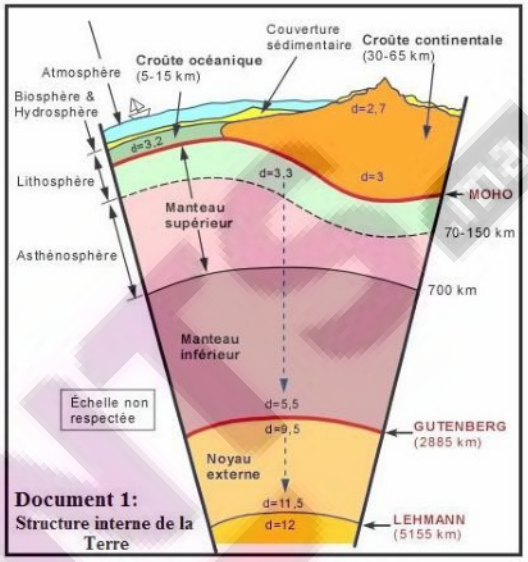
www.students.ma

Unité 4 : Les phénomènes géologiques accompagnant la formation des chaînes de montagnes et leur relation avec la tectonique des plaques

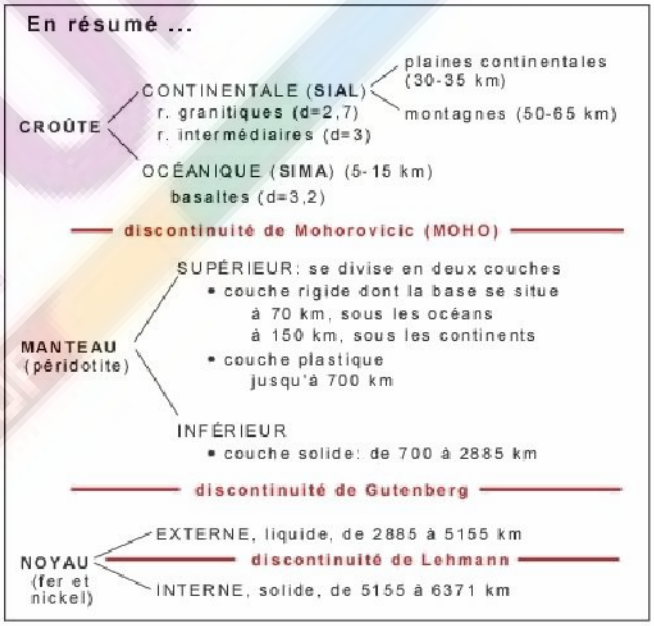
➲ Introduction (Rappels sur la tectonique des plaques) :

La structure de la Terre est constituée d'une succession de couches de propriétés physiques différentes: au centre, le noyau; puis, le manteau, qui constitue le gros du volume terrestre, et qui se divise en manteau inférieur solide et manteau supérieur principalement plastique, mais dont la partie tout à fait supérieure est solide (manteau lithosphérique); finalement, la croûte (ou écorce), qui compte pour moins de 2% en volume et qui est solide.



Document 1: Structure interne de la Terre

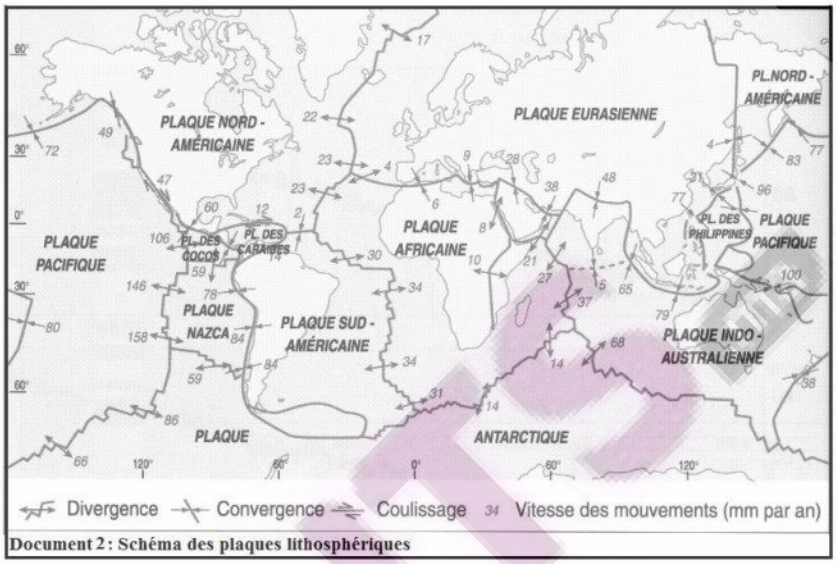
La couche plastique du manteau supérieur est appelée asthénosphère, alors qu'ensemble, les deux couches solides qui la surmontent, soit la couche solide de la partie supérieure du manteau supérieur et la croûte terrestre, forment la lithosphère. La limite entre les deux couches lithosphériques s'appelle Moho.



www.students.ma

www.students.ma

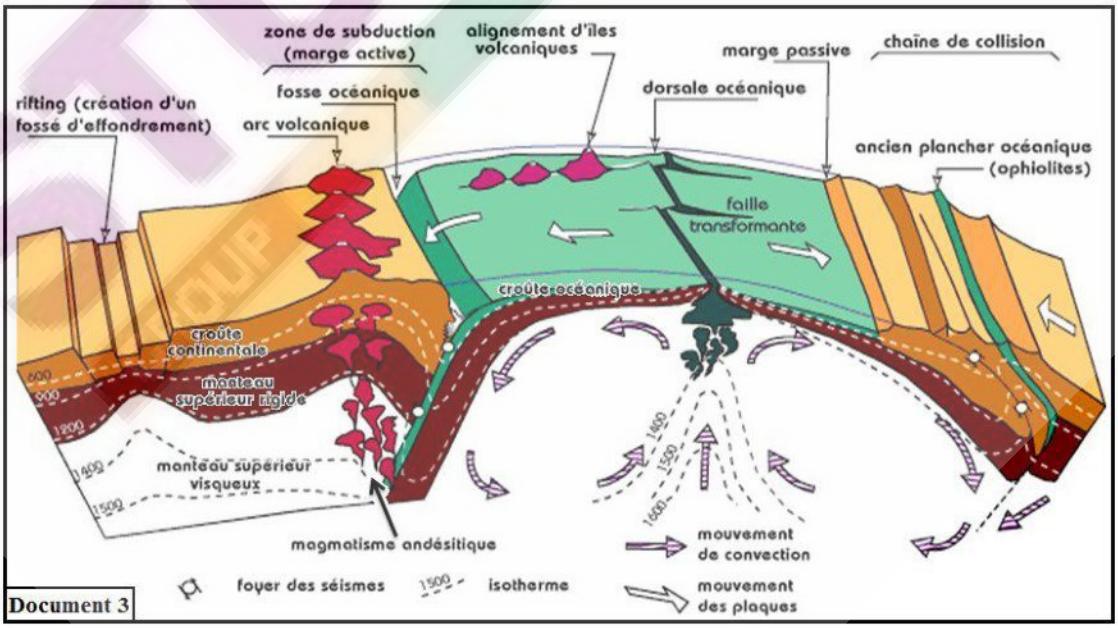
Notion de plaques lithosphériques : aussi appelées plaques tectoniques, sont des « morceaux » de la lithosphère qui reposent sur l'asthénosphère moins rigide. Les plaques s'assemblent à la manière d'un puzzle sur l'ensemble de la surface de la Terre.



Document 2 : Schéma des plaques lithosphériques

Ces plaques ont la particularité de se déplacer (de quelques centimètres par an en moyenne), à la suite des mouvements convectifs qui existent dans le manteau. Durant ces déplacements, deux plaques peuvent :

- S'écarter l'une de l'autre. Elles sont alors dites divergentes. Ce phénomène survient principalement au fond des océans, au niveau des dorsales océaniques, mais aussi en quelques endroits sur les continents (on parle alors de rifts). L'espace libéré suite à l'écartement des plaques est comblé par du magma qui refroidit rapidement.
- Deux plaques peuvent également être convergentes, ce qui donne lieu à des collisions (formation des chaînes de montagnes) ou à des subductions (la plaque la plus dense passe sous l'autre).
- Enfin, deux plaques peuvent tout simplement coulisser l'une contre l'autre.



Document 3

www.students.ma

www.students.ma

Chapitre 1 : Les chaines de montagnes récentes et les déformations tectoniques qui les accompagnent

Quelles sont les types de chaines de montagnes récentes ?

Quels sont les caractéristiques de chacun de ces types ?

I- Les caractéristiques structurales et pétrographiques des chaines de montagnes récentes :

1- Les chaines de subduction (exemple des Andes) :

La subduction est le processus d'enfoncement d'une plaque tectonique (plaque subduite) sous une autre plaque (plaque chevauchante) de densité plus faible, en général une plaque océanique (à forte densité) sous une plaque continentale (moins dense) ou sous une autre plaque océanique.

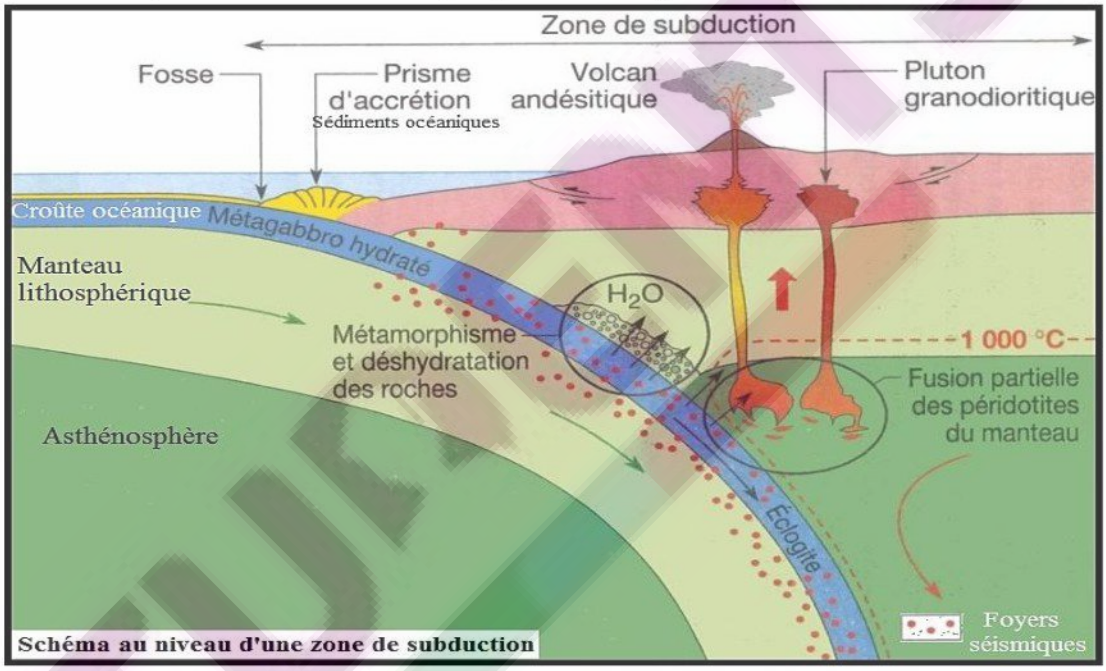


Schéma au niveau d'une zone de subduction

a- Les caractéristiques structurales :

De la subduction résulte la formation de chaînes de montagne de subduction. La chaine des Andes le long du littorale Ouest de l'Amérique du Sud en est un exemple. Ces chaines se caractérisent par :

- **L'élévation des montagnes** (relief positif) parallèle à une **fosse océanique profonde** (relief négatif), le long de la marge continentale active. On peut expliquer ces reliefs par le fait que la subduction de la lithosphère océanique entraine une forte pression sur les couches de la croûte terrestre de la région (force de convergence), ces couches répondent par une déformation formant les plis et les failles inverses ce qui conduit au soulèvement des reliefs sous forme d'une chaine de montagne.

www.students.ma

www.students.ma

- **Une forte activité sismique** dont les foyers sont répartis selon un plan incliné appelé « plan de Bénioff », qui traduit le fait que la plaque descendante s'enfonce de façon inclinée sous la plaque chevauchante.
- **Une activité volcanique**.
- **Des anomalies thermiques** par un abaissement des lignes isothermes sous la fosse continentale due au refroidissement de cette zone par la croute océanique subduite froide et, au contraire, une élévation de ces isothermes au-dessous de la chaine volcanique suite au réchauffement de cette zone par la magma chaud montant.
- La formation **d'un prisme d'accrétion** par l'empilement des sédiments océaniques entre la fosse et la plaque continentale (chevauchante).

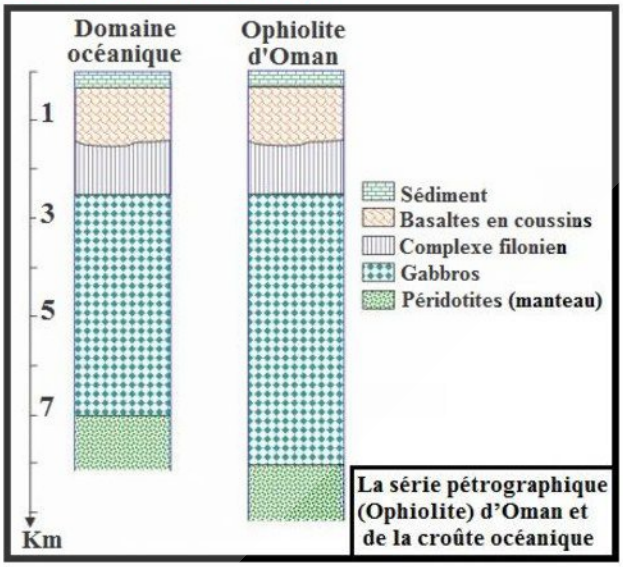
b- Les caractéristiques pétrographiques (rocheuses) :

Les chaines de subduction se caractérisent par l'abondance d'une roche volcanique nommée « Andésite » et par la présence de plutons de granitoïdes.

Au cours de l'enfouissement de la lithosphère océanique (plus dense) sous la lithosphère continentale (moins dense) les roches subduites subissent une augmentation de la pression et de la température, ce qui provoque des réactions minéralogiques accompagnées par la libération d'importante quantité d'eau qui diffusent à travers les roches du manteau supérieur (La péridotite). Ainsi se réalisent les conditions de la fusion partielle de la péridotite conduisant à la formation d'un magma qui migre vers la surface. Une partie de ce magma cristallise en profondeur et donne naissance à des plutons de granitoïdes à structure grenue, et l'autre partie atteint la surface et se refroidit rapidement pour former l'andésite caractérisée par sa structure microlitique où des petits cristaux appelés microlites sont liés par un verre.

2- Les chaines d'obduction (exemple de la chaine d'Oman) :

☑ Comparez la série pétrographique d'Oman à celle de la croûte océanique.



La série pétrographique (Ophiolite) d'Oman et de la croûte océanique

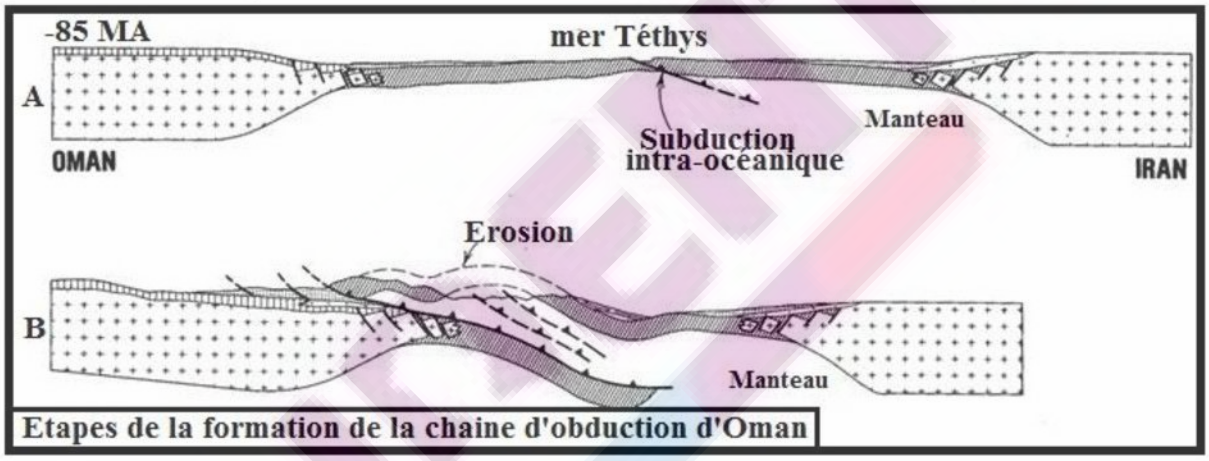
www.students.ma

www.students.ma

On remarque une ressemblance entre le complexe ophiolitique d'Oman et la lithosphère océanique dans la succession des structures. En effet, ils comportent du haut vers le bas : un niveau de basalte en coussinets, un niveau formé de gabbro et un niveau de péridotite. Ils diffèrent par l'épaisseur de ces structures et par la présence de sédiments anciens continentaux sous la péridotite dans la colonne de l'ophiolite.

➔ Le complexe ophiolitique d'Oman est un fragment formé au niveau d'une lithosphère océanique qui a migré sur la lithosphère continentale.

L'obduction est un phénomène géodynamique lors duquel des portions de croûte océanique (dites ophiolites) émergent sur la marge continentale sous l'effet de forces de convergence.



Etapes de la formation de la chaine d'obduction d'Oman

Les chaînes d'obduction sont caractérisé par la présence des roches du complexe ophiolitique (Basalte, gabbros, péridotite) et des sédiments du fond océanique (exp : radiolarites) au-dessus d'un socle continentale.

Ce phénomène est le résultat d'un rapprochement entre deux plaques. Dans un premier temps une subduction entre deux croutes océaniques se passe. Les forces compressives issues de cette convergence entrainent une disparition complète de la croute océanique subduite puis, un chevauchement de la lithosphère océanique (non subduite) sur la lithosphère continentale autochtone, provoquant la déformation des couches et le soulèvement de reliefs représentant les chaînes d'obduction.

www.students.ma

www.students.ma

3- Les chaînes de collision :

La collision continentale est un phénomène géodynamique se produisant à la limite convergente de deux lithosphères continentales qui se rencontrent après la fermeture totale d'une ancienne mer.

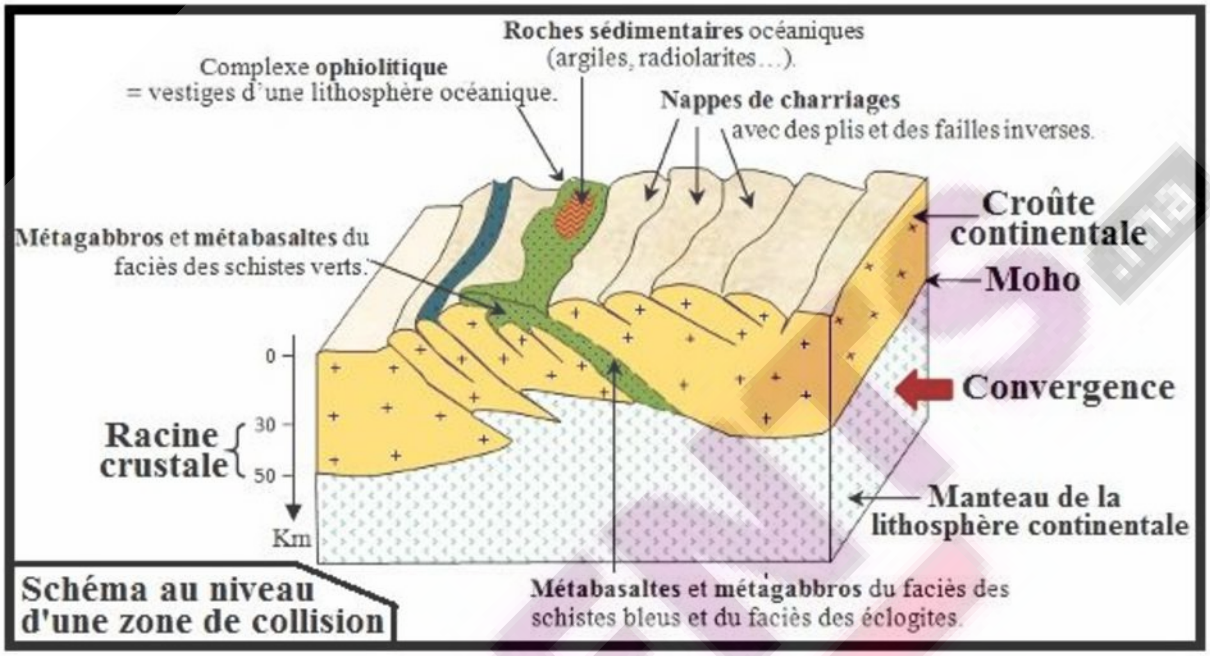


Schéma au niveau d'une zone de collision

a- Les caractéristiques structurales :

Les chaînes de collision (telles que l'Himalaya et les Alpes) sont caractérisées par :

- La convergence entre **deux lithosphères continentales**.
- Surrection de **hautes chaînes** de montagnes.
- Les **déformations** des couches de la croûte terrestre: Les plis, failles inverses, chevauchements et nappe de charriage qui résultent des forces de convergence compressives.

b- Les caractéristiques pétrographiques:

- Présence d'ophiolite et de roches sédimentaires d'origine marine (prisme d'accrétion) coincés dans la zone de suture entre les deux plaques convergentes, expliquée par la disparition d'un océan ancien (fermeture océanique).
- Présence de roches sédimentaires métamorphisées d'origine continentales différentes, chacune appartenant à l'une des plaques en collision.
- Présence de roches magmatiques telles que l'andésite et le granodiorite, résidus de l'activité de subduction qui précède la collision.

www.students.ma

www.students.ma

☑ La reconstitution de la formation d'une chaîne de collision peut être résumée comme suit :

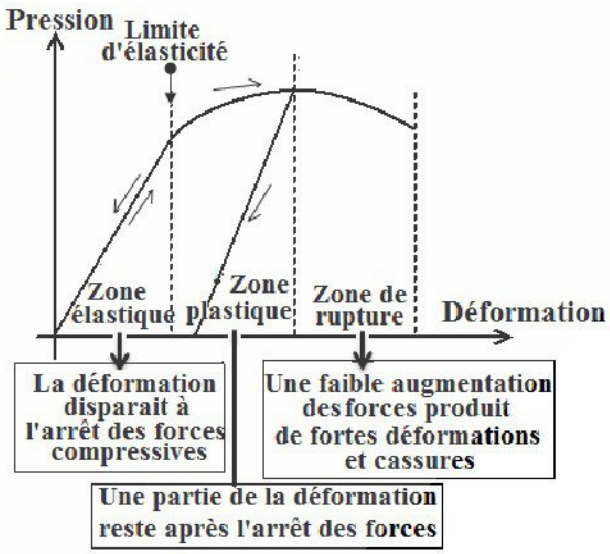
- **Etape 1 :** Deux plaques étaient séparées par un ancien océan (Cas de l'himalaya : Mer Téthys entre la plaque indienne et la plaque eurasienne / Cas des Alpes : Océan alpin entre la plaque africaine et la plaque européenne).
- **Etapes 2 :** L'arrêt de l'expansion marine et le rapprochement entre les deux plaques, accompagné par des forces compressives qui conduisent à la subduction de la lithosphère océanique sous la marge continentale.
- **Etape 3 :** La poursuite des forces tectoniques a pour résultat la déformation des couches rocheuses, la fermeture du domaine océanique et l'obduction d'un morceau de la lithosphère océanique sur la lithosphère continentale. Ce morceau correspond au complexe ophiolitique se trouvant dans la suture des deux plaques.
- **Etapes 4 :** Collision entre les deux marges continentales entrainant la formation de la chaîne de collision. Le complexe ophiolitique et les sédiments du prisme d'accrétion restent comme indices de la fermeture marine.

II- Les déformations tectoniques accompagnants la formation des chaînes de montagnes :

1- Facteurs de déformation des roches :

Le type de déformation des roches est lié à :

- Des facteurs externes dont le plus important est la profondeur qui détermine les variations de pression et de la température.
- Des facteurs internes en relation avec la nature des roches et leurs caractéristiques.
- La durée de l'application des forces tectoniques, les déformations sont plutôt souples si l'application des forces est lente. Elles seront cassantes si les forces sont rapides.



www.students.ma

www.students.ma

2- Types de déformations tectoniques :

a. Le pli : Une déformation souple des couches géologiques sous forme d'ondulation à la suite de contraintes tectoniques.

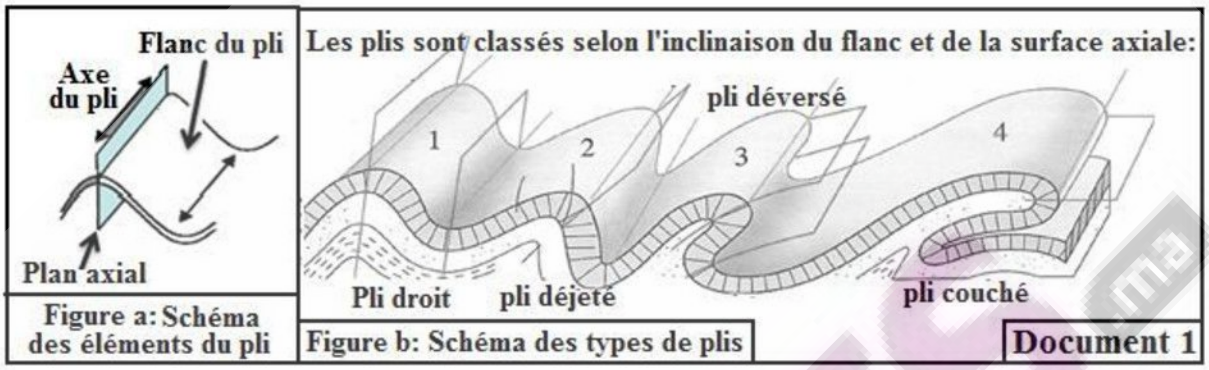
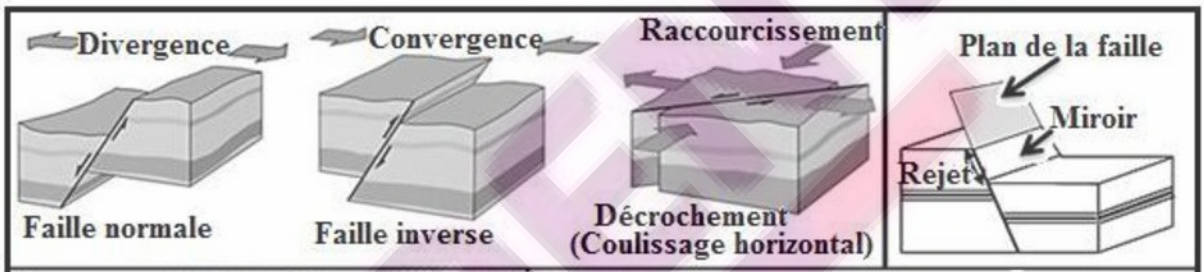


Figure a: Schéma des éléments du pli | Figure b: Schéma des types de plis | Document 1

b. La faille : Une déformation sous forme de cassure inclinée séparant deux compartiments rocheux. La faille inverse se traduit par un rapprochement des d'un compartiment par rapport à l'autre suite aux forces compressives.

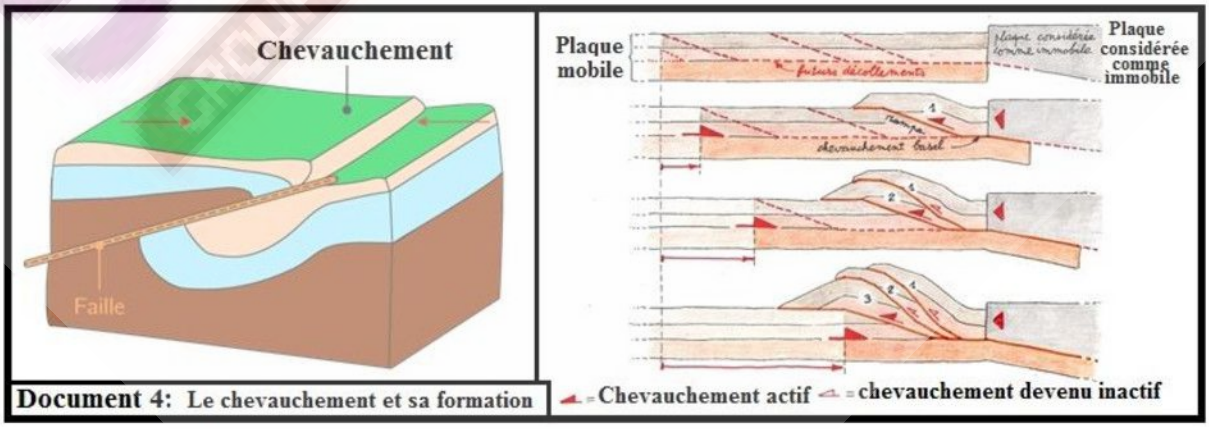


Document 2: Eléménts et types de failles



Document 3: Schéma d'un pli-faille (Déformation intermédiaire)

c. Chevauchement : une déformation suite à un mouvement tectonique où une série de terrains recouvre une autre après un contact anormal de type faille inverse.

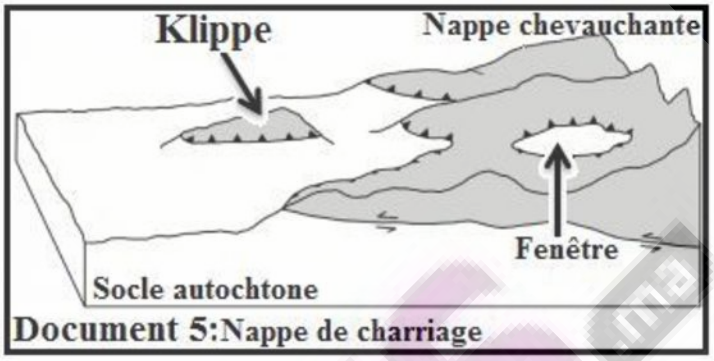


Document 4: Le chevauchement et sa formation

www.students.ma

www.students.ma

d. Nappe de charriage : Une forme de déformation, suite à un mouvement tectonique, se traduisant par le déplacement d'un terrain, sur de grandes distances, par-dessus d'autres terrains (c'est un chevauchement d'amplitude pluri-kilométrique).



Document 5: Nappe de charriage

La klippe : un morceau de nappe isolé du reste de la nappe par l'érosion.

La fenêtre : une zone de la nappe érodée permettant de voir les terrains autochtones (socle) sous-jacents.

www.students.ma

www.students.ma

Chapitre 2 : Le métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

Les zones de subduction et les zones de collision sont caractérisées par l'affleurement de roches qui ont une structure et une composition minéralogique qui résulte d'une transformation de la roche préexistante à l'état solide sous l'effet de l'augmentation de la température et de la pression. Ces roches sont appelées roches métamorphiques.

- Quelles sont les caractéristiques des roches métamorphiques dans les zones de subduction et de collision ?
- Quels sont les facteurs et les types de métamorphismes ?

I- Les caractéristiques des roches métamorphiques dans les zones de subduction et de collision :

1- Les roches métamorphiques dans les zones de subduction :

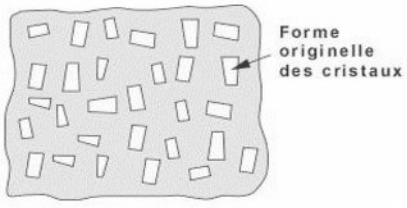
On distingue dans la zone de subduction la série métamorphique composée des roches suivantes :

Roches	Métamorphisme croissant →	Structure	Minéraux
Schiste bleu		Foliés gris	Glaucophane (Bleue) + Mica (blanche)
Eclogite		Grenue, D'origine basaltique ou gabroique	Jadéite + Grenat

Le gabbro, le schiste bleu et l'éclogite ont la même composition chimique :

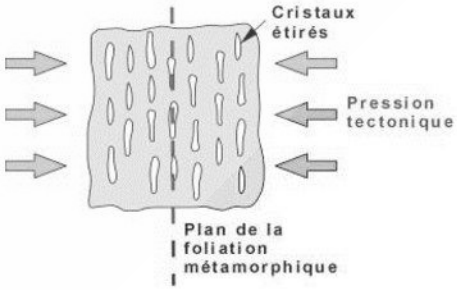
Formule chimique	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Pourcentage	47,1	2,3	14,2	11	12,7	9,9	2,2	0,4

Ce qui prouve que l'ensemble de ces roches provient de la même roche d'origine suite à un changement des conditions de température et de pression en profondeur.



➲ **Remarque :**

- **La schistosité :** feuilletage présenté par des roches sous l'influence de contraintes tectoniques (pression et température), selon lesquelles les minéraux s'organisent en lames (feuilles).
- **Foliation :** Structure présenté dans des roches métamorphiques qui se caractérisée par la succession de lits de minéraux à contenu minéralogique différent (feuilles



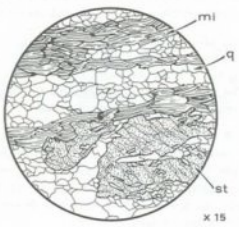
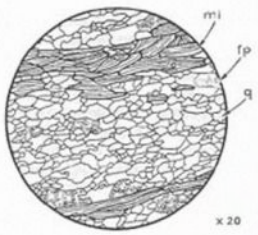
www.students.ma

www.students.ma

successives de couleurs différentes).

2- Les roches métamorphiques dans les zones de collision :

La zone de collision est caractérisée par la série métamorphique suivante :

Roches		Structure	Minéraux
Schiste vert 	↓ Métamorphisme croissant →	Schisteuse dont le sens des minéraux indiquent le sens des forces mécaniques	Séricite + Chlorite (verte)
Micaschiste 		Schisteuse-foliée, les lits de minéraux sont simple à cliver (séparables)	Lits de biotite + moscovite (=Mica) claires, et lits de quartz.
Gneiss 		Foliée, les lits de minéraux distincts sont non clivables.	Mica (lits sombres), quartz et feldspath (lits clairs)

L'analyse chimique montre que la composition chimique de ces roches de la zone de collision est semblable (roche silicoalumineuse), alors que leur composition minéralogique est différente, ces roches provient donc de la même roche d'origine qui a connu un métamorphisme grandissant au fur et à mesure du rapprochement lithosphérique).

➲ **Conclusion :** Le métamorphisme est l'ensemble des processus qui induisent des modifications minéralogiques et texturales d'une roche, à l'état solide et sous l'effet de la température, de la pression et des fluides.

II- Les facteurs du métamorphisme et Notion de minéral index et de faciès métamorphique:

1- Les facteurs du métamorphisme :

L'augmentation de la pression et/ou de la température entraîne des réactions minéralogiques. En effet, certains minéraux deviennent instables dans les

www.students.ma

www.students.ma

nouvelles conditions de pression et de température et se transforment. En même temps apparaissent des minéraux nouveaux stables dans ces conditions.

La température augmente en fonction de la profondeur (gradient géothermique), la valeur de cette augmentation varie d'une zone à l'autre. Elle est faible dans les zones géologiquement stables, et forte dans les zones géologiquement actives.

La pression varie en profondeur sous l'action de la masse des roches, les forces tectoniques et la pression partielle des fluides (CO_2 et la vapeur d'eau).

2- Notion de minéral index et de faciès métamorphique :

a- Le minéral index :

Certains minéraux sont sensibles aux variations de pression et de température. Ces variations provoquent des réactions minéralogiques, et ainsi la transformation d'un minéral en un autre. Chacun de ces minéraux est stable dans des conditions déterminées de pression et de température, si on le rencontre dans une roche métamorphique, il indique que cette roche a subi ces conditions. Ainsi ce minéral s'appel minéral index.

Certaines réactions suite à un métamorphisme croissant :

Plagioclase + Pyroxène + eau → Amphibole

Plagioclase + Amphibole + eau → Chlorite + Actinote

Plagioclase + Chlorite + Actinote → Glaucophane + eau

Plagioclase + Glaucophane → Grenat + Jadéite + eau

b- Les faciès métamorphiques :

Selon les conditions de pression et de température on peut déterminer le domaine de stabilité d'un ensemble de minéraux, ce domaine s'appel faciès métamorphique.

Ainsi on peut déterminer plusieurs faciès métamorphiques (exemple : faciès schiste vert, faciès schiste bleu, faciès éclogite…) chaque faciès est caractérisé par un ensemble de minéraux stables dans des conditions déterminées de pression et de température.

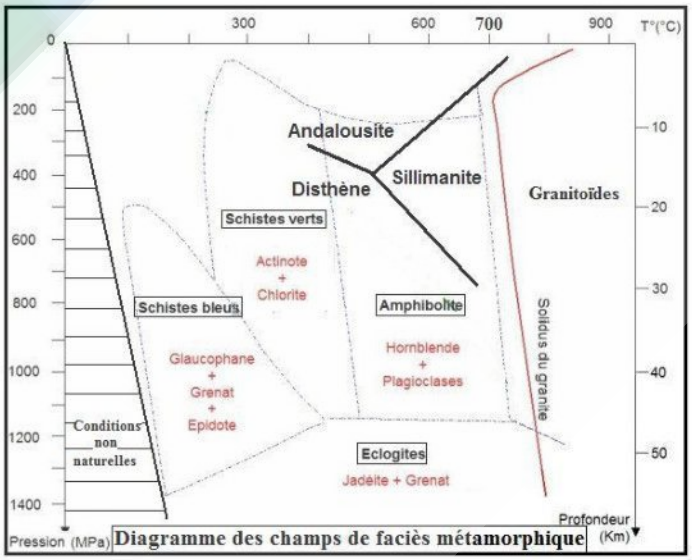


Diagramme des champs de faciès métamorphique

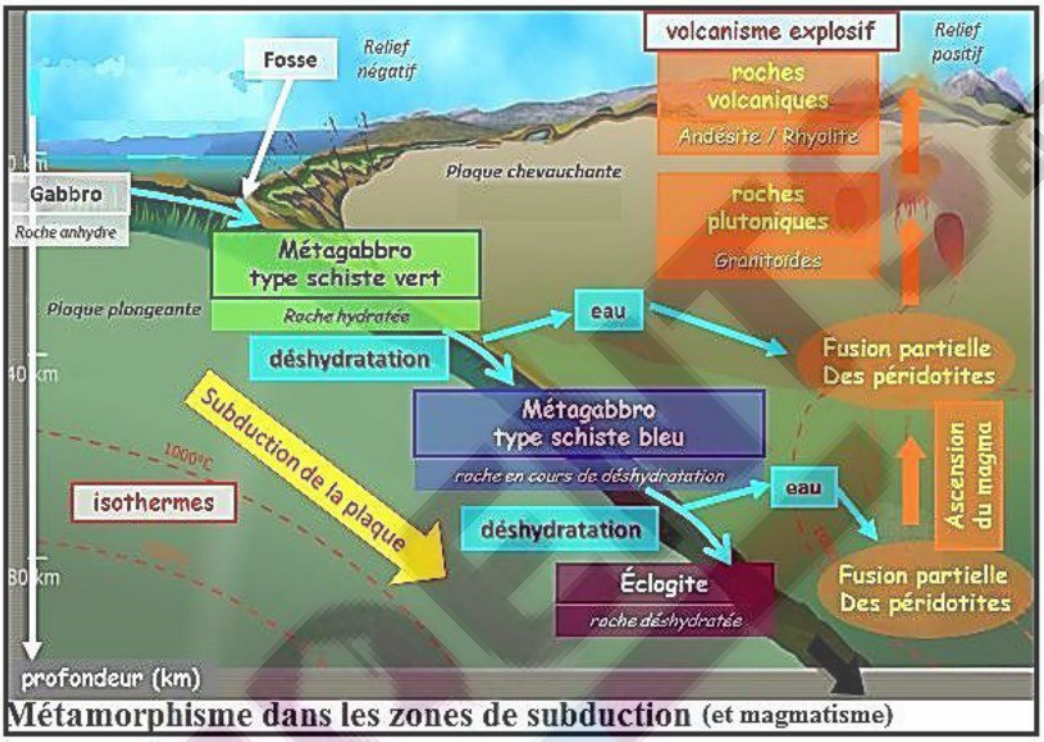
www.students.ma

www.students.ma

III- Le métamorphisme dans les zones de subduction et de collision :

1- Le métamorphisme dans les zones de subduction (métamorphisme dynamique) :

Dans les zones de subduction, les roches de la lithosphère océanique qui s'enfoncent sous la lithosphère continentale, subissent une forte augmentation de pression et, relativement, une faible augmentation de température. Cette



Métamorphisme dans les zones de subduction (et magmatisme)

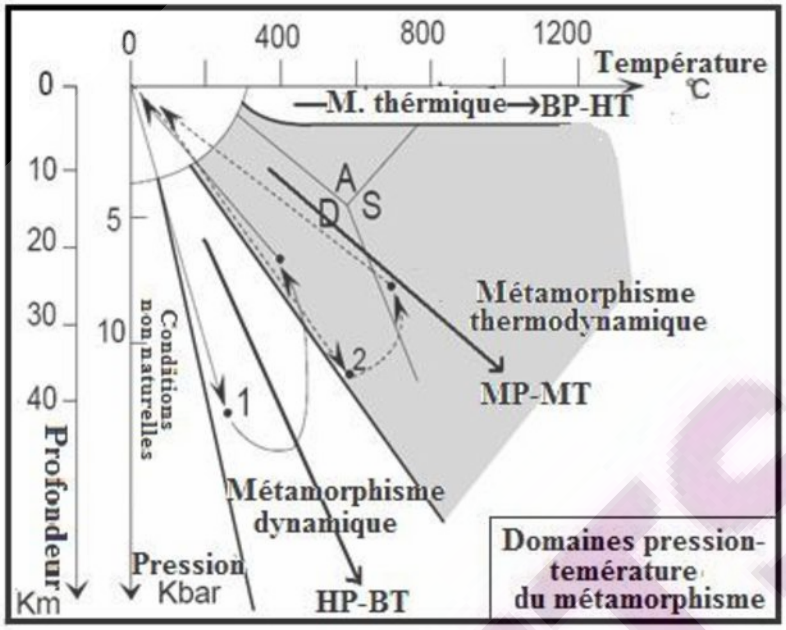
augmentation entraine la transformation des roches de la lithosphère océanique (basalte et gabbro) en schiste bleu puis éclogite (courbe 1) caractérisée par le grenat et la jadéite qui se forment dans des conditions de forte pression et de moyenne température. Dans ce cas on parle de métamorphisme dynamique.

2- Le métamorphisme dans les zones de collision (métamorphisme thermodynamique) :

Dans les zones de collision les roches lithosphériques continentales (et les roches du complexe ophiolitique) subissent une forte augmentation de la pression et de la température, elles se transforment en schiste vert puis en amphibolites (Courbe 2) caractérisées par le disthène ou la sillimanite qui se forment dans des conditions de pression et de température moyennes à fortes. Dans ce cas on parle de métamorphisme thermodynamique.

www.students.ma

www.students.ma



Remarque : Le métamorphisme thermique à basse pression et haute température correspond au métamorphisme de contact que subissent des roches lors du passage d'un magma proche. Ce métamorphisme caractérise la mise en place de granite intrusif.

www.students.ma

www.students.ma

Chapitre 3 : La granitisation et sa relation avec le métamorphisme

Le granite et les roches granitiques constituent la majeure partie de la croûte continentale. **Le granite est une roche plutonique issue d'un refroidissement lent d'un magma en profondeur, ce qui lui confère sa texture grenue à grands cristaux.** Le granite est une roche très solide de couleur claire (gris, blanc, rose), on distingue :

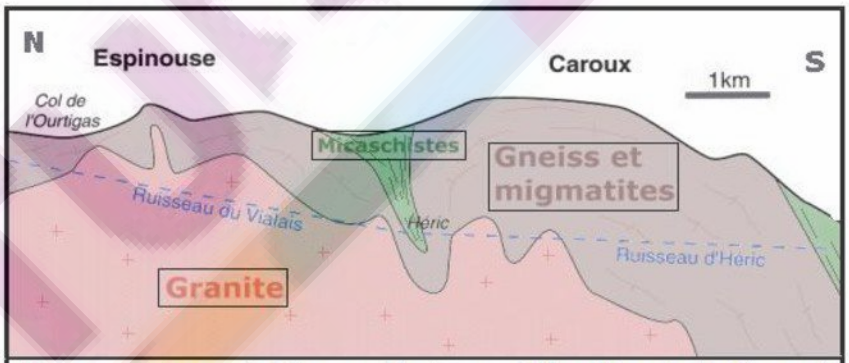
- **Un granite d'anatexie :** plutons liés à un métamorphisme régional formés suite à une augmentation de la pression et de la température.
- **Un granite intrusif :** plutons résultant d'une intrusion magmatique dans des terrains préexistants.

I- Origine et mise en place du granite d'anatexie :

1- Mise en évidence du lien entre les roches métamorphiques et le granite :

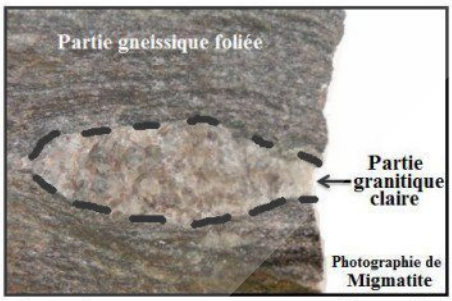
L'anatexie est le processus par lequel les roches métamorphiques, soumises à une augmentation de pression et de température, fondent totalement ou partiellement.

On peut mettre en évidence l'anatexie par l'expérience de soumettre une roche argileuse à une pression hydrostatique de 2 kbar et une température comprise entre 700 et 850°C, ce qui équivaut à une profondeur de 7 à 8 km. On observe alors, la formation d'un liquide issu de la fusion partielle, qui donne après refroidissement une roche granitique.



Coupe au niveau du Caroux-Espinouse (Massif central - France)

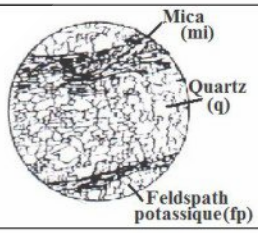
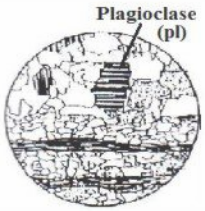
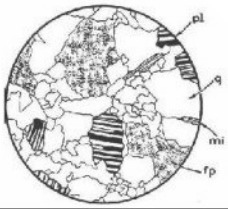
Dans les zones présentant des roches métamorphiques et la formation de granite, on observe la présence d'une roche intermédiaire nommée **migmatite**.



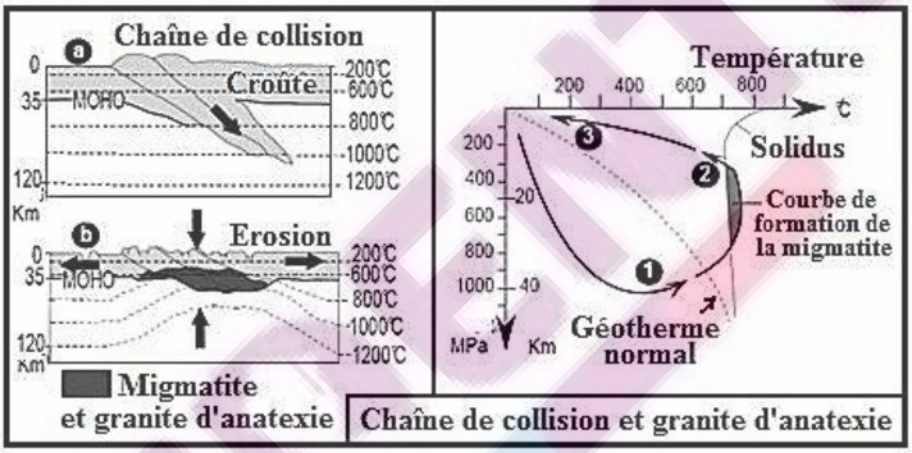
On y trouve une partie gneissique avec une alternance de lits sombres riches en micas noirs et de lits clairs (foliation) mais aussi des parties claires à texture grenue formées de quartz et de feldspaths similaire à la composition granitique.

www.students.ma

www.students.ma

Nom de la roche	Gneiss	Migmatite	Granite
Lame mince			
Etat à la formation	Solide	Solide + Liquide	Liquide
Structure	Foliée à minéraux orientés	Zone foliée et zone grenue	Grenue

2- Mise en place du granite d'anatexie dans les zones 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 elles subissent des conditions de pression et de température croissante (figure a). Cet enfouissement est lié au raccourcissement et à l'épaississement de la croûte continentale qui forme une racine en profondeur avec des reliefs en surface.

Les roches d'origine se transforment et deviennent des roches métamorphiques, aboutissant à la formation de gneiss (partie 1 de la courbe).

Sous l'effet de l'isostasie par poussée de l'asthénosphère, ces roches vont remonter vers la surface, la pression diminue mais la température reste élevée (partie 2 de la courbe). Ces conditions conduisent à la fusion partielle et à la formation du magma anatectique (Figure b).

Progressivement le magma refroidit sur place, une partie du magma reste liée au gneiss pour former la migmatite, et une autre partie forme du granite. Après l'érosion, ses roche affleurent en surface (partie 3 de la courbe).

II- le granite intrusif et métamorphisme de contact :

www.students.ma

www.students.ma

1- Relation du granite intrusif avec les roches voisines :

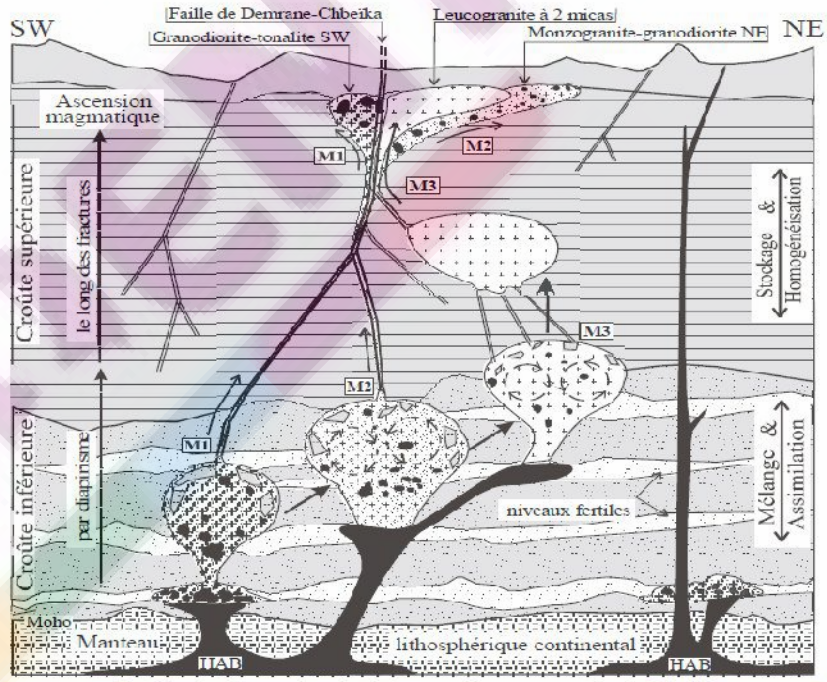
Le granit intrusif ce distingue du granite d'anatexie par son étendu moins large, il est généralement sous forme d'un massif. Autour de ce massif, se développe une bande limitée de roches métamorphique formant une auréole de métamorphisme de contact.

➲ Cas du granite de Zaër :

Le granite de Zaër est un pluton intrusif dans les terrains sédimentaires de l'Ordovicien et du Dévonien de l'ère primaire (paléozoïque) qui l'entourent. Avec une extension maximale de 40 km sur 12 km, il s'agit du plus grand pluton de ce type au Maroc. Autour du granite, l'intrusion a provoqué le développement d'une large auréole de métamorphisme de contact dans les terrains sédimentaires du paléozoïque.

- Un scénario de mise en place du granite de Zaër :

1. La fusion partielle du manteau est à l'origine d'un magma de composition de gabbro.
2. Ce magma s'injecte dans la croûte entrainant sa fusion partielle.
3. Les produits de ces deux fusions se mélangent prenant une composition de granodiorite. Dans le magma, l'homogénéisation entre les éléments de différentes origines se fait progressivement au cours du temps.



Modèle de pétrogenèse du pluton granitique composite de Zaër (1)

4. La remontée du magma se fait à travers des cassures de la croûte matérialisée en surface par la faille de Demrane-Chbeïka qui correspond à la zone d'injection du magma.
5. Un premier pluton (M1) se met en place en deux temps. Plus vite dans la partie sud-Ouest (SW) sans permettre une bonne homogénéisation du magma qui conserve de nombreuses enclaves bien différenciées. Un peu plus tard dans la partie nord-est (NE) à partir d'un magma mieux homogénéisé et donc moins riche en enclaves différenciées (M2).

www.students.ma

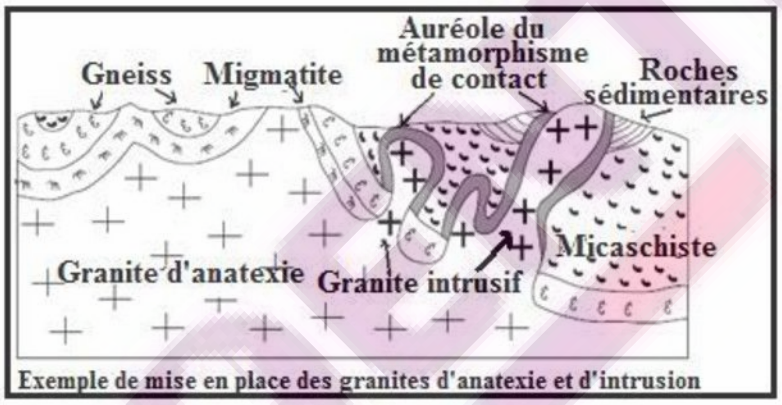
www.students.ma

6. bien plus tard, après un long stockage du magma, le second pluton de nature leucogranitique (M3 à dominance quartz et feldspaths clairs) se met lui aussi en place, il ne contient pratiquement plus d'enclave et le pluton est très homogène.

2- Granit intrusif et métamorphisme de contact :

Le granite intrusif se met en place suite à la migration vers la surface d'un magma sous formes d'intrusions qui traversent les couches encaissantes (sédimentaires) et donnent, après refroidissement, le granite intrusif.

Lors de la mise en place des plutons granitiques, les roches encaissantes sont soumises à une élévation de température qui affecte leur structure. Ce type de métamorphisme de basse pression et haute température et appelé métamorphisme de contact.



Exemple de mise en place des granites d'anatexie et d'intrusion

➲ **Remarque :**

On observe dans le granite d'intrusion des enclaves. Ce sont des inclusion (xenolith), que l'on interprète comme étant des fragments du manteau ou de la croûte profonde, arrachés et emportés vers la surface par la montée du magma.

Exemples : Enclave de roche encaissante (schiste, calcaire, ou autre) dans un granite en bordure d'un massif intrusif.



Photographie : Damien Mollex

On peut aussi observer la formation de filons par remplissage d'une fracture recoupant des roches de nature variée (roches encaissantes). Le matériel de ce remplissage peut avoir été déposé par des circulations de fluides hydrothermaux (filons hydrothermaux) ou être de nature magmatique ou sédimentaire.

www.students.ma