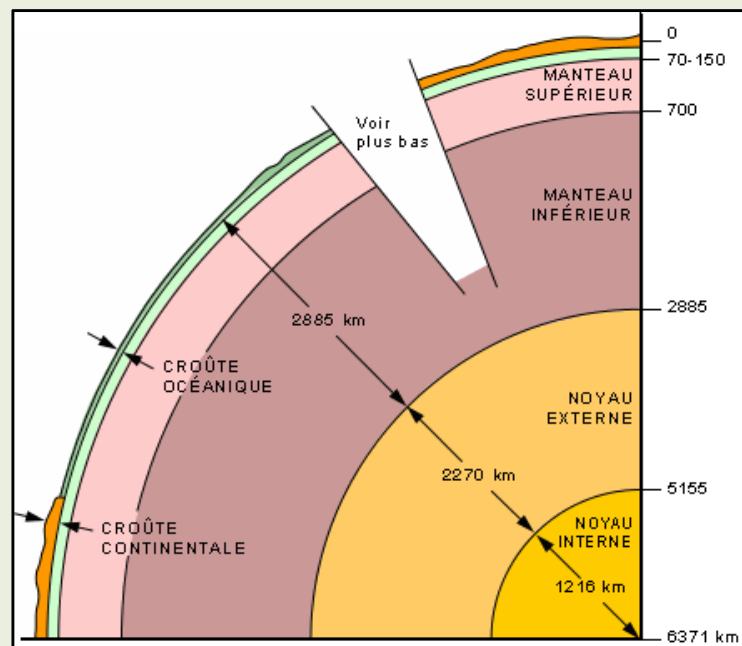


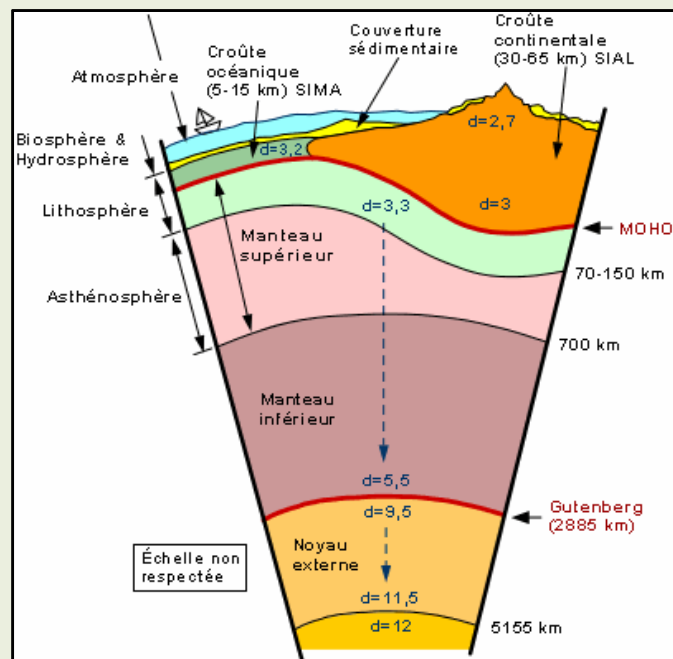
La Tectonique des Plaques

2^{ème} Année LMD
Génie Civil

La structure interne de la terre

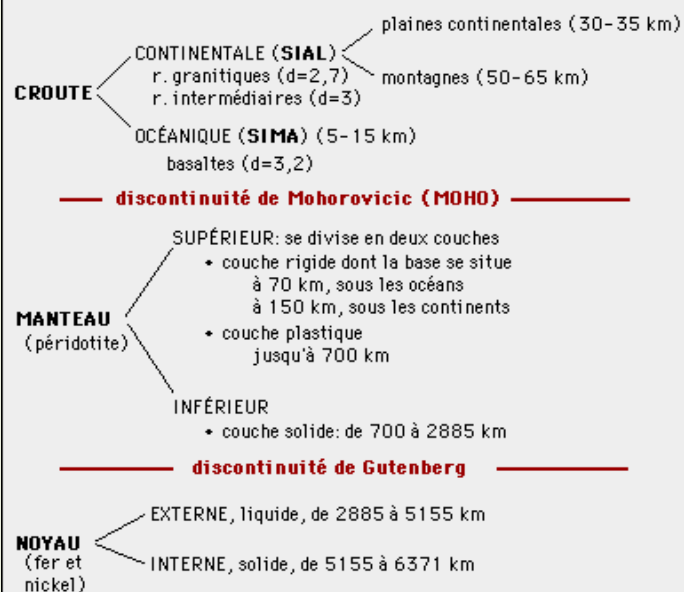


La structure interne de la terre

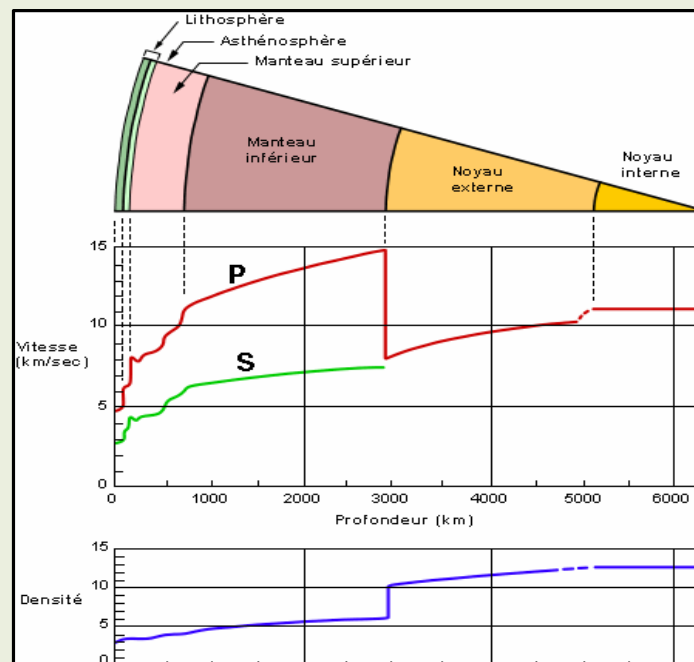


La structure interne de la terre

En résumé ...



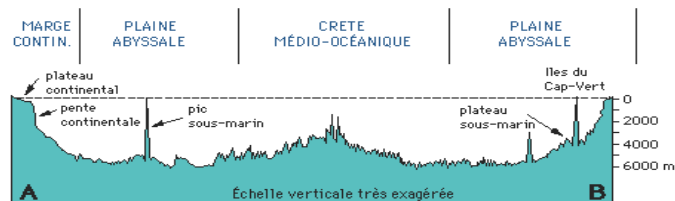
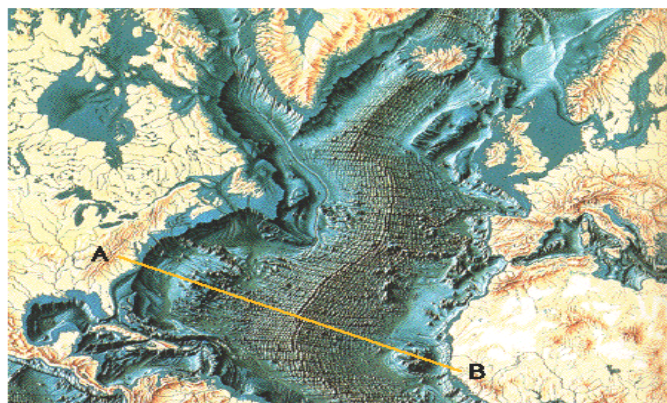
La structure interne de la terre



L'exploration des fonds océaniques

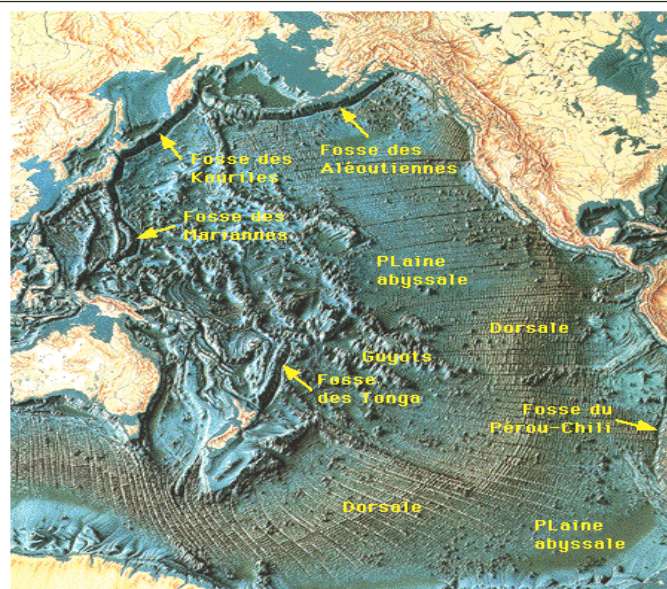
- Cette exploration a véritablement pris son essor durant la seconde grande guerre, pour des raisons stratégiques.
- Les connaissances acquises de cette exploration constituent un jalon important dans le questionnement qui a mené au développement des idées sur la dynamique des fonds océaniques.
- Grâce au sonar, on a obtenu une image assez réaliste du relief des fonds océaniques (Atlantique; Pacifique). Ces observations venaient interpeller les scientifiques. A quoi correspondent ces dorsales médio-océaniques? Ces fosses profondes autour du Pacifique? Ces pics sous-marins pouvant s'ériger jusqu'à la surface des mers dans les plaines abyssales?

Atlantique



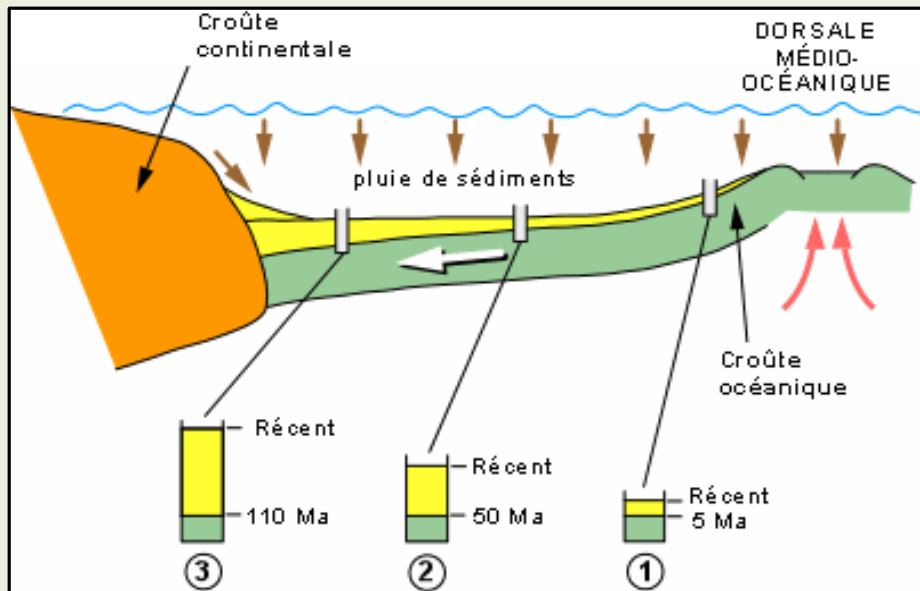
Ce profil à travers l'Atlantique-Nord va du Cap Hatteras (USA) au Cap Vert (Afrique); il montre les principaux éléments du relief des fonds océaniques. Il n'y manque que les fosses profondes (jusqu'à 11 000 m) qu'on retrouve au pourtour du Pacifique.

Le Pacifique

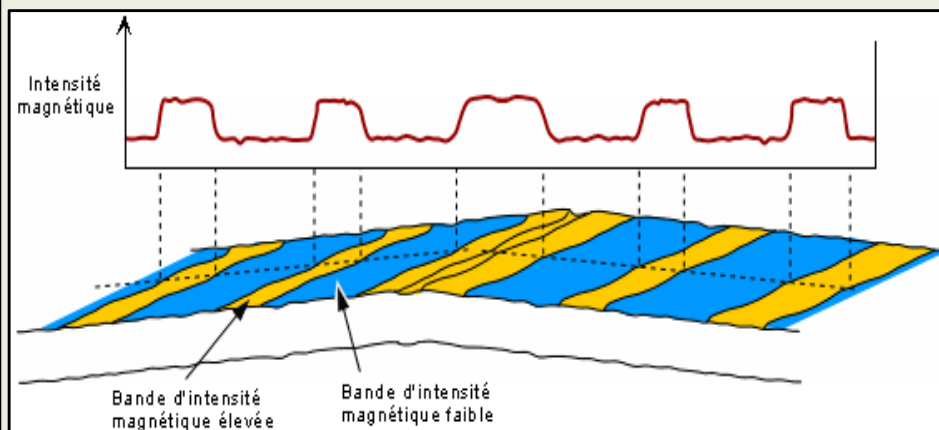


Cette carte des fonds océaniques du Pacifique montre les principaux éléments topographiques des fonds océaniques: pentes continentales, plaines abyssales, dorsales médio-océaniques, fosses profondes (F. des Aléoutiennes, 7822 m.; F. des Kouriles, 10542 m.; F. des Mariannes, 11034 m.; F. des Tonga, 10882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

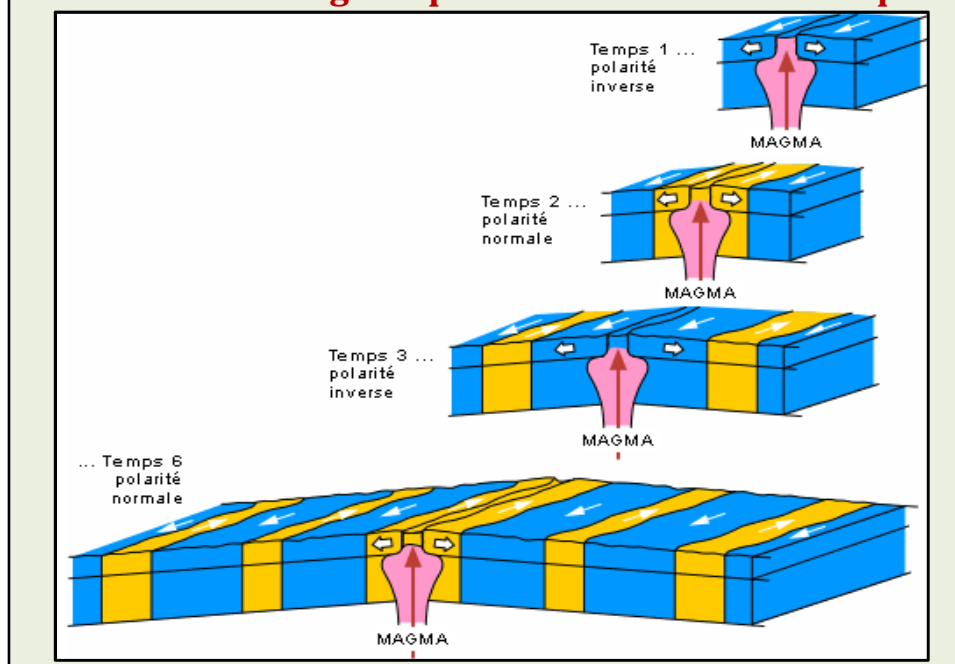
Les Programmes de forage DSDP (Deep Sea Drilling Project) (1970) et ODP (Ocean Drilling Program) (1979)



Les Anomalies magnétiques des Planchers océaniques



Les Anomalies magnétiques des Planchers océaniques

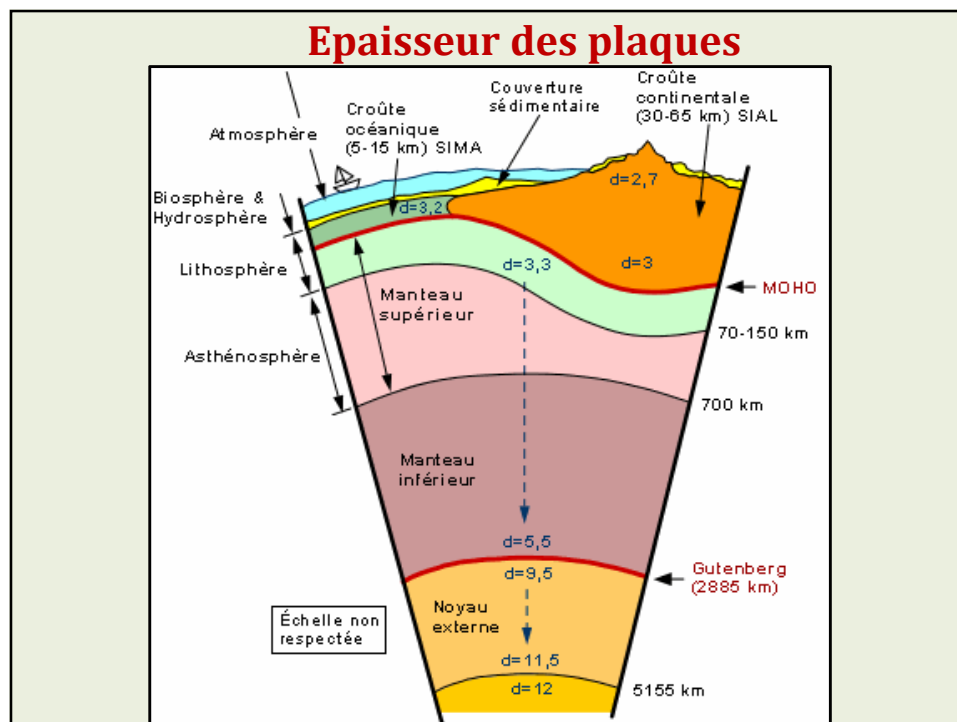


Historique

- o Arthur Holmes (1945), Warren Carey (1953); Harry Hess (1962); Tuzo Wilson; Vine, Matthews & Morley sont arrivés à la conclusion de *l'expansion des fonds océaniques*.
- o Il est difficile de cerner à qui appartient la paternité de la théorie « **tectonique des plaques** », mais disons que la première formulation est venue d'un jeune professeur de l'Université Princeton, **Jason Morgan**, qui a exposé ses idées dans une réunion scientifique de l'American Geophysical Union en 1967. Il y a présenté un exposé clairvoyant montrant que la terre est divisée en plaques rigides et que les mouvements d'étalement des fonds océaniques mis en évidence par ses prédécesseurs pouvaient être décrits à l'aide des règles mathématiques de la géométrie sur la sphère.
- o Entre-temps, les chercheurs anglais **Dan McKenzie** et **Robert Parker**, ignorant la proposition de Morgan, publient, dans la prestigieuse revue *Nature*, une théorie pratiquement identique, mais fondée sur des arguments tout à fait différents, principalement d'ordre sismologique.
- o Il semble donc que cette idée de la tectonique des plaques ait germé dans des cerveaux différents, à peu près en même temps, et de façon indépendante.

Une Théorie Planétaire: la Tectonique des Plaques

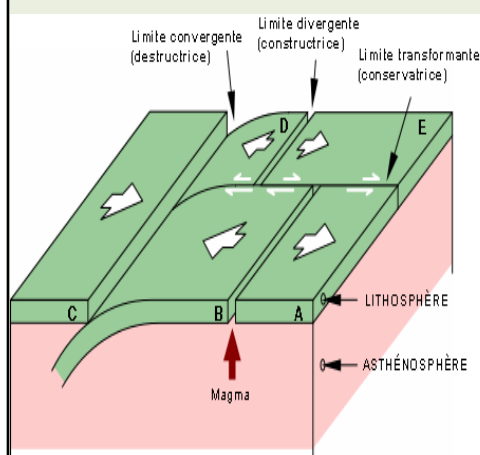
- La **tectonique** est cette partie de la géologie qui étudie la nature et les causes des déformations des ensembles rocheux, plus spécifiquement dans ce cas-ci, les déformations, à grande échelle, de la lithosphère terrestre.
- Une **plaque** est un volume rigide, peu épais par rapport à sa surface.
- La **tectonique des plaques** est une théorie scientifique planétaire unificatrice qui propose que les déformations de la lithosphère sont reliées 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 (14) qui bougent les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère.



Géométrie des 14 plaques lithosphériques



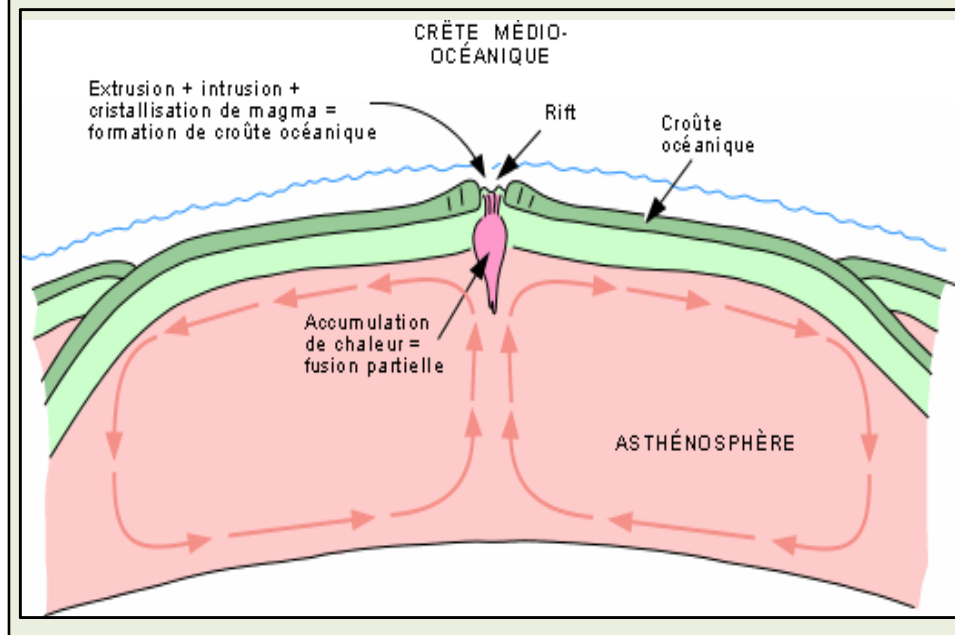
Mouvement des plaques



Ces mouvements définissent trois types de frontières entre les plaques:

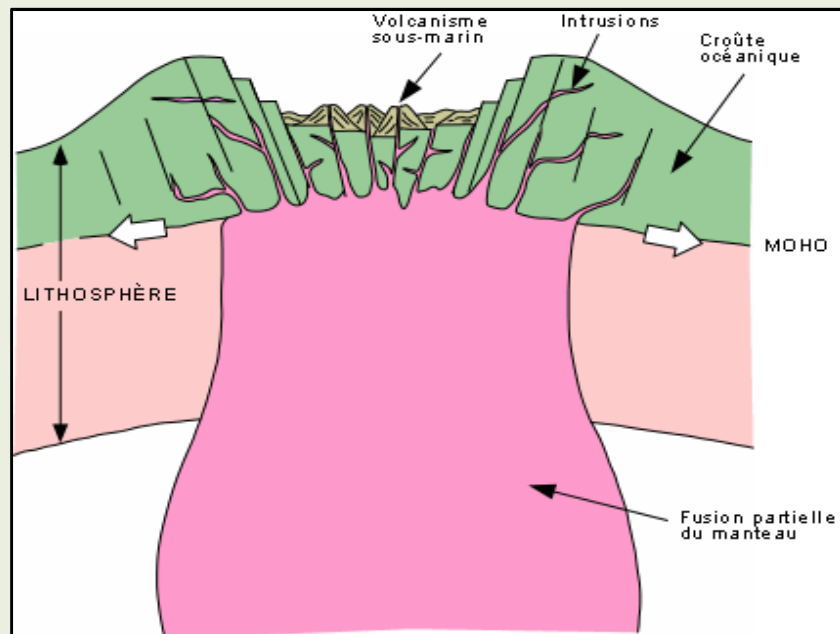
- 1) les frontières **divergentes**, là où les plaques s'éloignent l'une de l'autre et où il y a production de nouvelle croûte océanique; ici, entre les plaques A et B, et D et E;
- 2) les frontières **convergentes**, là où deux plaques entrent en collision, conséquence de la divergence; ici, entre les plaques B et C, et D et C;
- 3) les frontières **transformantes**, lorsque deux plaques glissent latéralement l'une contre l'autre, le long de failles; ce type de limites permet d'accommoder des différences de vitesses dans le déplacement de plaques les unes par rapport aux autres, comme ici entre A et E, et entre B et D, ou même des inversions du sens du déplacement, comme ici entre les plaques B et E.

Les frontières divergentes



- Il existe un flux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre.
- un flux causé par la désintégration radioactive de certains éléments chimiques et qui engendre des cellules de convection dans le manteau plastique (asthénosphère).
- A cause de cette convection, il y a concentration de chaleur en une zone où le matériel chauffé se dilate, ce qui explique le soulèvement correspondant à la dorsale océanique.
- La concentration de chaleur conduit à une fusion partielle du manteau qui produit du magma.
- La convection produit, dans la partie rigide de l'enveloppe de la terre (lithosphère), des forces de tension qui font que deux plaques divergent; elle est le moteur du tapis roulant, entraînant la lithosphère océanique de part et d'autre de la dorsale.
- Entre ces deux plaques divergentes, la venue de magma crée de la nouvelle croûte océanique.

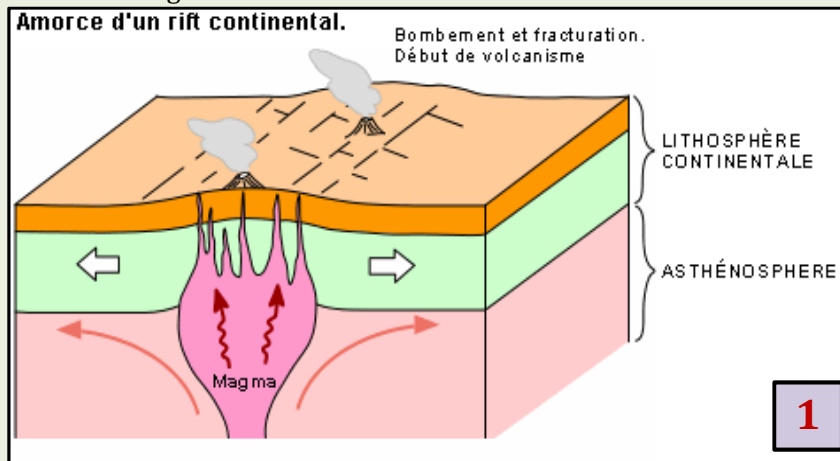
Détail d'une dorsale



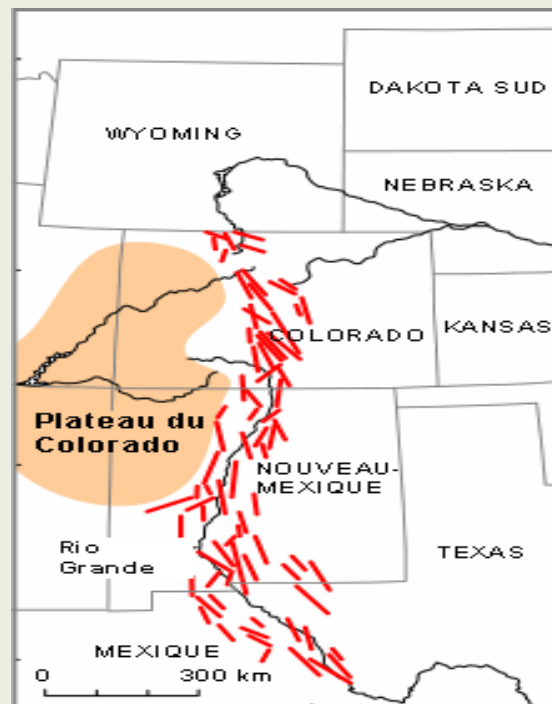
- o L'étalement des fonds océaniques crée dans la zone de dorsale, des tensions qui se traduisent par des failles d'effondrement et des fractures ouvertes, ce qui forme au milieu de la dorsale, un fossé d'effondrement qu'on appelle un rift océanique.
- o Le magma produit par la fusion partielle du manteau s'introduit dans les failles et les fractures du rift. Une partie de ce magma cristallise dans la lithosphère, alors qu'une autre est expulsée sur le fond océanique sous forme de lavé et forme des volcans sous-marins.
- o C'est ce magma cristallisé qui forme de la nouvelle croûte océanique à mesure de l'étalement des fonds.

Les schémas illustrant les quatre étapes de la formation d'un océan 1

- L'accumulation de chaleur sous une plaque continentale cause une dilatation de la matière qui conduit à un bombement de la lithosphère.
- Il s'ensuit des forces de tension qui fracturent la lithosphère et amorcent le mouvement de divergence.
- Le magma viendra s'infiltrer dans les fissures, ce qui causera par endroits du volcanisme continental; les laves formeront des volcans ou s'écouleront le long des fissures.

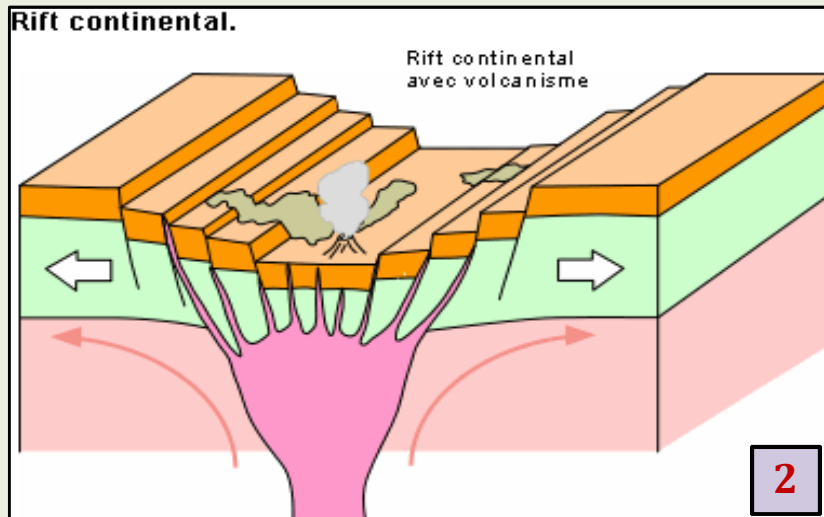


Un exemple de ce premier stade précurseur de la formation d'un océan est la vallée du Rio Grande aux USA.



Les schémas illustrant les quatre étapes de la formation d'un océan 2

- La poursuite des tensions produit un étirement de la lithosphère; il y aura alors effondrement en escalier.
- ce qui produit une vallée appelée un **rift continental**.
- Il y aura des volcans et des épanchements de laves le long des fractures.



Le **Grand Rift** **africain** en Afrique orientale en est un bon exemple.

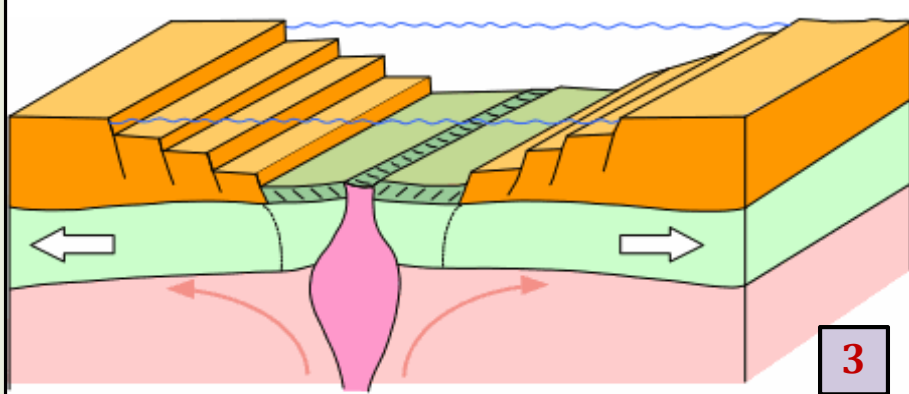


Le Grand Rift africain entaille l'est du continent au sud de la Mer Rouge. Il s'étend, du canal du Mozambique au sud, jusqu'aux bouches de la Mer Rouge au nord; il se divise en deux branches au nord du lac Malawi. On y est à un stade un peu plus avancé que le long du Rio Grande. Déjà des vallées profondes et larges se sont creusées, avec de grands lacs, tel le lac Tanganyika, et de grands volcans (points verts), comme le Kilimanjaro. Progressivement, ces vallées s'élargiront, s'enfonceront et seront envahies par la mer pour former une mer linéaire; d'ailleurs, les eaux marines commencent déjà à envahir la partie nord. Quant à elle, la Mer Rouge constitue l'exemple classique de mer linéaire; une dorsale médiane y fabrique de la croûte océanique. Les flèches indiquent les tensions qui affectent la lithosphère continentale dans l'est de l'Afrique.

Les schémas illustrant les quatre étapes de la formation d'un océan 3

- Avec la poursuite de l'étirement, le rift s'enfonce sous le niveau de la mer et les eaux marines envahissent la vallée.
- Deux morceaux de lithosphère continentale se séparent et s'éloignent progressivement l'un de l'autre.
- Le volcanisme sous-marin forme un premier plancher océanique basaltique (croûte océanique) de part et d'autre d'une dorsale embryonnaire; c'est le stade de mer linéaire, comme par exemple la Mer Rouge.

Premier plancher océanique - Mer linéaire.

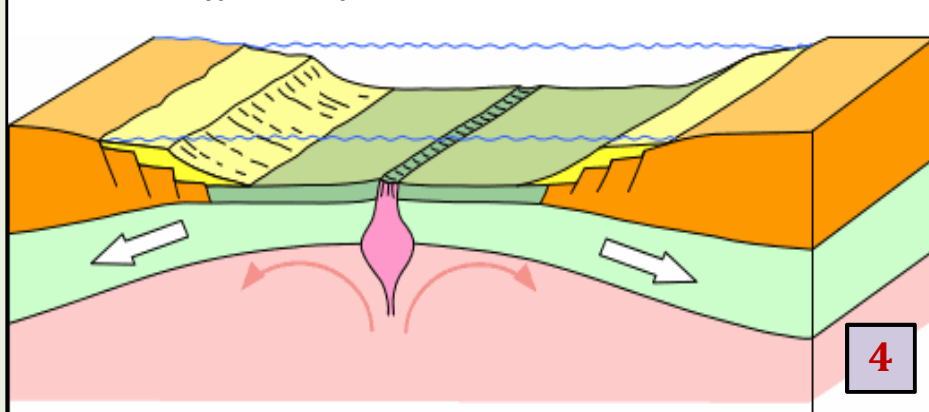


Les schémas illustrant les quatre étapes de la formation d'un océan 4

L'élargissement de la mer linéaire par l'étalement des fonds océaniques conduit à la formation d'un océan de type Atlantique, avec :

- sa dorsale bien individualisée,
- ses plaines abyssales
- et ses plateaux continentaux correspondant à la marge de la croûte continentale.

Océan de type Atlantique

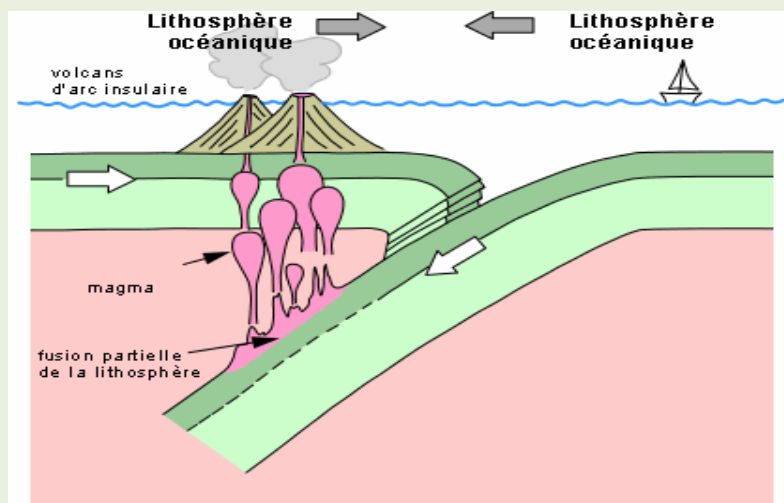


Les frontières convergentes

- Aujourd'hui, physiciens et astro-physiciens sont assez d'accord pour dire que la terre n'est pas en expansion comme le proposait Carey.
- Si la surface de la terre est un espace fini, le fait que les plaques grandissent aux frontières divergentes implique qu'il faudra détruire de la lithosphère ailleurs pour maintenir constante la surface terrestre.
- Cette destruction se fait aux frontières convergentes qui, comme le nom l'indique, marquent le contact entre deux plaques lithosphériques qui convergent l'une vers l'autre.
- La destruction de plaque se fait par l'enfoncement dans l'asthénosphère d'une plaque sous l'autre plaque, et par la digestion de la portion de plaque enfoncée dans l'asthénosphère.
- Les résultats (séismes, volcans, chaînes de montagnes, déformations) diffèrent selon la nature des plaques (océaniques ou continentales) qui entrent en collision.

Convergence entre deux plaques océaniques

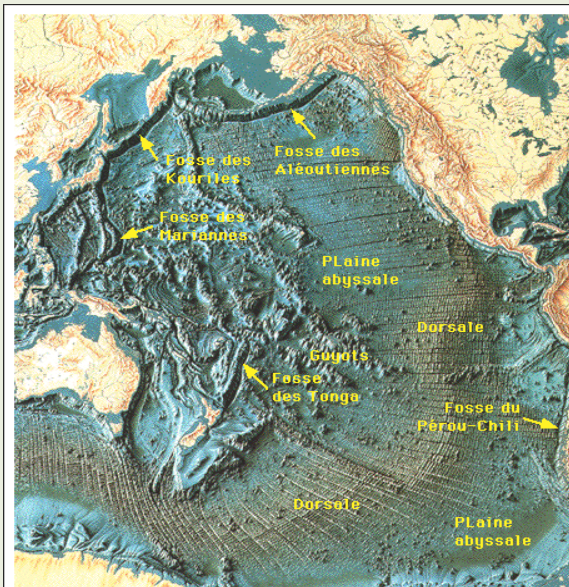
Un **premier type de collision** résulte de la convergence entre deux plaques océaniques. Dans ce genre de collision, une des deux plaques (la plus dense, généralement la plus vieille) s'enfonce sous l'autre pour former une zone de subduction (littéralement: conduire en-dessous).



Conséquences

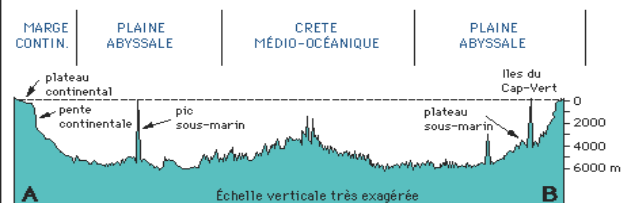
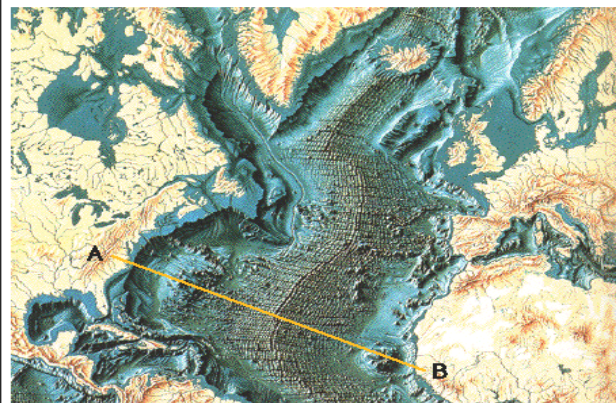
- On enfonce du matériel moins dense ($d \sim 3,2$) dans du matériel plus dense ($d \sim 3,3$), du matériel moins chaud dans du matériel plus chaud.
- L'asthénosphère "digère" peu à peu la plaque lithosphérique. Il se produit un phénomène de fusion partielle de la plaque engloutie.
- Le magma résultant (liquide), moins dense que le milieu ambiant, monte vers la surface.
- Une grande partie de ce magma reste emprisonnée dans la lithosphère, mais une partie est expulsée à la surface, produisant des volcans sous la forme d'une série d'îles volcaniques (arc insulaire volcanique) sur le plancher océanique.
- De bons exemples de cette situation se retrouvent dans le [Pacifique-Ouest](#), avec les grandes fosses des Mariannes, de Tonga, des Kouriles et des Aléoutiennes, chacune possédant leur arc insulaire volcanique, ainsi que la fosse de Puerto Rico ayant donné naissance à l'arc des Antilles bordant la mer des Caraïbes [Atlantique](#).

Les grandes fosses du pacifique



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, 10662 m.; F. du Pérou-Chili, 8066 m.), ainsi que d'innombrables pics sous-marins (guyots).

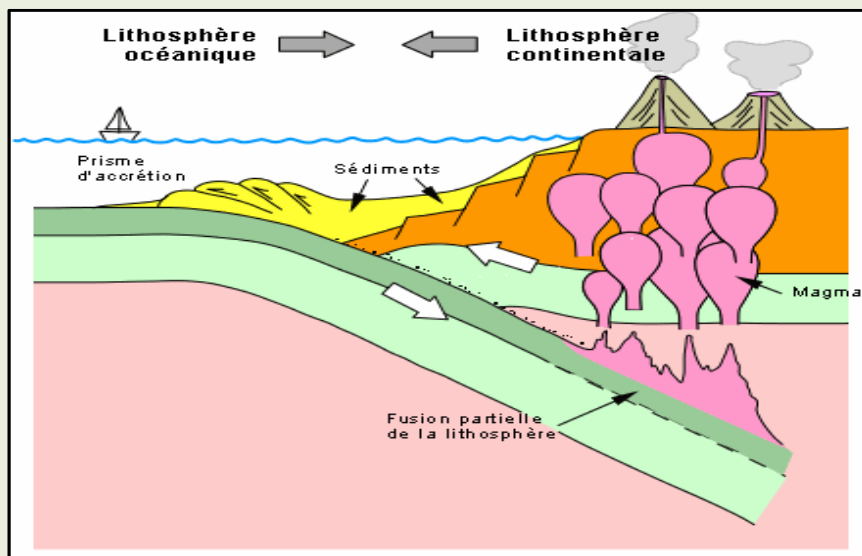
Fosse de Puerto Rico
ayant donné naissance à
l'arc des Antilles
bordant la mer des
Caraïbes Atlantique



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.

Convergence entre une plaque océanique et une plaque continentale

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.



Conséquences

- o Les basaltes de la plaque océanique et les sédiments du plancher océanique s'enfoncent dans du matériel de plus en plus dense.
- o Rendue à une profondeur excédant les 100 km, la plaque est partiellement fondue.
- o Comme dans le cas précédent, la plus grande partie du magma restera emprisonnée dans la lithosphère (ici continentale); le magma qui aura réussi à se frayer un chemin jusqu'à la surface formera une chaîne de volcans sur les continents (arc volcanique continental).
- o De bons exemples de cette situation se retrouvent à la marge du Pacifique-Est, comme les volcans de la Chaîne des Cascades (Cascade Range) aux USA (incluant le Mont St. Helens) résultat de la subduction dans la fosse de Juan de Fuca et ceux de la Cordillères des Andes en Amérique du Sud reliés à la fosse du Pérou-Chili.
- o Dans une phase avancée de la collision, le matériel sédimentaire qui se trouve sur les fonds océaniques et qui est transporté par le tapis roulant vient se concentrer au niveau de la zone de subduction pour former un prisme d'accrétion.

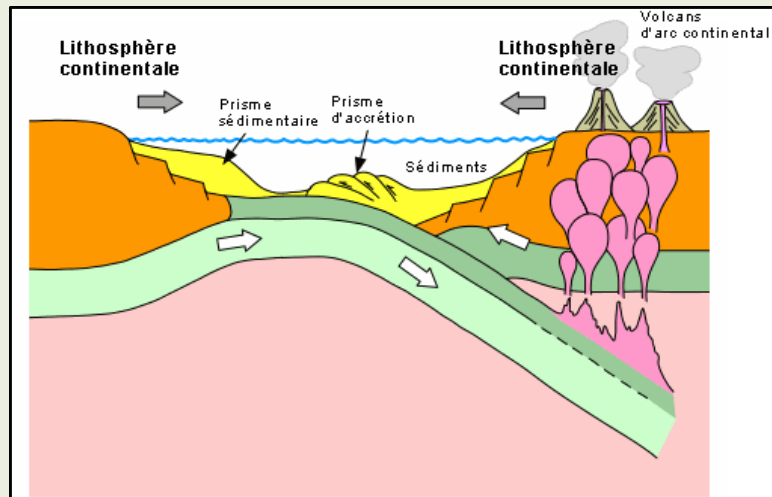
Chaîne des Cascades (Cascade Range) aux USA (incluant le Mont St. Helens) résultat de la subduction dans la fosse de Juan de Fuca et ceux de la **Cordillères des Andes** en Amérique du Sud reliés à la fosse du Pérou-Chili.



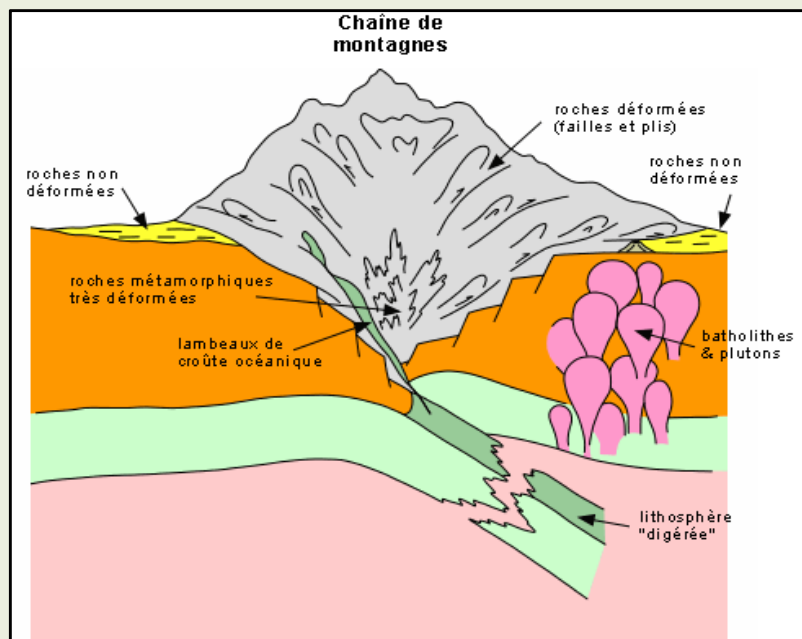
Cette carte des fonds océaniques du Pacifique montre les principaux éléments topographiques des fonds océaniques: pentes continentales, plaines abyssales, dorsales médio-océaniques, fosses profondes (F. des Aléoutiennes, 7822 m.; F. des Kouriles, 10542 m.; F. des Mariannes, 11034 m.; F. des Tonga, 10862 m.; F. du Pérou-Chili, 8066 m.), ainsi que d'innombrables pics sous-marins (guyots).

Convergence de deux plaques continentales

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.

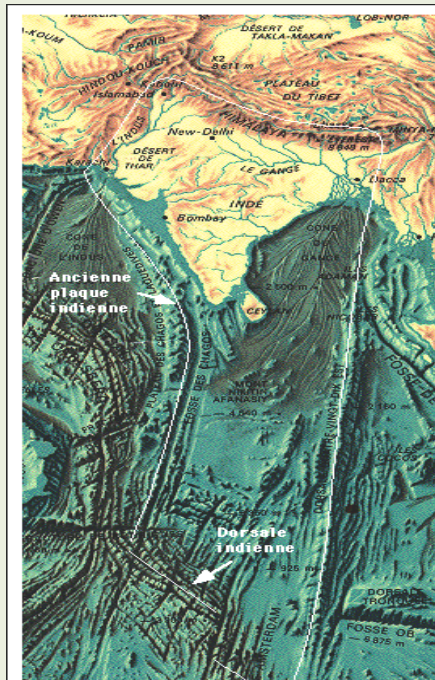


Formation d'une chaîne de montagnes



- Lorsque les deux plaques entrent en collision, le mécanisme se coince: le moteur du déplacement (la convection dans le manteau supérieur) n'est pas assez fort pour enfoncer une des deux plaques dans l'asthénosphère à cause de la trop faible densité de la lithosphère continentale par rapport à celle de l'asthénosphère.
- Tout le matériel sédimentaire est comprimé et se soulève pour former une chaîne de montagnes où les roches sont plissées et faillées.
- Des lambeaux de la croûte océanique peuvent même être coincés dans des failles.
- C'est la soudure entre deux plaques continentales pour n'en former qu'une seule.
- Toute les grandes chaînes de montagnes plissées ont été formées par ce mécanisme. Un bon exemple récent de cette situation, c'est la soudure de l'Inde au continent asiatique, il y a à peine quelques millions d'années, avec la formation des [Himalayas](#).

Formation des Himalayas

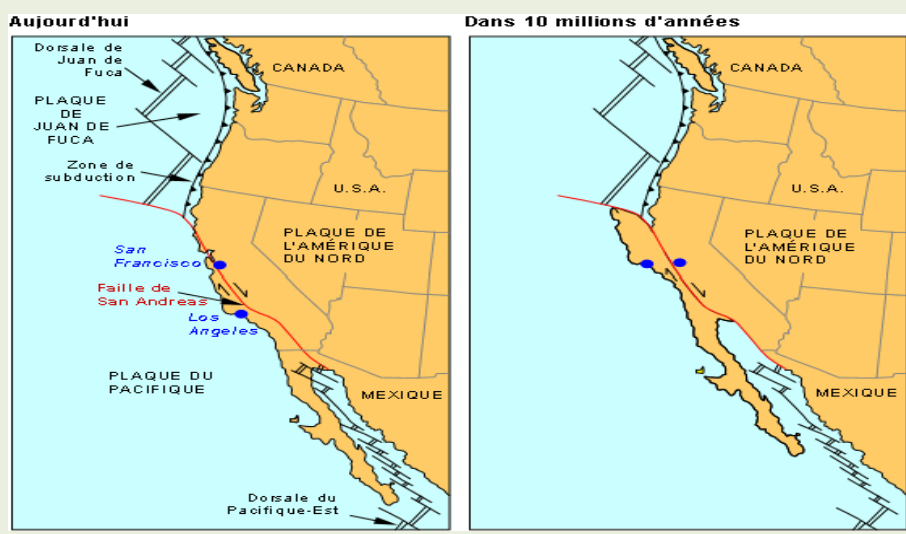


Il y a quelques millions d'années à peine, l'Inde est entrée en collision avec le continent asiatique. Il en est résulté une haute chaîne de montagnes plissée, l'Himalaya. Plus précisément, on devrait dire que l'ancienne plaque indienne est venue se souder à la plaque eurasiatique. Cette ancienne plaque était composée de lithosphère continentale (l'Inde actuel) et de lithosphère océanique (cette portion entre l'Inde et la dorsale indienne au sud, bordée à l'ouest par la ride des Chagos et à l'est par la ride Quatre-Vingt-Dix Est). La migration vers le nord de l'Inde s'est amorcée il y a quelques 130 millions d'années, à la faveur de formation de nouvelle croûte océanique à la dorsale indienne. Les deux rides actuelles des Chagos et Quatre-Vingt-Dix Est correspondent à d'anciennes failles transformantes le long desquelles a glissé la plaque indienne.

Les frontières transformantes

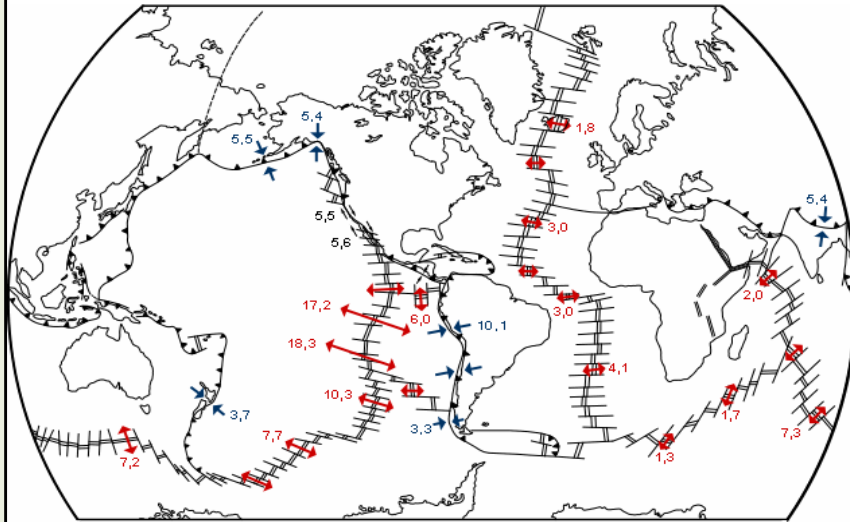
- Les frontières transformantes correspondent à de grandes fractures qui affectent toute l'épaisseur de la lithosphère; on utilise plus souvent le terme de failles transformantes.
- Elles se trouvent le plus souvent, mais pas exclusivement, dans la lithosphère océanique.
- Ces failles permettent d'accommoder des différences dans les vitesses de déplacement ou même des mouvements opposés entre les plaques, ou de faire le relais entre des limites divergentes et convergentes (ces failles transforment le mouvement entre divergence et convergence, de là leur nom de failles transformantes).
- La fameuse faille de San Andreas en Californie est un bon exemple de cette situation: elle assure le relais du mouvement entre la limite divergente de la dorsale du Pacifique-Est, la limite convergente des plaques Juan de Fuca-Amérique du Nord et la limite divergente de la dorsale de Juan de Fuca.

- Elle affecte à la fois la lithosphère océanique et la lithosphère continentale.
- Elle constitue la limite entre trois plaques: plaque de Juan de Fuca, plaque de l'Amérique du Nord et plaque du Pacifique.
- Elle présente aussi l'inconvénient de traverser la ville de San Francisco! Au rythme actuel du déplacement ($\sim 5,5$ cm/an), la ville de Los Angeles sera au droit de San Francisco dans 10 Ma.



Les taux de divergence et de convergence ne sont pas identiques partout. La divergence varie de 1,8 à 4,1 cm/an dans l'Atlantique et de 7,7 à plus de 18 cm/an dans le Pacifique. La convergence se fait à raison de 3,7 à 5,5 cm/an dans le Pacifique. À noter le taux de déplacement latéral relatif le long de la faille de San Andreas en Californie ($\sim 5,5$ cm/an).

La longueur des flèches est proportionnelle aux taux de divergence ou de convergence exprimés en cm /année.



Résumé 1

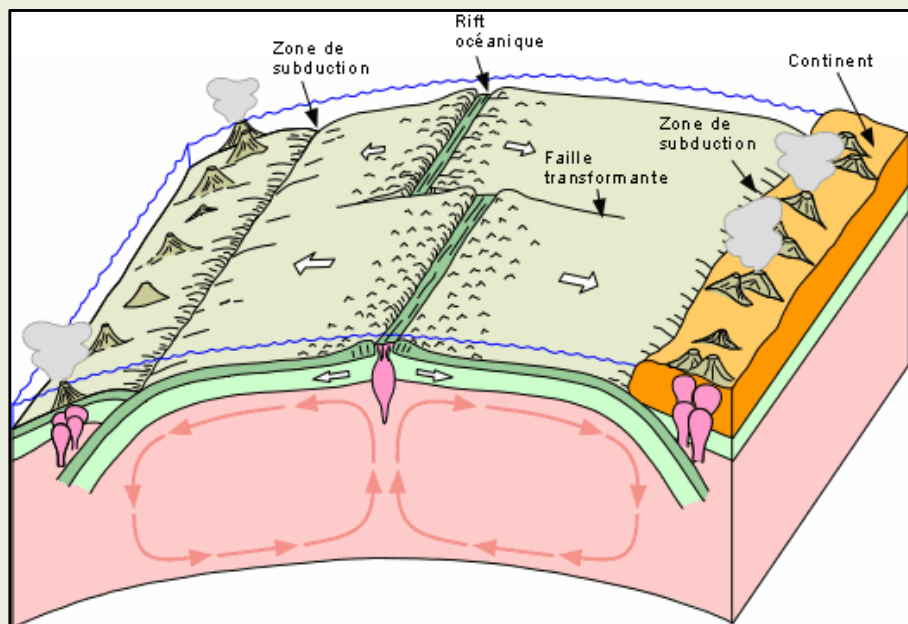
- La terre est un système où toutes les pièces, tous les éléments, forment une grande machine mue par la thermodynamique.
- Le moteur est constitué par les grandes cellules de convection dans le manteau, qui sont le résultat du flux de chaleur qui va du centre vers l'extérieur de la terre, un flux de chaleur qui est relié à la décomposition des éléments radioactifs contenus dans les minéraux constitutifs de la terre.
- Ces cellules concentrent de la chaleur dans leur partie ascendante, ce qui cause une fusion partielle du manteau tout à fait supérieur et une expansion des matériaux.²
- C'est cette expansion qui produit une dorsale médio-océanique linéaire.

Résumé 2

- L'écoulement de l'asthénosphère sous la lithosphère rigide entraîne cette dernière; il en découle des tensions au niveau de la dorsale, causant la divergence et le magmatisme associé. Ainsi, il y a formation continue de nouvelle lithosphère océanique au niveau de la dorsale et élargissement progressif de l'océan.
- En contrepartie, puisque le globe terrestre n'est pas en expansion, il faut détruire de la lithosphère, ce qui se fait par enfoncement de lithosphère océanique dans les zones de subduction qui correspondent aux fosses océaniques profondes pouvant atteindre les 11 km (fosse des Mariannes).
- Les dorsales sont disséquées par des failles dites transformantes pour accommoder des différences de vitesses de divergence.

A noter que l'iconographie de la tectonique des plaques présente toujours les dorsales comme des droites sur un plan. En fait, il faut bien comprendre que, la terre étant une sphère, le parcours de la dorsale est linéaire sur la surface de cette sphère. On représente aussi les cellules de convection en deux dimensions; il faut faire un effort d'abstraction pour se les représenter en trois dimensions, à l'intérieur de la sphère.

Mouvement des plaques et phénomènes géologiques



Merci pour votre attention