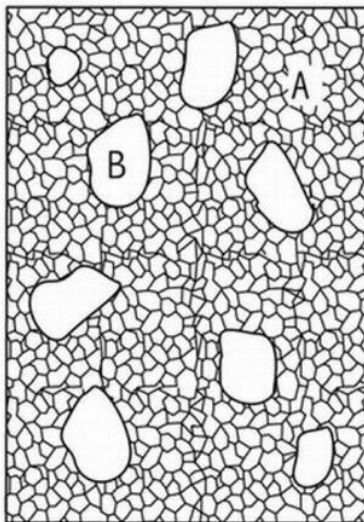


FILIERE SVT/S2
Module : GÉODYNAMIQUE INTERNE

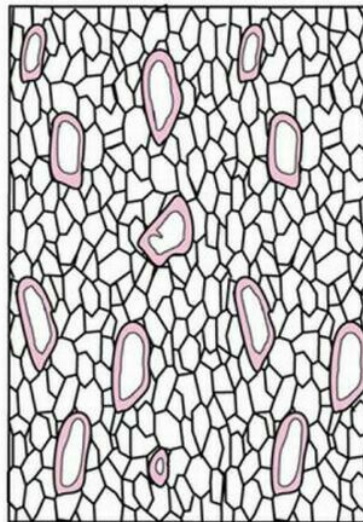
POLYCOPIE COURS

LE MÉTAMORPHISME
ET
LES ROCHES MÉTAMORPHIQUES

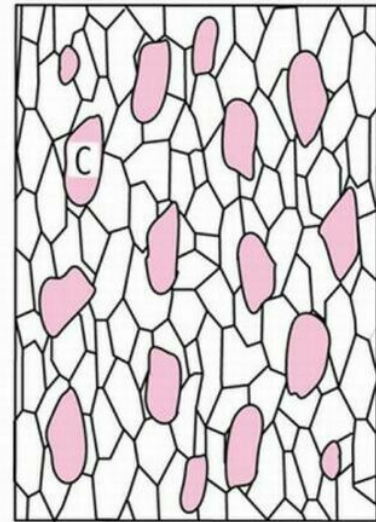
A P0-T0 la roche
contient les minéraux A+B



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



... jusqu'à disparition
de B.



c. Nicolle+

MÉTAMORPHISME

ET ROCHES MÉTAMORPHIQUES

I- Définitions

Chaque roche prend naissance dans des domaines thermodynamiques bien définies.

Roches sédimentaires → T° faible et pression habituellement faible (surface)

Roches magmatiques → T° élevées et des pressions variables (surface ou profondeur)

A la fin du 18^{ème} et début 19^{ème} siècle, James Hutton (Theory of the Earth, 1795) fait une observation en Écosse de roches issues de la transformation de roches magmatiques ou sédimentaires au contact de granite ou de basalte et propose un 3^{ème} type de roches résultant de la transformation d'une des roches précédentes : les roches métamorphiques.

Le perpétuel mouvement de la machine terre met les roches dans des conditions de profondeur (donc de pression-température) très variables en fonction des situations géodynamiques. Les roches métamorphiques représentent les témoins de telles transformations. Elles ont subi des transformations minéralogiques, à l'état solide, lorsque la température (T), la pression lithostatique (PL) et la pression des fluides (PF) changent.

Les minéraux formant les roches sont donc stables dans ces conditions précises, malgré l'existence de nombreux minéraux métastables.

Lorsqu'une roche est amenée à une grande profondeur (P augmente), elle devient plus dense et son volume diminue. Or, les minéraux ne sont pas très compressibles. Aussi, les minéraux peu denses, stables en surface, sont remplacés, en profondeur, par des minéraux de densité supérieure.

Les minéraux de roches de profondeur une fois arrivées en surface se modifient c'est l'altération, de même lorsque des roches sédimentaires sont portées à de hautes profondeurs par enfouissement elle se transforment c'est le métamorphisme.

Le métamorphisme est l'ensemble des transformations d'une roche à l'état solide (par réactions et transfert d'ions entre minéraux) du à la variation de la pression et de la température, avec la cristallisation de nouveaux minéraux dits néoformés, et acquisition de textures et structures particulières.

Une augmentation de P/T donne un métamorphisme prograde

Une diminution de P/T donne un métamorphisme rétrograde

L'élévation de la température est fonction de la profondeur (gradient géothermique 30°/km) ou par arrivée de corps magmatiques chauds.

La pression est fonction de la charge de roches sus-jacentes (pression lithostatique 1kb/4km) ou de contraintes tectoniques (pression orientée).

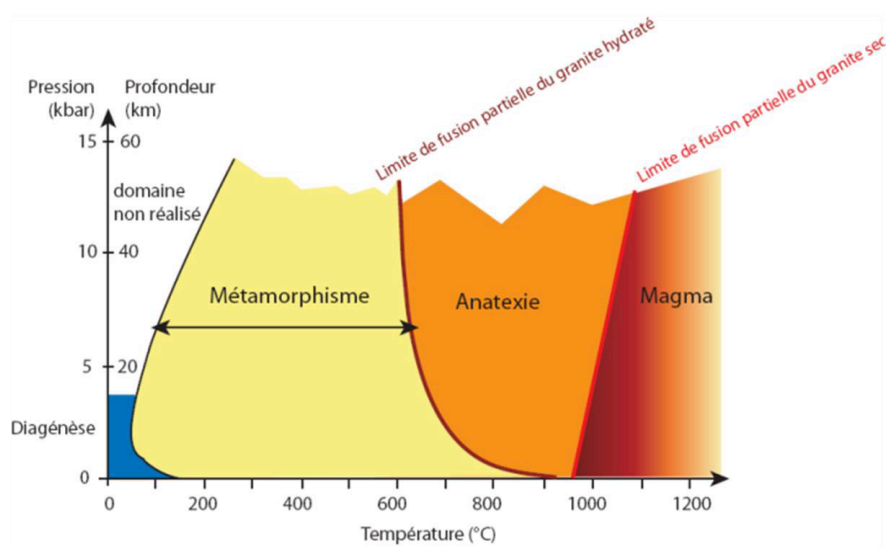
II- Les conditions du métamorphisme - Les types de métamorphisme

Le métamorphisme s'étend d'environ 200°C/3kbar (limite entre diagenèse et métamorphisme = limite inférieure) et la limite de fusion des roches (l'anatexie (formation d'un magma de composition granitique) = limite supérieure). La limite supérieure est variable selon la teneur en eau et le type de roche (limites 1 et 2 du diagramme ci-dessous).

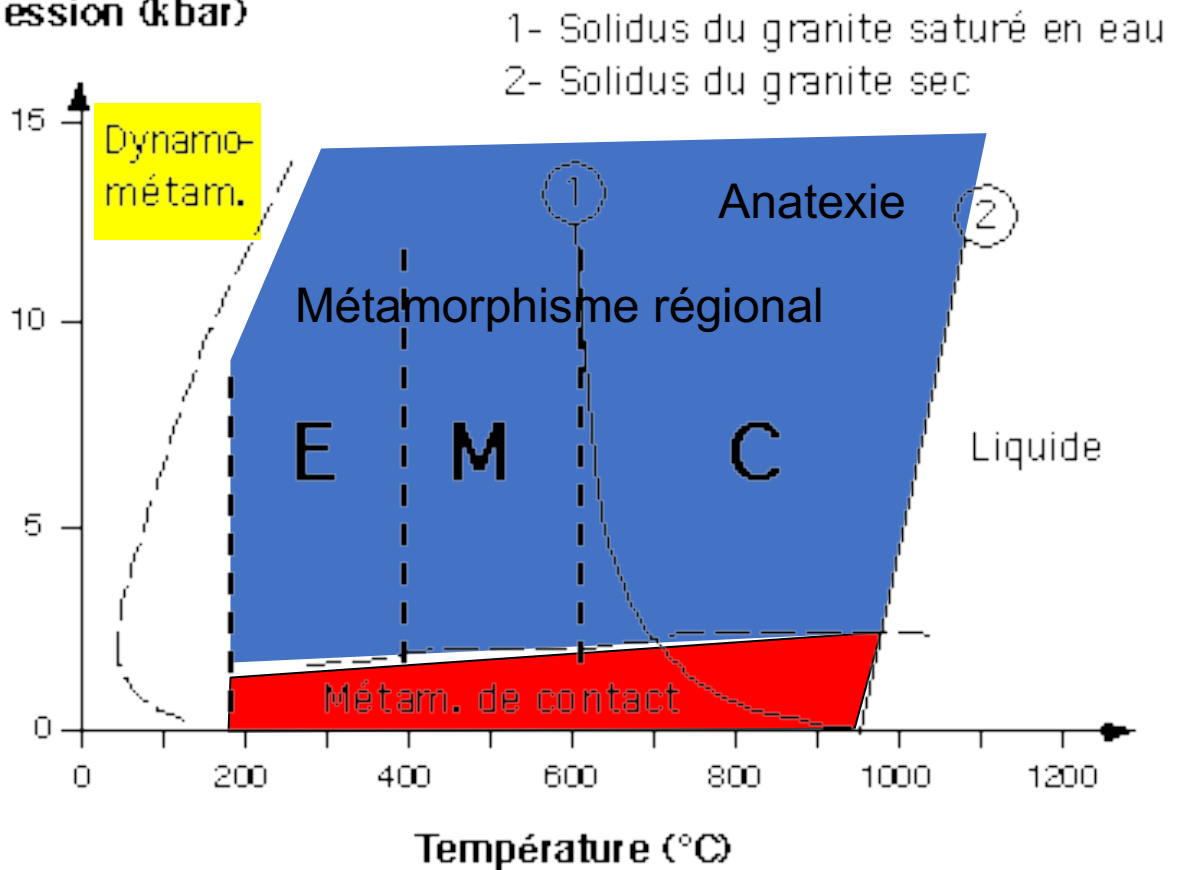
En fonction du couple pression/température on peut distinguer :

- le **dynamo-métamorphisme (HP/BT)** qui est dû à l'effet de la pression (roches intensément déformées avec relativement peu de néoformations de minéraux. Il s'agit de roches telles que les cataclasites : roches formées dans des zones étroites comme les failles et la base des nappes de charriages où la déformation est très intense et produit des mylonites (*métamorphisme cataclastique*) ou les roches formées dans des cratères lors d'impacts de météorites (*métamorphisme de choc ou d'impact*).

- Le **métamorphisme de contact (HT/BP)** est dû essentiellement à l'effet de la température. Il se développe dans les roches encaissantes autour des masses magmatiques chaudes. Les roches métamorphisées sont appelées des cornéennes
- Entre les deux se développe un métamorphisme, qui est lié à des facteurs géodynamiques correspondant à des situations thermiques variées, pourvu que la P et la T changent, c'est-à-dire si la situation thermique est modifiée, perturbée. Cela peut être au sein d'une plaque stable, dans les zones de convergence, mais aussi les zones en extension, telle que la lithosphère océanique. A l'affleurement, les roches métamorphiques sont surtout visibles dans les zones orogéniques, car dans ces zones épaissies de la lithosphère les roches profondes sont ramenées à la surface par déformation et/ou érosion. La majorité de ces roches est formée par le **métamorphisme régional**.



Pression (kbar)



Ce métamorphisme régional peut être subdivisé en plusieurs domaines en fonction de la pression et la température et qui sont :

E = épizone : conditions de température et pressions faibles proche de la surface

M = mésozone : conditions de température et pression moyennes

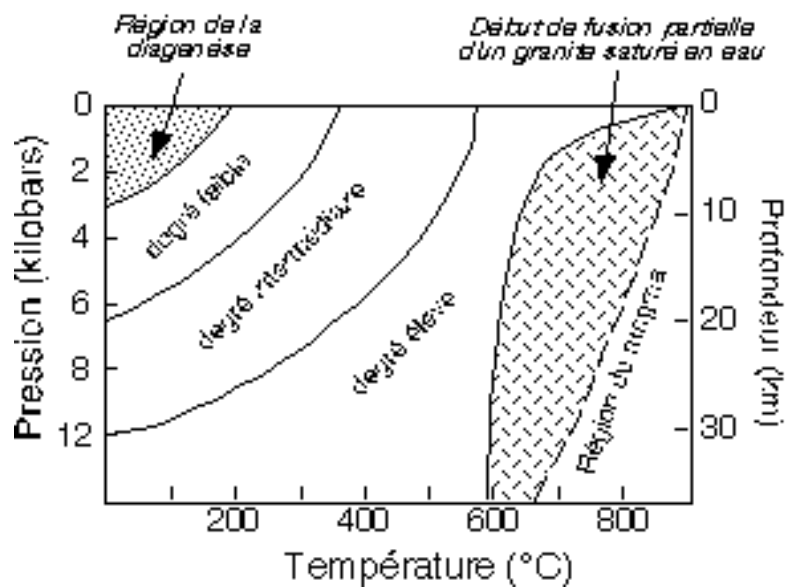
C = catazone : conditions de hautes profondeurs avec pression et températures hautes.

(notez que la catazone correspond au domaine de fusion des roches saturées en eau.

Le domaine à gauche de l'épizone est le domaine de la diagenèse

Les températures élevées chevauchent le domaine du magmatisme (voir figure ci-dessous). On appelle **migmatite**, une roche faite d'un composant igné (liquide formé par fusion partielle : **néosome**) et un composant métamorphique (solides restant après fusion partielle : **paléosome**). Lorsque des volumes importants de magma sont produits par fusion partielle, ils montent (vers le haut) et sont mis en place dans les roches métamorphiques. En résultat, on observe souvent l'association de batholites granitiques et de terrains métamorphiques.

On emploie les termes degré faible, intermédiaire et élevé pour indiquer l'augmentation progressive de la température et de la pression.



Régions de température et de pression (profondeur) du métamorphisme dans la Terre. Aux basses températures et pressions, les changements sont dus à la diagenèse. Aux hautes températures et pressions, les domaines du métamorphisme et du magmatisme se chevauchent dépendamment de la quantité d'H₂O présente (à partir de Skinner et Porter, 1995).

III-Transformations métamorphiques

1- Les facteurs ou variables physico-chimiques

Les transformations métamorphiques d'une roche dépendent bien évidemment de la composition chimique de cette roche (ingrédient essentiel) qui va contrôler l'association de minéraux qui en résulte, on parle de la notion de Protolithe : nature de la roche de départ dont les transformations minérales vont dépendre (voir tableau suivant) :

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

mais d'autres variables sont également importantes à savoir :

- la Température,
- la Pression,
- l'abondance et composition de la phase fluide H₂O, CO₂, ...
- le temps,
- la déformations de la lithosphère (contraintes)
- le déplacements de masses de magma (métamorphisme de contact)

Étapes d'une réaction métamorphique :

Dissolution (pression -température) → ***Transport*** (diffusion, déformation, fluide) →

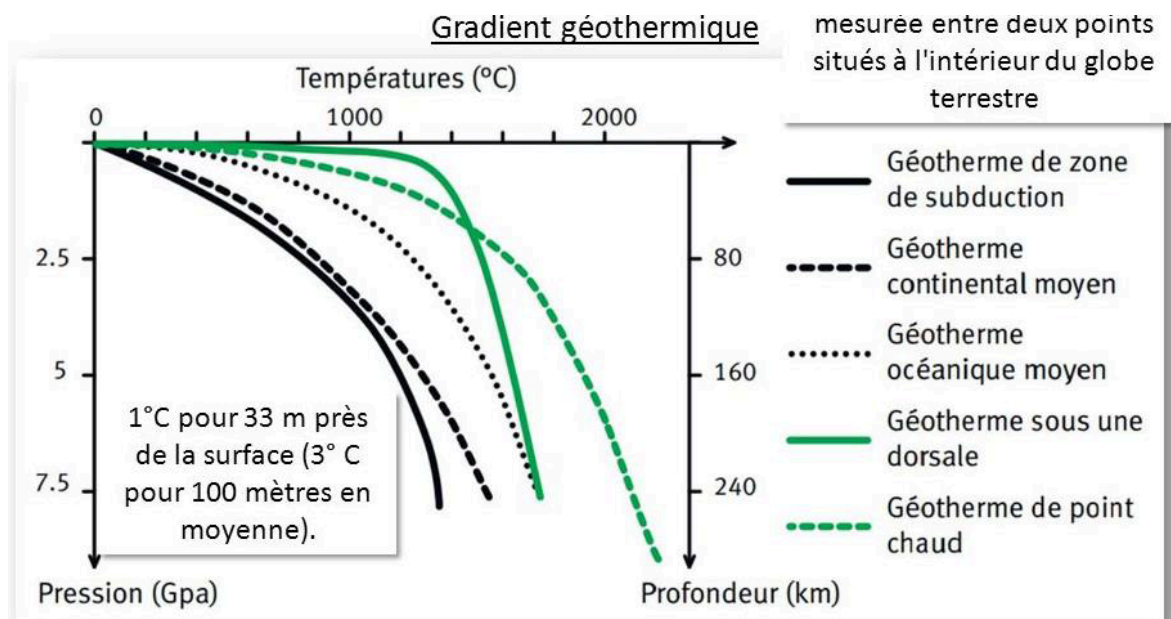
Nucléation (T, P, Composition) → ***Croissance*** (temps)

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

La diffusion à son tour est contrôlée par la température (+ T est élevée ⇒ + la diffusion est efficace. La diffusion est inefficace en dessous de 600°C) ; la déformation implique la formations de plus petits grains ce qui facilite la diffusion ; les fluides facilite également le transport des éléments

1-1- le couple Temperature-Pression

La pression et la température, sans compter le temps et la composition chimique des constituants de la roche, sont les principaux facteurs qui contrôlent leurs modifications physico-chimiques. D'où l'importance de tenir compte du gradient géothermique pour reconstituer les températures en profondeur en s'appuyant sur l'identification des minéraux. Le Gradient Géothermique correspond à l'augmentation de la température depuis la surface vers les profondeurs de la Terre. Cette augmentation est en moyenne de 0,03 °C par m. Mais il existe des zones thermiques où le gradient est irrégulier et peut-être beaucoup plus fort ou plus faible.



1-2- le fluide (H₂O-CO₂, SO₄, NaCl)

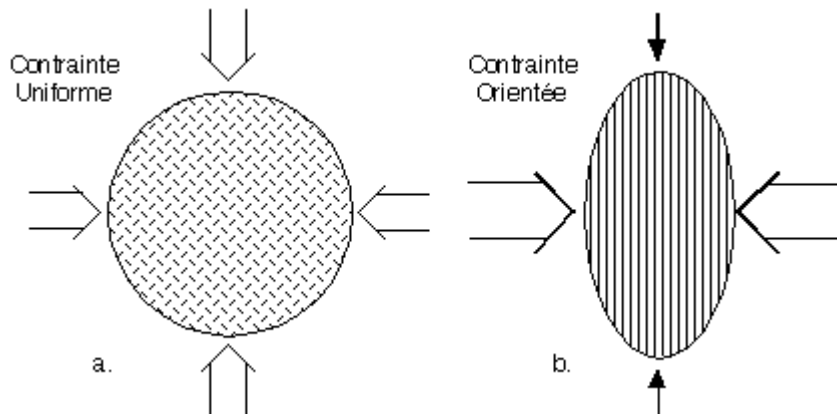
les processus de transformations métamorphiques se faisant à l'état solide par diffusion sont très lents. La présence d'eau (intergranulaire) facilite ce transfert d'éléments et de température et augmente ainsi la vitesse du métamorphisme. De même H₂O et les sels qui sont dissous rentrent eux mêmes dans ces réactions.

Cependant les phénomènes d'enfouissement ont tendance à chasser l'eau de la roche et le métamorphisme à tendance à transformer les minéraux hydratés en minéraux anhydres (amphiboles, micas → pyroxènes) et l'eau est expulsée de la roche ce qui fait que Les roches d'un degré élevé de métamorphisme sont relativement pauvres en minéraux hydratés et en fluides

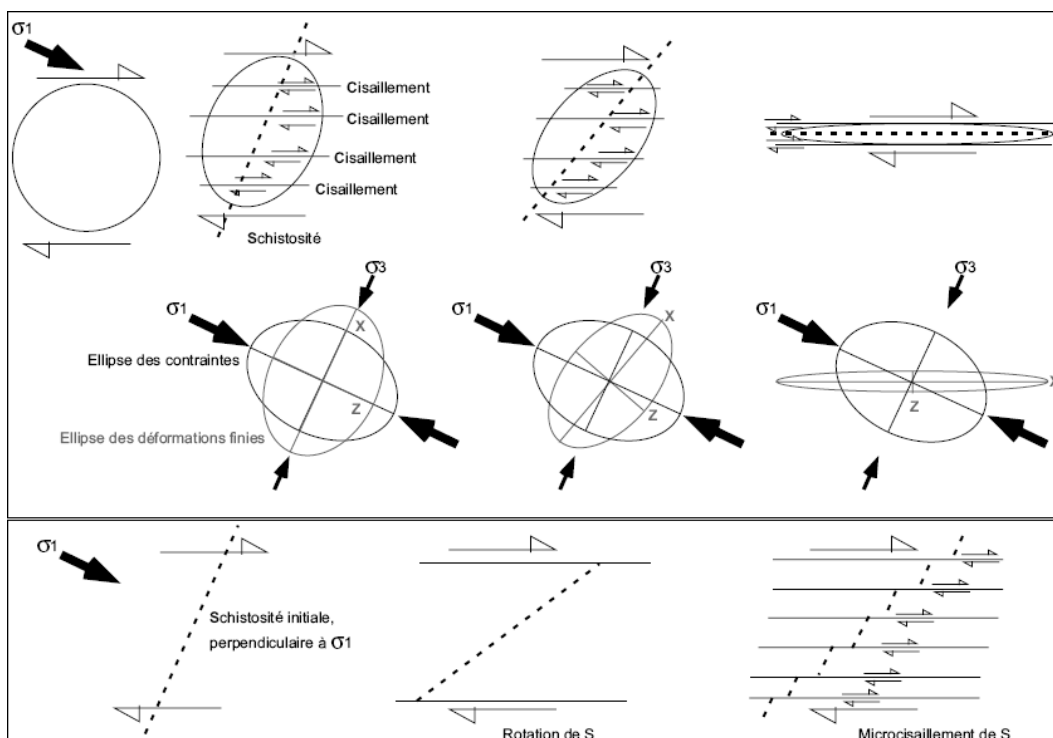
1-3- la contrainte

La déformation de roches est presque toujours associée au métamorphisme. Les roches étant solides, elles peuvent être déformées préférentiellement dans une direction plutôt qu'une autre. On appelle **contrainte orientée**, la différence de pression suivant les directions (voir figure ci-dessous). Les roches ignées cristallisent à partir de liquides et leurs textures sont uniformes car la contrainte ou la pression est égale dans toutes les directions. Les roches

métamorphiques enregistrent souvent les effets d'une contrainte orientée dont les effets sont marqués par la disposition de silicates feuilletés (micas, chlorites) qui s'allongent parallèlement à la direction de contrainte la plus faible. De même la déformation a tendance à réduire la taille des grains ce qui facilite la diffusion.



Comparaison d'une contrainte uniforme (a.) et d'une contrainte orientée (b.) dans la structure d'une roche. Une contrainte orientée provoque la formation d'une structure planaire marquée par l'orientation des minéraux feuilletés (à partir de Skinner et Porter, 1995).



Relations entre contraintes et déformation cas du cisaillement simple

1-4- le temps

Les réactions chimiques impliquent des changements jusqu'à un état d'équilibre (niveau d'énergie le plus bas). La plupart des réactions métamorphiques se font par diffusion et exigent des millions d'années afin d'être complètes. En laboratoire, on peut montrer que les hautes températures et pressions et les temps de réaction importants produisent de gros grains. Nous concluons donc que les roches métamorphiques à gros grains sont les produits de conditions métamorphiques durant beaucoup plus longtemps, probablement plusieurs millions d'années.

2- Les changements métamorphiques

Lorsque la profondeur change, la minéralogie de la roche en est affectée, la taille, l'arrangement, l'orientation et la chimie des grains (les minéraux) sont modifiés : On obtient une nouvelle organisation minérale, et une modification texturale du fond cristallin. Tous ces changements se font à l'état solide.

2-1- Transformations minéralogiques

Au cours du métamorphisme, les minéraux stables dans la roche initiale deviennent instables et subissent des réactions chimiques qui font apparaître de nouvelles associations de minéraux, appelées **paragenèses**

L'évolution du métamorphisme est tracée par l'apparition ou la disparition de minéraux index. On peut tracer des lignes d'iso-apparition ou disparition de ces espèces minérales .

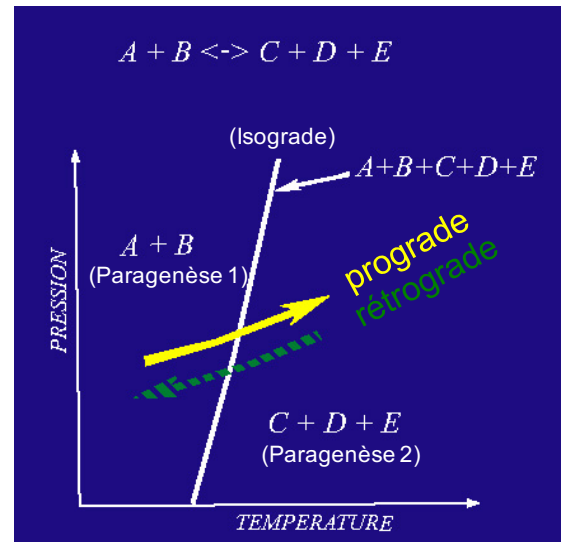
Ces courbes sont appelées **isogrades** (isograde plus (+) signifie l'apparition et isograde moins (-) la disparition).

roche = association stable de minéraux (**A+B**)

Si changement de T et / ou P
association instable

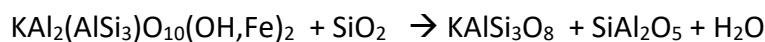
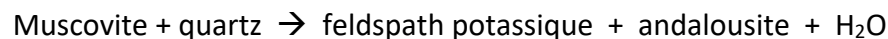
Les minéraux réagissent les uns avec les autres
réactions métamorphiques

Nouvelle association de minéraux (**C+D+E**)



L'évolution de la paragenèse 1 vers la paragenèse 2 est une évolution prograde, alors que l'évolution dans le sens inverse de la paragenèse 2 vers la paragenèse 1 est une évolution rétrograde.

Ex. de réactions métamorphiques:



Dans l'exemple ci-dessus, l'isograde Mu(-) correspond à l'isograde FK(+) et And(+).

Cette réaction est une réaction de déstabilisation de la muscovite en présence de quartz et d'apparition de feldspath potassique et d'andalousite (ainsi que de l'eau).

L'ancienne paragenèse est donc : muscovite + quartz; la nouvelle paragenèse est feldspath potassique et andalousite. La réaction se développe jusqu'à épuisement de l'un des minéraux réactants (muscovite ou quartz; en général le quartz est plus abondant). A la fin, on se retrouve donc avec comme minéraux : feldspath potassique, andalousite (néoformés) et quartz (en excès) ; l'ensemble de ces minéraux forme un **assemblage** (différent de la paragenèse, puisqu'il comprend aussi les minéraux réactants en excès).

Les réactions métamorphiques sont très variées et peuvent être classées de plusieurs façons :

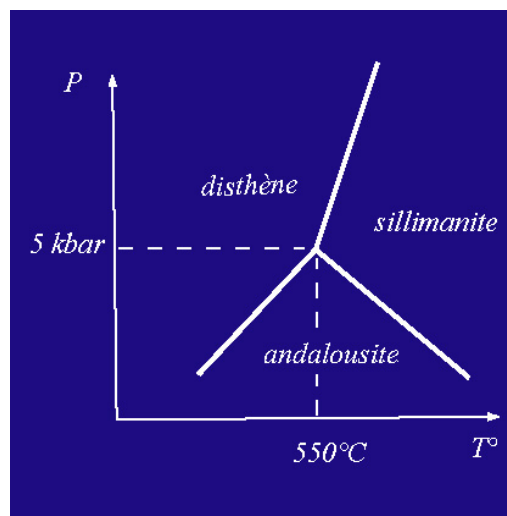
- Les réactions ou transformations **polymorphiques** sont des modifications de la structure d'un minéral sans changement de sa composition minéralogique : c'est le

cas des silicates d'alumine (alumino-silicates) de formule générale SiAl_2O_5

Andalousite (SiAl_2O_5)

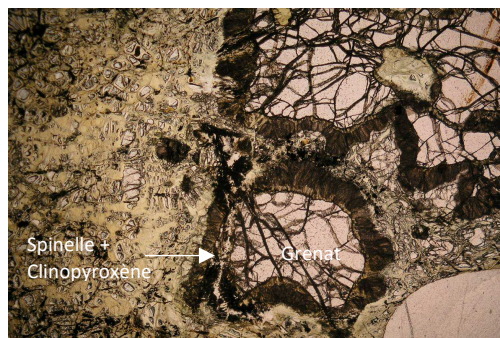
disthène (SiAl_2O_5)

sillimanite (SiAl_2O_5)



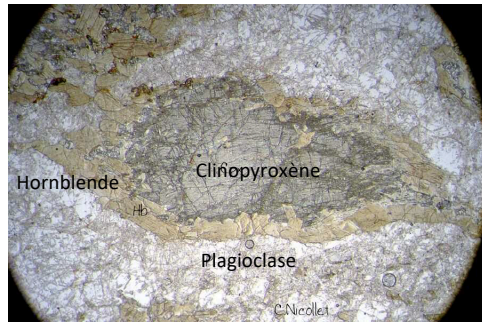
- Réactions **isochimiques** : changement de minéraux mais la chimie globale de la roche est conservée

exemple : Grenat \rightarrow Spinelle + Clinopyroxène



- Réactions **non isochimiques** (ou métasomatiques) : modification de la chimie de la roche par un apport d' H_2O

exemple : Plagioclase + Clinopyroxène + H_2O \rightarrow Hornblende



On peut également parler de :

- **Réactions sans intervention de fluide dans le bilan chimique:**

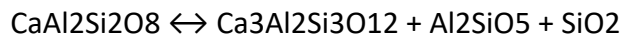
- Réactions de transfert : elles correspondent à un transfert de matière d'un site à l'autre des réactants vers les produits en ne concernant que des phases solides.

Exemples : albite (plagioclase) \leftrightarrow jadéite (clinopyroxène) + quartz



anorthite \leftrightarrow grenat + disthène + quartz

(évolution en hautes pressions de l'anorthite)



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

Exemples : quartz α \leftrightarrow quartz β

calcite \leftrightarrow aragonite

graphite \leftrightarrow diamant (diamant phase de profondeur du C dans le manteau)

transitions de l'olivine dans le manteau

andalousite \leftrightarrow sillimanite

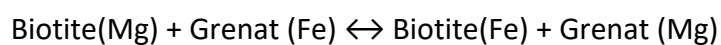
↙ ↘
disthène (kyanite)

système des silicates d'alumine)

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.

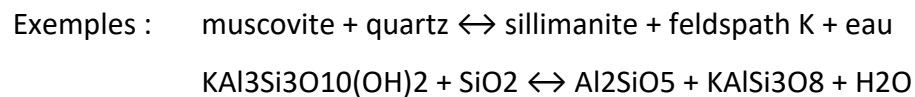
- Exemple : Fe – Mg entre grenat et biotite :



- **Réactions avec intervention de fluide dans le bilan chimique :**

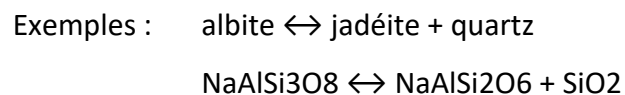
➤ Réactions impliquant l'entrée d'eau « externe » aux réactifs comme les réactions hydrothermales (Cela est bien sur le cas du métamorphisme hydrothermal au voisinage des dorsales océaniques avec intervention d'eau de mer, mais il peut s'agir aussi de réactions se déroulant en profondeur dans la croûte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

➤ Réactions impliquant la libération d'eau dans des processus de déshydratation...



ou encore les réactions de déshydratation des minéraux ferromagnésiens de la croûte océanique lors de son enfouissement en subduction...

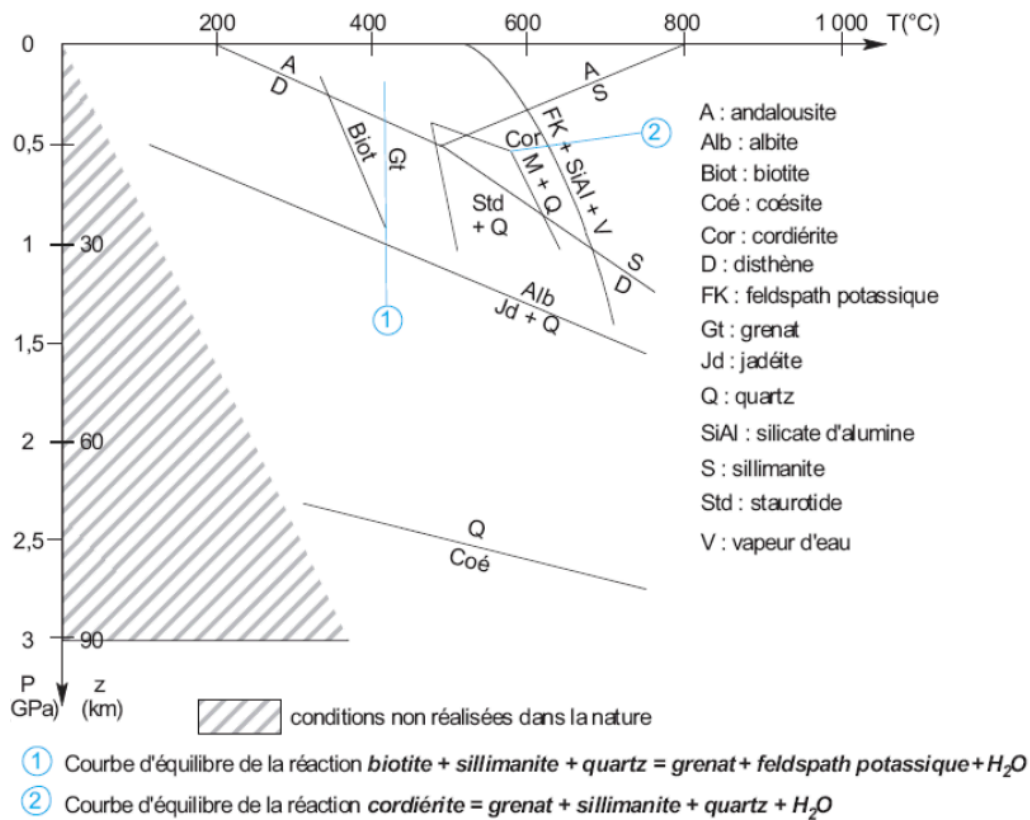
➤ Réactions par transfert : elles correspondent à un transfert de matière d'un site à l'autre des réactants vers les produits en ne concernant que des phases solides.



Deux isogrades successifs délimitent une zone métamorphique. Dans le sens croissant du métamorphisme on note par exemple une évolution allant de :

zone à chlorite \rightarrow zone à biotite \rightarrow zone à cordiérite \rightarrow zone à andalousite \rightarrow zone à sillimanite

chaque minéral est stable dans un domaine de pression température donné. Ces minéraux sont qualifiés de minéraux index puisque ils indiquent des conditions de T/P bien déterminés exemple des aluminosilicates Al_2SiO_5 .



2-2- Modifications chimiques

Si la paragenèse de la roche métamorphique est identique en terme de chimisme avec le la roche de départ, on parle de métamorphisme isochimique. A l'inverse, s'il y a des variations de chimisme par perte d'eau ou de constituants chimiques, alors on parlera de métamorphisme allochimique. Le phénomène lié à cette modification chimique est appelée métasomatose.

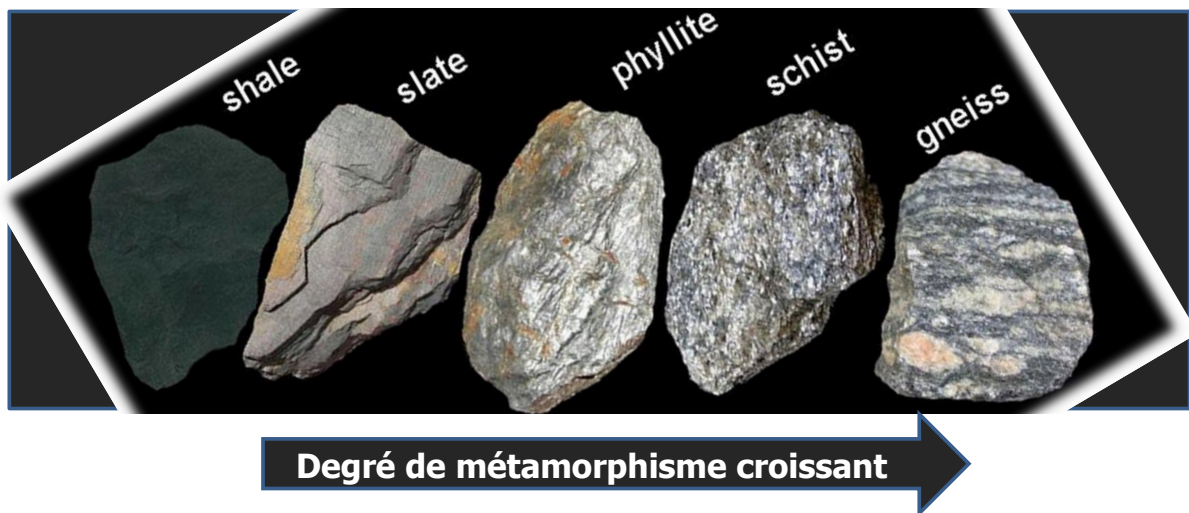
2-3- Réponses structurales

La plupart des roches métamorphiques sont produites dans un champ de contrainte orientée. Dès que le métamorphisme débute, les minéraux feuilletés commencent à croître. Ils s'allongent perpendiculairement à la direction de la contrainte maximale et produisent une structure planaire appelée **foliation**. Les trois types majeurs de foliation dans les roches métamorphiques sont:

1. **clivage ardoisier** - caractéristique d'un faible degré de métamorphisme dans les roches métasédimentaires. La contrainte est due au poids des roches au-dessus et la roche se casse en feuilles parallèles le long du clivage ardoisier.

2. **schistosité** - caractéristique d'un métamorphisme de degré intermédiaire et élevé dans les roches métasédimentaires et les metabasaltes. Les minéraux métamorphiques sont visibles à l'oeil nu et la foliation n'est pas strictement plane, mais sinueuse.

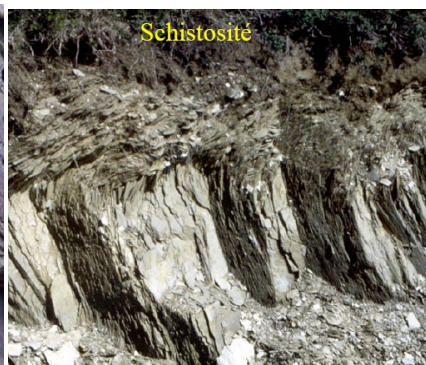
3. **gneissosité** - caractéristique d'un degré élevé de métamorphisme dans les roches métasédimentaires et les métagranites. Les minéraux majeurs se trouvent dans les couches séparées (quartz/feldspath vs. biotite).



clivage ardoisier
faible degré



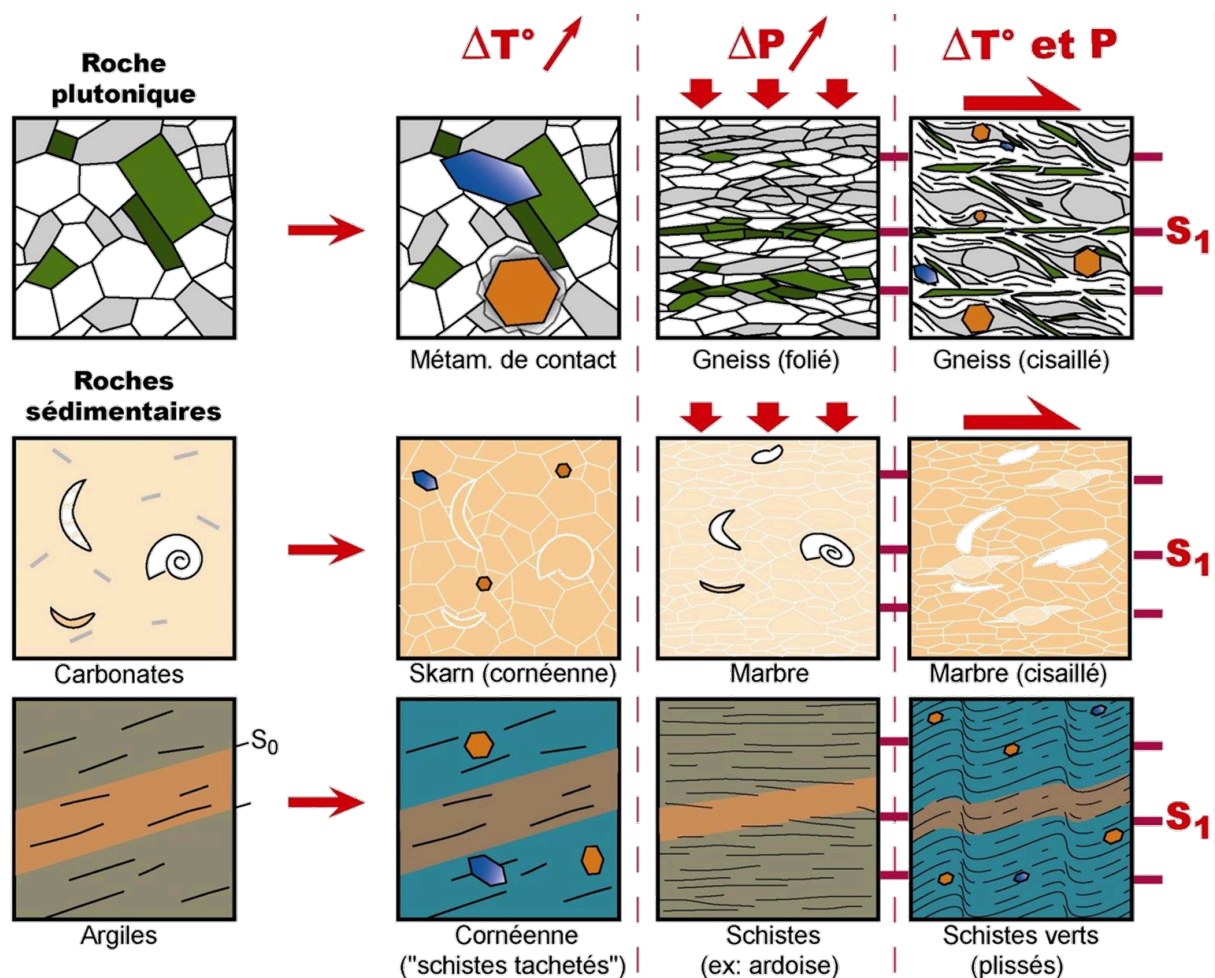
schistosité
Degré intermédiaire et élevé



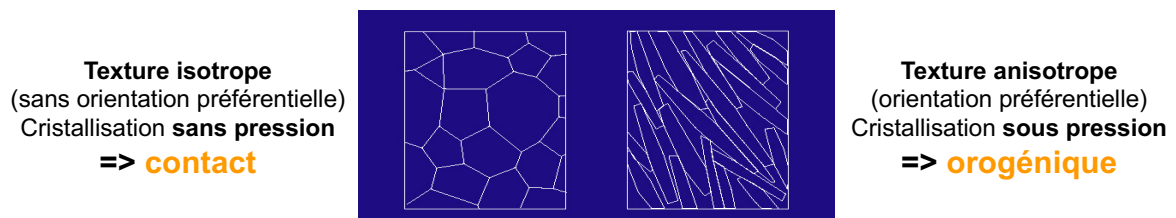
gneiss
degré élevé



Associé à ce changement structural, il se développe une suite bien spécifique de minéraux qui deviennent des indicateurs du degré de métamorphisme qu'a subit la roche.



La texture isotrope caractérise les roches magmatiques ou le métamorphisme de contact et la texture anisotrope est associée à la déformation et au métamorphisme.



IV- Les systèmes de classification et de nomenclature

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

Nature du protolithe :

- Métagranite
- Métabasalte
- Métasédiment
- Métapélite
- ...

Structure de la roche :

- Micaschiste
- schiste bleu
- schiste vert
- gneiss ocellé
- ...

Composition minéralogique :

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

A partir de la paragenèse résultant du métamorphisme, il est possible dans des cas de remonter à la roche originelle (protolithe = roche mère), avant que celle-ci ait subi des transformations minéralogiques. Malheureusement, peu de roche présente encore, après le métamorphisme, des critères surs pour identifier la roche mère ou protolithe.

Lorsqu'une roche métamorphique correspond à une simple transformation sans apport extérieur on la nomme **ectinite** (du grec tension). La classification des roches métamorphiques est complexe car il n'existe pas, comme pour les roches magmatiques, de classification génétique qui rendrait compte du mode de genèse. Les termes micaschiste ou gneiss ne sont que descriptifs.

roches sédimentaires + métamorphisme → **para-ectinites**,

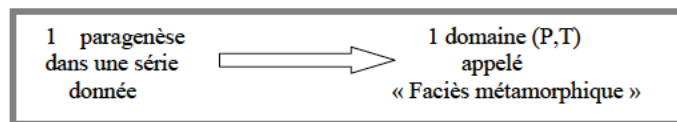
roches ignées + métamorphisme → **ortho-ectinites** .

Ainsi, selon la roche d'origine qui donne par exemple gneiss après métamorphisme, on parlera de para-gneiss c'est la roche d'origine est sédimentaire ou orthogneiss s'elle est magmatique.

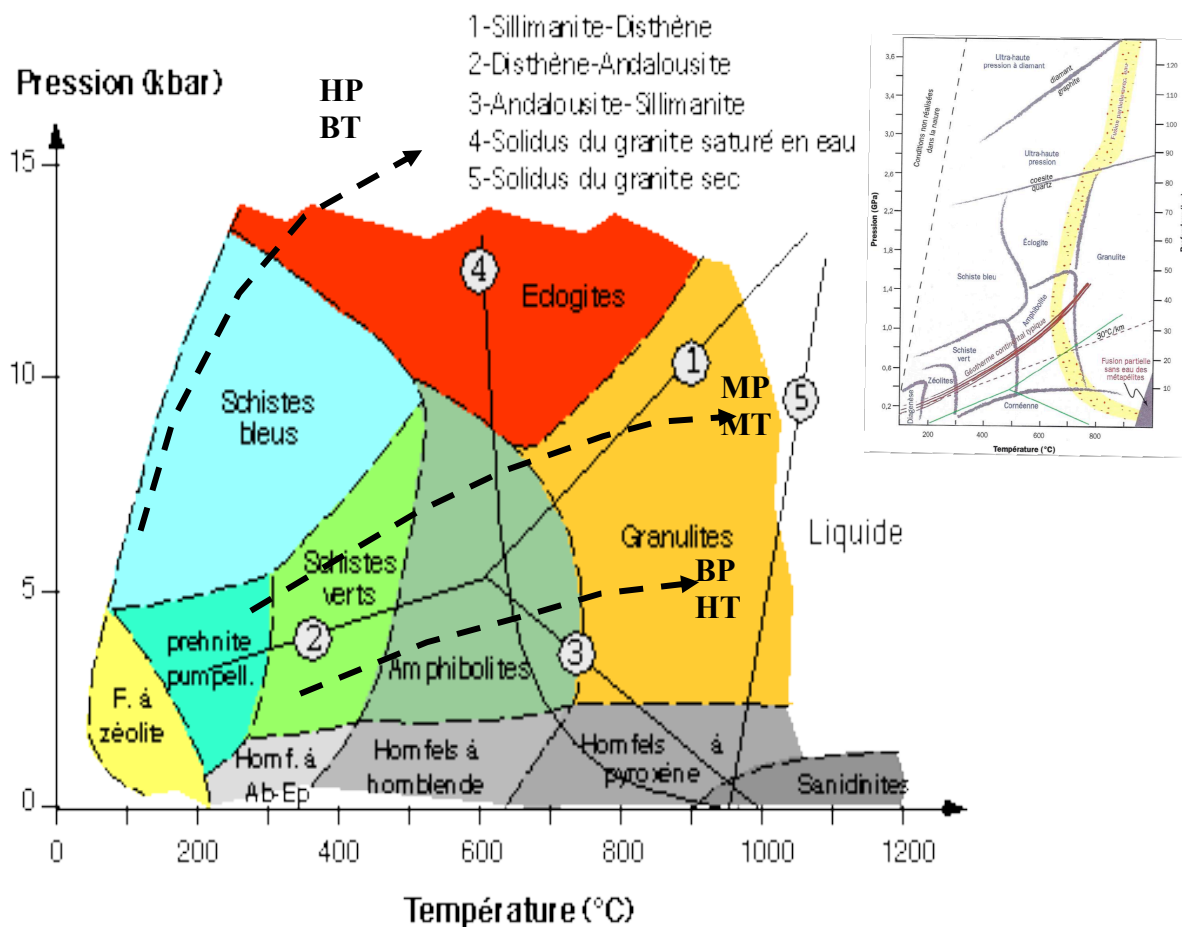
1- Faciès métamorphiques

Une classification universelle a été proposée par Eskola en fonction du couple P/T, ce sont les **faciès métamorphiques**. Ces faciès ont été établis à partir de la série basique ou la variété minérale est plus grande.

Un **faciès métamorphique** regroupe les paragenèses minérales caractéristiques d'un domaine pression-température déterminé.



Les principaux faciès métamorphiques sont présentés dans la figure ci-dessous. Les droites de stabilité des aluminosilicates sont représentées; le point triple ou les trois droites se recoupent est approximativement à 600°C et 5 kbar.



Graphes représentant les différents faciès métamorphiques et leur domaine P/T. Les trois traits gras et discontinus correspondent aux trois différents climats métamorphiques : HP/BT, MP/MT, BP/HT (voir texte pour explication).

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

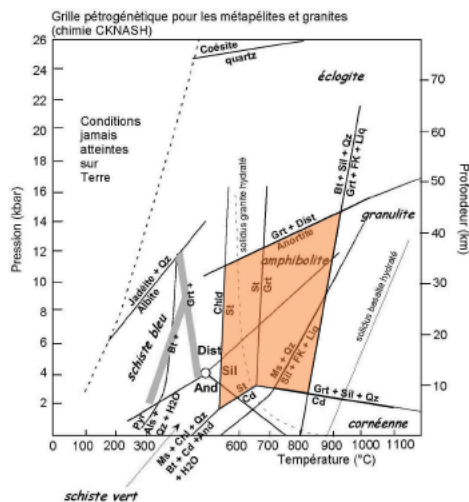
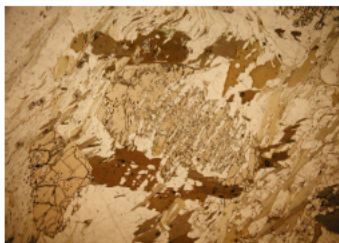
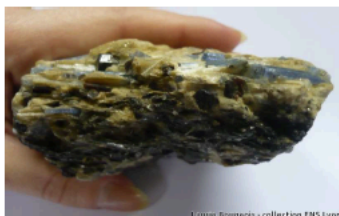
- par son assemblage minéralogique caractéristique, en fonction bien sûr de la série (par exemple Glc + Lws pour le faciès SB des roches basiques) ;
- par l'utilisation des courbes $P = f(T)$ qui caractérisent les réactions définissant les frontières des faciès (par exemple la réaction : muscovite +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

	roches basiques	roche pélitiques
Schistes verts	Chlorite, Albite, Actinote , Épidote	Biotite , Muscovite, Chlorite, Chloritoïde
Amphibolites	Plagioclase, Hornblende	Biotite, Muscovite , Staurotide , Grenat, Al_2SiO_5
Granulites	Plagioclase, Clinopyroxène, Orthopyroxène	Biotite, Grenat, Cordiérite, Al_2SiO_5
Schistes bleus	Glaucothane, Épidote, Chlorite, Lawsonite	Muscovite, Chlorite, Chloritoïde, Grenat
Éclogites	Grenat , Omphacite	Grenat, Muscovite, Disthène

Tableau de comparaison des paragenèses minérales entre roche basiques et pelitiques portées aux différents faciès métamorphiques.

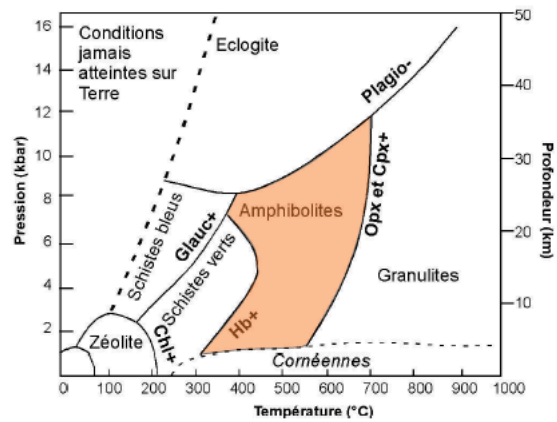
Exemple Faciès des amphibolites - Série alumineuse

Staurotide + Disthène + Biotite



Exemple Faciès des amphibolites - Série basique

Hornblende + Epidote + Plagioclase + Grenat



L'appartenance d'une roche à un faciès donné n'implique pas que cette roche doit avoir la composition de la référence basique. Exemple :

un basalte porté à 6kb /550°C devient une amphibolite (hornblende + plagioclase) → faciès amphibolites

mais un gneiss à 2 micas, plagioclase, qz, Fk appartient aussi à ce faciès sans contenir d'amphibole.

L'identification de ces faciès métamorphiques permet de tracer une évolution régulière dans le diagramme P-T: on parle de gradient métamorphique.

On peut aussi distinguer les différents faciès selon la température et la pression qui sont donnés grâce aux courbes limites :

Le faciès BT / BP : la zéolite (de Nouvelle-Zélande).

Le faciès +BT / +BT : schistes green (au départ des zones de subduction).

Le faciès HP : amphibolite.

Le faciès HP, BT : granulite (en base de croûte pour les roches anhydres).

Le faciès HP : schistes bleus (éclogites).

Le faciès éclogite affecte uniquement les basaltes (plancher océanique). Ces faciès sont caractérisés par leur paragenèse (Ky/ And/ Sil).

2- Climats métamorphiques

Cette classification a été introduite par Miyashiro au cours des années soixante à partir de l'étude des ceintures métamorphiques de l'arc japonais. Les variations relatives de pression et température permettent de définir des climats métamorphiques qui correspondent à des conditions de P/T particulières (voir figure ci-dessus) associées à un contexte géodynamique déterminé. Selon les gradients de pression et température on distingue :

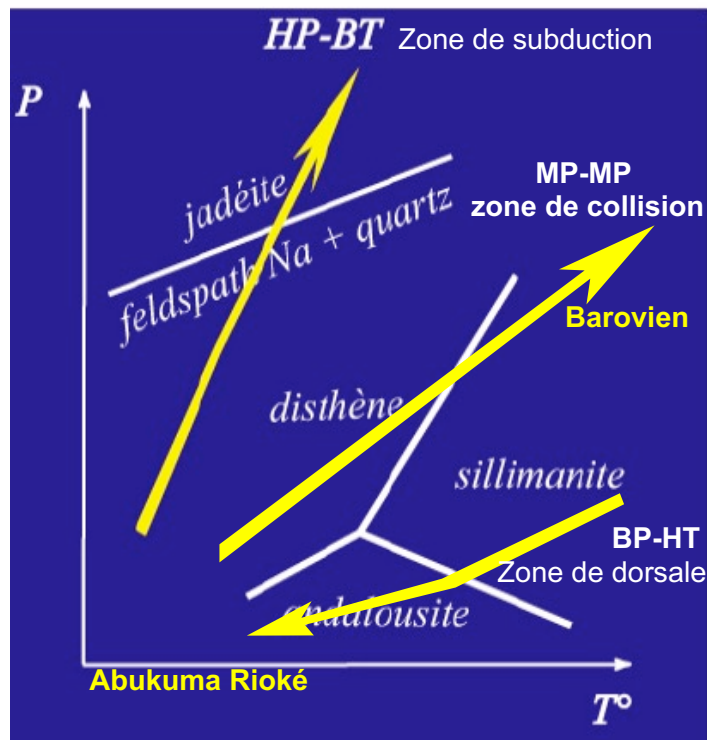
- **Le climat BP-HT** (basse pression haute température) : le **gradient géothermique est fort (50-55°C/km)**, la température croît très vite même pour une faible profondeur. Ce climat aboutit à une série dite de type **Abukuma-Rioké** (du nom du plateau japonais) avec des minéraux caractéristiques **andalousite-sillimanite**.
(Zone de détente post-collisionnel ou métamorphisme hydrothermal des rides médio-océaniques)
- **Le climat MP-MT** (moyenne pression moyenne température) : **gradient géothermique moyen (30-35°C/Km)** c'est le type **Barovien** qui aboutit souvent à l'anatexie. Les minéraux caractéristiques sont **disthène-sillimanite**.
(tectonique de type zone de collision)
- **Le climat HP-BT** (haute pression basse température) : **gradient géothermique faible (<20°C/Km)**, la pression croît sans élévation notable de la température. On obtient des schistes bleus (**lawsonite, glaucophane, amphibole bleu**) et on n'aboutit jamais à l'anatexie.
(Tectonique de zone de subduction)

Une roche évoluera différemment suivant le climat : par exemple un basalte deviendra successivement :

Schiste vert → amphibolite → granulite sous un climat MP-MT

Schiste bleu → éclogite en climat HP-BT.

Climats métamorphiques



Basse pression -
Haute température

Basse pression -
Haute température

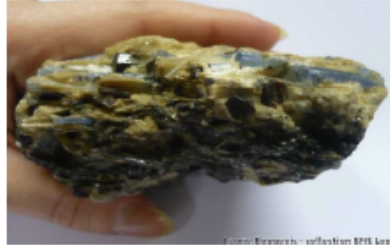


Cornéenne à andalousite



Skarn (Mexique)

Moyenne pression - Moyenne température



Amphibolite à disthène
et staurotide

Basse à moyenne pression Haute température



Granulite (grenat, disthène)

Haute pression - Basse température

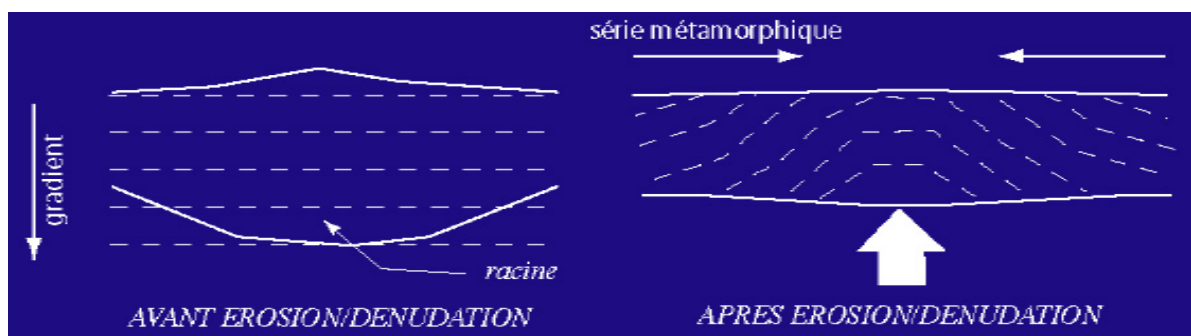


Schiste bleu (glaucophane,
épidote, grenat)

3- Séries ou (séquence) métamorphiques

On appelle **série** ou **séquence**, l'ensemble des roches métamorphiques, issu d'un même type de roche initiale caractérisé par une certaine composition chimique moyenne et ayant subi des degrés variables de métamorphisme. Le tableau suivant illustre les grands types de série métamorphiques.

----- Métamorphisme croissant ----->		
Séquences	Roches initiale	Roches métamorphiques
Pélitique	pélites, argiles	schistes -> micaschistes->gneiss ->leptynites
arénacée	grès, arkoses	quartzites ->gneiss->leptynites
calcaropélitique	marnes	micashistes à mx->amphibolites ->pyroxénites
carbonatée	calcaires et dolomites	calcshistes->marbres->cipolins
granitique	granitoïdes et laves analogues	(protogine) -> gneiss -> leptynites (=granite chloritisé à texture schisteuse)
basique	diorite, gabbros, basaltes	schistes->prasinites->amphibolites->pyroxénites

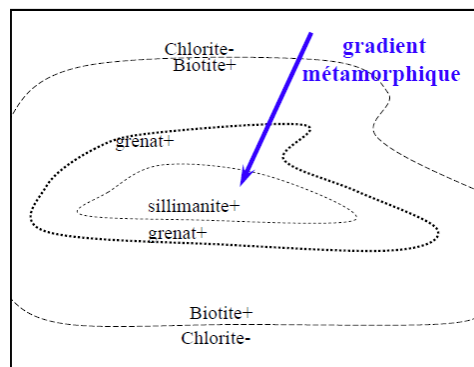


Gradients ou climats

des conditions de P/T particulières associées à un contexte géodynamique déterminé.

Série ou séquence

Ensemble de roches de même composition chimique se trouvant le long d'un gradient métamorphique



V- Différents types de métamorphismes en fonction des situations géodynamiques.

5-1- Diagenèse d'enfouissement.

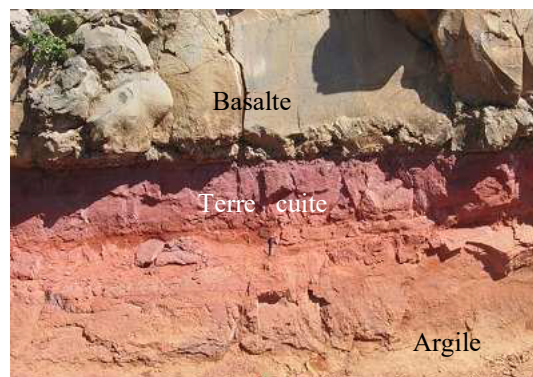
Les sédiments compactés éliminent l'eau interstitielle. Le gradient de température est faible et est de 10° par km. C'est un métamorphisme HP. Il y a enfouissement par subsidence et accumulation importante (au-dessus) (exemple, le golfe du Mexique). On peut arriver jusqu'à 20km de profondeur de sédiments !. A 20 km de profondeur, la pression est d'environ 5,5kBar. On est dans le faciès prehnite (et parfois, schistes bleus).

5-2- Métamorphisme de subduction.

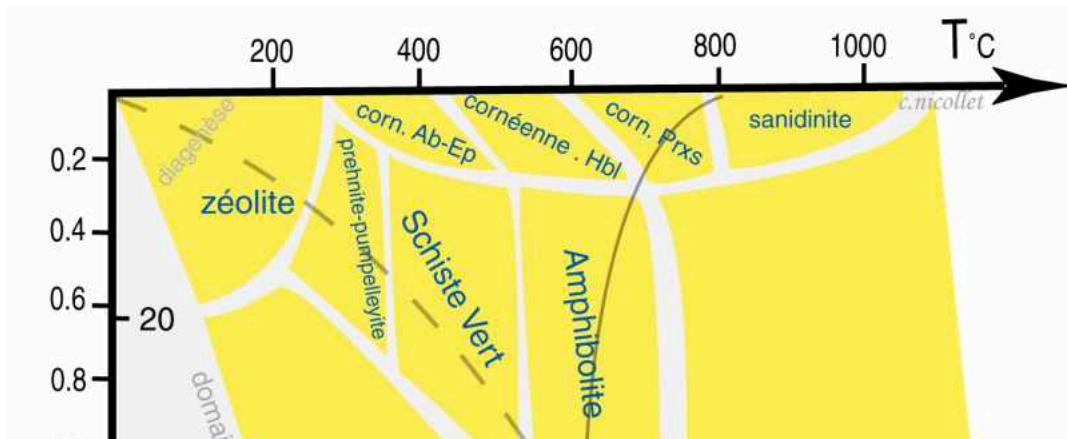
Les plaques subduites s'enfoncent dans la subduction à haute pression (sédiments océaniques et basaltes) et il va y avoir formation de zéolite et de schistes bleus (parfois, de schistes verts) et d'éclogite.

5-3- Métamorphisme de contact.

Ce métamorphisme se développe autour des masses magmatiques intrusives. Il y a une auréole métamorphique. L'importance de cette auréole dépend de la masse magmatique intensive. Le métamorphisme dans l'auréole est croissant quand on se rapproche du magma. Le métamorphisme est indépendant des structures de l'encaissant : c'est un métamorphisme thermique.



Un faciès caractéristique est le faciès de cornéennes de type amphibolite. L'épaisseur de l'auréole dépend du magma : elle peut aller de 0,5 à 1 km. Si le filon magmatique est d'environ 1 mètre, l'auréole ne sera que de quelques centimètres.



5-4- Métamorphisme général ou régional.

Ce type de métamorphisme a lieu à la base de la croûte, sous les chaînes de montagnes. Il y a intervention de la pression et de la température.

5-5- Migmatisation et anatexie.

Lorsque la roche arrive à des hautes profondeurs avec de hautes températures et de hautes pression la fusion commence.

La courbe d'anatexie indique les conditions au-delà desquelles les roches commencent à fondre en produisant un magma de composition granitique : les roches subissent une fusion partielle. Ces roches, appelées migmatites ou anatexites, sont formées de l'alternance de niveaux clairs (magmatiques granitiques) et de niveaux sombres (métamorphiques). Certains faciès métamorphiques existent au-delà de cette courbe d'anatexie : la courbe en question n'a pas une position fixe dans l'espace P-T. Elle dépend de la composition des roches, mais surtout de la nature et de la pression partielle des fluides (H₂O, CO₂, ...).

Exemple d'étude :

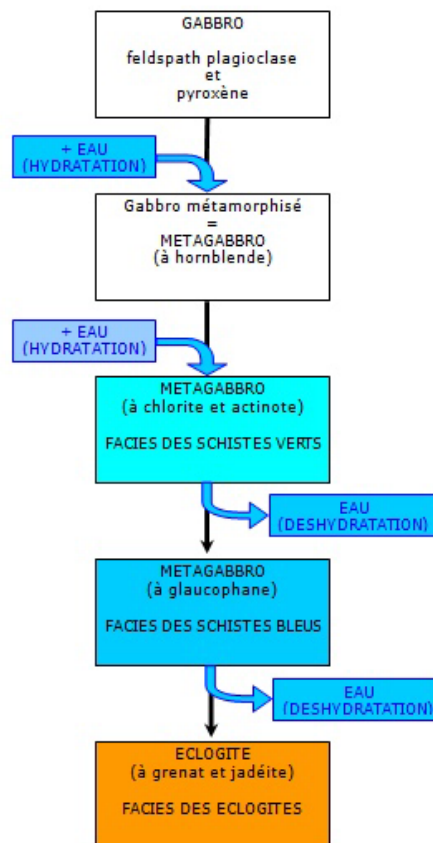
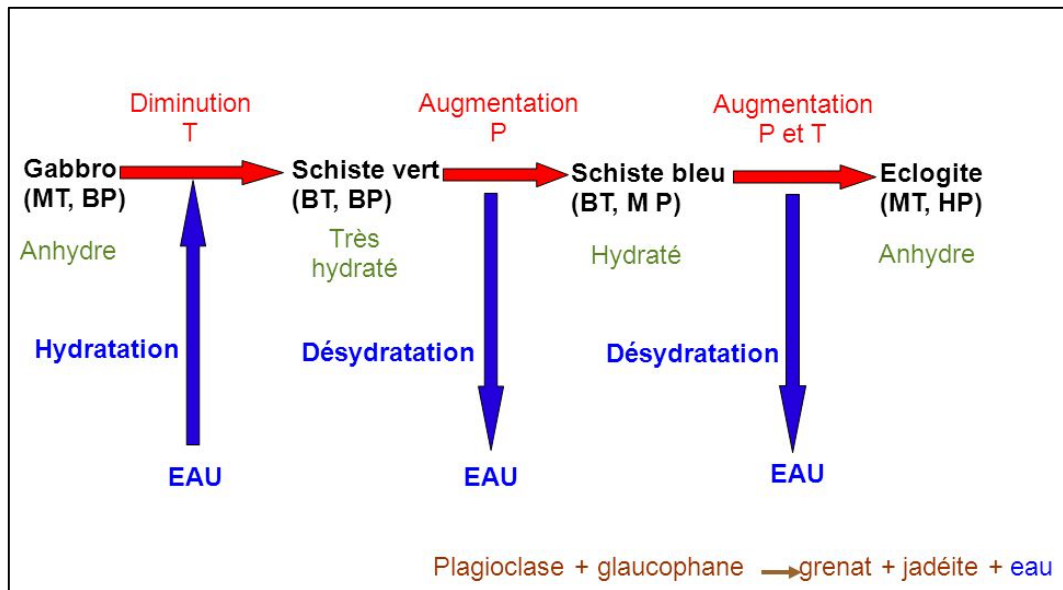
Bilan du métamorphisme d'une zone de subduction :

La lithosphère océanique est créée au niveau d'une dorsale, et plus on s'éloigne de celle-ci, plus la lithosphère devient âgée. En s'éloignant, la lithosphère s'épaissit, et voit sa densité augmenter (bien que la croûte océanique reste d'épaisseur constante). Au bout d'un certain temps, sa densité devient trop importante, ce qui entraîne une subduction.

Le moteur majeur du métamorphisme est l'eau : l'océan présent au-dessus de la lithosphère océanique. En effet, cette eau vient hydrater les roches en réagissant avec l'olivine et le pyroxène elle crée ainsi de nouveaux minéraux : **La serpentine** est un minéral de la famille des phyllosilicates (ou silicate lamellaire). Sa formule chimique est $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, l'Olivine de formule chimique Mg_2SiO_4 on voit bien qu'il y a eu un apport d'eau H_2O .

L'hydratation et le refroidissement étant progressifs, de nouveaux minéraux se forment : la **hornblende** qui provient de l'hydratation de plagioclase et du pyroxène du gabbro ainsi que l'**actinote** et la **chlorite** (on est dans *le faciès Schistes verts*).

Lorsque la lithosphère océanique est très dense, elle finit par subduire et cette subduction entraîne une augmentation de la pression au sein des roches. Comme la lithosphère s'enfonce plus vite qu'elle ne se réchauffe, la pression augmente plus vite que la température. Ce phénomène engendre de nouvelles réactions métamorphiques avec déshydratation et en l'occurrence la création d'un nouveau minéral, le **glaucophane** (*faciès schistes bleus*). Ce dernier sous l'effet de la pression qui continue à augmenter va libérer de l'eau en profondeur, pour donner d'autres minéraux la **jadéite** et le **grenat**, deux autres produits du métamorphisme (*faciès Éclogites*). A cette profondeur, la libération d'eau, et plus précisément d'ions hydroxyles, hydrate le manteau sous-jacent et permet sa fusion partielle. Ainsi, le métamorphisme de la plaque qui subduit est couplé à un éventuel magmatisme de la plaque chevauchante.



Les faciès placés dans un diagramme P/T donnent le chemin du métamorphisme de subduction.

Diagramme Pression Température

