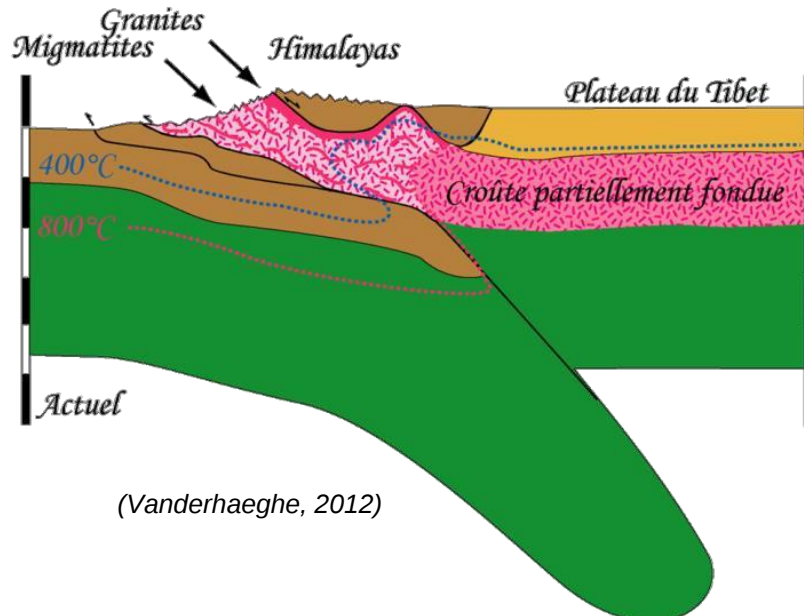


Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



Aurélien Eglinger
aurelien.eglinger@univ-lorraine.fr



Géodynamique:

Tectonique des plaques et cycle orogénique



Aurélien Eglinger
aurelien.eglinger@univ-lorraine.fr

Sommaire

I. Théories de la tectonique des plaques et cycles orogéniques

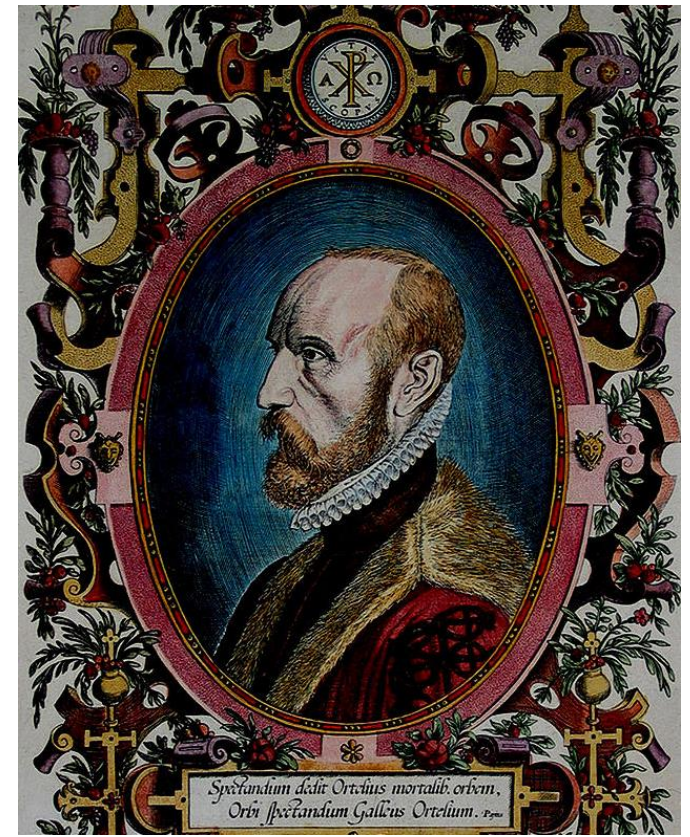
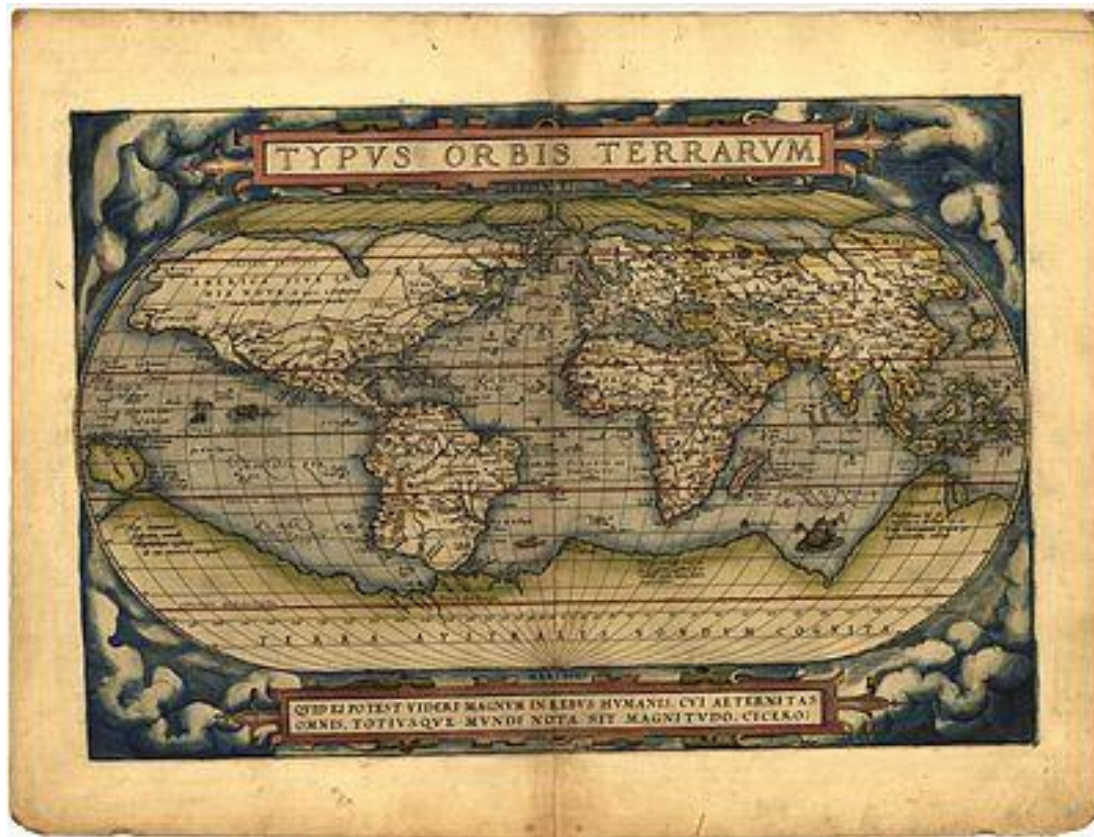
II. Extension de la lithosphère continentale: du rift continental aux marges passives

III. Ouverture et expansion des océans: relations divergence des plaques océaniques et magmatisme

IV. Fermeture et subduction: relations subduction océanique et magmatisme sur marge active

V. Collision et subduction continentale: évolution thermomécanique de la lithosphère continentale dans les zones de convergence, mécanismes d'épaississement (A. Richard)

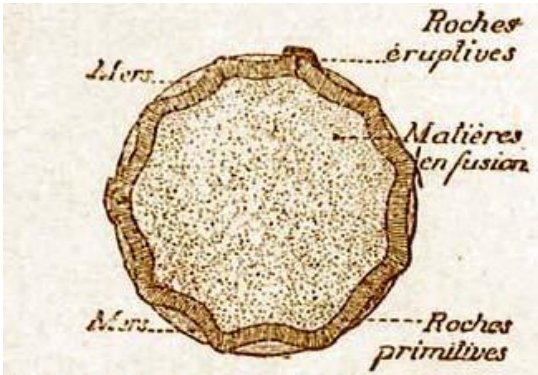
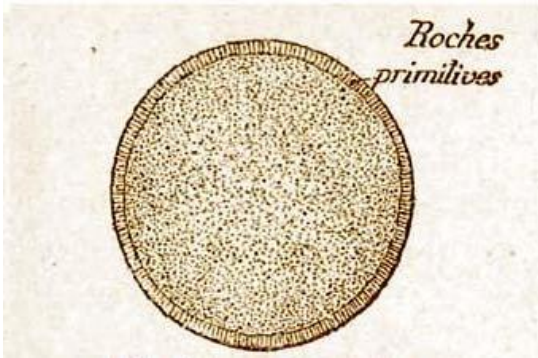
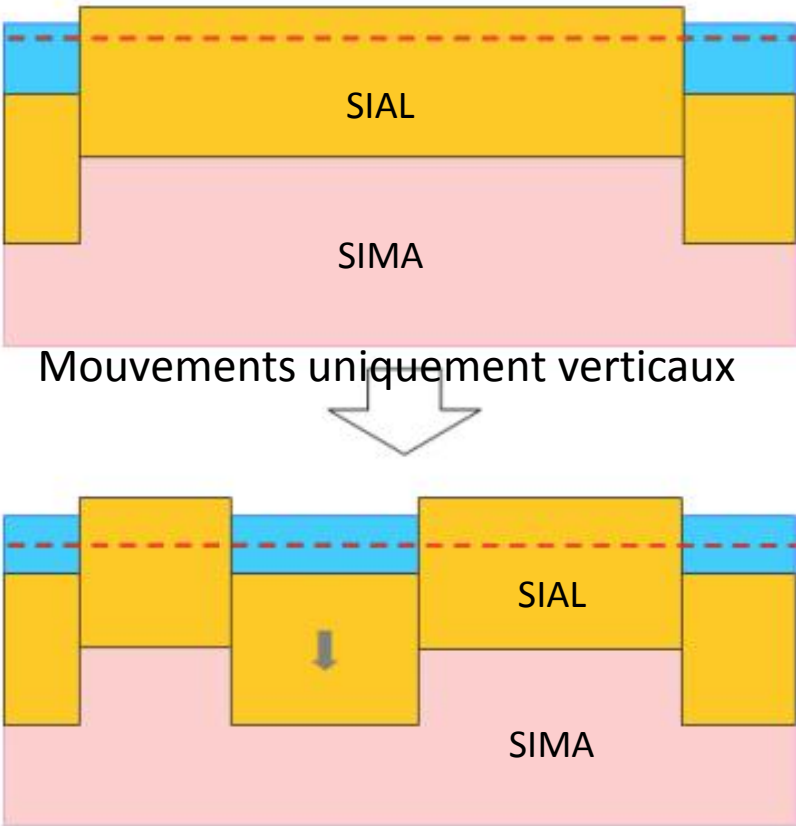
VI. Effondrement des orogènes: de la formation d'un prisme à l'effondrement gravitaire – mécanismes d'exhumation et d'amincissement (A. Richard)



Thesaurus geographicus (Abraham Ortelius, 1596): précurseur de la dérive des continents

⇒ Correspondance des côtes Est de l'Amérique du Sud et Ouest de l'Afrique: précurseur de la dérive des continents

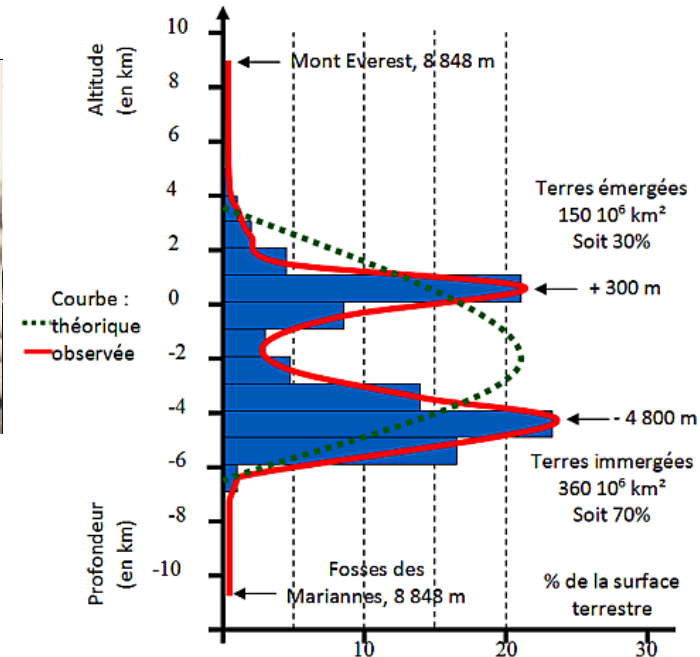
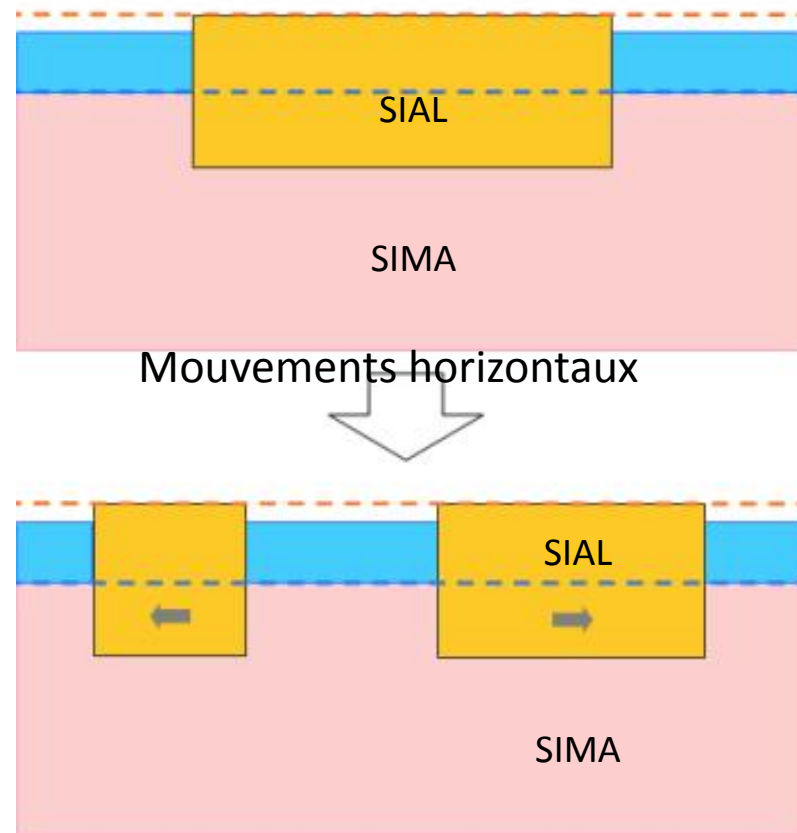
Théorie **fixiste** (Suess, 1883)



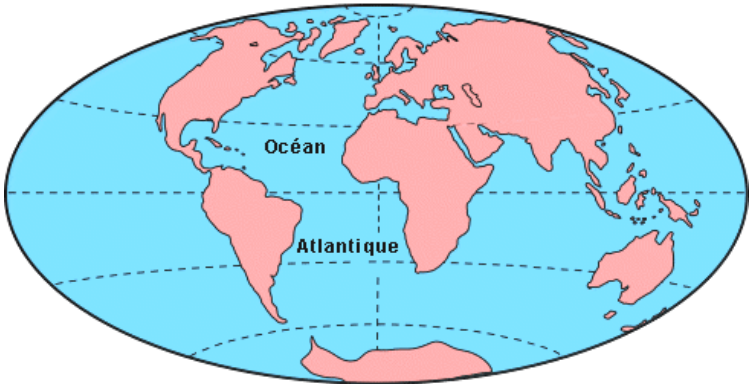
SIAL (Si, Al):
« croûte continentale »
SIMA (Si, Mg):
« croûte océanique »

⇒ **Refroidissement de la Terre** entraîne une **diminution de son volume** et donc de sa surface: phénomènes de **compression** à l'origine des **chaînes de montagne** et de vastes **dépressions** formant les océans.

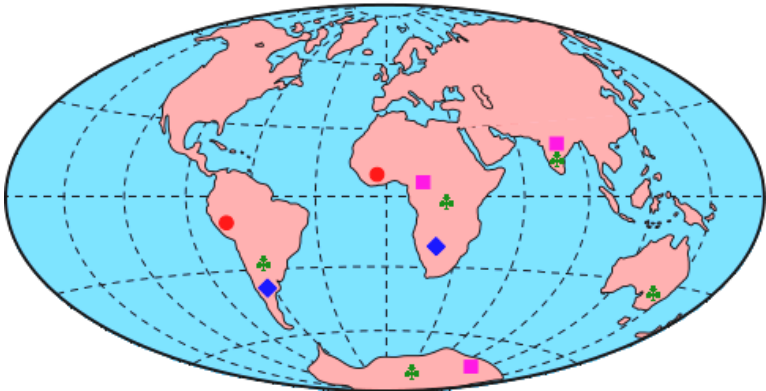
Théorie **mobaliste** (Wegener, 1883)



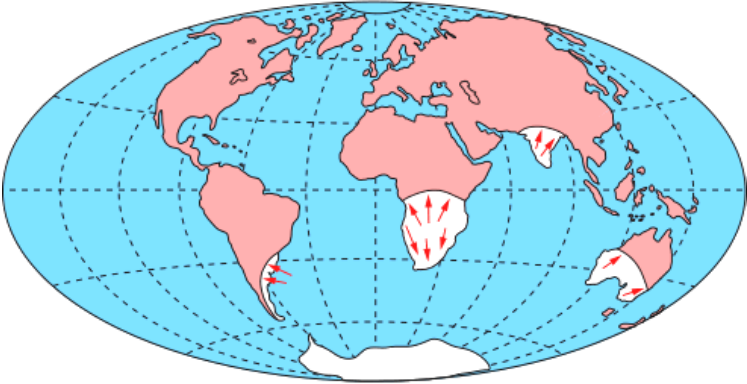
⇒ Distribution **bimodale** et non gaussienne de l'analyse statistique des altitudes à la surface du globe: **croûte terrestre** formée de **deux couches** distinctes (légère/dense).



Wegener, 1912



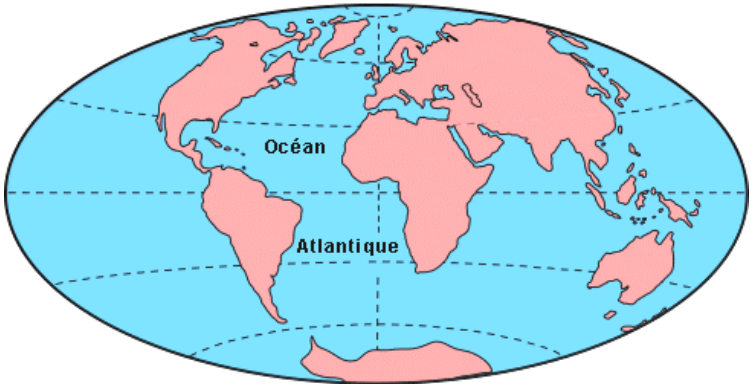
- **Cynognathus**: reptile prédateur terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ◆ **Mesosaurus**: petit reptile de lacs d'eau douce, il y a 260 Ma
- **Lystrosaurus**: reptile terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ☙ **Glossopteris**: plante terrestre d'il y a 240 Ma



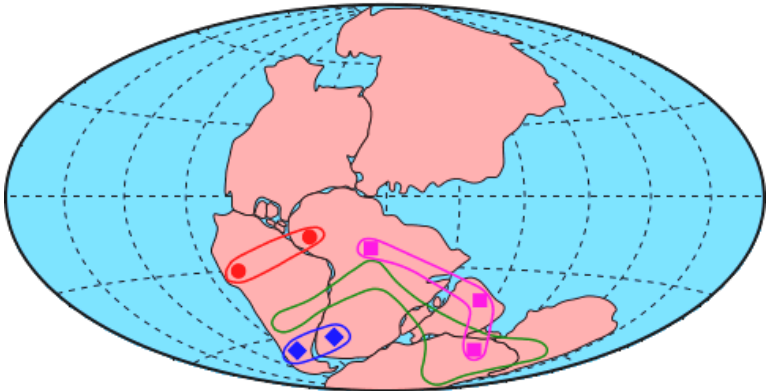
→ sens d'écoulement de la glace

3 arguments:

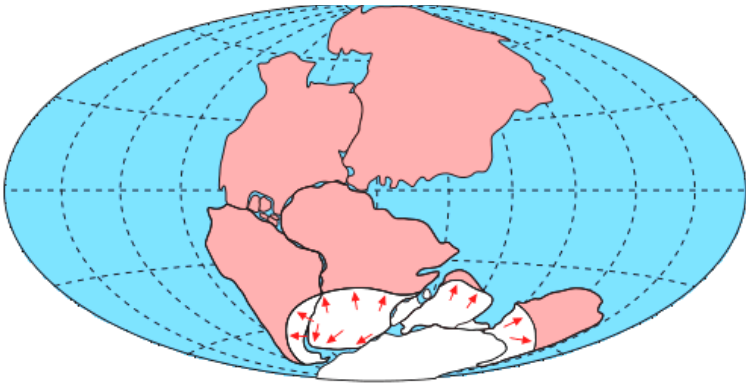
- ✓ **géographique**: forme complémentaire des continents
- ✓ **paléontologique**: mêmes fossiles ayant le même âge (triasique)
- ✓ **pétrographique**: trace de glaciation et écoulement des glaces semblables



Wegener, 1912



- **Cynognathus**: reptile prédateur terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ◆ **Mesosaurus**: petit reptile de lacs d'eau douce, il y a 260 Ma
- **Lystrosaurus**: reptile terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ✚ **Glossopteris**: plante terrestre d'il y a 240 Ma



—→ sens d'écoulement de la glace

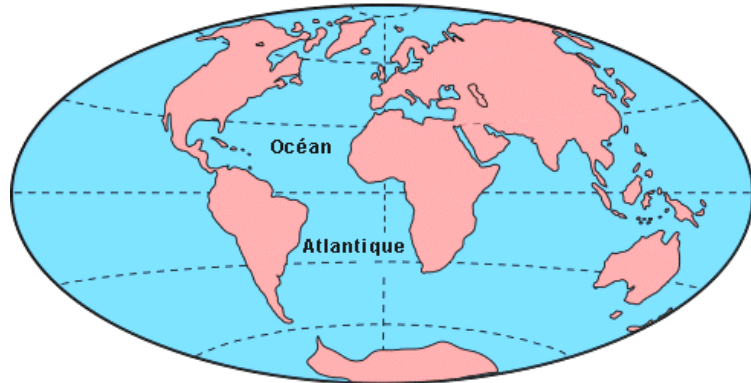
3 arguments:

- ✓ **géographique**: forme complémentaire des continents
- ✓ **paléontologique**: mêmes fossiles ayant le même âge (triasique)
- ✓ **pétrographique**: trace de glaciation et écoulement des glaces semblables

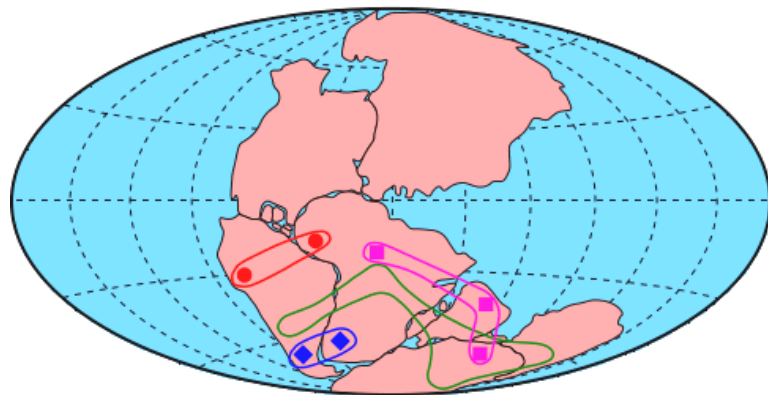
⇒ Naissance de la théorie de la **dérive des continents**

1. Historique

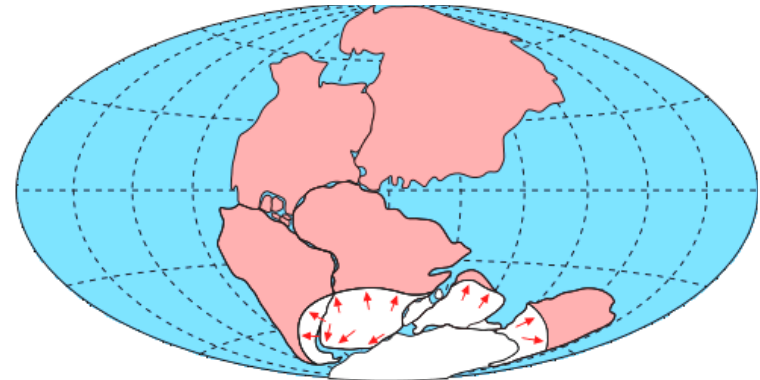
⇒ De la **dérive des continents** ...



Wegener, 1912



- **Cynognathus**: reptile prédateur terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ◆ **Mesosaurus**: petit reptile de lacs d'eau douce, il y a 260 Ma
- **Lystrosaurus**: reptile terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ✚ **Glossosaurus**: plante terrestre d'il y a 240 Ma

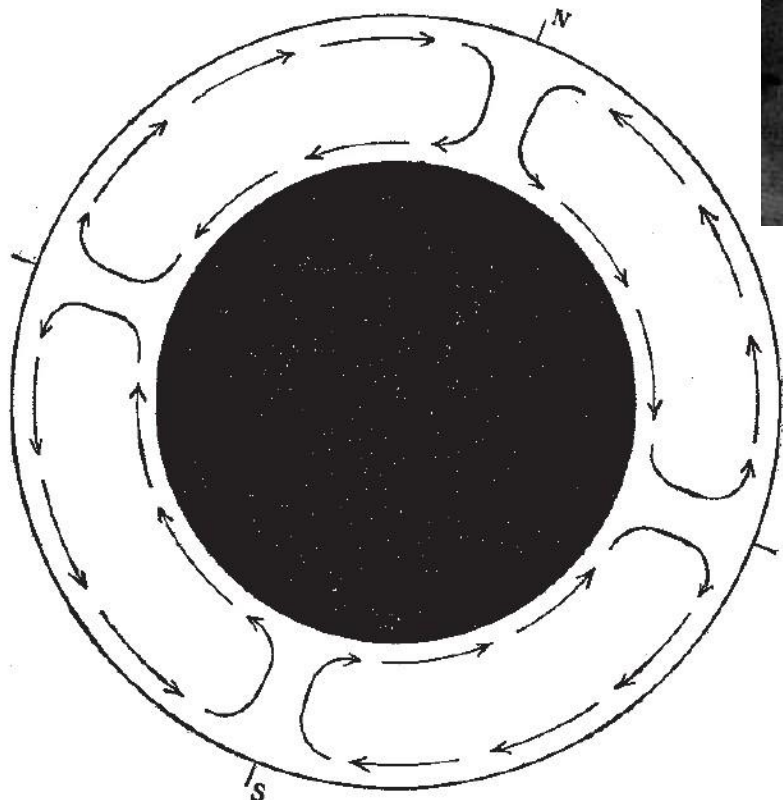


→ sens d'écoulement de la glace

⇒ Les continents tendent à **s'éloigner vers l'Ouest** du fait de la **rotation** de la planète, d'une part, et la **force d'Eötvös** qui tend à pousser les continents vers l'équateur

⇒ Mécanismes proposés par Wegener ne semblent pas convaincre la communauté scientifique: **théorie abandonnée**

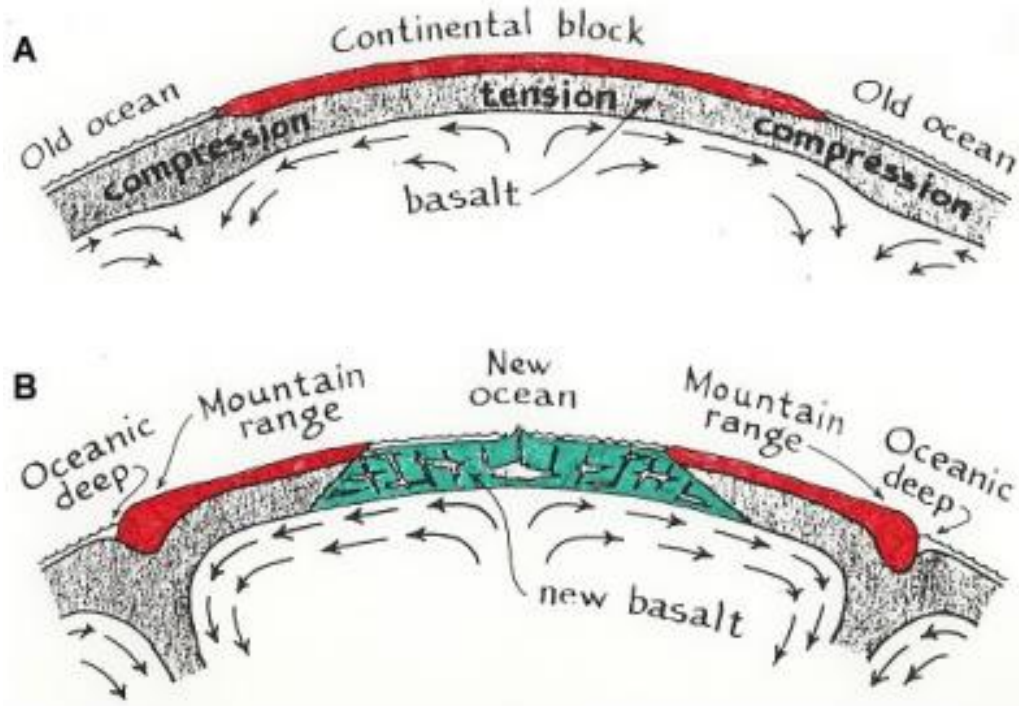
Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



Holmes, 1929

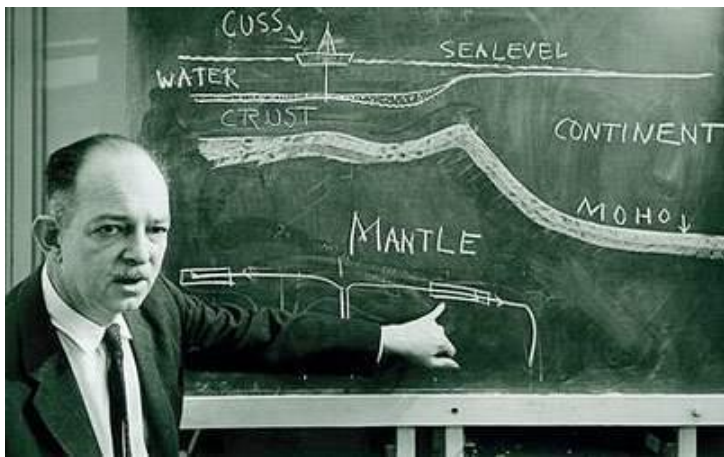
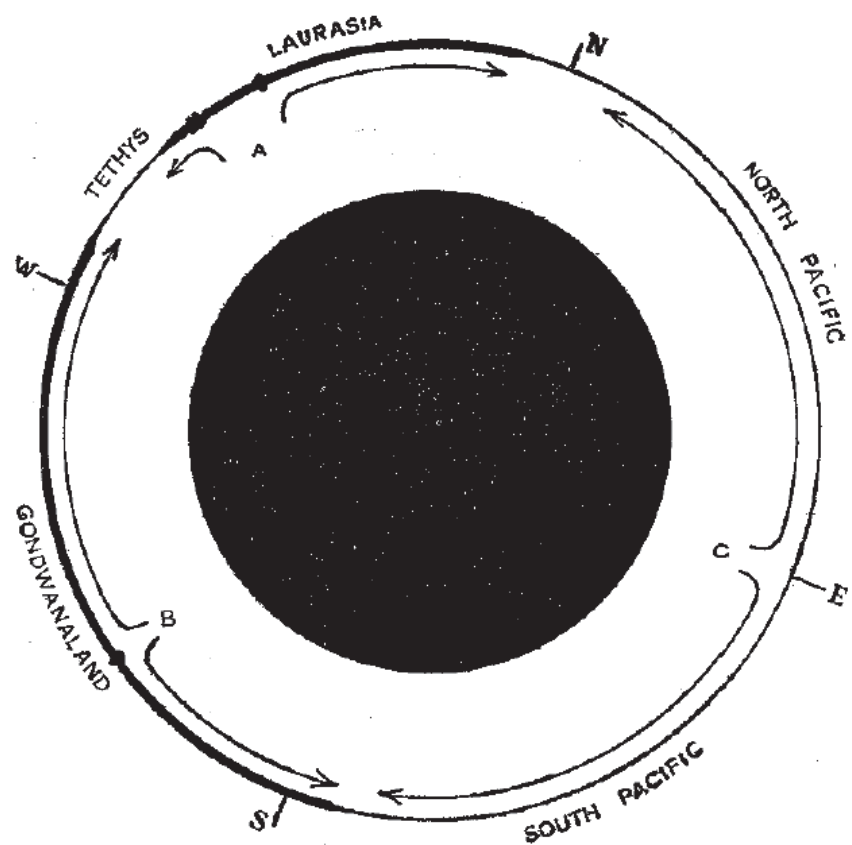


⇒ Désintégrations **radioactives** => chaleur => mouvement de **convection** mantellique basaltique => **moteur** de la dérive des continents: les plaques continentales et océaniques sont de nature différente.

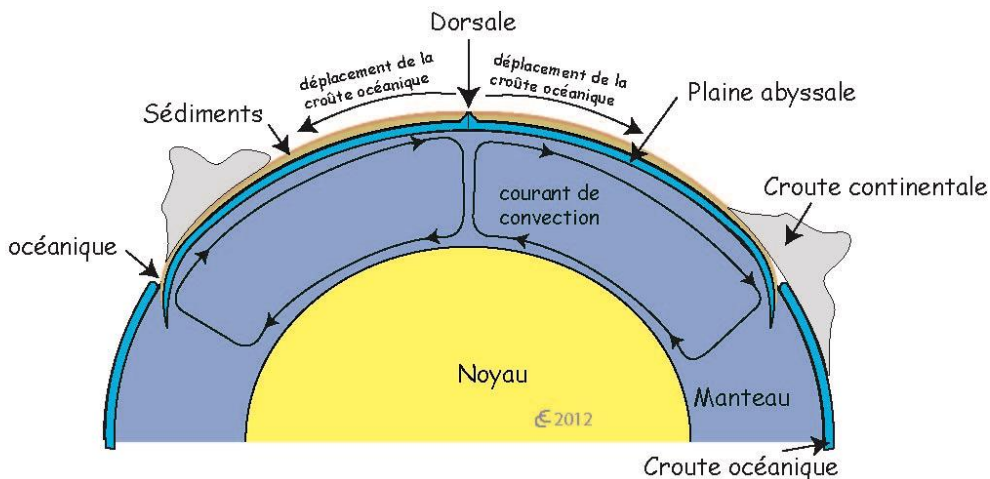


1. Historique

⇒ De la **dérive des continents** ... à la **tectonique des plaques**



(Hess, 1962)



⇒ Découverte des **fonds océaniques** et des **dorsales médio-océaniques** => hypothèse de **l'expansion des fonds océaniques** (confortée en parallèle par les études géomagnétiques).

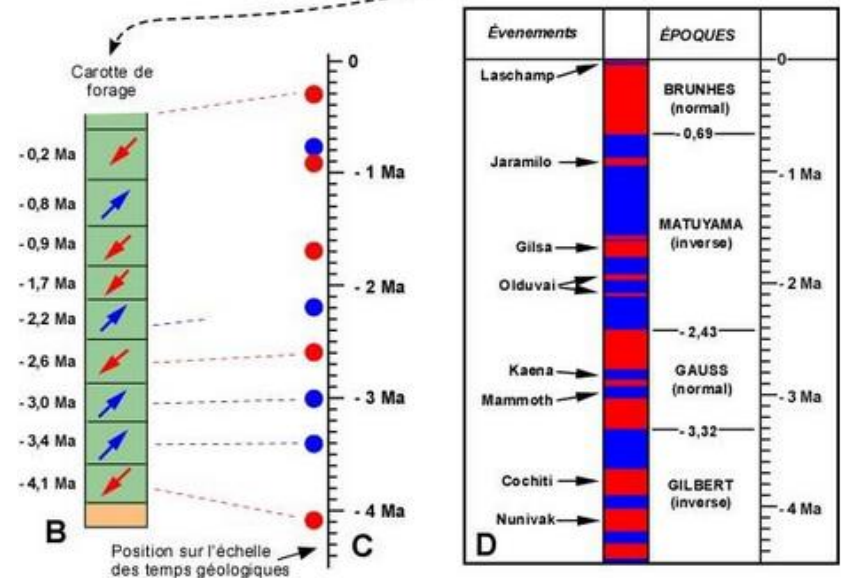
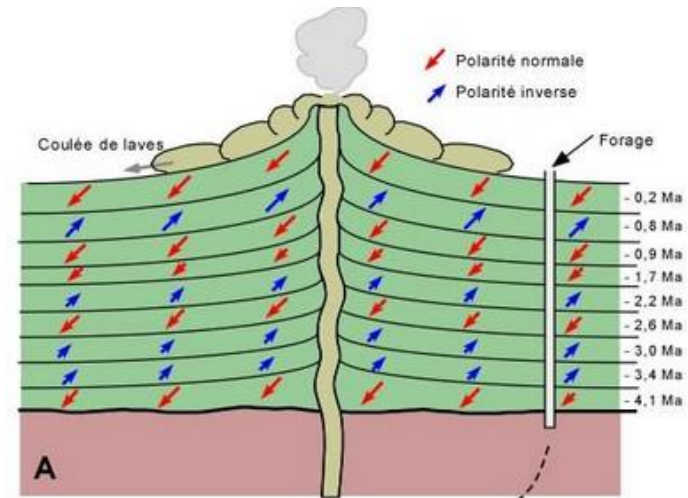
Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

1. Historique

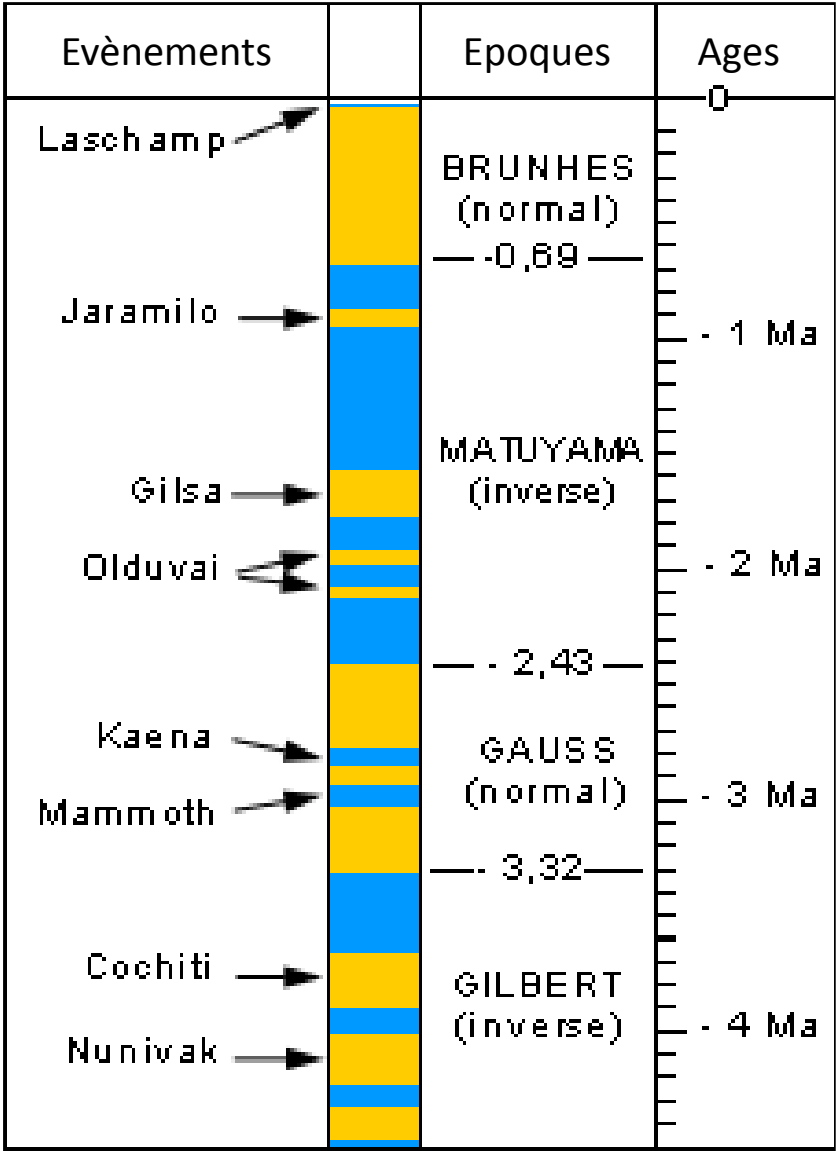
⇒ De la **dérive des continents** ... à la **tectonique des plaques**

⇒ L'existence d'anomalies magnétiques est connue depuis 1905 et 1929 sur les **basaltes continentaux** (Brunhes puis Matuyama): preuve des **inversions** des **pôles** au cours des temps géologiques.

⇒ Lorsque le basalte se forme au cours d'une **période normale** (nord magnétique en position identique à celle d'aujourd'hui), le **champ magnétique propre au basalte** sera de **même orientation** que le **champ magnétique terrestre**: intensité mesurée (résultante des deux champs) = anomalie **positive**



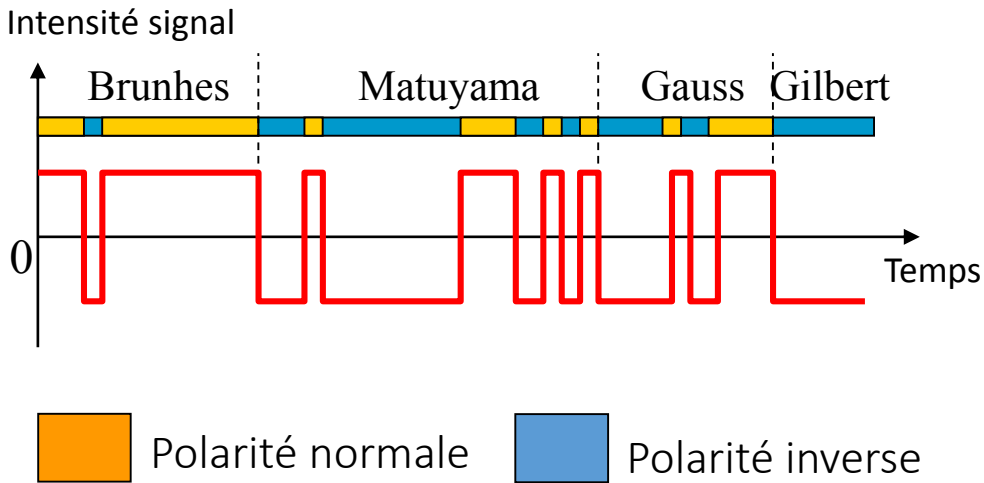
⇒ Echelle **magnétostratigraphique** réalisée par **datation** des **inversions magnétiques** en domaine **continental** (basaltes océaniques trop altérés).

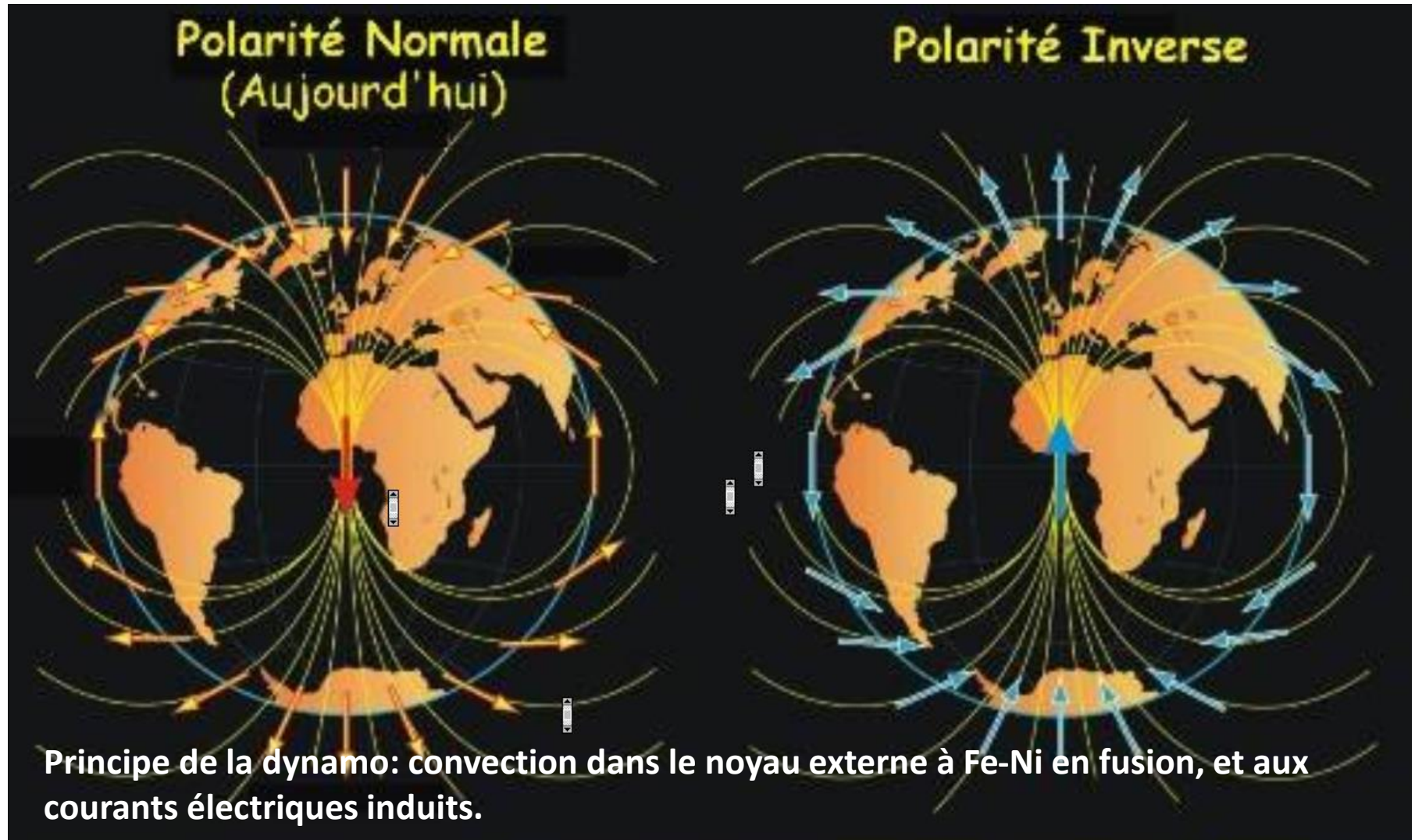


⇒ Echelle **magnétostratigraphique** qui montre que le C.M.T. est une succession de périodes stables pendant lesquelles le **champ** est **dipolaire**.

⇒ Chaque période stable est délimitée par deux inversions géomagnétiques (renversement de polarité).

Cette échelle peut se traduire en **signal**:





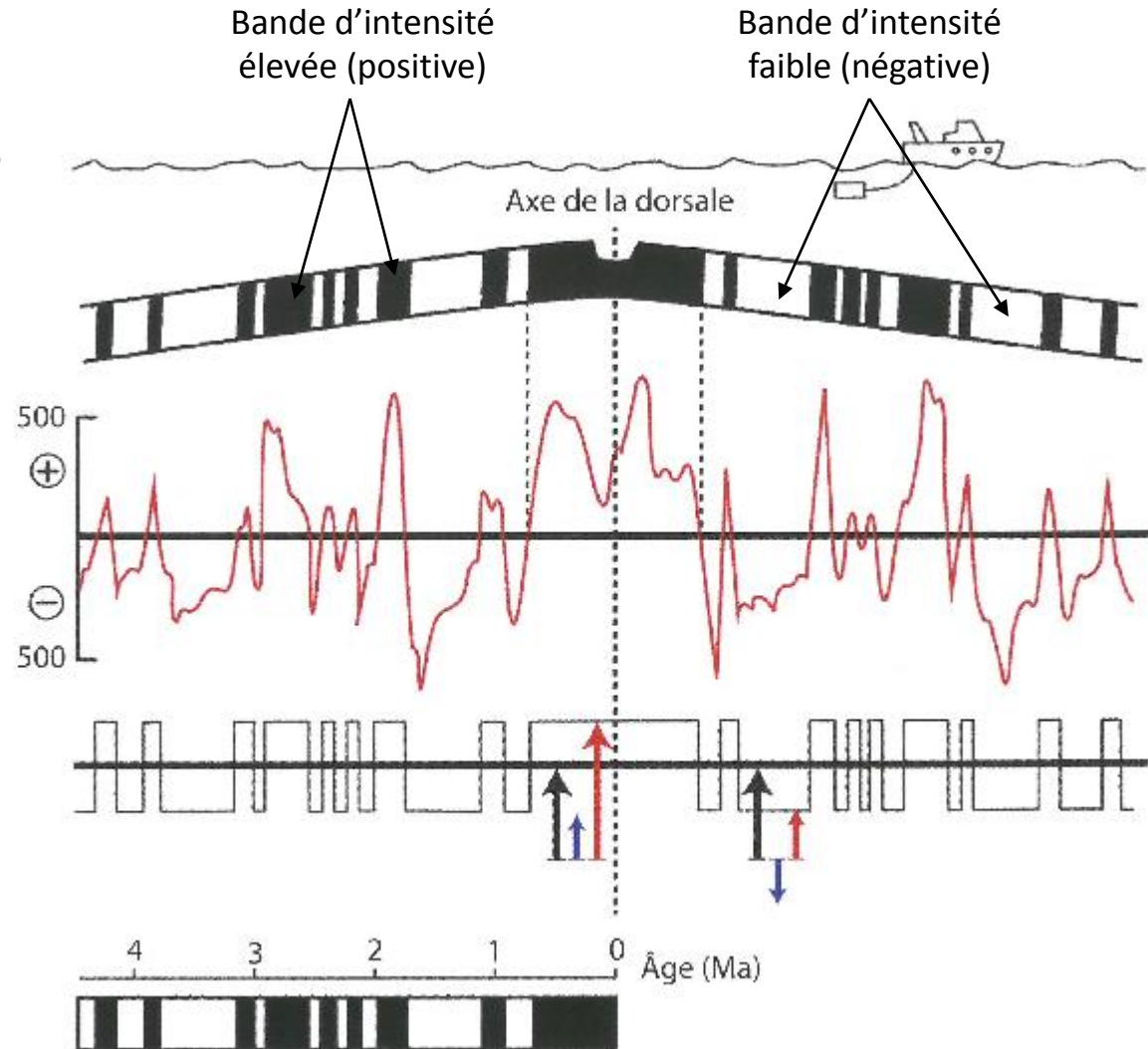
⇒ Le **champ terrestre** s'est inversé environ **300 fois** ces derniers **200 millions d'années**.
La dernière inversion est survenue il y a **780 000 ans**.

⇒ **Parallèle** des travaux en domaines **continentaux** et **océaniques**: l'âge du **plancher océanique** est d'autant plus **vieux** qu'il est **éloigné** de l'axe de la **dorsale**.



(Glomar Challenger, USA, 1960-1980: 2000 puits dans le plancher océanique sous des profondeurs d'eau allant jusqu'à 9000m)

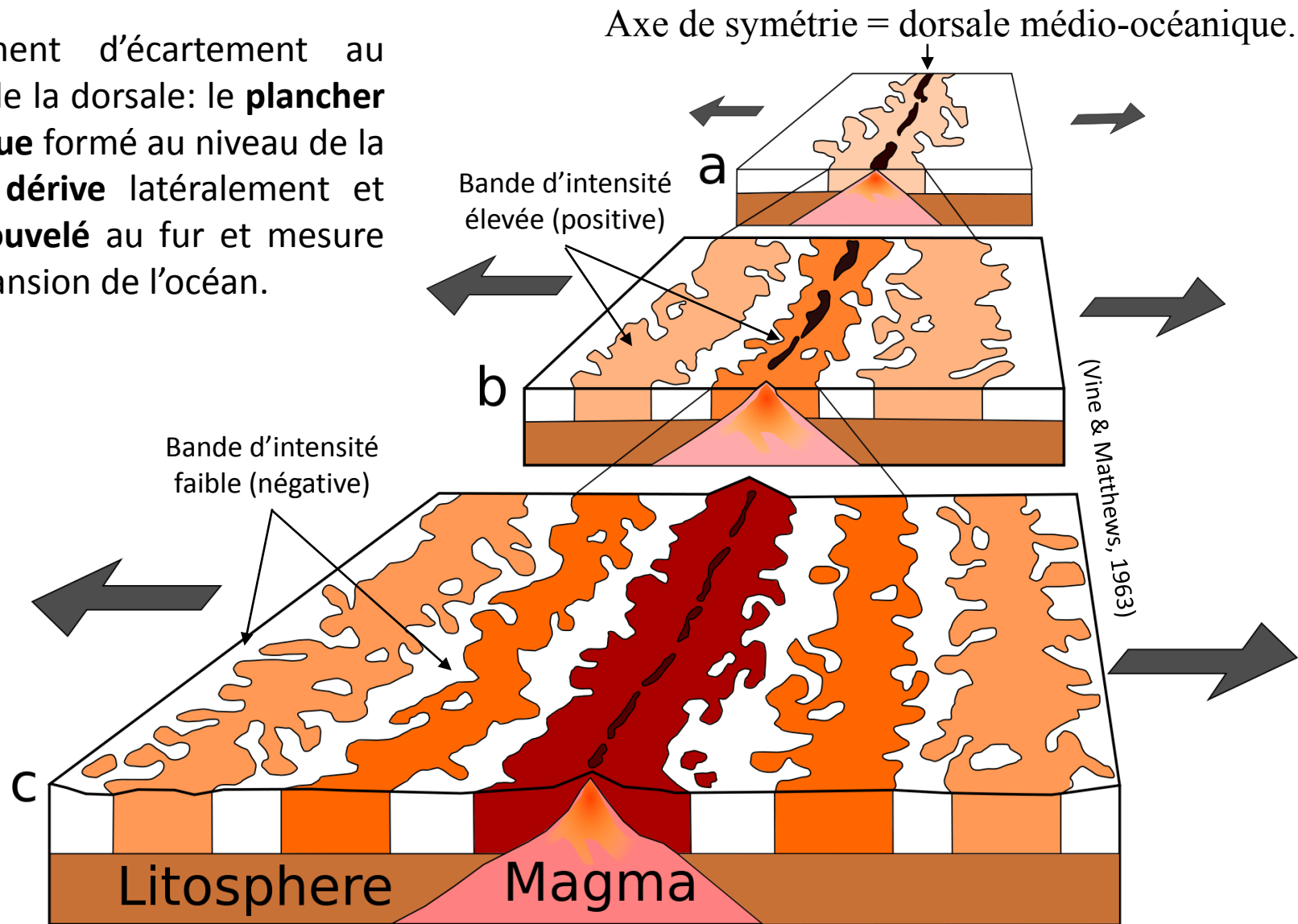
- ✓ Association **anomalie-âge** avec échelle magnétostratigraphique
- ✓ Ages **biostratigraphiques**



1. Historique

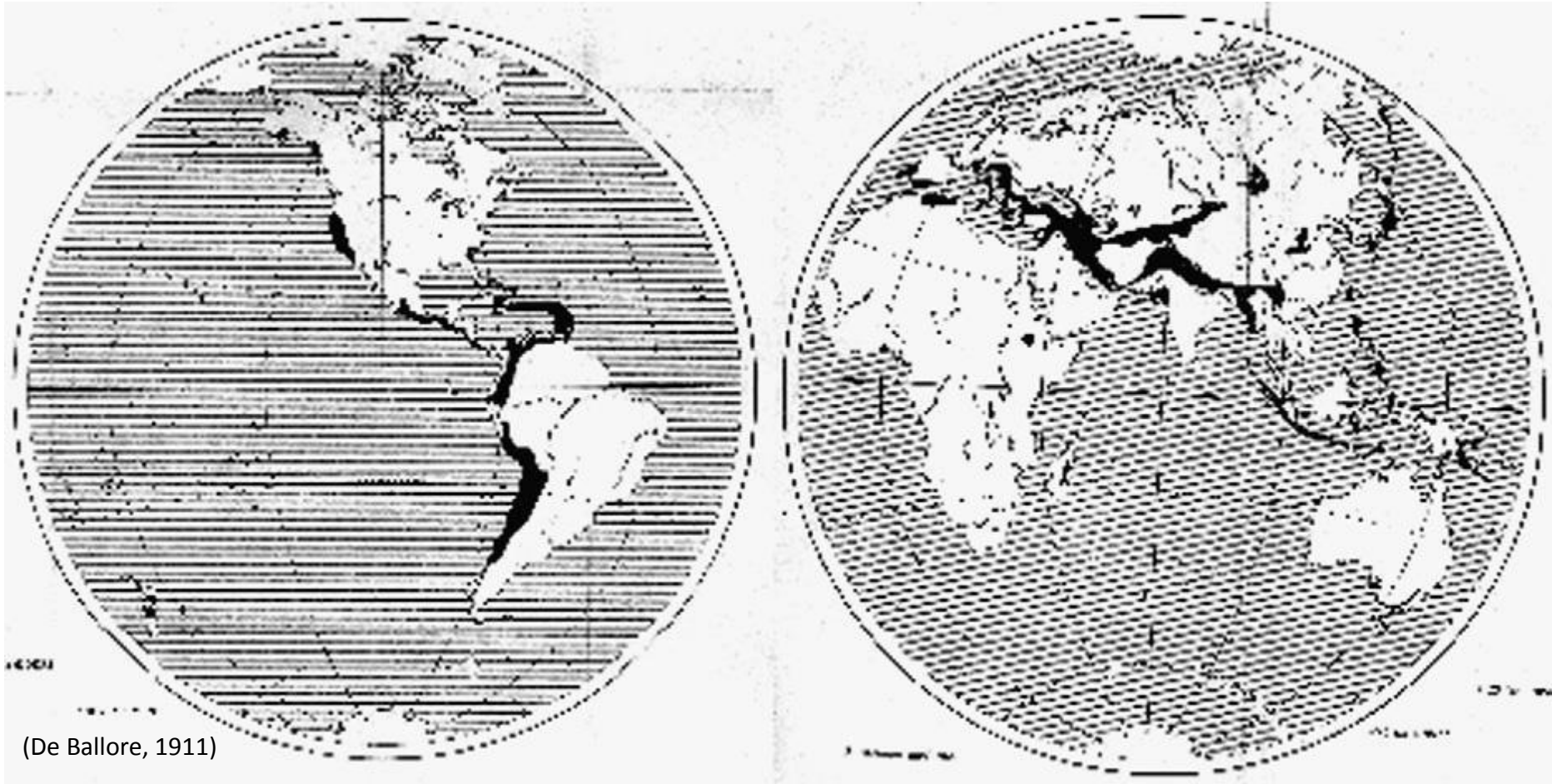
⇒ De la **dérive des continents** ... à la **tectonique des plaques**

⇒ Mouvement d'écartement au niveau de la dorsale: le **plancher océanique** formé au niveau de la dorsale **dérive** latéralement et est **renouvelé** au fur et mesure de l'expansion de l'océan.



⇒ Théorie de l'**expansion océaniques**: seafloor spreading (1960)

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



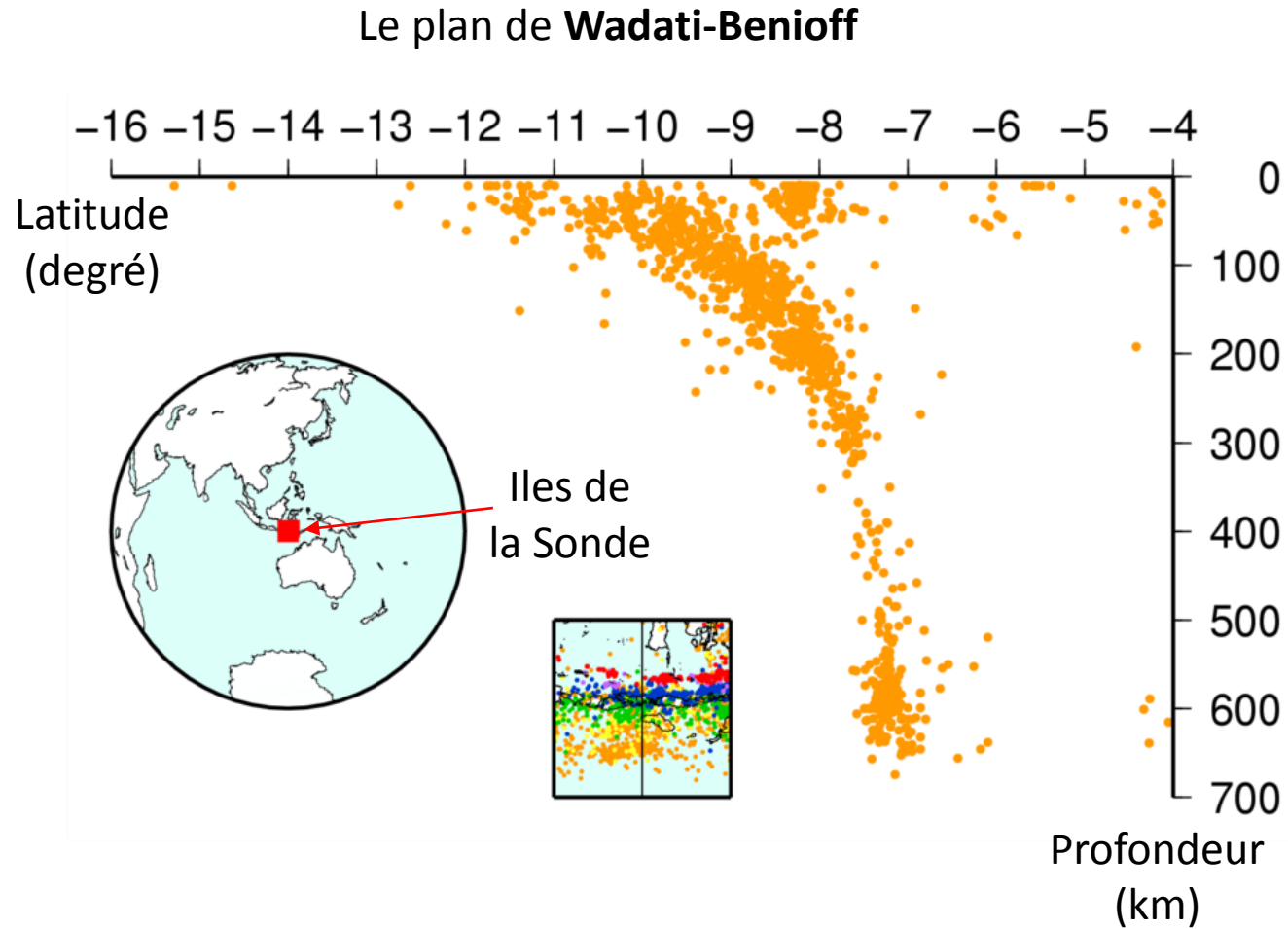
⇒ Activité **sismique** localisée le long des **chaînes de montagnes** en formation



(Wadati, 1935)

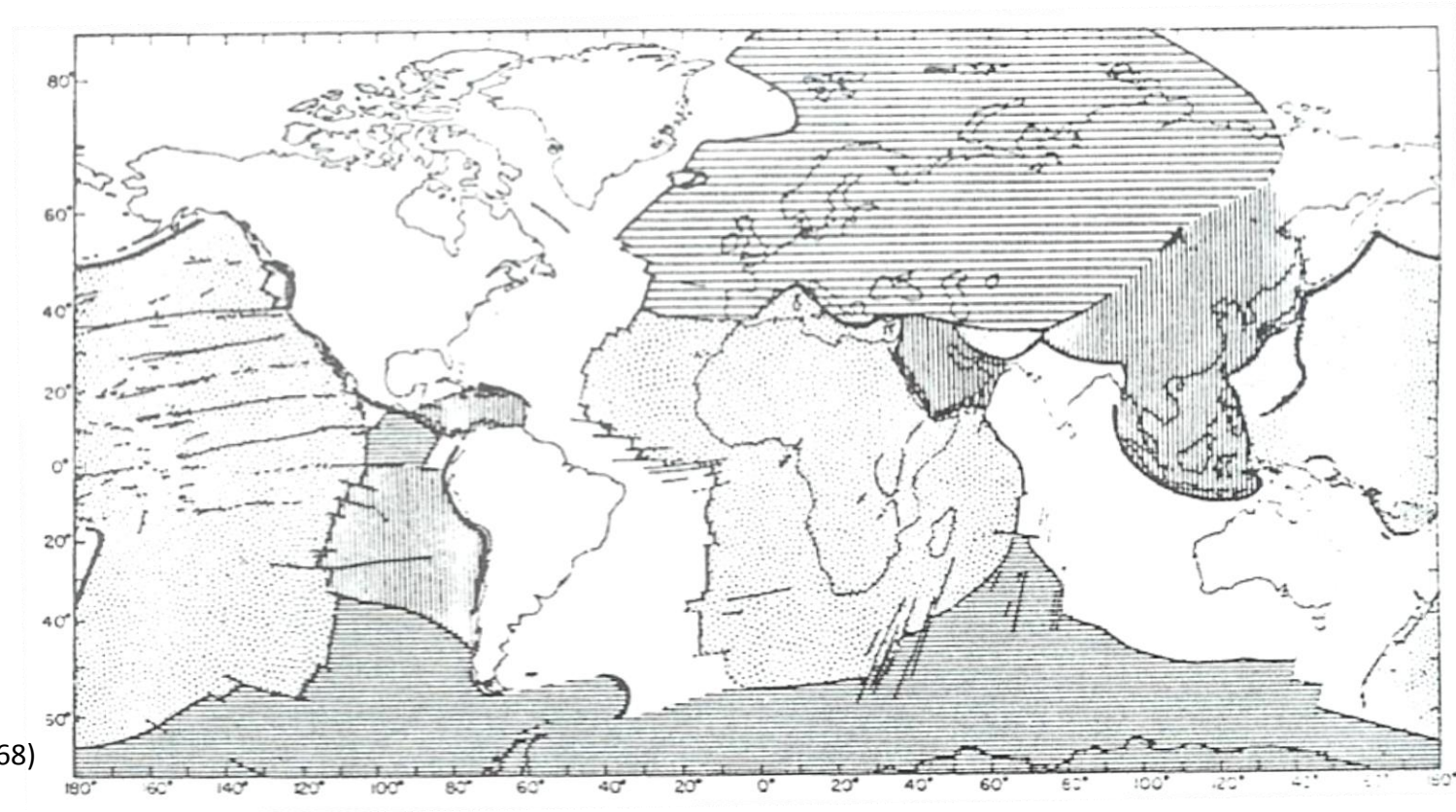


(Benioff, 1949)



⇒ Distribution des **hypocentres** des séismes aux **limites** de **plaques** continent-océan mais aussi continent-continent: naissance de la théorie du **panneau plongeant**

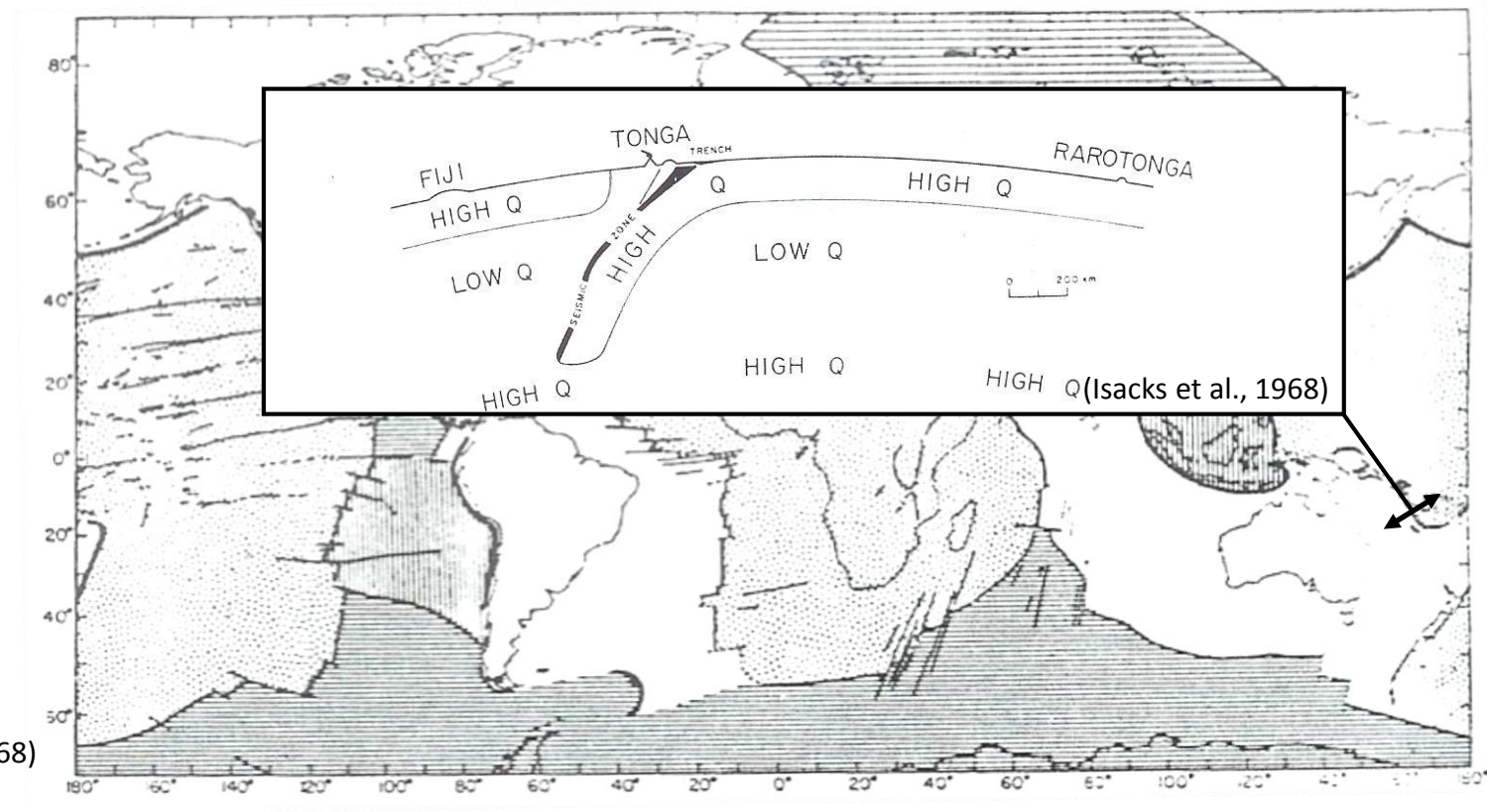
Les « plaques » selon Jason Morgan



(Morgan, 1968)

⇒ Couplage de ces différentes approches (magnétique, sismique...)=> première hypothèse « plaquiste »: la **lithosphère** est découpée en une série de « **blocs** » puis « **plaques** » parfaitement **rigides** se déplaçant sur **l'asthénosphère** (Isacks et al., 1968; Le Pichon, 1968; Morgan, 1968)

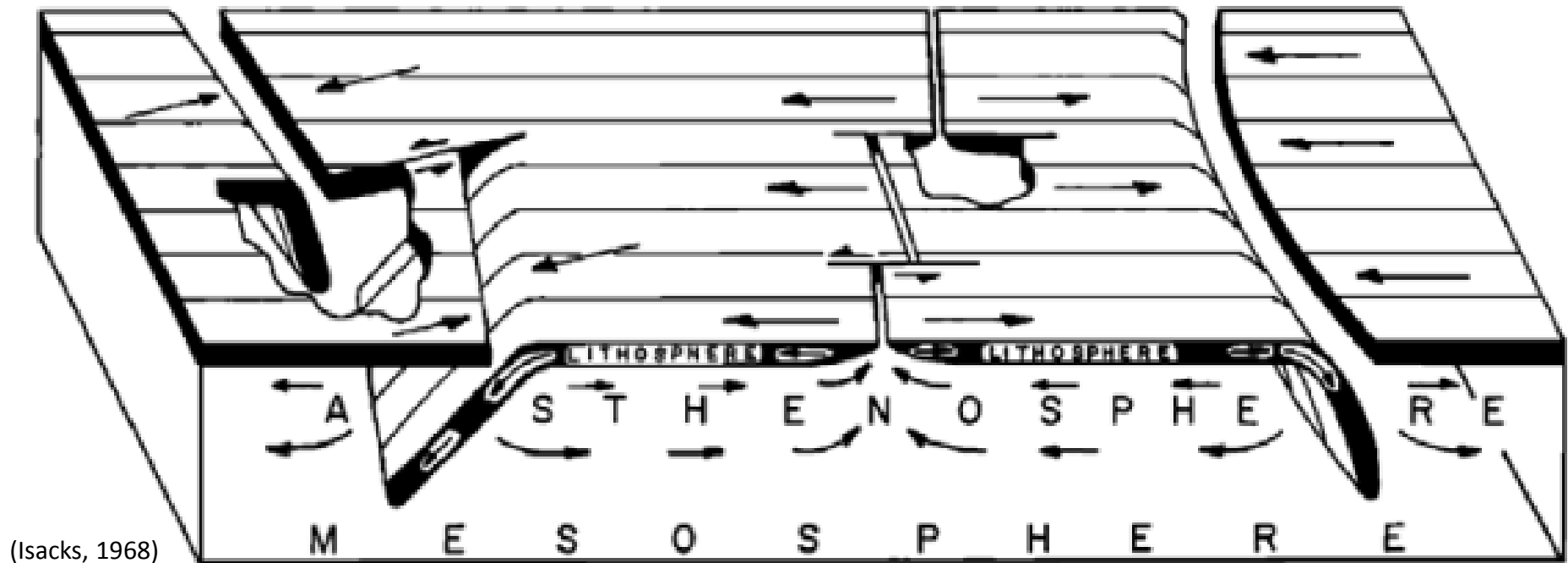
Coupe géologique hypothétique à travers Les Fiji, Tonga et Rarotonga



(Morgan, 1968)

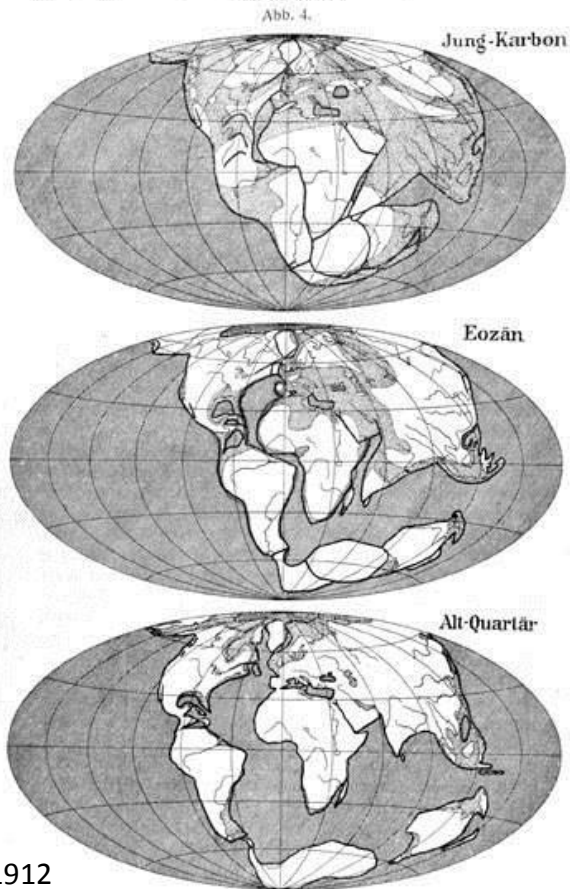
⇒ Premières **coupes géologiques** obtenues notamment grâce à l'étude des **ondes sismiques** (atténuation des ondes au cours de leur propagation)

Diagramme synthétique illustrant la nouvelle tectonique globale

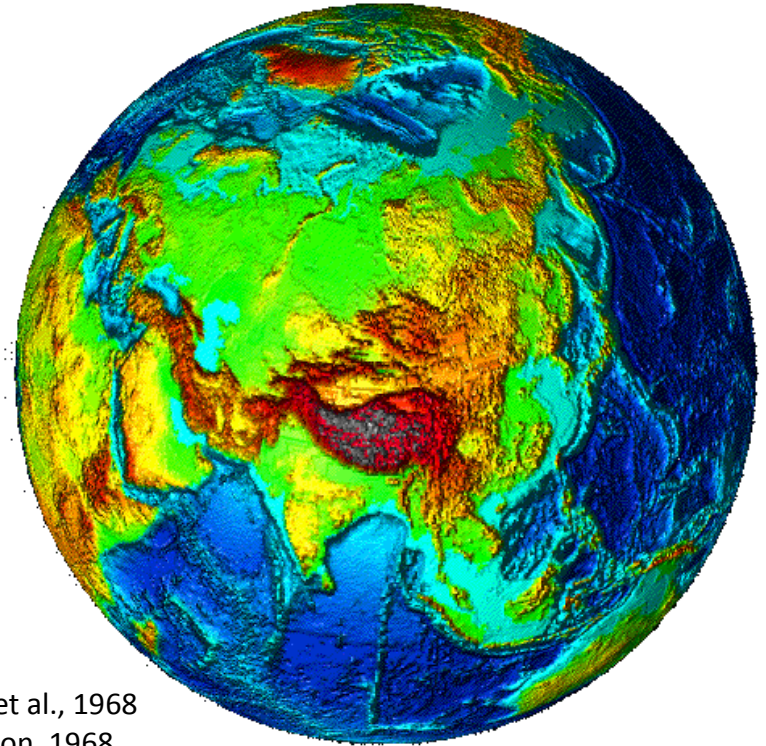


(Isacks, 1968)

⇒ Premiers **modèles géodynamiques (fin 1970)** à l'échelle **lithosphérique** proposés incluant les concepts: ouverture ≠ fermeture des océans; divergence ≠ convergence; rifting océanique; expansion océanique; subduction océanique; raccourcissement; chaînes de montagne ou orogène; collision.



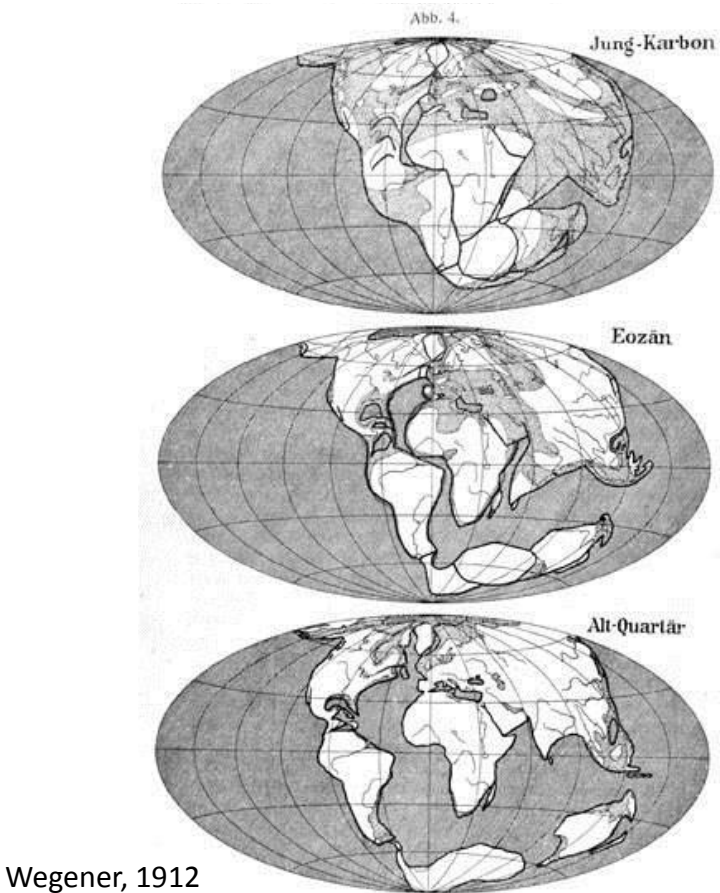
50-60 ans



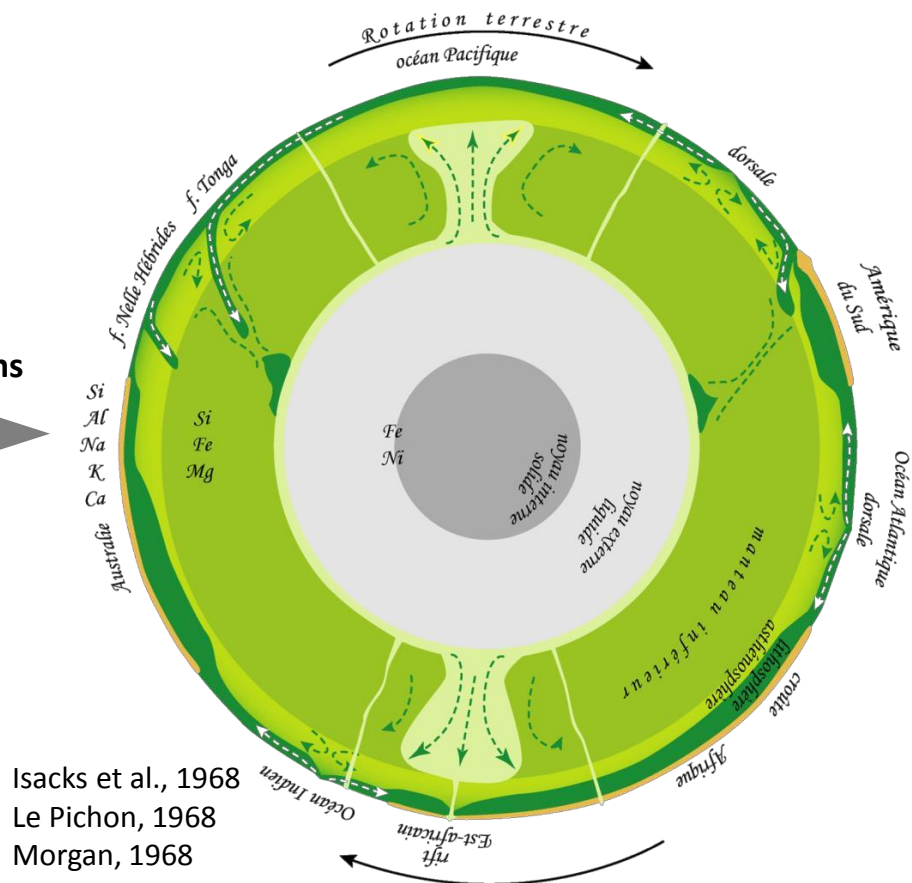
Isacks et al., 1968
Le Pichon, 1968
Morgan, 1968

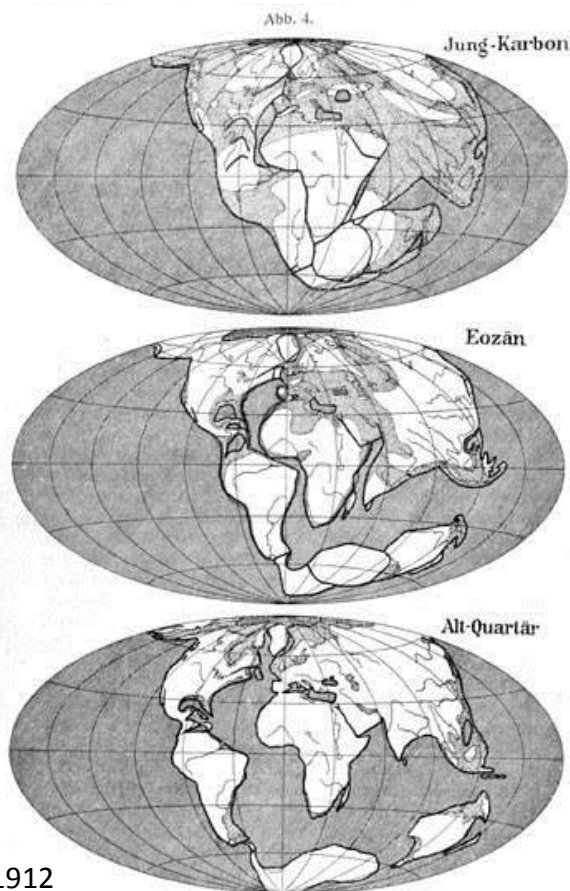
1. Historique

⇒ De la **dérive des continents** ... à la **tectonique des plaques**



50-60 ans





50-60 ans

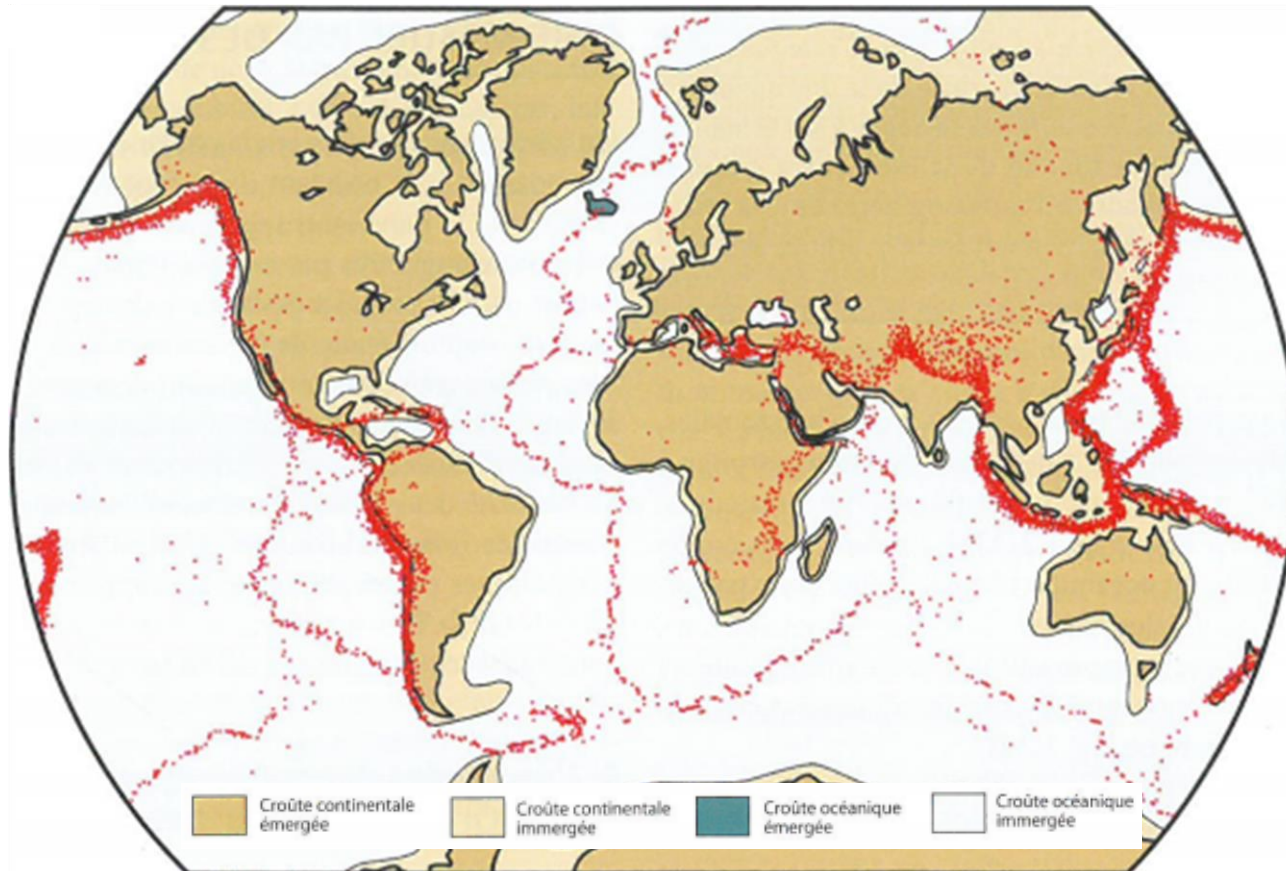


Modèle cinématique de la tectonique des plaques:

- ✓ Plaques **rigides**
- ✓ **Rotation** des plaques par rapport à un axe passant par le centre de la Terre
- ✓ Mouvement de chaque plaque défini par un seul **vecteur**
- ✓ Une plaque peut en **chevaucher** une autre, ou **subduiter** sous une autre

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

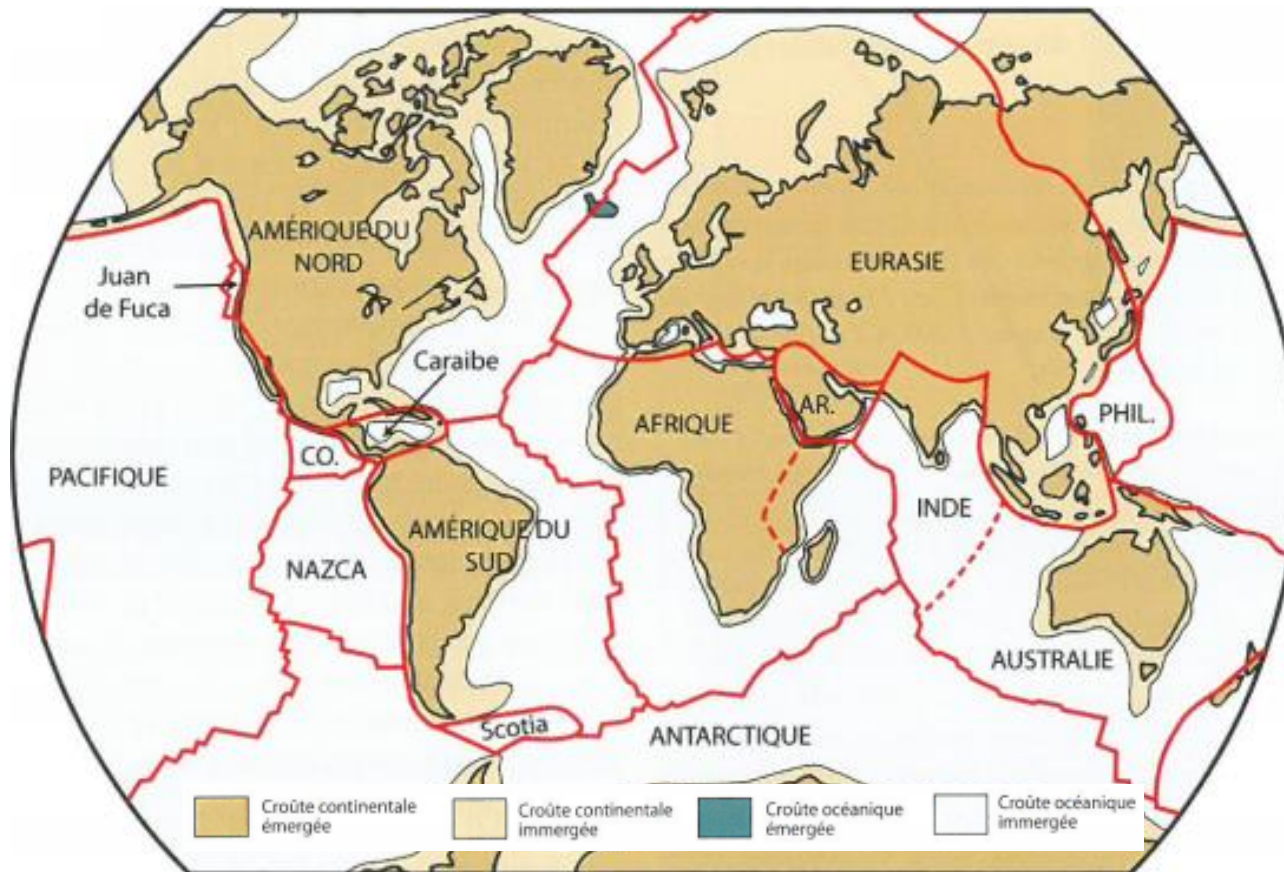
- ✓ Divergentes (éloignement de deux plaques)
- ✓ Convergentes (rapprochement de deux plaques)
- ✓ Coulissantes (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)



Répartition mondiale des séismes (NEIC)

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

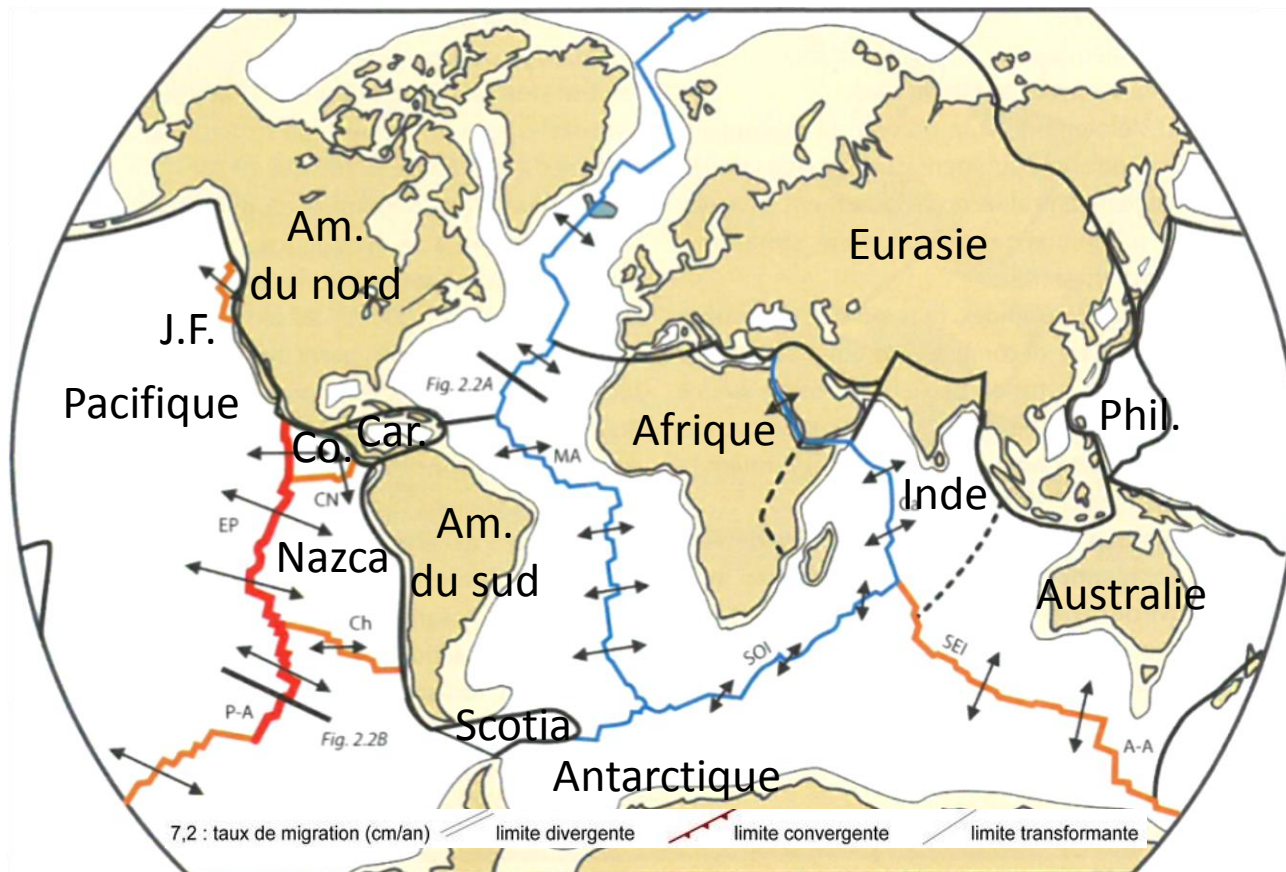
- ✓ Divergentes (éloignement de deux plaques)
- ✓ Convergentes (rapprochement de deux plaques)
- ✓ Coulissantes (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)



14 principales plaques lithosphériques

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

- ✓ **Divergentes** (éloignement de deux plaques)
- ✓ **Convergentes** (rapprochement de deux plaques)
- ✓ **Couissantes** (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)

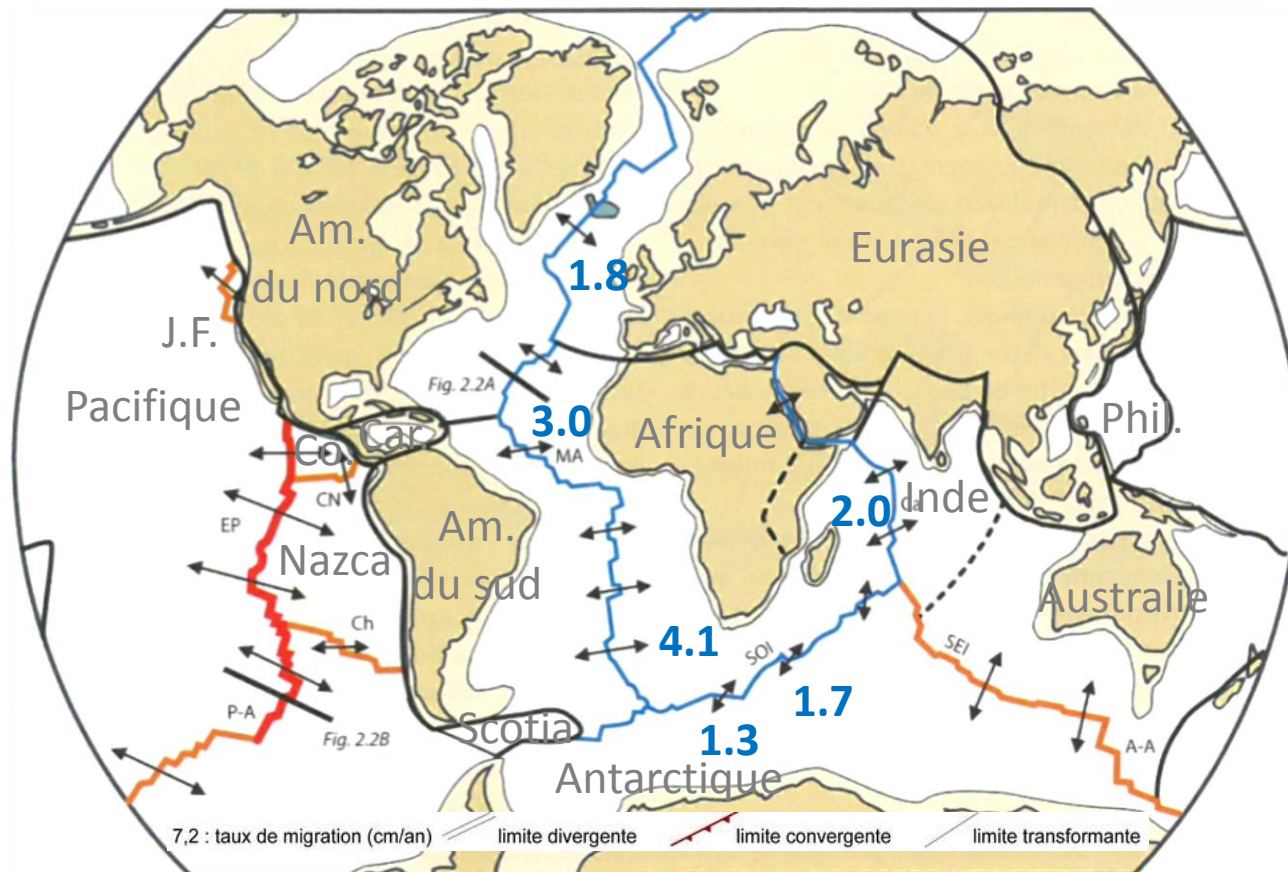


Localisation des zones d'extension océaniques

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

- ✓ **Divergentes** (éloignement de deux plaques)
- ✓ **Convergentes** (rapprochement de deux plaques)
- ✓ **Couissantes** (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)

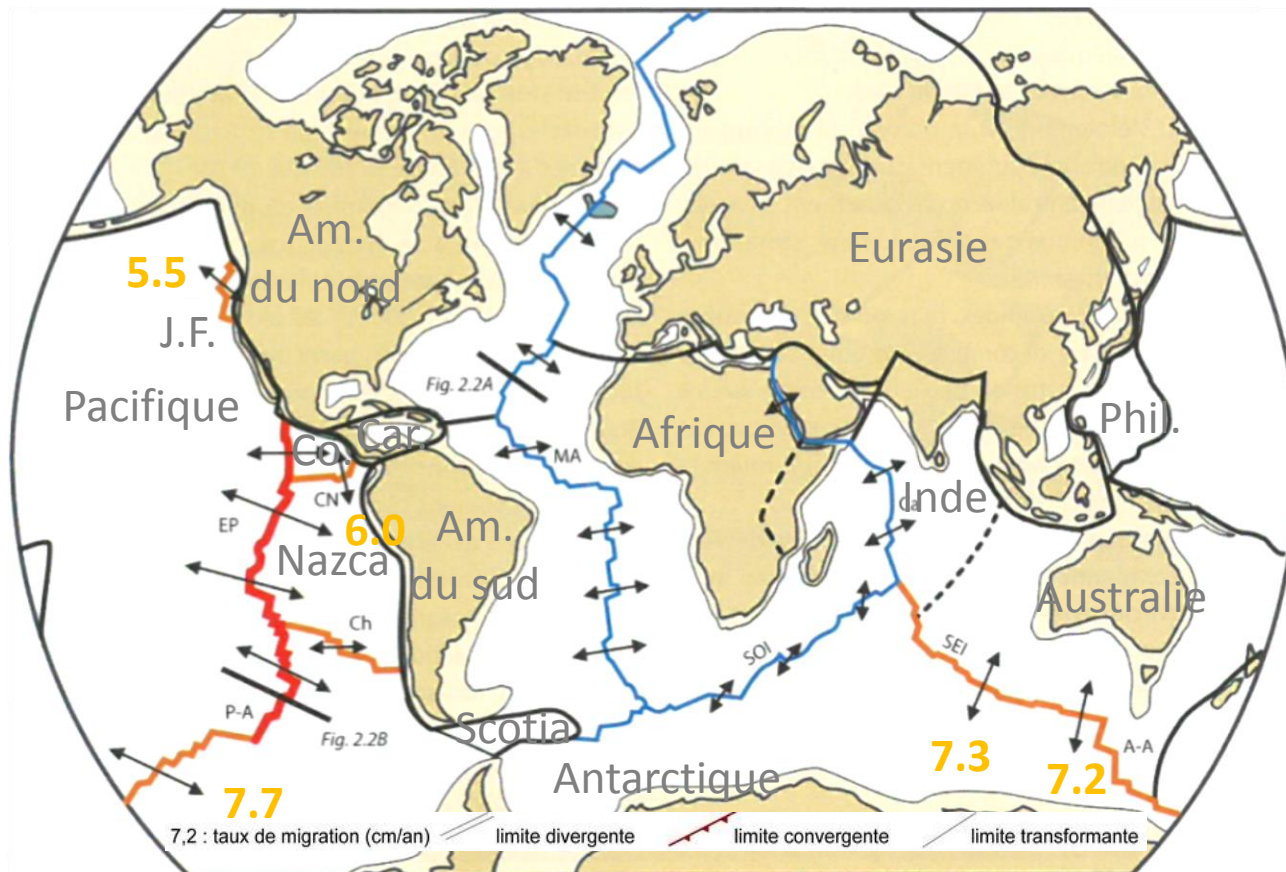


Océans à expansion lente: Atlantique, SO Indien

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

- ✓ **Divergentes** (éloignement de deux plaques)
- ✓ **Convergentes** (rapprochement de deux plaques)
- ✓ **Couissantes** (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)

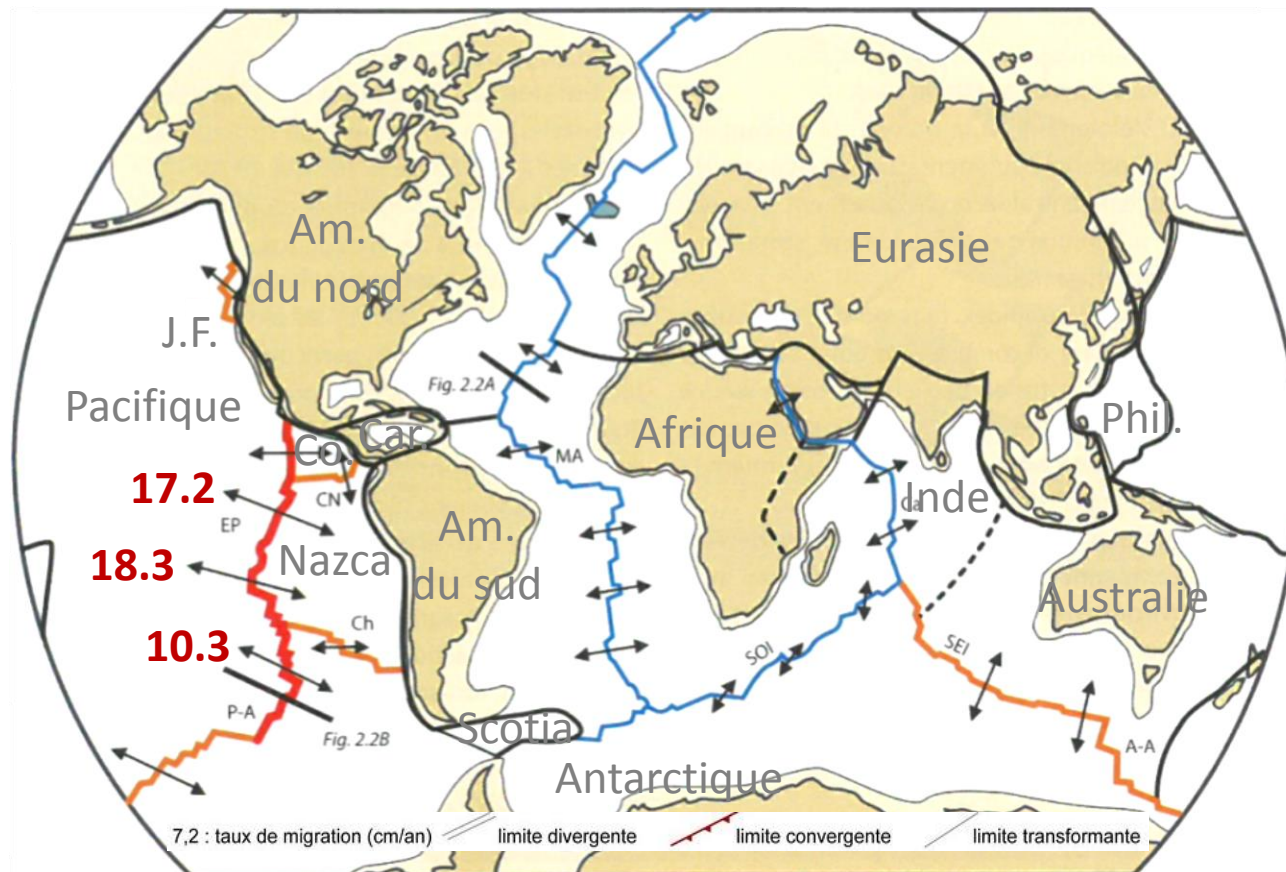


Océans à expansion intermédiaire: Pacifique-Antarctique, SE Indien

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

- ✓ **Divergentes** (éloignement de deux plaques)
- ✓ **Convergentes** (rapprochement de deux plaques)
- ✓ **Couissantes** (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)

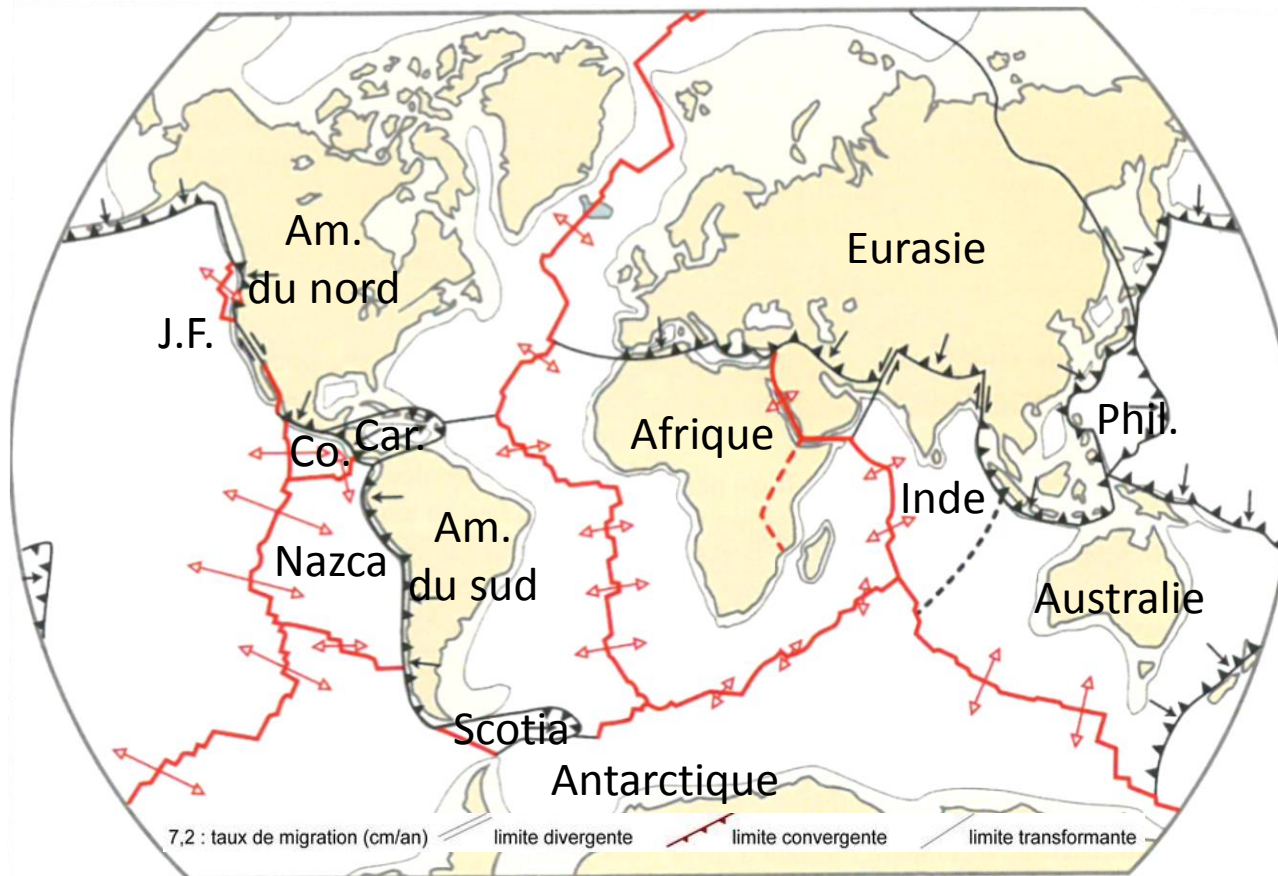


Océans à expansion rapide: Est-Pacifique

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

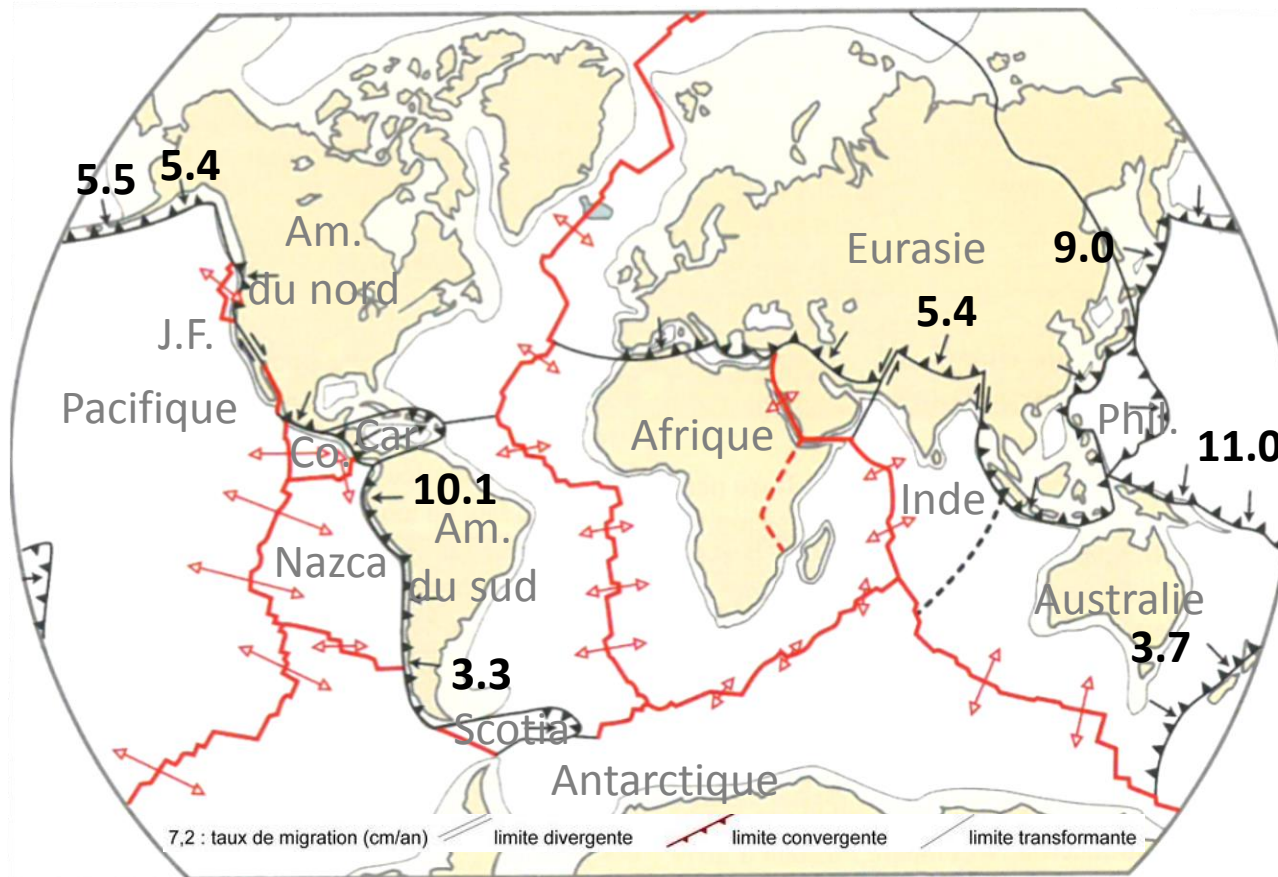
- ✓ Divergentes (éloignement de deux plaques)
- ✓ **Convergentes** (rapprochement de deux plaques)
- ✓ **Coulissantes** (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)



Localisation des zones **convergentes** et **coulissantes**

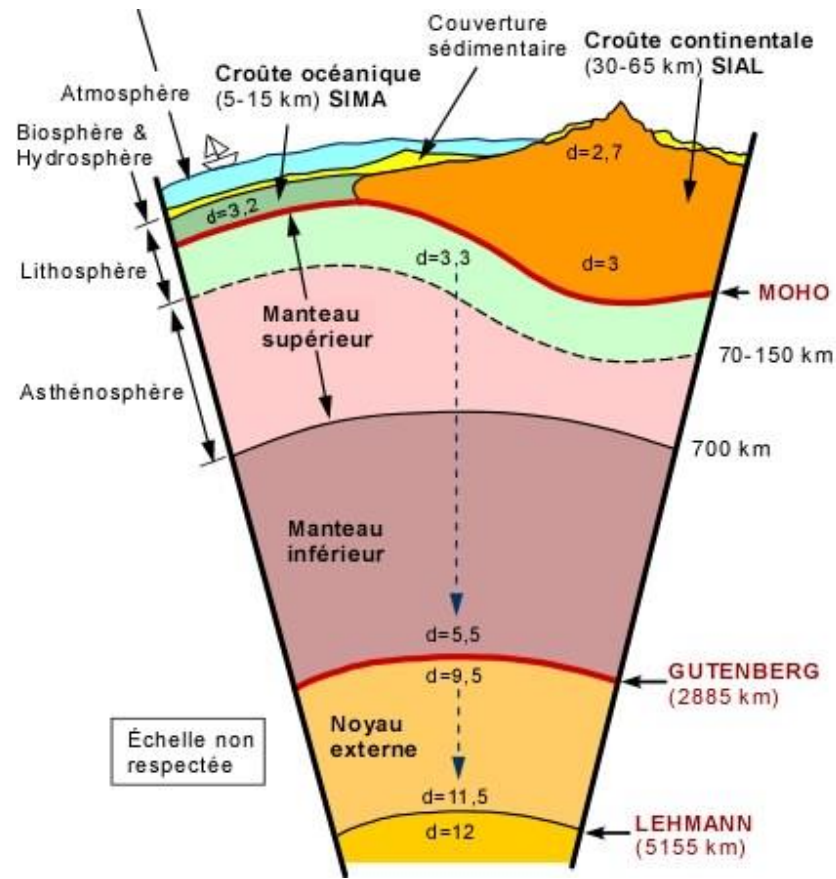
Il existe trois grands types de **limites de plaques**:

- ✓ Divergentes (éloignement de deux plaques)
- ✓ **Convergentes** (rapprochement de deux plaques)
- ✓ **Coulissantes** (glissement horizontal de deux plaques le long d'une faille transformante)

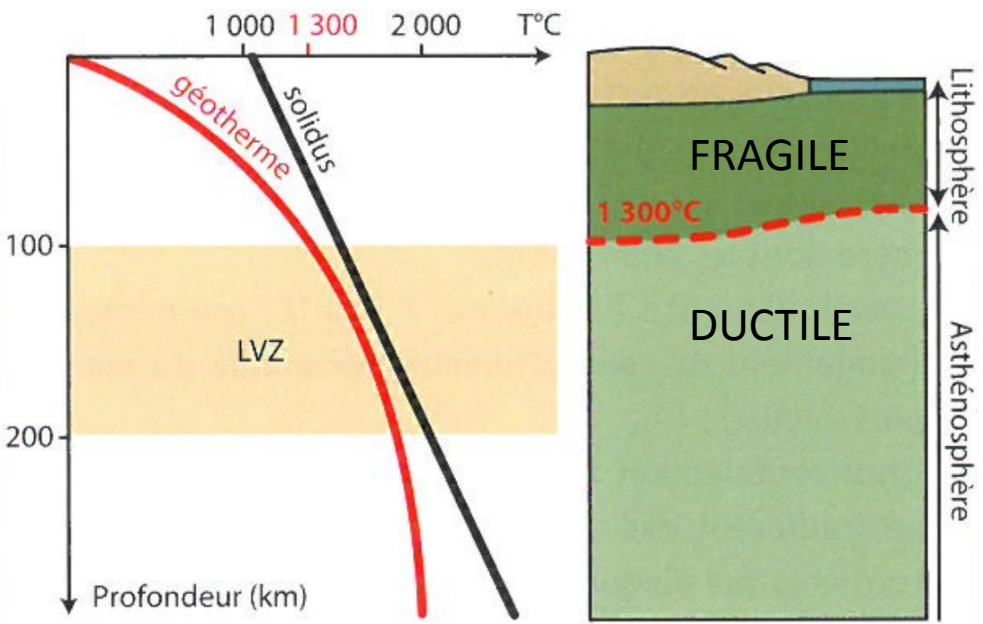


Localisation des zones orogéniques actuelles

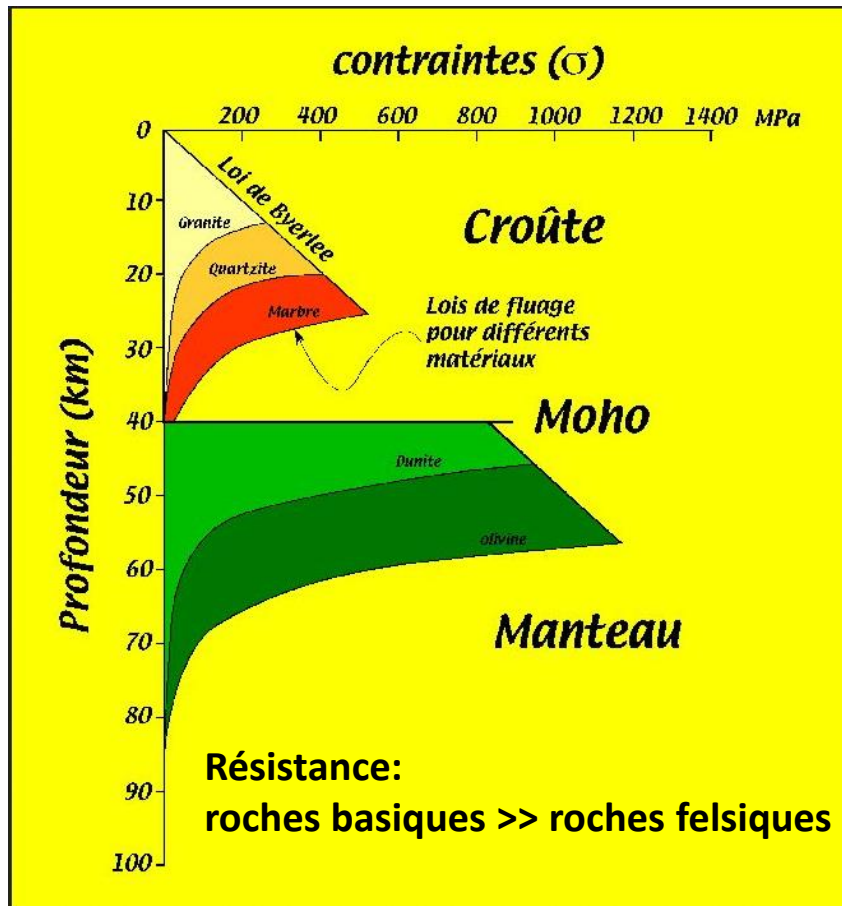
Coupe du globe:



Epaisseur $\approx$ 100 km pour une croûte « normale »
 $\approx$ quelques km à la dorsale
 $\approx$ jusqu'à 250 km sous les vieux continents

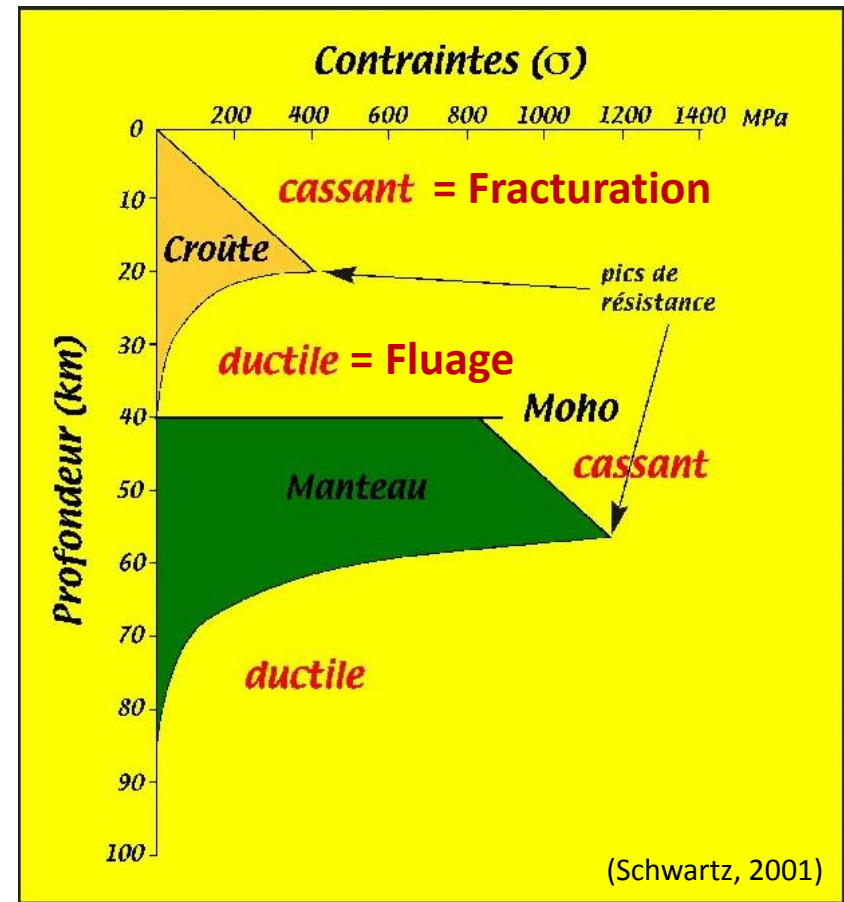


⇒ T° des **péridotites** (géotherme) est très proche de la T° de **fusion** (solidus) => zone **ductile** décrite comme la **LVZ** (*low velocity zone*)



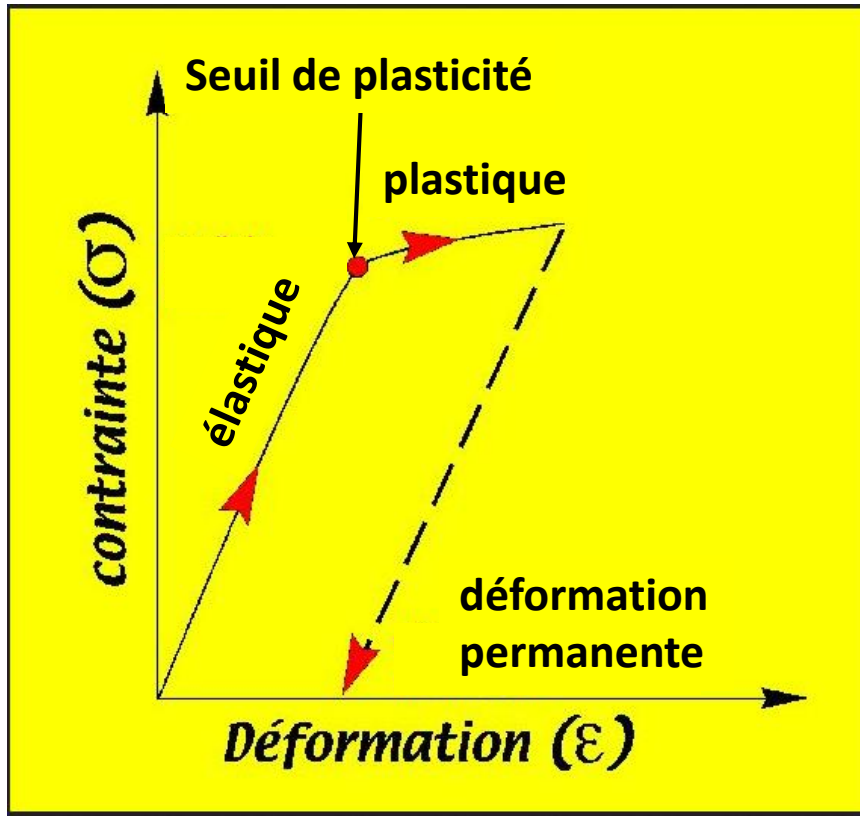
Loi de **Byerlee**: prédit le comportement **FRAGILE** d'un matériau en fonction de la profondeur et des contraintes ($\sigma_1 - \sigma_3$)

Loi de **fluages**: prédit le comportement **DUCTILE** d'un matériau spécifique (qtz, oli)



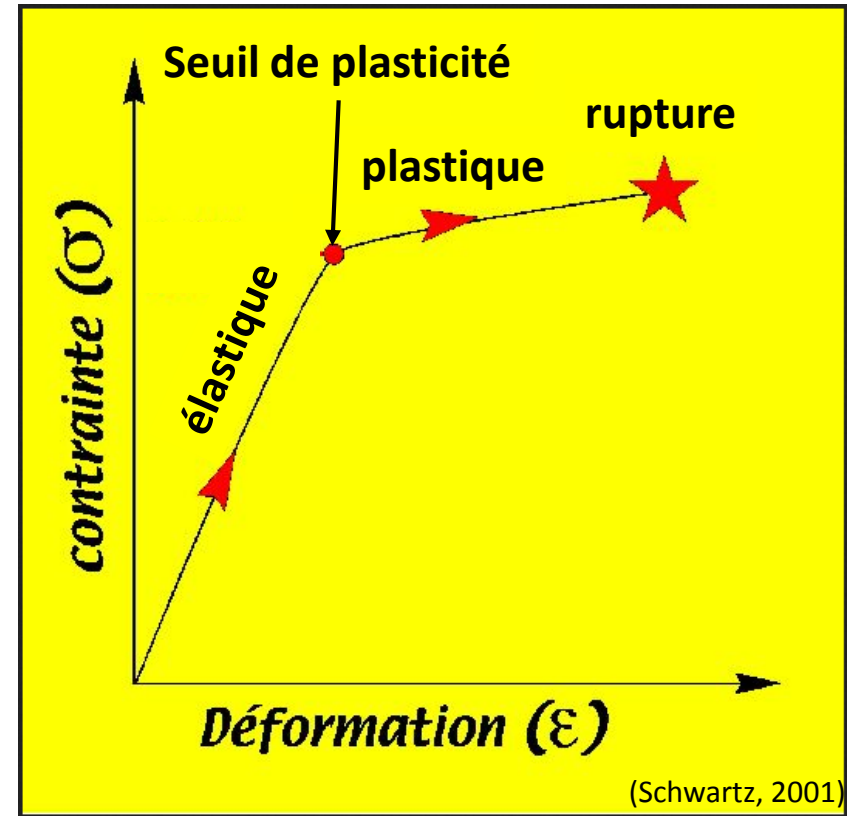
Droite de **Byerlee** et courbes de **ductilité** définissent deux **pics de résistance**. Les zones de résistance correspondent à des domaines non déformés ou déformés élastiquement (réversible)

DUCTILE



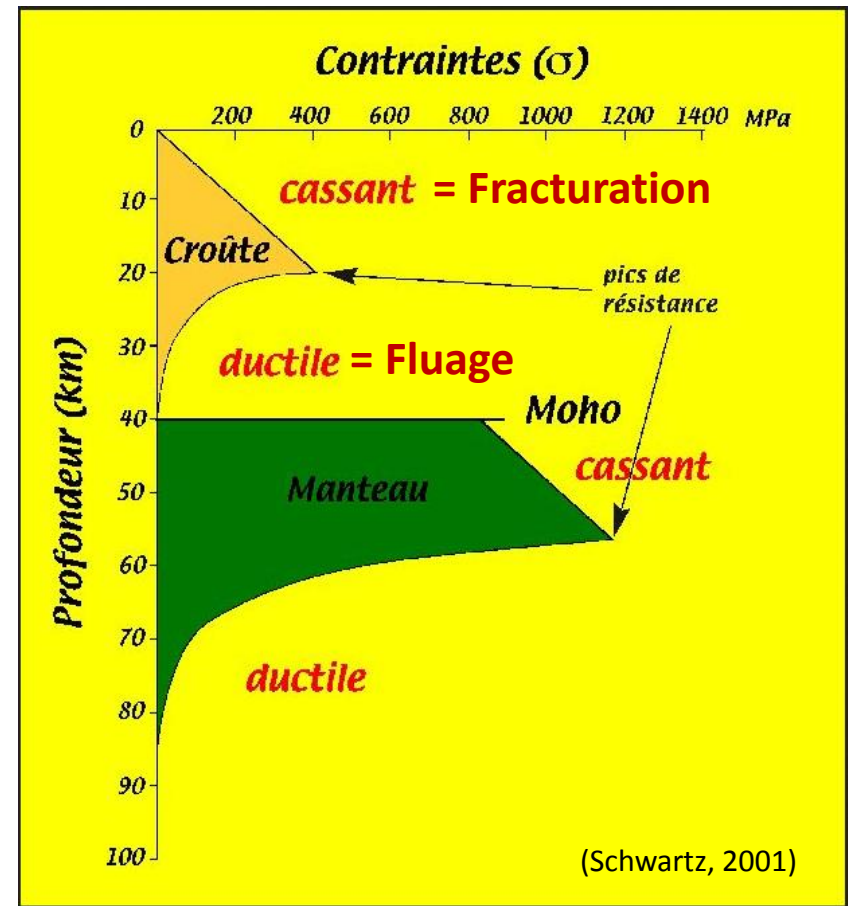
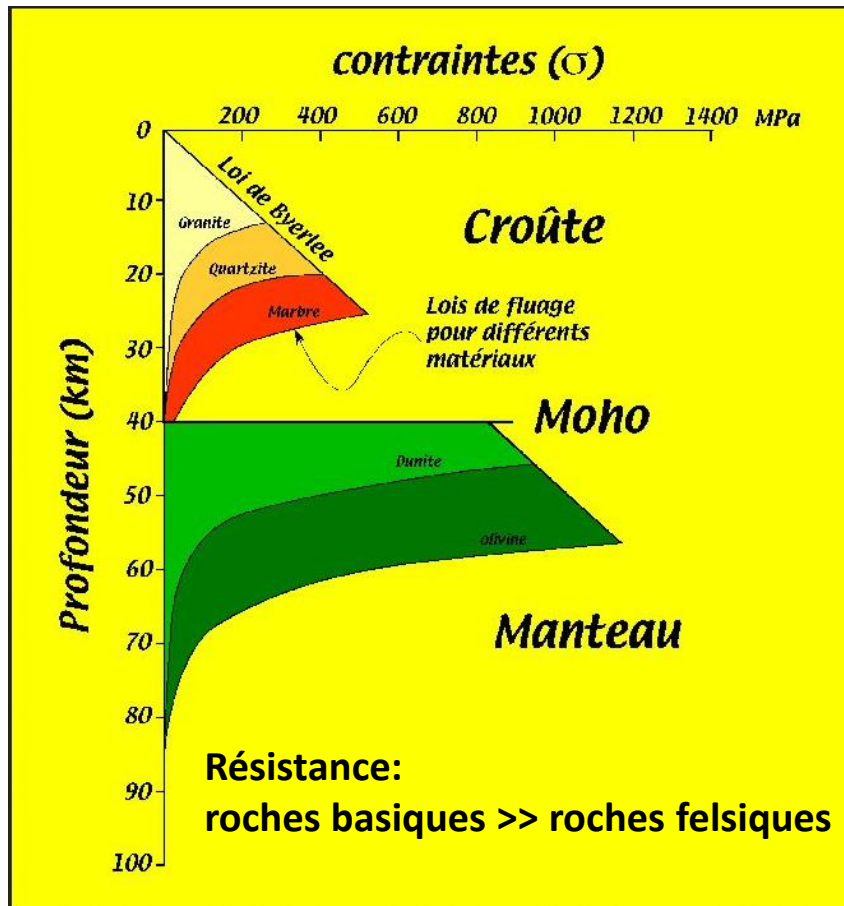
Déformation irréversible: dans le cas où le **seuil de plasticité** est dépassé, la roche se déforme de façon **plastique**. Si on relâche les contraintes (trait en pointillé), la roche présente alors une déformation permanente (ex.: plis, zones de cisaillement)

FRAGILE



(Schwartz, 2001)

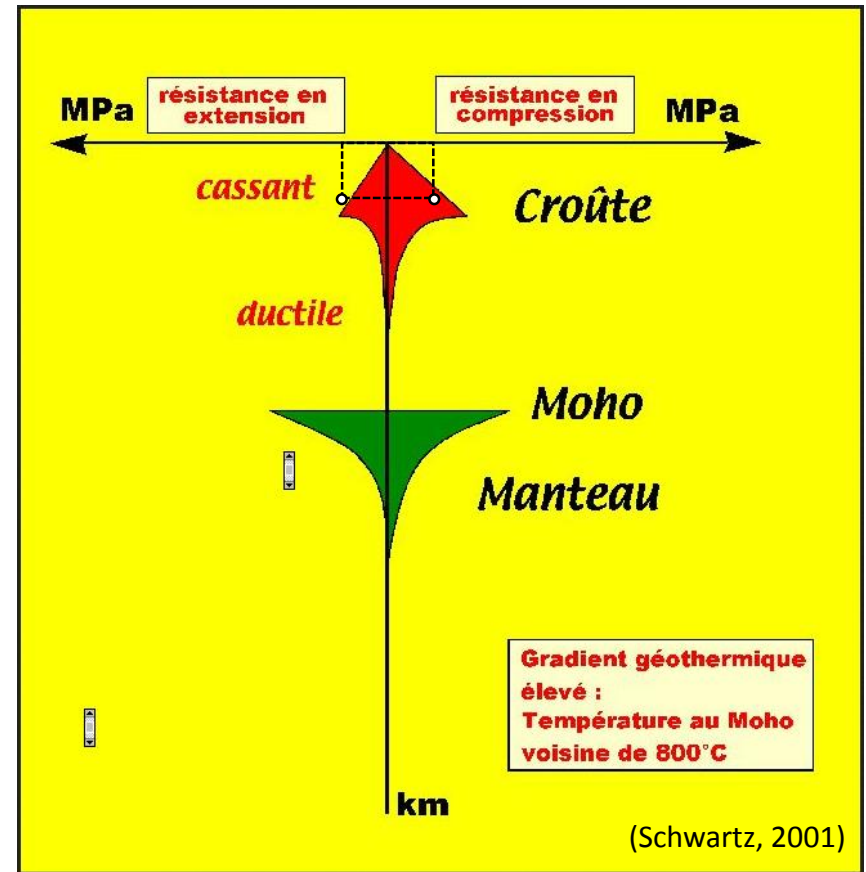
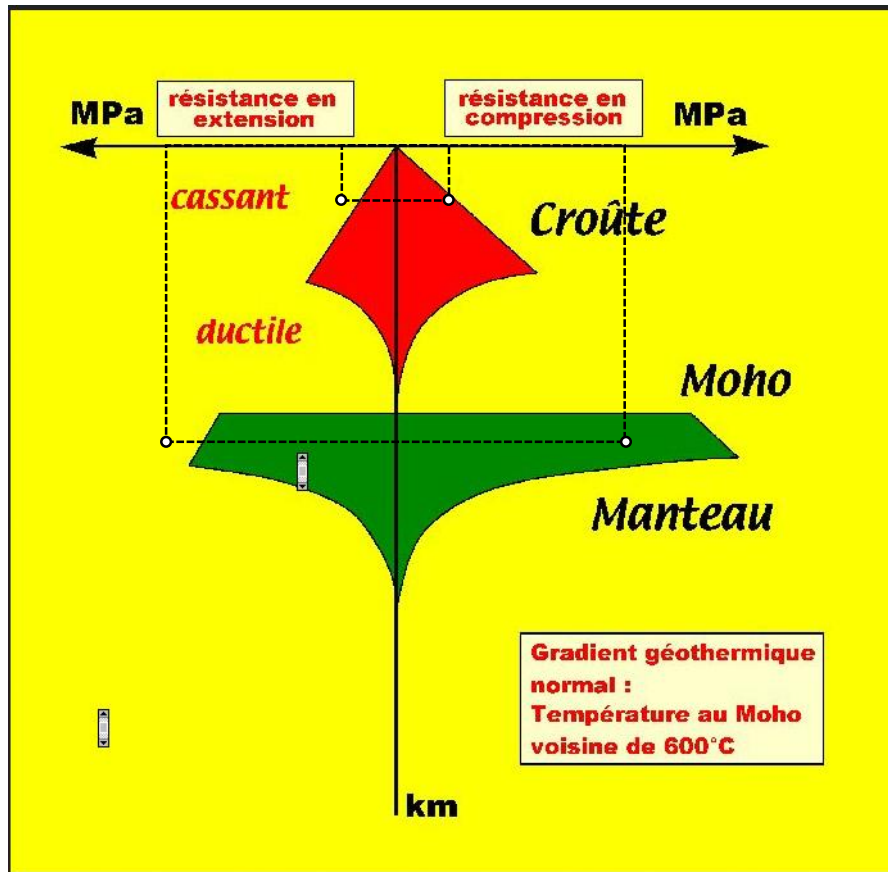
Fracturation irréversible: dans le cas où le **seuil de rupture** est atteint, la roche développe un plan de **fracture** irréversible (ex.: une faille normale)



A droite de la droite de **Byerlee**: déformation **cassante** (stade **rupture** atteint)

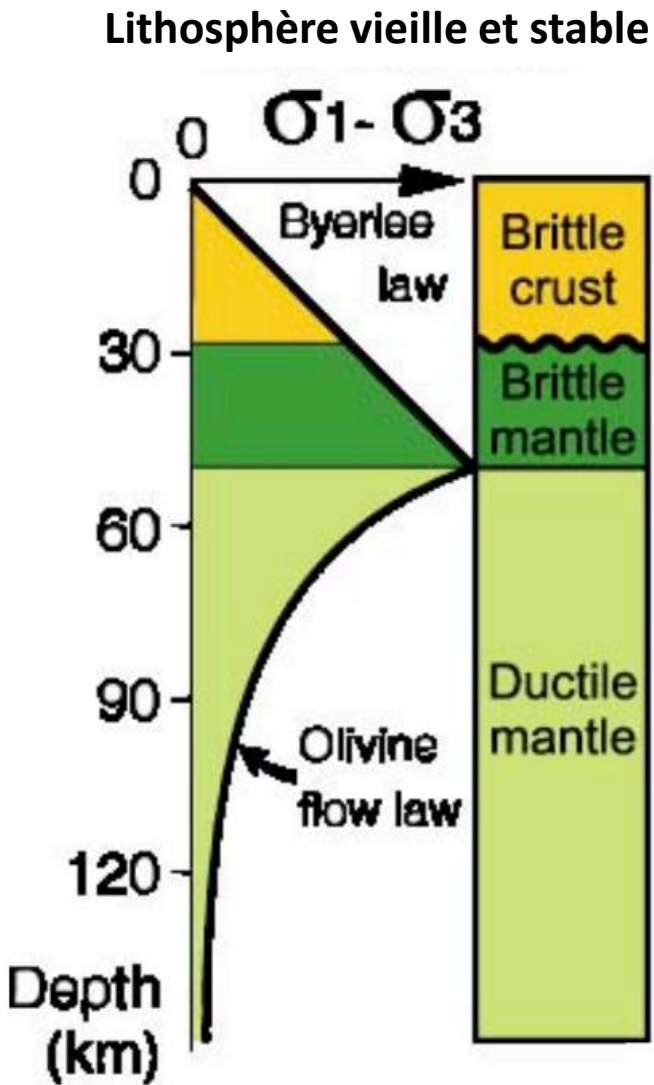
En-dessous des courbes de **ductilité**: déformation par **fluage** de la matière (dépassement du seuil de **plasticité**)

200MPa @ 20km => croûte élastique (rév.)
 400MPa @ 10km => croûte fragile/cassante (irréversible)
 400Mpa @ 35km => croûte ductile (irréversible)

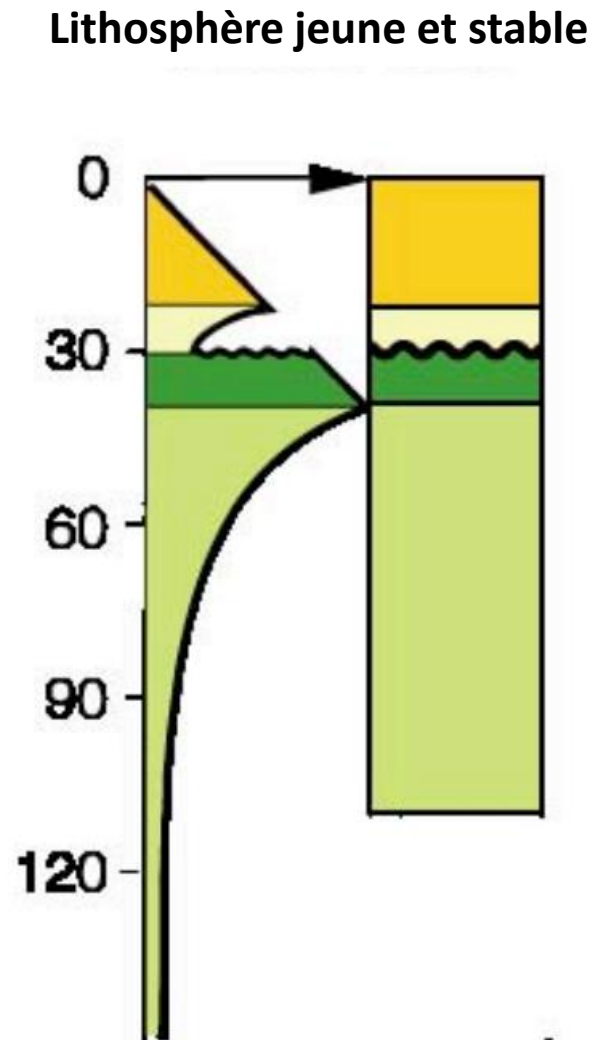


Dans le cas d'un **gradient géothermique** plus **élevé**, les **zones de résistance** deviennent de plus **petite dimension**. Les **courbes de ductilité** sont remontés vers de plus **basses pressions**.

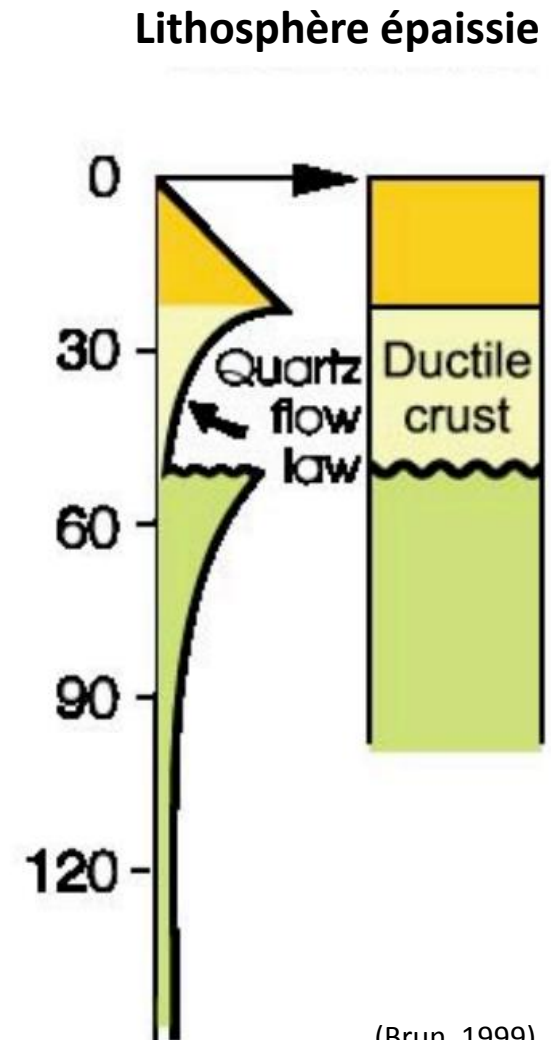
La **croûte** et le **manteau** ont une **résistance fragile** plus **élevée** en **compression** qu'en extension.



⇒ Gradient géothermique
froid

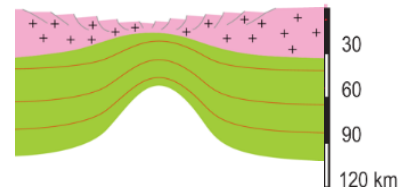


⇒ Gradient géothermique
normal

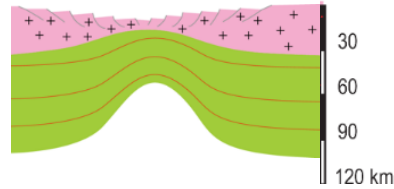


⇒ Gradient géothermique
chaud

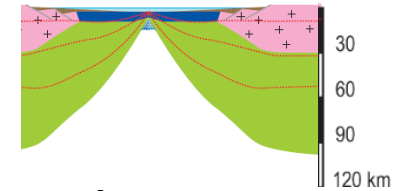
(Brun, 1999)



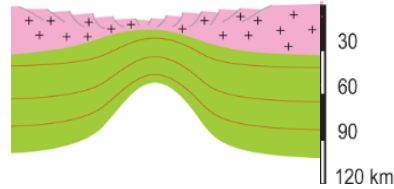
1. Rifting continental



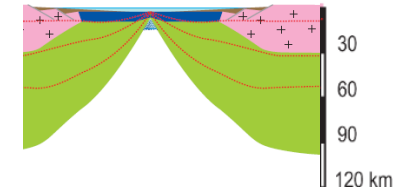
1. Rifting continental



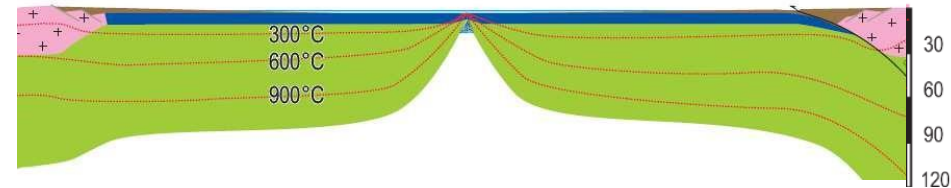
2. Océanisation



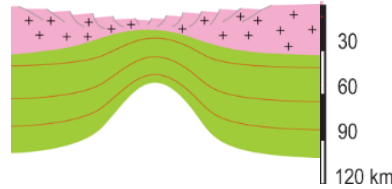
1. Rifting continental



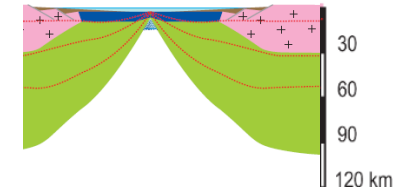
2. Océanisation



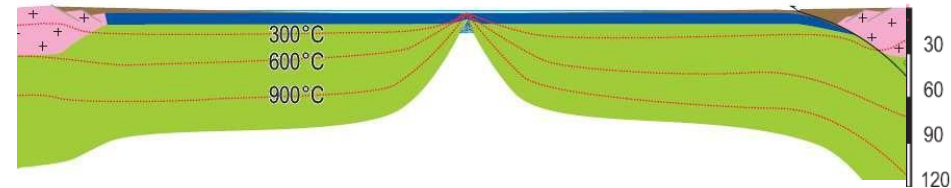
3. Expansion océanique



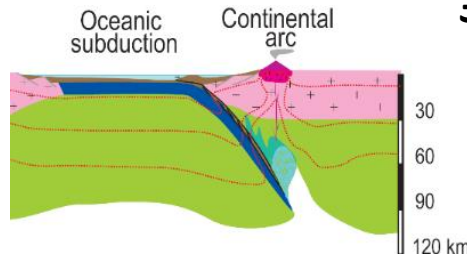
1. Rifting continental



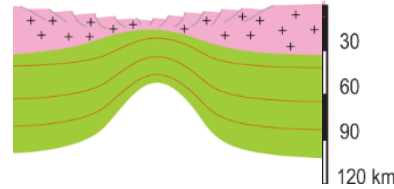
2. Océanisation



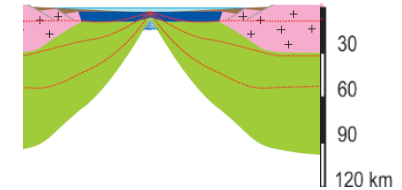
3. Expansion océanique



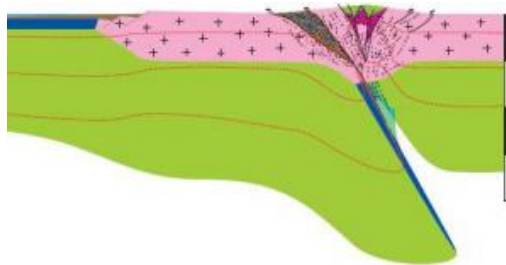
4. Subduction



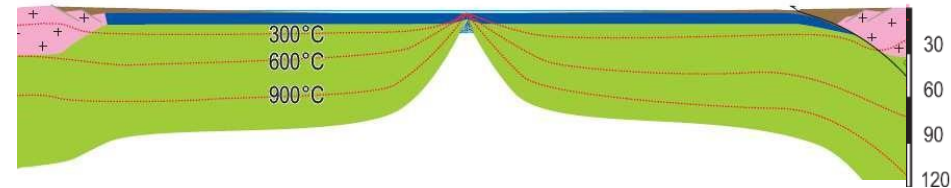
1. Rifting continental



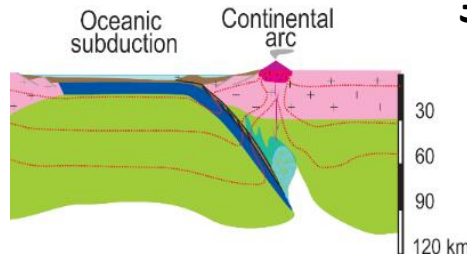
2. Océanisation



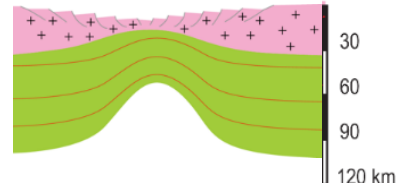
5. Collision



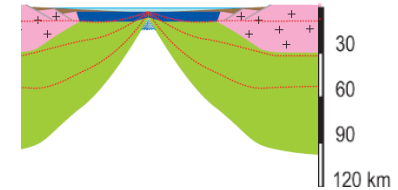
3. Expansion océanique



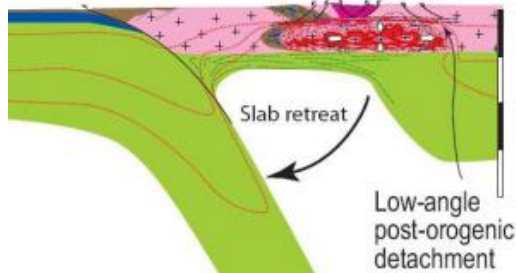
4. Subduction



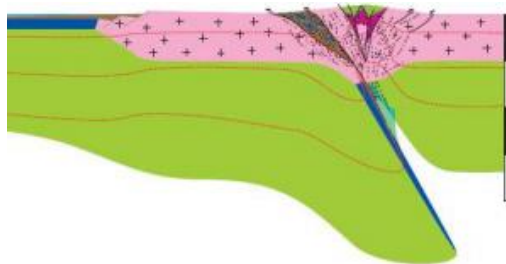
1. Rifting continental



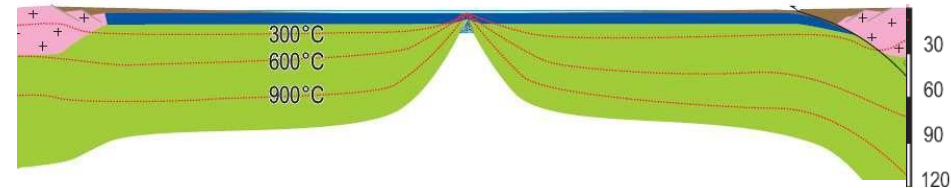
2. Océanisation



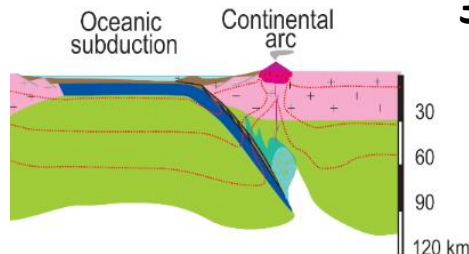
6. Effondrement gravitaire



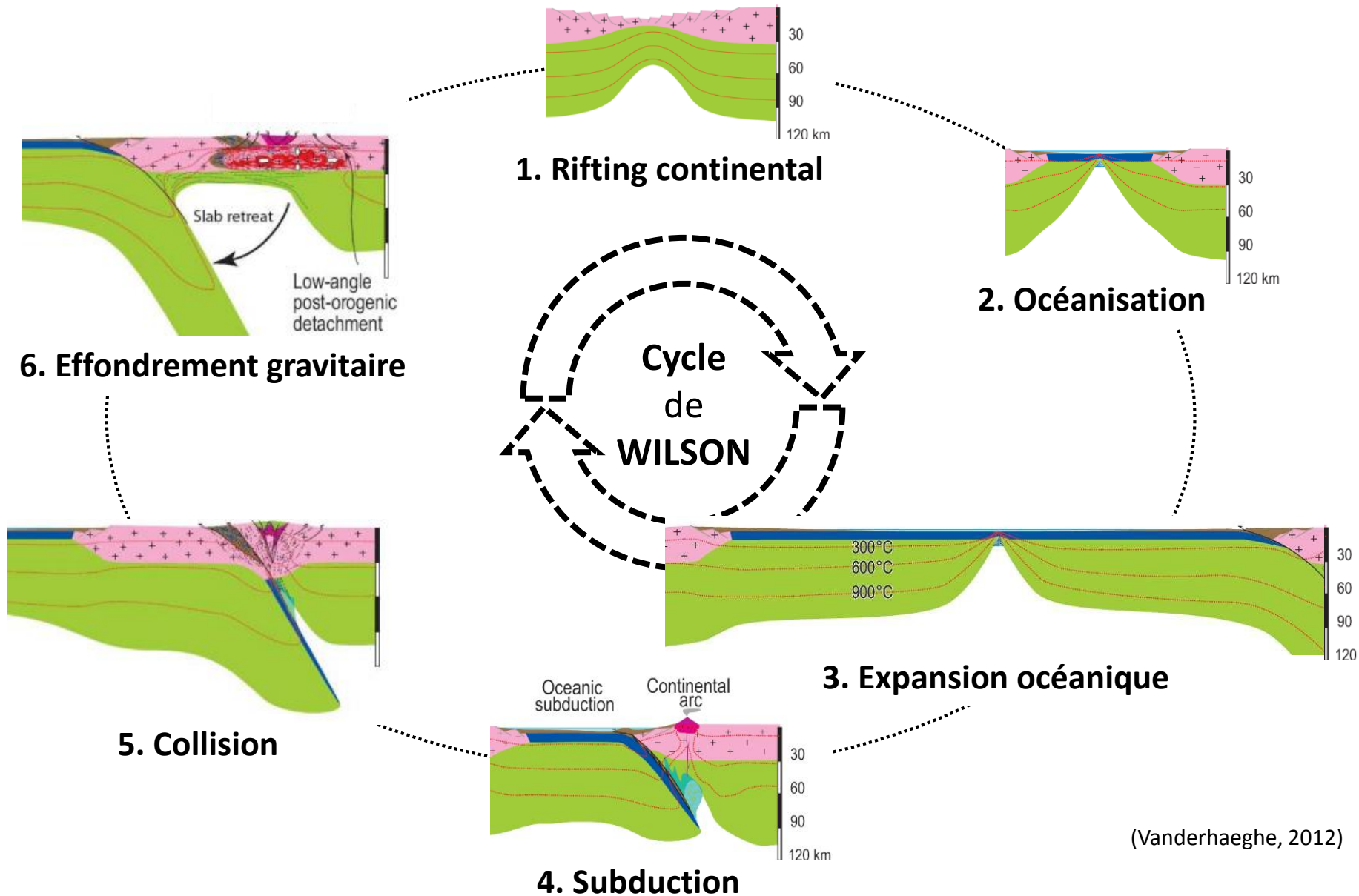
5. Collision



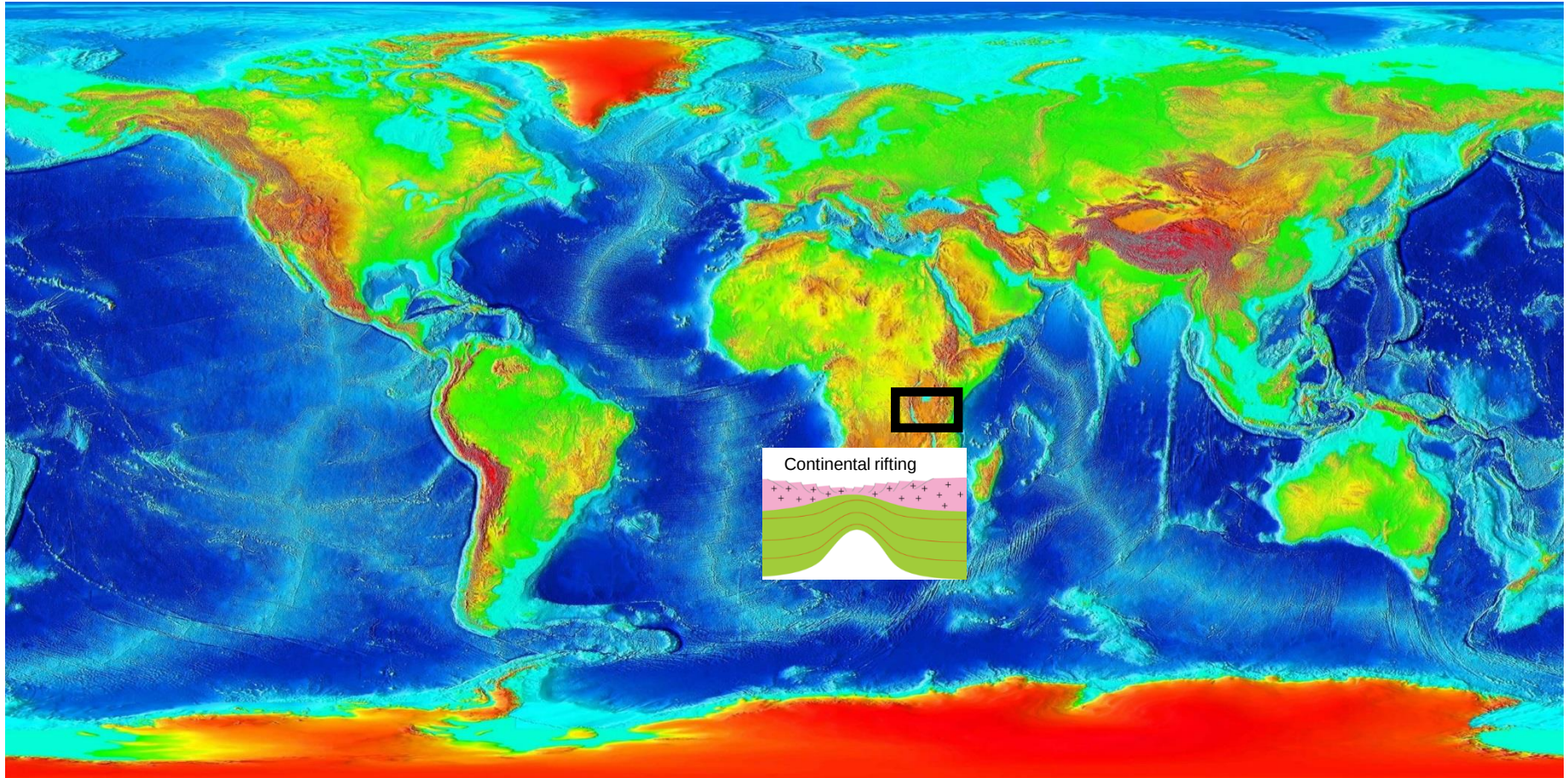
3. Expansion océanique



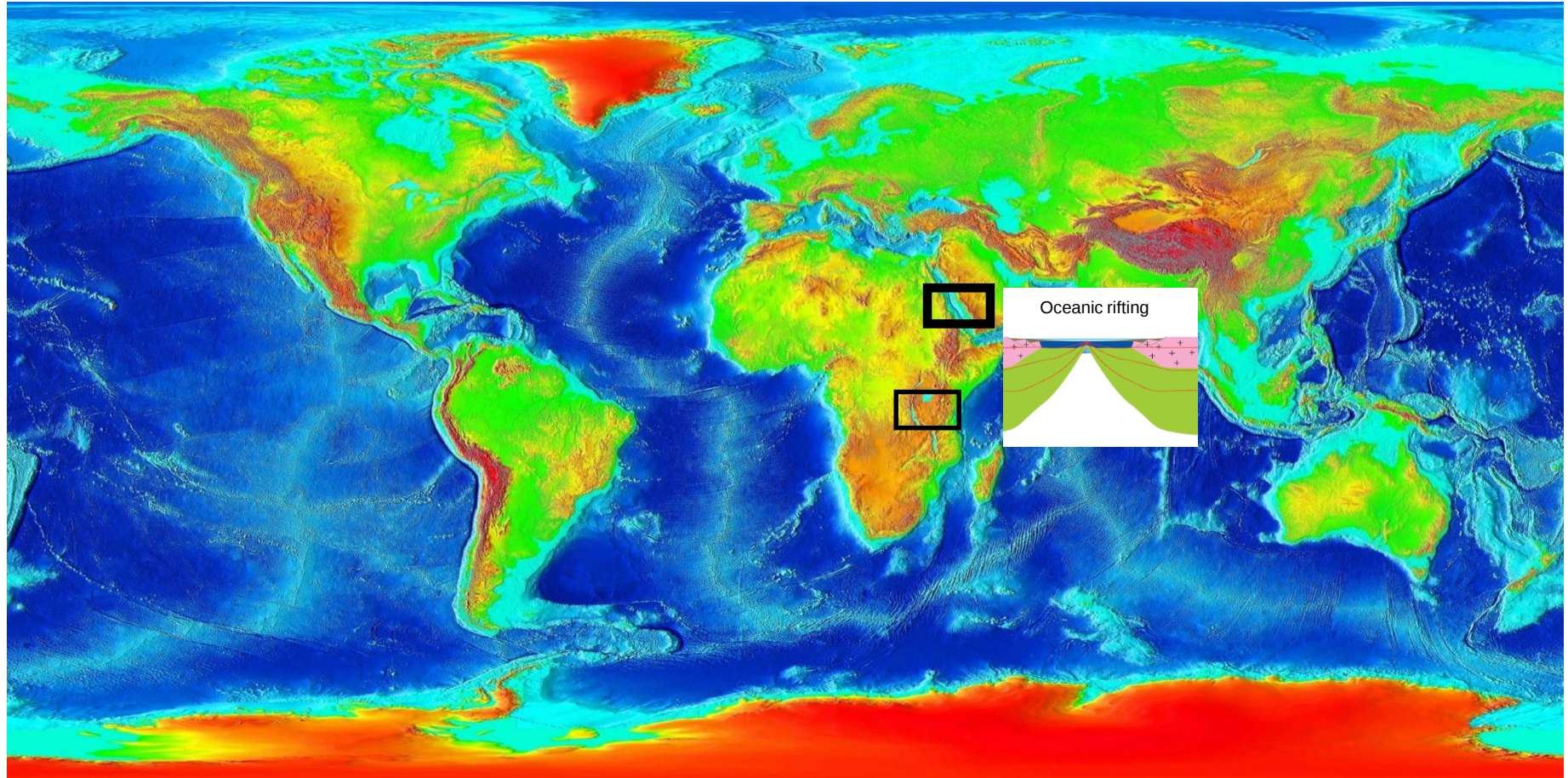
4. Subduction



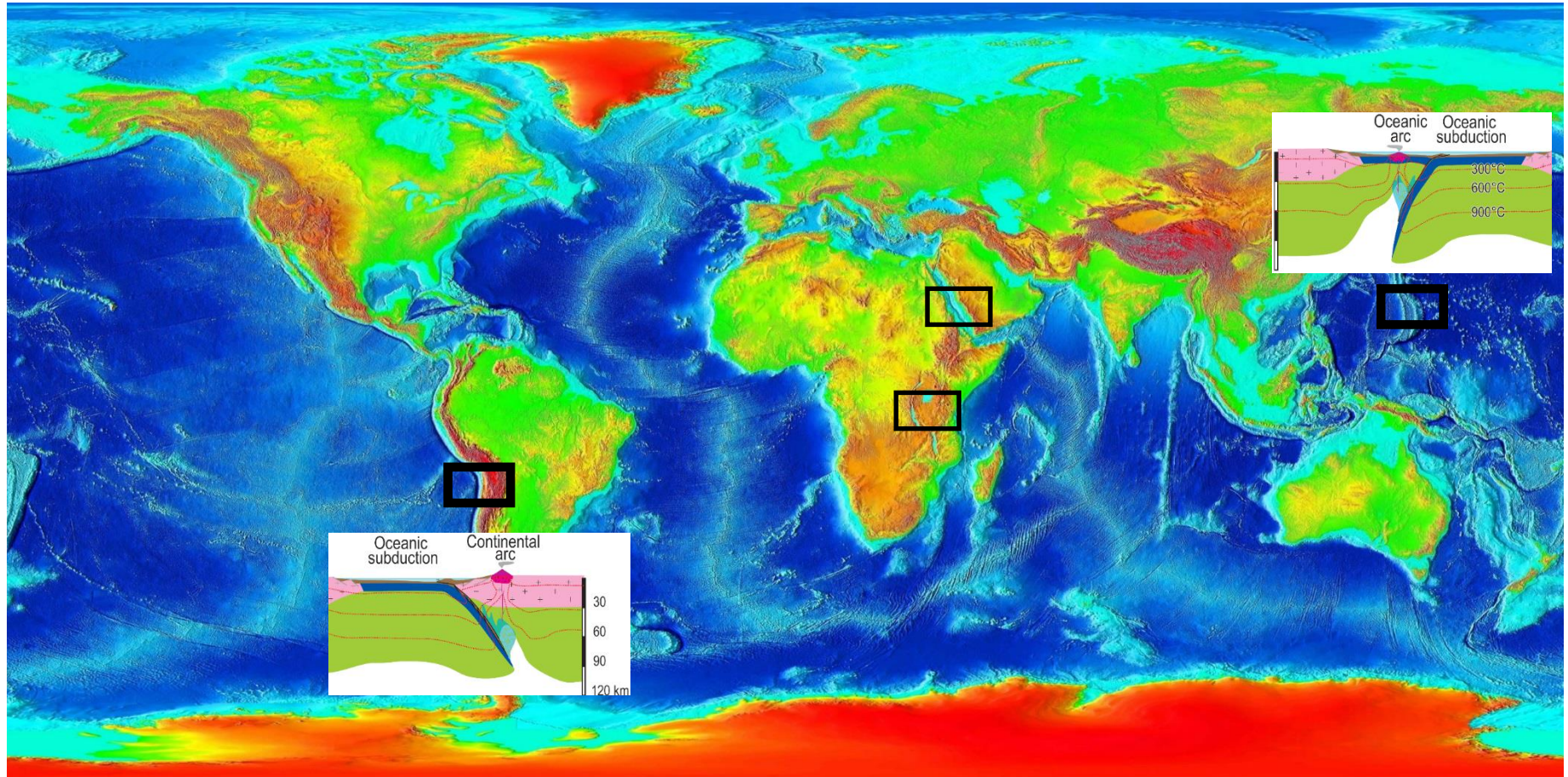
(Vanderhaeghe, 2012)



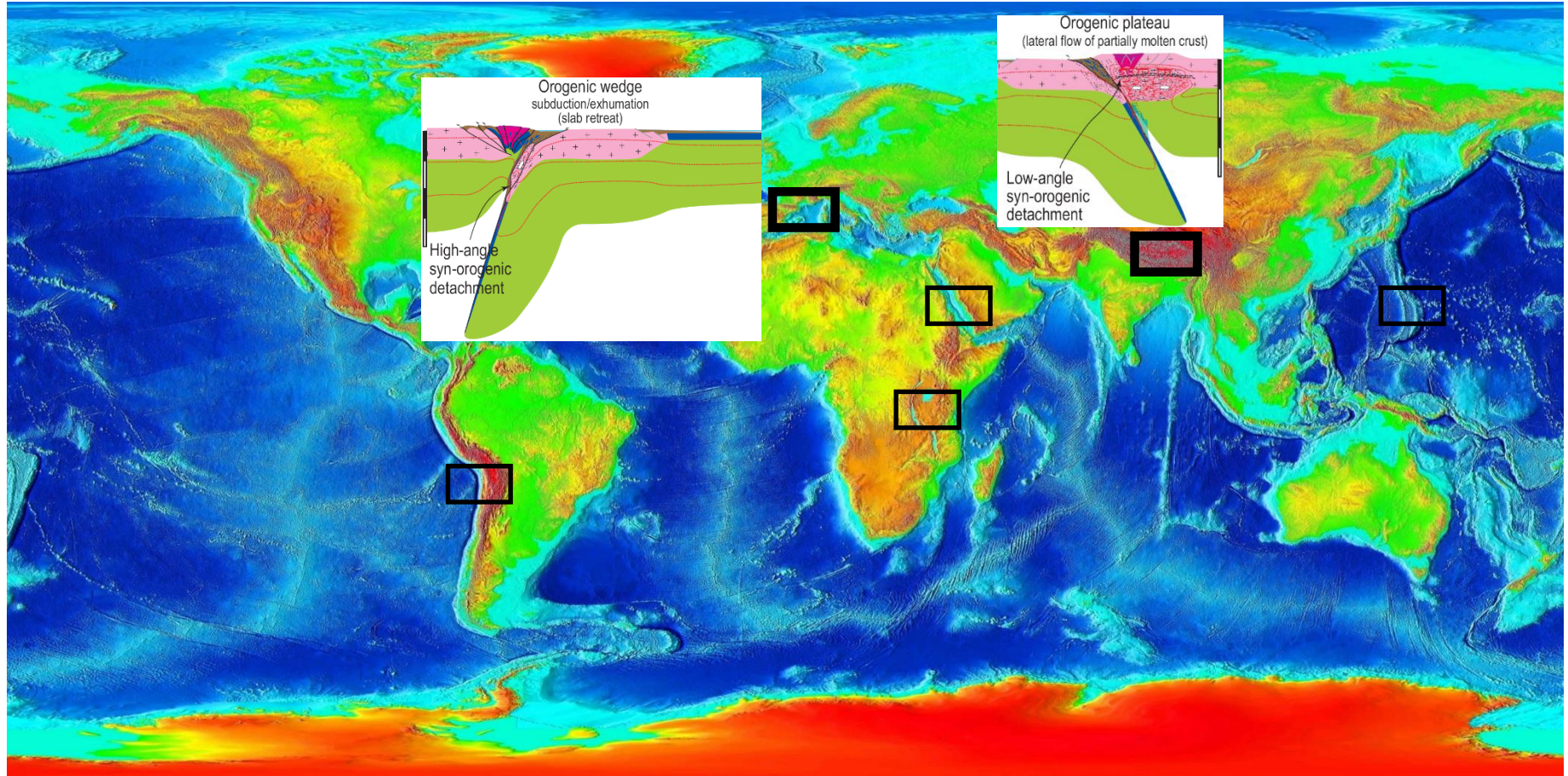
Systèmes de rifting continental: exemple du rift Est-Africain



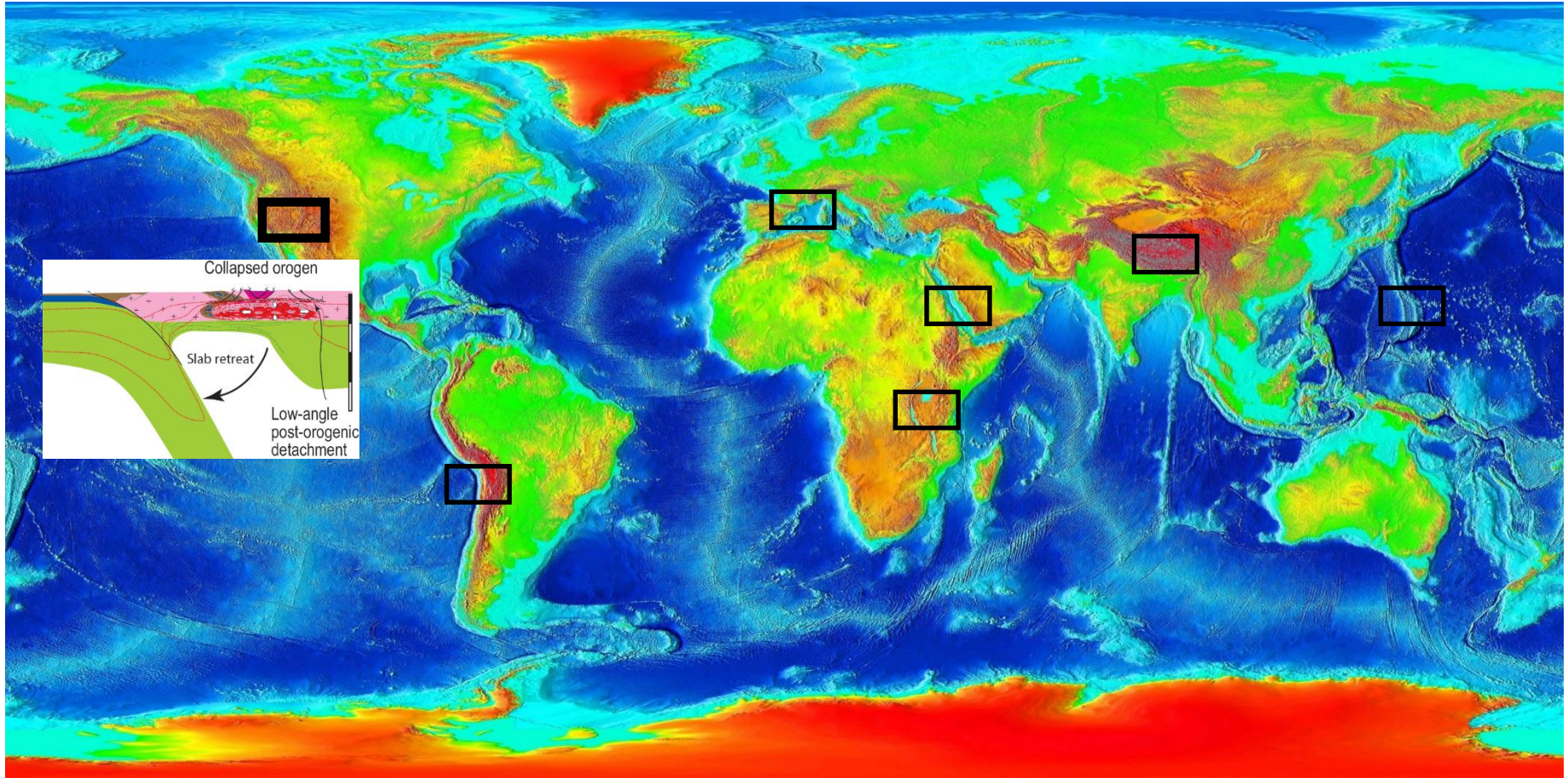
Systèmes de rifting océanique: exemple de la Mer Rouge



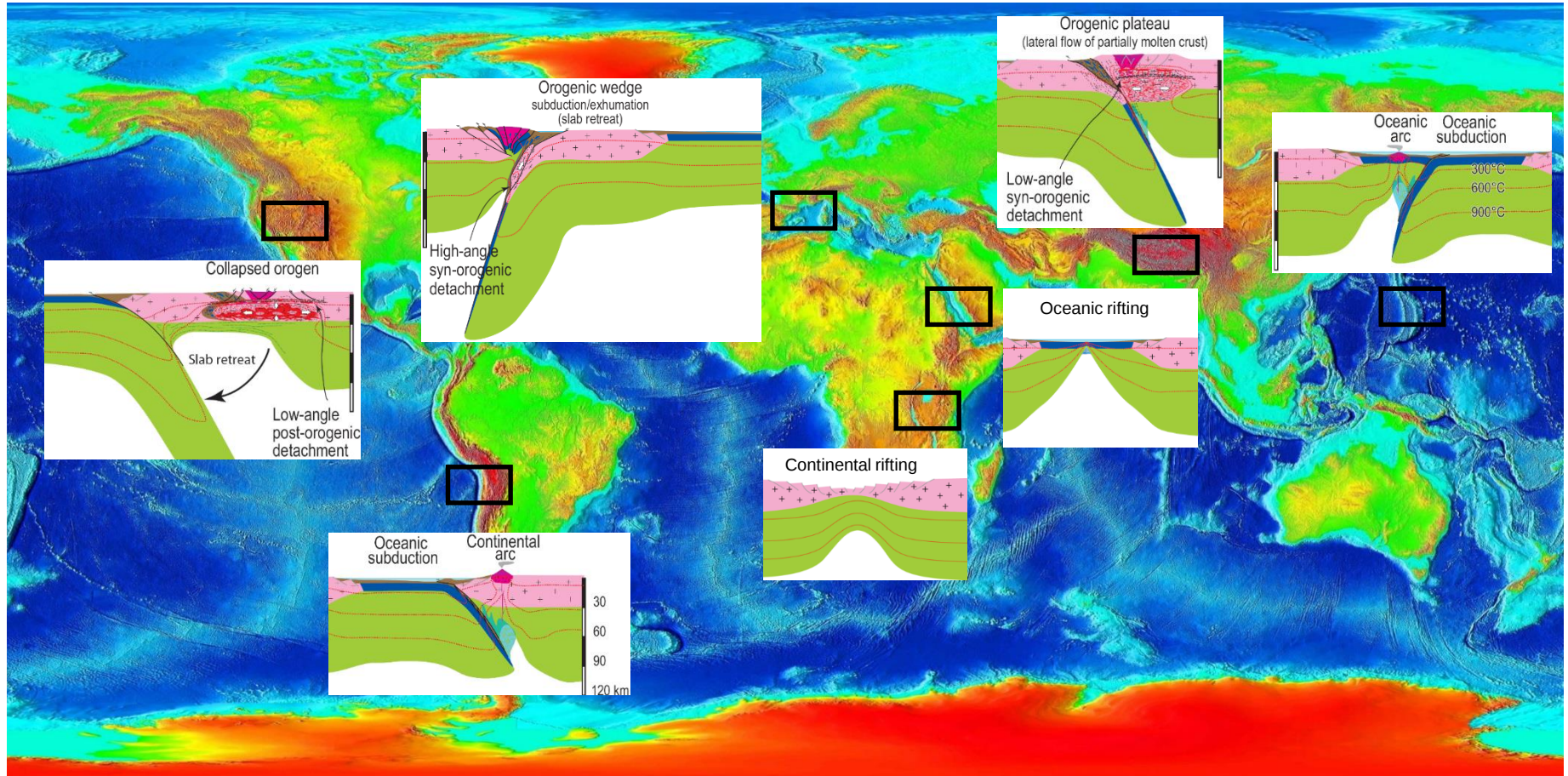
Systèmes de subduction océanique: exemples de la subduction Andine (océan-continent) et de la fosse des Mariannes (océan-océan)

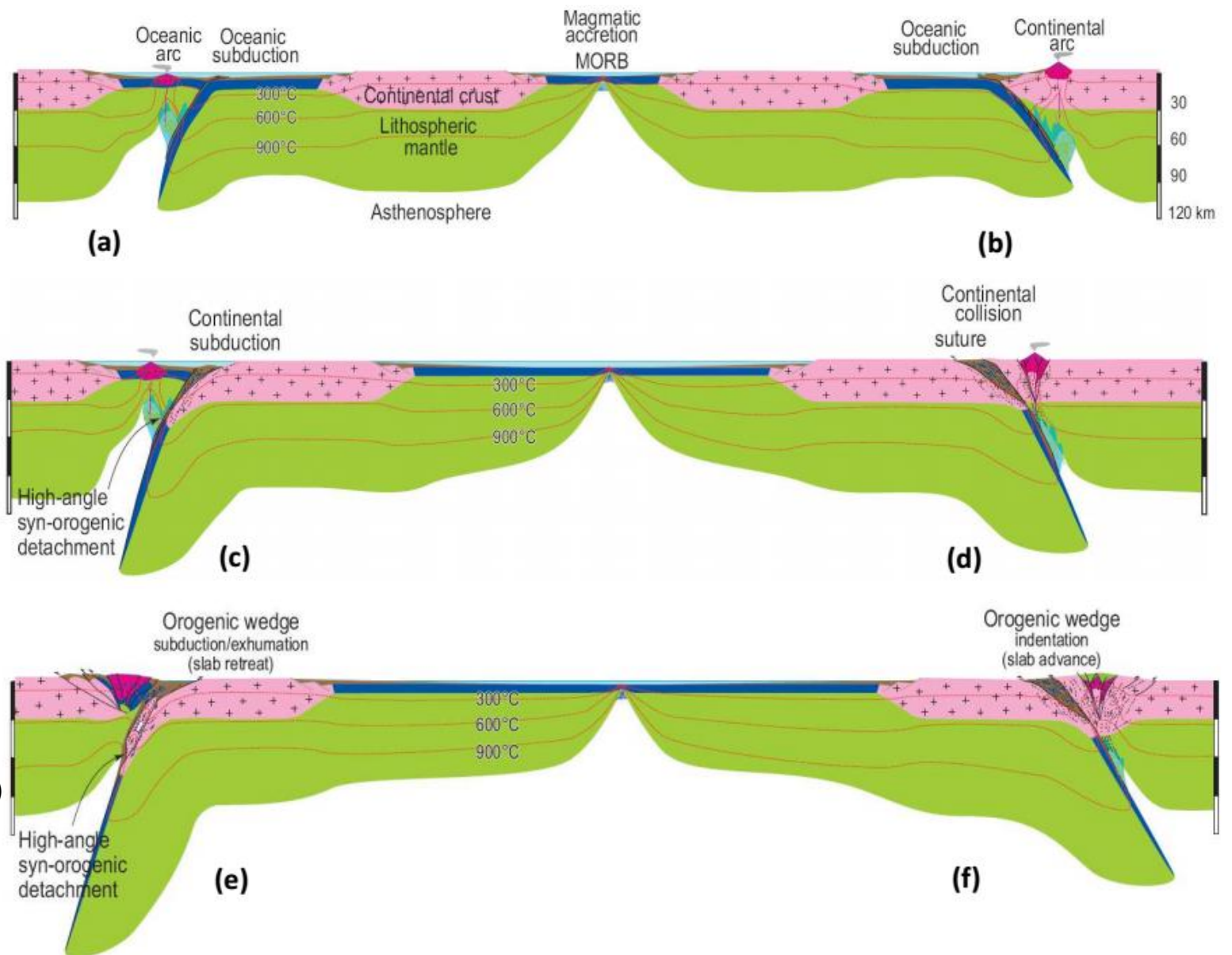


Systèmes de subduction continentale/collision: exemples des Alpes et de l'Himalaya

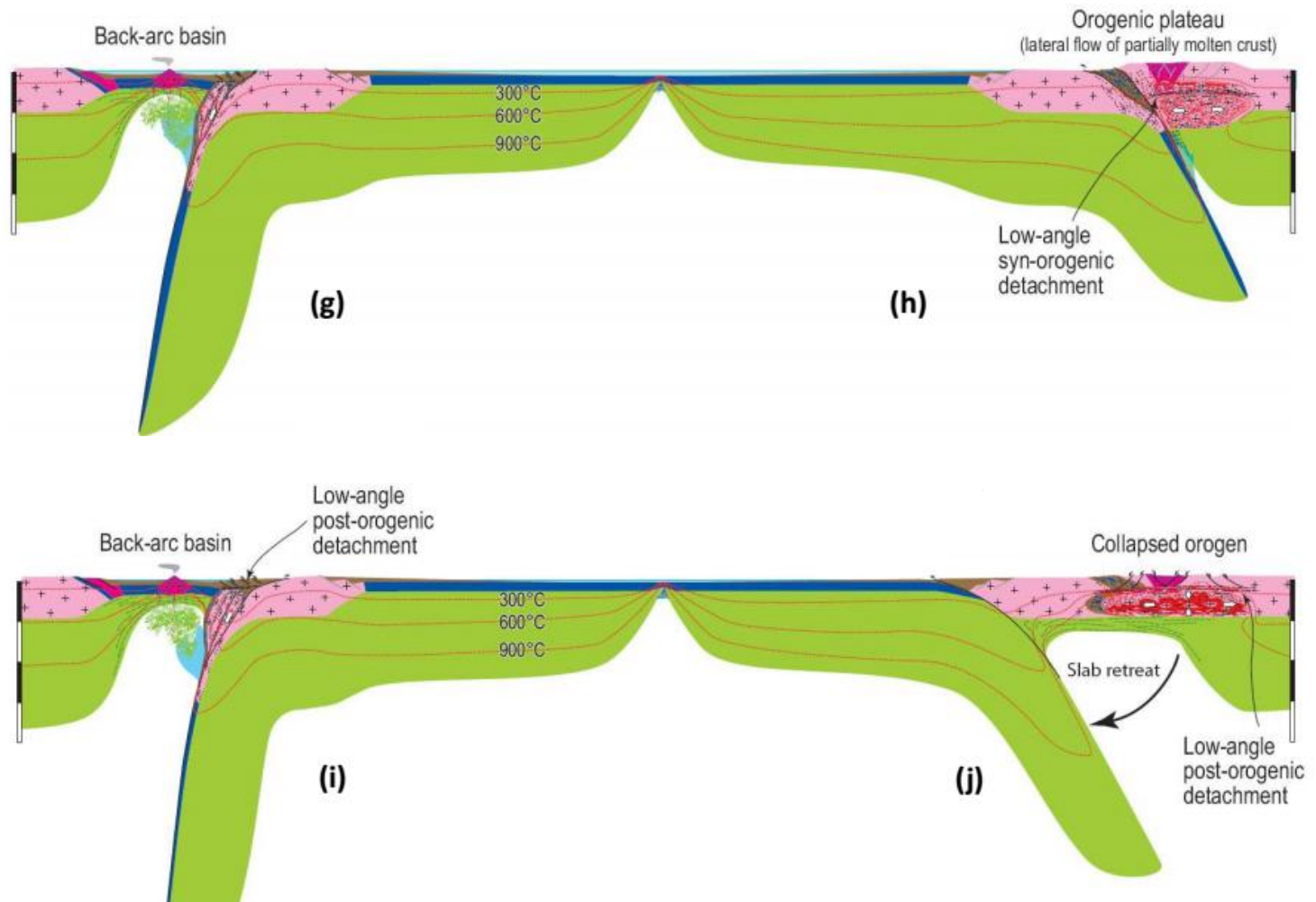


Systèmes d'effondrement gravitaire: exemple des Basin and Range





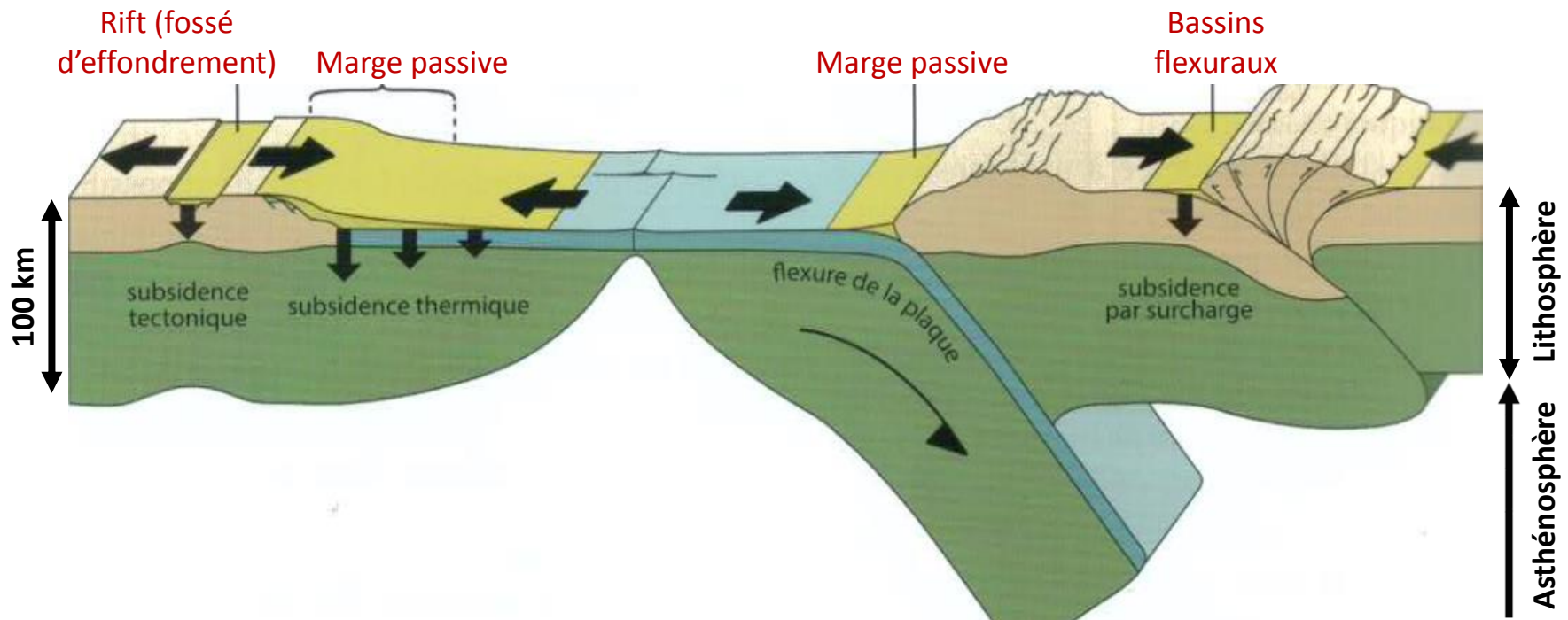
(Vanderhaeghe, 2012)



(Vanderhaeghe, 2012)

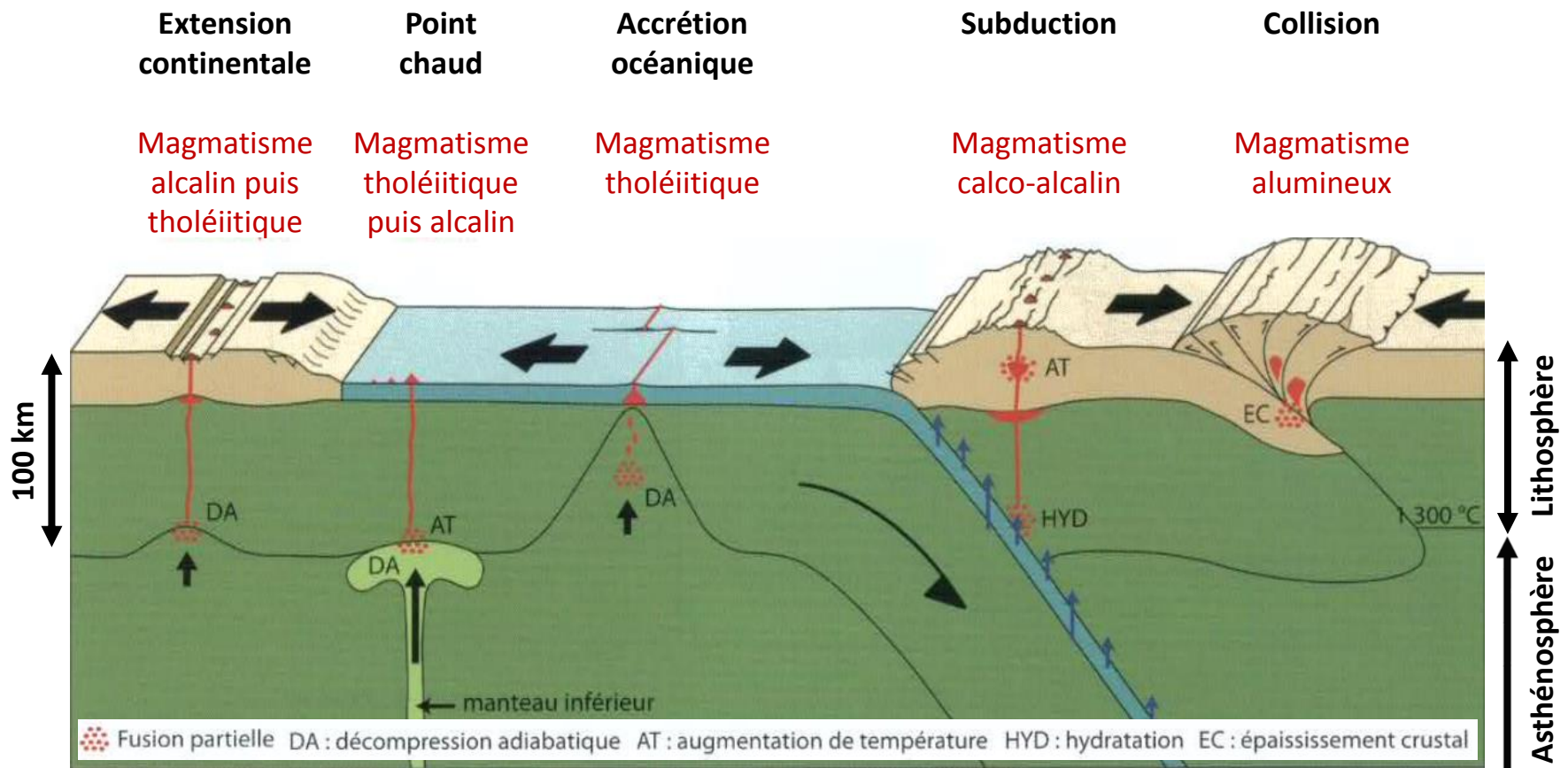
Il existe trois grands types de **subsidence**:

- la subsidence **tectonique**: associée au fonctionnement des failles normales, par exemple, dans les zones d'extension => formation d'un rift (ou fossé d'effondrement)
- la subsidence **thermique**: liée au refroidissement d'une lithosphère préalablement amincie => formation d'une marge passive
- la subsidence par **surcharge**: associée à la mise en place de nappe de charriage en bordure d'un orogène (fold-and-thrust belt ou zone externe)



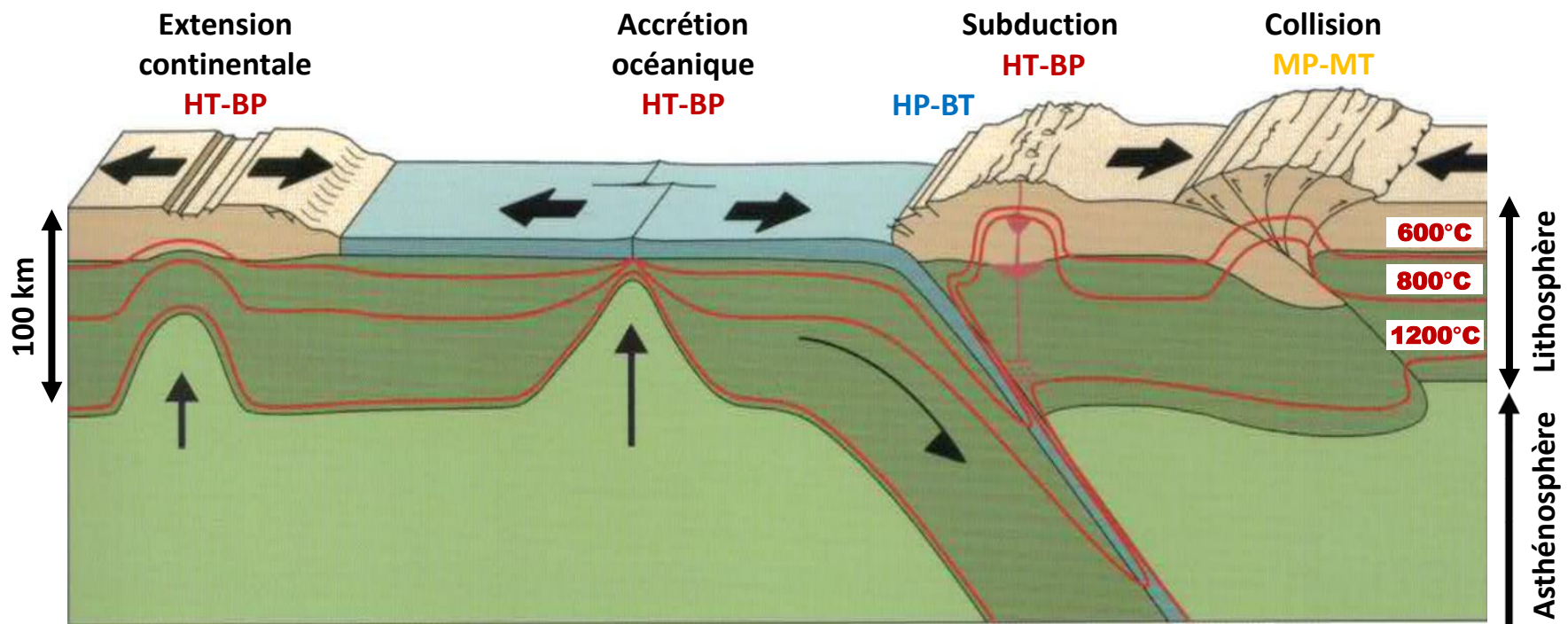
Il existe trois principales **séries magmatiques**:

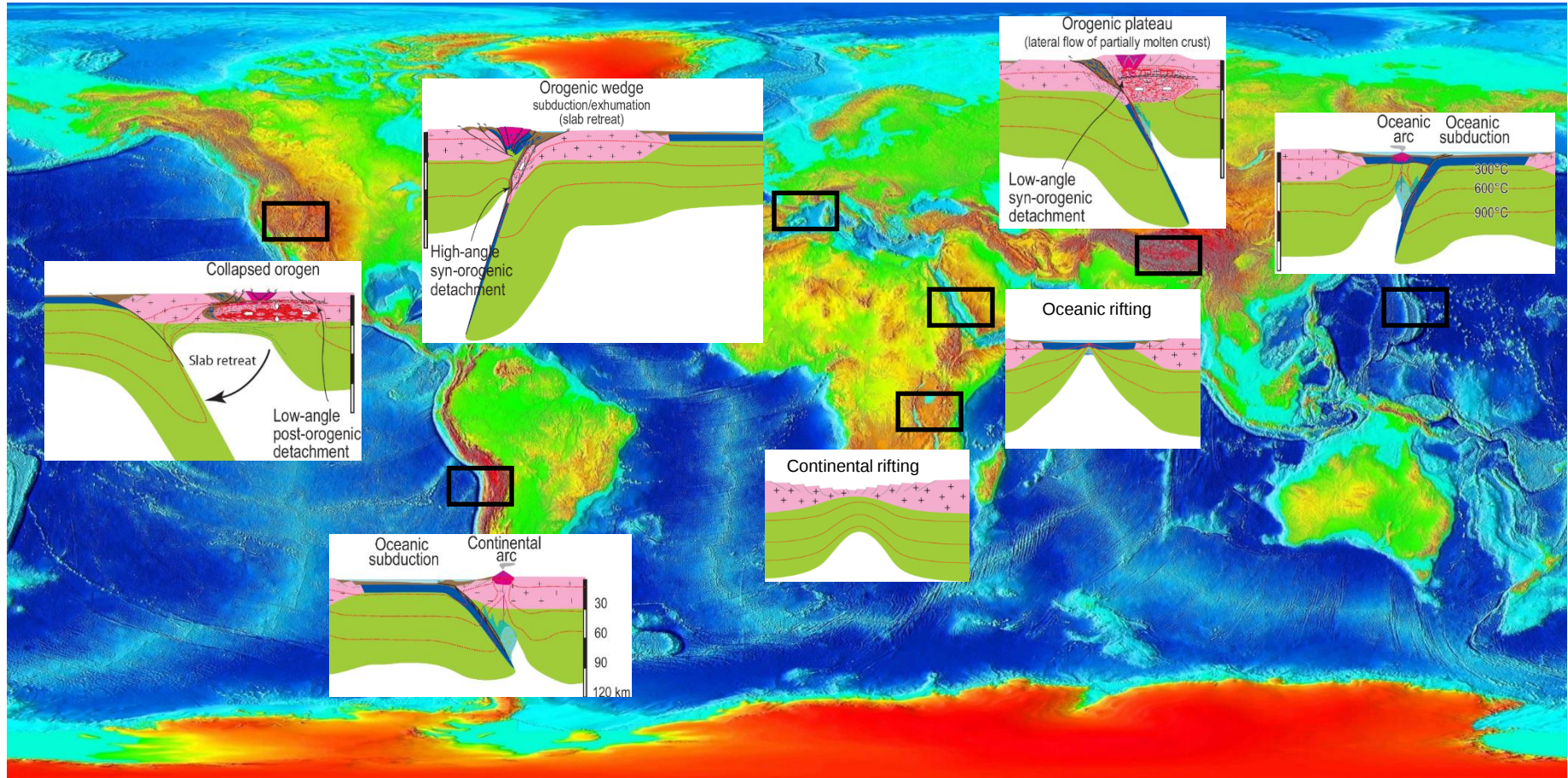
- Fusion à **taux faible** d'une **lherzolite** => magma primaire **alcalin**
- Fusion à **taux élevé** d'une **lherzolite** => magma primaire **tholéiitique**
- Fusion d'une **lherzolite hydratée** => magma primaire **calco-alcalin**

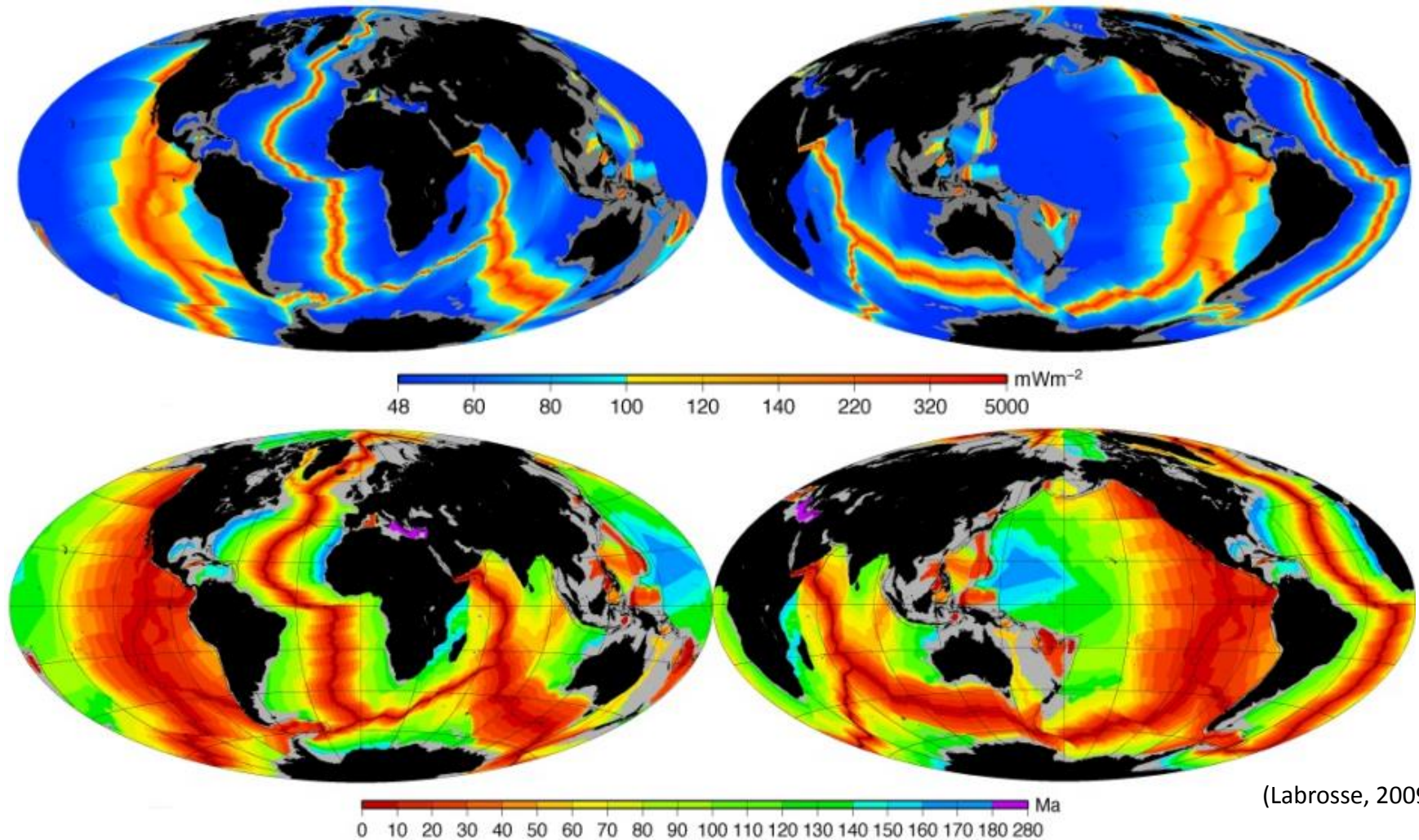


Il existe trois grands types de **gradients métamorphiques** régionaux:

- Gradient **Haute Pression-Basse Température (HP-BT)**: faciès schistes bleus, éclogites et la présence de disthène
- Gradient **Haute Température-Basse Pression (HT-BP)**: faciès schistes verts, amphibolite, granulite montrant la transition andalousite-sillimanite
- Gradient **Moyenne Pression-Moyenne Température (MP-MT)**: faciès schistes verts, amphibolite, granulite montrant la transition disthène-sillimanite



⇒ **Quels sont les moteurs de la tectonique des plaques ?**

1^{ère} hypothèse: convection mantellique



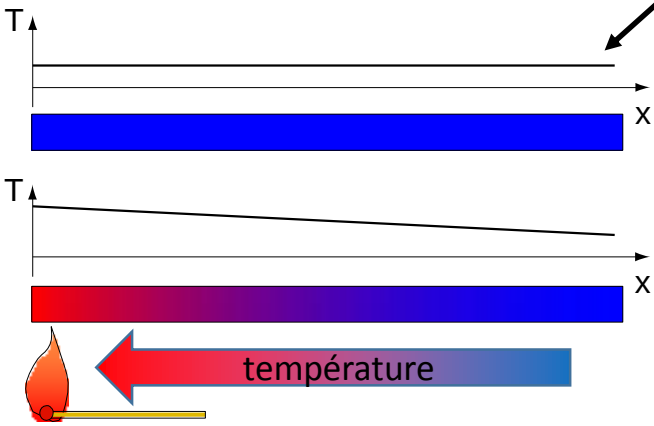
Flux thermique océanique (en mW.m^{-2}) déterminé à partir de deux grandeurs: (i) le **gradient thermique** (dT/dz) et (ii) la **conductivité thermique** des roches (λ):

$$F = \lambda \cdot dT/dz$$

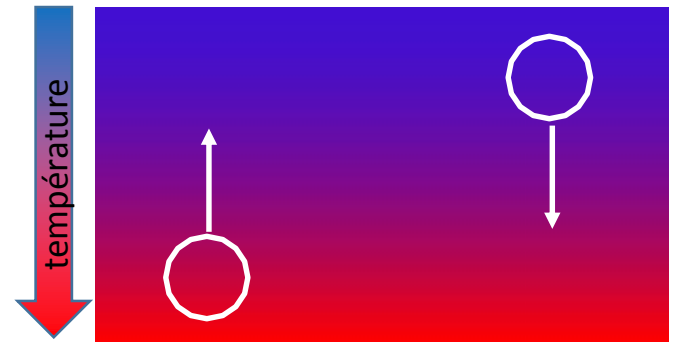
L'équation de la **chaleur** permet de comprendre comment la chaleur se répartit dans le **globe**. Cette équation indique les variations de la température en un point, en fonction du temps (t). Elle ne considère que les transferts verticaux (à la vitesse u), en fonction de la profondeur z .

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}}_{\text{Conduction}} + \underbrace{\frac{A}{\rho} \cdot C_p}_{\text{Production de chaleur}} - \underbrace{u \frac{\partial T}{\partial z}}_{\text{Convection}}$$

Conduction **Production de chaleur** **Convection**
Diffusion de chaleur Advection



κ = diffusivité thermique des roches
 A = désintégration des éléments radioactifs
 ρ = densité
 C_p = capacité thermique

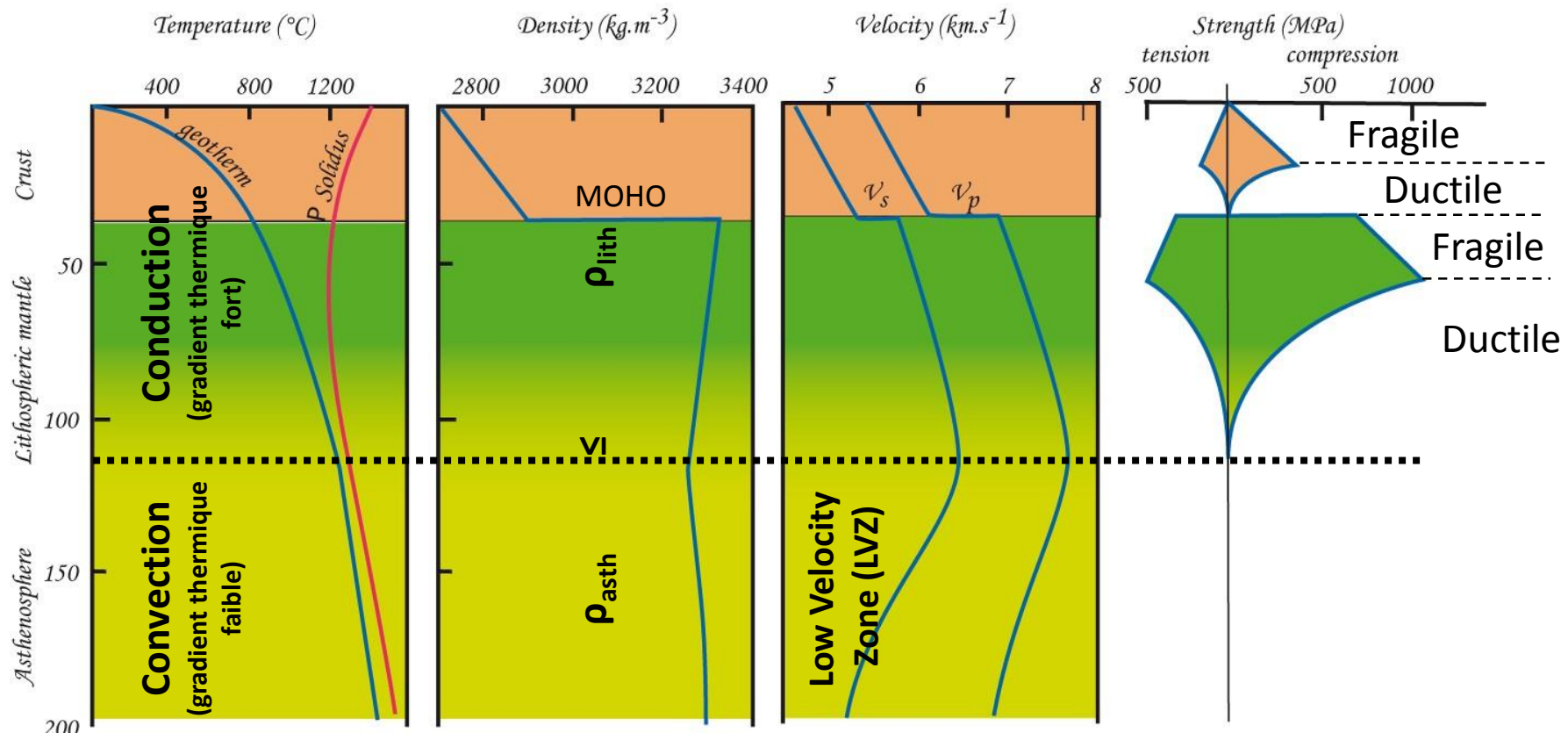


C_p mesure la chaleur nécessaire pour faire augmenter de un degré la température d'un volume unitaire de roche.
 κ mesure la capacité des roches à laisser circuler la chaleur.

$\Rightarrow$ Le flux **conductif** de **chaleur** est **indépendant** du **mouvement**!

4. Théories $\Rightarrow$ De la **géodynamique interne** ... à la **tectonique des plaques**

Sur Terre, l'évolution thermique est principalement fonction de ces deux processus **en compétition** : la **conduction** (diffusion) d'une part, la **convection** de l'autre (advection).



Lithosphère

- ✓ Mécaniquement résistante
 - ✓ Thermiquement conductrice
 - ✓ Chimiquement dense
- } comparée à l'**asthénosphère**

L'apparition de la **convection** est contrôlée par un certain nombre de **propriétés physiques** du **matériau** (coefficient de dilatation thermique, conductivité thermique) et de **caractéristiques** du **système** (épaisseur, températures aux limites du système).

Le nombre de **Rayleigh** est un paramètre sans dimension. Il reflète la compétition entre les forces motrices de la **convection** (la force de flottabilité définie comme la différence entre le poids et la poussée d'Archimède) et les phénomènes **dissipatifs** (conduction de la chaleur et frottement visqueux):

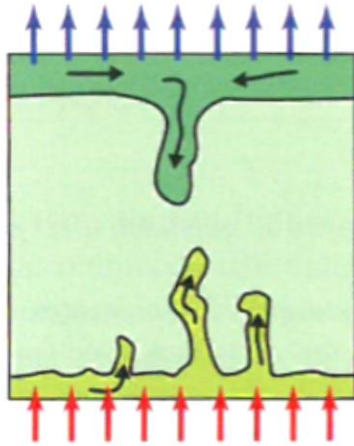
$$Ra = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot g \cdot d^3}{\nu \cdot K} = \frac{\text{flottabilité}}{\text{dissipation}}$$

Avec:

- α :** coefficient de dilatation thermique (K^{-1})
- ΔT :** différence de température entre la base et le sommet du système (K)
- g :** accélération de pesanteur ($m \cdot s^{-2}$)
- d :** épaisseur du système (m)
- ν :** viscosité (Pa.s)
- K :** diffusivité thermique

Si $Ra > 1000 \Rightarrow$ CONVECTION

Chauffage par le bas et refroidissement par le haut

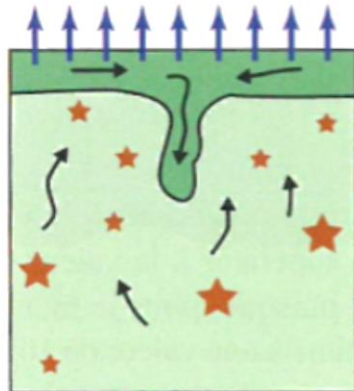


$$\rho_{\text{asth}} < \rho_{\text{lith}}$$

Gradients inverses de densité:

$$T^{\circ}_{\text{noy}} > T^{\circ}_{\text{asth}}$$

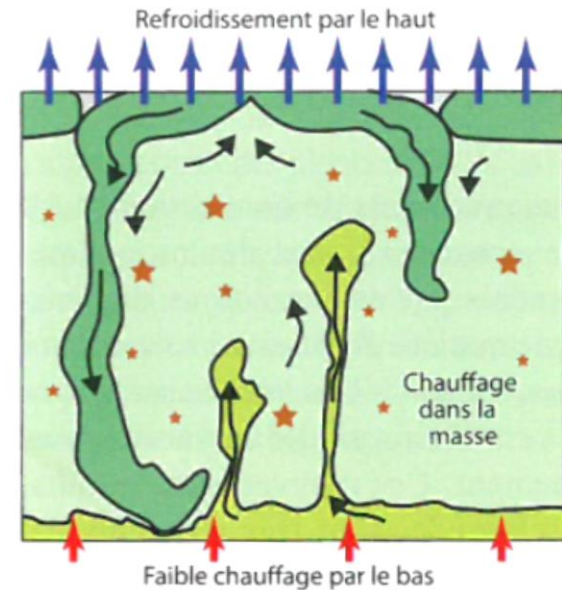
Chauffage dans la masse et refroidissement par le haut



$$\rho_{\text{asth}} < \rho_{\text{lith}}$$

+ radioactivité
(U_{235} , U_{238} , Th_{232} , K_{40})

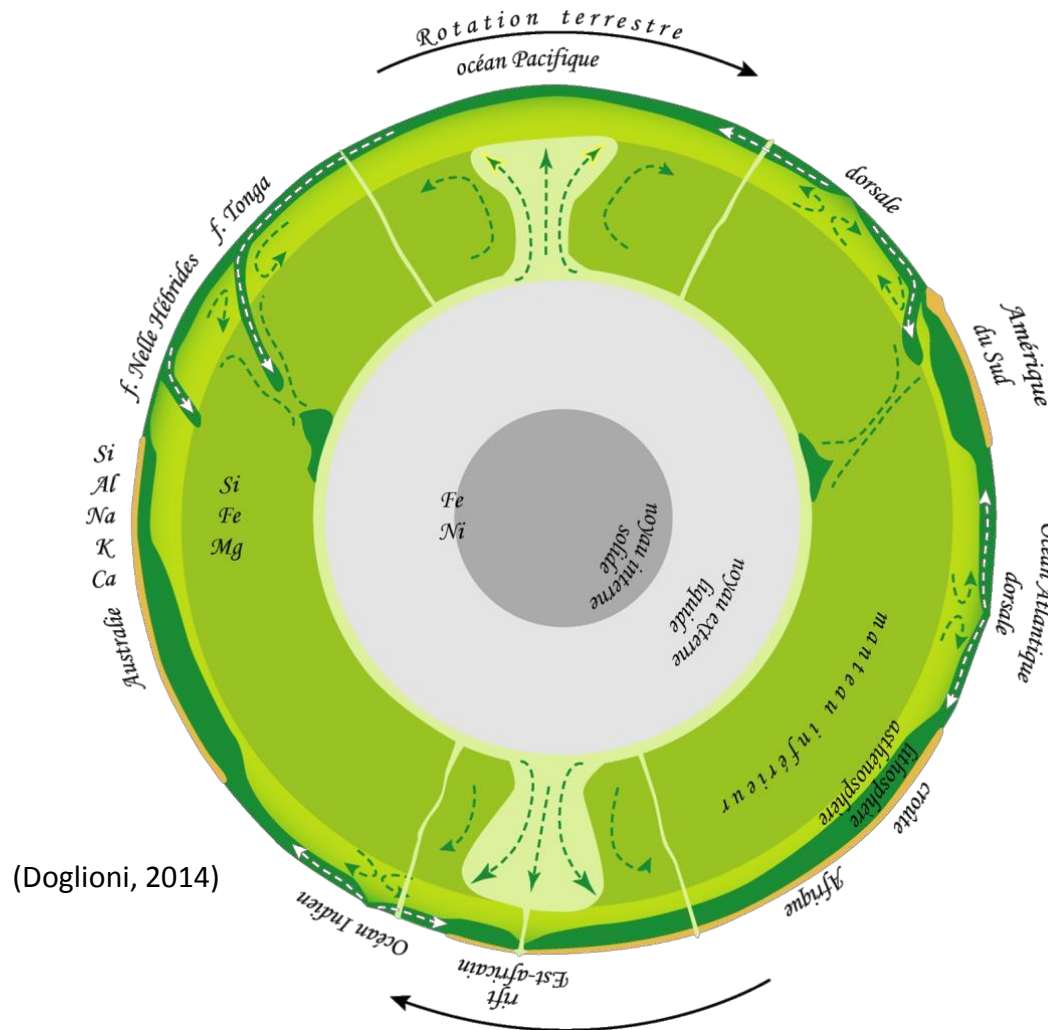
Manteau = système mixte



Manteau = système convectif:

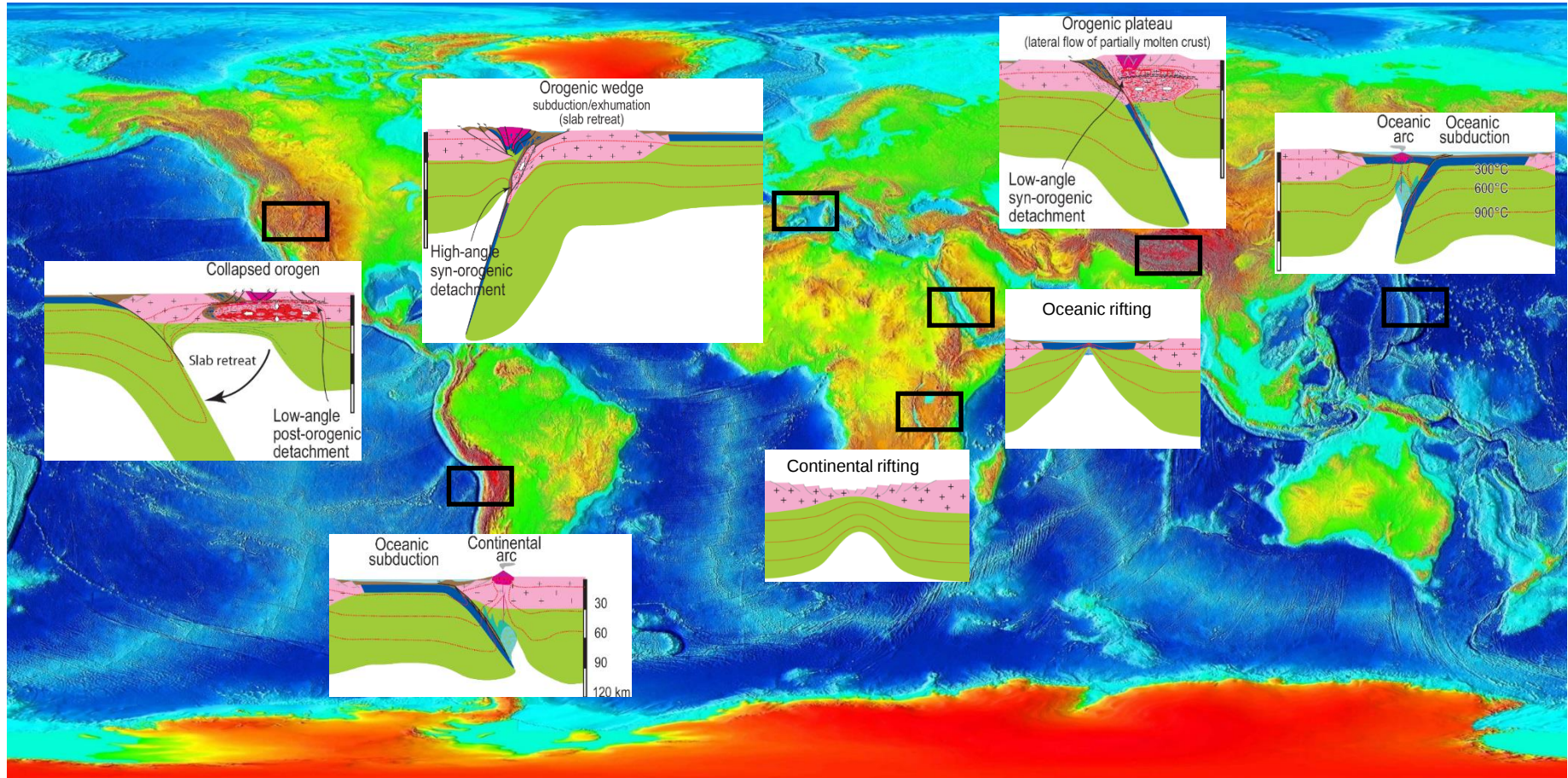
- ✓ $Ra \approx 10^6 - 10^8$
- ✓ Anomalies de densité d'origine thermique (refroidissement et radioactivité)

Lithosphère = couche limite thermique (conduction)



- ✓ La dynamique mantellique peut être décrite par **trois grands types de mouvements**: (1) le **plongement de la lithosphère** (subduction=moteur essentiel), (2) **remontées asthénosphériques diffuses** (dorsale=moteur passif), (3) **remontées locales** (panaches=moteur actif)

⇒ **Quels sont les moteurs de la tectonique des plaques ?**



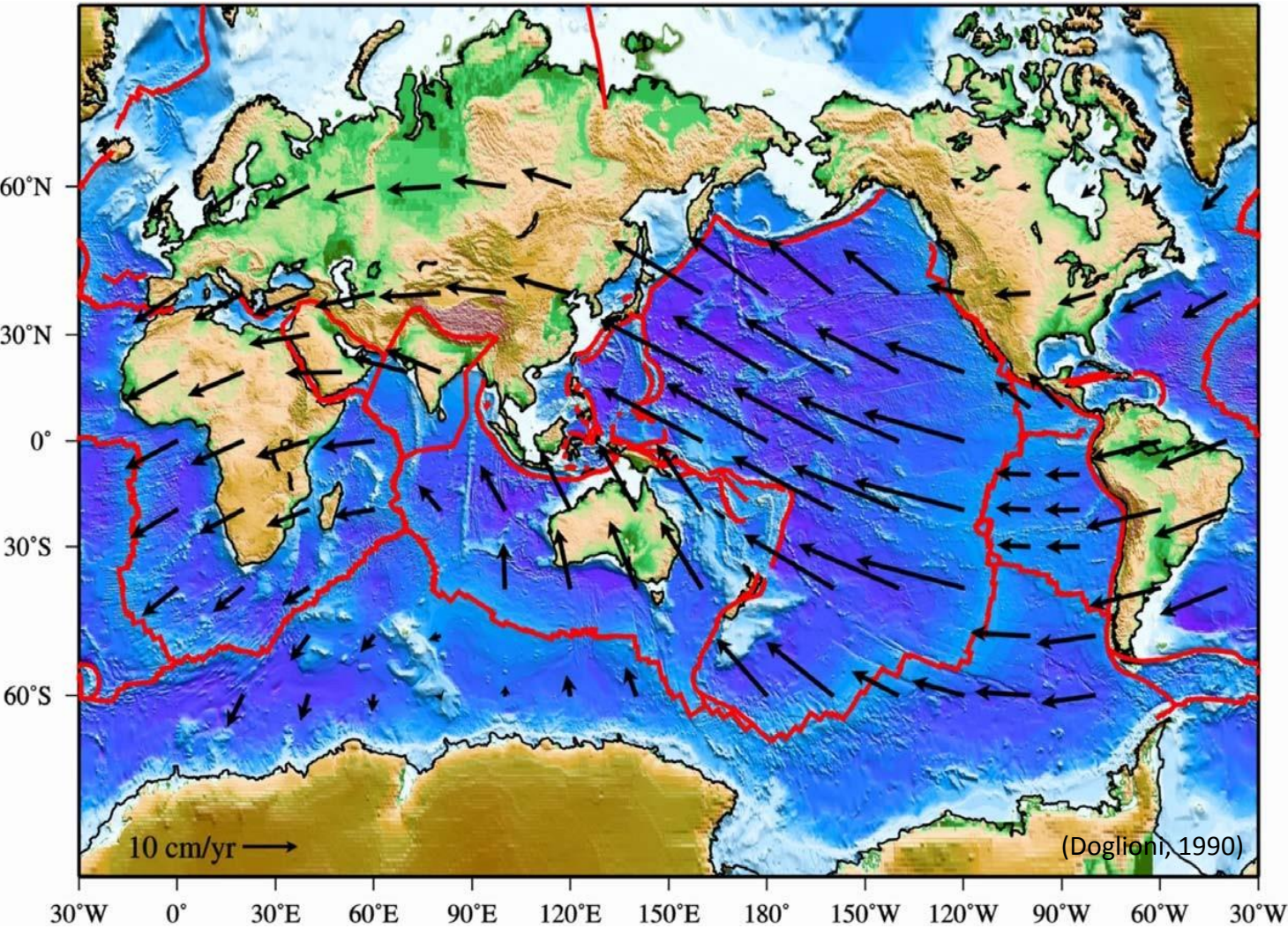
2^{ème} hypothèse: rotation de la Terre

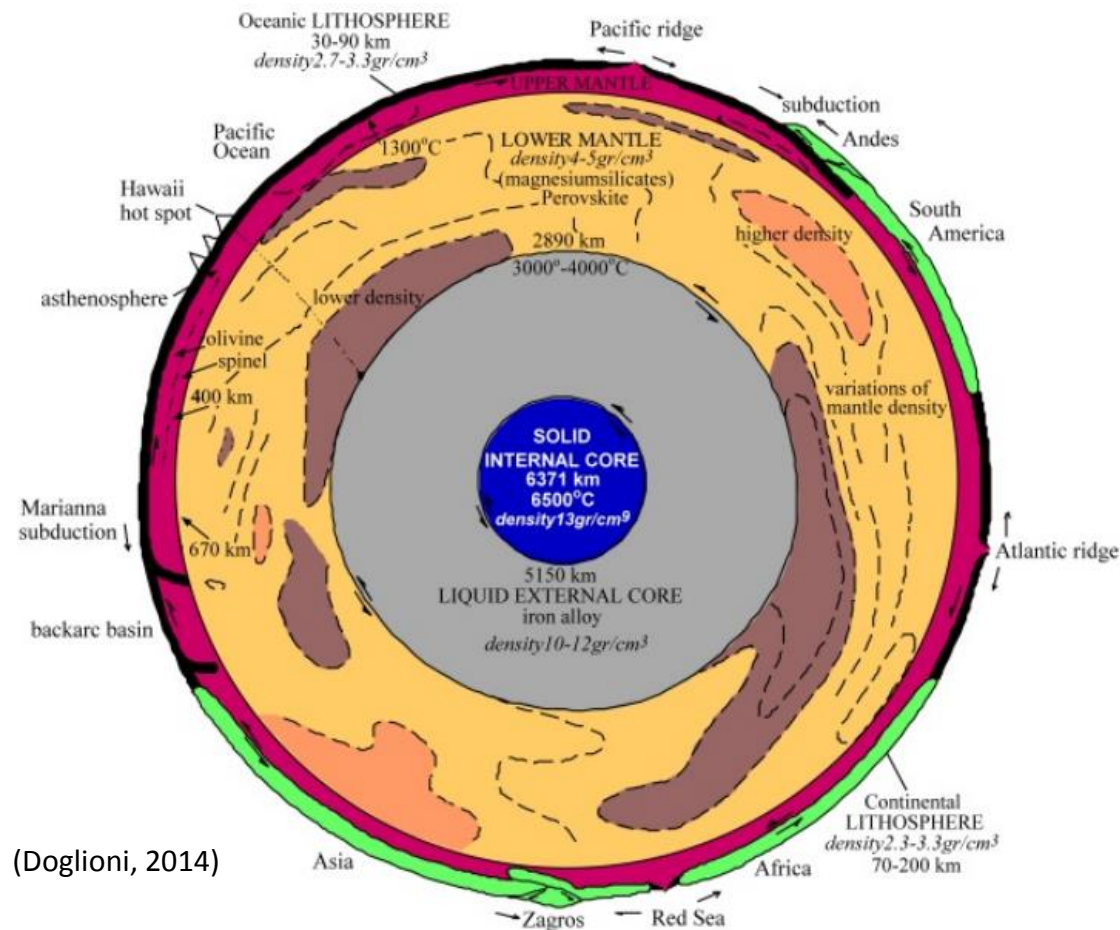
Dérive vers l'ouest (westward drift) de la lithosphère

La Terre tourne d'Ouest en Est.

La lithosphère, plus rigide et moins visqueuse, tourne moins vite que le manteau sous-jacent.

Tout se passe comme si la lithosphère se déplaçait vers l'Ouest.





- ✓ Limite entre la **lithosphère** et l'**asthénosphère** représente des changements de **densité** et de **viscosité**. Ces différentes limites sont interprétées comme des **zones de cisaillement**.
- ✓ Le mouvement **lithosphérique** est retardé par rapport au manteau sous-jacent. Son déplacement **apparent** est vers l'**Ouest** quand celui du **manteau** est vers l'**Est**