

Chapitre 2 : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

Introduction :

Le métamorphisme est l'ensemble des modifications minéralogiques et texturales d'une roche préexistante, à l'état solide et sous l'effet de la température, et de la pression, il donne des roches métamorphiques.

- **Quelles sont les caractéristiques des roches métamorphiques ?**
- **Quelles sont les conditions de la formation des roches métamorphiques? Et quelle est sa relation avec les chaines de montagnes ?**

I. Les caractéristiques minéralogiques et structurales des roches métamorphiques des zones de collision :

1. Observations de rches métamorphiques dans les chaines de collision :

a Carte géologique simplifiée de la région d'Uzerche (France)

Cette région présente une partie des affleurements des roches métamorphiques de la série du bas Limousin. Elle est caractérisée par la présence de batholites de granite et de diorite qui accompagnent une série de roches métamorphiques.

Légende

Roches métamorphiques

1. Schistes et micaschistes
2. quartzites sombres
3. Gneiss gris du bas Limousin
4. Gneiss clairs
5. Eclogites

Roches magmatiques

6. Granite
7. diorite

b Des roches métamorphiques des zones de collision (Les roches R₁, R₂ et R₃ Indiquées sur la carte)

Schiste vert (R₁) : roche à structure schisteuse caractérisée par la chlorite (minéral vert).

Micaschiste (R₂) : roche qui brille dont les minéraux forment des lits fins ce qui donne à la roche un aspect folié (foliation) simple à cliver.

Gneiss (R₃) : roche non clivable, avec une alternance de lits clairs et de lits sombres.

c Deux structures du métamorphisme : La schistosité et la foliation

Schistosité : Feuilletage (distinct de la stratification) présenté par des roches sous l'influence de contraintes tectoniques, et selon lequel elles peuvent se débiter en lames.

S1 : plan de schistosité
S0 : plan de stratification
Plan axial

Foliation : est une structuration en plans distincts des roches métamorphiques. La structure est marquée par l'orientation préférentielle de minéraux visibles à l'œil nu. Il y a le plus souvent une différenciation pétrographique nette.

Plan de foliation
Pression tectonique
Cristaux étirés

- 1- Décrivez la répartition des roches métamorphiques dans la région d'Uzerche.
- 2- Dégagez à partir du doc b et c les caractéristiques structurales des roches métamorphiques.

1- Dans cette chaîne de collision, il y a affleurement des roches métamorphiques sur un large étendue, et elles s'imbriquent avec des roches magmatiques.

2- On observe que les roches métamorphiques ont des structures :

- Le schiste se caractérise par sa structure schisteuse (minéraux alignés).
- Le micaschiste et le gneiss se caractérisent par une structure en foliation (recristallisation et réorganisation des minéraux en bondes claires et bondes sombres)

2. Structure microscopique et composition minéralogique des roches métamorphiques :

a Observation au microscope polarisant de roches métamorphiques (schiste, micaschiste et gneiss)

Three photomicrographs showing the microstructures of different metamorphic rocks under polarized light. The left image shows a schist with a distinct foliation and mineral lineations. The middle image shows a micaschist with large, elongated mica flakes (biotite) and quartz. The right image shows a gneiss with alternating layers of dark minerals (mica) and light-colored quartz and feldspar.

Lame mince d'un schiste vert avec schéma interprétatif : on y trouve des minéraux de séricite à couleurs chaudes et du chlorite de couleur verte.

Lame mince d'un micaschiste avec schéma interprétatif : on y trouve des lits de biotite et de mica et des lits de quartz à couleurs éteintes.

Lame mince d'un Gneiss avec schéma interprétatif : Il est formé principalement par l'alternance de minéraux sombres (mica) et de lit clairs de quartz et de feldspaths,

b1 Composition chimique de quelques roches métamorphiques et formules chimiques de quelques minéraux qu'ils composent.

| Eléments chimiques | Roches métamorphiques | | |
|--------------------------------|-----------------------|-------------|--------|
| | Schiste | Micaschiste | Gneiss |
| SiO ₂ | 60,2 | 60,9 | 68,7 |
| Al ₂ O ₃ | 20,9 | 19,1 | 16,2 |
| Fe ₂ O ₃ | 2,8 | 1,2 | 0,7 |
| FeO | 3,7 | 4,1 | 4,1 |
| MgO | 0,85 | 1,4 | 1,3 |
| CaO | 0,55 | 1,7 | 1,8 |
| Na ₂ O | 2,45 | 2,1 | 3,8 |
| K ₂ O | 4,1 | 3,7 | 3 |

b2 Quelques minéraux de silicates d'alumine² des roches métamorphiques et leurs formules chimiques : ces minéraux sont caractérisés par leur composition chimique générale Al₂SiO₅ d'où leur nomination de silicates d'alumine

| Minéraux | Formule chimique |
|-------------|---|
| Plagioclase | (Na,Ca)(Si,Al ₃)O ₈ |
| Augite | (Ca,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₂ O ₆ |
| Epidote | Ca ₂ FeAl ₂ (Si ₂ O ₇) ₂ (O,OH) |
| Glaucophane | Na ₂ (Mg,Fe ²⁺) ₃ Al ₂ Si ₃ O ₂₂ (OH) ₂ |
| Jadéite | Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₂ |
| Grenat | (Fe, Mg, Ca) Si ₃ Al ₂ O ₁₂ |

- 1- Comparez les microstructures et la composition des 3 roches.
- 2- Dégagez le caractère commun des roches métamorphiques et proposez une hypothèse sur leur origine.

- 1- **Le schiste vert** est une roche qui a gardé le litage sédimentaire, elle présente des minéraux de chlorite et de séricite orientés mais sans foliation.
- **Le micaschiste** est une roche métamorphique dont les minéraux (biotite muscovite et quartz) forment des lits fins ce qui donne à la roche un aspect folié simple à cliver.
- **Le gneiss** est une roche fortement métamorphisée, non clivable, formée d'une alternance de lits sombres (mica) et de lits clairs (feldspath et quartz).
- 2- Ces roches ont la même composition chimique générale (silicates d'alumine), donc elles ont la même origine (roche mère) et elles ont subi des conditions différentes de pression et températures.

Les roches argileuses ont la même composition chimique de ces roches métamorphiques, donc on peut supposer que ces dernières sont le résultat de transformation des roches argileuses soumises à des conditions de T et P croissantes.

II. Les caractéristiques minéralogiques et structurales des roches métamorphiques des zones de subduction :

1. Les ophiolites métamorphisées des Alpes :

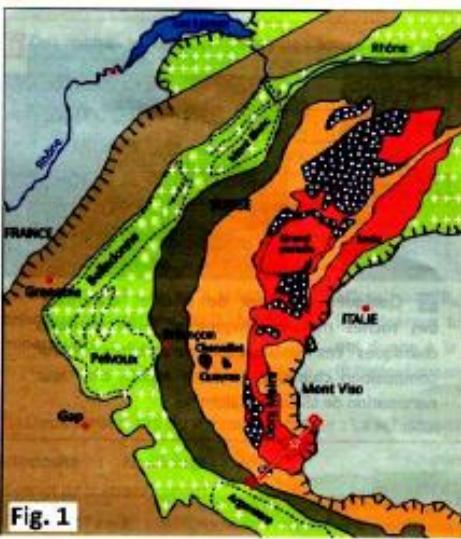
Document N° 01

a Affleurement des roches métamorphiques dans une chaîne de montagnes



Les ophiolites subissent des transformations lors de leur enfouissement dans les zones de subduction, ce qui conduit à la formation des roches métamorphiques. L'observation de ces roches n'est possible que dans des affleurements ophiolitiques des anciennes zones de subduction comme les chaînes de collision ou bien les chaînes d'obduction.

b Carte géologique simplifiée de la chaîne des Alpes (figure 1) avec coupe géologique selon l'axe AB (figure 2):

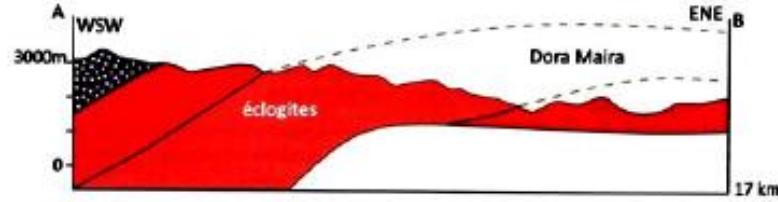


Dans cette région de la chaîne des Alpes, les roches du plancher océanique (ophiolites) sont métamorphisées à des degrés différents allant du faible degré à l'ultra-haute pression.

Fig. 1

bassins marginaux du domaine alpin
limites du domaine plissé de la chaîne alpine
couches plissées non métamorphisées
ophiolites métamorphisées
métamorphisme de faible degré
domaine des schistes verts
domaine des schistes bleus à glaucophane
domaine des éclogites
domaine ultra-haute pression

Fig. 2 coupe géologique selon l'axe AB



3000m
0
WSW
ENE
Dora Maira

1- Décrivez la répartition des roches métamorphiques dans cette région.

Dans la chaîne des Alpes (chaîne de collision) on observe des affleurements des roches métamorphiques de différents degrés de métamorphisme (schiste vert, schiste bleu, éclogite) sous forme de bandes parallèles. Ces roches métamorphiques qui appartiennent au plancher océanique témoins d'une ancienne subduction.

2. Structure microscopique et composition minéralogique des roches métamorphiques dans les zones de subduction:



Les gabbros : sont des roches dont la couleur principale est le vert foncé. Du point de vue minéralogique, ces roches comprennent plus de 50% de plagioclases. D'autres minéraux comme les pyroxènes, la hornblende, la biotite ou l'olivine peuvent également être présents.

Schiste bleu : ou schiste à glaucophane est une roche métamorphique caractérisée par la présence de glaucophane (couleur bleue) et de mica blanc.

Eclogite : roche métamorphique (d'origine basaltique ou gabbroïque) métamorphisée dans les conditions extrêmes. Elle contient du grenat, de la jadéite et de l'omphacite (famille de clinopyroxène) auxquels peuvent s'ajouter différents minéraux accessoires.

b Composition chimique de roches métamorphiques des zones de subduction (en %)

Le gabbro, le schiste bleu et l'éclogite ont la même composition chimique présentée dans le tableau ci-dessous.

| Formule chimique | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | FeO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O |
|------------------|------------------|------------------|--------------------------------|-----|------|-----|-------------------|------------------|
| Pourcentage | 47,1 | 2,3 | 14,2 | 11 | 12,7 | 9,9 | 2,2 | 0,4 |

- 1- Comparez les microstructures et la composition des 3 roches.
- 2- Dégagez le caractère commun des roches métamorphiques .

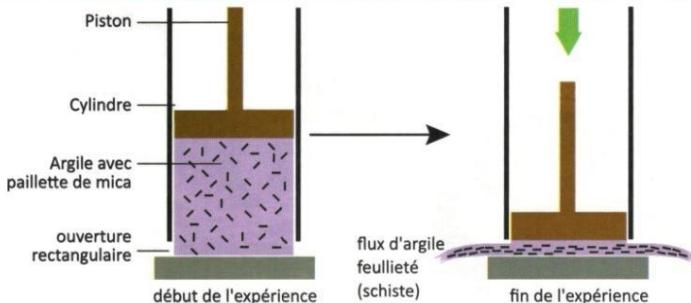
- On observe que les roches métamorphiques des anciennes zones de subduction ont des structures et compositions minéralogiques différentes, ce qui indique que ces roches ont subi des degrés différents de pression et températures (conditions de formation différents) :
 - Le schiste bleu** : ou schiste à glaucophane caractérisé par la présence de glaucophane (couleur bleu) et de mica blanc.
 - L'éclogite** : qui contient du grenat et jadet.
- Ces roches ont la même composition chimique qu'est identique à celle du Gabbro (roche magmatique du complexe ophiolitique), donc l'origine de ces roches est le gabbro.

III. Les facteurs du métamorphisme:

1. Mises en évidence des conditions du métamorphisme :

a L'expérience de Gabriel Auguste Daubrée (1814-1896) : Effet de la pression

Dans un cylindre à piston et avec des ouvertures rectangulaires à sa base, un mélange d'argile et de cristaux laminaires de mica est soumis à une haute pression appliquée avec le piston. Les dessins ci-contre résument les données et les résultats de cette expérience.



b Effet de la température sur les minéraux

Lorsque l'argile est soumise à une haute température, on obtient des minéraux issus de réactions chimiques irréversibles (Ex. la poterie). Les exemples ci-dessous présentent quelques réactions chimiques sous l'effet de la température :

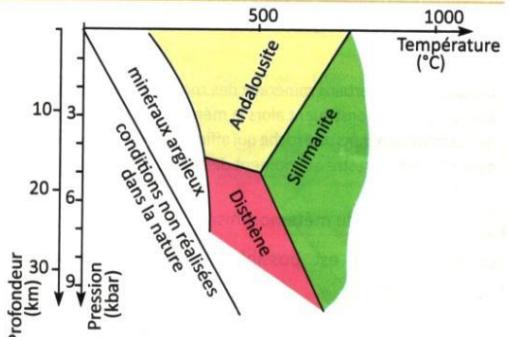
| | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| kaolinite | $\xrightarrow{500^\circ\text{C}}$ | métakaolinite |
| (Silicate d'alumine hydraté) | | (Silicate d'alumine non hydraté) |
| métakaolinite | $\xrightarrow{870^\circ\text{C}}$ | mullite |
| (silicate d'alumine non hydraté) | | (silicate d'alumine non hydraté) |
| quartz | $\xrightarrow{870^\circ\text{C}}$ | tridymite |
| (silice de basse température) | | (silice de haute température) |



Echantillon de kaolinite :
La kaolinite est une espèce minérale composée de silicate d'aluminium hydraté, de formule $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ du groupe des silicates.

c Champs de stabilité des trois silicates d'alumine : andalousite, sillimanite et disthène

Les travaux expérimentaux ont montré que les trois formes naturelles du silicate d'alumine (andalousite, disthène et sillimanite) n'apparaissent et ne se maintiennent que dans des conditions de température et de pression bien déterminées. Les lignes droites représentent les limites du champ de stabilité de chaque minéral. La présence de l'un de ces minéraux dans une roche donne des indications sur les conditions qui régnent dans l'écorce terrestre lors de la formation de cette roche.



Minéraux argileux dans la nature
conditions non réalisées



- 1- Expliquer l'effet de la pression sur les roches en se basant sur le doc a.
- 2- Expliquer l'effet de la température sur les roches en se basant sur le doc b.
- 3- Définissez le domaine de stabilité (température et pression) de chaque minéral.
- 4- Donner une définition au métamorphisme.
- 5- Définissez un minéral index ou indicateur.

- 1- L'effet de la pression sur un mélange d'argile et de mica conduit à la formation d'une roche aux minéraux orientés (schistosité) perpendiculairement à l'orientation des contraintes. L'expérience de Daubrée nous permet de démontrer que la structure schisteuse apparue est due à la pression, donc cette dernière change la structure des roches métamorphiques
- 2- Si on soumet des roches argileuses à une pression stable avec une augmentation progressive de la température, de nouveaux minéraux apparaissent sans fusion de la roche. La température transforme la composition minéralogique des roches à l'état solide.

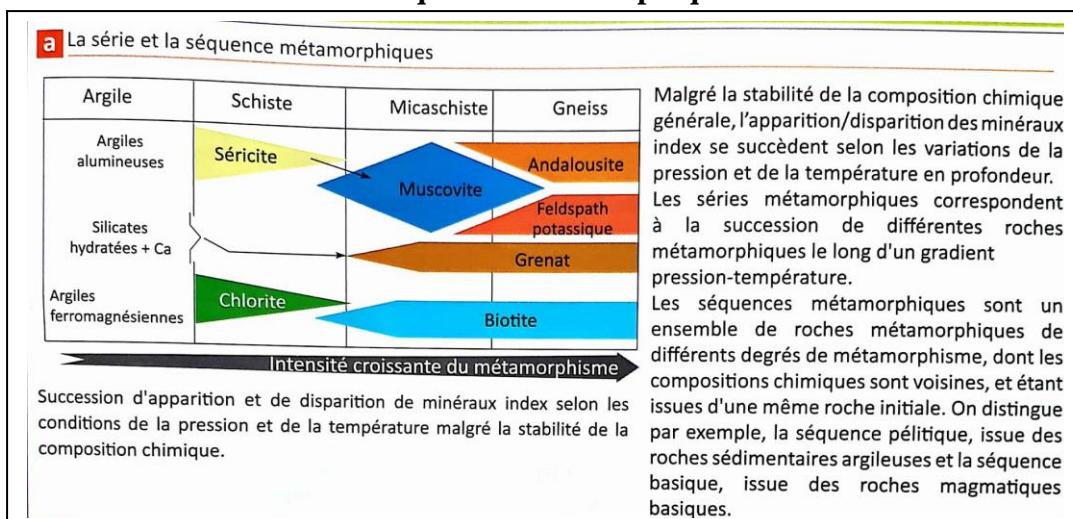
3-

| | Intervalle de température | Intervalle de pression | Conclusion |
|-------------|---------------------------|------------------------|---|
| Andalousite | | | Température et pression faibles |
| Disthène | | | Température faible et pression élevée |
| Silimanite | | | Température élevée quelque soit la pression |

Dans la nature la température et la pression changent simultanément, expérimentalement on observe que chaque minéral apparaît de façon stable dans des conditions bien déterminées de P et T, le changement de ces conditions entraîne la disparition du minéral et l'apparition d'un autre.

- 4- **Le métamorphisme** est une transformation minéralogique et structurale de la roche, à l'état solide, suite à des conditions de température et de pression en profondeur.
- 5- La présence de l'un de ces minéraux (disthène, sillimanite, andalousite) dans une roche indique les conditions de formation de la roche (P et T), il s'agit d'un **minérale indicateur** (ou index).

2. La série et la séquence métamorphique :

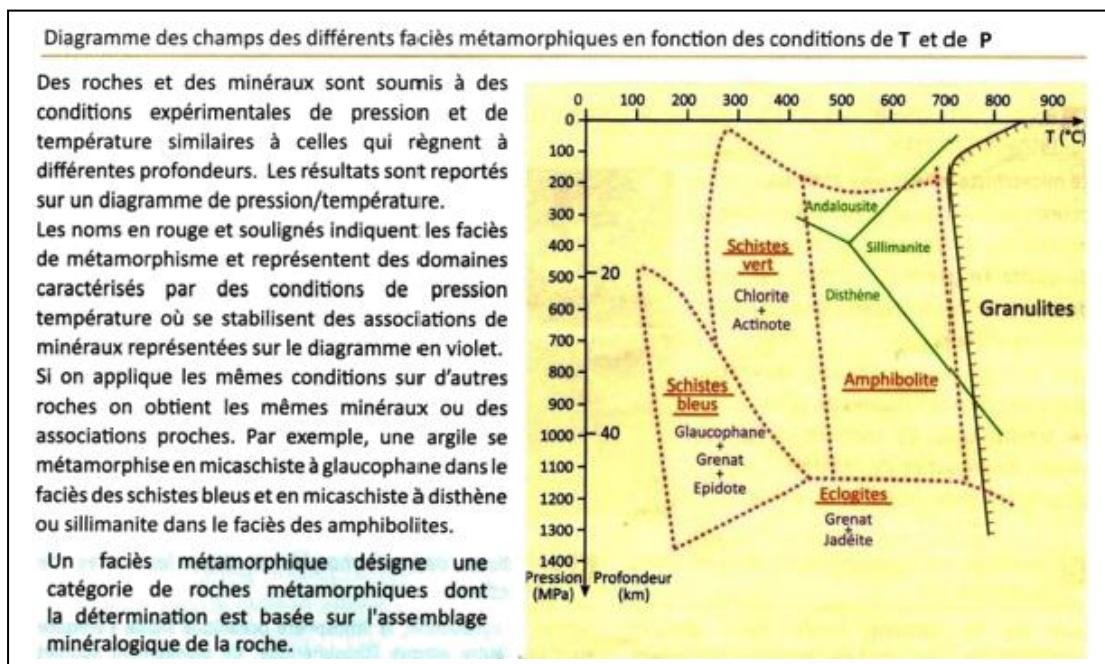


D'après le document ci-dessus, on observe qu'avec l'augmentation de la température et de la pression, les roches d'origine se transforment en nouvelles roches, ainsi que la disparition de certains minéraux et l'apparition d'autres.

- **Série métamorphique** : correspond à la succession de différentes roches métamorphiques le long d'un gradient pression-température.
- **Séquence métamorphique** : un ensemble de roches métamorphiques de différents degrés, dont les compositions chimiques sont voisines, et étant issues d'une même roche initiale.
- **Exemple : Séquence métamorphique argileuse** : argile – schiste – micaschiste – gneiss.

Séquence métamorphique basaltique : basal – gabbro ophiolitique – schiste bleu – éclogite.

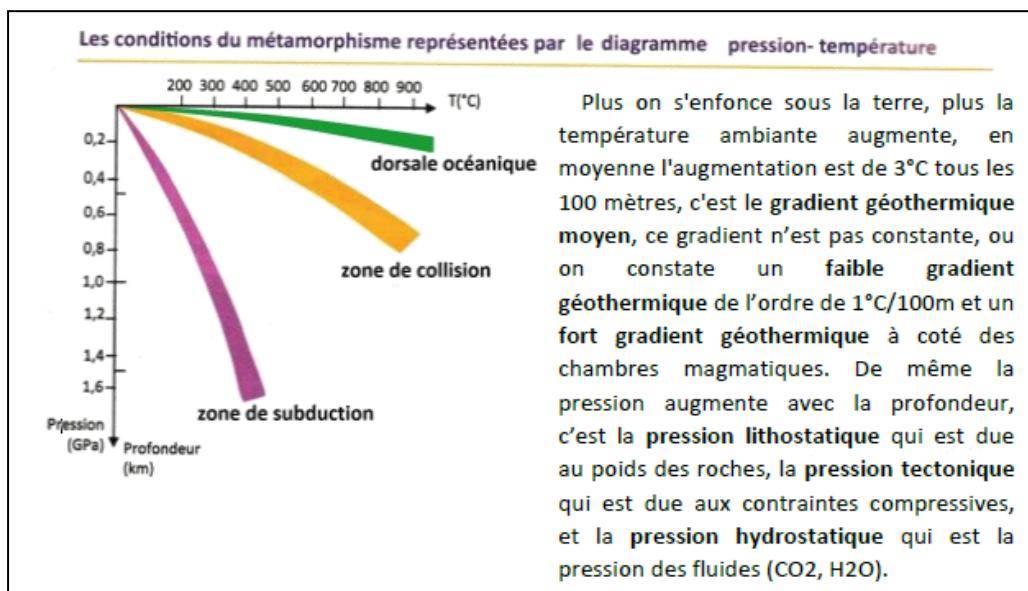
3. Faciès métamorphiques :



- 1- Relevez le faciès métamorphique et les conditions de formation d'une roche de métagabbro qui contient les minéraux suivants : feldspath, glaucophane, grenat.
- 2- Définissez le faciès métamorphique.

- 1- La présence de glaucophane et grenat dans cette roche indique qu'elle a un faciès métamorphique de schiste bleu, donc les conditions de formation du métagabbro sont :
 - Température entre 100°C et 350°C
 - Pression entre 500 MPa et 1300 MPa
 - Profondeur entre 20 Km et 55 Km
- 2- **Faciès métamorphique** : un assemblage de minéraux qui apparaissent dans une roche métamorphique dans un champ précis de température et de pression, cet assemblage dépend des conditions de métamorphisme (P et T) et pas de la nature de la roche mère, la présence de cet assemblage de minéraux nous renseigne sur les conditions de formation de cette roche de façon précis.

4. Le gradient géothermique :



IV. Les types de métamorphisme:

1. Métamorphisme dynamique (métamorphisme de subduction) :

a. Exercice intégré :

Dans une chaîne de montagne on a trouvé des affleurements des roches métamorphiques de métagabbro 1 et métagabbro 2 au sein d'un complexe ophiolitique, la figure 1 montre la composition minéralogique de ces deux roches, et la figure 2 montre les faciès métamorphiques :

| Roche | Composition minéralogique |
|--------------|--|
| Métagabbro 1 | plagioclase Epidote glaucophane |
| Métagabbro 2 | grenat jadeite glaucophane quartz |

Figure 1

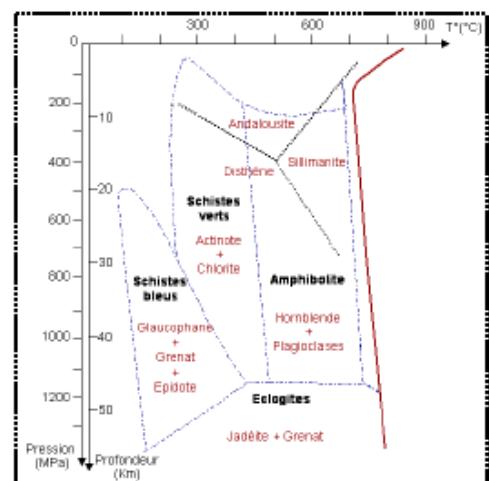


Figure 2

- 1- Déterminer les faciès de métagabbro 1 et métagabbro 2, et déduisez les conditions de formation de métagabbro 1 et métagabbro 2 ?
- 2- En passant de métagabbro 1 au métagabbro 2 déterminer le type de métamorphisme, et quelle est le cadre géologique de formation de ces roches ?

1) Le **métagabbro 1** a un faciès de schiste bleu, donc les conditions de formation de la roche sont : Température entre 100 °C et 400 °C

Pression entre 500 MPa et 1400 MPa

Profondeur entre 20Km et 60 Km

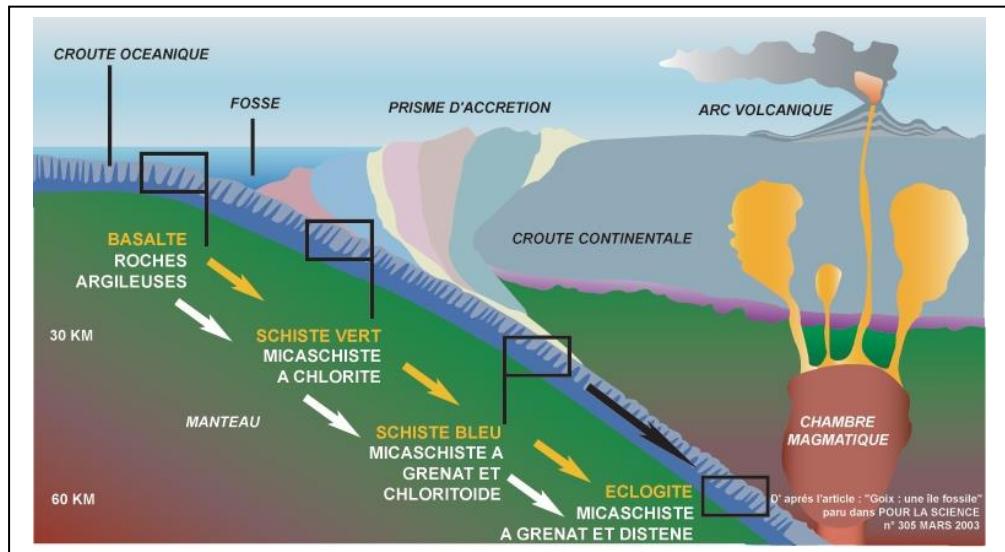
Le **métagabbro 2** a un faciès des éclogites, donc les conditions de formation de la roche sont: Température entre 100 °C et 700 °C

Pression entre 1200 MPa et 1400 MPa

Profondeur entre 45Km et 60 Km

2) En passant de métagabbro 1 au métagabbro 2, on observe que le facteur dominant de la métamorphisme est la pression, donc ce type de métamorphisme est Dynamique (HP et BT), et le cadre géologique qui peut donner naissance au métamorphisme dynamique est la subduction.

b. Conclusion :



Lors de la subduction les roches de la lithosphère océanique froide s'enfouie sous la lithosphère continentale et se métamorphisent sous l'effet de la haute pression et la basse température (due (HP – BT) ce qui transforme le gabbro en schiste bleu puis en éclogite : **métamorphisme dynamique**.

2. Métamorphisme thermodynamique : (métamorphisme régional) :

Dans les zones de collision les unités géologiques se chevauchent les uns sur les autres, ce qui entraîne un enfouissement de certaines unités, au cours de son enfouissement les roches se métamorphisent. Lorsque les forces aux limites compressives ne s'exercent plus, cette croûte épaisse est en déséquilibre gravitaire et s'amincit par érosion, et les roches métamorphisées en profondeur se retrouvent à la surface (La figure 1). La figure 2 montre le trajet P.T.t d'une roche R.

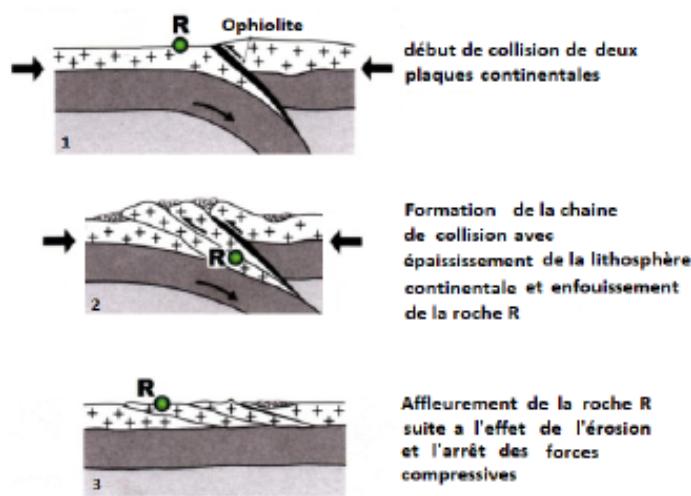


Fig. 1 Les étapes de la formation des roches métamorphiques dans la zone de collision

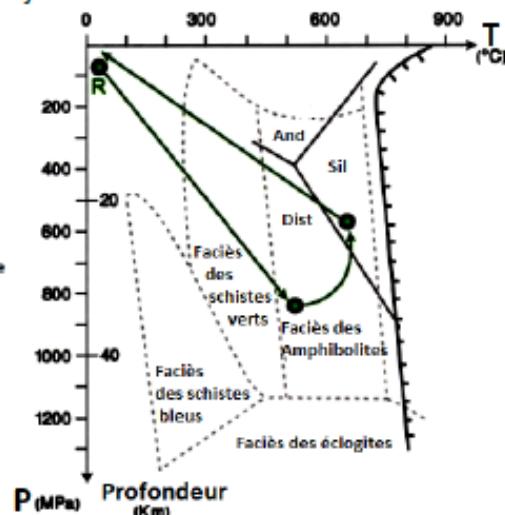
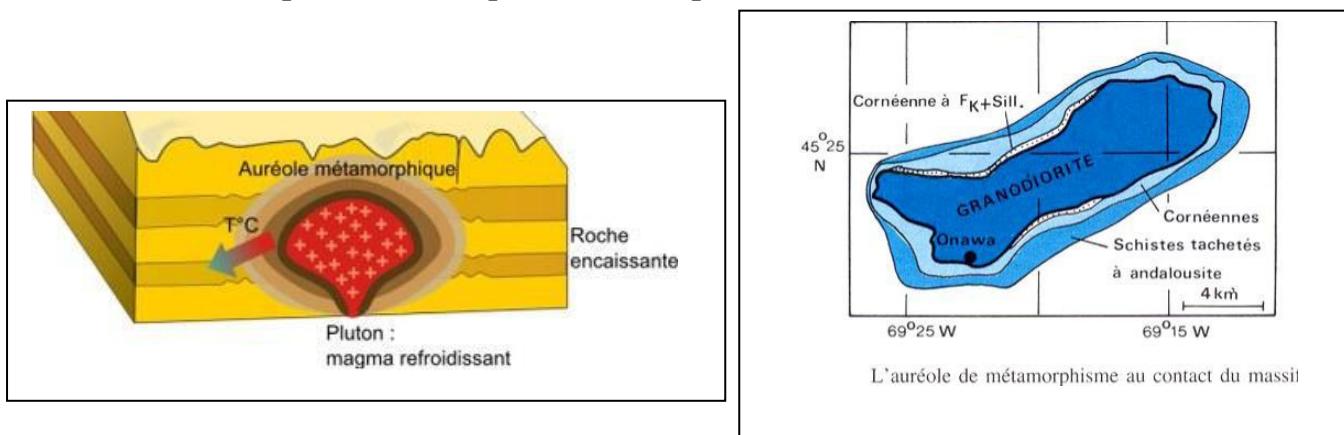


Fig. 2 → Trajet pression-température-temps (P-T-t) de la roche R

Lors des collisions certaines roches de la lithosphère continentale s'enfouie sous des unités géologiques qui sont été déplacés par chevauchement (empilement d'unités tectoniques), les roches enfouies se métamorphisent sous l'effet de la pression moyenne et la température moyenne (MP – MT) ce qui transforme les roches sédimentaires profondes en schiste vert puis en amphibolite, ce type de métamorphisme s'appelle **métamorphisme thermodynamique**, il caractérise les zones de collision. Quand l'orogenèse s'arrête les unités profondes métamorphisées remontent à la surface sous l'effet de l'érosion. Dans les chaînes de collision les roches s'enfouies puis se métamorphisent en profondeur et enfin elles remontent à la surface : c'est le trajet PT

3. Métamorphisme thermique : (métamorphisme de contact) :



Au voisinage des intrusions magmatiques, la chaleur dissipée par le corps magmatique en cours de refroidissement induit des modifications texturales et minéralogiques des roches sédimentaires adjacentes: il s'agit d'un **métamorphisme thermique**. Les roches métamorphisées forment une **auréole** de métamorphisme autour des roches magmatiques. Ce type de métamorphisme est due à une haute température et une basse pression HT-BP.

4. Bilan :

