# Géodynamique et tectonique des plaques

## La surface de la Terre a priori immobile … et pourtant

« Les dislocations visibles dans l'écorce terrestre sont le produit de […] **mouvements horizontaux** (c'est à dire de poussée et de plissement) et de **mouvements verticaux** (c'est à dire d'affaissement). »

*(Eduard Suess, 1883-1909, La face de la Terre)*

# Plan


## I- Du fixisme au mobilisme : de la dérive des continents à la tectonique des plaques

**1.1 Ce que l'on savait au début du XX$^{ième}$ siècle : vers une approche tectonique globale**

**1.2 La théorie de la dérive des continents**

**1.3 Vers la tectonique des plaques**

## II- La théorie de la tectonique des plaques

**2.1 La théorie**

**2.2 La cinématique des plaques**

**2.3 Les moteurs de la tectonique des plaques**

## III- Les limites de plaques

**3.1 En divergence**

**3.2 En convergence**

**3.3 En coulissage**

# I- Du fixisme au mobilisme : de la dérive des continents à la tectonique des plaques

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

## La surface terrestre est animée de mouvements

*De Saussure (1779-1796 ; le Voyage dans les Alpes)*



*Pli couché de St Clément*

Des strates plissées et couchées…

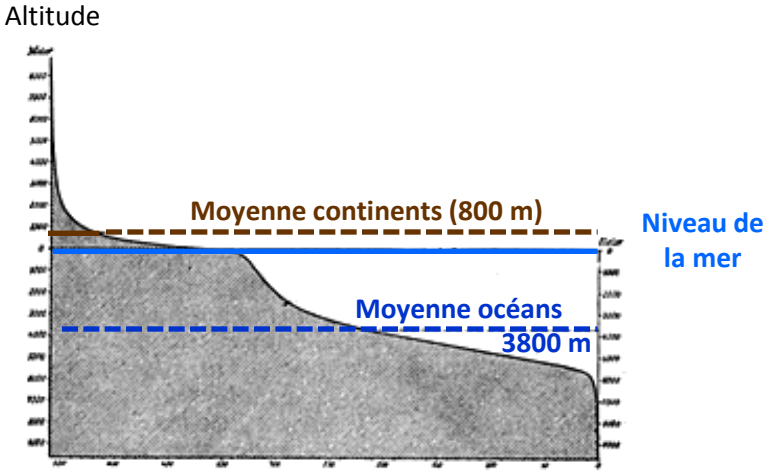
… et de nombreuses hypothèses explicatives

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

# Altitude, gravimétrie et structure profonde de la Terre

## *Les observations*



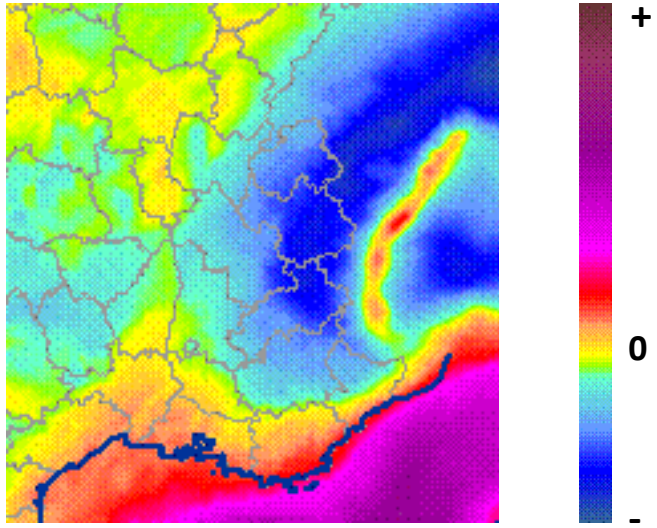

*Distribution des altitudes terrestres*

Une distribution bimodale des altitudes terrestres



*Pierre Bouguer (1698-1758)*

Des anomalies gravimétriques dans les Alpes : un paradoxe ?



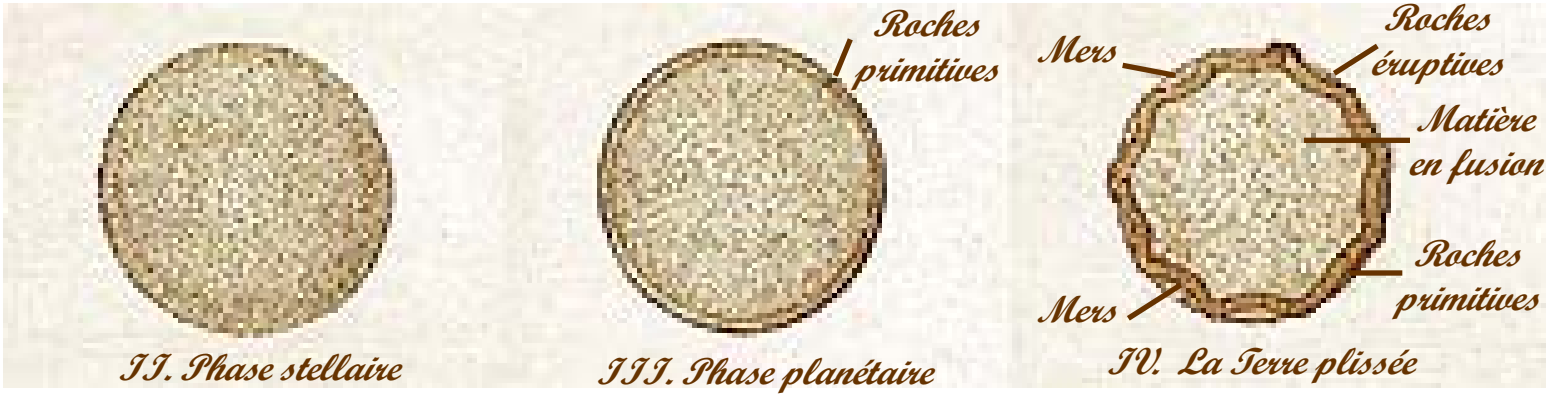

*Carte des anomalies de Bouguer*

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

## Théorie de la contraction thermique de la Terre

*Elie de Beaumont, 1828*




Refroidissement = contraction

- **Chaînes de montagne**
- **Dépressions colonisées par les océans**

Premier cadre conceptuel
Premier mécanisme pour expliquer les mouvements de la Terre.

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

# La surface terrestre est animée de mouvements

*Suess, Bertrand, … (1880)*

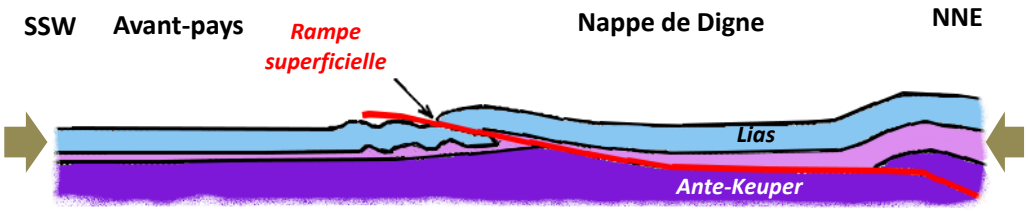


*Marcel Bertrand (1847-1907)*




*Nappes de charriage dans les Alpes*

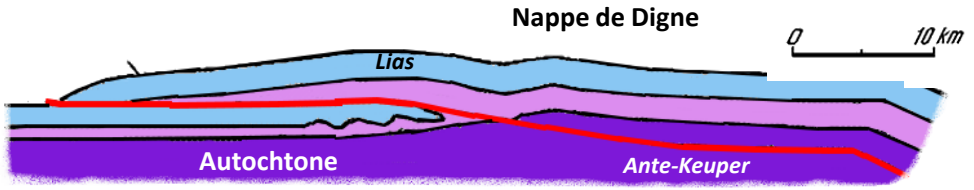
- Déplacement de formations sur des dizaines, centaines de km




**1. Détachement de la nappe**

Recouvrement de terrains d'âges très différents

➡ Mouvements tangentiels très importants




**2. Fin du charriage**

**Introduction**

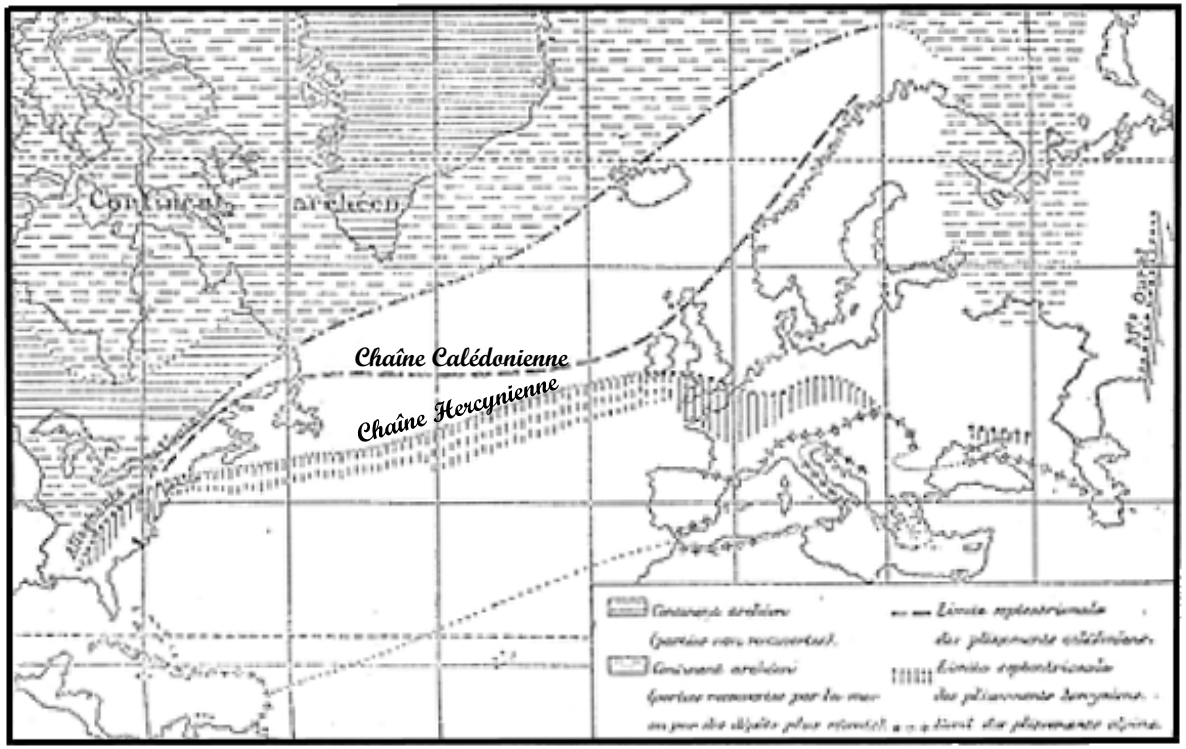
**I- Du fixisme au mobilisme**

## Approche paléontologique

*Suess (La face de la Terre)*



*Eduard Suess (1831-1914)*



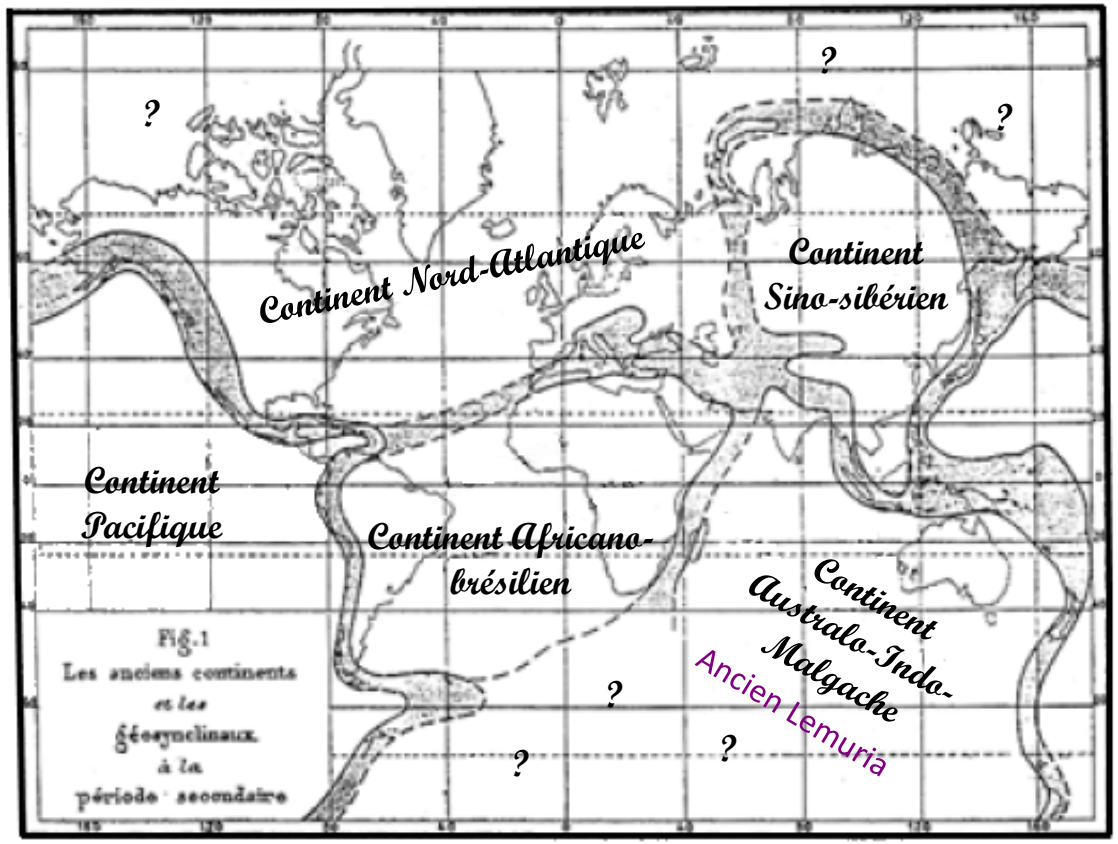

Faune fossile commune entre des régions aujourd'hui séparées par des océans → Impossible à expliquer selon la théorie darwinienne sans liaisons intercontinentales → Continents autrefois plus étendus

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

# Une théorie unificatrice avant la dérive des continents

*Bertrand, Suess, 1880-1890*




*Géosynclinaux et aires continentales, d'après Émile Haug (1900)*

Suess : « Les déformations observées sont le résultat de déplacement horizontaux »

Les chaînes de montagne sont des empilements d'écailles d'âge et de nature différents.

Bertrand : « Amérique du Nord et Europe formaient autrefois un seul continent, effondré en son centre pour constituer l'Atlantique »

Les continents autrefois plus étendus « s'effondrent » pour laisser place à des océans.

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

# Théorie des géosynclinaux

*Emile Haug, 1900*

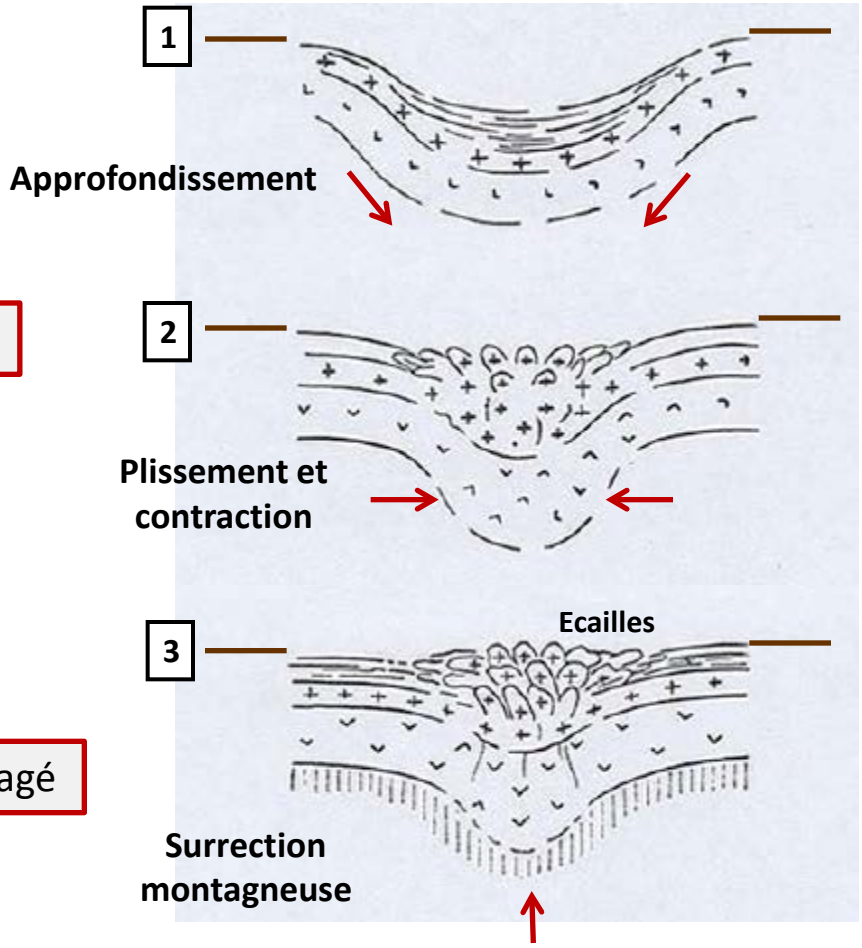
Haug : Chaînes de montagne érigée le long de bandes étroites (géosynclinaux) intercalées entre des unités continentales stables.

Basé sur la contraction thermique de la Terre

Rejoint Suess sur la répartition des continents et propose un mécanisme pour expliquer la formation des chaînes de montagne : la théorie des géosynclinaux

Aucun mouvement horizontal de grande ampleur envisagé

Toutes les théories proposées avant le XX$^{ième}$ siècle sont dites fixistes



**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

## Arguments géographiques

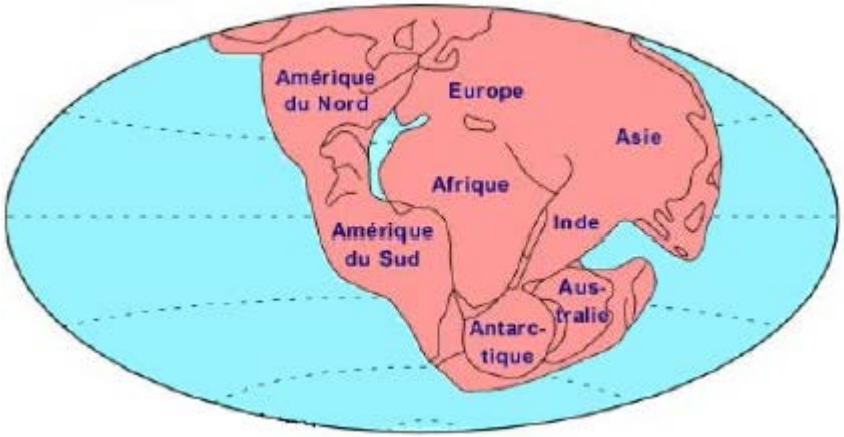


*La Terre actuelle*



*Alfred Wegener (1880-1930)*

Les continents s'emboîtent les uns les autres comme les pièces d'un puzzle ….



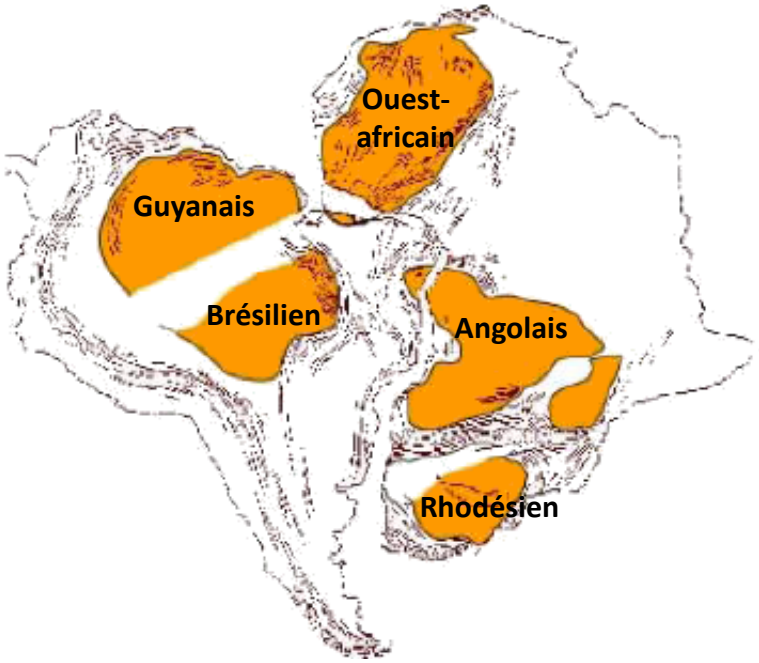

*La Pangée de Wegener*

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

## Arguments géologiques

… mais ils présentent aussi une continuité, une correspondance de leurs structures géologiques




*Les cratons*




*Les chaînes de montagne*

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

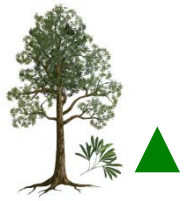
## Arguments paléontologiques



Cynognathus



Lystrosaurus

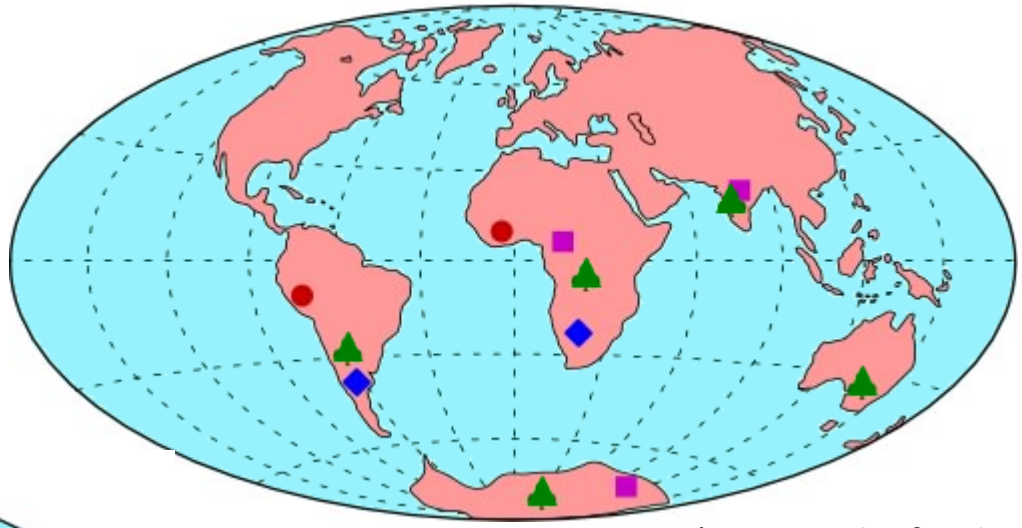


Glossopteris

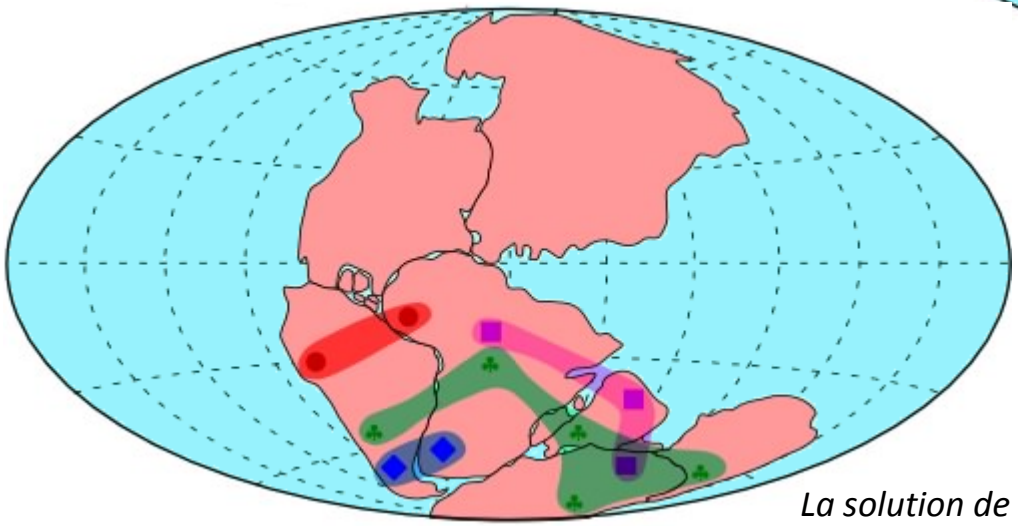
*Faune et flore permo-triasique*



Mesosaurus



*Répartition des fossiles*



*La solution de Wegener*

Analogies des faunes et flores fossiles imposant des « liaisons » continentales

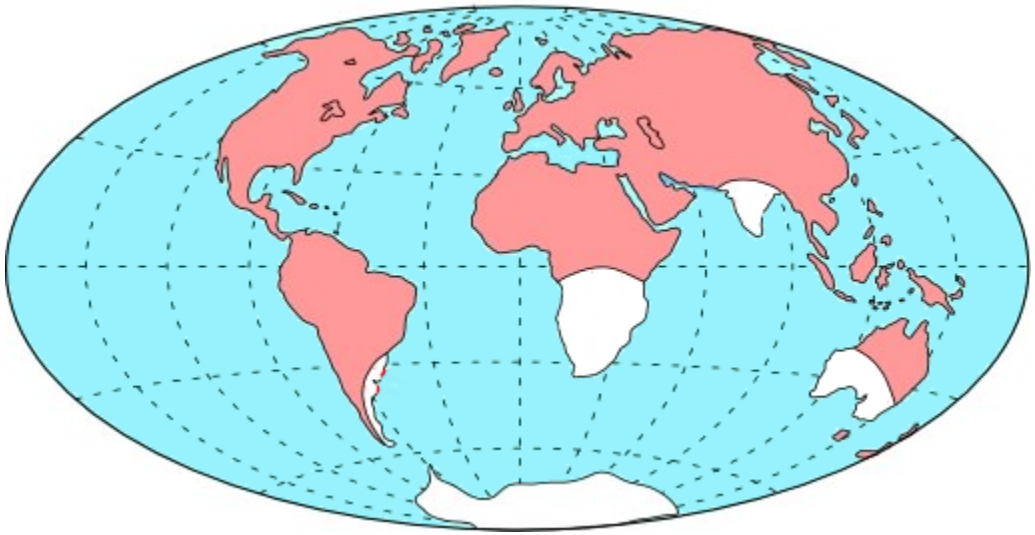
Remise en question des « ponts continentaux »

**Introduction**

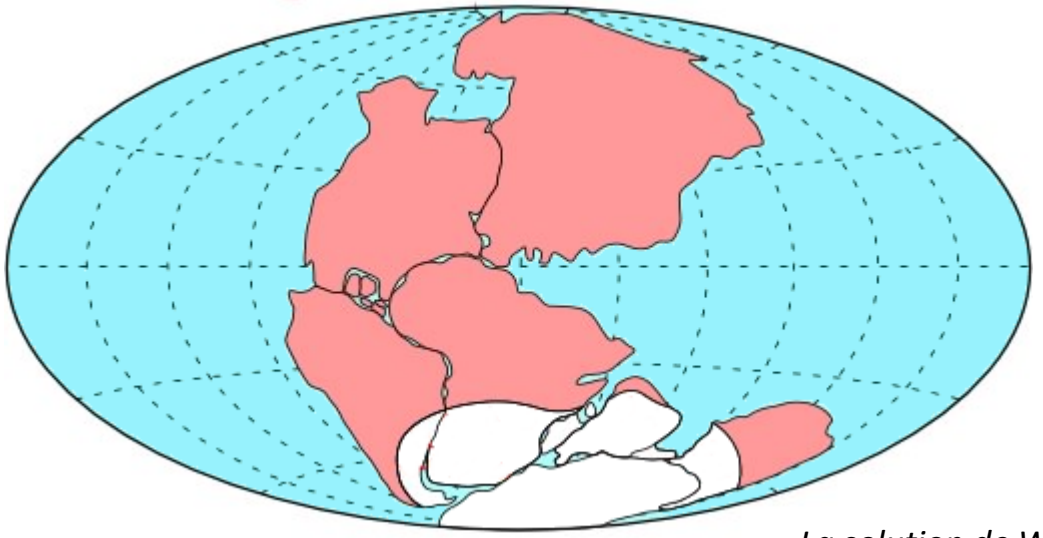
**I- Du fixisme au mobilisme**

## Arguments paléoclimatiques

Le même raisonnement est applicable aux climats aride ou chaud et humide



*Répartition des traces glaciaires permiennes*



*La solution de Wegener*

Le rassemblement des masses continentales de Wegener donne un sens à la répartition des dépôts glaciaires âgés de 250 Ma

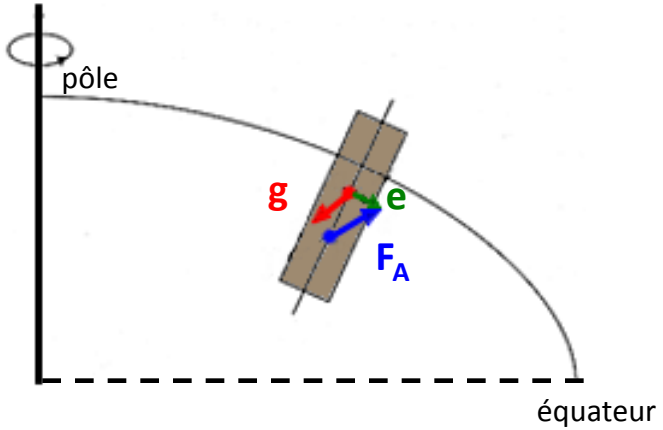
Une mobilité continentale horizontale de grande envergure

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

g : gravité
$F_A$ : force axifuge

## Les forces motrices




- La force d'Eötvos (e)

  g et $F_A$ ne s'appliquant pas au même point, leur **résultante** (e) est dirigée vers l'équateur

- La force de marée et la précession

  Marées océanique et terrestre sont responsables de la précession de la Terre induisant une **dérive des continents** vers l'Ouest

- Les courants de convection

  Le « sima » sous-jacent s'échauffe sous les continents et se refroidit sous les océans créant un **courant de convection**. Le frottement induit sur la croûte peut la faire glisser.

**Pb : quelle est la rhéologie de ces couches Rigide ? Élastique ? Visqueux ?**

« Ces forces sont **faibles** mais agissant constamment dans la **même direction** elles peuvent produire des **déplacements importants** »

**Mais d'après la sismologie, la Terre est solide, …**

« Une seule chose est sûr, ces mêmes forces sont à la fois responsable des **translations horizontales**, des **tremblements de terre**, du **volcanisme**, des alternances de transgression, …»

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

# La théorie (1912-1930)

La première théorie unificatrice mobiliste

- Les points forts de la théorie de Wegener

  - Un très **grands nombre de preuves** ….

  - … concordant vers un **modèle simple**

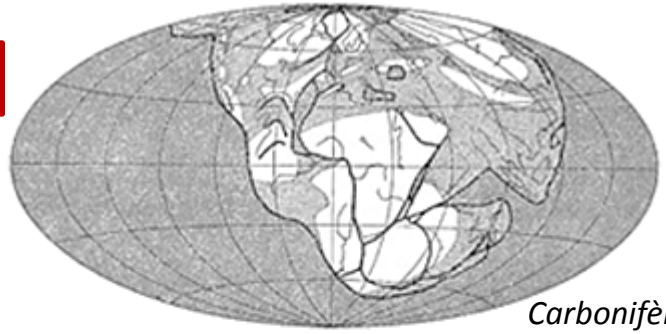
  - Et mettant en évidence les **insuffisances des théories précédentes**

**- Ponts continentaux (par rapprochement des continents)**
**- Fixisme (par la surface totale des continents et océans)**

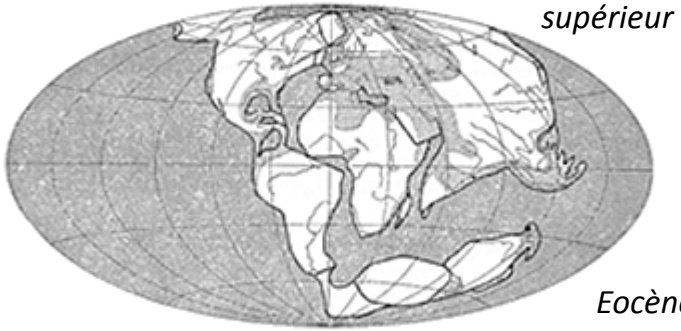
- Ses points faibles et ses détracteurs

  - Calculs d'une **vitesse de déplacement** d'après les mesures de longitudes et des estimations de l'âge de séparation : entre 10 cm/an et 10 m/an … **erroné**

  - D'après la théorie de l'isostasie : les continents « flottent » sur un « sima » et pouvaient ainsi dériver : mais le **mécanisme** avancé par Wegener est **peu étayé et peu réaliste**



*Carbonifère supérieur*



*Eocène*



*Quaternaire*

**Manque des données fondamentales sur la structure interne de la Terre**

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

# Bilan

## Ses détracteurs




*Harold Jeffreys (1891-1989)*

*Bailey Willis (1857-1949)*

« La supposition selon laquelle la Terre pourrait être déformée indéfiniment par de petites forces à la seule condition que celles-ci agissent longtemps, est donc une supposition très dangereuse, qui peut conduire à des erreurs graves »

## Wegener et ses partisans




*Emile Argand (1879-1940)*

*Alfred Wegener (1880-1930)*

Les évidences naturalistes sont dans l'ensemble indiscutées et indiscutables, les détracteurs de Wegener vont se concentrer sur le mécanisme causal.

A la fin des années 1930, la théorie de la dérive des continents est rejetée faute d'un moteur physique convaincant, d'une incapacité à tester les hypothèses émises sur la **structure profonde de la Terre** et la **rhéologie des enveloppes** … et surtout une méconnaissance quasi-totale de la **géologie des fonds sous-marins**.

Jusqu'en 1960, la théorie des géosynclinaux restera maîtresse.

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

# La découverte de la convection et son application au manteau

**Découverte de la radioactivité**

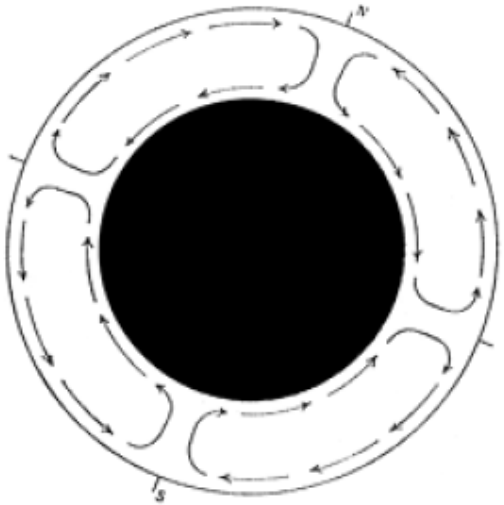
**Prise en compte des échelles de temps**

**Dans le manteau, le moteur de la convection est double : chauffage par la base (chaleur du noyau), refroidissement par le sommet (chaleur évacuée par la croûte) et chauffage interne (par les désintégrations radioactives).***

**l = 2800 km**
**ρ est compris en 3,3 et 6 (d'après le model PREM)**
**η = $10^{21}$ Pa.s (rebond isostatique du bouclier scandinave)**
**κ : $10^{-6}$ $m^2/s$ mesurés en laboratoire**
**α : $1{,}5.10^{5}$ K**
**ΔT : > 2 000 K et < 4 500 K**



*Lord Rayleigh (1842-1919)*



$$\text{Nombre de Rayleigh : } Ra = \frac{t_D}{t_C} = \frac{l^3.\alpha.\rho.\Delta T.g}{\kappa.\eta}$$

$\Rightarrow$ $2000 << 10^6 < \mathbf{Ra} < 8.10^7$

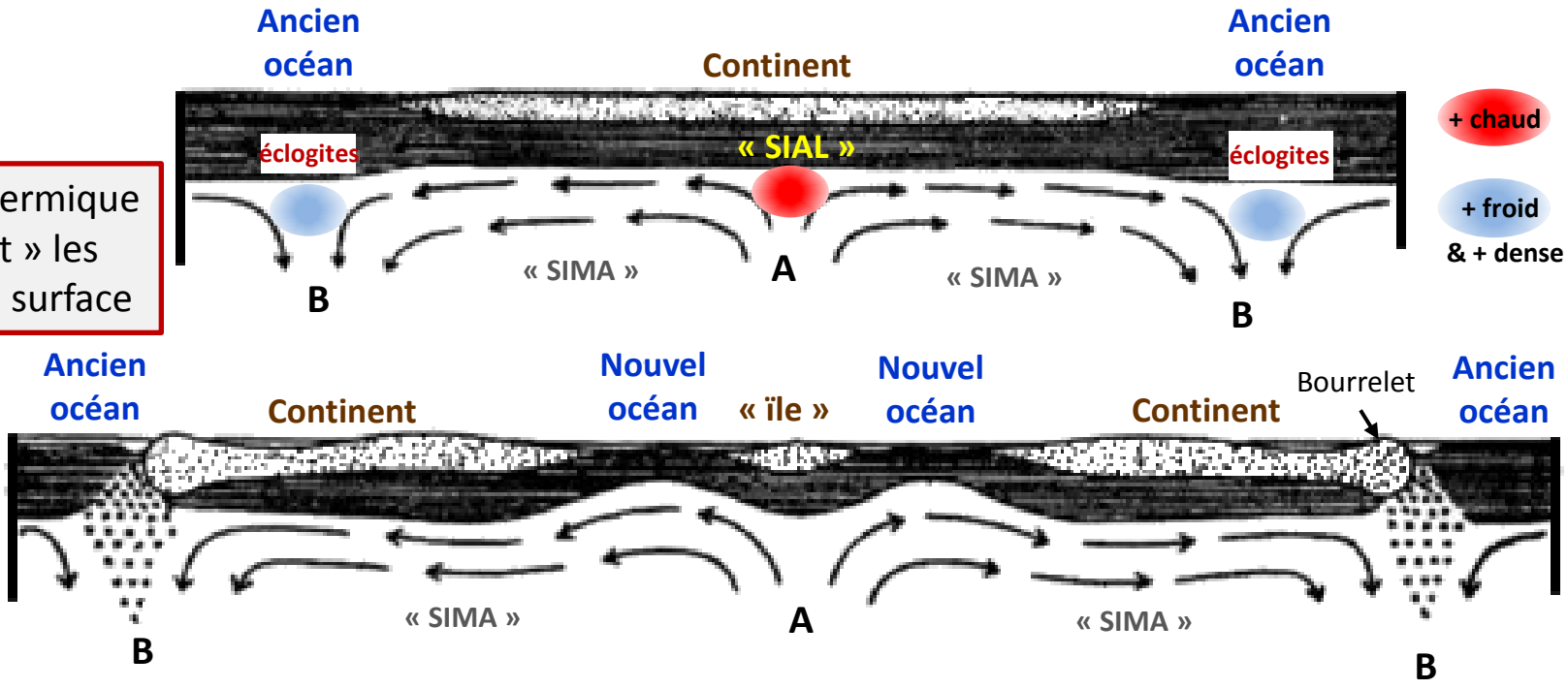
Le manteau convecte

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

## La convection mantellique, un moteur ? (1945)

Convection thermique « entrainant » les continents en surface




**Pb : quelle est la rhéologie de ces couches Rigide ? Élastique ? Visqueux ?**



*Arthur Holmes (1890-1965)*

Éclogites : roches très denses

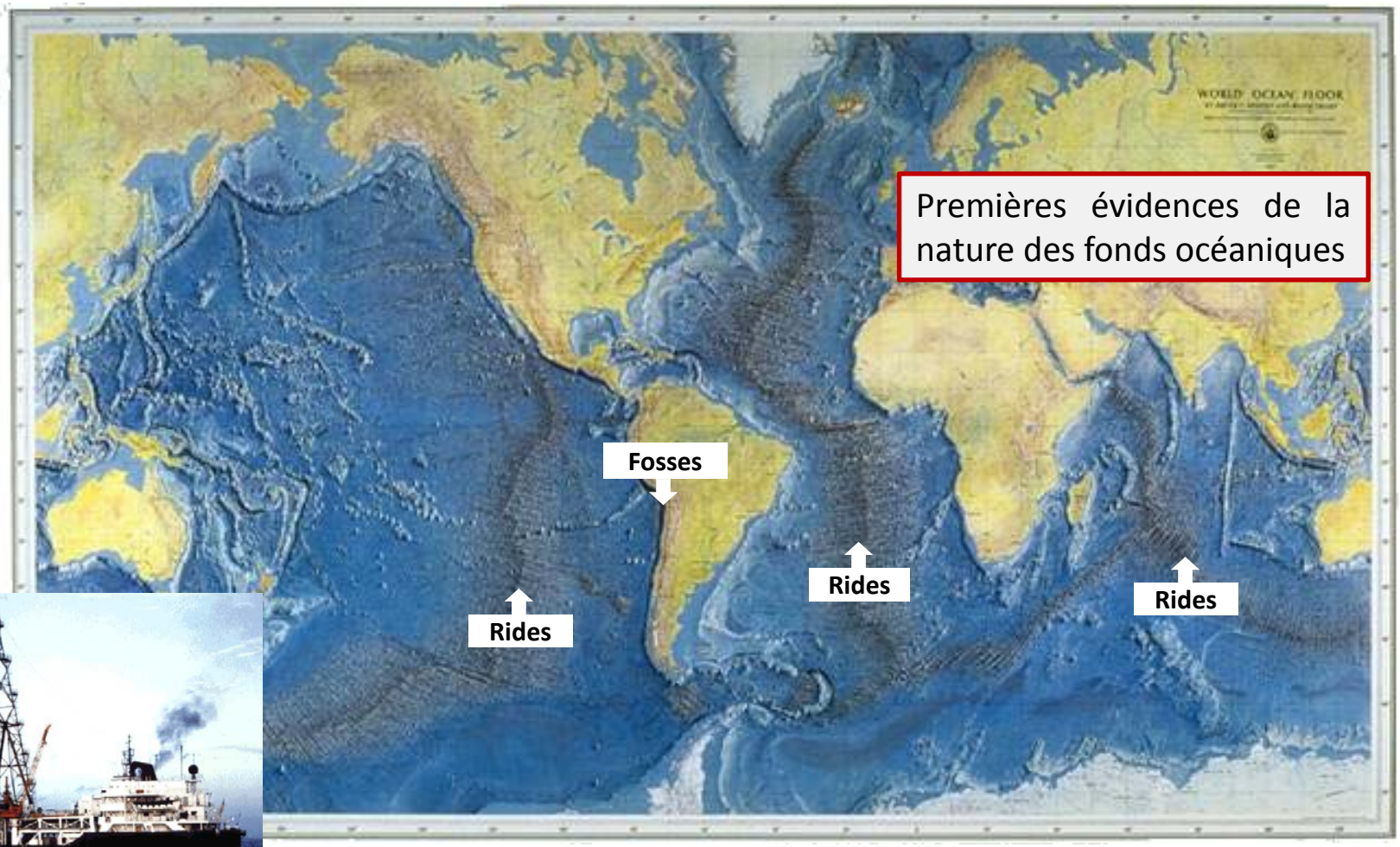
NB : On sait aujourd'hui que cette théorie est fausse

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

# La topographie des fonds océaniques

Premières évidences de la nature des fonds océaniques




*Carte des fonds océaniques*



*Glomar challenger, premier navire océanographique*

… un changement radical de paradigme !

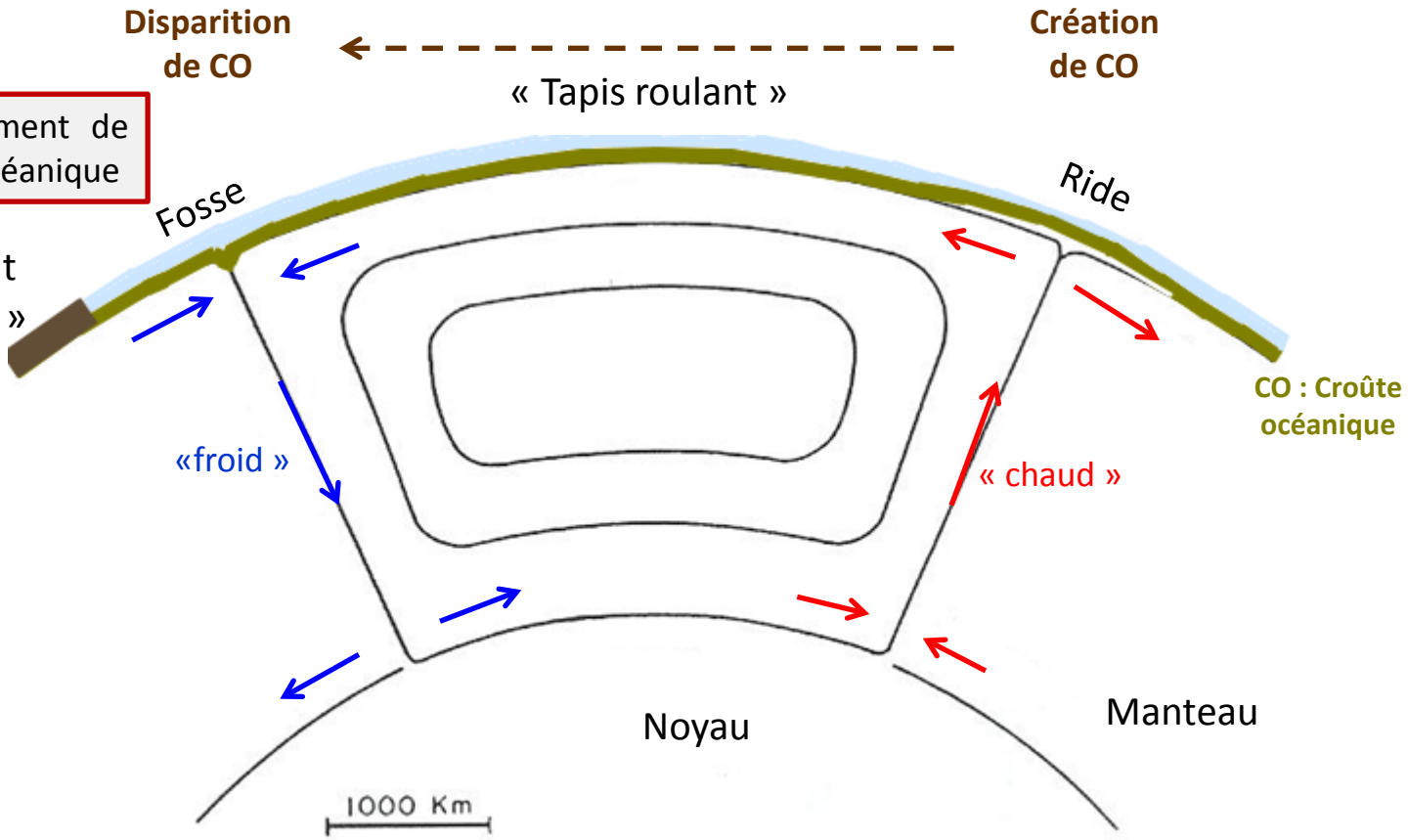
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

# La théorie de l'expansion des fonds océaniques (1960-1962)



*Harry Hammond Hess (1906-1969)*




*Modèle de convection de Hess (1960)*

**Existence d'un couplage mécanique entre croûte et manteau ?**

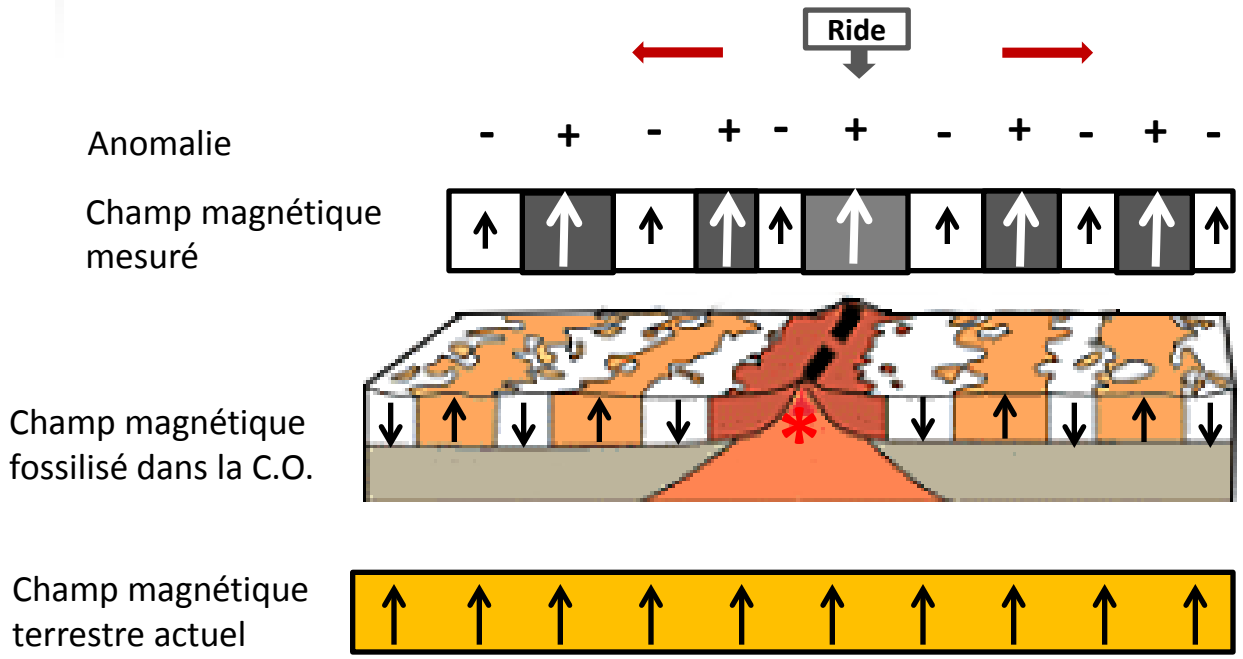
NB : Vision aujourd'hui erronée

Introduction

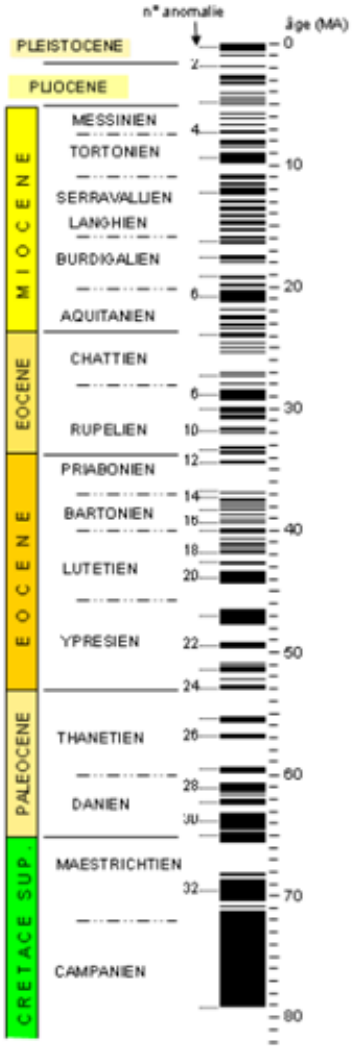
I- Du fixisme au mobilisme

# Les anomalies magnétiques des fonds océaniques (1963)

Le champ magnétique terrestre s'inverse périodiquement ….




* Aimantation propre des roches de la C.O. acquise lors de leur refroidissement



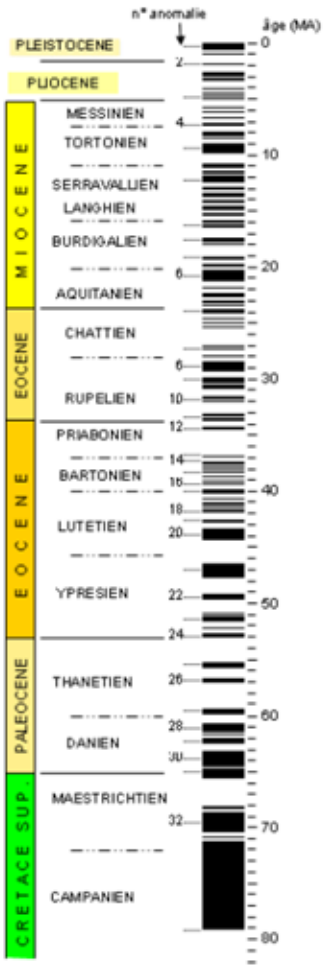

Echelle magnétostratigraphique

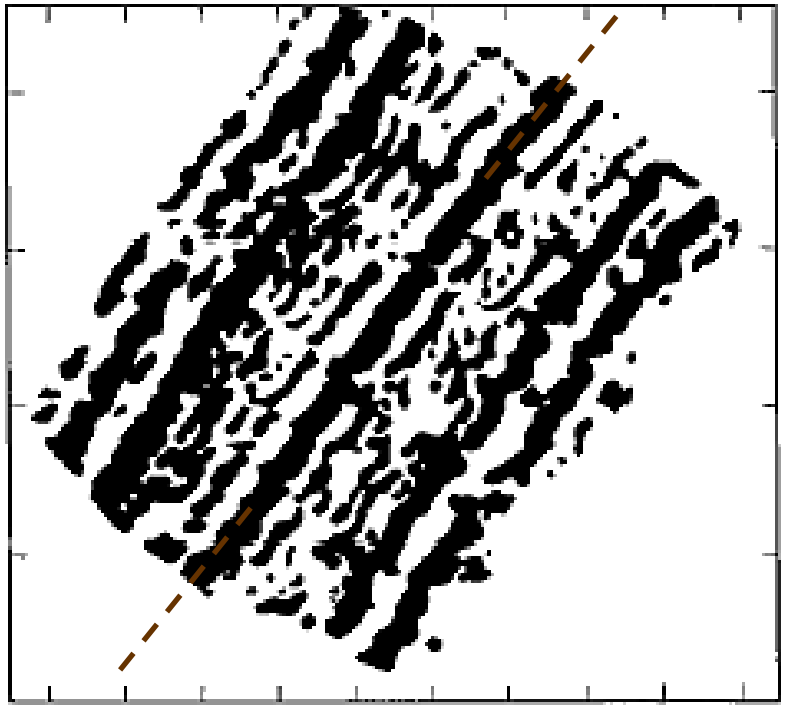
C.O. : Croûte océanique

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

# Les anomalies magnétiques des fonds océaniques




*Enregistrement magnétique des fonds océaniques*



*Vine & Matthews*

- Bandes d'anomalies **parallèles** et **symétriques** par rapport aux dorsales (*Qualitatif*)

- Que l'on peut corréler et dater grâce à l'**échelle magnétostratigraphique** de Bruhnes (*Quantitatif*)

**Vitesse d'expansion = x cm/an**

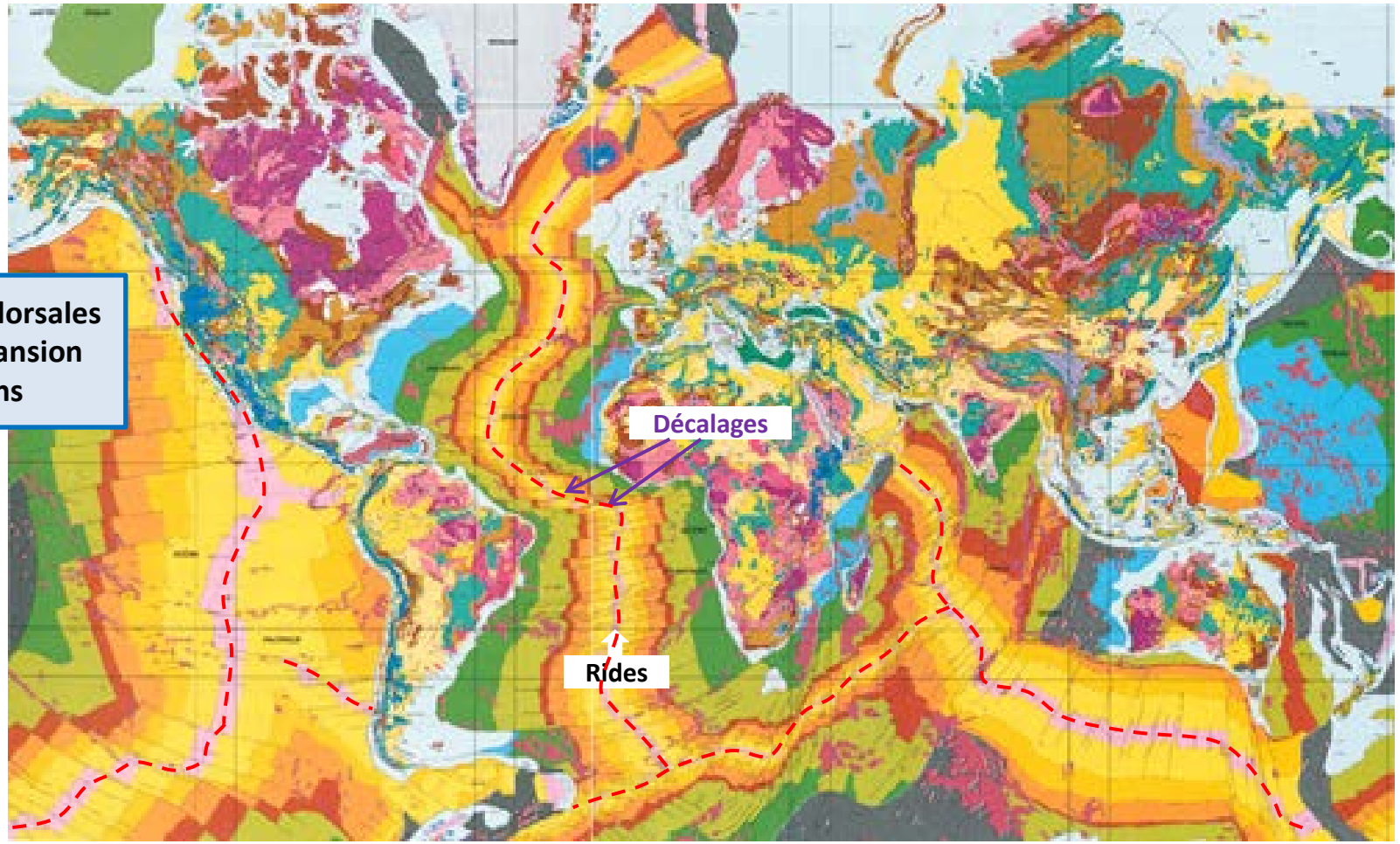
Une justification rigoureuse de la théorie de l'expansion des fonds océaniques de Hess

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

# Age et expansion des fonds océaniques

- Position des dorsales
- Vitesse d'expansion
- Age des océans



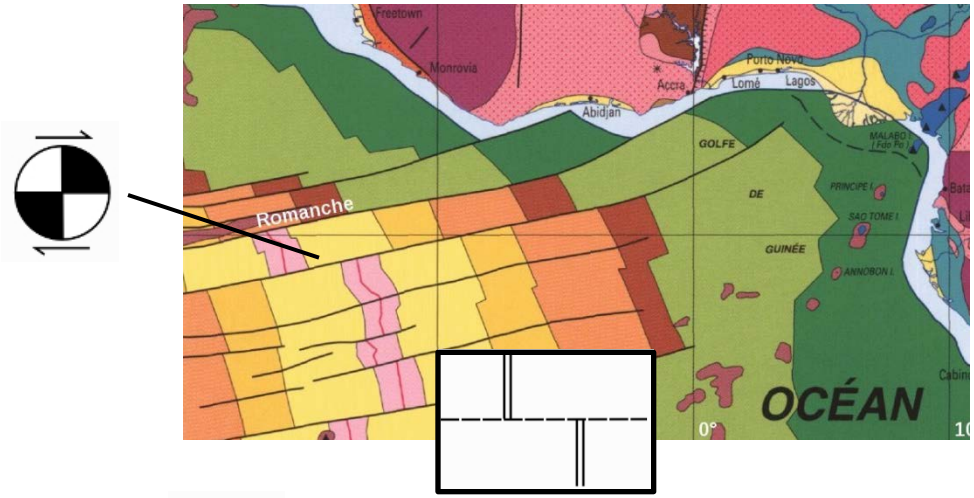

*Carte de l'âge des sédiments océaniques*

**Comment expliquer la discontinuité / les décalages horizontaux des linéations magnétiques ?**

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

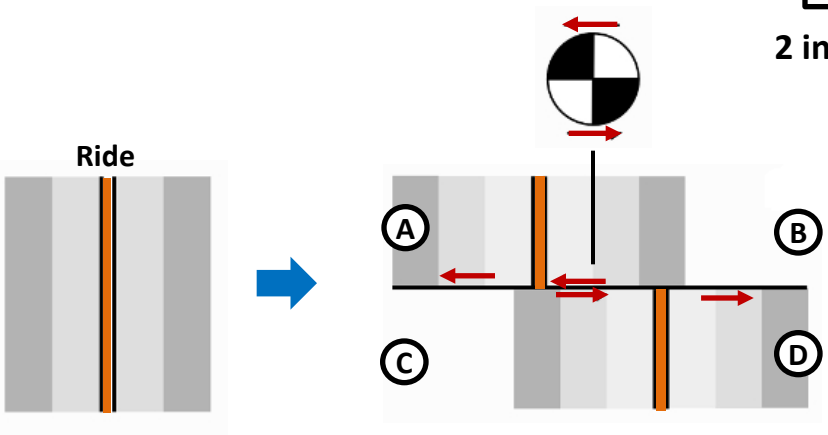
# Les anomalies magnétiques des fonds océaniques : les failles transformantes





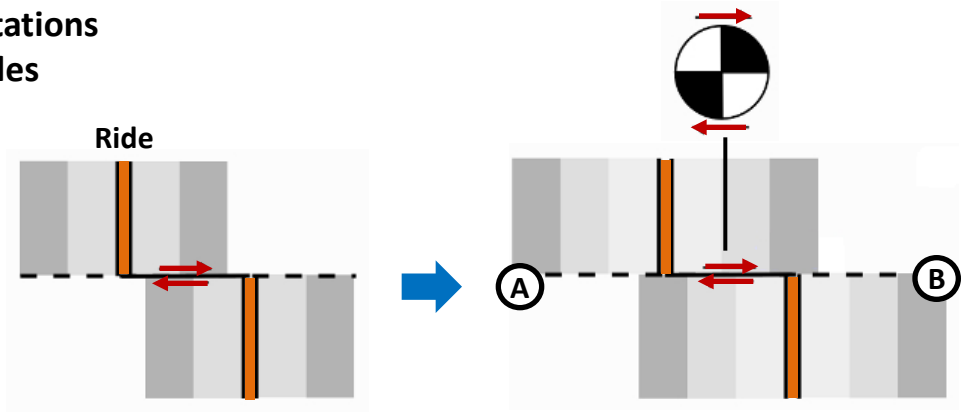

*Tuzo Wilson (1908-1993)*

**2 interprétations possibles**




- **Décrochement actif sur toute la longueur**
- **Délimite « 4 plaques »**

**Faille décrochante**




- **Décrochement actif entre les 2 rides**
- **Délimite « 2 plaques »**

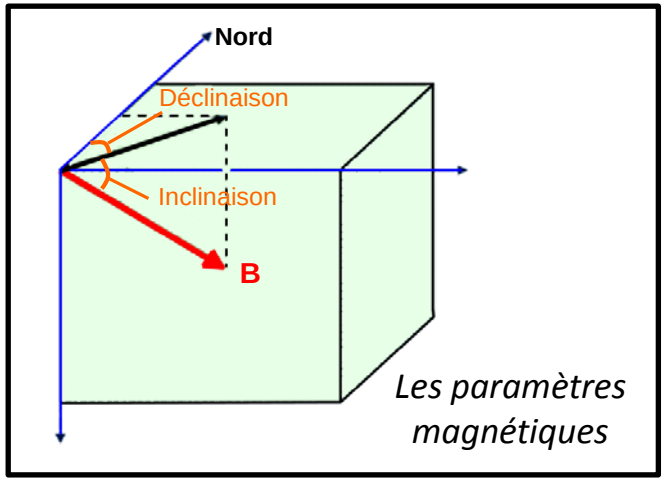
**Faille transformante**

La solution sismique (1966)

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

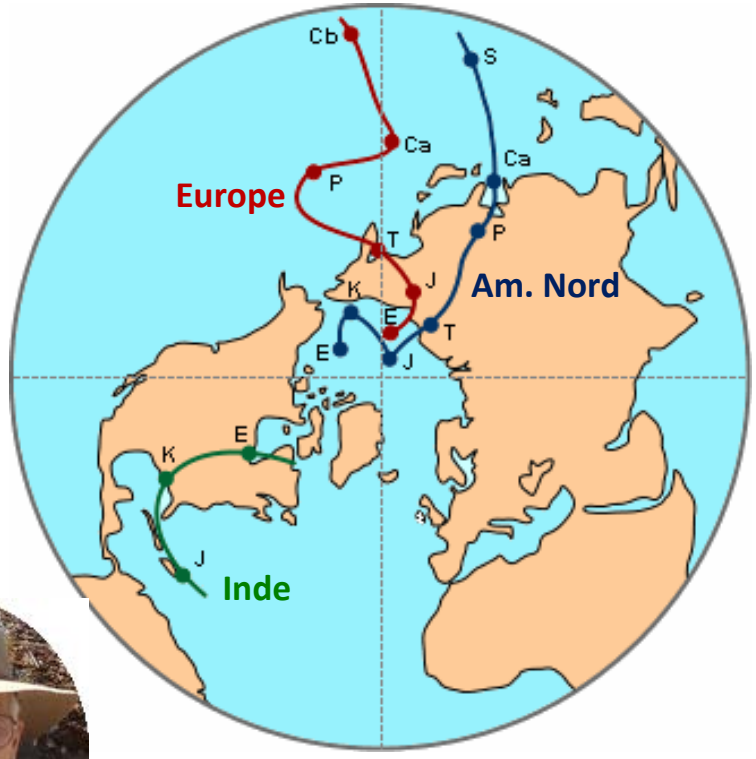
# Paléomagnétisme et position des continents (1954)



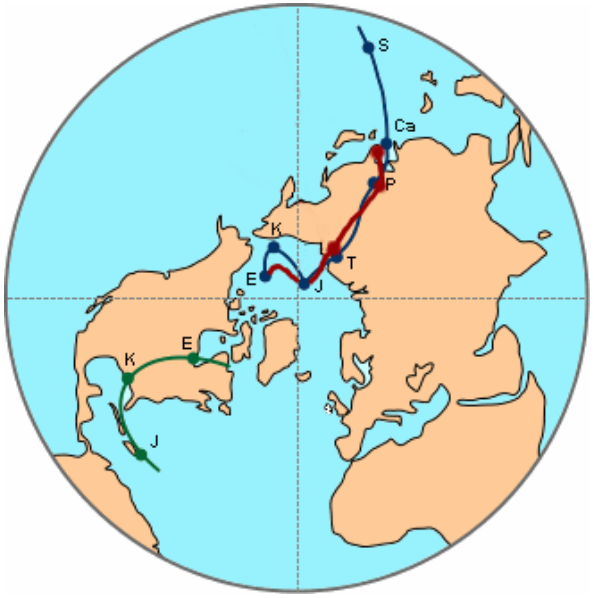

*Les paramètres magnétiques*

I = inclinaison du champ magnétique

λ = latitude




*Courbes de dérive apparente des pôles*




*En prenant en compte l'ouverture de l'Atlantique*



*Keith Runcorn (1922-1995)*



*Ted Irving (1927-2014)*

$$\tan(I) = 2\tan(\lambda)$$

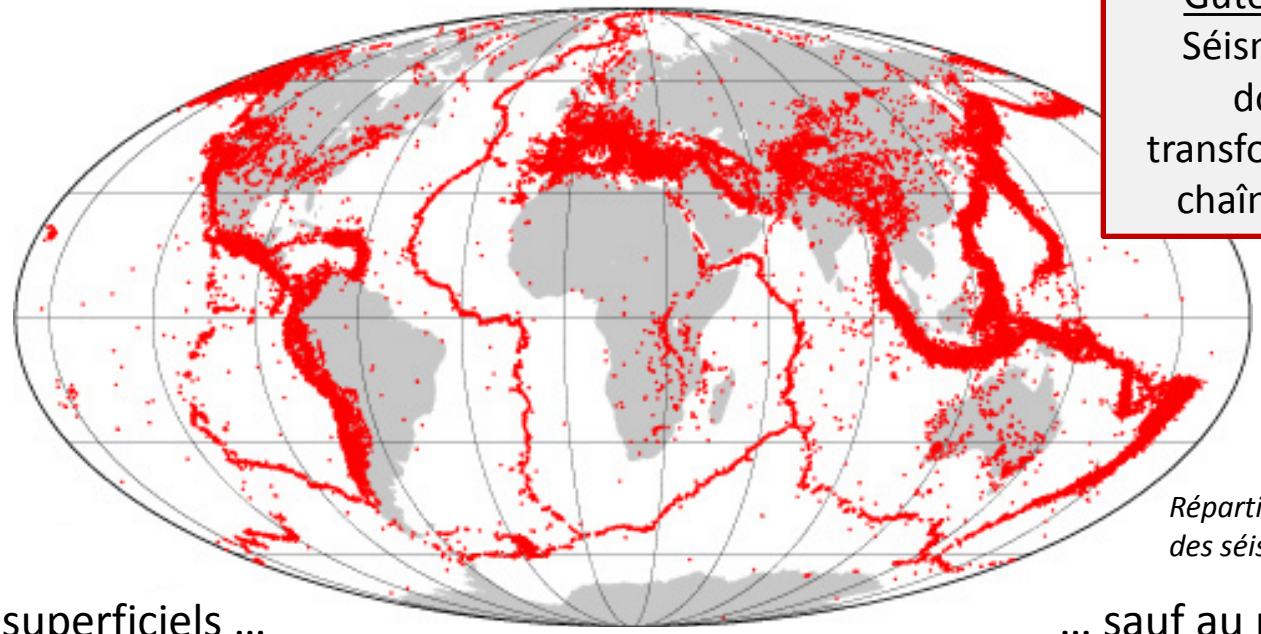
Indices paléomagnétiques de la dérive à la fois océanique et continentale

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

## La sismicité (1954)

Gutenberg et Richter
Séismes confinés aux dorsales, failles transformantes, fosses et chaîne montagneuses



*Répartition des séismes*

Séismes sont superficiels …

… sauf au niveau des fosses

Partie superficielle de la Terre = couche au comportement rigide et élastique… et cassant !



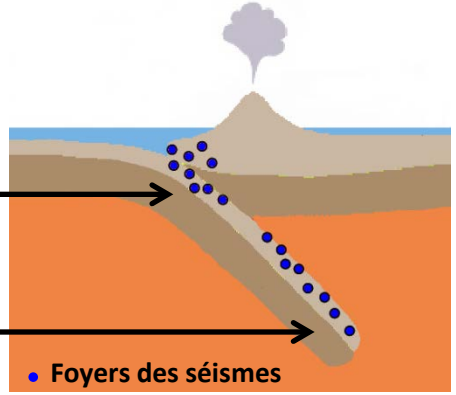
Kiyoo Wadachi
*(1902-1955)*



*Hygo Benioff*
*(1899-1968)*

**Matériau rigide enfoncé dans le manteau**

**Selon un plan incliné (1930-1955)**






*Jack Oliver*
*(1923-2011)*

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

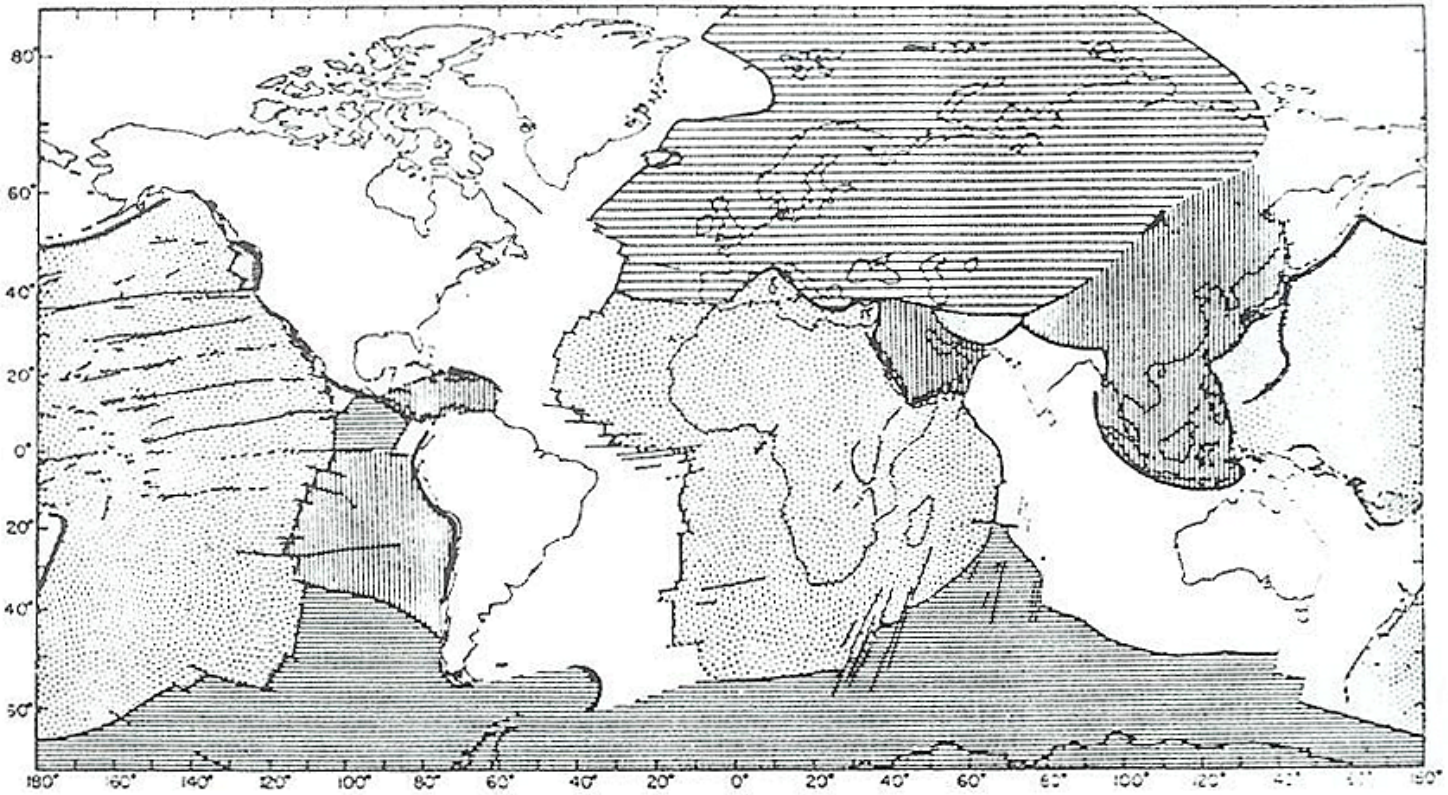
## Notion de plaque lithosphérique

Partie superficielle de la Terre = **lithosphère**
- Au comportement rigide
- Découpée en « blocs »
- Se déplaçant sur l'asthénosphère ductile

Les limites de ces plaques est marquée par une intense activité sismique et volcanique.



Jason Morgan
*(1935-2023)*



*Les « blocs » de Jason Morgan*

# II- La théorie de la tectonique des plaques

**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

**II- Tectonique des plaques**

# La théorie de la tectonique des plaques (1962-1970)

La **lithosphère** est découpée en plaques

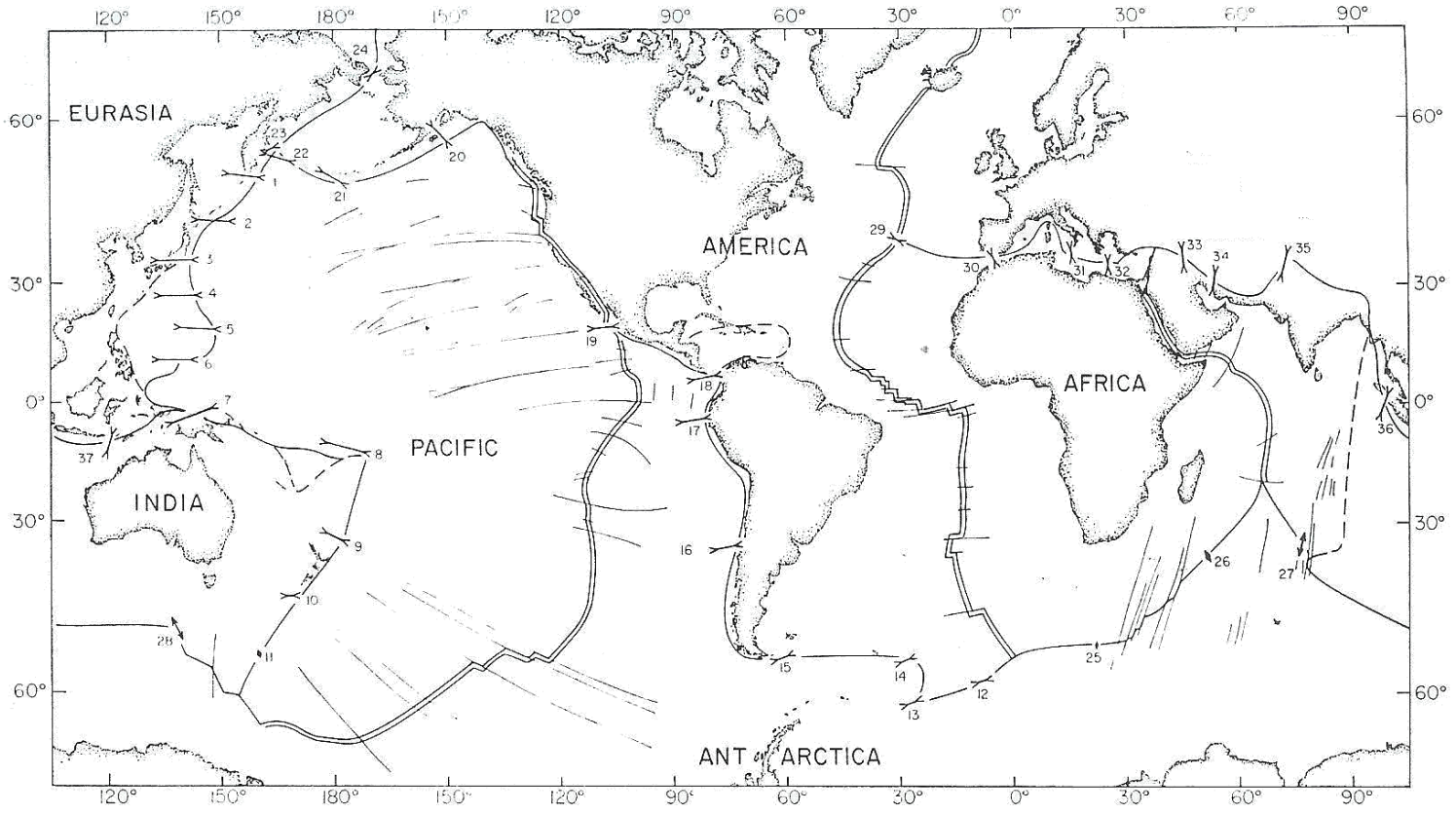
Chaque plaque se déplace par rotation autour d'un axe, appelé axe eulérien de rotation



Xavier Le Pichon
*(1937-2025)*



Dan Mc Kenzie
*(1942-)*




*Les 6 plaques de Le Pichon (1968)*

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

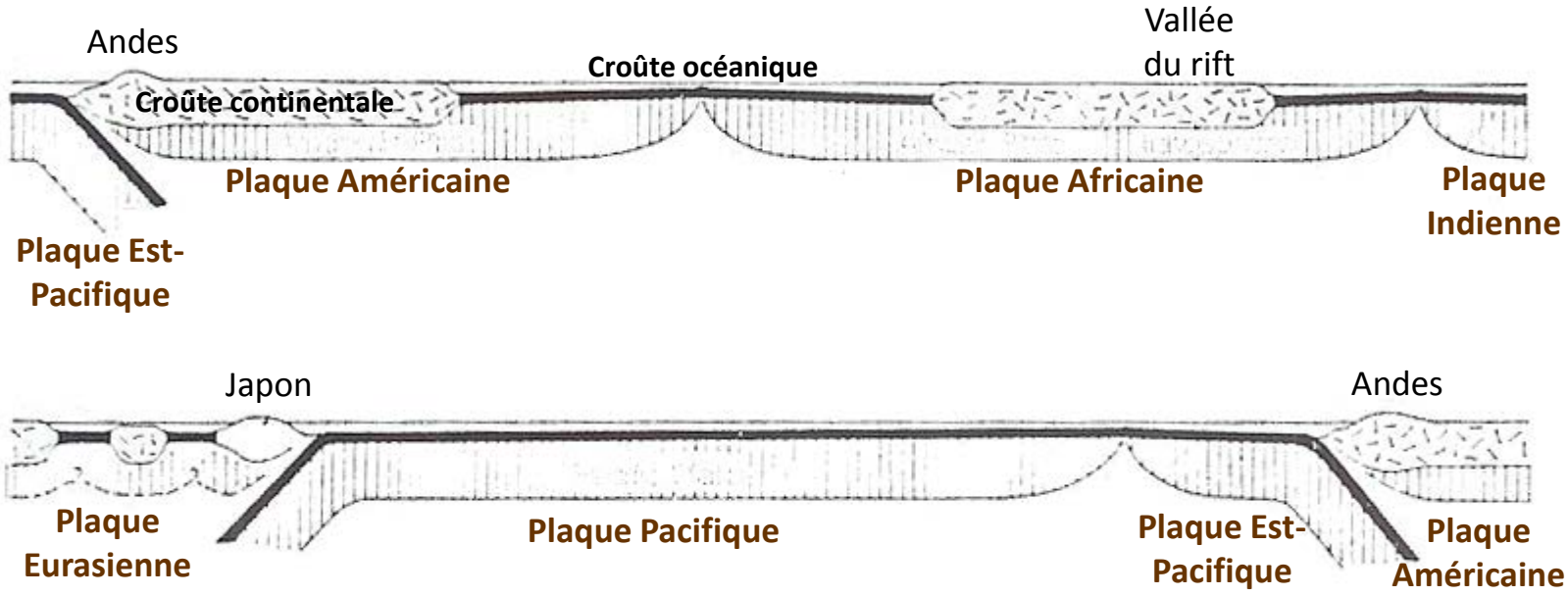
# Réinterpréter les structures géologiques du globe dans le cadre de la tectonique des plaques.



John Dewey
*(1937-)*



John Bird
*(1931-2017)*




*Classification des formations géologiques de Dewey et Bird*

Tectonique des plaques = cadre unificateur de l'ensemble des structures géologiques

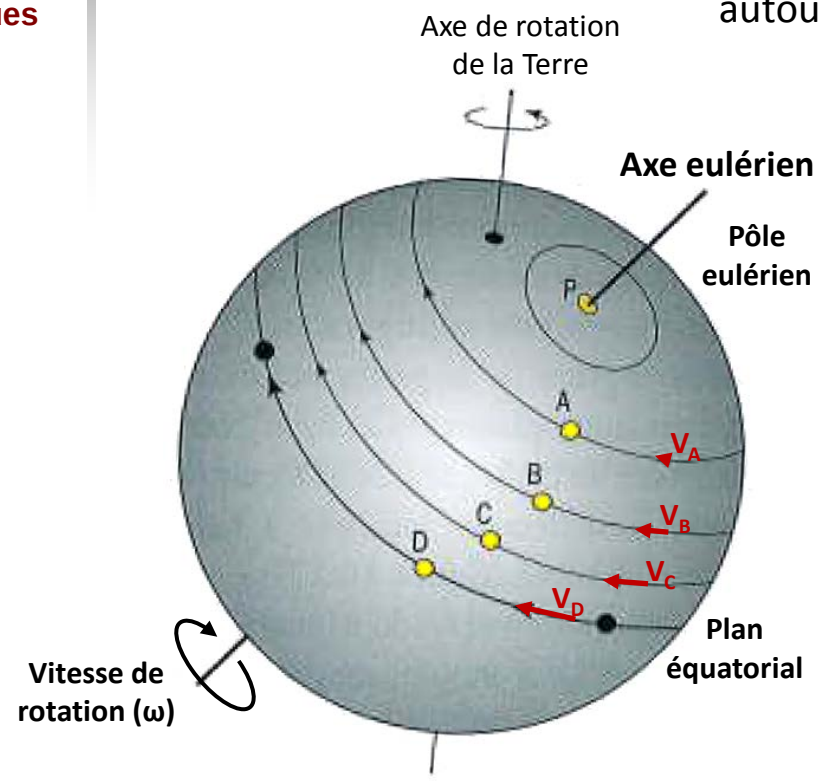
Introduction

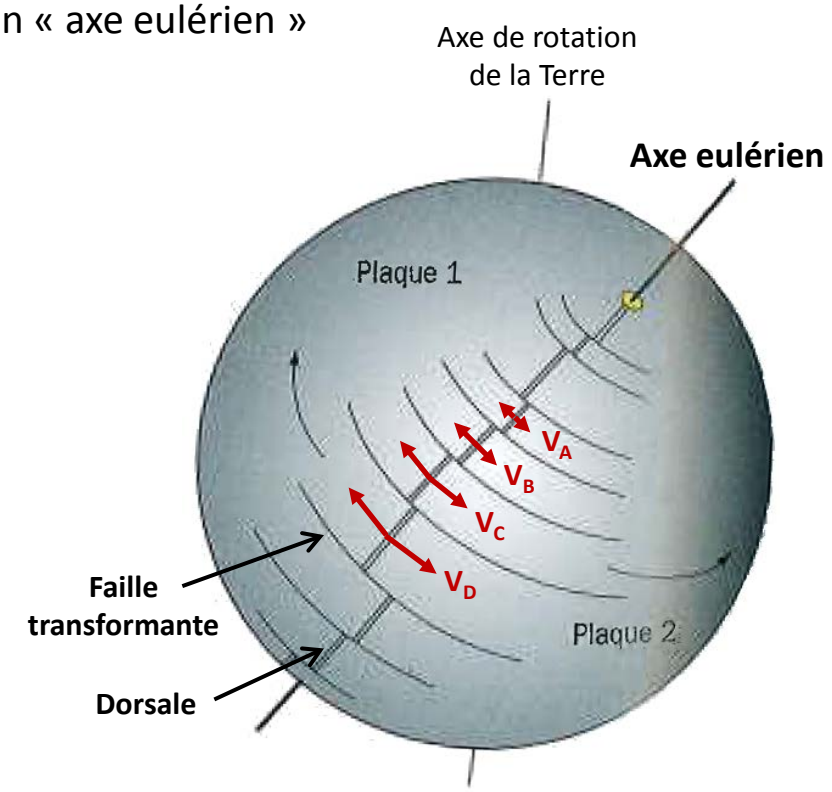
I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Le modèle

Mouvement en arc de cercle autour d'un « axe eulérien »




Tous les points d'une plaque se déplacent à la même vitesse angulaire (ω)

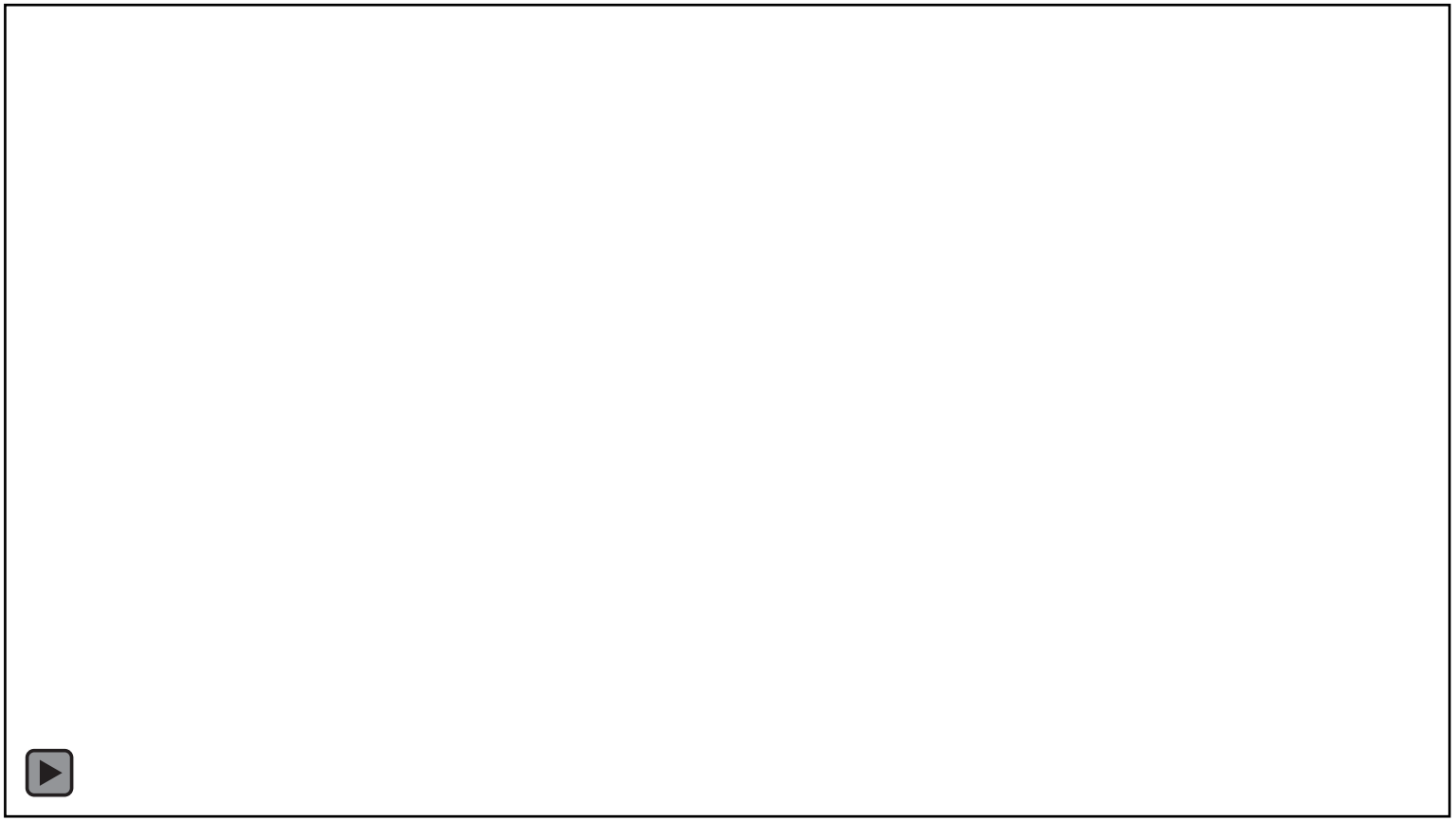
La vitesse linéaire des points dépend de la distance angulaire (θ) au pôle de rotation : $V = \omega.R.\sin(\theta)$

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Le modèle

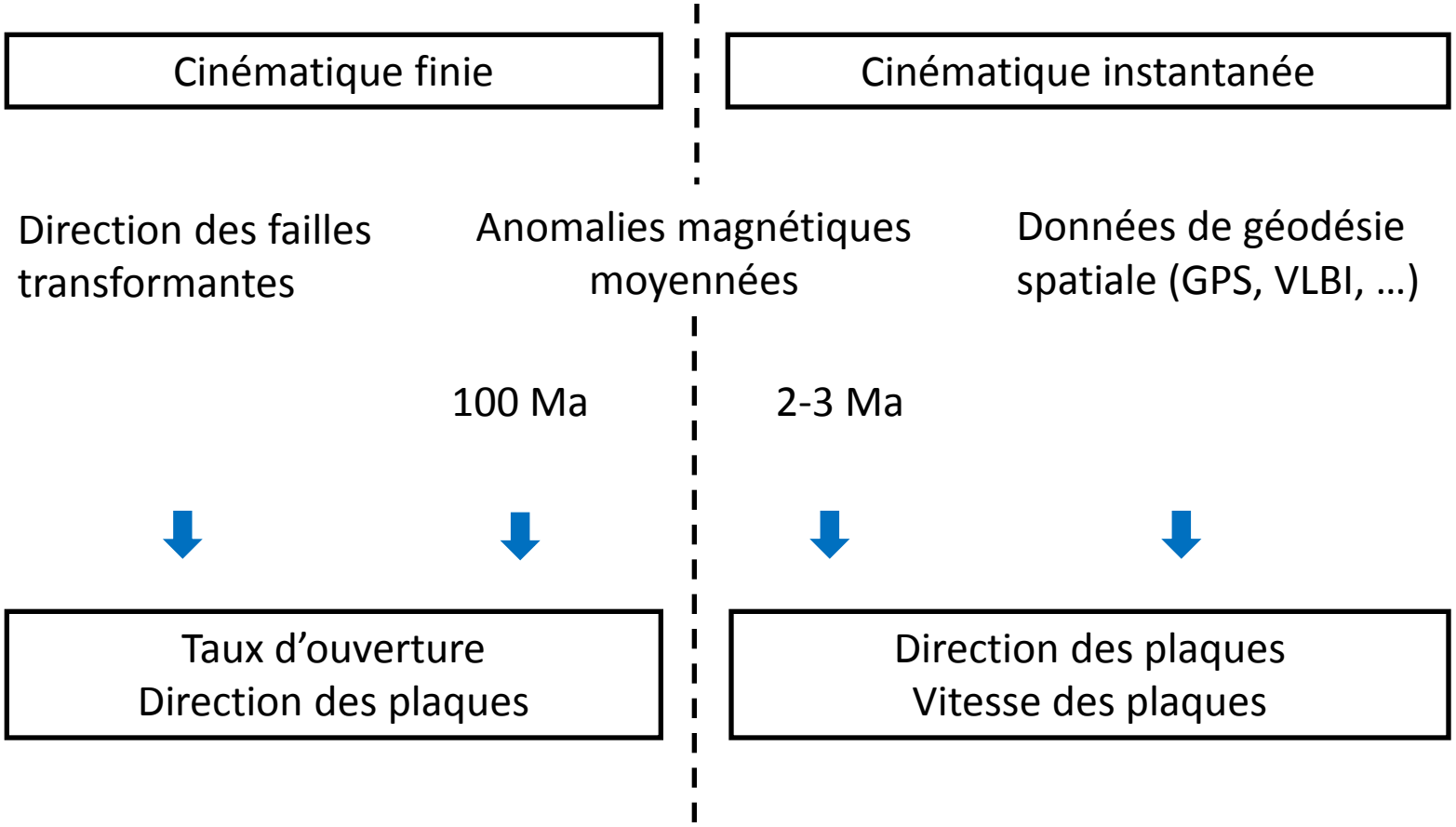


Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

## Comment estimer le mouvement des plaques ?




Techniques complémentaires et résultats concordants

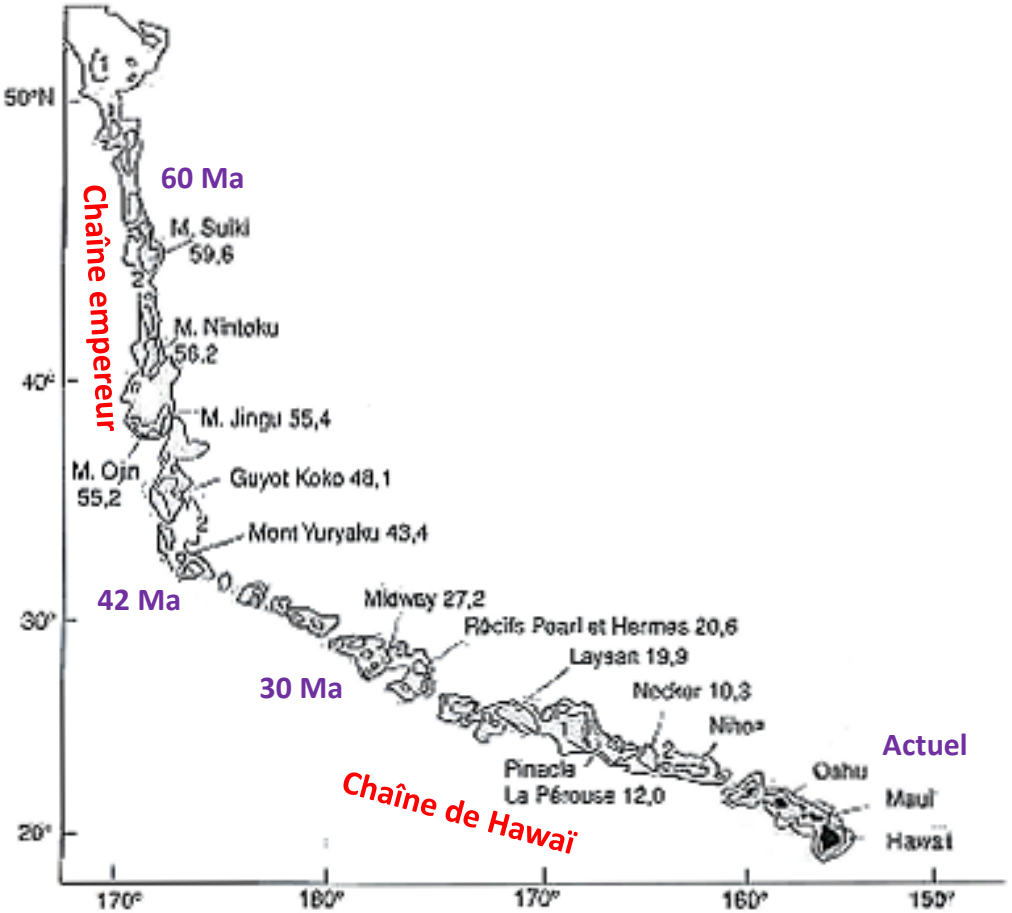
**Introduction**

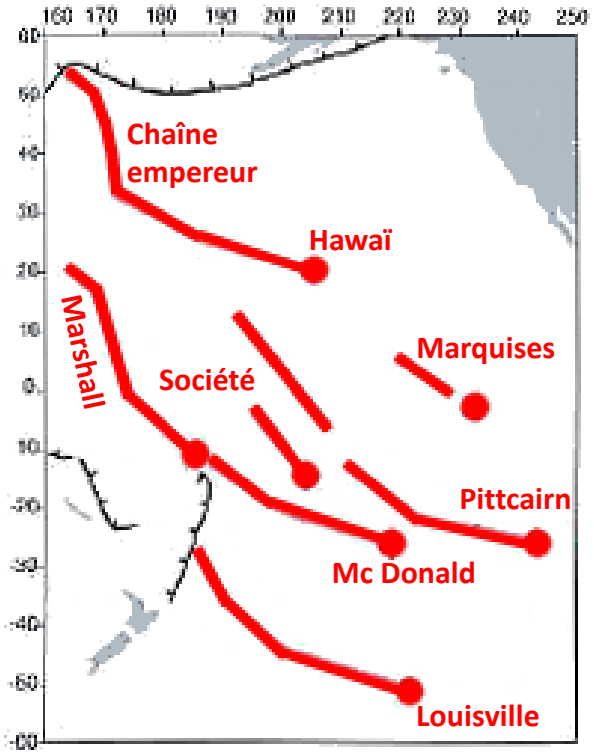
**I- Du fixisme au mobilisme**

**II- Tectonique des plaques**

# Comment estimer le mouvement des plaques ?

Cinématique absolue des plaques




*Carte des points chauds actifs du Pacifique*

**En considérant que les points chauds sont « fixes » dans le référentiel géocentrique**

*Pomerol 13ème éd fig 6,9*

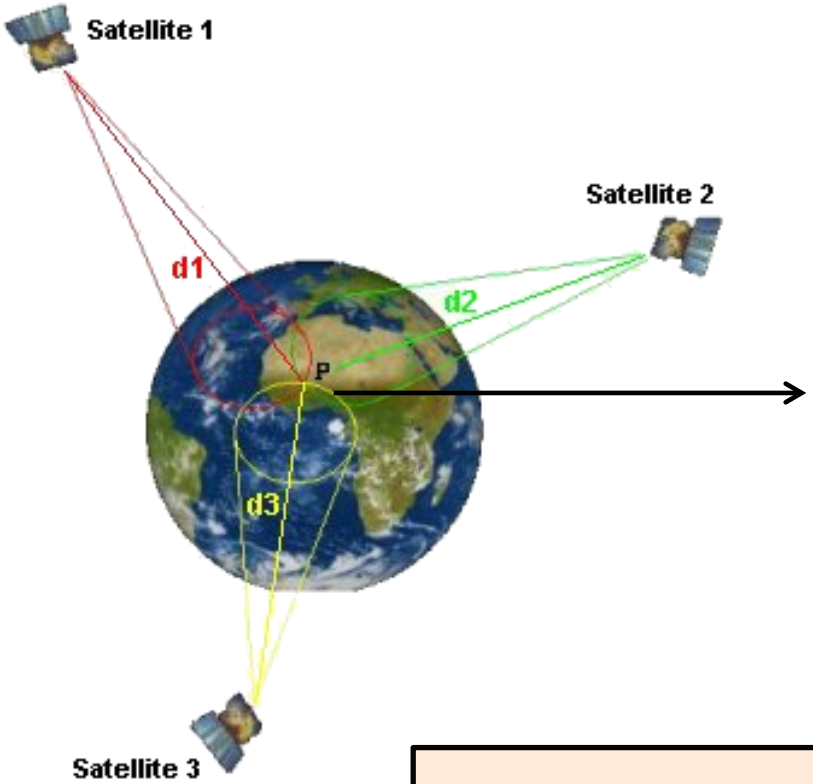
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Comment estimer le mouvement des plaques ?

## La méthode GPS




**1. Emission d'ondes par les satellites**

**2. Réception de plusieurs ondes simultanément par un récepteur**

**Point P = repère géodésique = récepteur**



**3. Décodage des signaux, évaluation de la distance et déduction de la position du récepteur dans un référentiel géodésique**

**Minimum de 3 satellites pour une position 2D et 4 satellites pour une position 3D (avec altitude)**

**Très grande précision**

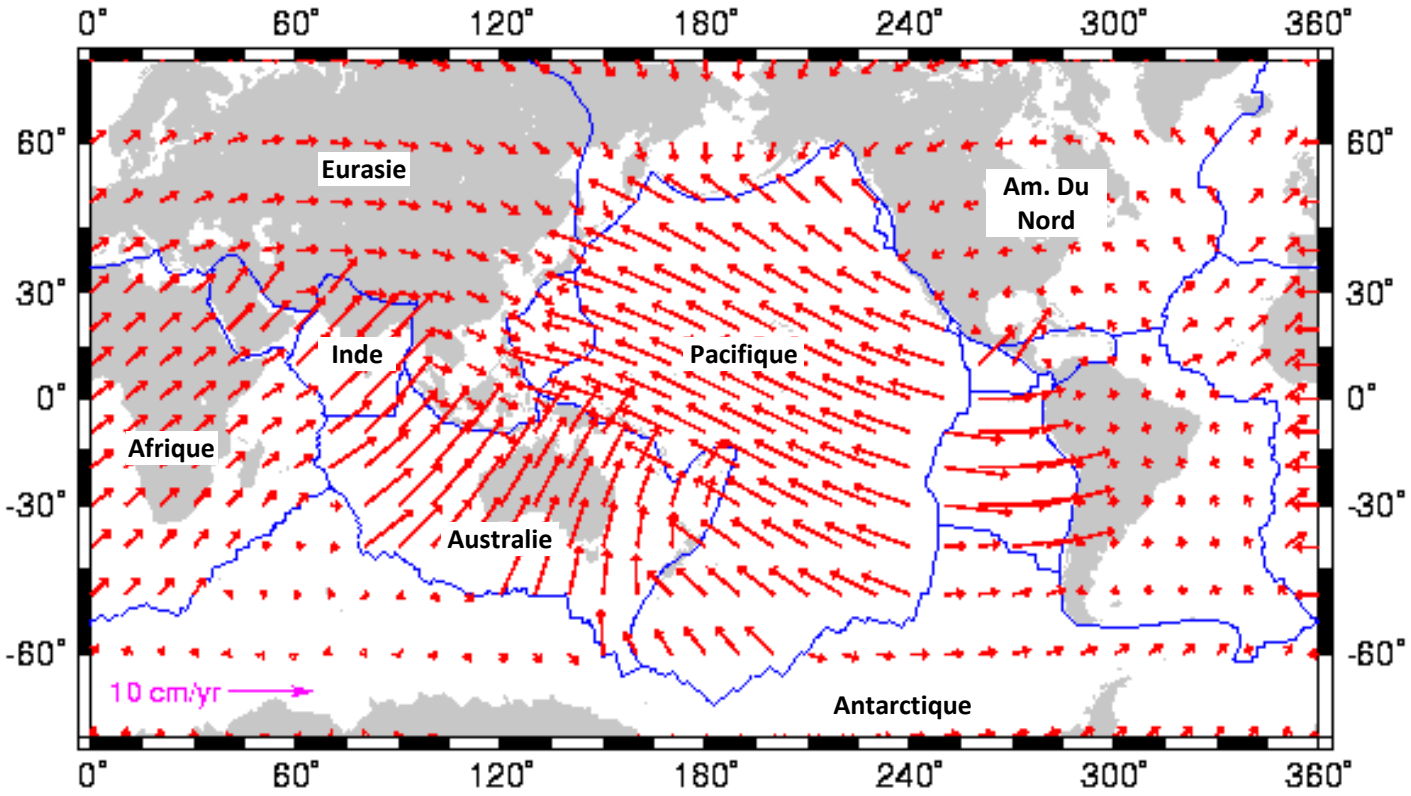
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Le modèle actuel

Cinématique absolue des plaques




*Modèle NNR- NUVEL-1 (Argus et Gordon,1991) – moyenne sur 3 Ma*

Frontière de plaque

Vecteur déplacement

**16 plaques rigides**

**Référentiel terrestre : points chauds ou minimisation**

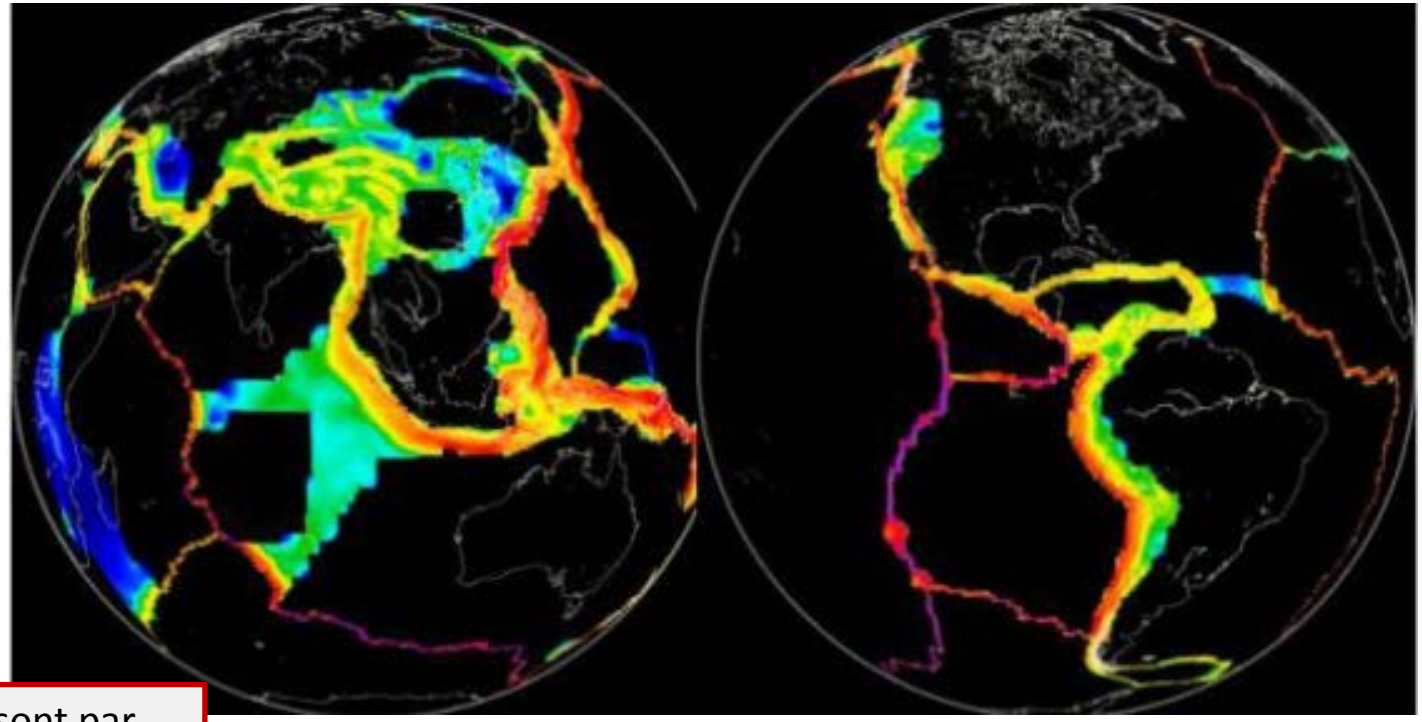
**Introduction**

**I- Du fixisme au mobilisme**

**II- Tectonique des plaques**

## Le modèle actuel

- Via les données magnétiques ….
- Sur environ 100 Ma …
- Mais en prenant en compte la déformation interne des frontières de plaques



*(Kreemer et al., 2003)*

Les plaques ne sont par parfaitement indéformables

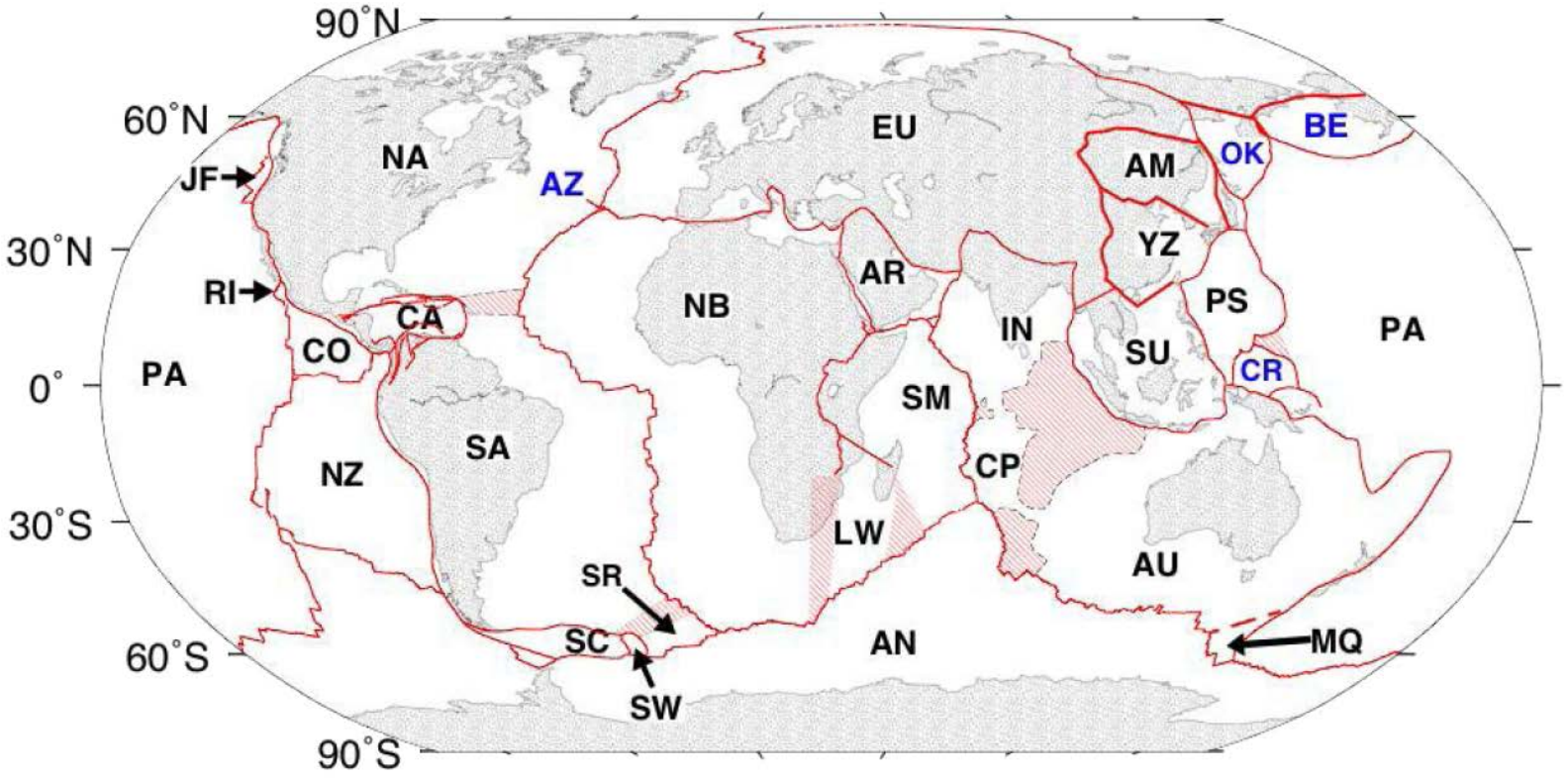
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Le modèle actuel

Le dernier modèle de cinématique des plaques …




*Modèle MORVEL (Demets et al., 2010)*

**25 plaques tectoniques**

Frontière de plaque

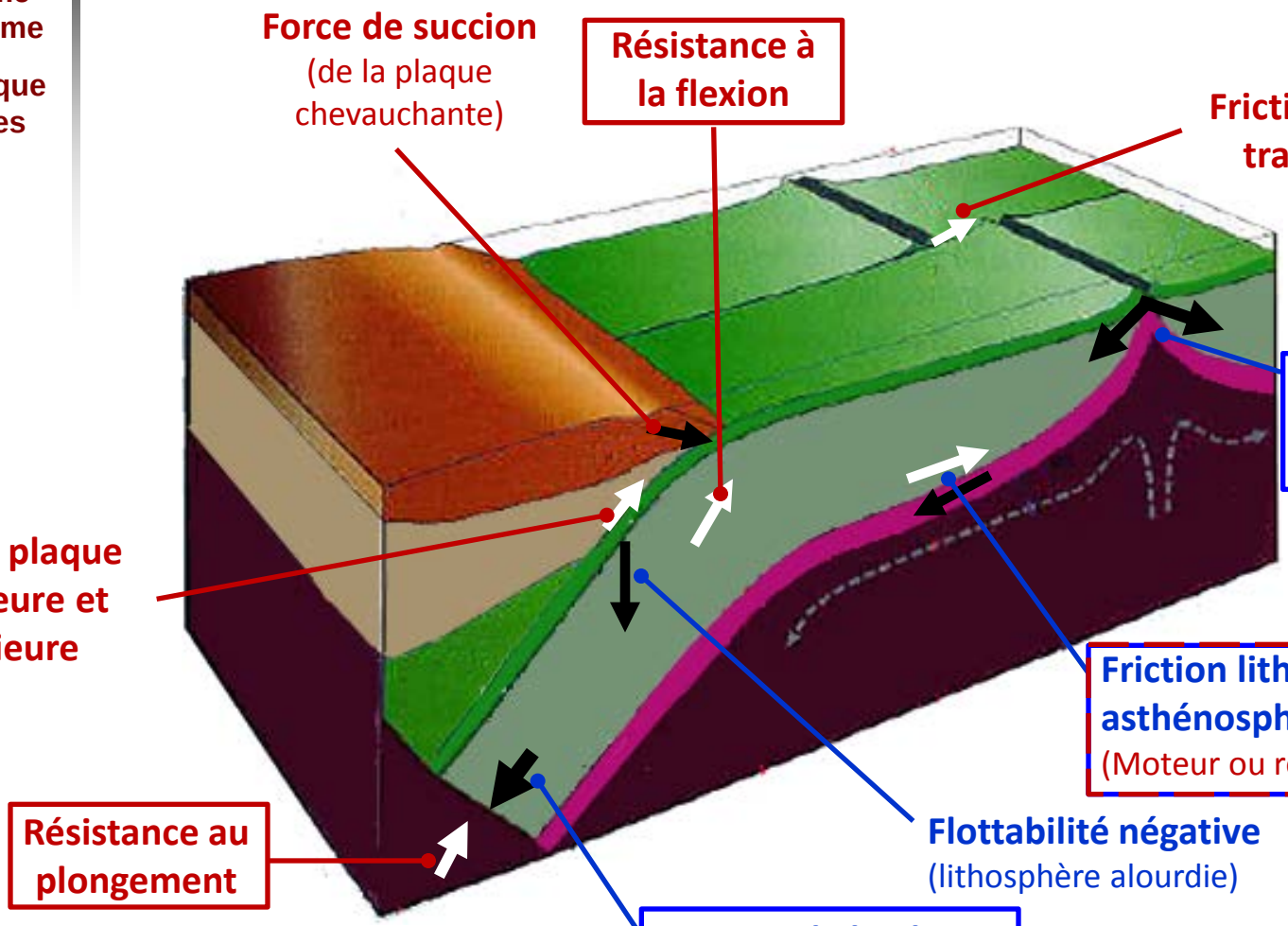
Frontière diffuse

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Bilan de force sur les plaques lithosphériques




*Forces agissant sur une plaque (simplifié d'après Robert)*

*D'après Robert, 2013*

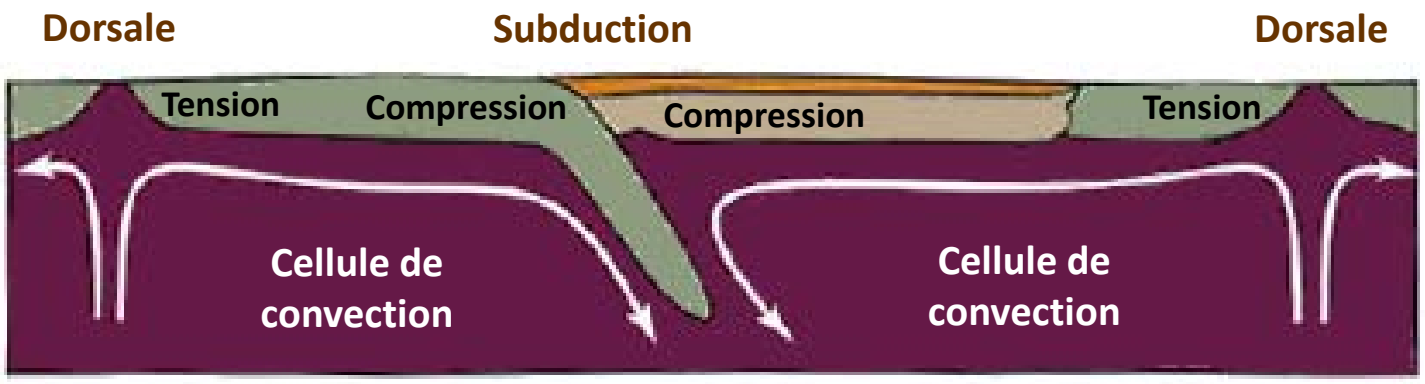
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

## Quel est le moteur principal ?

Hyp 1 : La dynamique mantellique




*D'après Robert, 2013*

**Entraînement visqueux à la base de la lithosphère → Couplage Asthénosphère - Lithosphère**

**Grandes cellules de convection couplées aux dorsales et aux fosses**

Limites :

- Lithosphère-Asthénosphère : zone de découplage partiel rigide/ductile, présence de la LVZ
- Géométrie des cellules de convections et failles transformantes ? Et points triples ?
- Quid des petites plaques ?

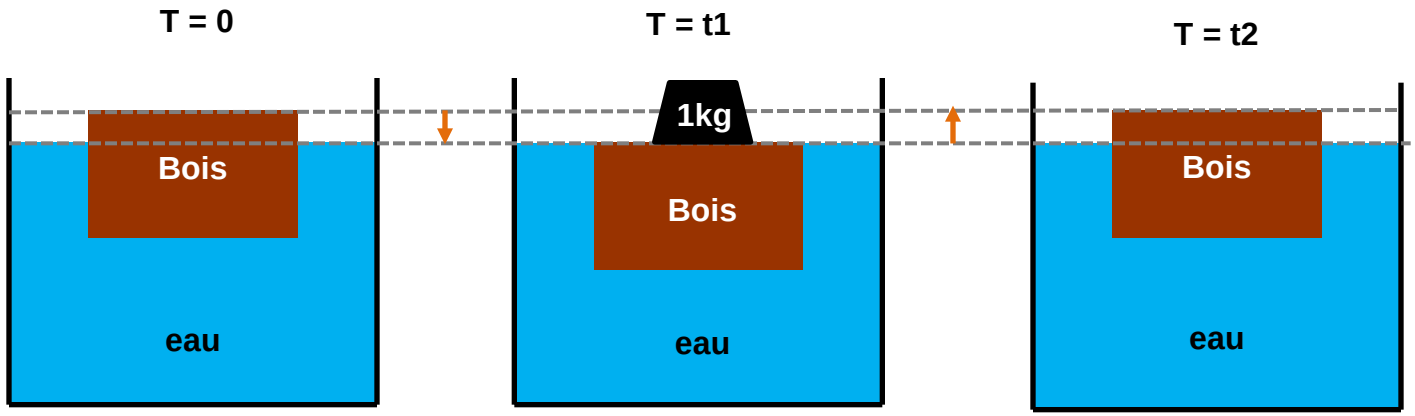
Introduction

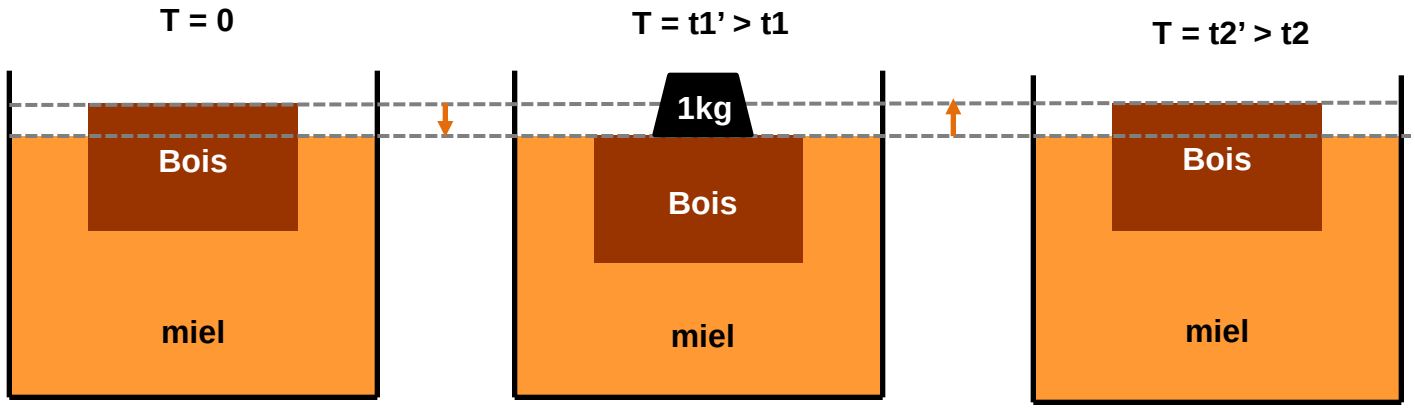
I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Appendice : la viscosité du manteau

## *Modèle analogique*




$Viscosité_{miel} > Viscosité_{eau}$

**La vitesse à laquelle l'équilibre est atteint dépend de la viscosité du fluide**

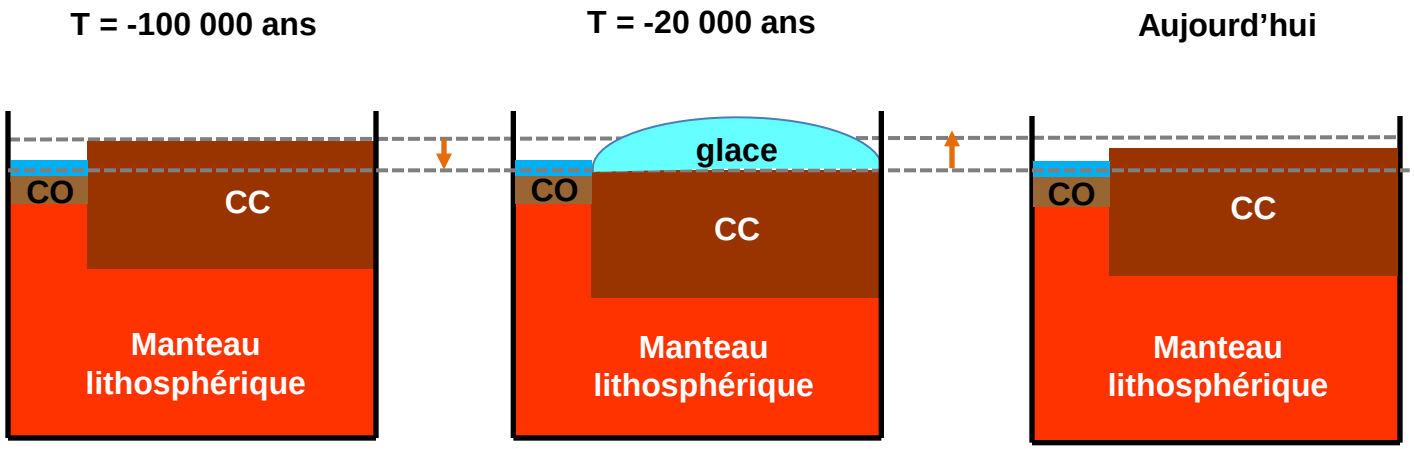
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

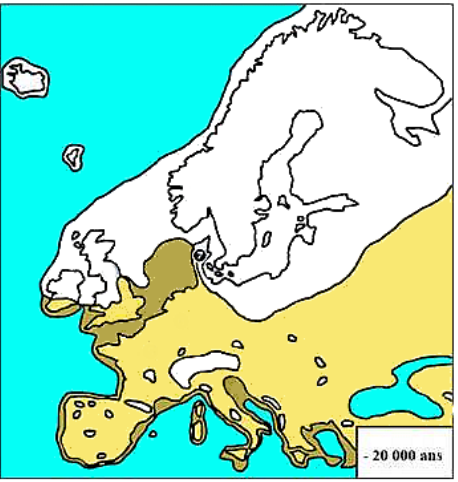
# Appendice : la viscosité du manteau

## *Le rebond post-glaciaire scandinave*




**CC : Croûte continentale**

**CO : Croûte océanique**




*Le bouclier scandinave lors du dernier maximum glaciaire*

**Viscosité du manteau : $\eta = 10^{21}$ Pa.s**

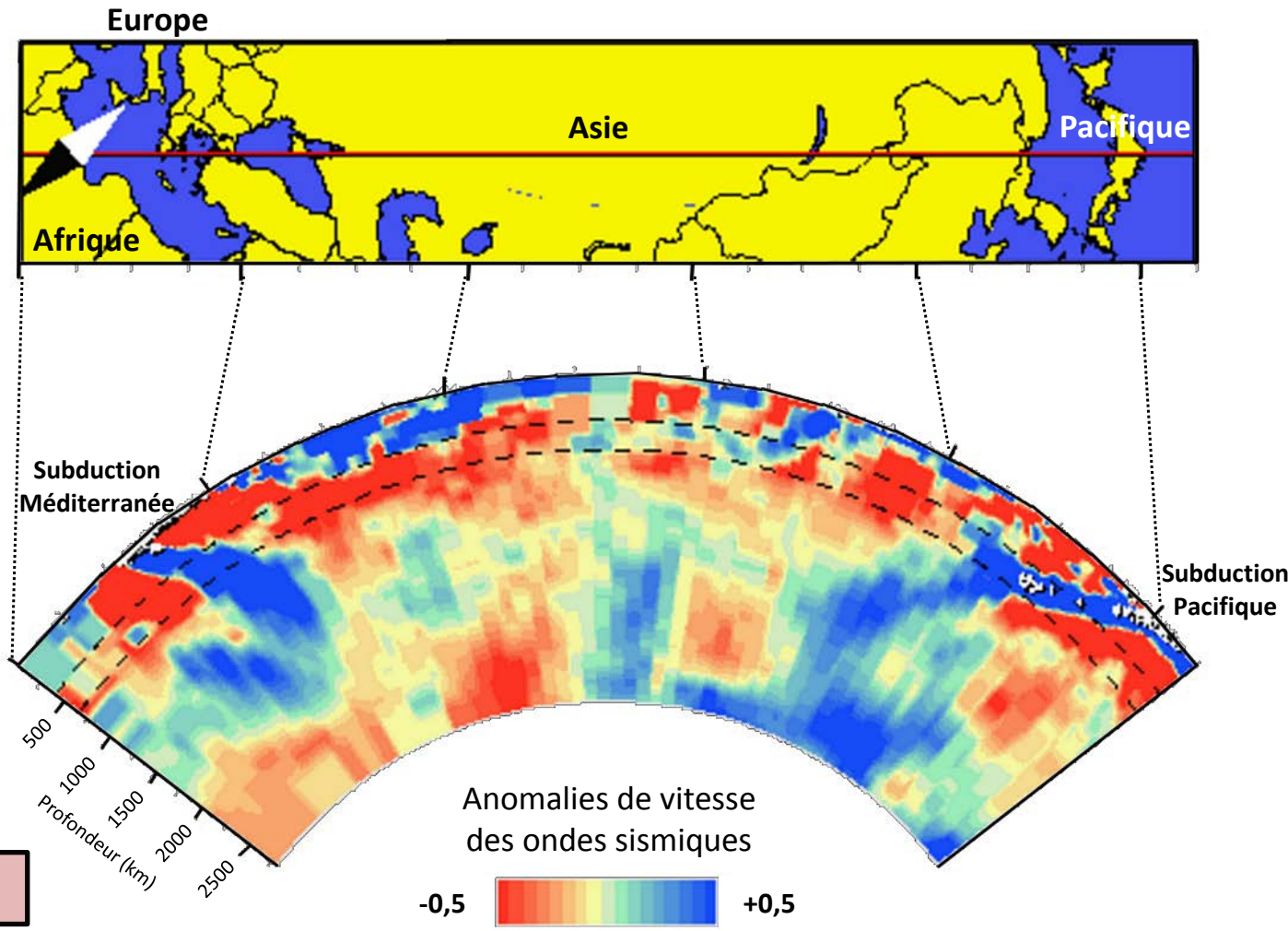
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Des hétérogénéités de température dans le manteau

**Une cartographie des anomalies* de vitesse au sein du globe**




*Profil de tomographie sismique entre l'Europe orientale et l'Asie*

**Anomalie - → Plus chaud**

**Anomalie + → Plus froid**

* Anomalies par rapport au modèle PREM

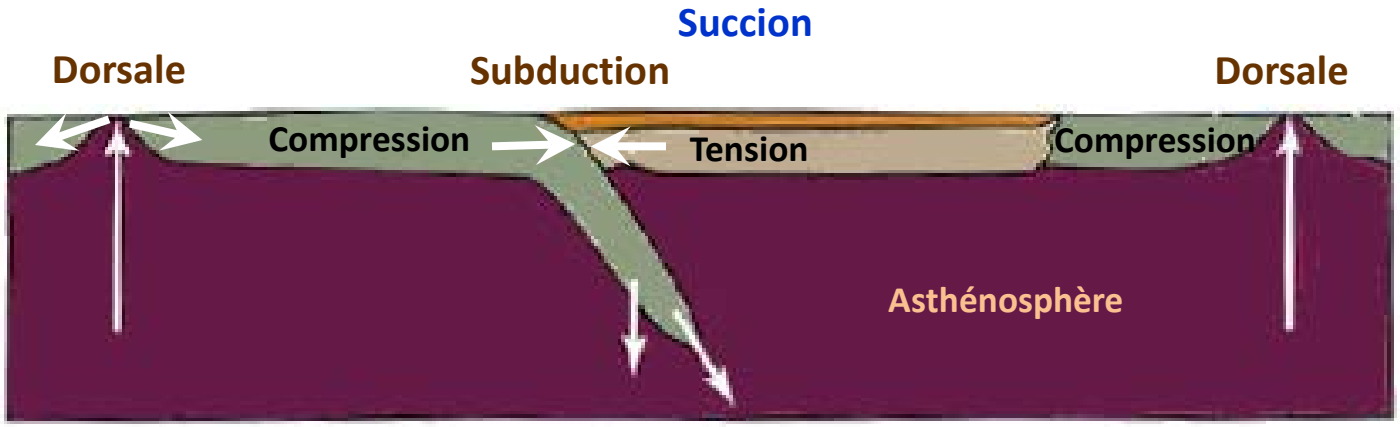
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Quel est le moteur principal ?

Hyp 2 : Les forces aux limites (de plaques)




*D'après Robert, 2013*

**Poussée à la ride**

→ **Favorise l'expansion**

<

**Traction du panneau plongeant**

→ **Favorise le plongement**

**Poussée à la ride**

Pb : séismes de type normal

- Déplacement plus rapide des plaques avec panneau plongeant
- Panneaux plongeant retrouvés en profondeur par la tomographie sismique
- Différence d'un ordre de grandeur

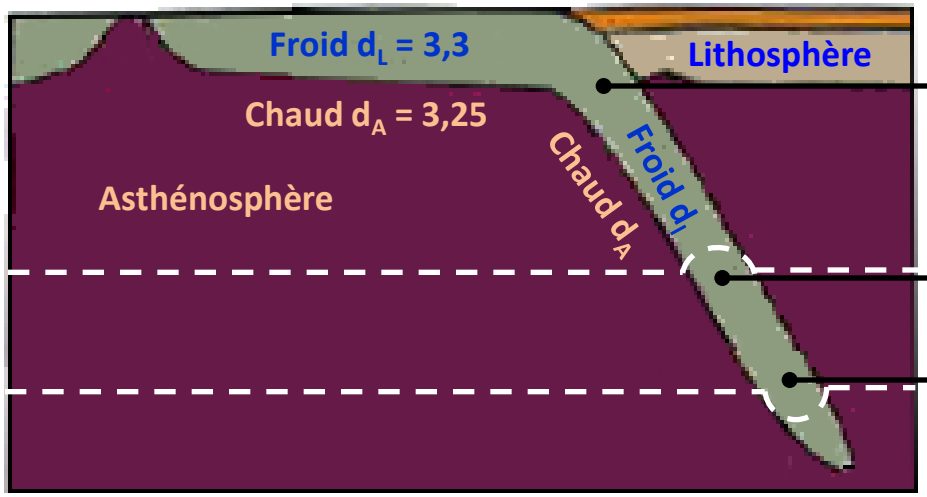
**La traction de la plaque au niveau des zones de subduction est le moteur principal du déplacement des plaques lithosphériques**

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# La traction du slab, comment ça marche ?




*D'après Robert, 2013*

Métamorphisme HP - BT

**Formation éclogites, schistes bleus (plus dense)**

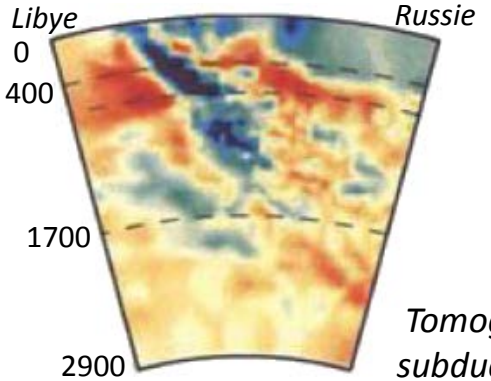
Transitions de phase

**Exothermique : accélération transition olivine α → β → γ**

**Endothermique : ralentissement transition Ol γ → bridgmanite**

- Hyp 1 : Origine thermique : Absence d'équilibre thermique entre la lithosphère et l'asthénosphère

**Toujours $d_L > d_A$**




*Tomographie sismique de la subduction méditerranéenne*

- Hyp 2 : Transitions de phase minéralogiques et métamorphisme

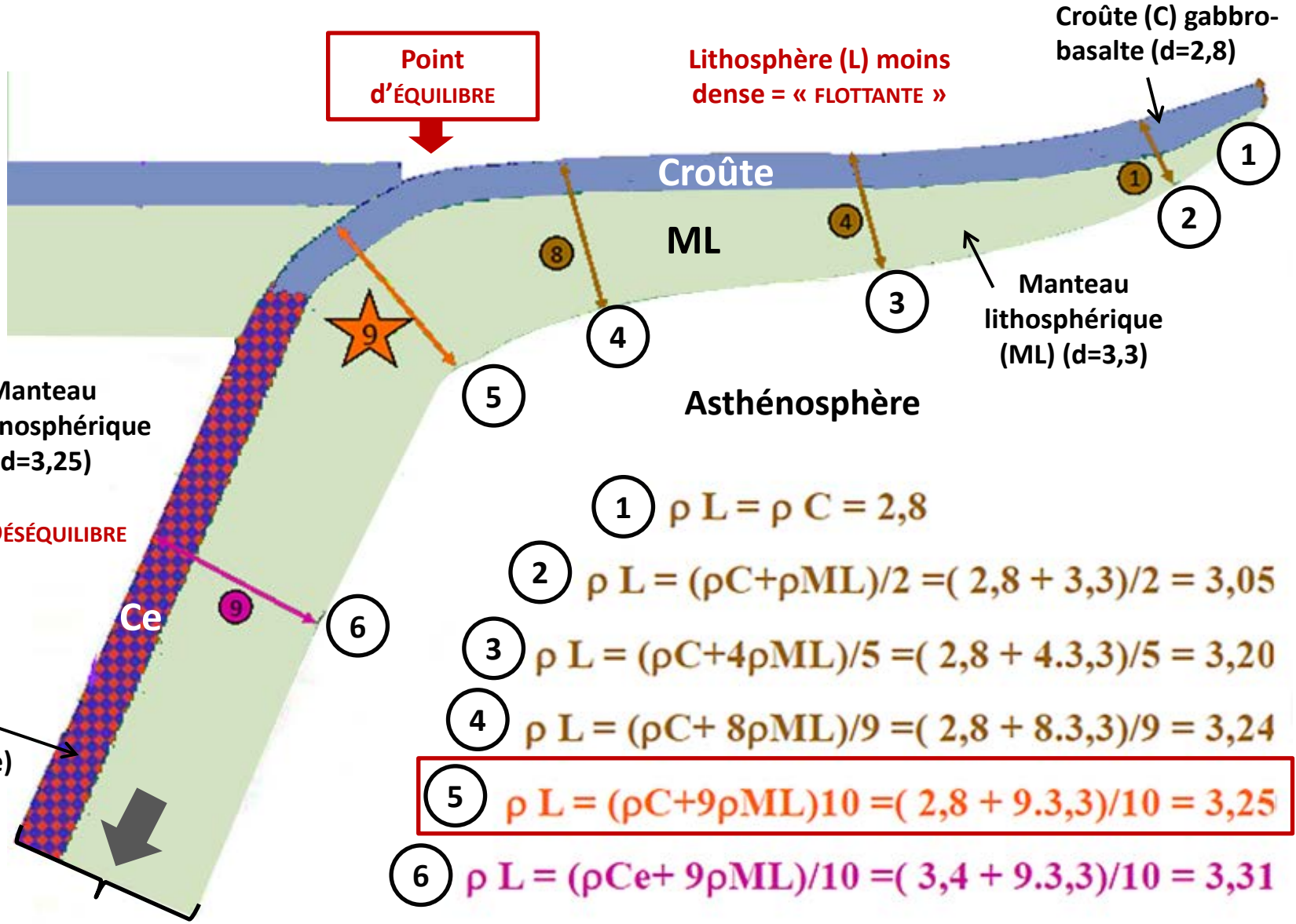
**En exagérant un peu : c'est la mobilité verticale de la lithosphère (et donc la gravité) qui est à l'origine du mouvement horizontal des plaques lithosphériques**

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Epaississement lithosphérique et équilibre isostatique




1 $\rho L = \rho C = 2,8$

2 $\rho L = (\rho C+\rho ML)/2 =( 2,8 + 3,3)/2 = 3,05$

3 $\rho L = (\rho C+4\rho ML)/5 =( 2,8 + 4.3,3)/5 = 3,20$

4 $\rho L = (\rho C+ 8\rho ML)/9 =( 2,8 + 8.3,3)/9 = 3,24$

5 $\rho L = (\rho C+9\rho ML)10 =( 2,8 + 9.3,3)/10 = 3,25$

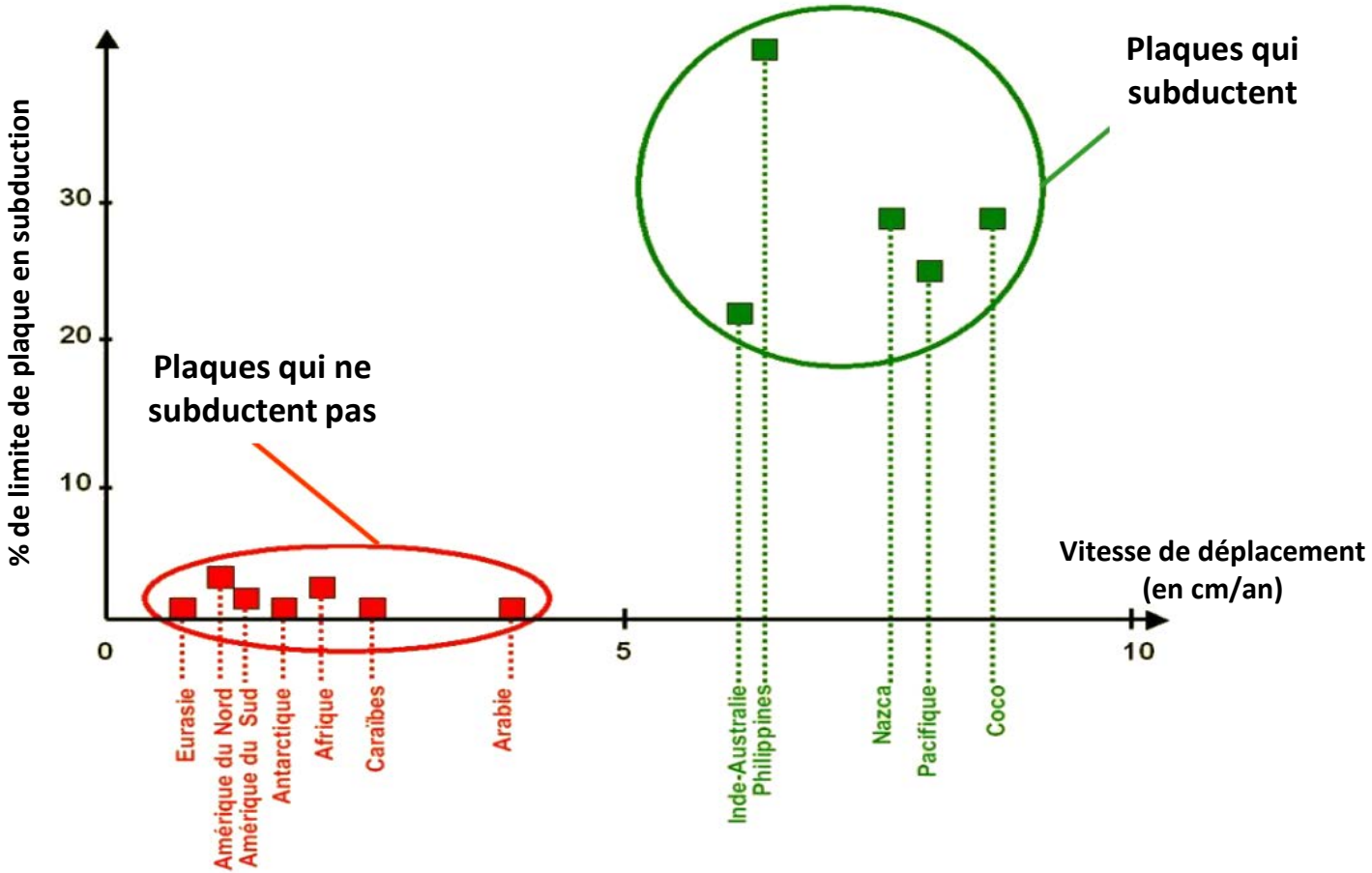
6 $\rho L = (\rho Ce+ 9\rho ML)/10 =( 3,4 + 9.3,3)/10 = 3,31$

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Plaques rapides et plaques lentes




**Les plaques qui subductent se déplacent plus rapidement que les plaques qui ne subductent pas.**

Introduction

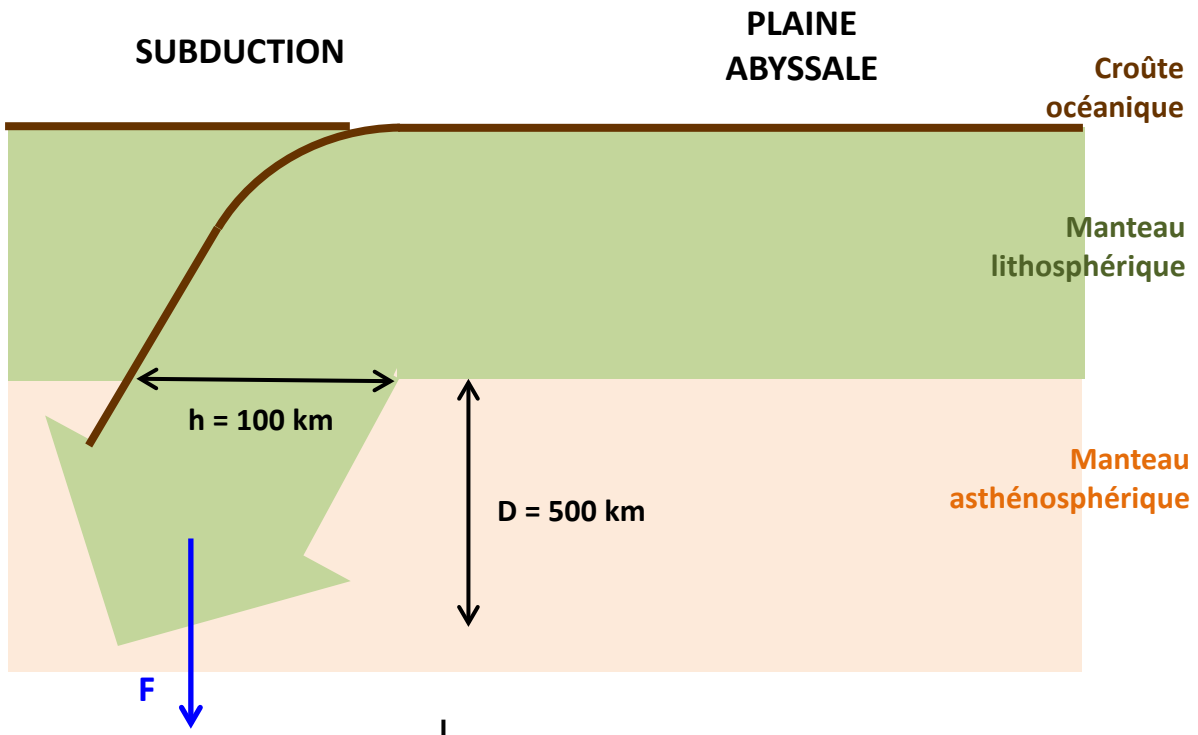
I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Calcul de la traction au niveau d'une subduction

h = 100 km est sous-estimée par rapport à la réalité (épaississement lithosphérique par refroidissement)

D est sous-estimé par rapport à la réalité, plaque pouvant plonger plus profondément




**F : force qui s'applique sur la lithosphère**

**F = Poids – Poussée Archimède**

$F = m_{lithosphère} \cdot g - m_{asthénosphère} \cdot g = m_{lithosphère} - m_{asthénosphère} \cdot g$

$m = \rho \cdot V$

$V \rightarrow D \times h$ pour la lithosphère et l'asthénosphère

$\rho_{lithosphère} - \rho_{asthénosphère} = 0,05$

$F = D \cdot h \cdot 0,05 \cdot g$

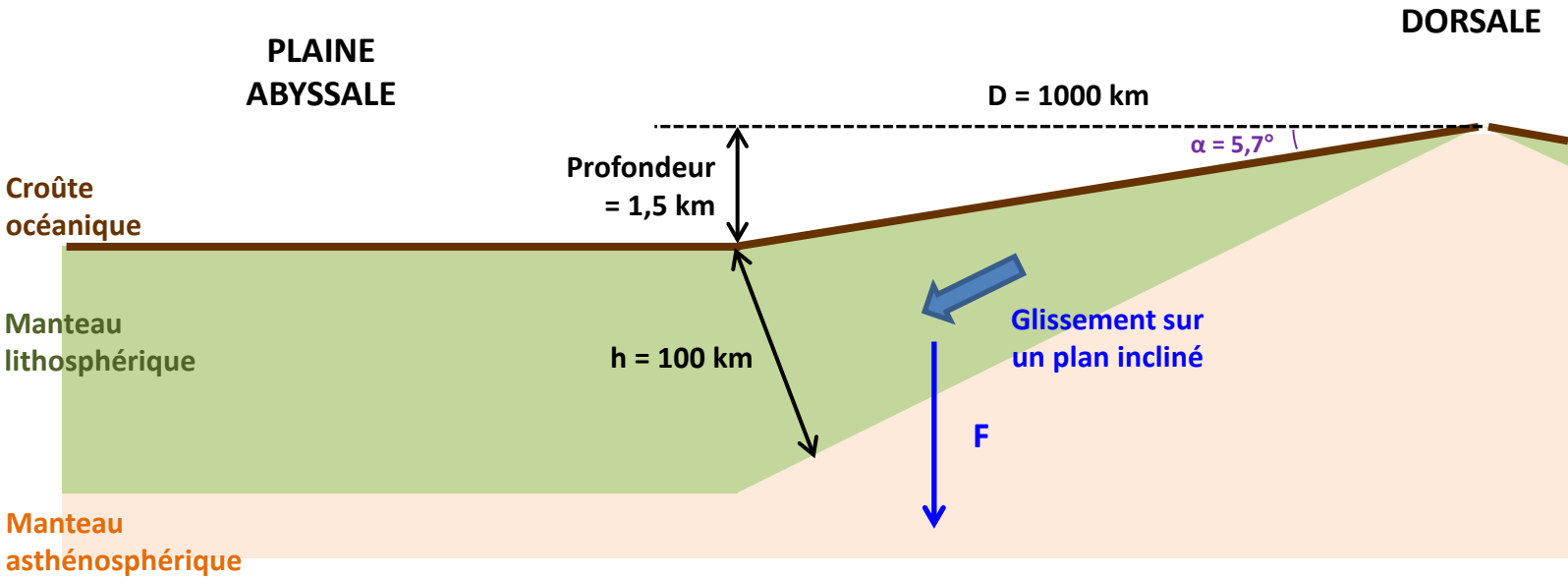
$Ft / h = D \cdot 0,05 \cdot g =$ **$25\,000 \cdot 10^4 N / m^2$** **Force de traction**

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Calcul de la poussée à la dorsale




**F : force qui s'applique sur la lithosphère**

**F = Poids – Poussée Archimède**

$F = m_{lithosphère} \cdot g - m_{asthénosphère} \cdot g = m_{lithosphère} - m_{asthénosphère} \cdot g$

**F = D . h/2 . 0,05 . g**

**m = ρ . V**

**V → D x h / 2 pour la lithosphère et l'asthénosphère**

**- On néglige P**

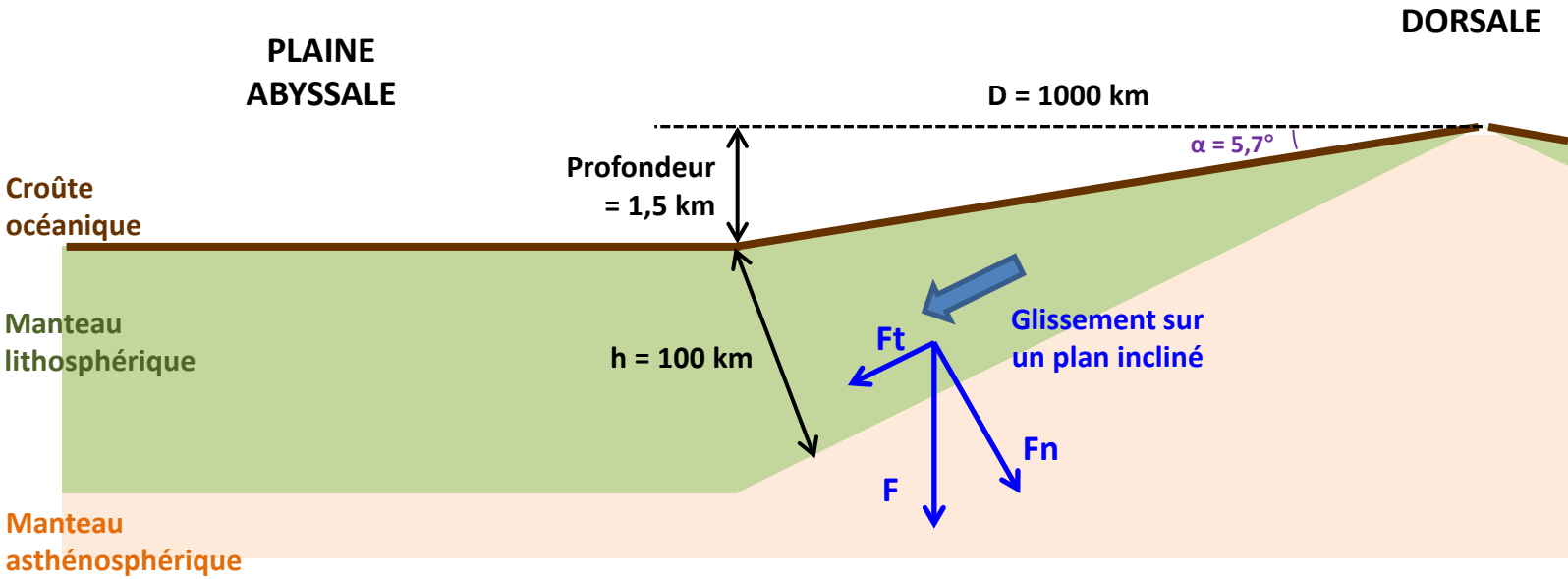
$\rho_{lithosphère} - \rho_{asthénosphère} = 0,05$

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# Calcul de la poussée à la dorsale




F : force qui s'applique sur la lithosphère → Composante normale au plan incliné (Fn)

→ Composante perpendiculaire au plan incliné (Ft) = Force de poussée

$Ft = F . \sin \alpha = D . h/2 . 0,05 . g . \sin \alpha$

$Ft / h = D/2 . 0,05 . g . \sin \alpha =$ **$2500 . 10^4 N / m^2$ Pression de poussée**

**Poussée à la dorsale 10 fois inférieure à la traction de subduction**

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

## Qu'est ce qui a changé dans le modèle de la tectonique des plaques aujourd'hui ?

- Le moteur de la mobilité horizontale

  Ce n'est pas la convection mantellique

  La poussée et le magmatisme à la ride jouent un rôle mineur (compensation)

  → **C'est la subduction de la plaque plongeante**

- Fonctionnement des limites de plaques

  Plusieurs « types » de dorsales : lentes et rapides

  Plusieurs « types » de mécanismes pour l'ouverture océanique (avec/sans volcanisme, horst, …)

  Profondeur de subduction > 700 km

- Rhéologie : les plaques lithosphériques ne sont pas totalement rigides, elles sont parfois déformables.
- La croûte/lithosphère continentale peut parfois subduire.

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

## Les avancées récentes… de la modélisation

GEOPHYSICS

# What drives tectonic plates?

Nicolas Coltice[1]*, Laurent Husson[2], Claudio Faccenna[3,4], Maëlis Arnould[1]

Does Earth's mantle drive plates, or do plates drive mantle flow? This long-standing question may be ill posed, however, as both the lithosphere and mantle belong to a single self-organizing system. Alternatively, this question is better recast as follows: Does the dynamic balance between plates and mantle change over long-term tectonic reorganizations, and at what spatial wavelengths are those processes operating? A hurdle in answering this question is in designing dynamic models of mantle convection with realistic tectonic behavior evolving over supercontinent cycles. By devising these models, we find that slabs pull plates at rapid rates and tear continents apart, with keels of continents only slowing down their drift when they are not attached to a subducting plate. Our models show that the tectonic tessellation varies at a higher degree than mantle flow, which partly unlocks the conceptualization of plate tectonics and mantle convection as a unique, self-consistent system.



Rouge : dorsales et rifts



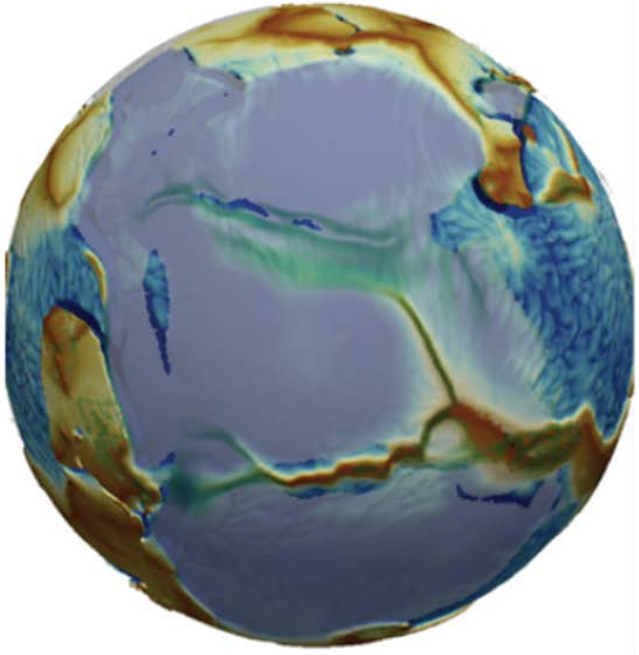
Bleu : fond océanique profond



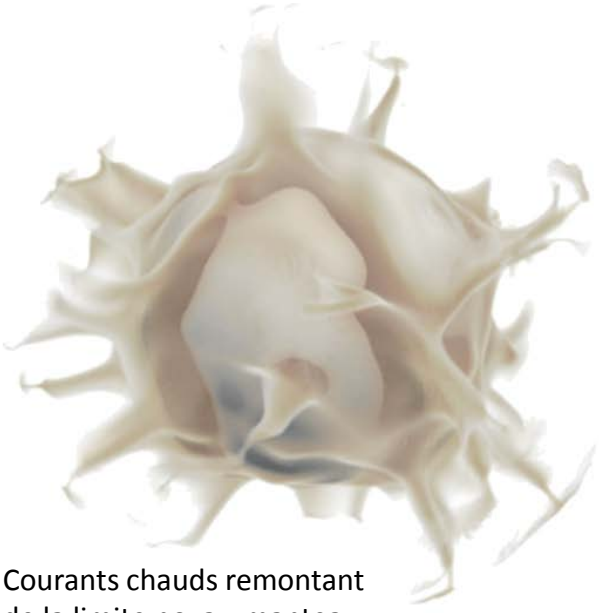
Bleu foncé : zones de subduction



Continent : blanc à violet-gris



*Modélisation numérique de la fracture d'un supercontinent*



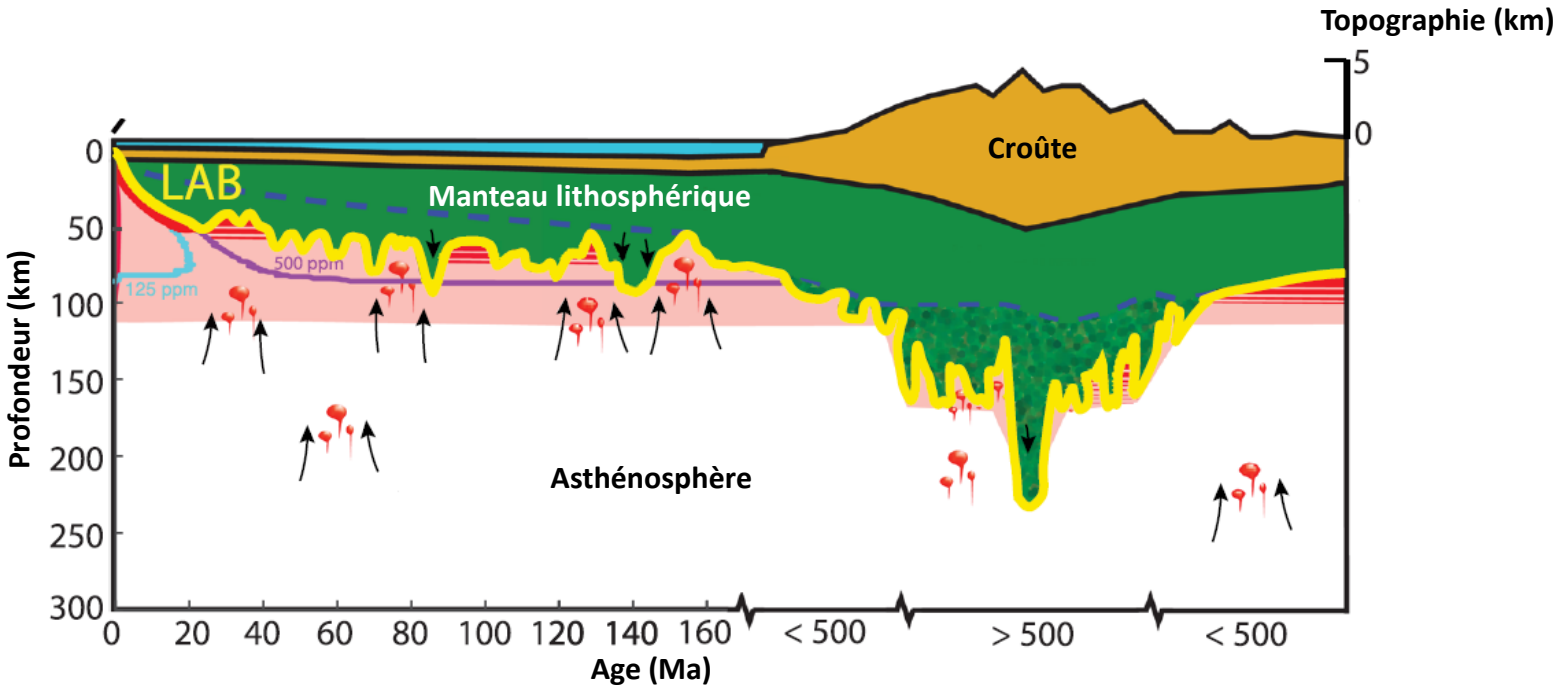
Courants chauds remontant de la limite noyau-manteau

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

# C'est quoi une plaque tectonique aujourd'hui ?




**Une épaisseur de plaque lithosphérique très variable**

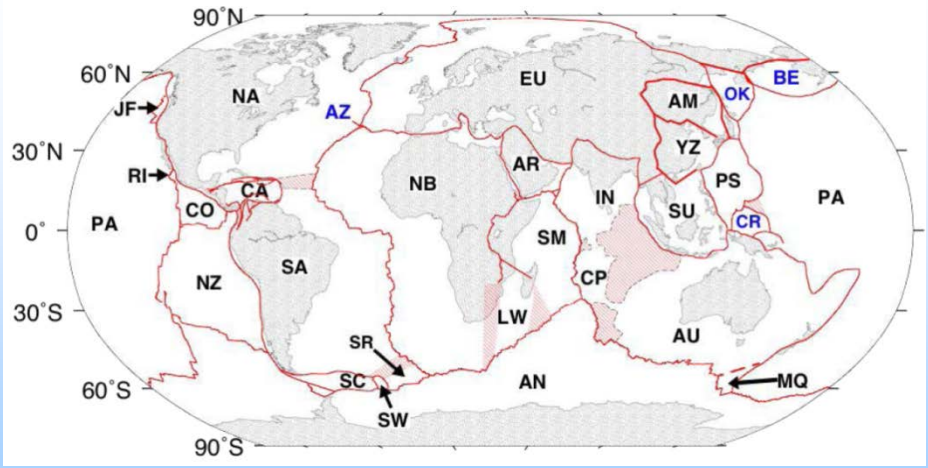
**Epaisseur de la lithosphère élastique**

**Limite lithosphère-asthénosphère**

**Zone de fusion partielle potentielle en fonction de la teneur en eau (ppm)**

*Rychert et al, 2020*

# III- Les limites de plaques



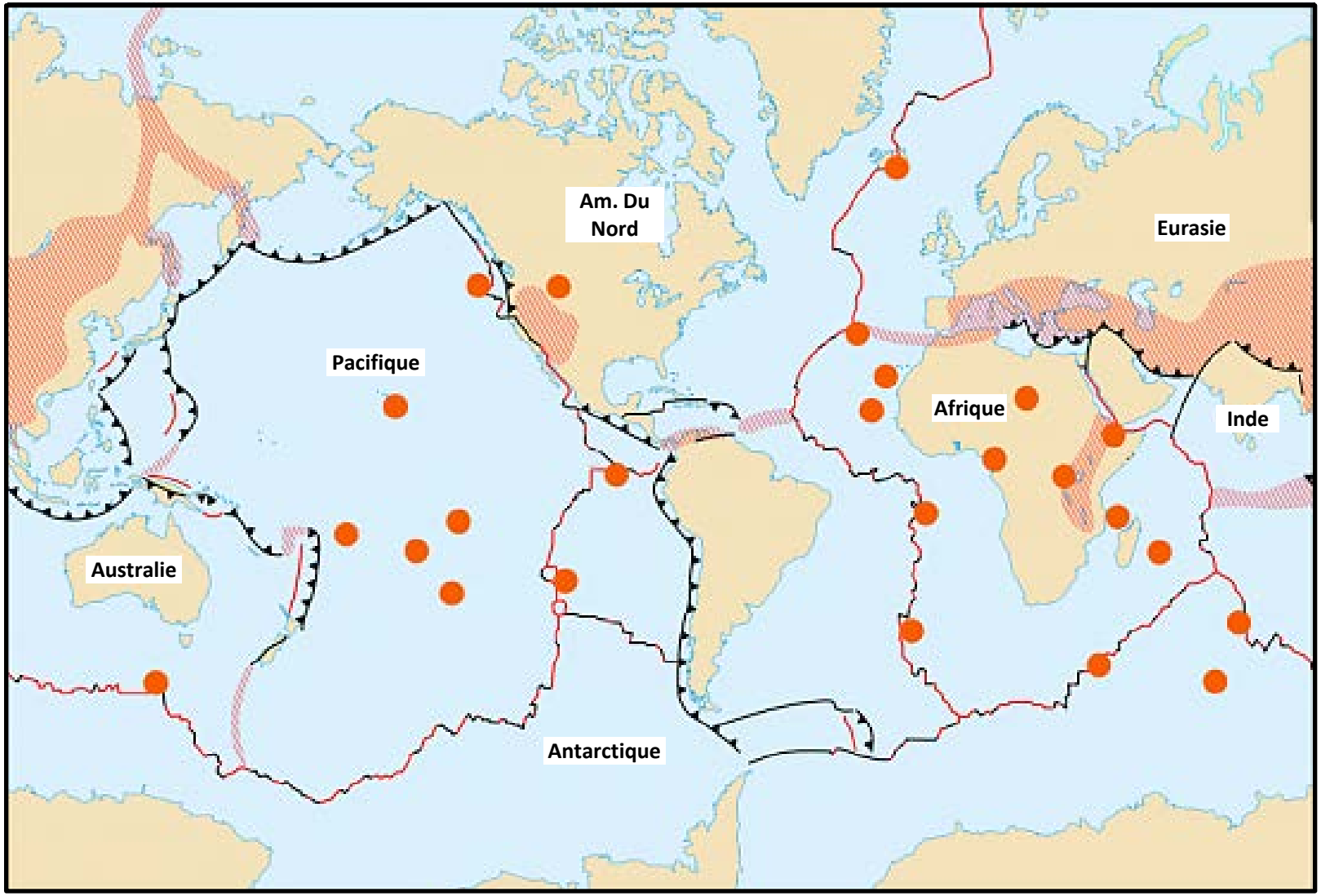
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

III- Limites de plaques

# Les dorsales : localisation



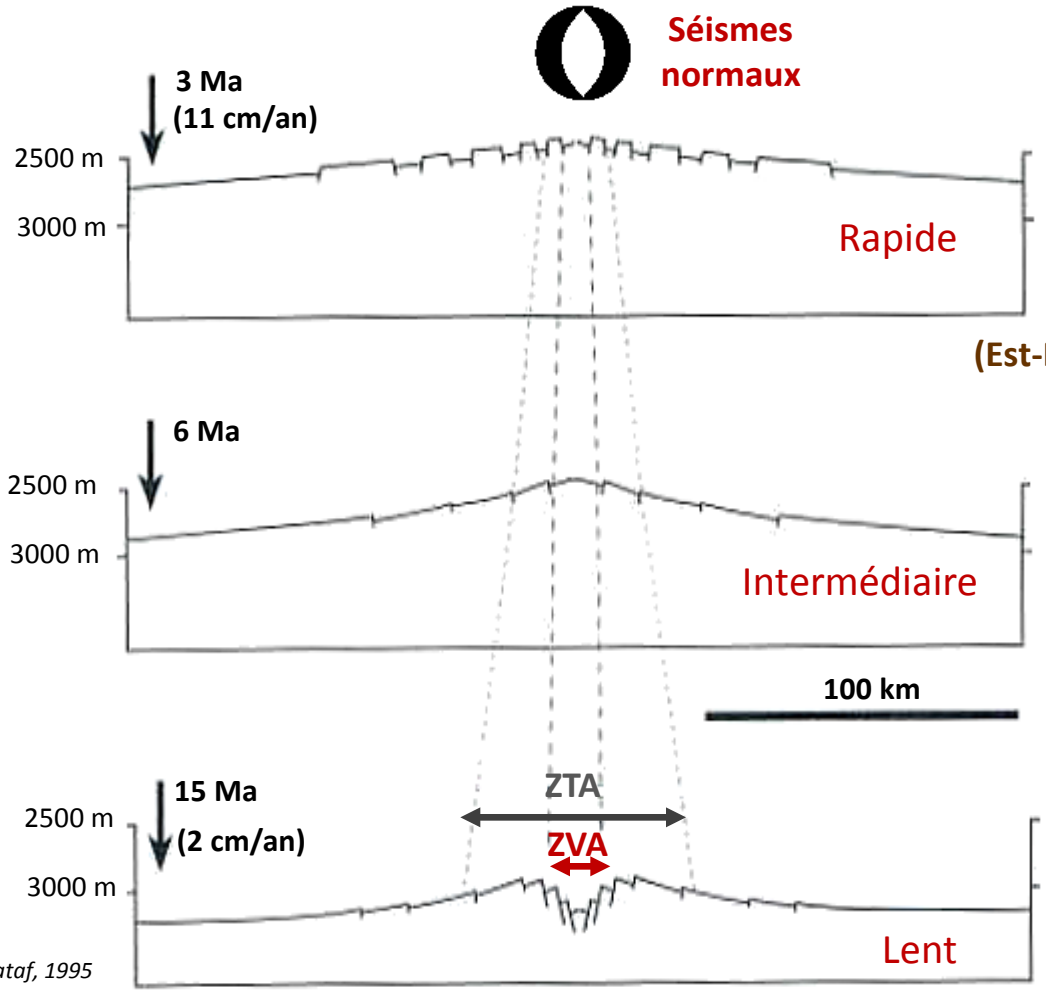
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

III- Limites de plaques

# Les dorsales médio-océaniques (1)




**Caractéristiques**

**Bombement très large mais sans rift central**

**Apport magmatique élevé, comportement plus ductile**

**(Est-Pacifique)**

**Faible largeur mais avec rift central**

**Faible apport magmatique, comportement cassant**

**(Atlantique)**

**ZTA : Zone tectoniquement active**

**ZVA : Zone volcaniquement active**

*Morphologie des dorsales*

Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

III- Limites de plaques

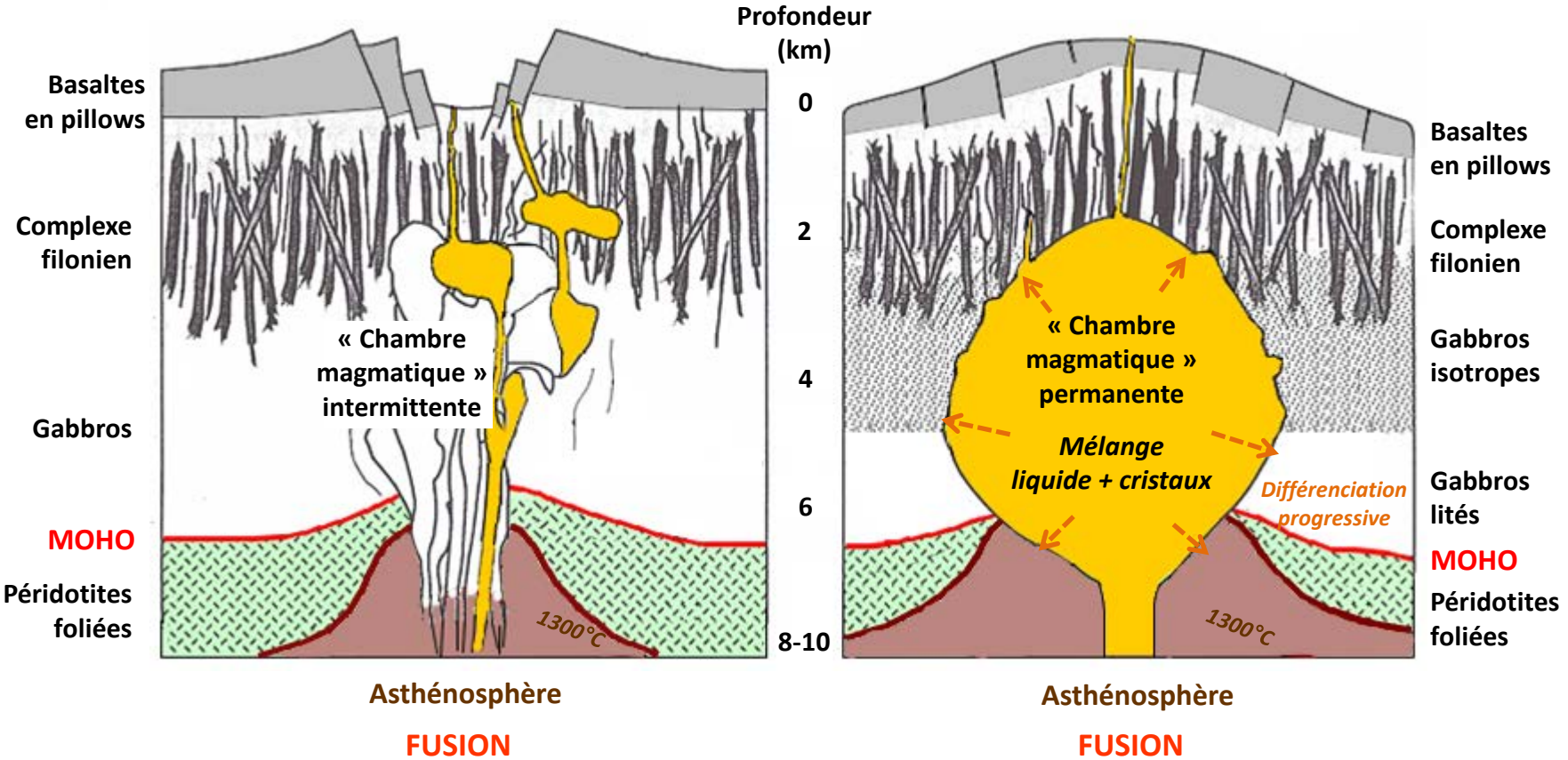
# Les dorsales médio-océaniques (3)

Mécanisme de fusion par décompression adiabatique

**Genèse de la croûte océanique**

Dorsale lente

Dorsale rapide



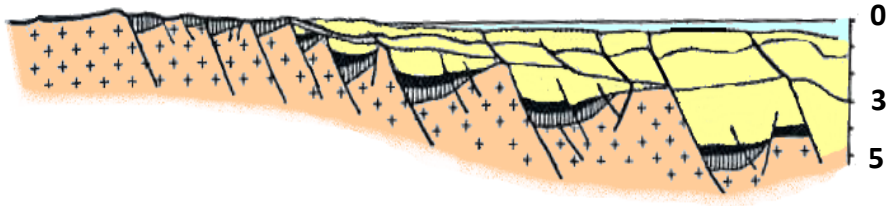
Introduction
I- Du fixisme au mobilisme
II- Tectonique des plaques
III- Limites de plaques

# Evolution du rifting : exemple du Moyen-Orie

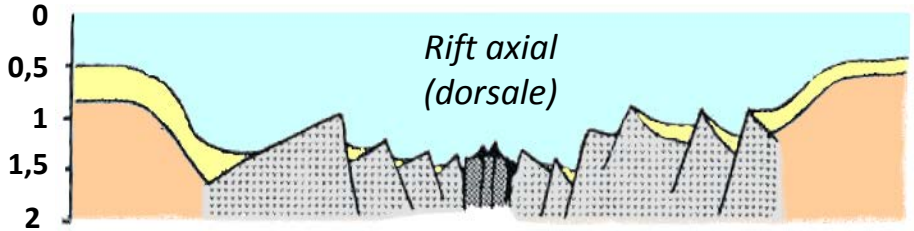


Remplissage sédimentaire
Croûte continentale
Basaltes (CO)

A

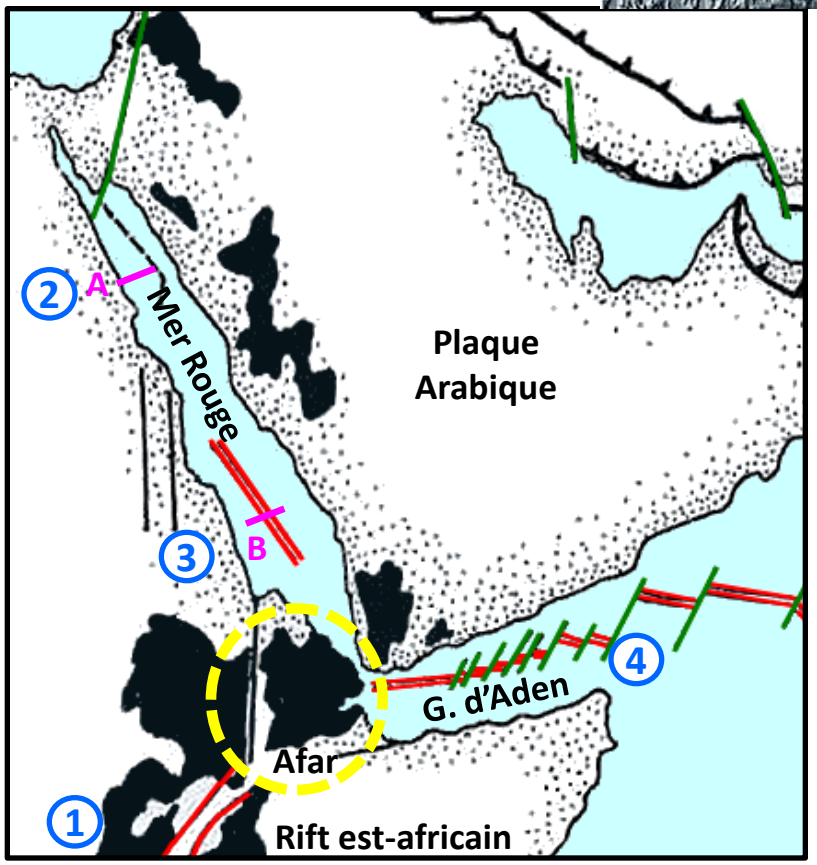



B




Océanisation avec croûte océanique

① ② ③ ④ Stades de divergence




Debelmas, 2008

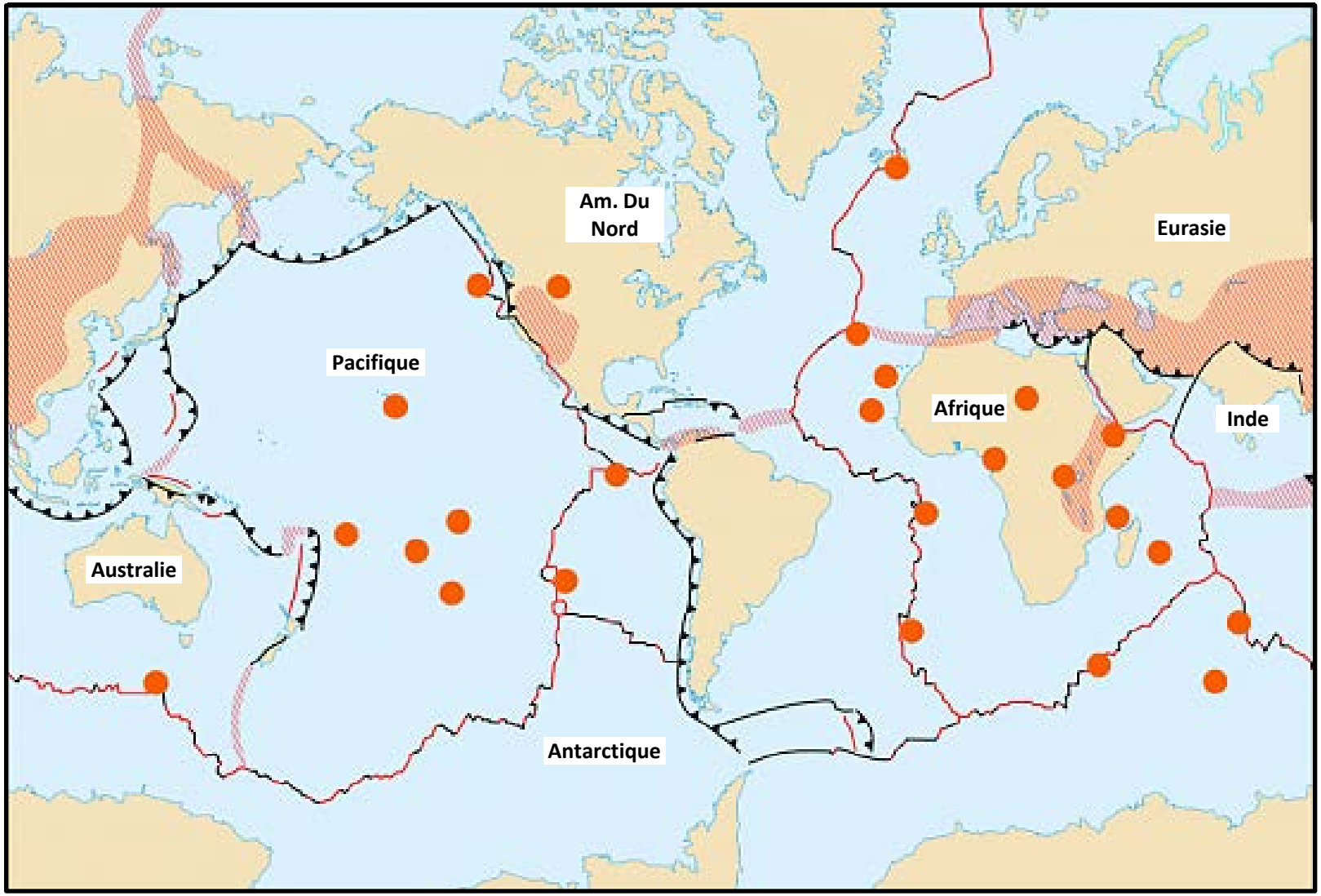
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

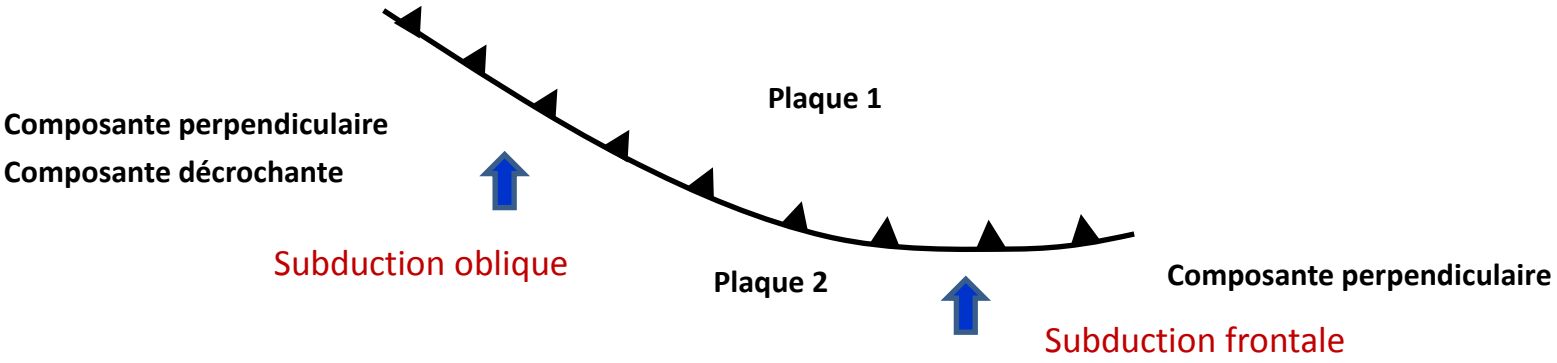
III- Limites de plaques

# Zone de subduction : localisation

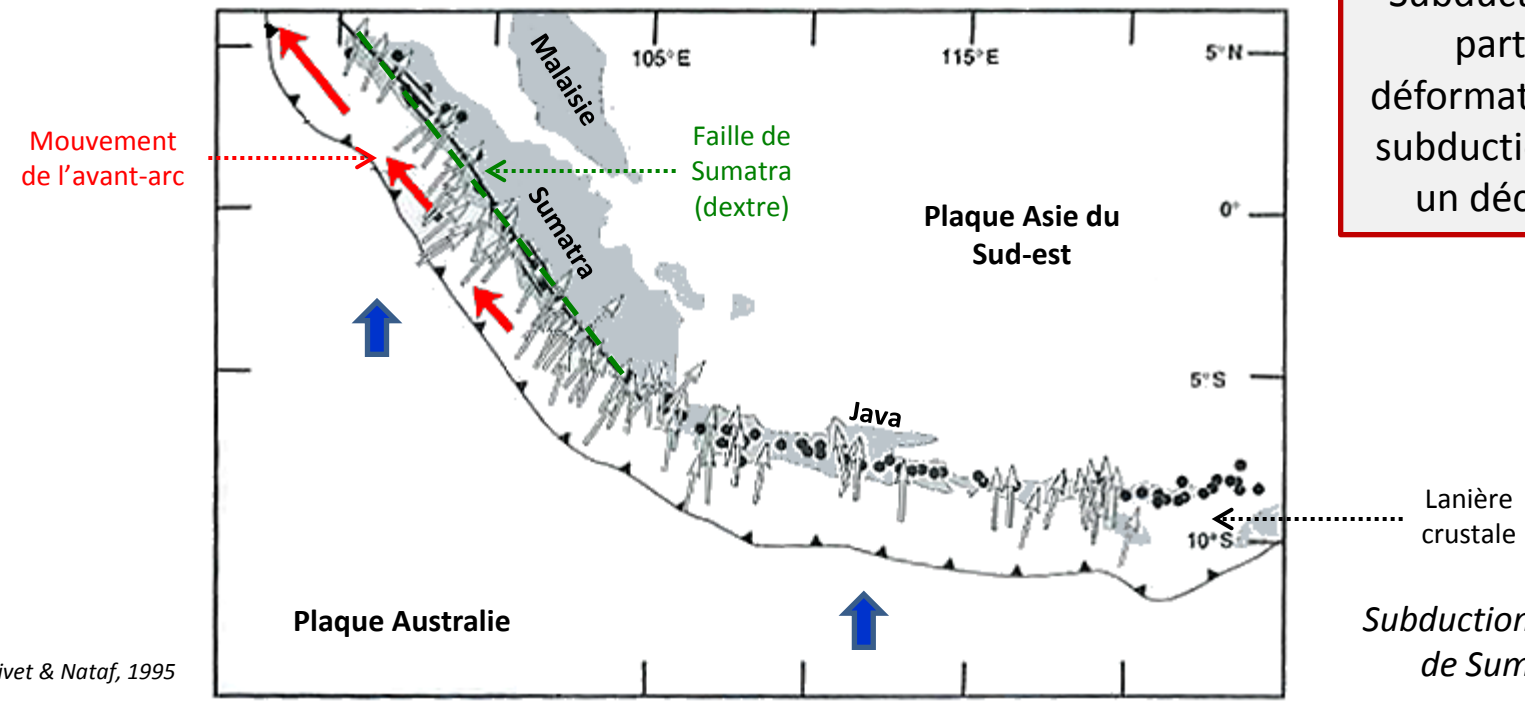


Introduction
I- Du fixisme au mobilisme
II- Tectonique des plaques
III- Limites de plaques

# Zone de subduction : Régimes cinématiques




Subduction oblique : partage de la déformation entre une subduction frontale et un décrochement




*Jolivet & Nataf, 1995*

*Subduction oblique de Sumatra*

*Debelmas, 2008*

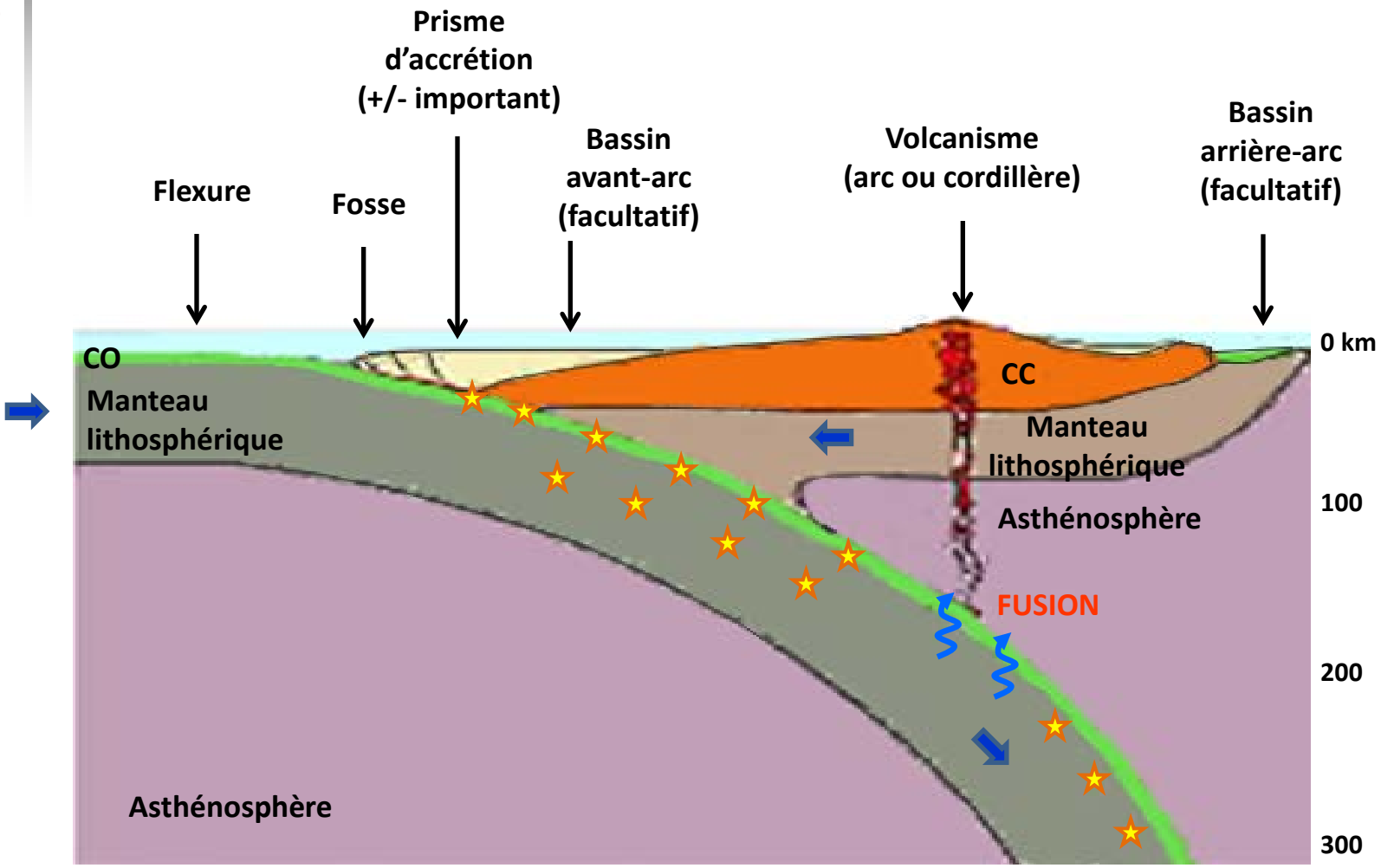
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

II- Tectonique des plaques

III- Limites de plaques

# La subduction




*D'après Robert, 2013*

***Coupe théorique d'une marge active***

Phases volatiles

Séismes

**CO : croûte océanique**

**CC : croûte continentale**

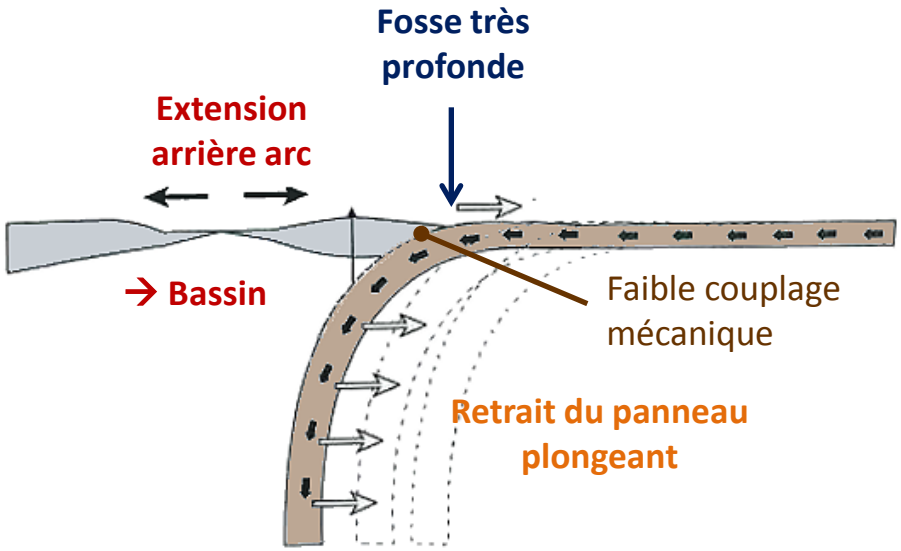
Introduction
I- Du fixisme au mobilisme
II- Tectonique des plaques
III- Limites de plaques

# Types de zones de subduction : un continuum

Lithosphère océanique âgée et « lourde »

Pas de séismes de forte magnitude

**Subduction « spontanée »**



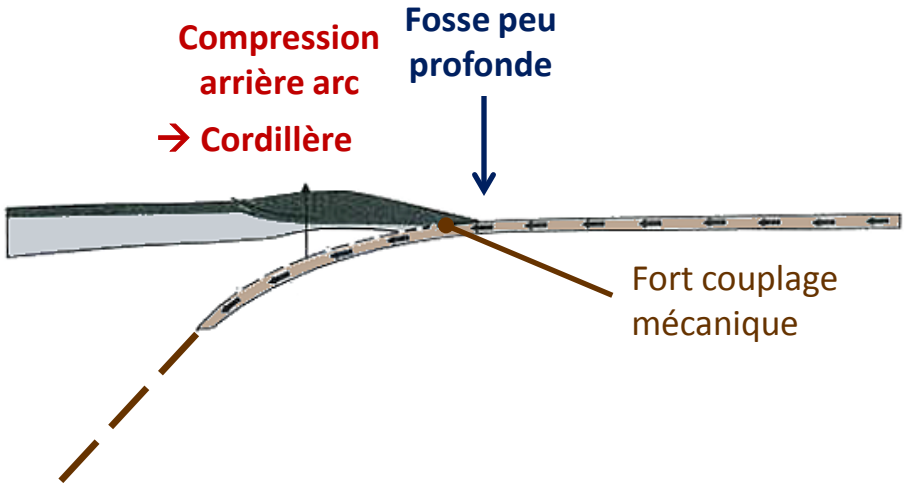

Fort pendage du panneau plongeant (>30°)

**Type Mariannes**

Lithosphère océanique jeune et « légère »

Séismes de forte magnitude (> 7,5)

**Subduction « forcée »**




Faible pendage du panneau plongeant (1-10°)

**Type Chili**

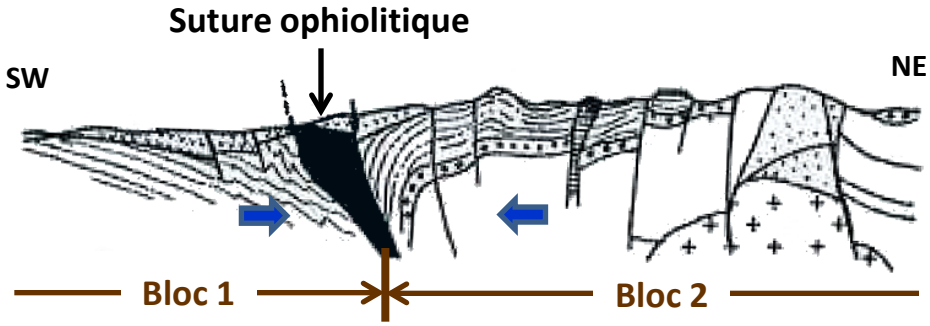
Introduction
I- Du fixisme au mobilisme
II- Tectonique des plaques
III- Limites de plaques

# Lorsque deux croûtes continentales se rencontrent : la collision

**Arc - continent**

**Continent - continent**

Solution 1 : **blocage** et **transfert** du raccourcissement à une autre limite de plaque

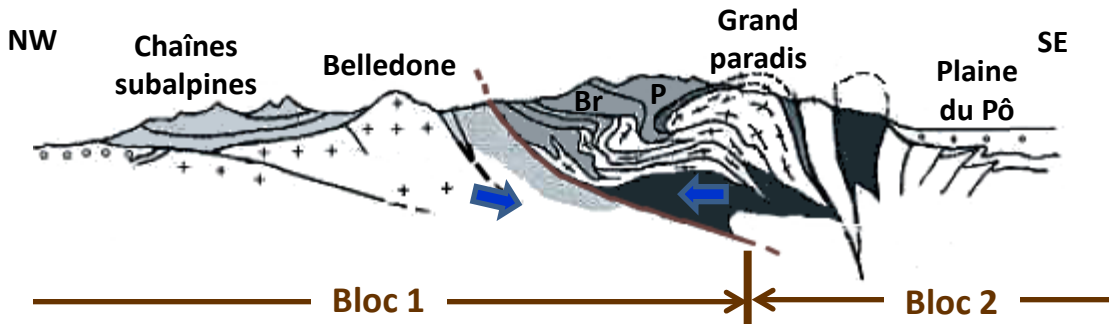



*Coupe dans la suture de Yazd (Iran)*

Solution 2 : **Pression maintenue** et raccourcissement horizontal des deux marges

- Cinématique : Ralentissement de la convergence

- Epaississement crustal = chaîne de montagne




*Coupe dans le nord des Alpes françaises*

*D'après Debelmas, 2008*

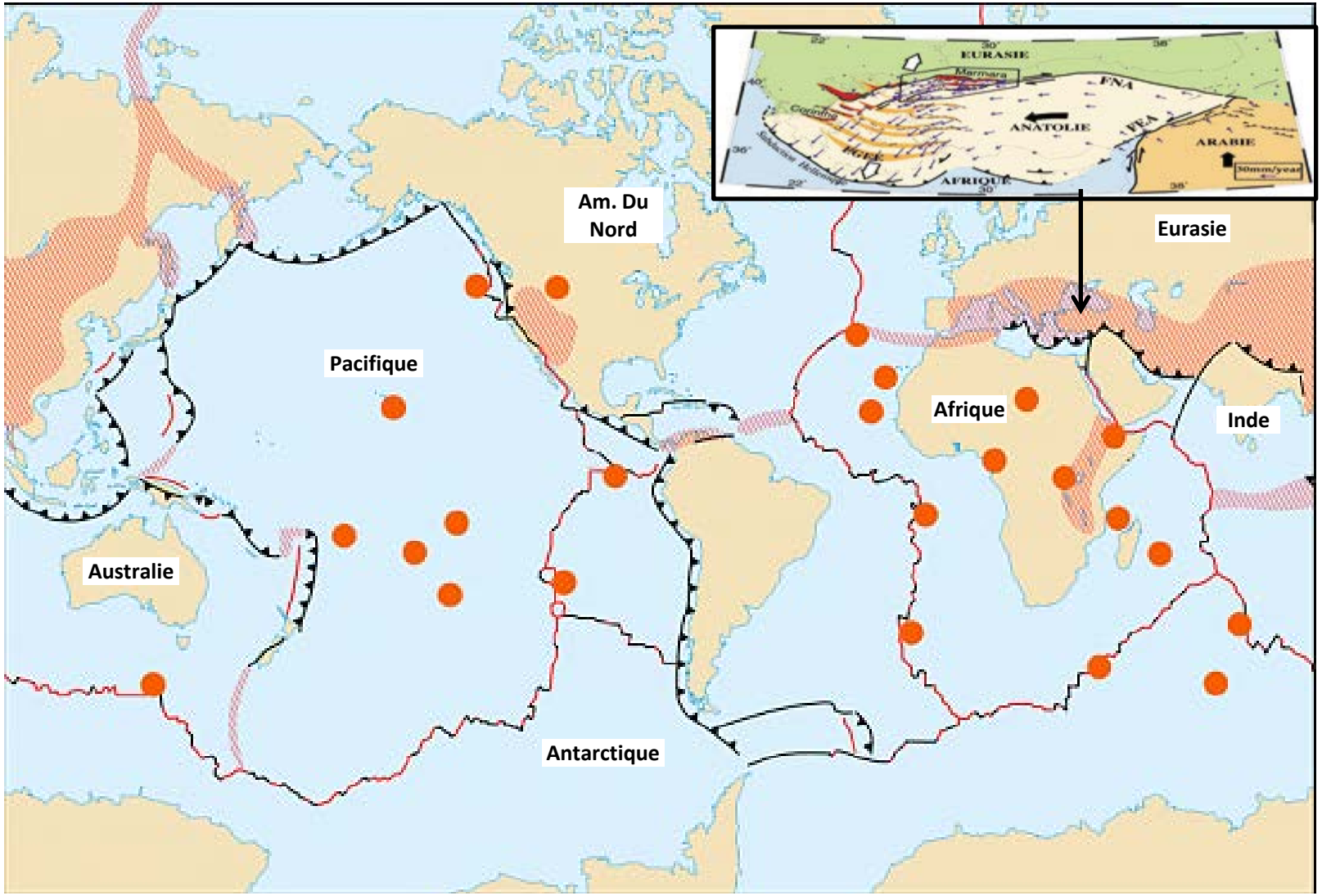
Introduction

I- Du fixisme au mobilisme

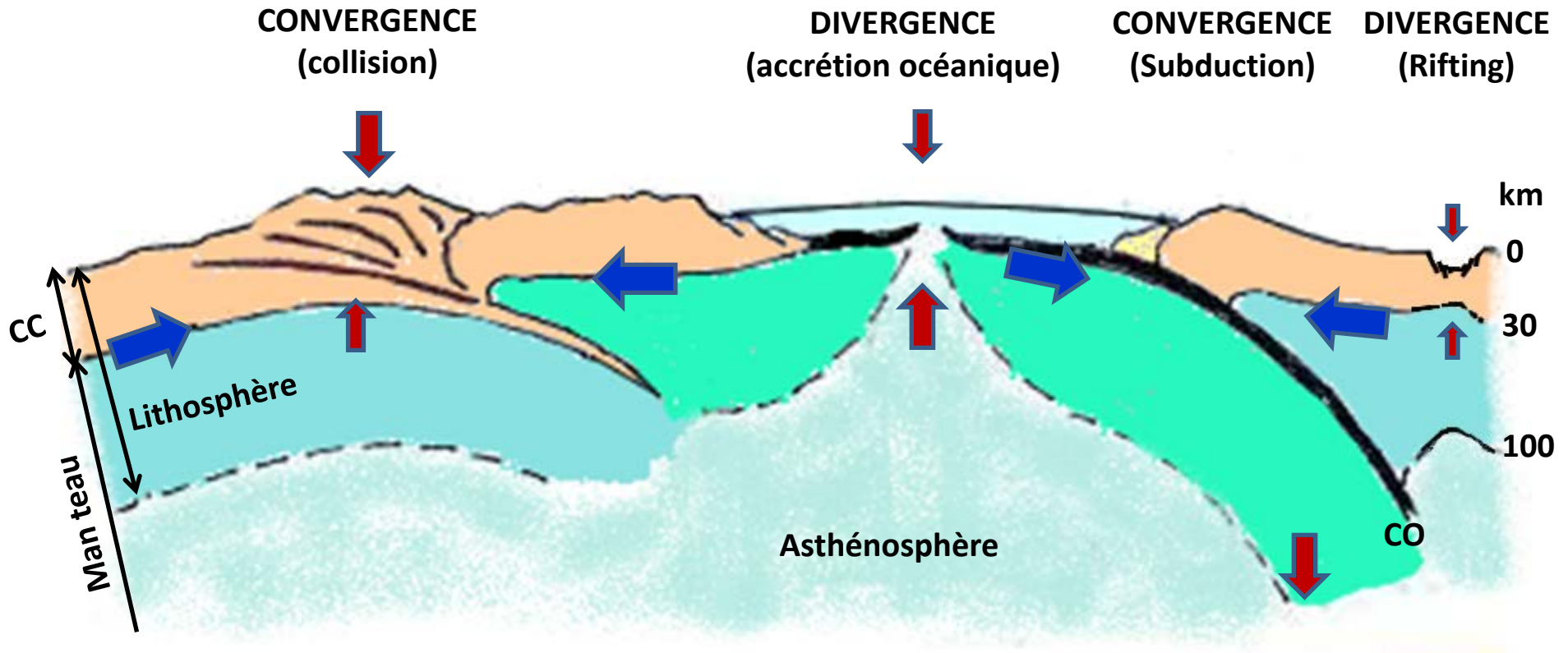
II- Tectonique des plaques

III- Limites de plaques

# Zones de décrochement : localisation



## Couplage entre mobilité verticale et horizontale de la lithosphère

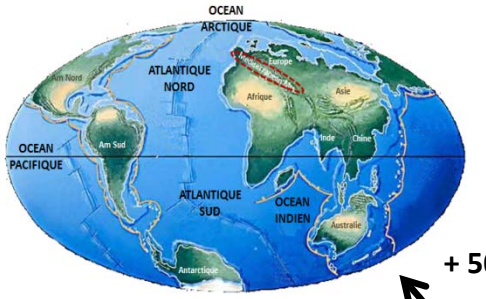



La tectonique des plaques… une conséquence du refroidissement de la Terre

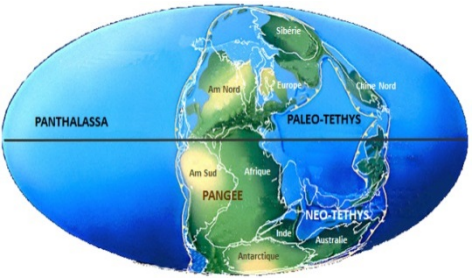
# Les cycles de Wilson




Dévonien (400 Ma)




+ 50 Ma ?

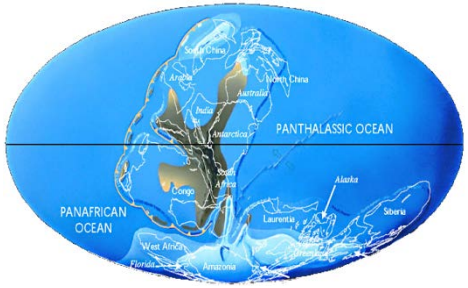



Pangée (300 Ma)

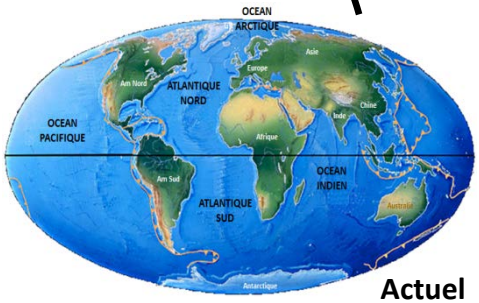
**Supercontinents**




Rodinia (1Ga)




Protérozoïque (650 Ma)



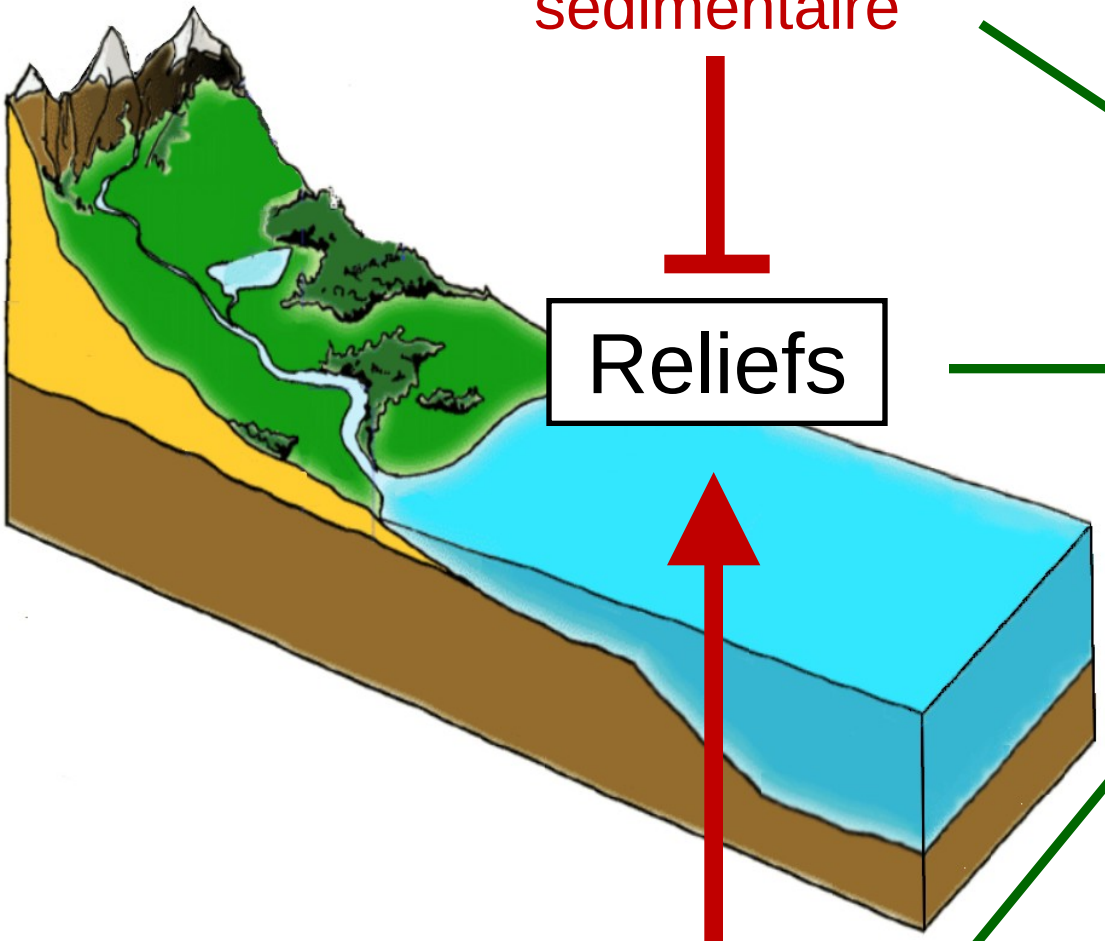

Actuel

**Continents éclatés**




Jurassique (180 Ma)

# Conclusion



Processus sédimentaire

Climat

Reliefs

Paysages

Tectonique

Lithologie