

ROCHES METAMORPHIQUES

Le métamorphisme est l'ensemble des transformations que subit une roche lorsqu'elle est portée dans des conditions de pression et de température différentes de celles ayant présidé à sa genèse*.

La plupart des roches métamorphiques se forment au sein de la croûte terrestre : ces roches sont donc, au sens strict, des roches endogènes. Elles résultent de la transformation à l'état solide de roches préexistantes sous l'effet d'une élévation de la pression et de la température.

Les roches préexistantes

Toutes les roches existant à la surface de la terre ou en profondeur peuvent constituer des matériaux aux dépens desquels se forment les roches métamorphiques. Il y aura donc des roches métamorphiques qui dérivent d'anciennes roches sédimentaires** (on qualifie ces roches métamorphiques de "paradérivées"), d'autres qui dérivent d'anciennes roches magmatiques, soit volcaniques, soit plutoniques (on les qualifie alors de roches "orthodérivées").

Les facteurs du métamorphisme

Ils sont au nombre de trois et peuvent agir soit séparément, soit simultanément.

1 - L'élévation de la température

Elle a deux origines possibles :

- l'enfouissement des roches au sein de l'écorce terrestre

Cet enfouissement se développe le plus souvent dans les conditions géodynamiques d'affrontement de plaques,

(1) soit en contexte de **subduction** (affrontement d'une plaque océanique et d'une plaque continentale) avec pour conséquences l'enfoncement d'une portion de lithosphère océanique sous la lithosphère continentale et la **formation d'une chaîne de montagnes de type "marge active"** comme la Cordillère des Andes*).

(2) soit en contexte de **collision** (affrontement de deux plaques continentales), avec pour conséquences le chevauchement d'une plaque sur l'autre (et donc le surépaississement local de la croûte continentale) et l'érection d'une **chaîne de montagnes de type alpin ou himalayen**).

Dans ces conditions d'enfouissement, l'élévation de température est le résultat du **flux thermique** qui émane de la Terre. Ce flux n'est pas uniforme et varie selon les contextes géodynamiques. L'accroissement de température en fonction de la profondeur (ou "**gradient géothermique**") est en moyenne de 1°C/30m, mais l'on connaît des contextes où ce gradient est de 1°C/10m, d'autres aussi où il n'est que de 1°C/60m.

- la mise en place d'un pluton magmatique

Quelque soit la nature du magma (granitique, andésitique, basaltique) et quelque soit la profondeur à laquelle ce pluton se met en place, sa température (comprise entre 700 et 1200°C) est toujours supérieure à celle des roches encaissantes. Ainsi, la mise en place d'un tel

(*) On exclut du métamorphisme les processus d'altération physique et chimique affectant les roches à l'affleurement.

(**) Dans le cas des sédiments, le métamorphisme débiterait donc dès que les conditions de pression et de température diffèrent significativement de celles existant lors de la sédimentation. Cependant, on préfère utiliser le terme de diagenèse (plutôt que celui de métamorphisme) pour décrire les processus, qui se développent à profondeur relativement faible (voir Fig. 3) et qui sont seulement responsables de la transformation d'un sédiment meuble et gorgé d'eau (un sable, une boue ...) en une roche cohérente et anhydre (un grès, une pélite ...).

pluton est toujours à l'origine d'un important réchauffement des roches qui entourent le pluton. Le métamorphisme qui se développe dans de telles conditions est essentiellement thermique (thermométamorphisme) et correspond à ce que l'on appelle le métamorphisme de contact.

2 - L'élévation de la pression de charge

Chaque roche en profondeur est soumise à une pression de charge (ou pression lithostatique) qui est due au poids des roches surincombantes. Cette pression est d'origine gravitaire et elle est orientée de haut en bas. Dans la mesure où aucun écoulement plastique n'affecte les roches sur lesquelles cette pression s'applique, et dans la mesure où ces roches sont homogènes, la pression lithostatique est de type hydrostatique, c'est à dire qu'elle s'applique avec la même intensité dans toutes les directions de l'espace. Cette pression ne peut donc pas provoquer la déformation de la roche.

3 - La contrainte

Il s'agit d'une pression orientée d'origine tectonique, donc liée aux mouvements des plaques. C'est elle qui est à l'origine de la déformation des roches. La manière dont les roches se déforment dépend essentiellement de la température, et donc aussi de la profondeur (voir les figures 1A et 1B).

En surface et à faible profondeur (Fig. 1A), les roches ont un comportement cassant. Dans ce cas, la déformation se manifeste par des plans de rupture - des failles - et le mécanisme de déformation est le cisaillement. La "tranche de terrain" dans lequel le mécanisme de déformation dominant est le cisaillement est qualifié de niveau structural supérieur : c'est donc le domaine des failles (Fig. 1B).

A plus grande profondeur, et donc à plus haute température, les roches acquièrent une certaine plasticité et elles peuvent donc s'étirer sans se rompre (on dit qu'elles sont "ductiles") (Fig. 1A). Dans ces nouvelles conditions, au lieu de se casser, les roches se plissent. Dans un premier temps, lorsque la ductilité n'est pas encore très importante, les roches se plissent de façon simple et le mécanisme de déformation est la flexion. La "tranche de terrain" dans lequel le mécanisme dominant est la flexion, correspond au niveau structural moyen. Ce niveau structural est donc le domaine des plis (Fig. 1B).

Lorsque la ductilité devient très importante, la déformation se généralise, les plis se resserrent et la roche subit un aplatissement qui a pour conséquence l'apparition d'un débit mécanique. Ce débit - que les géologues appellent la schistosité - confère à la roche un "feuilletage" plus ou moins serré, qui permet à la roche de se déliter en lames plus ou moins épaisses et plus ou moins régulières. Le schiste ardoisier (Fig. 5A) est le meilleur exemple de roche présentant une schistosité. Globalement, ce feuilletage se développe parallèlement aux plans axiaux des plis (Fig. 2A). Dans ce cas, le mécanisme de déformation dominant est l'aplatissement (Fig. 1A). Le niveau structural correspondant est l'inférieur (Fig. 1B) et c'est donc le domaine de la schistosité. C'est dans ce domaine que se développe ce que nous définiront ultérieurement comme le métamorphisme général.

A plus grande profondeur, lorsque les roches sont portées à des températures proches ou supérieures à leur point de fusion (Fig. 1A), elles se comportent comme des liquides extrêmement visqueux susceptibles d'écoulement (Fig. 2B). Ce domaine correspond à celui de l'anatexie (Fig. 1B) et le mécanisme de déformation est alors l'écoulement.

Il est évident qu'on ne passe pas brutalement d'un mécanisme à l'autre mais qu'il y a, au contraire, une évolution progressive, si bien que, dans certains domaines, plusieurs mécanismes peuvent intervenir en même temps.

Les résultats du métamorphisme

Les roches soumises au métamorphisme subissent une recristallisation. Quand le métamorphisme s'opère sous contrainte; les roches subissent en plus une déformation, qui, le plus souvent, se développe en même temps que la recristallisation.

- La recristallisation

Elle est provoquée par l'élévation de la température et de la pression de charge. Les roches

soumises au métamorphisme contiennent deux types de minéraux : des minéraux qui vont rester stables lorsque la température et la pression s'élèveront et d'autres qui seront instables et qui vont donc disparaître.

Quelle que soit l'origine de l'élévation de température (intrusion magmatique, enfouissement), la recristallisation se traduit, dans une roche donnée, de deux manières :

- par l'**augmentation de la taille des minéraux** qui restent stables dans les nouvelles conditions de pression et de température. Ces minéraux correspondent donc à des **minéraux hérités recristallisés**. Le quartz et le feldspath, que l'on rencontre dans de nombreuses roches métamorphiques, ont souvent une origine de ce type : ils appartenaient à l'association minéralogique initiale de la roche et le métamorphisme a eu pour seul effet d'augmenter la taille de leurs cristaux (ce qui souvent les rend visibles à l'oeil nu, alors que dans la roche initiale ils étaient invisibles).

- par l'**apparition de nouveaux minéraux** - les **minéraux néoformés** - qui se forment à partir des éléments chimiques libérés lors de la destruction de minéraux initiaux instables dans les nouvelles conditions de pression et de température. Les réactions chimiques responsables de l'apparition de ces nouveaux minéraux, en équilibre donc avec les nouvelles conditions de pression et de température, s'opèrent toujours à l'état solide. Dans le cas d'un enfouissement progressif de la roche, ces réactions chimiques se succèdent au fur et à mesure que la pression et la température augmentent. Un exemple classique est celui de la transformation des minéraux argileux en fonction de la température : à des températures voisines de 350°C, les minéraux argileux se transforment, en fonction de leur composition initiale, en deux phyllosilicates, la séricite* et la chlorite ; à plus haute température, la séricite se transforme en muscovite et, vers 450°C, la chlorite se transforme en biotite. Si la température dépasse 600°C, la muscovite, à son tour, devient instable et se transforme en un mélange de feldspath potassique et de cordiérite. Ces minéraux nouveaux sont donc extrêmement importants car ils constituent autant de repères qui permettent d'estimer la température à laquelle la roche a été soumise. D'autres minéraux nouveaux, les silicates d'alumine (andalousite, sillimanite, disthène) en particulier, permettent d'accéder à l'estimation de la pression.

Minéraux hérités recristallisés et minéraux néoformés constituent donc la nouvelle composition minéralogique de la roche.

- La déformation

Dans le domaine structural où se développe le métamorphisme général (voir § Contrainte), la **recristallisation s'opère en même temps que les roches acquièrent une schistosité**. Dans ces conditions, la plupart des minéraux recristallisent ou croissent dans un plan préférentiel et, souvent aussi, suivant une même direction. Ce phénomène est particulièrement visible dans les roches contenant des micas (Fig. 5B et C) : dans ce cas, en effet, toutes les paillettes de micas sont disposées à plat dans les plans de schistosité. Cette nouvelle structure s'appelle la **foliation** et les roches métamorphiques la présentant sont dites "foliées".

Les deux types de métamorphisme

Les domaines de pression et de température dans lesquels se développent le **métamorphisme de contact** et le **métamorphisme général** sont donnés dans la figure 3.

- Le métamorphisme de contact

Il fait essentiellement intervenir l'**élévation de la température associée à la mise en place des plutons**. Il s'opère à des profondeurs variables (et donc sous des pressions de charge variable), qui dépendent du niveau auquel s'est injecté le magma**. Les modifications

(*) La séricite correspond minéralogiquement à un ensemble de phyllosilicates dont la composition est voisine de celle de la muscovite.

(**) Dans le cas du granite de l'Aigoual, le magma est remonté jusqu'à environ 6km de profondeur; le métamorphisme de contact s'est donc développé sous une pression de charge correspondant à ces 6km de terrain surincombant.

induites au sein des roches qui entourent ces plutons, se développent sous la forme d'une **auréole** (Fig. 4) dont la largeur est relativement faible (hectométrique à kilométrique) et varie suivant la roche affectée. Les transformations peuvent se résumer en une recristallisation générale et l'apparition de minéraux néoformés marqueurs de l'élévation de température des roches. Dans le cas de ce métamorphisme, souvent la recristallisation s'opère indépendamment de toute contrainte : on dit alors qu'elle est statique. Dans ce cas, les roches n'acquièrent pas de foliation.

- Le métamorphisme général

Ce métamorphisme (que l'on appelle aussi "régional") fait intervenir à la fois l'élévation de température et de pression de charge, ainsi que les contraintes induites par le mouvement des plaques. Ce type de métamorphisme se développe le plus souvent dans les zones où les plaques s'affrontent (subduction, collision) et l'échelle du phénomène est celle des chaînes de montagnes qui s'édifient dans ces zones d'affrontement (Chaîne alpine, Chaîne himalayenne, Cordillère des Andes...). Le soubassement de toutes ces chaînes est en effet entièrement constitué par des roches métamorphiques de ce type.

Les transformations associent déformation (résultant de l'application des contraintes) et recristallisation (résultant de l'élévation de température et de pression de charge). Cette recristallisation s'opère donc en même temps que la roche se déforme et dans ce cas les roches acquièrent systématiquement une foliation.

Indépendamment de toute considération sur la nature de la roche originelle, et si l'on se réfère uniquement aux caractères minéralogiques et structuraux, deux types pétrographiques principaux sont à distinguer : le type "schiste" et le type "gneiss".

- **les schistes** : ils présentent une foliation, mais leur débit se fait en feuillets minéralogiquement identiques (Fig. 5B). Suivant la nature du phyllosilicate dominant, on distinguera des séricitoshistes, des chloritoschistes et des micaschistes. Dans ces schistes, le quartz est visible à l'oeil nu, mais le feldspath ne l'est pas.

- **les gneiss** : à la foliation se superpose un litage compositionnel, se traduisant par une alternance millimétrique à centimétrique de feuillets clairs et sombres de composition minéralogique différente (Fig. 5C). Les feuillets clairs sont essentiellement quartzofeldspathiques, alors que les sombres sont en majeure partie constitués de minéraux ferromagnésiens. Dans ce type de roche, le feldspath est toujours visible à l'oeil nu. L'origine de ce litage compositionnel est complexe et multiple (ancien litage d'origine sédimentaire, différenciation métamorphique d'une roche initialement homogène ...).

A noter que le type "gneiss" n'est pas automatiquement indicateur d'un métamorphisme supérieur à celui du type "schiste". En effet, la transformation en schiste ou en gneiss d'une roche dépend essentiellement de sa nature originelle. Si l'on envisage les transformations affectant, au cours d'un métamorphisme croissant, des roches sédimentaires de type grésopelitique, la succession "séricito-chloritoschiste / micaschiste / gneiss" est représentative de l'accroissement du métamorphisme. Dans ce cas, le gneiss (qui ici devra être appelé un "paragneiss") est une roche plus métamorphique que les schistes. Si le métamorphisme affecte un granite, cette roche (dont la composition minéralogique - quartz+feldspaths+micas - est déjà celle d'un gneiss), dès les premiers stades du métamorphisme, se déformera et se transformera en un "orthogneiss". On peut donc trouver sur le terrain schistes paradérivés et gneiss orthodérivés associés et correspondant au même niveau de métamorphisme.

L'anatexie

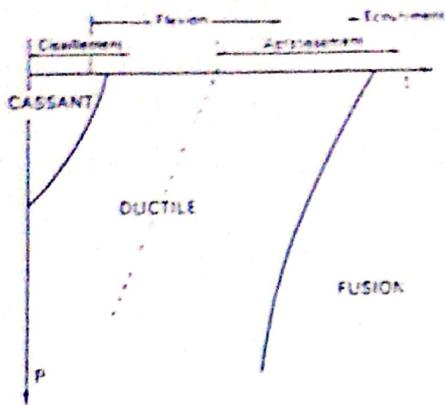
Dans les zones de fort métamorphisme, le point de fusion (environ 800°C) des roches métamorphiques peut être atteint (Fig. 1B et 3) : un liquide de composition granitique va

(*) Dans les roches que nous aurons l'occasion d'étudier en T.P., et qui ont été prélevées dans l'auréole de métamorphisme de contact du granite de l'Aigoual, le métamorphisme de contact se traduit uniquement par l'apparition au sein de la roche de taches noires millimétriques constituées par un minéral nouveau, la cordiérite. La roche, un schiste, prend un aspect tacheté tout à fait caractéristique.

alors se former par **fusion partielle** de ces roches. C'est le domaine de l'**anatexie** (Fig. 3). On regroupe sous le nom d'**anatexite** (ou de **migmatite**) toutes les roches métamorphiques présentant des traces de fusion partielle.

Au niveau des échantillons, l'anatexie se traduit par l'apparition au sein de la roche, de matériel granitique (constitué donc de quartz et de feldspath) qui, dans certains cas, se concentre sous la forme de lits centimétriques entre les plans de foliation, dans d'autres s'injecte sous la forme de filonnets à travers la roche. Souvent, en raison de leur aptitude à l'écoulement (voir § Contrainte), les anatexites présentent des structures plissées. Les plis, dans ce cas, ne sont pas d'origine tectonique, mais liés à l'écoulement de la roche en profondeur.

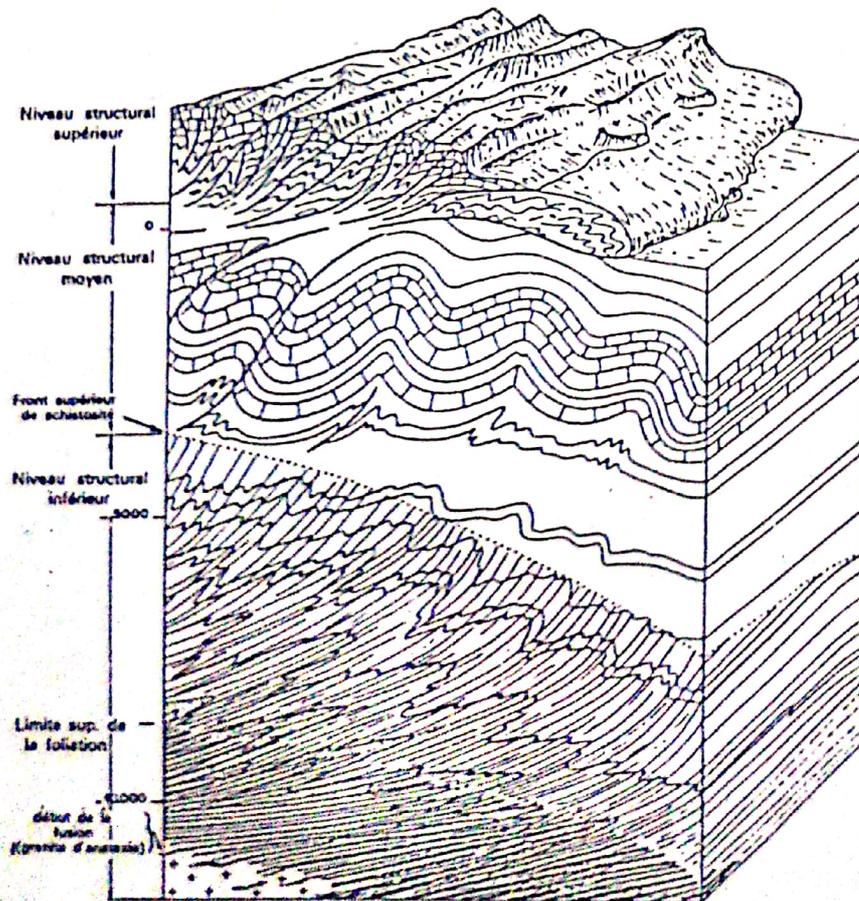
Les zones de fusion partielle crustales décrites dans le dossier "Roches magmatiques" sont constituées par de telles anatexites. Ce sont ces roches qui, lorsque la fusion s'accroît, donnent les granites d'anatexie. Elles représentent donc la source des magmas granitiques.



Allure schématique des domaines des différents comportements des corps en fonction de la Pression et de la Température et mécanismes élémentaires de déformations correspondants.

Fig. 1A

LES PRINCIPES DE DÉFINITION DES NIVEAUX STRUCTURAUX



Coupe théorique d'une portion d'écorce montrant la superposition des différents niveaux structuraux et l'allure des structures correspondantes.

Fig. 1B

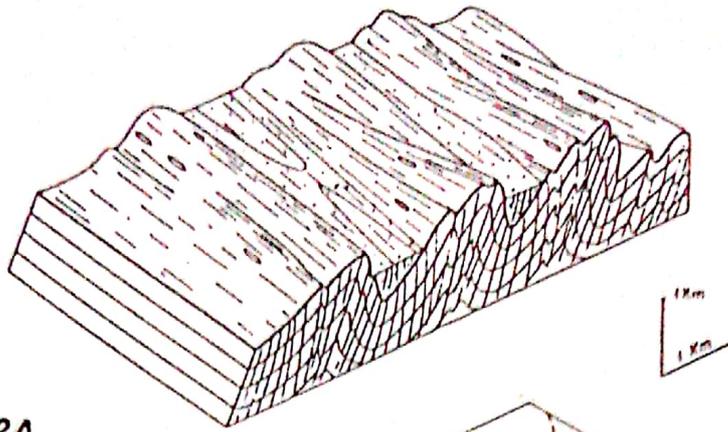


Fig. 2A

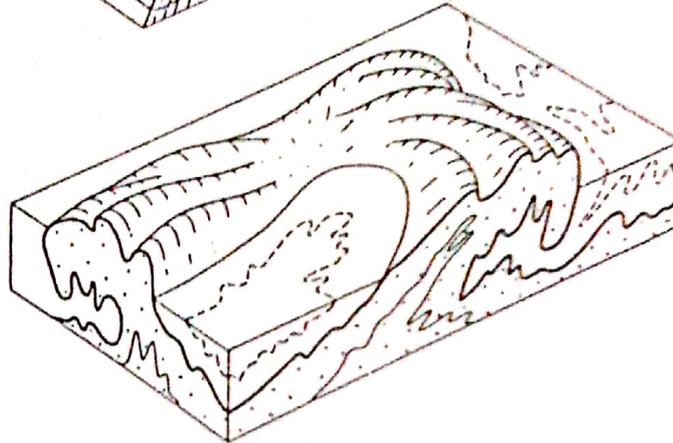


Fig. 2B

Deux aspects de la déformation d'une tranche de terrain effectuée en conditions profondes.
Haut : plissement anisopaque avec schistosité. Bas : plis d'écoulement.

