

De la Dérive des Continents à la Tectonique des Plaques

Jean-Jacques Jarrige

**1968 – 2018
50 ans!**



Changer d'échelles

Retracer l'histoire de la Terre, demande de changer certains référentiels:

- Distances

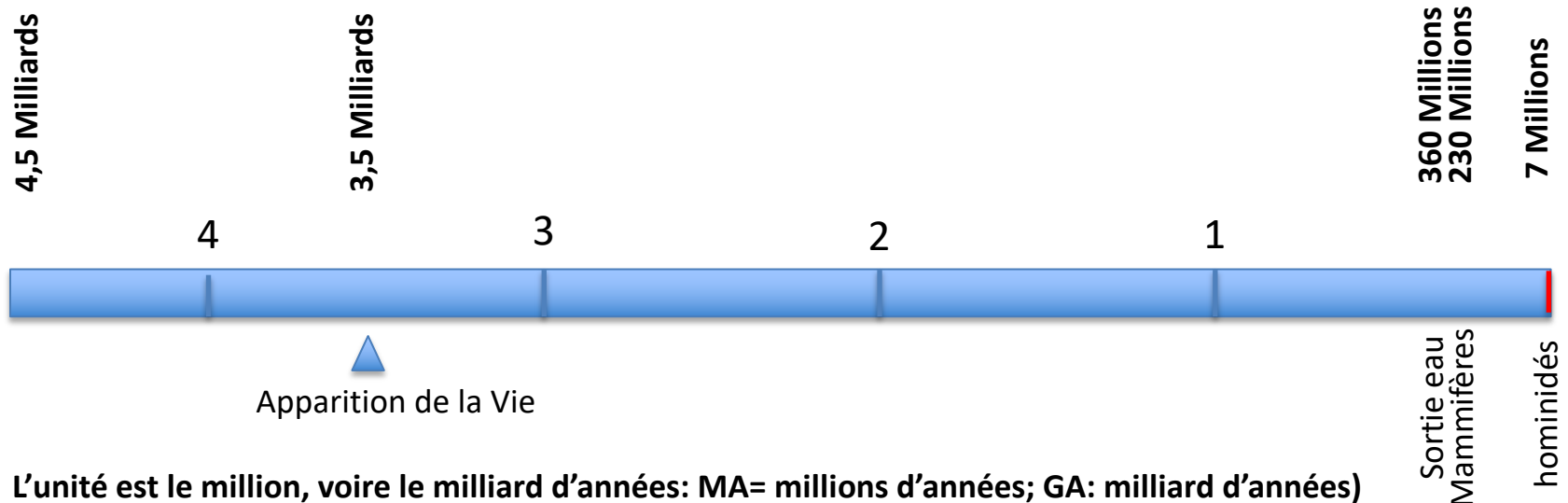
Diamètre: 12 740 km

Circonférence: 40 070 km

L'unité est la centaine, voire le millier de kilomètres



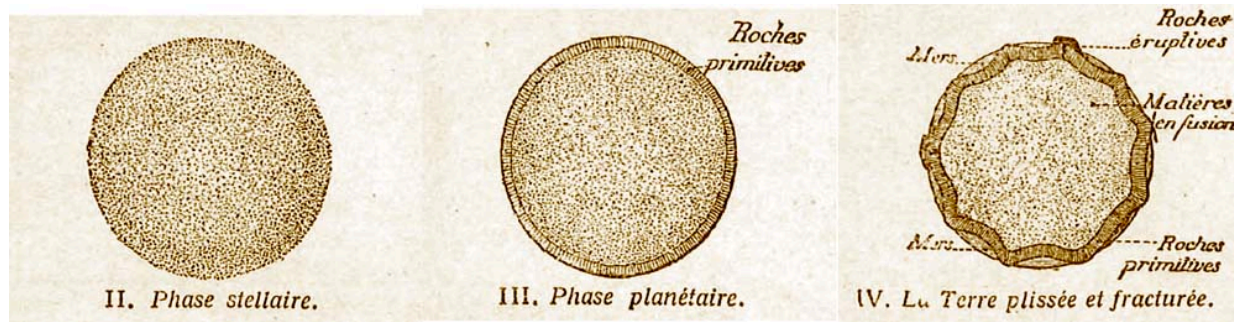
- Temps



L'unité est le million, voire le milliard d'années: MA= millions d'années; GA: milliard d'années)

Les premiers modèles

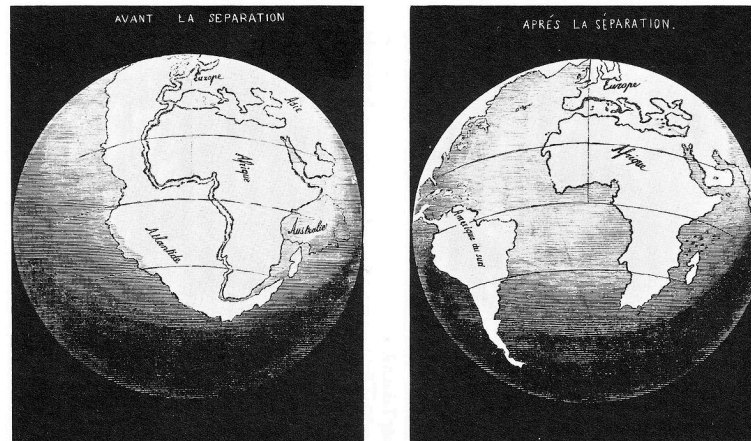
- Terre ronde: concept proposé par Eratosthène 3^e siècle avant JC
- Conception fixiste de la Terre liée aux théories du *catastrophisme* et du *créationnisme*
- XIX^e siècle: théorie de la formation de la Terre par *contraction thermique*: la Terre s'est refroidie progressivement en se contractant, formant à sa surface une croûte bosselée (montagnes, plaines et mer) ; on évalue son âge à 100 MA



Modèle fixiste

D'après V Boulet, 1925

- Mais à partir du XVII^e siècle, les **cartes** sont devenues de plus précises: on note déjà des analogies entre les traits de côtes Afrique/Amérique. Hypothèse de séparation au moment du *Déluge*



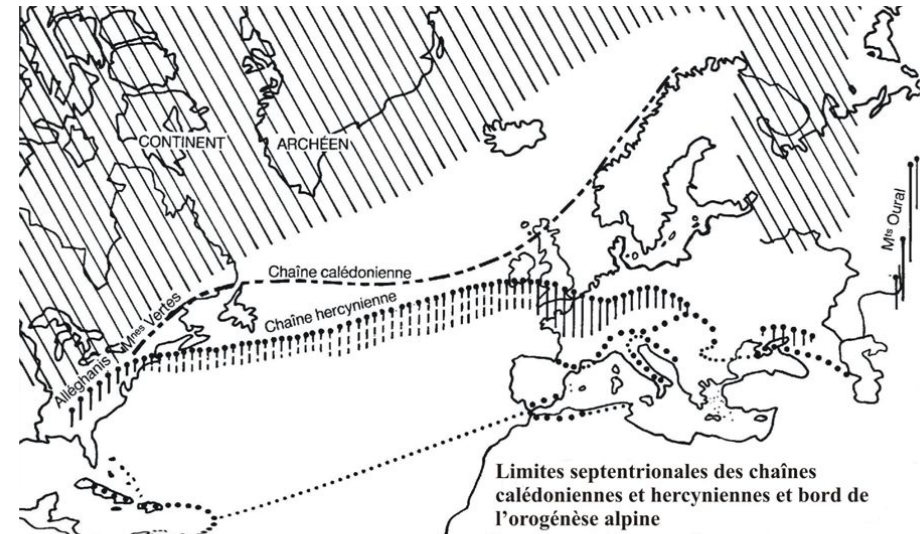
A. Snider Pelligrini, 1858 (F)

A. Ortelius, 1596

La Géologie devient une science au XIXe (1)

E. Suess (1831-1914)(A) propose l'existence de *déformations verticales et horizontales* (charriages) de l'écorce terrestre mais il reste un adepte du refroidissement de la Terre comme moteur (1875)

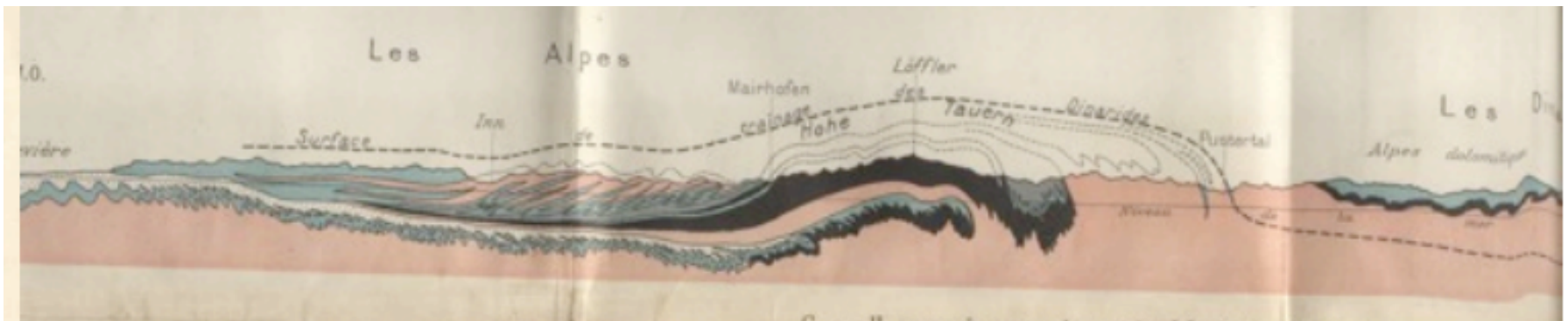
M. Bertrand (1847-1907) (S) propose que les *déplacements horizontaux* sont à l'origine de la formation des chaînes de montagnes (1884)



Limites septentrionales des chaînes calédoniennes et hercyniennes et bord de l'orogénèse alpine

D'après Marcel Bertrand, BS&F, 1887

Mise en évidence des continuités des chaînes calédoniennes et varisques de part et d'autre de l'Atlantique

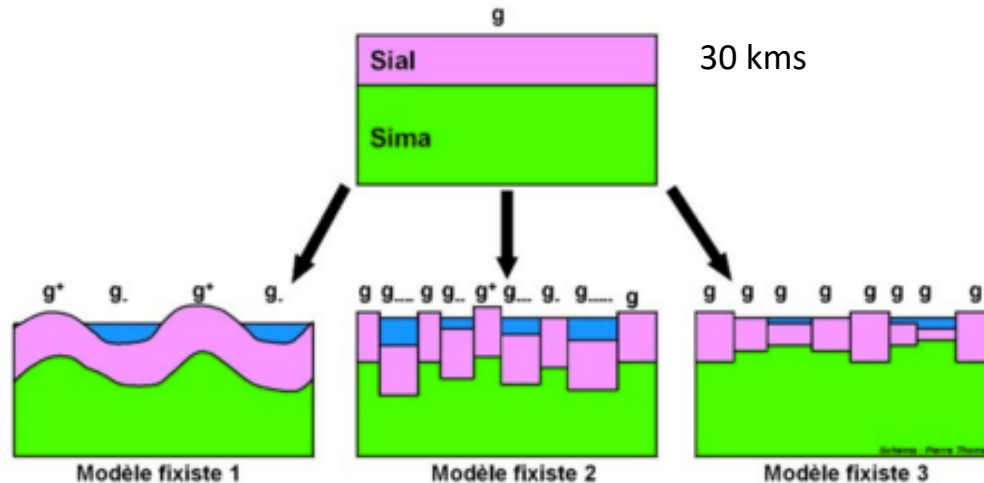


Coupe interprétative des Alpes

P. Termier, 1903

La Géologie devient une science au XIXe (2)

- **G.B. Airy (1801-1892) (UK) et la théorie de l'isostasie:** la croûte continentale (sial) est en équilibre sur le manteau plus dense (sima). Pour préserver l'équilibre latéralement, les poids totaux des colonnes unitaires (sial/sima) doivent être égaux. L'excès de masse induit localement par présence de relief en surface (massif montagneux) est compensé par une racine de sial. Le déficit de masse induit par un bassin sédimentaire ou un océan est compensé par une remontée du manteau (sima) plus dense.



Modèles d'isostasie
dans théorie fixiste

P. Thomas, 2011

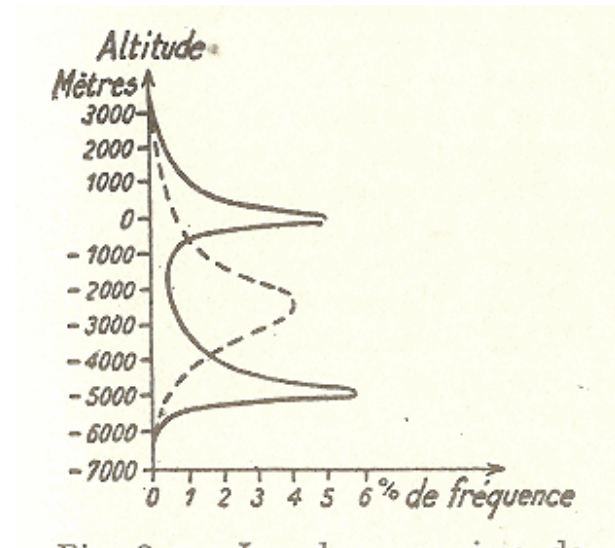
- **A. Mohorovicic (1857-1936) (Y)** met en évidence une discontinuité des vitesses de propagation des ondes sismiques dans le sous-sol à la base de la croûte continentale : discontinuité physico/chimique entre sial et sima, + dense (1909)

Le modèle de Wegener (1)

A. Wegener (astronome, climatologue, 1880-1930) A) avance l'hypothèse d'une mobilité horizontale de océans et continents à partir de 4 types d'observations (1915) – (A)



A. Wegener (1912)



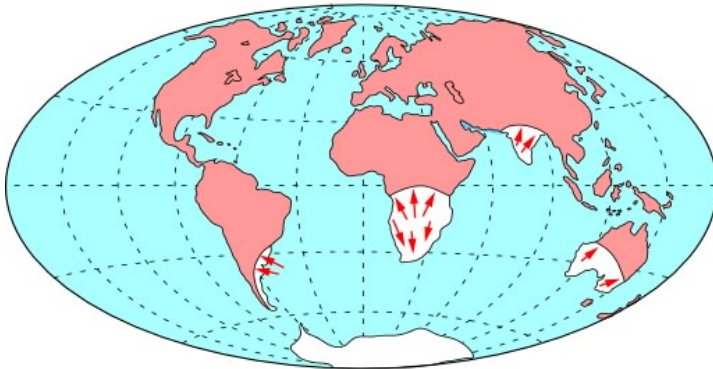
1- **La correspondance des tracés des côtes** et des formations géologiques d'Afrique et d'Amérique du Sud

2- **La distribution des altitudes à la surface de la Terre** (continents et océans) montre une distribution bimodale. Ceci indique deux processus de formation différents pour les océans et les continents.

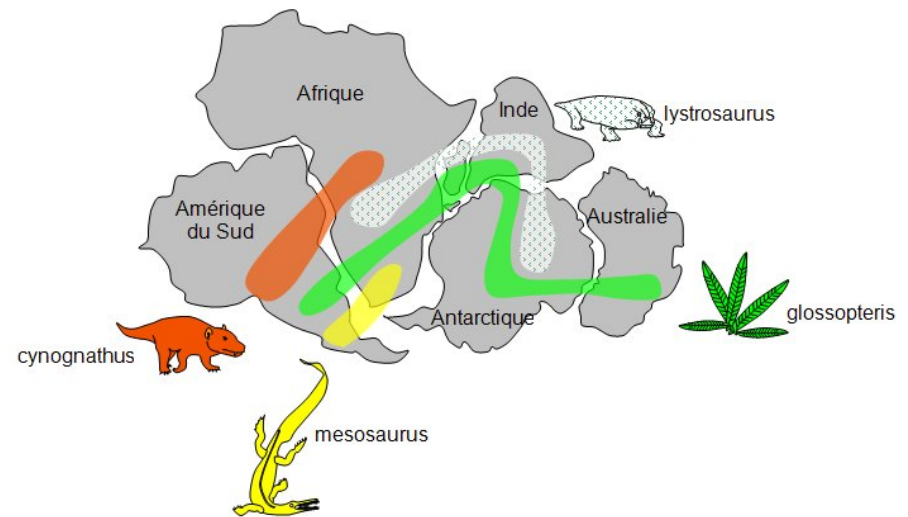
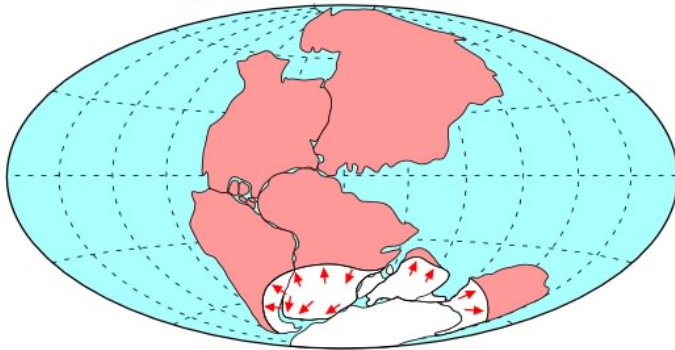
Le modèle de Wegener (2)

A. Wegener (1880-1930) avance l'hypothèse d'une mobilité horizontale des océans et continents (1915) > modèle de *dérive des continents* à partir d'un supercontinent initial, à la fin de l'ère primaire la **Pangea** – C'est le **Modèle mobiliste**

→ sens d'écoulement de la glace



La solution de Wegener



4- Distribution de fossiles de l'ère primaire. Les mêmes espèces se retrouvent de part d'autre de l'Atlantique, qu'elles n'ont pas pu traverser.

3- Les traces des glaciations du Permo-Trias (200-300MA). Les traces d'écoulement des glaciers sont cohérentes dans un schéma de réunion des continents.

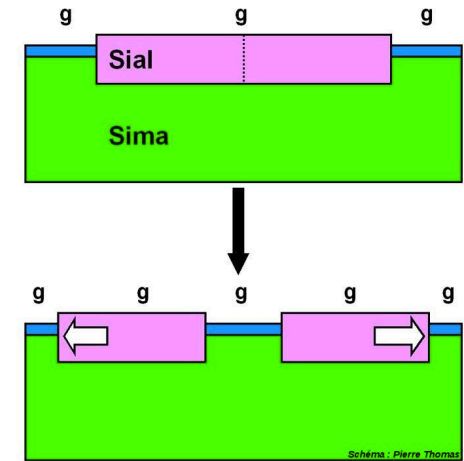
Rejet du modèle de dérive des continents

Durant la première moitié du XXe siècle l'**hypothèse de dérive des continents est rejetée**, car:
Symposium 1926, New-York

- A. Wegener ne peut définir le matériau sur lequel les continents flottent (le sima est considéré comme un solide)
 - Aucun modèle de **moteur** n'est physiquement plausible pour provoquer le déplacement des continents
 - La Pangea n'intègre pas l'histoire antérieure
- Et surtout
- Le modèle bouleverse les théories fixistes établies

Pourtant:

- En 1924, le géologue **E. Argand** (S) propose que les forces horizontales soient prédominantes dans les déformations de l'écorce terrestre à l'origine de la formation des bassins où se déposent les sédiments et des chaînes de montagnes (Tectonique de l'Asie)
- En 1929, **A. Holmes** (UK) propose l'existence de mouvements de convection dans le manteau pour évacuer la chaleur due aux effets de la radioactivité.



Modèle mobiliste

P. Thomas, 2011

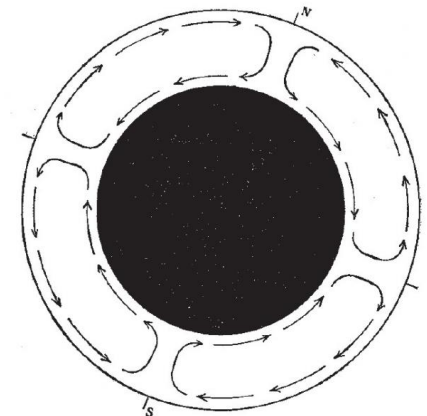


Fig. 1.

A. Holmes, 1929

La révolution: l'exploration des océans

Jusqu'au milieu du XXe siècle, l'étude de la Terre s'est limitée aux continents qui représentent 30% de la surface totale.

Après la deuxième guerre mondiale, de grandes campagnes océanographiques sont lancées pour **explorer les fonds marins.**

Ces campagnes amènent des informations sur:

- la topographie
- les flux de chaleur
- les activités sismique et volcanique
- la nature du plancher océanique
- Les sédiments présents

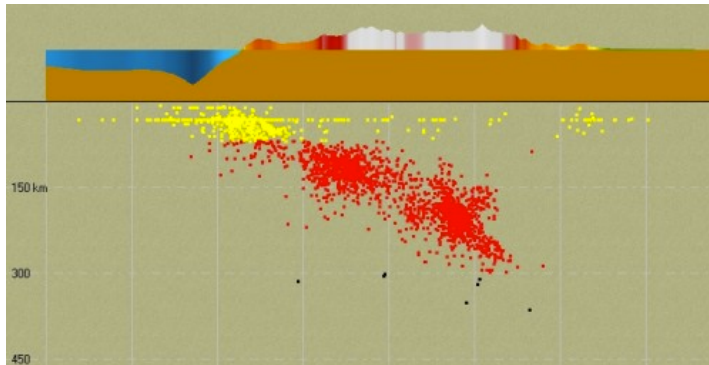


Les océans couvrent 70% de la surface de la Terre

Le **Glomar Challenger** est le bateau scientifique le plus connu qui a acquis des données océaniques de 1968 à 1983.

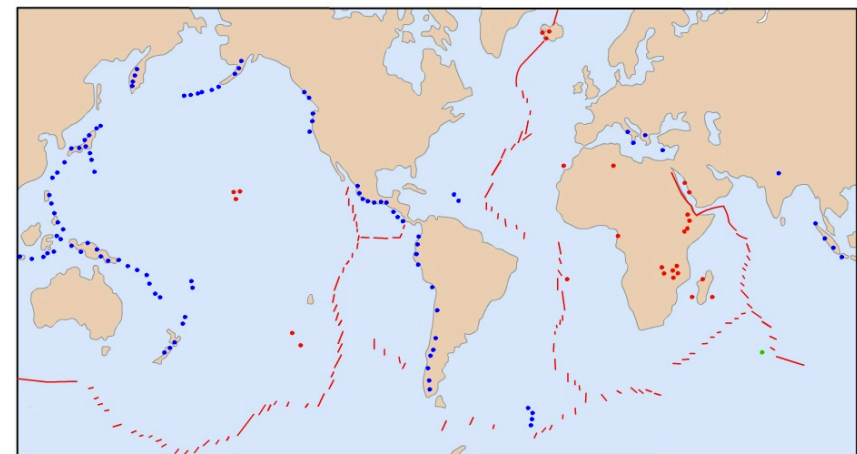
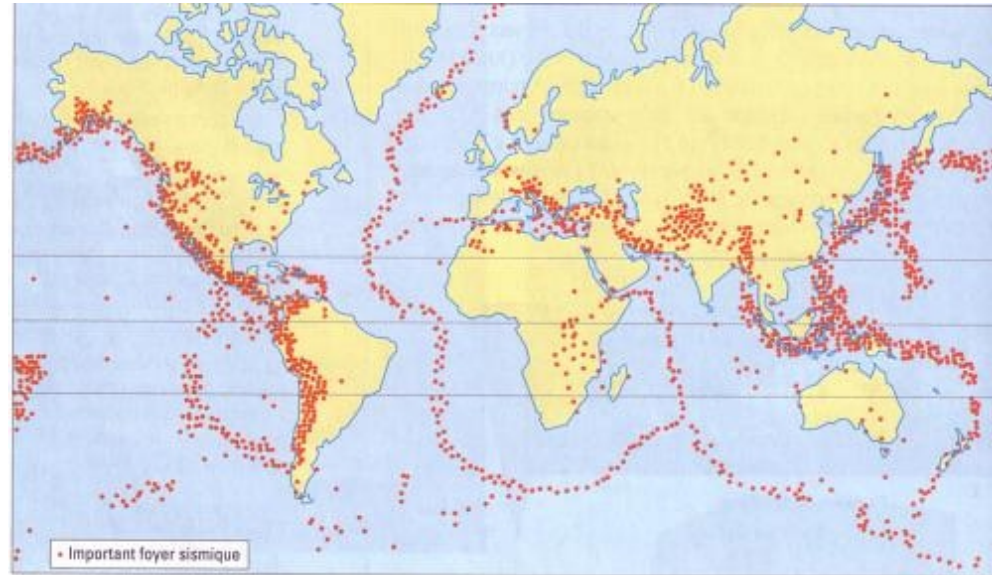
Les nouvelles données (années 1950-70)

- **Répartition des séismes:** ils se concentrent spatialement dans des zones assez étroites et ne dépassent pas 100 km de profondeur sauf en bordures océans : **zones de Wadati-Benioff (J-US)**



Répartition des séismes (points jaunes et rouges) en bordure de l'Océan Pacifique suivant un plan incliné: zone de Wadati-Benioff

- **Répartition des volcans:** elle est proche de celle des séismes

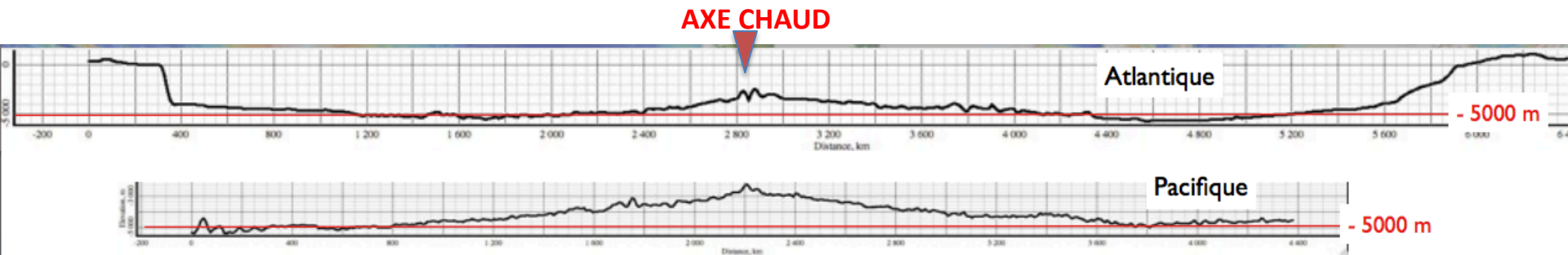


• Volcanisme explosif andésitique
• Volcanisme effusif basaltique

Les nouvelles données (années 1950-60)

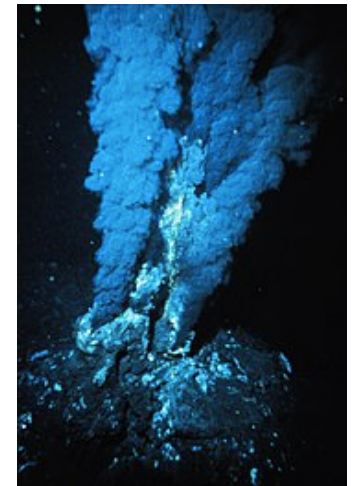
- **Fonds des océans:** les forages et les mesures géophysiques montrent que **la croûte océanique est formée de basaltes (ou roches de même nature) et qu'elle est épaisse de 5 à 10 kms.** Donc différente de la croûte continentale.

Les profils topographiques sont semblables d'un océan à l'autre: une **ride médiane** continue entourées de **plaines abyssales** de chaque côté, limitées par des **fosses latérales**)



- La distribution des **flux thermiques** est également caractéristique:: axes de fort gradient au niveau des rides
- **L'activité volcanique se focalise principalement le long** des rides médianes, donc le plus souvent au milieu des océans, exceptionnellement à terre, comme en Islande.

Event hydrothermal sous marin

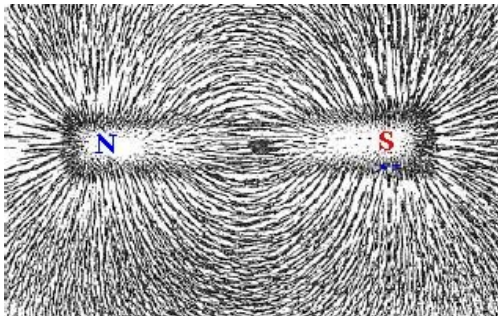


Les nouvelles données

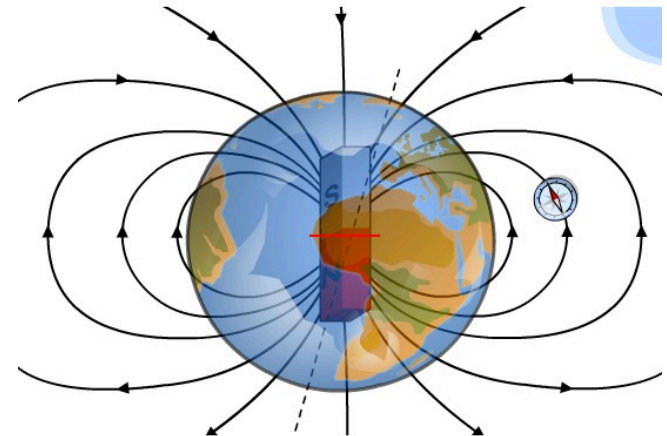
- **Datations radiométriques:**

Méthodes qui permettent d'évaluer l'âge d'une roche (âge absolu) par la mesure des éléments instables (isotopes radioactifs): $Ur > Th$, $Ur > Pb$, $Rb > Sr$, $C14/C12$

- **Etudes géomagnétiques :**



Orientation de la limaille de fer sous l'action d'un aimant



La terre se comporte comme un gros aimant

En 1905, B. Brunhes (F) met en évidence les **inversions du champ magnétique terrestre.**

Il note des déviations de l'aiguille de sa boussole à proximité des coulées volcaniques du Massif central. Chaque roche volcanique contient des cristaux de fer qui possèdent leur aimantation acquise lors du refroidissement de la lave qui enregistre le champ magnétique terrestre contemporain de son refroidissement.

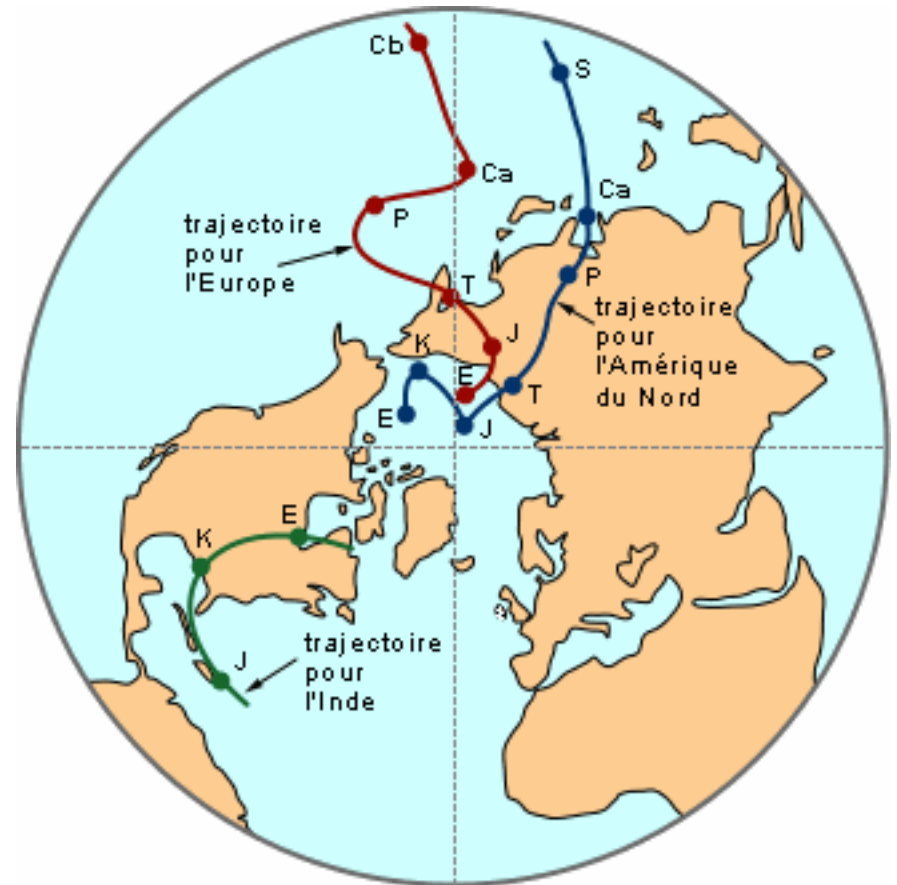
Les nouvelles données (années 1950-60)

Mesures paléomagnétiques sur les continents

Les mesures des champs magnétiques fossilisés dans les roches d'âge différents suggèrent une dérive des pôles magnétiques au cours du temps, différente pour chaque continent (de Cb = Cambrien à E = Éocène).

L'hypothèse n'est pas crédible.

En fait, **ce sont les continents qui ont dérivé** par rapport à un pôle globalement fixe.



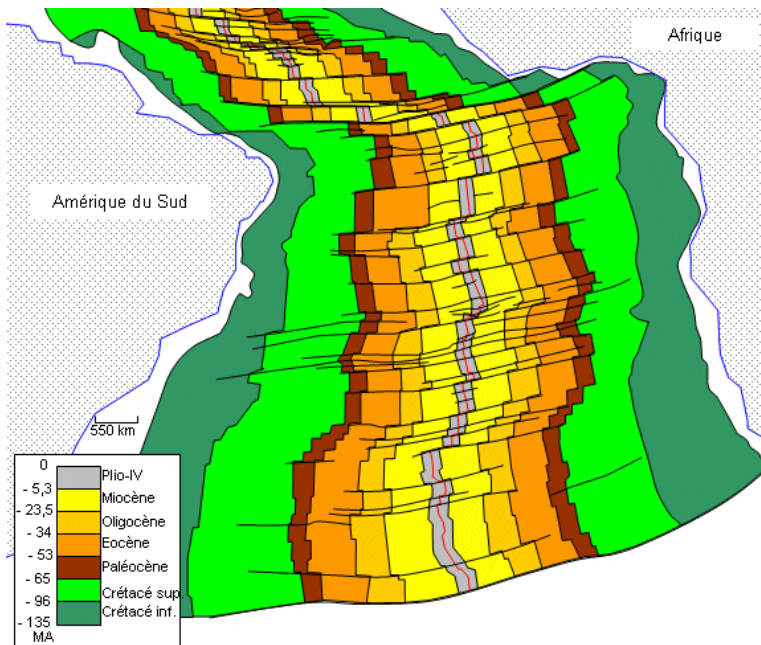
Evolution des trajectoires des pôles pour l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Inde

Les nouvelles données (années 1950-60)

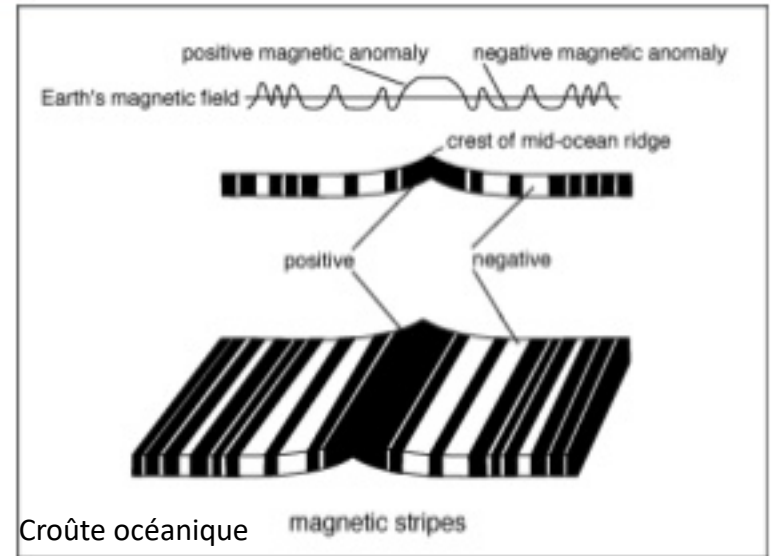
Application au plancher océanique

Les campagnes océanographiques permettent de récupérer des échantillons de roches volcaniques du plancher océanique et de réaliser des **datations absolues** et des **mesures paléomagnétiques**.

On observe une symétrie de part et d'autre de la ride: notion d'**expansion océanique**



F. Vines et D. Matthews, 1963 (UK)



La polarité magnétique de la Terre s'est inversée périodiquement au cours du temps. Ces alternances (positif (noir)/négatif (blanc)) enregistrées dans les roches magmatiques du plancher océanique ont une disposition symétrique par rapport à la ride centrale.

Carte du plancher océanique de l'Atlantique sud. Les couleurs correspondent à la variation d'âge de la croûte. Cet âge est plus ancien quand on s'éloigne de la ride. L'évolution est symétrique par rapport à la ride.

Théorie de la Tectonique des Plaques (1967 - 68)

La Terre est une sphère.

Tout déplacement sur sa surface est assimilable à une **rotation** autour d'un axe vertical passant par un point à la surface (axe de rotation ou pôle de rotation).

Connaissant la distance et l'âge de la croûte océanique, il est possible de calculer la **vitesse de déplacement**.

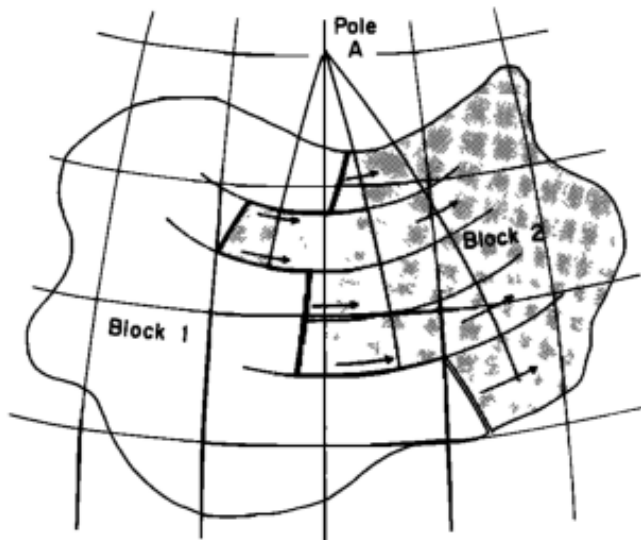


Schéma initial – W J. Morgan 1968 (US)

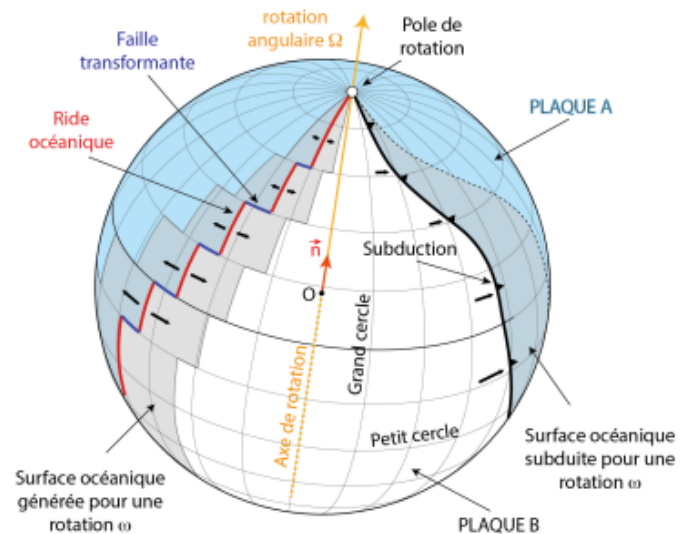


Schéma récent – E. Calais (ENS)

Théorie de la Tectonique des Plaques (1967 - 68)

- Dès 1962 H.H. Hess (US) a proposé l'hypothèse de l'expansion des fonds océaniques intégrant les processus des **rides medio océaniques** et des **fosses de subduction**. En 1967, J. Morgan (US) et D. Mac Kenzie et R. Parker (UK) introduisent la notion de **plaques** mobiles.
- Le modèle de **la Tectonique des Plaques** qui est proposé en suivant (B. Isacks, J. Oliver, LR. Sykes; 1968 - US) est basé sur 4 principes:

+ La lithosphère est divisée en plaques

+ Les **frontières des plaques** sont de 3 types: **convergence** (ride médio-océanique), **divergence** (subduction) ou **coulissage** (déplacement latéral)

+ Les plaques lithosphériques se déplacent rigidement sans se déformer

+ L'activité tectonique est donc confinée aux frontières des plaques

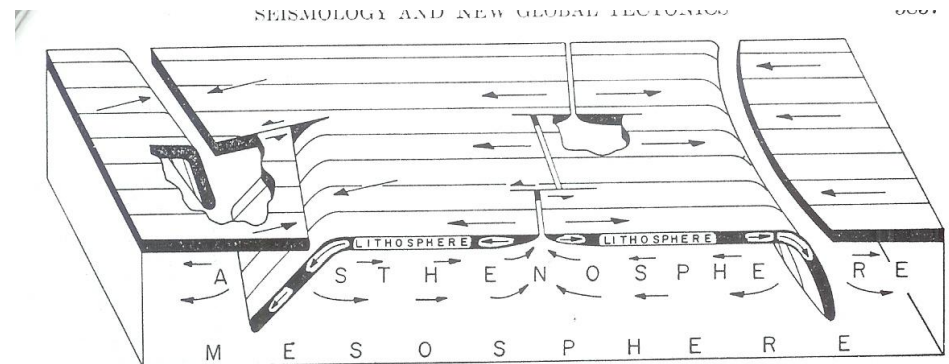
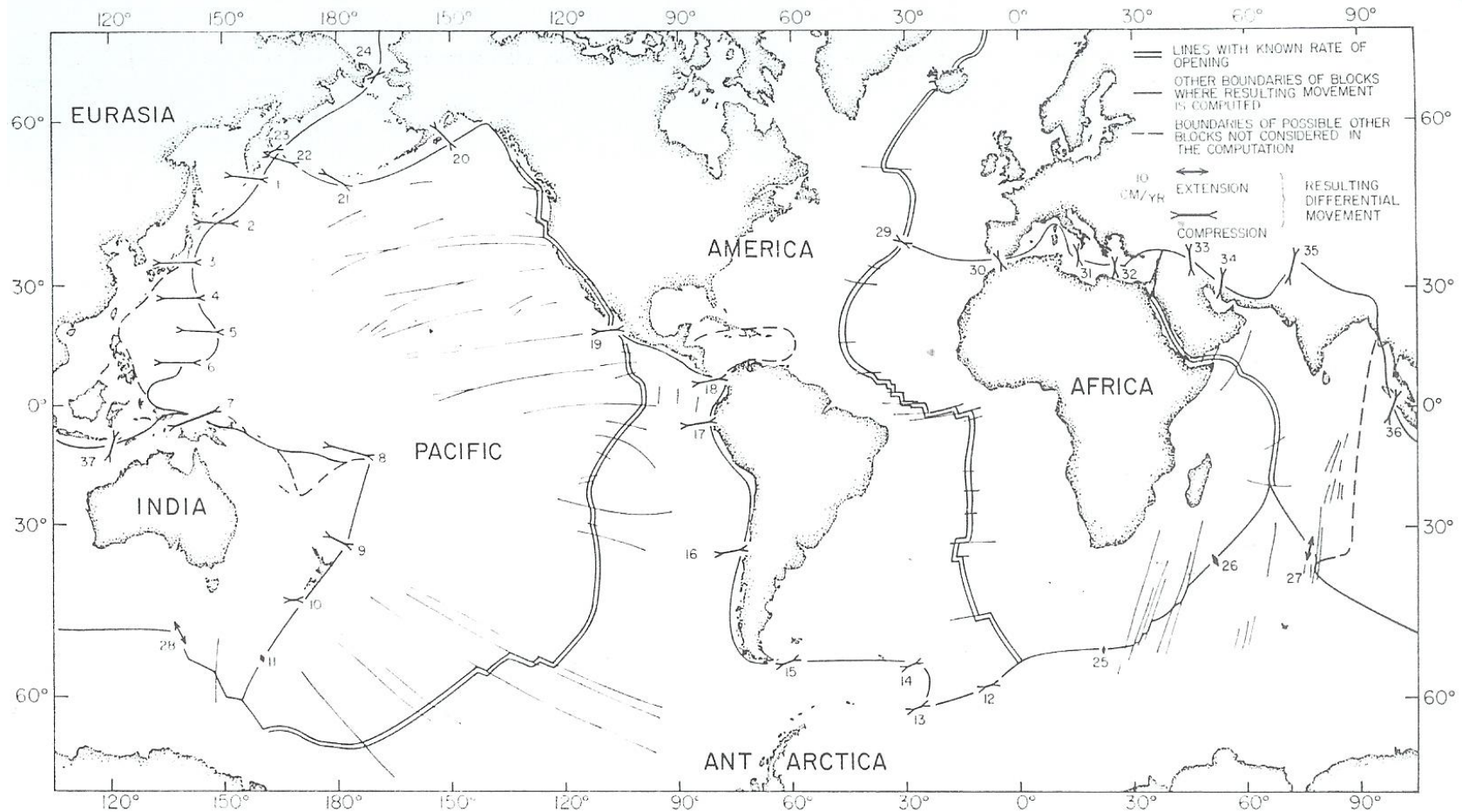


Fig. 1. Block diagram illustrating schematically the configurations and roles of the lithosphere, asthenosphere, and mesosphere in a version of the new global tectonics in which the lithosphere, a layer of strength, plays a key role. Arrows on lithosphere indicate relative movements of adjoining blocks. Arrows in asthenosphere represent possible compensating flow in response to downward movement of segments of lithosphere. One arc-to-arc transform fault appears at left between oppositely facing zones of convergence (island arcs), two ridge-to-ridge transform faults along ocean ridge at center, simple arc structure at right.

Schéma tiré de la publication originale de B. Isacks, J. Oliver, LR. Sykes (1968) introduisant le processus de la Tectonique des Plaques

Théorie de la Tectonique des Plaques (1967 - 68)

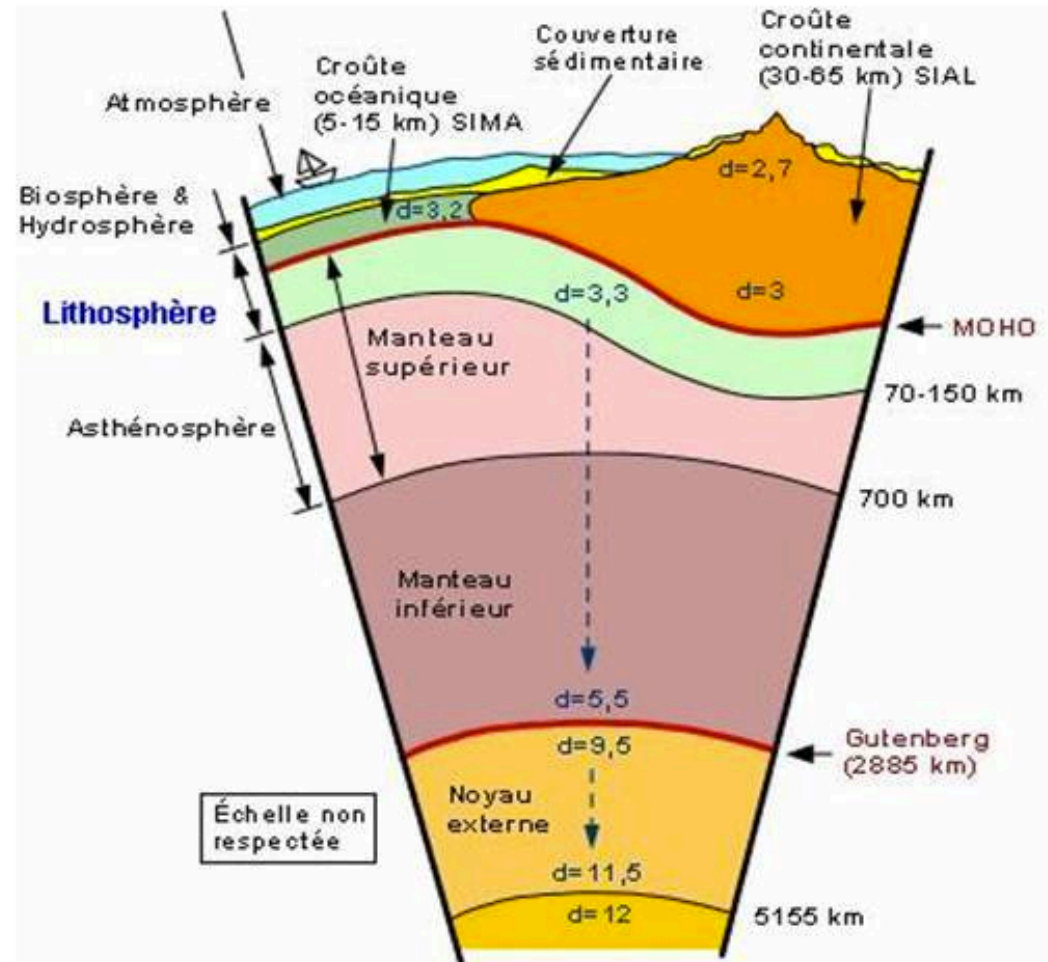
- La même année, X. Le Pichon (F) propose un **modèle à 6 plaques lithosphériques** et calcule leurs mouvements depuis 120 MA.



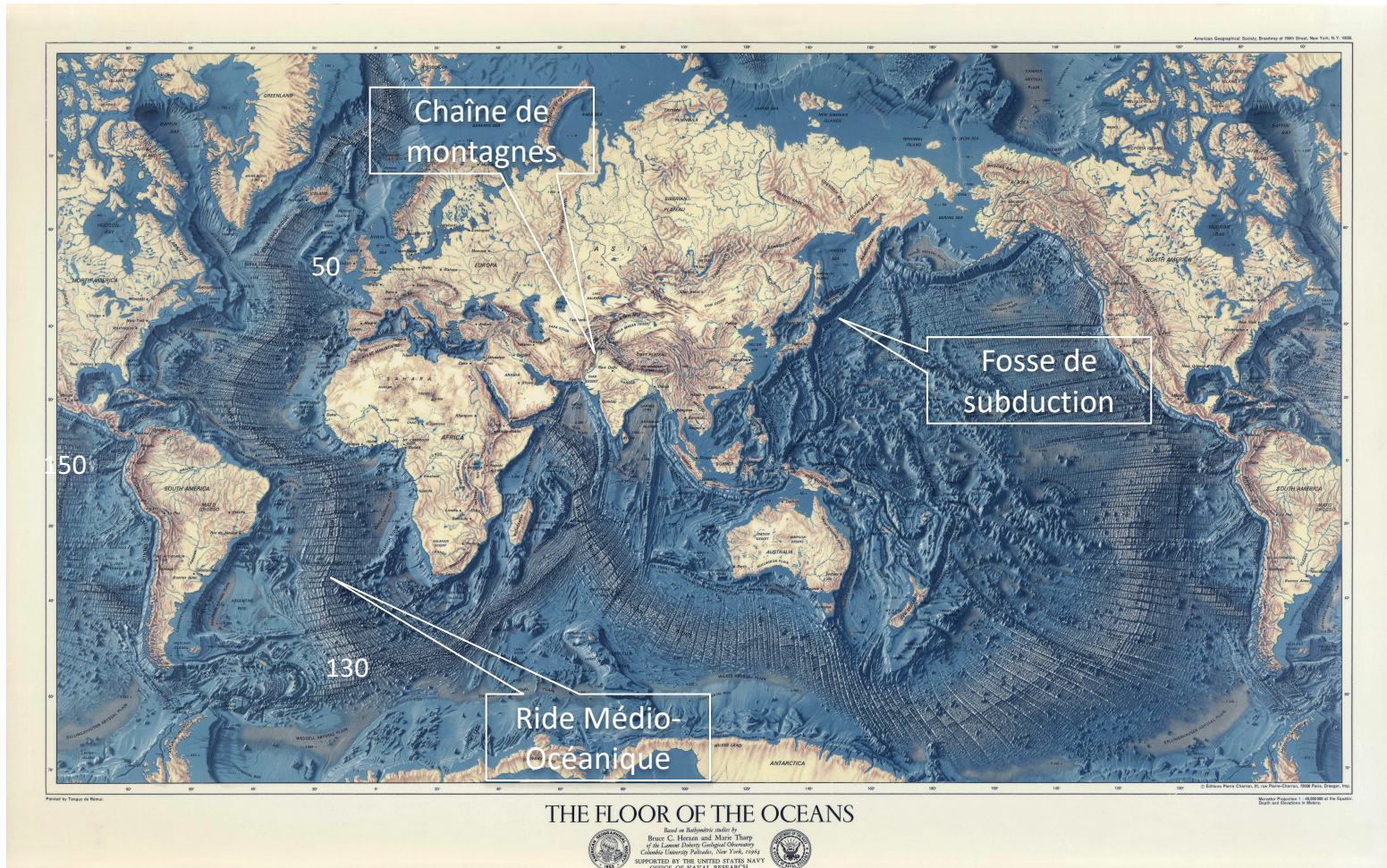
Lithosphère - Asthénosphère

Conséquences sur la structure de la Terre:

- **Croûte / Manteau:** les deux unités sont séparées par une limite de densité: la discontinuité de Mohorovicic
- **Lithosphère / Asthénosphère:** la limite correspond à un isotherme ($1300^{\circ}\text{C} = 100\text{km}$)
- A la base de la lithosphère: Zone de faible vitesse de propagation des ondes ou **LVZ** (100-200km): matériau plus ductile (élastique)
- **Plaques lithosphériques:** elles sont limitées par des **rides médio-océaniques**, des **zones de subduction** ou de **grandes failles de coulissage**.



Carte globale Continents / Océans



Les cartes topographiques actuelles de la planète intègrent les **reliefs continentaux** et les **reliefs sous marins**.

On peut distinguer, les **chaînes de montagnes continentales**, les **rides médio-océaniques** et les **fosses de subduction océaniques**.

Evolution du modèle 1970 – 2010 (1)

Les données nouvelles (forages profonds, GPS...) ont confirmé et fait évoluer le modèle:

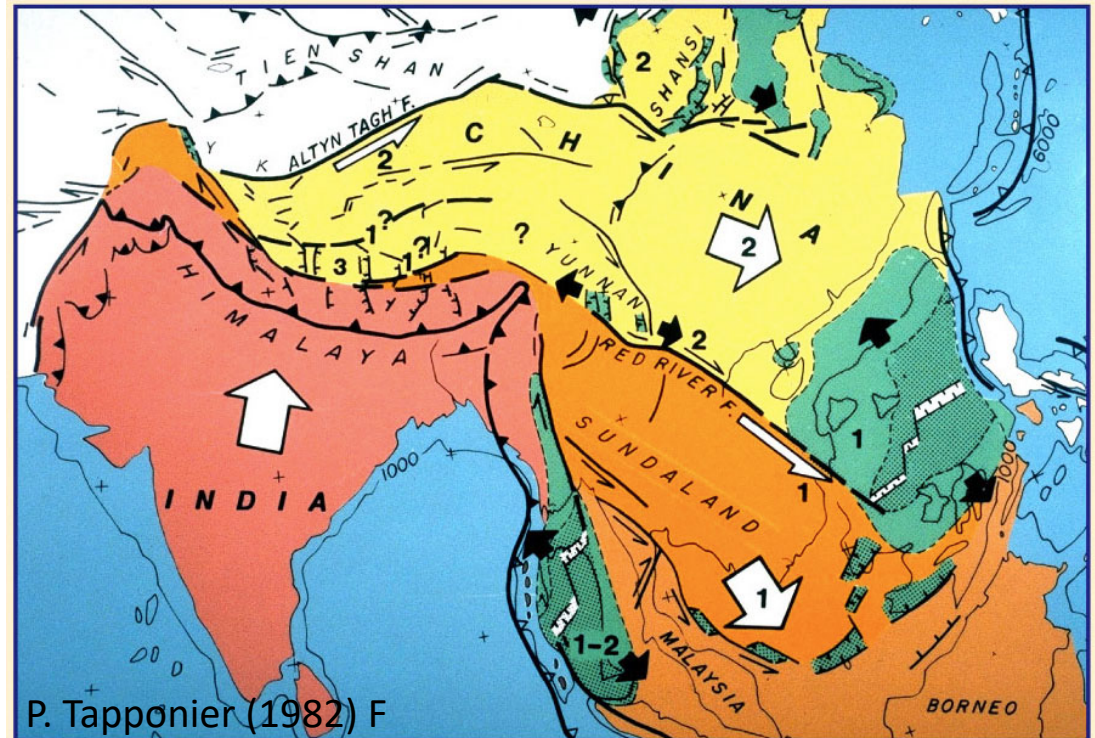
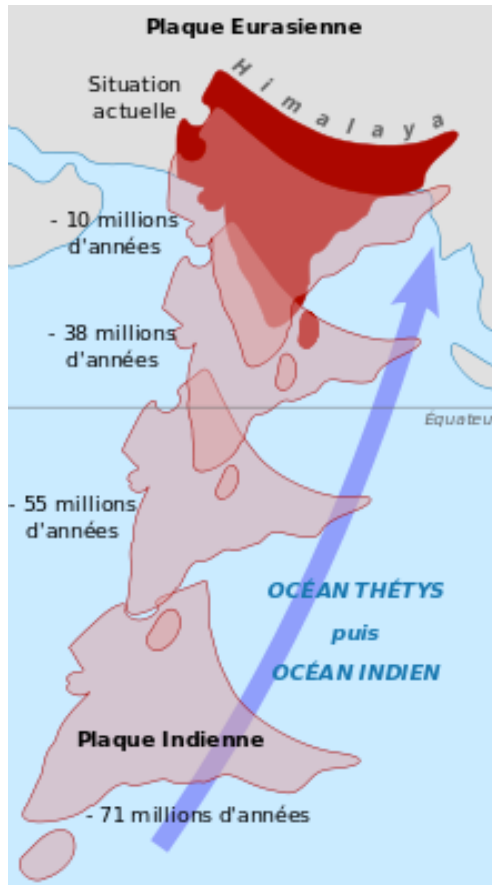
- Les **vitesse de déplacement** mesurées à l'aide des GPS ont permis d'affiner les modèles et sont conformes aux vitesses déduites de la théorie
- Meilleure compréhension du **moteur** : mouvements de convection dans l'asthénosphère; la zone dite LVZ (à faible vitesse des ondes sismiques) facilite le découplage entre matériaux rigides et plus ductiles
- Les modèles les plus récents évoluent vers un système à **12 plaques lithosphériques**
- Les rides médio-océaniques sont des **zones d'accrétion** (formation de croûte), les subductions sont des **zones de disparition** de croûte océanique.



Evolution du modèle 1970 – 2010 (2)

- **Notion de déformations dans les plaques** : le poinçonnement de l'Inde

La dérive du continent indien depuis 71 MA



Il est maintenant prouvé que les déformations ne se limitent pas aux frontières des plaques mais sont présentes à l'intérieur de la plaque en particulier en avant des **zones de collision** entre continents.

Les continents entrent en collision quand la croûte océanique d'un océan a complètement disparu au niveau d'une zone de subduction. C'est le cas de la collision Inde-Eurasie depuis quelques millions d'années. Les déplacements se font le long de grandes lignes de faiblesse de la croûte continentale.

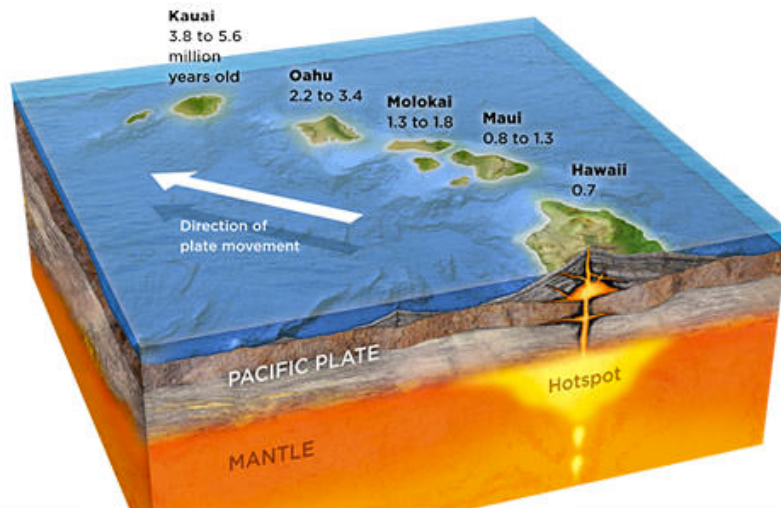
Evolution du modèle 1970 – 2010 (3)

- **Volcanisme intra-plaque**

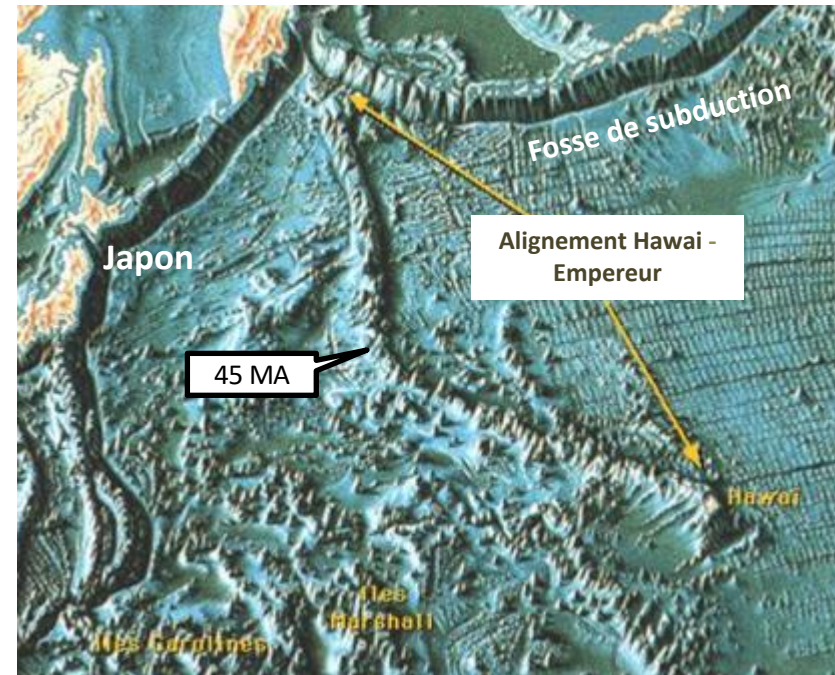
En plus de l'activité volcanique située aux limites de plaques, **certains volcans existent au sein des plaques.**

Un alignement de reliefs sous-marins continu est observable sur 3500 km dans la partie nord-ouest du Pacifique. Il est formé de volcans émergés actifs au niveau de l'archipel d'Hawaï prolongés vers le nord-ouest par des volcans sous-marins éteints (**guyots**).

L'âge du volcanisme est de plus en plus ancien en se déplaçant vers le nord-ouest à partir du volcan d'Hawaï actuel qui est à l'aplomb d'un « **point chaud** » dans le manteau.



Âge des volcans sur les îles de l'archipel d'Hawaï



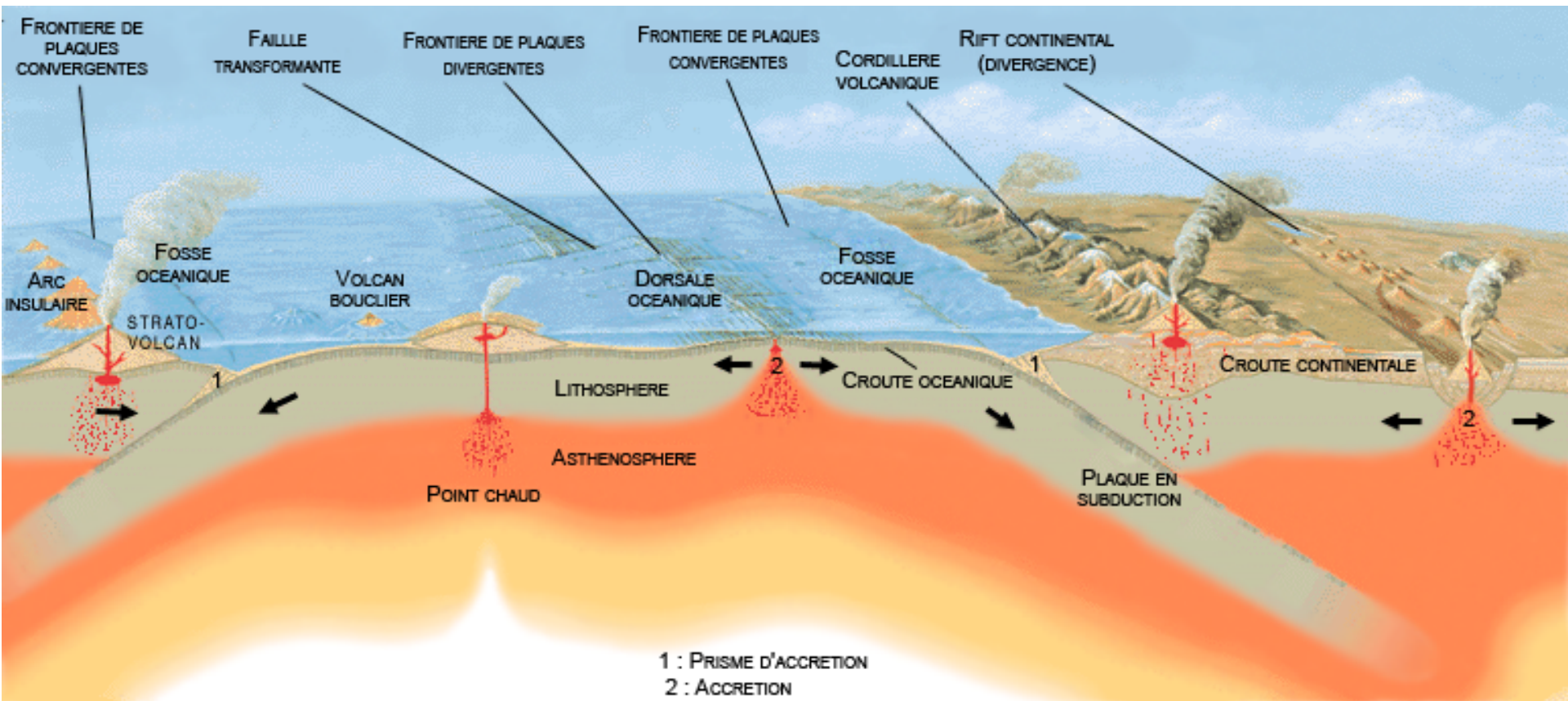
Extrait de la carte du fond océanique du Pacifique

Le mouvement de dérive de la plaque lithosphérique fait que le volcan s'éloigne progressivement de la verticale du point chaud fixe et un nouveau volcan se forme. Ce mécanisme est à l'origine de l'alignement volcanique Hawaï – Empereur.

La géométrie de l'alignement et les âges des volcans montrent un changement de direction du mouvement de la plaque vers 45 millions d'années.

La théorie donne un cadre géologique universel

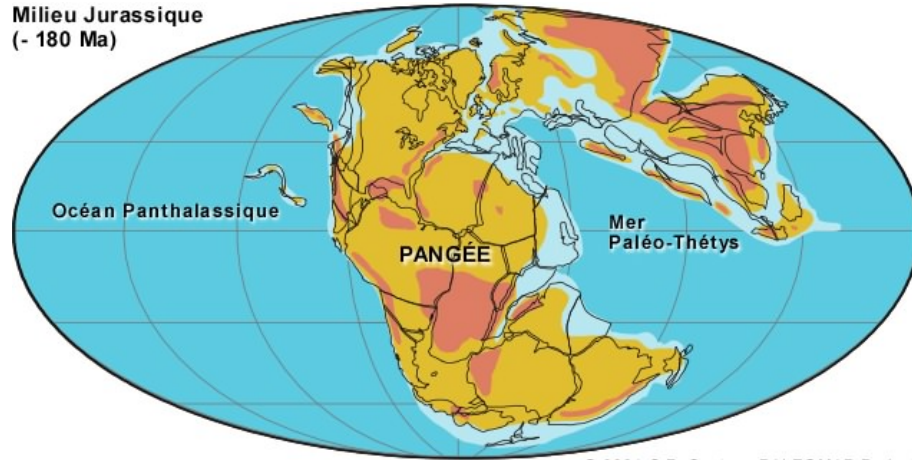
- Elle est confortée par les mesures récentes
- Elle intègre les phénomènes géologiques actuels
- Elle permet d'expliquer les phénomènes géologiques passés



Evolution depuis 180 millions d'années

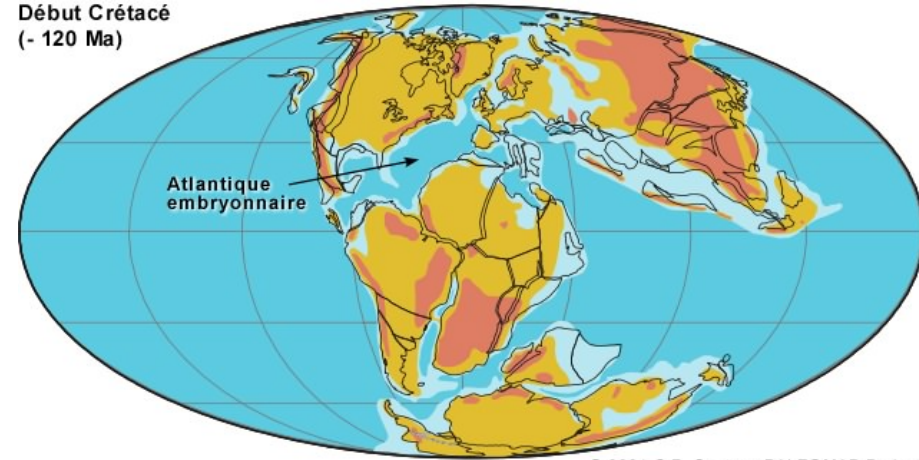
C. Scotese, 2001-US

Milieu Jurassique
(- 180 Ma)



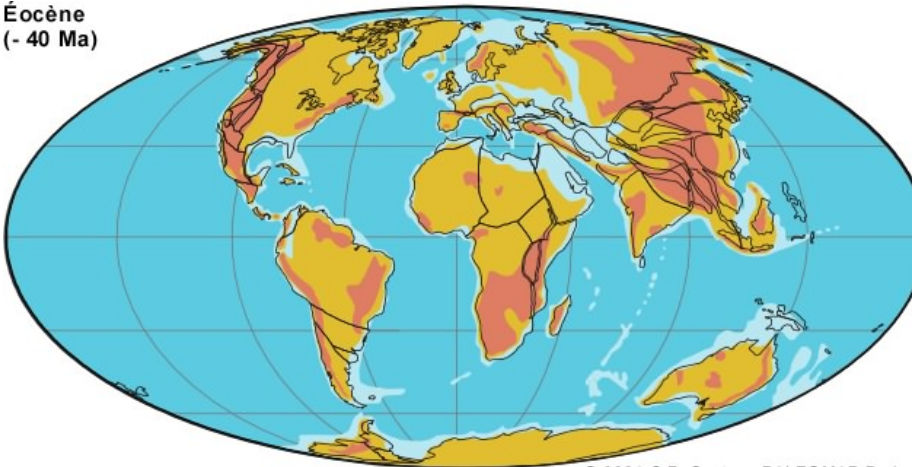
© 2001 C.R. Scotese PALEOMAP Project

Début Crétacé
(- 120 Ma)



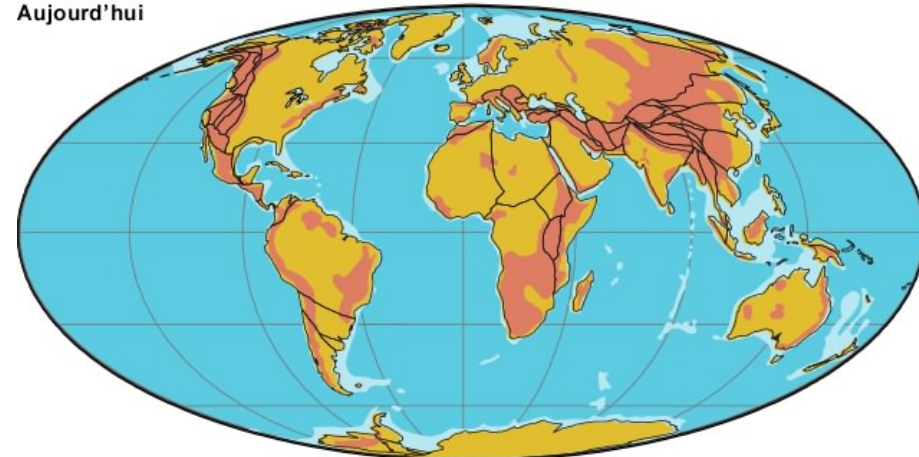
© 2001 C.R. Scotese PALEOMAP Project

Éocène
(- 40 Ma)



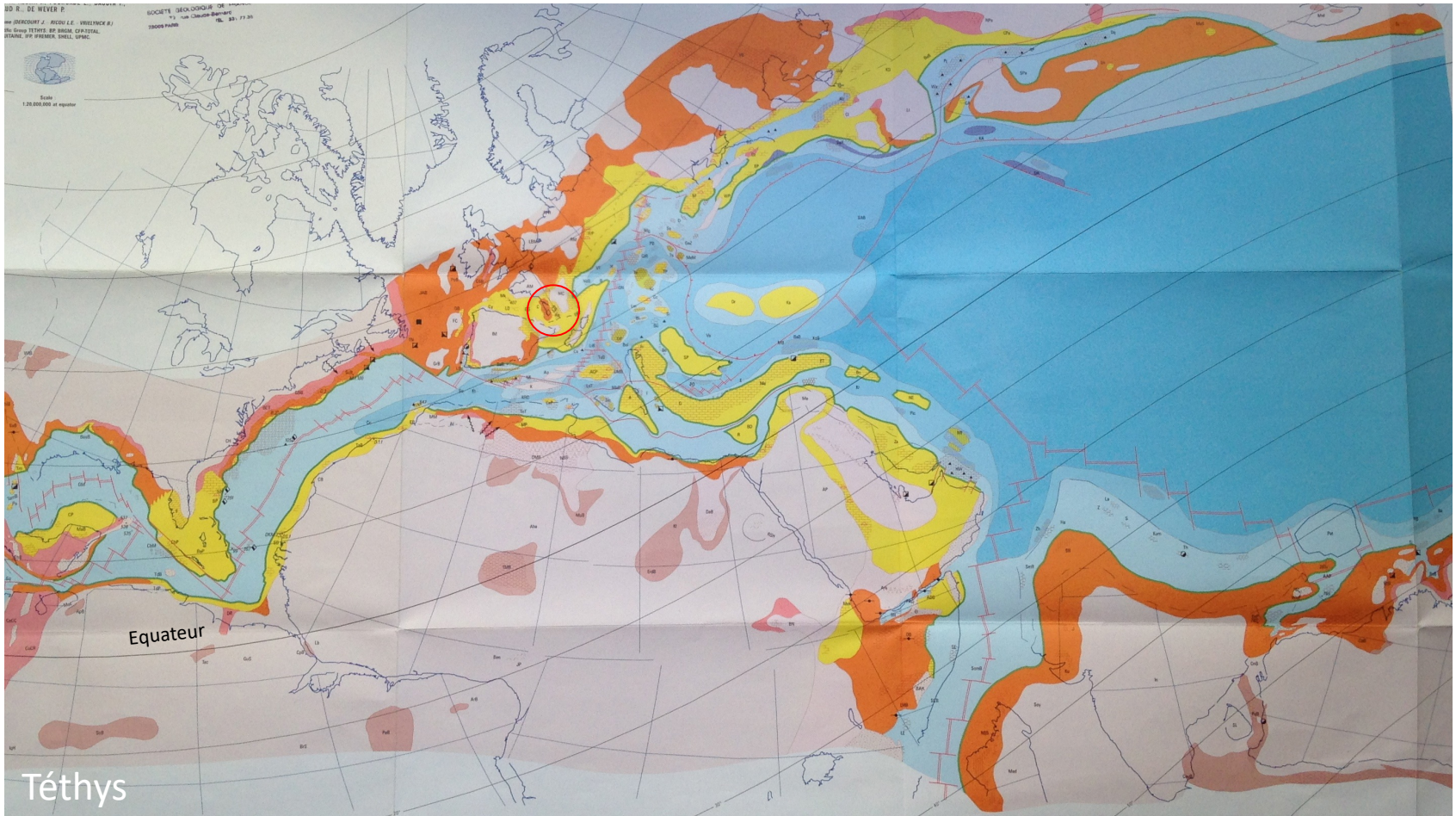
© 2001 C.R. Scotese PALEOMAP Project

Aujourd'hui



© 2001 C.R. Scotese PALEOMAP Project

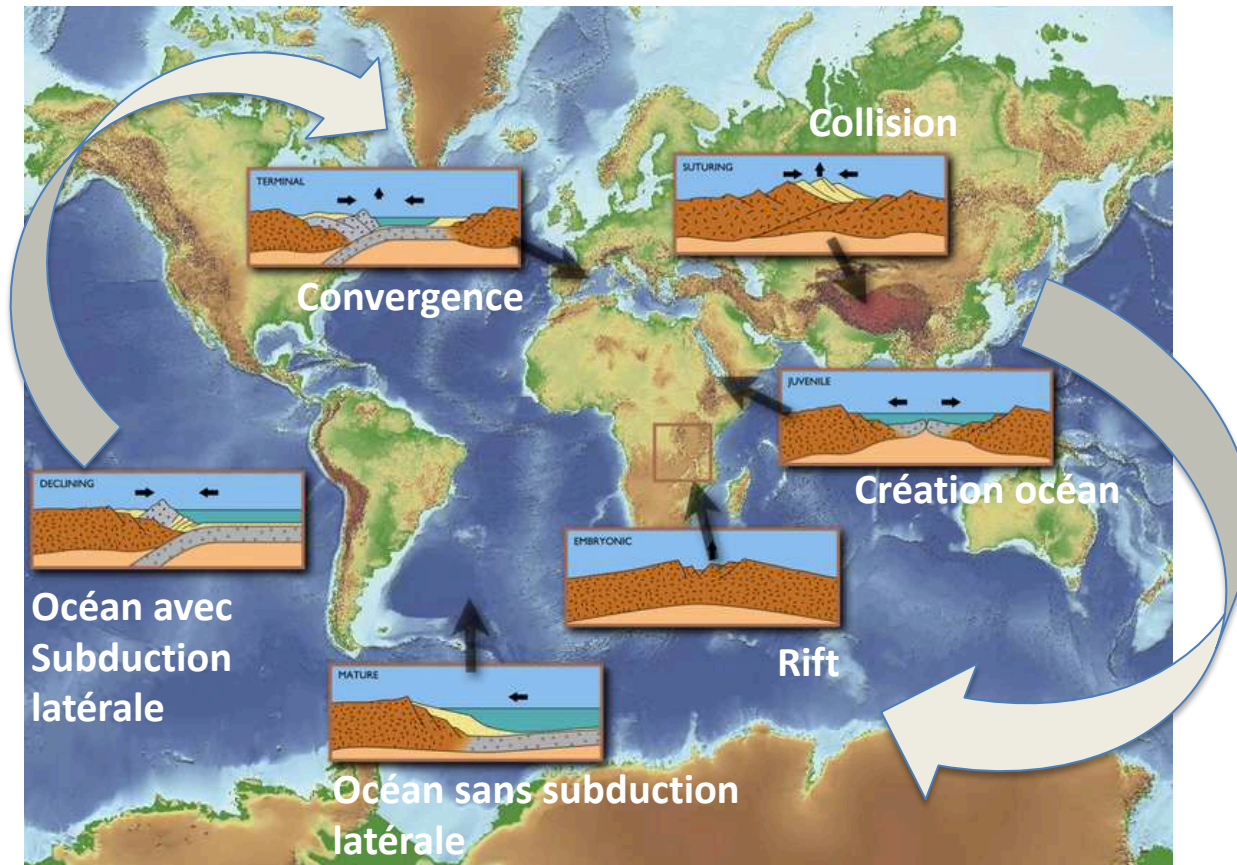
Nouvelle interprétation des phénomènes géologiques – Histoire de la Terre



Paléogéographie, il y a 145 Millions d'années. L' Atlantique central est entrain de s'ouvrir. Entre l'Europe et l'Afrique existe un océan (bleu) aujourd'hui disparu: la Thétys (rond rouge: France)

Nouvelle interprétation des phénomènes géologiques – Histoire de la Terre

Cycle de Wilson (C)



On peut à partir d'exemples actuels pris dans diverses parties du monde proposer un cycle géodynamique complet qui va de la création d'un nouvel océan au sein d'un continent (Rift Est-Africain – Mer Rouge), son élargissement à partir d'une ride (Atlantique) puis sa fermeture progressive au niveau d'une zone de subduction - convergence (Pacifique-Méditerranée), jusqu'à la collision (Himalaya).