

## 1. Chapitre 3 GEODYNAMIQUE INTERNE

La géodynamique interne s'intéresse aux processus internes de la planète ainsi qu'à leurs répercussions mécaniques en surface. Les grands phénomènes géologiques comme les tremblements de terre, les volcans, la formation des océans et des grandes chaînes de montagnes sont expliqués par le modèle de la tectonique des plaques (source : cnrs.fr).

### 1.1 Sismologie

L'ébranlement brusque de la lithosphère en un point quelconque provoque des vibrations qui se transmettent à travers le globe. Le passage de ces vibrations constitue un tremblement de terre ou séisme (Pomerol Ch. et al, 2013).

Il est le résultat de la libération d'énergie considérable accumulée par les déplacements et les frictions des différentes plaques lithosphériques.

On appelle foyer ou hypocentre, le point où se produit l'ébranlement, et où se libère l'énergie, et l'épicentre le point correspondant le plus proche sur la surface terrestre et où la secousse est maximale (Bellair P. et Pomerol Ch., 1984) (fig. 21).

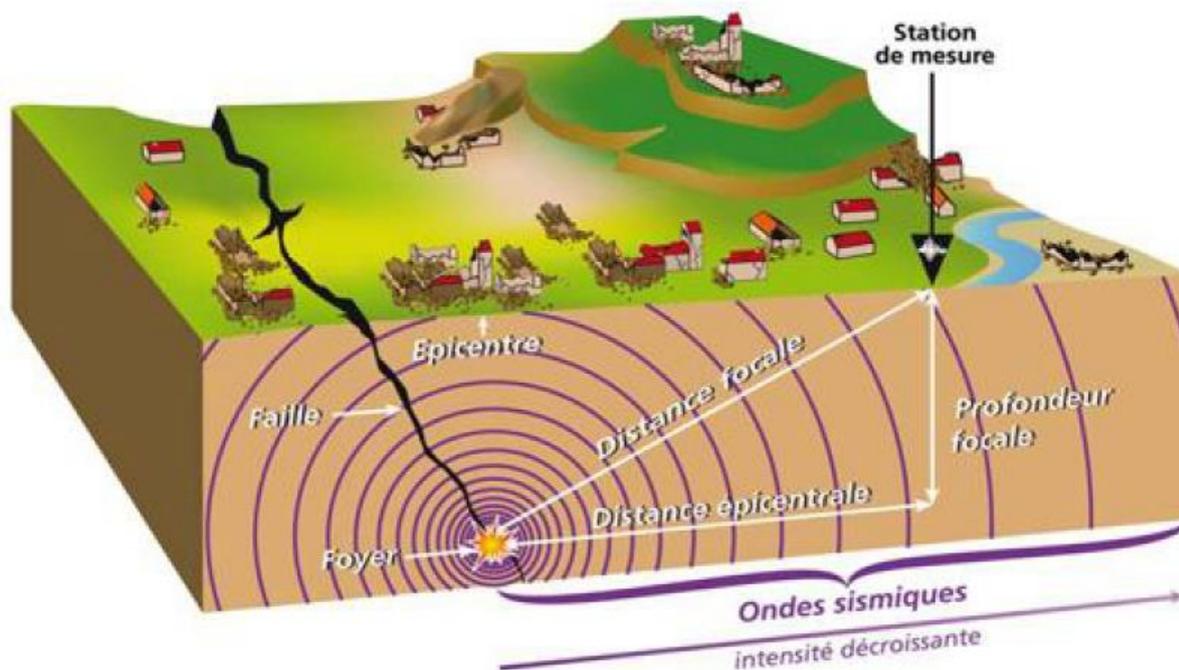


Figure 21. Bloc diagramme montrant les lignes isoséistes, leurs relations avec l'épicentre et les ondes issues du foyer d'un tremblement de terre (source : seisme.nc).

### 1.1.1 Etude des séismes

Des instruments sensibles « les sismographes » permettent d'enregistrer les caractéristiques d'un tremblement de terre : intensité, magnitude et effets (fig. 22 et 23).

Les paramètres permettant de quantifier l'énergie d'un séisme sont ;

- La magnitude ;
- L'intensité ;
- Les ondes sismiques.

#### A- Magnitude

La magnitude mesure l'énergie libérée par un séisme et permet d'évaluer sa puissance. Plus un séisme libère de l'énergie, plus sa magnitude est élevée. Cette grandeur physique fut utilisée pour la première fois en 1935 par le sismologue américain, C. F. Richter, qui étudiait les séismes californiens. Pour évaluer la magnitude, il prenait en compte l'amplitude maximale de la secousse sismique enregistrée par un sismographe et la distance à l'épicentre (tableau 1). (source : seisme.nc).

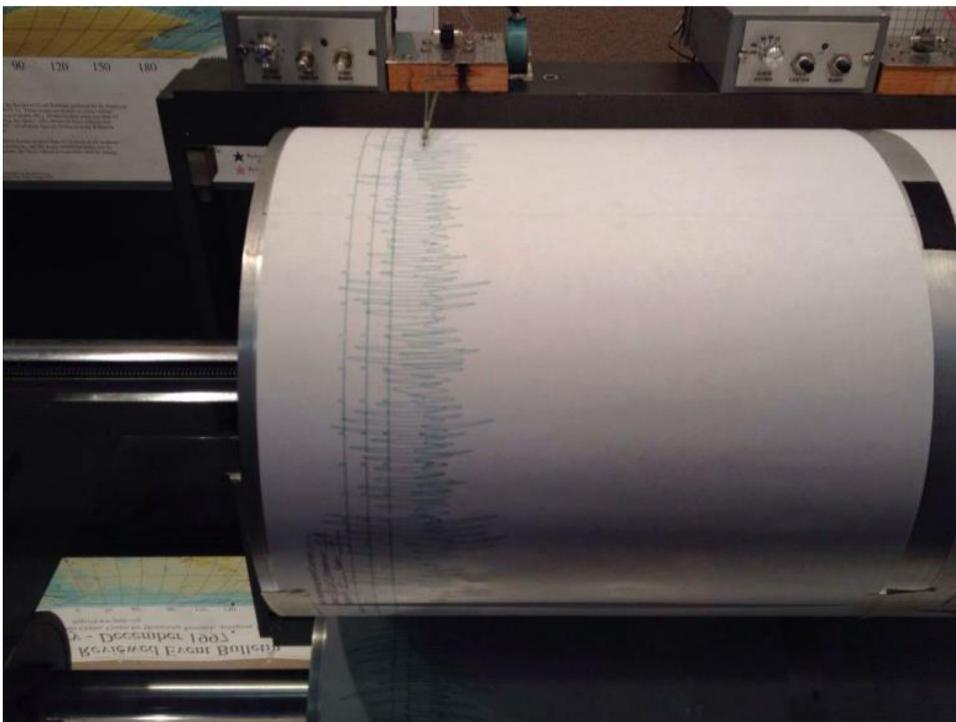


Figure 22. Sismographe (source : <https://imgur.com/gallery/Aym7A>)



Figure 23. Schémas des sismographes : vertical et horizontal (source : ikonet.com)

Tableau 1. Relation entre magnitude et l'énergie libérée par un séisme : échelle de Richter (Source : mementodumaire.net).

Magnitude	Energie Libérée	Nbr de séismes par an dans le monde (ordre de grandeur)
9	$E \times 30^5$	1 tous les 10 ans
8	$E \times 30^4$	1
7	$E \times 30^3$	10
6	$E \times 30^2$	100
5	$E \times 30$	1000
4	$E$	10 000
3	$E/30$	>100 000
2	$E/30^2$	
1	$E/30^3$	

### B-Intensité

L'intensité est établie sur la base de l'observation des effets des séismes sur les populations et les infrastructures (Schneider J. L., 2009).

L'estimation de l'intensité d'un séisme en un endroit donné se fait selon une procédure très codifiée prenant en considération (tableau 2) :

- la classification des bâtiments éventuellement endommagés suivant la qualité de leur construction et les matériaux utilisés
- le degré d'endommagement des bâtiments (de dommages légers à destruction totale)
- les proportions de bâtiments endommagés ou de personnes ayant ressenti le séisme.

**Tableau 2. Echelle de Medvedev, Sponheuer et Karnik, dite échelle MSK (source : edu.obs-mip.fr).**

Degré	description
I	Non ressenti
II	Rarement ressenti
III	Faiblement ressenti
IV	Largement ressenti
V	Fortement ressenti
VI	Dégâts légers
VII	Dégâts significatifs
VIII	Dégâts importants
IX	Destructions
X	Destructions généralisées
XI	Catastrophe
XII	Changement de paysage

### C-Ondes sismiques

La libération de l'énergie au cours d'un séisme se traduit par l'émission d'ondes sismiques qui se déplacent rapidement dans l'écorce terrestre mais également dans les enveloppes plus profondes de la planète (Schneider J. L., 2009).

On distingue deux types d'ondes :

Les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à la surface. Sur les enregistrements des sismographes, elles se succèdent ou se superposent (fig. 24) (source : tpe-seisme-hb.e-monsite.com).

#### Les ondes de volumes :

Elles se propagent à l'intérieur du globe. Leur vitesse de propagation dépend du matériau traversé et d'une manière générale elle augmente avec la profondeur. Il y a deux sortes d'ondes de volumes : les ondes primaires et les ondes secondaires :

- **Les ondes primaires** appelés aussi les ondes **P**, des ondes de compression ou des ondes longitudinales ; le déplacement du sol qui accompagne leur passage se fait par des dilatations et des compressions successives. Ces déplacements du sol sont parallèles à la direction de propagation de l'onde.
- **Les ondes secondaires**, appelées aussi les ondes **S**, des ondes de cisaillement ou des ondes transversales. À leur passage, les mouvements du sol s'effectuent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Ces ondes ne se propagent pas dans les milieux liquides, elles sont réfléchies vers la surface. Leur vitesse est de 4,06 km/s. Plus lentes que les ondes P, elles apparaissent donc en deuxième sur les sismogrammes.

### **Les ondes de surface :**

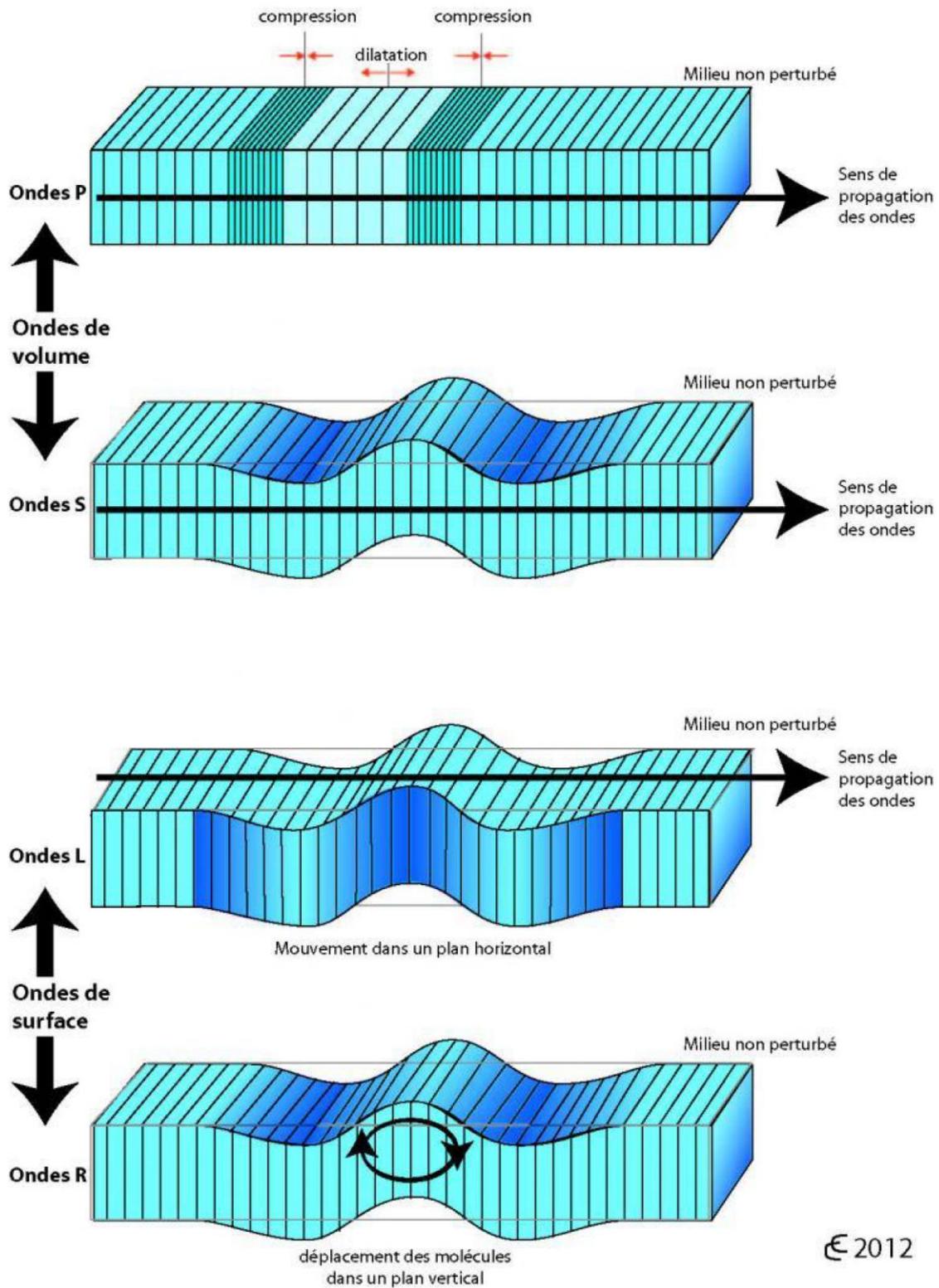
Ce sont des ondes guidées par la surface de la Terre. Leur effet est comparable aux rides formées à la surface d'un lac. Elles sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude est généralement plus forte. On peut distinguer deux sortes d'ondes de surface :

Les ondes de Love appelées aussi les ondes L, elles sont caractérisées par une amplitude importante, une fréquence faible et un amortissement plus lent. Ce sont des ondes de surface qui se déplacent perpendiculairement au foyer.

Elles provoquent des cisaillements uniquement dans le plan horizontal. Elles sont donc perpendiculaires aux ondes S.

Elles peuvent être aussi très dangereuses pour les constructions. Ces ondes n'étaient pas enregistrées par les anciens sismographes. Seuls les sismographes à 2 dimensions peuvent les enregistrer.

Les ondes de Raleigh appelées aussi les ondes R, elles ne sont mesurables que sur les sismomètres modernes. Elles sont assimilables à une vague dans le sens où les molécules du sol se déplacent dans celui-ci comme les molécules d'eau dans une vague.



© 2012

Figure 24. Schéma explicatif des différentes ondes sismiques observables (source : svt4vr.e-monsite.com).

### 1.1.2 Origine et répartition

Les tremblements de terre se produisent essentiellement dans les zones où les plaques tectoniques sont en mouvement. Au niveau de ces frontières, les masses rocheuses sont soumises à des contraintes, elles sont « comprimées » ou « étirées » et se déforment de façon élastique pendant des dizaines voire des milliers d'années. Les forces s'accumulent pendant une longue période de temps jusqu'à la rupture brutale (source : seisme.nc).

La figure ci-dessous nous montre la répartition des séismes à la surface de la Terre : les épicentres sont concentrés au niveau des frontières des plaques tectoniques.

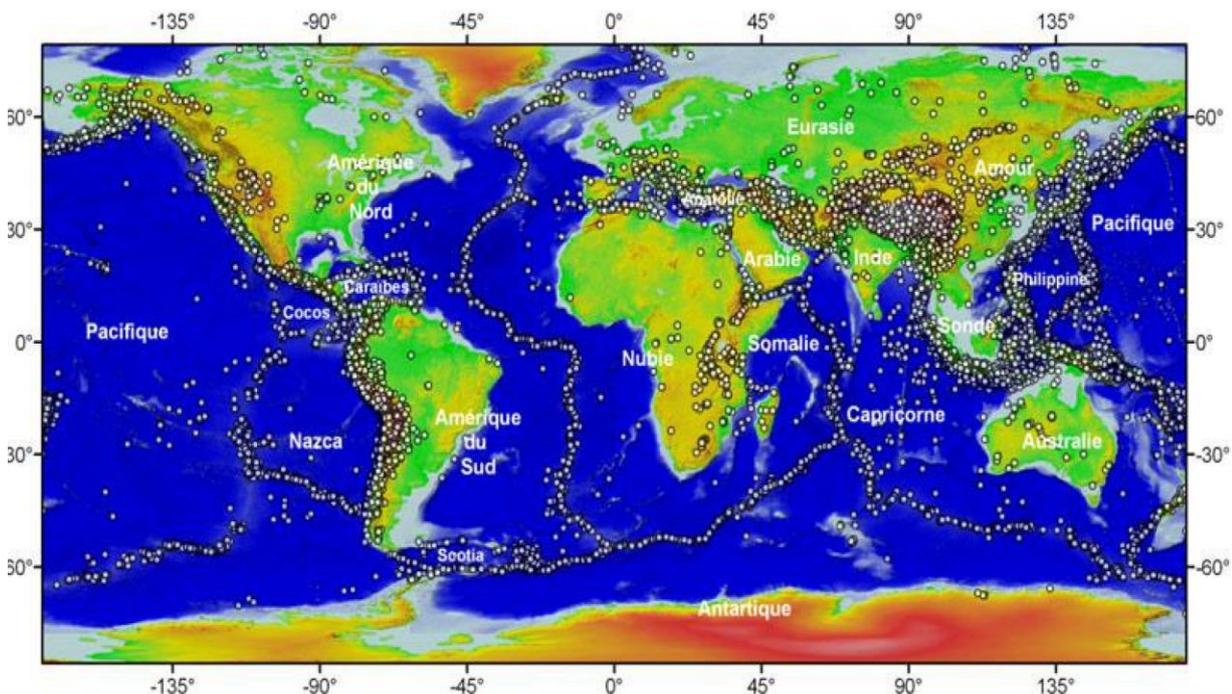


Figure 25. Carte de la sismicité mondiale. Les épicentres sont issus du catalogue de l'United States Geological Survey, pour la période 1973-2008 et pour tous les séismes de magnitude supérieure à 5 (source : irsn.fr).

### 1.1.3 Tectonique souple et cassante

Les mouvements de l'écorce terrestre provoquent, à une échelle de temps géologique, des déformations intenses résultant des reliefs montagneux. La tectonique étudie les phénomènes responsables à ces déformations à toutes échelles, en impliquant les forces de compression, de cisaillement, et d'écartement.

#### A- Tectonique souple : Plis

Les plis constituent la manifestation d'un comportement plastique (ductile) des roches sous l'effet de contraintes de compression.

Les plis s'observent à toutes les échelles, pluri kilométrique à millimétrique. D'une manière très générale, un pli résulte de la déformation souple d'une surface initialement plane.

Un pli élémentaire se compose d'une partie convexe vers le ciel ou anticlinal et d'une partie concave ou synclinale (Bellair P. et Pomerol Ch., 1984).

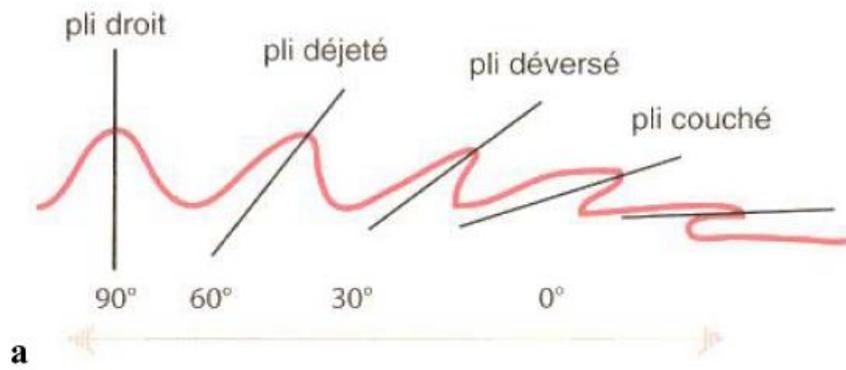
Les plis sont dits droits lorsque le plan axial est vertical. A l'autre extrême, il y a les plis couchés, lorsque le plan axial est horizontal. Entre les deux, il y a les plis déjetés et les plis déversés. Les plis droits résultent de contraintes de compression coaxiales, les plis déjetés et déversés de contraintes qui ne sont pas coaxiales (fig. 26).

### **B- Tectonique cassante : Faille**

Lorsqu'une déformation dépasse le seuil de résistance mécanique de la roche, on parle d'une «déformation cassante». Elle se traduit par des plans de cassures « les failles ».

Une faille ou une fracture de cisaillement macroscopique accompagnée d'un glissement des blocs de part et d'autre du plan de faille. Elle est définie par le plan de rupture et par le vecteur de déplacement de chaque compartiment.

La faille sépare le volume rocheux en deux blocs : le toit, qui correspond au bloc situé au-dessus du plan de faille, et le mur, situé sous le plan de faille (fig. 27). Les surfaces du mur et du toit au contact avec le plan de faille sont parfois polies lors du glissement le long de la faille ; on appelle alors ces surfaces polies des miroirs de failles. Le vecteur-glissement, soit le rejet réel de la faille, correspond à la ligne de séparation entre deux points situés sur le mur et le toit et qui étaient initialement contigus (source : [ggl.ulaval.ca](http://ggl.ulaval.ca)).



**Déformation plastique - Régime compressif**

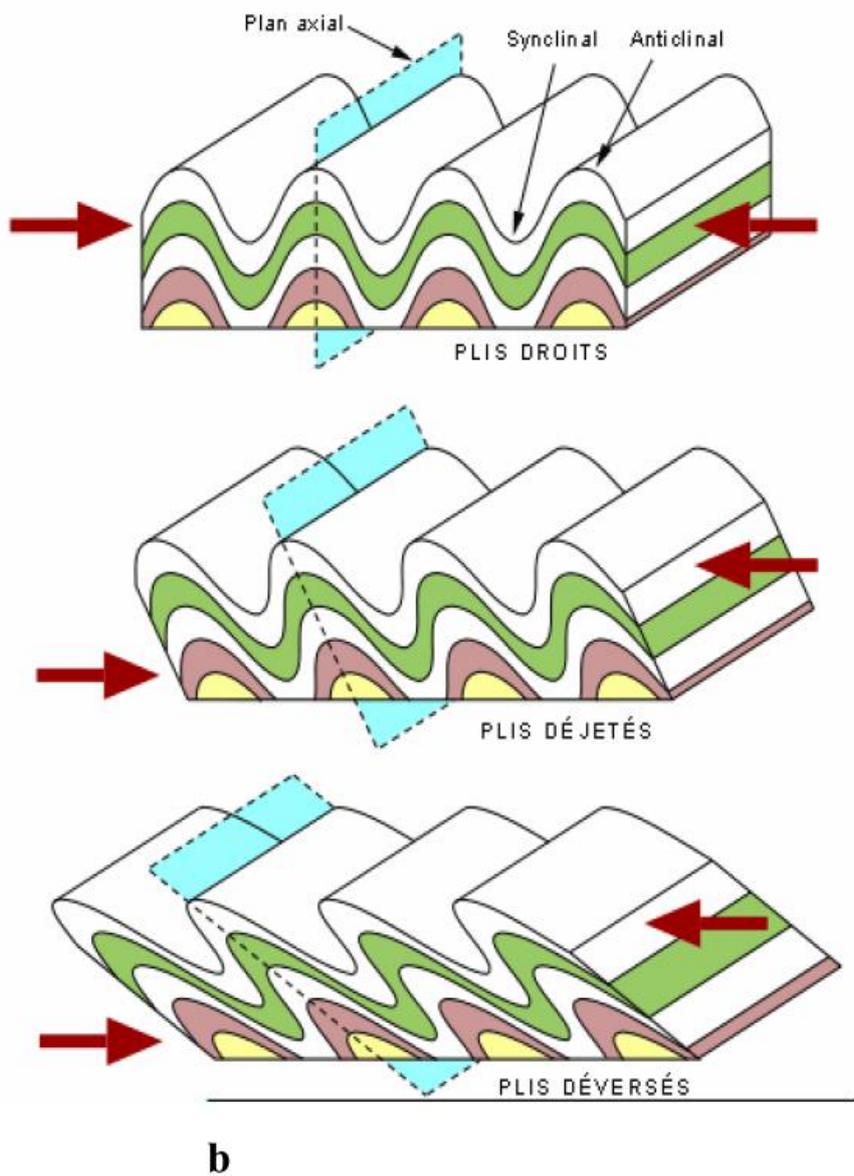


Figure 26. a : Principaux types des plis (Emmanuel L. et al. 2007) ; b : Géométries des plis (Bourque P. A., 2010)

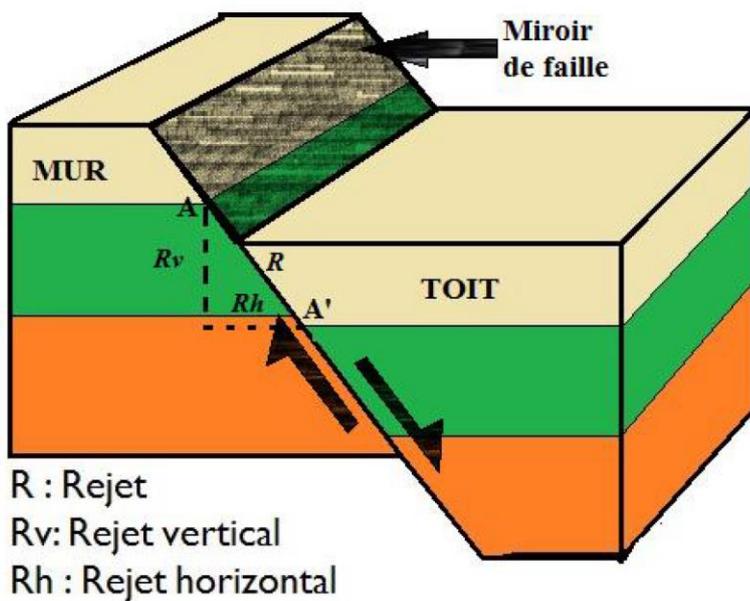


Figure 27. Structure faillée.

Il existe trois types de failles (fig. 28) : les failles normales, inverses et décrochantes.

- La faille normale survient quand les deux compartiments sont tirés dans des directions opposées. La masse rocheuse qui se situe au-dessus de la faille (elles sont rarement verticales) tend alors à descendre.
- Les failles inverses apparaissent dans la situation contraire, lorsque les deux compartiments sont comprimés l'un contre l'autre. Dans ce cas, la masse rocheuse surplombant la faille monte.
- Les failles décrochantes sont le résultat d'un coulissement dans le plan horizontal d'un compartiment par rapport à l'autre. Dans ce cas, les failles sont généralement verticales.

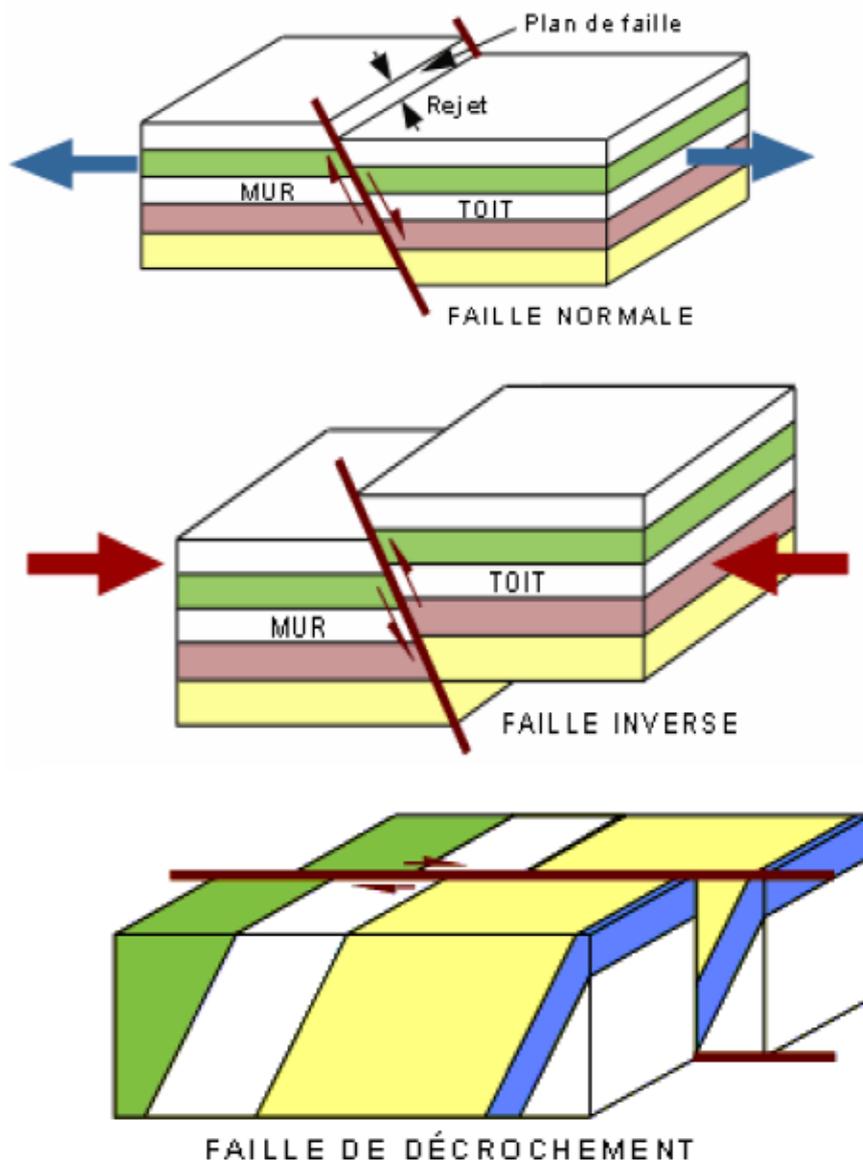


Figure 28. Géométrie et types des failles (Bourque P. A., 2010).

## 1.2 Vulcanologie

### 1.2.1 Volcan

Les volcans sont des appareils qui mettent en relation la surface du globe avec des zones internes où les roches sont à une température permettant leur fusion. Ces roches en fusion viennent s'épancher à la surface du sol, en y créant des reliefs surajoutés de structures variées. (Bellair P. et Pomerol Ch., 1984) (fig. 29).

#### Type des volcans

Selon les caractéristiques du magma, fluide ou visqueux, et de la forme de la cheminée on peut distinguer 5 principaux types de volcans (fig. 30). Le tableau 3 résume leurs caractéristiques :

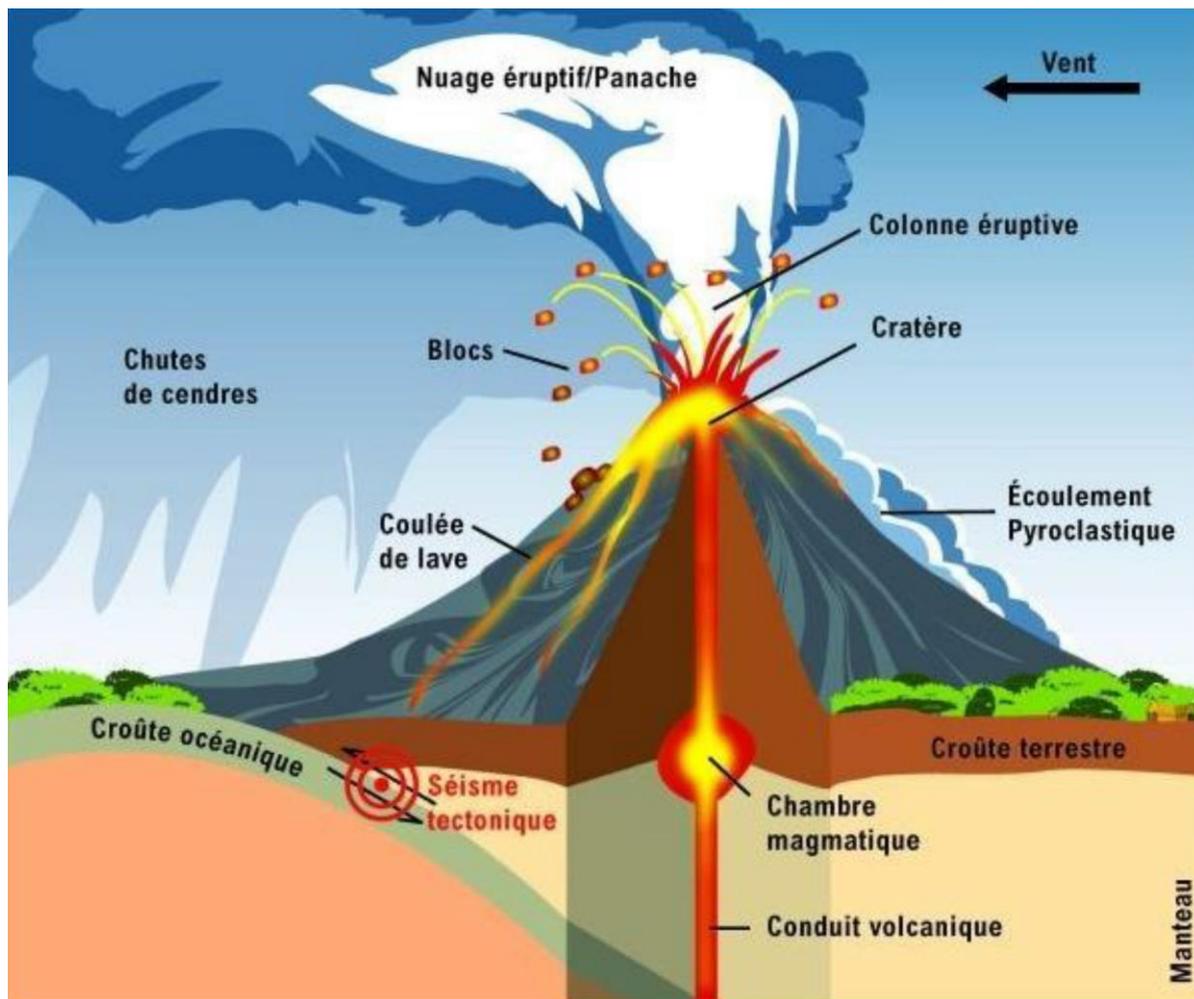


Figure 29. Schéma général d'une éruption (source : ird.fr)

Tableau 3. Caractéristiques des différents types de volcan.

Type	Magma	Éruption	Éjection principale	Caractéristiques de l'éruption
Hawaïen	basique	effusive	coulées de lave longues et fines = lave pahoehoe	éruption "calme", dégazage sans explosion, très peu de projection.
Strombolien	intermédiaire - un peu visqueux	coulées et fontaines de lave + projections pyroclastiques	coulées et fontaines de lave + projections pyroclastiques	fontaines et coulées de lave - beaucoup de projections pyroclastiques (bloc, bombe, lapilli, etc...). Petit panache de gaz et de cendres
Plinien	acide	explosive	immense panache de gaz et de cendres de plusieurs kilomètres de haut	énormément d'éjection pyroclastique
Péléen	acide	explosive	Panache de gaz et de cendre et coulées	Nuées ardentes. Grand panache de gaz et cendres. Éventuellement dôme ou aiguille de lave.

			pyroclastiques (nuées ardentes)	
Vulcanien	acide	Explosive et très violente	Lave très visqueuse beaucoup de cendres	Eruption très violentes pouvant conduire à la destruction du volcan lui-même

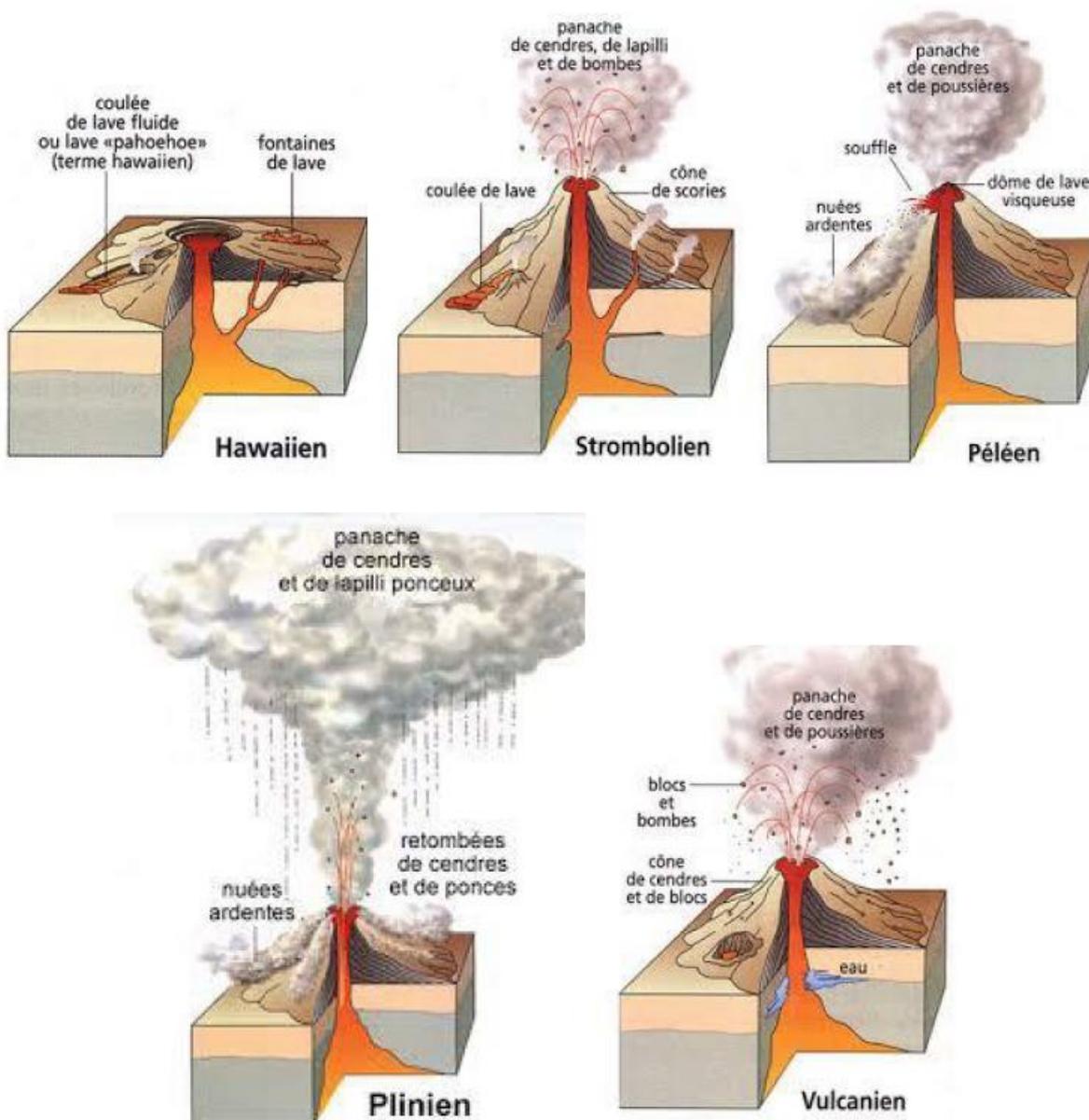


Figure 30. Types des volcans (source : etude-volcans.e-monsite.com).

### 1.2.2 Roches magmatiques

Les roches magmatiques se mettent en place par cristallisation d'un magma (Emmanuel L. et al. 2007). Ce magma vient des profondeurs de la Terre où il est soumis à une grande pression.

Les roches magmatiques sont des roches endogènes, c'est-à-dire ayant pris naissance à l'intérieur de la Terre. Les unes sont issues de matières fondues, ou « magmas », qui ont fait éruption à la surface : ce sont les roches volcaniques. Les autres se sont formées en profondeur et n'apparaissent que par le jeu des déformations de l'écorce et de l'érosion : ce sont les roches plutoniques (Lelubre M., 2018).

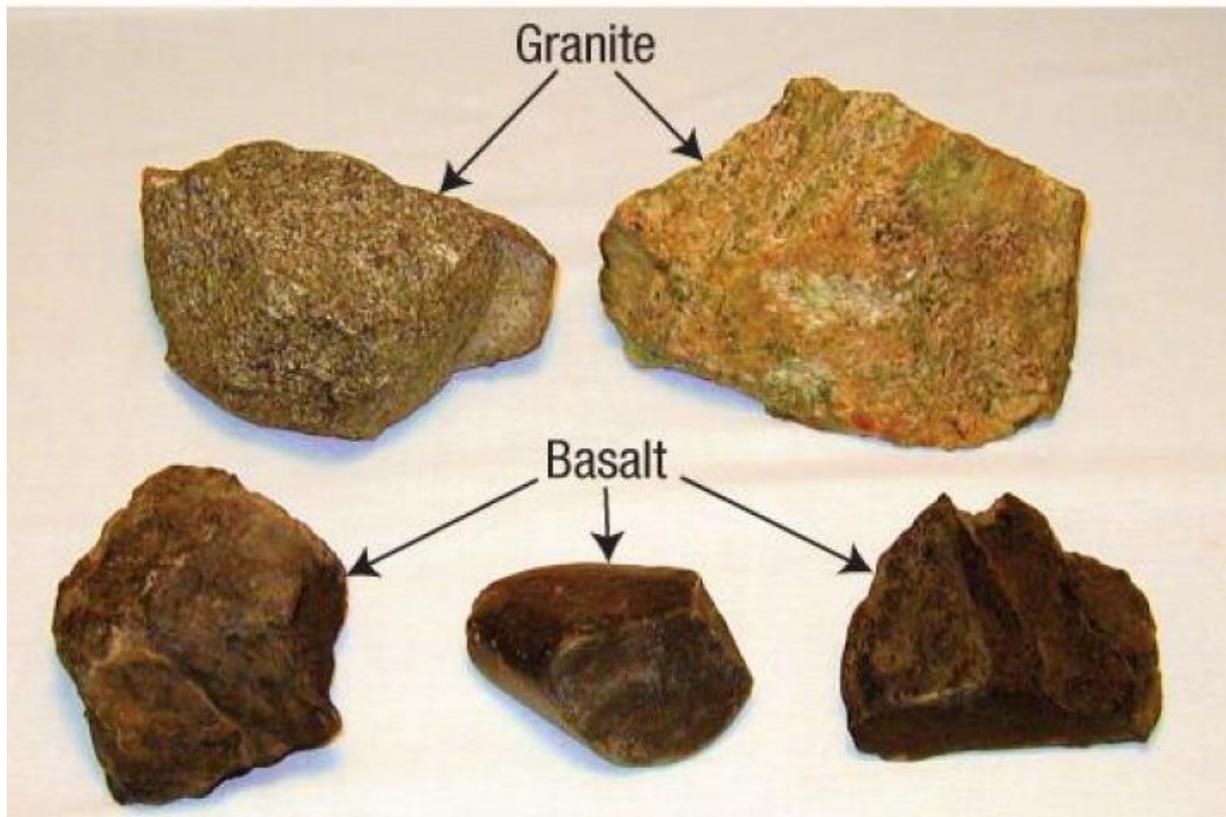


Figure 31. Granite et basalte (source : herboyves.blogspot.com)

### 1.2.3 Etude des magmas (Évolution chimique des magmas)

Les magmas qui alimentent les volcans proviennent tous d'une même source, le manteau, situé entre le noyau de la Terre et la croûte continentale ou océanique. Mais leur diversité montre que cette source n'est pas homogène. Les roches du manteau ont en effet une composition chimique variable, qui témoigne des conditions de leur formation et des mouvements de convection qui les animent.

Le manteau lui-même est inaccessible à l'observation, mais l'analyse de la composition chimique des roches éruptives, qui en sont issues, permet de formuler des hypothèses sur sa dynamique. Par leurs proportions ou celles de leurs isotopes, certains éléments présents en quantités même très faibles peuvent témoigner de la formation des magmas au sein du manteau et des processus qui s'y déroulent tout au long de l'histoire de la Terre (source : -iuem.univ-brest.fr).

### 1.3 Tectonique des plaques

La tectonique des plaques est une hypothèse selon laquelle la partie superficielle de la Terre est de plaques rigides flottant sur l'asthénosphère déformables (Foucault A. et Raoult J.F., 1984). Cette théorie confirme que les déformations de la lithosphère sont liées aux forces internes de la Terre et que ces déformations se traduisent par le découpage de la lithosphère en un certain nombre de plaques rigides (12 plaques principales) qui bougent les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère (fig. 32 et 33).

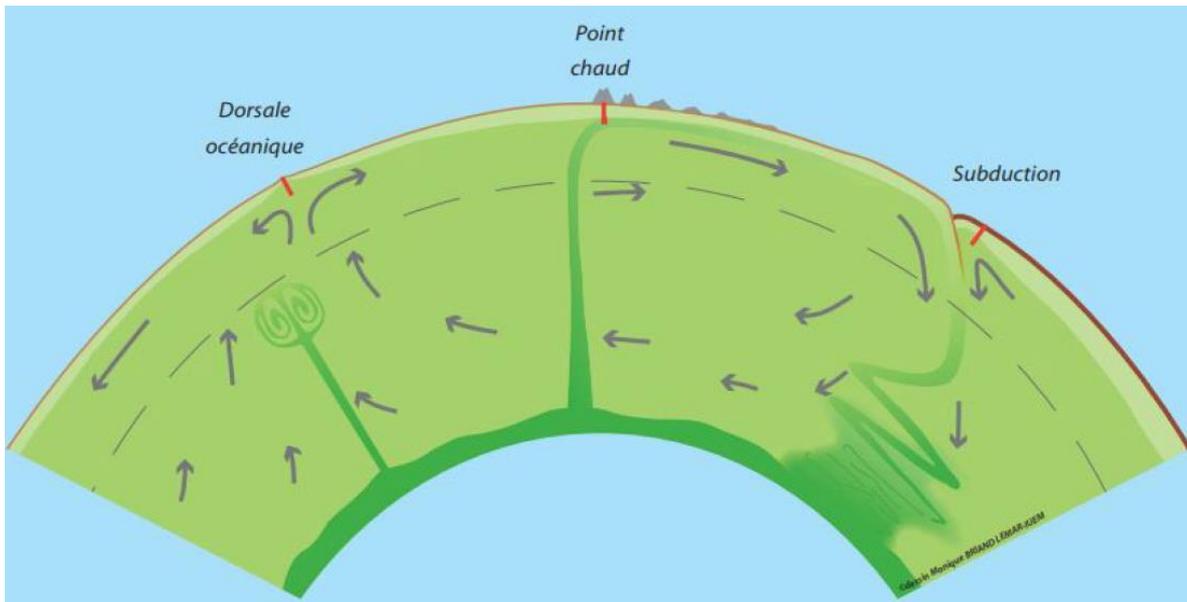
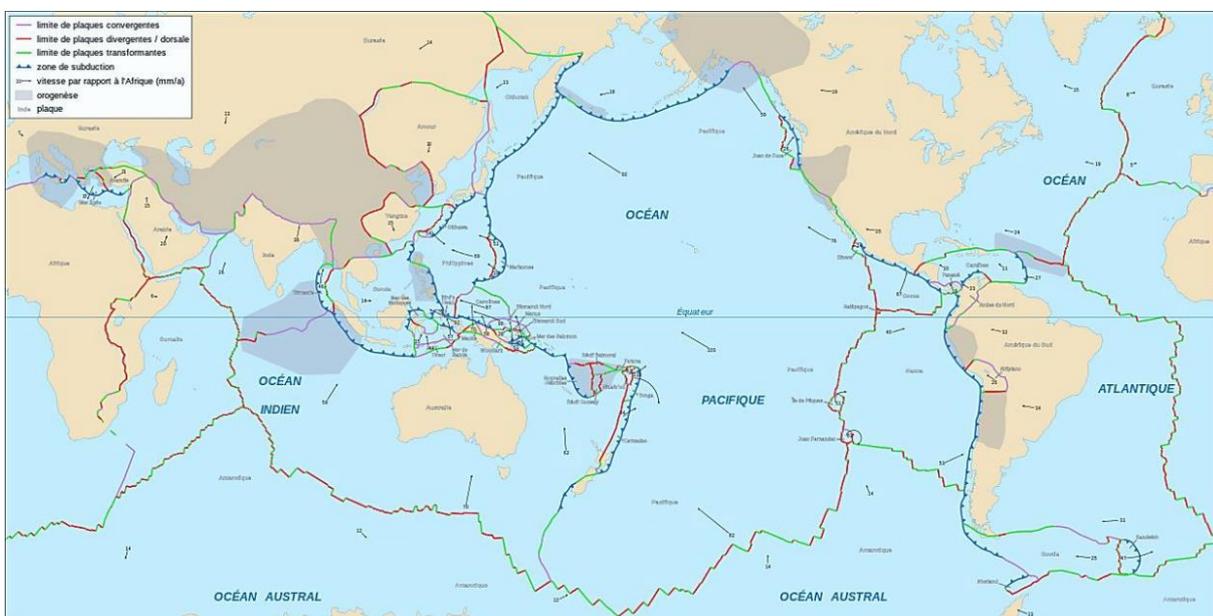


Figure 32. Un des modèles de la dynamique interne du manteau (Bourque P. A., 2010).



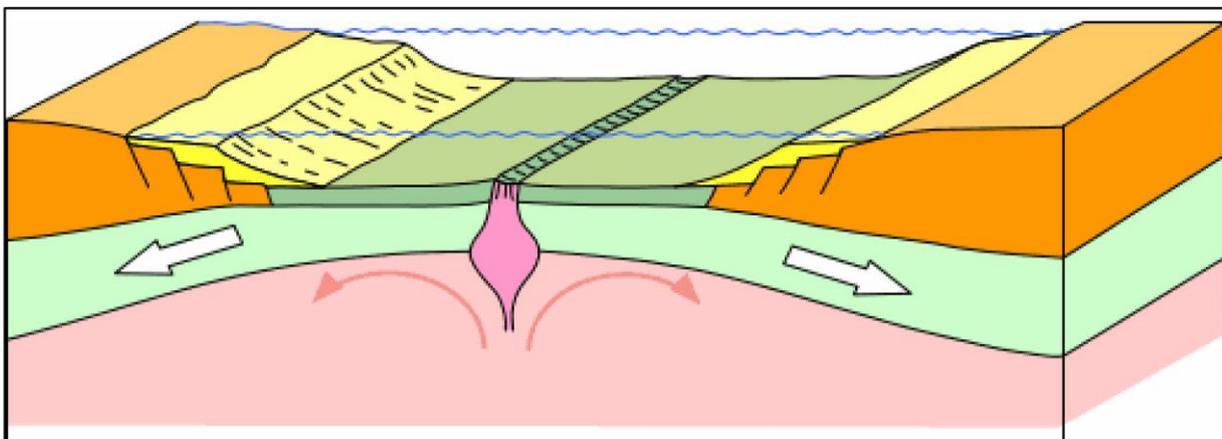
**Figure 33. Principales plaques continentales d'aujourd'hui et la direction dans laquelle elles se déplacent (source : etude-volcans.e-monsite.com).**

### 1.3.1 Zones d'accrétion ou d'expansion océanique

On appelle zone de divergence, d'accrétion ou d'expansion le lieu d'écartement de deux plaques lithosphériques. L'écartement des plaques (divergentes) s'effectue à partir des dorsales par émission continue de basalte sous-océanique, qui se présente généralement en coussins de lave. Ses zones sont considérées comme une zone de production de croûte océanique (fig. 34).

On distingue souvent deux types (Bouchardon J. L., 2005) :

- En milieu océanique, on parle de dorsale ou ride médio-océanique,
- En milieu continental on parle de rift,



**Figure 34. Zone d'accrétion ou d'expansion océanique (Bourque P. A., 2010)**

### 1.3.2 Zones de subductions

En contrepartie des zones d'accrétion, les plaques s'opposent en zones de convergence où une plaque plonge sous une autre, donnant naissance à la limite des deux plaques à une dépression allongée, de grandes dimensions et de grande profondeur, à flancs plus au moins inclinés qu'on appelle « fosse ».

**A-Un premier type de collision** résulte de la convergence entre deux plaques océaniques. Dans ce genre de collision, une des deux plaques (la plus dense, généralement la plus vieille) s'enfonce sous l'autre pour former une zone de subduction (fig. 35, 36 et 37) (Bourque P. A., 2010).

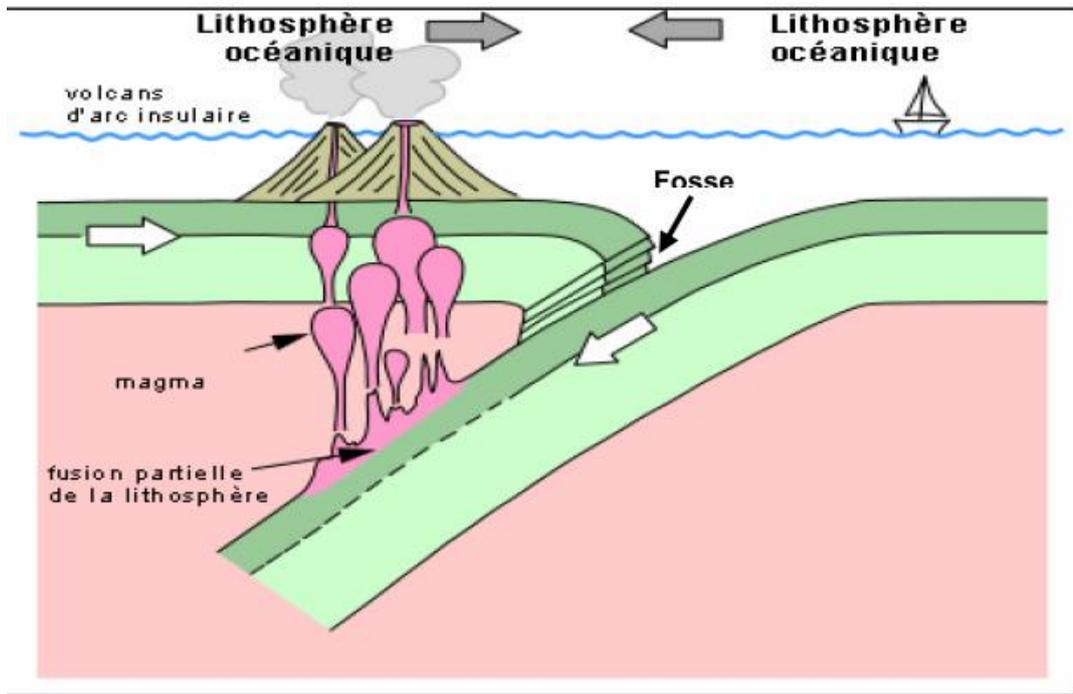
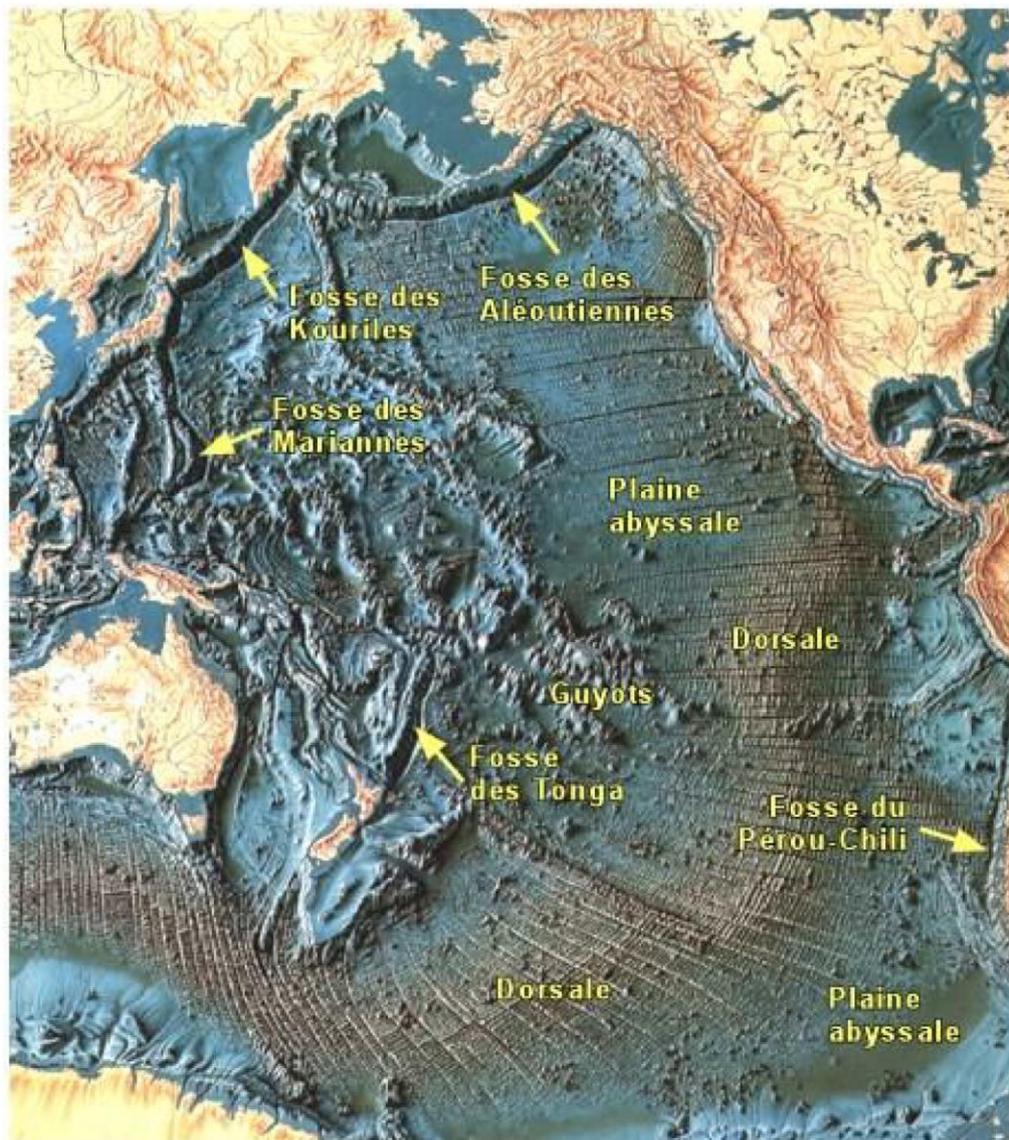
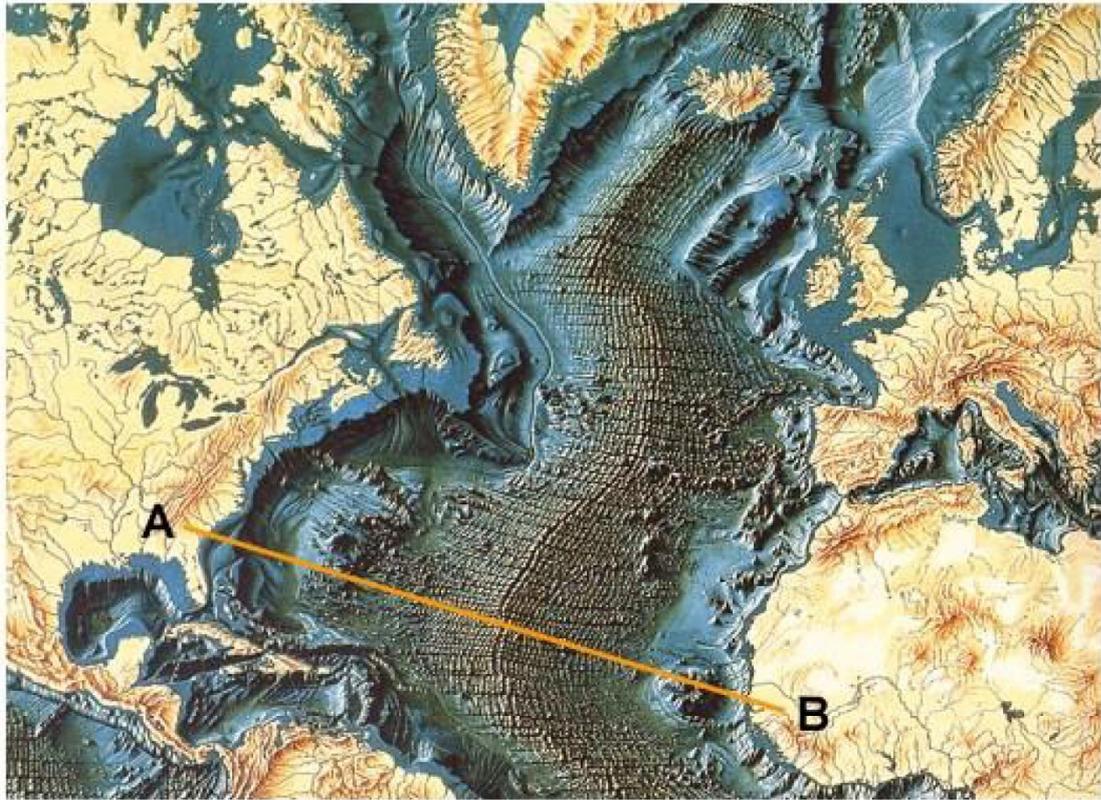


Figure 35. Zone de subduction Océanique-Océanique (Bourque P. A., 2010)



Cette carte des fonds océaniques du Pacifique montre les principaux éléments topographiques des fonds océaniques: pentes continentales, plaines abyssales, dorsales médio-océaniques, fosses profondes (F. des Aléoutiennes, 7822 m.; F. des Kouriles, 10542 m.; F. des Mariannes, 11034 m.; F. des Tonga, 10882 m.; F. du Pérou-Chili, 8066 m.), ainsi que d'innombrables pics sous-marins (guyots).

Figure 36. Grandes fosses des Mariannes, de Tonga, des Kouriles et des Aléoutiennes



Ce profil à travers l'Atlantique-Nord va du Cap Hatteras (USA) au Cap Vert (Afrique); il montre les principaux éléments du relief des fonds océaniques. Il n'y manque que les fosses profondes (jusqu'à 11 000 m) qu'on retrouve au pourtour du Pacifique.

Figure 37. Arc des Antilles bordant la mer des Caraïbes Atlantique.

**B- Un second type de collision est** le résultat de la convergence entre une plaque océanique et une plaque continentale. Dans ce type de collision, la plaque océanique plus dense s'enfonce sous la plaque continentale (fig. 38 et 39).

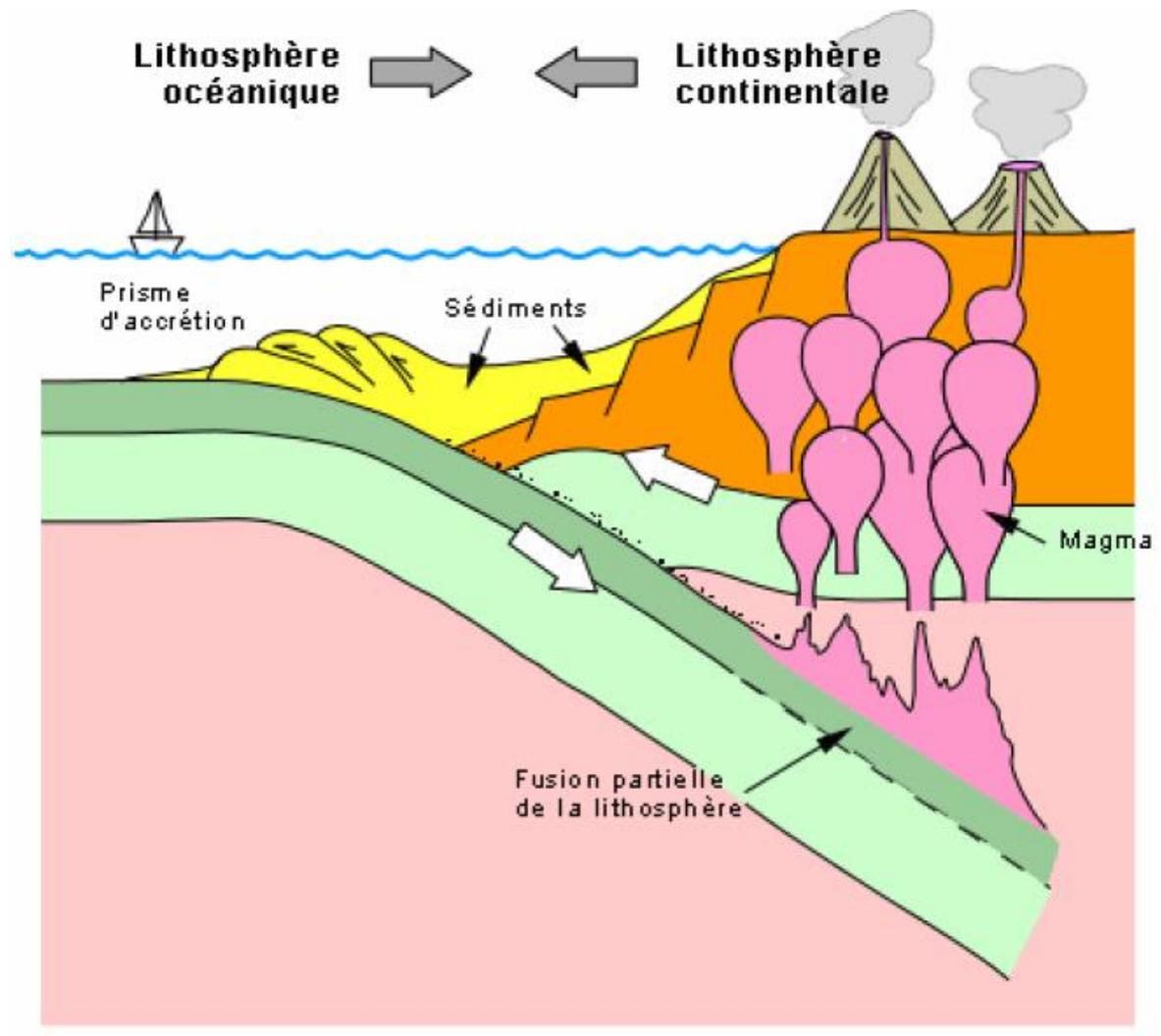


Figure 38. Zone de subduction Continentale-Océanique (Bourque P. A., 2010).

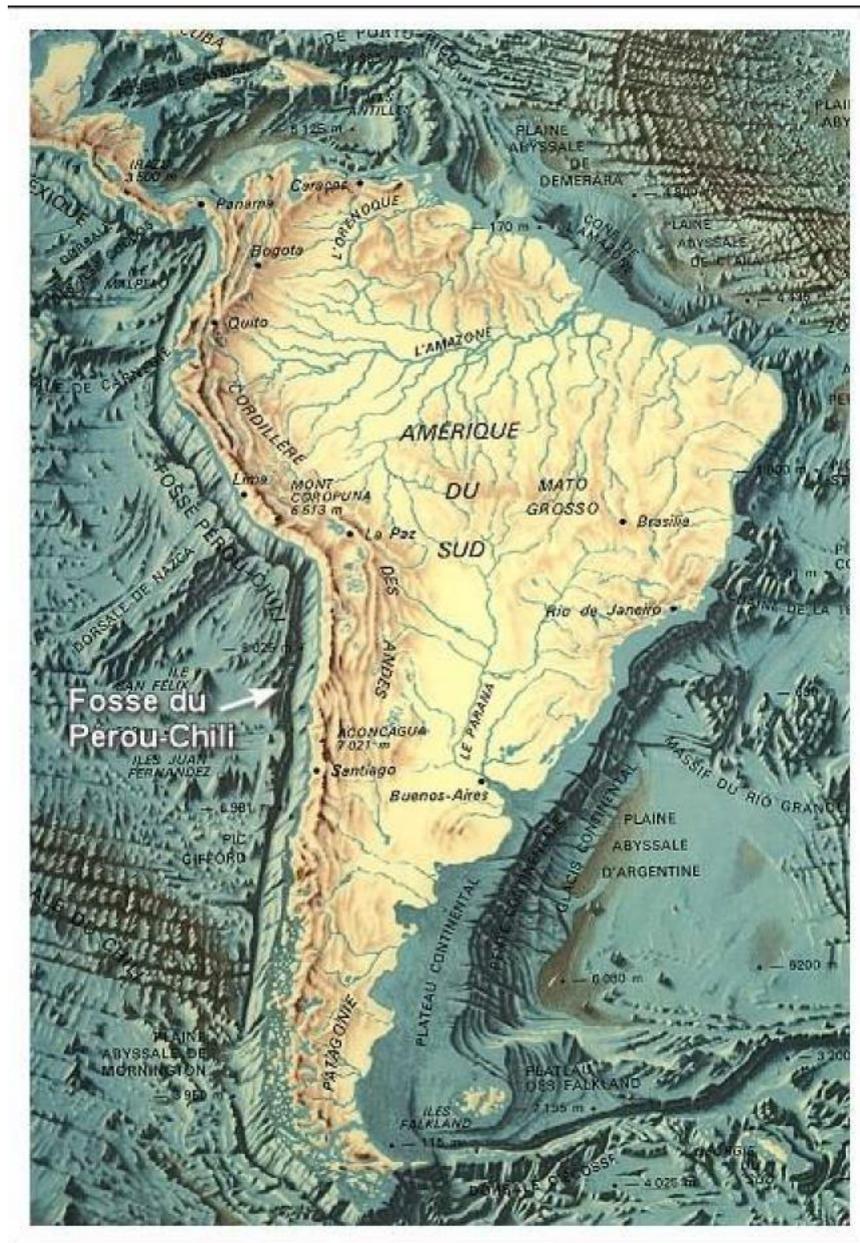


Figure 39. Cordillères des Andes en Amérique du Sud reliés à la fosse du Pérou-Chili (Bourque P. A., 2010)

C- Un troisième type de collision implique la convergence de deux plaques continentales. L'espace océanique se refermant au fur et à mesure du rapprochement de deux plaques continentales, le matériel sédimentaire du plancher océanique, plus abondant près des continents, et celui du prisme d'accrétion se concentrent de plus en plus ; le prisme croît (fig. 40 et 41).





En résumé, on peut noter que l'essentiel de la déformation qui se produit à la surface du globe est la conséquence du déplacement des plaques rigides les unes par rapport aux autres ; cette déformation est concentrée dans d'étroites « ceintures » orogénique, situées entre les plaques. La figure 43 montre les trois rides océaniques et deux zones de subduction ; la somme des vitesses d'écartement des crêtes est égale à la somme des vitesses de rapprochement des zones de subduction (Mattauer M., 1980).

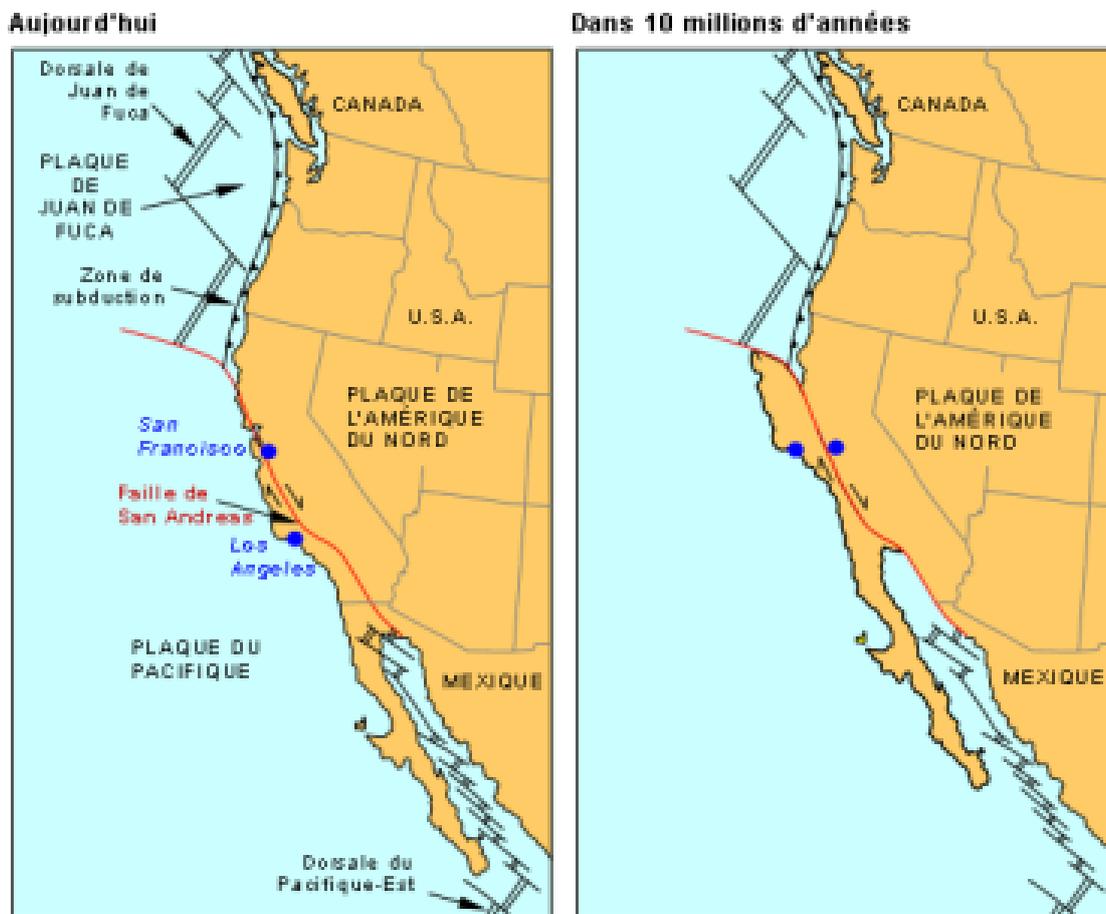


Figure 42. Faille transformante de San Andreas en Californie (Bourque P. A., 2010)

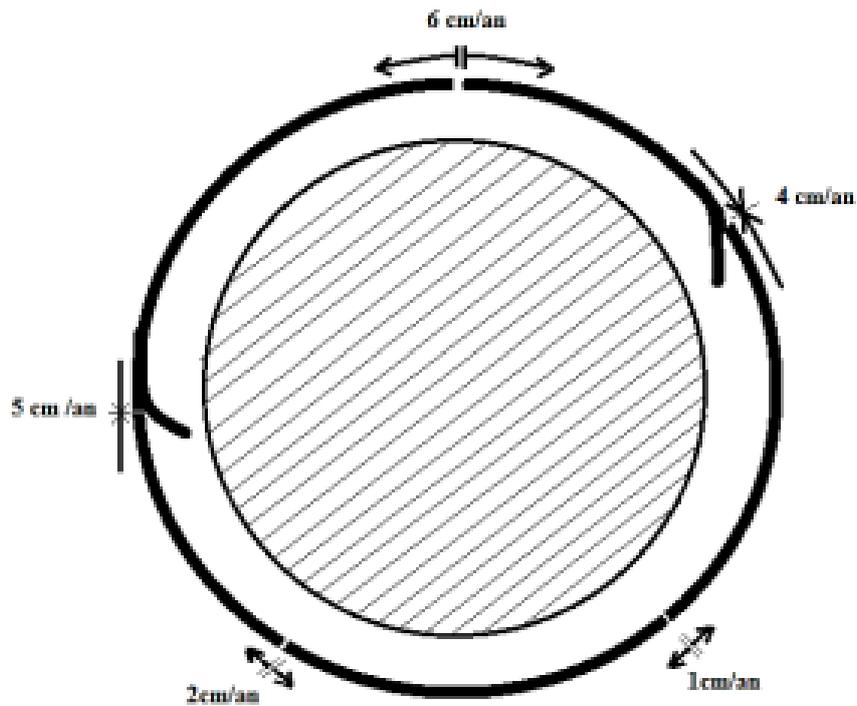


Figure 43. Coupe du globe, passant par son centre et montrant les grandes plaques lithosphériques (en noir) reposant sur l'asthénosphère (en blanc) (Bellair P. et Pomerol C., 1984).