



Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

11 h

Introduction : Le métamorphisme est l'ensemble des modifications minéralogiques et structurales d'une roche préexistante, à l'état solide sous l'effet de la température, et de la pression, il donne des roches métamorphiques comme (schiste, gneiss ...)

Dans les parties profondes des chaînes de montagnes récentes ou anciennes on trouve que des roches métamorphiques et granitiques. En effet ces roches arrivent à la surface suite aux mouvements tectoniques ascendants et l'érosion, l'affleurement de ces roches à la surface constitue des témoins des conditions physiques (P et T) qui régnaient en profondeur lors de la formation de ces roches.

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

I- Les caractéristiques minéralogiques et structurales des roches métamorphiques:

1- Données de terrain :

Document 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

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.

- 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 (haute pression)

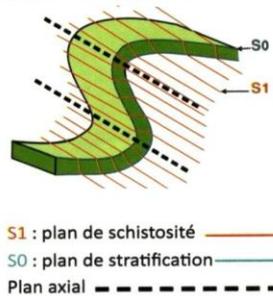
Dans la chaîne des Alpes (chaîne de collision) on observe des affleurements des roches métamorphiques de différents degrés de métamorphisme (schiste vert, schiste bleu, éclogite) sous forme de bandes parallèles à côté des ophiolites métamorphisées, cette répartition de roches indique que l'origine du métamorphisme c'est la tectonique des plaques.

2- Comparaison des roches métamorphiques :

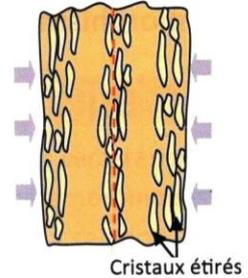
Document 02

a Deux structures du métamorphisme : La schistosité et la foliation

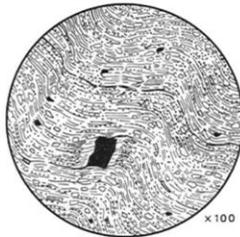
la schistosité : structure des roches métamorphiques, elle se caractérise par une des cristaux de la roche, cette structure est susceptible de se débiter selon des plans parallèles



Foliation: Structure visible dans certaines roches métamorphiques, elle se caractérise par une différenciation pétrographique avec une alternance des lits clairs quartzo-feldspathiques et des lits sombres micacés, formant ainsi des feuilletés,



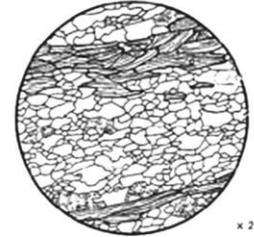
b Observation au microscope polarisant de roches métamorphiques (schiste, micaschiste et gneiss)



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



Lame mince d'un micaschiste avec un schéma interprétatif : on y trouve des lits de biotite et des lits de quartz



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

c Composition chimique de quelques roches métamorphiques

Éléments 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

1- Composition chimique de roches métamorphiques (en %)

Argile (Roche sédimentaire)
58,0
20,0
3,2
3,5
0,8
0,45
2,45
4,5

2- Composition chimique de l'Argile (roche sédimentaire)

On observe que les roches métamorphiques ont des structures et compositions minéralogiques différents, mais elles ont la même composition chimique, donc ces roches ont la même origine (roche mère) et elles ont subi des conditions différentes de pression et température

Le schiste se caractérise par la structure schisteuse (minéraux alignés)

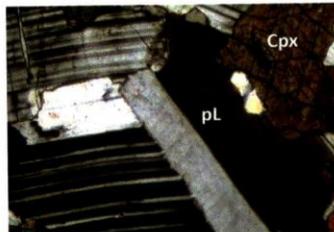
Le micaschiste et le gneiss se caractérisent par une structure en foliation (recristallisation et réorganisation des minéraux en bandes claires et bandes sombres)

- 🚩 Roches ont la même composition chimique ⇒ même origine
- 🚩 Roches ont des structures et composition minéralogiques différents ⇒ conditions de formation (T et P) différents

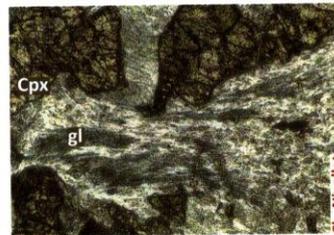
3- Caractéristiques des roches métamorphiques de la zone de subduction :

Document 03

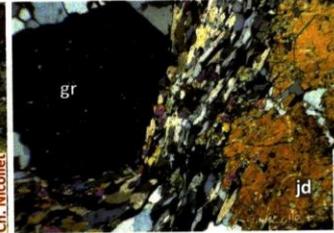
a Echantillons de roches métamorphiques qui caractérisent les zones de subduction



Echantillon de gabbro ophiolitique et sa lame mince observée au microscope polarisant (x 40).



Echantillon de schiste bleu et sa lame mince observée à la lumière polarisée (x 20)



Eclogite et sa lame mince observée au microscope polarisant (x 40)

gl : glaucophane, cpx : clinopyroxène, pl : plagioclase, gr : grenat, jd : jadéite.

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 être également 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

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)

On outre ces roches ont la même composition chimique qu'est identique à celle du Gabbro, donc l'origine de ces roches métamorphique est le gabbro

Les roches métamorphiques des zones de subduction ont une même origine (Gabbro) et ont subi a des températures et pressions croissants, ce qui a modifié sa structure et composition minéralogiques

La séquence métamorphique, désigne l'ensemble des roches métamorphiques, métamorphisées à des degrés différents, et qui sont issus de la même roche original.



Exemple d'une séquence métamorphique des zones de subduction

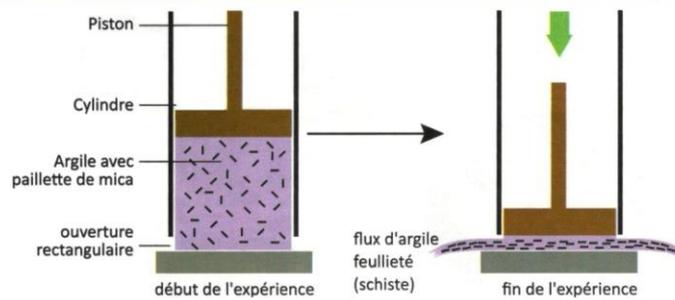
II- Les facteurs de métamorphismes :

1- Mise en évidence des facteurs de métamorphismes :

Document 04

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

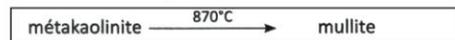
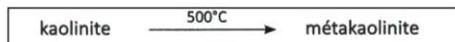
Dans un cylindre à piston et avec des ouvertures rectangulaires à sa base, un mélange d'argile et de cristaux laminaires de mica est soumis à une haute pression appliquée avec le piston. Les dessins ci-contre résument les données et les résultats de cette expérience.



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 :



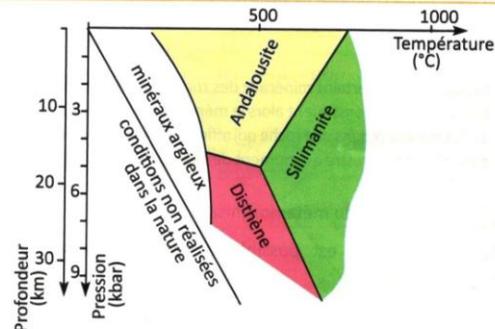
Echantillon de kaolinite :

La kaolinite est une espèce minérale composée de silicate d'aluminium, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

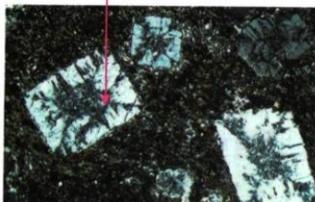
c Champs de stabilité des trois silicates d'alumine : andalousite, sillimanite et disthène

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.

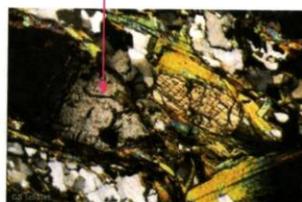
Les lignes droites représentent les limites du champ de stabilité de chaque minéral. La présence de l'un de ces minéraux dans une roche donne des indications sur les conditions qui régnaient dans l'écorce terrestre lors de la formation de cette roche.



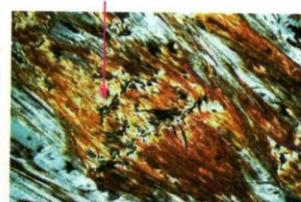
Andalousite



Disthène



Sillimanite

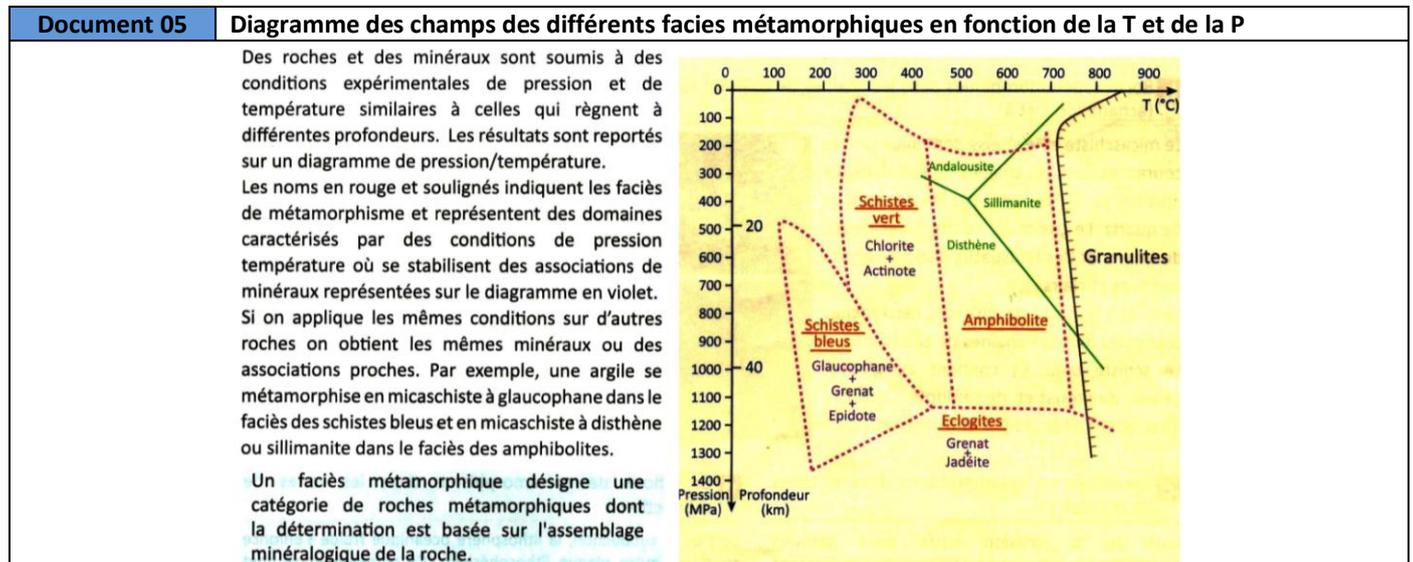


- ✚ L'expérience de Daubrée nous permet de démontrer que la structure schisteuse apparue est due à l'augmentation de la pression
 - ✚ On observe que l'augmentation de la température induit la disparition de certains minéraux (kaolinite) de la roche originelle et apparition de nouveaux minéraux (mullite), donc la température change la composition minéralogique de la roche.
 - ✚ Dans la nature la température et la pression changent simultanément, dans le laboratoire on a observé 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 (recristallisation)
- ⇒ 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 **minéral indicateur**.

2- Notion de minéral indicateur et faciès métamorphique :

Minéral indicateur, c'est un minéral qui est stable dans des conditions précises de température et de pression (ces conditions sont déterminées expérimentalement), la présence de ce minéral dans une roche nous renseigne les conditions de formation de cette roche.

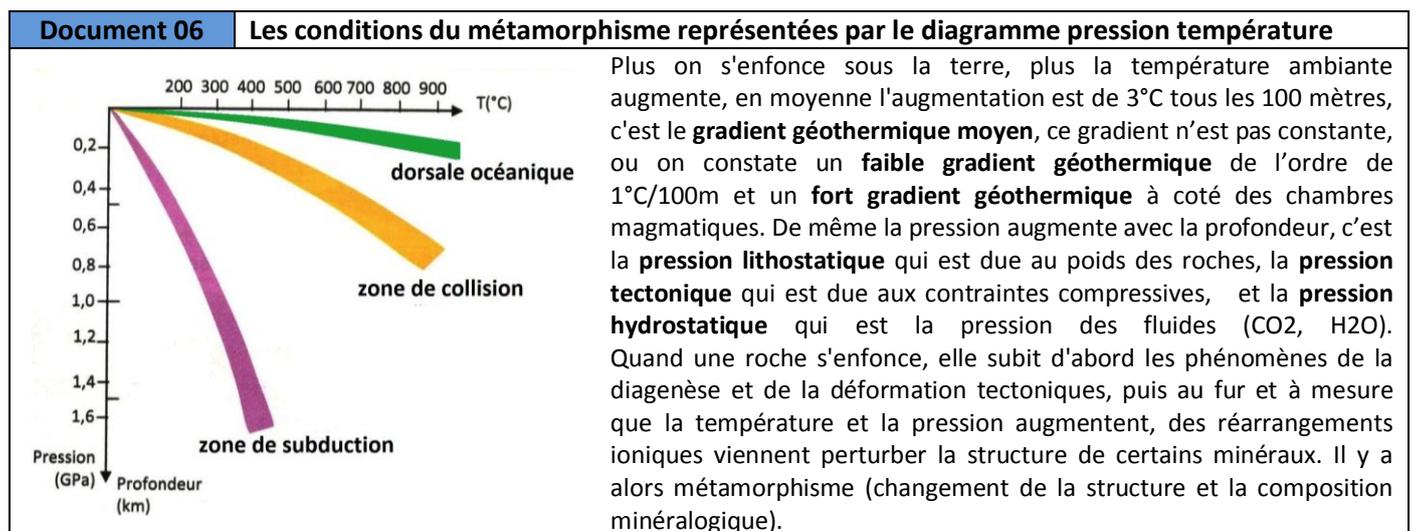
Faciès métamorphique, c'est un assemblage de minéraux qui apparaissent dans une roche métamorphique dans des conditions précises de température et de pression, cet assemblage dépend des conditions de métamorphisme (P et T) et pas de la nature de la roche mère, la présence de cet assemblage de minéraux roche nous renseigne les conditions de formation de la roche de façon précis.



Exemple ; une roche de métagabbro qui contient les minéraux suivants : feldspath, glaucophane, grenat. ⇒ la présence de glaucophane et grenat dans cette roche indique qu'elle a une faciès métamorphique de **schiste bleu**, donc les condition de formation de métagabbro sont :

- ✚ Temperature entre 100°C et 350°C
- ✚ Pression entre 500 MPa et 1300 MPa
- ✚ Profondeur entre 20 Km et 55 Km

3- Les conditions de métamorphisme dans la nature :



Les facteurs de métamorphisme (P et T) changent en fonction du cadre géodynamique :

- ✚ Dans les zones de collision les roches en profondeur sont soumis a une pression moyen (pression tectoniques et lithostatique) et la températures moyen (gradient géothermique moyen)
- ✚ Dans les zones de subductions les roches de la plaque océanique plongeante sont soumis a une pression tectonique élevé et la température faible (gradient géothermique faible)

- Les roches qui se trouvent a coté des magmas, reçoivent une température élevé (chaleur du magma) et la pression augmente légèrement

III- Les types de métamorphisme :

1- Métamorphisme dynamique : (métamorphisme de subduction)

Document 07

Dans une chaîne de montagne on a trouvé des affleurements des roches métamorphiques de métagabbro1 et métagabbro 2 au sein d'un complexe ophiolitique, la figure1 montre la composition minéralogique de ces deux roches, et la figure 2 montre les faciès métamorphiques.

- Déterminer les faciès de métagabbro 1 et métagabbro 2, et déduisez les conditions de formation de métagabbro 1 et métagabbro 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 ?

Roche	Composition minéralogique
Métagabbro 1	plagioclase Epidote glaucophane
Métagabbro 2	grenat jadéite quartz

- Le métagabbro 1 à 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

- En passant de métagabbro 1 au métagabbro 2, on observe que le facteur dominant du métamorphisme est l'augmentation de la pression, donc ce type de métamorphisme est Dynamique (HP et BT), le cadre géologique qui à donné naissance au métamorphisme dynamique c'est la subduction.

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

2- Métamorphisme thermodynamique : (métamorphisme régional)

Document 08

Dans les zones de collision les unités géologiques se chevauchent les uns sur les autres, se qui entraine 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 épaissie est en déséquilibre gravitaire et s'amincit par érosion, et les roches métamorphisé en profondeur se retrouver a la surface (La figure 1)

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

La figure 2 montre le trajet P.T.t d'une roche R

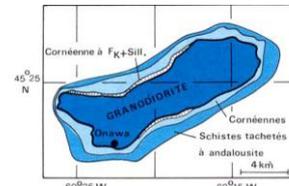
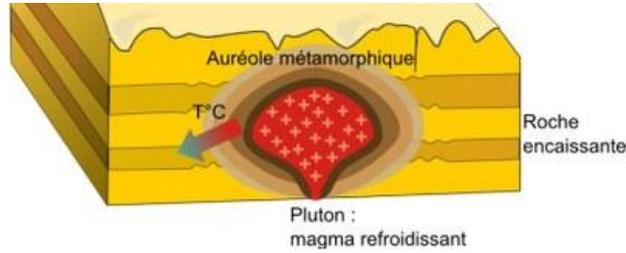
Lors de la collision certaines roches de la lithosphère continentale s'enfouie sous des unités géologiques qui sont été déplacés par chevauchement (empilement d'unités tectoniques), les roches enfouies se métamorphisent sous l'effet

de l'augmentation simultanée de la pression et de la température (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'orogénèse s'arrête les unités profondes métamorphosées remontent à la surface sous l'effet de l'érosion.

⇒ Dans la chaîne de collision les roches s'enfouissent puis se métamorphosent en profondeur et en fin elles remontent à la surface : c'est le trajet PT

3- Métamorphisme thermique : (métamorphisme de contact)



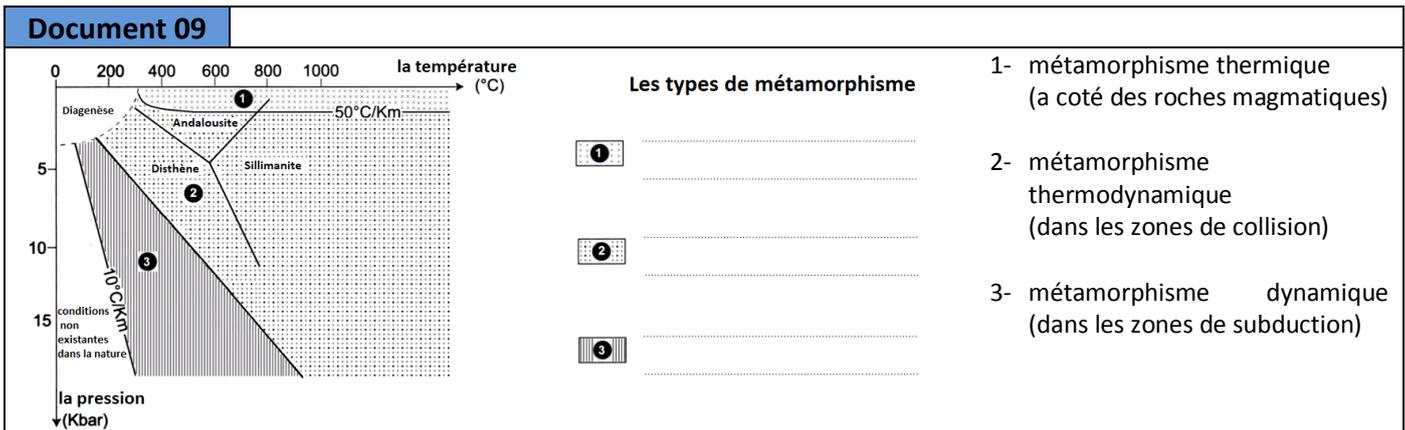
L'auréole de métamorphisme au contact du massif

(Dessin)

Au voisinage des intrusions magmatiques, la chaleur dissipée par le corps magmatique en cours de refroidissement induit des modifications structurales et minéralogiques des roches sédimentaires adjacentes: il s'agit d'un **métamorphisme thermique**. Les roches métamorphosées forment une **auréole** de métamorphisme autour des plutons magmatiques

Ce type de métamorphisme est due à une haute température et une basse pression HT-BP

⇒ **Bilan** : les types de métamorphisme

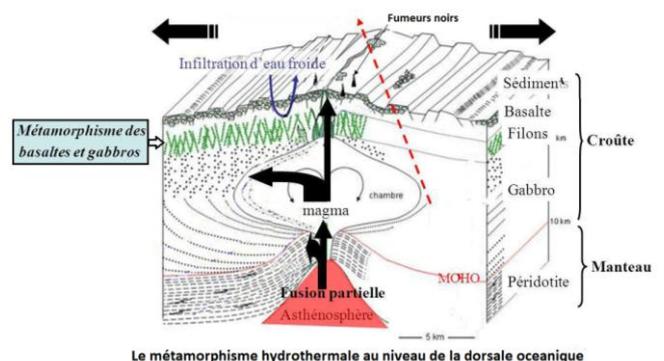
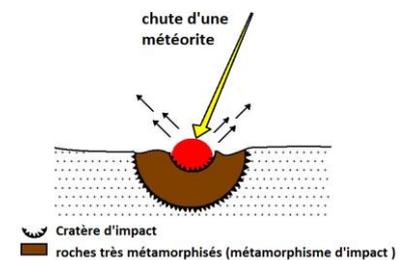


Conclusion :

Métamorphisme particulier :

© **Le métamorphisme d'impact** : il est la conséquence de la chute d'une météorite à la surface de la planète. Le choc engendre des températures et des pressions énormément élevées qui transforment les minéraux de la roche choquée, des températures et des pressions qui sont bien au-delà de celles atteintes dans le métamorphisme régional mais ne dure que quelques secondes .

© **Le métamorphisme hydrothermal** : Ce type de métamorphisme se caractérise par des transformations d'une roche originelle par apport d'éléments chimiques lié à la circulation de fluides. Il concerne essentiellement la lithosphère océanique. En effet, dès sa mise en place au niveau de la dorsale, la croûte subit de profondes transformations par un hydrothermalisme de haute température qui bouleverse les associations minérales initiales par hydratation et échanges d'ions en réponse à la circulation active de l'eau de mer dans ces roches très fracturées. Les phénomènes essentiels sont le passage dans le faciès amphibolites puis schistes verts des gabbros.



Exercice 01 :

1 Vrai ou faux:

- A.** Andalousite, disthène et sillimanite sont de composition chimique voisine.....
- B.** Un minéral index peut se rencontrer de part et d'autre d'un isograde
- C.** Le métamorphisme de contact est dû à l'augmentation simultanée de P et T.....
- D.** Les gabbros subduits évoluent en schiste bleu puis en élogite
- E.** La foliation est une structuration en plans distincts des roches métamorphiques.....

2 Questions à choix multiples :

Pour chacune des propositions suivantes, il y a une seule suggestion correcte, mettez une dans la case qui lui correspond

1. En ce qui concerne les conditions de métamorphisme :

- A.** Une roche métamorphique peut se former par fusion partielle.
- B.** Une roche métamorphique peut se former suite à une modification de pression et de température.
- C.** L'augmentation des conditions de pression et de température modifie la composition chimique d'une roche sans changer sa composition minéralogique lors du métamorphisme.
- D.** L'augmentation des conditions de pression et de température provoque toujours la fusion partielle des roches de la croûte continentale

2. La succession des faciès métamorphiques dans la zone de subduction est:

- A.** schiste vert, gabbro , schiste bleu.
- B.** schiste vert, schiste bleu, élogite.
- C.** schiste bleu, schiste vert, micaschiste.
- D.** schiste vert, schiste bleu, micaschiste.

3. Le métamorphisme MT-MP est un:

- A.** métamorphisme régional.
- B.** métamorphisme de contact.
- C.** métamorphisme dynamique.
- D.** métamorphisme de subduction

4. Parmi les roches suivantes il y a une roche métamorphique, qui est:

- A.** le gabbro.
- B.** le basalte.
- C.** la péridotite.
- D.** l'élogite.

5. On appelle géotherme:

- A.** Une augmentation de la pression avec la profondeur représentée par une courbe $P=f(T)$.
- B.** Une diminution de la pression avec la profondeur représentée par une courbe $T=f(P)$.
- C.** Une diminution de la pression avec la profondeur représentée par une courbe $T=f(P)$.
- D.** Une augmentation de la température avec la profondeur représentée par une courbe $T=f(P)$.

6. Les roches métamorphiques sont :

- A.** formées à partir du refroidissement d'un magma.
- B.** le résultat de transformations chimiques affectant les minéraux à l'état liquide.
- C.** constituées des mêmes minéraux que les roches dont elles sont issues.
- D.** les témoins de conditions anciennes de la température et de la pression.

7. La séquence métamorphique est un ensemble de :

- A.** roches magmatiques résultantes du refroidissement du même magma.
- B.** roches ayant subi un même degré de métamorphisme.
- C.** minéraux ayant subi une température croissante.
- D.** roches métamorphiques qui résultent de la même roche mère.

8. Parmi ces minéraux il y a un minéral index de haute température. Lequel ?

- A.** chlorite.
- B.** muscovite.
- C.** sillimanite.
- D.** biotite.