

Chapitre 2: La structure

Les étapes de formation des reliefs

Le relief est le résultat de l'action combinée des facteurs (internes ; endogènes, externes ; exogènes) et anthropogènes. Les facteurs endogènes font appel à la connaissance de la structure géologique. Les forces de construction ou forces orogéniques (les déformations tectoniques) qui se traduisent par les mouvements des plaques, des tremblements de terre, le volcanisme, des fractures, des failles, des plissements..).

Les facteurs exogènes : la gravité et le climat qui attaque le relief et le façonnement, il s'agit de l'eau, la glace, le vent, les variations de température, responsable de l'érosion.

Processus d'érosion :

Les processus d'érosion sont des mécanismes naturels qui conduisent à la dégradation et à la transformation des reliefs, des sols, des roches, des berges et des littoraux sous l'influence d'agents externes. Voici quelques processus d'érosion courants :

Ablation (la météorisation): Il s'agit de l'enlèvement de matériau par des agents externes tels que l'eau, le vent, la glace ou les vagues. L'abrasion par des particules transportées contribue à l'usure des surfaces. Le ruissellement et le cycle de gel-dégel fragmentent les roches en surface.

Altération : Ce processus implique la modification chimique ou physique des roches ou des sols. L'altération chimique peut résulter de réactions avec l'eau, l'oxygène, ou d'autres composés. L'altération physique peut inclure la désagrégation des roches par le gel et le dégel.

Fragmentation mécanique : modification physique **ex :** eau (cycle gel/dégel)



Fragmentation chimique : transformation chimique

Ex : dissolution (hydrolyse)

Carbonate de calcium (CaCO_3)



Transport : Une fois les particules érodées, elles peuvent être transportées par divers agents tels que l'eau (ruissellement, rivières), le vent, la glace ou les vagues marines. Le mode de transport dépend des caractéristiques locales.

Les fragments de roches sont emportés par le ruissellement de l'eau et le vent. L'érosion se poursuit par le pouvoir abrasif des fragments transportés par l'eau.

Accumulation (la sédimentation) : Lorsque les particules transportées atteignent un endroit où la vitesse de transport diminue, elles peuvent être déposées, créant des accumulations de sédiments. Cela peut se produire dans des zones telles que les deltas, les plages ou les vallées fluviales.

L'accumulation des sédiments transportés dans les plaines, les vallées et au fond de l'océan.

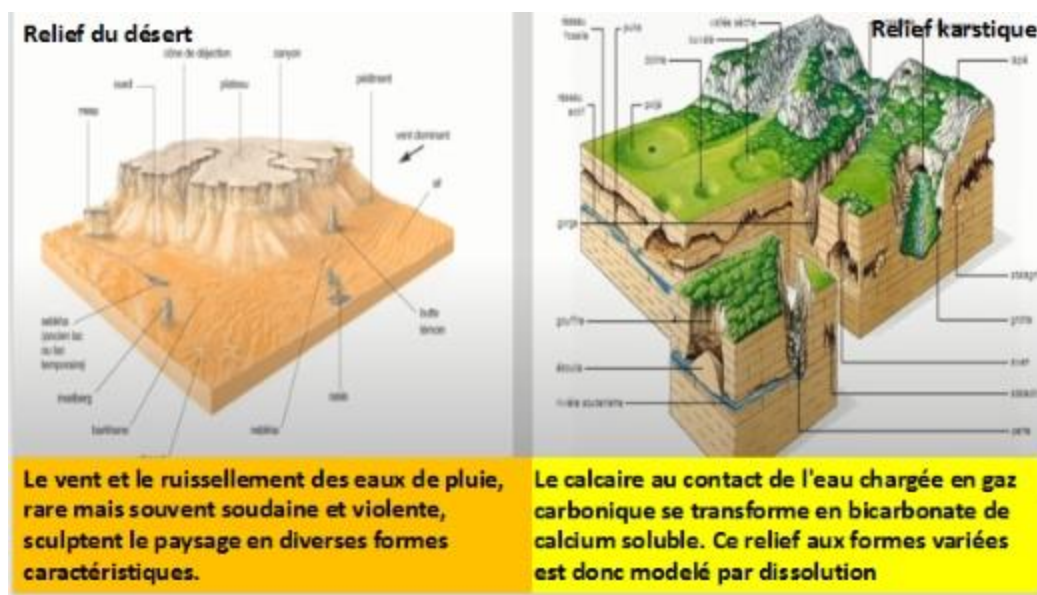
L'érosion correspond à l'ensemble des processus qui enlèvent des particules aux terrains existants par l'action des agents divers (eau, vent, neiges, ruissellement, gélifraction, météorisation...). Donc, le relief est la résultante d'un antagonisme entre les forces de déformation (exclusivement internes à l'écorce terrestre). Les facteurs anthropogènes jouent également un rôle érosif, tant dans la destruction de formes naturelles que dans la création de nouvelles formes (ex. remblais). La combinaison de ces trois groupes de facteurs permet de comprendre les mécanismes qui sont à la base de la formation et de l'évolution du relief. La description et l'explication analytique des formes des reliefs. L'objet de cette étude est la description et l'explication analytique des formes des reliefs et synthétique pour les constituants de chaque ensemble.

Deux domaines se partagent le champ scientifique de la géomorphologie :

La géomorphologie structurale ou tectonique : Etude de la déformation des roches soumises aux contraintes. Cette étude se fait par une analyse géométrique des structures (tectonique analytique) et par une étude cinématique (mouvement) et dynamique (contraintes).

la géomorphologie dynamique (anciennement géomorphologie zonale ou climatique) se spécialise dans l'étude analytique des processus externes qui contribuent à la formation et à l'évolution des formes de relief ; l'ablation, l'altération, l'érosion, le transport, le dépôt, etc.

-Il explique les formes de reliefs par le rôle des facteurs climatiques et leur impact sous la forme des systèmes d'érosion.



Influence de la lithologie

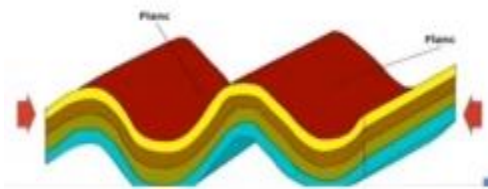
Une analyse correcte du relief passe d'abord par sa description qui a pour but de caractériser les principaux aspects du relief et de le localiser. La dégradation des roches produisent des nombreux blocs et particules qui vent être déplacés sous forme dissoute dans la circulation des eaux ou sous forme solide par gravité, c'est l'état d'équilibre- déséquilibre.

Les types lithologiques sont : Déformation recoupée par un filon (Lame de roche magmatique ou sédimentaire recoupant d'anciennes roches (l'encaissant) correspondant au remplissage d'une fracture ou une fissure.

- Les déformations souple (plis) et cassante (faille) affectant une série sédimentaire.

Les différents types de déformations tectoniques dans les chaines de montagnes:

Déformation souple continues ou ductiles (plis): Un pli est une déformation souple continue des couches géologiques initialement plane sous forme d'ondulations à plus ou moins grand rayon de courbure, à la suite d'une contrainte tectonique.



L'ondulation peut être:

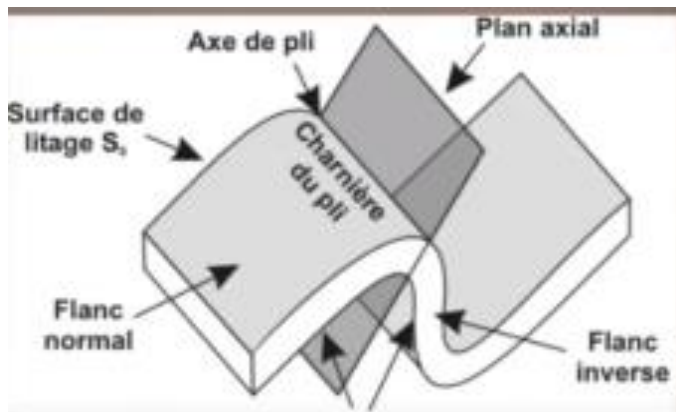
En saillie: pli anticlinal un pli convexe dont le centre est occupé par les couches géologiques les plus anciennes.



En creux: pli synclinal est un pli dont la concavité est tournée vers le haut. Dans des conditions normales, les couches les plus jeunes étant les couches supérieures, on trouve, après érosion, les strates géologiques les plus récentes dans le cœur du synclinal.

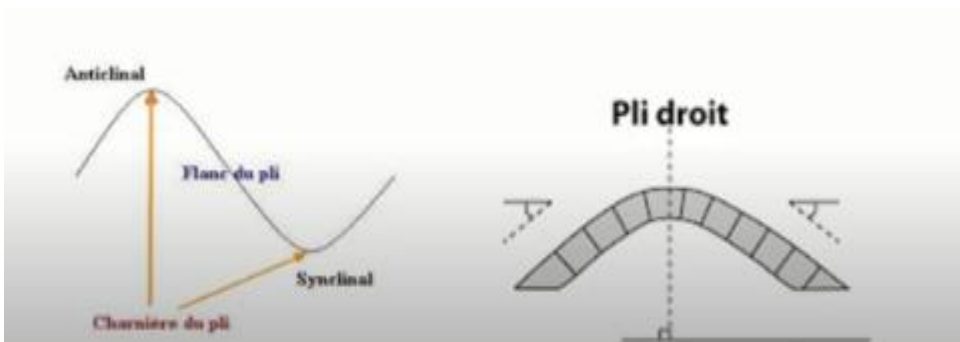


Les éléments d'un pli : **La charnière:** est une zone de courbure maximale et les flancs relient deux charnières. **Flanc du pli:** c'est la surface qui raccorde deux charnières successives. **Plan axial** (ou surface axiale): surface imaginaire qui relie les charnières des couches du pli. **Axe du pli:** ligne de bissectrice entre le plan axial et la surface topographique.



Les différents types des plis

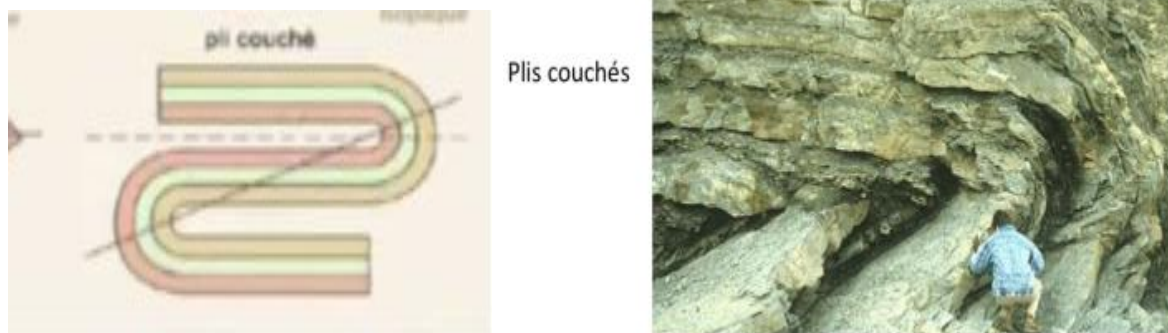
Pli droit: se caractérise par deux flancs symétriques par rapport à son plan axial vertical. Des forces compressives de même intensité donnent un pli droit.



Pli déjeté: caractérise par un plan axial oblique et les deux flancs ont des inclinaisons différentes.



Pli couché: se caractérise par deux flancs symétriques par rapport à son plan axial horizontal.



On parlera de **relief structural** lorsque l'agencement des roches du sous-sol joue un rôle prépondérant dans les formes de la topographie (ce sont les formes de relief commandées par la structure du sous-sol), et de **modelé** lorsque les reliefs s'expliquent par les actions érosives (vent, eau, gel/dégel, glaciers etc.). Ainsi, les mouvements verticaux et tangentiels qui affectent la croûte terrestre (via les forces tectoniques) donnent les structures suivantes:

- **Aclinal (tabulaire) et monoclinale (Cuesta)**

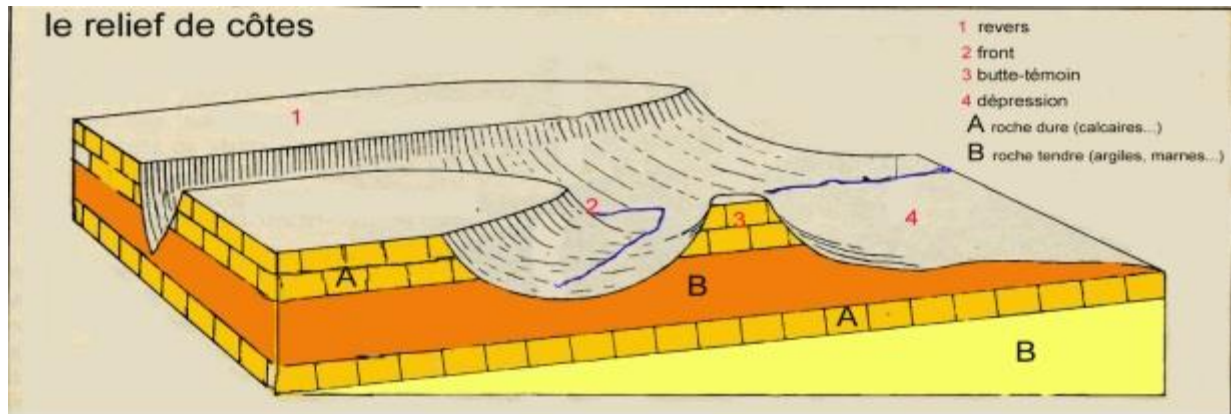
Définition : Les couches sédimentaires sont inclinées dans une direction constante. Le pendage est faible (1 à 10°).

• On observe des variations dans l'inclinaison du pendage qui se présentent ainsi:

1. Flexure: une variation positive du pendage (ou une augmentation de sa valeur).
2. Palier structural, une variation négative du pendage (ou une diminution du pendage).
3. Pendage régulier - Cuesta
4. Ondulations anticlinales (structures en dôme).
5. Ondulations synclinales (structures en cuvettes, bassin sédimentaire).

La forme Cuesta : Il s'agit d'une forme structurale (structure monoclinale) dégagée (creusée) dans une succession sédimentaire concordante comportant une unité de roche meuble comprise entre deux unités de roches résistantes et affectée par un pendage faible.

La cuesta est une forme de relief dissymétrique constituée par (**le front**): **un talus** à profil concave en pente raide et, de (**revers**) un plateau doucement incliné en sens inverse. **Butte-témoin** est une élévation du terrain qui résiste à l'érosion environnante en raison de sa composition rocheuse plus résistante. **Une dépression** désigne une zone géographique plus basse que les régions environnantes. Cela peut inclure des vallées, des cuvettes, ou d'autres formes de terrain en creux.



L'évolution des formes jurassiennes

Dans cette section sur l'évolution des formes jurassiennes, différentes périodes du Jurassique sont explorées.

Jurassique inférieur (Lias):

Situé dans les dépressions de la Haute-Saône, dans l'anticlinal des Avants-Monts ou dans la zone de chevauchement Jura-Bresse.

Épaisseur d'environ 200 m, constante d'Ouest en Est.

Roches dominantes : marne grise avec des marnes bleues, des schistes et des calcaires.

Abondance de fossiles maritimes indiquant un dépôt dans une mer riche en organismes.

Petites modifications du milieu marin entraînent un dépôt avec un faciès varié.

Terrains propices au cépage Savagnin.

Jurassique moyen (Dogger):

Présent sur les plateaux occidentaux de la chaîne.

Principales roches : calcaires avec Oolithe, marno-calcaire et un peu de minerai de fer.

Épaisseur d'environ 250 m sur quatre étages : Callovien, Bathonien, Bajocien et Aalénien.

Roche visible sur les falaises des reculées des plateaux externes du Jura.

Jurassique supérieur (Malm):

Prédominant dans le massif avec une épaisseur de plus de 500 m.

Présent dans les plis de la Haute-Chaîne, dans la Petite Montagne, sur les plateaux internes du Jura, les faisceaux internes, dans les plateaux de la Haute-Saône et les plateaux entre Doubs et Ognon.

Roches principalement calcaires, parfois dolomitiques, parfois marneuses, parfois compactes.

Dans le Purbeckien, de petits amas de lignite se sont formés dans le Haut-Doubs et la Bresse.

Empreintes de dinosaures:

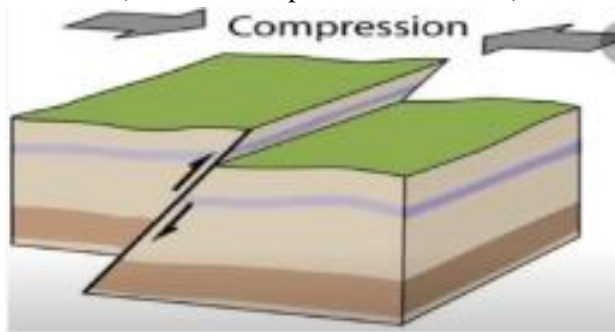
Plusieurs pistes d'empreintes de dinosaures découvertes dans le Jurassique supérieur du Jura.

Principalement identifiées dans le nord-est de la Suisse, dans la formation de Reuchenette (Kimméridgien).

Correspond à un environnement d'estran soumis à des émergences ponctuelles où les dinosaures ont laissé leurs empreintes.

Une faille: déformation discontinu qui est une cassure au niveau des couches de terrain qui s'accompagne d'un déplacement des deux compartiments ainsi créés.

Les éléments de la faille sont: Les deux compartiments: **le mur:** compartiment soulevé (en dessous de la faille). **Le toi:** compartiment affaissé (au-dessus de la faille).

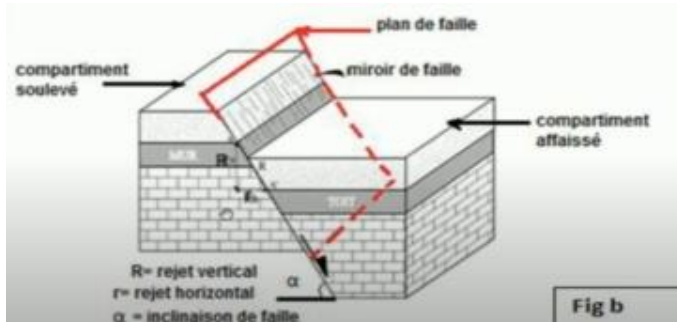


Plan de faille: c'est la surface le long de laquelle les deux compartiments ont glissé, soit à l'oblique, soit la verticale. Accompagné par une surface polie dite miroir de faille. On peut décrire **le plan de faille** en mesurant son inclinaison ou son angle de pendage (α) par rapport à la verticale.

Le rejet de la faille:

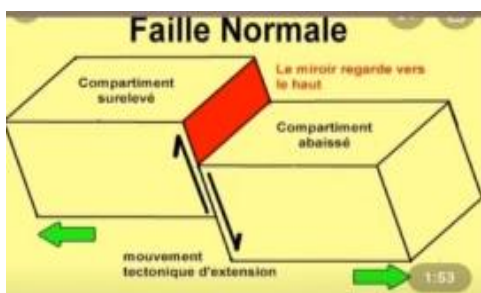
R: rejet vertical: c'est la différence d'altitude entre les deux blocs.

r: rejet horizontal: mesure du glissement des blocs l'un contre l'autre.

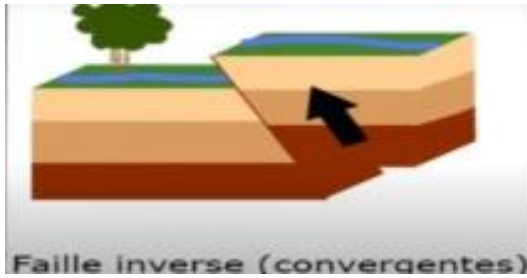


Les différents types de failles

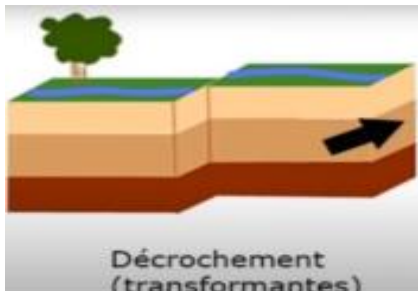
Faille normale: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le bas par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles normales se forment lorsque deux blocs de roche s'éloignent l'un de l'autre en raison d'une distension (il y a extension).



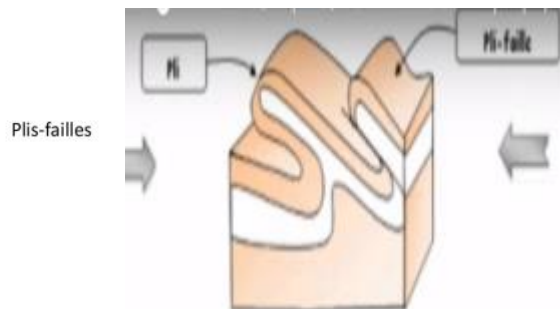
Faille inverse: faille le long de laquelle les roches au-dessus du plan de faille se déplacent vers le haut par rapport aux roches sous le plan de faille. Les failles inverses se forment lorsque deux blocs de roche sont poussés l'un vers l'autre en raison d'une compression.



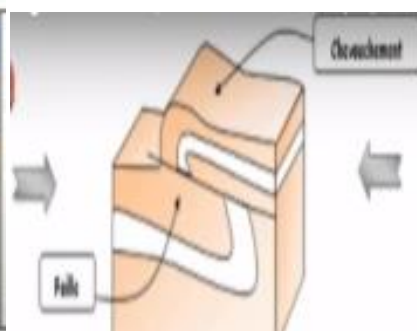
Décrochement: faille le long de laquelle le déplacement relatif s'effectue horizontalement le long du plan de faille séparant des blocs de roches adjacents: et on note décrochement dextre (sens d'aiguille d'une montre) décrochement senestre.



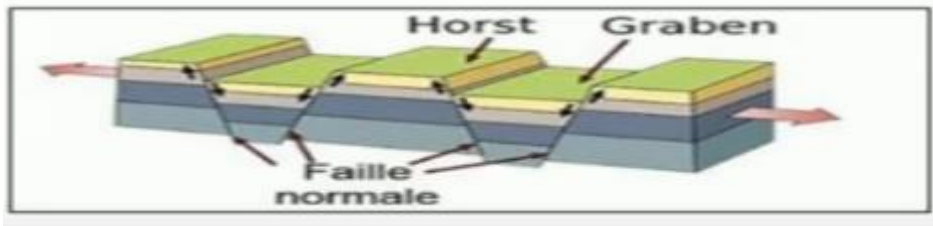
Pli-faille: pli déversé ou couché dont le flanc inverse a été laminé par une faille inverse. (déformations intermédiaires)



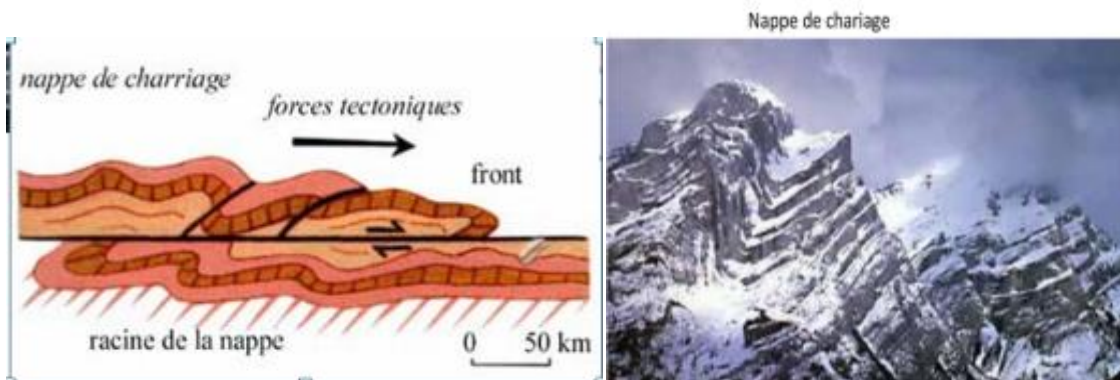
Chevauchement : est un mouvement tectonique où une série de terrains en recouvre une autre par le biais d'un contact anormal de type faille inverse. Généralement de faille inclinaison et d'une portée limitée (quelque Km).



Remarque: l'association de nombreuses failles normales peuvent donner des formes tectoniques tels que: **Graben** (vallée d'effondrement): assemblage de faille normale. **Horst:** plusieurs failles inverse.

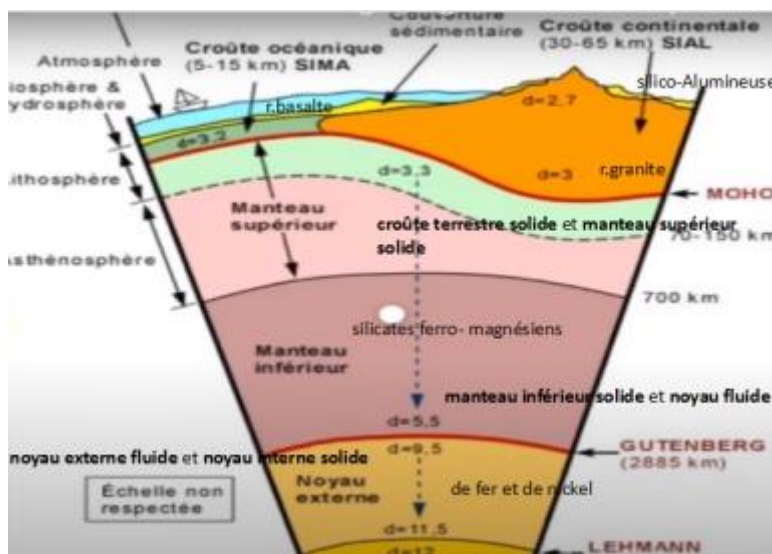


Nappe de charriage: correspondent à des unités tectoniques de beaucoup plus grande dimension, de portée pouvant atteindre plusieurs dizaines à plus de la centaine de Km. (elle se déplace plusieurs Km) pli elle se déplacée sous l'effet des forces compressive de plusieurs Km. Dans ce cas on distingue l'unité chevauchée restée sur place dite autochtone et l'unité charnière est dite allochtone.



Structure générale du globe

Les trois grandes unités concentriques et les discontinuités un modèle de structure en couches concentriques de densité croissante de la périphérie vers le centre et de composition chimique différente : - Croûte terrestre constituée essentiellement de silico-Alumineuse (SIAL) - Manteau constitué principalement de silicates ferro- magnésiens - Noyau formé essentiellement de fer et de nickel (NiFe).



Les variations de la vitesse de propagation des ondes sismiques ont permis de subdiviser les principales couches en sous-couches et de mettre en évidence des discontinuités au niveau desquelles la vitesse de propagation des ondes sismiques subit une variation brutale.

- Discontinuité de Mohorovicic ou MOHO limite entre croûte terrestre solide et manteau supérieur solide de composition chimique très différente.
- Discontinuité de Gutenberg limite entre manteau inférieur solide et noyau fluide
- Discontinuité de Lehman limite entre noyau externe fluide et noyau interne solide

La structure de la Terre est composée de trois compartiments principaux : le noyau, le manteau et la croûte terrestre. Chacun de ces compartiments est subdivisé en plusieurs sous-compartiments. Le noyau a une division entre le noyau interne et le noyau externe. Le manteau est divisé en manteau inférieur et manteau supérieur. La croûte terrestre se divise en croûte continentale et croûte océanique.

Le manteau supérieur présente une subdivision en deux parties : l'asthénosphère, qui est liquide, et la partie solide du manteau supérieur. Lorsqu'on ajoute la croûte terrestre à la partie rigide du manteau supérieur, on obtient ce qu'on appelle la lithosphère. Cette dernière se compose de la lithosphère océanique et de la lithosphère continentale.

Comparant la croûte océanique à la croûte continentale, on constate que la croûte océanique est plus mince, variant entre 5 et 15 km, tandis que la croûte continentale est plus épaisse, allant de 30 à 35 km. De plus, la croûte océanique a une densité plus élevée, atteignant 3,2, comparée à la densité de la croûte continentale, qui varie entre 2,7 et 3. En résumé, la croûte océanique est moins épaisse et plus dense que la croûte continentale.

Le concept de plaques tectoniques montre que la lithosphère n'est pas un seul morceau continu, mais plutôt divisée en plusieurs plaques lithosphériques. Ces plaques sont discontinues et séparées les unes des autres, formant un réseau complexe de mouvements tectoniques à la surface de la Terre.

La roche est un assemblage de minéraux. Elle est définie par: sa chimie, sa composition minéralogique: c'est à dire les minéraux qu'elle contient (ex : pyroxène, feldspath, quartz), sa structure: c'est à dire le mode d'assemblage des minéraux qui la constituent.

Les différents types des roches

Ex : roches liquides ou gazeuses =pétrole, gaz naturel
Roches solides meubles =sable, argile.
Roches solides cohérentes =calcaire, grès, charbon.



Les roches solides sont constituées d'un mélange de minéraux.

Classifications des roches

Roches magmatiques (endogène): roches issues du refroidissement du magma volcanique.

Roches sédimentaires (exogènes): roches formées à la surface de l'écorce terrestre, résultant de l'action des agents d'érosion et de transport pris d'un dépôt.

Roches métamorphiques: roches formées, sans fusion, à partir d'autres roches (magmatiques ou sédimentaires) par recristallisation due à des élévations de la température et de la pression.



Les roches magmatiques : ignées= du feu

Les roches magmatiques proviennent de la cristallisation d'un magma. Le magma: (matière minérale à l'état de fusion) est engendré par la fusion locale de roches profondes. Les roches issues du refroidissement du magma sont de deux types: extrusives ou intrusives.

Les roches magmatiques-extrusives (ou volcanique)

Le magma fait irruption en surface, à l'air libre on parle alors de (lave). Il se refroidit rapidement et devient une roche extrusive. Les gaz contenus dans le magma n'ont pas le temps de s'échapper, ce qui explique la porosité de ce type de roches (nombreux petits trous liés au, bulles de gaz, comme dans la pierre ponce). La cristallisation est faible ou inexistante. Ce sont souvent des roches sombres, comme le basalte.

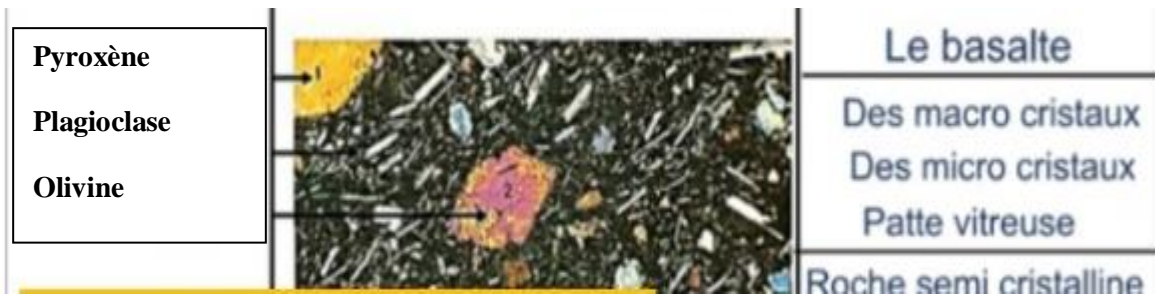


Roche extrusives (volcaniques) : Formé à partir de la lave refroidie à la surface de la terre

Ex : le basalte

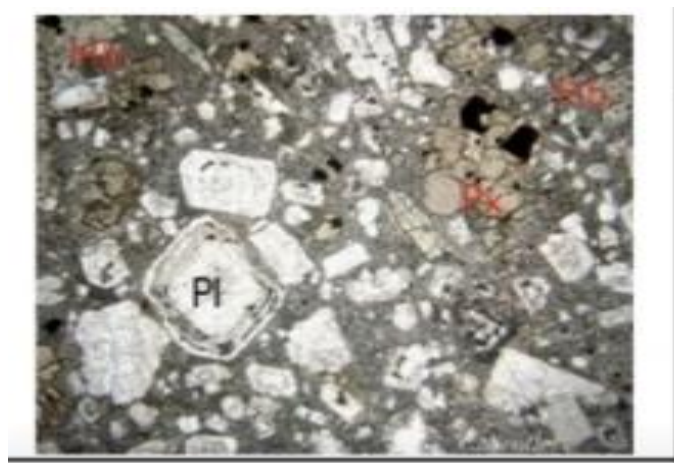
Caractéristique du basalte

- Des macro cristaux
- Des micro cristaux
- Patte vitreuse
- Roche semi cristalline à



Roche extrusives (volcaniques) : d'une lave intermédiaire en composition.

Ex : l'andésite



Caractéristique de l'andésite

- Macrocristaux (plagioclase- mica- amphibole)**
- Des microcristaux (les microlithes)**
- Verre volcanique**

Comparaison entre le basalte et l'andésite

	Le basalte	L'andésite
A l'œil nu	Le basalte est une roche compacte, sombre qui contient peu de cristaux de grande taille et une grande partie non cristallisée (verre)	Roche compacte, noire ride, gros cristaux, verre volcanique microlithes
Au microscope polarisant	Des macrocristaux (plagioclase et l'olivine) Des microcristaux (les microlithes) une pate non cristallisée (le verre volcanique)	Macrocristaux (plagioclase, mica, amphibole) -des microcristaux (le microlithes) -verre volcanique
La structure pétrographique	microlitique	microlitique

Composition chimique :

Le basalte est une roche volcanique riche en silice, en magnésium et en fer. Il a une composition basaltique avec une teneur en silice généralement inférieure à 52%. Les minéraux communs dans le basalte comprennent l'olivine, le feldspath plagioclase, le pyroxène et l'ilménite.

L'andésite, en revanche, a une composition plus riche en silice par rapport au basalte. Sa teneur en silice est généralement comprise entre 52% et 63%. Les minéraux dominants dans l'andésite comprennent le feldspath plagioclase, le pyroxène, l'amphibole et la biotite.

Texture : La texture du **basalte** est généralement fine à grossière, avec des cristaux qui peuvent être visibles à l'œil nu. La rapidité de refroidissement des laves basaltiques, qui émergent souvent des volcans, contribue à cette texture.

L'andésite a généralement une texture plus fine que le basalte en raison d'un refroidissement légèrement plus lent. Les cristaux peuvent également être visibles, mais ils sont plus petits que ceux du basalte.

Origine géologique : Le **basalte** est associé aux volcans de point chaud, aux dorsales océaniques et aux zones d'activité volcanique importante. Il est fréquemment trouvé dans les fonds océaniques.

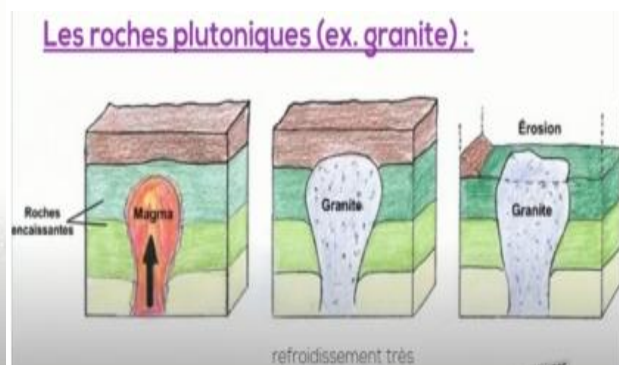
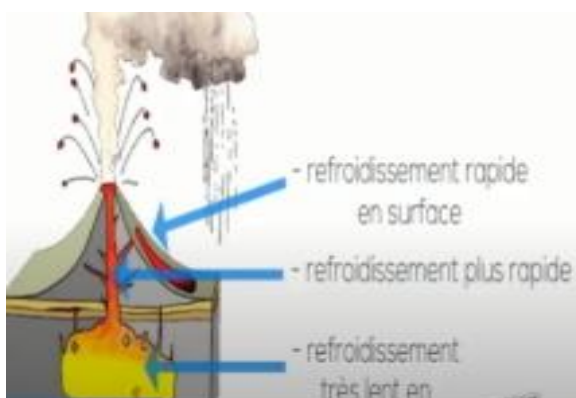
L'andésite est souvent associée aux zones de subduction, où une plaque tectonique plonge sous une autre. Les volcans andésitiques se trouvent souvent le long des zones de subduction.

Couleur : Le **basalte** a souvent une couleur sombre, allant du noir au gris, en raison de sa teneur en minéraux ferromagnésiens comme l'olivine et le pyroxène.

L'andésite peut avoir une gamme de couleurs plus large, allant du gris foncé au gris clair, en fonction de sa composition minérale. La présence de minéraux tels que le feldspath plagioclase peut influencer la couleur.

Les roches magmatiques-intrusives (ou plutonique) Endogène (roches formées en profondeur).

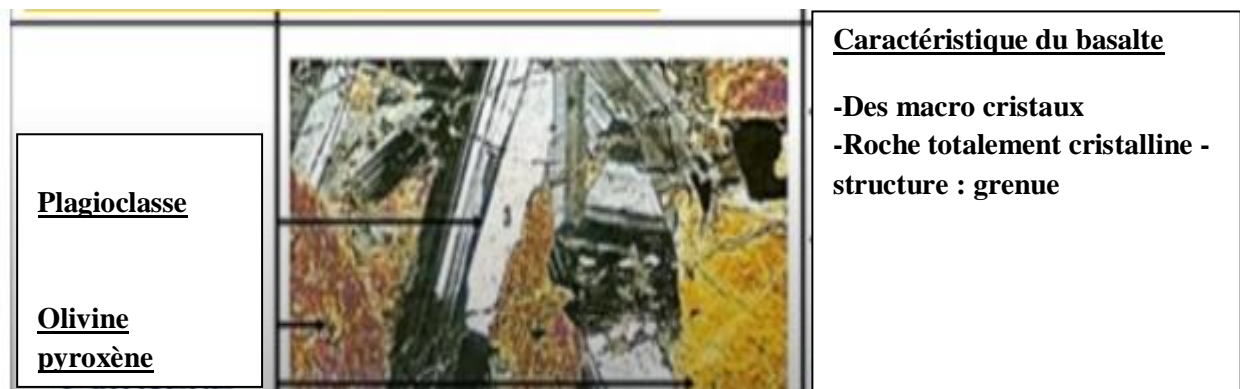
Le magma après s'être élevé dans la croûte terrestre, s'accumule dans une chambre située à une certaine profondeur. En se refroidissant lentement, il devient une roche intrusive. Ce lent refroidissement permet l'évacuation des gaz (les roches sont donc non poreuses) et l'apparition de cristaux bien formés (cristallisation plus ou moins importante en fonction du temps de refroidissement). Il s'agit par exemple du granite qui a un aspect « moucheté », à cause des nombreux minéraux qui le composent.





Roche intrusives (plutonique) : se forme à des profondeurs significatives dans la croûte terrestre. Son refroidissement lent permet la croissance de cristaux.

Ex : le gabbro



Roche intrusives (plutonique) : refroidissement lent du magma profondément

Ex : Le granite



Caractéristique du basalte

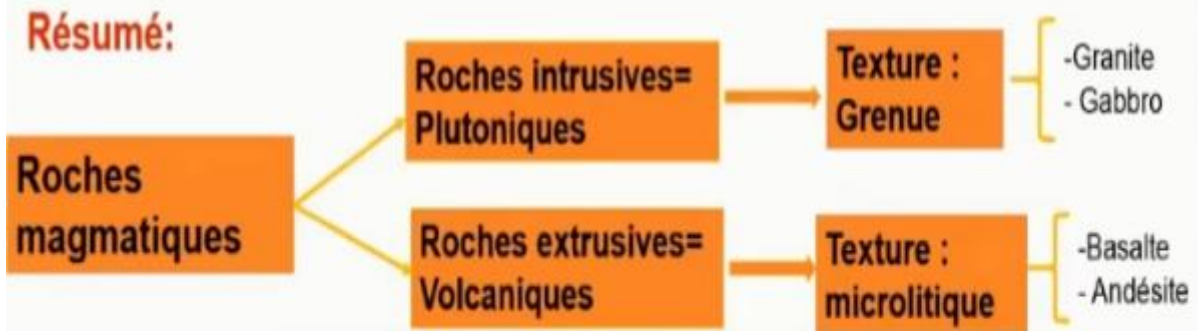
Gros cristaux (quartz, feldspath, mica, l'amphibole, le pyroxène)

Comparaison entre le gabbro et le granite

	Le gabbro	Le granite
A l'œil nu	Le gabbro est une roche compacte, de couleur verte à noire constituée de cristaux de grande taille	Roche très dure compacte, qui est entièrement constituée de gros cristaux
Au microscope polarisant	De gros crocristaux (plagioclase et le pyroxène)	Gros cristaux (quartz, feldspath mica, amphibole, pyroxène)
La structure pétrographique	Grenue	Grenue

Roches magmatiques = ignées = du feu

Résumé:



Les roches sédimentaires

Les sédiments sont des dépôts, la plupart du temps au fond des eaux. Elles sont classées en fonction de leur taille (granulométrie).

Les roches sédimentaires formées à partir de ces sédiments peuvent être meubles (formées d'éléments séparés, ex: sable) soit cohérentes (formées d'éléments soudés entre eux ex: grès).

Classe granulométriques (diamètres)

Cailloux (blocs, galets, graviers, gravillons): de 2mm

Sables: de 0.05 mm à 2 mm

Limons : de 0.002 mm à 0.05 mm

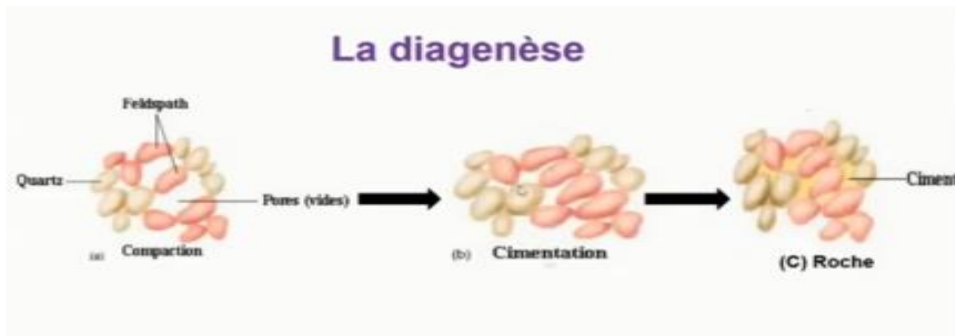
Argiles de 0.002 mm

Classement des roches sédimentaires

Les roches détritiques (diagenèse): sable, grès, argile, schiste.

Elles résultent de l'accumulation et du compactage de débris provenant de la désagrégation d'autres roches.

Les sédiments déposés au fond de la mer: Les débris les plus gros vont se déposer le plus près de la côte, tandis que les débris les plus fins vont se déposer plus ou large, dans des régions moins agitées.



Les roches organogènes: (ex craie, calcaire)

Après la mort des organismes marins, la partie molle se putréfie ou est mangée tandis que les parties dures (coquilles, pièces de squelette, construction des coraux) subsistent.

Les roches organogènes résultent de l'accumulation de ces débris d'organismes au fond de la mer.



Les roches organiques (charbon, pétrole) résultent de la transformation de matière organique animale, végétale, et sont riche en carbone.

Les roches évaporitiques: (gypses, NaCl) proviennent de la précipitation de sels pour suite de l'évaporation d'eau salée.

Cette précipitation résulte de l'évaporation et de la concentration des sels jusqu'au point de saturation.

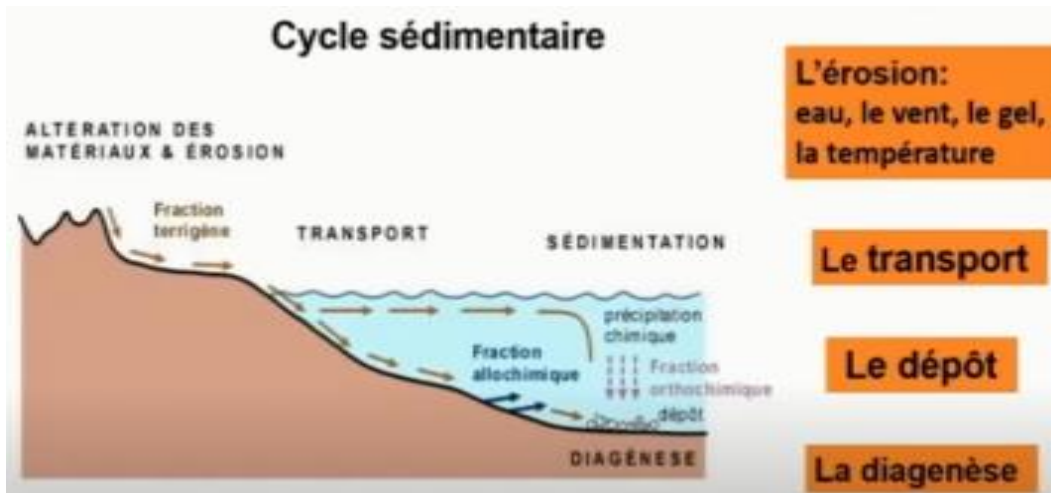
Quelques caractéristiques des roches sédimentaires

La stratification: sont disposées en strates, couches successives (composition, granulométrie, couleur)

La subsidence:

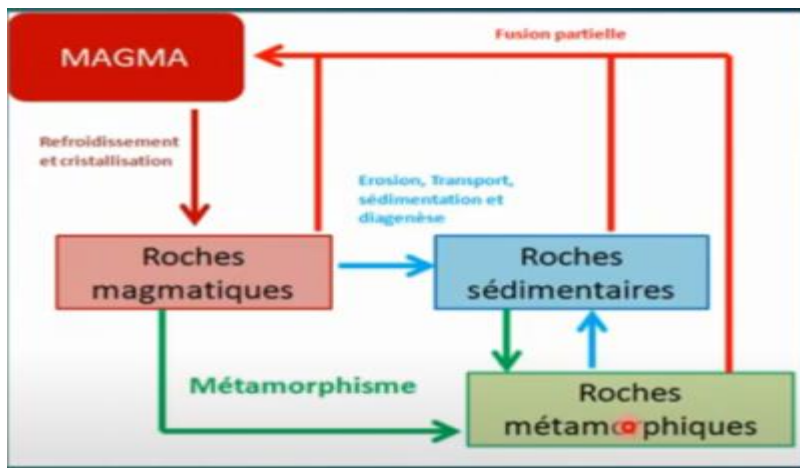
Les couleures sédimentaires sont souvent empilées sur des épaisseurs considérables, d'atteignant plusieurs kilomètres, le dépôt de sédiments s'accompagne d'un affaissement progressif très lent, de l'écorce terrestre.

Ce mouvement porte le nom subsidence.



Roche métamorphique

La roche métamorphique est un type de roche formée à partir de la transformation physique et/ou chimique d'une roche préexistante, appelée roche mère, sous l'effet de la chaleur, de la pression ou de fluides hydrothermaux. Ce processus, connu sous le nom de métamorphisme, modifie la structure minéralogique et la texture de la roche d'origine sans la faire fondre complètement.

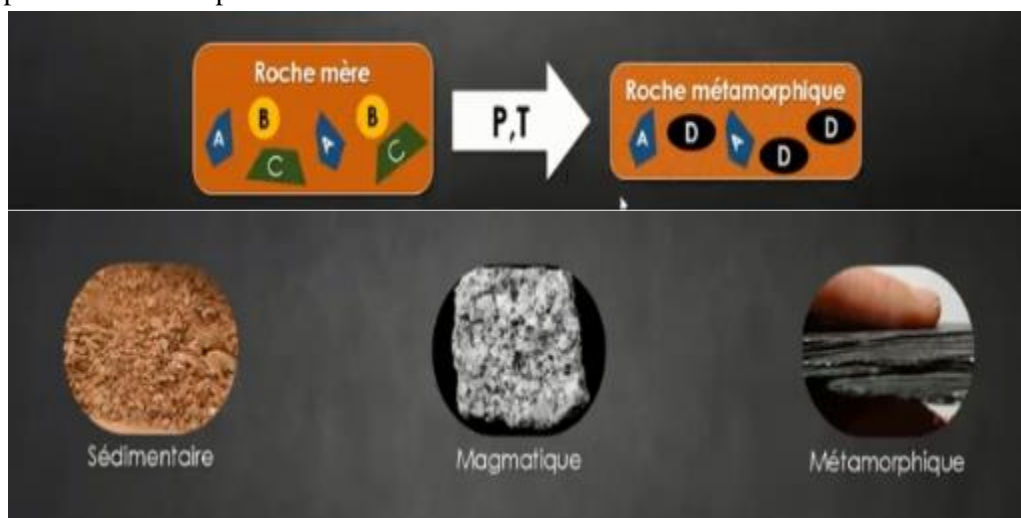


Définition du métamorphisme :

Le métamorphisme est un processus géologique qui engendre des changements dans la composition minéralogique et la texture d'une roche préexistante. Il se manifeste par la disparition de minéraux anciens et l'apparition de nouveaux minéraux néoformés, ainsi que par des modifications dans la structure de la roche, souvent caractérisées par un alignement des minéraux selon des plans parallèles, donnant une texture feuilletée. Ce phénomène résulte de variations dans les conditions de température et de pression auxquelles la roche est soumise, entraînant des transformations minéralogiques et structurales. En résumé, le métamorphisme représente l'ensemble des modifications subies par une roche mère en raison des changements de température et de pression.

Par exemple, en prenant une roche mère, qu'il s'agisse d'une roche sédimentaire, magmatique, ou métamorphique, elle sera invariablement constituée d'un ensemble de minéraux. Ces minéraux représentent les structures fondamentales qui composent les roches, qu'elles soient sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques. Si cette roche mère est soumise à des conditions élevées de pression et de température, ou à une combinaison de pressions et de températures, elle subira un ensemble de transformations minéralogiques et structurales.

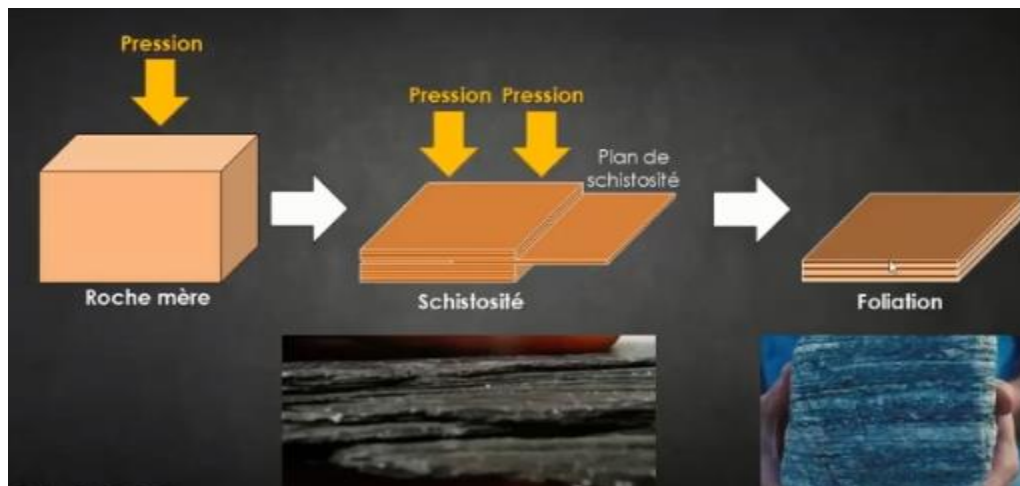
Ces transformations ne se limitent pas uniquement à la structure de la roche mère. En effet, non seulement la structure de la roche subira des modifications, mais également sa composition minéralogique. Ainsi, les roches seront sujettes à des changements tant au niveau de leur agencement structural que de leur composition minéralogique lorsque soumises à des conditions spécifiques de pression et de température.



Caractéristiques structurales des roches métamorphiques

Les caractéristiques structurales des roches métamorphiques peuvent être illustrées par l'exemple d'une roche mère soumise à une pression élevée ou croissante. Sous de telles conditions, la roche subit une transformation structurale appelée schistosité. La schistosité se manifeste par la formation de plusieurs couches ou strates dans la roche, chaque strate étant désignée comme un plan de schistosité. Ces plans de schistosité représentent une évolution par rapport à la structure initiale de la roche, et ils peuvent être séparés par une simple action de séparation. Notamment, ces strates présentent une composition minéralogique similaire, constituant ainsi la première structure distinctive des roches métamorphiques.

Si la roche subit une pression encore plus élevée que lors de la première transformation, elle évoluera vers une autre structure appelée foliation. Dans la foliation, les strates de formation ne sont plus composées de la même composition minéralogique, marquant ainsi une différence par rapport à la schistosité.



Transformation au niveau de la Zone de subduction

La lithosphère océanique constituant la plaque plongeante est un ensemble géologique constitué de croûte océanique en surface et de manteau supérieur lithosphérique plus en profondeur.

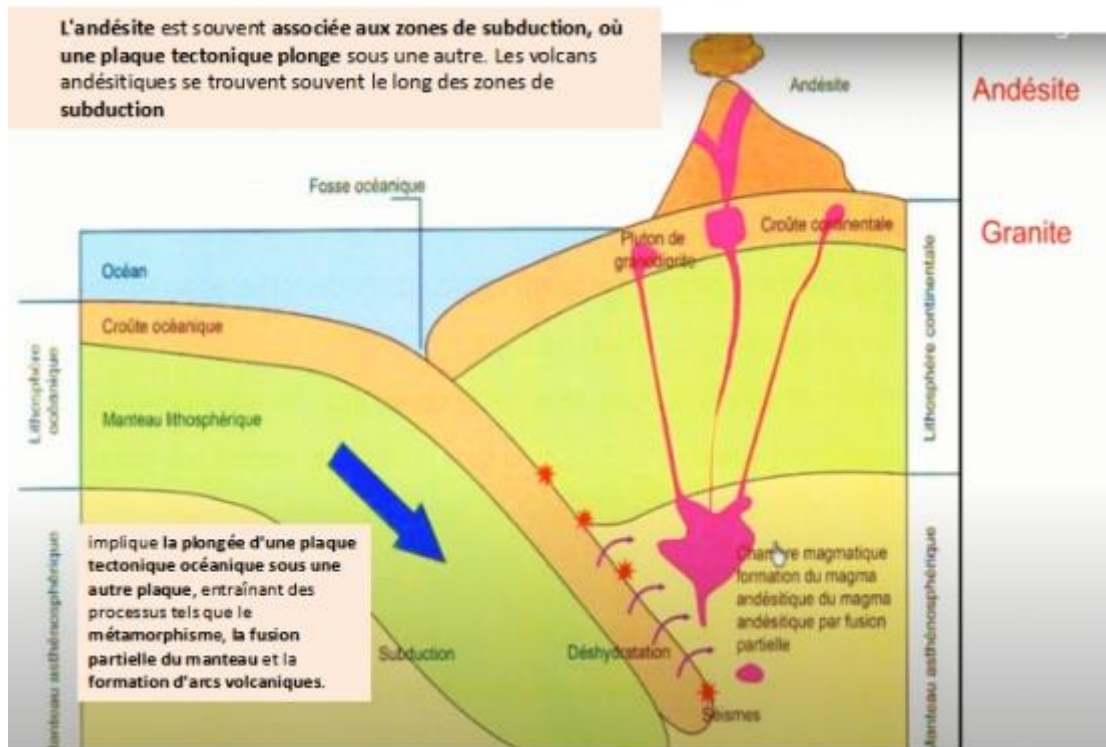
On va s'intéresser ici essentiellement au **métamorphisme de la croûte océanique**. La croûte océanique est constituée / de basaltes en surface et de gabbros plus en profondeur. Au cours de son éloignement de la dorsale, le refroidissement de la croûte océanique, associé à des circulations d'eau dans la croûte, vont entraîner des réactions **d'hydroxylation** des minéraux constitutifs des roches. Les basaltes et les gabbros vont se métamorphiser en metabasaltes **et métagabbros de types schistes verts contenant** de nouveaux minéraux comme la hornblende, la chlorite et l'actinote qui sont des minéraux hydroxylés, index d'un métamorphisme de type hydrothermal ; Il faut bien comprendre que ce métamorphisme n'est pas du tout lié à la subduction. Au cours de la subduction, la lithosphère océanique – donc la croûte océanique - plonge en profondeur.

Une zone de subduction se caractérise par le plongement d'une lithosphère océanique sous une lithosphère continentale ou océanique. Sous l'effet des forces de convergence, la lithosphère océanique qui plonge dans le manteau sous-jacent est alors soumise à une augmentation de pression et de température à l'origine / de transformations métamorphiques.

Les métagabbros de types schistes verts sont donc soumis à une augmentation de pression et de température qui va entraîner leur transformation en métagabbros de **types schistes bleus** qui se caractérisent en particulier par l'apparition d'un nouveau minéral métamorphique comme le glaucophane. Lorsque la lithosphère océanique plonge encore plus profondément au cours de la subduction, **les schistes bleus vont se transformer en écolites** qui sont des roches métamorphiques contenant des minéraux de jadéite et de grenats - deux nouveaux minéraux index du métamorphisme de haute pression. La subduction de la lithosphère océanique a donc entraîné un métamorphisme des roches de la croûte océanique en raison de l'augmentation des conditions de pression et de température auxquelles les roches ont été progressivement soumises.

Ex	Basalte----->	Schiste vert----->	Schiste bleu----->	Eclogites
Assemblage des minéraux		Actinote+chlorite	Glaucophane+Grenat+épidote	Jadéite+Grenat
structure		schisteuse	foliée	Grenue

Dans les zones de subduction, la péridotite sèche ne subit pas de fusion partielle en raison des conditions de pression et de température. Cependant, la péridotite hydratée du manteau de la plaque chevauchante, sous l'influence de l'hydratation, voit sa température de fusion partielle abaissée. Ainsi, dans les zones de subduction, le magma résulte de la fusion partielle des péridotites hydratées de la plaque chevauchante. Il est également souligné que la lithosphère océanique comprend une partie du manteau supérieur lithosphérique composée de péridotite. Sous l'impact des circulations d'eau, la couche superficielle du manteau subit des hydroxylation, conduisant à la serpentinisation des péridotites, appelées péridotites serpentinisées ou serpentinites. Il est crucial de noter que ce métamorphisme de la partie superficielle du manteau n'est pas lié à la subduction.



La composition chimique

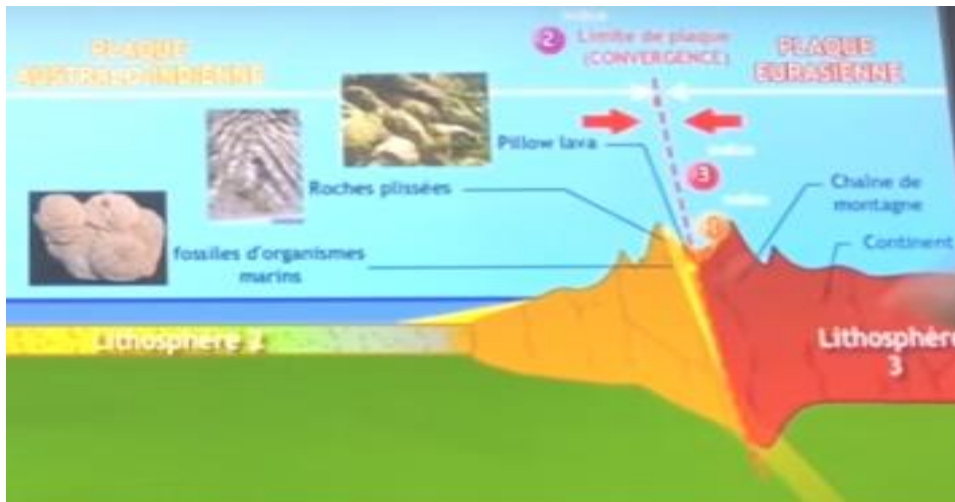
Les éléments chimiques	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
%	47.1	14.2	2.3	11	12.7	9.9	2.2	0.4

Le tableau2 donne la composition chimique approximative du basalte et gabbro ophiolitique

Les éléments chimiques	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeMgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Basalte	50%	14.8%	18.4%	11.5%	2.7%	0.1%
Gabbro	9.9%	17.8%	16.7%	11.9%	2.8%	0.2%

Transformation au niveau de la Zone de collision

La collision entre deux plaques portant des continents amène des fragments de croûte continentale à des profondeurs de l'ordre de 50 à 70 km où elle subissent des conditions de pression et de température particulières.



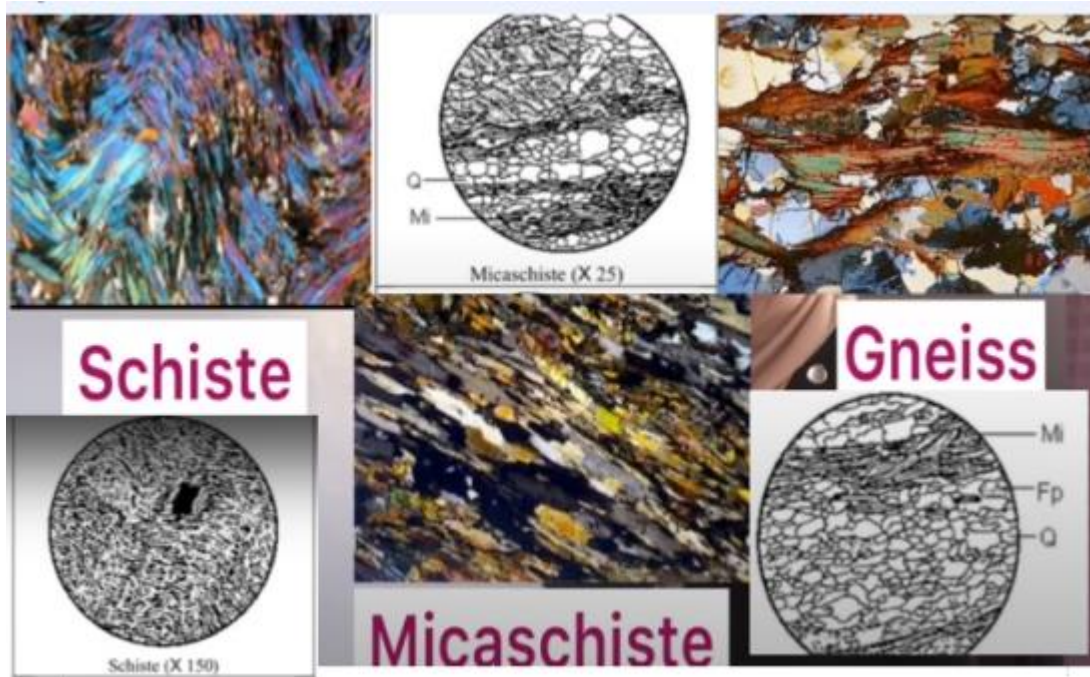
Les chaînes de montagnes exercent une pression sur les roches sous-jacentes, notamment les roches sédimentaires, soumises à des températures et pressions élevées. Ces conditions provoquent une transformation en schiste, puis, avec l'augmentation de la pression et de la température, **en micaschiste et finalement en gneiss**. Ces roches ne fusionnent pas à ce stade. Cependant, le gneiss, en s'enfonçant davantage dans les profondeurs où les températures sont très élevées, commence à subir une fusion partielle, phénomène appelé anatexie.

Ex	Argile-->	Schiste----->	Micaschiste----->	Gneiss
Assemblage des minéraux		Séricite + chlorite	Quartz + biotite + muscovites	Quartz + Feldspath + Mica
structure		schisteuse	Schisteuse + foliée	foliée

Si le magma résultant de l'anatexie subit un refroidissement, il se cristallise pour former une roche grenue, connue sous le nom de roche migmatique. Lorsque la pression exercée par la montagne diminue, le magma anatexie remonte, provoquant le soulèvement de cette région montagneuse. Sous l'effet de l'érosion dans des zones de températures plus basses, il se refroidit pour donner naissance à une roche grenue distincte, le granite anatexie.

Un deuxième type de granite, le granit intrusif, se forme lorsque certaines parties du magma anatexie traversent des fissures et se figent en profondeur. En refroidissant, il subit un métamorphisme thermique et un métamorphisme de contact, transformant les roches environnantes en une auréole métamorphique.

La structure de quelques roches métamorphique



La structure de certaines roches métamorphiques peut être examinée en commençant par un échantillon de **schiste**. L'observation de cet échantillon révèle une roche d'apparence homogène où les minéraux sont à peine visibles, caractérisés par leur petite taille. La surface plate de cette roche suggère un alignement des minéraux selon des plans parallèles, formant des structures feuilletées. Ces plans sont insérés les uns dans les autres, créant une structure feuilletée avec un litage ou une linéation. Ainsi, le schiste présente une structure feuilletée avec linéation.

L'examen en lame mince confirme cette observation. Au microscope polarisant, les minéraux de petite taille sont clairement alignés selon des plans parallèles et rectilignes, confirmant la structure feuilletée avec linéation. Des ondulations sont présentes, mais les minéraux restent organisés.

En passant au **micaschiste**, un autre échantillon montre une roche avec des minéraux organisés en feuillet, mais cette fois-ci, ils sont séparables. Cela donne une structure feuilletée avec schistosité, caractérisée par des minéraux alignés selon des plans parallèles, mais cette fois-ci séparables.

L'observation en lame mince révèle des minéraux un peu plus grands que ceux du schiste, comprenant du quartz, du feldspath et de la biotite. La schistosité se caractérise par des minéraux alignés selon des plans parallèles, mais légèrement plus épais et séparables.

Enfin, le **gneiss** présente des minéraux de grande taille, tels que les grenats et la biotite noire, organisés en feuillets épais alternant entre minéraux clairs (feldspath et quartz) et minéraux sombres. Ainsi, la structure du gneiss est une structure feuilletée avec foliation.

La composition chimique

	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
Na2O	2.45	2.1	3.83
K2O	4.1	3.7	3
H2O	4.05	3.65	1.39

Le tableau présenté expose la composition chimique des trois roches examinées précédemment, à savoir le schiste, le micaschiste et le gneiss. Il indique que ces trois roches partagent des similitudes dans leurs oxydes, notamment l'oxyde de silicium, également appelé **silicates**, et le dioxyde de carbone (CO₂), qui présentent des proportions significatives. Ces proportions sont sensiblement équivalentes dans les trois types de roches, de même que **l'alumine** (Al₂O₃), bien que sa présence soit en proportion inférieure à celle des **silicates**. Ainsi, les trois roches possèdent une composition chimique commune en tant que silicates d'alumine.

Cela suggère que lorsqu'une roche mère subit un processus de métamorphisme, elle peut donner naissance aux trois types de roches étudiées, qui se distinguent principalement par leur structure. La roche mère en question est un silicate d'aluminium hydraté, autrement dit, **de l'argile**.

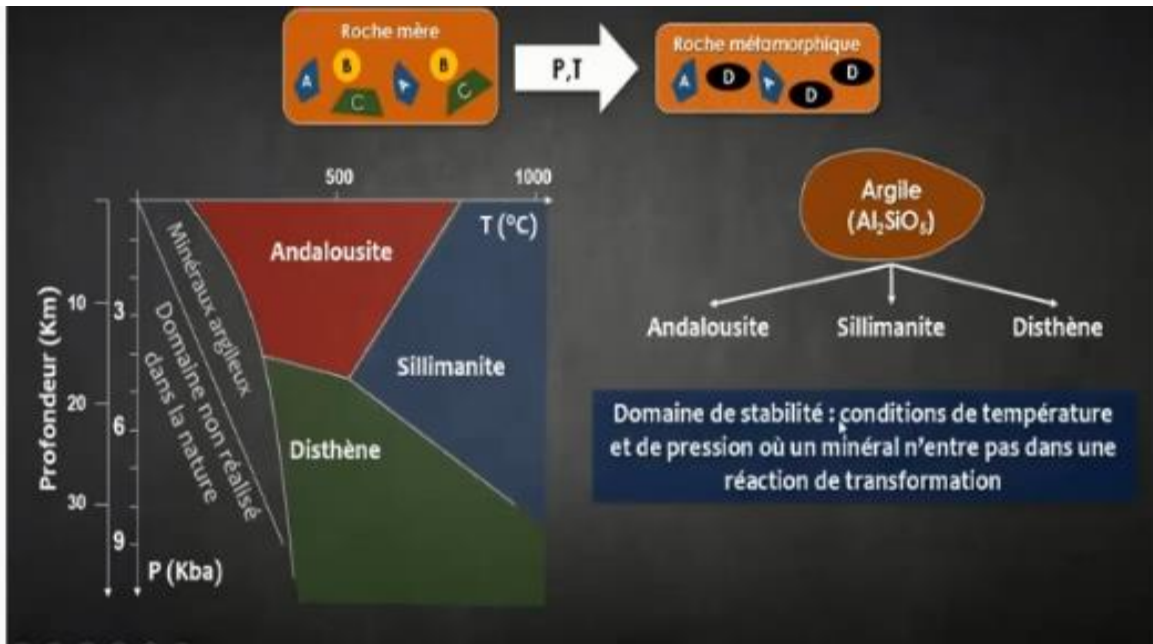
La composition minéralogique d'une roche se réfère à l'ensemble des minéraux qui la constituent. Lors du processus de métamorphisme, on observe la disparition de certains minéraux et l'apparition d'autres, ce qui caractérise cette transformation minéralogique.

Ex	Schiste	Micaschiste	Gneiss
Composition minéraux	Séricite Chlorite Silicates hydratés	Biotite (mica noir) Muscovites (mica blanc) Grenat	Quartz Feldspath potassique Biotite Silimanite Grenat

Caractéristiques minéralogiques des roches métamorphiques

Les propriétés minéralogiques des roches métamorphiques ont été explorées au moyen d'une expérience impliquant des roches argileuses, principalement composées de silicate d'aluminium (Al₂SiO₅). Sous une pression croissante et une température croissante, les minéraux d'argile ont été observés se transformant en d'autres minéraux tels que l'andalousite, la sillimanite et le disthène, tous distincts de l'origine de l'argile.

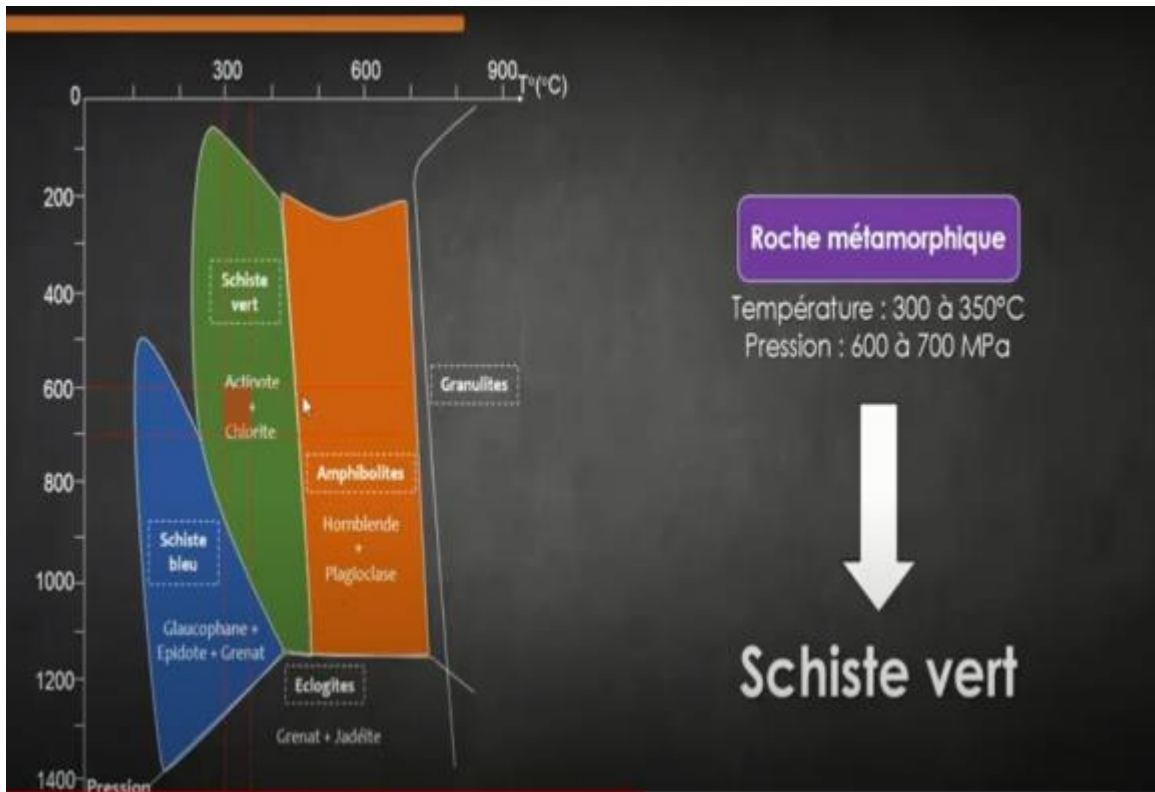
L'observation d'un graphique met en évidence un phénomène intéressant. En soumettant un ensemble de minéraux argileux à une augmentation de température uniquement, les minéraux d'argile évoluent vers l'andalousite. Lorsqu'on augmente la pression, l'andalousite à son tour se transforme en disthène. Ainsi, la variation de la température et de la pression influence à la fois la structure et la composition minéralogique de la roche. Chaque minéral possède un **domaine de stabilité, défini par des conditions spécifiques de température et de pression où il ne subit pas de transformation réactionnelle**.



Faciès métamorphique

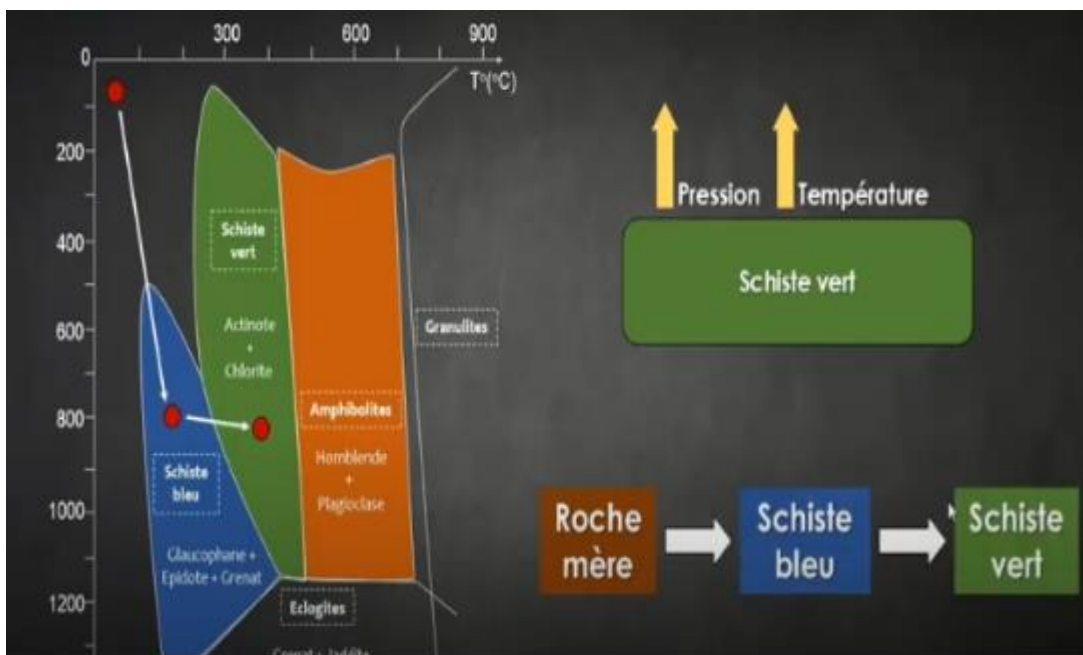
un ensemble spécifique de conditions de température et de pression dans lequel certaines roches métamorphiques se forment. Chaque faciès métamorphique est caractérisé par des conditions thermodynamiques distinctes qui influencent la composition minéralogique des roches qui s'y développent.

L'exemple du "faciès de schiste bleu" que vous mentionnez représente un domaine spécifique dans un diagramme de pression-température (P-T). Ce faciès indique les conditions idéales pour la formation de schistes bleus, caractérisés par la présence de minéraux spécifiques tels que la glaucophane. Ce faciès est souvent associé à des zones de subduction où les roches subissent des pressions élevées à des températures relativement basses.



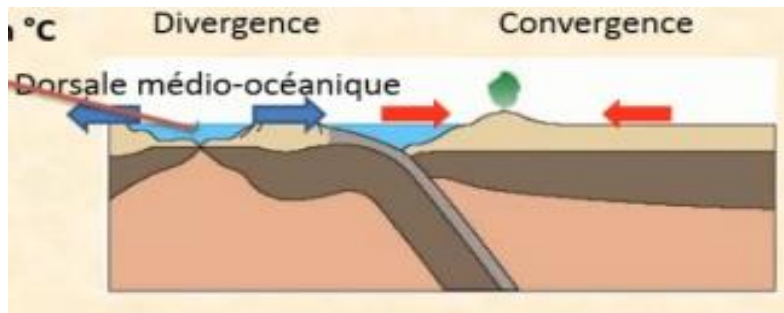
Série métamorphiques

La notion de "série métamorphique" désigne l'ensemble des faciès métamorphiques traversés par une roche donnée au cours de son processus métamorphique. En d'autres termes, elle représente le parcours métamorphique suivi par une roche depuis le début de son métamorphisme. Cette série témoigne des différentes conditions de pression et de température auxquelles la roche a été soumise au fil du temps, et elle est souvent associée à des processus tectoniques complexes, tels que la **subduction ou la collision** des plaques lithosphériques.



La série métamorphique associée aux zones de subduction, comprenant du basalte ou des gabbros, des schistes verts, des schistes bleus, et enfin de l'éclogite, est caractérisée par des conditions de haute pression et de basse température. Ce type particulier de métamorphisme est qualifié de dynamique.

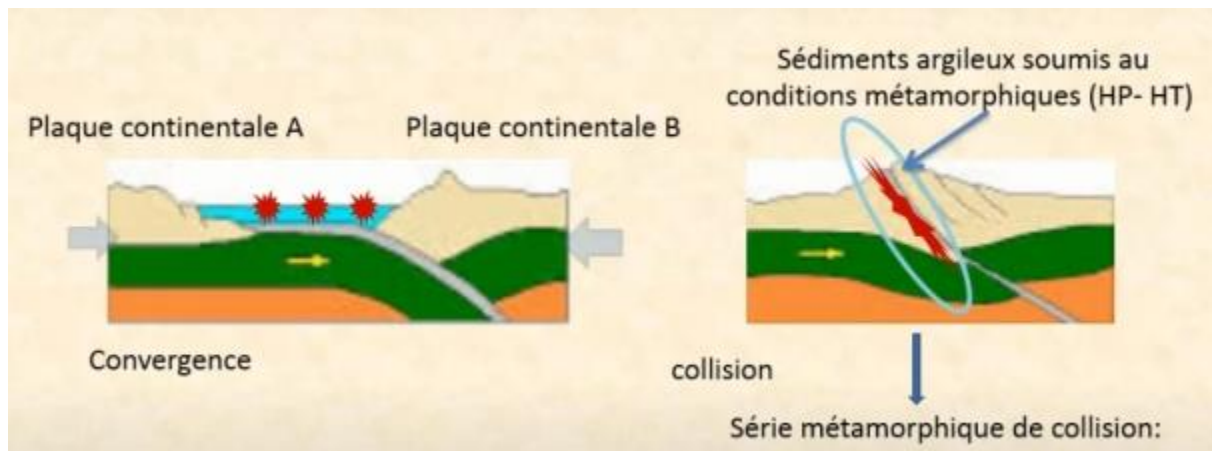
Basalte ou gabbros → schistes verts → schiste bleus → Eclogite



La série métamorphique associée aux zones de subduction de collision

La série métamorphique associée aux zones de collision, comprenant du gneiss, du micashiste, du schiste et de l'argile, est caractérisée par des conditions de haute pression et haute température. Ce type particulier de métamorphisme est qualifié de métamorphisme thermo-dynamique.

Gneiss ≤-----Micashiste ≤-----Shiste≤-----Argile



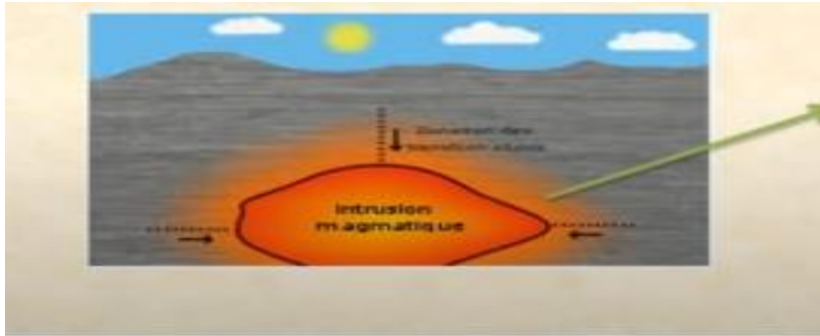
Série métamorphique et types de métamorphisme caractérisant l'auréole métamorphique

Gneiss ≤-----Micashiste ≤-----Shiste≤-----Argile

La série métamorphique associée à l'auréole métamorphique résultant d'un processus de collision comprend du gneiss, du micashiste, du schiste et de l'argile. Lorsque le gneiss, situé à des profondeurs élevées où la température est importante, subit une fusion partielle, il donne naissance à un magma. Ce magma, toujours à une température élevée, est ensuite injecté dans une séquence de roches plus froides, provoquant un transfert de chaleur et induisant une cuisson de la roche encaissante le long de ses bordures, par le biais d'un métamorphisme de contact.

L'auréole de contact résultante présente une transformation de la roche encaissante en schiste, sous des conditions de faible pression et de haute température. Ce processus spécifique de métamorphisme est

qualifié de métamorphisme thermique ou de contact, soulignant l'importance de l'apport thermique provenant du magma en fusion partielle. Cette interaction entre le magma chaud et la roche encaissante froide conduit à des changements minéralogiques et texturaux dans la roche encaissante, donnant naissance à l'auréole métamorphique.



Les types de métamorphisme et leur relation avec l'orogénèse

Les types de métamorphisme, à savoir le métamorphisme thermique, le métamorphisme thermique-dynamique et le métamorphisme dynamique, sont liés aux processus d'orogénèse, qui sont les mouvements tectoniques impliquant la formation de montagnes. Chacun de ces types de métamorphisme est associé à des conditions géologiques spécifiques qui surviennent au cours des phases de l'orogénèse.

Métamorphisme Thermique:

Conditions Géologiques: Haute température, basse pression.

Relation avec l'Orogénèse: Le métamorphisme thermique est souvent associé aux premières phases de l'orogénèse, où l'accumulation de sédiments ou les intrusions magmatiques provoquent des élévations de température sans nécessiter une pression très élevée. **Par exemple, les sédiments** déposés en profondeur peuvent subir un métamorphisme thermique lorsqu'ils sont enfouis par de nouvelles couches de sédiments.

Métamorphisme Thermique-Dynamique:

Conditions Géologiques: Haute température, haute pression.

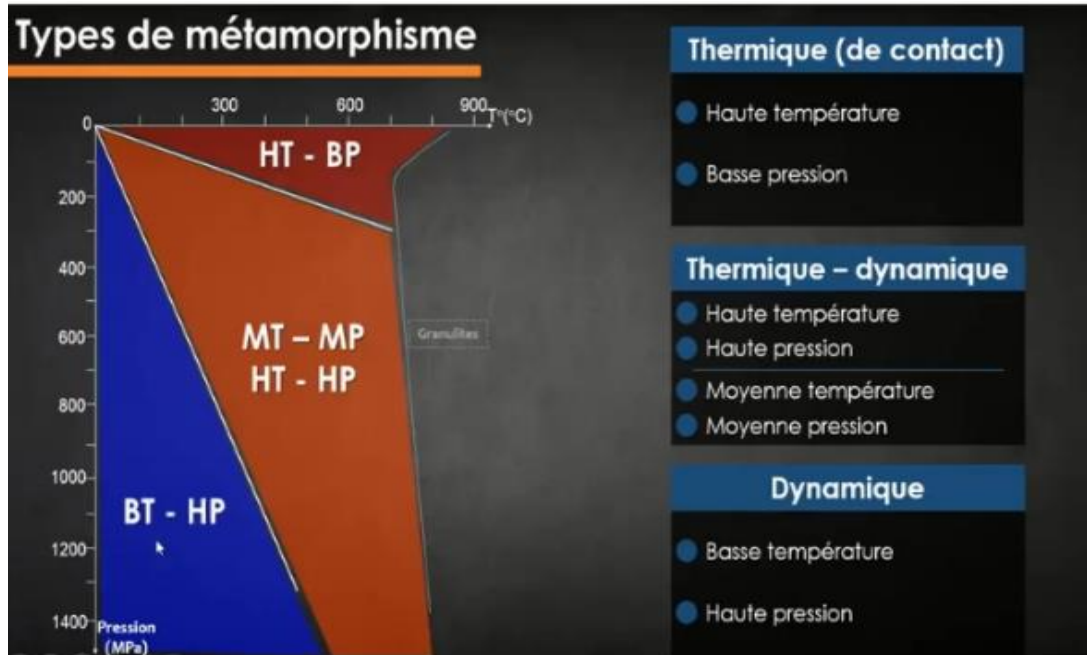
Relation avec l'Orogénèse: Ce type de métamorphisme est étroitement lié aux stades avancés de l'orogénèse, où les roches subissent à la fois des températures élevées et des pressions accrues. Les roches à des profondeurs importantes dans la croûte terrestre peuvent subir **ce type de métamorphisme pendant les collisions tectoniques**, formant des chaînes de montagnes.

Métamorphisme Dynamique:

Conditions Géologiques: Basse température, haute pression.

Relation avec l'Orogénèse: Le métamorphisme dynamique est souvent associé aux zones de subduction, où une plaque lithosphérique plonge sous une autre. Les roches subissent une déformation intense à des profondeurs importantes, entraînant des pressions élevées sans augmentation significative de la température. Cela se produit fréquemment **pendant les phases de collision et de**

subduction associées à l'orogénèse.

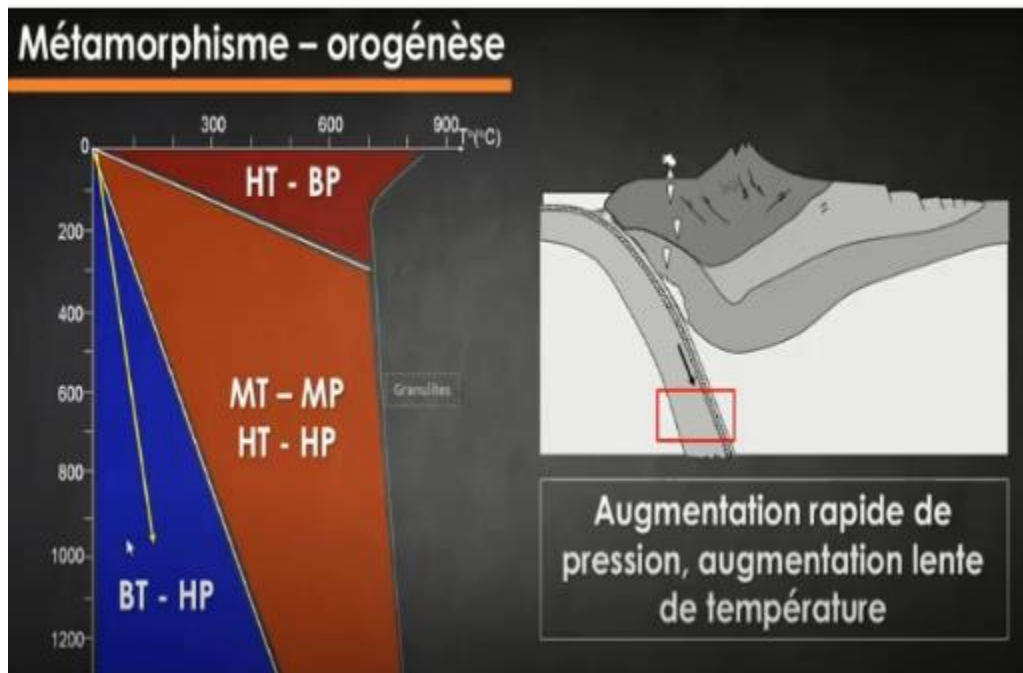


Métamorphisme - Orogénèse

En cas de subduction, les roches de la croûte océanique, initialement à la surface, subissent un processus d'enfouissement, se déplaçant vers des zones de plus en plus profondes. Ces roches, en raison de leur origine à la surface, conservent des températures relativement basses même à des profondeurs considérables, comme indiqué par les anomalies thermiques. Cependant, l'enfouissement rapide entraîne une augmentation significative de la pression par rapport à une augmentation relativement faible de la température.

Cette combinaison de conditions, caractérisée par une augmentation rapide de la pression et une augmentation plus lente de la température, conduit à un métamorphisme spécifique appelé métamorphisme dynamique. Dans le contexte de la subduction, le métamorphisme dynamique est le seul type de métamorphisme rencontré dans cette région. Il se caractérise par des conditions de basse température et haute pression.

Ainsi, les roches de la croûte océanique subissent des transformations minéralogiques en réaction à ces conditions spécifiques de subduction, générant un métamorphisme dynamique. Ce processus métamorphique est essentiel pour comprendre l'évolution des roches dans les zones de subduction, où les déplacements des plaques tectoniques entraînent des changements significatifs dans les conditions thermiques et de pression.



En cas de la collision

Dans le contexte de la collision, le processus peut être divisé en plusieurs étapes clés:

Subduction: La première étape implique le rapprochement des deux lithosphères, entraînant la subduction d'une partie de la lithosphère océanique.

Cassure et Déplacement: La deuxième étape montre une cassure de la lithosphère océanique, créant un fragment de croûte océanique enfermé entre les deux masses continentales. Des forces tectoniques et des failles contribuent à la formation de ce fragment.

Montée et Subduction Continue: Dans la troisième étape, une partie de la croûte continentale monte sur la croûte océanique, suivie de la subduction continue de cette zone de croûte océanique.

Affrontement des Masses Continentales: La dernière étape est marquée par l'affrontement des deux masses continentales, formant une chaîne de montagnes.

L'évolution métamorphique de ces roches au cours de ces étapes est notée en rouge étoilé:

- Initialement à la surface (basse pression et basse température).
- Prolongement vers des profondeurs croissantes lors de la subduction, provoquant un métamorphisme de basse température et haute pression.
- Déplacement vers des profondeurs plus importantes pendant la collision, induisant des déformations tectoniques et des métamorphismes.

Le processus global est marqué par des changements de pression et de température, impactant le métamorphisme des roches. Les variations dans la transformation des roches offrent des indices sur les événements qui ont façonné ces régions, avec certaines parties ayant déjà subi le métamorphisme, tandis que d'autres suivent encore ce processus complexe. Ces indices sont souvent observables à travers les différentes phases métamorphiques que traverse une roche au cours de son histoire géologique.

