

Leçon n°13

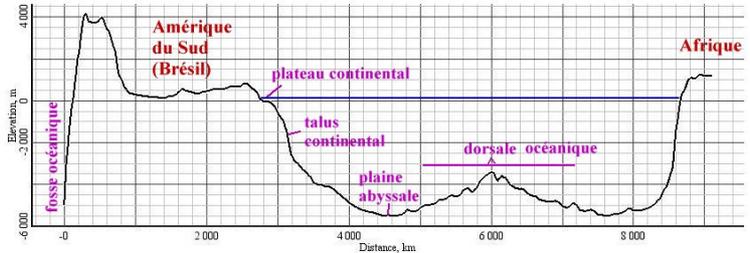
Les composantes d'un modèle convectif : notion de plaques tectoniques

I. Arguments en faveur d'un mouvement convectif (activités n° 26 et n°27)

1) Apports de la topographie des fonds océaniques et de la géothermie dans la mise en évidence d'une ascendance du mouvement convectif (=> activité n° 26)

a) Apports de la topographie des fonds océaniques

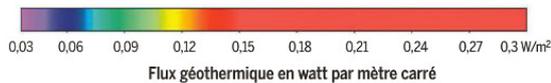
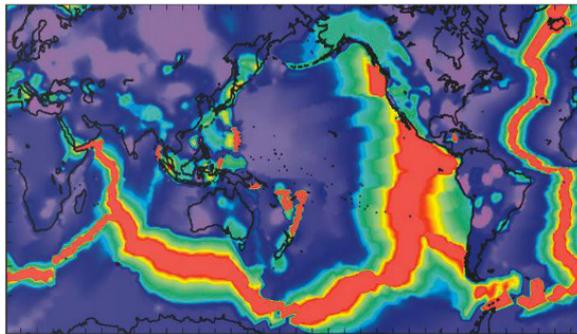
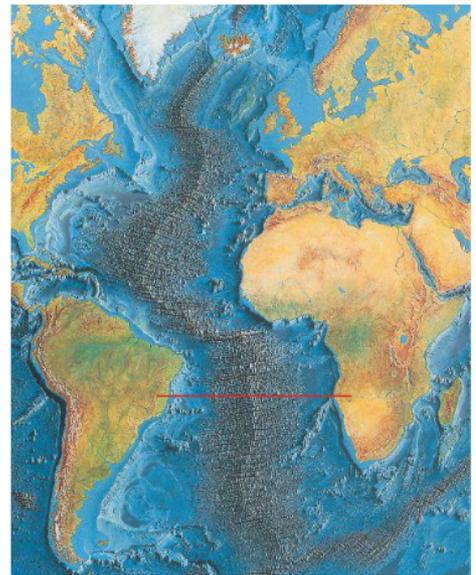
+ Dès les années 1960, la **prospection du fond des océans** grâce aux **sonars** des navires océanographiques qui émettent des **faisceaux d'ultrasons** en direction des fonds qui après réflexion reviennent aux navires ; des appareils enregistrent alors les



échos de ces ultrasons.

+ Les travaux de Marie Tharps, Bruce Henzen et Maurice Ewing apportent ainsi de s informations sur la **topographie des fonds océaniques**. L'élément marquant est la présence, au milieu des océans de **chaînes de montagnes, les dorsales (60 000 Km de long pour le total des océans) de 2000 à 3000 Km de large** qui se dressent à 2 000 m au dessus des plaines abyssales (-5000 m).

+ Ces études révèlent aussi que la partie immergée des continents (= **plateau continental**) d'une profondeur de -300 m plonge profondément (pente de plus de 7 %) pour atteindre la profondeur de -4000 m : c'est le **talus continental**. le profil atteint ensuite rapidement la profondeur de la plaine abyssale par un **glacis continental**. Par ailleurs à d'autres endroits du globe, la topographie océanique révèle la présence de **fosses océaniques** dont les profondeurs varient de -7000 m à -11040 m.



b) Apports de la géothermie

+ On nomme **géothermie**, l'énergie issue du globe terrestre convertie en chaleur. Le **flux géothermique** est la quantité de chaleur d'origine interne évacuée par unité de surface et unité de temps ; son expression se fait en milli Watts / m² (mW/m²).

+ Le flux moyen terrestre est de 60 mW/m² (cette valeur s'observant à la fois pour les continents et les océans).

+ Au niveau des **dorsales**, on observe des **valeurs élevées de ce flux** qui atteint alors 300 mW/m².

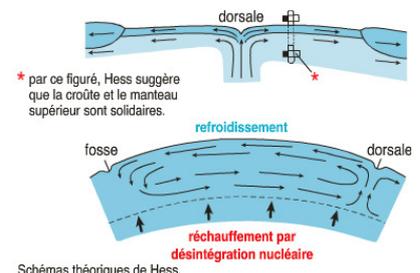
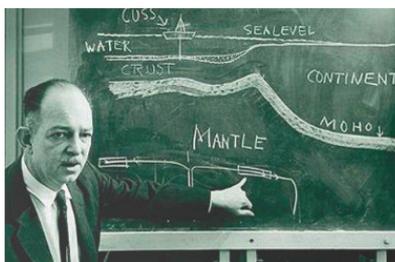
On interprète ces valeurs élevées comme

l'existence de matériel chaud (magma) en profondeur et à l'aplomb de ces dorsales.

Remarque : au niveau des fosses on relève plutôt des valeurs basses de l'ordre de 30 mW/m² (dont nous verrons plus loin l'interprétation).

c) L'hypothèse de Harry Hess (1960)

+ Pour **Harry Hess**, la concordance « **topographie de la dorsale** » et le « **flux géothermique élevé** » dans sa partie médiane met en évidence des courants



ascendants qui viennent du manteau.

+ Il reprend donc le modèle de Holmes suggéré trente ans plus tôt. Dans ce modèle, il entrevoit par opposition à cet apport de matière (la croûte océanique selon Hess) au **niveau de l'axe des dorsales**, une disparition de matière **au niveau des fosses** donc une **subsidence**. Ce modèle suggère donc un **recyclage** de matière océanique rejetée par le globe terrestre. Ainsi **continents et océans** seraient transportés passivement sur un **double tapis roulant** (voir schémas).

+ en 1961, **Robert Dietz** (géophysicien Américain évoque le « **sea floor spreading** » (= expansion des fonds océaniques au niveau des dorsales) et conforte ainsi l'**ascendance du mouvement convectif**.

2) Apports du paléomagnétisme dans la mise en évidence d'une expansion des fonds océanique à partir des dorsales et donc du mouvement horizontal du modèle convectif (=> activité n° 26)

a) Le champ magnétique terrestre

+ Le **champ magnétique** terrestre est la conséquence de **courants électriques profonds** suite à un écoulement de matière dans le noyau externe liquide.

+ Ce **champ** est représenté en tout point par un vecteur qui a pour direction et sens celui d'une aiguille aimantée de boussole. Ce champ est donc constitué de **lignes de champ magnétique** qui convergent au **centre de la terre** et dont l'**axe traverse la Terre au pôle Nord magnétique** (en réalité le Sud !) à la position 84,9°N et 131°O par rapport au pôle Nord géographique et au pôle Sud magnétique (en réalité le Nord !) à la position 65°S et 138° E.

Remarque : ces **pôles magnétiques ont une position qui varie quotidiennement** (ce qui donne une idée des mouvements de fluide dans la partie interne du globe).

+ Chaque **vecteur** (indiqué par une boussole) se définit par son **intensité** (mesurée en sous unités du **Tesla (T)**) : le nano Tesla (1T = 10⁻⁹ T). Pour la France ce champ est en moyenne de 46 000 nT.

b) Le paléomagnétisme

+ Les basaltes possèdent des **minéraux ferromagnétiques** tels que la **magnétite** qui lors du **refroidissement** du basalte lors de sa formation au niveau de l'axe des dorsales **s'aimante** selon les caractéristiques du champ magnétique du moment. Ce magnétisme que les basaltes gardent en mémoire est appelé **paléomagnétisme**. Il est faible et est difficile à mesurer. Les géophysiciens utilisent pour cette mesure des appareils très sensibles (= magnétomètres astatiques) qui informent - quand la roche prélevée a fait l'objet d'un repérage spatial très précis

- de la **direction** et du **sens** du champ « paléo » magnétique et donc de la position du **paléopôle**.

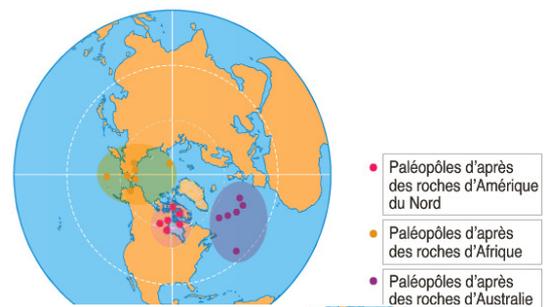
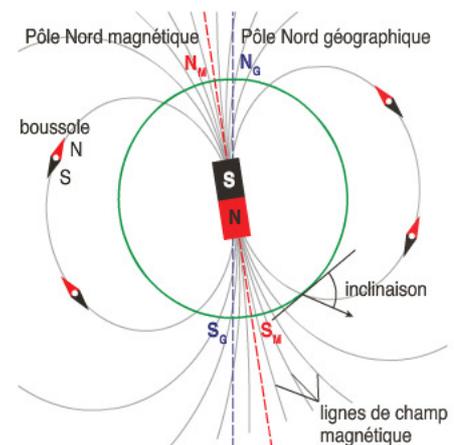
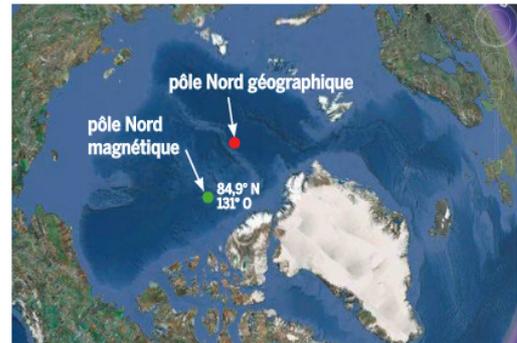
c) Une première preuve du déplacement des continents donnée par le paléomagnétisme

+ Vers 1950, on observe que **des roches de même âge** mais prélevés sur **trois continents différents** donnent **trois paléopôles différents** alors qu'un seul paléopôle existe à un moment donné et est à l'origine du magnétisme des roches qui se forment à ce moment là. (Voir ci-dessus, globe supérieur)

=> D'où l'idée que les **continents se sont déplacés**.

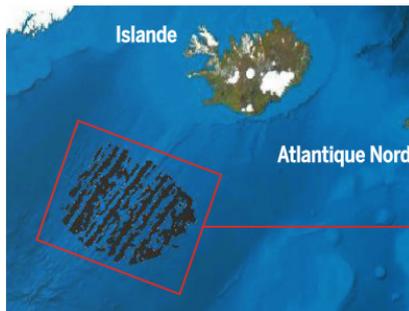
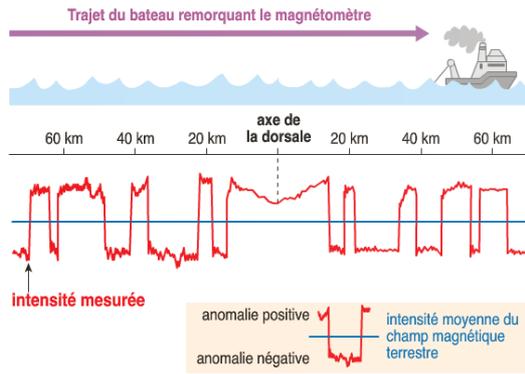
+ Par ailleurs des **roches d'âge différent** mais provenant d'un **même endroit** semblent indiquer une **dérive des paléopôles** comme l'indique le schéma ci-contre.

=> Là encore, ce sont les **continents qui se déplacent** par rapport à un paléopôle qui reste **stable et unique** au cours des **temps géologiques**.



d) Les anomalies magnétiques

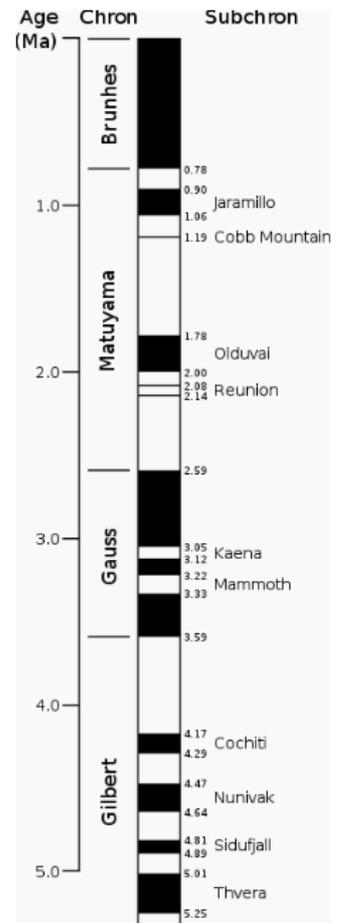
+ C'est Bernard Brunhes (géophysicien français) qui met en évidence en 1905 dans des coulées volcaniques superposées du massif central (dans le cantal, près de St Flour), le **phénomène d'inversions** du champ magnétique au cours des temps géologiques. **L'axe géomagnétique** reste relativement **stable** au cours des temps mais la **polarité du champ subit des inversions** : certaines périodes sont caractérisées par une **polarité normale** (le pôle Géomagnétique Nord est proche du pôle géographique Nord comme actuellement) alors que d'autres périodes sont caractérisées par une **polarité dite inverse** (le pôle Géomagnétique Nord est alors proche du pôle géographique Sud). **Ces inversions s'effectuent en quelques milliers d'années**. Ces inversions ont été datées et une chronologie de ces inversions a été établie (voir document de droite : Noir = polarité normale / Blanc = polarité inverse).



relation directe entre les **anomalies magnétiques** et les **inversions de polarité** comme le montre le schéma de droite).

e) L'hypothèse de Fred Vine et Drummond Matthews (1963)

+ C'est en faisant converger plusieurs faits (inversions de polarité du champs magnétique au cours des temps géologiques, les anomalies positives et négatives de la croûte terrestre) avec le modèle de Harry Hess que Fred Vine et Drummond Matthews émettent l'hypothèse que **c'est au niveau de la dorsale** que le magma acquière une **aimantation de polarité identique** au champ magnétique qui règne à ce moment là. Comme au niveau de la dorsale **l'ascendance mantellique apporte toujours du magma**, les nouvelles cristallisations repoussent latéralement les basaltes déjà refroidis. Et le mécanisme d'expansion se poursuit. Dès lors, au niveau de ces basaltes anciens, quand **l'aimantation « fossile » s'ajoute** au champs magnétique actuel, **l'anomalie est positive** ; quand elle vient se **soustraire** (du fait de polarité contraire) au champ magnétique actuel alors l'anomalie est négative. + Ainsi ce modèle explicatif de Vine et Matthews apporte la preuve d'un **plancher océanique en expansion** à la manière d'un **double tapis roulant**, donc **bilatéral par rapport à l'axe de la dorsale**.

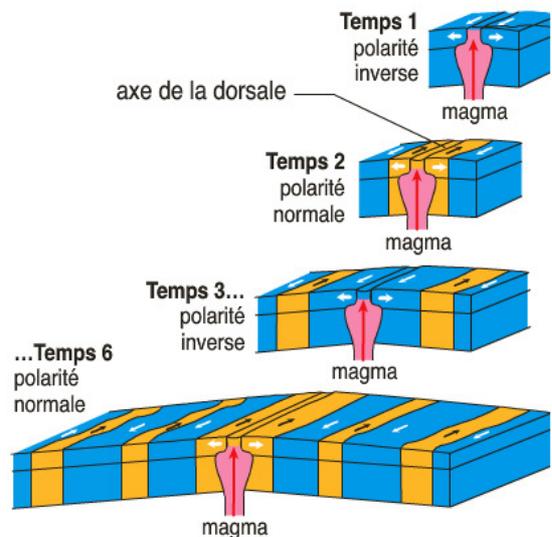
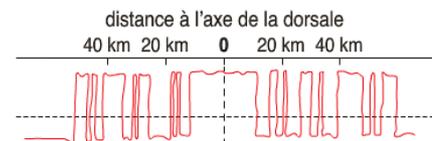


+ Vers les années 1950, des mesures du champ magnétique réalisées au niveau du **plancher océanique** par des magnétomètres sensibles embarqués dans des navires océanographiques montrent que les intensités du champ magnétique sont soit **légèrement plus fortes** que la

normale (= valeur moyenne théorique), ce sont les **anomalies positives**, soit légèrement plus faibles que la normale, ce sont les **anomalies négatives**.

+ Ces **anomalies magnétiques** sur le plancher océanique forment des **bandes parallèles entre elles**, et sont **symétriques par rapport à l'axe de la dorsale** : cette cartographie des anomalies est dite « **en peau de zèbre** ».

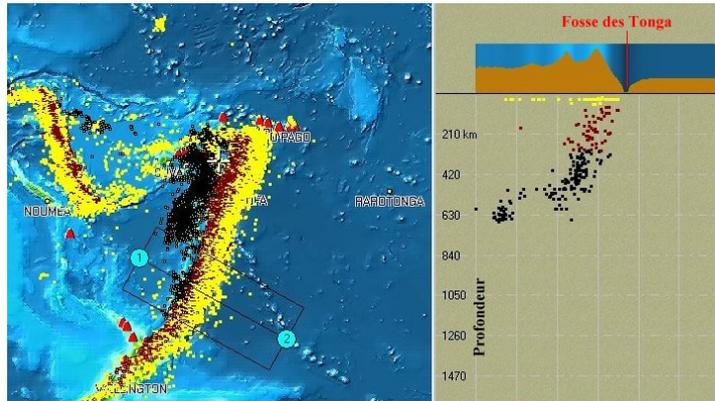
+ Il existe une



3) Apports de la sismique au niveau des fosses océaniques dans la mise en évidence d'un mouvement subsident du modèle convectif (=> activité n° 27)

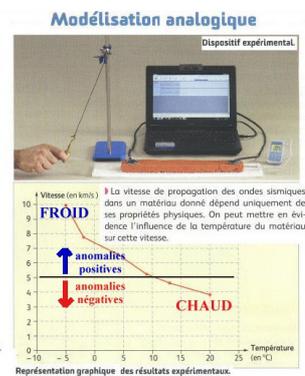
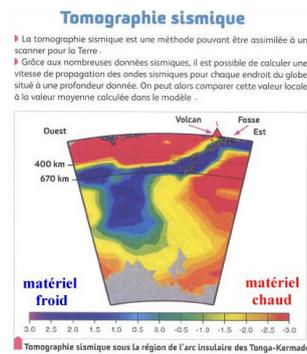
a) Répartition des foyers des séismes (Kiyoo Wadachi en 1930 et Hugo Benioff en 1955)

+ **Kiyoo Wadachi** (parfois orthographié Wadati (prononcer « Ou-da-tchi) et **Hugo Benioff** constatent que dans les **bordures océaniques** marquées par une **fosse profonde**, les **foyers des séismes** se répartissent selon un plan incliné (surface voilée ?) que l'on nomme aujourd'hui « **plan de wadati-Benioff** » qui part de la fosse et plonge dans le manteau jusqu'à la profondeur de 700 Km (il n'existe plus de séismes au-delà de cette profondeur !).



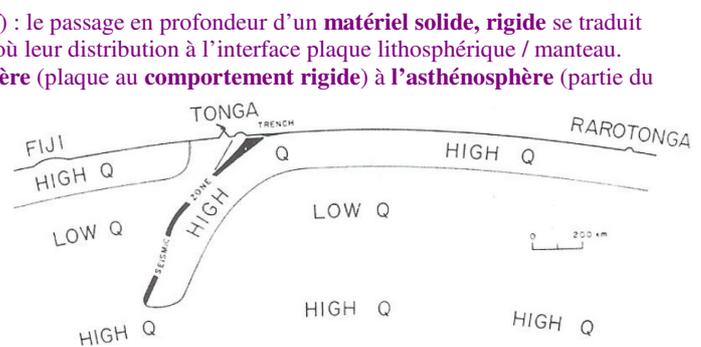
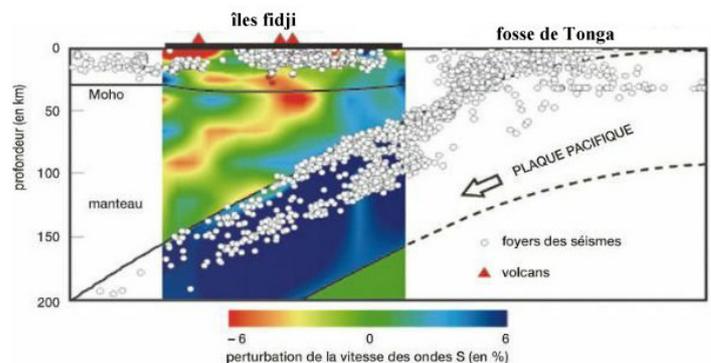
b) Apports de la tomographie sismique

+ Les ondes sismiques se déplacent – nous l'avons vu – à une **vitesse qui augmente avec la profondeur** (du fait de la **densité croissante** des matériaux) et qui varie avec la **nature des matériaux**. Mais il a été démontré que la vitesse de ces ondes étaient modulée par la température des matériaux. On peut ainsi mettre à jour dans le globe terrestre des **anomalies positives** de la vitesse de ces ondes (vitesse plus élevée que la normale [« High » en anglais]) qui correspondent à la traversée de **matériaux « froids »** et des **anomalies négatives** (vitesse plus faible que la normale [« Low » en anglais]) correspondant à des **matériaux chauds**.



c) L'hypothèse de Jack Oliver et Brian Isacks en 1967

+ **Jack Oliver** et **Brian Isacks** en 1967 établissent une corrélation au niveau de la fosse océanique de Tonga (profondeur maximale 10 882m) entre la **distribution des foyers des séismes** (Wadati-Benioff) et les données de la **tomographie sismique** (voir leur schéma interprétatif ci-contre) et montrent que les zones froides correspondent à la **plongée en profondeur**, dans le manteau d'une **lithosphère océanique rigide** ; ce qui explique les nombreux séismes se trouvant au contact de cette **plaque plongeante** (d'où le plan de Wadati-benioff) : le passage en profondeur d'un **matériel solide, rigide** se traduit par des **cassures** à l'**origine des séismes** d'où leur distribution à l'interface plaque lithosphérique / manteau. Ainsi ces deux auteurs opposent la **lithosphère** (plaque au **comportement rigide**) à l'**asthénosphère** (partie du manteau au **comportement ductile**¹). Pour **Oliver et Isacks**, ces lieux de **disparition de la lithosphère océanique** (on dira plus tard « zones de subduction ») sont nécessaires dans la logique de l'**expansion des fonds océaniques** envisagée par Harry Hess : ce qui se crée **au niveau des dorsales** ne peut que disparaître **au niveau des fosses**. On nommera dorénavant « **plaque tectonique** » cet ensemble rigide correspondant à la **lithosphère**.



¹ Dictionnaire TLF => « ductile » : qui se laisse étirer, battre, travailler sans se rompre.

II. Les plaques tectoniques et leurs délimitations géologiques

1) Délimitation verticale : distinction lithosphère / asthénosphère et LVZ (activité n° 27)

a) Les données sismiques

+ L'étude de la vitesse des ondes (P et S) montre qu'à partir de 100 Km, cette vitesse diminue, ce qui doit être interprété (cf. tomographie sismique) comme la traversée **d'un matériel plus chaud que le normale**. Cette anomalie thermique s'observe sur une épaisseur de 120 à 130 Km. On nomme **LVZ (= Low Velocity Zone)** ce domaine.

b) Diagramme P/T et géotherme

+ Des études réalisées en laboratoire à l'aide de **presse à enclume de diamant** permettant d'aboutir à une fusion partielle de roches (péridotites) permettent de construire un **diagramme « pression température »** dans lequel une droite, le **solidus**, sépare deux domaines, celui des solides et celui des solides accompagnées de phases liquides (domaine de fusion partielle). Le **géotherme océanique** est la **courbe** qui fournit la valeur des couples « pression / température » quand on s'enfonce à la verticale d'un point de l'océan vers les profondeurs de la croûte puis du manteau.

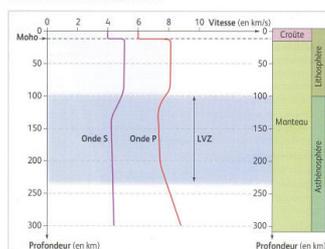
+ Or à 100 Km, dans la LVZ, le géotherme océanique se rapproche du solidus ce qui signifie que tout en restant à l'état solide les roches, **très chaudes** deviennent **ductiles**. Donc déformables. Ainsi la LVZ constitue la **limite inférieure** des plaques tectoniques. C'est la LVZ qui assure le **déplacement passif des plaques tectoniques rigides**.

c) LVZ et isothermes

+ Le **tracé des isothermes** (= points de même température) au niveau d'une fosse océanique montre que les isothermes suivent le plongement de la plaque océanique ; c'est l'**isotherme 1300°C** qui **limite** la base de la plaque tectonique et donc qui établit la **frontière** entre la **lithosphère océanique** et le début de l'**asthénosphère** (et donc de la LVZ). Cette **plaque tectonique rigide** ou **lithosphère** est donc constituée d'une croûte terrestre, **océanique ou continentale** et du **manteau lithosphérique**, ces deux sous-ensembles étant séparés par une **discontinuité** : le **Moho**.

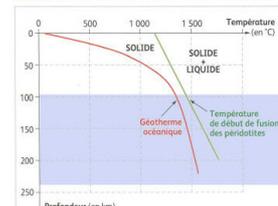
Lithosphère et asthénosphère

Les courbes de vitesse des ondes sismiques en fonction de la profondeur ont permis de définir et de différencier la lithosphère et l'asthénosphère située immédiatement en dessous.

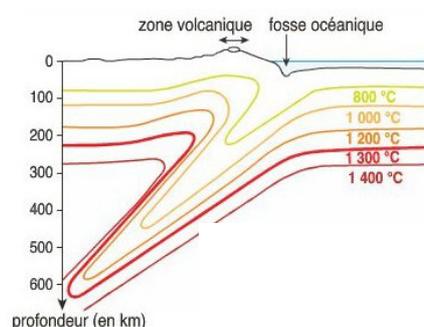


Variations de la vitesse des ondes P et S de 0 à 300 km sous les océans et interprétation de la structure des couches.

Lorsque les roches de la lithosphère sont soumises à des contraintes mécaniques, elles peuvent résister à celles-ci sans se déformer tant que les contraintes sont inférieures à leur seuil de résistance ou, au contraire, se déformer lorsque les contraintes dépassent ce seuil. On distingue alors la **déformation cassante** des roches caractérisée par leur rupture et pouvant être à l'origine d'ondes sismiques, de leur **déformation ductile** sans rupture et sans production d'ondes sismiques.



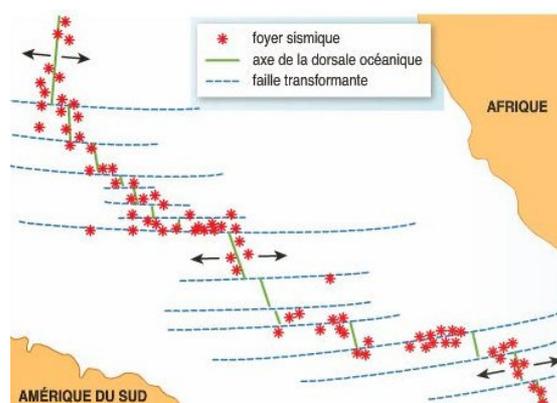
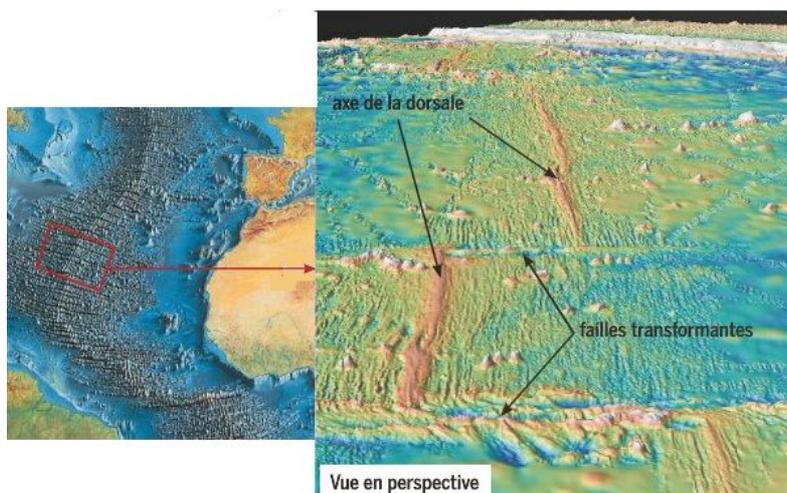
Géotherme océanique évalué à 100 km de distance de l'axe de la dorsale. Le géotherme fournit la température des matériaux en fonction de la profondeur.



2) Délimitation horizontale : frontières de divergence, de convergence et de coulissage (activité n° 27)

a) Les failles transformantes fracturent les plaques tectoniques

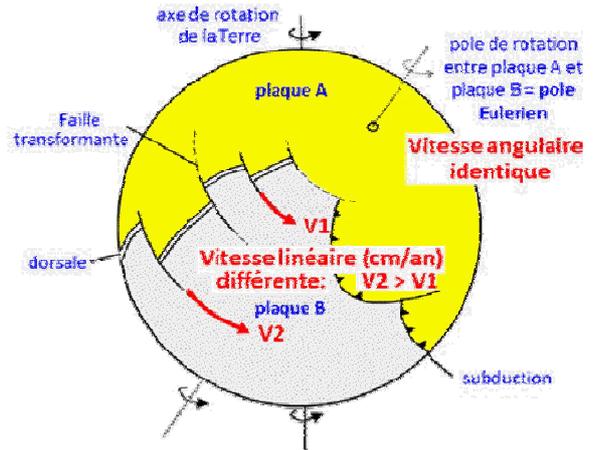
+ C'est dans les années 1960 que **Tuzo Wilson** constate des **décalages horizontaux** de plusieurs centaines de kilomètres au niveau de l'**axe des dorsales**. Il nomme « **failles transformantes** » ces décalages. Ce sont des zones sans création, ni disparition de matière. Au niveau de ces failles transformantes, on relève une **activité**



sismique particulièrement importante. Ces séismes sont la conséquence d'un **mouvement de coulissage** du fait de **mouvements horizontaux** des bandes découpées à la fois par la dorsale et

les failles transformantes.

En 1967, **Jason Morgan** développe la première hypothèse « plaquiste » et explique la nature des failles transformantes. Il suppose la lithosphère découpée en une série de « blocs » parfaitement rigides, se déplaçant les uns par rapport aux autres sur l'**asthénosphère**. Comme ces mouvements de « blocs » se font sur **une sphère** (la Terre), le déplacement de tous les points d'un bloc rigide correspond à une **rotation autour d'un axe passant par le centre de la Terre** et nommé **axe eulérien** de rotation qui se traduit par deux **pôles eulériens** à la surface de la Terre. Si la **vitesse angulaire de rotation** est la même pour tous les points de la plaque, la **vitesse linéaire** par contre varie selon les points de la plaque et les conséquences s'observent principalement au niveau des **zones de divergence** des plaques donc des **dorsales**. Plus cette zone de divergence est éloignée du pôle eulérien de rotation et plus la vitesse linéaire d'écartement est grande ; il s'en suit que la plaque étant rigide, des **failles perpendiculaire** à l'axe des dorsales se créent lors de l'**expansion** : les **failles transformantes**. Ces failles transformantes résultent donc des **différences de vitesse d'écartement**. Plus la vitesse linéaire est importante, plus les failles transformantes sont importantes. Ces failles transformantes qui peuvent être assimilés à des **arcs de cercles** centrés sur l'axe eulérien, sont donc **parallèles entre elles**.



b) Les trois types de frontières des plaques tectoniques

+ Après **Jason Morgan** en 1967 (voir carte de Jason Morgan ci-contre), **Dan McKenzie** et **Xavier Le Pichon** en 1968 développent l'hypothèse des « **plaques tectoniques** » (on devrait d'ailleurs parler plutôt de « **calottes tectoniques** » pour tenir compte de leur forme coiffante du globe terrestre.



Carte des "plaques tectoniques de Jason Morgan (1968)

+ Ces plaques sont soit **uniquement océaniques** comme la **plaque Pacifique** ou **mixtes** c'est-à-dire avec une **partie océanique** et une **partie continentale** (comme c'est le cas pour toutes les autres). Ainsi le terme de « **dérive des continents** » devient inexact avec cette théorie des plaques puisque ce sont des **ensembles océans + continents** (croûtes + manteau lithosphériques) qui se **déplacent** et non les seuls croûtes continentales comme le prévoyait Wegener.

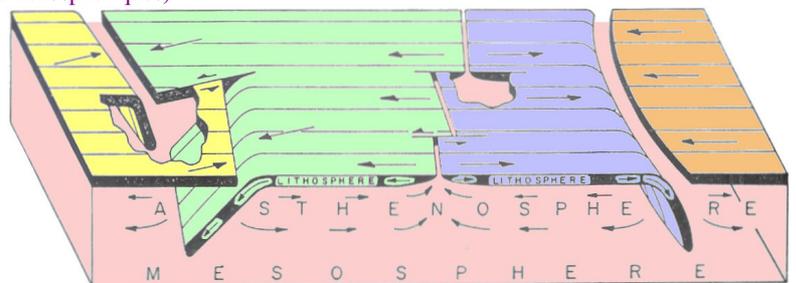


Diagramme synthétique de Oliver, Isacks et Sykes (1968)

+ Trois **frontières les délimitent** :
=> des **frontières de divergence** : ce sont les **dorsales** où se forment et s'étendent les plaques tectoniques,

=> des **frontières de convergence** : ce sont les **zones de subductions** matérialisées par les **fosses océaniques** où les parties océaniques des **plaques disparaissent** et les **zones de collisions** matérialisées par les **chaînes de montagnes** intra-contininentales où les **plaques se soudent** entre-elles par leur partie continentale.

=> des **frontières de coulissages** : frontières marquées par des mouvements horizontaux de plaques à des vitesses différentes (exemple : faille de San Andreas en Californie). Les **failles transformantes** sont aussi des **coulissages**.

+ Les **failles transformantes** permettront à Le Pichon de déterminer la position du pôle de rotation et donc de **reconstituer les déplacements des plaques** depuis les derniers 120 millions d'années.

+ Le Pichon comptait six **grandes plaques**. On en connaît aujourd'hui une **quinzaine** et de **nombreuses plaquettes**.

Les 3 types de frontières des plaques tectoniques

