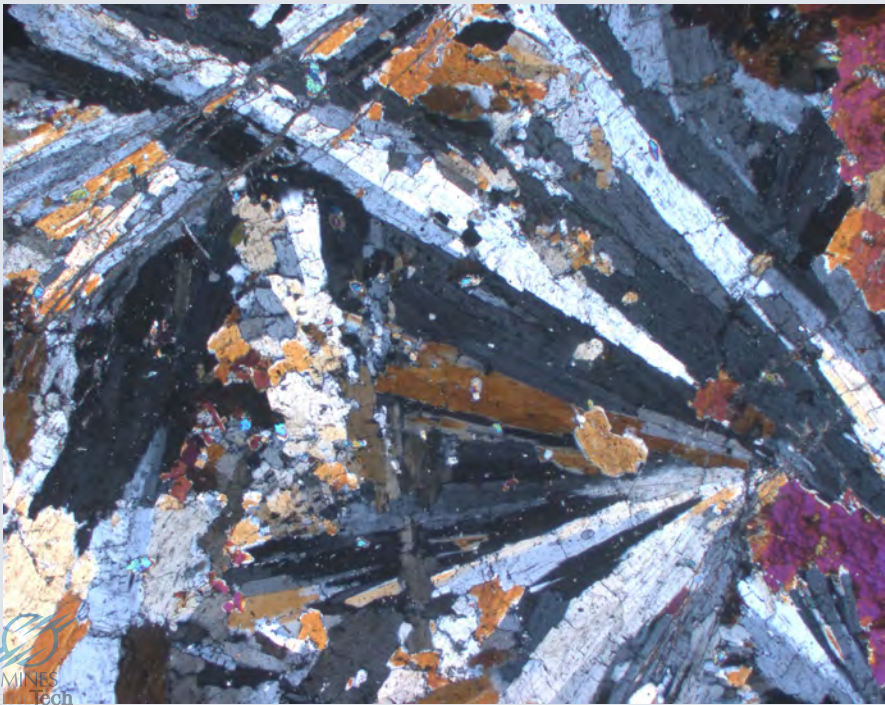






# Wollastonite $\text{CaSiO}_3$

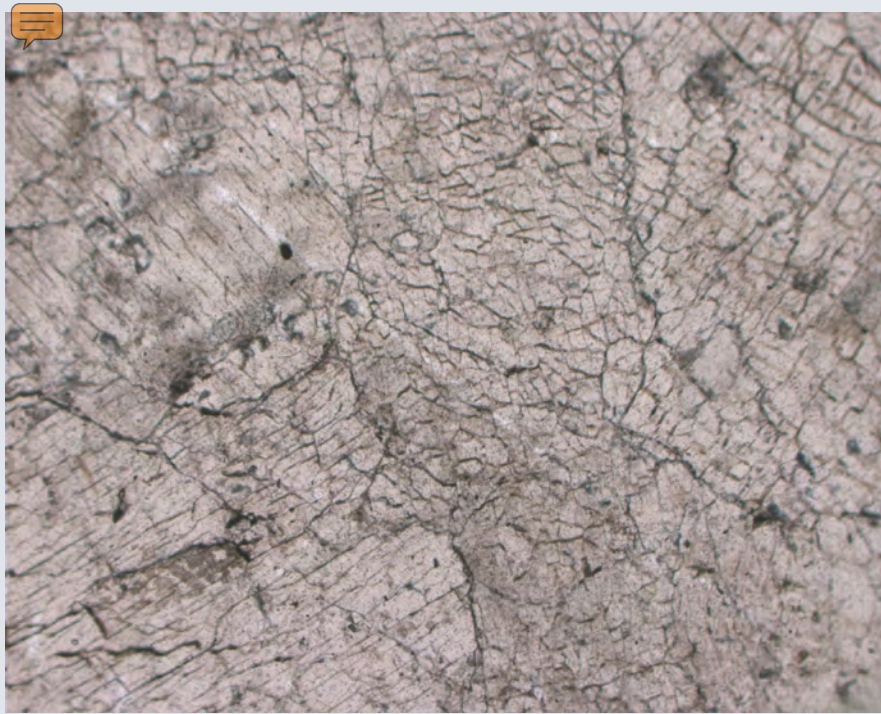
- Triclinique.
- Prismes (dont la base est un hexagone irrégulier).
- Incolore.
- Clivages : (100) parfait, (001) et (102) bons.
- Les sections basales montrent trois clivages ; les sections longitudinales un clivage parallèle à l'allongement.
- Indices moyens  
 $N_p$  1,616 – 1,640     $N_g$  1,631 – 1,653
- Cette section montre des gerbes de sections prismatiques (certaines avec des macles) ; quelques sections basales sur le bord droit.
- Demir Tepe, Bursa, Turquie.







# Wollastonite $\text{CaSiO}_3$



- Biréfringence  $\Delta = 0,013 - 0,014$   
Polarise en gris, blanc, jaune orangé de la fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Biaxe négatif  $2V_x 42 - 36^\circ$ 
  - (biaxe positif selon Tröger).
  - $r > v$
- Allongement du prisme positif ou négatif selon les sections.
- Extinction oblique sous un petit angle  $3 - 5^\circ$ .
- Macle à axe de macle  $[010]$  lamellaire commune.
- La photo ci-contre montre des sections basales, les trois clivages étant bien visibles sur la plage centrale ; une section longitudinale à un seul clivage sur le bord gauche.
- Cette lame est un peu épaisse : les teintes de polarisation un peu élevées.

AR





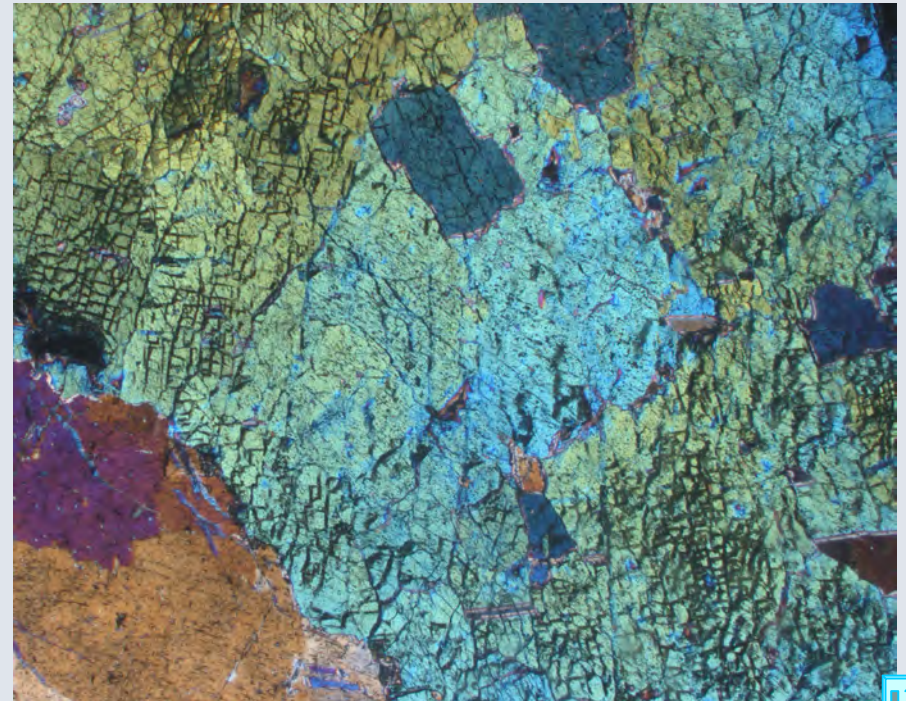
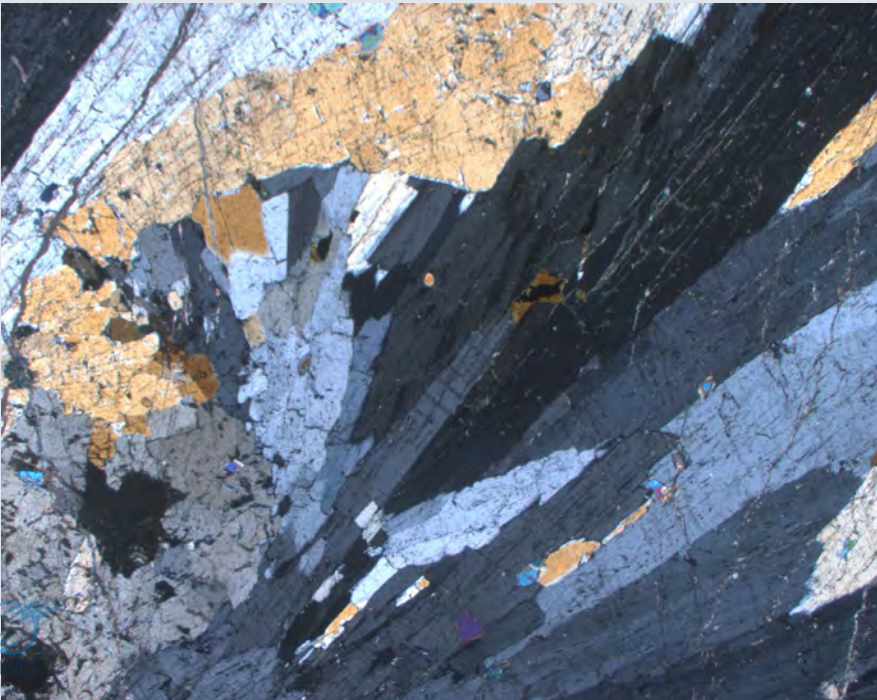
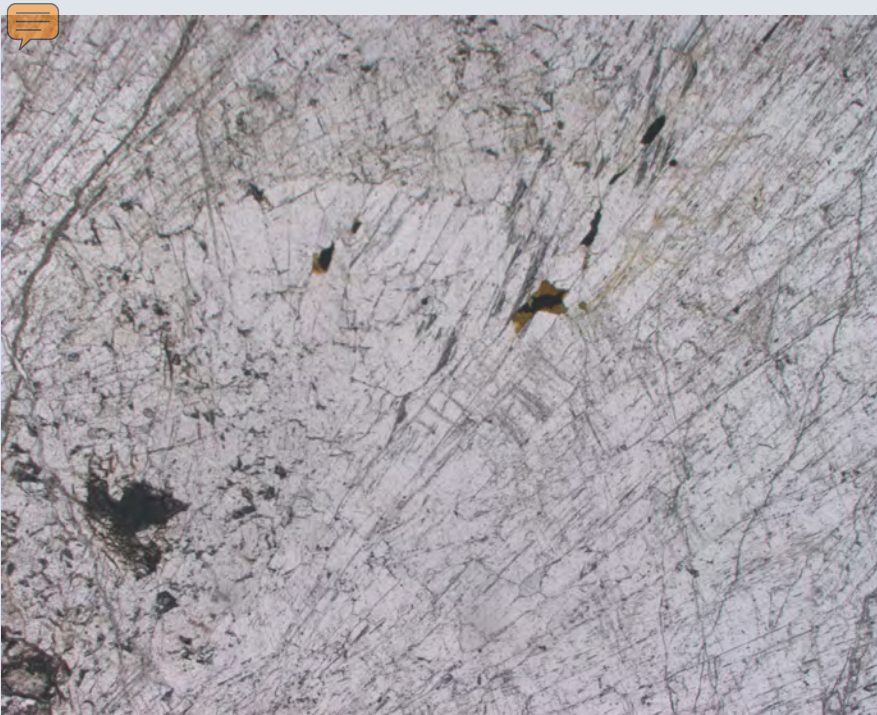


# Wollastonite

*À gauche* : une gerbe de prismes et quelques sections basales.

*En bas* : sections basales montrant les clivages.

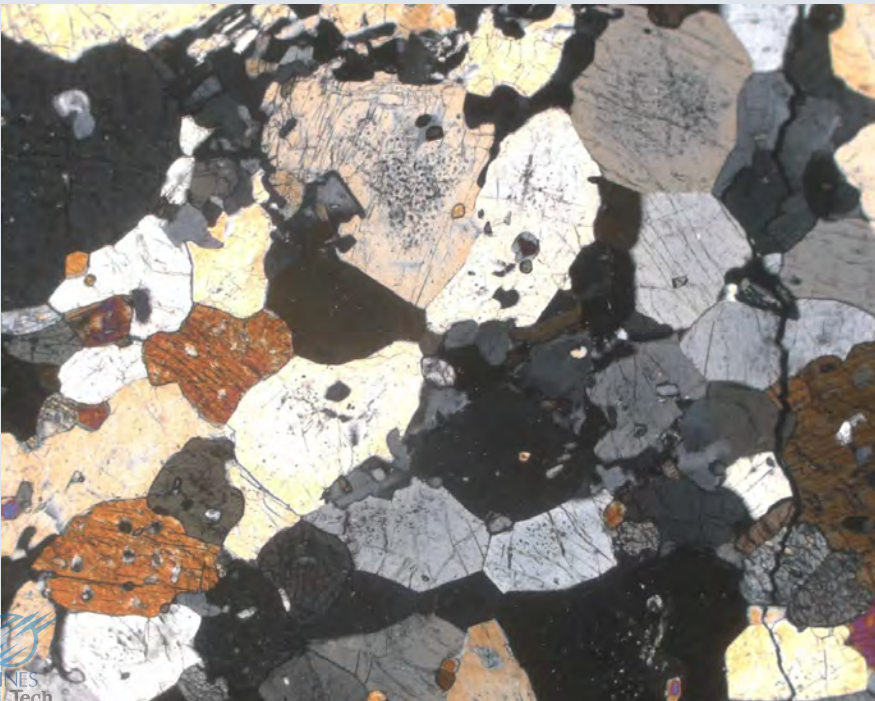
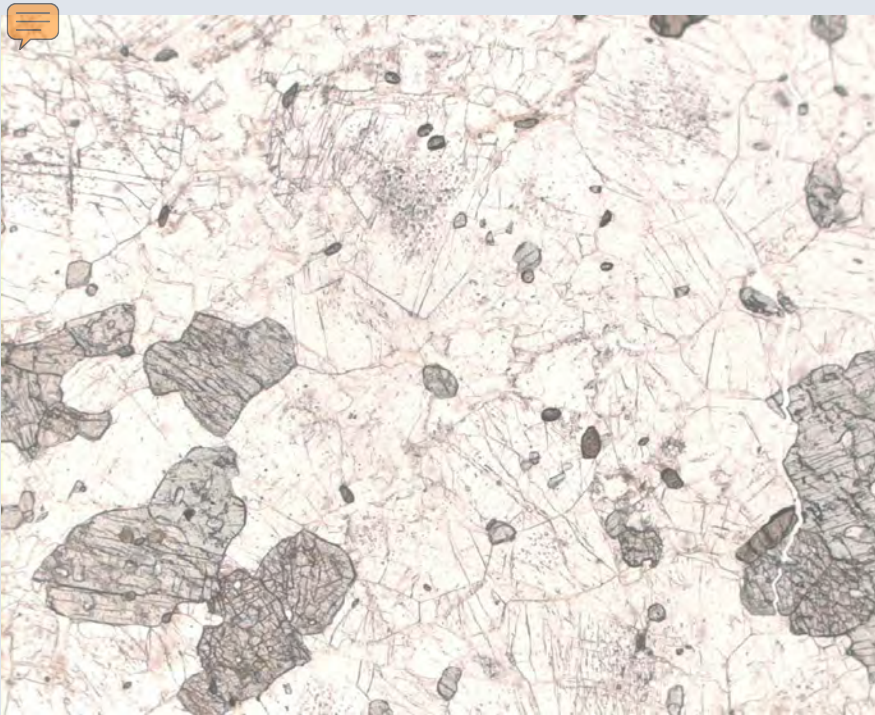
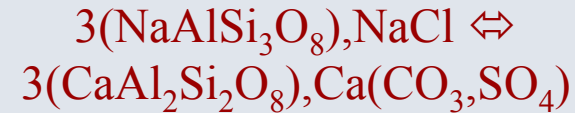
Demir Tepe, Bursa, Turquie.







# Scapolite

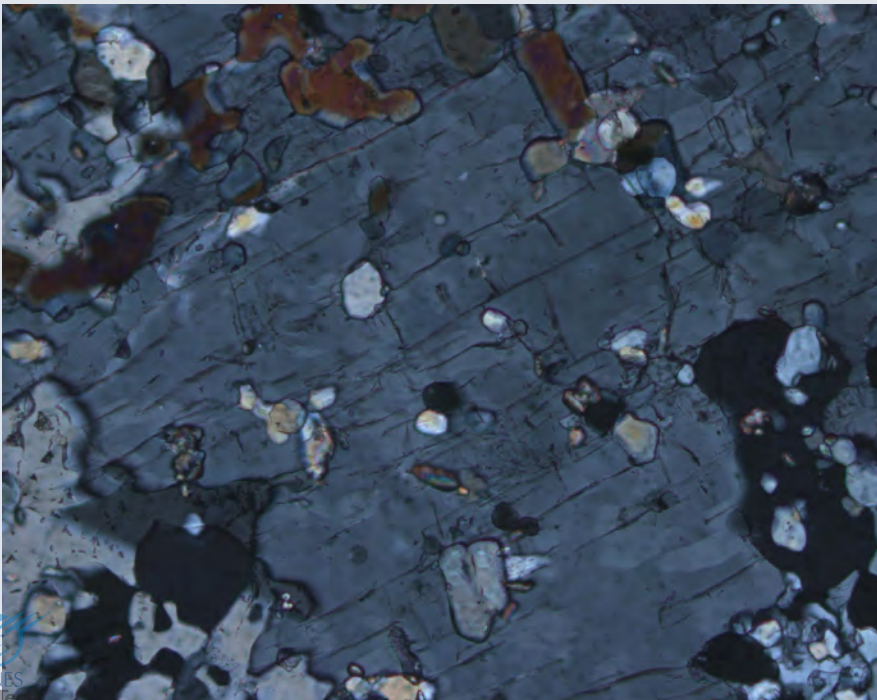
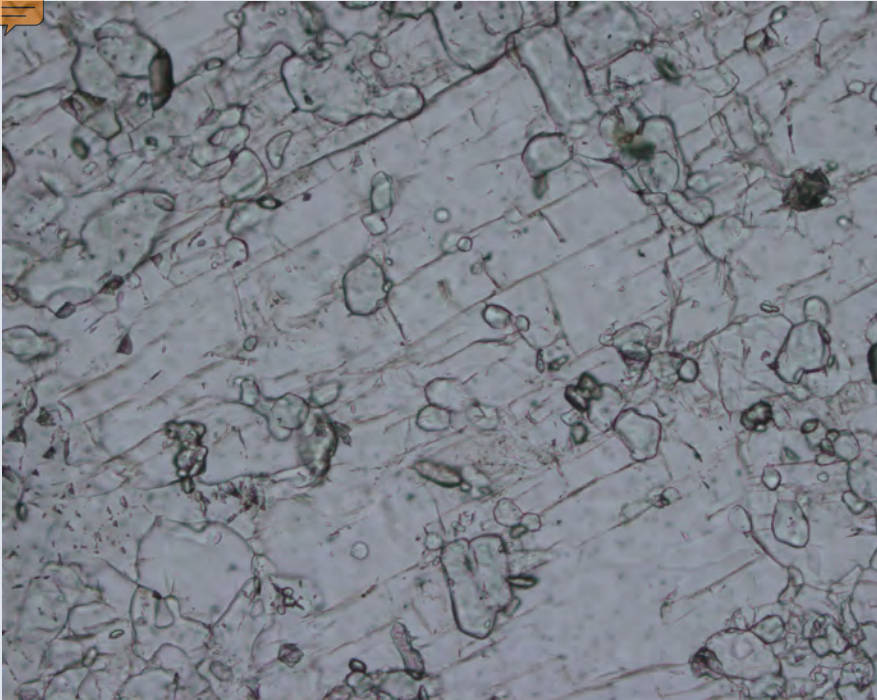


- Quadratique
- Prisme droit à base octogonale.
- Deux clivages orthogonaux (100) ; parfois autres clivages (110) ; sections prismatiques avec un seul clivage.
- Incolore.
- Les propriétés optiques varient avec le rapport Na/Ca :  
     $N_p \quad 1,540 - 1,564$   
     $N_g \quad 1,546 - 1,600$   
Les termes sodiques ont des indices plus faible que ceux du quartz ; les termes calciques des indices nettement plus élevés.
- Le minéral à fort relief est du diopside,  quelques grains de sphène. 

AR



# Scapolite



- Section basale montrant les deux clivages à angle droit
- Comme dans la section précédente, les grains à fort relief incolores sont du diopside, les grains brunâtres du sphène.
- Biréfringence  $\Delta = 0,005 - 0,038$
- Les termes sodiques polarisent dans des gris ; les termes calciques dans des rouge orangé fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Extinction droite.
- Allongement négatif.
- Uniaxe négatif.
- Cet échantillon, comme le suivant : Demir Tepe, Bursa, Turquie.

AR

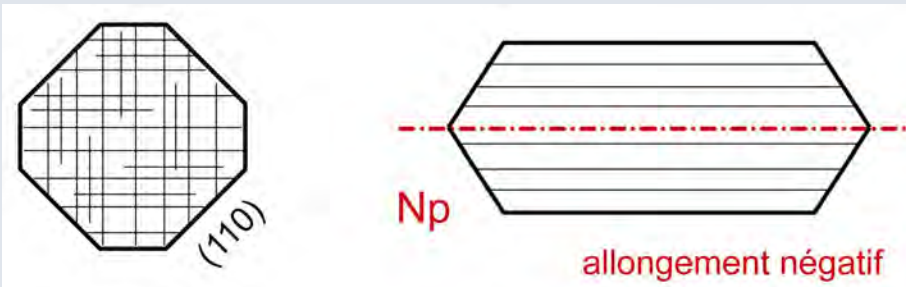
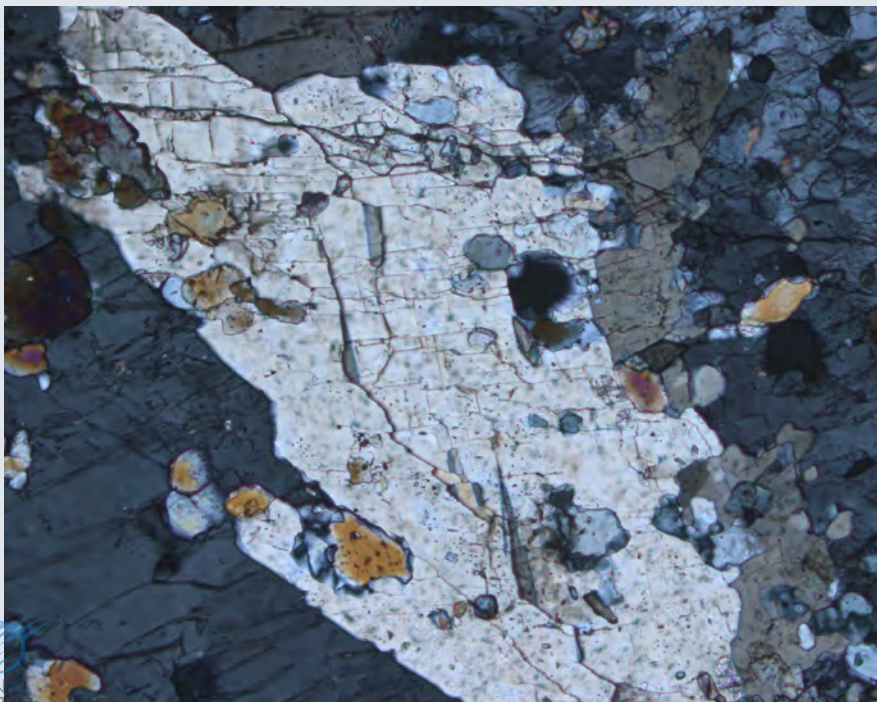
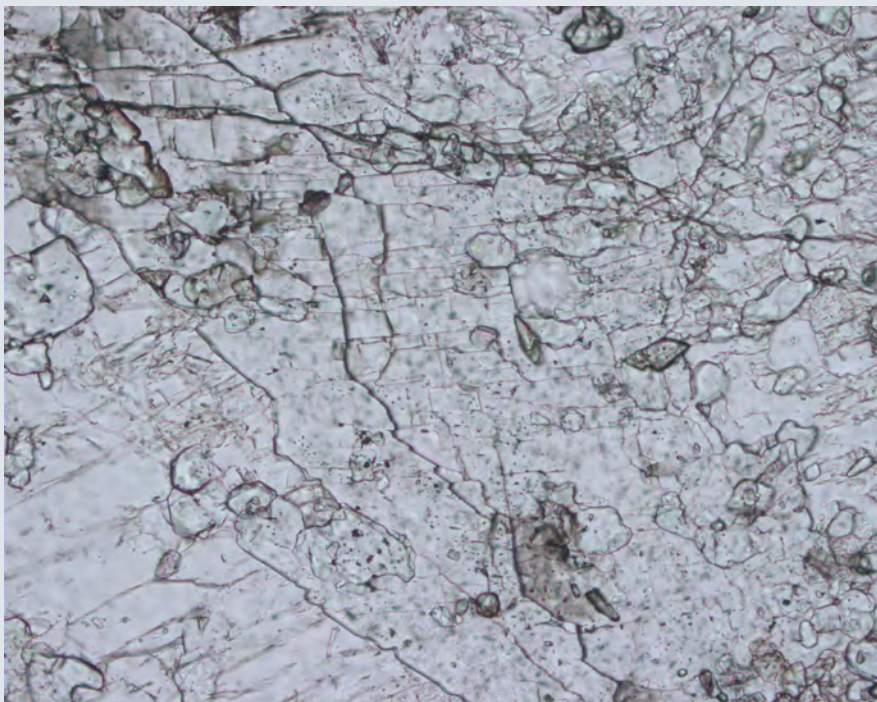




# Scapolite

Même échantillon que pour la photo précédente.

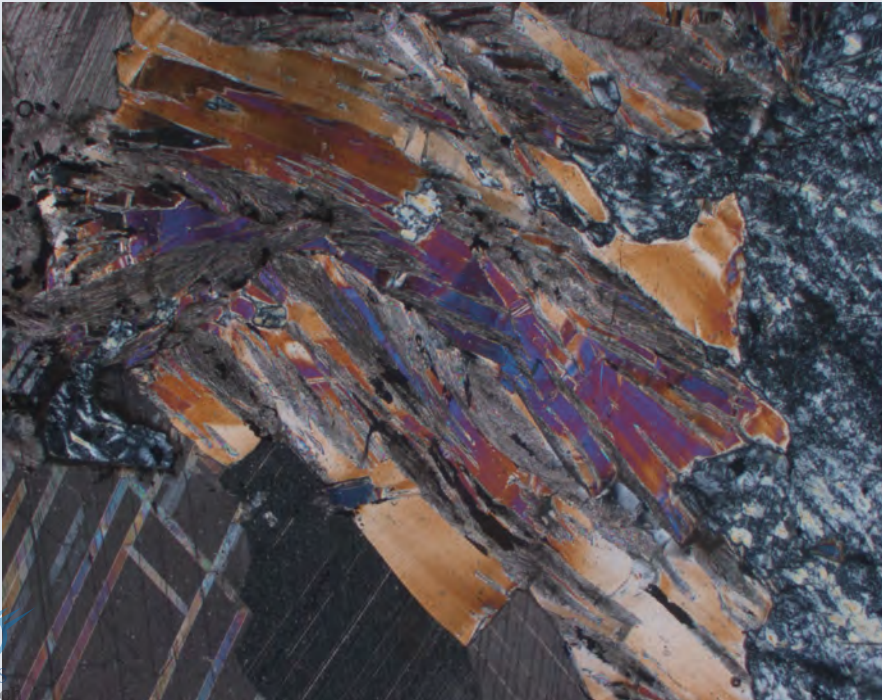
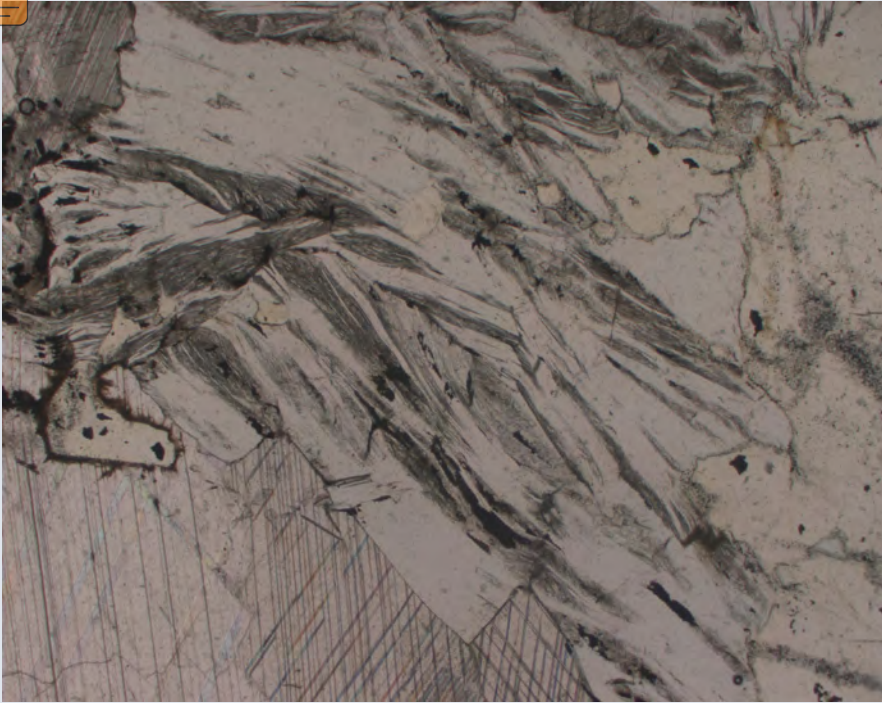
Section basale montrant deux clivages orthogonaux.







# Talc



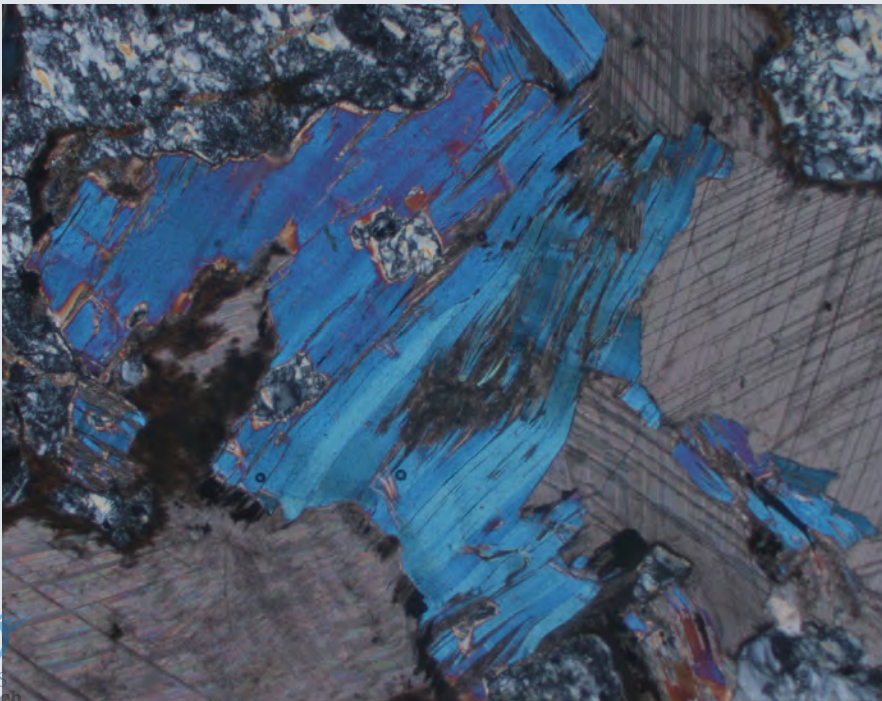
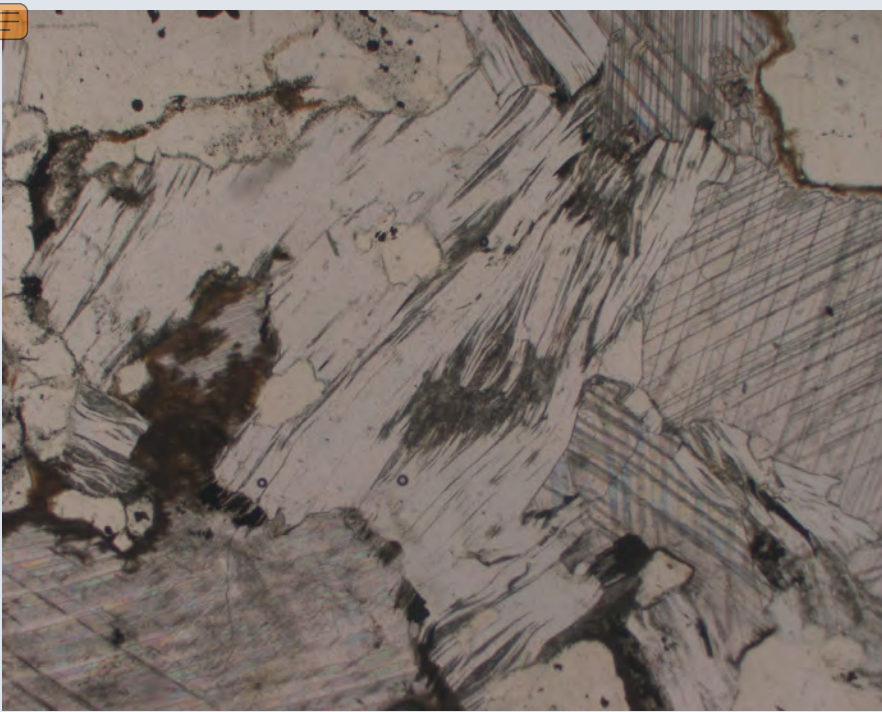
- À peu près indistinguable de la muscovite , si ce n'est sa paragenèse, une biréfringence un peu plus élevée et un 2V petit ( $0 - 30^\circ$ ).
- $r > v$
- Le reste de la lame est occupé par de la dolomite (coin SW, observer les macles) et de l'olivine serpentinisée (bord droit).
- Costabonne, Pyrénées orientales, France.

AR





# Talc

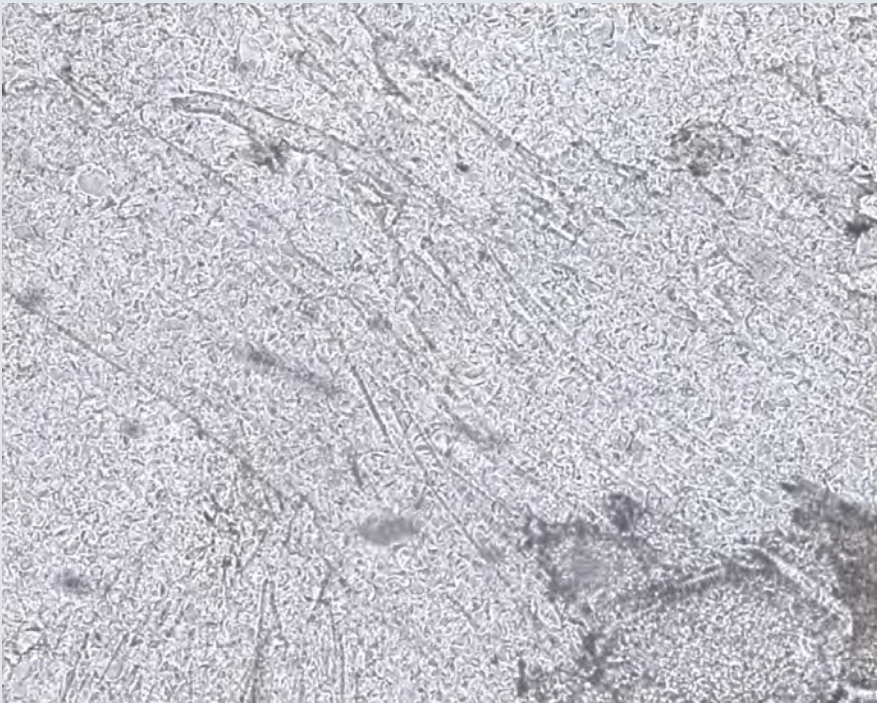


- Même échantillon que pour la photo précédente
- Tablettes avec un bon clivage (001) comme la muscovite
- Incolore
- $N_p$  1,539 – 1,550
- $N_g$  1,589 – 1,600
- Biréfringence  $\Delta = 0,050$

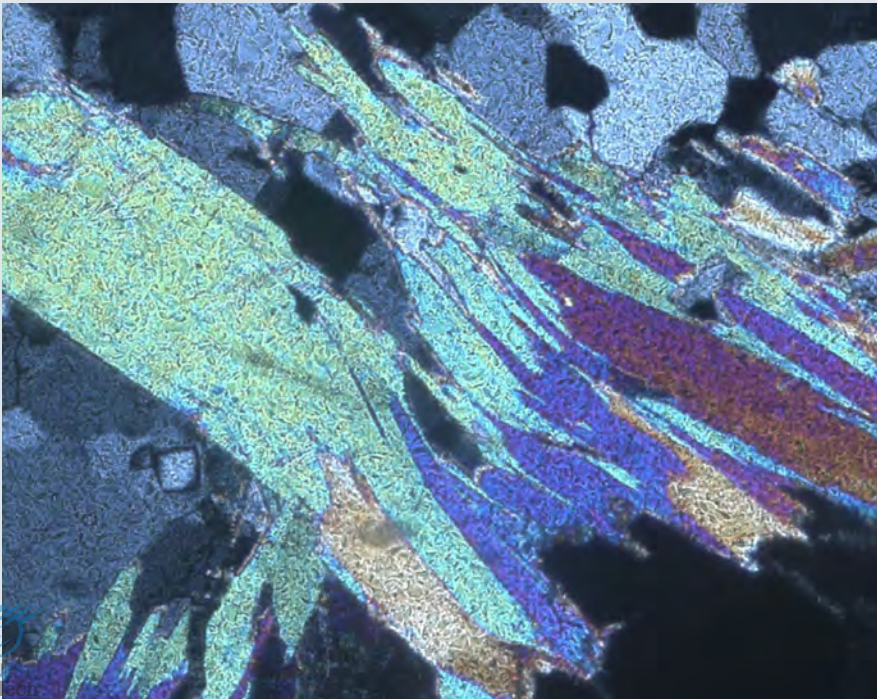




# Talc

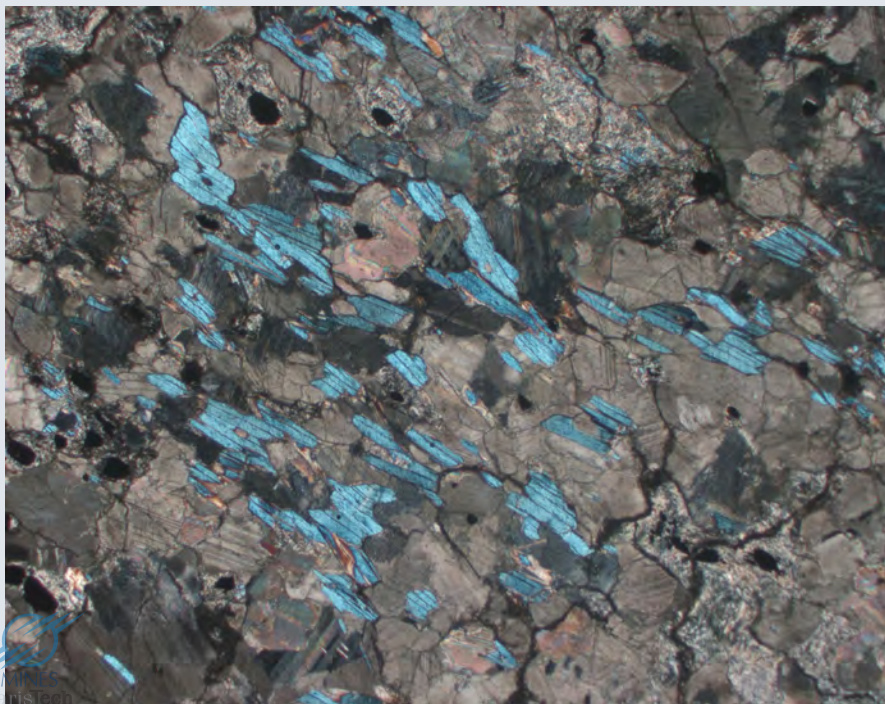
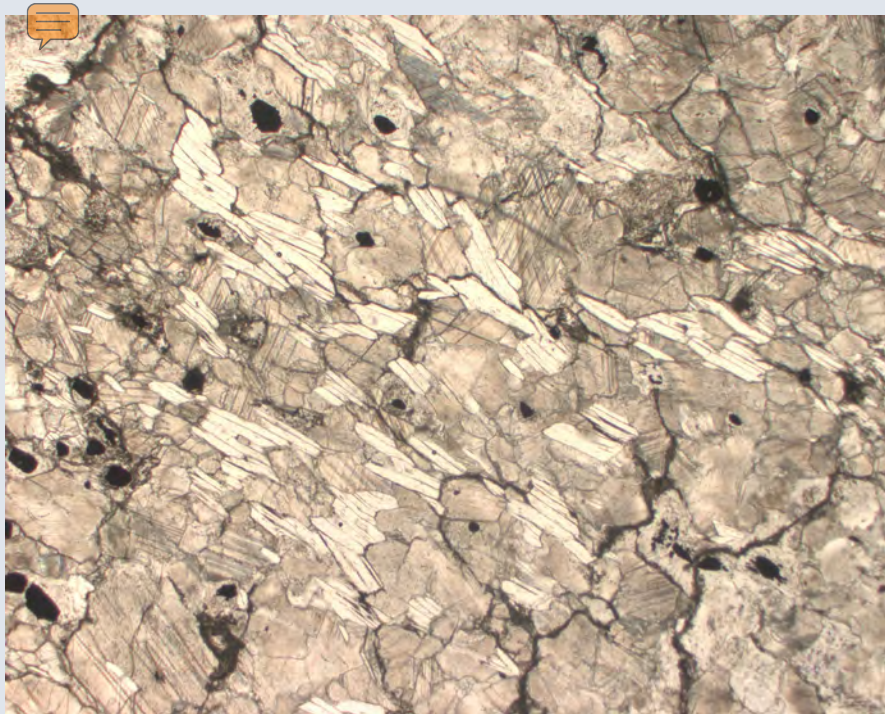


- Le talc a une biréfringence plus élevée que la muscovite : 0,050 pour le talc, 0,036 – 0,049 pour la muscovite.
- Dans la photo ci-contre, le talc polarise en bleu et pourpre alors que la muscovite polarise en vert.



- La roche est un schiste blanc à talc – muscovite (Phengite) – grenat (coin inférieur droit) – disthène – quartz et reliques de coésite
- Parigi, Piémont, Italie.





# Brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$



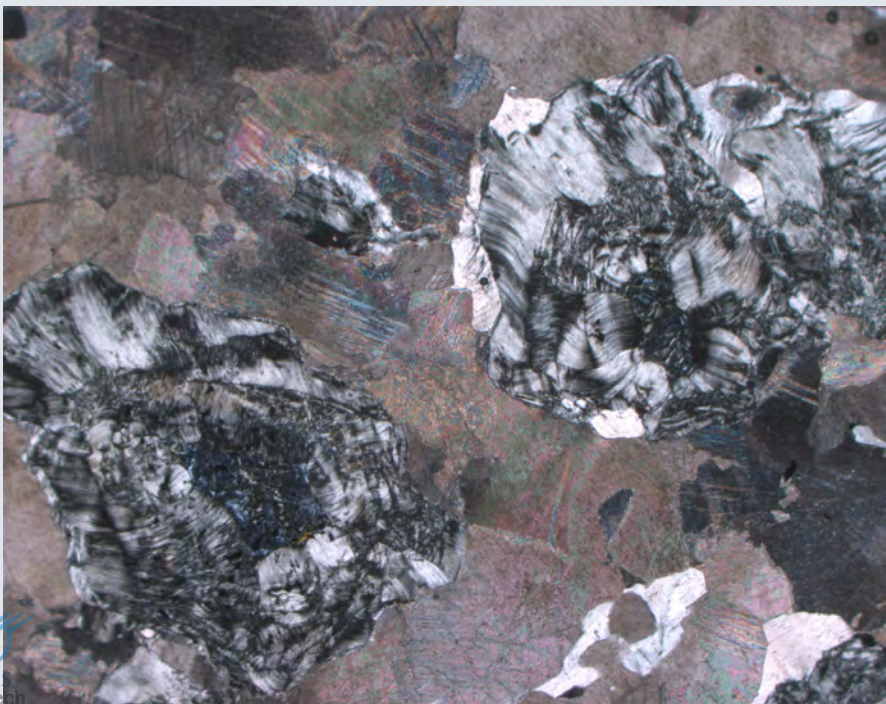
- Rhomboédrique.
- Forme : tablettes (001), clivage (001) ; analogue à ceux de la muscovite et du talc.
- Indices moyens :
 

|       |               |
|-------|---------------|
| $N_p$ | 1,559 – 1,566 |
| $N_g$ | 1,580 – 1,681 |
- Biréfringence  $\Delta = 0,015 - 0,021$   
 Blanc, gris du premier ordre , parfois teintes plus élevées.  
 Minéral dispersif : teintes anormales (ici).
- Uniaxe positif.
- **Ne se distingue de la muscovite et du talc que par son caractère uniaxe positif.**
- Costabonne, Pyrénées orientales, France.

R







# Brucite $\text{Mg}(\text{OH})_2$ pseudomorphoses de périclase $\text{MgO}$

- Le périclase  $\text{MgO}$  cristallise dans le système cubique et forme des cristaux globulaires d'indice élevé (1,736) à clivage cubique.
- C'est un minéral de haute température qui se rétrotransforme fréquemment en des agrégats fibreux de brucite, **dont c'est le principal gisement.**
- Quelques petites plages de périclase sont préservées au sein de ces amas.
- Costabonne, Pyrénées orientales, France.

R





# Groupe des humites

|             |                                                                   |                |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| Norbergite  | $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$  | orthorhombique |
| Chondrodite | $2\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$ | monoclinique   |
| Humite      | $3\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$ | orthorhombique |
| Clinohumite | $4\text{Mg}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{Mg}(\text{OH}, \text{F})_2$ | monoclinique   |

indices

$\Delta$

2V

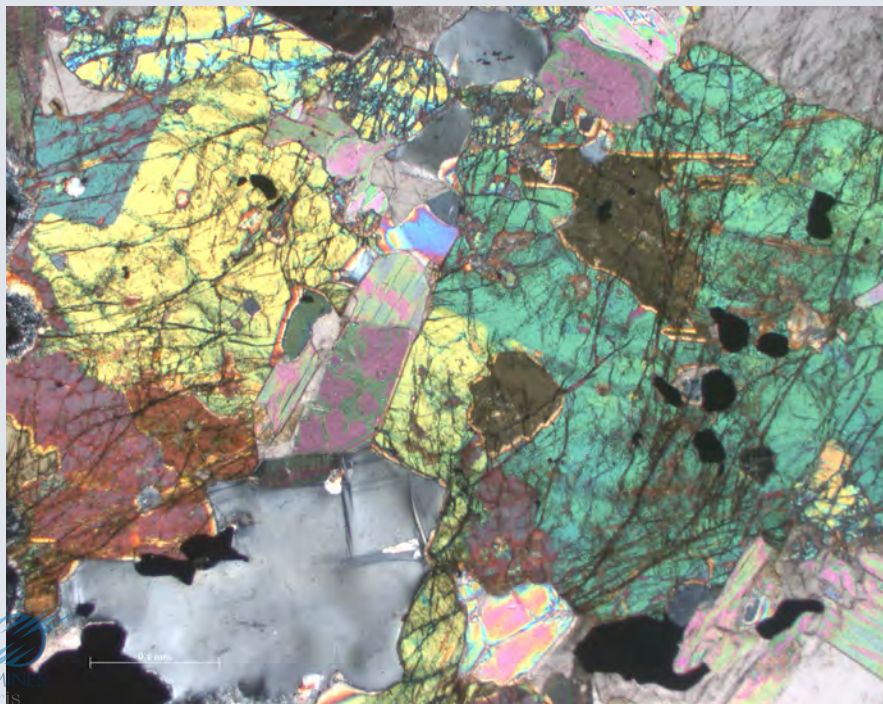
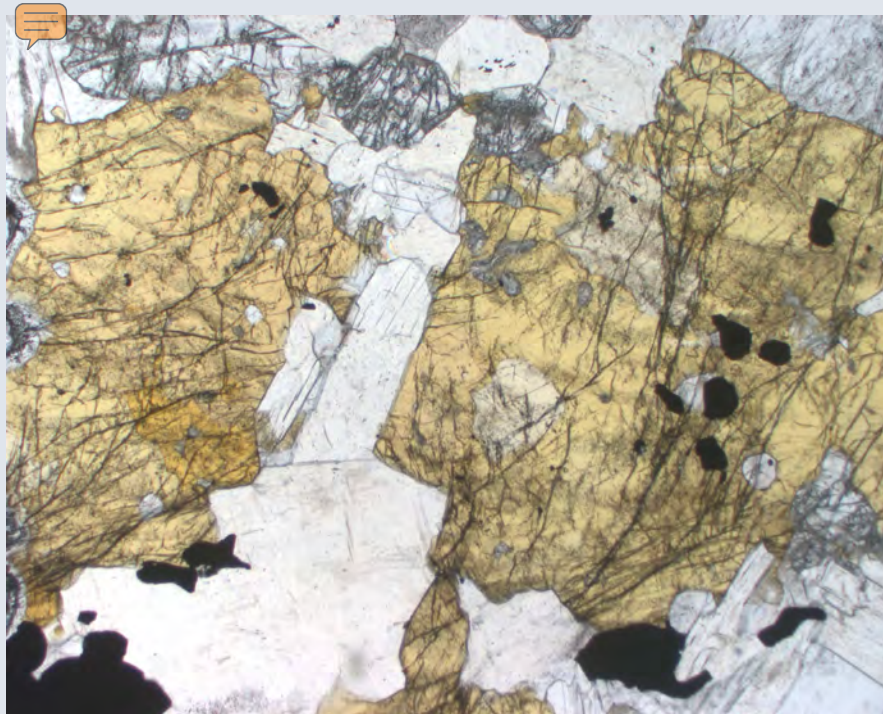
pléochroïsme

|                |               |               |        |                       |
|----------------|---------------|---------------|--------|-----------------------|
| • norbergerite | 1,563 – 1,593 | 0,026 – 0,027 | 44-50° | incolore – jaune pâle |
| • chondrodite  | 1,593 – 1,653 | 0,030 – 0,034 | 73-89° | incolore – jaune pâle |
| • humite       | 1,607 – 1,675 | 0,030 – 0,032 | 65-84° | incolore – jaune pâle |
| • clinohumite  | 1,623 – 1,698 | 0,028 – 0,034 | 62-85° | orangé – jaune vif    |

- Minéraux voisins des olivines magnésiennes. Ils s'en distinguent essentiellement par la couleur.
- Sections hexagonales ou octogonales ; le plus souvent en grains xénomorphes.
- Indices forts, un peu moins forts que ceux des olivines.
- Teintes de polarisation vives dans les 2<sup>ème</sup> – 3<sup>ème</sup> ordre, biréfringence un peu plus faible que celle des olivines.
- 2V plus faible que celui des olivines. •  $r > v$
- Mauvais clivage (100) – macles lamellaires (001).

• Gisement limité aux marbres magnésiens métamorphiques et skarns.

**R**



# Clinohumite

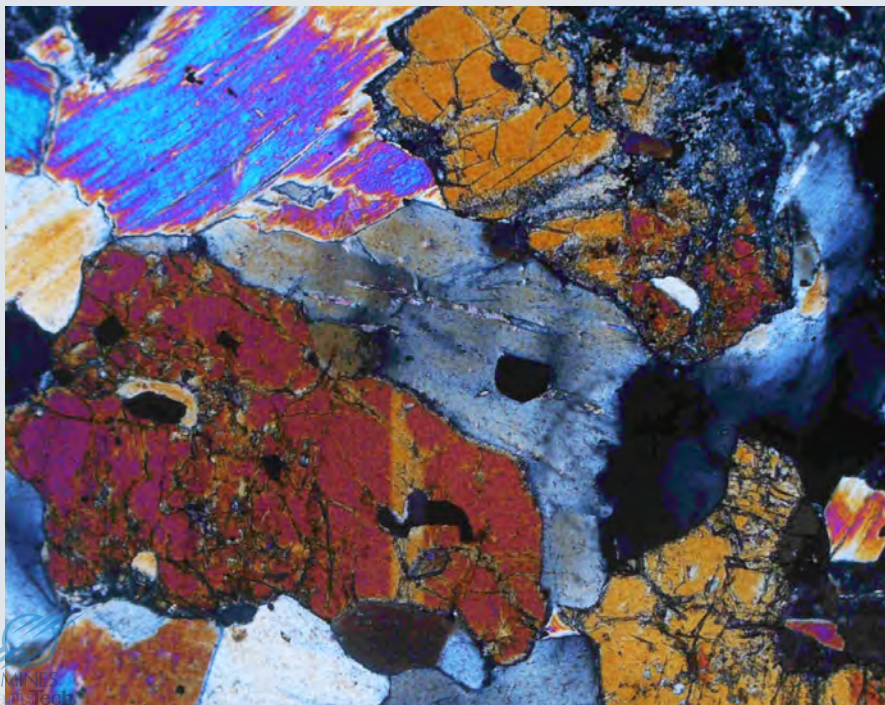
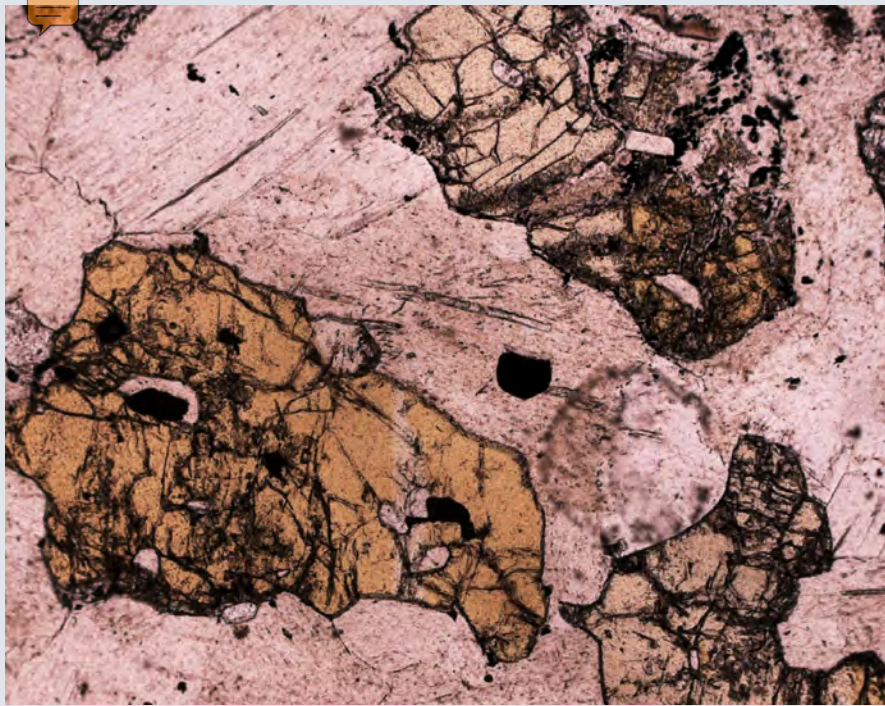


- Teinte jaune.
- Teintes de polarisation vives du 2<sup>ème</sup> — 3<sup>ème</sup> ordre.
- Marbre magnésien à humite, dolomite, phlogopite, spinelle, forstérite.
- Arignac, Ariège, France.

R







# Clinohumite

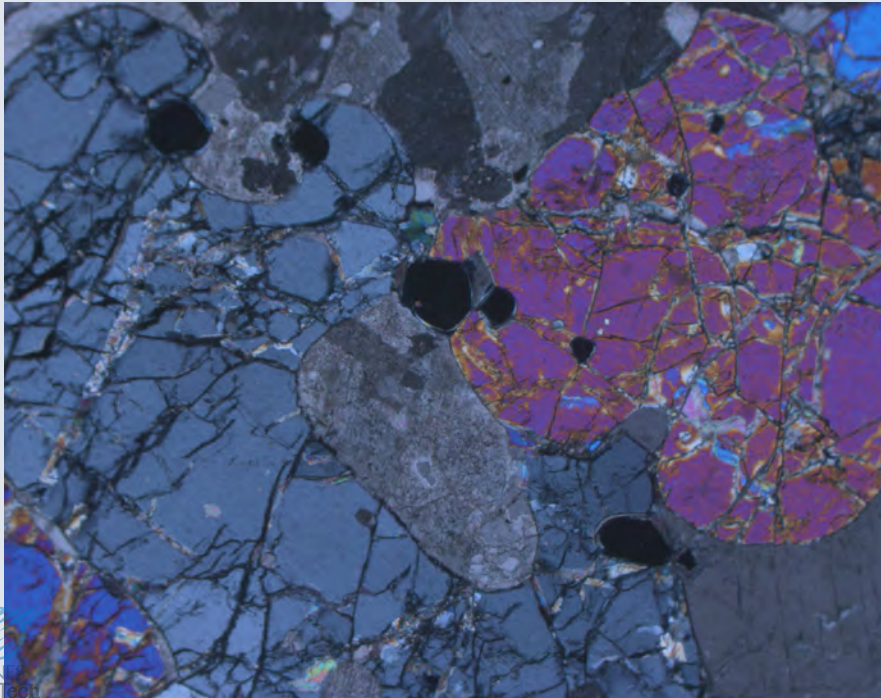
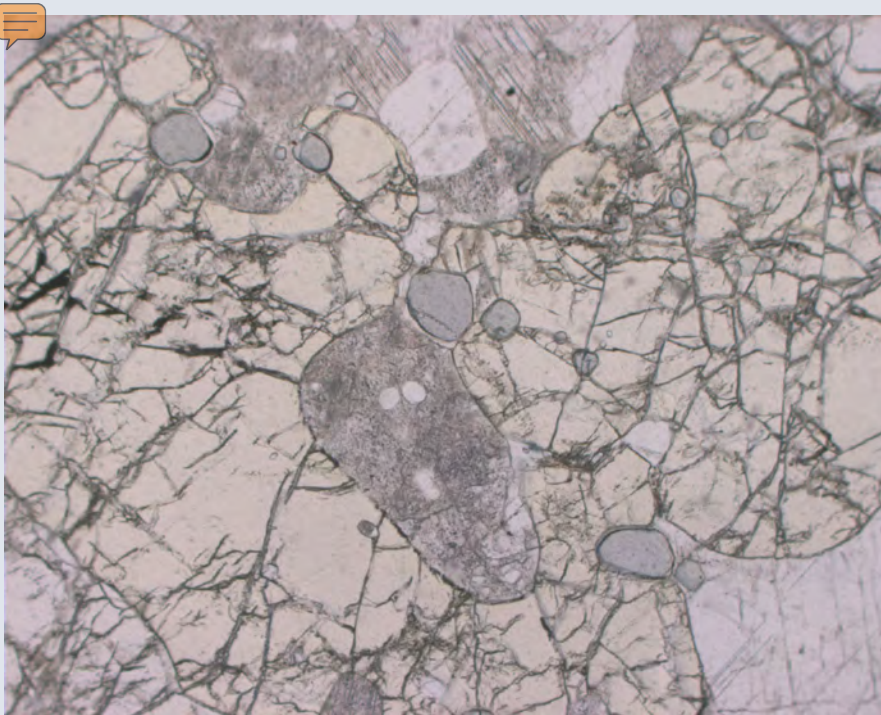


- Pleochroïsme jaune – jaune orangé.
- Le fond de la roche est constitué de phlogopite □ .
- Arignac, Ariège, France.

R







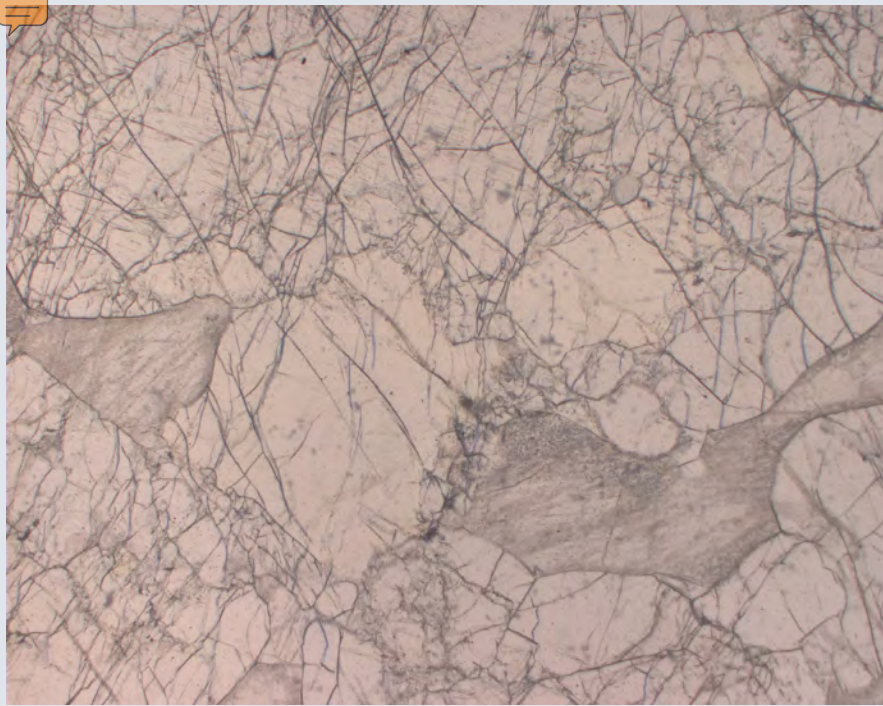
# Clinohumite



- Grands cristaux sans forme de clinohumite de couleur jaune pâle.
- Le cristal du coin inférieur gauche est presque incolore.
- Le fond de la roche est constitué de carbonate.
- Grains de spinelle ( $\text{MgAlO}_4$ ), à fort relief, incolores, isotropes .
- Port de Salau, Ariège, France.

R

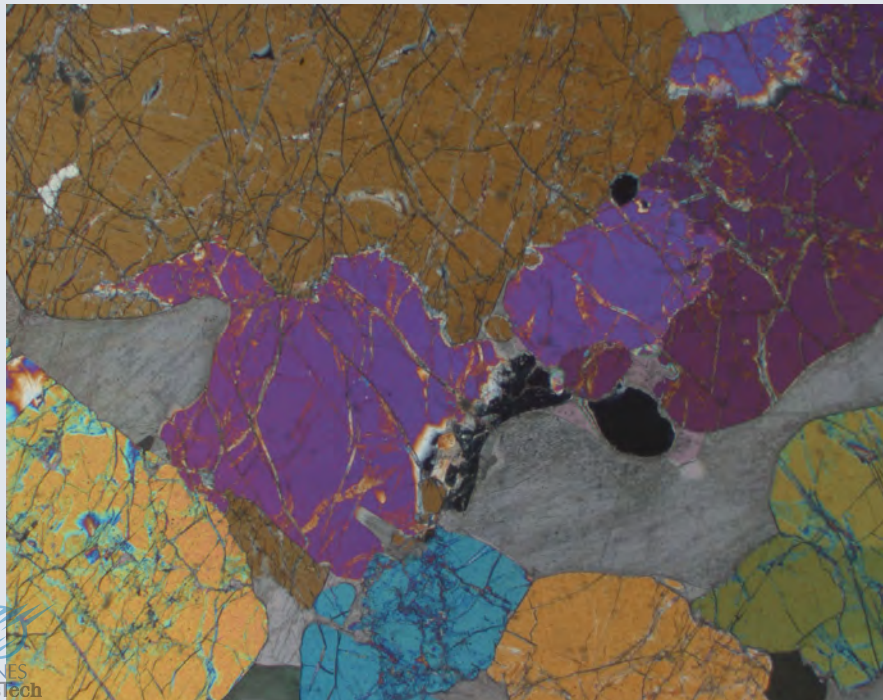




# Chondrodite



- La chondrodite forme deux plages au centre de l'image. Elle se distingue de la forstérite  qui occupe l'essentiel de l'image, par sa couleur jaune très pâle. Carbonate interstitiel.



- Belato, Madagascar.

R



# Minéraux calciques et magnésiens sous-saturés en silice

- Minéraux des roches plutoniques et de métamorphisme de contact de haute température et des skarns :

- Groupe des mélilites :

- Gehlenite  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$
- Na-melilite  $\text{Na Ca AlSi}_2\text{O}_7$
- Åkermanite  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$

- Monticellite  $\text{Ca Mg SiO}_4$

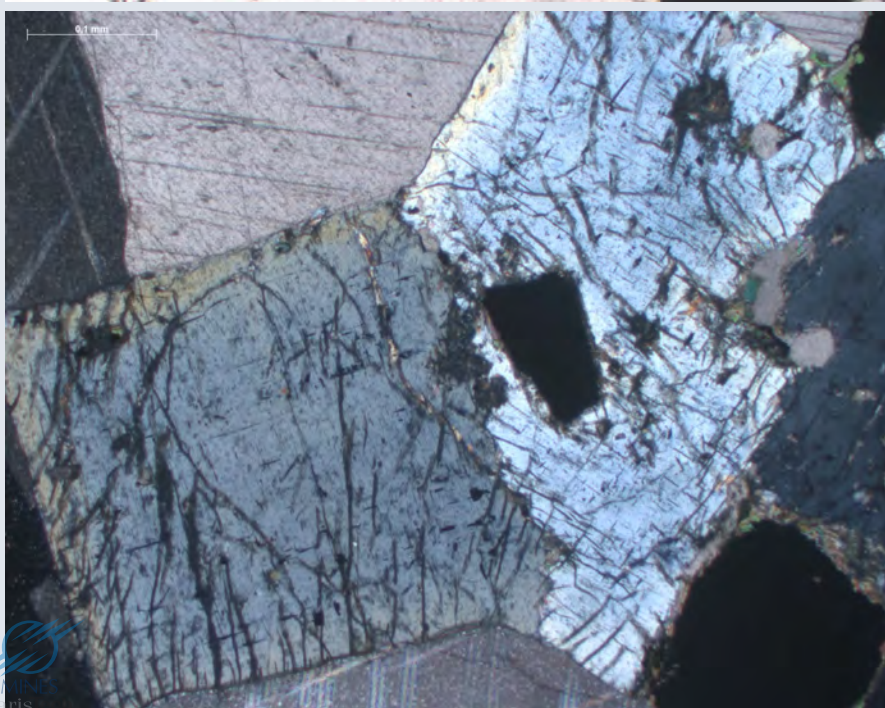
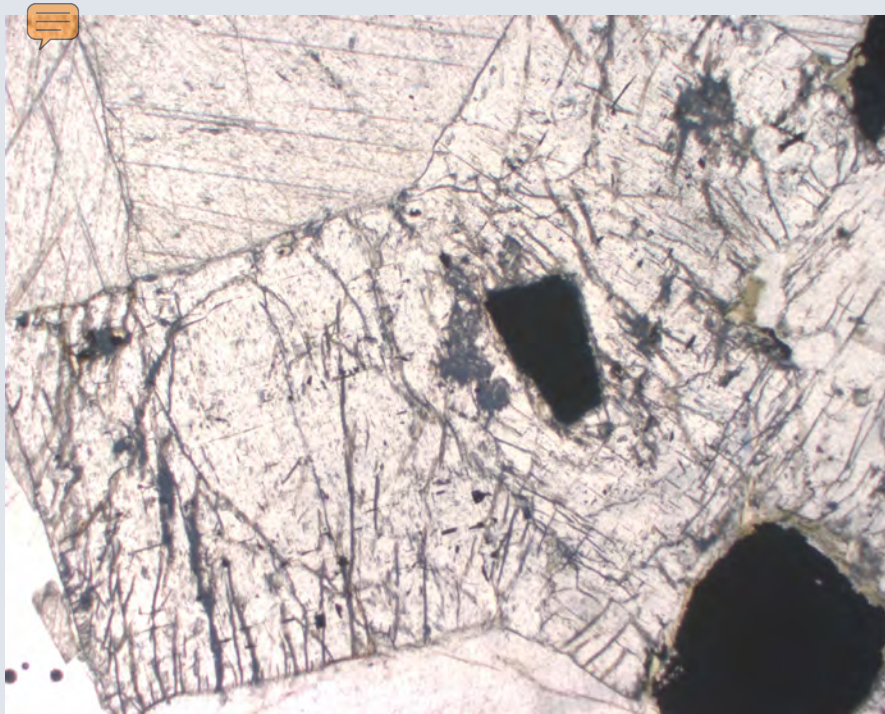
- Perowskite  $\text{CaTiO}_3$



- Minéraux limités aux métamorphisme de contact de haute température et aux skarns (*non traités ici*) :

Larnite ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ), Rankinite ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$ ), Merwinite ( $\text{Ca}_3\text{MgSi}_2\text{O}_6$ ), Spurrite ( $2(\text{Ca}_2\text{SiO}_4) \cdot \text{CaCO}_3$ ), Tilleyite ( $\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot \text{CaCO}_3$ ), etc.

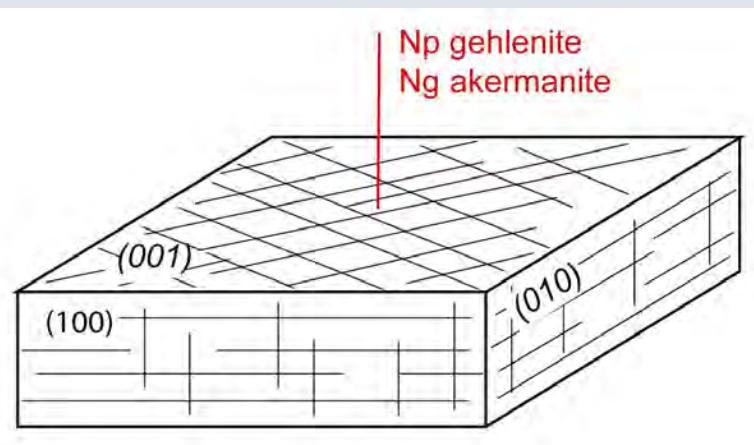




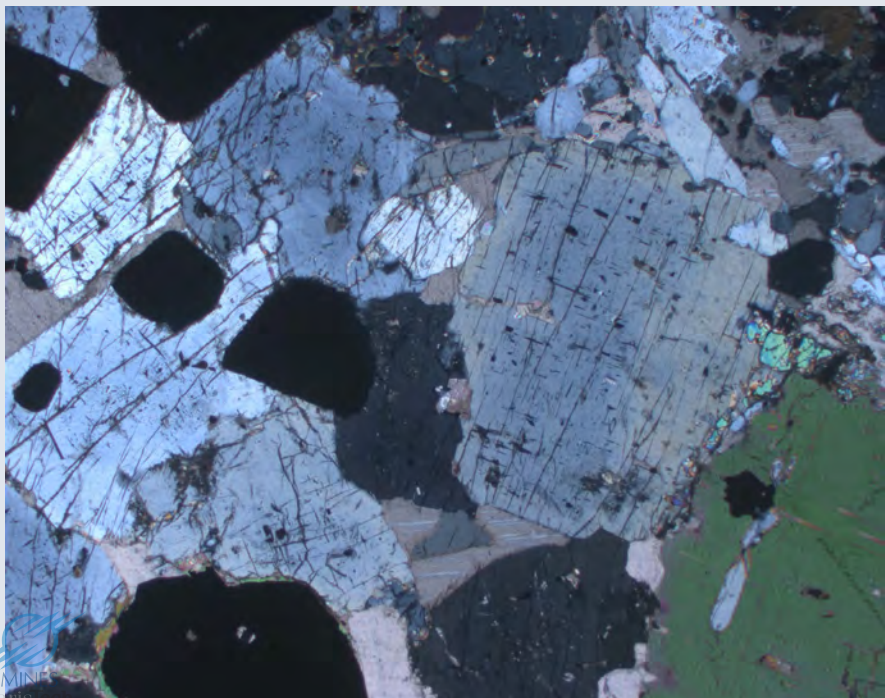
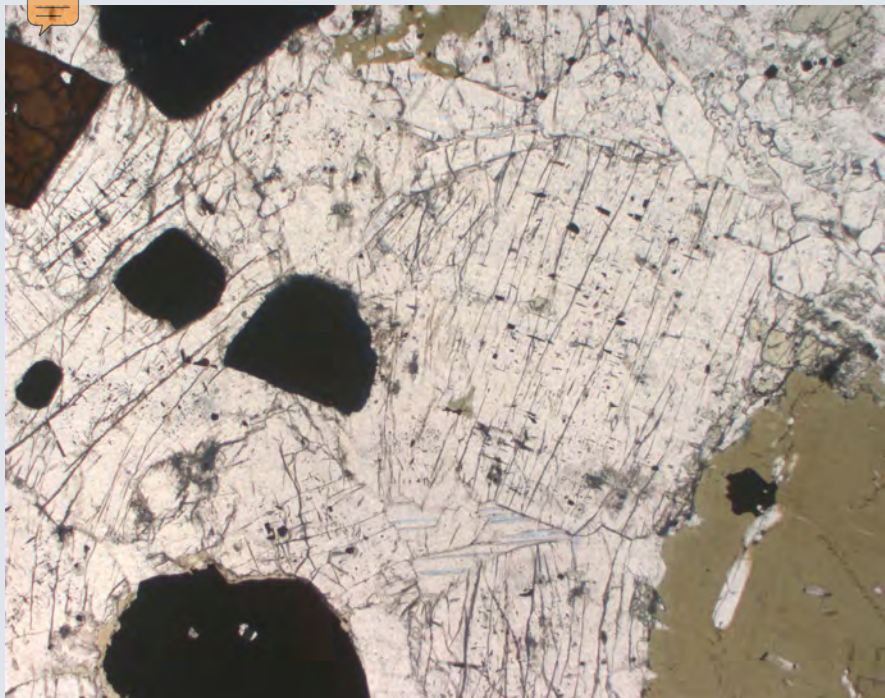
## Mélilite

- Quadratiques
- Tablettes (001).
- Clivages (001) moyen et (110) mauvais.
- Le plus souvent, sections rectangulaires montrant deux clivages à angle droit.
- Carbonatite d'Oka, Québec, Canada.

R







# Mélilite

• Ng 1,624 – 1,666

Np 1,616 – 1,661

Indices moyens de l'ordre de ceux de l'apatite ou de la tourmaline.

• Biréfringence  $\Delta = 0,001 - 0,013$

Gris sombres à jaune pâle du 1<sup>er</sup> ordre.

• Souvent teintes anormales.

• Uniaxe négatif (gehlenite) à positif (åkermanite).

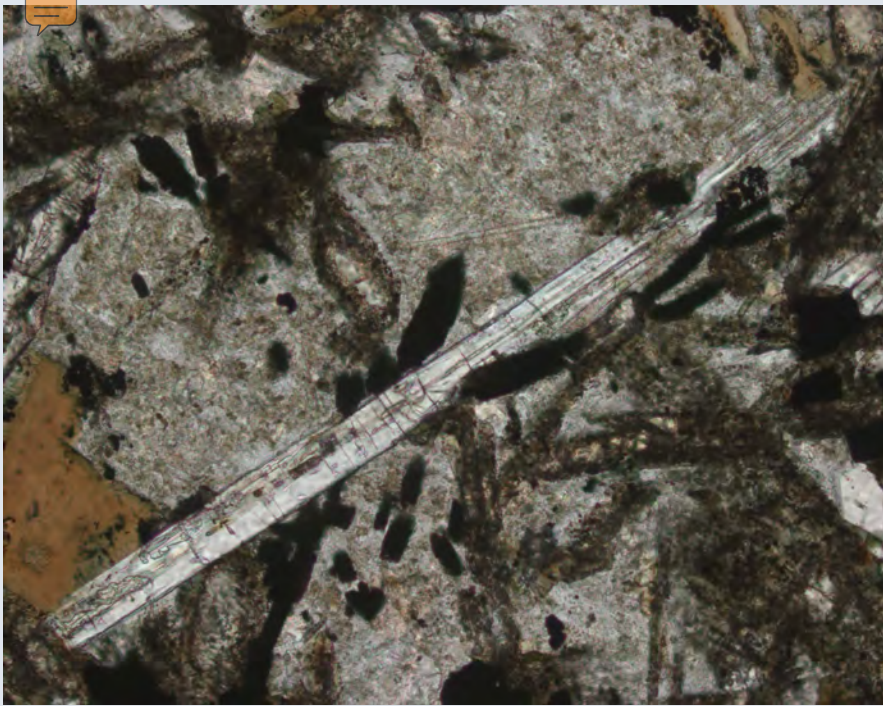
• Le roche comme celle de l'image précédente est une carbonatite : calcite, biotite (brun vert), magnétite

• Oka, Québec, Canada.

R



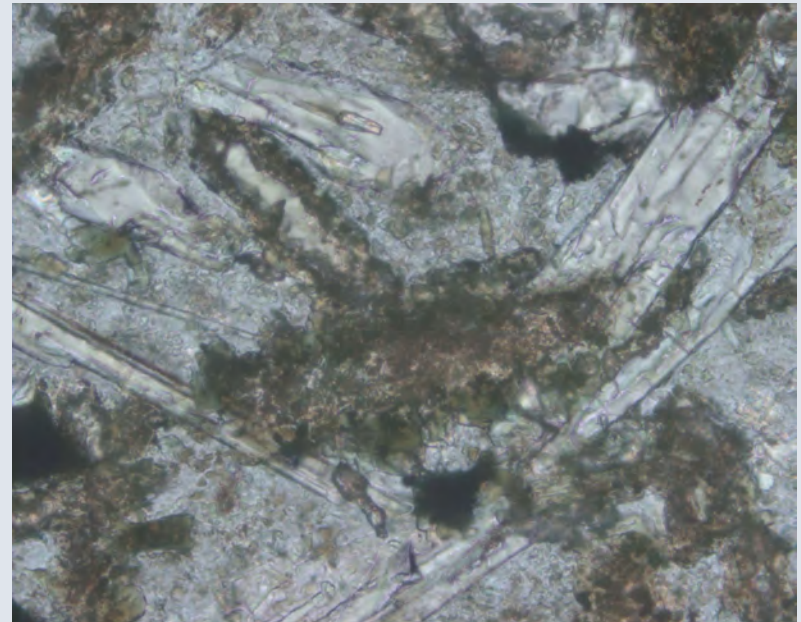
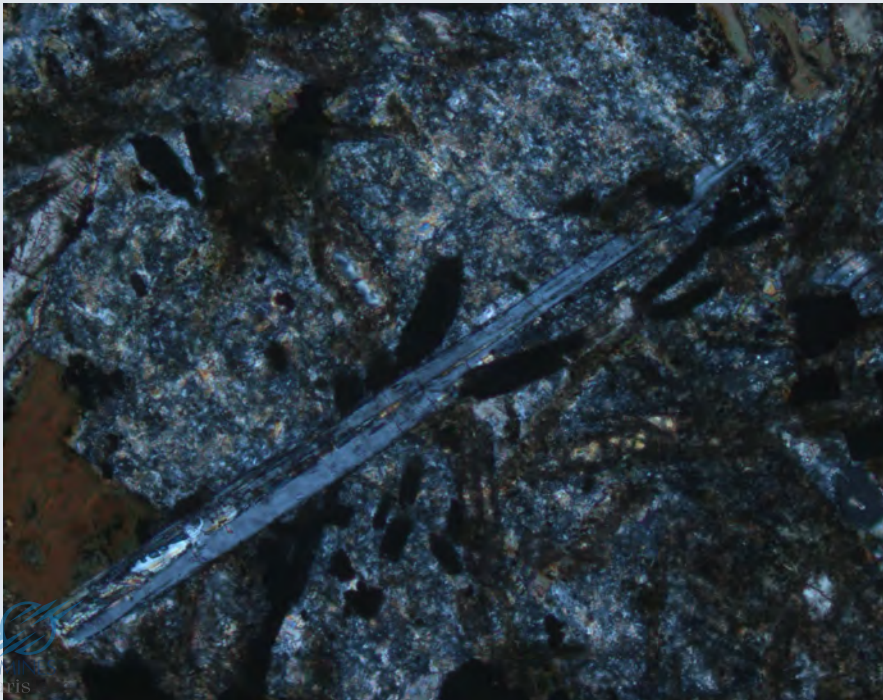




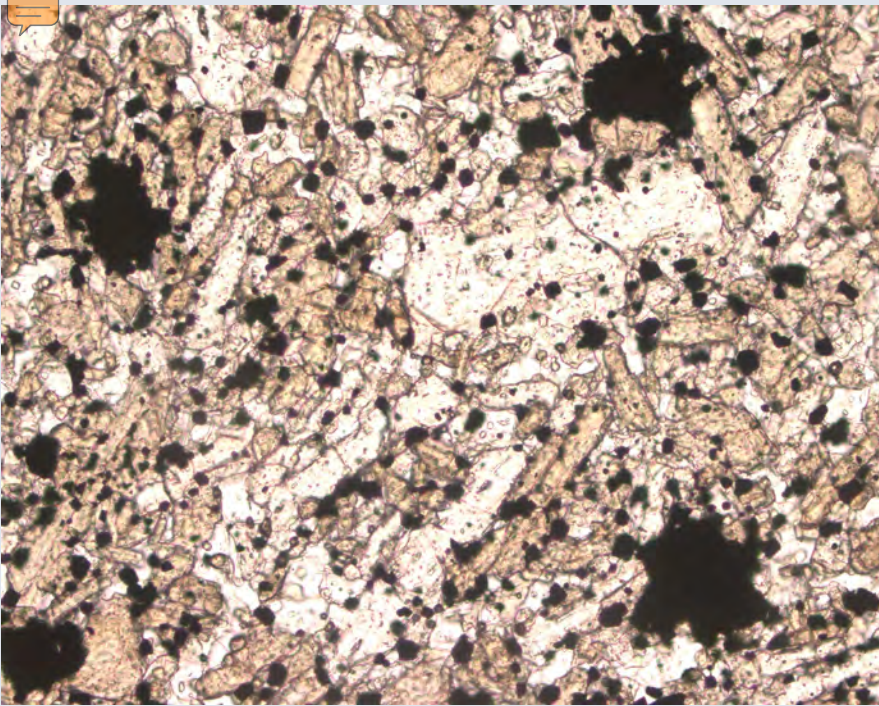
## Melilite dans un basalte



- Section rectangulaire perpendiculaire aux tablettes.
- Deux clivages perpendiculaires.
- Teintes de polarisation anormales dans les gris bleu.
- Les minéraux brun foncé sont des clinopyroxènes altérés, le minéral brun rouge à gauche est de la biotite, le verre du fond est altéré en smectites + carbonates.
- Bermudes.

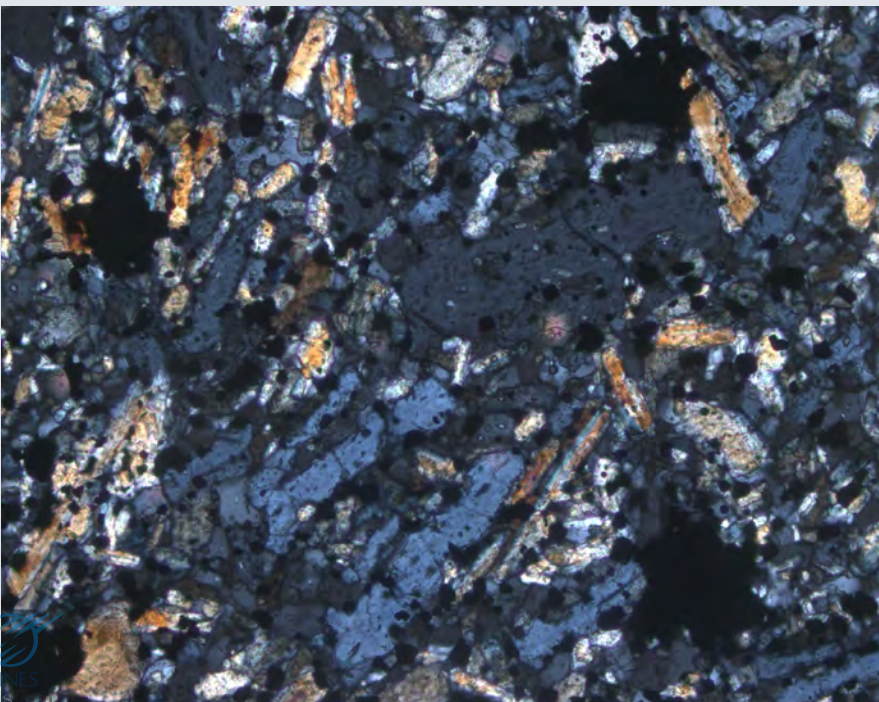






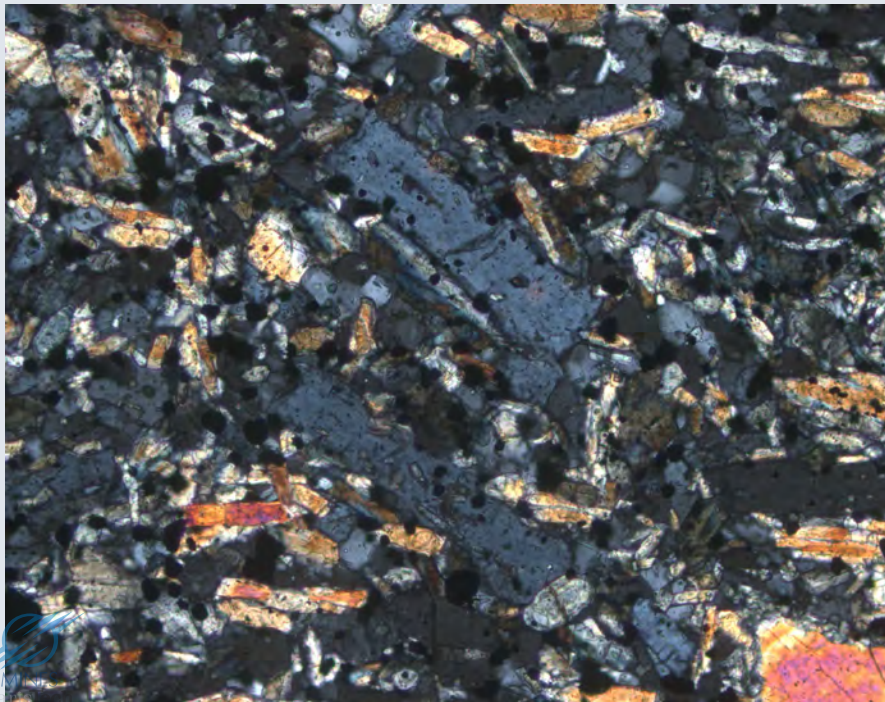
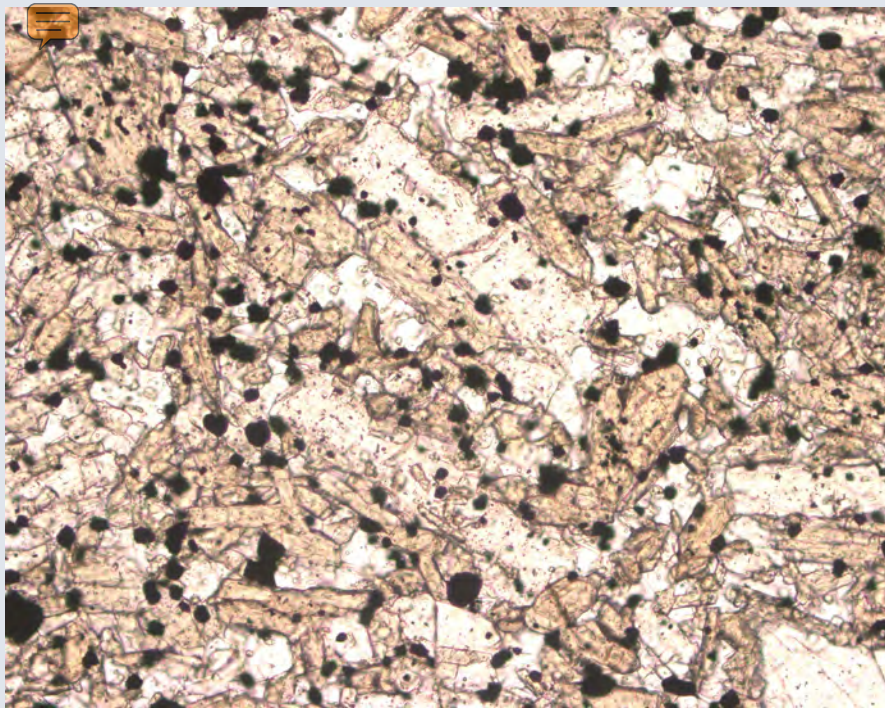
## Mélilite dans un basalte

- La mésostase est formée de mélilite (teintes de polarisation gris foncé ou gris bleuté (teinte anormale)), de clinopyroxène et de titano-magnétite.
- Höwenegg, Bade-Württemberg, Allemagne.



AR





## Mélilite dans un basalte

- La mésostase est formée de mélilite (teintes de polarisation gris foncé ou gris bleuté (teinte anormale)), de clinopyroxène, d'olivine (coin inférieur droit, incolore, teintes de polarisation vives) et de titanomagnétite.
- Höwenegg, Bade-Württemberg, Allemagne.

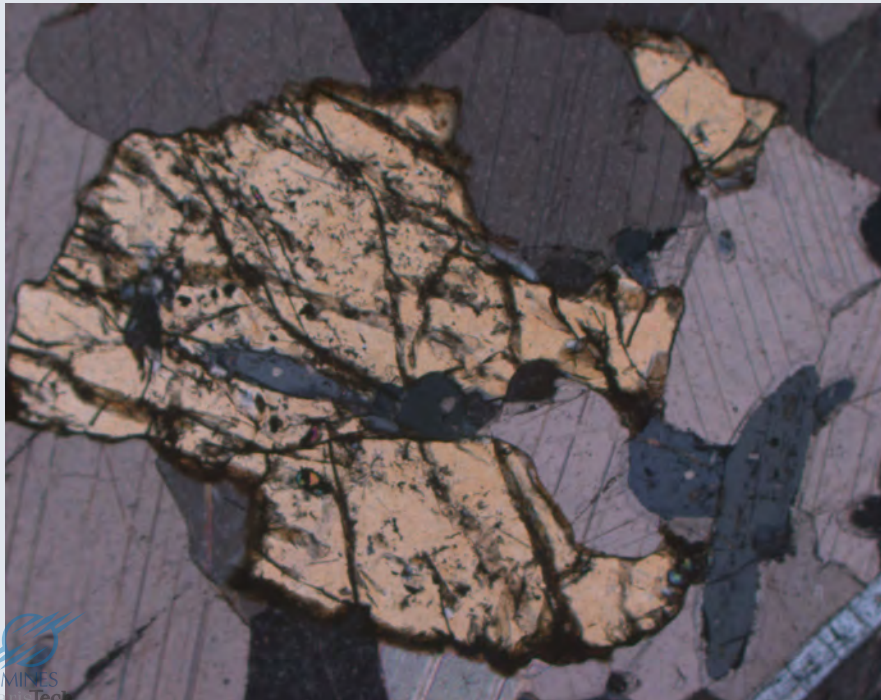
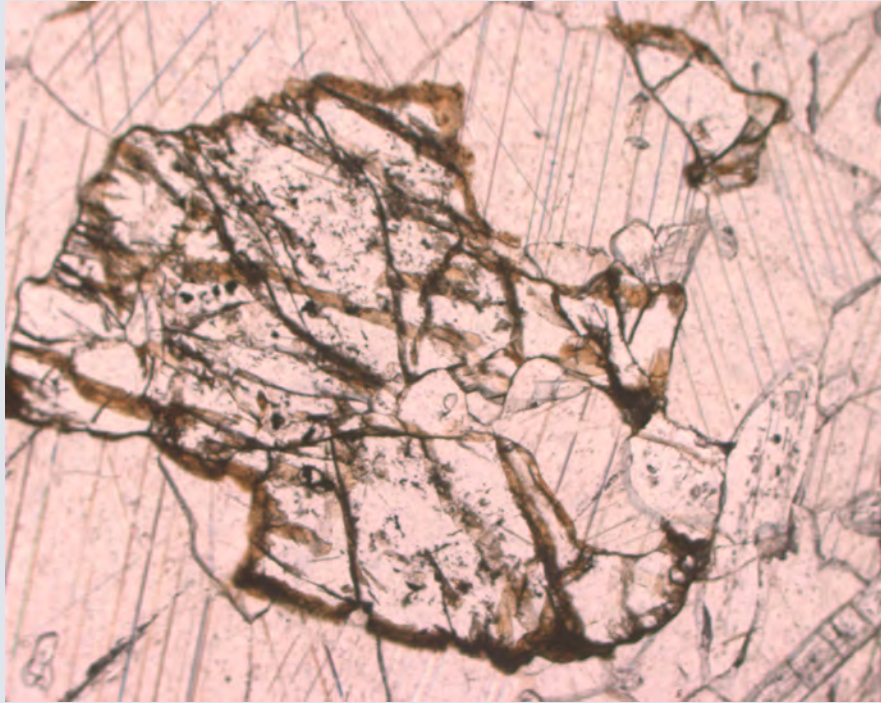






# Monticellite

## $\text{Ca}(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_4$



- Minéral voisin des olivines.
- Orthorhombique.
- Grains plus ou moins arrondis, hexagones, octogones.
- Mauvais clivage (010).
- Incolore en lame mince.
- Np 1,639 – 1,654 Ng 1,653 – 1,674 Indices voisins de ceux des olivines magnésiennes.
- Biréfringence  $\Delta = 0,012 - 0,20$
- Jaune orangé – rouge de la fin du 1<sup>er</sup> ordre, nettement plus faibles que celui des olivines.
- Biaxe négatif  $2V \ 72-82^\circ$
- $r > v$

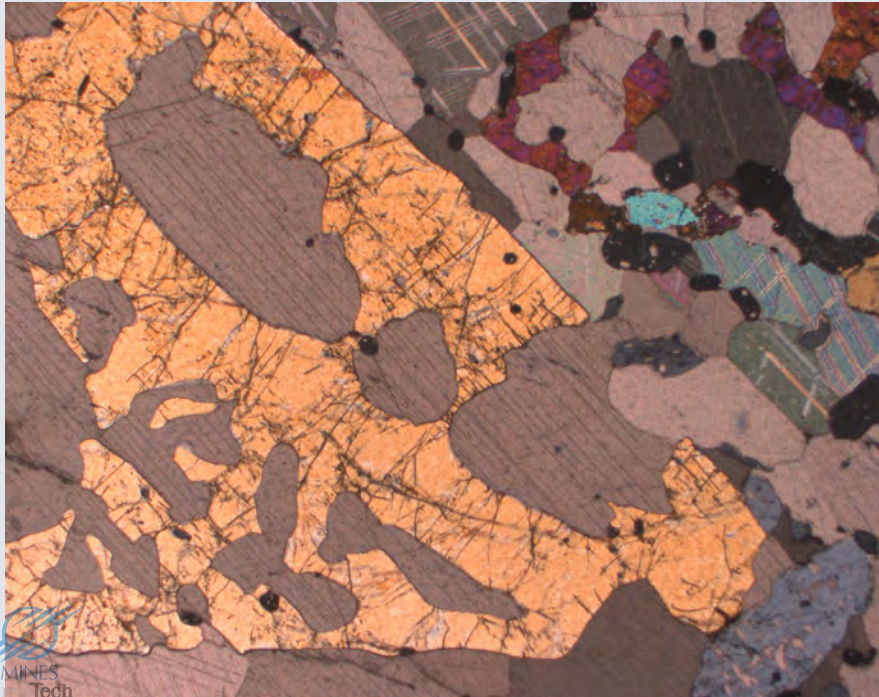
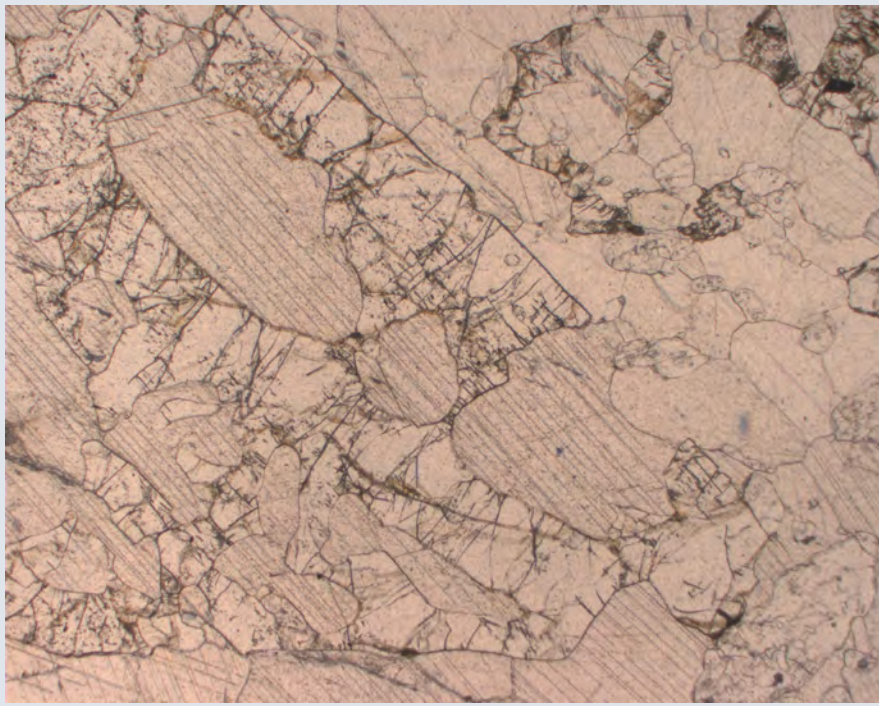






# Monticellite

## $\text{CaMgSiO}_4$



- Même échantillon que la fiche précédente.
- Noter le fort relief et les teintes de polarisation plus faibles que celles d'une forstérite.
- Le clivage est visible sur cet échantillon.
- La roche est une carbonatite : le fond de la roche est constituée de calcite, le minéral en tablette dans le coin inférieur droit des deux photos est de la mélilite.
- Oka, Québec, Canada.



| Nom<br>formule chimique                                                                                                                                                     | symétrie | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice                                                                                                  | Indice                | Couleur<br>Altérations                             | Biréfringence | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|---------------|----------------------------|
| Carbonates<br>calcite $\text{CaCO}_3$<br>dolomite - ankerite<br>$\text{Ca}(\text{Mg,Fe})(\text{CO}_3)_2$<br>magnésite - sidérite ( $\text{FeCO}_3$ )<br>- rhodocrosite (Mn) | rhomb    | calcite : rarement des formes<br>dolomite, sidérite : rhomboédres<br><br>clivages rhomboédriques<br><br>macles : calcite (01 $\bar{1}$ 2) - dolomite (02 $\bar{2}$ 1) |                       | incolore<br><br>pléochroïsme<br>de relief          |               | U-                         |
| Epidotes<br>clinozoïsite (Al)<br>$\text{Ca}_2(\text{Al, Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$<br>pistachite (Al,Fe)                                      | mnocl    |                                                                                                                                                                       |                       | incolore<br><br>vert jaune<br><br>vert             |               | B+<br><br>B-               |
| Allanite<br>$(\text{Ca,Ce,L a})_2(\text{Al, Fe}^{3+})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$                                                                        |          | section longitudinale<br>section basale                                                                                                                               | parfois<br>métamictes | brun rosé<br>brun jaune                            |               | B-                         |
| Scapolites<br>marialite<br>$3(\text{NaAlSi}_3\text{O}_8), \text{NaCl}$<br>meionite<br>$3(\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8), \text{Ca}(\text{CO}_3, \text{SO}_4)$          | quadr    |                                                                                                                                                                       |                       | incolore                                           |               | U-                         |
| Prehnite<br>$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$                                                                                                   | orthor   |                                                                                                                                                                       |                       | incolore<br><br>ressemble<br>à la<br>muscovite     |               | B+                         |
| Idocrase (vésuvianite)<br>$\text{Ca}_{12}(\text{Al,Fe})_6\text{Si}_{10}\text{O}_{40}(\text{OH, F})_4$                                                                       | quadr    |                                                                                                                                                                       |                       | incolore<br><br>(brunâtre<br>verdâtre<br>jaunâtre) |               | U-                         |
| Wollastonite<br>$\text{CaSiO}_3$                                                                                                                                            | tricl    |                                                                                                                                                                       |                       | incolore                                           |               | B-                         |





## 6 - minéraux accessoires



# 6- les minéraux accessoires



## Sommaire

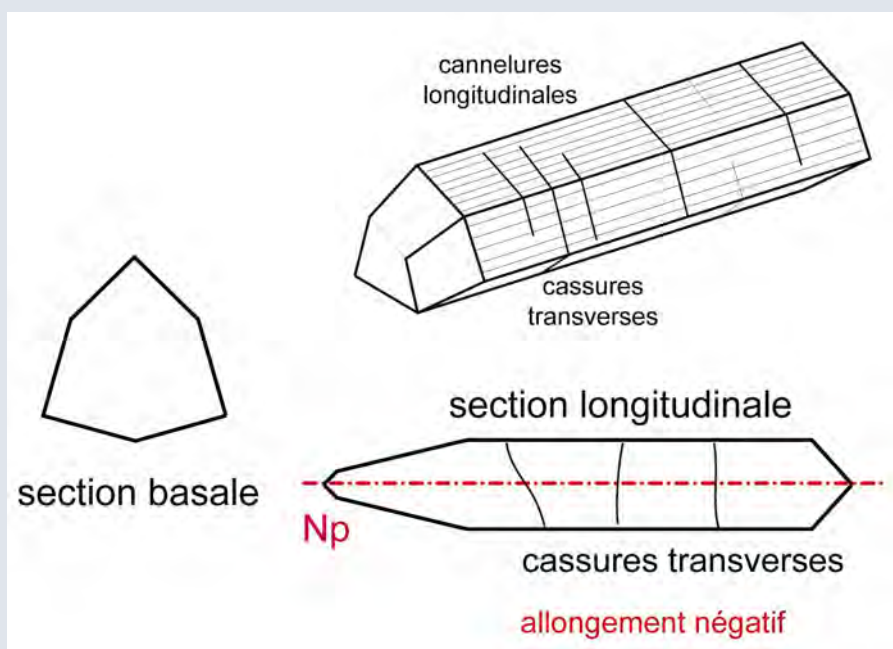
- |                       |                          |                               |                          |
|-----------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| • Tourmaline          | <input type="checkbox"/> | • <i>Minéraux accessoires</i> |                          |
| – Faciès luxullianite | <input type="checkbox"/> | <i>des roches alcalines</i>   | <input type="checkbox"/> |
| • Axinite             | <input type="checkbox"/> | • Aenigmatite                 | <input type="checkbox"/> |
| • Apatite             | <input type="checkbox"/> | • Astrophyllite               | <input type="checkbox"/> |
| • Zircon              | <input type="checkbox"/> | • Eudyalite                   | <input type="checkbox"/> |
| • Monazite            | <input type="checkbox"/> | • Låvenite                    | <input type="checkbox"/> |
| • Sphène              | <input type="checkbox"/> | • Pérovskite                  | <input type="checkbox"/> |
| • Rutile              | <input type="checkbox"/> | • Zirconolite                 | <input type="checkbox"/> |
| – Faciès sagénite     | <input type="checkbox"/> |                               |                          |
| • Spinelle            | <input type="checkbox"/> |                               |                          |





## Minéraux accessoires

- Tourmaline  $\text{Na(Fe, Mg, Mn, Li)}_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4(\text{BO}_3)_3$
  - Axinite  $\text{Ca}_2(\text{Fe, Mn, Mg})\text{Al}_2(\text{Si}_4\text{O}_{12})(\text{BO}_3)(\text{OH})$
  - Apatite  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH, F, Cl})$
  - Zircon  $\text{ZrSiO}_4$
  - Monazite  $(\text{Ce, La, Th})\text{PO}_4$
  - Sphène (titanite)  $\text{CaTiSiO}_4(\text{O, OH, F})$
  - Rutile  $\text{TiO}_2$
  - Spinelles  $\text{R}^{2+}\text{O R}^{3+}_2\text{O}_3$ 
    - $\text{R}^{2+} = \text{Mg, Fe, Mn, Zn, Ni}$
    - $\text{R}^{3+} = \text{Al, Fe, Cr, Ti}$ 
      - »  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  spinelle
      - »  $\text{Fe}_2\text{TiO}_4$  ulvospinelle
      - »  $(\text{Fe, Mg})(\text{Al, Cr})_2\text{O}_4$  picotite
- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  magnétite  
 $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  chromite



## Tourmaline (sections basales)

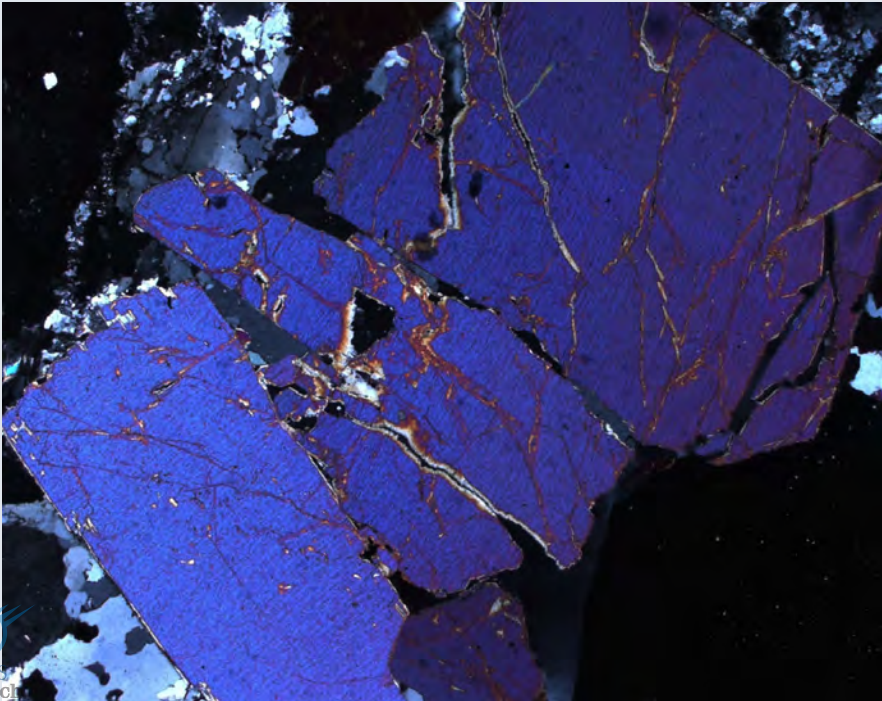
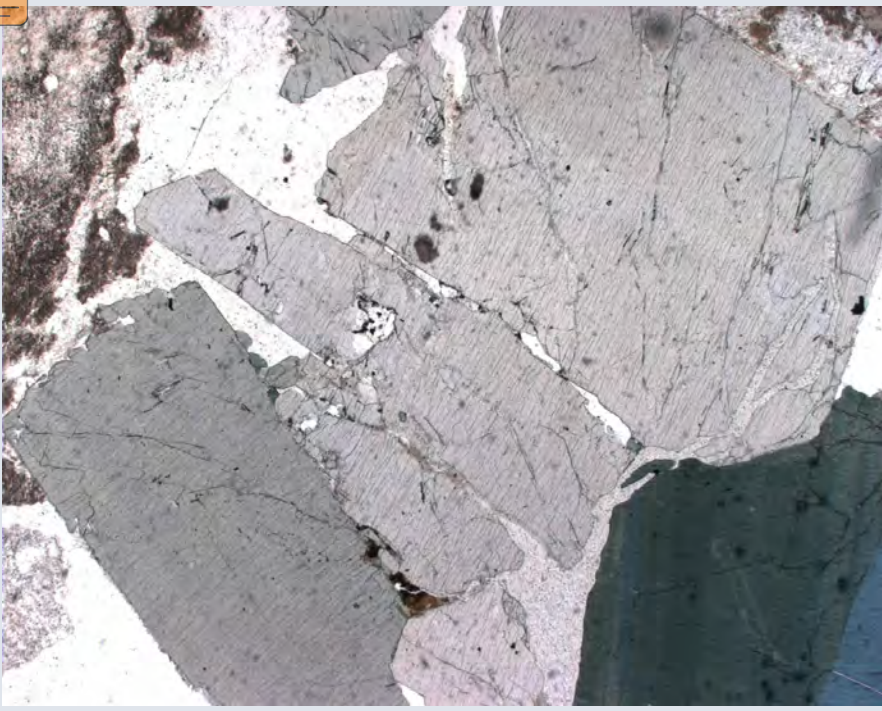
- Rhomboédrique.
- Souvent automorphe.
- Les tourmalines communes (ferrifères) sont vertes, vert jaune, vert bleu, bleues. Elles sont souvent zonées.
- Pléochroïsme inverse.
- Indices moyens

$N_p$  1,610 – 1,650

$N_g$  1,635 – 1,675







# Tourmaline

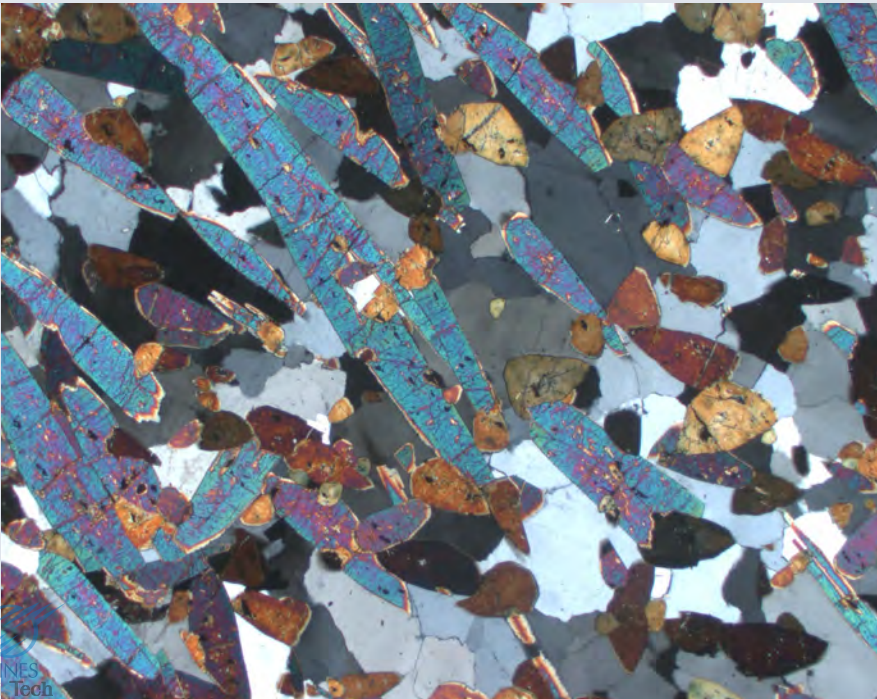
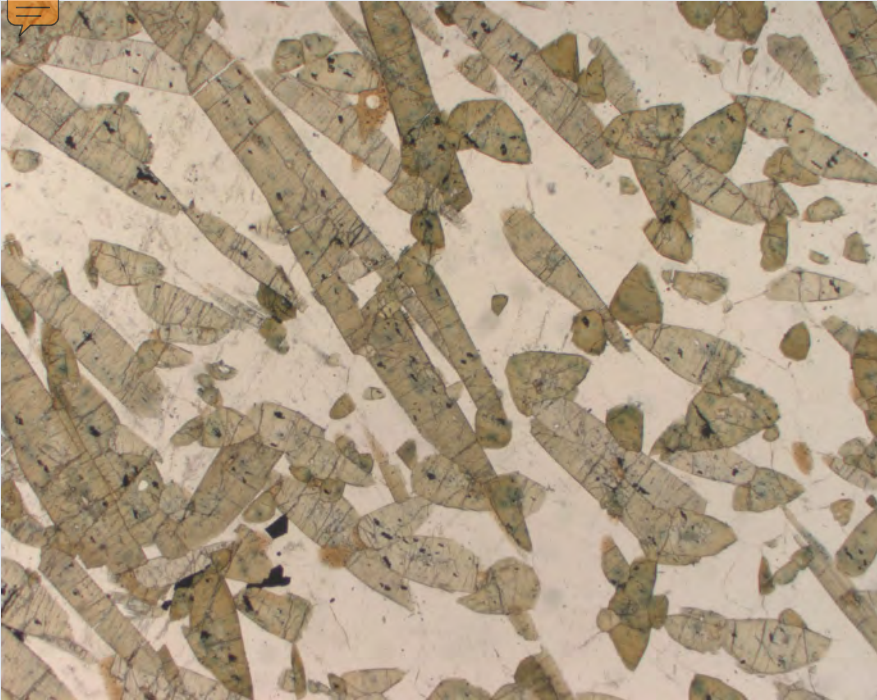
(sections longitudinales)

- Pas de clivage.
- Des cassures transverses.
- Biréfringence  $\Delta = 0,021 - 0,035$   
Teintes vives du 2<sup>ème</sup> ordre.  
La section du coin SE, voisine de  
l'axe optique est pratiquement  
éteinte.
- Extinction droite sur le prisme ;  
allongement négatif.
- Uniaxe négatif.
- Castelnau de Brassac Tarn, France.

C



# Tourmaline

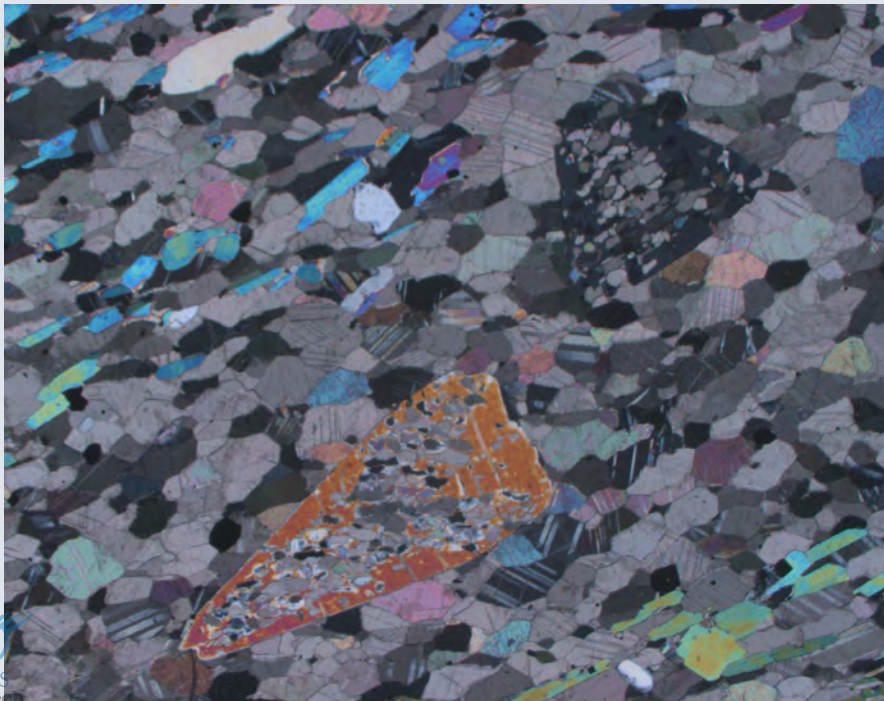
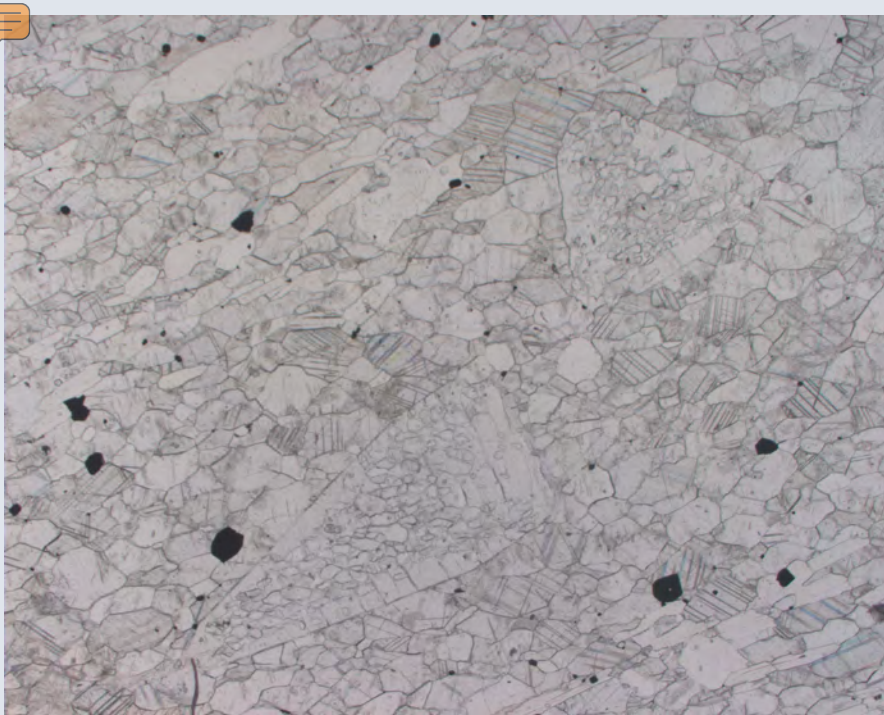


- Cette section montre différents cristaux automorphes de tourmaline sur un fond de quartz.
- L'orientation variable des cristaux permet d'observer :
  - Les **formes** (sections basales en triangle à face courbe ; sections longitudinales dont les deux extrémités sont différentes) ;
  - Le **pléochroïsme** ;
  - Les **teintes de polarisation** :
    - Teintes vives pour les sections longitudinales à  $45^\circ$  ;
    - Sections basales voisines de l'axe optique presque éteintes.





# Tourmaline magnésienne



- Les tourmalines magnésiennes (ainsi que les tourmalines lithinifères) sont incolores ; elles ont des indices plus bas et une biréfringence plus faible que les tourmalines ferrifères.
- On observe ici deux sections automorphes (section basale triangulaire, éteinte en LP) et une section plus ou moins longitudinale ; toutes deux sont très poecilitiques.
- Marbre dolomitique avec un fond de carbonates avec phlogopite
- Binnental, Suisse.

AR

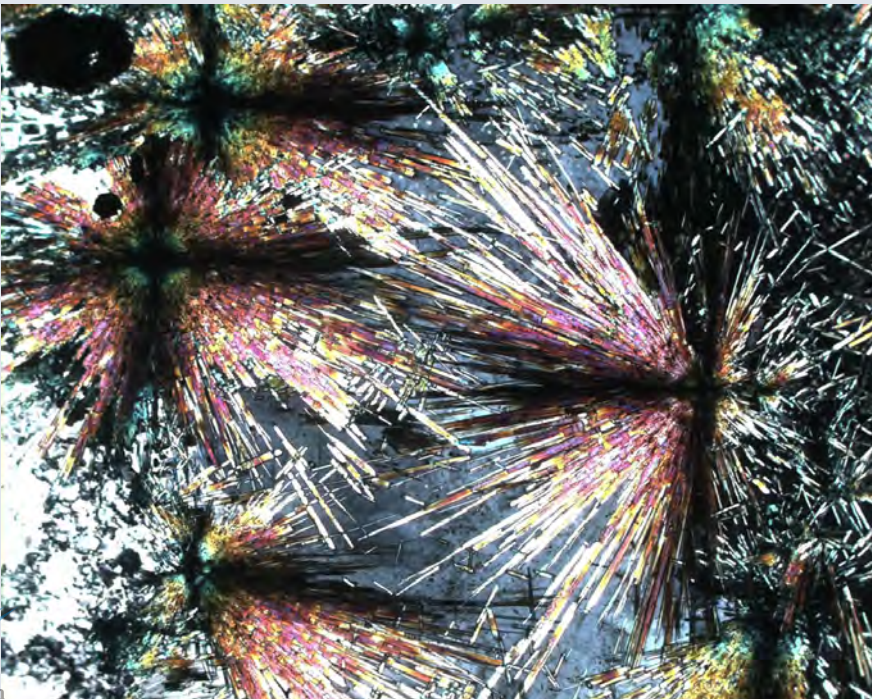
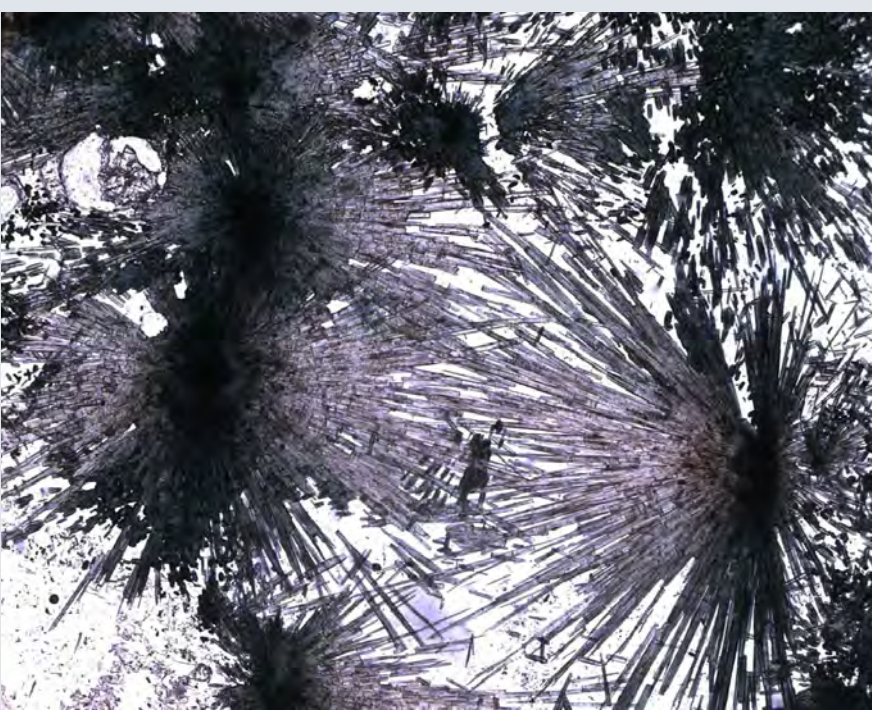




# Tourmaline faciès luxullianite

- La luxullianite est un faciès de tourmaline en fibres associées en sphérolites.
- En LP, les fibres occupant toutes les directions présentent un éclairement maximum à  $45^\circ$  (NE – SW et NW – SE) et sont éteintes en position NS et EW ce qui produit le phénomène de croix noire.
- La Chaumette, Lozère, France.

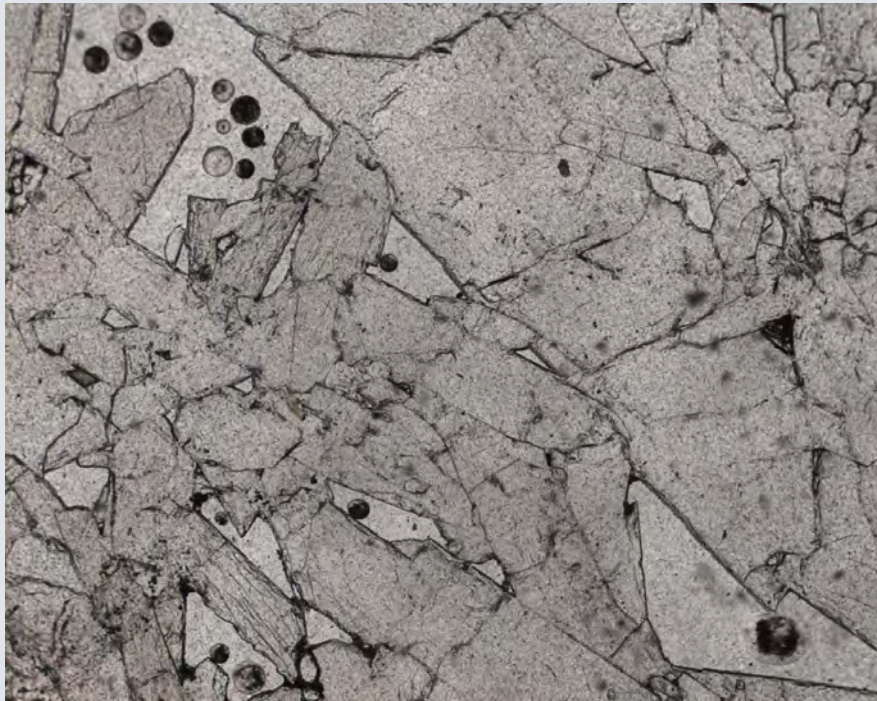
AR







# Axinite



- Triclinique.
- Sections en parallélogrammes aigus et formes dérivées par troncatures (axinite = hache), lentilles ; également en grains.
- Clivages : (100) bon ; (001), (110), (011) mauvais.

Les clivages sont parfois peu nets en lame mince ; sur les photos ci-contre visibles seulement sur quelques sections.

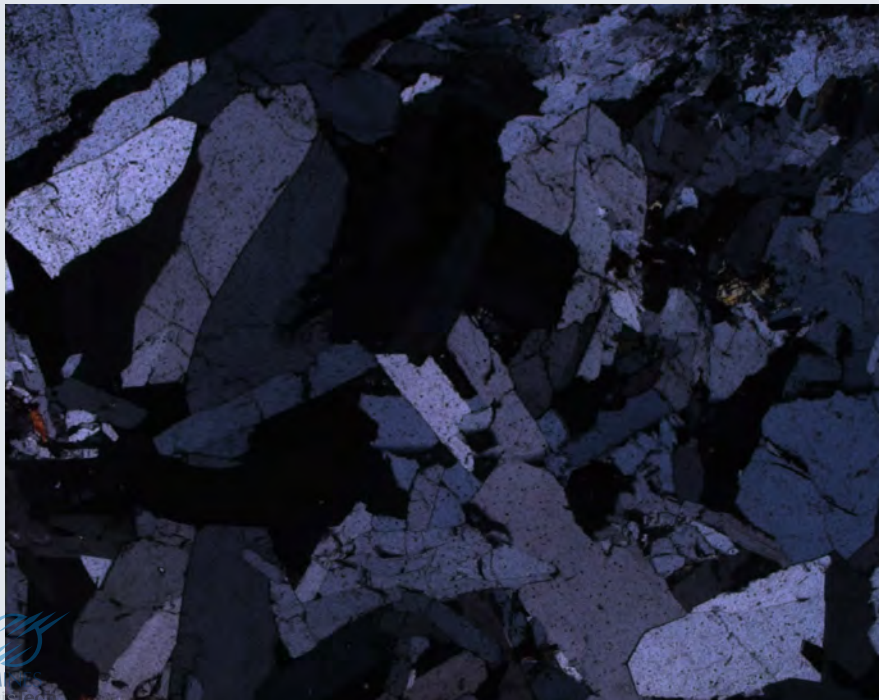
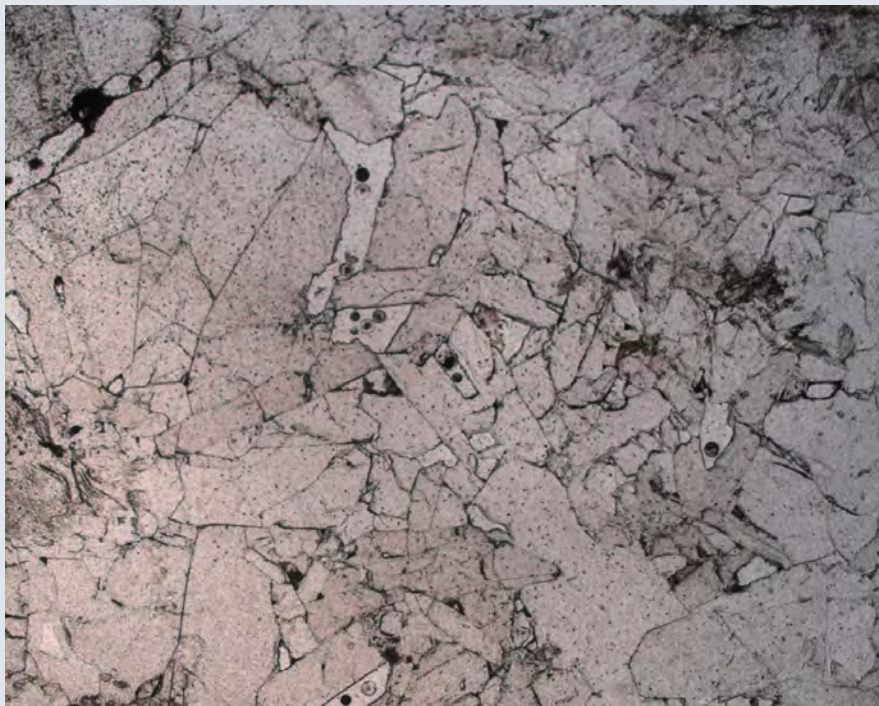
- Indices forts :

Np 1,674 – 1,693

Ng 1,684 – 1,704

- On peut apprécier sur les photos ci-contre l'indice par rapport au Baume (les ronds noirs sont des bulles dans le Baume).



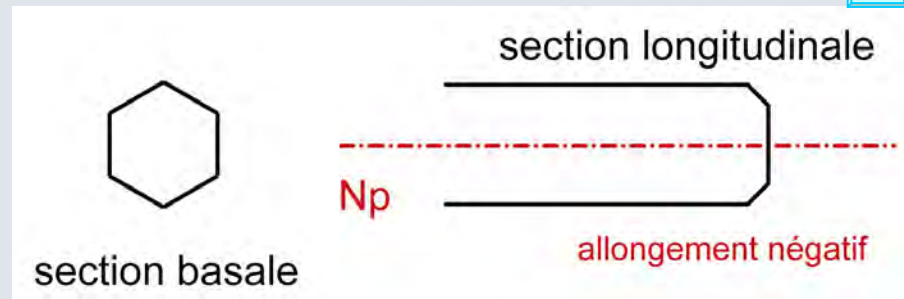
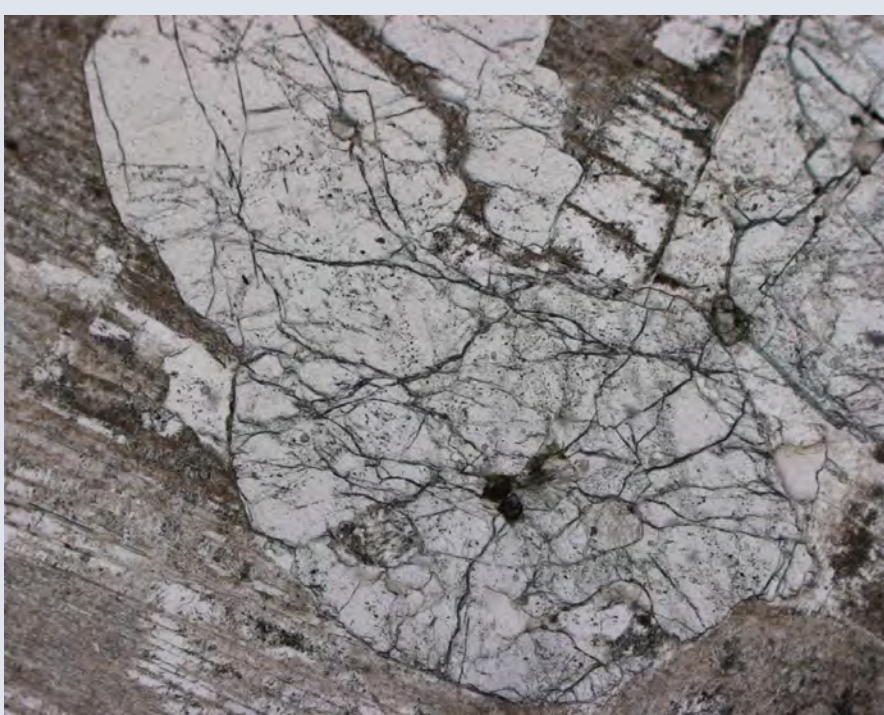


## Axinite

- Incolore.
- Les termes manganésifères peuvent présenter de légères couleurs brun violacé, brun jaune.
- Biréfringence  $\Delta = 0,009 - 0,011$   
Comme le quartz : gris – blancs du 1<sup>er</sup> ordre.
- Biaxe négatif.
- $2V \ 55 - 81^\circ$
- $r < v$
- Le Bourg d'Oisans, Isère, France.

R





## Apatite



- Hexagonal.
- Prismes à base hexagonale ; le plus souvent en grains.
- Mauvais clivages (0001) et (10 $\bar{1}$ 0) rarement visibles
- Incolore
- Indices assez élevés pour un minéral incolore

Np 1,624 – 1,666

Ng 1,629 – 1,667

C



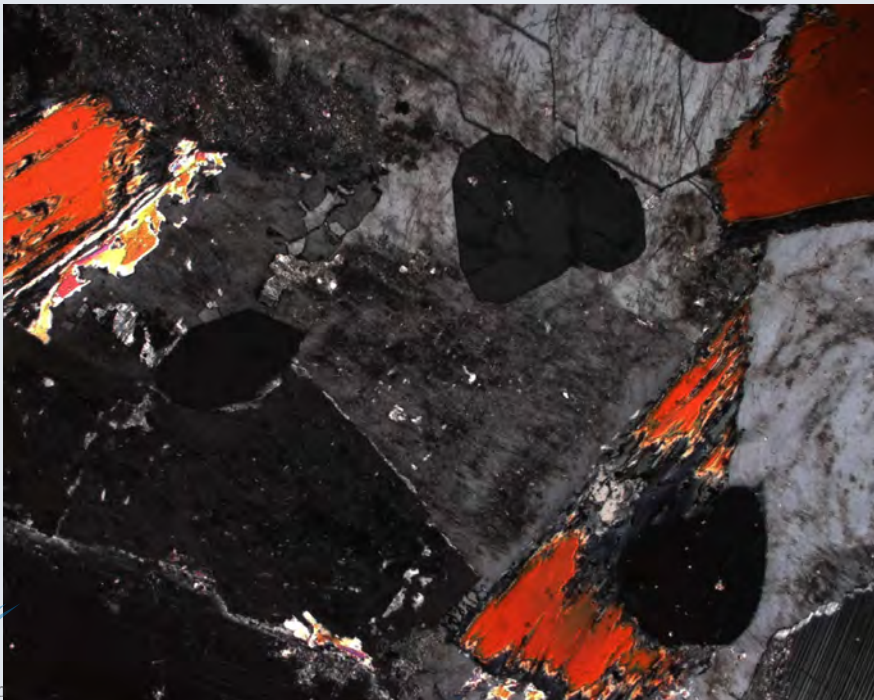
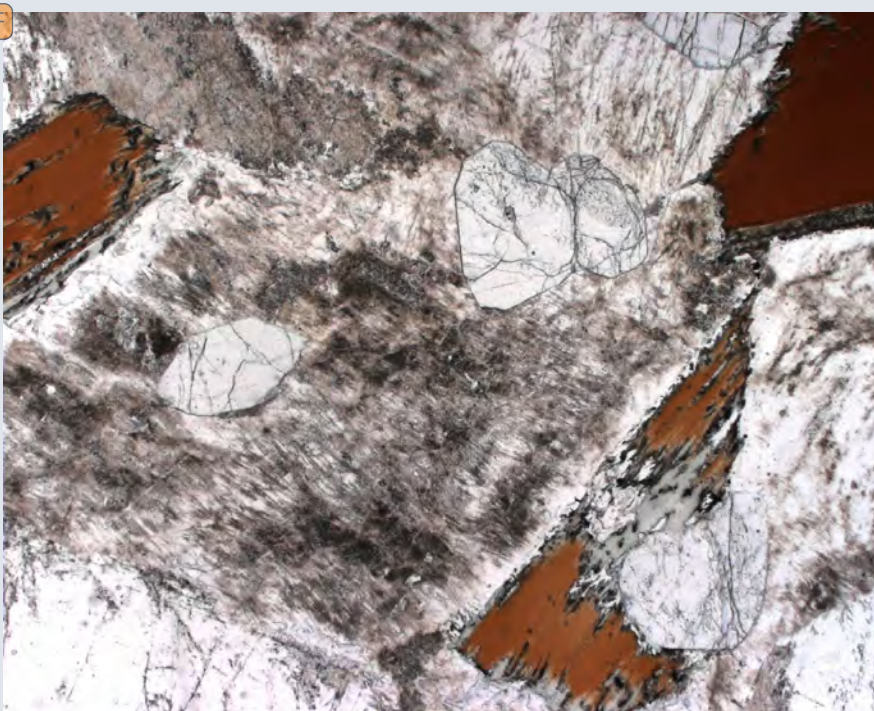


# Apatite

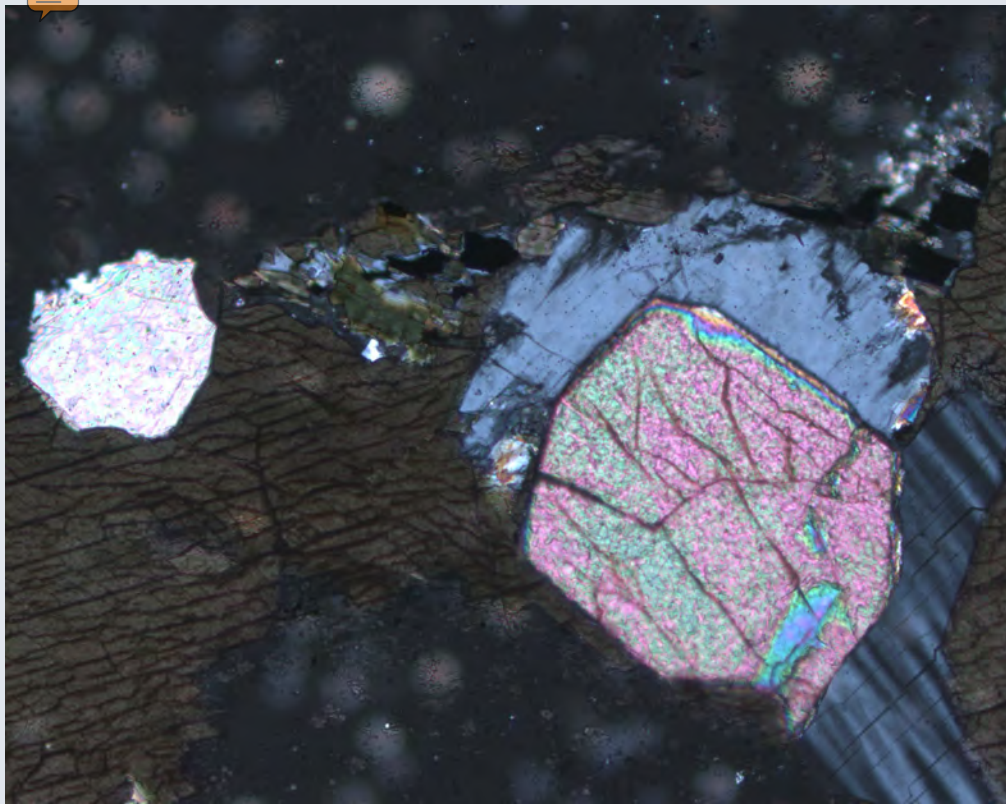
- Biréfringence  $\Delta = 0,001 - 0,007$   
Polarise dans des gris plus ou moins sombres du 1<sup>er</sup> ordre.
- Extinction droite sur le prisme.
- Allongement négatif.
- Uniaxe négatif (figures de lumière convergente difficiles).

## C

- Grains arrondis, pratiquement éteints dans un granite (orthose – biotite, muscovite secondaire).
- Col de Fontfroide, Hérault, France.





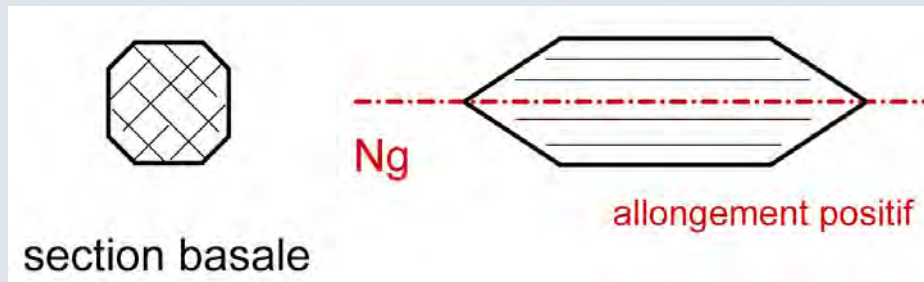


# Zircon $\text{ZrSiO}_4$

- Quadratique.
- Assez souvent automorphes : prismes à base carrée ou octogonale et terminaisons pyramidales.
- Grains arrondis.
- Clivage (110) : deux clivages à angle droit sur les sections basales.
- Indices très forts, supérieurs à ceux du grenat :

$N_p$  1,923 – 1,960

$N_g$  1,968 – 2,015



- Biréfringence  $\Delta = 0,042 - 0,065$

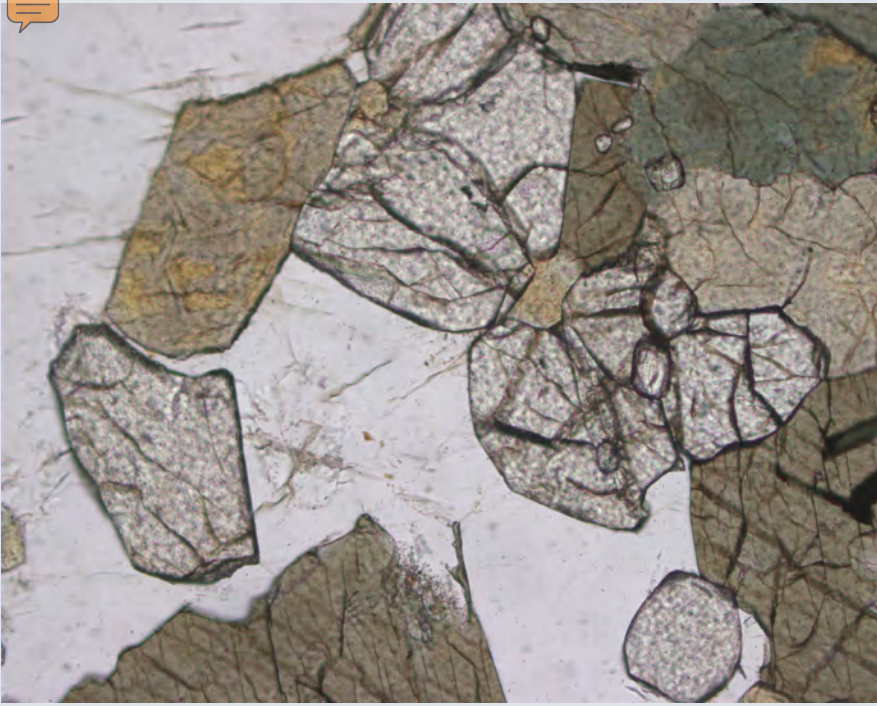
**Teintes du 3ème ordre ou d'ordres supérieurs**

- Uniaxe positif.
- Rocher du Loup, Cameroun

**C**



## Zircon $\text{ZrSiO}_4$



Ici, grains dans une syénite néphélinique avec microcline, néphéline (photo suivante) et une amphibole sodique brune du groupe de l'arfvedsonite  (clivages), allanite  (coin NE et centre droit), carbonate (photo suivante)

Rocher du Loup, Cameroun

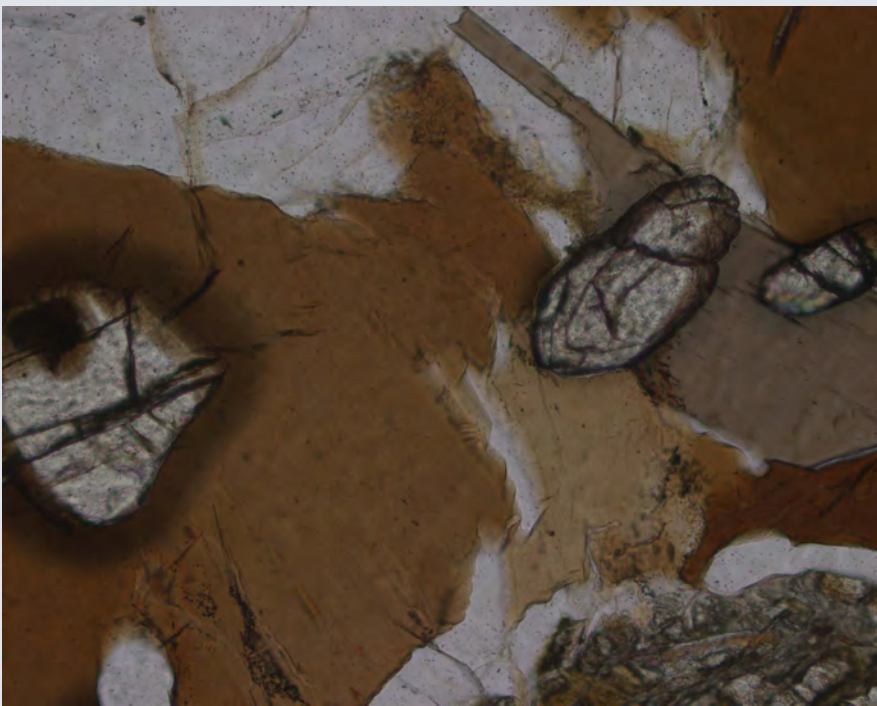
C





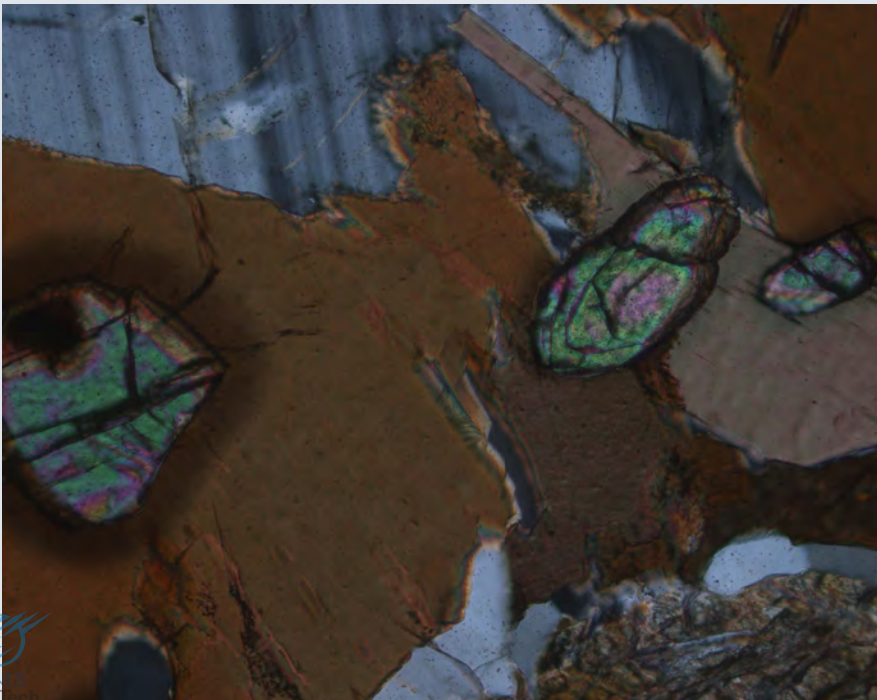


## Zircon $\text{ZrSiO}_4$



Les inclusions de zircon dans d'autres minéraux sont souvent entourées d'un halo pléochroïque :

- brun dans la biotite (ici)
- jaune dans la cordiérîte .



- Granite d'Ansignan  
Pyrénées orientales, France.

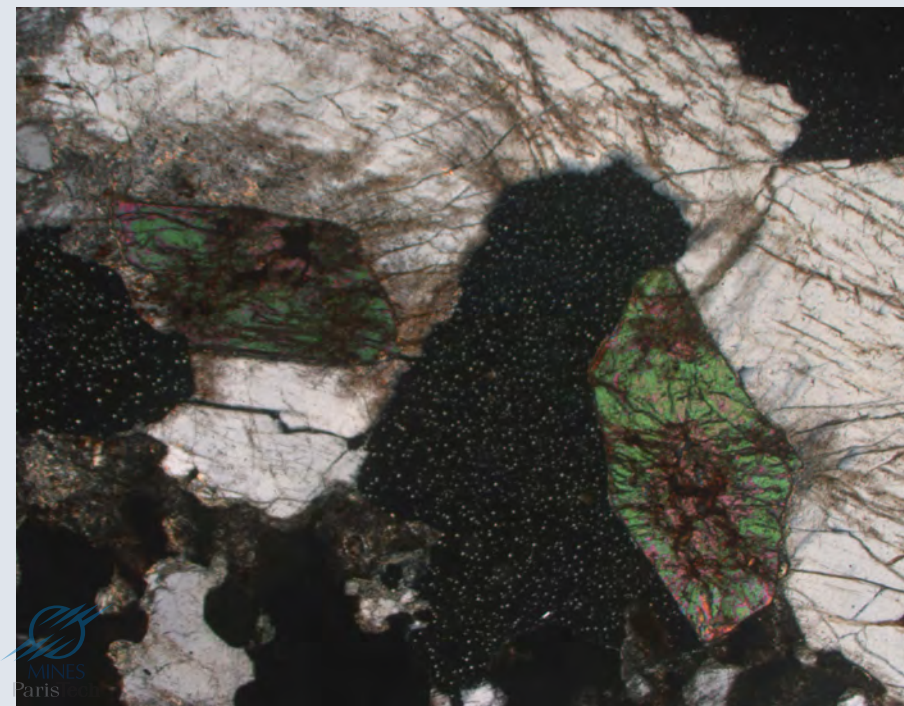
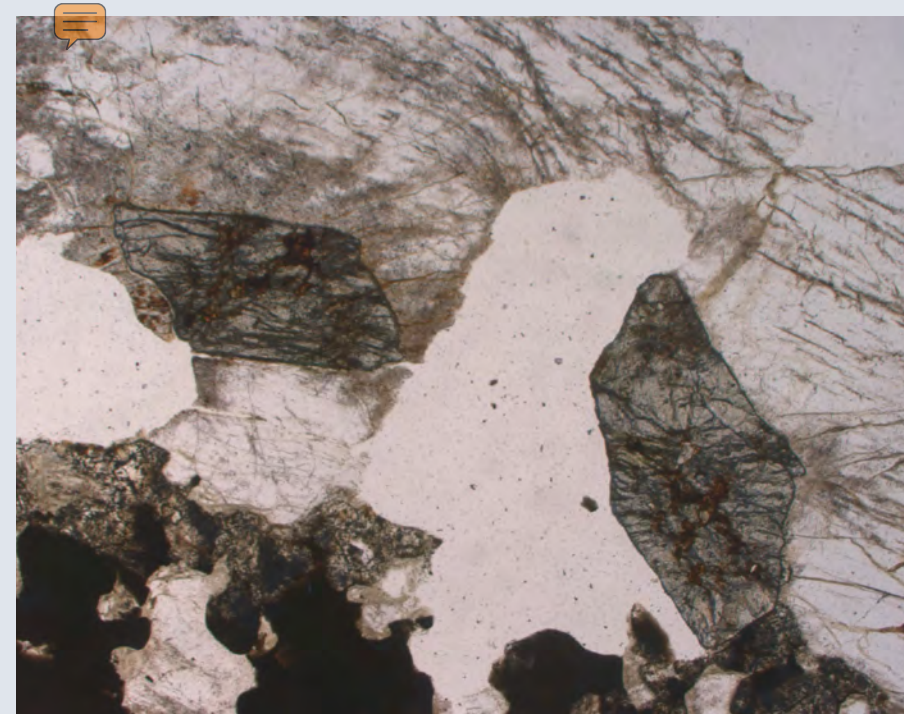
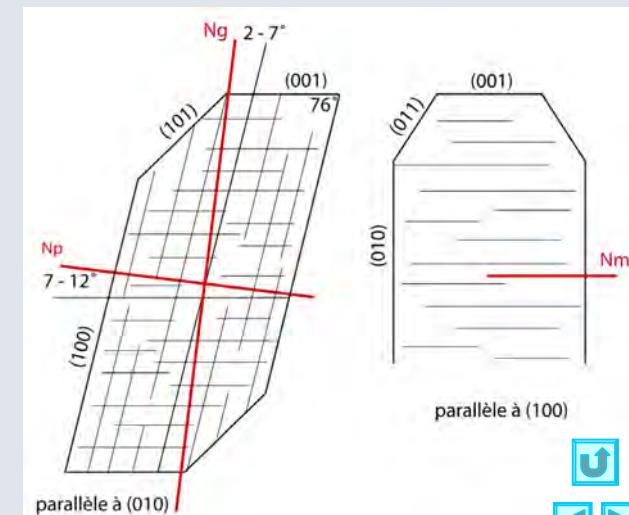
C

# Monazite (Ce, La, Th)PO<sub>4</sub>

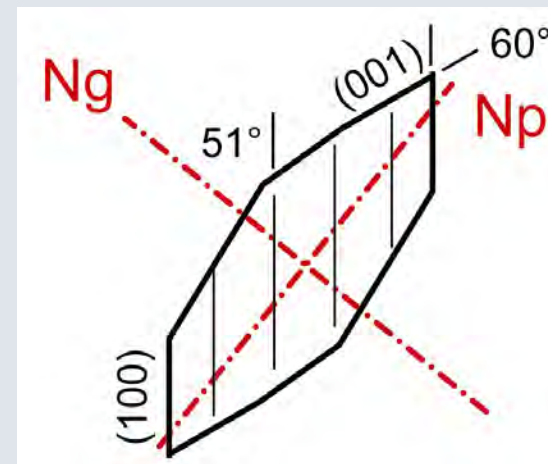


- Monoclinique.
- Grains, prismes selon (100).
- Clivages (100) moyen, (001) mauvais.
- Macle (100).
- Jaunâtre, brun jaune, brun vert, rarement pléochroïque.
- Np 1,774 – 1,800 Ng 1,825 – 1,849 Indices forts, analogues à ceux du grenat ou du zircon.
- Biréfringence  $\Delta = 0,051 - 0,049$   
Analogue à celle du zircon.
- Biaxe positif .  
 $2V \ 6 - 19^\circ$ .
- $r < v$  (faible).
- Mont Ilmen,
- Russie

AC







## Sphène $\text{CaTiSiO}_4(\text{O}, \text{OH}, \text{F})$

- Monoclinique.
- Formes en losange, en coin... et aussi grains.
- Clivage (100) bon.
- Brun jaune, brun orangé, brun, brun vert ; pléochroïque (photo suivante)
- Indices très forts

Np 1,843 – 1,950

Ng 1,943 – 2,110

- Biréfringence très élevée  
 $\Delta = 0,100 - 0,192$
- Teintes d'ordres supérieur (+ couleur propre)







# Sphène [rutile]



- Allongement positif.
- Biaxe positif  $2V$   $17 - 40^\circ$
- $r > v$  (fort)
- Ces caractères sont difficilement observables étant donnée la forte biréfringence du sphène.

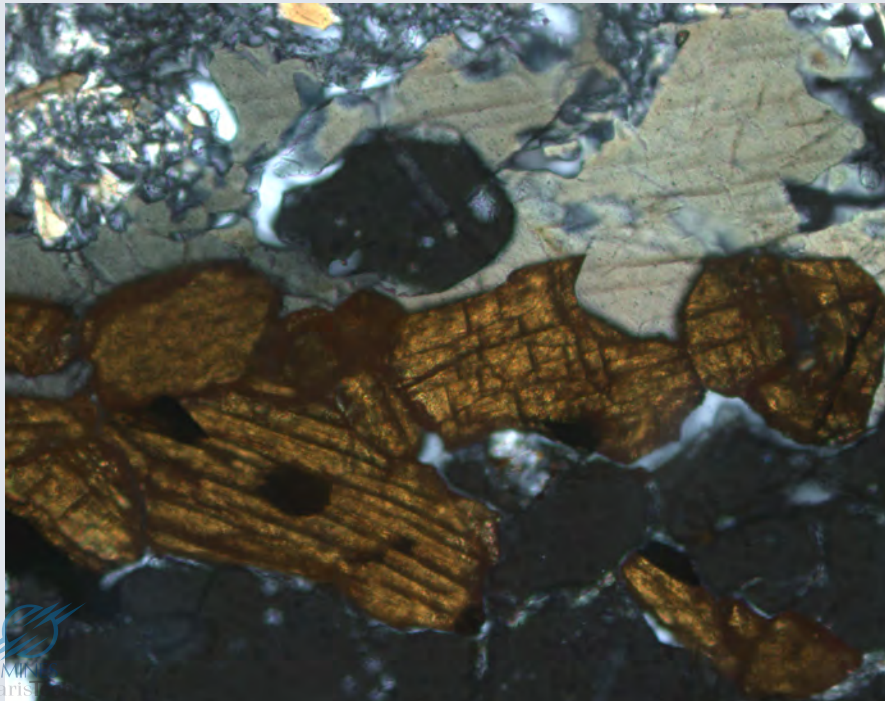
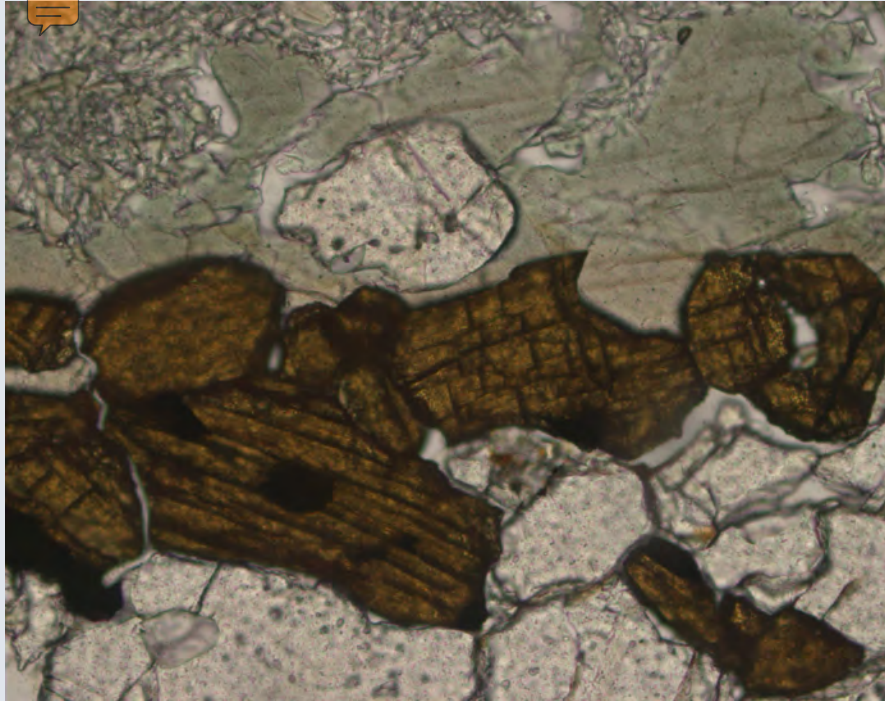


- Dans la lame ci-contre, les cristaux automorphes de sphène contiennent des inclusions brun très sombre de rutile  ; le fond de la roche est constitué de prehnite .
- Dans la lame précédente, le fond de la roche est constitué de plagioclase, une apatite dans le coin SW

AC



# Rutile $\text{TiO}_2$



- Quadratique.
- Grains ; prismes bipyramidés à base carrée.
- Macle (011) (macle en genou).
- Brun rouge (brun jaune).
- Clivages : (110) bon (deux clivages perpendiculaires) ; (100) moyen.
- Indices très forts :

$N_p$  2,609 – 2,616

$N_g$  2,895 – 2,903

- Biréfringence très élevée :

$\Delta = 0,286 - 0,287$

Teintes d'ordre supérieur, masquées par la teinte propre.

- Extinction droite.
- Allongement positif.
- Uniaxe positif.
- La roche contient également grenat et amphibole. Cabardès, Aude, France.

AC



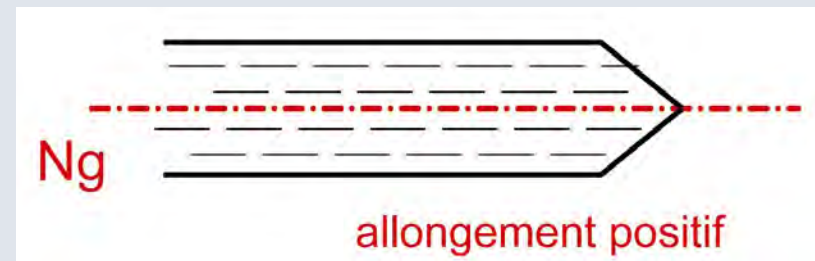
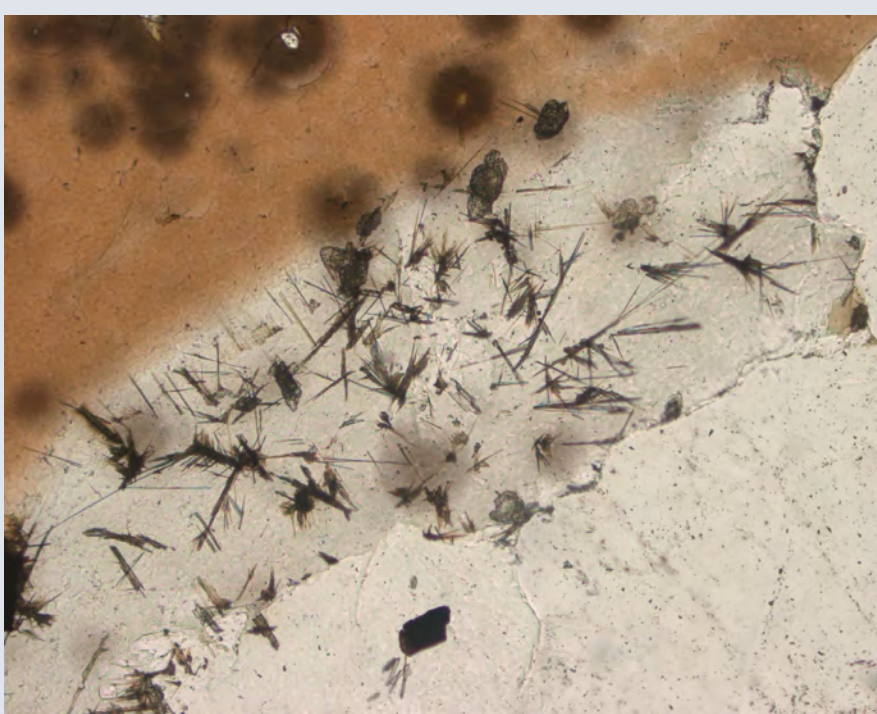




## Rutile faciès sagénite

- L'altération de biotite en chlorite libère du titane qui cristallise sous forme de rutile (parfois aussi de sphène).
- Généralement, ce rutile apparaît sous forme de grains sombres (photo du bas).
- Assez souvent, le rutile apparaît sous forme d'aiguilles qui s'associent selon des directions à  $60^\circ$  (en fait, macles) : c'est le **faciès sagénite** (photo du haut).
- Granite de Huelgoat, Finistère, France

C







# Spinelle $\text{MgAl}_2\text{O}_4$



- Les minéraux du groupe des spinelles sont des minéraux cubiques qui se présentent soit avec leurs formes propres, souvent en octaèdres (ici) soit en grains (photo suivante).
- Ils ne présentent généralement pas de clivage ; sauf chez le spinelle s.s. où un mauvais clivage octaédrique (111) peut être présent.
- Les indices sont forts, du même ordre que ceux du grenat et dépendent de la composition ; 1,719 dans le spinelle s.s. jusqu'à plus de 2,3.
- Le spinelle s.s. est incolore.

## AR

- La roche est un marbre dolomitique, le minéral incolore, relief moyen polarisant dans les gris, est de l'apatite.
- La Salvetat-sur-Agout, Hérault, France.





# Spinelle

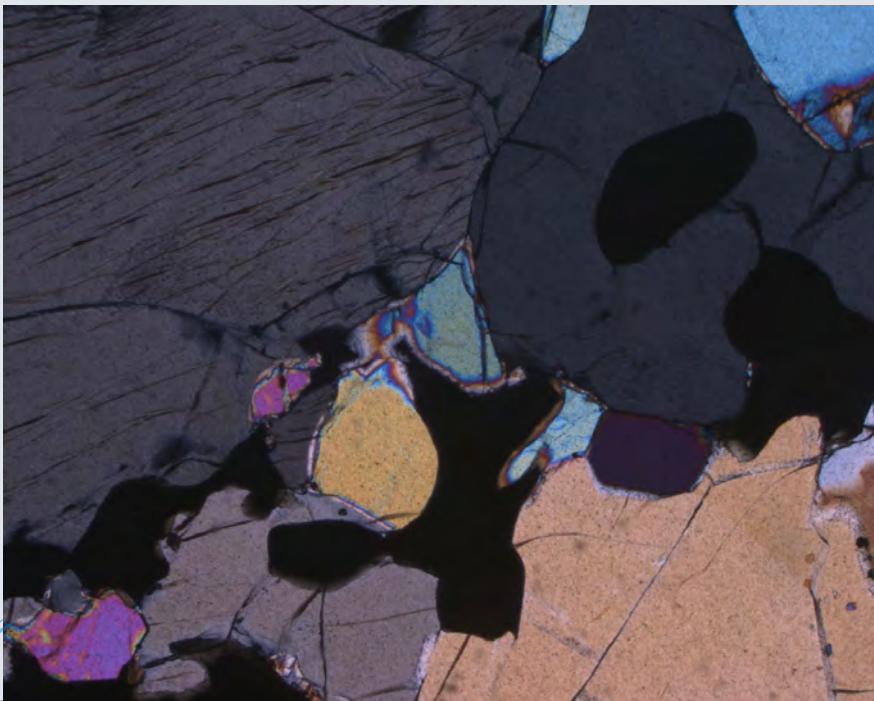
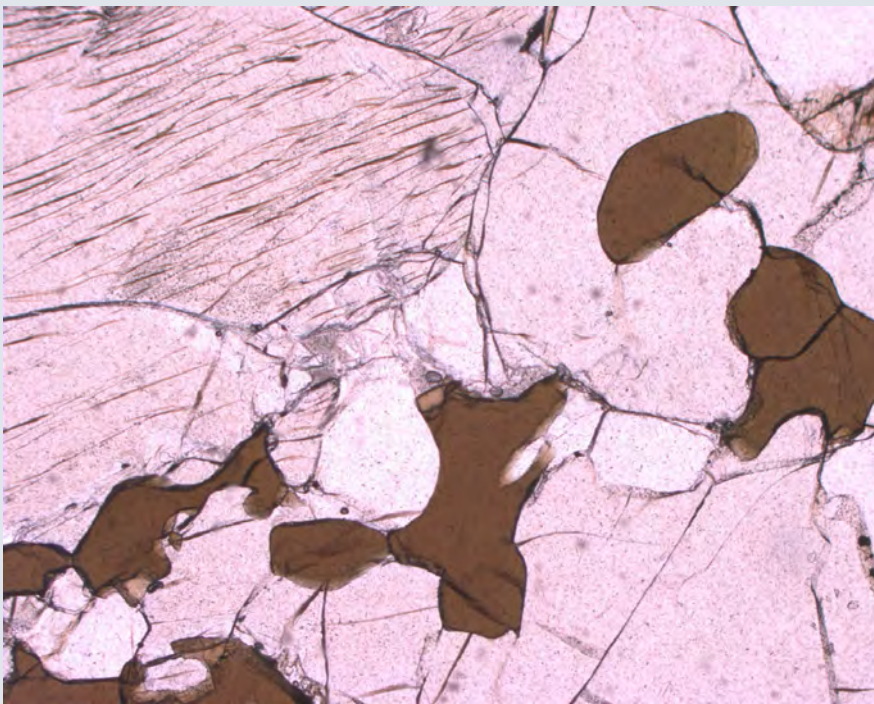
## Picotite $(\text{Fe,Mg})(\text{Al,Cr})_2\text{O}_4$

- Les spinelles contenant du fer et/ou du titane sont colorés : vert, gris vert, brun vert, brun, brun rouge, etc.
- Magnétite et chromite sont opaques.

- La roche est une lherzolite : olivine (incolore, limpide), clinopyroxène (légèrement rosé), orthopyroxène (grande plage montrant des clivages dans le coin NW).

- Maar de Borée, Ardèche, France.

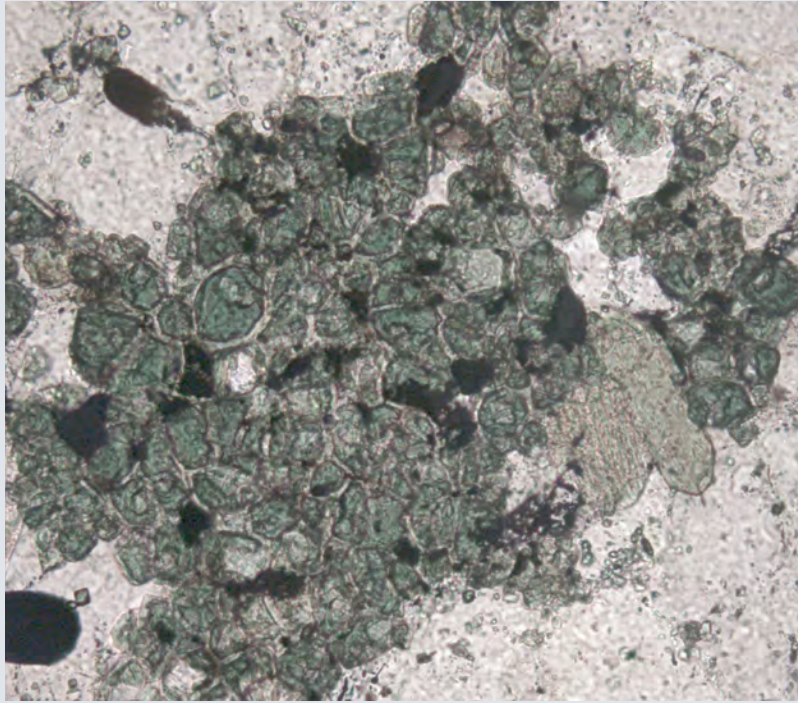
AC



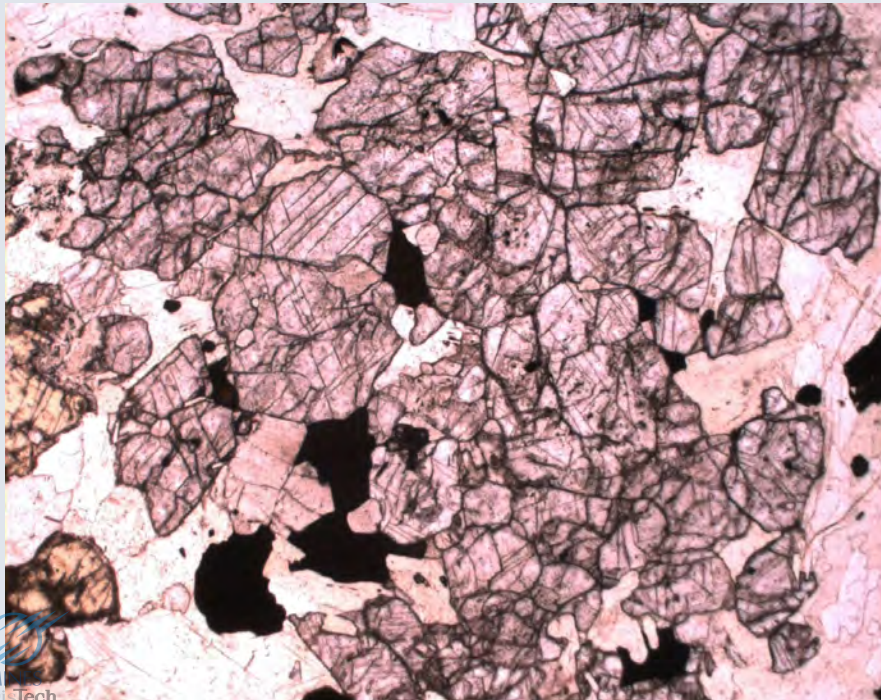




# Spinelle

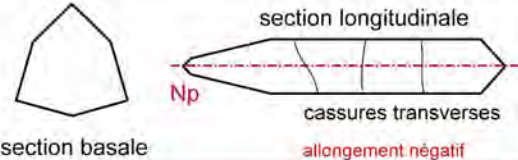
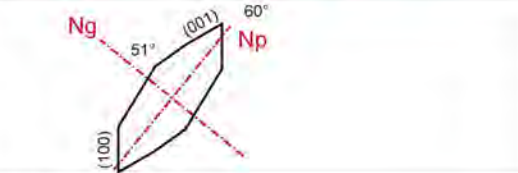


- *En haut* : Gahnite  $\text{ZnAl}_2\text{O}_4$
- Spinelle caractérisé par sa couleur verte
- La gahnite s'altère à la périphérie en chlorites. Le fond de la roche est du quartz. Quelques sulfures.
- Tiouit, Maroc



- *En bas* : Spinelle  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$
- Noter le clivage octaédrique sur certaines sections.
- Le fond de la roche est de la phlogopite, le minéral presque opaque du rutile, humite dans le coin inférieur gauche. 
- Artignac, Ariège



| Nom<br>formule chimique                                                                                                                                                           | symétrie | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice                                                                                                              | Indice<br>baume 1.54<br>quartz<br>1.55<br>tourmaline 1.65<br>grenat 1.75<br>2.8 | Couleur<br>Altérations                                            | Biréfringence<br>1er ordre<br>noir<br>gris<br>blanc<br>0<br>0.009<br>0.018<br>0.054<br>2e-3e<br>ordres<br>sensibles<br>teintes<br>vives | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Tourmaline<br>$\text{Na(Fe, Mg, Mn, Li)}_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4(\text{BO}_3)_3$                                                                        | rhomb    | <br>section basale<br>section longitudinale<br>Np<br>cassures transverses<br>allongement négatif | 1.639<br>1.657                                                                  | vert<br>(bleu incolore)<br>zoné<br>pléochroïsme inverse           | 0.019<br>0.035                                                                                                                          | U-                         |
| Apatite<br>$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F, Cl, OH})$                                                                                                                         | hex      | <br>section basale<br>section longitudinale<br>Np<br>allongement négatif                         | 1.637<br>1.667                                                                  | incolore                                                          | 0.002<br>0.005                                                                                                                          | U-                         |
| Zircon<br>$\text{ZrSiO}_4$                                                                                                                                                        | quadr    | <br>section basale<br>section longitudinale<br>Ng<br>allongement positif                         | 1.926<br>1.985                                                                  | incolore<br><br>(halos pléochroïques)                             | 0.039<br>0.059                                                                                                                          | U+                         |
| Sphène (Titanite)<br>$\text{CaTiSiO}_4(\text{O, OH, F})$                                                                                                                          | mnocl    | <br>Ng<br>Np<br>51°<br>60°<br>(100)<br>(001)                                                     | 1.885<br>2.081                                                                  | brunâtre<br>(verdâtre rose brun jaune)                            | 0.108<br>0.160                                                                                                                          | B+                         |
| Rutile<br>$\text{TiO}_2$                                                                                                                                                          | quadr    | <br>grains baguettes<br>section longitudinale<br>Ng<br>allongement positif<br>sagénite          | 2.609 - 2.903<br>2.609 - 2.903                                                  | brun rouge<br>brun jaune<br>brun vert                             | 0.286-0.287                                                                                                                             | U+                         |
| Spinelle<br>$\text{R}^{2+}\text{O} \cdot \text{R}^{3+}_2\text{O}_3$<br><br>$\text{R}^{2+} = \text{Fe}^{2+}, \text{Mg, Zn, Mn}$<br>$\text{R}^{3+} = \text{Al, Fe}^{3+}, \text{Cr}$ | Cub      | cubes - octaèdres<br><br>clivage octaédrique                                                                                                                                      | 1.718<br>2.05                                                                   | incolore<br>bleu vert<br>vert<br>brunâtre<br>brun rouge<br>opaque |                                                                                                                                         |                            |







# Minéraux accessoires des roches alcalines

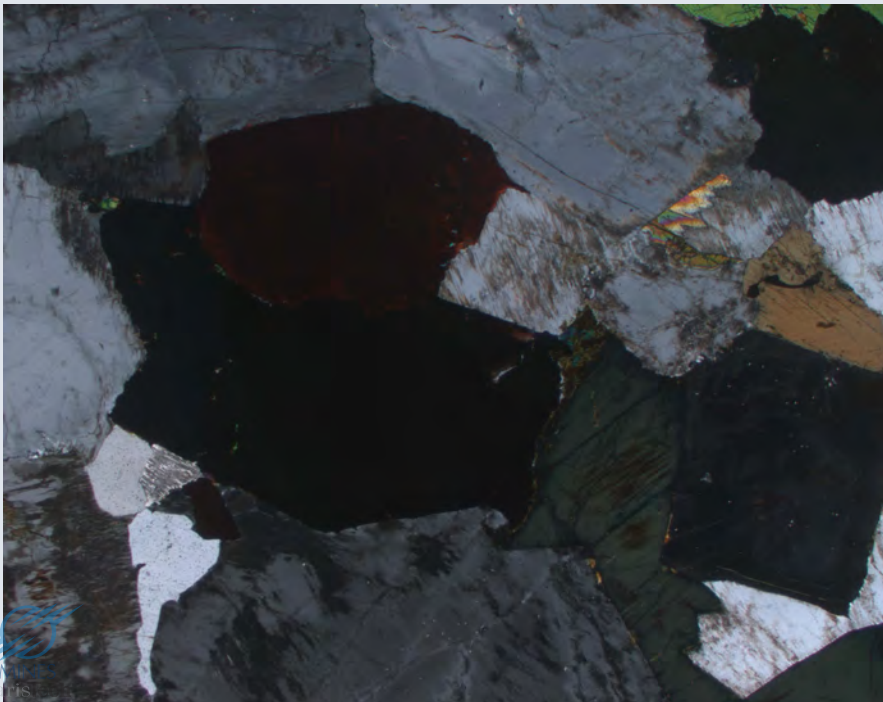
- Dans les roches alcalines (peralcalines) (plutoniques et/ou volcaniques), l'excès d'alcalins par rapport à l'aluminium se traduit par l'apparition de minéraux ferro-magnésiens alcalins (amphiboles et pyroxènes sodiques) et parmi les minéraux accessoires, de titano-silicates et zircono-silicates de sodium.

Sont présentés ici les silicates :

- Aenigmatite  $\text{Na}_2\text{Fe}^{2+}_5\text{Ti Si}_6\text{O}_{20}$
- Astrophyllite  $(\text{K}, \text{Na})_3(\text{Fe}^{2+}, \text{Mn})_7\text{Ti}_2 (\text{Si}_4\text{O}_{12})_2(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_7$
- Eudyalite  $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Fe}^{2+})_6\text{Zr} (\text{Si}_3\text{O}_9)_2(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$
- Låvenite  $(\text{Na}, \text{Ca}, \text{Mn}, \text{Fe})_3(\text{Zr}, \text{Nb}, \text{Ti}) \text{Si}_2\text{O}_7 (\text{OH}, \text{F})$

Ainsi que les oxydes :

- Pérovskite  $(\underline{\text{Ca}}, \text{Na}, \text{Fe}^{2+}, \text{Ce}) (\underline{\text{Ti}}, \text{Nb}) \text{O}_3$
- Zirconolite  $(\text{Ca}, \text{Ce}) \text{Zr} (\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_7$



# Aenigmatite



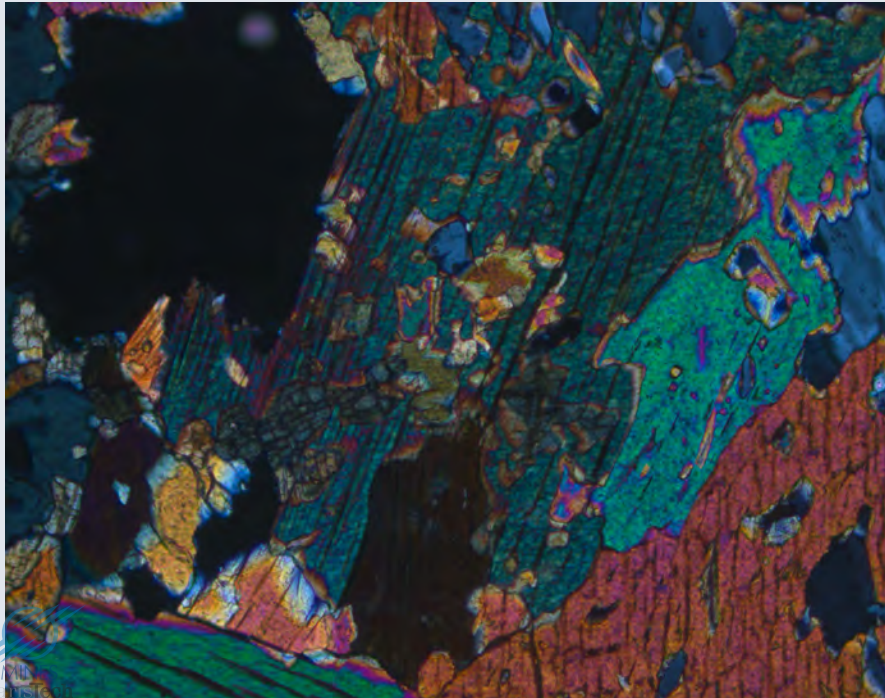
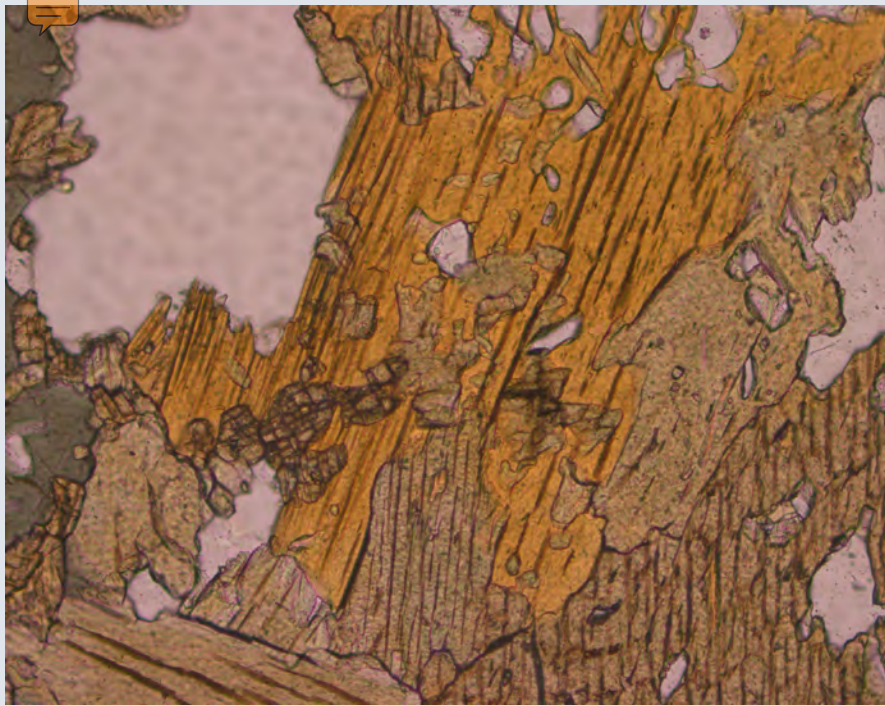
- Triclinique.
- Prismes allongés irréguliers, deux clivages à  $66^\circ 15'$ .
- Aspect voisin des amphiboles, structure analogue à celle des pyroxènes.
- Grains sans trop de formes.
- Brun, brun sombre, presque opaque en lame mince (frange plus claire sur la photo).
- $N_p = 1,81 - N_g = 1,88$ .
- Biréfringence  $\Delta = 0,007$ .

Teintes de polarisation masquées par la teinte propre.

- $2V = 32^\circ$  biaxe négatif  $r < v$
- Gisement : roches volcaniques et plutoniques.
- Ici un granite alcalin : orthose, biotite, quartz
- Buea, Cameroun





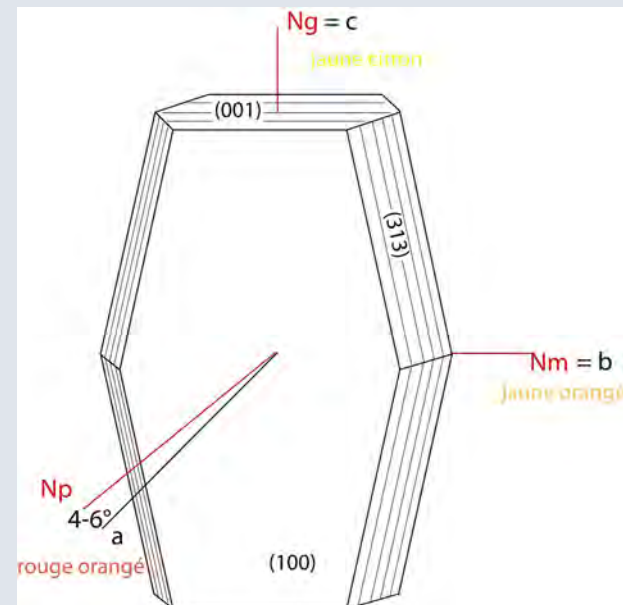


# Astrophyllite

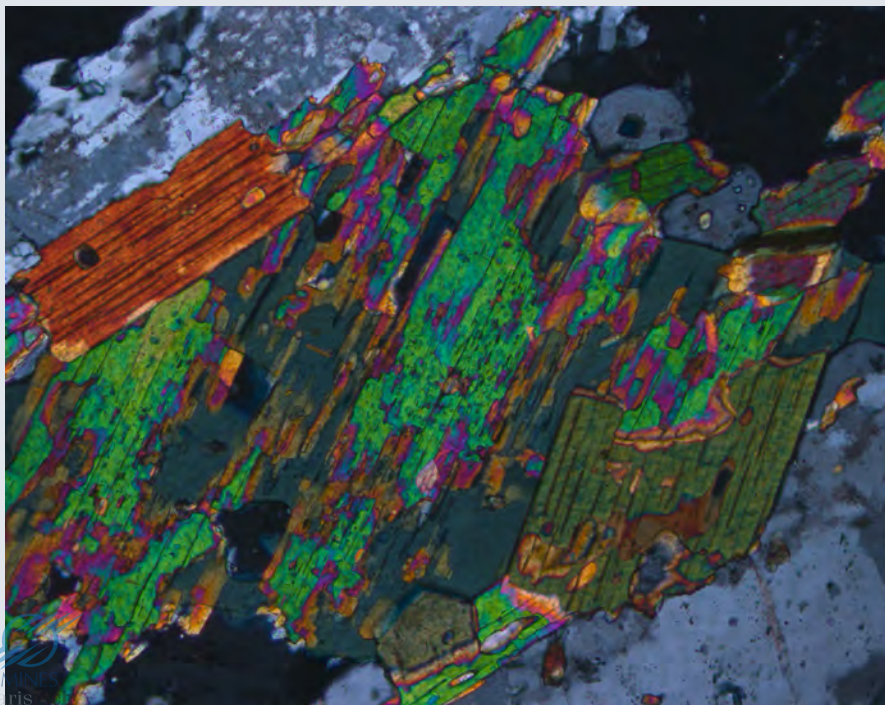
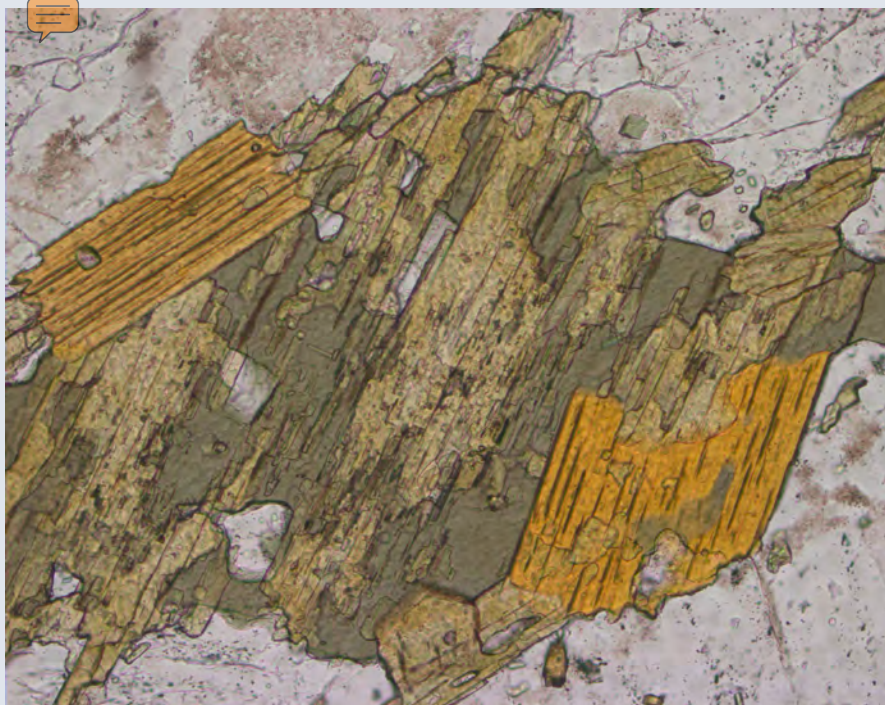


- Triclinique.
- Cristaux tabulaires selon (100) (cf. micas), en aiguilles, parfois en rosettes.
- Bon clivage (100) (analogue à celui des micas) ; clivage (010) moyen.
- Pléochroïsme inverse par rapport à celui de la biotite : jaune citron, jaune orange, rouge orangé.

R







# Astrophyllite



- Indices forts, de l'ordre de ceux des pyroxènes :  
Np 1,676 – 1,708 Ng 1,731 – 1,758
- Biréfringence  $\Delta = 0,055$  : teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre.
- Allongement positif.
- Biaxe positif 2V 70 – 85°
- $r > v$  (fort).
- La roche est une syénite néphélinique :  
néphéline dans le coin bas droite, aegyrine (brun jaune), arfvedsonite (vert).
- Gisement : syénites néphéliniques et leurs pegmatites
- Iles de Los, Guinée.

R

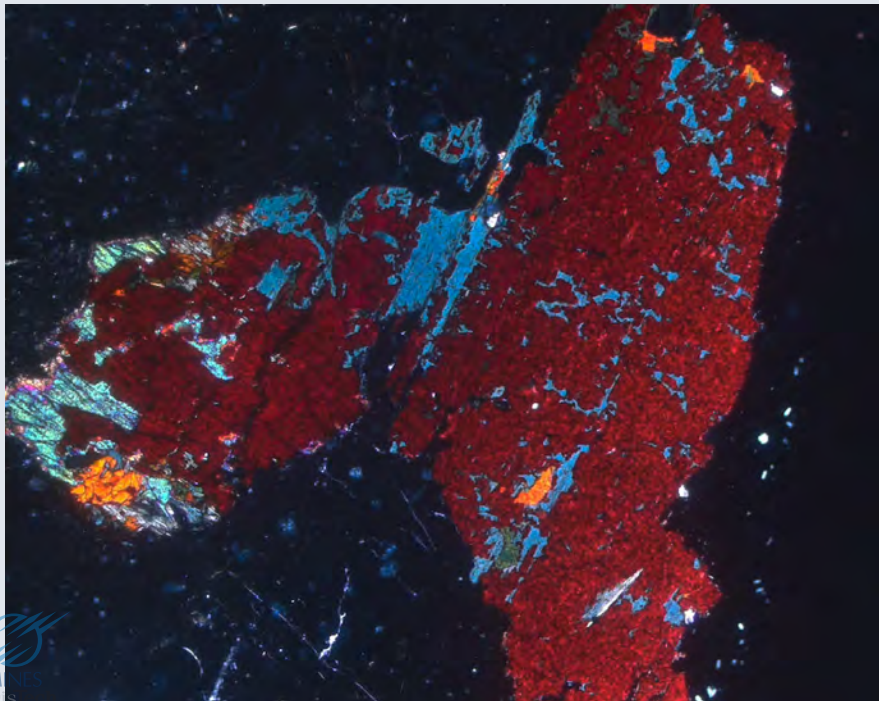
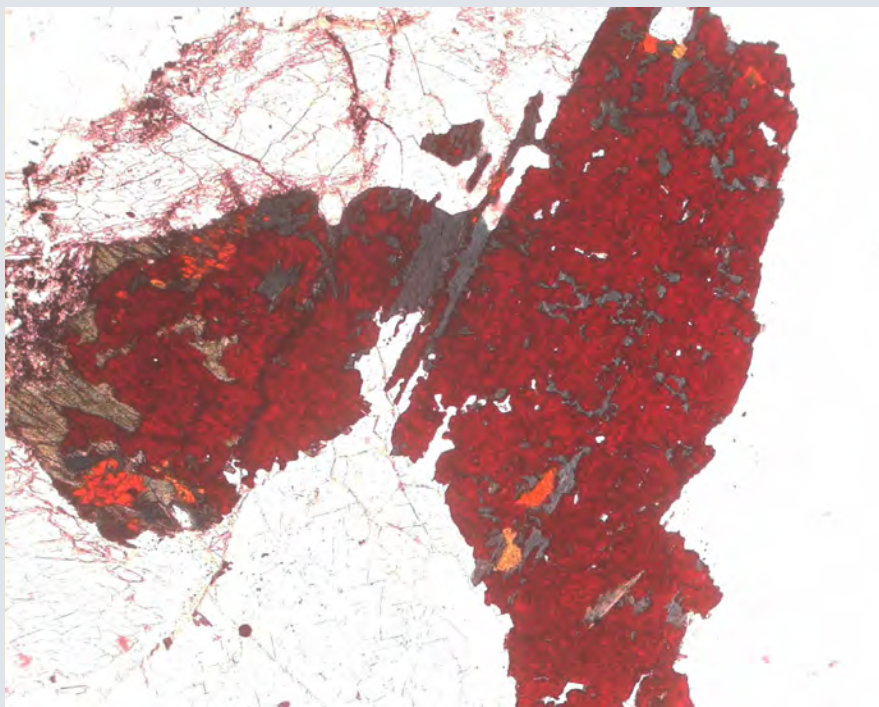




# Astrophyllite



- L'astrophyllite présente ici un pléochroïsme qui va de l'orange vif à un exceptionnel rouge carmin. Ces couleurs propres masquent les teintes de polarisation.
- Le minéral brun vert à brun très sombre presque opaque est de l'arfvedsonite .
- Le fond de la roche est constitué de néphéline et de feldspath alcalin.
- Illimaussaq, Groënland.





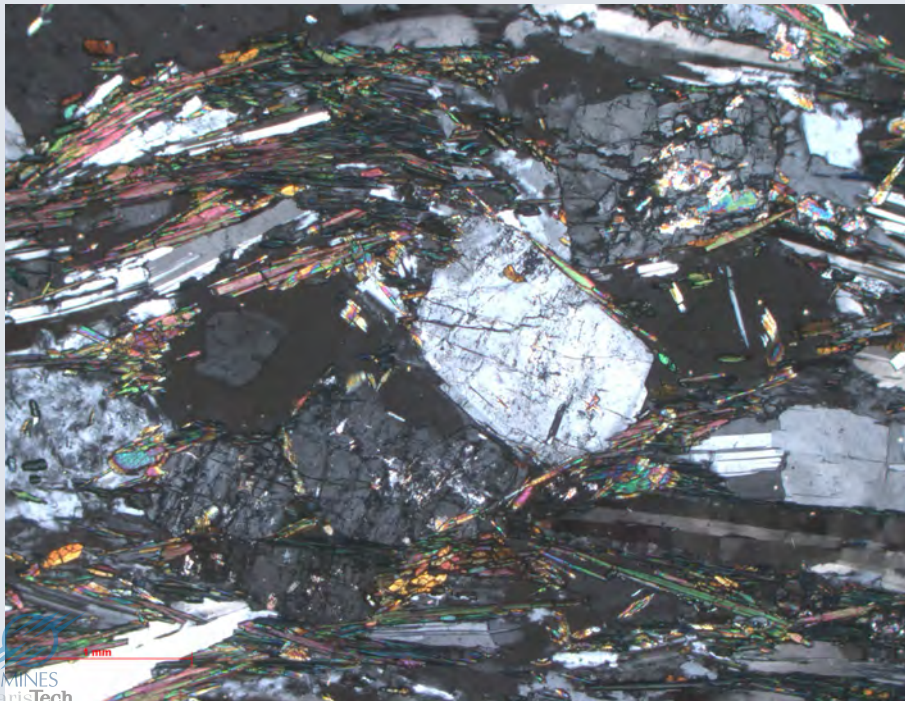
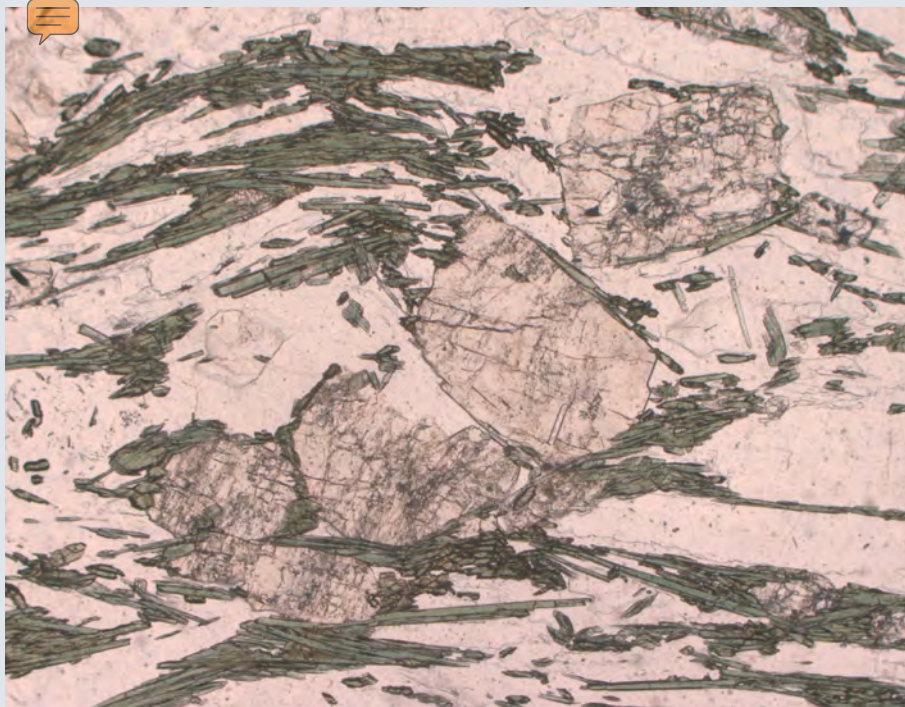
# Eudyalite



- Rhomboédrique.
- Grains xénomorphes, polygones.
- Clivage basal (0001) mauvais, indistinct en lame mince.
- Incolore en lame mince, sections épaisses pléochroïques de l'incolore au rosé (ici) à jaunâtre.
- Indices moyens du même ordre que la tourmaline ou l'apatite :
- Np 1,593 – 1,643 Ng 1,597 – 1,634  
Biréfringence  $\Delta = 0,000 - 0,0010$  (gris du 1<sup>er</sup> ordre).
- Les teintes de polarisation sont réparties inégalement, parfois zonation liée à la croissance du minéral, parfois non.
- Uniaxe positif (eudyalite) ou négatif (eucolite).
- La roche est une syénite néphélinique à sodalite (isotrope), feldspath alcalin, aegyrine (coin supérieur gauche) □ .







# Eudyalite

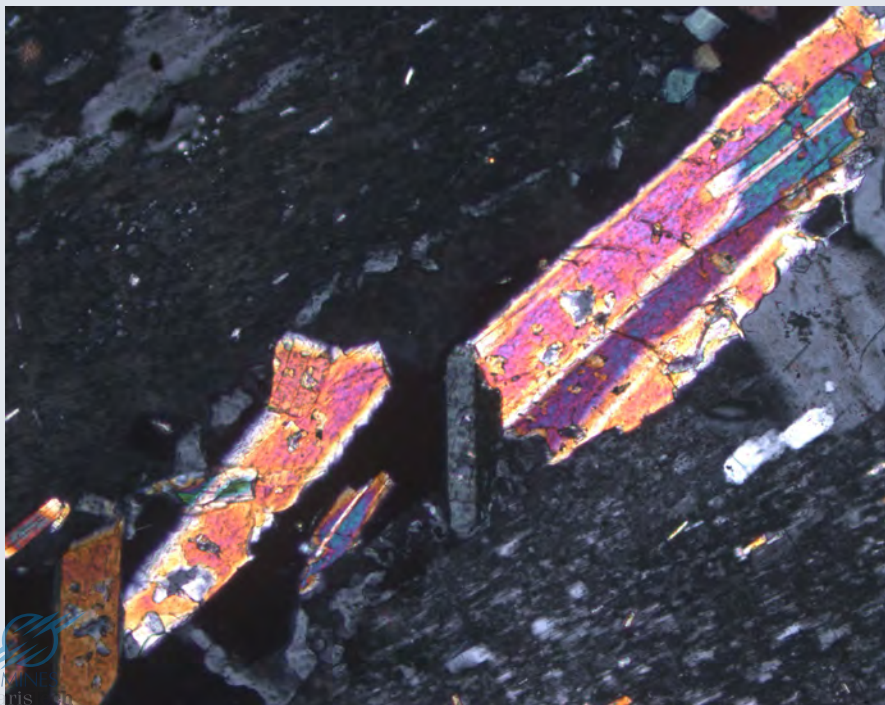
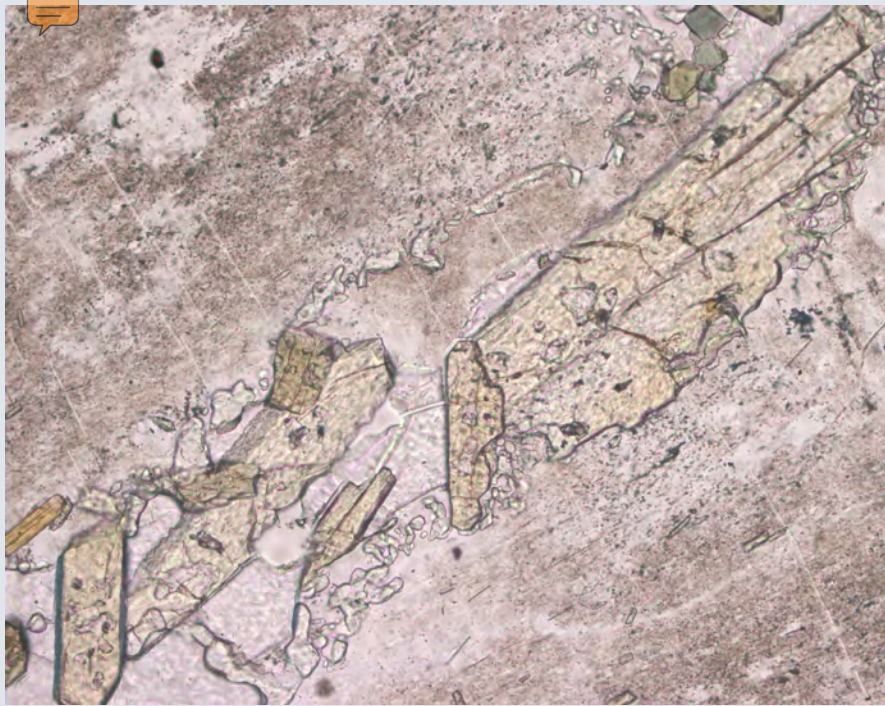


- L'eudyalite forme les cinq cristaux au centre de l'image.
- Elle se distingue par son fort relief.
- La roche est une syénite néphélinique très déformée à néphéline, plagioclase, feldspath alcalin, aegyrine .
- L'eudyalite apparaît dans les syénites néphéliniques et leurs pegmatites.
- Lovozero, Russie.

R







# Låvenite



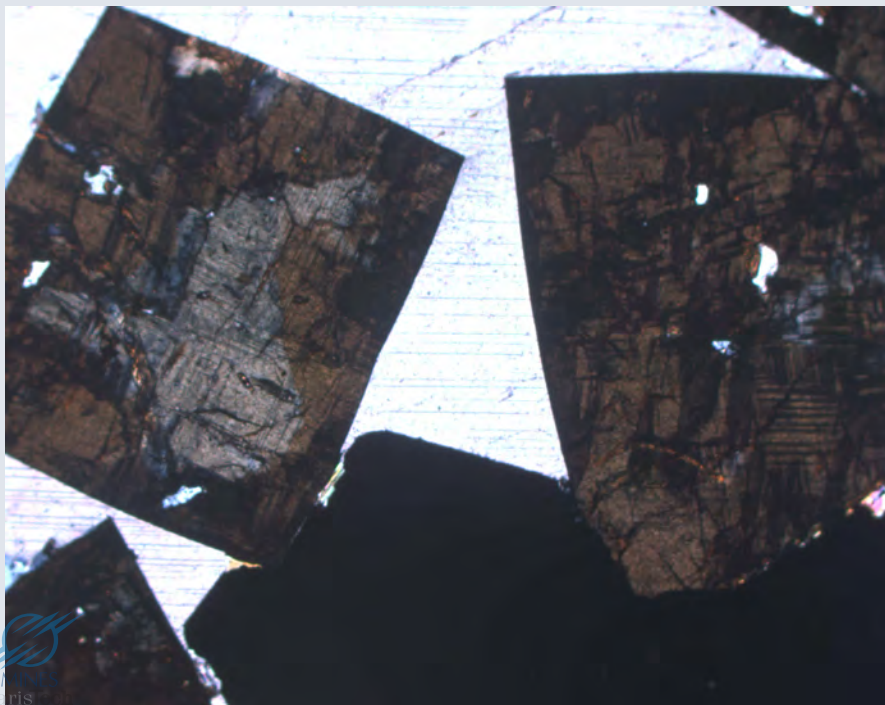
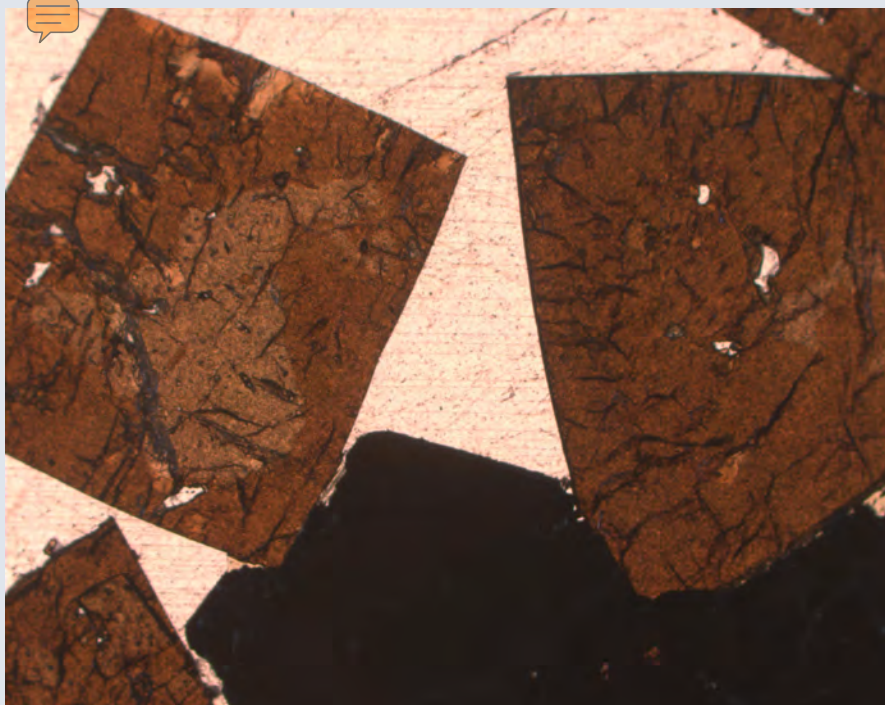
- Monoclinique.
- Prismes allongés à section plus ou moins losangique.
- Bon clivage (100).
- Macle lamellaire (001).
- Pléochroïque d'incolore à brun jaune
- Indices forts :  

$$N_g \ 1,690 - 1,698 \quad N_p \ 1,720 - 1,745$$
- Biréfringence  $\Delta = 0,030 - 0,047$   
 Teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre.
- Extinction oblique sur le prisme et le clivage (20°) allongement négatif.
- Biaxe négatif  $2V \ 73 - 85^\circ$ .
- $r < v$  (faible).
- La låvenite apparaît surtout dans les pegmatites de syénites néphéliniques
- On reconnaît ici feldspath potassique, apatite, néphéline (bord droit)
- Iles de Los, Guinée.

R







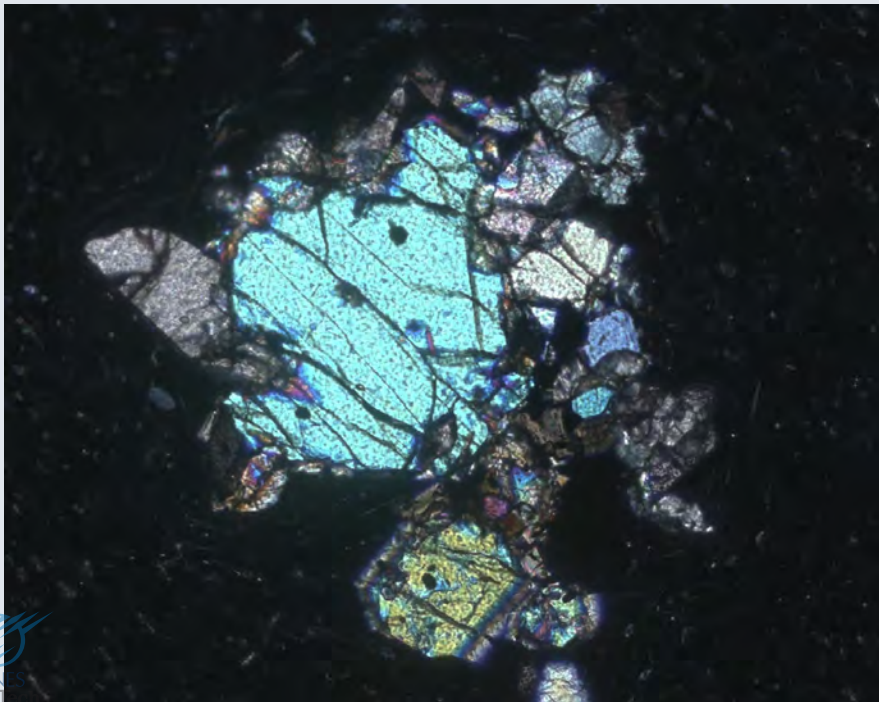
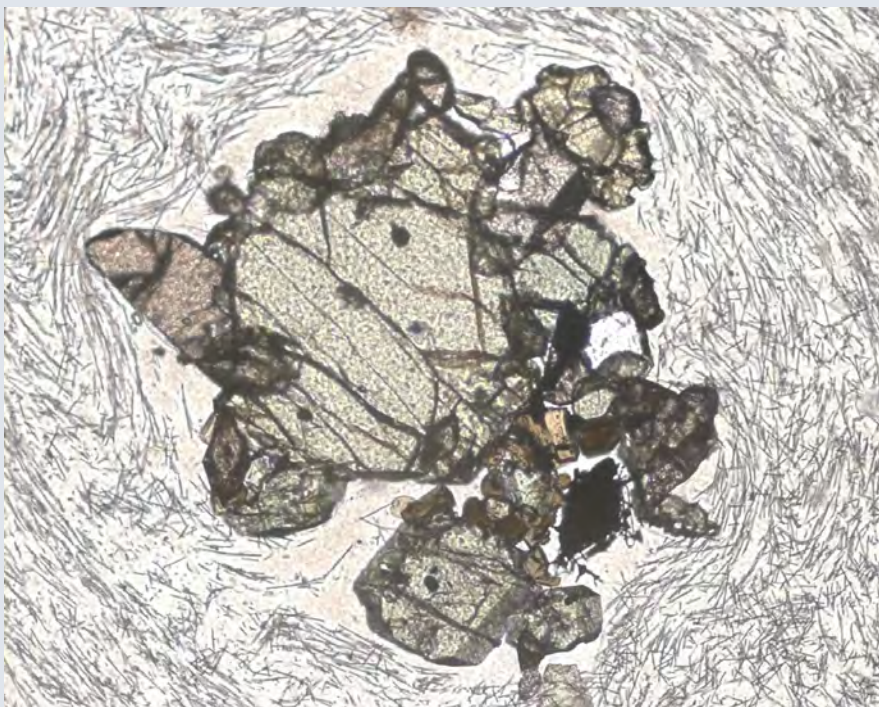
# Pérovskite



- Monoclinique (pseudo-cubique).
- Grains, cubes, parfois octaèdres.
- Clivage cubique, mauvais.
- Indice très élevé :  $N = 2,30 - 2,38$ .
- Brun foncé, brun rouge, brun violacé, parfois incolore ; zoné.
- Macles complexes, lamellaires (l'image en LP a été surexposée de façon à faire ressortir ces macles).
- Presque isotrope.
- La roche est une carbonatite avec calcite et magnétite.
- Oka, Québec, Canada.

R





# Groupe de la zirconolite

$$(\text{Ca}, \text{Ce})\text{Zr}(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe}^{3+})_2\text{O}_7$$


- Il existe plusieurs polymorphes répondant à la formule  $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$  : la zirconolite s.s. métamicté, la zirconolite 3T rhomboédrique, la zirconolite 3O orthorhombique, la zirconolite 2M monoclinique et la zirkelite cubique.
- On observe ici un agrégat de minéraux dans une obsidienne à texture fluidale. Le minéral gris vert polarisant dans les teintes vives ainsi que les cristallites dans le verre sont de l'aegyrine.
- Le minéral en prismes ou grains, à fort relief, beige, polarisant dans les teintes d'ordre supérieur serait de la zirconolite 3O (N calculé 2,3 – 2,4).
- La zirconolite est considérée comme très rare mais serait assez commune dans les roches éruptives alcalines ; elle serait en général confondue avec le sphène ou le rutile.
- Les Gardes, Cantal, France.

RRR







# 7 - Minéraux des roches sédimentaires

## 8 - Minéraux des gisements métallifères





# Sommaire

- **7- Minéraux des roches sédimentaires**

- **Gypse**  $\text{CaSO}_4, 2 \text{H}_2\text{O}$  ☐
- **Anhydrite**  $\text{CaSO}_4$  ☐
- **Halite**  $\text{NaCl}$  ☐
- **Argiles** ☐
  - **Kaolinite** ☐
  - **Dickite** ☐
  - **Illite** ☐
  - **Glaucosite** ☐
- **Chlorite** ☐

- **8- Minéraux des gisements métallifères**

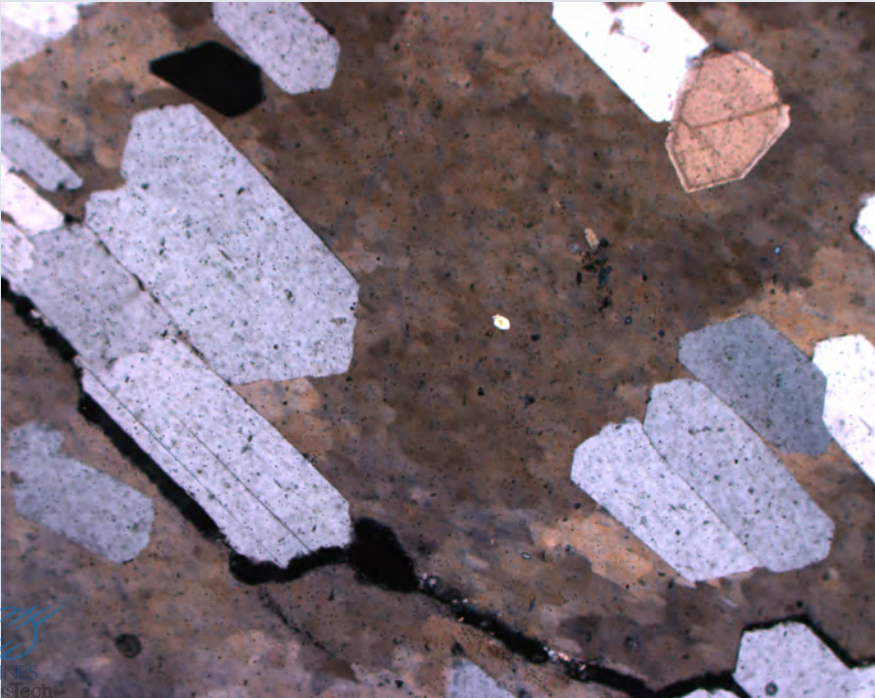
- **Barytine**  $\text{BaSO}_4$  ☐
- **Fluorite**  $\text{CaF}_2$  ☐
- **Blende**  $\text{ZnS}$  ☐
- **Scheelite**  $\text{CaWO}_4$  ☐
- **Cassitérite**  $\text{SnO}_2$  ☐

- *Page précédente : cassitérite, Pedra Branca, Brésil*





# Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$



- Monoclinique.
- Cristaux en tablettes aplaties selon le plan (010) ; à sections hexagonales (limitées par les plans (100), (011) et  $\bar{1}11$ ).

Ici, sections hexagonales parallèles à (010).

- Clivages nombreux, les plus importants étant :

(010) parfait

(100) et (011) bons

(clivage (100) visible sur le cristal de gauche).

- Indices faibles de l'ordre de ceux des feldspaths potassiques ; le grain de calcite dans le coin supérieur droit de la photo apparaît en relief.

$n_p$  1,519 – 1,521

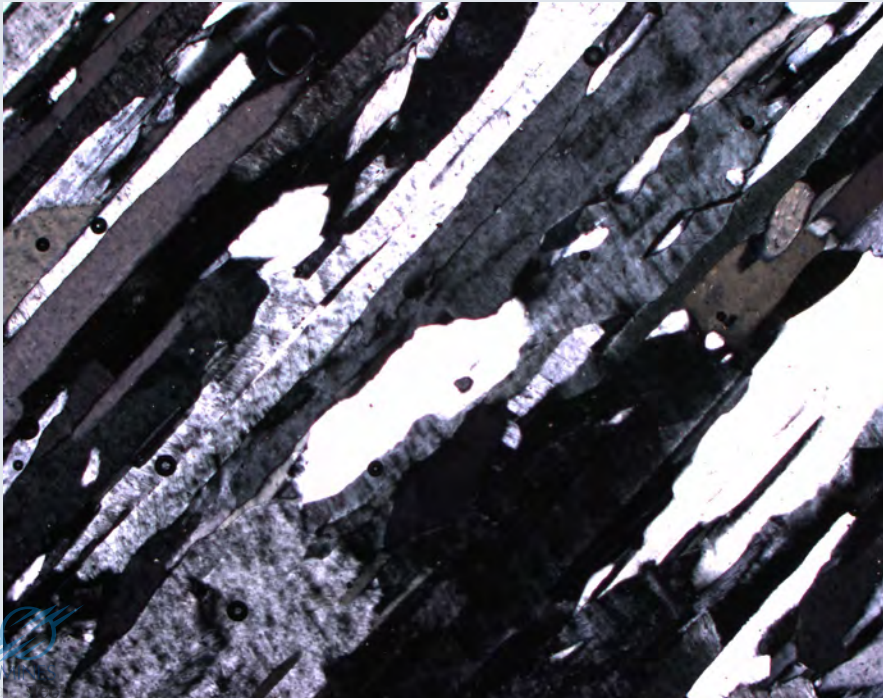
$n_g$  1,529 – 1,531

- Lagny, Seine et Marne, France.

C





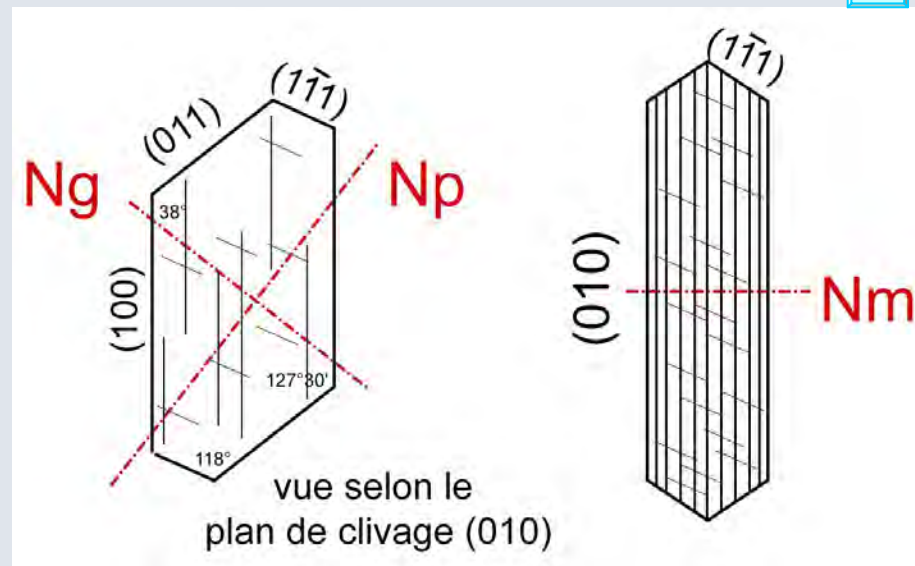
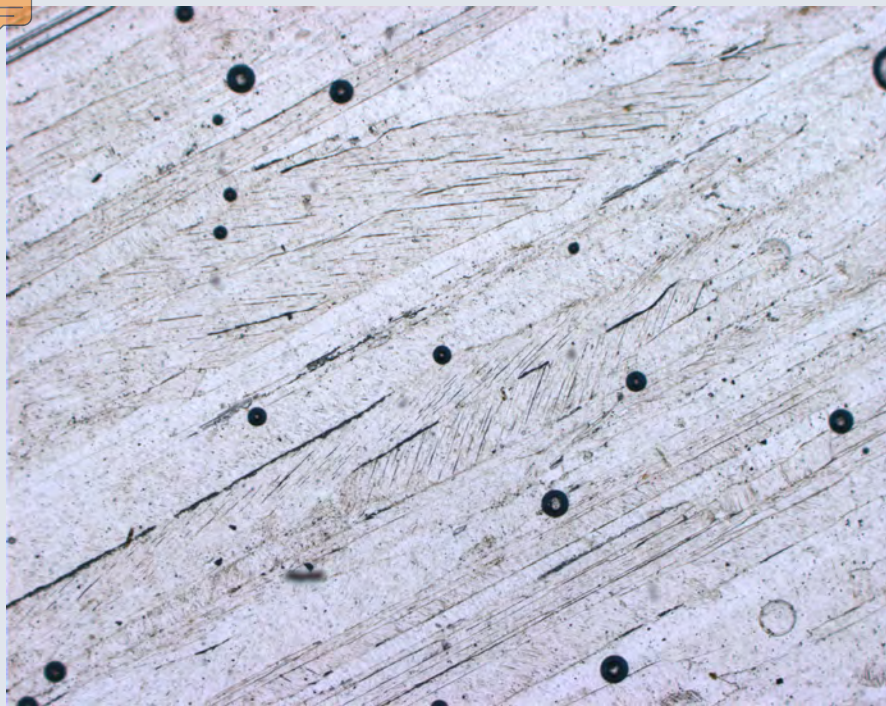


## Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

- Sections perpendiculaires à (010) montrant les clivages (010) et  $(\bar{1}11)$ .
- Nm est perpendiculaire à (010).  
Np et Ng sont dans le plan (010).  
L'angle entre Ng et (100) est de  $38^\circ$ .
- Biréfringence  $\Delta = 0,091$ .  
(voisin de celui du quartz : gris à blanc du premier ordre).
- Macles (100) (macle en queue d'aronde, *visible sur la photo ci-contre*) et  $(\bar{1}01)$  (macle en fer de lance).
- Biaxe positif  $2V = 58^\circ$ .
- Dispersion forte  $r > v$ .
- Vaujours, Seine et Marne, France





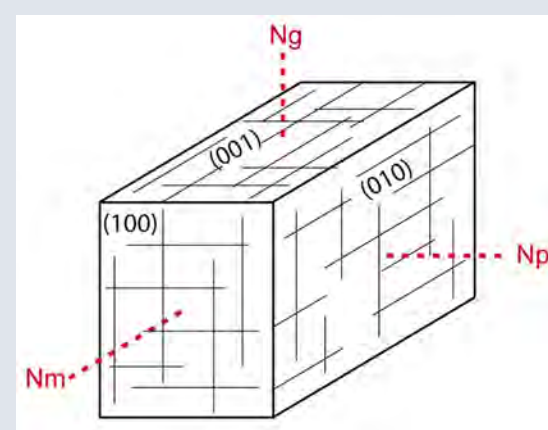
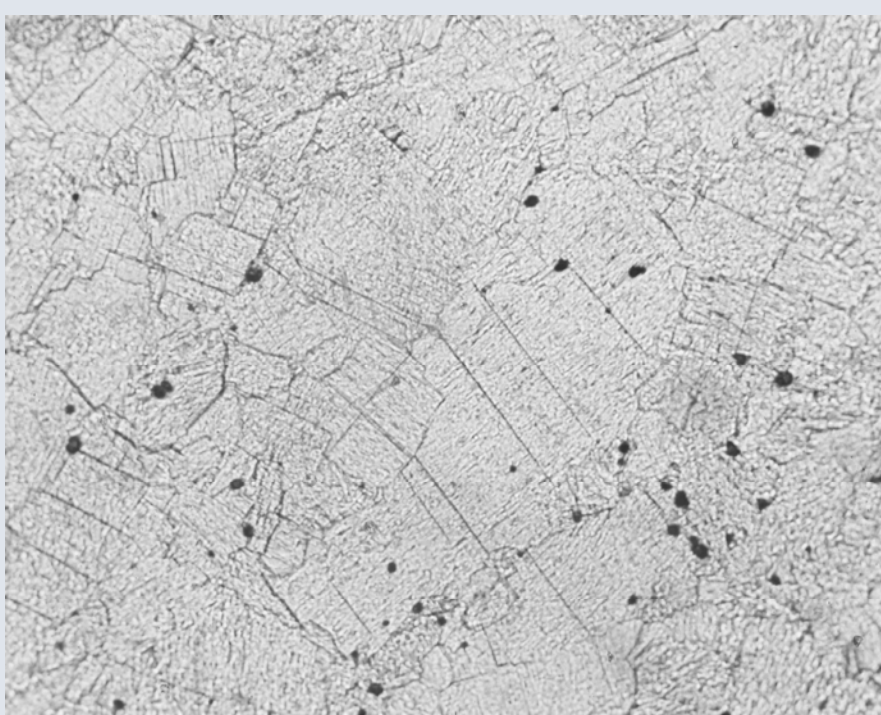


## Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

*En haut, (LN), sections perpendiculaires au clivage (010) ; certains cristaux montrent le clivage  $(\bar{1}11)$ ; macles (010).  
En bas, (LP), sections hexagonales parallèles au clivage (010) ; le fond de la roche est également du gypse, en cristaux xénomorphes.*

Vaujours, Seine et Marne, France

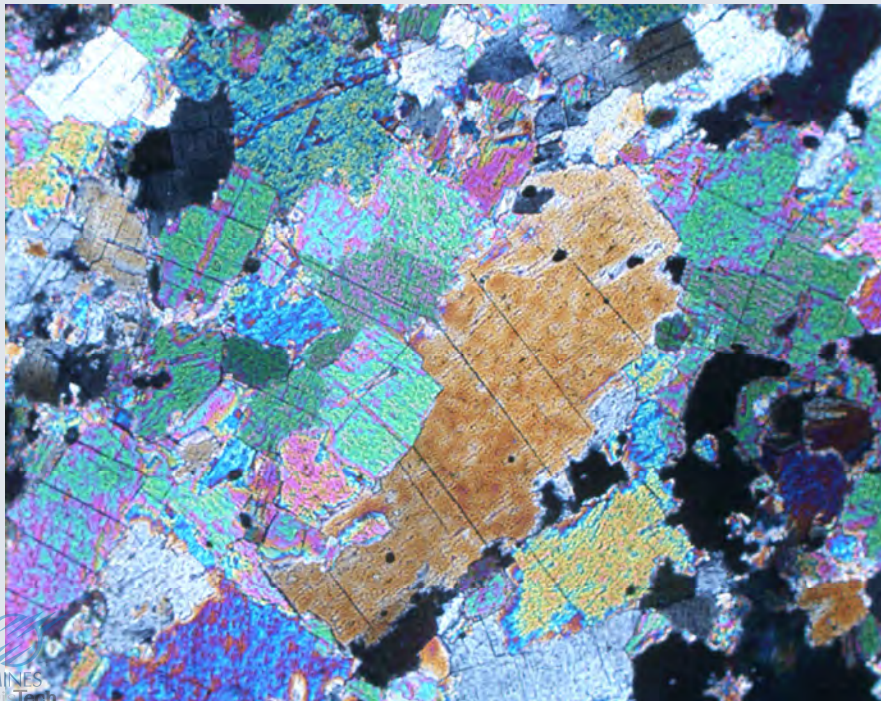




## Anhydrite $\text{CaSO}_4$

- Orthorhombique.
- Prismes allongés, lattes ; nodules dans les sédiments.
- Trois clivages perpendiculaires :  
(010) parfait, (001) et (100) bons.
- Incolore
- Indices plus élevés que ceux du gypse :  

$$\begin{array}{ll} \text{Np} & 1,569 - 1,574 \\ \text{Ng} & 1,609 - 1,618 \end{array}$$
- Bedeilhac, Ariège, France





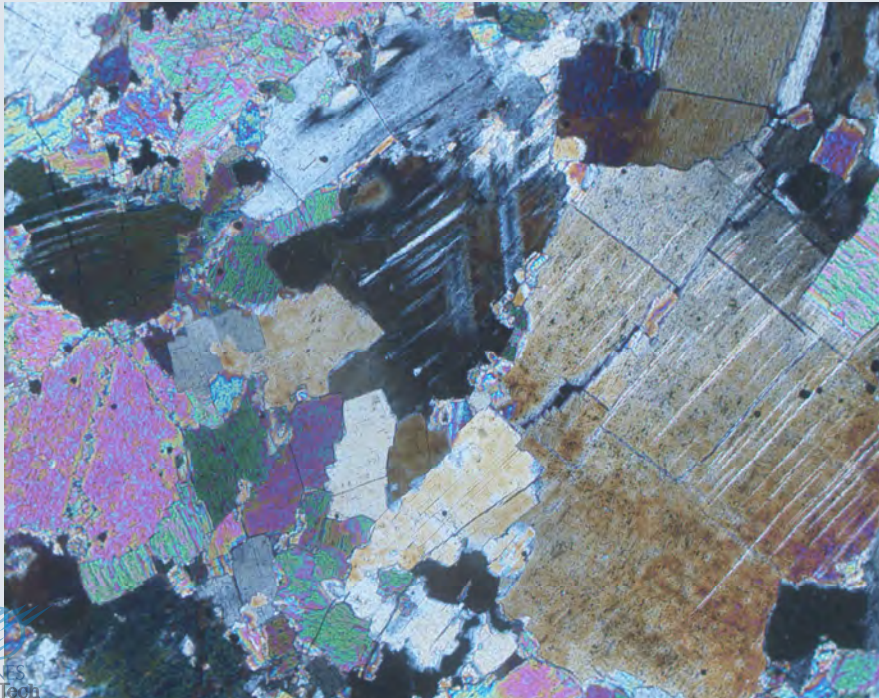


# Anhydrite $\text{CaSO}_4$



- Biréfringence  $\Delta = 0,0438$ .  
Polarise dans des teintes vives du 3<sup>ème</sup> ordre, nettement plus élevées que celles du gypse.
- Macles (011) lamellaires, simples ou répétées.
- $2V = 42^\circ$       Biaxe positif.
- $r > v$ .
- Bédailhac, Ariège, France

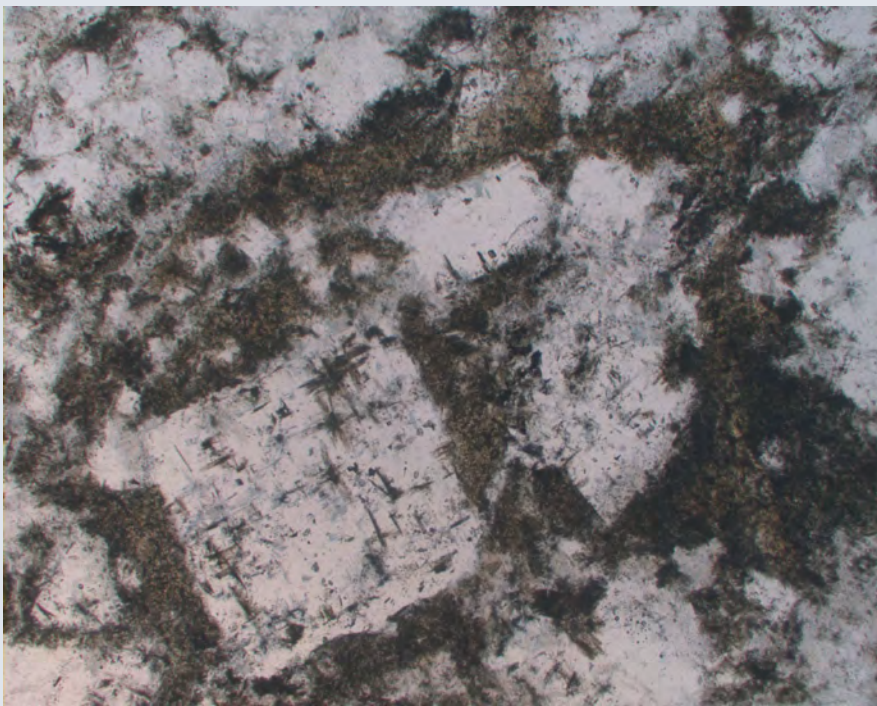
AC



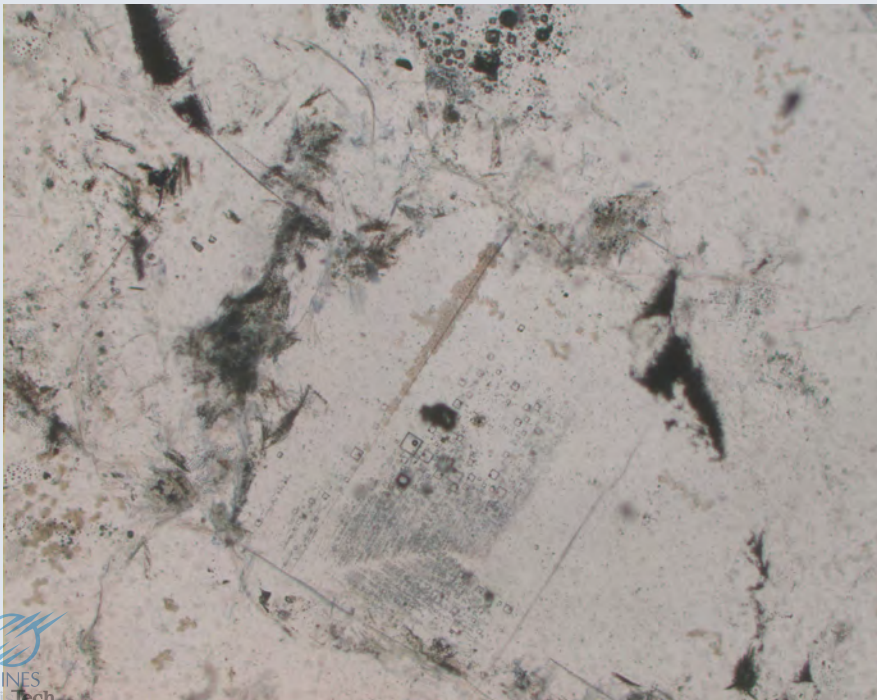




# Halite NaCl



- Cubique.
- Cristaux en cube.
- Clivage (100) cubique.
- Incolore.
- N 1,544.  
(légèrement plus faible que celui du quartz).



- Cristaux cubiques montrant les clivages.
- Le fond de la roche de la photo supérieure est de l'anhydrite.
- Sur la photo inférieure, noter les inclusions fluides cubiques.

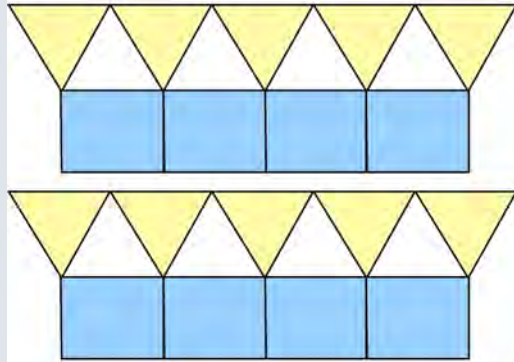
C





# Minéraux argileux

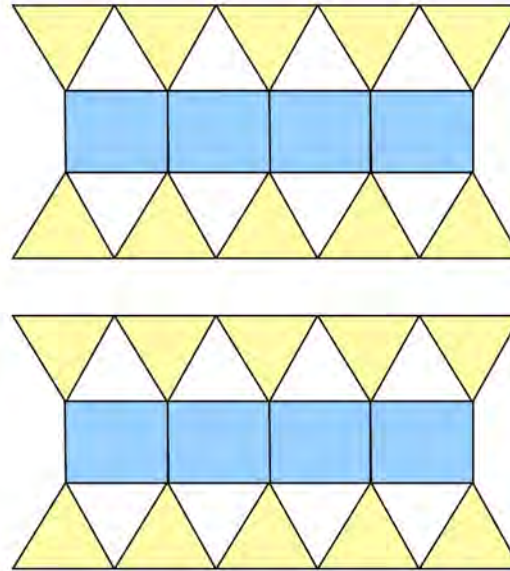
- Groupe de la kaolinite :  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 
  - Structure de type 1/1 (une couche tétraédrique, 1 couche octaédrique) ; dioctaédriques.
- Groupe de l'illite  $\text{K}_{1-x}\text{Al}_2\text{Si}_{8+x}\text{Al}_{1-x}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 
  - Structure de type 2/1 (2 couches tétraédriques, 1 couche octaédrique) ; le plus souvent dioctaédriques.
  - Dérivent de la muscovite par la substitution  $\text{K Al} \Leftrightarrow \text{Si}$ .
  - Illite, séricite , glauconite, etc.
- Groupe des smectites
  - $(1/2\text{Ca, Na})_{0,35}(\text{Al, Fe, Mg})_4(\text{Si, Al})_8\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$
  - Structure de type 2/1 (2 couche tétraédrique, 1 couche octaédrique) ; le plus souvent trioctaédriques.
- Généralement les minéraux argileux ont un grain trop fin pour pouvoir être déterminés au microscope. Les rayons X sont un moyen plus adapté. Néanmoins on rencontre parfois des cristaux assez gros pour être reconnaissables au microscope.



type 1:1  
groupe de la kaolinite

feuillet :  
une couche tétraédrique  
une couche octaédriques  
di-octaédrique

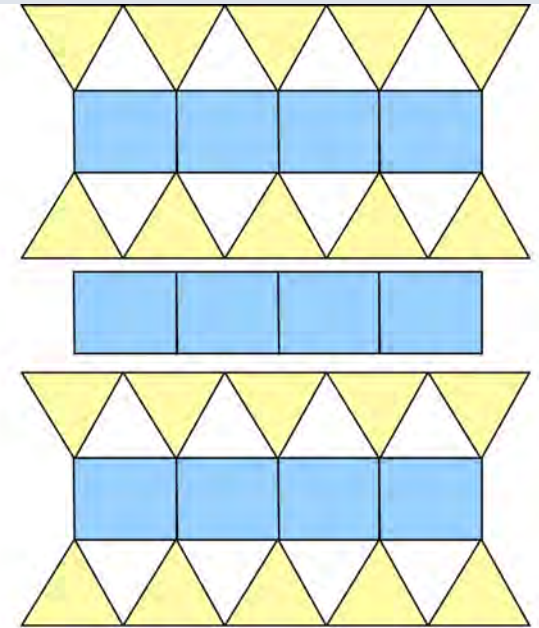
liaison entre les feuillets  
par liaison hydrogène



type 2/1  
micas - illites  
smectites

feuillet :  
couche octaédrique  
entre deux couches tétraédriques  
di- ou tri-octaédrique

interfoliaire :  
K : micas, illites  
Ca, Na, (Mg, K..) : smectites



chlorites

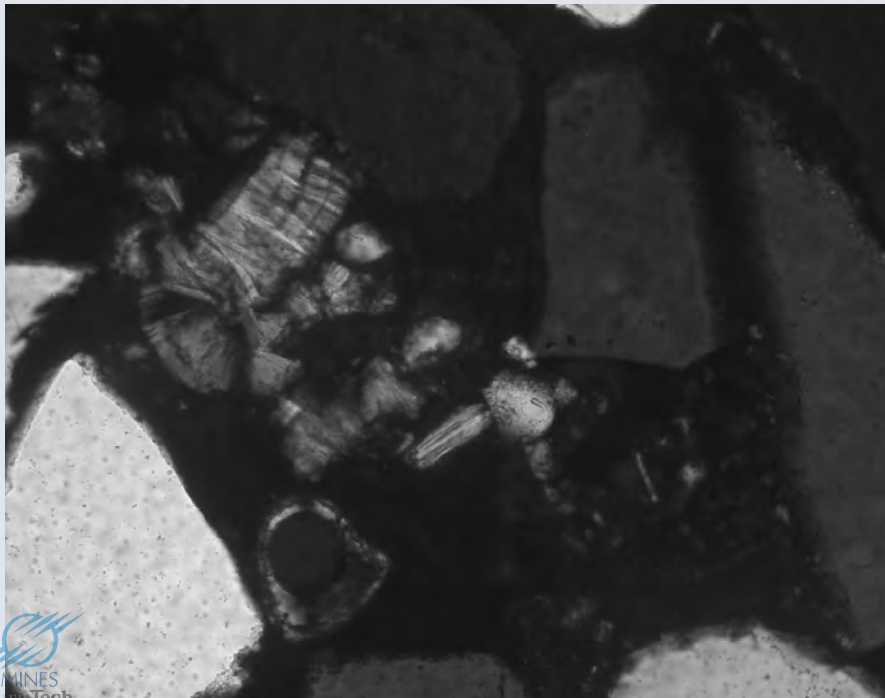
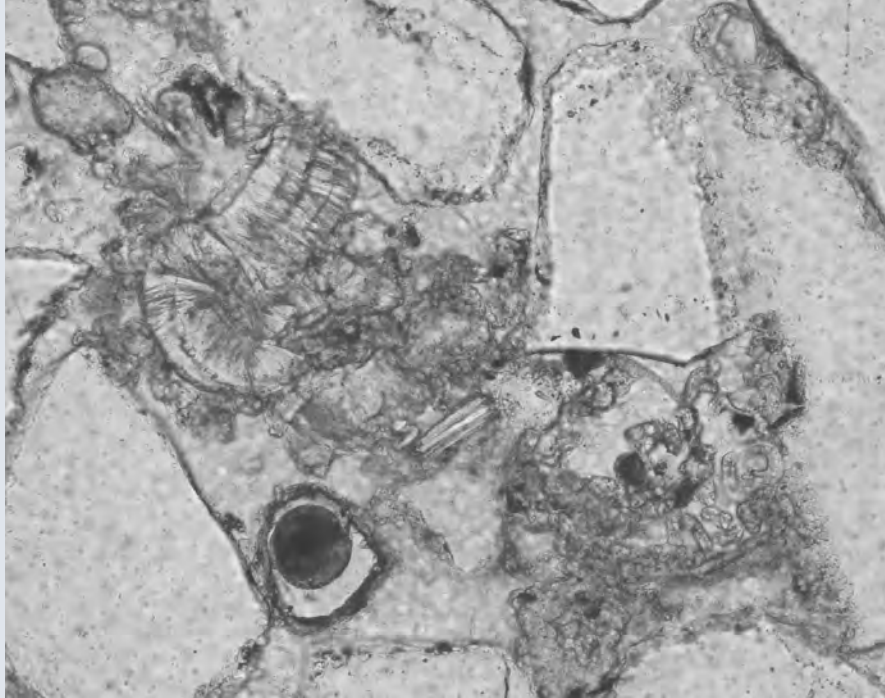
alternance de feuillets de type talc :  
couche octaédrique  
entre deux couches tétraédriques  
et de feuillets de type brucite, octaédriques

# Structure des minéraux argileux et des chlorites



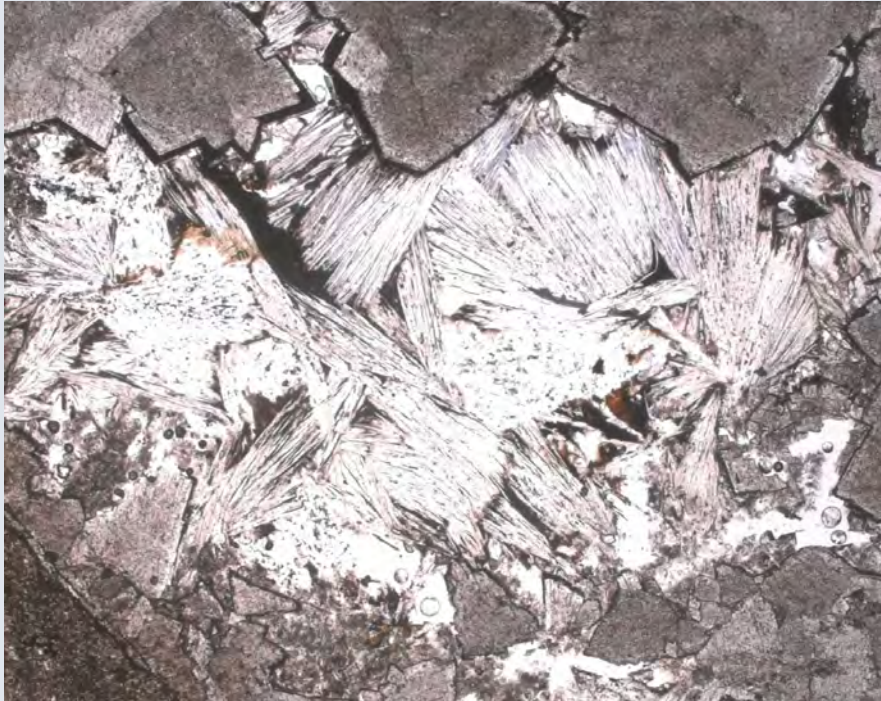


## Kaolinite $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$



- La plupart des minéraux argileux sont monocliniques. La kaolinite toutefois est triclinique. Ces minéraux présentent les formes (tablettes hexagonales) et le clivage basal (001) des micas, mais ces caractères sont très rarement observables en lame mince des micas.
- La kaolinite se présente parfois en empilement de paillettes en forme d'accordéons ou de vers.
- Incolore en lame mince
- Indices de l'ordre de ceux de la muscovite :  
Ng 1,553 – 1,565  
Np 1,560 – 1,570
- Biréfringence  $\Delta = 0,006 - 0,007$  : polarise dans les gris du 1<sup>er</sup> ordre.
- 2V 24 – 50° biaxe négatif.
- La roche ci contre est un grès (grains de quartz) où se développent des cristaux de kaolinite
- Le ciment est de l'opale (isotrope)





# Dickite

$$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$$

- Polymorphe de la kaolinite.
- Essentiellement d'origine hydrothermale.
- Incolore en lame mince.
- Indices de l'ordre de ceux de la muscovite :

$N_g$  1,566 – 1,568

$N_p$  1,560 – 1,562

- Biréfringence  $\Delta = 0,006 - 0,007$  : polarise dans les gris du 1<sup>er</sup> ordre.
- Angle d'extinction 15-20°.
- 2V 68 – 80° biaxe positif.
- Druse hydrothermale avec des cristaux de dolomite.
- Lodève, Hérault, France.

R





# Illite $\text{K}_{1-x}\text{Al}_2\text{Si}_{8+x}\text{Al}_{1-x}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

- Indices du même ordre que ceux de la muscovite :

Ng 1,54 – 1,57

Np 1,57 – 1,61

- Biréfringence  $\Delta = 0,03$  : teintes vives du 2<sup>ème</sup> ordre.

- Dans l'échantillon ci contre, développement d'une illite hydrothermale dans un gneiss ; l'illite très fine forme des agrégats plus ou moins fidroradiés. Les minéraux opaques sont des sulfures.

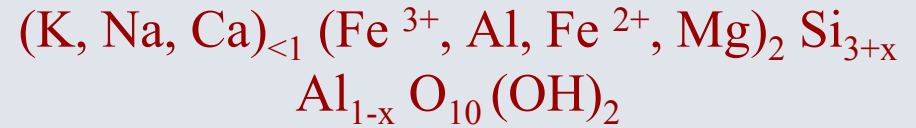
- Bertholène, Aveyron, France.

C





# Glaucosite



voisin de la muscovite avec  $Fe^{3+}$  remplaçant Al

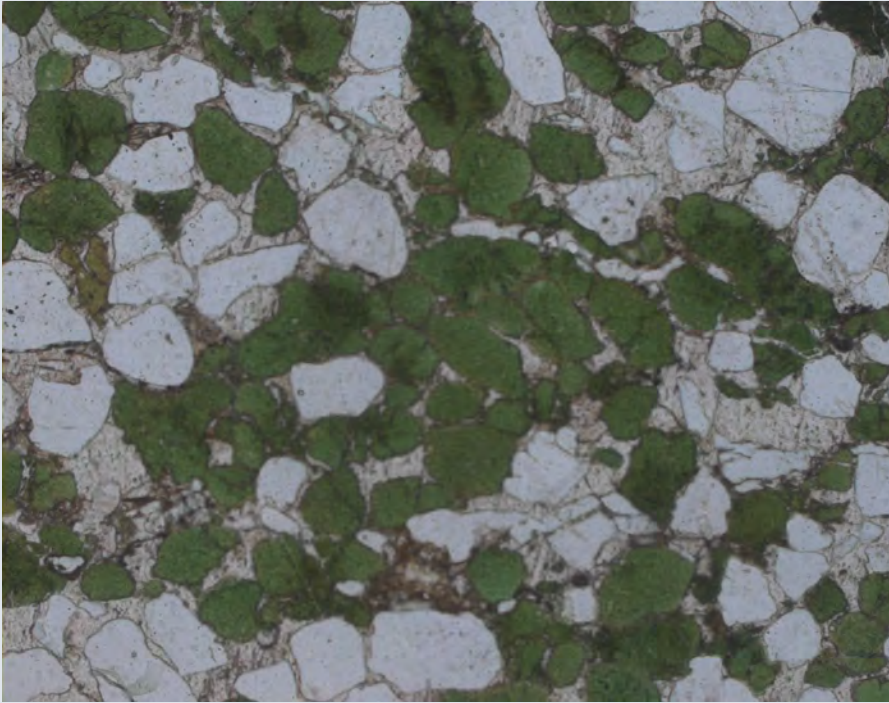


- Monoclinique
- Analogue aux micas : tablettes hexagonales avec bon clivage (001).  
On observe le plus souvent des agrégats de très petits cristaux mal formés.
- Couleur vert, vert jaune, bleu vert dépendant de la teneur en fer.
- Np 1,592 – 1,610  
Ng 1,614 – 1,644
- Ici, grains formés d'un agrégat de petits cristaux de glauconite dans un calcaire micritique ; un grain de quartz à gauche.

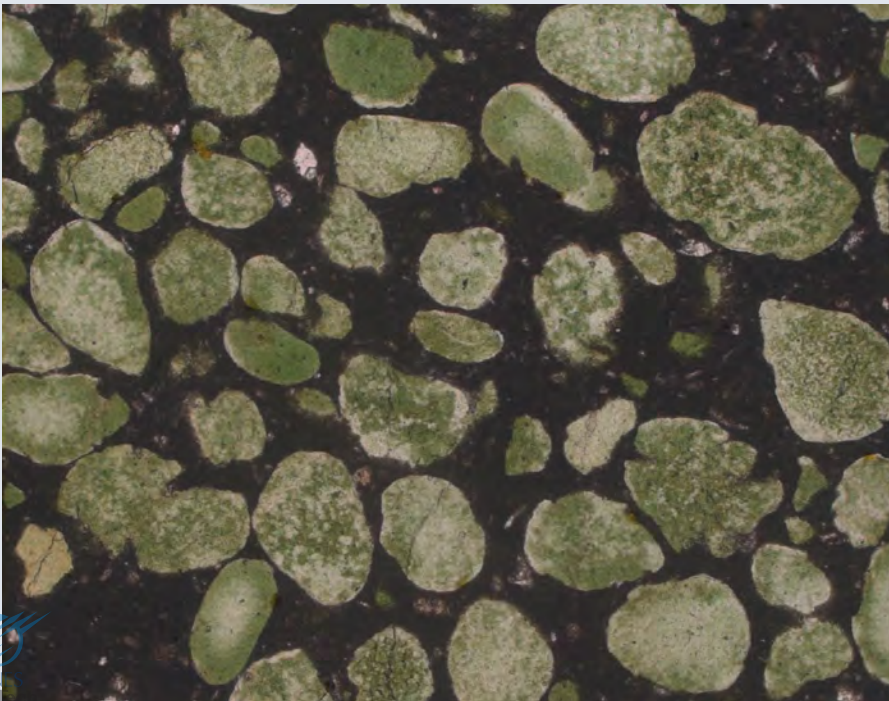




# Glaucosite

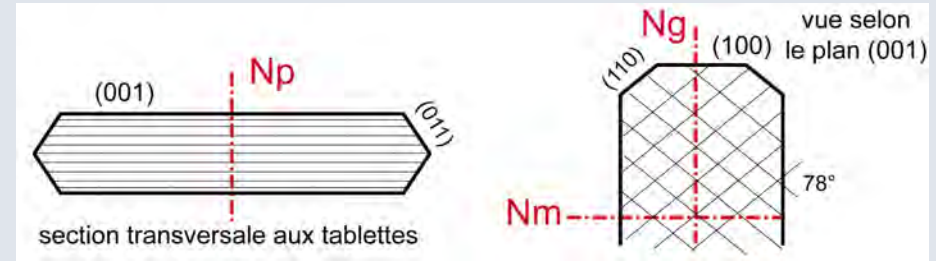
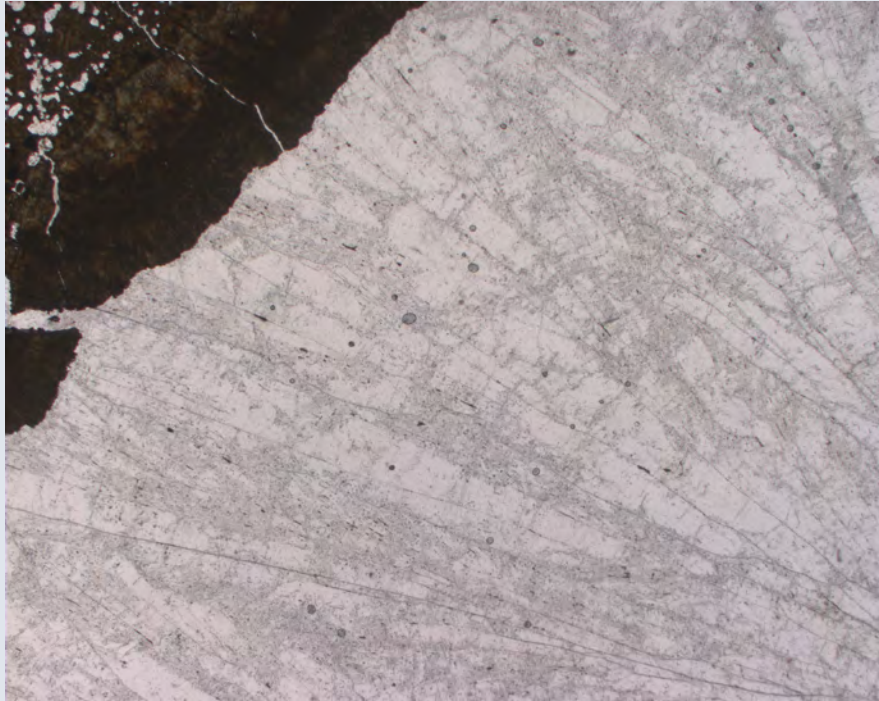


- Biréfringence  $\Delta = 0,014 - 0,030$   
Polarise dans des teintes vives.  
Teintes de polarisation masquées par le teinte propre.
- Biaxe négatif  $2V = 0 - 20^\circ$ .



- Photographies prises en lumière naturelle.
- *En haut*, grès avec grains de quartz et grains de glauconite à ciment carbonaté.
- *En bas*, grains de glauconite dans un calcaire micritique.

C

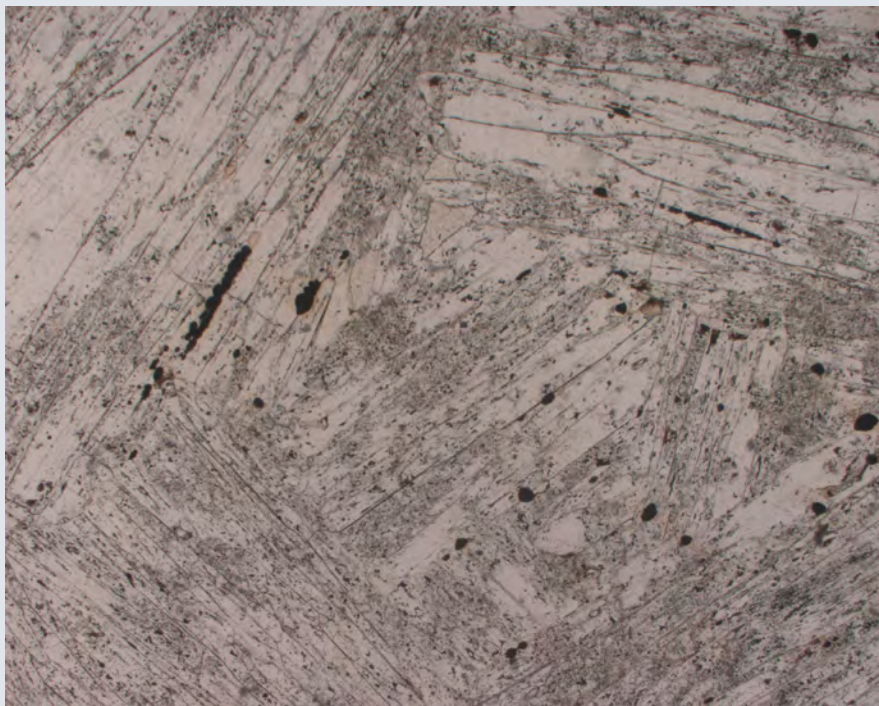


## Barytine $\text{BaSO}_4$

- Orthorhombique.
- Parfois automorphe mais en général, en lame mince, lamellaire, formant des gerbes.
- Clivages : (001) parfait, (110) bon (angle de  $78^\circ$ ), (120), (011).
- Incolore.
- Le minéral presque opaque dans le coin NW est de la blende.

C





## Barytine $\text{BaSO}_4$

- Indices moyens (comme la tourmaline, l'apatite)  
 $N_p 1,636 - N_g 1,647$
- Biréfringence  $\Delta = 0,012$   
Polarise en blanc, gris, jaune pâle du 1<sup>er</sup> ordre.
- Biaxe positif  $2V 36 - 38^\circ$ ;

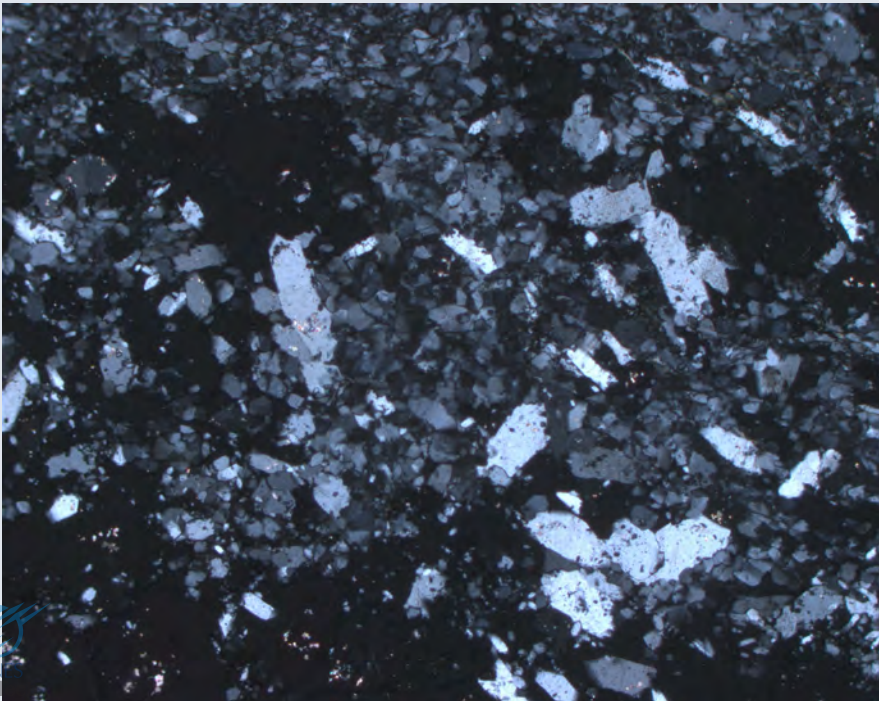




## Barytine $\text{BaSO}_4$ et fluorite $\text{CaF}_2$



- La fluorine se reconnaît à son fort relief négatif et à son caractère isotrope (éteinte en LP).
- La barytine forme le fond de la roche ; quelques cristaux plus gros, sont automorphes.







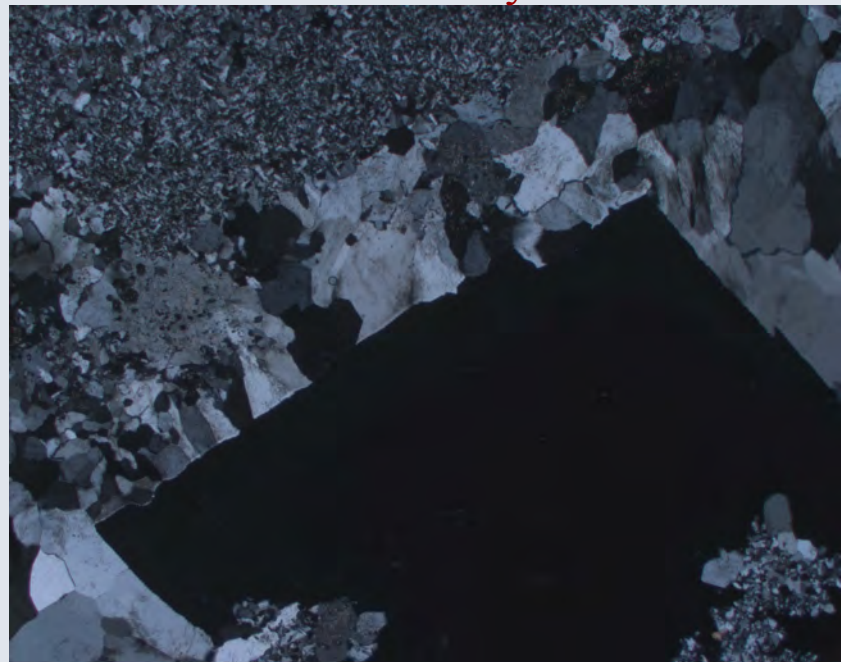
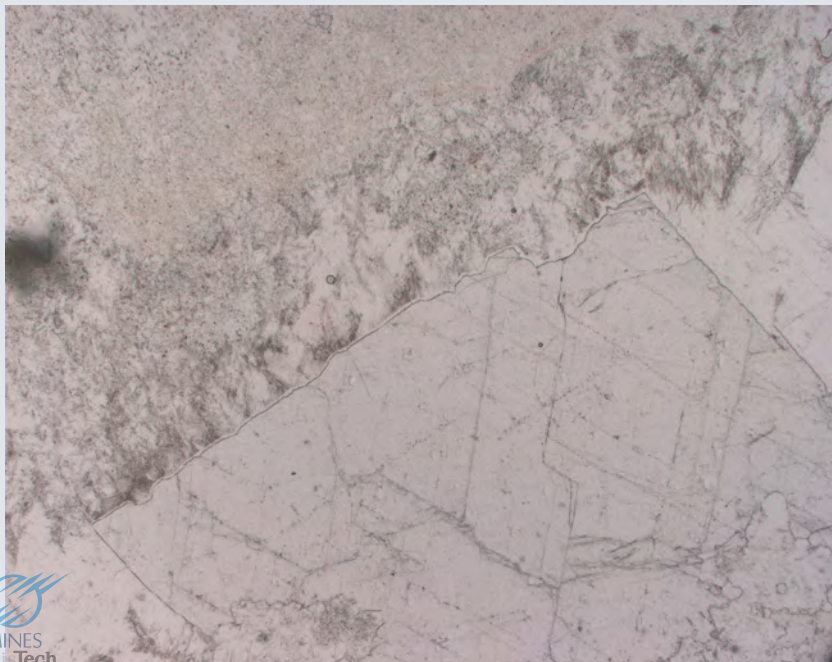
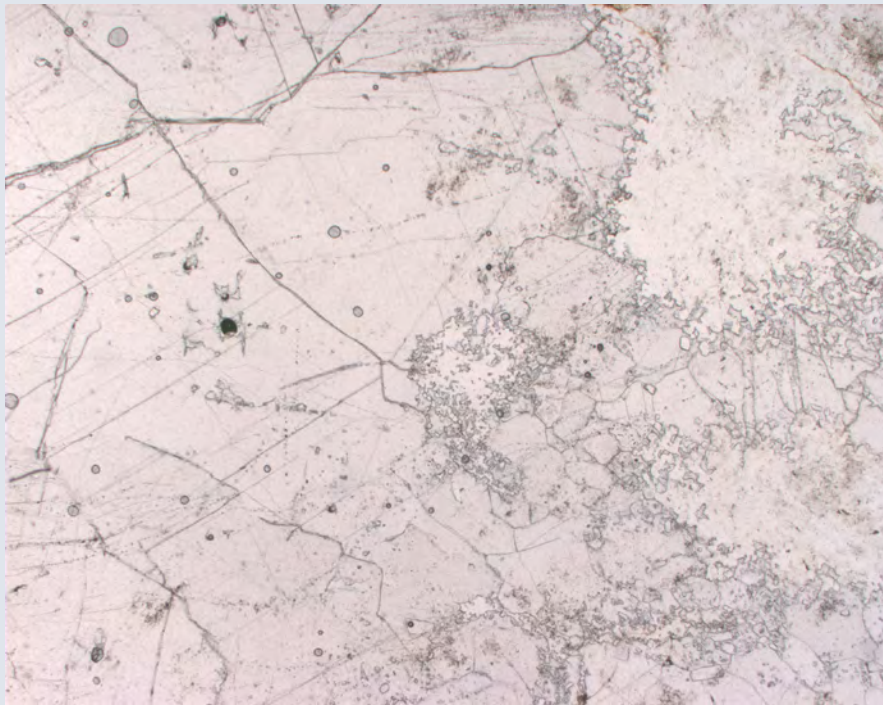
# Fluorite $\text{CaF}_2$

- Cubique.
- Souvent formes en cube (*en bas*).
- Clivage octaédrique.
- Incolore – parfois violet.
- Indice très faible ; relief très fort mais négatif.

N 1,433 – 1,435

C

- Dans les deux échantillons ci-contre la fluorite est associée à de la barytine.

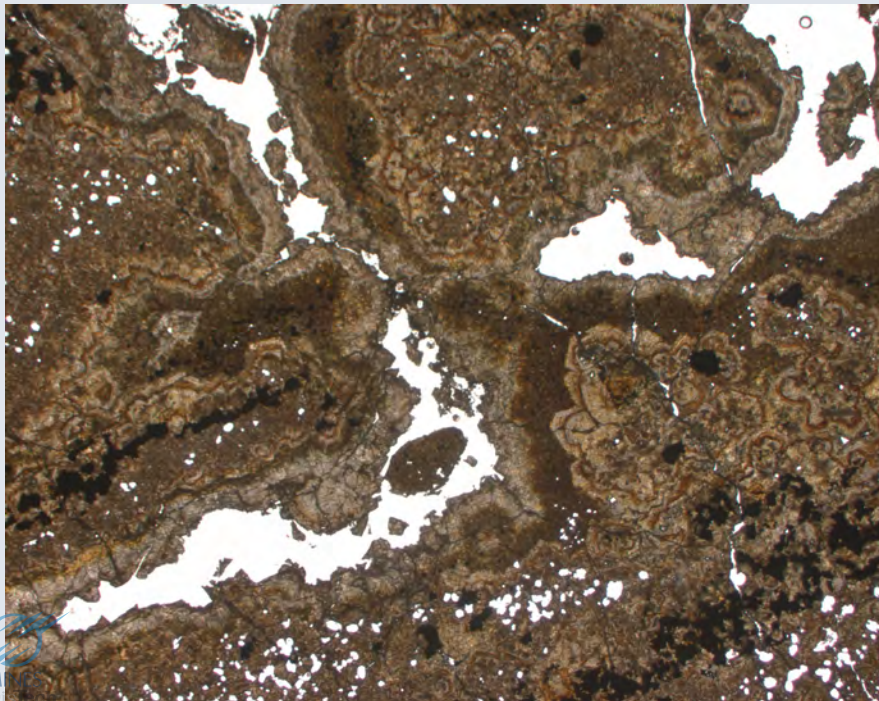






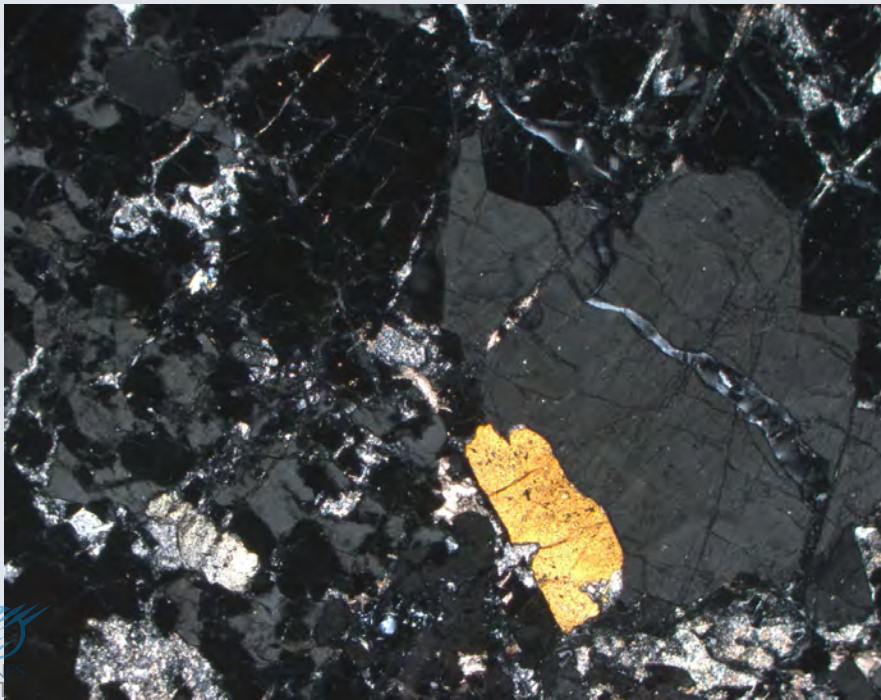
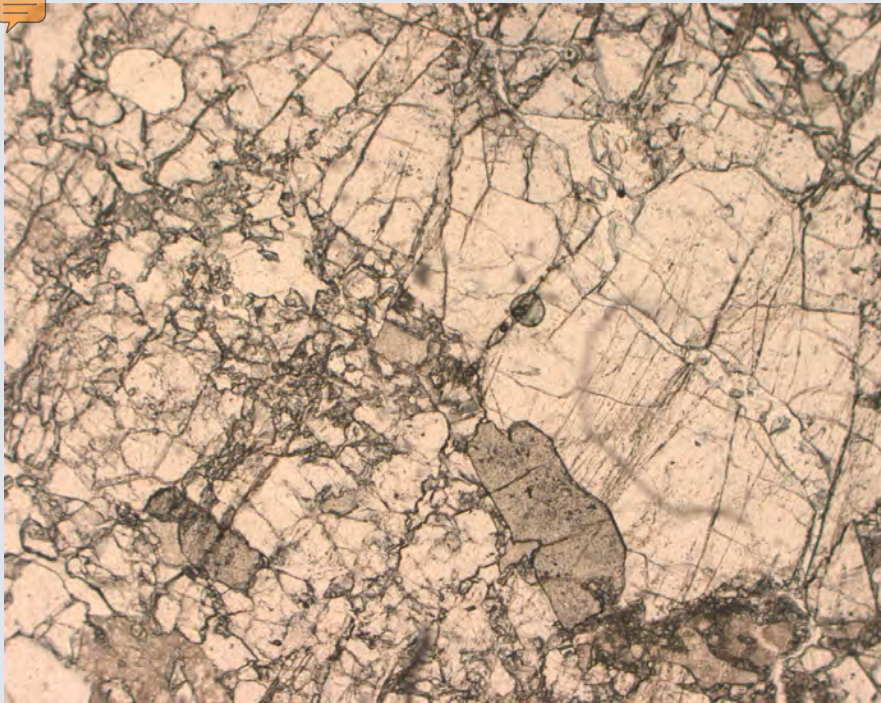
## Blende ZnS (sphalérite)

- Cubique.
- Indice très élevé :  $n_D = 2,37$ .
- Rarement incolore, plus souvent brun, brun jaune.
- Rarement automorphe en lame mince (tétraèdres, dodécaèdres) – massive, botryoïdale (*en bas*).
- Clivage (011) (*en haut*).
- Macles lamellaires (111) (211) peu visibles en lame mince.



C





# Scheelite $\text{CaWO}_4$



- Quadratique.
- Granulaire, pas de clivage.
- Incolore.
- Indice très élevé, supérieur à celui du grenat :

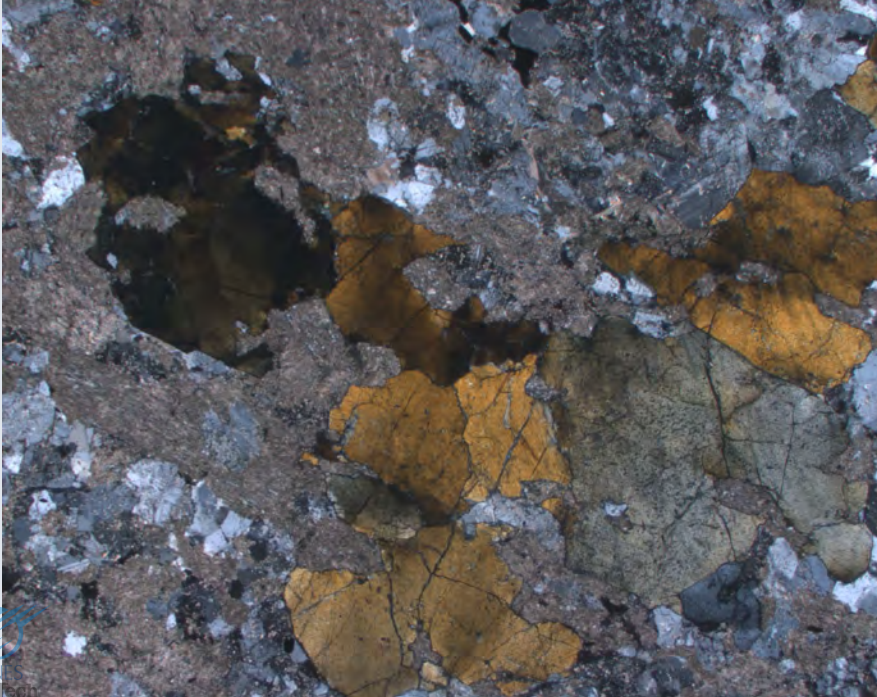
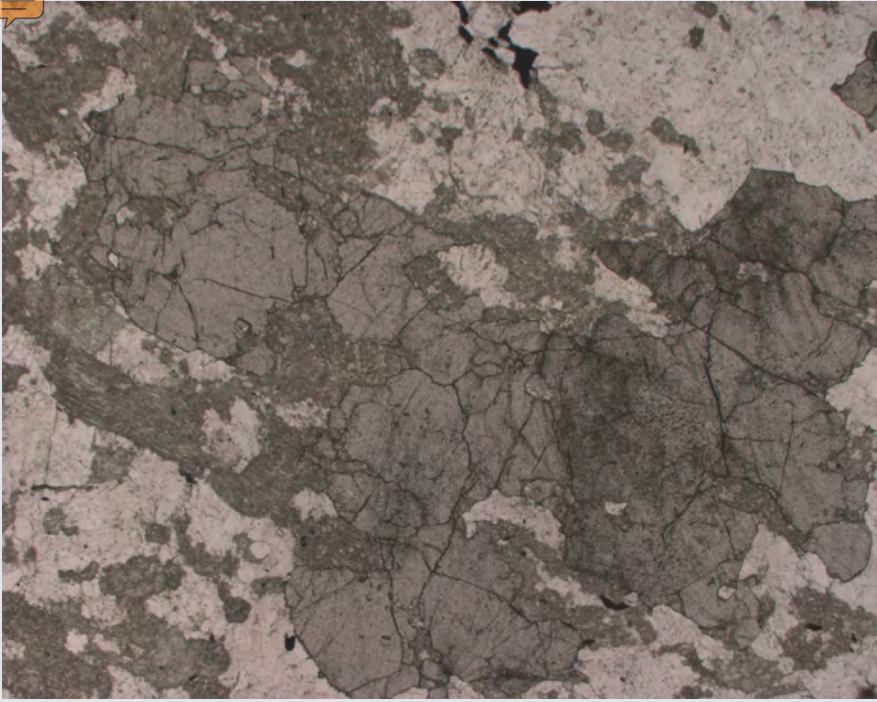
N 1,92 – 1,94

- Biréfringence  $\Delta = 0,015 - 0,018$   
Polarise dans des jaunes de la fin du 1<sup>er</sup> ordre.
- Uniaxe positif.
- Skarn avec grenat  et vésuvianite   
Prémian, Hérault, France.

R

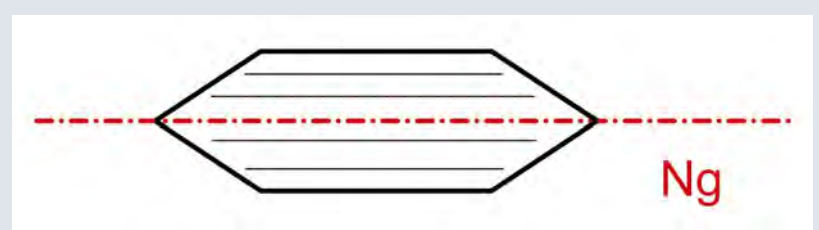
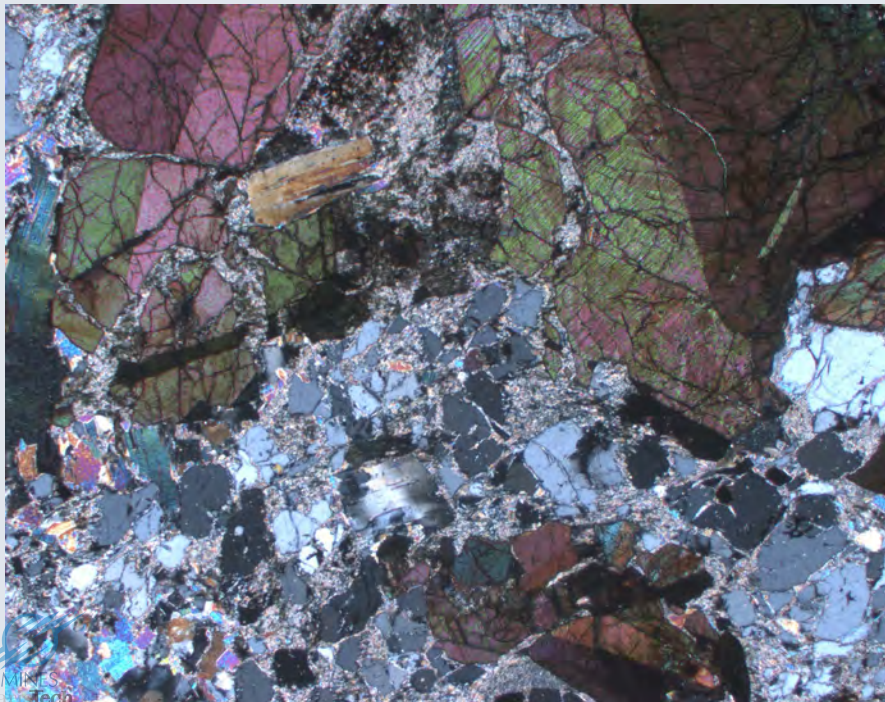
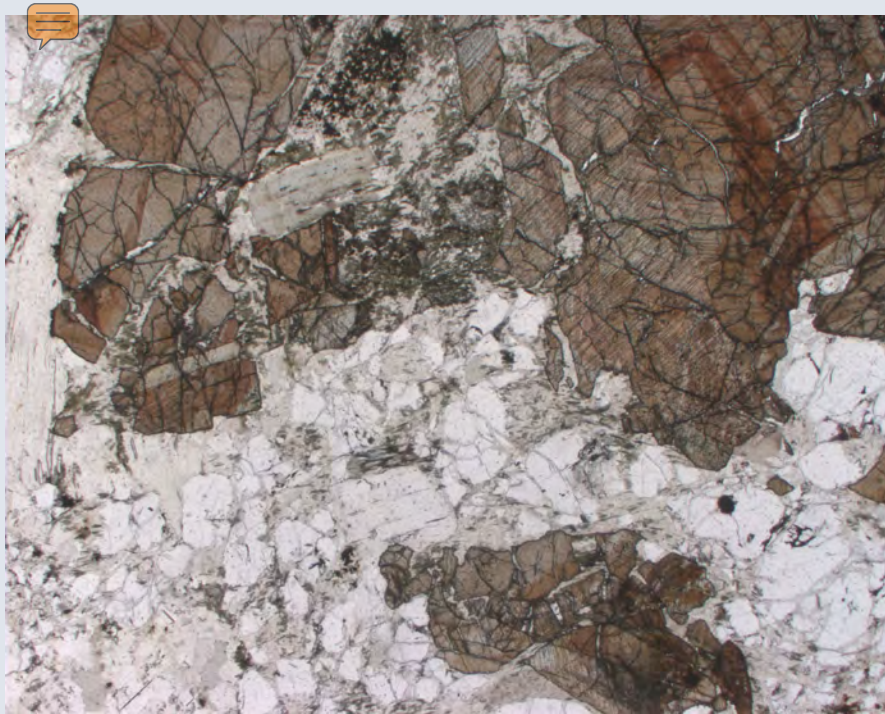


# Scheelite



- La roche est un gneiss-à-silicates-calciques avec quartz, plagioclase calcique séricitisé.
- La Favière, Var, France.





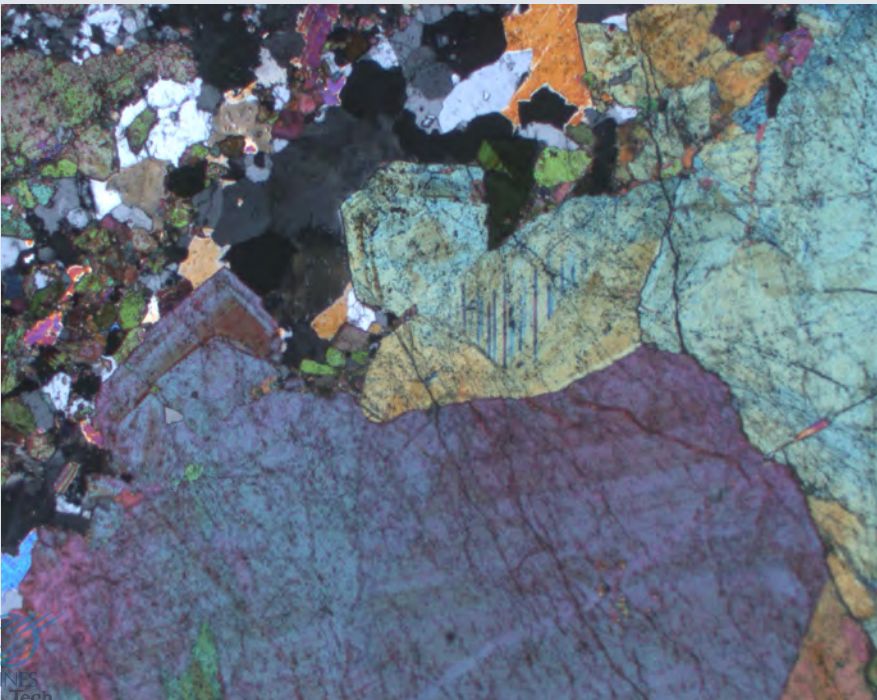
## Cassitérite $\text{SnO}_2$

- Quadratique.
- Prismes courts bipyramidés ; granulaire.
- Clivage : (110) parallèle à l'allongement du prisme ; (321) (111).
- Macle (101).
- Brun rouge, brun jaune.  
Montre des figures d'accroissement, parfois en sablier.
- Indices très fort, supérieur aux indices des grenats
 

|       |               |
|-------|---------------|
| $N_p$ | 1,997 – 2,001 |
| $N_g$ | 2,093 – 2,098 |
- La roche est un greisen avec quartz et mica lithinifère.
- Pedra Branca, Goiás, Brésil.







# Cassitérite

- Biréfringence  $\Delta = 0,096 - 0,097$   
Polarise dans les ordres supérieurs.
- Uniaxe positif.
- Noter les figures d'accroissement et les pyramides automorphes sur le bord du filon de quartz dans le coin NW.
- Pedra Branca, Goiás, Brésil

R





| Nom<br>formule chimique                                 | symétrie | formes cristallines - clivages - macles<br>position de l'indicatrice | Indice<br>baume 1,54<br>quartz 1,55<br>tourmaline 1,65<br>grenat 1,75<br>2,8 | Couleur<br>Altérations                         | Biréfringence<br>1er ordre<br>gris<br>blanc<br>jaune<br>orange<br>rouge<br>violet<br>bleu<br>vert<br>gris<br>noir<br>0<br>0,009<br>0,018<br>0,054<br>2e - 3e<br>ordres<br>faibles<br>vives | Uniaxe<br>/ Biaxe<br>+ / - |
|---------------------------------------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Gypse<br>$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$     | monocl.  |                                                                      | 1,5205<br>1,5296                                                             | incolore                                       | 0,0091                                                                                                                                                                                     | B+<br>(2V=58°)             |
| Anhydrite<br>$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ | orthor.  |                                                                      | 1,569<br>1,6138                                                              | incolore                                       | 0,0438                                                                                                                                                                                     | B+<br>(2V=42-44°)          |
| Barytine<br>$\text{BaSO}_4$                             | orthor.  | tablettes, lamellaire, gerbes<br>                                    | 1,636<br>1,648                                                               | incolore                                       | 0,012                                                                                                                                                                                      | B+<br>(2V=36-38°)          |
| Fluorite<br>$\text{CaF}_2$                              | cub.     | clivage octaédrique (111)                                            | 1,434<br>relief en creux !                                                   | incolore<br>(violacé)                          |                                                                                                                                                                                            |                            |
| Blende<br>$\text{ZnS}$                                  | cub.     | clivage (110)                                                        | 2,396<br>2,47                                                                | jaunâtre<br>brun jaune<br>brun rouge           |                                                                                                                                                                                            |                            |
| Scheelite<br>$\text{CaWO}_3$                            | quadr.   | granulaire, pas de clivage                                           | 1,92<br>1,94                                                                 | incolore<br>jaunâtre<br>brunâtre<br>(chagriné) | 0,015<br>0,017                                                                                                                                                                             | U+                         |
| Cassitérite<br>$\text{SnO}_2$                           | quadr.   |                                                                      | 1,997<br>2,098                                                               | incolore<br>brun rouge<br>brun vert<br>zoné    | 0,096<br>0,097                                                                                                                                                                             | U+                         |