

## **CHAPITRE I : DEFINITION, FACTEURS, CONDITIONS ET REACTIONS DU METAMORPHISME**

### **1 : DEFINITION**

**La pétrographie** (du grec *petra*, pierre=roche, et *graphein*, écrire) est une des Sciences de la Terre qui s'intéresse à la description et à la classification des roches.

**La pétrogenèse** cherche à comprendre les mécanismes de formation des roches.

**La pétrologie** (du grec *petra*, pierre=roche, et *logie*, science) c'est la science qui s'intéresse à la description, classification et interprétation de la genèse des roches.

**Un minéral** est une substance inorganique solide qui se présente sous forme d'un cristal ou d'un solide cristallin.

**Un cristal** est un corps solide (minéral naturel homogène) de forme polyédrique, plus ou moins brillant, à structure régulière et formé d'un assemblage ordonné d'un grand nombre d'atomes de molécules ou d'ions.

**Une roche** est un matériau solide formé en général d'un assemblage de minéraux. Les roches sont constituées de minéraux tandis que les minéraux sont constitués d'éléments chimiques

**Métamorphisme** : le métamorphisme est l'ensemble des transformations qui affecte les roches à l'état solide sous l'effet d'un changement de température (T), de pression (P) ou de composition, quelque soit l'origine de ces roches (sédimentaires, magmatiques ou déjà métamorphiques). Ces transformations conduisent à des changements dans :

- la minéralogie (remplacement d'anciens minéraux par des minéraux nouveaux du métamorphisme).
- la texture (apparition des fabriques planaires : orientation des minéraux)
- la composition chimique de la roche d'origine parfois, par ajout et/ou perte d'éléments.

Le métamorphisme est compris entre la diagenèse (processus sédimentaires) et la fusion des roches (processus magmatiques), c'est-à-dire des températures comprises environ entre 200 et 700 à 1000°C.

#### **- Métamorphisme Topochimique (Isochimique) :**

C'est un métamorphisme qui procède sans échange d'éléments chimiques avec le milieu extérieur, c'est à dire la composition chimique de la roche d'origine reste inchangée pendant et après le métamorphisme (système fermé).

#### **- Métamorphisme Métasomatique (Allochimique) :**

C'est un métamorphisme qui se déroule en un système ouvert (échange de matière avec le milieu extérieur), donc en fin de compte la composition chimique de la roche d'origine est modifiée.

- Un **métamorphisme prograde ou progressif** est un métamorphisme qui s'accompagne d'une augmentation simultanée de P et T.
- Un **métamorphisme rétrograde ou régressif** est un métamorphisme qui s'accompagne d'une chute de P et ou de T.
- **Paragenèse** : On appelle paragenèse, un assemblage minéralogique à l'équilibre thermodynamique. Les minéraux de cet assemblage sont à peu près contemporains et stable dans certaines conditions de pression et température. L'état d'équilibre est démontré lorsque toutes les espèces minérales présentes dans la roche sont en contact entre elles, sans réaction.

**Le para-métamorphisme** : c'est une roche sédimentaire qui est métamorphisée

**L'ortho-métamorphisme** : c'est une roche magmatique qui est métamorphisée

**Le poly-métamorphisme** : c'est une roche métamorphique qui est métamorphisée

## 2 : LES LIMITES ET LES CONDUCTIONS DU METAMORPHISME

Dans un diagramme P-T, Du côté des basses températures, le domaine du métamorphisme est limité par le champ de la diagenèse. Vers les hautes températures, il est limité par le domaine de l'anatexie du granite hydraté, c.à.d. le domaine où débute la fusion des roches (Fig.1).

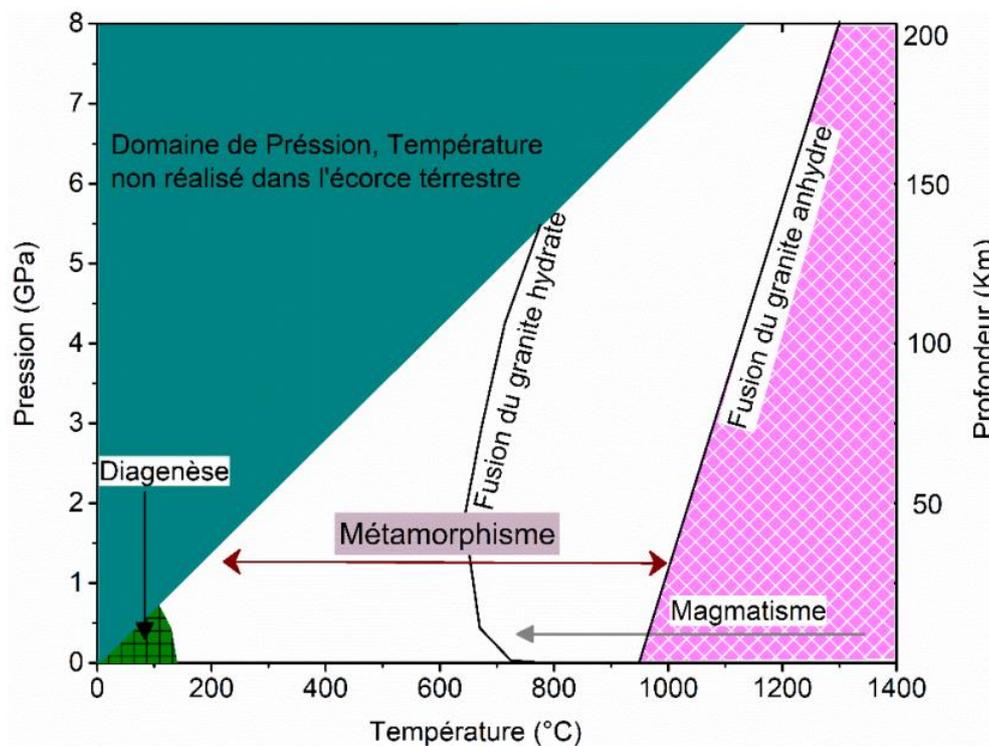


Fig. 1- Limites du métamorphisme dans le diagramme pression/ température, K. Bucher and R. Grapes (2011).

### **3 : LES FACTEURS DU METAMORPHISME :**

Il existe 4 facteurs principaux : la **température**, la **pression**, le **temps** et la **composition chimique**.

**1 ; La température :** ce paramètre peut être généré en fonction de profondeur ou un rapprochement d'un corps magmatique. On reconnaît la relation proportionnelle de la profondeur et la température interne provoquée par le flux de chaleur dû à la désintégration des éléments radioactifs, c'est la géothermie. Dans les conditions normales, le gradient géothermique est estimé à 3°C pour chaque 100m, il s'agit d'une moyenne qui n'est pas du tout constante, elle peut être élevée dans les zones tectoniquement actives ou de friction (10°C/100m) ou faible dans les zones d'une activité tectonique modérée tels que les anciens boucliers (1°C/100m). Ainsi les principales régions qui seront le siège d'importantes variations sur le plan géothermique sont :

- Zones de rifting -Zones d'accrétion (dorsale océanique)
- Zones de subduction (arc et cordillère volcanique)
- Zones de collision (racine crustale des orogènes)
- Zones de points chauds (volcanismes intra-plaque)

Il est évident qu'une roche soit un ensemble de minéraux dont chacun constitue un assemblage bien défini de certains éléments chimiques, les atomes de ces éléments chimiques peuvent être arrangés selon un système bien régulier (dans ce cas on parle de systèmes ou formes cristallines en nombre de 7) ou répartis d'une manière irrégulière caractéristique de forme non-cristalline dite amorphe. L'augmentation de température peut varier le nombre et la disposition de ces atomes dans la maille contribuant ainsi à la création d'une nouvelle maille élémentaire (système cristallin) et par conséquent l'apparition de nouveaux minéraux dit néoformés (un nouveau assemblage minéral est dit paragenèse). On signale donc que la température a une grande influence sur la taille des cristaux (proportionnelle à température) ainsi que la nature de cette cristallisation lors d'un métamorphisme,

**2 : La pression :** peut distinguer 3 types de pression s'exerçant sur une roche.

- **la pression lithostatique** ( $P_L$ ) qui est la pression exercée sur une roche, par les roches qui la surmontent. Cette pression est fonction de la densité des roches et de la profondeur à laquelle elle s'exerce. Elle est isotrope, c'est à dire homogène dans toutes les directions et n'engendre donc pas de déformation.

- **les contraintes tectoniques** ( $C_T$ ) : il s'agit de la pression exercée sur les roches par l'action des forces tectoniques, elle est liée aux chevauchements et aux processus orogéniques. Elle est donc anisotrope car elle n'est pas homogène dans toutes les directions de l'espace : elle est orientée et engendre des déformations et l'apparition de nouvelles structures à différentes échelles.
- **la pression des fluides** ( $P_f$ ) : c'est la pression exercée au sein des pores des roches par les fluides. Elle dépend de la présence d' $H_2O$  et de  $CO_2$  qui peuvent être présents dans les interstices et libérés lors de réactions chimiques de déshydratation ou de décarboxylation. La  $P_f$  favorise la circulation de fluides, accélère les réactions de transformations minérales, les échanges de matière et abaisse la température de début de fusion des matériaux.

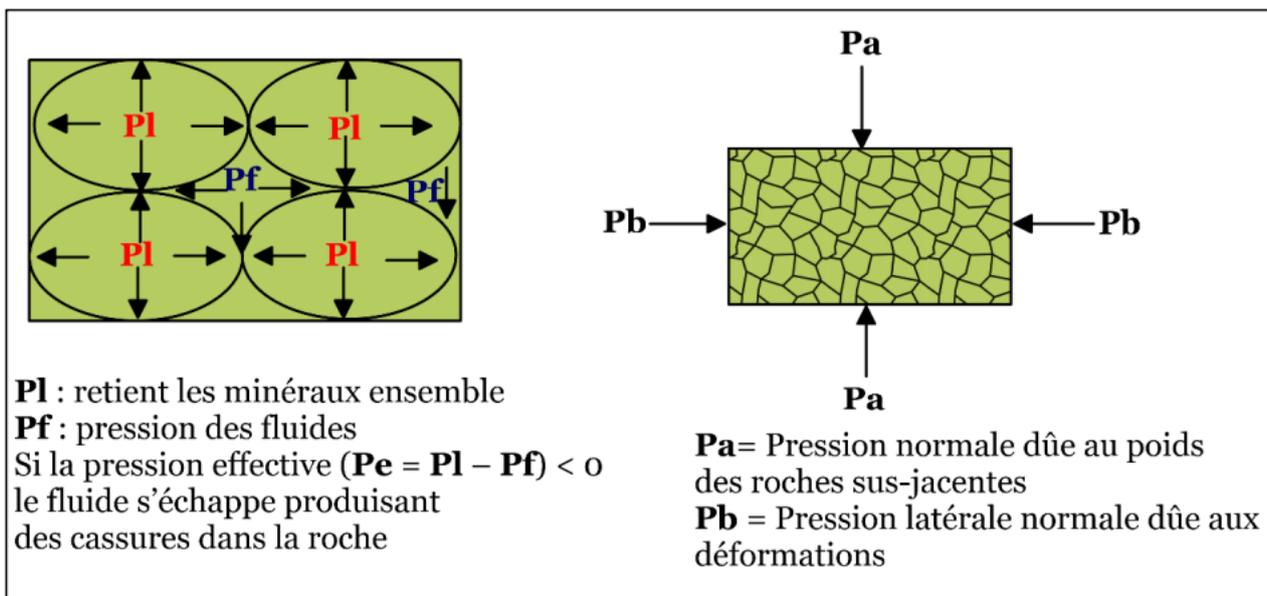


Fig. 2 Représentation graphique montrant la relation entre la pression lithostatique et la pression des fluides pendant le métamorphisme.

⇒ L'action combinée de ces 3 pressions engendre des transformations

$P_f + P_l$  = Transformations minéralogiques et chimiques

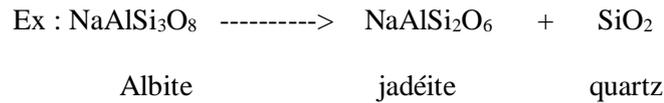
$P_L$  = Transformations minéralogiques

$C_T + P_L$  = Transformations minéralogiques et structurales

**3 : La composition chimique** : Au cours du métamorphisme, la composition chimique peut :

- restées inchangée (à l'exception des teneurs en  $H_2O$  et  $CO_2$ ) :

Il s'agit donc de transformations isochimiques qui ont lieu en "système fermé (métamorphisme isochimique)



- être sensiblement modifiées par apport d'éléments chimiques (Si, Al, Na, K, etc...) : ce sont donc des transformations allochimiques



Dans ce dernier cas, les fluides jouent un grand rôle : apport d'eau et départ de dioxyde de carbone. C'est souvent le cas dans le cadre de conditions de P et T peu élevées. Dans le métamorphisme prograde, l'eau est chassée des assemblages minéralogiques et des fluides minéralisés sont ainsi extraits des roches.

**4 : Le temps** : c'est un facteur important car il faut que les conditions physico-chimiques soient modifiées durablement pour que les transformations minéralogiques et structurales aient le temps de se produire.

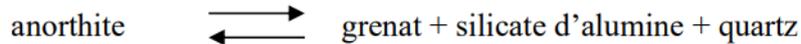
La plupart des minéraux sont métastables, c'est à dire qu'ils se maintiennent sans modifications sensibles en dehors de leur domaine de formation : c'est cette propriété qui permet d'observer à l'affleurement des paragenèses d'origine profonde. Les réactions de formation des minéraux sont réversibles mais les réactions rétrogrades ne se produisent pas ou à des vitesses extrêmement faibles. La vitesse d'exhumation est donc un facteur essentiel de conservation des assemblages métamorphiques.

#### **4 : REACTIONS METAMORPHIQUES**

L'élimination des minéraux instables et l'apparition de minéraux stables révélateurs des nouvelles conditions (P, T) tout au long de l'évolution progressive du métamorphisme est d'une grande importance en ce qui concerne les problèmes pétrographiques et leur relation spatio-temporelle. Quatre (04) réactions essentielles régissent ces changements minéralogiques :

##### **- Réactions à sec : solide-solide (anhydre)**

Ces réactions sont indépendantes de la présence des fluides, elles dépendent uniquement de la pression et de la température.



### - Les réactions de déshydratation

Comme indiqué ci-dessous, la grande majorité des processus métamorphiques qui se produisent avec l'augmentation de la température entraînent la libération de l'eau des phases solides :

Exemples :

# réaction de déshydratation

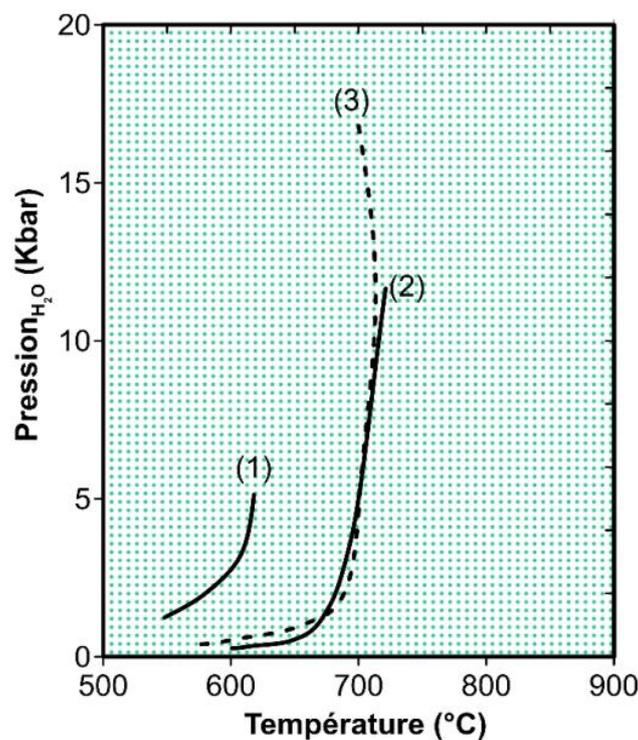
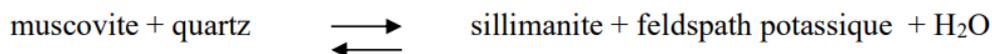
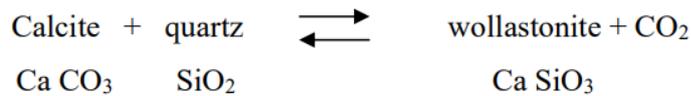


Fig. 3 Diagramme d'équilibre des silicates métamorphiques montrant les réactions de déshydratation (1) réaction muscovite-quartz, (2) décomposition de la muscovite (3) réaction d'équilibre forstérite + talc = enstatite + eau, qui prend une tendance inverse au-dessus de 10 Kbar (Miyashiro, 1973).

### - Réactions de décarbonatation

Le CO<sub>2</sub> est libéré lors du métamorphisme des roches carbonatées. Les réactions de décarbonatation ont une thermodynamique comparable à celle des réactions de déshydratation. Toutefois, en présence d'une phase fluide, les réactions d'équilibre sont déterminées par le mélange (CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O). La réaction suivante illustre la création de wollastonite par décarbonatation...

# réaction de décarbonatation :



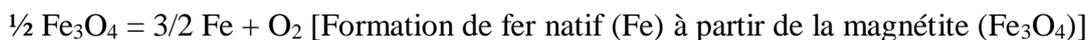
### - Réactions d'oxydo-réduction

Le fer contenu dans les minéraux présente deux états d'oxydation : ferreux (Fe+2) et ferrique (Fe+3). Les phases silicatées riches en ions ferreux (comme l'olivine et la hornblende) sont souvent vertes, tandis que celles riches en fer ferrique (comme l'hématite) sont rouges ou orange

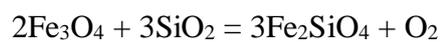
Les réactions d'oxydoréduction sont celles qui englobent un changement de valence des phases Fe-Ti dans le système. Une réaction d'oxydation se produit lorsque la valence du fer augmente de Fe+2 à Fe+3, tandis qu'une réaction de réduction se produit lorsque la valence diminue.

L'oxygène étant principalement mélangé sous forme de silicates et d'oxydes dans la croûte et le manteau terrestres, il est soumis à une pression extrêmement élevée. Comme H<sub>2</sub>O, l'oxygène dans les roches est à une pression P<sub>O<sub>2</sub></sub> (pression d'oxygène) en équilibre osmotique avec l'environnement extérieur.

Les oxydes de fer, tels que l'hématite, la magnétite et la wüstite, sont les meilleurs et les plus utiles indicateurs de la présence de P<sub>O<sub>2</sub></sub> dans la croûte. Les équations suivantes relient ces minéraux entre eux :



La magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) et l'ilménite (FeTiO<sub>3</sub>) sont les oxydes Fe-Ti les plus stables dans la plupart des roches métamorphiques, les réactions d'oxydoréduction se produisant dans une gamme typique de pression, de température et de fugacité de l'oxygène (fO<sub>2</sub>). De même, la fayalite (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) est stable à 700°C dans la plage de P<sub>O<sub>2</sub></sub> (pression d'oxygène dans la roche) = 10<sup>-16</sup> à 10<sup>-26</sup> bar (avec une légère variation en fonction de la pression de la roche). Si la concentration de P<sub>O<sub>2</sub></sub> est trop élevée ou trop faible, la fayalite se décompose pour générer de la magnétite ou fer natif, comme indiqué ci-dessous :



Magnétite + Quartz = Fayalite



Fayalite = Fer + Quartz