

III. Géodynamique interne

La géodynamique interne concerne la dynamique du globe terrestre solide, de sa surface à son centre. On s'intéresse donc aux profondeurs de la Terre.

III.1. Sismologie

1.1. Introduction

La **sismologie** est la science qui étudie les **séismes** ou **tremblements de Terre** (le mot sismologie vient du grec seismos). Il se produit de très nombreux séismes tous les jours mais la plupart ne sont pas ressentis par les humaines. Environ 100000 séismes sont enregistrés chaque année sur la planète. Les plus puissants d'entre eux comptent parmi les catastrophes naturelles les destructrices.

1.2. Caractères généraux des séismes

- **Définition d'un séisme**

Un **séisme** est un ébranlement brutal du sol provoqué par l'arrivée d'ondes créées en profondeur à la suite d'une rupture et d'un mouvement brusque de deux compartiments lithosphériques. La conséquence est une libération instantanée d'énergie (figure.01).

Le **foyer** du séisme (**hypocentre**) est le point où débute le mouvement, l'**épïcéntré** est sa projection verticale sur la surface terrestre et correspond au lieu où la secousse est maximale. La rupture se fait par **formation d'une faille** ou réactivation d'une faille ancienne.

Un tremblement de Terre peut être **superficiel** (foyer à moins de 100 Km de profondeurs), **intermédiaire** (de 100 à 300 Km) ou **profond** (plus de 300 Km). Ce sont les tremblements de Terre superficiels qui sont les plus dangereux.

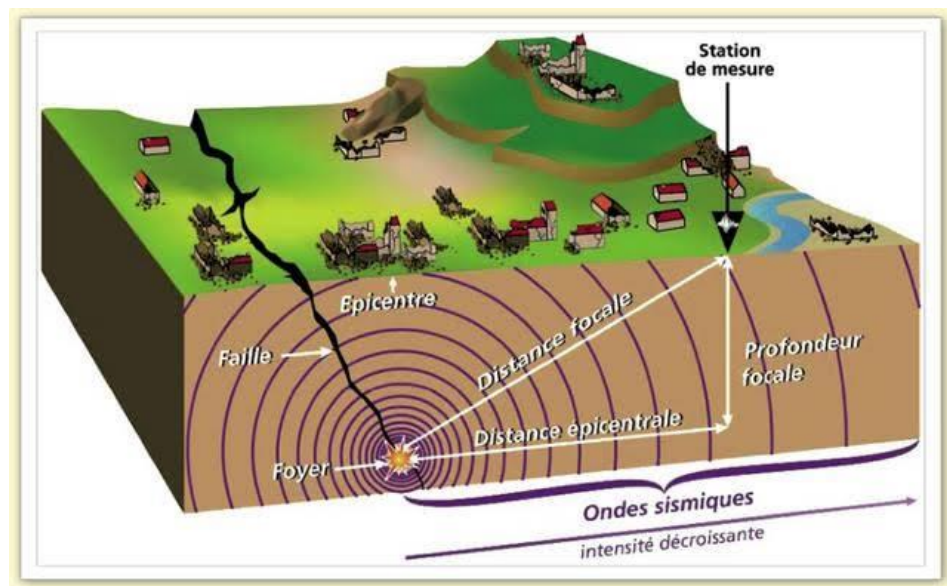


Figure.01. Caractéristiques générales d'un séisme

- **Intensité et magnitude**

Depuis longtemps, les scientifiques ont essayé de classer les tremblements de Terre, ils ont donc défini plusieurs échelles afin de caractériser les séismes.

Les échelles d'intensité

Elles se fondent sur l'observation des effets et de conséquences du séisme sur des indicateurs communs en un lieu donné (effets sur les personnes, les objets, les mobiliers, les constructions,

l'environnement). L'intensité d'un séisme n'est pas une mesure fiable, car elle dépend non seulement de la distance à l'épicentre, mais également du type sol, des constructions, de l'heure de séisme.

Les échelles d'intensité les plus connues sont celles de Mercalli (abandonnée en 1964) et l'échelle MSK (à partir de 1964) (tableau.01). Ces deux échelles comprennent 12 degrés, notés de I (intensité la plus faible) à XII (intensité la plus forte).

L'échelle de magnitude (Richter)

La **puissance** d'un tremblement de Terre peut être quantifiée par sa **magnitude**, notion introduite en 1935 par le sismologue Charles Francis **Richter** (tableau.02). La magnitude se calcule à partir des différents types d'ondes sismiques en tenant compte de divers paramètres comme la distance à l'épicentre Ou la profondeur du foyer, etc. la magnitude augmente d'une unité, ainsi un séisme de magnitude 7 provoquera une amplitude 10 fois plus importante qu'un séisme de magnitude 6, 100 fois plus importante qu'un de magnitude 5.

Tableau.01 et 02. L'échelle d'intensité (l'échelle MSK) et l'échelle de magnitude (Richter)

Echelle d'intensité (EMS-98)	
I	Secousse non perceptible
II	Secousse à peine perceptible
III	Secousse faible ressentie de façon partielle
IV	Secousse largement ressentie
V	Réveil des dormeurs
VI	Frayeurs
VII	Dommages aux constructions
VIII	Destruction de bâtiments
IX	Dommages généralisés aux constructions
X	Destruction générale des bâtiments
XI	Catastrophe
XII	Changement de paysage
L'échelle d'INTENSITE EMS-98 (European Macroseismic scale 1998) définit les effets du séisme sur l'homme et les constructions. Elle diminue en principe quand on s'éloigne de l'épicentre.	

Echelle de magnitude (Richter)	
Magnitude	Ordre de grandeur du nombre de séismes par an dans le monde
> 0	100 millions
1	10 millions
2	1 million
3	100 000
4	10 000
5	1 000
6	100
7	10
8	1
9	1 tous les 10 ans
L'échelle de MAGNITUDE mesure l'énergie libérée par le séisme. Elle ne varie pas quand on s'éloigne de l'épicentre	

1.3. La répartition géographique des séismes

La carte de répartition des grandes zones sismiques, comme celle des zones volcaniques, met en évidence de vastes surfaces peu ou pas actives (les plaques tectoniques) limitées par des frontières très actives, au niveau des **dorsales océaniques**, des **fosses océaniques** et des **chaines de montagnes** (figure.02).

1.4. Sismographes et sismogrammes

Le **sismographe** ou **sismomètre** est un appareil servant à enregistrer les séismes.il existe différents types de sismogrammes afin d'enregistrer tous types d'ondes sismiques. L'enregistrement du séisme est appelé **sismogramme**.

Un **sismologue** est le scientifique spécialiste de cette branche de la géologie.

1.5. Les ondes sismiques

Les ondes engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de **volumes** et les ondes de **surface** (figure.03).

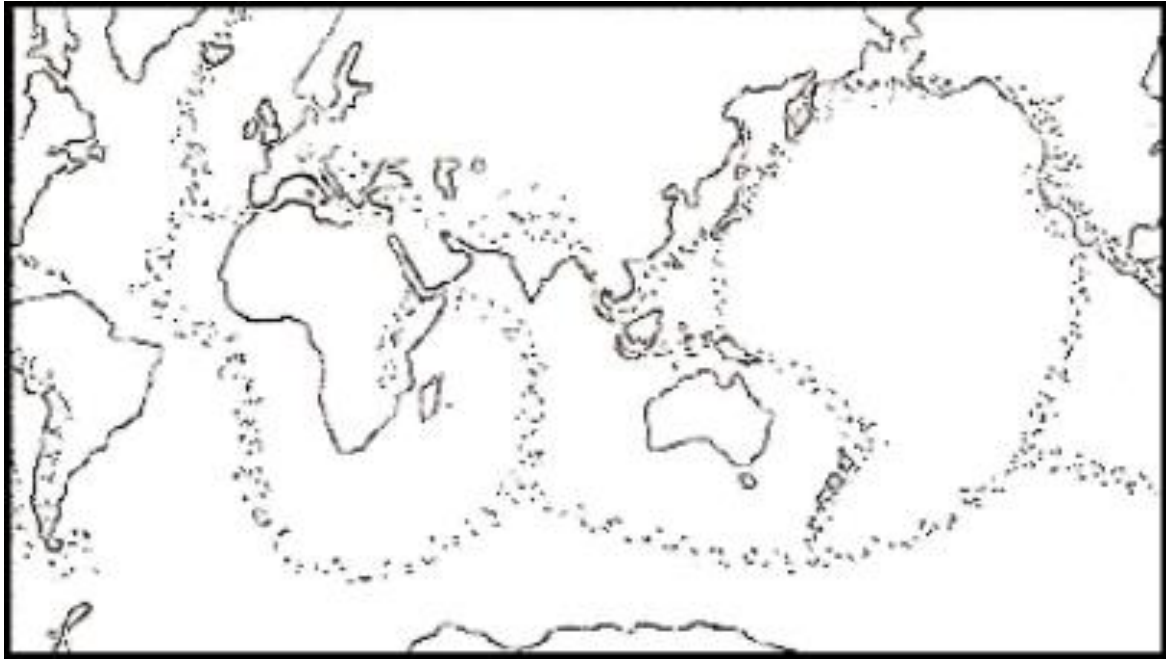


Figure.02. localisation des séismes dans le monde

a) Les ondes de volumes :

Elles se propagent à l'**intérieur** du globe. Leur vitesse de propagation dépend de la nature du milieu traversé d'une manière générale, la **vitesse** des ondes de volume augmente avec la **profondeur**. Ces ondes de volume sont :

- **Les ondes primaires** : elles traversent tous les milieux : liquides, solides et gaz (ces ondes traversent facilement les milieux **solides**). Elles sont très **rapides** (6km/s près de la surface).
- **Les ondes secondaires** : elles ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont en particulier arrêtées par le noyau de la terre.

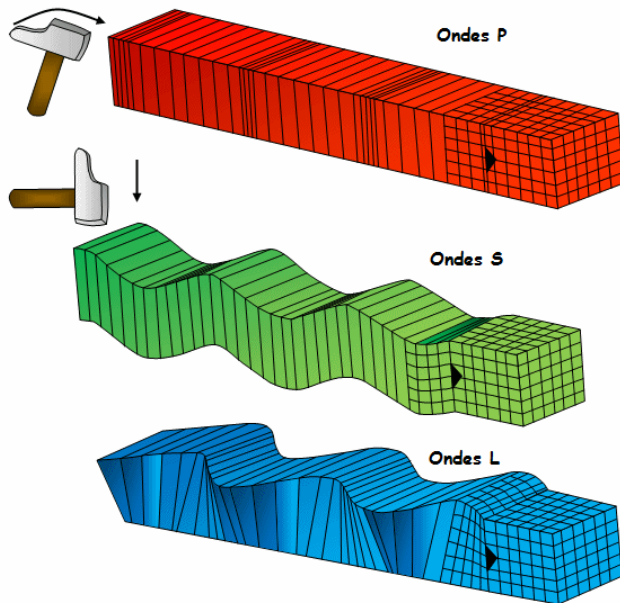
Les **ondes P** sont plus rapides que les **ondes S** et sont donc enregistrées plus rapidement et plus nettement. Le rapport des vitesses des deux types d'ondes de $P/S=1.73$.

Les ondes de volume se propagent un peu comme les rayons lumineux : elles peuvent être réfléchies ou réfractées, c'est-à-dire déviées à chaque changement de milieu, comme par exemple un passage manteau-noyau.

b) Les ondes de surface :

Qui se propagent à la surface d'un milieu élastique comme celles que l'on observe à la surface de l'eau lorsqu'on y jette un caillou, leur amplitude est généralement plus forte. Elles se subdivisent elles aussi en deux types :

- **L'onde de Love L ou LQ**: Elle déplace le sol d'un côté à l'autre dans un plan horizontal perpendiculairement à sa direction de propagation. Le déplacement est essentiellement le même que celui des ondes S sans mouvement vertical. On l'enregistre uniquement sur les composantes horizontales du sismomètre. Les ondes de Love provoquent un ébranlement horizontal qui est la cause de nombreux dégâts aux fondations des édifices.
- **L'onde de Rayleigh ou LR**: Le déplacement est complexe, assez semblable à celui d'une poussière portée par une vague, un mouvement elliptique à la fois horizontal et vertical.



D'après C. Allègre « Les fureurs de la Terre »

Figure.03. Les ondes sismiques

1.6. Définition de la tectonique

La **tectonique**, ou **géologie structurale**, est une discipline des Sciences de la Terre qui étudie les **structures**, les **déformations** et les **mouvements** qui affectent les terrains géologiques ainsi que les **mécanismes** qui en sont responsables.

Structure : agencement des couches d'échelle kilométrique ou planétaire.

Déformation : les couches perdent leur structure originelle, généralement, horizontales.

Mouvements tectoniques : ensemble des déformations que subit l'écorce terrestre sous l'effet des forces géologiques, ou contraintes.

Mécanismes : phénomènes qui sont à l'origine de ces déformations et qui trouvent leur explication dans le mouvement des plaques lithosphériques (tectonique des plaques).

En résumé, les matériaux de l'écorce terrestre se déforment, parfois sous nos yeux. Par exemple, à l'occasion de grands tremblements de terre, on observe couramment l'apparition de fractures qui tranchent les terrains. Le plus souvent, les déformations ne sont visibles ni à l'œil nu, ni à l'échelle humaine. Elles se déroulent sur des millions d'années, à une échelle géologique.

1.6.1. Les différents types de déformation

Les roches, ou couches géologiques, peuvent subir deux types de déformation :

- Elles se cassent. On parle alors de **tectonique cassante** qui donne naissance à des **fractures**.
- Elles se plissent, forment des **plis**. On parle de **tectonique souple**.

a- La tectonique cassante

Ce type de tectonique donne naissance à des fractures de plusieurs catégories. On distingue les diaclases et les failles.

- **Les diaclases**

On parle de diaclase lorsque les terrains se cassent en deux ou en plusieurs blocs sans que ces derniers s'éloignent les uns des autres. On dit qu'il n'y a pas de déplacement relatif.

- **Les failles**

Les failles sont des cassures des couches avec un déplacement relatif des deux compartiments. Les terrains se trouvent morcelés et déplacés les uns par rapport aux autres (figure.04).

- **Les différents éléments d'une faille** : une faille possède généralement :
 - **Plan de faille**: surface le long de laquelle s'est fait le déplacement.
 - **Toit de la faille**: compartiment situé au-dessus du plan de faille.
 - **Mur de la faille**: compartiment situé sous le plan de faille.
 - **Rejet**: distance qui sépare deux points situés de part et d'autre du plan de faille, et qui étaient en contact avant la cassure; on en mesure surtout les composantes verticale et horizontale.

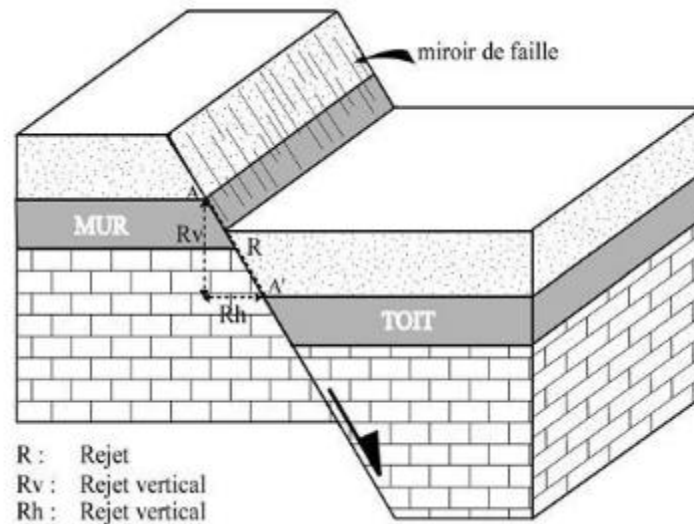


Figure.04. Structure faillée

- **Type de failles**

Suivant le type de mouvement relatif, on définit trois types de failles : normale, inverse, décrochement (figure.05)

- Les **failles normales** correspondent à un allongement horizontal des couches tout en gardant l'ordre de leur succession.
- Les **failles inverses** correspondent à un raccourcissement horizontal des couches avec une inversion dans la succession de l'ordre de celles-ci.
- Les **décrochements** permettent un simple coulissage entre 2 compartiments. Le mouvement est de sens **dextre** si le pivotement que subirait un objet pris dans le plan de cassure se fait dans le sens des aiguilles d'une montre (le jeu de la faille tourne vers la droite) ; il est dit **sénestre** dans le cas contraire (ou vers la gauche).

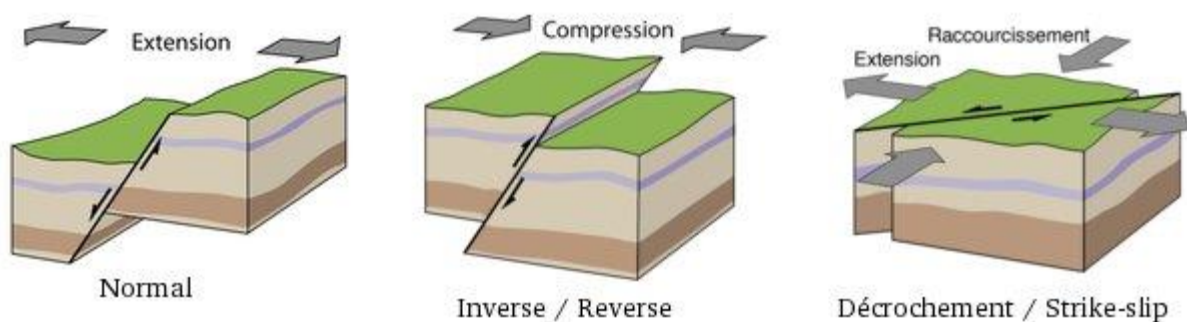


Figure.05. Différents types de failles

b. La tectonique souple

Ce second type de tectonique donne naissance à des plissements ou plis. Ces derniers correspondent à des ondulations de strates formées d'une suite d'anticlinaux, pluriel d'anticlinal et de synclinaux, pluriel de synclinal.

- **Les plis :**

Un pli est une déformation des couches géologiques. Il peut être convexe : Il s'agit d'un anticlinal ou concave : c'est un synclinal (figure.06)

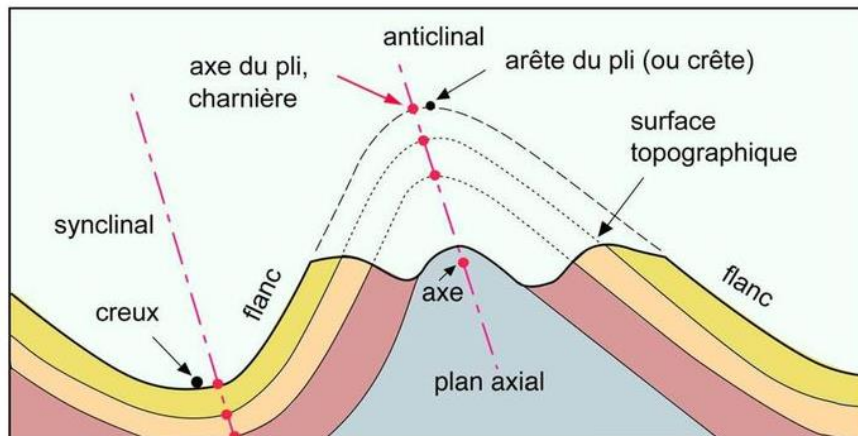


Figure.06. structure plissée

- **Les différents éléments d'un pli :** un pli possède généralement :
 - Une **charnière** : c'est la région de courbure maximale. On parle de charnière anticlinale et de charnière synclinale.
 - **Arête du pli** (anticlinal ou synclinal).
 - **Surface axiale** et **axe du pli** : plan et ligne qui passent par la charnière.
 - Le **cœur** ou **creux d'un pli** : représenté par les couches les plus internes du pli.
 - Les **flancs** : parties du pli de part et d'autre de la charnière.
- **Différents types de plis**

Il existe deux types de plis (figure.07) :

 - **Anticlinal** est un pli convexe dont le centre est occupé par les couches géologiques les plus anciennes. Le terme « anticlinal » prend en considération une notion stratigraphique. La couche la plus basse, qui occupe le cœur de l'anticlinal, est la plus ancienne.
 - **Synclinal** est un pli concave dont le centre est occupé par les couches géologiques les plus récentes. La couche la plus ancienne se trouve à l'extérieur du pli.

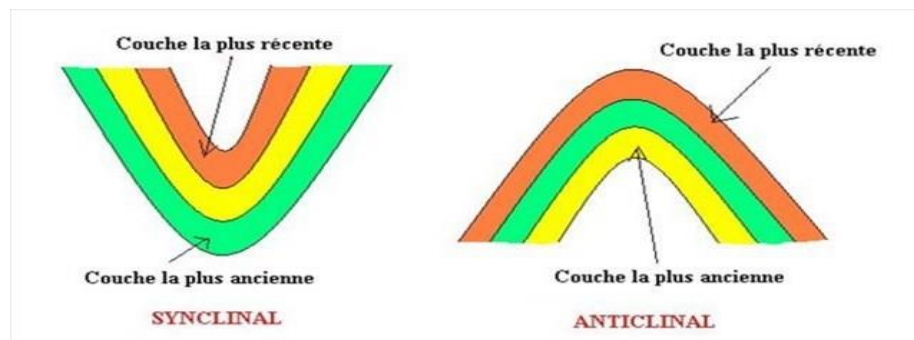


Figure.07. anticlinaux et synclinaux

Selon l'épaisseur des couches géologiques, on distingue deux types de plis : Plis **Isopaques** ou toutes les couches géologiques ont une épaisseur constante au cours de la déformation et les plis **Anisopaques** dans lequel l'épaisseur des couches n'est plus conservée pendant la déformation (figure.08).

- **Plis Droit** : Lorsque les deux flancs d'un pli ont le même pendage mais de sens opposé, on a affaire à un pli droit, dans ce cas le plan axial est vertical.

Pendage : le pendage d'une couche est figuré par la ligne de la pente d'un plan

- **Plis Déjeté** : C'est un pli avec un plan axial légèrement incliné de tel manière que les deux flancs ont un pendage différent.
- **Plis Couché** : Le plan axial est presque horizontale et les flancs sont presque horizontaux.
- **Plis Laminé** : Lorsque l'épaisseur des couches d'un flanc étiré deviennent nulles.
- **Plis faille** : Lorsque la détermination des couches géologiques, de part et d'autre de la zone de laminage sont séparés.

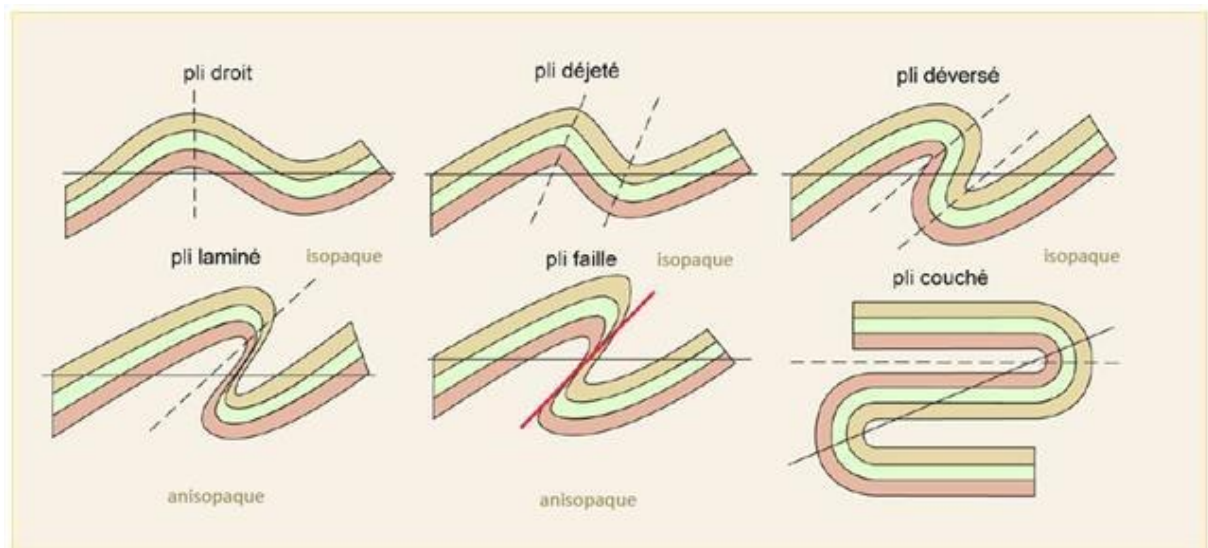


Figure.08. les plis isopaques et les plis anisopaques

III.2. Le volcanisme

2.1. Introduction

La **Terre** possède plus de 10.000 **volcans** sur les continents et davantage sous les océans. Plus de 1.500 d'entre eux ont été actifs au cours des 10.000 dernières années. Une centaine de volcans sont considérés comme très dangereux et donc particulièrement surveillés.

La **volcanologie** ou **vulcanologie** est la science qui étudie le volcanisme : volcans, geysers, fumerolles, éruptions volcaniques, magmas, laves, tephres, etc.

Un **volcanologue** ou **vulcanologue** est le scientifique spécialiste de cette branche de la géologie liée à la géodynamique et à la géomorphologie.

Certains volcans sont **éteints** (ne s'étant pas manifesté depuis plus de 50.000 ans, soumis à l'érosion et ne montrant aucun signe d'activité), d'autres sont en **sommeil** ou **endormi** (ne montrant aucun signe d'activité depuis plusieurs centaines/milliers d'années mais susceptible de se réveiller un jour) et certains sont constamment **actifs** (En éruption ou susceptible de l'être (ayant eu une activité au cours des 10.000 dernières années **ex** : Le stomboli dans les îles éoliennes)).

2.2. Qu'est-ce qu'un volcan ?

Un **volcan** est un relief formé à la suite de l'éjection et de l'empilement de matériaux issus du manteau terrestre (laves, cendres...). Il peut être terrestre, sous-marin ou extra-terrestre. Il prend en général une forme conique couronnée par un cratère.

Cependant, l'édifice volcanique n'est qu'une partie visible du volcan. Un volcan n'est en réalité seulement qu'un appareil naturel qui fait communiquer les profondeurs de la Terre (le manteau) à la surface, et c'est grâce lui que circule le **magma**.

Un **volcan** est formé de différentes structures caractéristiques (figure.09) :

- Une **chambre magmatique** alimentée par le magma du manteau, entre 10 et 50 km sous la croûte terrestre. Elle va alimenter l'éruption (il peut dans certains cas y avoir plusieurs chambres magmatiques pour un même volcan)
- Une **cheminée principale** par où transite le magma, entre la chambre magmatique et le cratère. Elle peut mesurer jusqu'à 10km
- Un **cratère** ou une **caldeira** où débouche la cheminée principale et par où passe la plupart du magma pendant l'éruption
- Des **cheminées secondaires** ou **fissures latérales** entre la chambre magmatique et les flancs du volcan, qui peuvent donner naissance à des cônes secondaires par où sort une partie du magma.

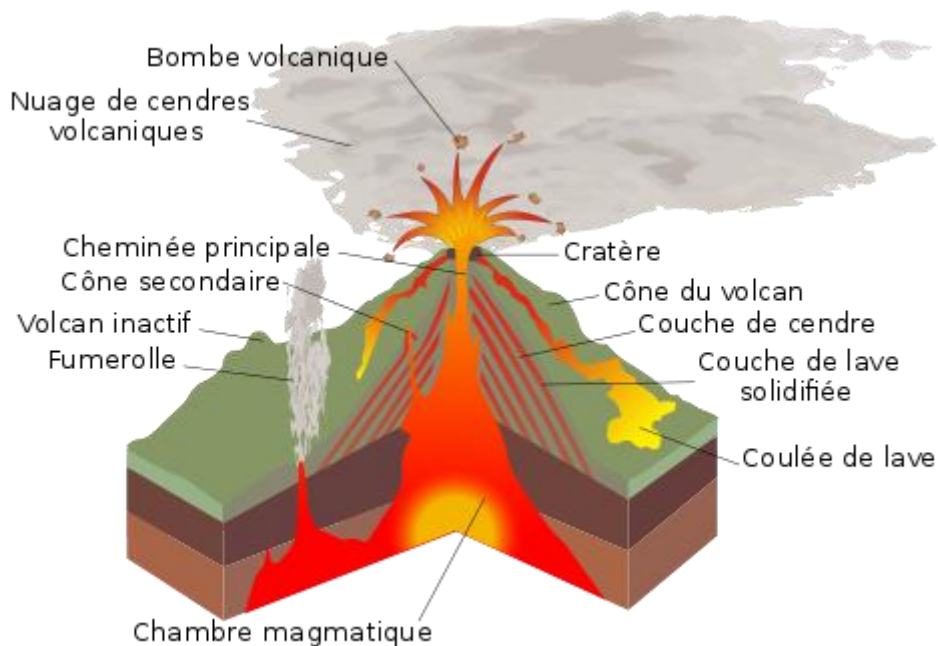


Figure.09. Structure typique d'un volcan

2.3. Produits rejetés par un volcan

Ce sont les produits des magmas et leurs dérivés

- Les **coulées de laves** sont généralement produites par des volcans dont la lave est très fluide (**basaltiques** au niveau des dorsales océaniques et les points chauds et **andésitiques** au niveau des zones de subduction). Cette lave s'écoule facilement sur les flancs du volcan. Après refroidissement, ces coulées forment des roches volcaniques très compactes et très dures.

- Les **gaz volcaniques** sont principalement composés de :
 - ✓ **vapeur d'eau** à teneur de 50 à 90 % ;
 - ✓ **dioxyde de carbone** à teneur de 5 à 25 % ;

- ✓ **dioxyde de soufre** à teneur de 3 à 25 %.

Puis viennent d'autres éléments volatils comme le monoxyde de carbone, le chlorure d'hydrogène, le dihydrogène, le sulfure d'hydrogène, etc. Le dégazage du magma en profondeur peut se traduire à la surface par la présence de fumerolles autour desquelles des cristaux, le plus souvent de soufre, peuvent se former.

- Les **projections ou tephra** sont des fragments émet par les volcans, on les classe selon leur taille :

- ✓ Les **bombes volcaniques** qui acquièrent une forme particulière lors de leur projection. Pour former ce type de bombe volcanique, le magma doit être peu visqueux et donc dans la plupart des cas basaltiques.
- ✓ Les **ponces** sont des fragments de magmas qui ont emprisonnés une très grande quantité de bulles. Elles se forment généralement à partir de magmas acides très visqueux.
- ✓ Les **scories basaltiques** sont des fragments scoriacés sombres, riches en bulles émis par exemple lors d'éruptions de type Stromboliennes.
- ✓ Les **cendres** correspondent à la fraction la plus fine des projections émises lors d'une éruption volcanique. Au contact de l'air et de l'humidité ambiante, les cendres peuvent s'agglomérer en fines gouttelettes millimétrique que l'on appelle **lapilli**.

2.4. Les différents types de volcans

Il existe deux grands types de volcans (figure.10) :

a. Les volcans effusifs (« rouges ») : caractérisés par des éruptions calmes, des émissions de laves fluides sous la forme de coulées, ils sont souvent situés sur une dorsale océanique ou sur un point chaud. Les meilleurs **exemples** sont les hawaïens (Kilauea, Mauna Kea, etc...).

b. Les volcans explosifs (« gris ») : caractérisés par des éruptions très violentes, des émissions de laves pâteuses, de nuées ardentes, de matériaux solides et de panaches volcaniques, ils sont souvent situés sur une zone de subduction. Le meilleur **exemple** est la Ceinture du Pacifique, qui comprend tous les plus violents volcans d'Indonésie, comme le Tambora ou le Krakatoa, et où l'on peut observer 90% des éruptions et 80% des plus violents tremblements de Terre du Monde.

2.5. Répartition du volcanisme

La répartition du volcanisme est voisine de celle des séismes (figure.11), ce qui traduit le fait qu'une grande partie de l'énergie libéré par la Terre est évacuée au niveau des plaques lithosphériques. La très grande majorité des volcans est concentrée :

- **Dans les zones de subduction** : (rapprochement de deux plaques lithosphériques) c'est un volcanisme beaucoup plus brutal qui t'accompagne à une forte sismicité.
- **Dans les zones d'accrétion** : (éloignement de deux plaques lithosphériques) ce sont les rifts (en domaine continental) ou les dorsales océaniques (dans les océans), le volcanisme est de type fissural relativement calme et permanent.

Il existe aussi un volcanisme **intraplaque**, lié aux **points chauds**. Du magma en fusion perce la croûte (généralement océanique) et donne naissance à un volcan **exemple** : les îles Hawaï.

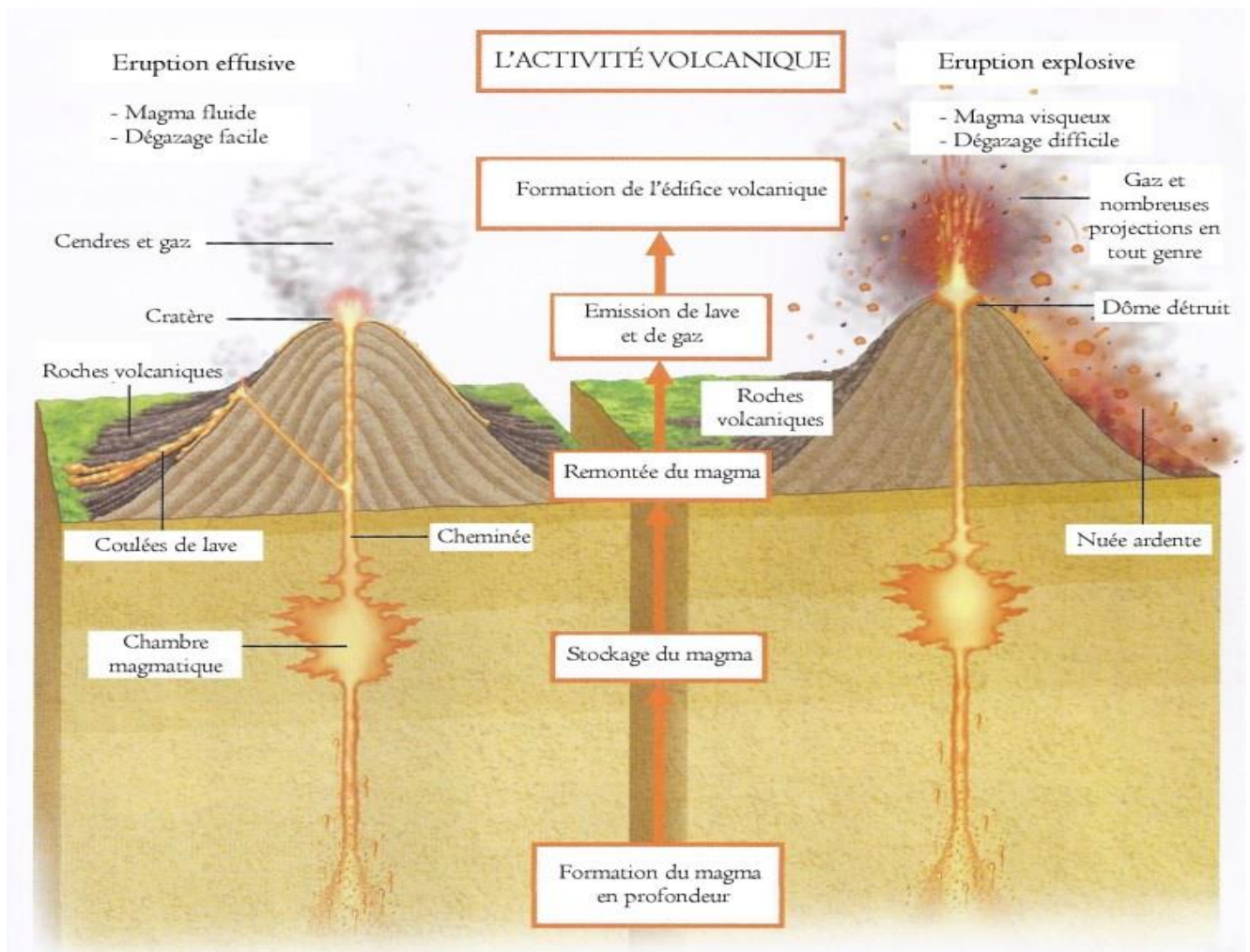


Figure.10. Types d'éruptions volcaniques



Figure.11. répartition mondiale des volcans

III.5. La tectonique des plaques

La lithosphère est constituée de la croûte et de la partie supérieure du manteau. Ces deux enveloppes rocheuses étant séparées par la discontinuité de Mohorovicic. La limite inférieure de la lithosphère, c'est à dire la limite entre le manteau supérieur rigide (cassant) et le manteau supérieur ductile, est situé vers 1200 °C. Cette température correspond à la température de fusion de l'olivine un minéral constitutif de la péridotite. La profondeur de cette limite est donc variable, proche de 0 km au niveau de l'axe des dorsales océaniques jusqu'à plus de 300 Km sous les vieux continents. La transition entre la lithosphère et l'asthénosphère, se caractérise par une diminution de la vitesse des ondes sismiques, due à la présence de matériel partiellement fondu, et permet de définir la ZMV (ou LVZ) pour Zone à Moindre Vitesse (ou Low Velocity Zone).

Deux types de lithosphère sont identifiables :

- La **lithosphère continentale** constituée de la croûte continentale et du manteau supérieur
- La **lithosphère océanique** constituée de la croûte océanique et du manteau supérieur.

Les séismes et les volcans ne sont pas répartis de manière homogène à la surface du globe : ils sont concentrés sur des bandes étroites et très longues.

Dans ces bandes, les déformations sont importantes, alors qu'ailleurs, il y a très peu de déformations. Ces bandes délimitent des calottes sphériques rigides et peu déformées à l'exception de leurs frontières : **les plaques lithosphériques**. Ces plaques lithosphériques sont **rigides** et ont un comportement **cassant** là où elles sont soumises à des contraintes (fig.12).

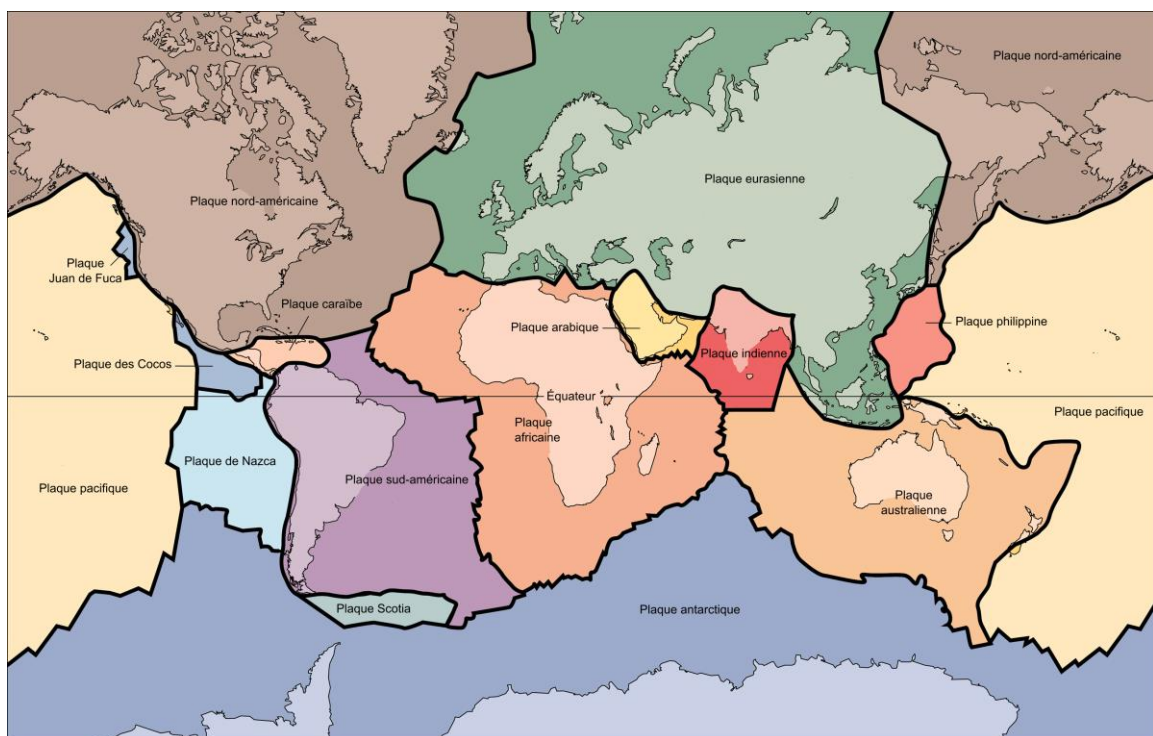


Figure.12. carte des principales plaques tectoniques terrestres.

La tectonique des plaques caractérise l'ensemble des mouvements des plaques plus ou moins rigides constituant la lithosphère terrestre (elles sont dites tectoniques ou lithosphériques). Elle trahit en surface les mouvements de convection ayant cours dans le manteau terrestre.

La dérive des continents ou la théorie de Wegener

Le concept de tectonique des plaques (ou initialement de dérive des continents) a pour la première fois été défini en 1912 par Alfred Wegener, à partir de considérations d'ordre cartographique, structural, paléontologique et paléoclimatique. Cependant, il n'a été accepté de tous que plusieurs décennies plus tard, après sa vérification par diverses observations dans les années 1960. Cette théorie s'appuya sur 3 types d'observations:

- La complémentarité du tracé des côtes orientale d'Afrique et orientale d'Amérique du Sud ainsi que la disposition des ensembles de roches d'âges supérieurs ou inférieurs à - 2000 Ma
- La répartition de certaines faunes et flores. Les fossiles de Mesosaurus ne sont connus que dans des parties sud de l'Amérique du Sud et de l'Afrique. Cette répartition géographique se comprend mieux si l'on admet que ces deux continents étaient réunis à cette époque.
- La répartition des séquences glaciaires d'âge permo-carbonifère (-360 à -245 MA). Celles-ci ont été identifiées sur les cinq continents issus de la fragmentation du Gondwana.

Aujourd'hui, les déplacements des continents à la surface de la Terre, de l'ordre de quelques centimètres par an, sont mesurés avec précision grâce à la technologie GPS

Les mouvements relatifs des plaques lithosphériques

Les plaques se déplacent les unes par rapport aux autres et changent sans cesse de superficie. Leurs mouvements et leurs modifications dépendent des phénomènes intervenant à leurs limites.

Des mouvements aux frontières des plaques : trois types de mouvements peuvent être observés aux frontières des plaques lithosphériques :

- des mouvements de divergence
- des mouvements de convergence
- des mouvements de coulissage

Les dorsales, des zones de divergences

La divergence a lieu au niveau des dorsales océaniques qui sont des reliefs caractérisés par une activité magmatique. Elle est matérialisée par l'écartement en sens opposé de deux points situés chacun sur une plaque (fig.13).

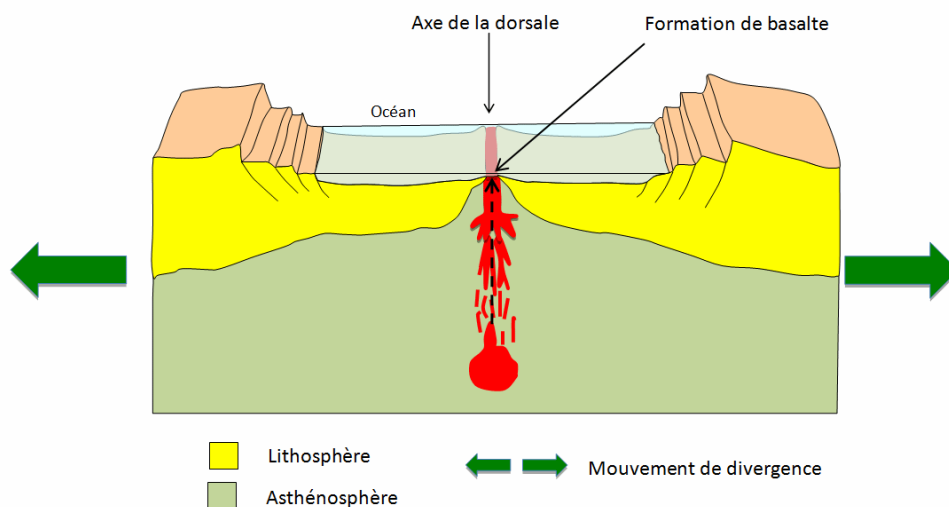


Figure.13. zones d'accrétion océanique (dorsales océaniques)

Des frontières convergentes

La convergence a lieu dans les zones de subduction (LO-LO ou LO-LC) et les chaînes de collision (LC-LC); elle est matérialisée par le rapprochement de deux points situés chacun sur une plaque, elle compense à la déformation près, la création de lithosphère dans les zones de divergence (fig.14).

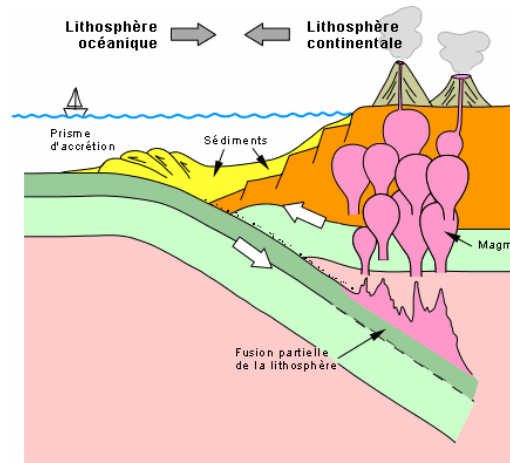


Figure.14. zone de subduction

Les failles transformantes : des zones de coulissage

Certaines zones du globe sont en mouvements bien qu'elles ne soient ni des zones de divergence, ni des zones de convergences. Les mouvements des plaques à leur niveau se traduisent par des coulissages horizontaux réalisés au niveau de failles. Les deux plaques se déplacent en sens inverse de part et d'autre de ces failles qualifiées de transformantes (fig.15=).

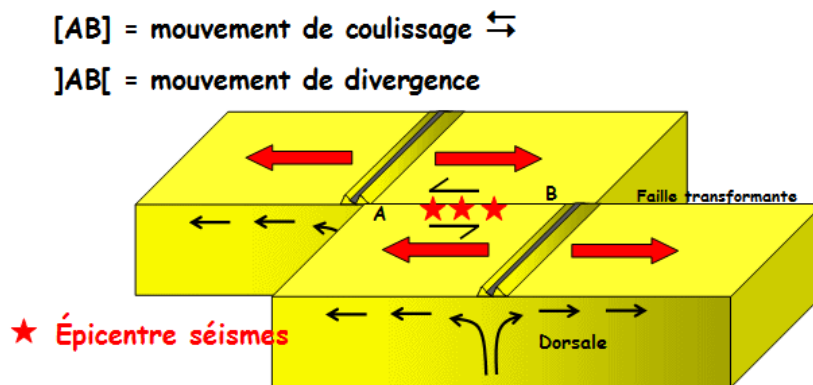


Figure.15. les failles transformantes.