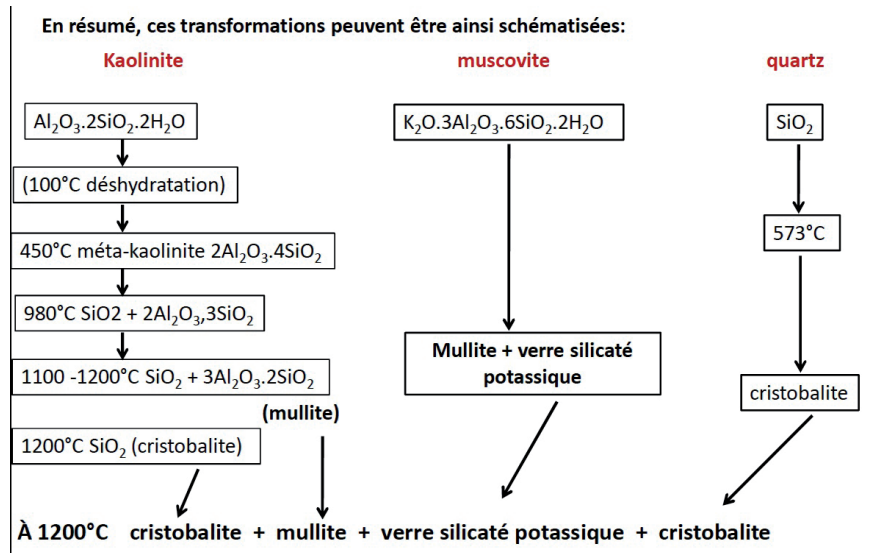
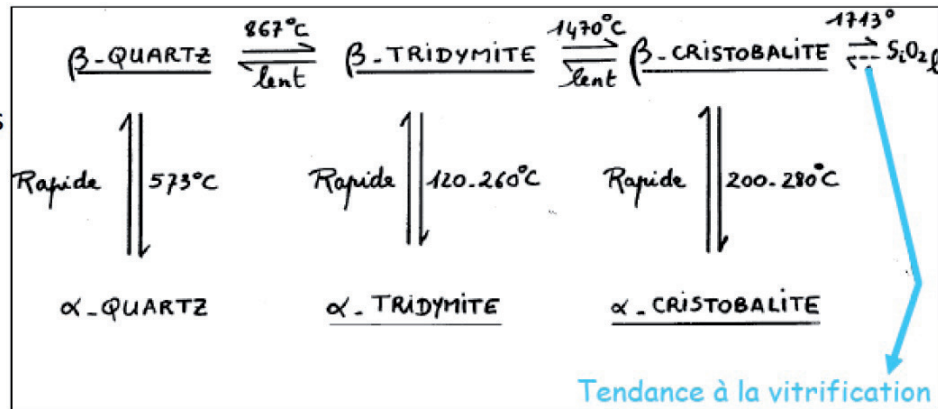


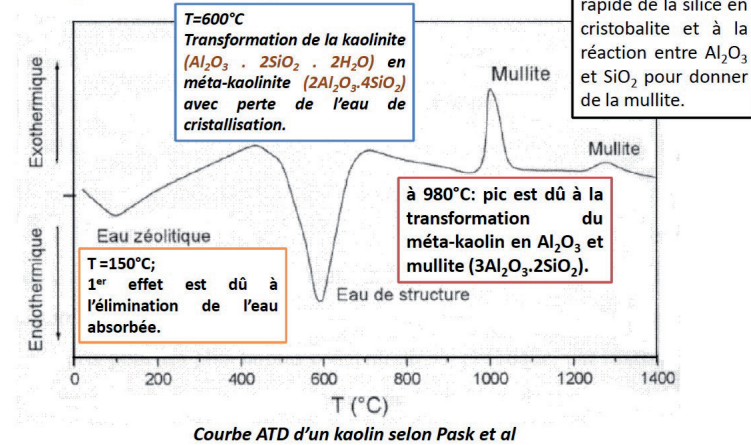
THEME ST-SCIENCES DE LA TERRE

ST-G. LE MÉTAMORPHISME, MARQUEUR DE LA GÉODYNAMIQUE INTERNE

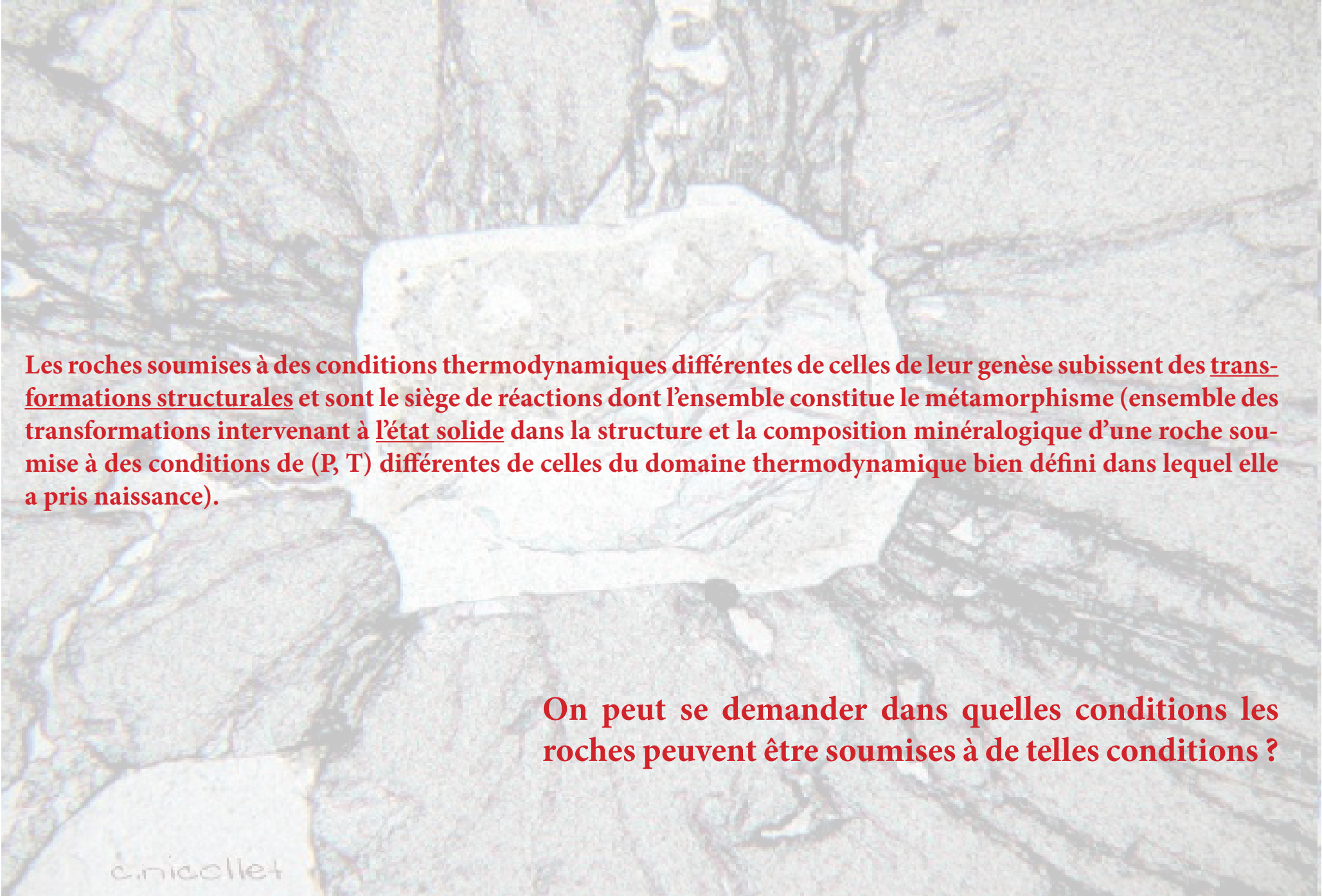
**ST-G-1. LES ASSOCIATIONS MINÉRALOGIQUES INDICATRICES
DE PRESSION ET DE TEMPÉRATURE**



Comportement des argiles à la cuisson

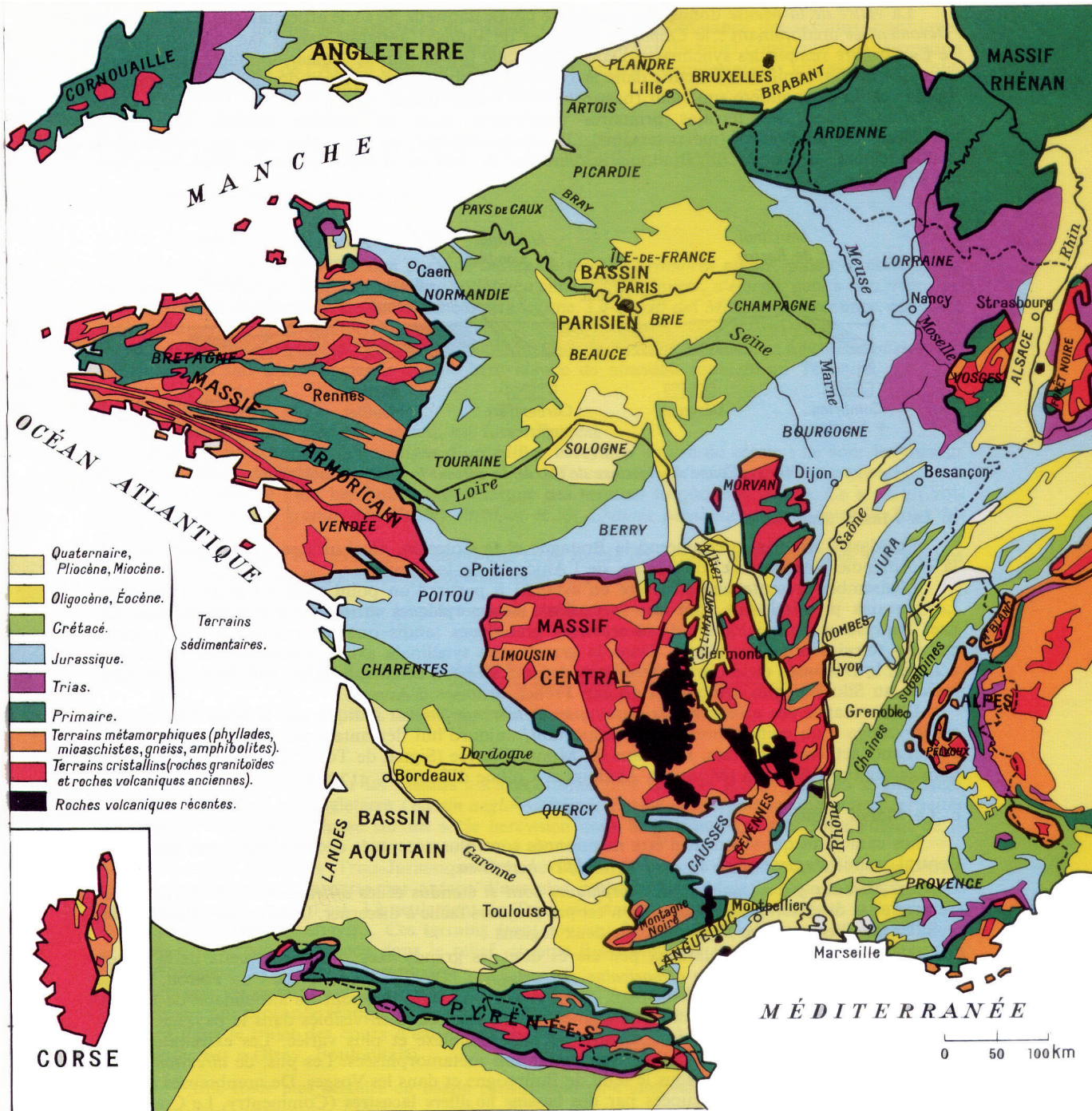


La cuisson de la brique, opération réalisée empiriquement depuis l'Antiquité, entraîne une transformation du matériau par étapes qui ont lieu successivement lors de l'augmentation de T. Chaque étape est caractérisée par la disparition d'une phase initiale et l'apparition d'une phase nouvelle qui peut persister lors du retour aux conditions initiales de T : le matériau transformé conserve sous forme de phases minérales la mémoire des conditions traversées; la composition du matériau de départ conditionne celle du résidu de fusion et du liquide, donc la composition du matériau transformé.



Les roches soumises à des conditions thermodynamiques différentes de celles de leur genèse subissent des transformations structurales et sont le siège de réactions dont l'ensemble constitue le métamorphisme (ensemble des transformations intervenant à l'état solide dans la structure et la composition minéralogique d'une roche soumise à des conditions de (P, T) différentes de celles du domaine thermodynamique bien défini dans lequel elle a pris naissance).

On peut se demander dans quelles conditions les roches peuvent être soumises à de telles conditions ?



Si les roches métamorphiques se retrouvent à l'affleurement, vu leurs conditions de formations, c'est qu'elles ont subi un phénomène d'exhumation (érosion, réajustement isostatique). Ce phénomène implique des modifications de conditions de P et de T°C pouvant être à l'origine de nouvelles transformations minéralogiques à l'état solide.

Une roche métamorphique est donc susceptible de garder des traces de l'histoire de l'enfouissement donc de son origine et l'exhumation donc de son état final

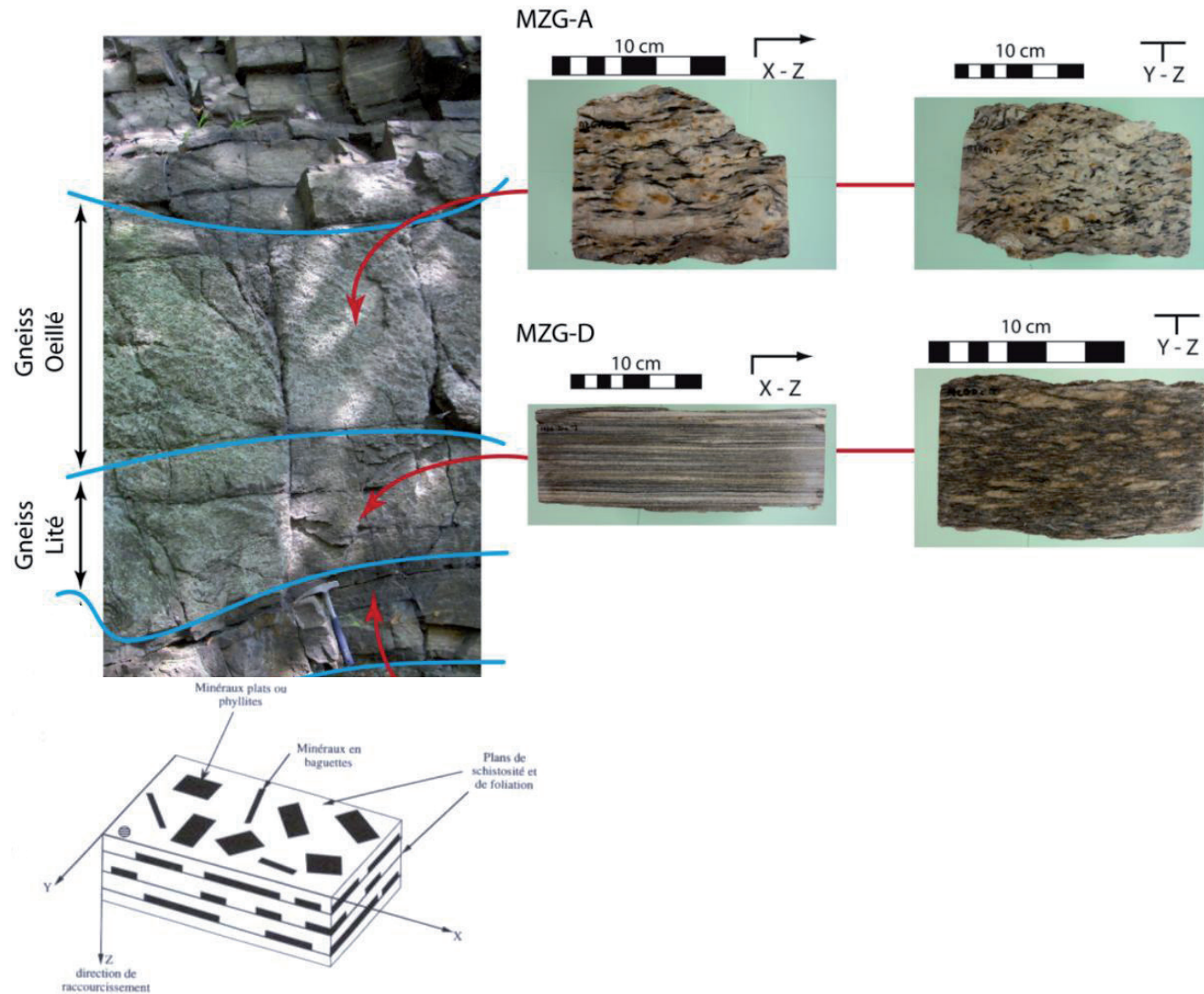
Comment analyser les roches métamorphiques ?

The background is a photograph of a metamorphic rock sample, likely a schist or gneiss, showing distinct foliation and banding. A white rectangular label is placed in the center of the image, containing the title text.

LES ROCHES METAMORPHIQUES : UN ASSEMBLAGE DE MINÉRAUX RESULTANT D'UNE TRANSFORMATION PAR ETAPES

© nicollet

Figure 2 : Photographies de l'affleurement et des échantillons.
 On observe une transition quasi-continue entre un gneiss oeilé (MZG-A) et un gneiss lité (MZG-D). La roche initiale est un granite à deux micas.



A la recherche d'indices

Figure 3 : Photographies en LPA du gneiss lité. (a) Les limites de lits sont nettes et rectiligne. Les quartz sont très gros par rapport aux autres phases. (b) Les lits sont un peu plus épais que selon l'autre section, mais tout de même bien allongés.

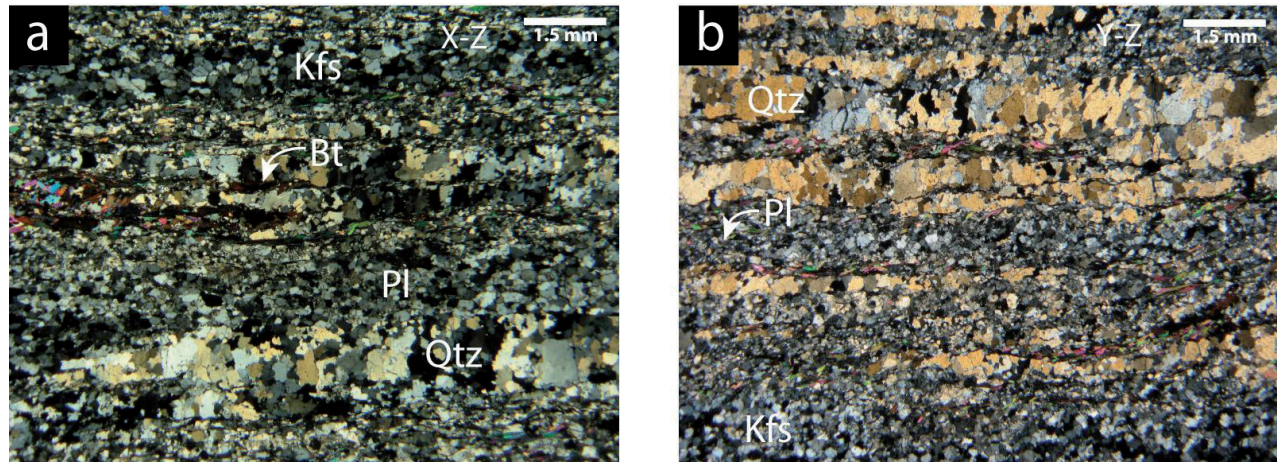
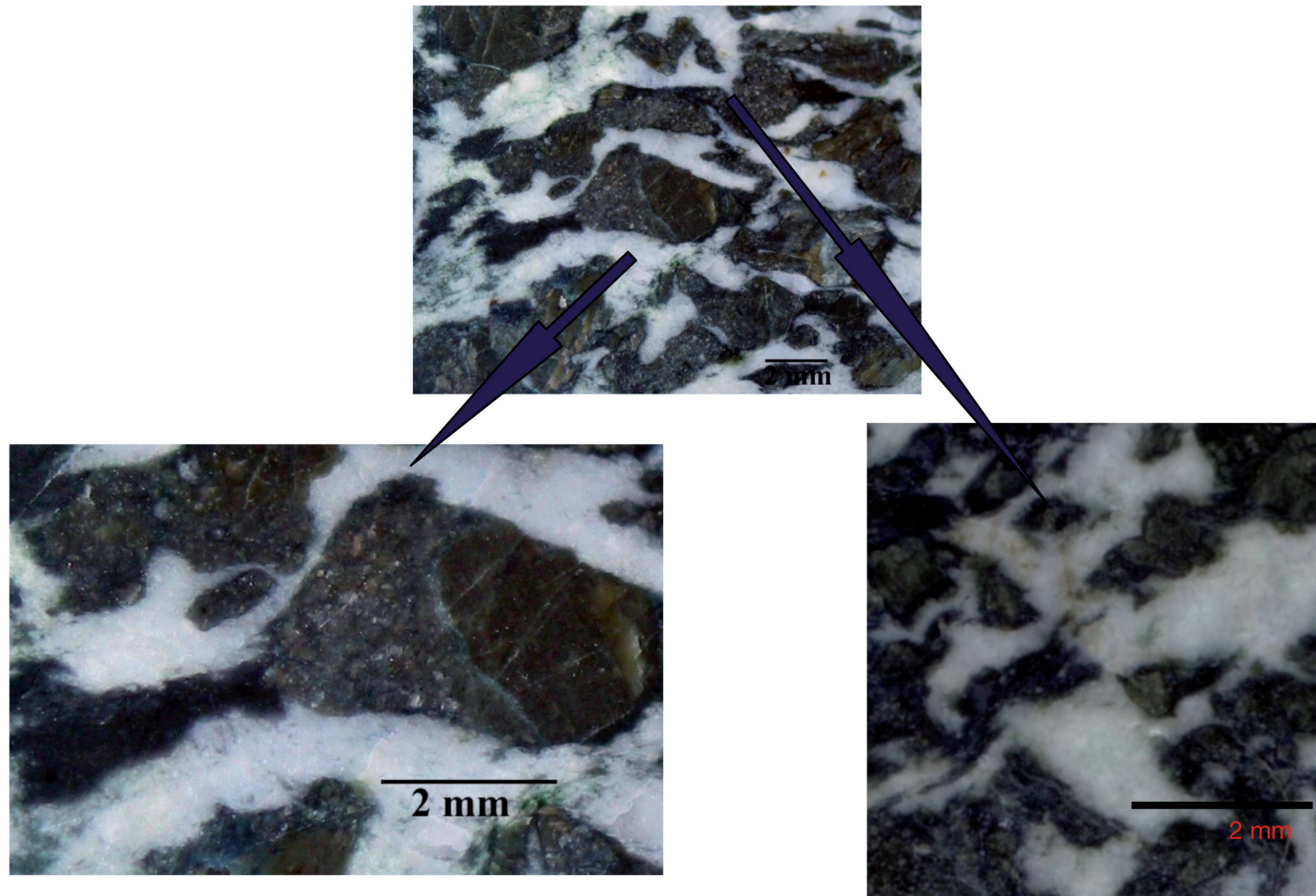
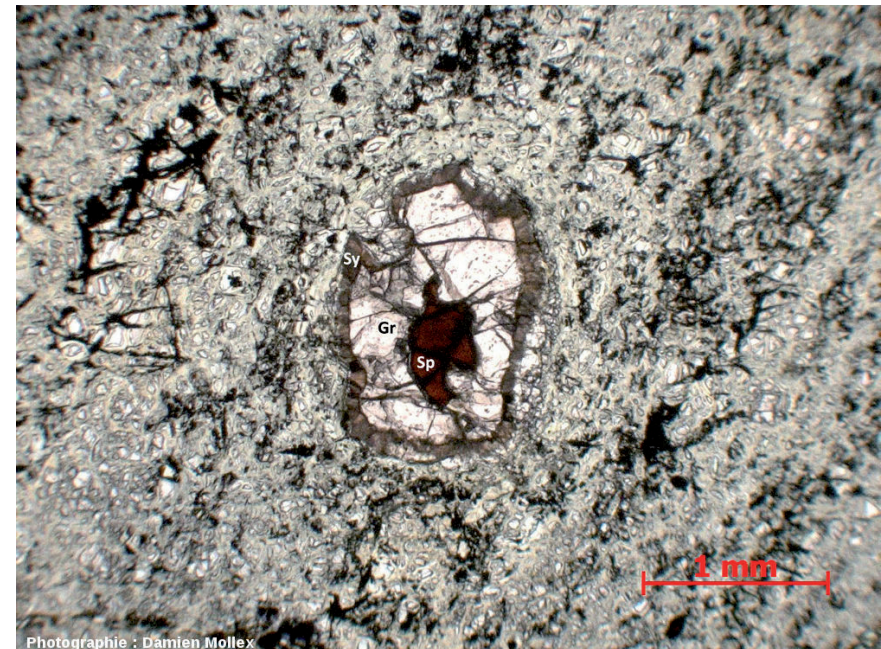
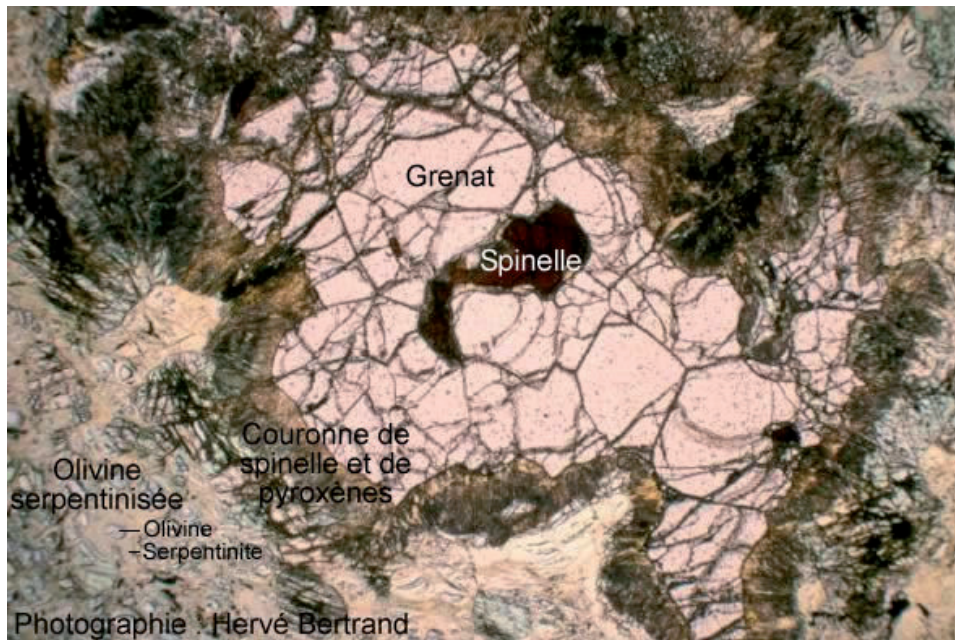


Figure 4 : Métagabbro issu de la transformation du gabbro océanique ne comportant que plagioclase et pyroxène



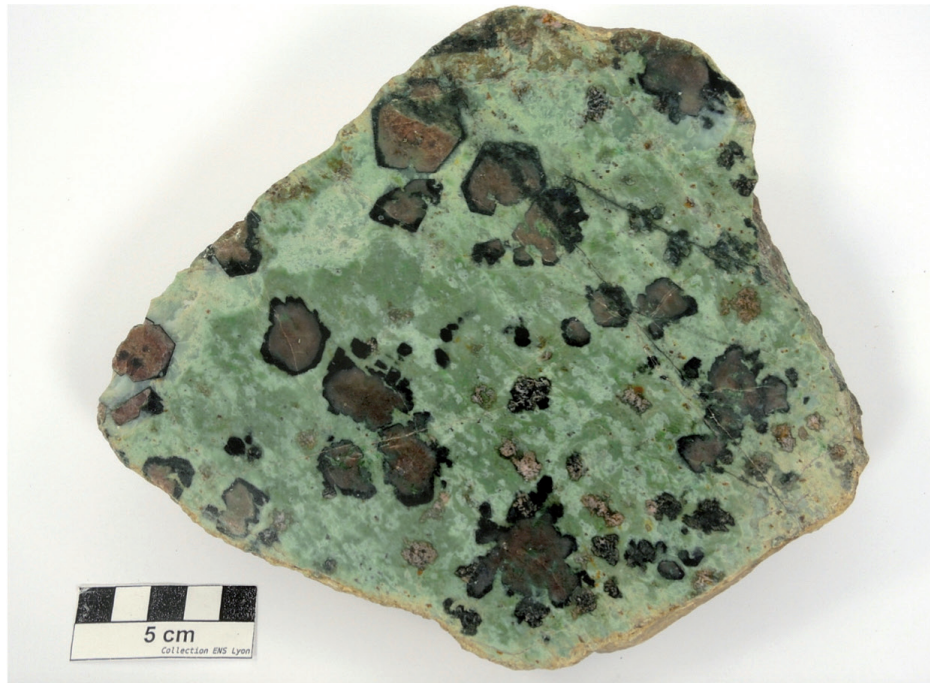
A la recherche d'indices

**Figure 5 : Des minéraux à couronnes emboîtées dans des
péridotites des Monts du Lyonnais**



A la recherche d'indices

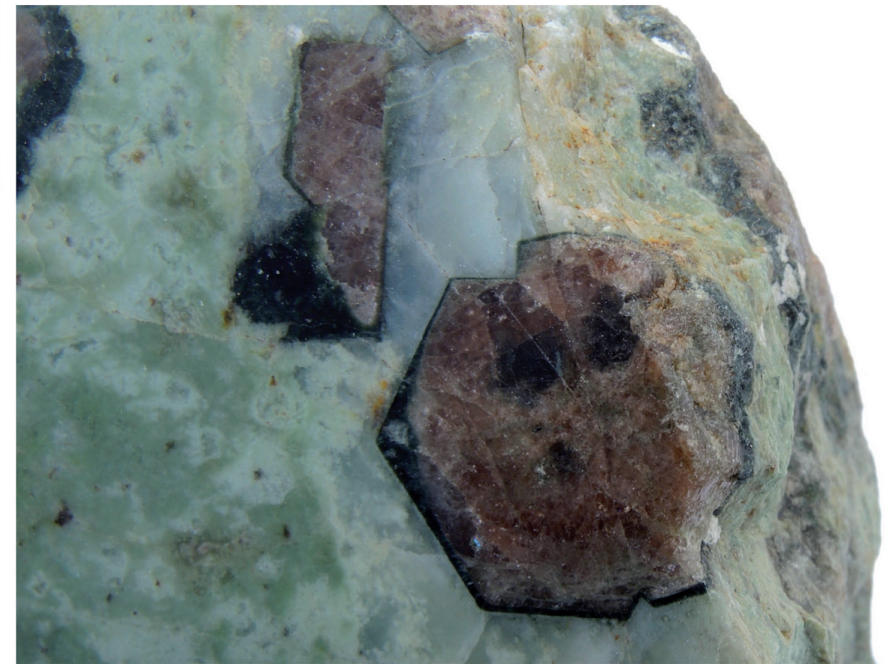
Figure 6 : Métabasite à grenat et omphacite



Éclogite principalement formée
d'omphacite et de grenat.
Échantillon de P. Thomas - Photo de D.
Mollex

Section sciée

Section brute



A la recherche d'indices

On a pu identifier

- Une ségrégation des minéraux selon les conditions anisotropes associées à des phénomènes de dissolutions et recristallisation
- Des minéraux qui se forment aux dépens d'autres minéraux
- Des réactions incomplètes avec les lixiviés réactionnels

==> On a donc des phénomènes de transformations minérales conduisant à une recristallisation à l'état solide (absence de fusion partielle) ==> définition du métamorphisme.

La roche métamorphique a globalement la même composition chimique que la roche initiale aux fluides près (H₂O, CO₂ ajout ou retrait Cf infra étude des réactions). On nomme protolithe^{***} la roche initiale et série métamorphique^{**}, l'ensemble des roches qui dérivent d'un même protolithe.

On nommera paragenèse^{***} l'association minéralogique à l'équilibre formée au cours d'un processus géologique spécifique.

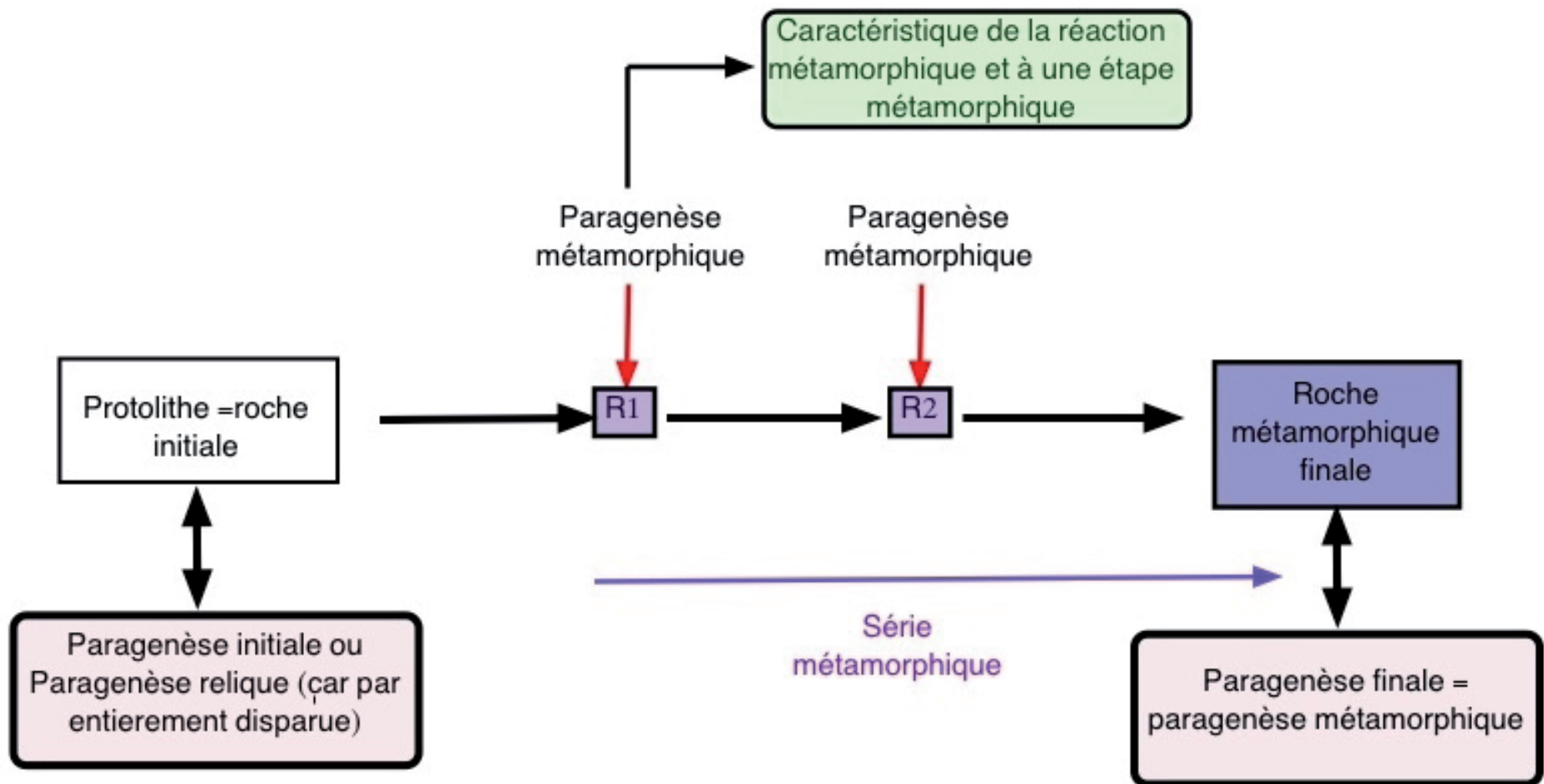
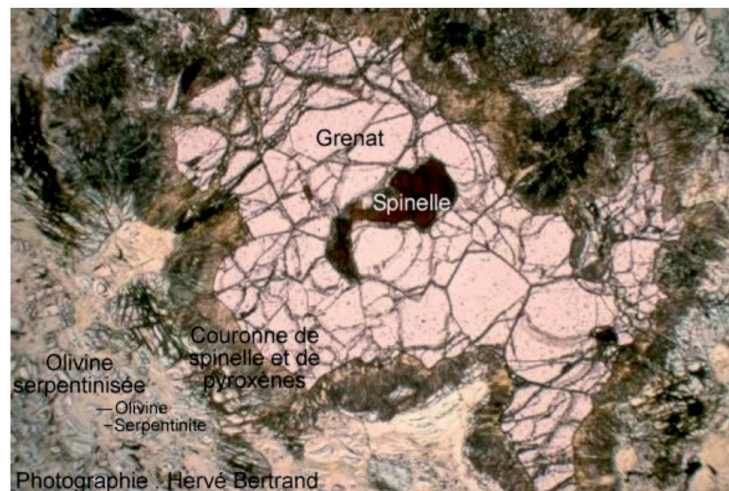
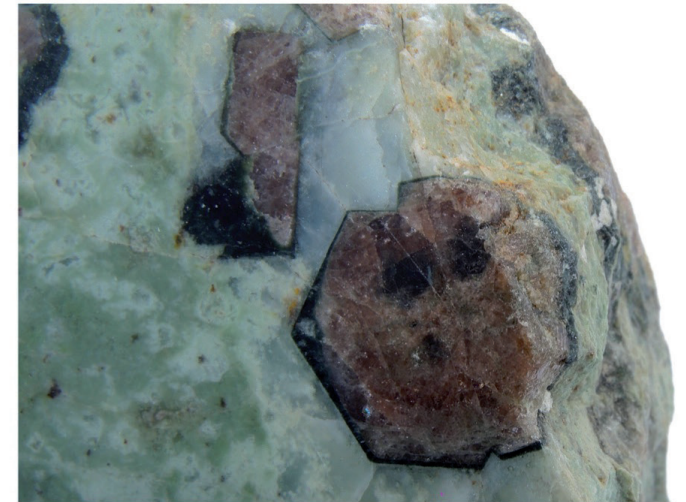
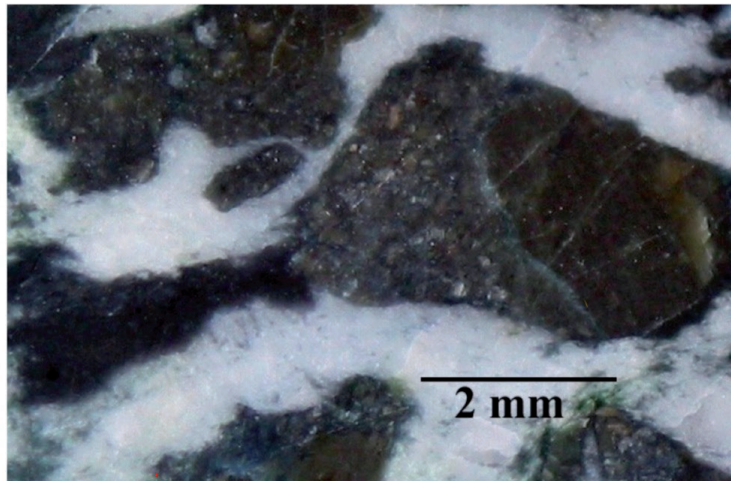


Figure : à la recherche des paragenèses



Astuce : Observer les relations physiques entre les minéraux, appliquer les principes de datation relatives

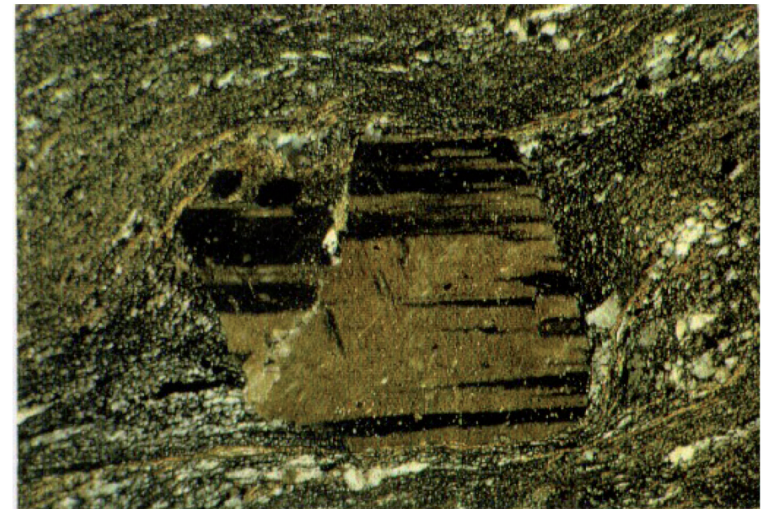
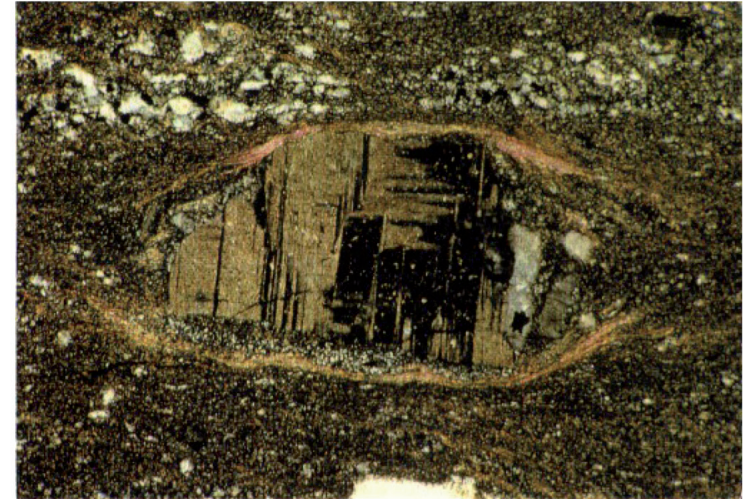
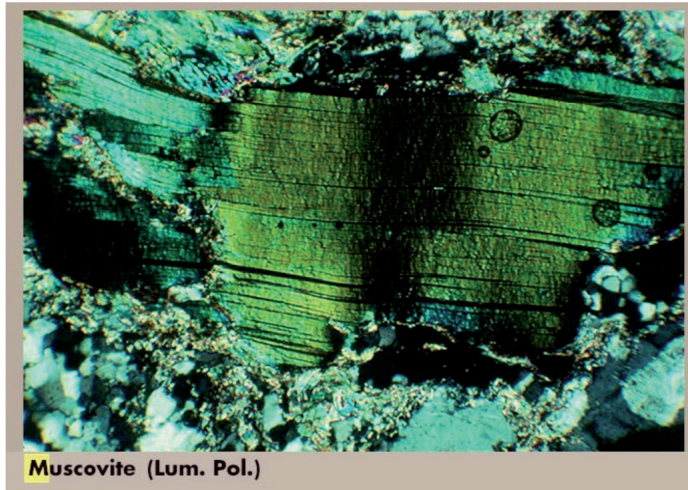


Paragenèse - cinématique



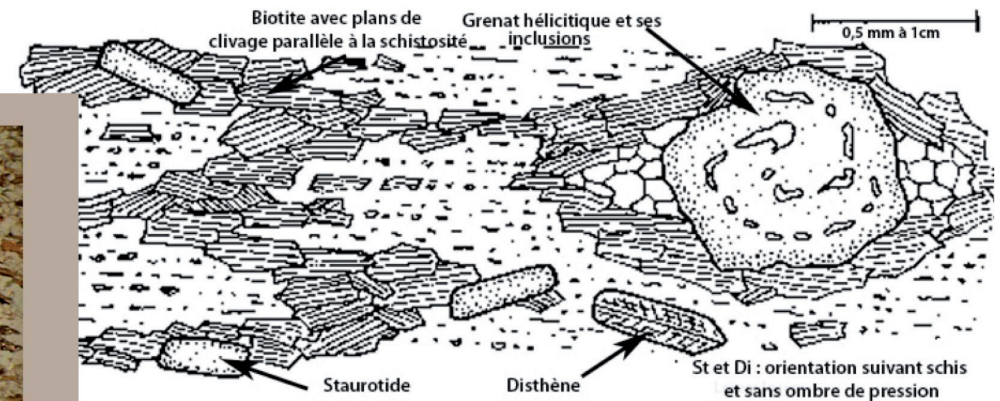
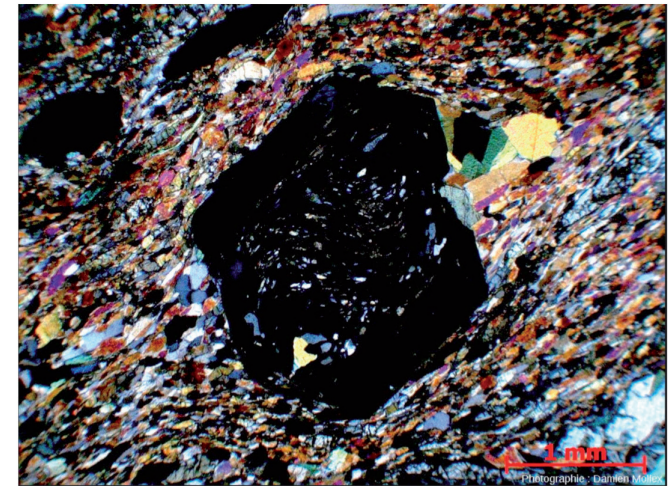
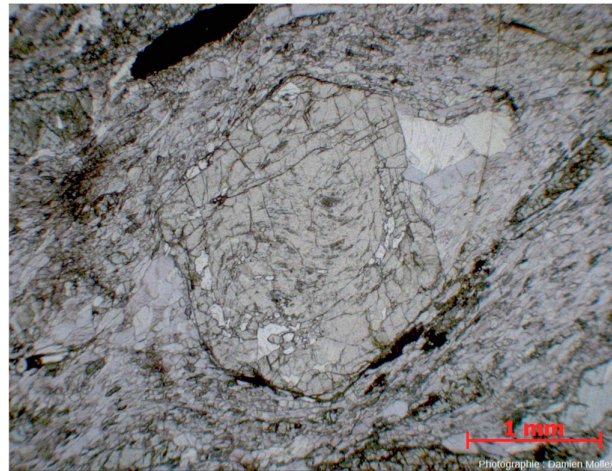
Astuce : Observer la disposition des minéraux afin de reconnaître les minéraux antécinématiques*** (ceux qui étaient là avant la déformation), les minéraux syncinématiques*** (produits par la déformation) et les minéraux postcinématiques*** (apparus après la déformation).

Figure X : Des exemples de minéraux antécinématiques



Paragenèse - cinématique

Figure : Des exemples de minéraux syncinématiques. Pour la microphotographie du grenat (LPNA à gauche, LPA à droite) : Les ombres de pression sont ici composées de micas blancs et de glaucophanes. Les inclusions hélicitiques sont constituées de quartz et de glaucophane.



Paragenèse - cinématique

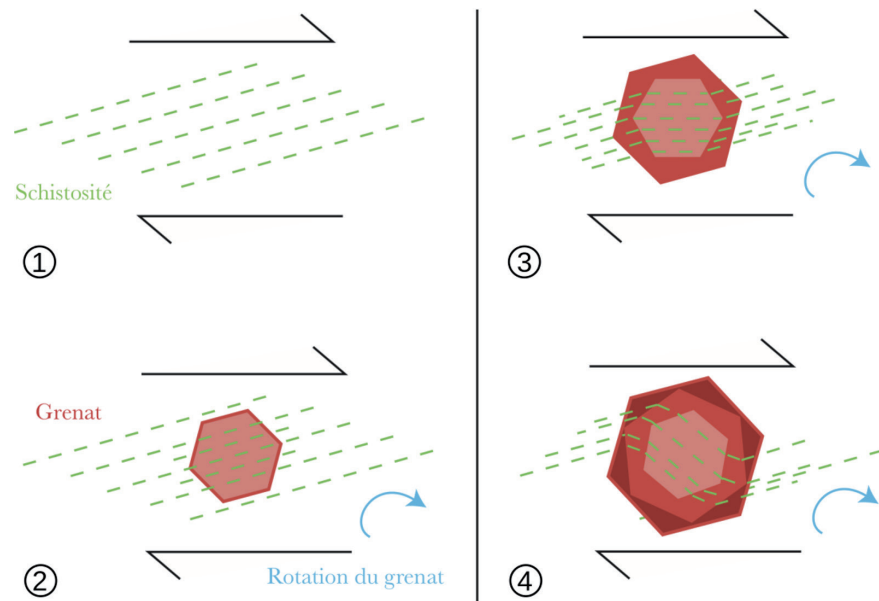
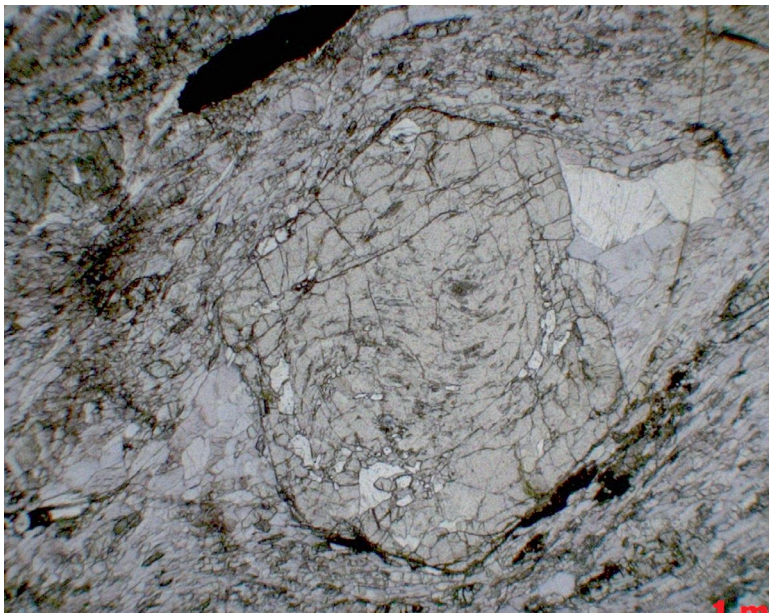
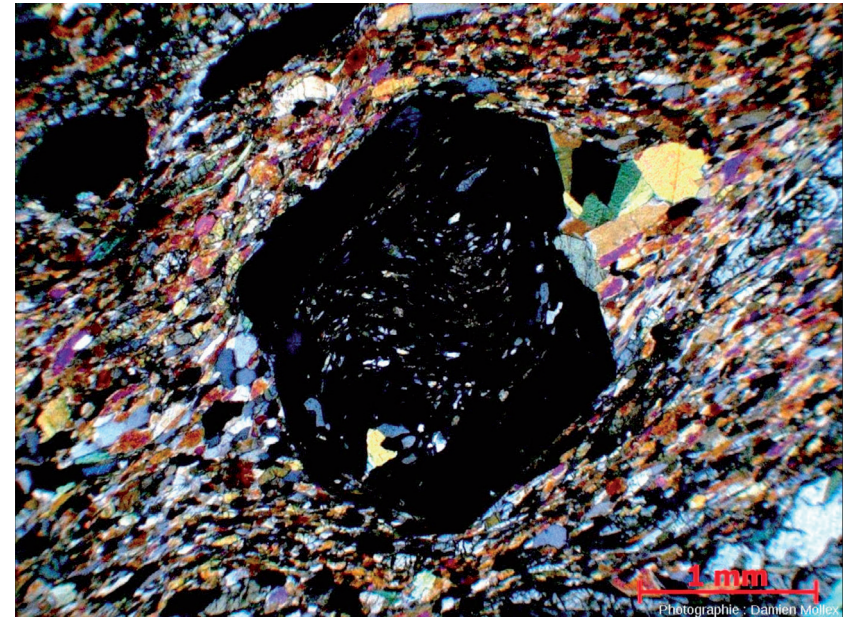


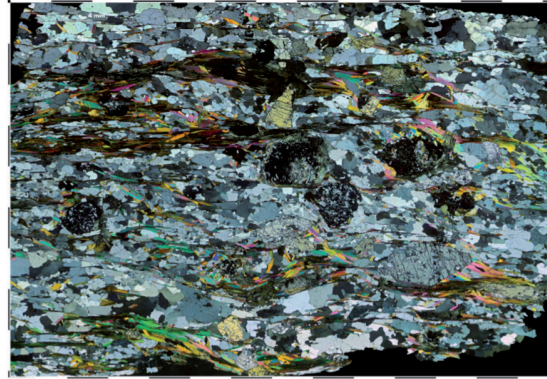
Figure : Schéma théorique de formation des inclusions hélicitiques dans les grenats syncinématiques



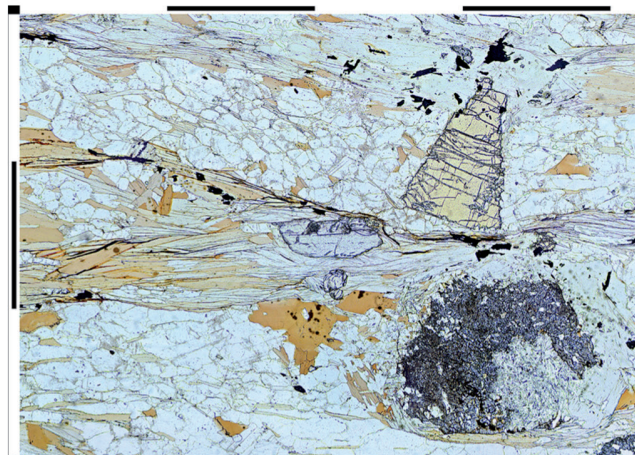
Paragenèse - cinématique

**Figure X : Micaschiste à staurotides – Origine Mont du Lézou –
Rouergue – Sud du Massif Central
Photos de F . Labaune**

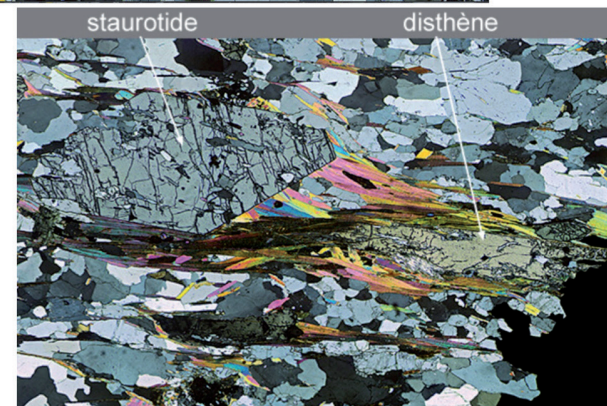
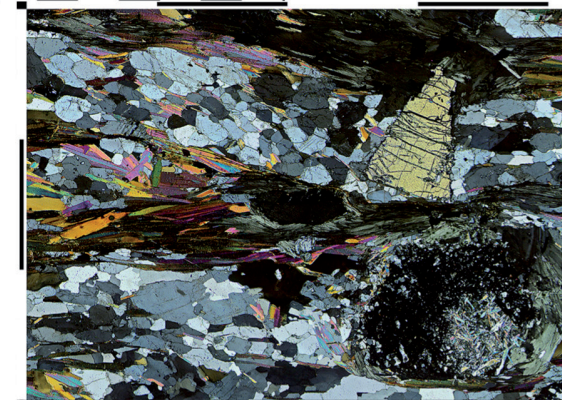
Paragenèse - cinématique

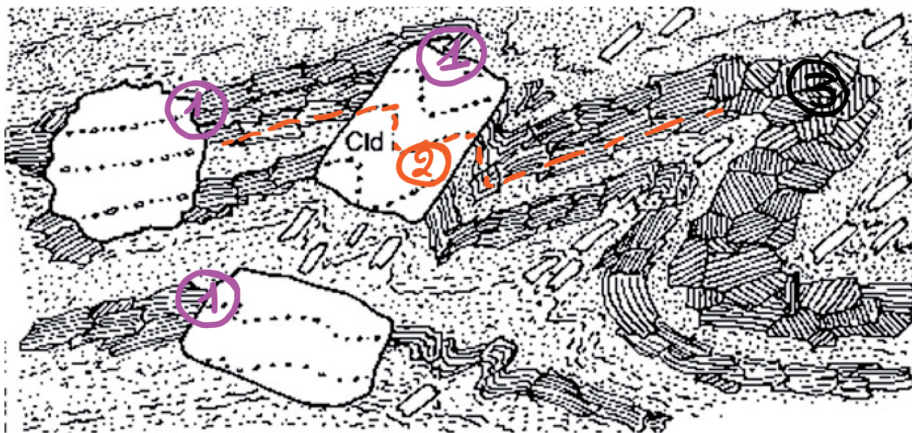


Micaschiste en LPNA
Chaque trait blanc et noir
correspond à 2 mm



Micaschiste en LPA
Chaque trait blanc et noir
correspond à 2 mm





Indice 1 : recoupement
Les nouveaux minéraux recoupent les structures antérieures

Indice 2 : les inclusions minérales dans la chlorite prolonge la schistosité externe

Indice 3 : la biotite a recristallisé de façon post dynamique dans la charnière (les plans de clivage ne sont pas parallèles au plan axial du micropli)

Figure : Les différentes relations au sein d'une paragenèse postcinématique



Paragenèse postcinématique

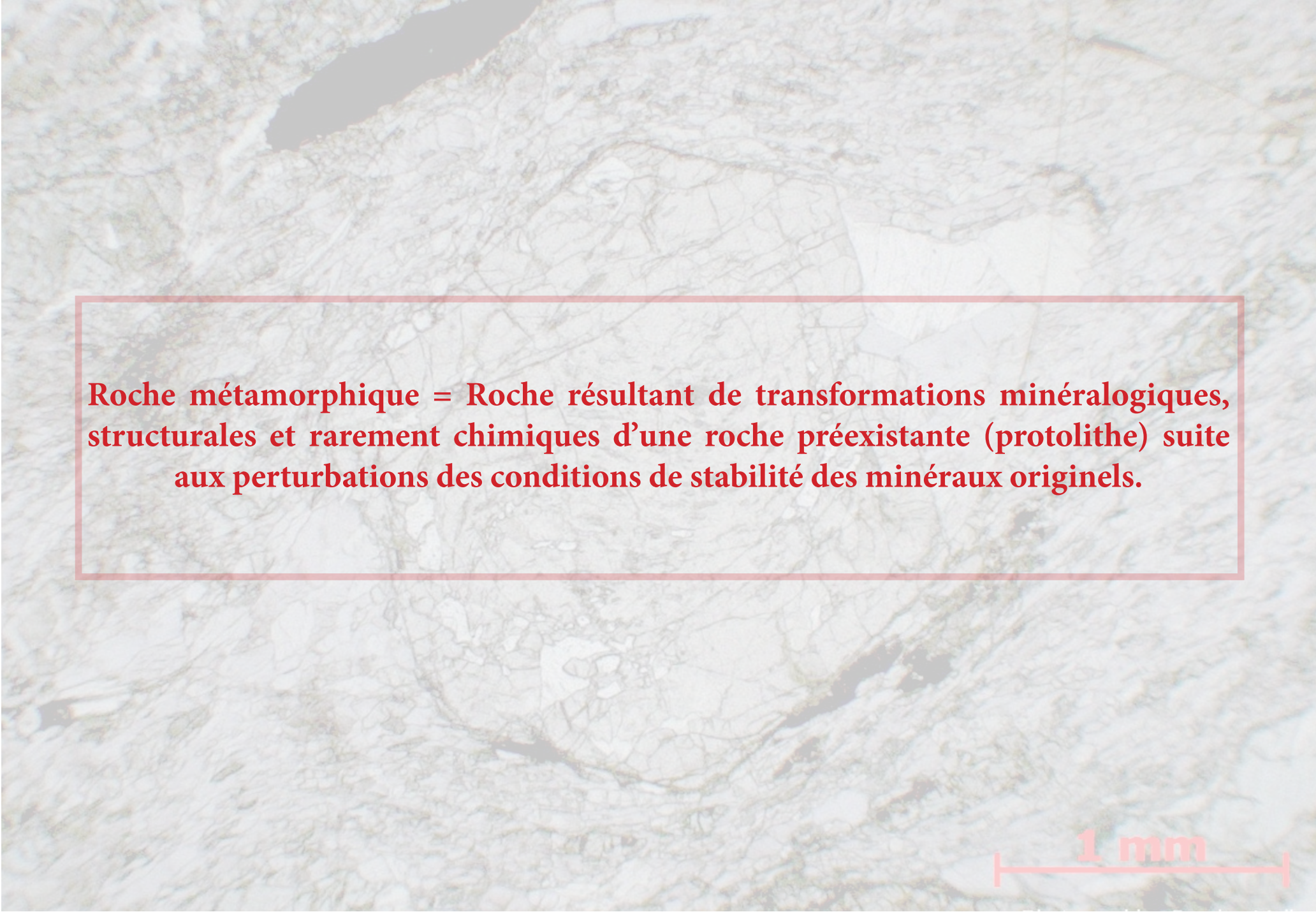
Figure : Récapitulatif des relations chronologiques déformation - recristallisation

ANTÉ-déformation	SYN-déformation	POST-déformation
glaucophanes anté-S2, actinotes syn-S2 schiste bleu	grenat hélicitique	micaschiste à chloritoïde schistosité micro-plissée incorporée lors de la croissance des porphyroblastes de chloritoïde
porphyroclastes de feldspaths, fluage du quartz (o.p. = ombre de pression) gneiss ocellé	schiste à disthène et staurotide Micas, staurotides et disthène, non déformés forment la foliation	schiste à andalousite

Tableau des relations entre croissance minérale et déformation

La croissance cristalline métamorphique intervient durant les diverses phases de la déformation. Les minéraux enregistrent ou scellent les déformations. Ils sont d'excellents marqueurs de l'évolution structurale des unités enfouies puis exhumées. gl : glaucophane, act : actinote, ph : phengite, gt : grenat, cld : chloritoïde, bio : biotite, qz : quartz, fk : feldspath potassique, st : staurotide, ky : disthène, m : muscovite, and : andalousite.

Paragenèse - cinématique



Roche métamorphique = Roche résultant de transformations minéralogiques, structurales et rarement chimiques d'une roche préexistante (protolithe) suite aux perturbations des conditions de stabilité des minéraux originels.

1 mm

**LES ROCHES METAMORPHIQUES : TEMOINS DES CONDITIONS DE
PRESSION ET DE TEMPERATURES A UN TEMPS DONNE**

1 mm

Photographie : Damien Mollex

Figure : Évolution de l'état de stabilité en fonction des conditions de P et de T°C

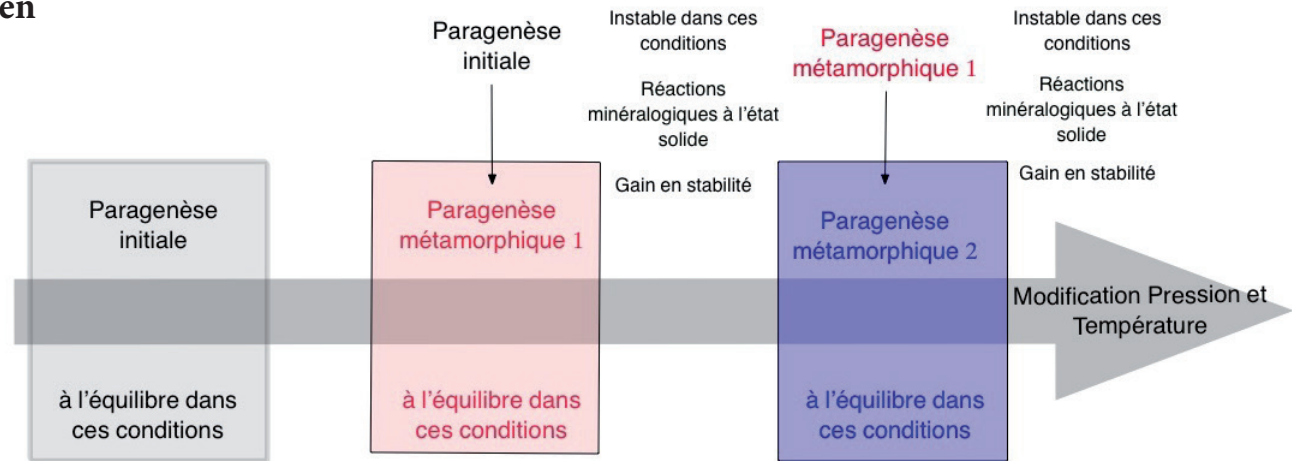


Figure : Localisation des fluides et application des P_L et P_F

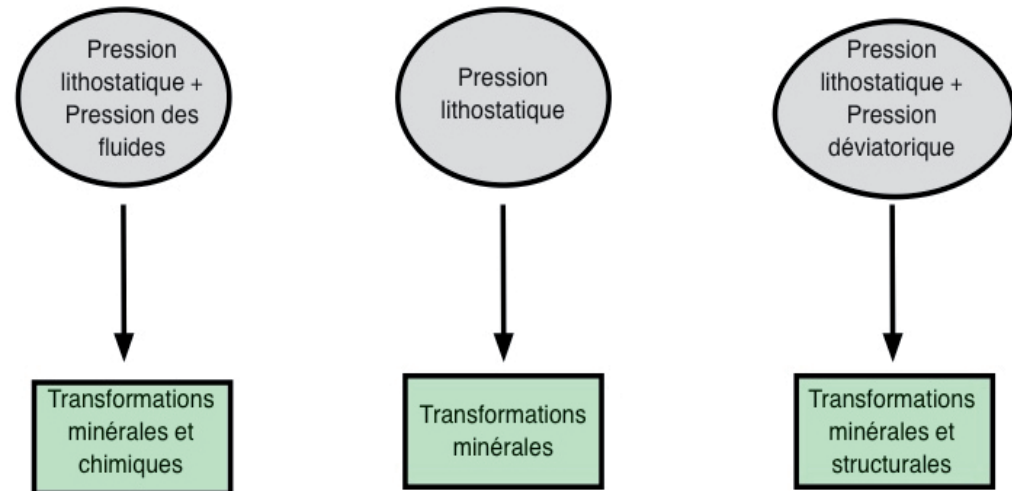
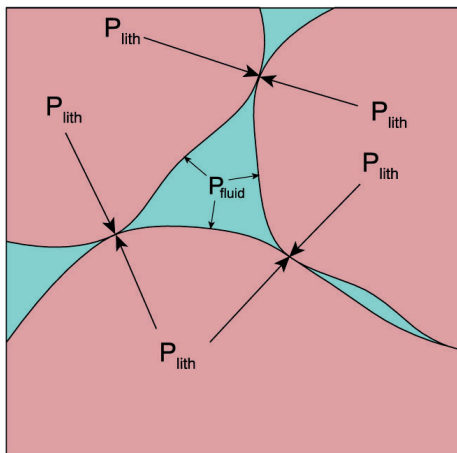
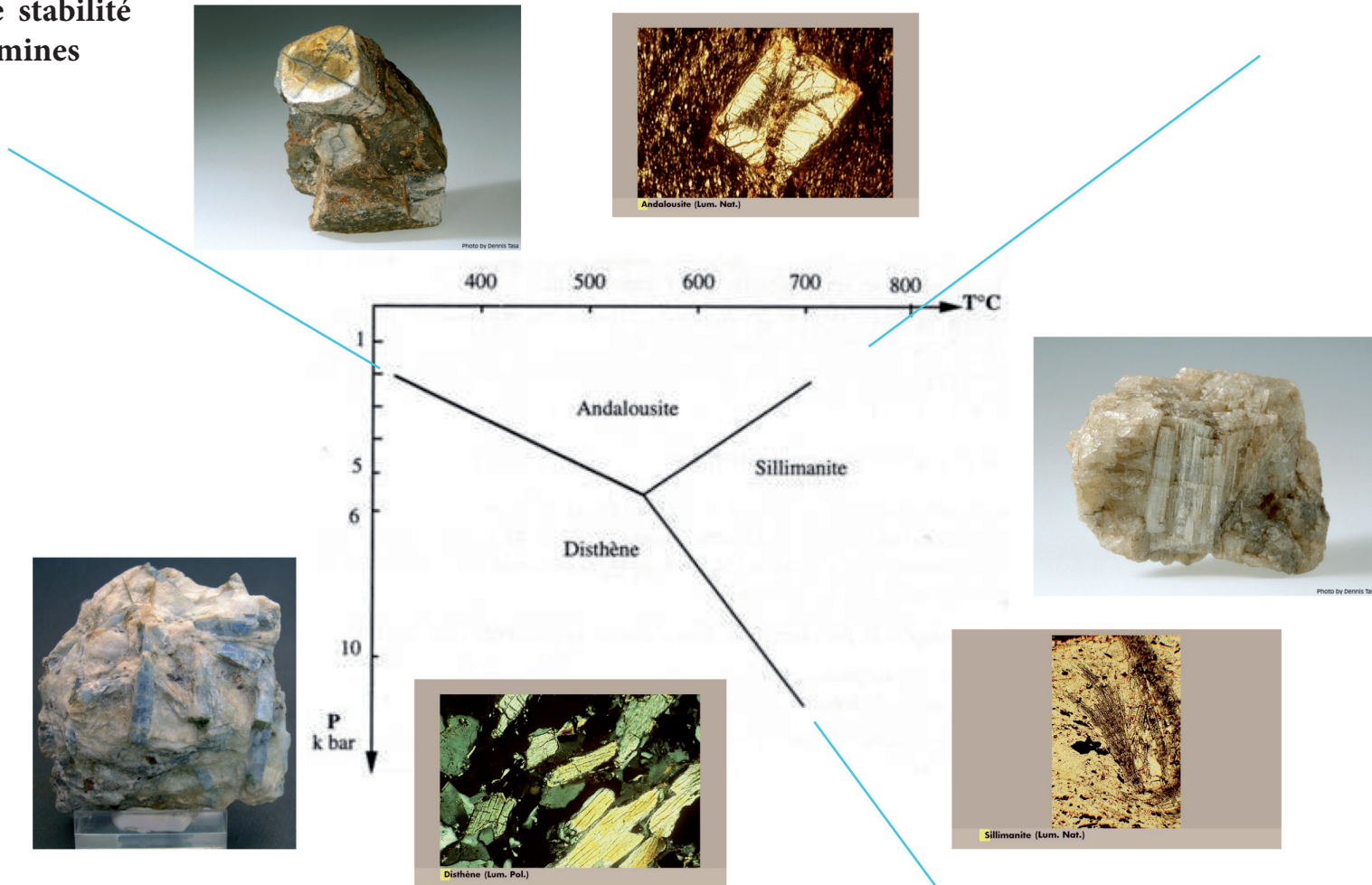


Figure : Conséquence des variations de Pression sur les transformations

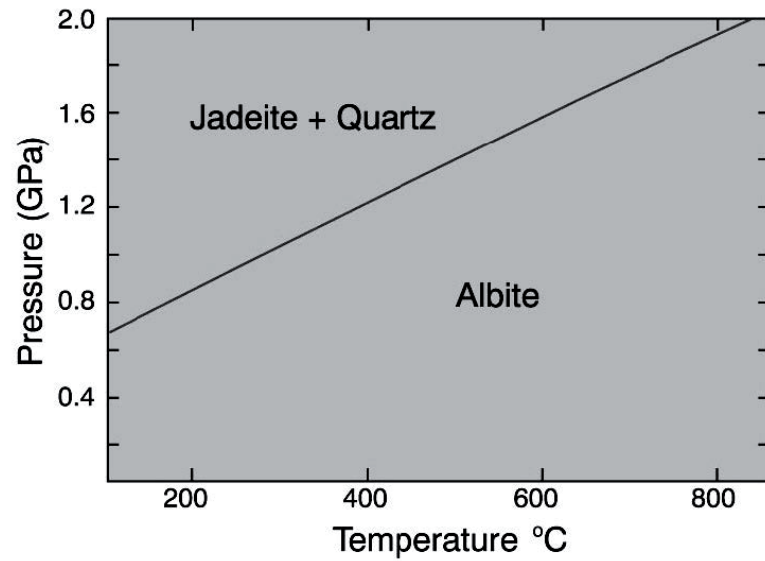
Figure : domaine de stabilité
des silicates d'alumines



Les silicates d'alumine de formule chimique Al_2SiO_5 existent sous trois formes minéralogiques différentes, ce sont des minéraux polymorphes*** :

- **l'andaloussite** cristallise dans le système orthorhombique, elle se présente en petits prismes à section carrée, couleur rose-marron, de densité $d = 3,15$;
- **la sillimanite** cristallise dans le système orthorhombique, elle se présente sous forme de fibres blanches très fines, de densité $d = 3,25$;
- **le disthène** cristallise dans le système triclinique, il se présente en prismes bleus aplatis, de densité $d = 3,6$.

Réactions minéralogiques - P et T°C



Minéral A → **Minéral B + Minéral C**

Albite → **Jadéite + Quartz**
 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \rightarrow \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2$
 isochimique



Réactions minéralogiques - P et T°C



Astuce : Il est donc important d'avoir une petite idée de la formule des principaux minéraux ou de regarder les réactions avec précisions (Cf doc annexe – formules des principaux minéraux)

Étudiez les réactions suivantes et précisez si elles sont isochimiques ou pas, sachant qu'elles correspondent à

l'équilibre Minéral A + Minéral B → Minéral C
OU Minéral A + Minéral B → Minéral C + Minéral D

Réaction 1 : Forstérite + Quartz → Enstatite
 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2 \rightarrow 2 \text{MgSiO}_3$

Réaction 2 : Enstatite + Anorthite → Diopside + silicate d'alumine
 $\text{MgSiO}_3 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{CaMgSi}_2\text{O}_6 + \text{Al}_2\text{SiO}_5$

Réaction 3 : Enstatite + Anorthite → Grenat + Quartz
 $\text{MgSiO}_3 + \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{CaMg}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{SiO}_2$

Réactions entre plusieurs minéraux (avec apport et/ou production de fluide) répondent aux équilibres de type :

Minéral A + Minéral B + H_2O → Minéral C + Minéral D + CO_2

Minéral A → Minéral B + Minéral C + Minéral D + H_2O

Minéral A + Minéral B → Minéral C + CO_2

Par exemple :

Calcite + Quartz → Wollastonite + CO_2

$\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$



Biotite et Grenat sont des minéraux Ferro-Magnésiens dont la composition oscille entre un pôle Fe et un pôle Mg. Au cours de cette réaction, lorsque biotite et grenat coexistent, ils échangent les 2 éléments Fe et Mg selon les 2 réactions suivantes :



La réaction (2) se fait à basse température, la réaction (3) se fait à température élevée de sorte que la réaction globale (1) se fait sur un intervalle de 250°, entre 650 et 900° C.

Ainsi le couple Fe-Mg se présente en proportions variées dans la biotite et le grenat selon un équilibre chimique dont la position dépend fortement de la température.



Dans les roches métamorphiques à 2 micas, feldspath potassique, et quartz, le mica blanc que l'on y rencontre n'est pas de la muscovite au sens strict, il correspond le plus souvent à une solution solide évoluant entre le pôle muscovite et le pôle phengite :

- muscovite : $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})(\text{OH})_2$
- phengite : $\text{KAl}_{(2-x)}\text{Si}_{(3+x)}\text{Al}_{(1-x)}(\text{Mg, Fe})_x\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \quad 0 < x < 1$

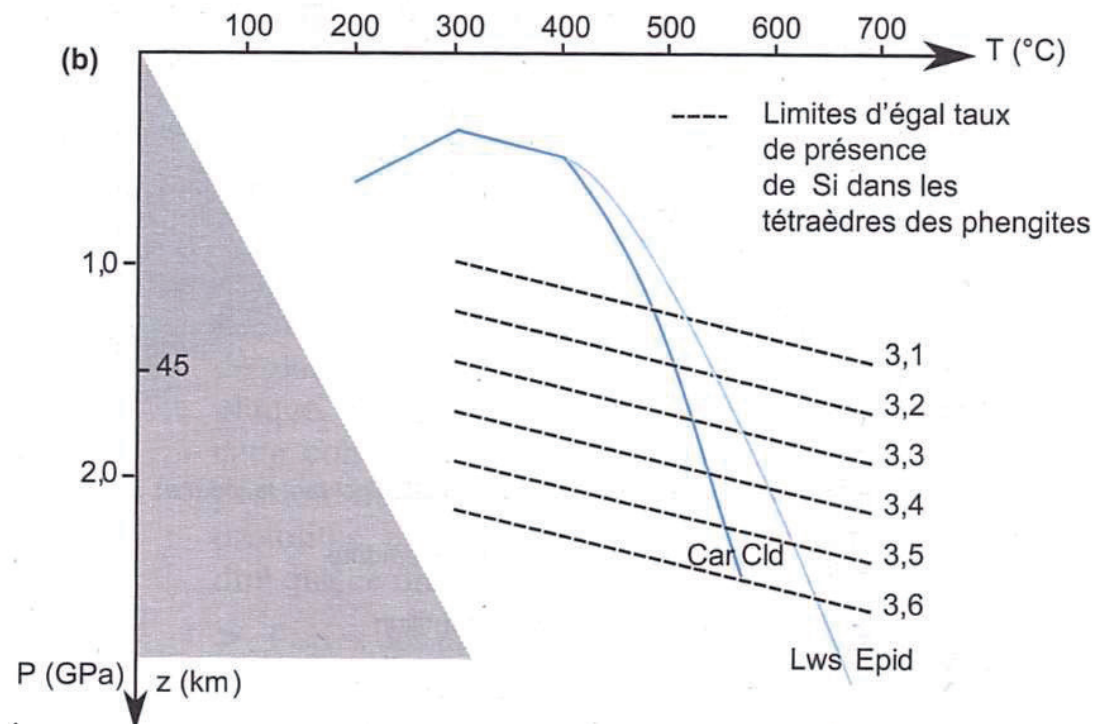
La transition muscovite-phengite correspond à une substitution de :

- **Al par Si** dans les tétraèdres ;
- **Al par Fe-Mg** dans les octaèdres.

La différence de rayon ionique entre Al ($R_i = 0,49 \text{ \AA}$) et Si ($R_i = 0,40 \text{ \AA}$) est telle que **la transformation de la muscovite en phengite correspond à une forte diminution de volume, en conséquence de quoi elle est très sensible à l'augmentation de pression.**

Figure : La phengite, un minéral baromètre

Analyse à la microsonde de la teneur en Si : La lame mince est métallisée au carbone puis un faisceau incident très fin d'électrons entre en contact avec l'échantillon. Les électrons de la matière sont alors excités et émettent un rayonnement X primaire. Ce rayonnement est ensuite analysé par des spectromètres qui explorent chacun, une gamme de longueurs d'ondes précises et permettent de quantifier la teneur en Si.



Réactions minéralogiques - P et T°C

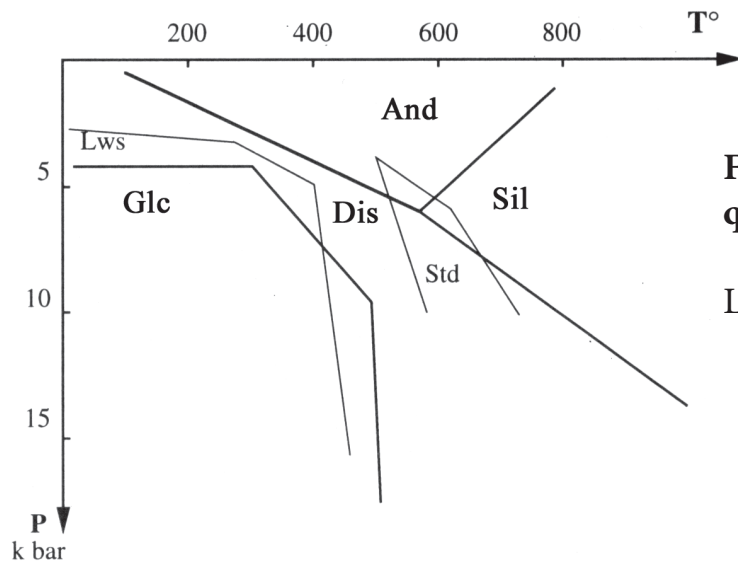


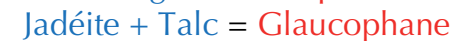
Figure : Domaines de stabilité de quelques barogéothermomètres

Lws : lawsonite, Std : staurotide

Sous forte pression, à basses températures et en milieu anhydre, **l'albite** entre dans des réactions de recombinaison ou de dissociations caractéristiques.

- **Basses températures :**

- Au cours du **métamorphisme prograde**, lorsque la pression augmente et dépasse 4 kbars, tandis que la **température reste inférieure à 400°C** environ, deux minéraux bleus, jadéite (clinopyroxène) ou glaucophane (amphibole), apparaissent aux dépens de l'albite :

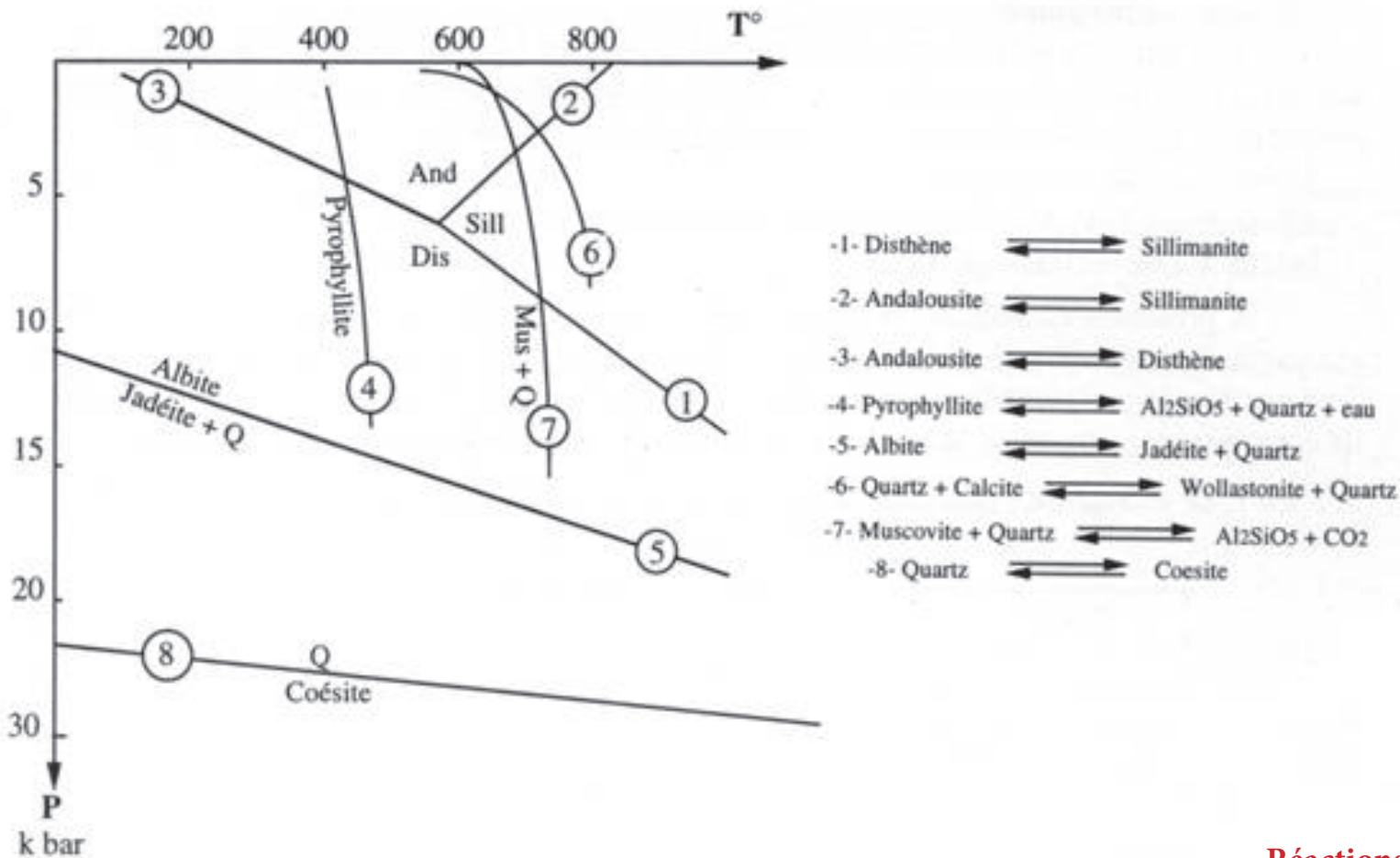


- À pressions élevées, **si la température augmente au-delà de 400°C**, la jadéite et le glaucophane sont déstabilisés. Ces deux minéraux, jadéite et glaucophane caractérisent le domaine **hautes pressions-basses températures**, ils sont souvent accompagnés par la lawsonite, ils apparaissent au cours de la subduction, ils sont déstabilisés ensuite par une collision.

- **Hautes températures :**

- Au-delà de 500° C, entre 2,5 et 4,5 kbars :
cordiérite = grenat + Sillimanite + quartz
- Au-delà de 650° C, entre 5 et 8 kbars :
olivine + plagioclases = orthopyroxènes + clinopyroxènes + spinelle
- Au-delà de 700° C, entre 8 et 11 kbars :
orthopyroxènes + plagioclases = grenat + clinopyroxènes + quartz

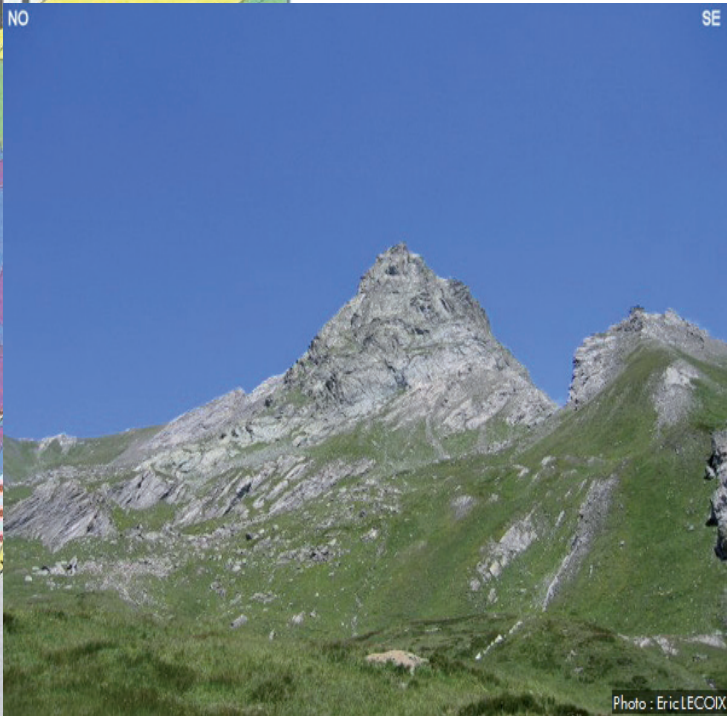
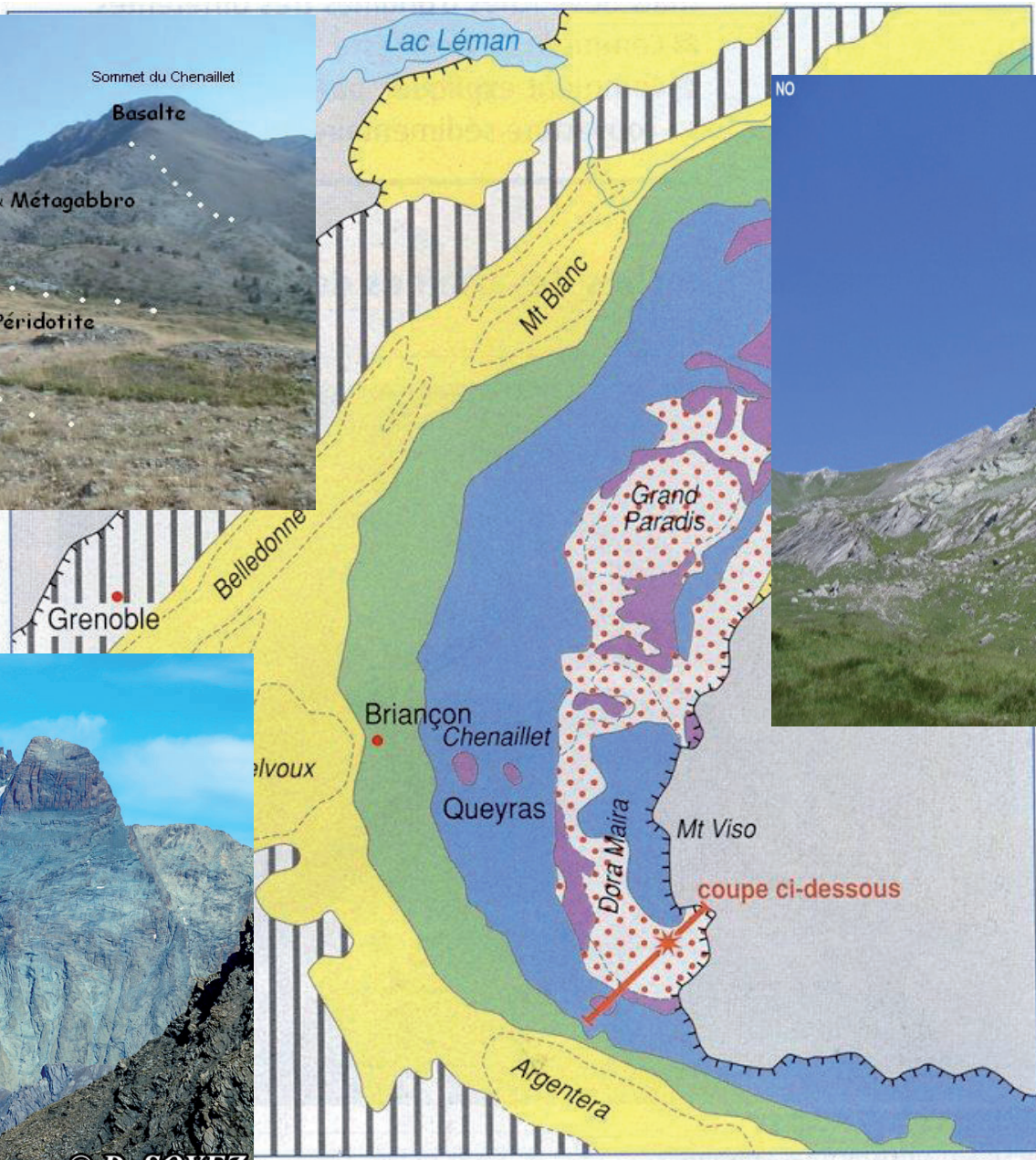
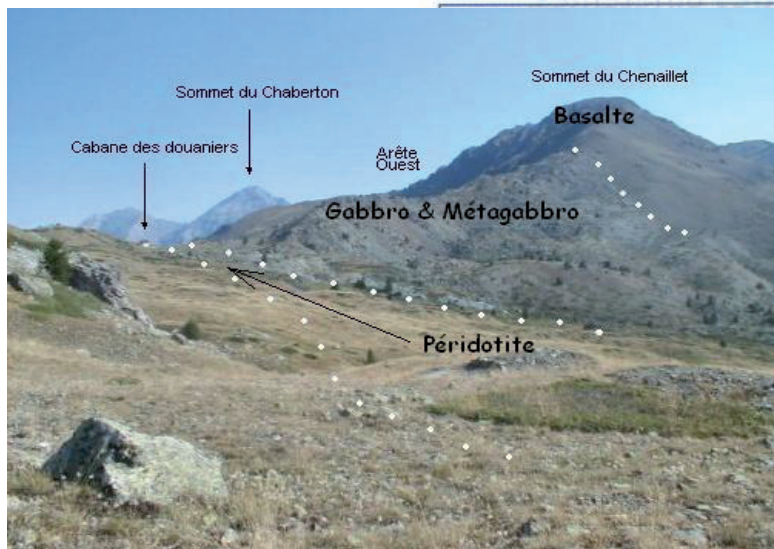
Figure : Grille pétrogénétique.
Tous ces équilibres dépendent à la fois de la P et de la T°C.
Les équilibres 4, 6 et 7 sont plus sensibles à la T°C alors que les 5 et 8 le sont plus à la pression



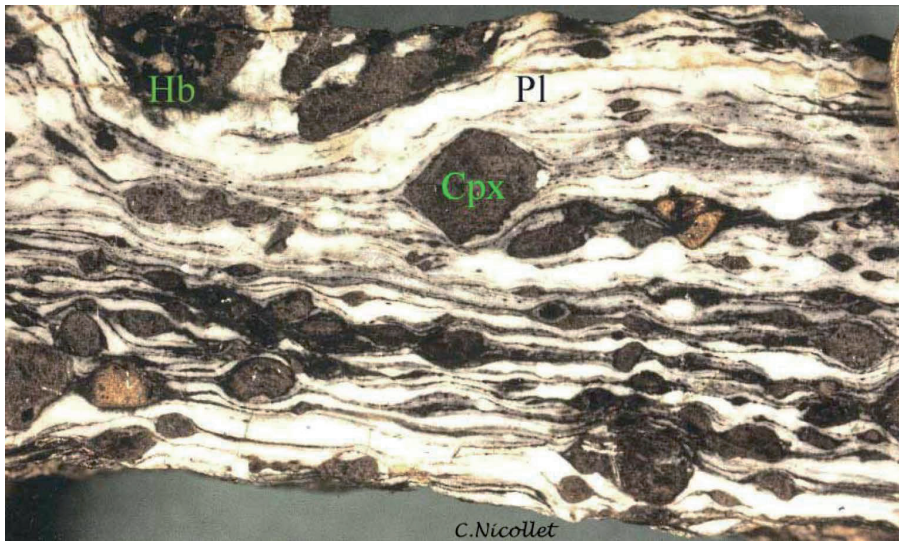
Réactions minéralogiques - P et T°C



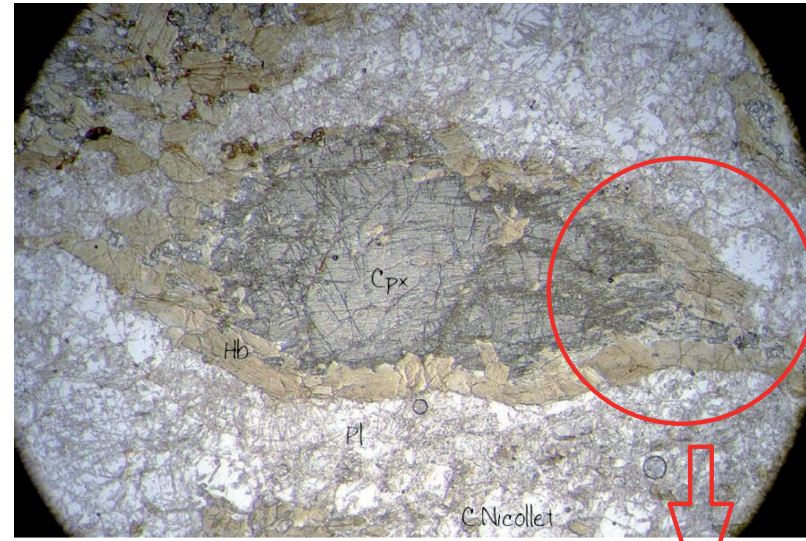
Réactions minéralogiques - P et T°C



Section de Gabbro déformé



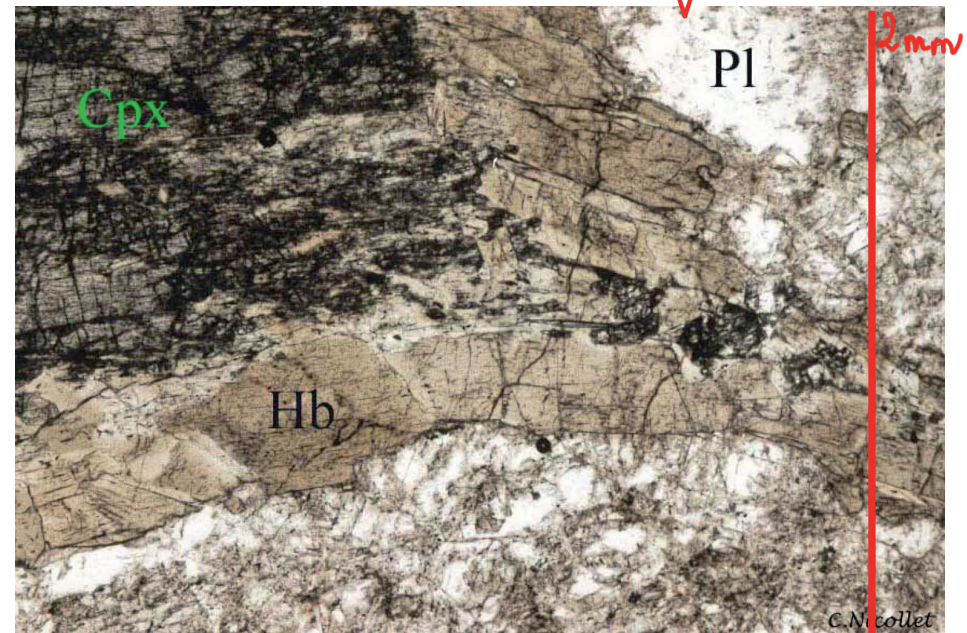
En lame mince - LP



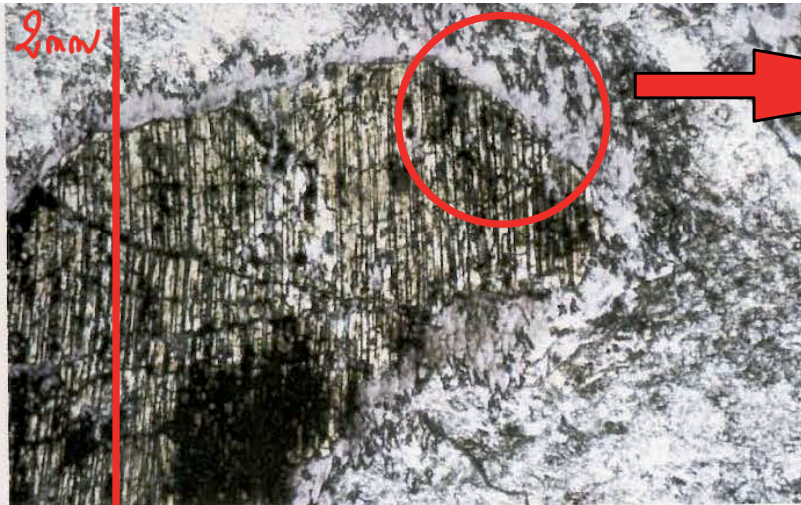
Paragenèse :

Relations physiques entre minéraux :

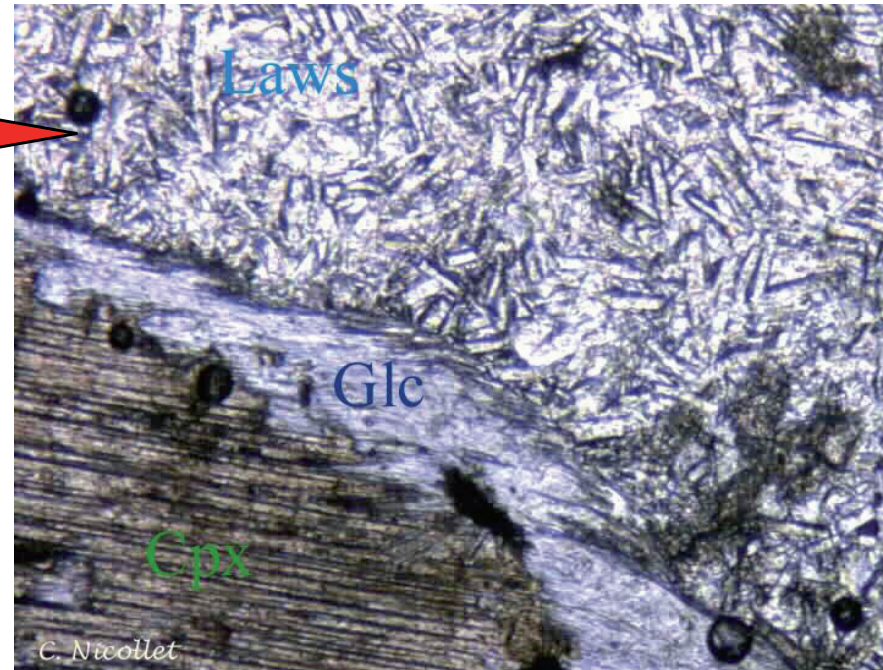
Relations cristallisation - déformation :



Métagabbro - Lame Mince - LP



Métagabbro - Lame mince - LP

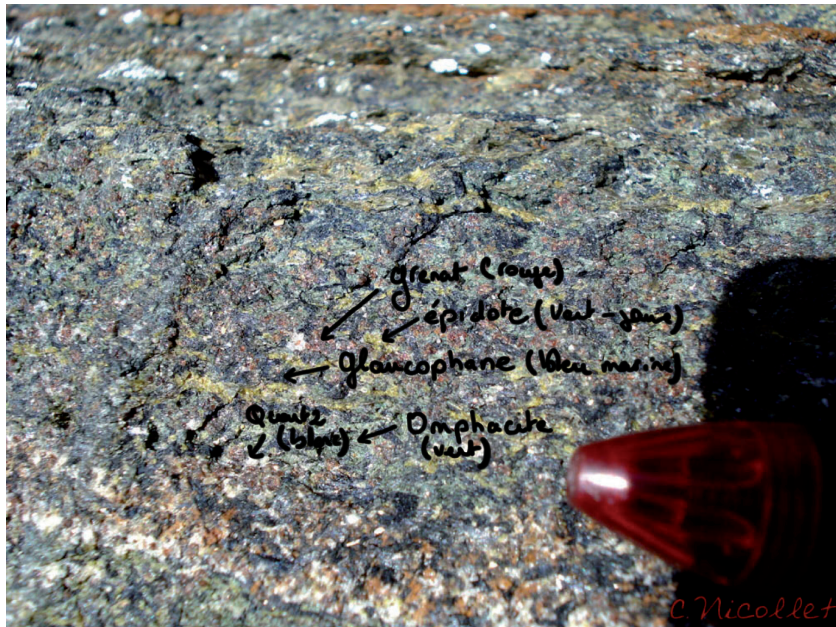


Paragenèse :

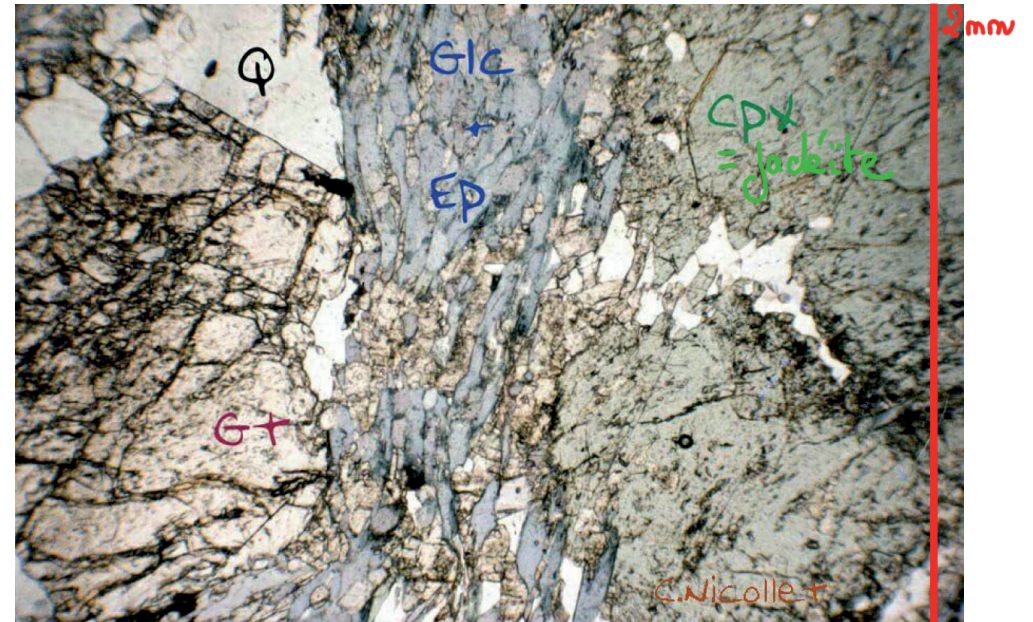
Relations physiques entre minéraux :

Relations cristallisation -

échantillon



En lame mince - LP



Paragenèse :

Relations physiques entre minéraux :

Relations cristallisation - déformation :

échantillon



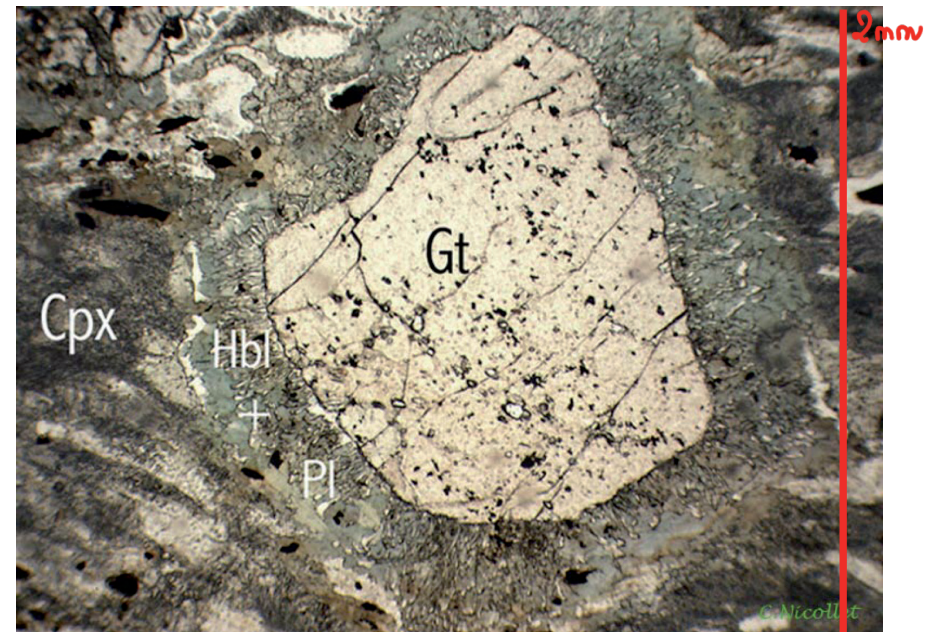
Zo = Zoisite = Epidote

Paragenèse :

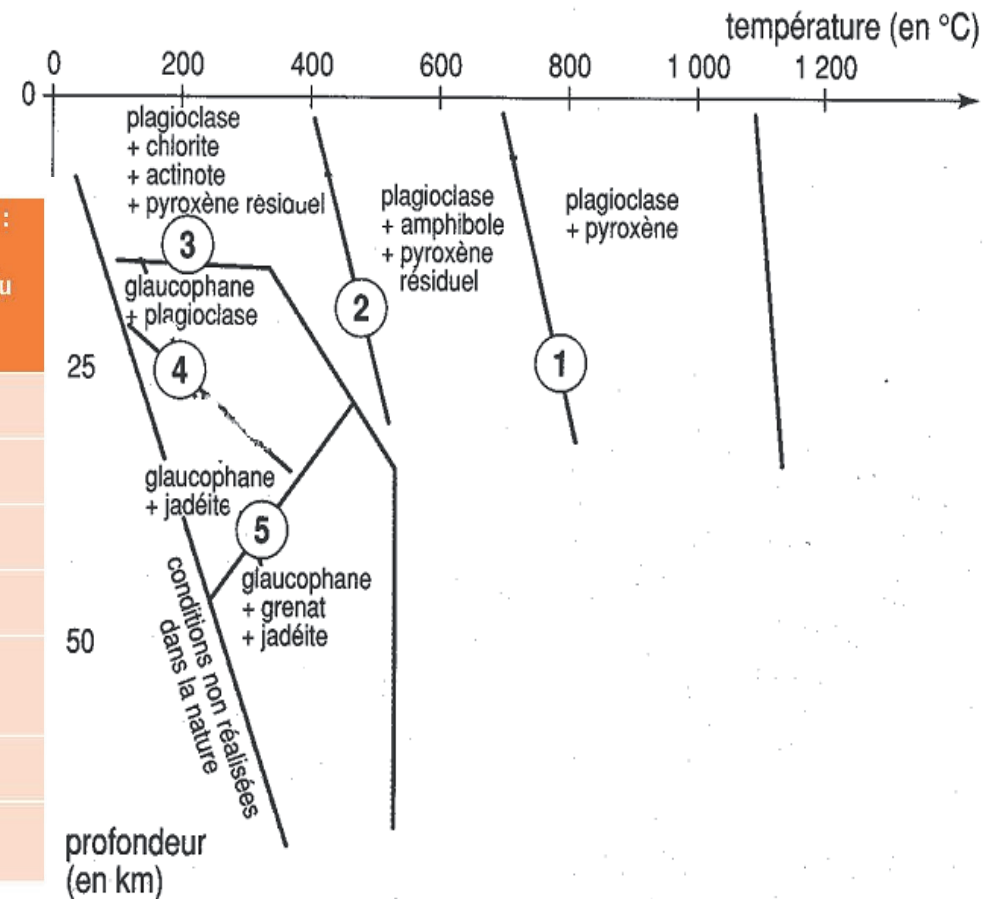
Relations physiques entre minéraux :

Relations cristallisation - déformation :

Lame mince - LP

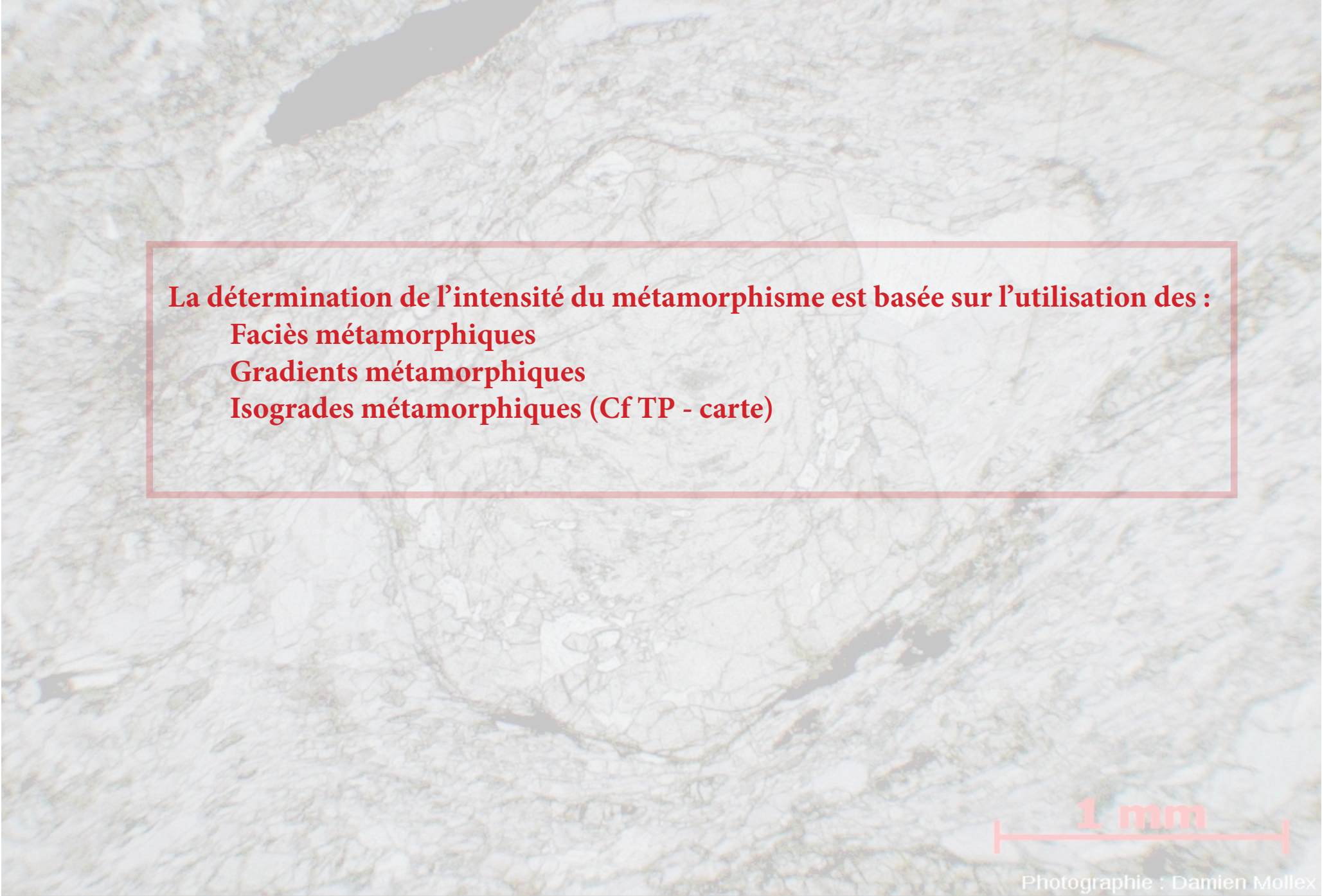


	Échantillon 2 : Chenaillet	Échantillon 3 : Queyras	Échantillon 4 : Sur la route du Mont Viso	Échantillon 5 : Sur la route du Mont Viso
Clinopyroxène				
Plagioclase				
Hornblende				
Glaucophane				
Lawsaunite ou jadéite				
Grenat				
Quartz				



Quelques réactions du métamorphisme

1. Plagioclase + Pyroxène + eau → Amphibole Hornblende verte
2. Plagioclase + Hornblende + eau → Chlorite + Actinote
3. Albite + Chlorite + Actinote → Amphibole Glaucophane + eau
4. Albite → Pyroxène Jadéite + Quartz
5. Albite + Glaucophane → Grenat Pyrope + Pyroxène Jadéite + eau

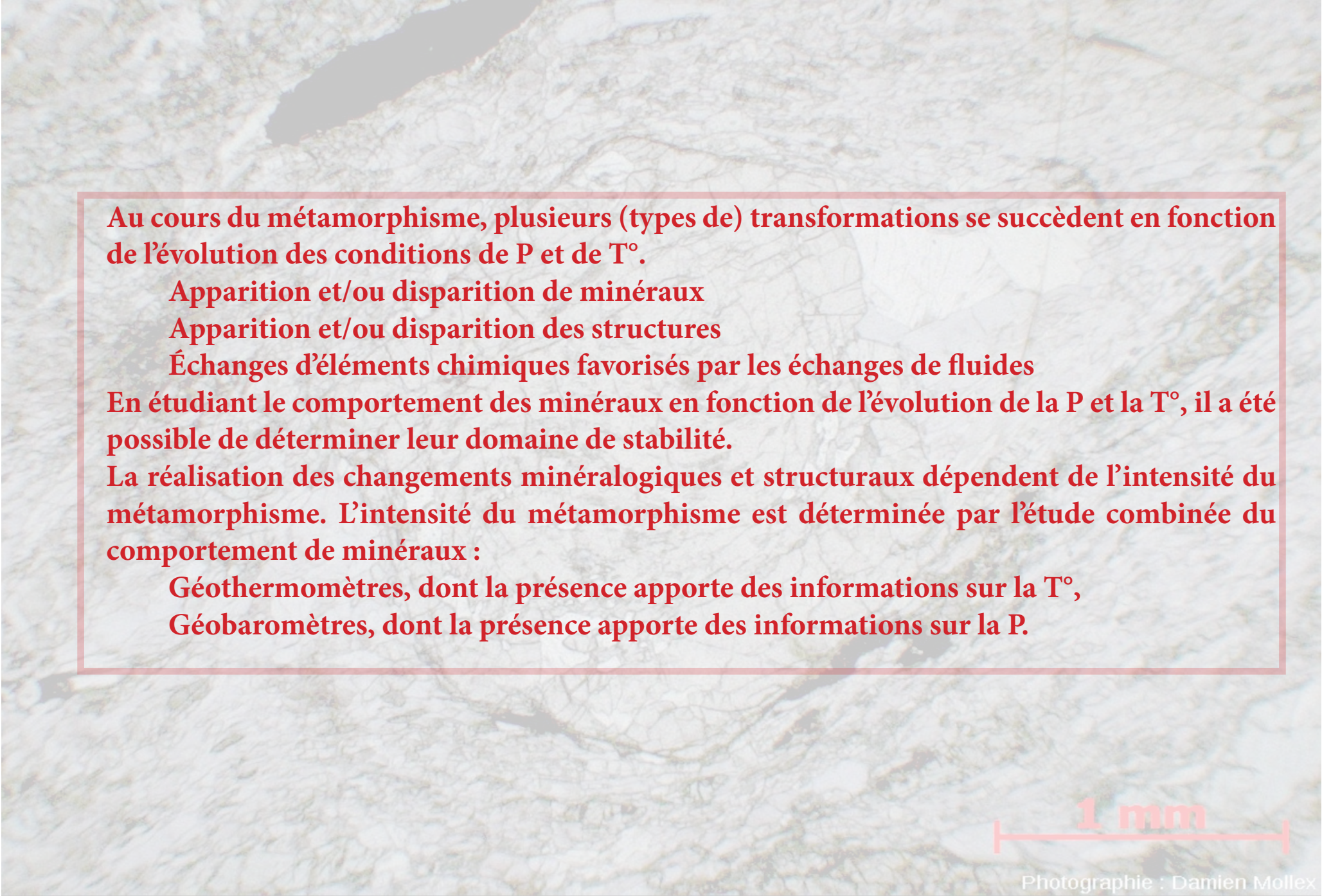


La détermination de l'intensité du métamorphisme est basée sur l'utilisation des :

- Faciès métamorphiques**
- Gradients métamorphiques**
- Isogrades métamorphiques (Cf TP - carte)**

1 mm

Photographie : Damien Mollex



Au cours du métamorphisme, plusieurs (types de) transformations se succèdent en fonction de l'évolution des conditions de P et de T°.

Apparition et/ou disparition de minéraux

Apparition et/ou disparition des structures

Échanges d'éléments chimiques favorisés par les échanges de fluides

En étudiant le comportement des minéraux en fonction de l'évolution de la P et la T°, il a été possible de déterminer leur domaine de stabilité.

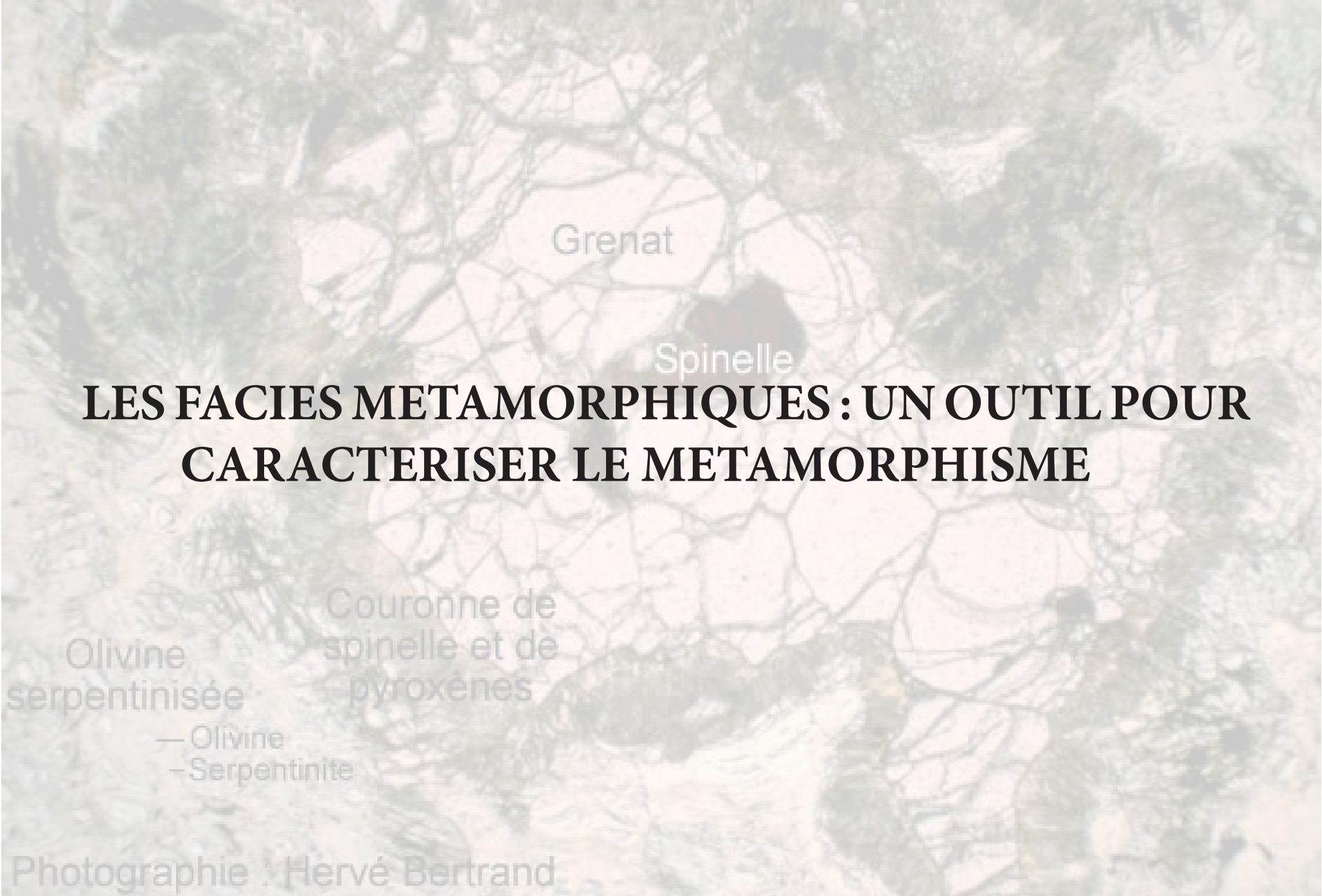
La réalisation des changements minéralogiques et structuraux dépendent de l'intensité du métamorphisme. L'intensité du métamorphisme est déterminée par l'étude combinée du comportement de minéraux :

Géothermomètres, dont la présence apporte des informations sur la T°,

Géobaromètres, dont la présence apporte des informations sur la P.

1 mm

Photographie : Damien Mollex



Grenat

Spinelle

LES FACIES METAMORPHIQUES : UN OUTIL POUR CARACTERISER LE METAMORPHISME

Olivine
serpentinisée

— Olivine
— Serpentinite

Couronne de
spinelle et de
pyroxènes

Photographie : Hervé Bertrand

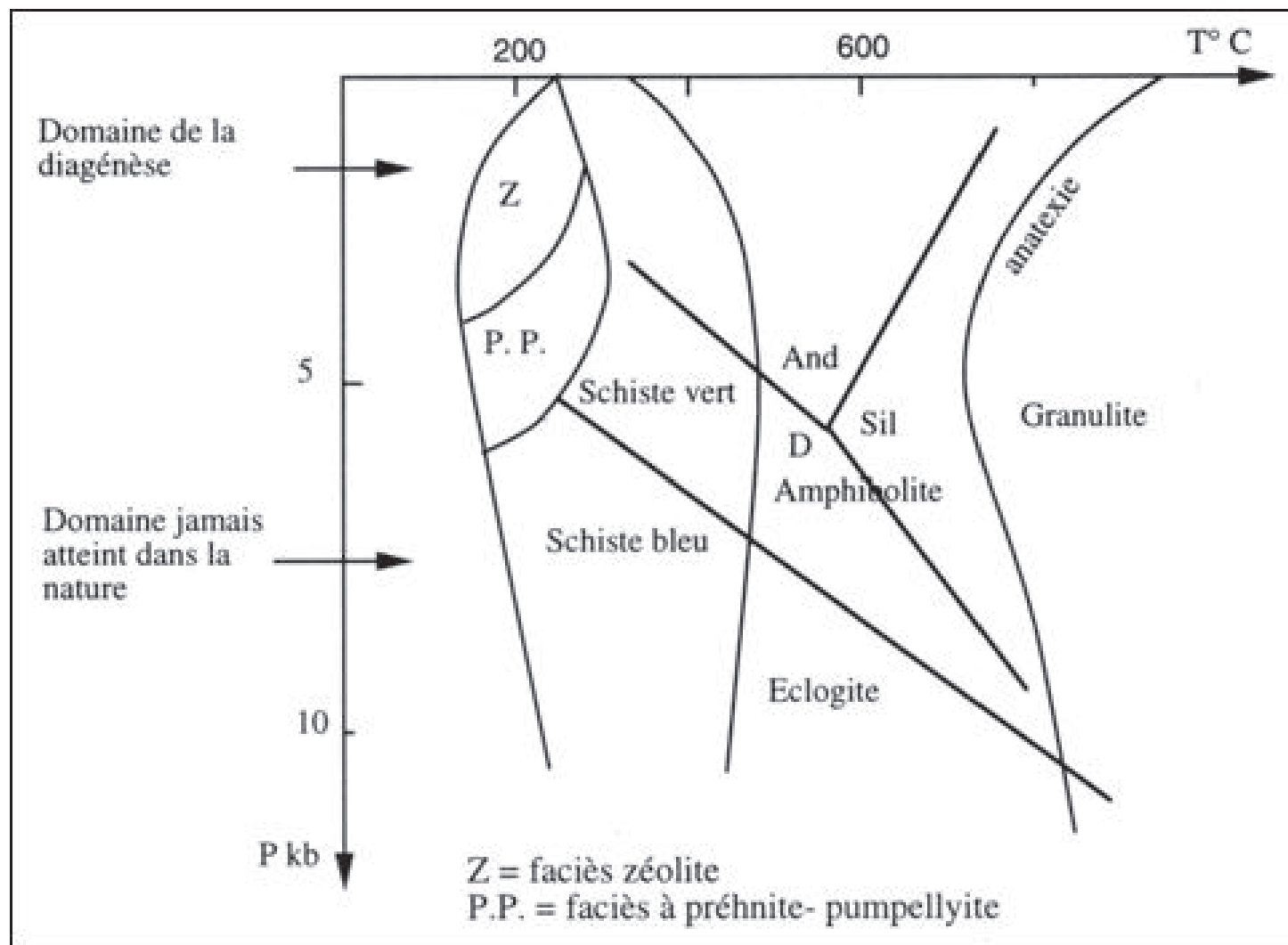


Figure : les faciès métamorphiques - Répartition des faciès métamorphiques dans le diagramme P,T (1974, ERNST)

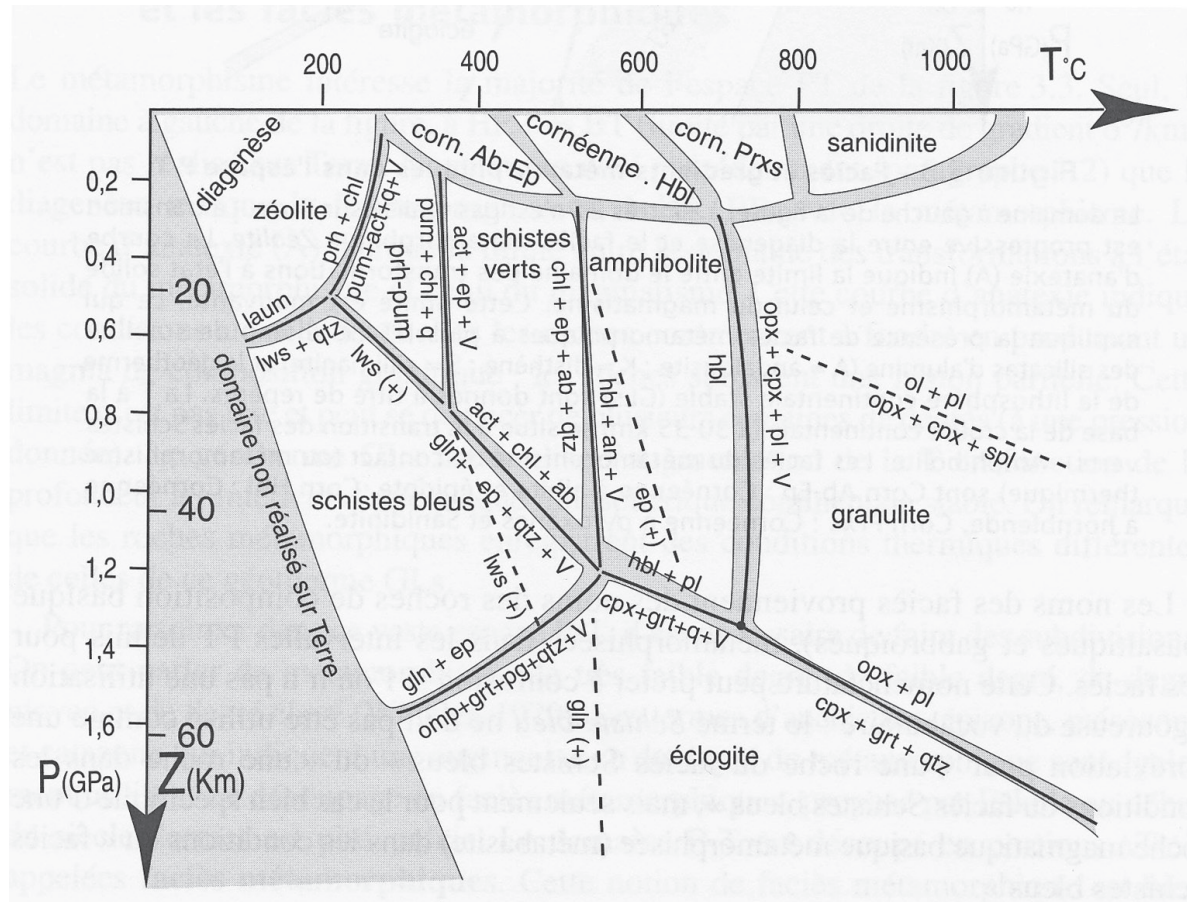


Figure : Faciès métamorphiques et réactions minéralogiques

Schistes verts ==> Amphibolites

Albite (-) Actinote (-)

Hornblende (+) Oligoclase (An) (+)

Faciès métamorphiques

L'importance de l'héritage chimique

➔ Toute réaction métamorphique ne peut avoir lieu que si les réactifs sont disponibles. Ainsi la séquence des réactions est spécifique de chaque protolithe.

=> Si la présence d'un minéral index est significative, son absence ne l'est pas

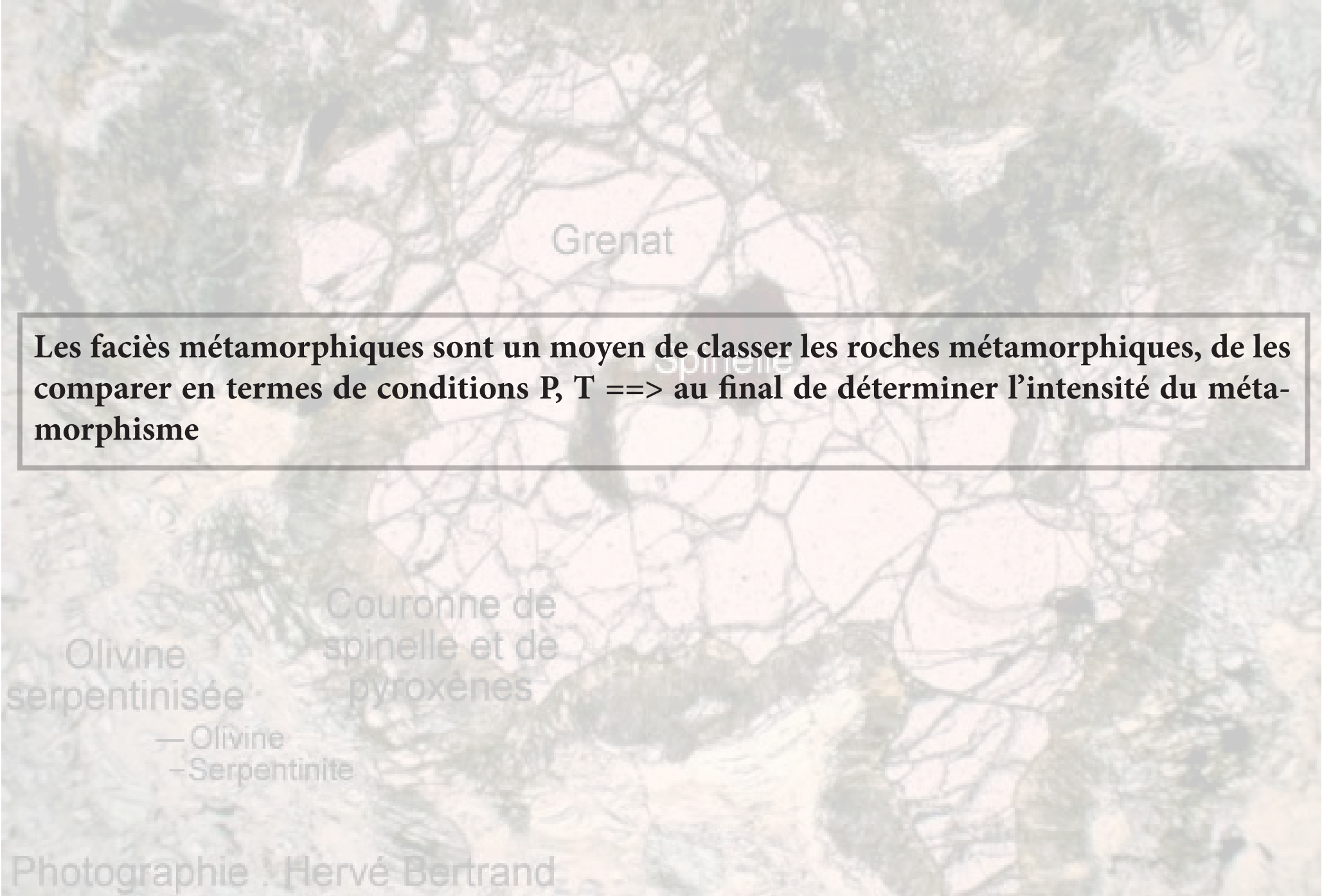
➔ Un même minéral peut être issu de réactions différentes se réalisant à des conditions de P, T différentes

=> Ce n'est pas le minéral en lui-même mais la paragenèse à laquelle il appartient ainsi que la réaction ayant eu lieu pour mener à cette paragenèse qui permettent de déterminer le domaine de stabilité en pression et température, c'est-à-dire le faciès !!



Protolithes différents, réactions minéralogiques différentes, paragenèses différentes, Faciès différents

Faciès métamorphiques



Grenat

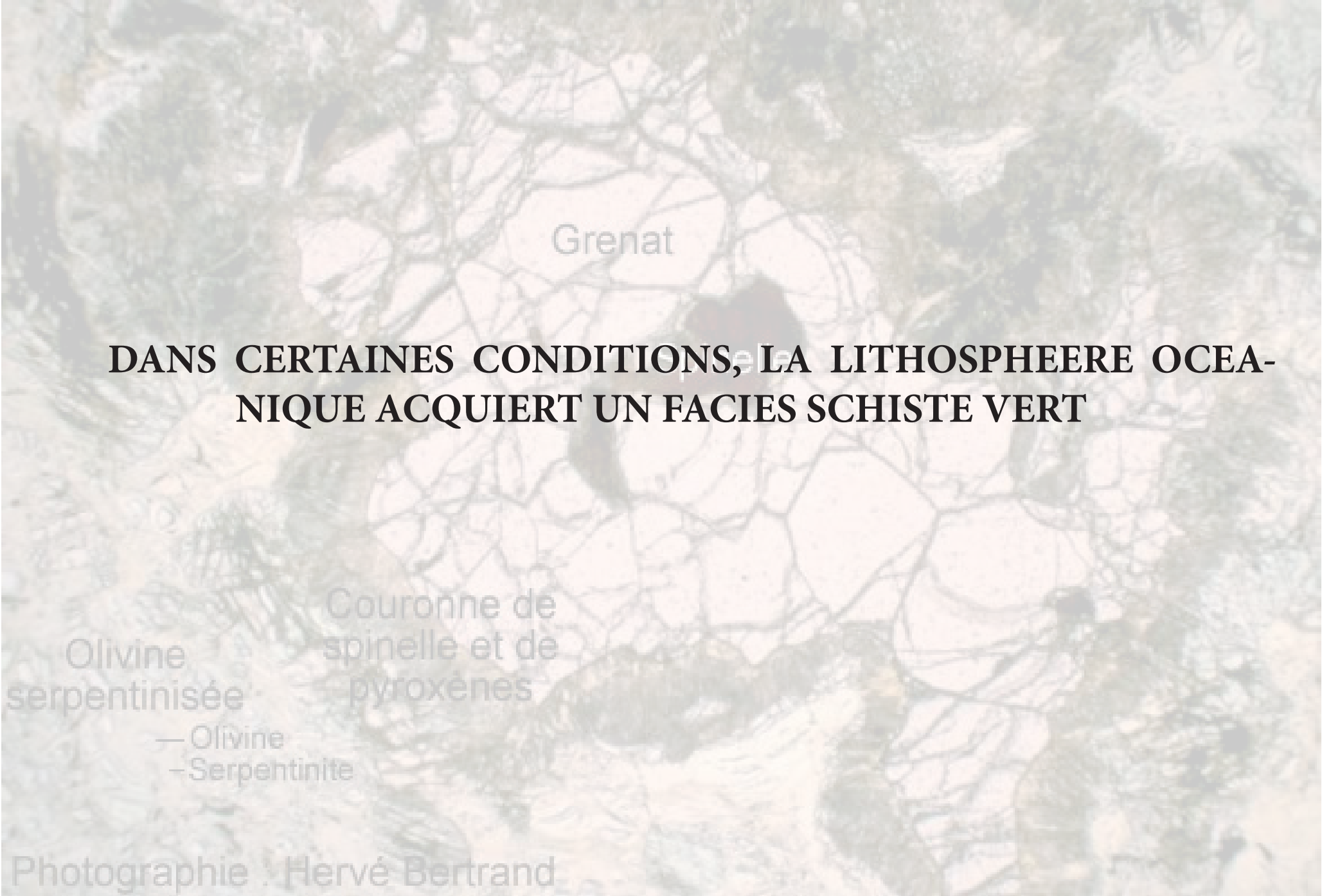
Les faciès métamorphiques sont un moyen de classer les roches métamorphiques, de les comparer en termes de conditions P, T ==> au final de déterminer l'intensité du métamorphisme

Olivine
serpentinisée

— Olivine
— Serpentine

Couronne de
spinelle et de
pyroxènes

Photographie : Hervé Bertrand



Grenat

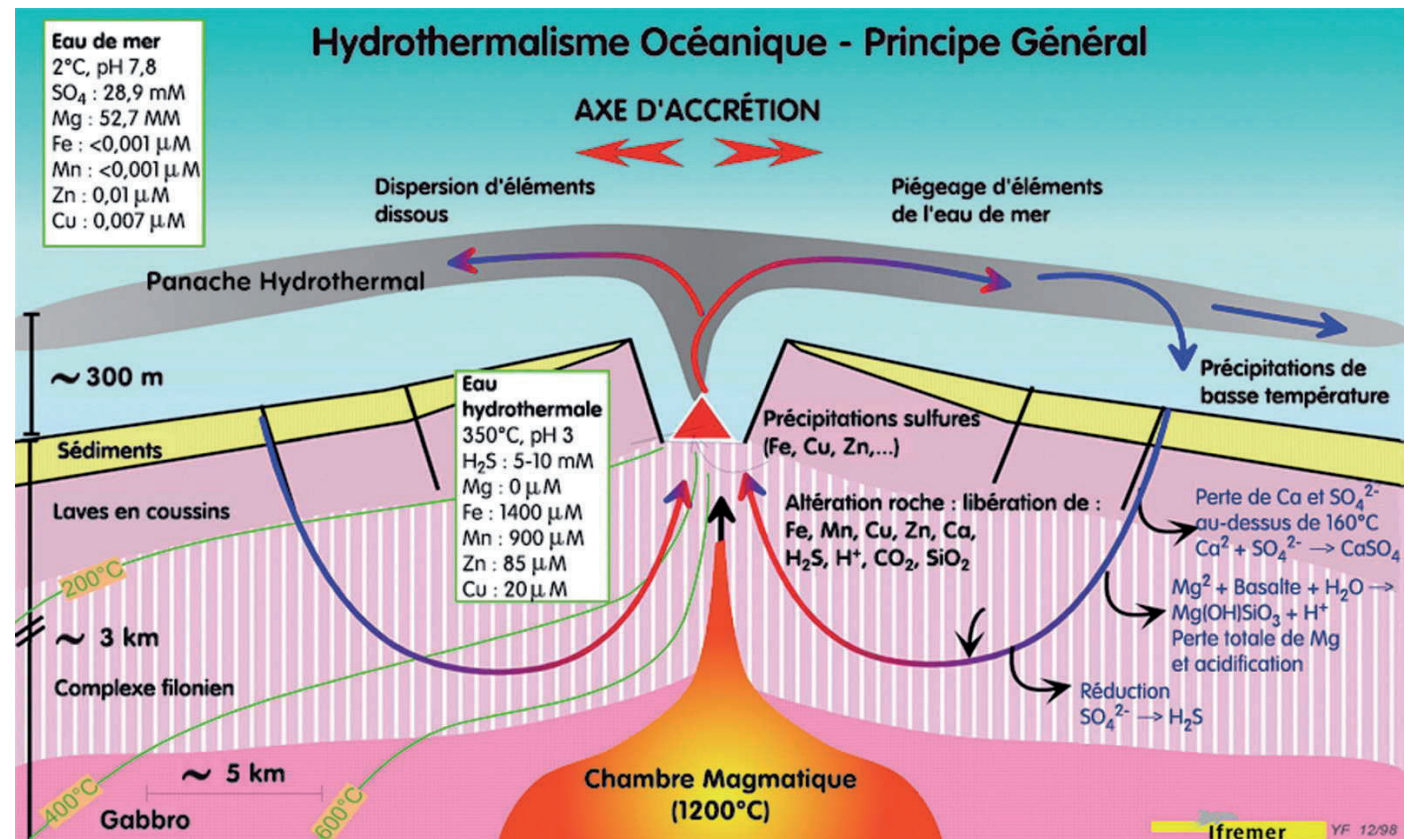
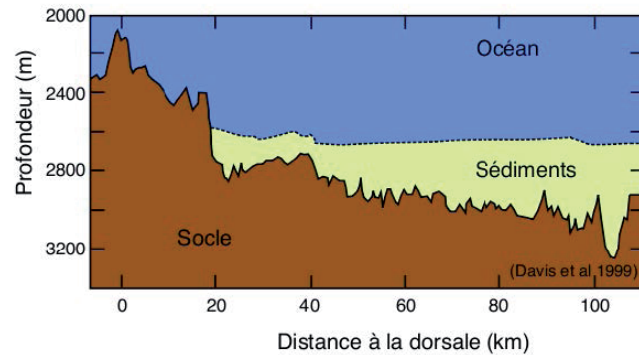
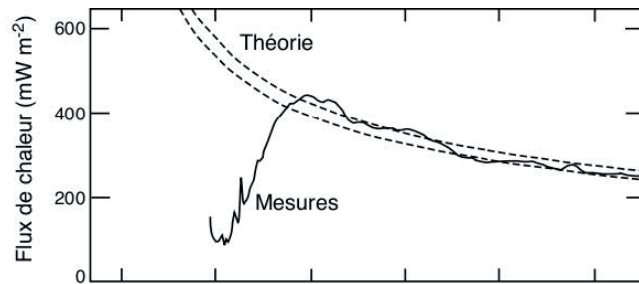
DANS CERTAINES CONDITIONS, LA LITHOSPHERE OCEANIQUE ACQUIERT UN FACIES SCHISTE VERT

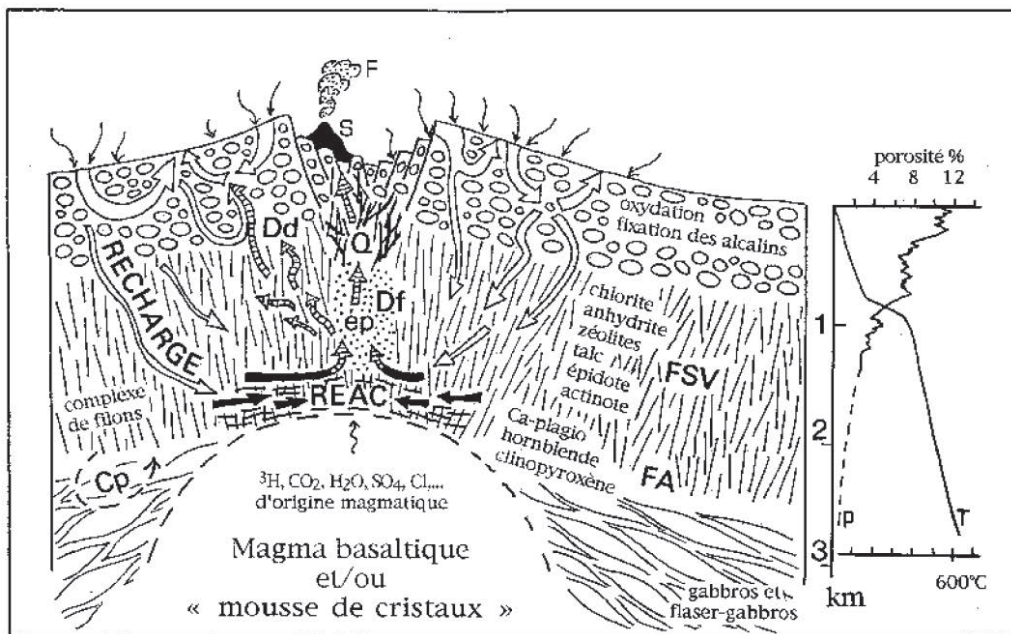
Olivine
serpentinisée

— Olivine
— Serpentinite

Couronne de
spinelle et de
pyroxènes

Photographie : Hervé Bertrand



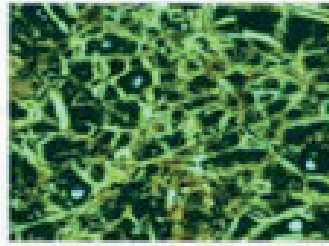


péridotite



+ H₂O =

serpentine



+

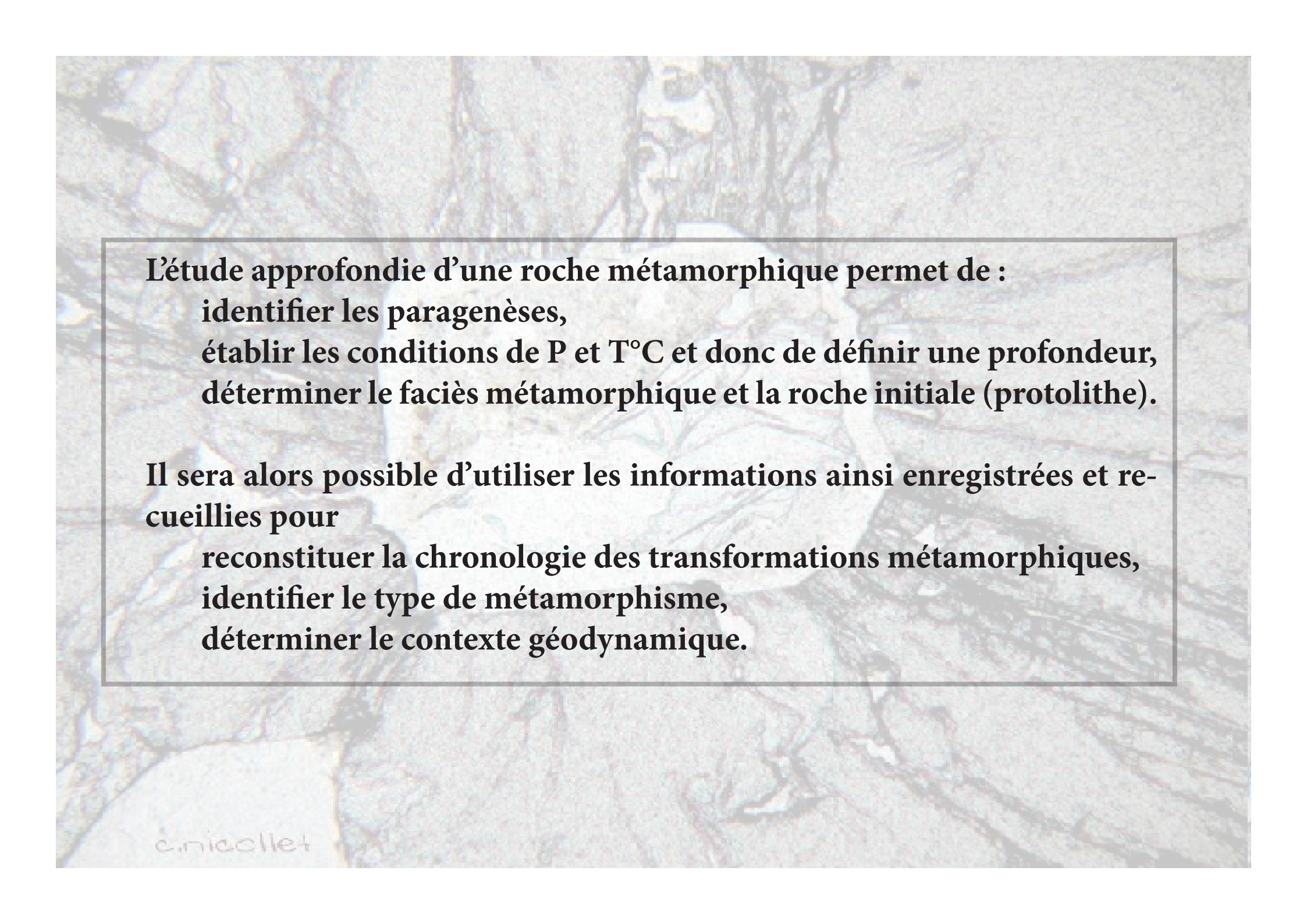
brucite

+

magnetite

+

H₂



L'étude approfondie d'une roche métamorphique permet de :
identifier les paragenèses,
établir les conditions de P et T°C et donc de définir une profondeur,
déterminer le faciès métamorphique et la roche initiale (protolithe).

Il sera alors possible d'utiliser les informations ainsi enregistrées et recueillies pour
reconstituer la chronologie des transformations métamorphiques,
identifier le type de métamorphisme,
déterminer le contexte géodynamique.

Après avoir étudié les relations physiques entre les minéraux identifiés sur la lame (Photo de V. Gardien), proposez une interprétation en terme de variation des conditions de P et T°C

