

Thème 1-B - Le domaine continental et sa dynamique

Classe : Terminales S

Durée envisagée : 6 semaines

Nombre de TP : 6

En rouge : Bilans à faire noter aux élèves

En bleu : Activités pratiques

En vert : Problématique et hypothèses

Chapitre 1 - La caractérisation du domaine continental

Dans les années 1920, Wegener a identifié une caractéristique spécifique de la Terre appelée **dualité altitudinale** : il y a 2 groupes de terrains d'altitude très distinctes : le **domaine océanique** présentant une altitude de -4000 m et le **domaine continental** présentant une altitude moyenne de 100 m. Cette observation implique que le domaine continental est nettement distinct du domaine océanique.

Problématique : Quelles sont les particularités du domaine continental par rapport au domaine océanique ?

TP 1 : La caractérisation du domaine continental

- **Observation initiale** : Altitudes bimodales de Wegener → Comparaison des domaines océaniques (vu en 1èreS) et du domaine continental.

- **Objectif** : Expliquer l'origine de la différence d'altitude entre la LO et la LC

- **Matériel** :

- Google Earth/Mesure volume roche
- Logiciel Excel et Radiochronologie
- Granite, éprouvette, balance de précision (densité)

Capacités et attitudes :

- Utiliser un logiciel de données (Google Earth)
- Evaluer la profondeur du Moho
- Utiliser un tableau (Excel)
- Réaliser une manipulation d'après un protocole (densité des roches)
- Calculer la densité d'une roche
- Utiliser un logiciel de modélisation
- Déterminer un âge en utilisant la méthode de la droite isochrone.

I. La dualité des domaines continentaux et océaniques

1. Caractérisation du domaine continental à l'affleurement

A l'affleurement, le domaine continental est généralement constitué de roches sédimentaires (calcaires, grès, marnes ...). Néanmoins, ces roches ne constituent que la partie superficielle de la croûte continentale. Sous les sédiments, se trouve le socle continental. Celui-ci est constitué en majorité de granite mais également de gneiss et de migmatite. Ces roches sont riches en Silice (SiO₂) et en Aluminium (Al).

Le granite est une roche magmatique plutonique (formée en profondeur) présentant une structure holocristalline. Elle est composée de Quartz (Qz), Feldspath (Fd) et Biotite (Mica). La densité du granite est d'environ 2,7 (celle des basaltes et des gabbros autour de 3). Les gneiss sont des roches qui ont été transformées à l'état solide : ce sont des roches métamorphiques.

2. Caractérisation géophysique du domaine continental

Pour identifier la structuration verticale et l'épaisseur des couches du domaine continental, on fait appel à la sismique réflexion (voir 1ereS). Ces techniques montrent que la Lithosphère Continentale (LC) est composée

- d'une croûte continentale d'une épaisseur de 30 km en moyenne
- d'une discontinuité majeure : le moho qui sépare la croûte du manteau sous-jacent.
- d'un manteau lithosphérique (ML) présent entre 30 et 100km de profondeur. En dessous, on trouve le manteau asthénosphérique (MA) avec notamment la LVZ.

3. Variabilité du domaine continental

L'épaisseur de la croûte continentale et la profondeur du Moho sont variables. La croûte est plus épaisse dans les chaînes de montagne (épaississement crustal - 70km) et plus fine dans les zones d'effondrement (fossé rhénan - 25 km). L'épaississement présent sous une chaîne de montagnes est appelée racine crustale.

4. L'isostasie

C'est l'analyse de l'intensité de la pesanteur terrestre qui a permis d'identifier l'isostasie. En effet, on a constaté que le champ de pesanteur terrestre présentait de faibles anomalies qui peuvent être mesurées (gravimétrie). Ainsi, on a des anomalies (anomalies de Bouguer) négatives au niveau des chaînes de montagnes et des anomalies positives dans les zones amincies.

Ces anomalies gravimétriques conduisent à penser que l'excès ou le déficit de croûte est compensé par un enfoncement ou une remontée de matériel plus dense (manteau asthénosphérique). La lithosphère est donc en équilibre sur l'asthénosphère. Ainsi, la lithosphère peut être affectée de mouvement verticaux en fonction des masses en présence (glaciers, chaînes de montagnes ...) : c'est l'isostasie. En effet, la densité de la lithosphère rigide est inférieure à celle de l'asthénosphère ductile. C'est le principe de l'isostasie.

Il existe 2 modèles principaux d'isostasie :

- Le modèle d'Airy qui est adapté à la lithosphère continentale
- Le modèle de Pratt qui est plus adapté à la lithosphère océanique.

B Des modèles pour comprendre l'isostasie

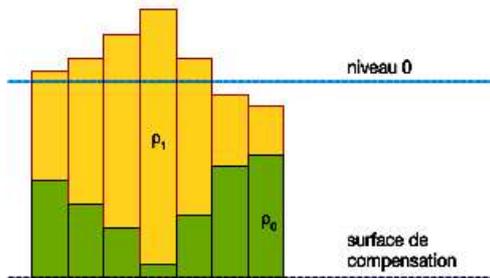
Pour rendre compte des anomalies gravimétriques, les spécialistes ont admis qu'à une certaine profondeur, la lithosphère est soumise à une pression constante qui ne dépend pas des reliefs superficiels. À cette profondeur dite **surface de compensation**, la lithosphère est en équilibre « isostatique ». Cela signifie que la masse de chaque colonne rocheuse surplombant cette surface est la même en tout point.

Plusieurs modèles permettent d'illustrer cette théorie.

• Le modèle d'Airy

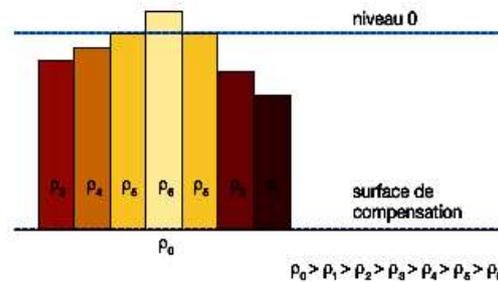
Ce modèle postule que la **masse volumique** de la croûte est constante et que cette dernière repose sur des roches de masse volumique plus importante ($\rho_0 > \rho_1$).

Ce modèle est bien adapté à la lithosphère continentale. En effet, les études sismiques révèlent l'existence de « racines crustales » sous les reliefs montagneux.



• Le modèle de Pratt

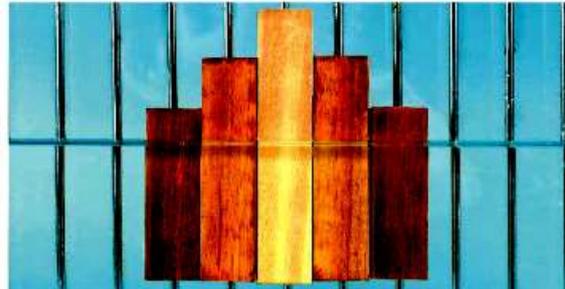
Dans ce modèle, les variations d'altitude s'expliquent par des différences latérales de masses volumiques. Plus celle-ci est importante, plus la hauteur de la colonne de roche est faible. Ce modèle est assez bien adapté à la lithosphère océanique : en s'éloignant de la dorsale océanique, elle se refroidit et sa densité augmente. Les fonds océaniques deviennent alors plus profonds.



• Réaliser des modèles analogiques



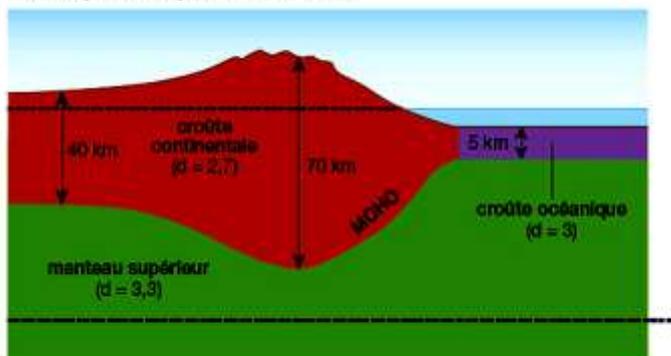
Une série de tasseaux d'un même bois, percés dans le sens de la longueur, sont enfilés sur des tiges métalliques le long desquelles ils peuvent glisser. L'ensemble est placé dans un aquarium contenant de l'eau.



Dans ce second montage (*ci-dessus*), comparable au premier, les tasseaux sont constitués de bois de différentes **densités**. Leur longueur est telle que l'extrémité inférieure des tasseaux est peu près au même niveau.

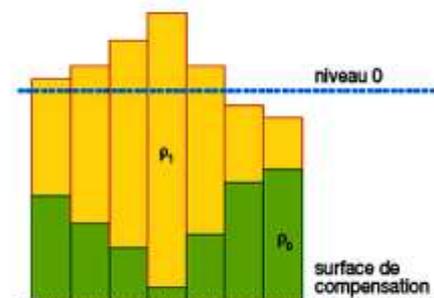
Épaisseur et densité de la croûte continentale

• Une croûte continentale moins dense que la croûte océanique et d'épaisseur variable



La croûte continentale est plus épaisse que la croûte océanique. Elle s'épaissit encore au niveau des chaînes de montagnes (racine crustale).

• La notion d'isostasie



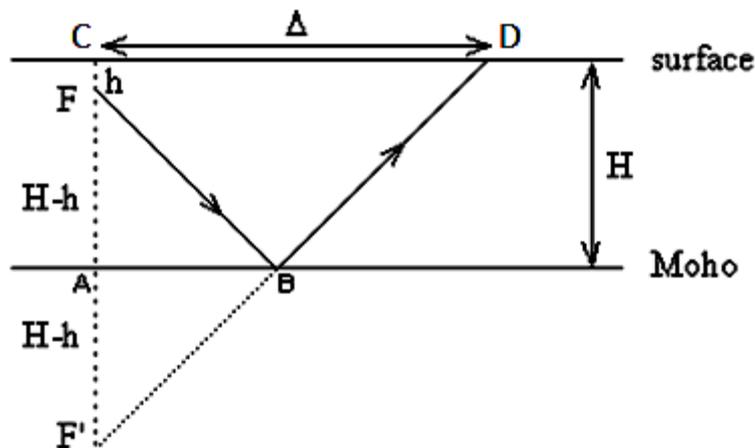
Au-dessus d'une surface profonde dite de compensation, la colonne de roches lithosphériques a partout la même masse. À ce niveau, la lithosphère est dite en **équilibre isostatique**.

Exercice : Calcul de la profondeur du Moho sous une chaîne de montagnes

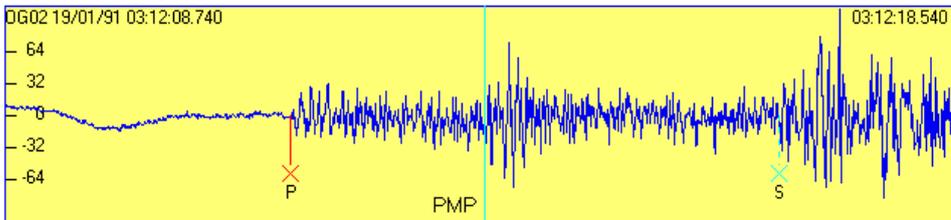
On sait que le MOHO est une discontinuité qui sépare la croûte continentale (CC) du manteau lithosphérique (ML), généralement située à 30 km sous la croûte continentale. On cherche identifier sa profondeur dans la chaîne des Alpes. Afin de réaliser ce travail nous allons étudier un sismogramme réalisé à partir des ondes issues d'un séisme qui a eu lieu le 19/01/1991 à 63,3 km d'Annemasse.

Document 1 : Paramètres utilisés et identification de la géométrie du trajet des ondes P et PMP.

- Soit H l'épaisseur de la croûte continentale dans la zone étudiée.
- Soit F le foyer du séisme (profondeur h de 11 km) et Δ la distance épacentrale (63,3km)
- Soit C l'épicentre du séisme (projection orthogonale de F à la surface)
- Soit B le point de réflexion des ondes P sur le Moho (ondes PMP réfléchies sur le Moho)
- Soit D le point d'arrivée des ondes réfléchies (localisation du sismomètre)
- La vitesse moyenne des ondes P dans la croûte sous les Alpes est de $6,25 \text{ km.s}^{-1}$.



Document 2 : Etude du sismogramme relevé au point D.



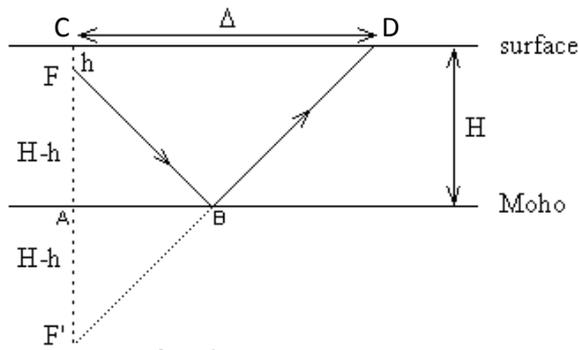
Arrivée des ondes P à 3 h 12 min 15,580 s.

Arrivée des ondes PMP à 3 h 12 min 18,540 s.

Arrivée des ondes S à 3 h 12 min 23,080 s.

QUESTIONS :

1. Employez le théorème de Pythagore afin d'identifier la distance FD correspondant au trajet direct des ondes P. En déduire le temps de trajet direct des ondes P (t_1). Conserver l'expression littérale de t_1 .
2. Employez le théorème de Pythagore afin d'identifier la distance $FB + BD$ correspondant au trajet réfléchi des ondes PMP. En déduire le temps de trajet des ondes PMP réfléchies sur le Moho (t_2). Conserver l'expression littérale de t_2 .
3. A partir des 2 premières questions, déterminez l'expression littérale de $\Delta t = t_2 - t_1$. De quel paramètre dépend la valeur de Δt ?
4. En vous aidant des indications précédentes, déterminez l'expression littérale de H et en déduire la profondeur du Moho sous la croûte continentale dans la zone étudiée.
5. Cette valeur est-elle conforme à ce qui était attendu ? Comment l'expliquer ?



$$\delta t = \frac{\sqrt{(2H-h)^2 + \Delta^2}}{V} - \frac{\sqrt{h^2 + \Delta^2}}{V}$$

$$(2H-h)^2 = (V \cdot \delta t + \sqrt{h^2 + \Delta^2})^2 - \Delta^2$$

$$H = \frac{1}{2} \left[h + \sqrt{(V \cdot \delta t + \sqrt{h^2 + \Delta^2})^2 - \Delta^2} \right]$$

δt différence de temps entre l'onde P directe et l'onde PMP et V la vitesse moyenne des ondes P dans la croûte.

H = 36 km

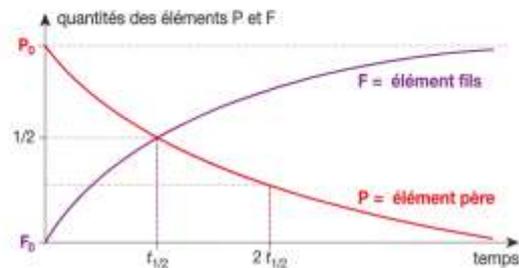
II. L'âge du domaine continental

1- Les méthodes de datation (p152-153)

La **radiochronologie** permet de dater la croûte continentale. Lors de la cristallisation d'un magma, les minéraux incorporent des éléments Rb et Sr en petite quantité. Dans la roche obtenue, le ^{87}Rb se désintègre en ^{87}Sr au cours du temps selon une loi exponentielle décroissante.

A Le principe du géochronomètre rubidium/strontium

- Depuis la découverte de la radioactivité en 1896 par Becquerel, on a mis en évidence l'existence de nombreux éléments chimiques possédant des **isotopes** naturels radioactifs, qui, en se désintégrant spontanément, émettent divers rayonnements et se transforment en éléments stables. On peut doser la quantité des différents isotopes dans un échantillon à l'aide d'un spectromètre de masse qui sépare les isotopes.
- En se désintégrant, un élément radioactif « père » se transforme spontanément en un élément « fils ». C'est ainsi que le rubidium 87 (^{87}Rb) se transforme en strontium 87 (^{87}Sr).
- La désintégration de tout élément radioactif constitue une véritable « horloge » car elle se fait en suivant une loi mathématique immuable de **décroissance exponentielle** en fonction du temps : quelle que soit la quantité d'élément « père »



présente au départ, il faut toujours le même temps pour que cette quantité soit réduite de moitié par désintégration. Cette durée caractéristique d'un élément est sa **demi-vie** ($t_{1/2}$).

Doc. 1 Le principe physique des chronomètres géologiques.

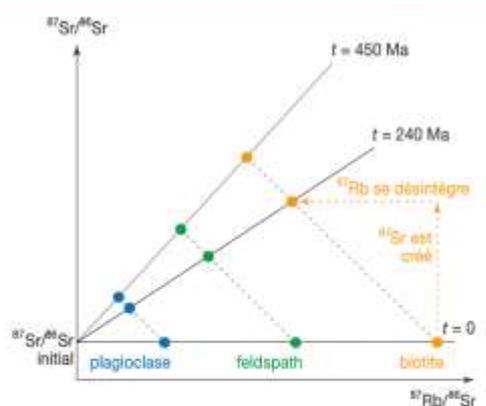
Au moment de la cristallisation d'une roche, les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ sont identiques (rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ du magma). Néanmoins, certains minéraux sont plus riches en ^{87}Rb (cas de la biotite) et les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ sont différents. Dès que la roche est formée, le ^{87}Rb se désintègre : le $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ rapport commence à diminuer. Il se désintègre en ^{87}Sr : le $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmente. Les points donnés par les rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ restent alignés et forment une **droite isochrone**. Cette droite présente une pente d'autant plus importante que le temps est important.

Ainsi, en mesurant la quantité de ^{87}Rb et ^{87}Sr dans les différents minéraux de la roche, on identifie la droite isochrone (et sa pente) et on peut alors déterminer l'âge de la roche : on parle alors de **géochronomètre**.

- Rubidium et strontium sont des éléments présents dans les minéraux des roches de la croûte continentale. Le strontium présente deux isotopes stables : ^{87}Sr et ^{86}Sr . Le ^{87}Rb , quant à lui, est radioactif et se désintègre en ^{87}Sr . Au cours du temps, la quantité initiale de ^{86}Sr reste donc constante, tandis que celle de ^{87}Rb diminue au profit de ^{87}Sr , qui, elle, augmente.

Au moment de la cristallisation d'une roche, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est le même pour tous les minéraux d'une roche : en effet, les minéraux incorporent la même proportion de ces deux isotopes du même élément (la proportion qui est présente dans le magma). En revanche, certains minéraux sont plus riches en ^{87}Rb : le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ n'est pas le même pour tous les minéraux. C'est ce que traduit la droite initiale ($t = 0$) du **graphique ci-contre**, parallèle à l'axe des abscisses.

- Au cours du temps, ^{87}Rb diminue au profit de ^{87}Sr . Donc le rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ diminue et le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ augmente. Cependant, cette variation est d'autant plus importante que le minéral est riche en Rb. À un temps t , on obtient une droite avec un coefficient directeur, a , non nul. Une telle droite est dite **droite isochrone** car elle relie des points correspondant à des minéraux de même âge. Il est facile de comprendre que plus le temps passe, plus le coefficient directeur de cette droite est important, puisqu'il y aura encore moins de ^{87}Rb et plus de ^{87}Sr .



Le coefficient directeur de la droite est donc indicateur du temps écoulé depuis la **cristallisation** de la roche.

On peut démontrer mathématiquement que :

$$t = \ln(a + 1) / \lambda$$

avec λ : constante de désintégration (propre à l'élément)

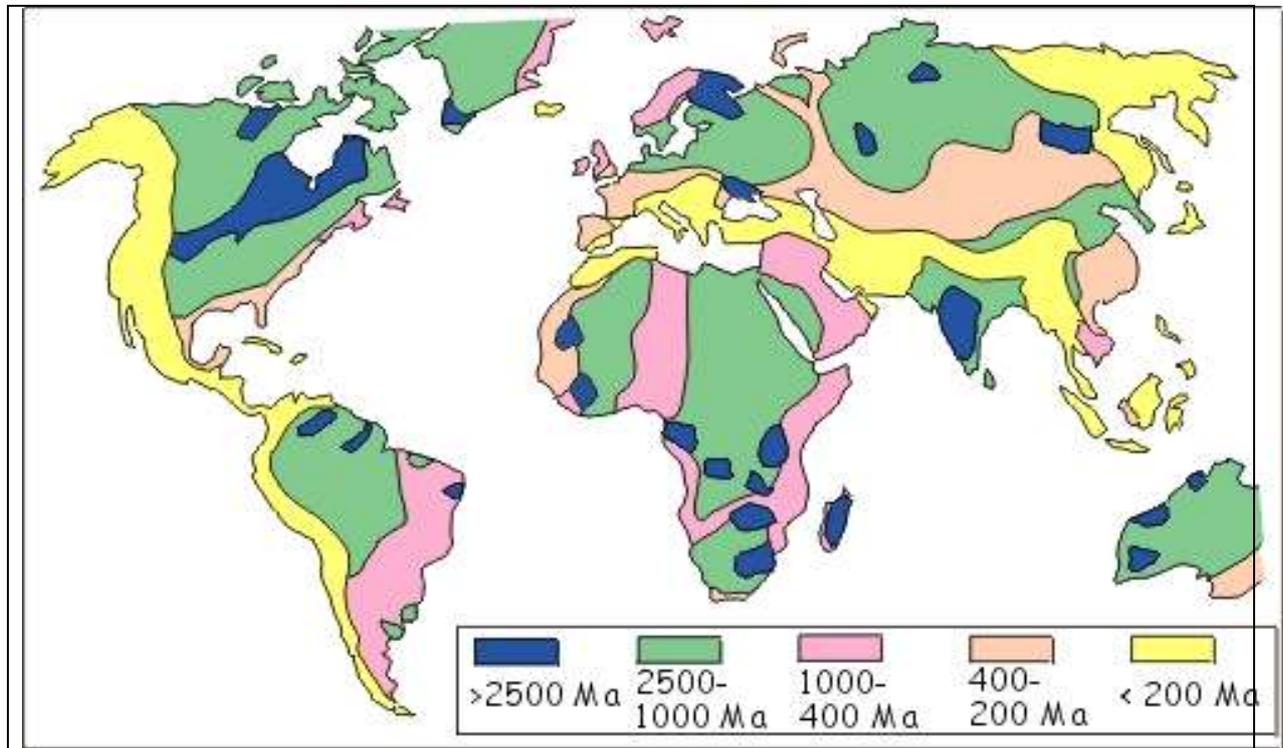
$$\begin{aligned} &^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr} \\ \text{Demi-vie} &= 48,8 \cdot 10^9 \text{ ans} \\ \lambda &= 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1} \end{aligned}$$

Doc. 2 La méthode de la droite isochrone.

2- Les âges de la lithosphère

Les âges de la croûte continentale sont variés et peuvent atteindre des valeurs de l'ordre de 4Ga (Formation Acasta dans la région du grand Lac des Esclaves au Canada).

L'âge de la croûte océanique est variable et augmente avec l'éloignement à la dorsale mais ne dépasse pas jamais 200Ma.



III. Les marqueurs de l'épaississement de la croûte continentale

TP 2 : Les indices tectoniques et pétrographiques de l'épaississement crustal.

Objectif :

- déterminer les indices tectoniques (failles, plis, nappes) et pétrographique (granite, gneiss, migmatites) permettant d'affirmer que la LC résulte d'un épaississement.

Matériel : Roches/Microscope/Documents

Capacités et attitudes :

- Recenser, extraire et organiser des données de terrain
- Repérer, à différentes échelles, des indices simples de modifications tectoniques ou pétrographiques du raccourcissement et de l'empilement
- Utiliser un microscope polarisant
- Réaliser un schéma

1- Des marqueurs tectoniques

L'épaisseur de la croûte résulte d'un épaississement lié à un raccourcissement et un empilement. On peut mettre en évidence des éléments par un modèle (plâtre) et on retrouve de nombreux indices tectoniques dans les paysages des zones montagneuses récentes (Alpes, Pyrénées ...).

a- Les failles

Les failles de type inverses sont un indice de déformation cassante des roches. Elles traduisent un raccourcissement local. (NB : les failles normales sont associées à la divergence).

b- Les plis

Les plis affectent les séries (couches) sédimentaires et témoignent d'une déformation souple.

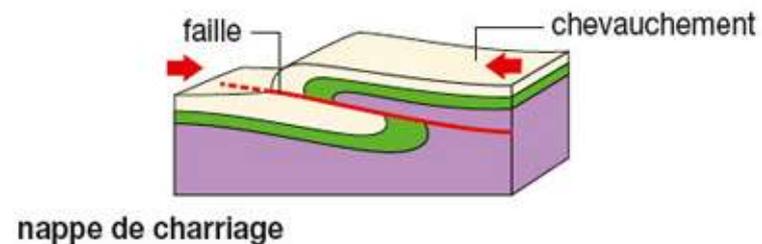
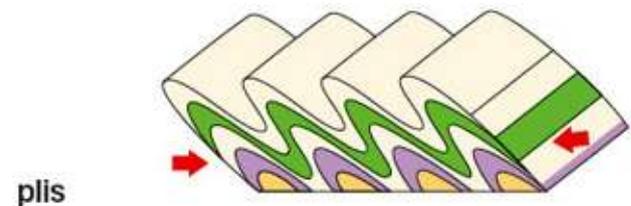
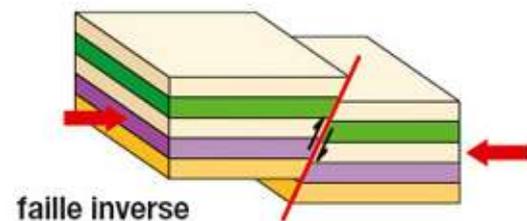
c- Les chevauchements

Les chevauchements et nappes de charriage. Au niveau de certaines failles inverses, les contraintes sont telles que les blocs finissent par se superposer : c'est un chevauchement. La formation de chevauchement d'une taille de l'ordre du kilomètre correspond à une nappe de charriage.

NB : Les plis et les nappes sont souvent mis en évidence par des contacts anormaux (discontinuités) dans les terrains.

NB2 : Plusieurs nappes/chevauchements peuvent se produire dans une même zone. On parlera alors d'écaillés.

- Des indices tectoniques, signes d'un raccourcissement de la croûte



2. Des marqueurs pétrographiques

a- Les gneiss

Le gneiss est une roche métamorphique contenant du quartz, du mica, des feldspaths (plagioclases) et parfois du feldspath alcalin, tous suffisamment gros pour être identifiés à l'œil nu. Le gneiss est caractérisé par l'alternance de petits lits clairs et de fins niveaux plus sombres : on parle alors de litage (gneiss = roche litée). Ce litage est lié à des contraintes de pression qui ont réorganisé les minéraux. On constate souvent qu'une déformation des minéraux se surimpose au litage. Cette déformation est appelée schistosité ou foliation. Dans le cas du gneiss, litage et schistosité sont confondues.

b- Les migmatites

Dans certains cas, l'enfouissement est tel que l'on peut observer des traces de fusion partielle (anatexie). C'est le cas de la migmatite qui est le résultat de la fusion partielle d'un gneiss. Le liquide fondu (*néosome*) s'apparente à un granite et il est souvent composé d'une partie claire (*leucosome* : *feldspaths*) et d'une partie sombre (*mélanosome* : *biotite, grenat et amphiboles*). Les composants restants (*paléosome*) sont généralement sombres.

3. L'importance du métamorphisme

Le métamorphisme est une modification de la structure et de la composition d'une roche par une modification des conditions de pression et de température à l'état solide. Ces modifications peuvent être caractérisées par

- une orientation de leurs minéraux due à un étirement
- des transformations minéralogiques à l'état solide en fonction des conditions de pression et de température.

La présence de sillimanite (ou de disthène) dans les gneiss atteste de l'augmentation de pression et de température subie par les roches et sont donc un indice de l'épaississement crustal (et donc de la collision).

NB : Le gneiss est une roche qui peut provenir du granite (*orthogneiss*). Il peut également provenir du métamorphisme de sédiments argileux (pélites) qui se transforment d'abord en schistes (présence de séricite), puis micaschistes (présence de grenat) et enfin en gneiss (*paragneiss*).

Conclusion :

Le domaine continental est constitué d'une lithosphère continentale (CC + ML) caractérisée dans la croûte par le granite dont les âges sont très variables. La lithosphère continentale est variable dans son épaisseur suite aux forces de convergence qui produisent différents objets tectoniques (failles inverses, plis, chevauchement/charriage) ou métamorphiques (gneiss à sillimanite).

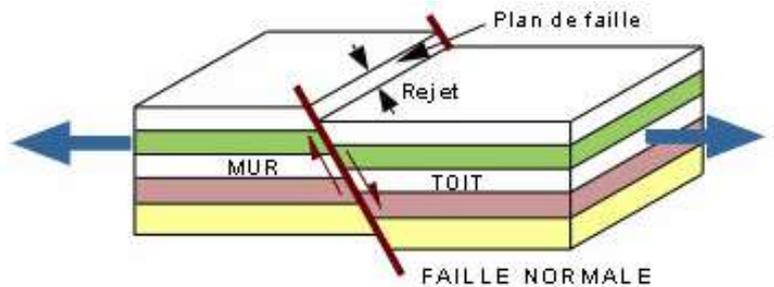
FICHE TECTONIQUE : Objets tectoniques courants (DIVERGENCE)

- Faille : désigne une cassure de la roche, ce qui se repère à l'existence d'un décalage entre les deux compartiments que sépare la faille. On distingue fondamentalement trois sortes de failles, selon le type de décalage des deux compartiments :

a- failles normales (ou extensives) :

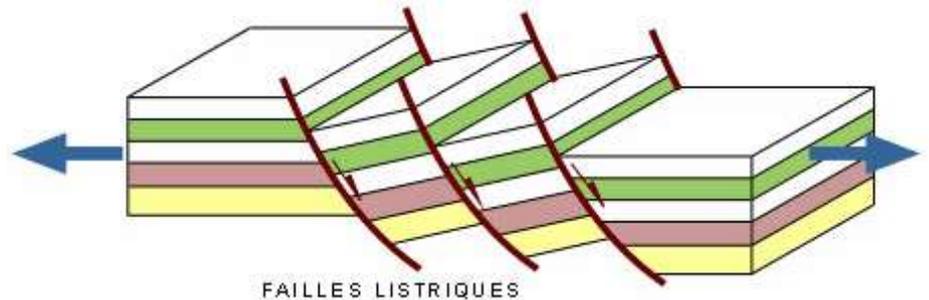
Ce sont des cassures résultant d'une extension horizontale et caractérisées par l'ouverture d'un hiatus entre les compartiments initialement contigus d'une même tranche de couches.

Le côté de la faille où se trouve de compartiment supérieur (où le miroir tend à se dénuder du fait du mouvement extensif) correspond au sens de "regard" d'une faille normale.



b- failles listriques :

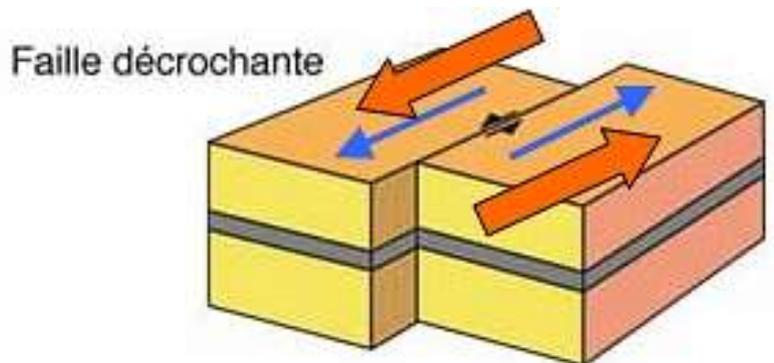
Ce sont des failles normales se produisant très souvent au niveau des dorsales. Le miroir de faille est courbé et produit des blocs basculés.



c- failles de décrochement (ou coulissantes) :

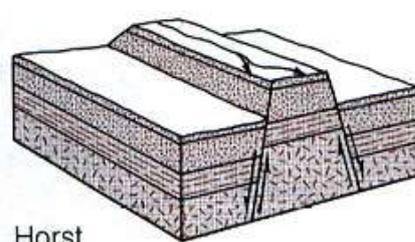
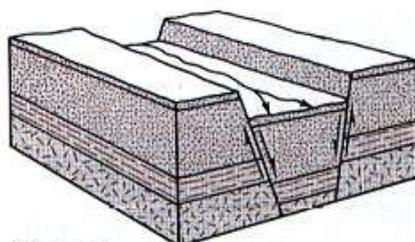
Ce sont des déchirures le long desquelles les mouvements sont des coulissements horizontaux (ou ne comportaient qu'un décalage vertical faible en regard du décalage horizontal). Les surfaces de cassures des failles de décrochement sont à peu près verticales. Leurs miroirs sont porteurs de stries ou cannelures horizontales.

Le mouvement est de sens dextre (ou "horaire") si le pivotement que subirait un objet pris dans le plan de cassure se fait dans le sens des aiguilles d'une montre (vu de dessus) ; il est dit sénestre (ou "anti-horaire") dans le cas contraire (cas de la figure c).



d- Horst et Graben

Ces deux termes désignent respectivement des blocs soulevés et des fossés effondrés, créés par la combinaison de failles normales conjuguées. Ces termes ne comportent aucune connotation de dimension.

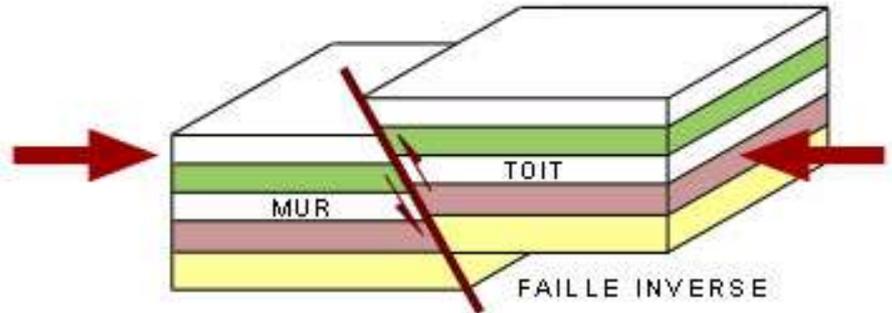


FICHE TECTONIQUE : Objets tectoniques courants (CONVERGENCE)

e- failles inverses (ou compressives):

Ce sont des cassures qui réalisent un raccourcissement en amenant en superposition l'un sur l'autre deux compartiments initialement contigus d'une même tranche de couches (on dit donc qu'il y a "chevauchement" des deux compartiments).

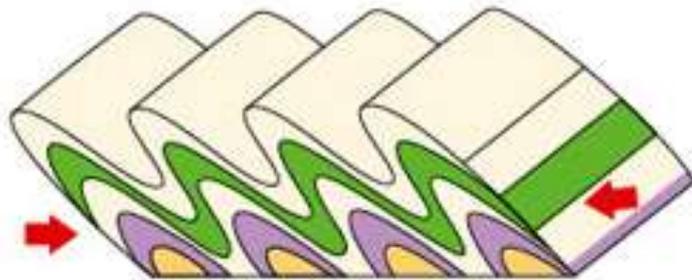
Le sens dans lequel se fait le glissement de la tranche supérieure par rapport à l'inférieure est appelé la "vergence" du chevauchement (c'est l'équivalent du déversement des plis).



f- Plis :

Les plis affectent les séries (couches) sédimentaires et témoignent d'une déformation souple. Le pli est dit anticlinal lorsqu'il est convexe vers le haut (couches les plus âgées au centre, ou en forme de A). Le pli est synclinal s'il est convexe vers le bas (couches les plus jeunes au centre, ou en forme de V ou de U).

plis

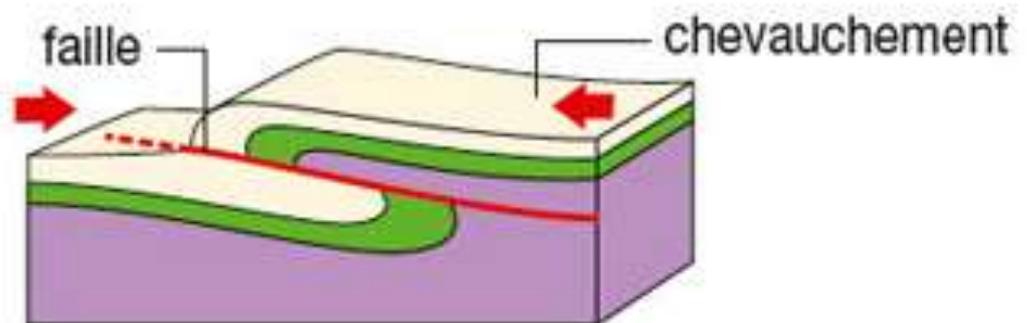


g- Chevauchements et nappes de charriage :

Au niveau de certaines failles inverses, les contraintes sont telles que les blocs finissent par se superposer : c'est un chevauchement. La formation de chevauchement d'une taille de l'ordre du kilomètre correspond à une nappe de charriage.

NB : Les plis et les nappes sont souvent mis en évidence par des contacts anormaux (discontinuités) dans les terrains.

NB2 : Plusieurs nappes/chevauchements peuvent se produire dans une même zone. On parlera alors d'écaillés.



nappe de charriage