

- LES TRANSFORMATIONS MINÉRALES DU METAMORPHISME –

Introduction :

A côté des déformations (transformations structurales), les roches peuvent aussi avoir subi des transformations minéralogiques.

Nous ne nous intéresserons dans ce chapitre qu'aux transformations minérales ne remettant pas en cause « l'état physique » de la roche ; à ce titre, diagenèse et altération ne seront pas abordées alors que des transformations minérales y ont aussi cours.

→ renvoi vers le chapitre VI.A consacré à l'altération

→ renvoi également au chapitre I.A dans lequel il est question des transitions minéralogiques des péridotites du manteau

Alors que l'altération procède d'un rééquilibrage minéralogique des roches aux conditions thermodynamiques (P_{atm} , $T^{\circ}_{\text{surface}}$) et aux conditions chimiques de la surface (H_2O), ce chapitre s'intéresse aux transformations minérales subies par les roches au cours de leurs cheminements divers en profondeur dans le cadre des grands processus de la géodynamique lithosphérique.

Problèmes :

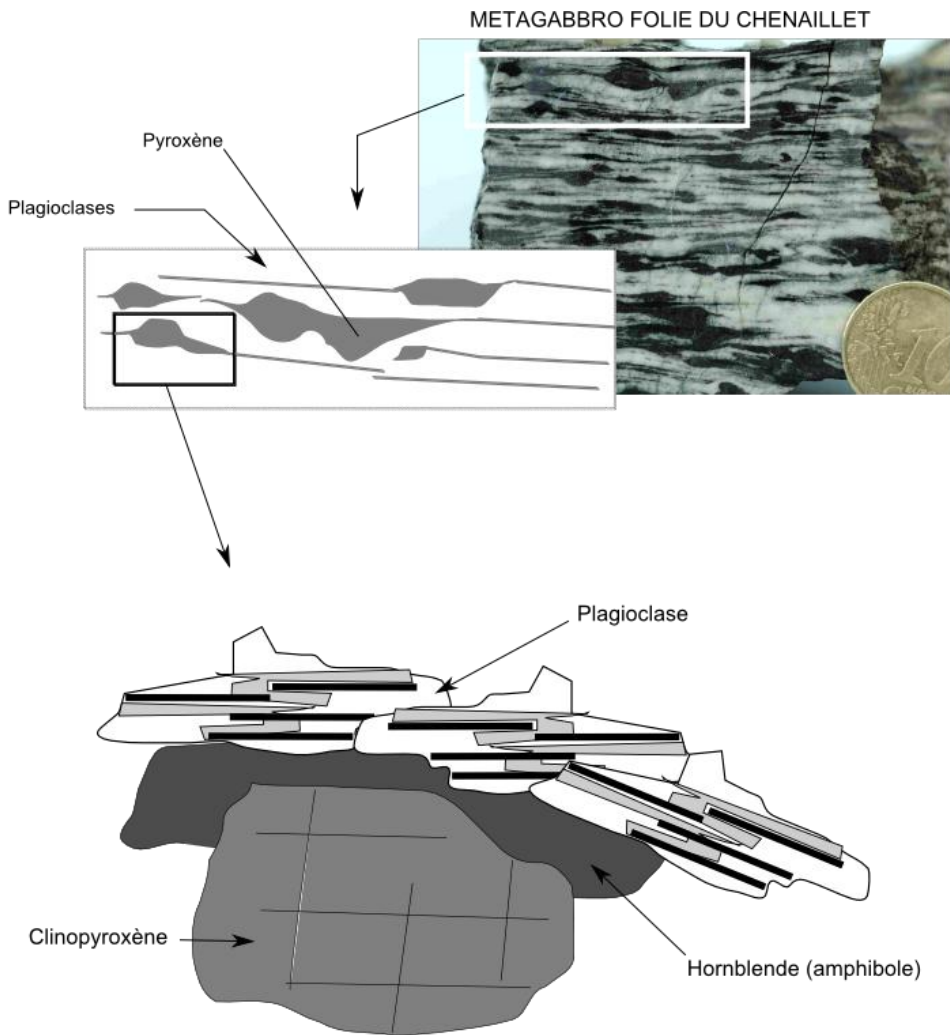
1. Comment mettre en évidence ces transformations ?
2. Comment la pétrologie expérimentale permet-elle de préciser les contextes (P,T) propices au déroulement des transformations minérales ?
3. Comment tirer profit de leur étude ?
 - comment dater les diverses transformations minérales ?
 - comment relier une succession de contextes (P,T), un chemin (P,T,t) à un contexte géodynamique ?

I. MISE EN EVIDENCE DE TRANSFORMATIONS MINERALES A DIFFERENTES ECHELLES

- exploiter les données de documents photographiques

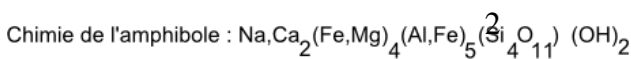
1.1. A l'échelle de l'échantillon : roche / lame mince

→ Etude d'un exemple (planche 1)



Disposition de l'amphibole :

-entre CPX et Plagio



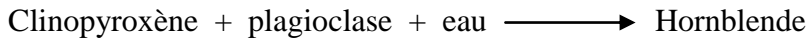
donc chimie intermédiaire entre CPX et Plagio + hydroxylation

→ 1 modèle en relation avec une réaction de métamorphisme hydrothermal

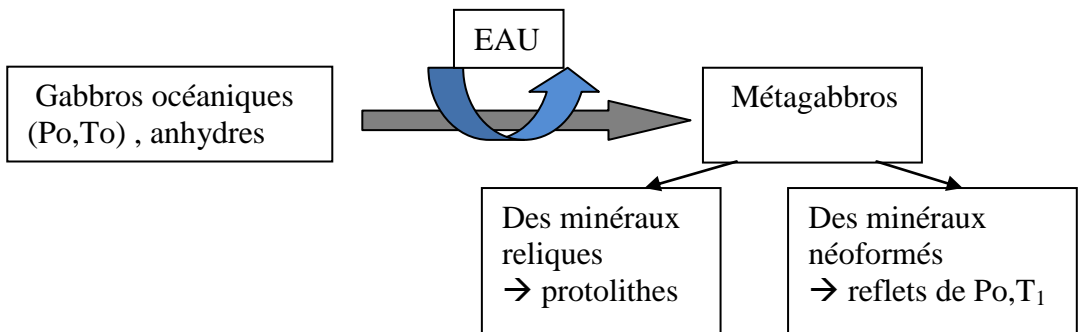
Commentaire : une roche grenue à pyroxène et plagioclase : un gabbro ; autour des pyroxènes et au contact des plagioclases, une couronne sombre d'amphibole de type hornblende (Hb).

Hb : minéral hydroxylé à chimie composite entre pyroxène et plagioclase

→ Idée d'une réaction entre ces deux minéraux



Et de son intégration probable à un contexte d'hydrothermalisme océanique, métamorphisme hydrothermal :



- analyser et exploiter les représentations cartographiques du métamorphisme

1.2. A l'échelle régionale à partir de cartes (planches 2 et 3, cf. TP)

- à partir d'exemples de métamorphisme de contact (Sélestat, Condé sur Noireau, Cherbourg, etc.)

- à partir d'exemples de métamorphisme plus général (Tulle, Brive, St Giron, Largentière, etc.)

- et des données de la carte au 1/10⁶.

→ cf. séances de TP consacrées aux cartes **mais bien sûr aussi aux roches** (planche 4)!

Rappel objectif du programme :

- identifier à l'œil nu des roches métamorphiques : schiste, micaschiste, gneiss, élogite, migmatite, marbre ; d'autres roches peuvent être présentées (cornéennes, amphibolites...), mais leur reconnaissance macroscopique n'est pas exigible.

BILAN : définition du métamorphisme

Transformations minéralogiques mais aussi structurales subies par une roche à l'état solide sous l'effet du changement de pression et de température

II. LES ASSOCIATIONS MINÉRALOGIQUES INDICATRICES DE PRESSION ET DE TEMPERATURE

Une roche de composition donnée exposée à un changement de température et/ou de pression est le siège de transformations minéralogiques. Ces transformations sont régies par les lois de la thermodynamique et de la cinétique chimique.

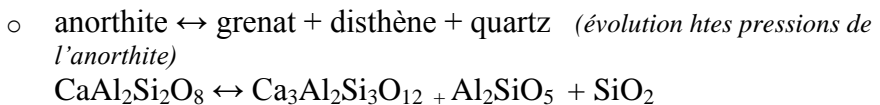
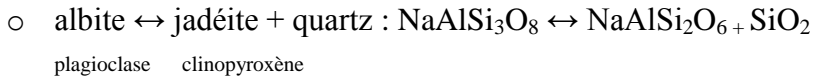
Les faciès métamorphiques sont des domaines de l'espace pression-température. L'association de minéraux stables dans un faciès constitue une paragenèse à l'équilibre. Ces assemblages dépendent de la nature de la roche originelle (protolithe). Des géobaromètres et des géothermomètres sont constitués par des réactions univariantes du métamorphisme, des minéraux index et par la distribution de certains éléments chimiques dans les phases minérales.

2.1. Les réactions du métamorphisme : diversité de formes

a) Sans intervention de fluide dans le bilan chimique

- Réactions de transfert : elles correspondent à un transfert de matière d'un site à l'autre des réactants vers les produits en ne concernant que des phases solides.

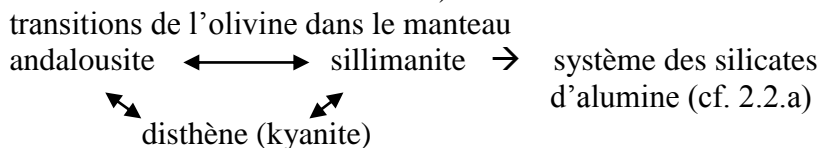
Exemples :



Cas particulier : les réactions polymorphiques ou transitions de phase, réactions de transfert avec un seul réactant et un seul produit.

Exemples :

- quartz α ↔ quartz β
- calcite ↔ aragonite
- graphite ↔ diamant (diamant phase de profondeur du C dans le manteau)



Remarque : Les réactions de transfert peuvent aussi impliquer des composés volatils sans que ceux-ci ne soient consommés ou dégagés : ils sont alors juste échangés.

- Réactions d'échange : elles caractérisent un échange réciproque d'éléments entre plusieurs minéraux.

Exemple : Fe – Mg entre grenat et biotite (cf. 2.2.c):
$$\begin{array}{ccccccc} \text{Biotite(Mg)} & + & \text{Grenat (Fe)} & \leftrightarrow & \text{Biotite(Fe)} & + & \text{Grenat (Mg)} \\ \text{phlogopite} & & \text{almandin} & & \text{annite} & & \text{pyrope} \end{array}$$

b) Avec intervention de fluide dans le bilan chimique

- Il peut s'agir de réactions impliquant l'entrée d'eau « externe » aux réactifs.
C'est par exemple le cas des réactions hydrothermales.
Cela est bien sûr le cas du métamorphisme hydrothermal au voisinage des dorsales océaniques avec intervention d'eau de mer, mais il peut s'agir aussi de réactions se déroulant en profondeur dans la croûte le long de fissures canalisant des fluides expulsés par d'autres réactions plus profondes de déshydratation...

- Il peut s'agir de réactions impliquant la libération d'eau dans des processus de déshydratation...

Exemples :

- muscovite + quartz \leftrightarrow sillimanite + feldspath K + eau
$$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 \leftrightarrow \text{Al}_2\text{SiO}_5 + \text{KAlSi}_3\text{O}_8 + \text{H}_2\text{O}$$
- ou encore les réactions de déshydratation des minéraux ferromagnésiens de la croûte océanique lors de son enfouissement en subduction...
- C'est par de transfert : elles correspondent à un transfert de matière d'un site à l'autre des réactants vers les produits en ne concernant que des phases solides.

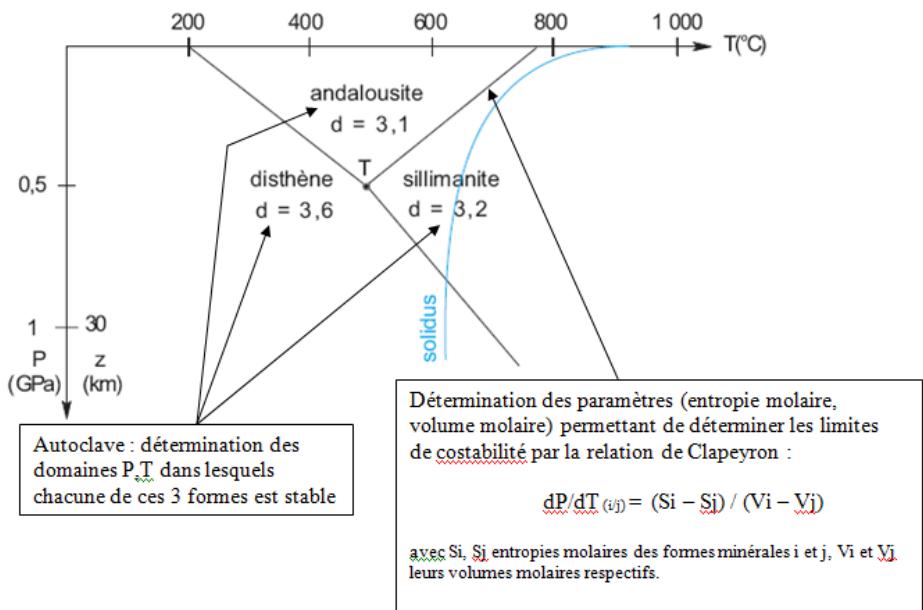
Exemples :

- albite \leftrightarrow jadéite + quartz : $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 \leftrightarrow \text{NaAlSi}_2\text{O}_6 + \text{SiO}_2$

2.2 Minéraux index, grilles pétrogénétiques ; géobaromètres et géothermomètres

a) un exemple « simple » pour (re)découvrir le principe des minéraux index et des limites des champs de stabilité des minéraux : le système des silicates d'alumine Al_2SiO_5

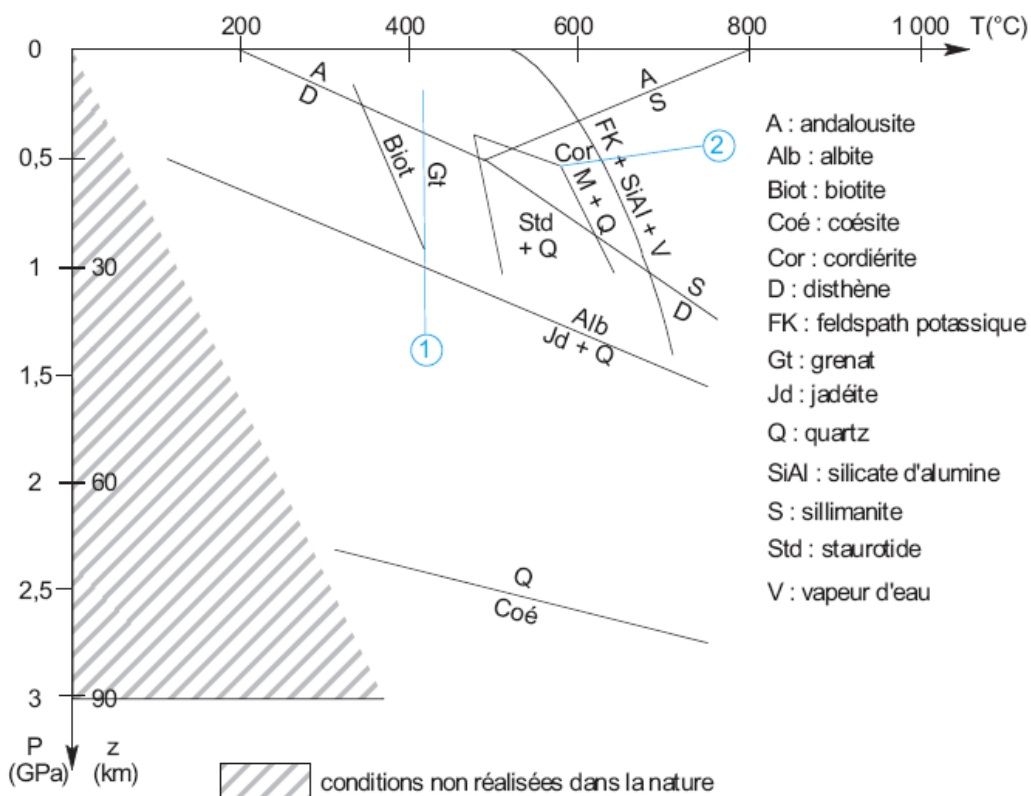
→ Cf. planche 5



- 3 formes minérales de nésosilicates différentes par la compacité de l'assemblage de leurs structures tétraédriques.
- Etude au laboratoire :
 - Autoclave : détermination des domaines P,T dans lesquels chacune de ces 3 formes est stable
 - Détermination des paramètres (entropie molaire, volume molaire) permettant de déterminer les limites de costabilité

b) généralisation : minéraux index, réactions univariantes et grilles pétrogénétiques

→ planche 3



- ① Courbe d'équilibre de la réaction *biotite + sillimanite + quartz = grenat + feldspath potassique + H₂O*
- ② Courbe d'équilibre de la réaction *cordiérite = grenat + sillimanite + quartz + H₂O*

- ❖ certains minéraux peuvent servir d'index barométriques
 - cordiérite : BP dans la grille KFMASH
 - jadéite : HP, coésite : THP

- ❖ d'autres minéraux d'index thermométriques
 - Sillimanite seule, ou en association avec la disparition de la muscovite et l'apparition du feldspath potassique
 - Grenat de la grille KFMASH

- ❖ de même la coexistence d'associations minérales rassemblant les phases solides d'une même réaction métamorphiques permet de positionner le système chimique le long de la ligne univariante (plus justement dans son voisinage) qui caractérise cette réaction.
Si dans une même roche ceci peut être fait avec plusieurs associations minérales, il est alors possible de contraindre plus fortement les conditions P,T qui ont présidé à leur développement.
MAIS encore faut-il s'assurer que ces associations minérales témoignent d'un même épisode métamorphique, soient relativement synchrones...

- ❖ Les « minéraux index » ont aussi servi à définir des **zones** sur le terrain et sur carte via la notion de degré métamorphique et d'**isograde**.

- analyser et exploiter les représentations cartographiques du métamorphisme

- cf. cartes au 1/50000^{ème} déjà citées
- Degré métamorphique : dans une région donnée, il est fréquent d'établir une zonation par la présence à certains endroits de minéraux index. La succession des zones d'un endroit à un autre permettait de définir une direction de métamorphisme croissant ; historiquement les zones ont été établies par des minéraux indicateurs de T car on pensait alors que c'était le facteur essentiel (planches 3 et 5).
Cependant, cela n'a vraiment de sens que si l'on reste dans le cadre d'une même séquence à l'échelle de la région étudiée : la présence de feldspath potassique indique un fort métamorphisme d'un protolithe pélitique, alors que ce même feldspath potassique peut être hérité du protolithe si celui-ci est un granite et ne témoigne alors d'aucune intensité métamorphique particulière...

- **Isograde** : limite qui marque sur le terrain d'une région métamorphique l'apparition (+) ou la disparition (-) d'un minéral index et qui est censée représentée un front de même intensité métamorphique (planches 2 et 3). En effet, les minéraux index choisis initialement étaient les minéraux caractéristiques des zones...

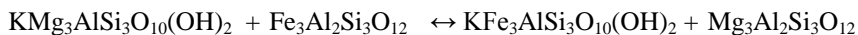
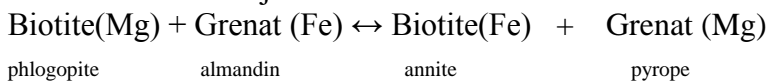
Cependant là encore ... une succession d'isogrades indiquant croissance ou décroissance métamorphique n'a de sens que vis-à-vis d'un même protolithe car en effet toutes ces transformations sont subordonnées à la composition chimique initiale... une succession d'isogrades peut donc aussi refléter un même degré métamorphique ayant affecté une série pétrographique initialement hétérogène !

**c) distribution de certains éléments chimiques dans les phases minérales :
approche complémentaire en géothermobarométrie**

- discuter de la pertinence du choix d'un géobaromètre ou d'un géothermomètre

- ❖ Un exemple de géothermomètre fondé sur une réaction d'échange : le géothermomètre biotite – grenat.

Deux cristaux de biotite et de grenat coexistant dans un assemblage minéralogique peuvent en effet échanger du fer et du magnésium entre eux suivant la réaction déjà citée :



L'échange Fe – Mg est mesuré par le coefficient de distribution K_D qui est le rapport de Mg/Fe entre biotite et grenat

$$K_D = (X_{\text{Fe}}^{\text{Bt}} \cdot X_{\text{Mg}}^{\text{Gt}}) / (X_{\text{Mg}}^{\text{Bt}} \cdot X_{\text{Fe}}^{\text{Gt}})$$

$$\text{d'où } K_D = (\text{Mg} / \text{Fe})^{\text{Gt}} / (\text{Mg} / \text{Fe})^{\text{Bt}}$$

Le bilan de cet échange est surtout thermodépendant, sensible à T donc, et peu dépendant de P .

→ $\ln K_D$ se rapproche d'une fonction linéaire de $1/T$.

Cette fonction a été calibré expérimentalement ce qui permet de disposer au final d'une loi liant $T^\circ\text{C}$ à $1/K_D$ et d'une grille d'**isoplèthes** (*lignes joignant des points d'égales valeurs sur une carte ou un diagramme*) correspondant à différentes valeurs du K_D (figure 1).

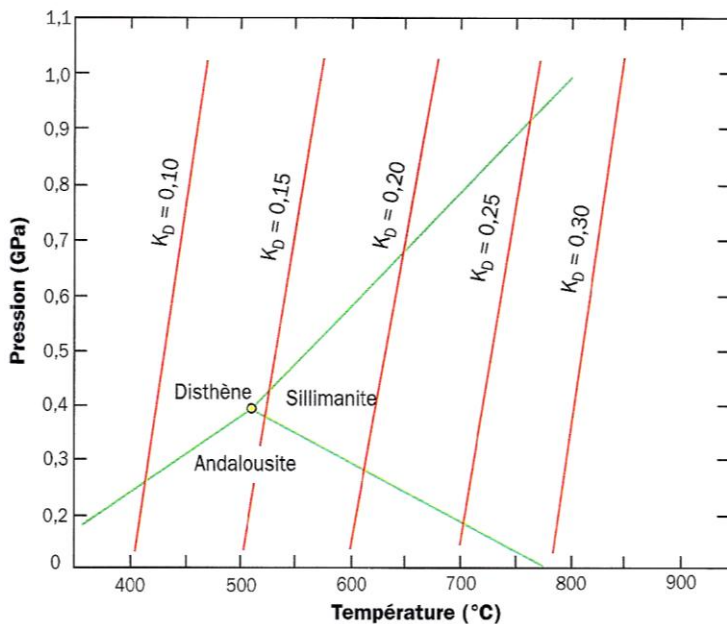
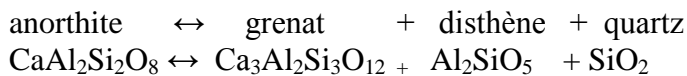


Figure 1 : Isoplèthes des différentes valeurs du K_D du système biotite - grenat

- ❖ Un exemple de géobaromètre fondé sur une réaction de transfert : le géobaromètre GASP.

C'est l'un des systèmes les plus utilisés dans les faciès amphibolites et granulites pour les séquences métapélitiques.

Il s'agit d'une réaction de transfert qui, comme fréquemment, illustre la transition Al^{IV} en Al^{VI} quand la pression augmente.



Un calibrage expérimental a permis là aussi de tracer in fine les isoplèthes correspondant à différentes valeurs de la constante d'équilibre K pour la réaction du géobaromètre GASP (figure 2).

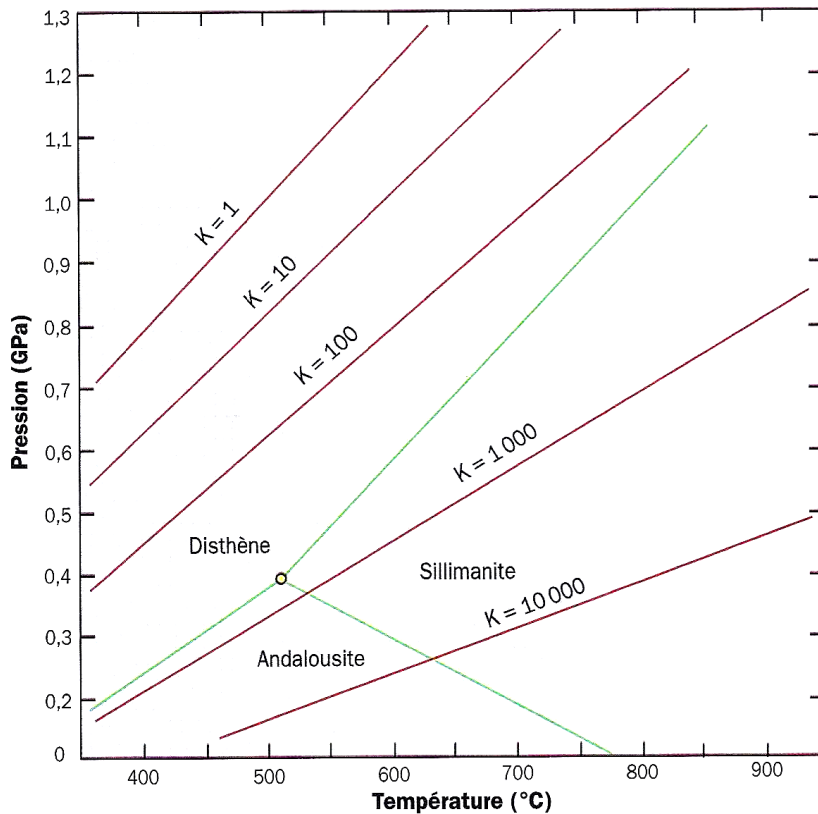


Figure 2 : Isoplèthes des différentes valeurs du K du système GASP.

Attention : ordre de grandeur des isoplèthes à inverser : forte valeur HP / faible BP !!!

K augmente vers les hautes pressions quand l'aluminium se trouve de plus en plus sous forme Al^{VI} dans des grenats au détriment de la forme Al^{IV} dans les plagioclases.

→ *exercice application*

d) utiliser des grilles pétrogénétiques adaptées

- ❖ Une grille pétrogénétique (planche 5) est un diagramme P,T (conditions de formation des roches) sur lequel sont reportées les courbes d'équilibre d'assemblages minéralogiques.

- ❖ Compte-tenu des connaissances actuelles des champs de stabilité des minéraux, une grille globale serait inutilisable ; du fait de la topochimie des réactions métamorphiques, les grilles utilisées sont adaptées pour des systèmes chimiques donnés.

Ainsi par exemple, les grilles KFMASH et CFMASH utilisées pour caractériser l'histoire métamorphique d'une séquence pélitique (planche 6) ne seront pas construites autour des mêmes minéraux index et droites univariantes que celle utilisée pour une séquence mafique (ferromagnésienne de type protolithe basalte-gabbro).

2.3. Les réactions du métamorphisme : cinétique et bilans de matière

a) Isochimisme et métasomatose au cours des réactions métamorphiques

A priori les réactions métamorphiques sont isochimiques...aux fluides près. Ces migrations de fluides peuvent aussi bien relever :

- d'import : c'est la métasomatose (par exemple hydratation des péridotites du manteau lithosphérique de la plaque chevauchante au dessus des secteurs de déshydratation des roches de la croûte subduite dans le cas des subductions...);

Remarque : la métasomatose est un apport de fluide (H_2O , CO_2) et de ce qu'il peut contenir de matière dissoute dans le cas de l'eau.

- d'export : ce qui permet ailleurs des métasomatoses, et ce qui explique certaines irréversibilités ; les réactions rétrogrades ne peuvent en effet se réaliser quand l'évolution prograde s'est accompagnée de déshydratations importantes...ce qui est fréquemment le cas !

Bilan : Interprétation des paragenèses des roches

Paragenèse : ensemble des minéraux appartenant à une roche et illustrant une origine et des conditions de mise en place communes (c'est évident étymologiquement !)

- **interprétation en terme de protolithe : on distingue 5 séries** métamorphiques constituant les 5 grands types de systèmes chimiques suffisants pour décrire la plupart des roches métamorphiques : série pélitique, série quartzo-feldspathique, série basique, série carbonatée, série ultrabasique.

Série (séquence)	protolithes	métamorphites
Pélitique	Pélites : roches détritiques à Q+F+ argiles dominantes	Métapélites : micaschistes paragneiss <i>schistes noduleux et cornéennes (métam. Contact)</i>
Quartzo-feldspathique	Grès +/- feldspathique Granite, rhyolite	Paragneiss Orthogneiss
Basique	Basaltes, gabbros	Schistes bleus, verts, amphibolites, éclogites
Carbonatée	Calcaire, marne, dolomie	Marbre +/- pur
Ultrabasique	péridotite	Péridotites (anhydres) et serpentinites (hydratées)

Remarque : Le cas des marnes, et d'autres protolithes (évaporites, latérites, etc.) n'est pas évoqué ici ; pour ces dernières, elles sont à l'origine de très peu de roches métamorphiques.

b) La notion de faciès métamorphique

Elle repose sur la reconnaissance d'assemblages minéraux qui coexistent à l'équilibre, chaque assemblage correspondant à un domaine bien défini de P et T, c'est-à-dire sur la reconnaissance de paragenèses.

Les faciès ont été définis sur des roches basiques par Eskola en 1925 (figure 3, planches 7 et 7 bis).

- situer approximativement les limites des principaux faciès métamorphiques : schistes verts, amphibolite, granulite, schiste bleu, éclogite

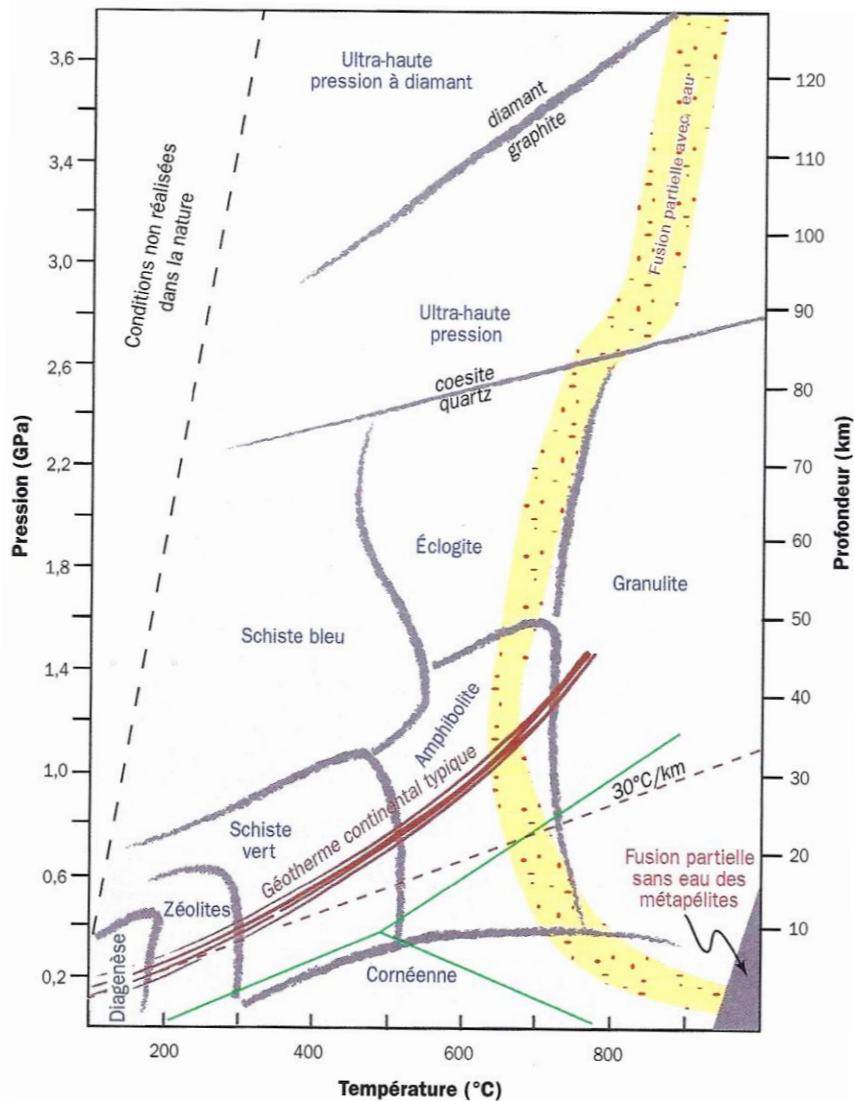
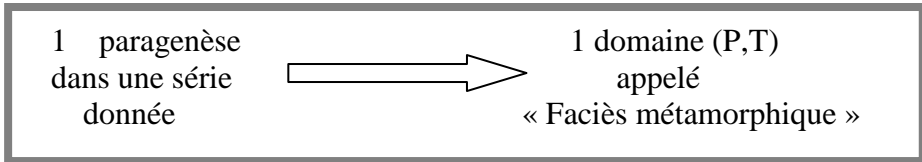


Figure 3 : Les limites des principaux faciès métamorphiques

Dans la pratique, un faciès est défini de deux manières :

- par son assemblage minéralogique caractéristique, en fonction bien sûr de la série (par exemple Glc + Lws pour le faciès SB des roches basiques) ;
- par l'utilisation des courbes $P = f(T)$ qui caractérisent les réactions définissant les frontières des faciès (par exemple la réaction muscovite + Qz \leftrightarrow FK + Sill + eau marque la limite des faciès amphibolite et granulite pour la série pélitique).



Attention donc : un granite ou un gneiss dans le faciès des éclogites ne seront jamais des éclogites, mais des gneiss de faciès éclogitiques ; leur chimie sans Fe, Mg ne permettra pas la formation des clinopyroxènes ferro-magnésiens typiques des éclogites : tout juste pourra-t-on observer de la jadéite (alumino-sodique), voire de la coésite grâce auxquelles on déterminera ce faciès, mais jamais des omphacites ferro-magnésiennes.

c) Cinétique des réactions métamorphiques

- Problème : on observe dans les Alpes des roches métamorphiques diverses dont certaines à coésite, or ce minéral n'est théoriquement stable qu'au-delà de 2 GPa de P (c'est-à-dire près de 70 km de profondeur) : il est ici **METASTABLE**.

Comment rendre compte de la formation et de la métastabilité de ces minéraux ?

- Evolution thermique prograde (montée en P et en T) :
 - L'augmentation de température facilite la diffusion de matière : réactions facilitées suivant une tendance exponentielle → elles peuvent être totales.
Remarque : elles peuvent aussi profiter des déformations qui facilitent souvent les migrations de fluides.

Bilan : Il se peut que le protolithe soit complètement « effacé ». Le cas du métagabbro du Chenaillet étudié dans le I. est atypique : en effet dans le cas du métamorphisme hydrothermal, il y a un refroidissement progressif et non un échauffement.

- Evolution thermique rétrograde accompagnant un retour vers la surface (tectonique ou isostatique) : baisse de température, ce qui bloque plus ou moins rapidement les réactions chimiques.

- Enregistrement d'un paroxysme métamorphique :
Au cours de l'enfouissement tectonique d'une roche, alors que la pression s'équilibre instantanément aux conditions de la profondeur atteinte, la faible conductivité thermique des roches est responsable d'un retard à l'échauffement par rapport à la température du géotherme correspondant à cette profondeur.
Ce retard à la montée en T° fait que :
- ✓ les réactions engageant le rééquilibrage minéralogique interviennent plus tardivement, soit à cette profondeur si l'enfouissement cesse, soit à une profondeur moindre (et donc une pression inférieure à P_{max}) si la remontée des roches est déjà entamée. La paragenèse paroxysmale est donc plus révélatrice du pic de T° que du pic de P ...
 - ✓ la poursuite d'une montée en T° alors que la roche entame sa remontée ou qu'elle se stabilise à une profondeur donnée permet à de nouvelles transformations d'effacer la minéralogie symptomatique du pic de P initial ; si les transformations liées à cet échauffement se font au cours d'une remontée, elles auront pu effacer les minéraux marqueurs du pic de P .
Nous reparlerons de ce point en abordant les chemins $P, T, temps$ et les gradients métamorphiques dans le volet 3.

Bilan :

- 1. Les réactions rétrogrades sont souvent très incomplètes.**
- 2. Une roche aura tendance à conserver des reliques +/- importantes de son « paroxysme métamorphique » (pic de T surtout) autour desquelles on trouvera des minéraux issus de réactions incomplètes liées à son évolution rétrograde.**

*Remarque : une autre situation peut gêner la réalisation de réactions métamorphiques, indépendamment d'une baisse de température, c'est le cas des **réactions coronitiques** au cours desquelles le minéral néoformé isole les réactifs les uns des autres.*

Mis à part le métamorphisme de contact et le métamorphisme hydrothermal, la plupart du temps les transformations minérales du métamorphisme se réalisent au sein de roches qui se déforment et compte tenu des conditions P, T surtout de manière ductile.

Nous avons déjà insisté sur le rôle majeur des fluides dans les processus de déformation, notamment dans leur capacité à faciliter les transferts de matière depuis les secteurs en raccourcissement vers les secteurs en allongement. Les réactions de déshydratation que subissent la plupart des roches dans leur évolution prograde conditionne donc grandement leur déformation du fait de l'anisotropie des contraintes qui accompagne leur enfouissement.

De même, l'intensité du métamorphisme est souvent plus forte dans les secteurs les plus déformés : ce n'est pas forcément que les P et T y aient été différentes mais peut-être que les conditions plus propices aux déformations aient aussi facilité la réalisation des transformations minérales.

Cependant, les relations entre paragenèses métamorphiques et déformations peuvent être complexes et il peut être intéressant de les ordonner chronologiquement.

III. PARAGENESES METAMORPHIQUES AU COURS DU TEMPS ET INTERPRETATION GEODYNAMIQUE

La distribution spatiale des roches métamorphiques à l'échelle régionale permet d'identifier des séries métamorphiques, indicatrices d'un gradient géothermique local. Les mêmes méthodes peuvent être transposées à plus petite échelle dans le cadre du métamorphisme de contact.

L'étude des différentes paragenèses présentes dans une roche métamorphique et leur datation permettent de reconstituer un chemin $P, T = f(t)$. Ce chemin fait apparaître des étapes progrades et des étapes rétrogrades, caractéristiques des conditions d'enfouissement et des conditions d'exhumation. Un chemin $P, T = f(t)$ constitue une jauge de profondeur dans l'histoire tectonique d'une unité crustale.

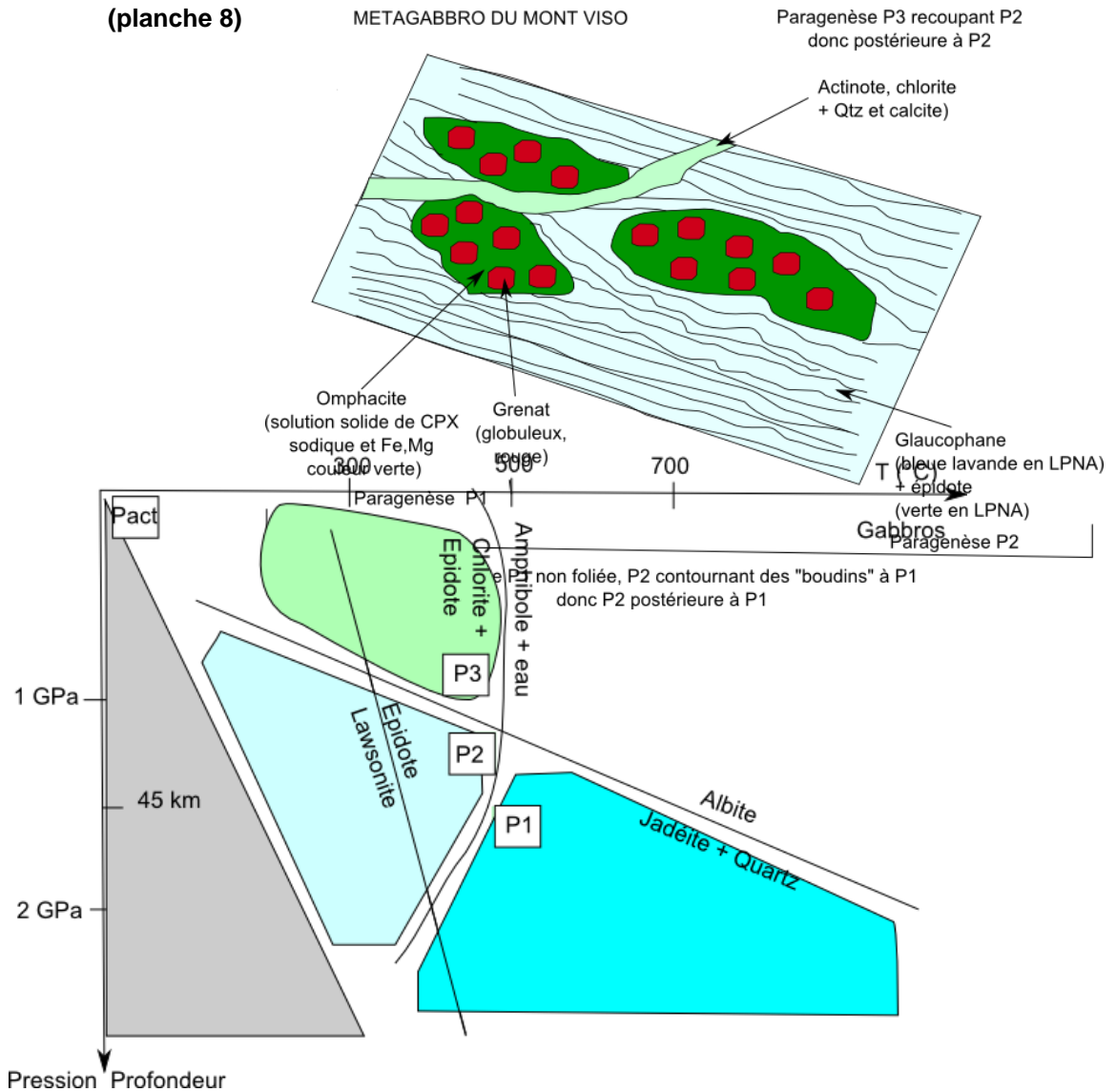
La nature des séries métamorphiques et les reconstitutions de chemins $P, T = f(t)$ sont étroitement liées à l'histoire géodynamique.

2.1. Etablissement des chemins (P,T,t)

- analyser et exploiter les représentations cartographiques du métamorphisme
- utiliser une grille pétrogénétique fournie
- exploitation de données pétrogénétiques et structurales pour proposer une hypothèse en terme de chemin $P, T = f(t)$; exploitation de ces résultats dans le

cadre d'une histoire régionale et dans celui de la géodynamique globale
 - utilisation l'évolution dans le temps des associations minéralogiques pour
 éclairer une histoire métamorphique

a) Étude d'un exemple alpin : exploitation d'un métagabbro du Mt Viso
 (planche 8)



b) généralisation

b1. Méthodes de datation relative des paragenèses métamorphiques

- étude des relations géométriques entre minéraux : recoupement, inclusion, frange réactionnelle

- étude des relations cristallisations – déformations :
 - retour sur le métagabbro du Viso : des minéraux anté-cinématiques (anté-schisteux), des minéraux syn-cinématiques (syn-schisteux), des minéraux post-cinématiques (post-schisteux).
 - Mais aussi des cas plus complexes encore : cf. exemples
- exploiter des données pétrogénétiques et structurales pour proposer une hypothèse en terme de chemin $P, T = f(t)$

Savoir interpréter des minéraux à inclusions hélicitiques (planche 9)

A côté de ces approches, il ya aussi la possibilité de dater les paragenèses de façon absolue.

b2. Ce que les roches nous livrent...et ce qu'elles nous cachent

- Ce qu'elles nous livrent souvent : des étapes du chemin rétrograde mais aussi la possibilité d'ordonner dans le temps ces étapes (par chronologie relative et parfois absolue)
- Ce qu'elles nous cachent : l'essentiel du chemin prograde sauf parfois au stade d'inclusions résiduelles dans les minéraux du pic métamorphique, mais c'est rare et toujours discret.

3.2. Evaluation d'un gradient métamorphique et interprétation

- exploiter la juxtaposition d'assemblages typomorphes dans une série métamorphique ; déterminer un gradient d'enfouissement
- exploiter des assemblages typomorphes et des chemins $P, T=f(t)$ dans le cadre d'une histoire régionale et dans celui de la géodynamique globale

a) un exemple alpin : le chemin de la vallée du Guil « Queyras-Viso »

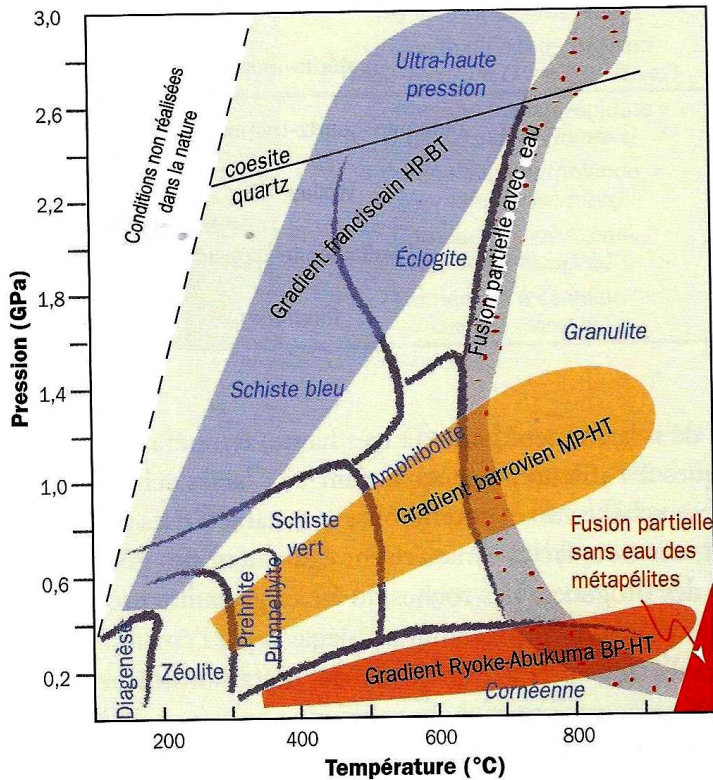
- Dans le Queyras, d'autres métagabbros que ceux rencontrés au Mt Viso avec une paragenèse indiquant un pic métamorphique dans le faciès des

Schistes bleus (lawsonite, jadéite) vers 1 GPa et 300°C.

- Si on replace les pics métamorphiques du Queyras et du Viso sur une même grille, **on appelle gradient métamorphique la pente dT/dz (avec z équivalent à P à un coefficient près) de la droite que l'on peut tracer entre ces deux pics.**
On retiendra donc l'idée d'exploiter plusieurs échantillons prélevés à des endroits différents d'un même massif métamorphique.
- b) **Généralisation : les trois types de gradients métamorphiques et leur interprétation géodynamique**

- relier les principaux gradients à des contextes géodynamiques

- En réalisant de telles constructions dans de nombreux massifs métamorphiques, on constate que la plupart se rangent dans trois grands types de gradients.
- Un gradient métamorphique n'est en aucune façon assimilable à un gradient géothermique (cf. exercice sur le gradient barrovien dans les chaînes de collision)



➤ ON DISTINGUE AINSI (figure 4):

Figure 4 : Les trois grands types de séries de faciès et de gradients métamorphiques.

- Un gradient franciscain (HP-BT) avec la succession schistes verts, schistes bleus, éclogites, et des protolithes fréquemment basiques (mais non exclusivement, cf. Dora Maira dans les Alpes) assimilable à un contexte de subduction ;
- Un gradient dalradien (barrovien) (MP-MT) avec la succession schistes verts, amphibolites et éventuellement granulites affectant le plus souvent des protolithes d'affinité continentale : c'est le gradient rapporté à la collision continentale avec un métamorphisme pouvant se prolonger par l'anatexie, la formation de migmatites et de granites d'anatexie ;
- Un gradient d'Abukuma (BP-HT) défini dans les chaînes japonaises du même nom et caractérisé par une succession de faciès proche de la précédente mais avec une transition andalousite/ sillimanite à la place de

la transition disthène/sillimanite ; il caractérise les zones peu profondes qui ont été largement injectées de magmas anatectiques, suffisamment pour subir un échauffement conséquent ; on peut aussi rencontrer cela dans les cordillères injectées de magmas granodioritiques et anatectiques. C'est aussi le gradient du métamorphisme hydrothermal mais dans ce cas avec des protolithes basiques !

3.3. Dans le cadre du métamorphisme associé à la collision, la possibilité d'atteindre l'anatexie crustale

- Dans certaines conditions, le métamorphisme peut conduire à l'anatexie crustale.

Au terme du faciès amphibolites et dans le cas d'un gradient barrovien affectant une série pélitique ou quartzo-feldspathique, les réactions de disparition de la muscovite s'accompagne d'une libération d'eau. Cette eau, si elle n'est pas évacuée du site peut alors jouer le rôle de fondant sur des roches dont la composition est proche de celle d'un granite dès lors que leur solidus hydraté est atteint ; on obtient alors une migmatite. Une migmatite (figure 5, TP) est une roche dérivée d'une roche métamorphique associant des secteurs clairs constitués de la cristallisation in situ d'un liquide de composition leucogranitique (leucosome), et des secteurs sombres interprétés comme des secteurs résiduels, réfractaires à la fusion partielle (anatexie) subie par la roche au terme de son métamorphisme.



Figure 5 : Migmatite (plage des Chaumes, Sables d'Olonne, photo P.Thomas)

(1) Le gros du volume de la roche est sombre, riche en mica noir (biotite), et très schistosé.(2) Intercalés entre les feuilletés de la schistosité/foliation, on voit de très nombreuses « lentilles » claires, formant comme des yeux (bridés) au sein de la schistosité/foliation. Ces lentilles ont une longueur allant de 1 à 10 cm. Un gros plan sur ces « lentilles » (fig 1) montre qu'elles sont constituées de minéraux de taille millimétrique à centimétrique, jointifs, et sans orientation/schistosité très visible. Les minéraux constitutifs sont principalement des quartz (gris) et des feldspaths (blancs à jaunâtres suivant le degré d'altération), avec quelques rares micas (blancs). Ces lentilles ont la composition

minéralogique et la structure d'un granite clair (leucogranite).

Dans le cas des migmatites des Sables d'Olonne, la roche mère qui subit la fusion partielle est un orthogneiss assez sombre, ancien granite (ou ancienne rhyolite) fortement métamorphisé et schistosé, qui, à la suite de son métamorphisme, a subi un début de fusion partielle. L'âge du métamorphisme et de la fusion partielle serait de 390 Ma, et l'âge du protolite (roche anté-métamorphique) serait Protérozoïque supérieur (Briovérien).

La roche anté-fusion des Sables d'Olonne était donc un gneiss à quartz, feldspath et beaucoup de mica noir, avec une belle foliation. La fusion partielle a fait fondre une partie des minéraux les plus fusibles (quartz, feldspath et un tout petit peu de mica) ce qui a donné quelques pour cent de liquide de composition granitique et a laissé solide la majorité de la roche qui s'est trouvée, par différence, enrichie en micas et appauvrie en quartz et feldspath. La petite fraction fondue s'est rassemblée après une très faible migration en lentilles intercalées dans la foliation pré-existante et a donné les lentilles de composition granitique (le mobilisat = leucosome). La majorité de la roche, non fondue, constitue la partie sombre bien foliée et riche en biotite (le restat = restite = mélanosome)

- utiliser un solidus quartz-albite-orthose pour discuter d'une possible fusion crustale

→ planche 9

L'étude du système ternaire quartz – albite – orthose est à même d'expliquer la nature relativement constante du liquide alors obtenu, un liquide de composition leucogranitique (1/3 Qtz, 1/3 Alb, 1/3 Orth) ; celui-ci peut rester mêlé au résidu réfractaire (mélanosome) et y cristalliser en formant des passées leucogranitiques (leucosomes), ou s'extraire du résidu réfractaire et entamer une remontée plus ou moins importante dans l'encaissant métamorphique avant de s'arrêter et de former un corps plutonique à part entière.

→cf. TP : exemples sur les secteurs des cartes de Tulle, St Girons, Largentière

→ **un exemple alpin mais dans le socle varisque de la zone dauphinoise : les migmatites d'Epierre (Belledonne) → sortie jour 4**

Conclusion : L'étude des transformations minérales permettent donc de reconstituer certains évènements de la géodynamique passée du globe. Elles complètent l'exploitation des déformations.

Si l'histoire des chaînes récentes s'appuie sur l'exploitation des roches de leur couverture sédimentaire et de leur socle, l'histoire des chaînes anciennes et très anciennes ne peut s'écrire qu'en exploitant celles le plus souvent métamorphiques de leur socle, qui malheureusement ont pu subir des métamorphismes successifs ayant plus ou moins effacé les informations les plus anciennes .

La géologie n'est pas une science aisée mais le livre des Sciences de la Terre et de l'Univers reste ouvert à qui veut contribuer à l'œuvre collective !