

DOSSIER "GEOLOGIE" XXI

LE METAMORPHISME

Robert SIX

I. INTRODUCTION

Sur le terrain, on remarque que généralement les **roches feuilletées et litées** sont **associées**. Ainsi, si, par exemple, on suit une **coupe** entre Brive et Tulle (**60 Km**), on trouve successivement des **ardoises**, des **schistes**, des **micaschistes**, des **gneiss** et enfin du **granite**. Plus on avance dans cette suite, plus les roches deviennent dures et « transformées ». Il y a eu **métamorphose** et les roches rencontrées, à l'exception du granite, sont dites « **roches métamorphiques** ».

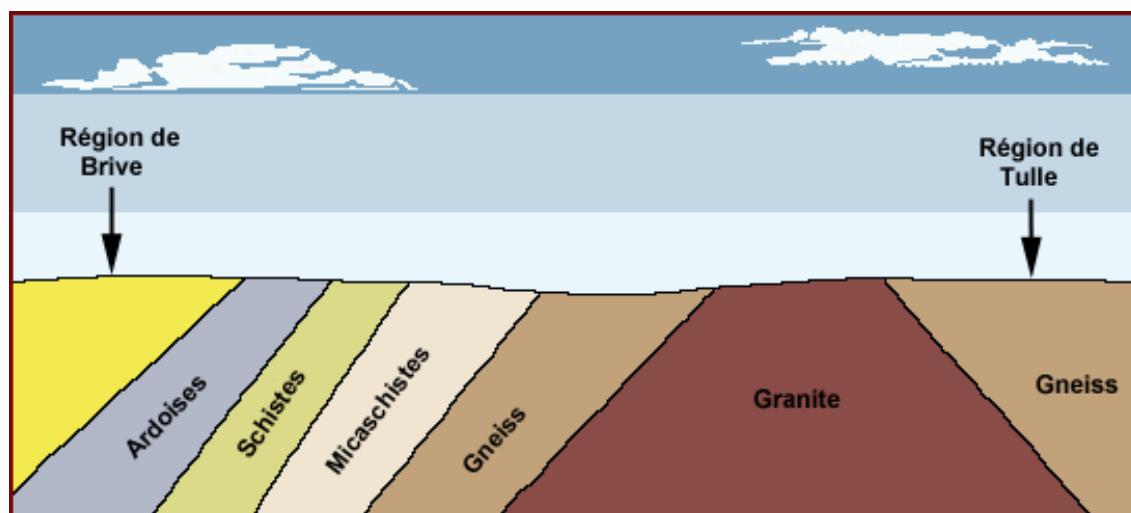


Fig. 1 – Coupe géologique simplifiée entre Brive et Tulle (redessiné par R. SIX, d'après MICHEL F.)

Les termes « **roches métamorphiques** » apparaissent pour la première fois dans les "*Principles of Geology*" de **Charles LYELL** en 1833. « **Métamorphisme** » (du grec *meta*, qui marque la succession, et *morpho*, forme) évoque l'idée de la transformation, du changement.

Bien avant **LYELL**, en 1795, **James HUTTON**, le fondateur du « **plutonisme** », décrit pour la première fois les profondes modifications subies par les sédiments sous l'influence de la chaleur et de la profondeur, au contact des nappes basaltiques. Les roches, ces monuments du passé, ont pu changer de nature, et leur état actuel ne reflète alors que cet acte de transformation. De statique, le monde devient fluctuant et dynamique. C'est à ce titre-là surtout que l'Écossais James HUTTON mérite d'être appelé « le fondateur de la géologie moderne ».

Le « **plutonisme** » est une théorie géologique du XIX^e siècle qui s'oppose au « **neptunisme** ». Dans cette conception, HUTTON pense que les roches sont créées par l'activité volcanique. Il nomme sa théorie d'après le dieu Pluton. HUTTON et l'école plutoniste reconnaît l'origine intrusive du granite. Le « **neptunisme** », fondé par WERNER, professeur à l'Ecole des Mines de Freiberg en Saxe, au XVIII^e siècle, établit que les roches cristallines appartiennent à la croûte primitive de la Terre, formée après son refroidissement par précipitation au fond des eaux.

Mais c'est n'est que dans la **seconde moitié du XIX^e siècle** que fut observé pour la première fois une **transition progressive** entre des sédiments fossilifères et des roches métamorphiques formées à partir de ces sédiments et que le terme de **métamorphisme régional** ou **général** fut introduit.

Le **métamorphisme** est l'ensemble des **transformations minéralogiques, structurales et texturales** qui affectent les roches à l'état solide lorsqu'elles sont soumises à des **conditions physiques et chimiques** différentes de celles qui présidèrent à leur formation. A l'origine ce peuvent être d'anciennes roches sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques, qui ont subi des transformations.

Avec les roches ignées, les **roches métamorphiques** constituent l'essentiel, en volume, de l'écorce terrestre dans les régions continentales et se retrouvent en majorité dans les **boucliers continentaux** anciens et dans les **chaînes de montagnes** récentes. En outre, il est probable qu'elles s'étendent plus encore sous les bassins sédimentaires à quelques milliers de mètres en profondeur. Le métamorphisme est en fait un phénomène de profondeur. Elles affleurent au bout d'un moment (plusieurs millions d'années) à la surface terrestre à la suite de mouvements verticaux de **surrection** (isostasie) et de **érosion** des roches qui les recouvrent. On connaît aussi des roches métamorphiques dans les domaines océaniques.

Bouclier : (ou craton) vaste zone granitique de l'écorce terrestre, tectoniquement stable et relativement épaisse, 30 à 40 kilomètres en moyenne (le bouclier scandinave, canadien, brésilien, etc.).

Isostasie : état d'équilibre gravitationnel de compartiments rocheux au-dessus d'une surface d'égale gravité (ou surface de compensation) interne au globe terrestre.

II. GENERALITES

A. Les agents du métamorphisme

On ne peut déduire ni reconstituer les **phénomènes métamorphiques** qu'au travers des **structures, textures, caractères pétrographiques** des roches qui les ont subis.

La **transformation** des roches métamorphiques a lieu à l'**état solide** et n'est possible que par l'existence de **films liquides** très ténus (essentiellement aqueux) et discontinus entre les cristaux. Ces films mettent en contact les différents minéraux de la roche et permettent l'**échange de groupements ioniques** entre les réseaux cristallins. Ces réactions ne s'opèrent que grâce à la **variation** et à l'**interaction** des agents suivants : la **température** - la **pression** - la **phase fluide** percolant dans les interstices laissés par les grains minéraux.

1. La température

En s'enfonçant progressivement sous de nouvelles couches de sédiments, les roches sont soumises à des températures de plus en plus élevées. Cette **élévation de température** peut être due à divers facteurs :

- a) **L'enfouissement des sédiments dans une fosse géosynclinale** (dû à la pression exercée par le poids des sédiments)

Fosse géosynclinale : vaste dépression allongée de la croûte terrestre caractérisée par une grande épaisseur de sédiments, par exemple : zone de subduction (tectonique de plaques).

C'est le **degré** ou **gradient géothermique** qui intervient alors. Il est défini comme étant l'augmentation de la température en fonction de la profondeur ou de la pression et se calcule suivant la formule :

$$\text{Gradient} = (\text{t}^\circ \text{ en profondeur} - \text{t}^\circ \text{ de surface}) / \text{profondeur}$$

Le gradient dépend de la proximité du manteau. Le gradient géothermique moyen dans les régions superficielles de l'écorce est d'**environ 3° C** par tranche de **100 mètres** de profondeur, mais il varie suivant la constitution profonde de ces différentes régions. Cependant, on peut estimer que la température atteint **250 à 300° C** à **10 Km de profondeur**.

Gradient géothermique : grandeur exprimant l'augmentation de la température en fonction de la profondeur de la lithosphère.

Dans les **boucliers continentaux**, régions stables, le gradient vaut **1,5 à 2° C** par **100 mètres de profondeur**, tandis que dans les **régions tectoniques instables**, les **zones de subduction** par exemple, il atteint des valeurs de **6° C** par **100 mètres de profondeur**.

Zone de subduction : zone d'enfoncement de la lithosphère océanique dans l'asténosphère.

On distingue **trois** types de gradient métamorphique :

- le **gradient Franciscain** (F), inférieur à 20° C/Km, correspond à un métamorphisme de basse température et de haute pression. Il traverse souvent le faciès des schistes bleus et les éclogites. On le rencontre particulièrement dans les phénomènes d'enfouissement, de subduction, ou d'obduction.

Obduction : phénomène inverse de la subduction qui consiste au chevauchement d'une vaste portion de la croûte océanique sur une zone continentale.

- Le **gradient Dalradien** (D), gradient normal entre 30 et 35° C/Km. Il correspond à un métamorphisme de pression et température moyennes. Il concerne le métamorphisme localisé dans les orogènes de collision.
- Le **gradient Abukuma** (A), de valeur importante, 50 à 55° C/Km. Il correspond à un métamorphisme de basse pression et haute température. Il caractérise des zones où existe une forte source de chaleur, comme dans le métamorphisme de contact ou les rifts médio-océaniques.

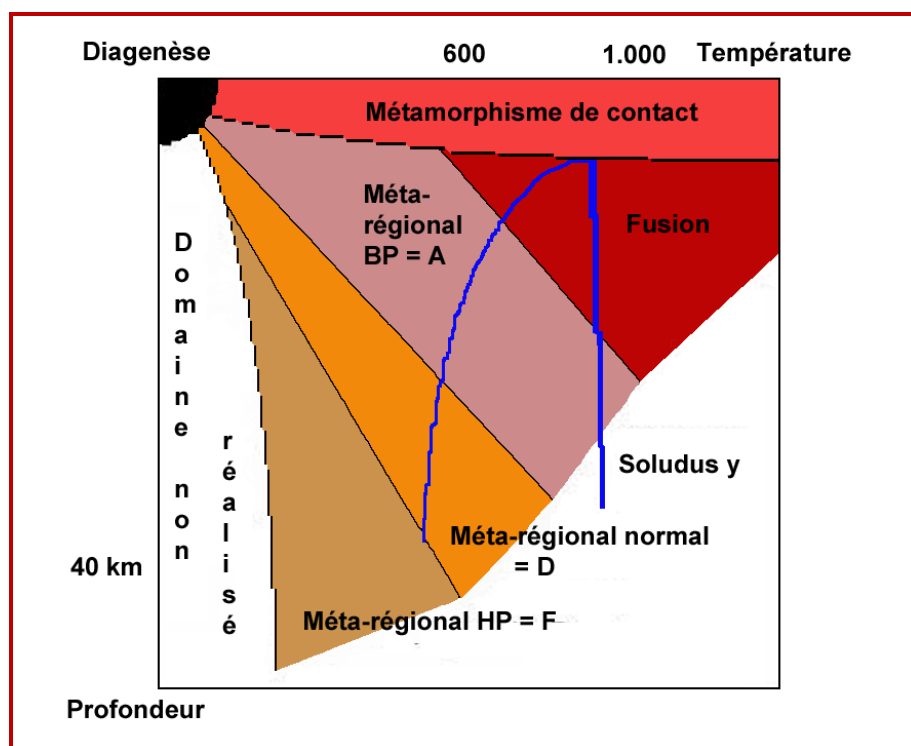


Fig. 2 – Types de métamorphisme en fonction du gradient thermique
A = gradient Abukuma ; D = gradient Dalradien ; F = gradient Franciscain

b) Les intrusions magmatiques et les épanchements volcaniques

L'intrusion d'une série sédimentaire, magmatique ou métamorphique par un corps magmatique (sill, dyke, neck,...) provoque le passage d'une vague de chaleur entraînant une forte élévation de température dans les roches

encaissantes. La propagation de cette vague de chaleur dépend bien entendu de la conductivité thermique des roches intrudées.

Epanchement volcanique : nappe de lave d'épaisseur et d'extension très variables, qui dévale les flancs d'un volcan et se répand sur les régions environnantes. Des fragments d'anciennes nappes basaltiques couronnent certains reliefs, formant ainsi des plateaux basaltiques. Exemple : les plateaux de Dekkan (Inde).

Sill : (ou filon-couche) corps magmatique intrusif, en forme de couche, injecté dans les roches encaissantes suivant les plans de stratification (intrusion concordante).

Dyke : corps magmatique intrusif en forme de couche, discordant par rapport à la stratification et qui, dégagé par l'érosion, se dresse en une muraille escarpée.

Neck : corps magmatique intrusif en forme de cheminée plus ou moins cylindrique, discordant par rapport à la stratification.

c) La transformation locale d'énergie mécanique en énergie thermique

Ce facteur intervient au contact de deux compartiments rocheux en mouvement relatif l'un par rapport à l'autre par friction (dans les zones de subduction, de charriage, de cisaillement). Il apparaît aussi au cœur des grands plis où la compression est extrême (lors de la surrection des chaînes de montagne).

Charriage : chevauchement sur grande distance de formations autochtones par une nappe de formations allochtones épaisse de centaines et parfois de milliers de mètres.

Cisaillement : déformation par aplatissement et rotation aboutissant à la rupture.

2. La pression

En même temps que la température des roches s'accroît en profondeur, les pressions qu'elles subissent s'élèvent également progressivement. Ces pressions dépendent de diverses circonstances telles :

a) L'enfouissement d'un sédiment (voir 1.a.)

Cet enfouissement est engendré par la charge des sédiments surincombants¹; on parle alors de **pression lithostatique** ou **pression de**

¹ **Surincombant** : qui est étendu par-dessus.

charge. Sa valeur dépend de la **profondeur** et de la **densité** des roches; l'augmentation moyenne est d'environ **250 à 300 atmosphères pour 1.000 mètres** de sédiments. En prenant une **moyenne de 2,5** comme densité des roches, on arrive à une pression de **1.000 atmosphères à 4.000 mètres** de profondeur.

Surincombant : qui est étendu par-dessus.

La **pression lithostatique** ayant des valeurs égales dans toutes les directions, elle est donc **isotrope** (valeurs égales dans toutes les directions).

b) Les déformations tectoniques

Les **déformations de l'écorce terrestre** engendrent des **contraintes** auxquelles sont liées des pressions dirigées ou **stress**, lesquelles déterminent les **structures orientées** des roches d'un certain type de métamorphisme. Elles influent également sur la **composition minéralogique** de ces roches. Ces pressions orientées se font sentir à des profondeurs limitées et, comme leur nom l'indique, elles varient suivant la direction; elles sont donc **anisotropes** (intensités variant suivant les directions de l'espace considéré).

3. Les phases fluides interstitielles

L'**activité chimique** de **phases fluides** percolant dans les espaces intergranulaires des sédiments, engendre elle aussi des **réactions métamorphiques**. Ces phases fluides trouvent leur origine dans les eaux marines ou lacustres piégées dans les sédiments (**eaux connées** ou eaux fossiles) ou dans la dissociation des carbonates et des argiles sédimentaires. Elles peuvent également être libérées par des réactions chimiques en cours. La pression de ces phases fluides joue également un rôle important.

Connée : en parlant d'eau contemporaine des sédiments, signifie piégée dans les sédiments.

Si les fluides interstitiels peuvent migrer librement dans les roches et communiquer avec la surface terrestre, leur pression vaut approximativement un tiers de la pression lithostatique.

Si les fluides ne sont pas en communication avec la surface terrestre, leur pression peut être équivalente à la pression de charge et même supérieure, si ces fluides proviennent d'intrusions magmatiques voisines, ou de réactions chimiques.

Les agents du métamorphisme, tels qu'ils viennent d'être définis (1, 2, 3), caractérisent le développement d'un **métamorphisme progressif**, correspondant à des valeurs croissantes de la température et de la pression, ainsi qu'à la libération d'une phase fluide ; ils sont capables de transformer un sédiment meuble en une roche métamorphique largement recristallisée dans laquelle l'association minérale est à l'équilibre (**paragenèse**). On utilise également l'expression **évolution prograde**.

Paragenèse : dans le cas des roches métamorphiques, ce terme désigne les associations de minéraux qui sont ensemble stables dans certaines conditions de T et de P et caractérisent en outre le chimisme général des roches

Il existe toutefois assez fréquemment un **métamorphisme régressif** ou **évolution rétrograde** affectant les roches métamorphiques largement recristallisées lorsqu'elles sont ramenées en surface par le jeu du réajustement isostatique et de l'érosion.

Au cours de cette remontée, elles évoluent vers un nouvel équilibre de plus basses température et pression, mais elles le font avec une vitesse infiniment plus lente que dans le métamorphisme progressif parce que les températures sont plus basses, que la porosité des roches est pratiquement nulle et que la phase fluide fait habituellement défaut.

B. Les limites du métamorphisme

1. Métamorphisme isochimique et métasomatisme

On oppose le métamorphisme **isochimique** (ou **topochimique**) au **métasomatisme**.

Dans le premier, les **transformations** s'opèrent **sans modification** notable de la composition chimique globale de la roche, par addition ou perte d'un ou plusieurs constituants.

Le **métasomatisme** au contraire implique un apport important de substances provenant le plus souvent de la proximité d'un corps magmatique en voie de consolidation. Au sens large, le **métasomatisme** peut désigner toute **introduction ou expulsion de matière** dans la roche transformée à l'intervention d'un gaz (**pneumatolyse**), de solutions aqueuses (dites **hydrothermales**), ou de magma fluide (migmatites). Au sens strict, le **métasomatisme** est un **processus moléculaire** essentiellement simultané, de **dissolution** et de **précipitation** au cours duquel un minéral, en contact avec une phase fluide, est transformé en un autre minéral de composition chimique différente.

En milieu solide, cette transformation s'opère nécessairement à volume constant.

Pneumatolyse : stade de la différenciation magmatique où la vapeur d'eau se condense pour former les solutions hydrothermales.

Hydrothermal : qui résulte d'émanations magmatiques riches en eau chaude ou en vapeur.

2. Les limites du métamorphisme

Rappelons que l'**altération superficielle** des roches qui conduit à la formation des sols, ou la **cémentation** par les eaux météoriques, font appel à l'action de **phénomènes exogènes**, c'est-à-dire externes à la lithosphère (par opposition

aux phénomènes endogènes, internes à la croûte terrestre) et n'entre donc pas dans le processus du métamorphisme.

La **diagenèse** d'un sédiment, dont les divers processus transforment un sédiment meuble en une roche sédimentaire cohérente, est également exclue de la définition du métamorphisme, car elle a lieu à de très basses températures. La diagenèse constitue donc la **limite inférieure du métamorphisme**.

Mais cette limite n'est pas tranchée. Ainsi, pour **VON ENGELHART (1967)**, la diagenèse cèderait le pas au métamorphisme lorsque les pores, permettant la circulation des fluides au sein des sédiments, sont bouchés par compaction ou par colmatage des vides, par précipitation chimique de solutions. Pour d'autres pétrographes, la limite inférieure du métamorphisme est définie dans les **roches pélitiques** par le degré de cristallinité d'un minéral argileux de structure réticulaire complexe, l'**illite** ; ce degré est déterminé par la méthode des rayons X. Dans les roches de composition basique, la limite inférieure du métamorphisme est définie lors de l'apparition de certains **minéraux zéolitiques**.

Roches pélitiques : roches sédimentaires détritiques à grains très fins.

Illite : fait partie de la série des minéraux argileux dont il est le plus commun des argiles.

Zéolites : famille d'alumino-silicates hydratés complexes, regroupant une trentaine de minéraux.

La **limite supérieure du métamorphisme** est déterminée par la **température de fusion des roches**, puisque celui-ci affecte les roches à l'état solide. Suivant la composition chimique de la roche considérée et la présence ou l'absence d'eau, la fourchette de température se situe entre **700 et 1.000 degrés**. On entre alors dans le domaine des migmatites; cette limite supérieure n'est pas non plus très nette.

Migmatites : roches résultant d'un mélange complexe de gneiss et de matériaux granitiques, le contact entre les deux étant généralement diffus. Sur base de leur texture, on a défini un grand nombre de migmatites.

III. LES DIFFERENTS TYPES DE METAMORPHISME

Une définition des principaux **types de métamorphisme** est basée à la fois sur la présence de l'un ou l'autre **agent du métamorphisme** et sur la **nature du processus géologique** responsable du métamorphisme observé. Nous avons vu que ces facteurs sont essentiellement la **température** et la **pression**, qui peuvent agir simultanément, ou l'un d'eux prévaloir sur l'autre. On distingue habituellement deux grands types de métamorphique :

- le **métamorphisme thermique** ou **de contact** dû à une élévation de température localisée autour d'une intrusion magmatique ;
- le **métamorphisme général** ou **régional** dû à une augmentation simultanée des températures et des pressions à la suite de mouvements de dislocation et d'enfouissement de vastes zones de l'écorce terrestre.

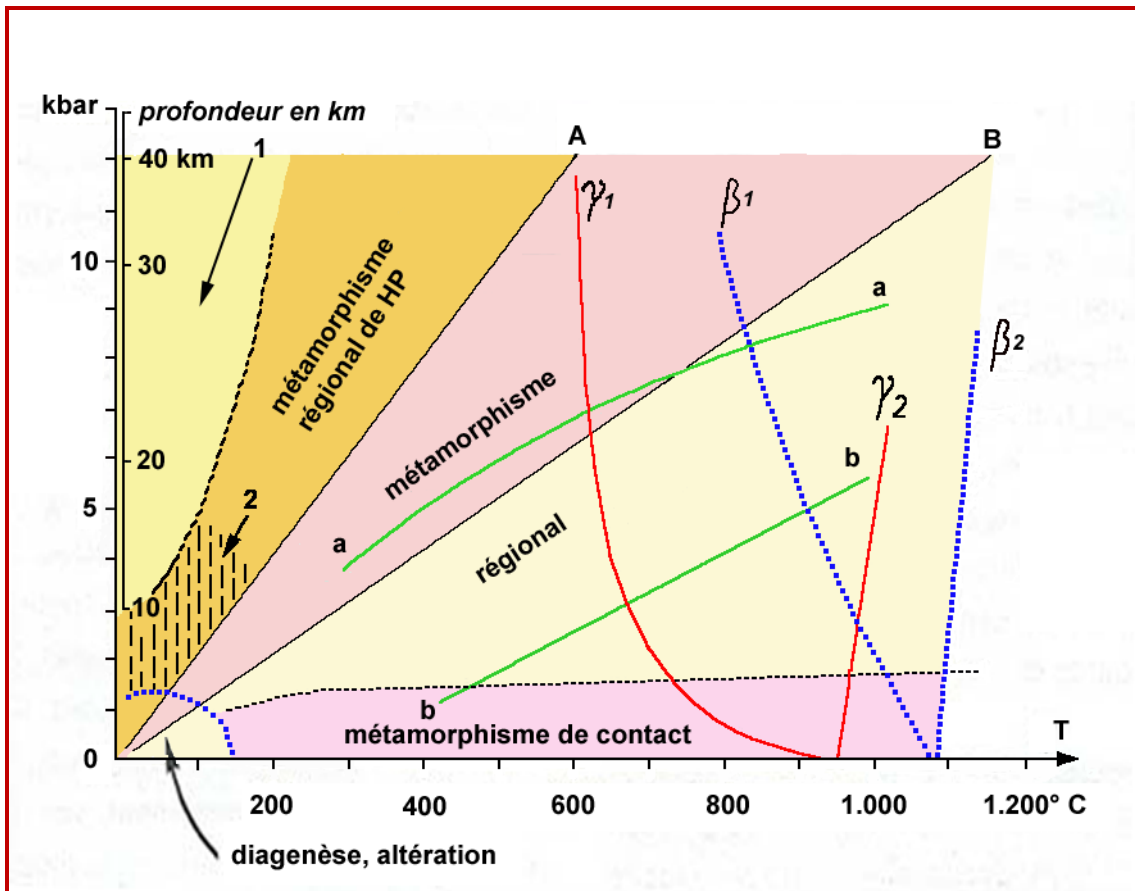


Fig. 3 – Types de métamorphisme

1 : conditions non réalisées dans la nature – 2 : métamorphisme dynamique – Dans le métamorphisme régional, la zone hachurée entre A et B correspond à un gradient géothermique normal ; les courbes aa et bb limitent approximativement de haut en bas les métamorphismes dits de haute pression (HP), de pression intermédiaire, de basse pression (BP) – γ_1 : début de la fusion (solidus), en allant vers la droite du diagramme, du granite en présence de vapeur d'eau saturante – γ_2 : début de la fusion du granite en l'absence de vapeur d'eau – β_1 et β_2 : courbes équivalentes pour le basalte.

A. Le métamorphisme thermique

Dans le **métamorphisme thermique**, le facteur principal de transformation des roches est une élévation de température très importante, localisée dans l'environnement immédiat d'une intrusion magmatique. Il en résulte des réajustements minéralogiques. Selon le processus géologique responsable de la variation de température, on distingue :

1. Le métamorphisme de contact

Il s'observe lorsqu'il y a remontée de magma sans affleurement en surface, au contact des intrusions magmatiques avec les terrains encaissants, ou à la base des coulées volcaniques. Ce métamorphisme, dû à la propagation d'une "vague de chaleur", provoque la cuisson de la roche encaissante aux bordures qui se caractérisées par l'apparition de nouveaux minéraux, généralement de petite taille et non orientés. La vague de chaleur décroît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du contact intrusif, ce qui donne lieu à la formation de différentes zones concentriques, caractérisées par des associations minérales et des degrés différents de recristallisation des roches. Cet ensemble de zones concentriques forme une **auréole de contact** qui ne dépasse généralement pas quelques hectomètres, rarement plusieurs kilomètres.

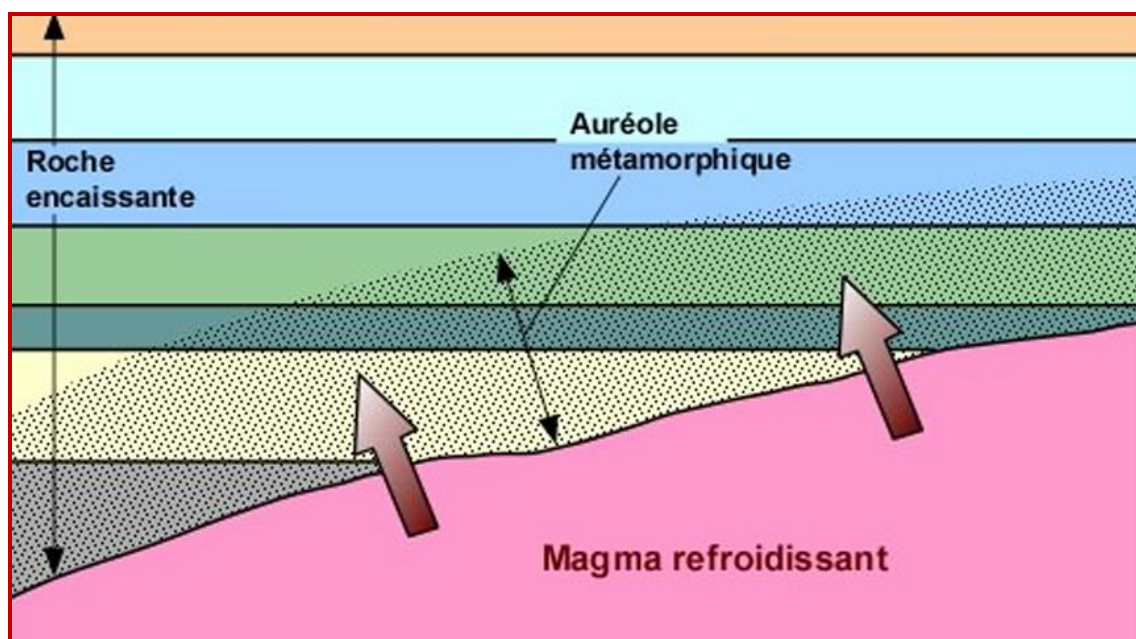


Fig. 4 – Métamorphisme de contact (les grosses flèches indiquent le transfert de chaleur)

Les minéraux dus à la transformation minéralogique se décomposent et leur substance recristallise en de nouvelles combinaisons minérales. Un schiste argileux se charge de petites taches ou de cristaux de **chiastolite** (Al_2SiO_5) et se métamorphose progressivement en une roche compacte entièrement recristallisée que l'on appelle **cornéenne**.

Cornéenne : roche métamorphique de contact à grain fin et aspect corné, dépourvue de schistosité, à structure équate (isotrope), et très tenace.

De même, au contact d'un granite, un calcaire devient un marbre cristallin et un grès devient un quartzite, par métamorphisme. Ce métamorphisme de contact s'étend autour du batholite à une zone de quelques centaines de mètres de largeur ; celle-ci affleure à la surface du sol et forme l'auréole de contact tout autour du granite.

Exemples :

1) **Vallée d'Andlau** (Bas-Rhin) : en 1877, le géologue allemand **ROENBUSCH** décrit les auréoles de contact sur le versant alsacien des Vosges (excursion faite avec **Thierry MORTIER**).

1° La **zone des schistes tachetés**, présente sur un fond gris-fer chloriteux de petites taches noires de 1 mm environ dues à la formation de cordiérite ;

2° La **zone des schistes noduleux** dans laquelle les taches sont plus nombreuses et font saillie. On y trouve toujours de la cordiérite et aussi de l'andalousite. La biotite tend à remplacer la chlorite ;

3° La **zone des cornéennes à andalousite** où la schistosité s'atténue pour donner place à une roche massive, dure, finement cristallisée d'aspect corné avec des cristaux d'andalousite abondants.

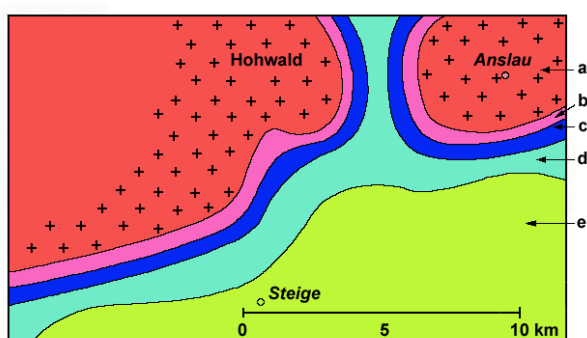


Fig. 5 – Métamorphisme de contact – Vallée d'Andlau :

a) Granite d'Andlau ; b) Cornéennes à andalousite ; c) Schistes noduleux ; d) Schistes tachetés ; e) Schistes de Steige à l'W et schistes de Villé à l'E (non métamorphisés).
(d'après **ROENBUSCH**)

2) **Le ravin de Mairupt** (excursion faite avec **Thierry MORTIER**)

Il s'agit du gîte célèbre de la « **pophyroïde de Mairupt** ». Nous avons affaire à une intrusion (sill) de microgranite (microdiorite quartzifère) d'une épaisseur de 10 m enclavée dans les phyllades Rv3 qui ont subi un **métamorphisme de contact**. La roche est massive au cœur de l'intrusion. La roche encaissante au contact est schisteuse sur une épaisseur d'environ 0,50 m d'épaisseur.

Le long du chemin qui conduit au gîte, on peut observer les **phyllades micacés de la formation Rv3 (Revinien)** affleurant dans la paroi de la route et appartenant au flanc Nord du synclinal de ravin de Mairupt. Ces roches répondent au **faciès métamorphiques des schistes verts**.

La succession des roches est la suivante :

- microdiorite quartzifère
- cornéenne
- schiste tacheté
- phyllade Rv3

Le **métamorphisme de contact** est souvent associé à des phénomènes **métasomatiques**, c'est-à-dire à l'introduction dans les roches au contact de l'intrusion, de fluides provenant du magma et fixés dans les réseaux de quelques minéraux métamorphiques, ce qui provoque un changement de la composition chimique initiale de la roche.

2. L'autométamorphisme (ou autométasomatisme ou autopneumatolyse)

Ce type de **métamorphisme des masses magmatiques** correspond à la **transformation** des **minéraux** d'une roche magmatique, à peine consolidée, par ses propres solutions résiduelles, enrichies en éléments volatils, vers la fin de la consolidation magmatique.

3. Le rétrométamorphisme

Le **rétramétamorphisme** (ou **diaphorèse**) correspond au **métamorphisme régressif des séries métamorphiques**, évoqué antérieurement, et conduisant au réajustement à des conditions de basse température, d'un assemblage minéralogique de haute température.

B. Le métamorphisme général ou régional.

C'est le type de **métamorphisme le plus répandu** tant par sa fréquence que par l'étendue des surfaces et de l'épaisseur des zones affectées. On le rencontre dans les zones orogéniques où les roches sont soumises à des pressions aboutissant à la surrection des chaînes de montagnes. C'est le **métamorphisme des racines des chaînes de montagnes**.

Le **métamorphisme** résulte ici de l'**action combinée** de l'**augmentation** de la température et de la pression lithostatique et de l'existence de pressions dirigées.

Le **métamorphisme régional** produit **trois grandes transformations** :

- une **déformation** souvent très poussée de la roche, entraînant la **recristallisation des minéraux** ;
- le **développement de minéraux dits métamorphiques** conduisant à la **ségrégation** de minéraux de chimisme différent en minces **couches alternantes** ;
- le développement de la **foliation** caractéristique de ce type de métamorphisme. Dans ce dernier cas, les cristaux ou les particules d'une roche ignée ou sédimentaire seront aplatis, étirés par la pression sous des températures élevées et viendront s'aligner dans des plans de foliation privilégiés.

Pour faire simple, on peut dire que la **foliation est la caractéristique que certaines roches métamorphiques ont de se fendre en fins feuillets**. Le type de foliation peut servir de base à un classement de ces roches.

Ainsi l'**ardoise** possède une **foliation parfaite** suivant la direction des très petits grains. Elle se délite facilement en fines plaques, ce qui explique leur emploi dans la couverture des toitures.

Les **micaschistes** présentent des grains plus grossiers de mica et de chlorite. Ceux-ci sont **grossièrement parallèles** entre eux et la roche se fracture moins nettement suivant ces alignements des grains de ces minéraux.

Micaschiste : roche métamorphique à foliation nette, essentiellement constituée de quartz et de micas, accessoirement de feldspath, se débitant en plaquettes minces souvent fragiles et en lames écailleuses.

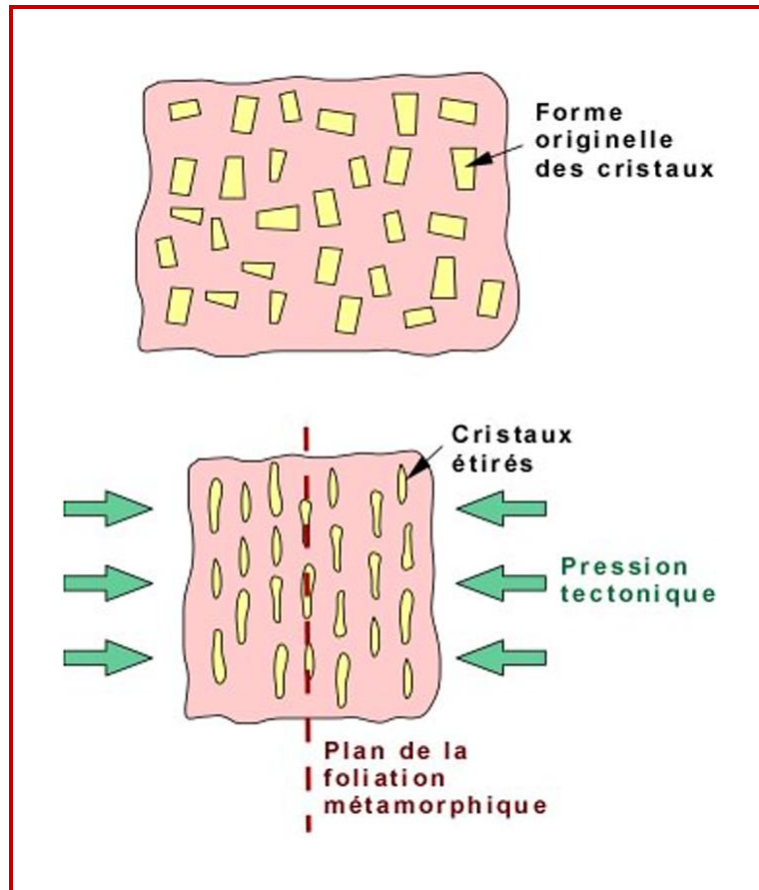


Fig. 6 – Phénomène de foliation métamorphique

Les **gneiss**, par contre, sont des roches **grossièrement grenues** dont les minéraux sont disposés en **couches distinctes** entre elles. Le quartz et les feldspaths peuvent composer certaines couches, la biotite et les amphiboles d'autres. Aussi, les gneiss se clivent difficilement.

Gneiss : roche métamorphique à texture litée, rubanée, lenticulaire, essentiellement constituée de quartz, de feldspath, de micas et d'une amphibole ou d'un pyroxène, se débitant en plaquettes épaisses ou en blocs comme un granite.

Durant le **métamorphisme régional**, les roches sont fréquemment soumises à différents épisodes de **cristallisation superposés**, pendant lesquels règnent des conditions physico-chimiques différentes. Si ces épisodes de cristallisation ont lieu au cours d'un **même cycle orogénique**, il s'agit d'un **métamorphisme polyphasé**. S'ils ont lieu lors de **deux cycles différents**, on parle de **polymétamorphisme**.

Le **facteur principal** du **métamorphisme régional** est la **profondeur** à laquelle les roches ont été amenées, de telle sorte que l'on peut distinguer plusieurs zones de profondeur dont les trois principales sont :

Epizone , la moins profonde → phyllades	↓ T° - pression ↓
Mésozone , moyennement profonde → micaschistes	
Catazone , la plus profonde → gneiss	

Nous reprendrons cette classification plus en détail lorsque nous aborderons la classification des roches métamorphiques selon différents critères.

Exemple : l'anticlinal de Tulle

Dans l'introduction, nous avons montré une coupe géologique simplifiée de l'anticlinal de Tulle entre Brive et Tulle (fig. 1). Nous la reprenons ici pour illustrer le métamorphisme régional. On y trouve, de part et d'autre du noyau granitique, les migmatites, puis les gneiss, des micaschistes à biotite qui s'envoient au S-W sous des sédiments secondaires. Dans le prolongement N-W, la coupe de la Vézère fait apparaître les autres termes de la série, avec au Saut-du-Saumon une intrusion d'une veine de granite schisteux..

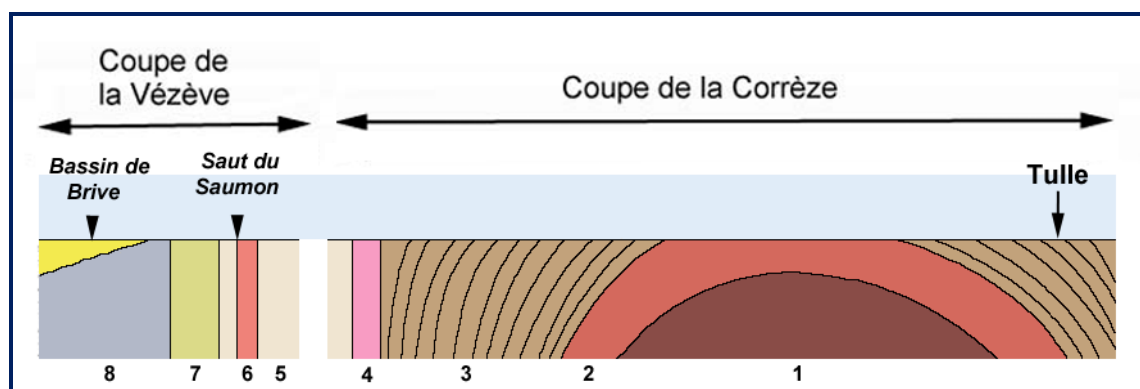


Fig. 7 – Métamorphisme régional. L'anticlinal de Tulle (d'après JUNG et ROQUES, redessiné par R. SIX)

1) Granite intrusif de Cornil ; 2) Migmatites (embréchites) ; 3) Gneiss à deux micas ; 4) Diorite ; 5) Micaschistes à biotite ; 6) Granite syncinélatique ; 7) Schistes à séricite ; 8) Ardoise d'Allasac.

Anchimétamorphisme :

Signalons que l'on distingue aussi un **métamorphisme général de faible intensité**, formant la transition entre la diagenèse et le métamorphisme (entre 100 at 200° C et 1 Kbar de pression).

Exemple : argile, kaolinite disparaissent et sont remplacées par l'illite ; l'illite recristallise en muscovite, etc.

C. Le métamorphisme lié à une augmentation de pression.

1. Le dynamométamorphisme

Ce **métamorphisme dynamique**, ou **dynamométamorphisme** (ou **cataclase**) intéresse de faibles volumes de roches situés dans les parties superficielles de la lithosphère, à proximité de surface de mouvements tectoniques importants tels les charriages, les cisaillements, etc. Les pressions dirigées liées aux efforts tectoniques l'emportent largement sur la pression lithostatique.

Dans les roches ainsi soumises à des **déformations intenses**, les changements sont purement **mécaniques** et se traduisent surtout au niveau des structures; ils consistent en un **écrasement des grains cristallins** avec accessoirement de petits réajustements minéralogiques. Aussi, certains géologues lui contestent le nom de métamorphisme car il n'y pas de néoformations minérales significatives.

Le **dynamométamorphisme** conduit tantôt au **broyage des roches** avec production de **brèches** et de **mylonites**, tantôt au développement dans les roches à grains fins, d'une **texture planaire interne**, assurant une parfaite **fissilité des roches** : c'est le clivage schisteux des **schistes cristallins** et des **phyllades**.

Brèche tectonique : roche constituée de fragments anguleux de tailles diverses, cimentés par une matrice de débris finement broyés et parfois recristallisés. Cette roche se forme par écrasement et broyage, à proximité de grands accidents tectoniques.

Mylonite : roche broyée à texture feuilletée, dont la présence révèle des pressions et frictions tectoniques importantes, faille, décrochements, etc.

Fissilité : caractère d'une roche qui se fend facilement en feuillets minces, ce caractère pouvant être d'origine sédimentaire (cas des psammites), ou d'origine mécanique (cas de nombreux schistes).

Phyllade : (ou ardoise) schiste finement cristallin à quartz, séricite et chlorite, se débitant en minces plaquettes luisantes.

2. Le métamorphisme d'enfouissement

La **lapidification régional modérée** peut résulter simplement de la charge statique et de l'élévation de température, sous l'action de la **géothermie** = transformation peu marquée et sans déformation : c'est le **métamorphisme statique** ou **d'enfouissement**. Toutefois dès que les pressions orientées s'ajoutent à la charge statique, l'évolution s'accroît rapidement et le métamorphisme apparaît avec cristallisation de la matière et développement de la schistosité, etc.

Celui-ci désigne un ensemble de transformations minéralogiques et structurales que subissent les roches soumises, à grandes profondeurs, à de fortes pressions dues au poids des roches sus-jacentes, sans qu'interviennent des déformations orogéniques. Ce métamorphisme est rare.

On observe un **passage très progressif** entre les roches sédimentaires soumises seulement à la **diagenèse** et les roches affectées par le **métamorphisme d'enfouissement**. Cependant, dans le cas de sédiments particuliers comme des **tufs** ou des **grauwackes**, riches en débris de **verre volcanique**², le simple enfouissement dans une fosse géosynclinale non

² **Verre volcanique** : silice amorphe d'origine volcanique, figée sous sa forme de très haute température par un brusque refroidissement. Il n'a donc pas eu le temps d'acquiescer une forme cristalline.

déformée, à des profondeurs modérées (de 3.000 à 4.000 mètres), suffit pour développer des associations minéralogiques particulières définissant le faciès zéolitique.

Tuf : roche tendre et poreuse d'origine volcanique, formée de cendres ultérieurement consolidées.

Grauwacke : roche de couleur foncée du type des flyschs, présentant des débris de roches ignées et des minéraux englobés dans une matrice détritique. Ce terme ne doit pas être confondu avec la "grauwacke" du Dévonien de l'Ardenne, qui est un grès carbonaté à nombreux fossiles décalcifiés; la roche résultante présente une texture cariée et le fossile se retrouve sous forme de mauvais moules remplis d'argile brun rouille.

Verre volcanique : silice amorphe d'origine volcanique, figée sous sa forme de très haute température par un brusque refroidissement. Il n'a donc pas eu le temps d'acquiescer une forme cristalline.

Faciès zéolitique : secteur d'un diagramme pression/température, défini par des pressions moyennes (1 à 4 kilobars) et des températures relativement basses (100 à 150 degrés C), et caractérisant le métamorphisme d'enfouissement.

D. L'ultramétamorphisme

L'ultramétamorphisme est associé au métamorphisme régional et se rencontre dans les zones les plus profondes. Il regroupe les processus qui, aux températures et aux pressions les plus élevées, aboutissent à la fusion partielle ou totale (**anatexie**) des sédiments affectés et donnent ainsi naissance aux migmatites. Celles-ci sont des roches mixtes constituées de minéraux quartzofeldspathiques blanchâtres et de minéraux ferromagnésiens noirs.

E. Le métamorphisme hydrothermal

Il est lié aux circulations de fluides à haute température, en relation avec des volcans ou des zones plutoniques, et qui, d'une part réchauffent les roches traversées, et d'autre part leur apportent des éléments chimiques particuliers.

F. Le métamorphisme d'impact ou de choc

C'est un métamorphisme particulier qui résulte de l'action de très fortes pressions instantanées et de températures élevées dues à la chute de grosses météorites ou une explosion nucléaire au sol ou souterraine. Les roches qui en résultent sont les **impactites**.

La mise en évidence, par l'étude de la lune, de l'importance du bombardement météoritique, qui a multiplié les cratères d'impact à la surface de presque tous les objets du système solaire a permis de définir le métamorphisme d'impact.

G. Synthèse.

Au cours du **développement d'une zone orogénique**, les différents types de métamorphisme décrits précédemment ont lieu. Le **métamorphisme régional** affecte des **régions particulières de l'écorce terrestre** où se sont généralement déposées d'**épaisses séries sédimentaires**, soumises par la suite à un **flux de chaleur** et à des **compressions tectoniques**. Lors des **déformations de ces séries sédimentaires**, plusieurs **phases de cristallisation métamorphique** peuvent se succéder, donnant lieu à un **métamorphisme polyphasé**. Dans les **parties les plus profondes** se forment des **migmatites**. En même temps, des **intrusions granitiques** se mettent en place dans les couches superficielles de l'écorce et provoquent la formation d'**auréoles de contact**. A la fin du cycle orogénique, les températures et les pressions baissent; le métamorphisme régional devient rétrograde et les minéraux métamorphiques précédemment formés peuvent être en partie détruits.

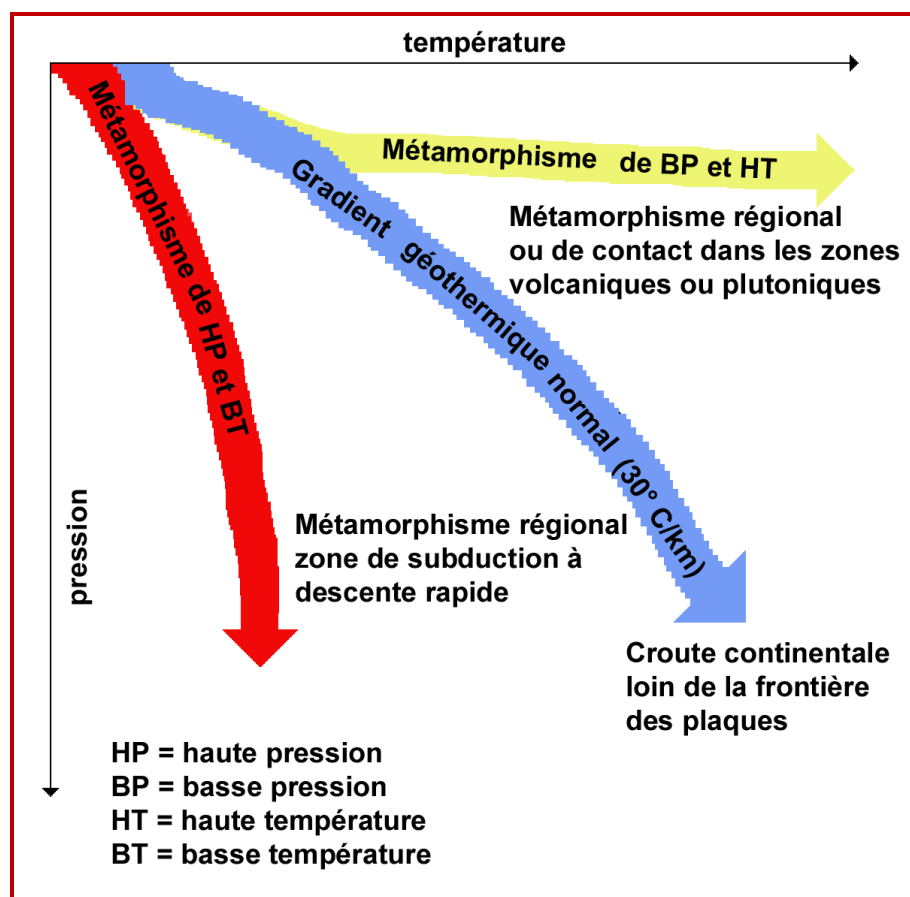


Fig. 8 – Diagramme résumant le métamorphisme dans un contexte géodynamique donné, en fonction de la température et de la pression (inspiré de C. ALLEGRE et R. DARS)