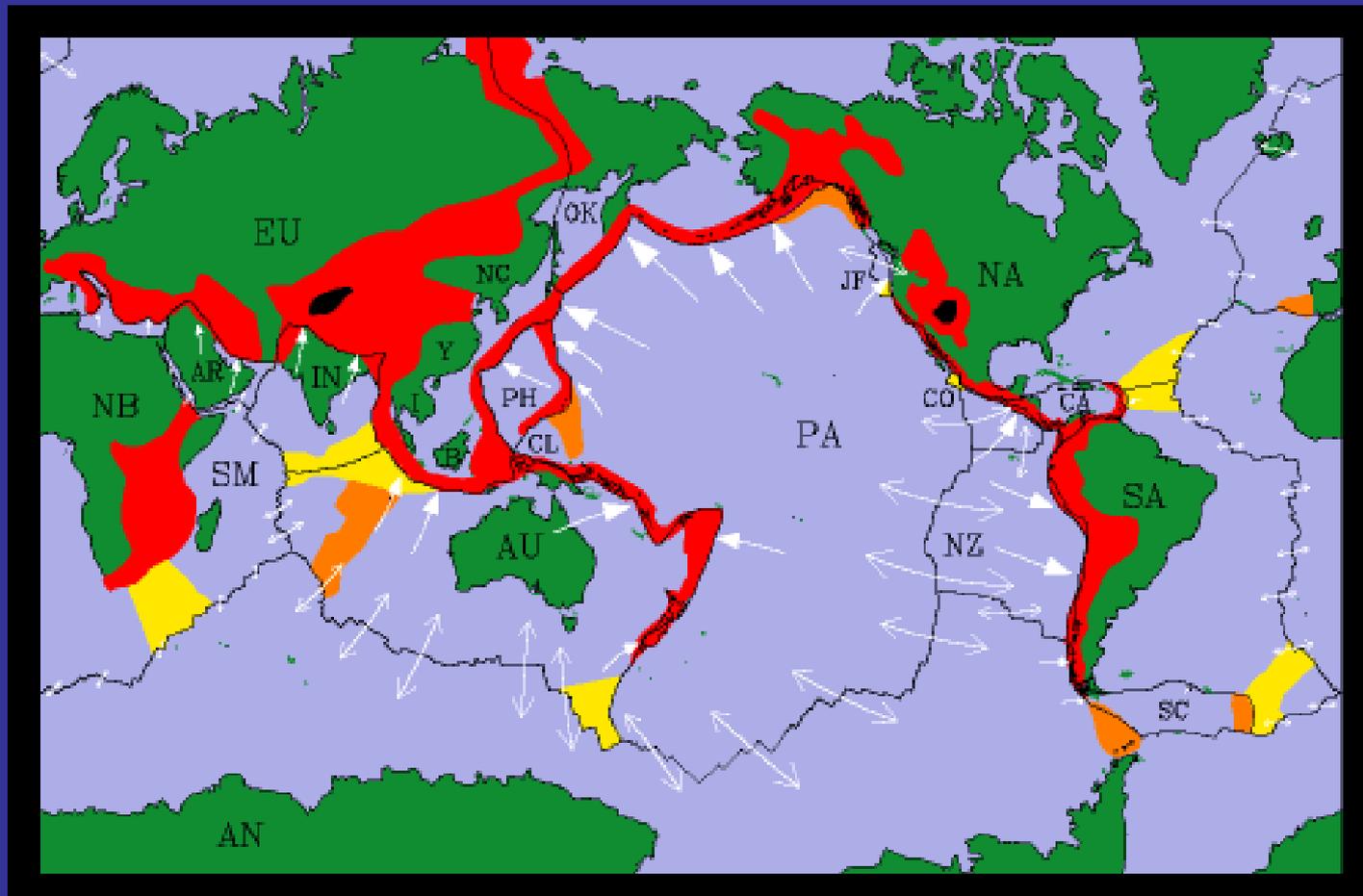


LA MACHINE TERRESTRE

3b

Jean-Paul Montagner, Elise Delavaud,
Université Paris VII-Denis Diderot, Institut de Physique du Globe



Plan

I- Une brève Histoire de la Terre

-observations de surface: calculs à la surface de la terre

Calcul de la masse des planètes

- l'aventure Wegenerienne

II- Le champ magnétique terrestre

-Définition

-Modèle de champ dipolaire

-Les inversions

-Aimantation des roches, PGV

III- Tectonique des plaques

-Expansion des fonds océaniques

-Théorème d'Euler

-Modèle cinématique- cinématique sur la sphère

-Différents types de frontière- Différents types de données

IV- Déformations, contraintes, rhéologie (très sommaire)

V- Sismologie

-sismomètres

-séismes, localisation, ondes P, ondes S

-structure radiale de la terre (1D)

-Notions de tomographie sismique

VI- Imagerie des objets géologiques

-Modèles globaux 3D

- Concept de lithosphère

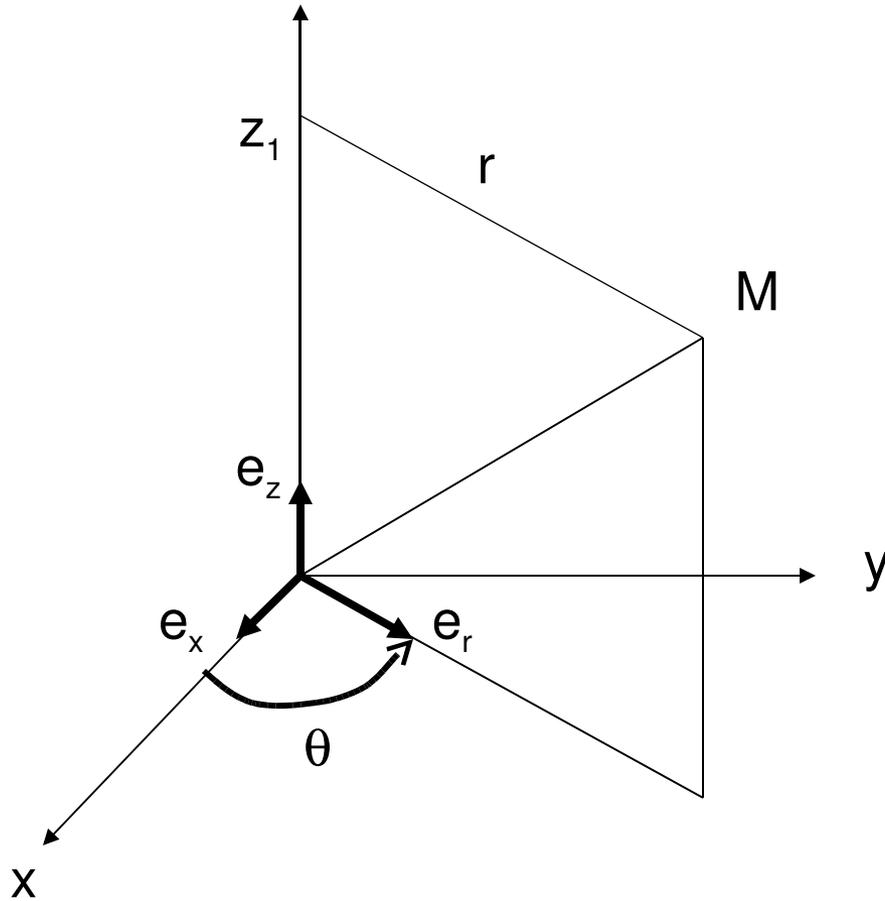
- Slabs

-Hotspots- panaches

VII-Développements actuels

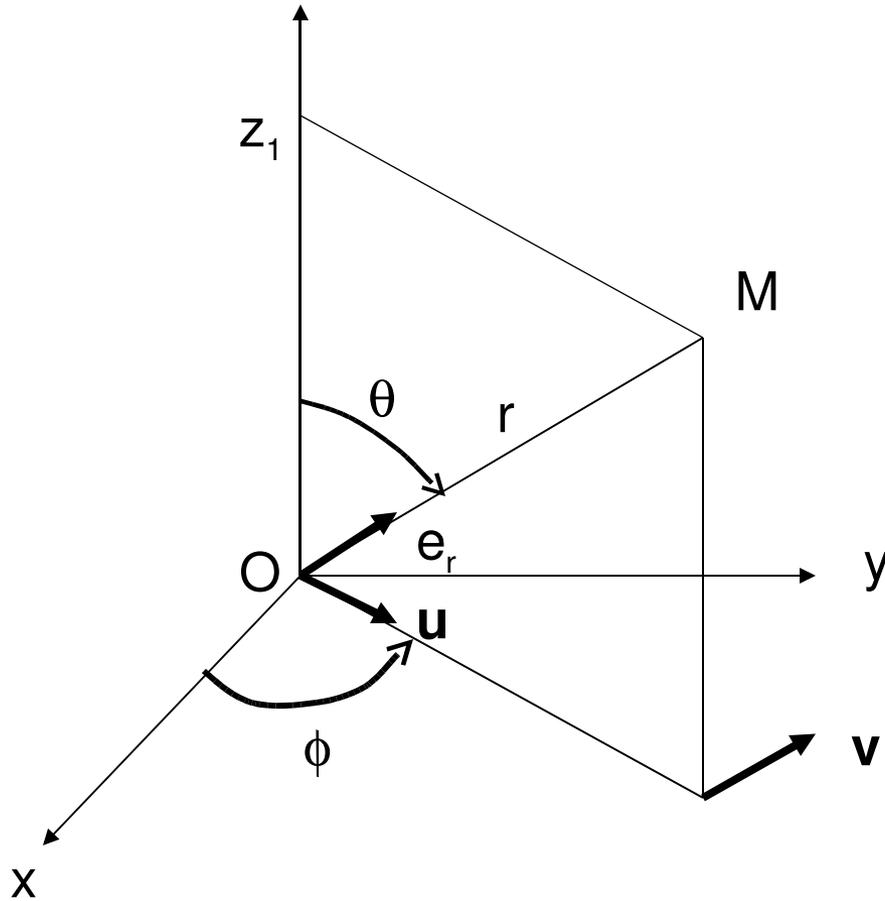
Cinématique des Plaques

Coordonnées polaires



$$M \begin{cases} x = r \cos \Theta \\ y = r \sin \Theta \\ z = z_1 \end{cases}$$

Coordonnées sphériques



$$M \begin{cases} x = r \sin \theta \cos \phi \\ y = r \sin \theta \sin \phi \\ z = r \cos \theta \end{cases}$$

Cinématique des Plaques

- Plaques rigides
- Continents
- Déplacement sans déformation
- Différents types de frontière
- Glissement sur asthénosphère
- Mouvements relatifs des plaques décrits par les lois de la cinématique sur la sphère

Théorème d'Euler

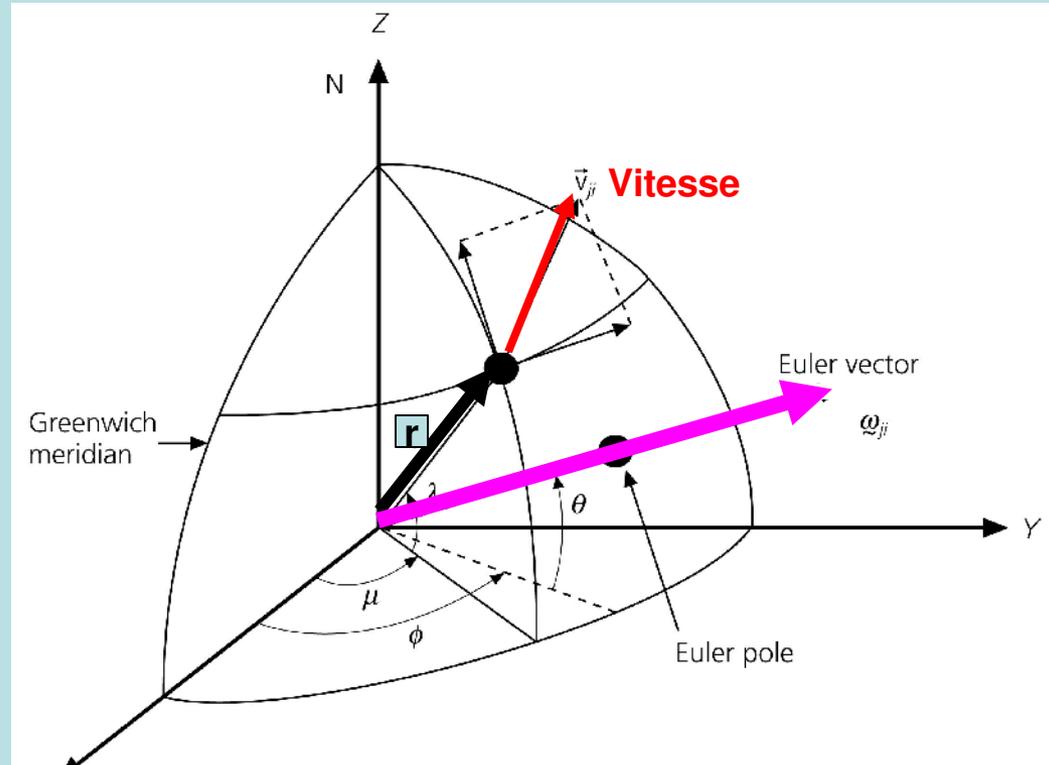
Le mouvement relatif entre 2 plaques rigides sur la terre sphérique peut être décrit par un pôle d'Euler.

Au point \mathbf{r} sur la frontière entre 2 plaques, à la latitude λ et la longitude μ , la vitesse de la plaque j par rapport à la plaque i \mathbf{v}_{ji} , est donnée par le vecteur (produit vectoriel)

$$\mathbf{v}_{ji} = \boldsymbol{\omega}_{ji} \wedge \mathbf{r}$$

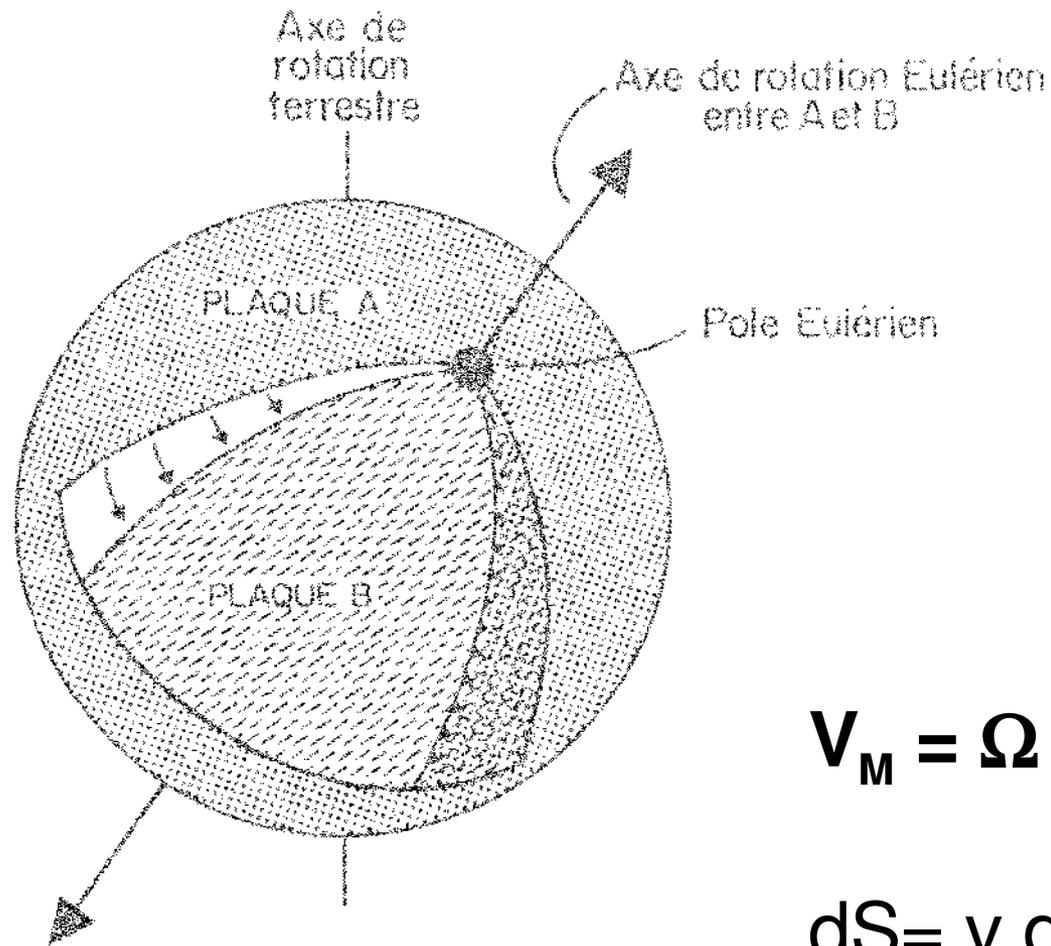
\mathbf{r} est le vecteur position du point sur la frontière

$\boldsymbol{\omega}_{ji}$ est le vecteur vitesse angulaire ou vecteur d'Euler décrit par son amplitude (rotation rate) $|\boldsymbol{\omega}_{ji}|$



Stein & Wysession, 2003

Et son pôle (position en surface) Machine terrestre
(θ, ϕ)



$$\mathbf{V}_M = \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{OM}$$

$$dS = v dt a d\Theta$$

Allègre, 2002

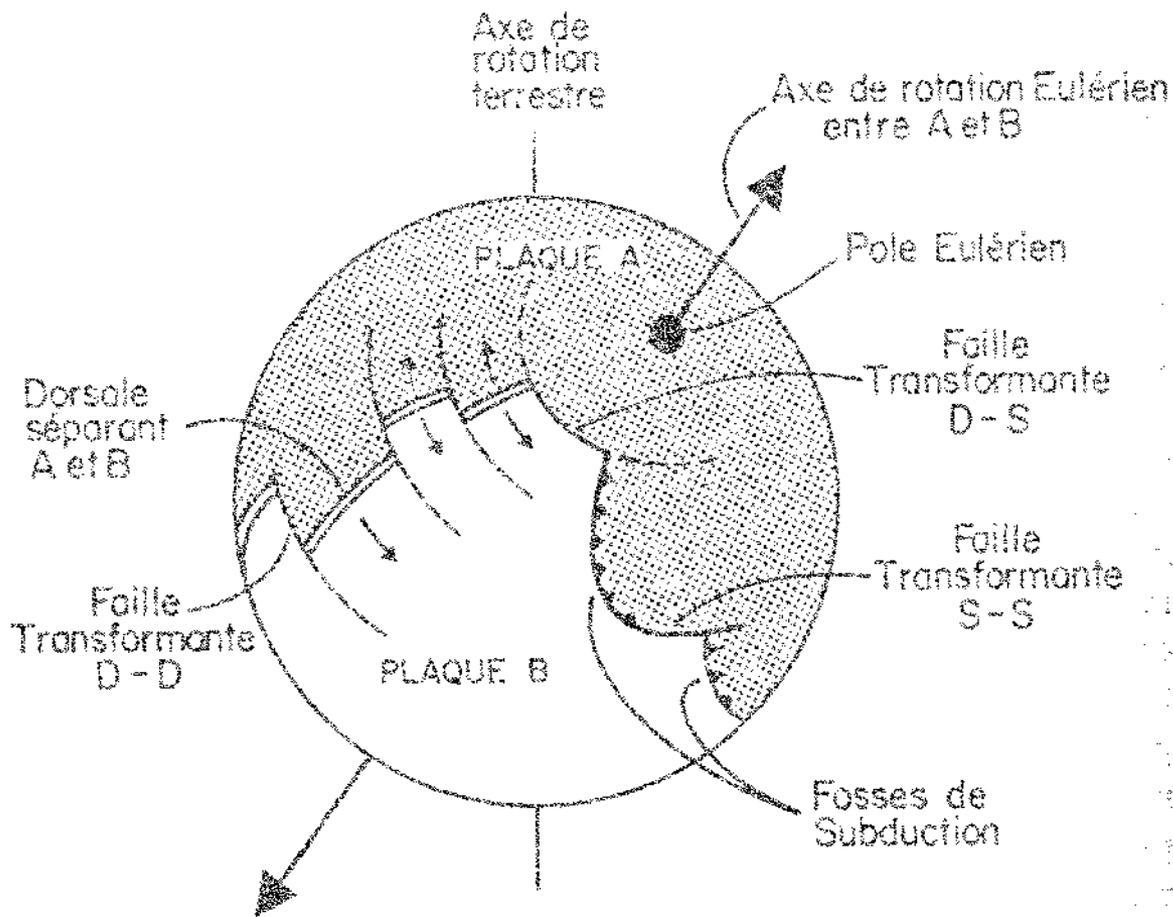


FIG. 23. — Nous passons maintenant à une Terre formée de deux plaques (A) et (B) mais où les conditions deviennent tout à fait réelles. Une dorsale, une zone de subduction, des failles transformantes ; contrairement au cas précédent, la zone de création de surface est symétrique de part et d'autre de la dorsale. Les failles transformantes sont multiples, de types variés mais toutes sont sur des petits cercles ayant pour axe l'axe eulérien de rotation entre (A) et (B). On notera que l'axe eulérien de rotation entre (A) et (B) n'a rien à voir avec l'axe de rotation de la Terre.

Direction du mouvement relatif est un petit cercle par rapport au pôle d'Euler

1ère plaque (j) se déplace dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à la 2ème plaque (i).

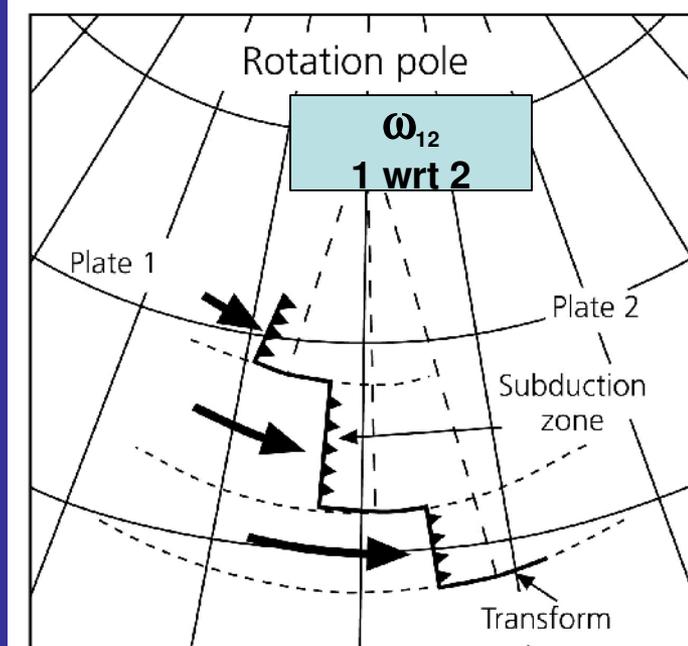
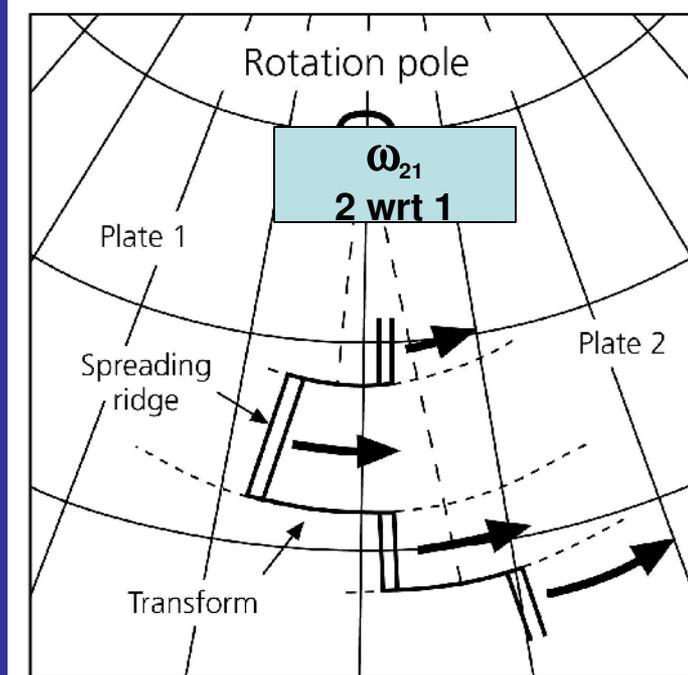
Segments de frontière avec un mouvement relatif parallèle à la frontière sont des failles transformantes (petits cercles par rapport au pôle)

Segments avec un mouvement relatif perpendiculaire à la frontière et divergents sont des centres d'expansion.

Segments avec un mouvement relatif perpendiculaire à la frontière et convergents sont des zones de subduction.

Le taux de mouvement relatif croît avec la distance au pôle car $|\mathbf{v}_{ji}| = |\omega_{ji}| |r| \sin \gamma$, où γ est l'angle entre le pôle et le point d'observation.

Tous les points sur la frontière ont la même vitesse angulaire, mais l'amplitude de la vitesse lineaire varie de zéro au pôle à un maximum à 90°



Théorème d'Euler

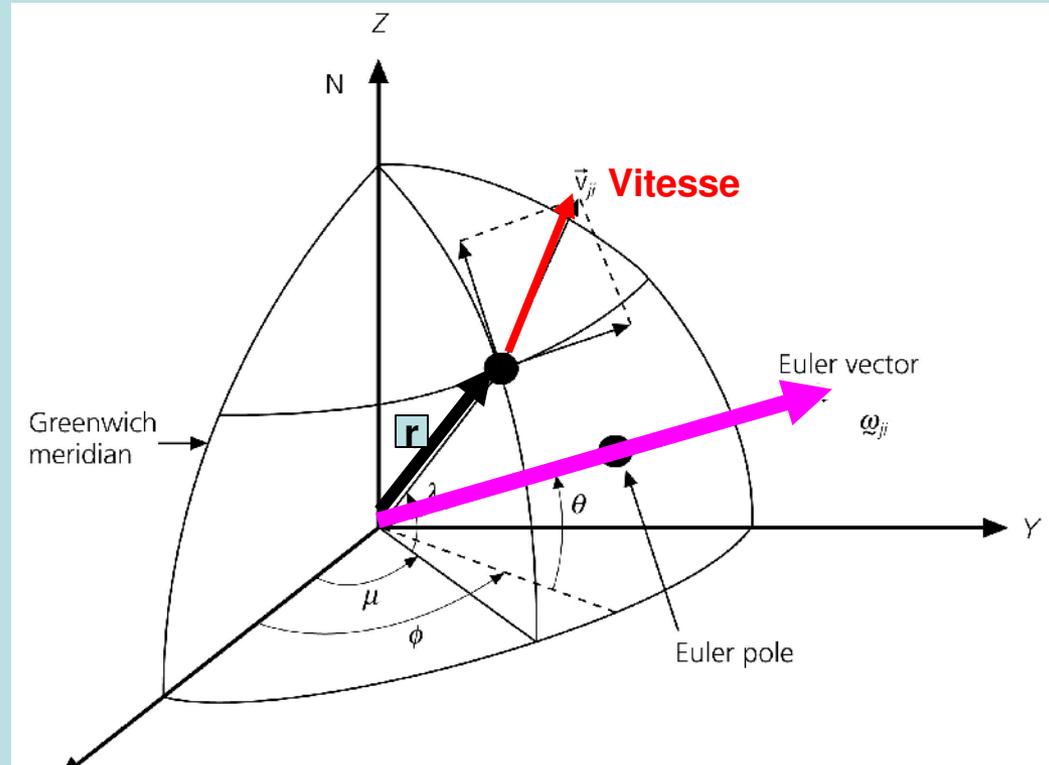
Le mouvement relatif entre 2 plaques rigides sur la terre sphérique peut être décrit par un pôle d'Euler.

Au point \mathbf{r} sur la frontière entre 2 plaques, à la latitude λ et la longitude μ , la vitesse de la plaque j par rapport à la plaque i \mathbf{v}_{ji} , est donnée par le vecteur (produit vectoriel)

$$\mathbf{v}_{ji} = \boldsymbol{\omega}_{ji} \wedge \mathbf{r}$$

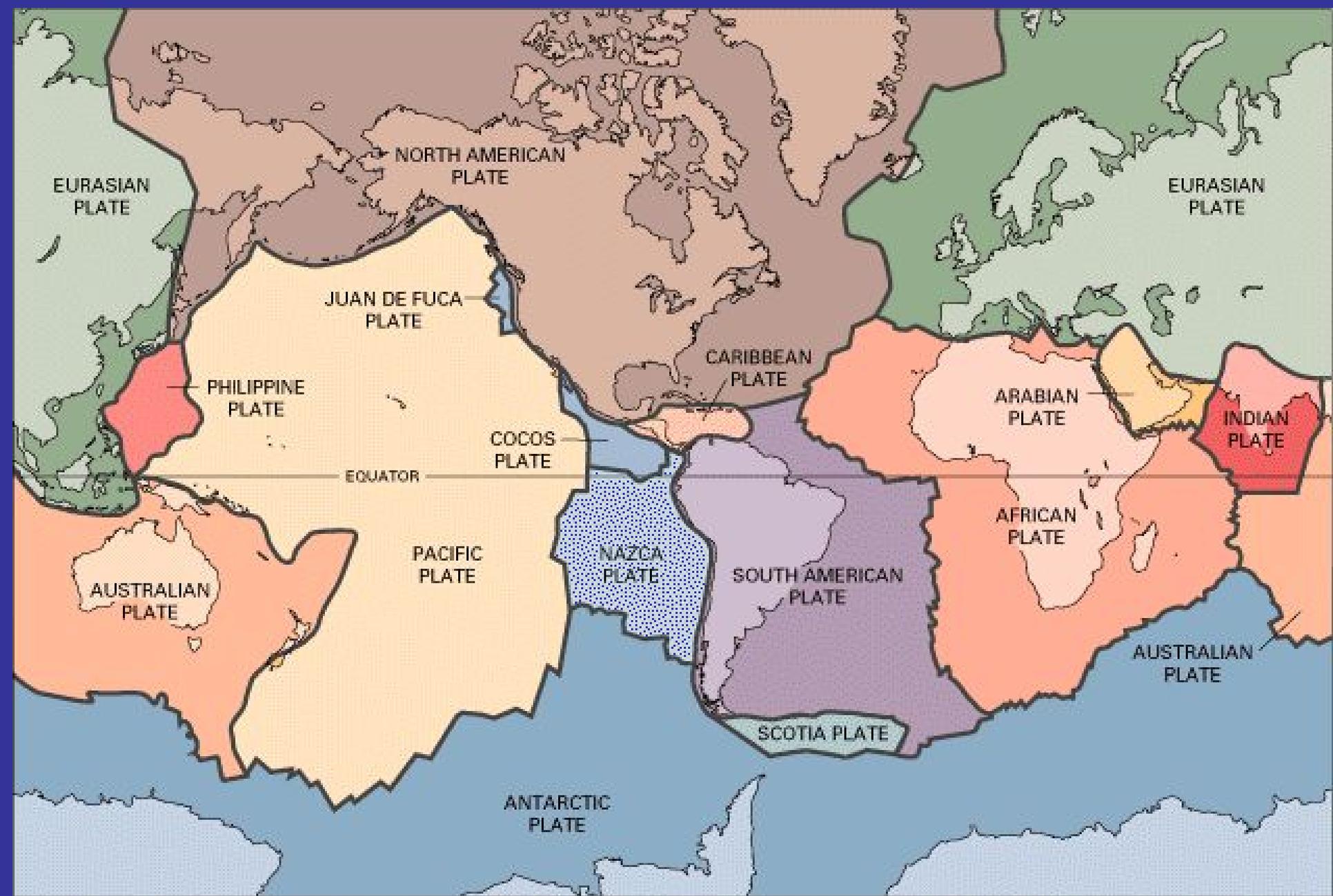
\mathbf{r} est le vecteur position du point sur la frontière

$\boldsymbol{\omega}_{ji}$ est le vecteur vitesse angulaire ou vecteur d'Euler décrit par son amplitude (rotation rate) $|\boldsymbol{\omega}_{ji}|$



Stein & Wysession, 2003

Et son pôle (position en surface) Machine terrestre
(θ, ϕ)



Modèle de cinématique des plaques

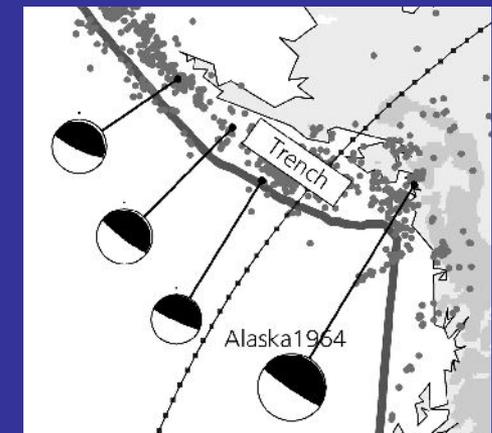
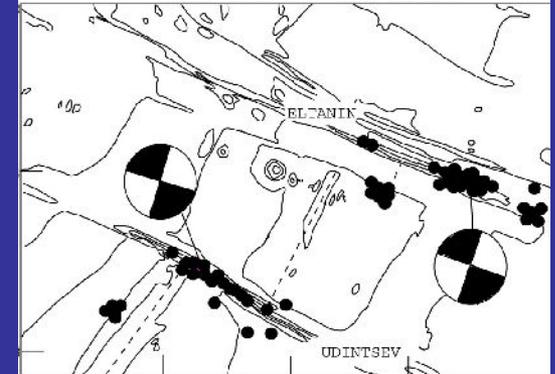
Hyp.: terre mosaïque de n plaques rigides P_i
caractérisées par un vecteur rotation instantanée Ω_i

Données (seulement près des frontières
de plaques):

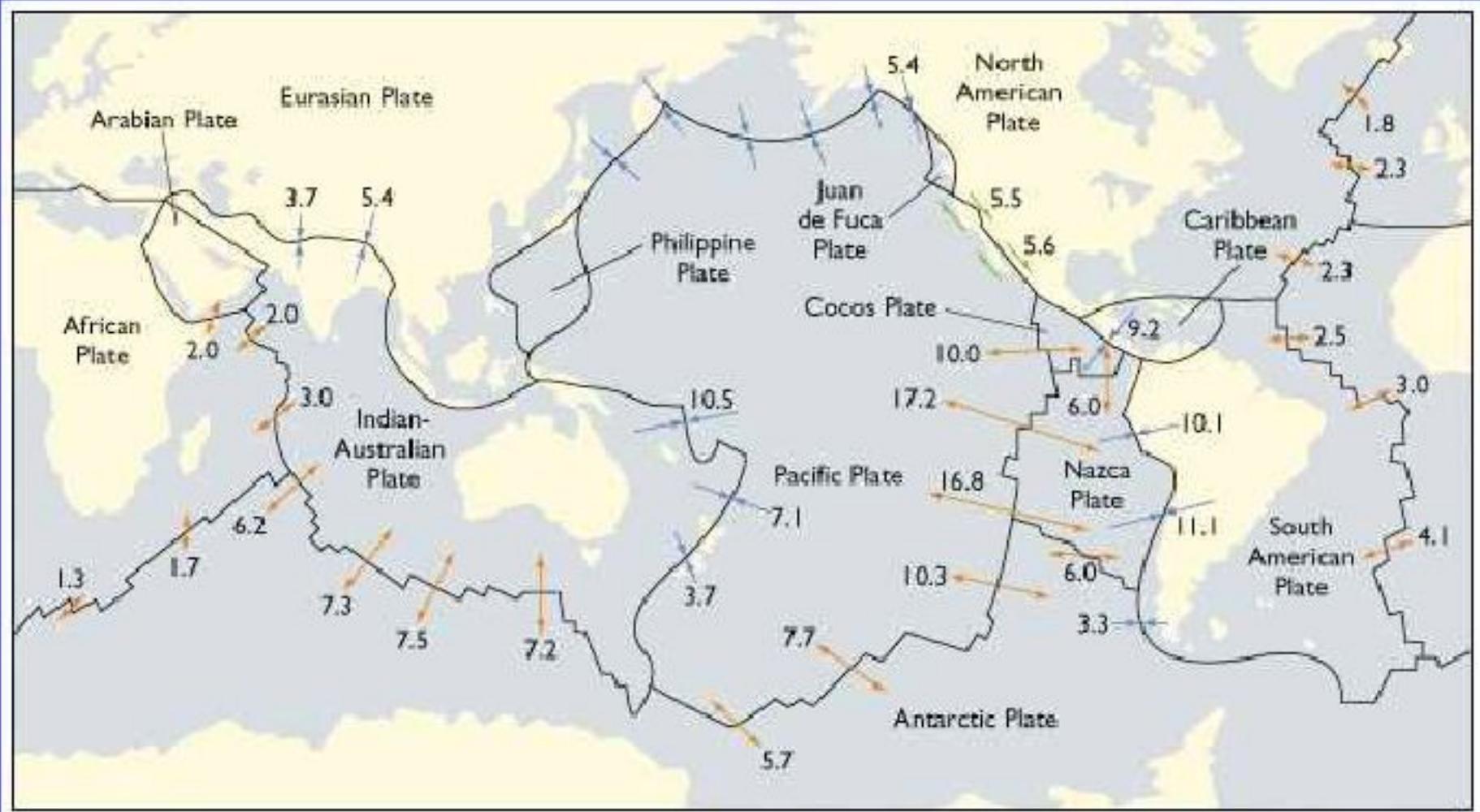
- azimuts des failles transformantes
- projections horizontales des vecteurs glissements des tremblements de terre
- vitesses relatives avec anomalies magnétiques
- Problème inverse: n plaques (1 plaque fixe)

$$V^2 = V_N^2 + V_E^2$$

$$\text{azimut} = \arctg(V_E/V_N)$$



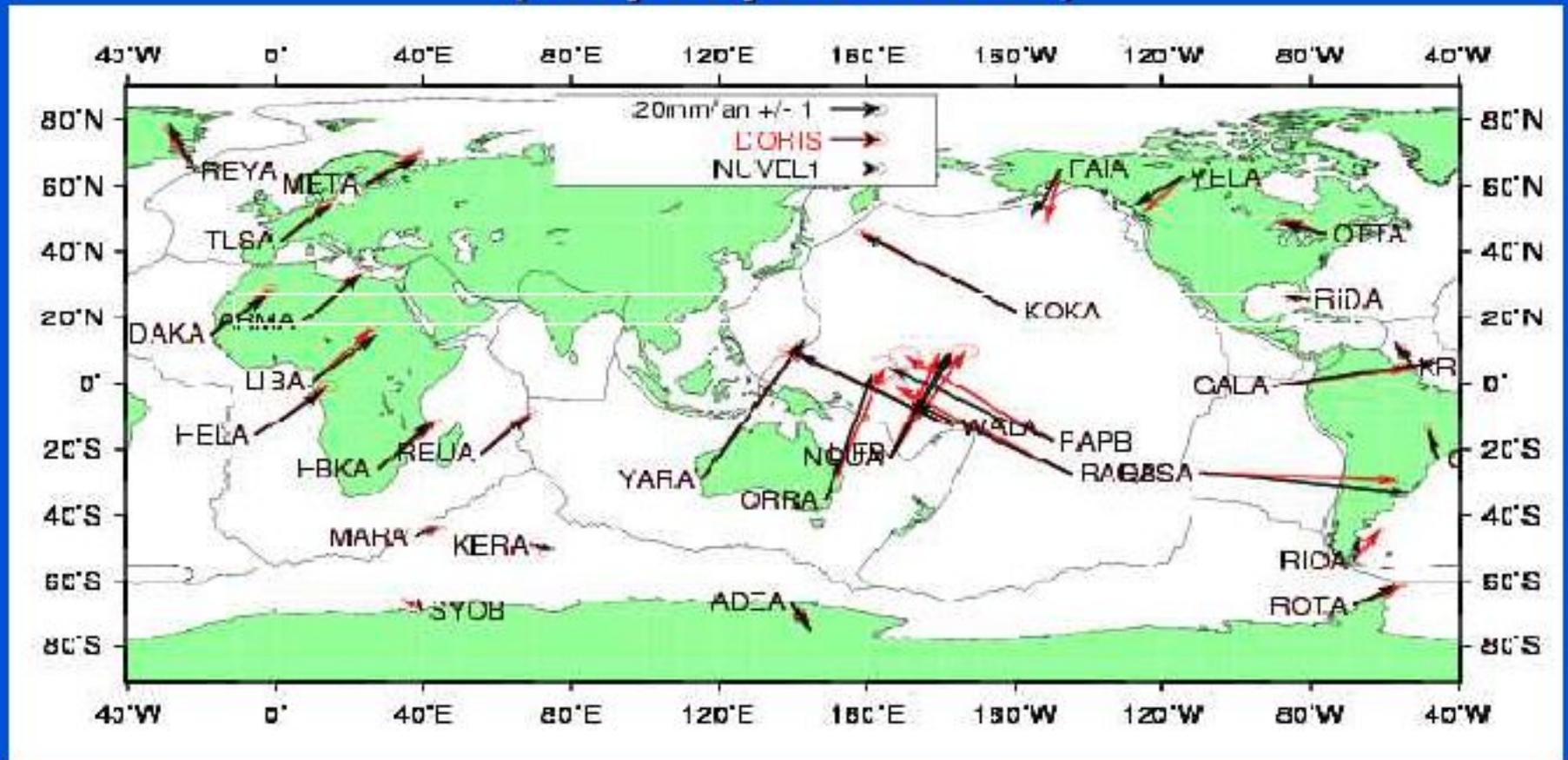
Vitesse relatives (en cm/an) et directions du mouvement des plaques



Mesures par satellite

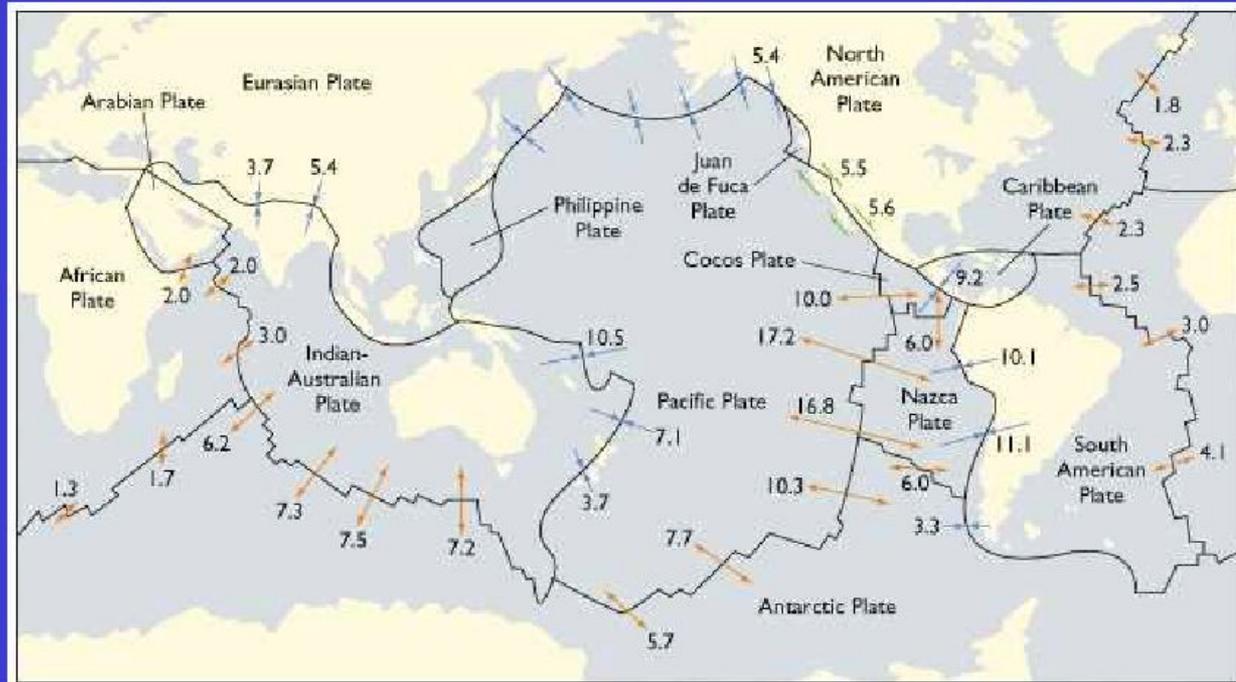


Vitesses relatives des plaques
prédites par le modèle géologique Nuvel1
et observées par le satellite Doris
(en quelques années)



Grande stabilité des mouvements

Vitesses relatives (en cm/an) et directions du mouvement des plaques



Vitesses par rapport à la plaque Antarctique, en degré/Ma
(Molnar et Jordan, JGR, 83, 811, 3331-3354, 1978)

Plaque	ω_x	ω_y	ω_z
Africain	0,110	-0,097	0,035
Arabique	0,332	-0,072	0,158
Caribbe	0,025	-0,058	-0,108
des Cocos	-0,585	-1,237	0,510
Eurasiatique	0,022	-0,064	-0,030
Indo-australienne	0,537	0,345	0,216
de Nazca	-0,058	-0,439	0,415
d'Amér. du N.	0,086	-0,133	-0,130
d'Amér. du S.	-0,067	-0,011	-0,302
Pacifique	-0,070	0,407	-0,873

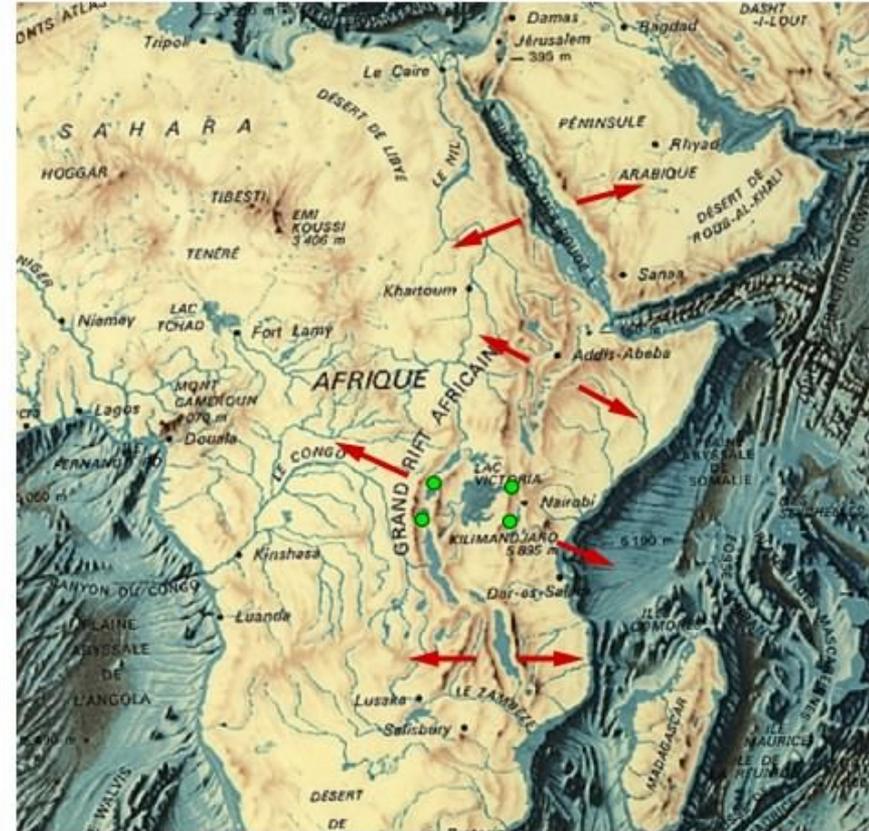
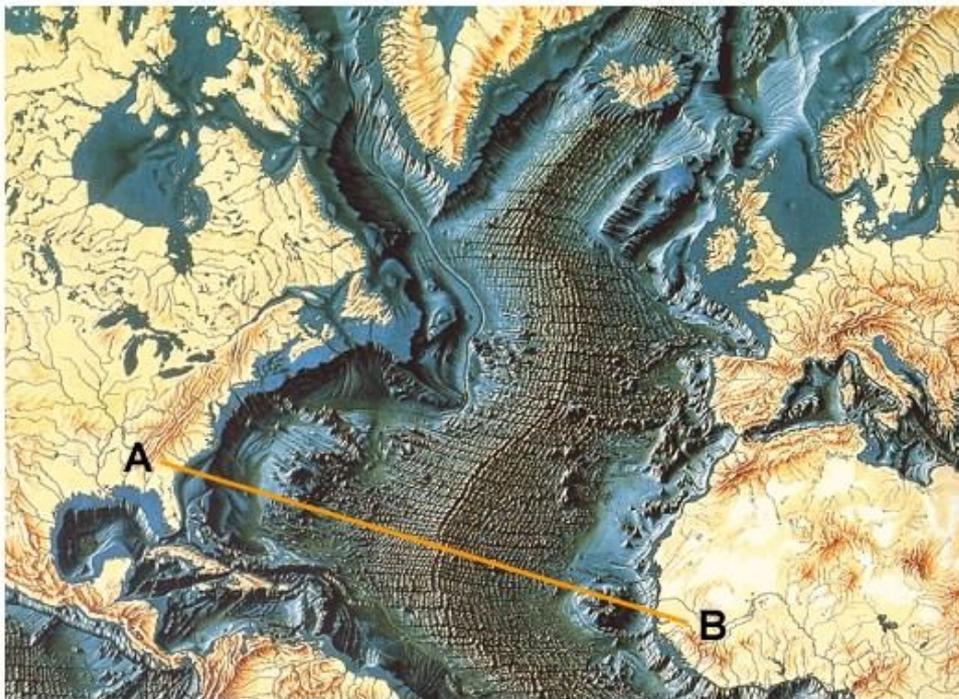
Modèle cinématique global NUVEL-1A

Mouvement des Plaques moyennées sur les 3 derniers 3 Ma

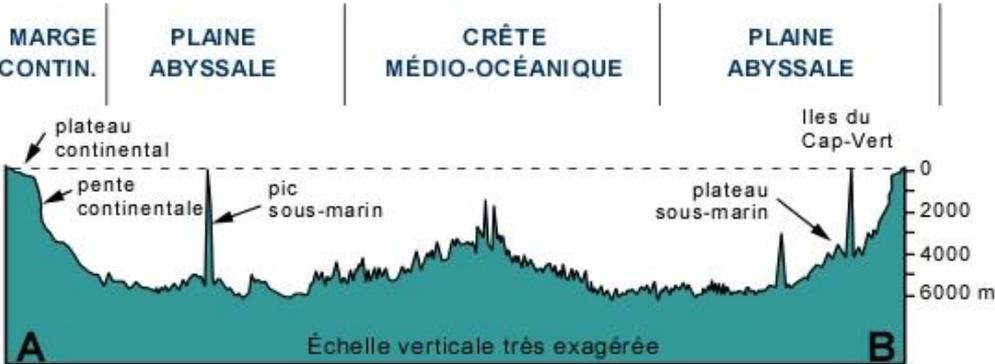
plate	Euler vectors with respect to North America (NA)		
	pole latitude (°N)	longitude (°E)	$ \omega $ (degrees/my)
PACIFIC (PA)	-48.709	101.833	0.7486
AFRICA (AF)	78.807	38.279	0.2380
ANTARCTICA (AN)	60.511	119.619	0.2540
ARABIA (AR)	44.132	25.586	0.5688
AUSTRALIA (AU)	29.112	49.006	0.7579
CARIBBEAN (CA)	74.346	153.892	0.1031
COCOS (CO)	27.883	-120.679	1.3572
EURASIA (EU)	62.408	135.831	0.2137
INDIA (IN)	43.281	29.570	0.5803
NAZCA (NZ)	61.544	-109.781	0.6362
SOUTH AMERICA (SA)	-16.290	121.876	0.1465
JUAN DE FUCA (JF)	-22.417	67.203	0.8297
PHILIPPINE (PH)	-43.986	-19.814	0.8389
RIVERA (RI)	22.821	-109.407	1.8032
SCOTIA (SC)	-43.459	123.120	0.0925
NNR*	2.429	93.965	0.2064

Classification des différentes frontières

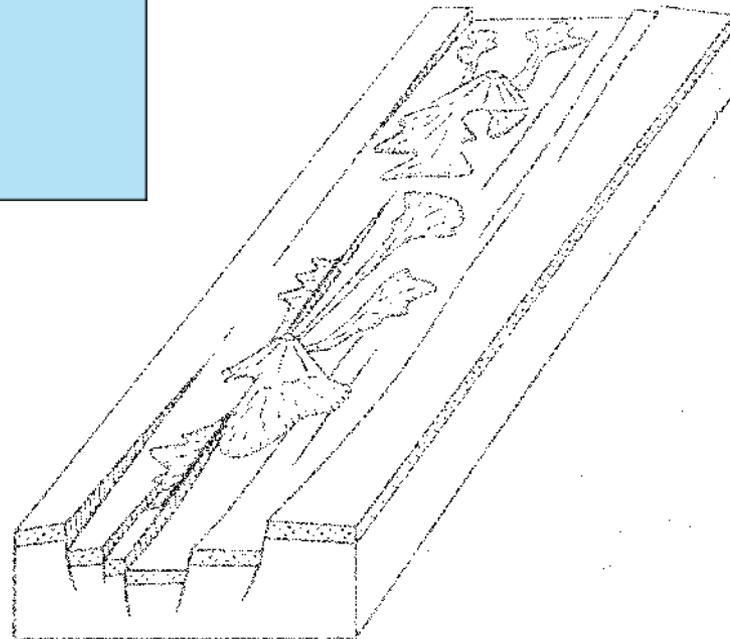
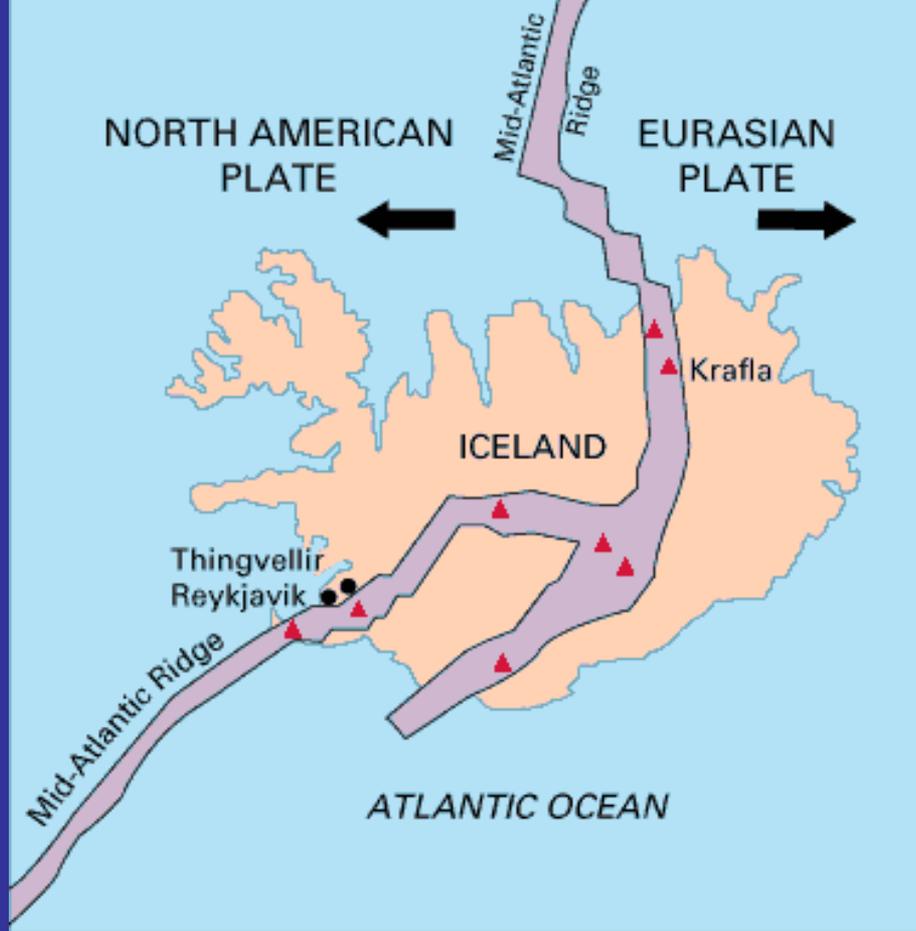
- Divergentes (Dorsales)
- Failles Transformantes
- Convergentes (Subduction - Collision)

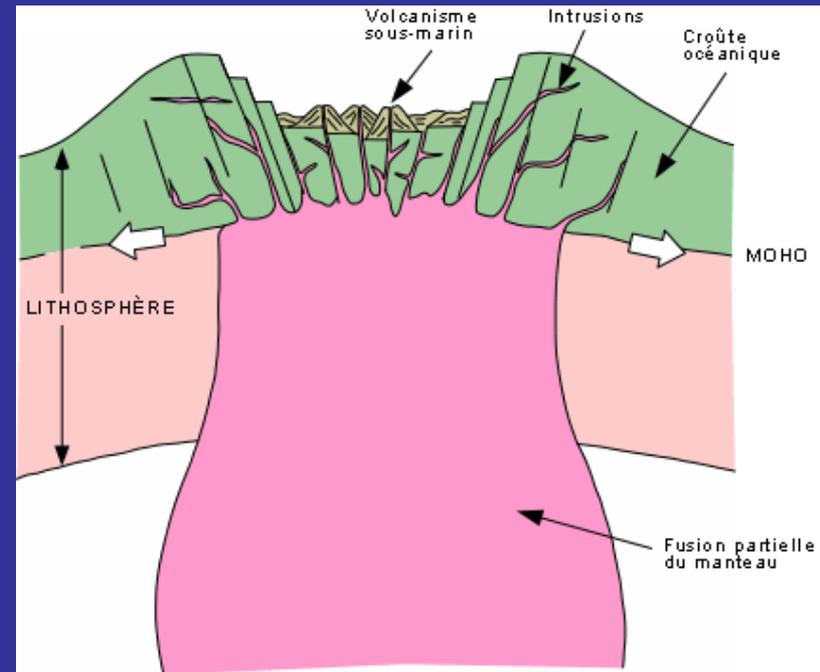
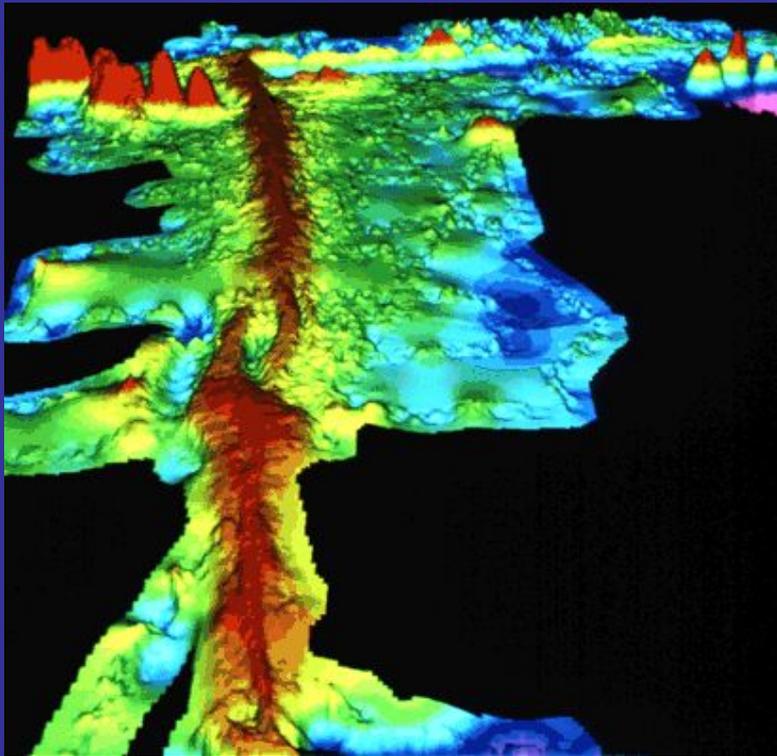


Le Grand Rift africain entaille l'est du continent au sud de la Mer Rouge. Il s'étend, du canal du Mozambique au sud, jusqu'aux bouches de la Mer Rouge au nord; il se divise en deux branches au nord du lac Malawi. On y est à un stade un peu plus avancé que le long du Rio Grande. Déjà des vallées profondes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



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





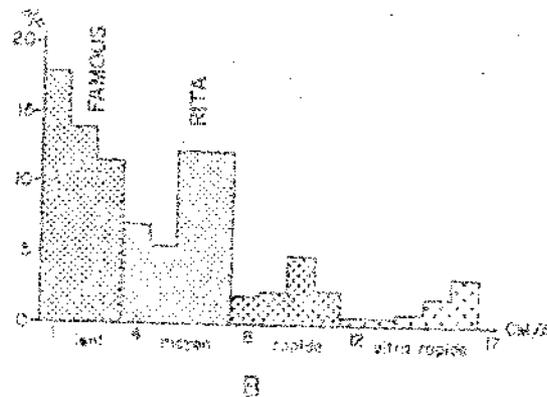
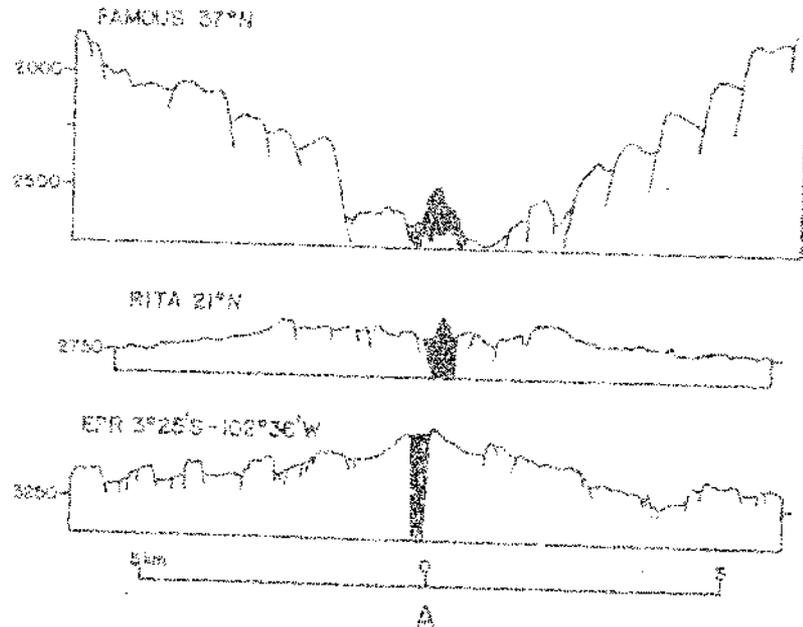
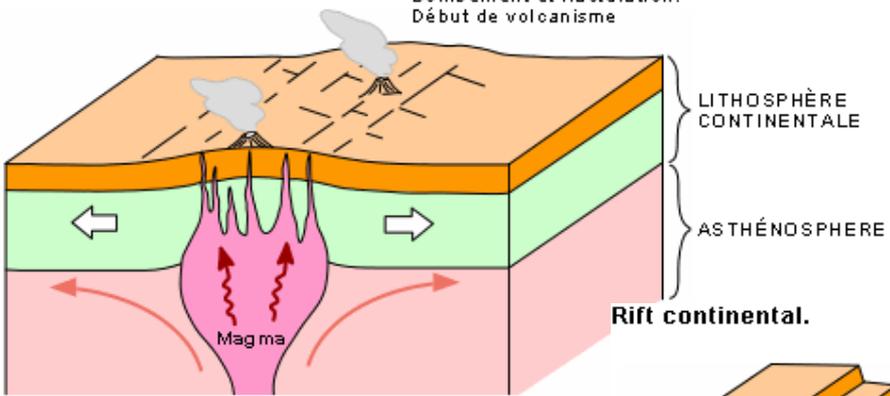


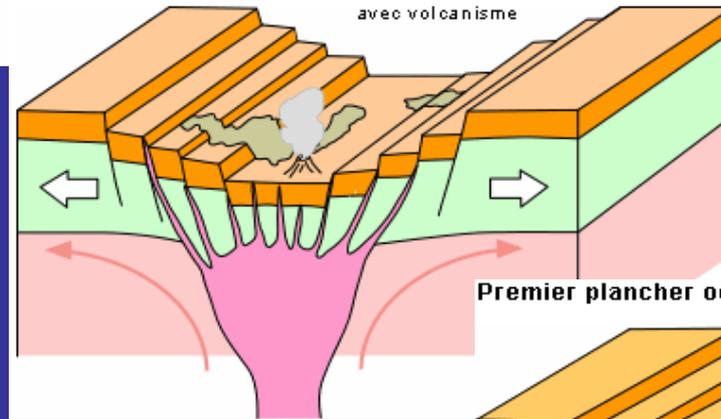
FIG. 27 — A) Cette figure montre trois coupes morphologiques effectuées à travers trois dorsales océaniques dont les vitesses d'expansion sont différentes. En haut la dorsale Nord-Atlantique, au niveau de la zone Famous (vitesse d'expansion : 2 cm/an), au milieu la zone située au sud du golfe de Californie (vitesse 6 cm/an), enfin, en bas l'Est Pacific Rise au sud où la vitesse est de 10 cm/an. On notera que si, au niveau des dorsales lentes, il existe une vallée centrale effondrée, cette structure disparaît pour faire place à un bombement au niveau des dorsales rapides. Par contre, dans tous les cas, les failles sont de type normal. B) On a tracé l'histogramme de répartition des vitesses d'expansion des différentes portions de dorsales océaniques. Comme on peut le constater, les vitesses varient de 0,5 à 17 cm/an, soit une variation d'un facteur 35 ! (d'après J. Francheteau).

Amorce d'un rift continental.

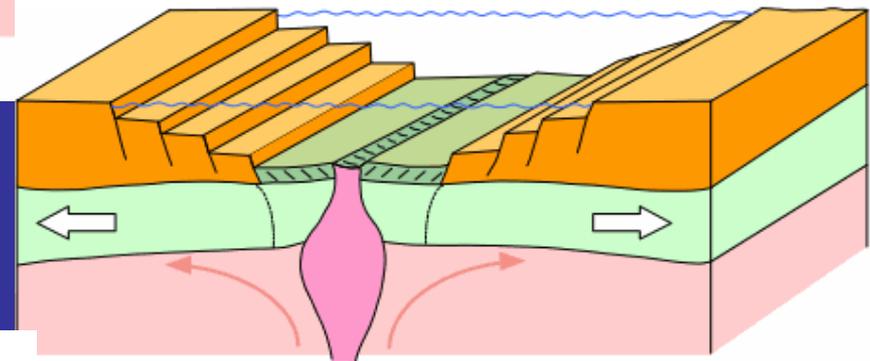
Bombement et fracturation.
Début de volcanisme



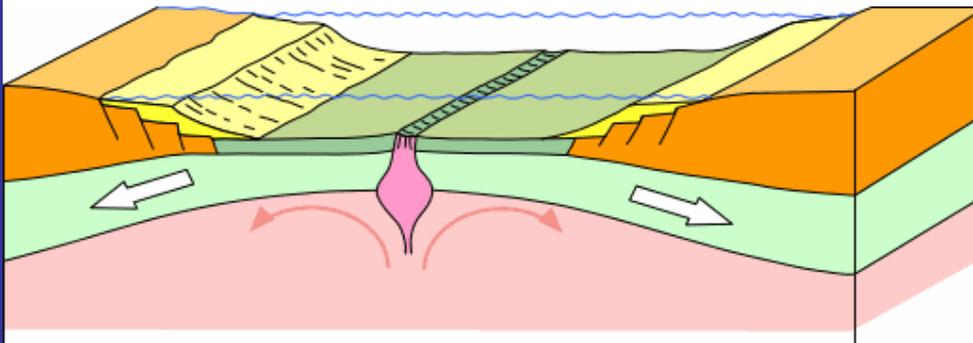
Rift continental
avec volcanisme



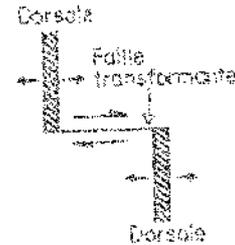
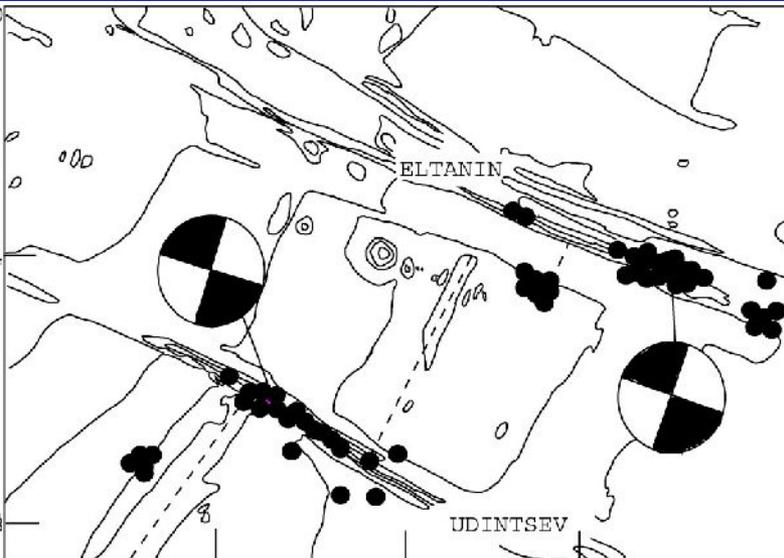
Premier plancher océanique - Mer linéaire.



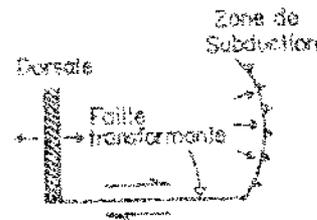
Océan de type Atlantique



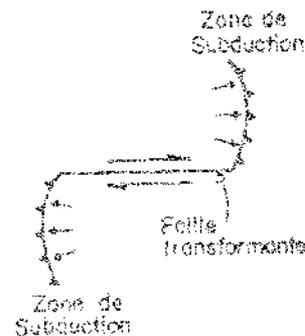
Failles Transformantes



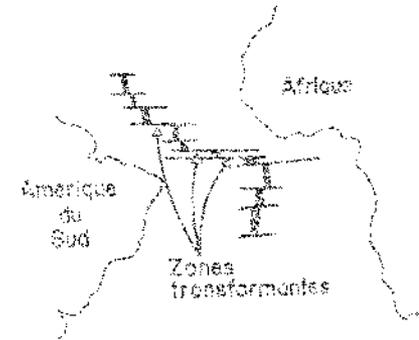
Dorsale - Dorsale (D-D)



Dorsale - Subduction (D-S)



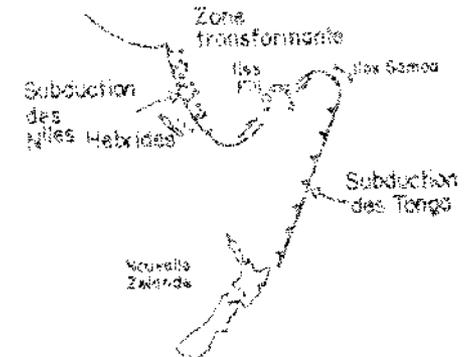
Subduction - Subduction (S-S)



Dorsale Médio Atlantique ou niveau de l'équateur (D-D)



Zone transformante (D-S) entre la subduction aléoutienne et la dorsale Juan de Fuca



Zone transformante (S-S) des Fidji



Aujourd'hui

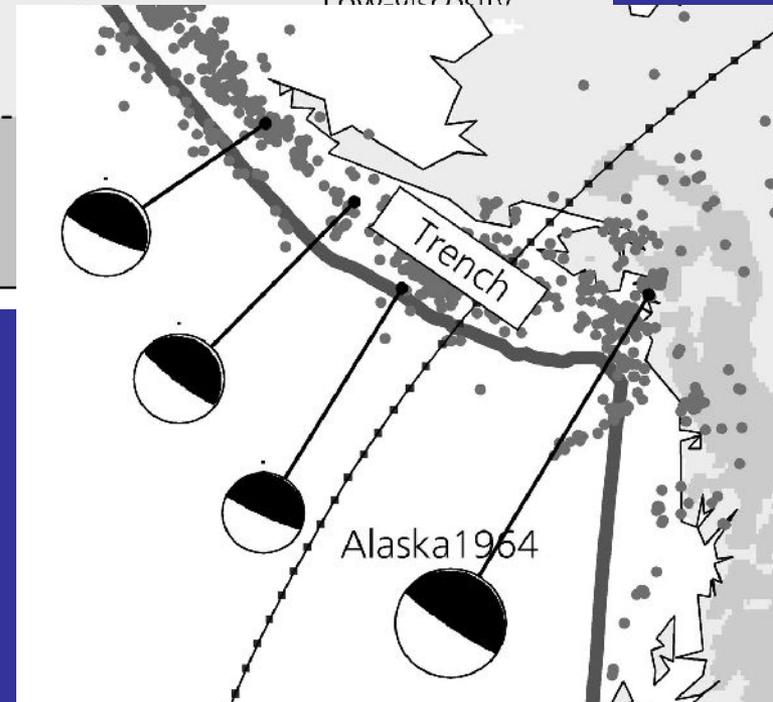
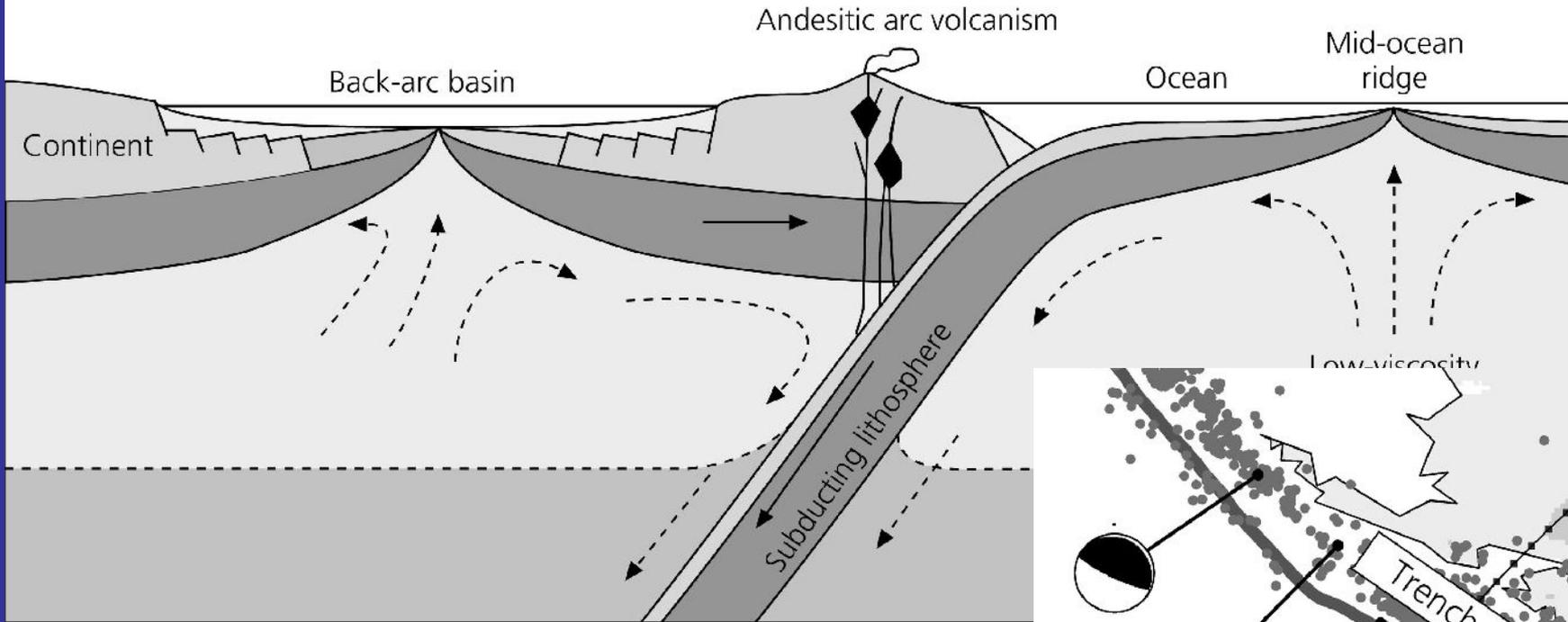


Dans 10 millions d'années

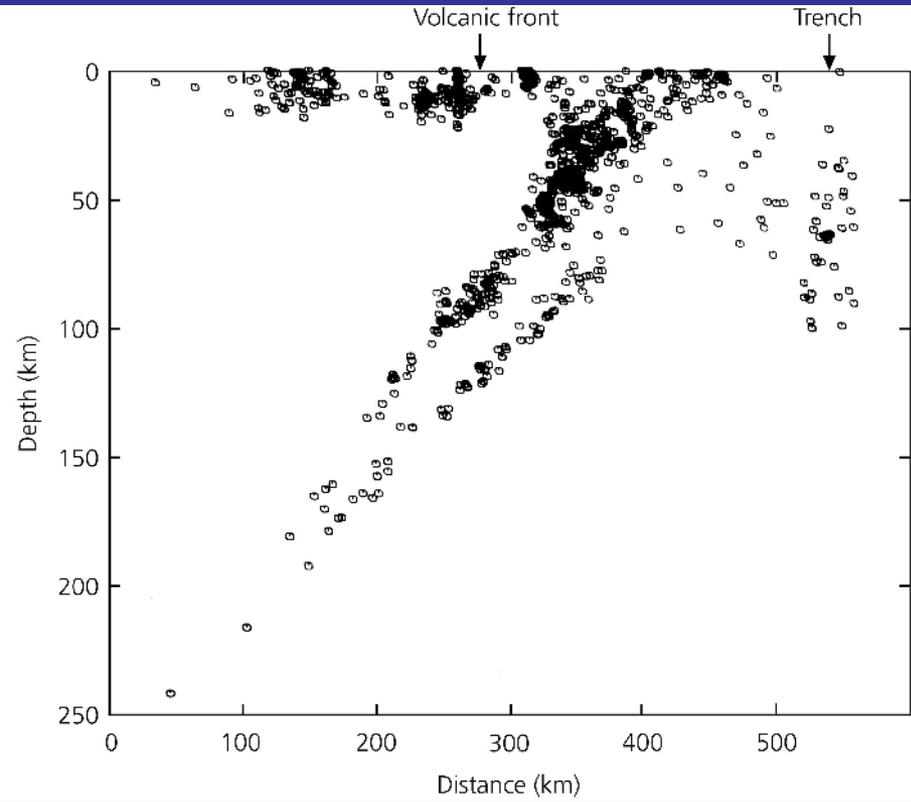


Zones de subduction

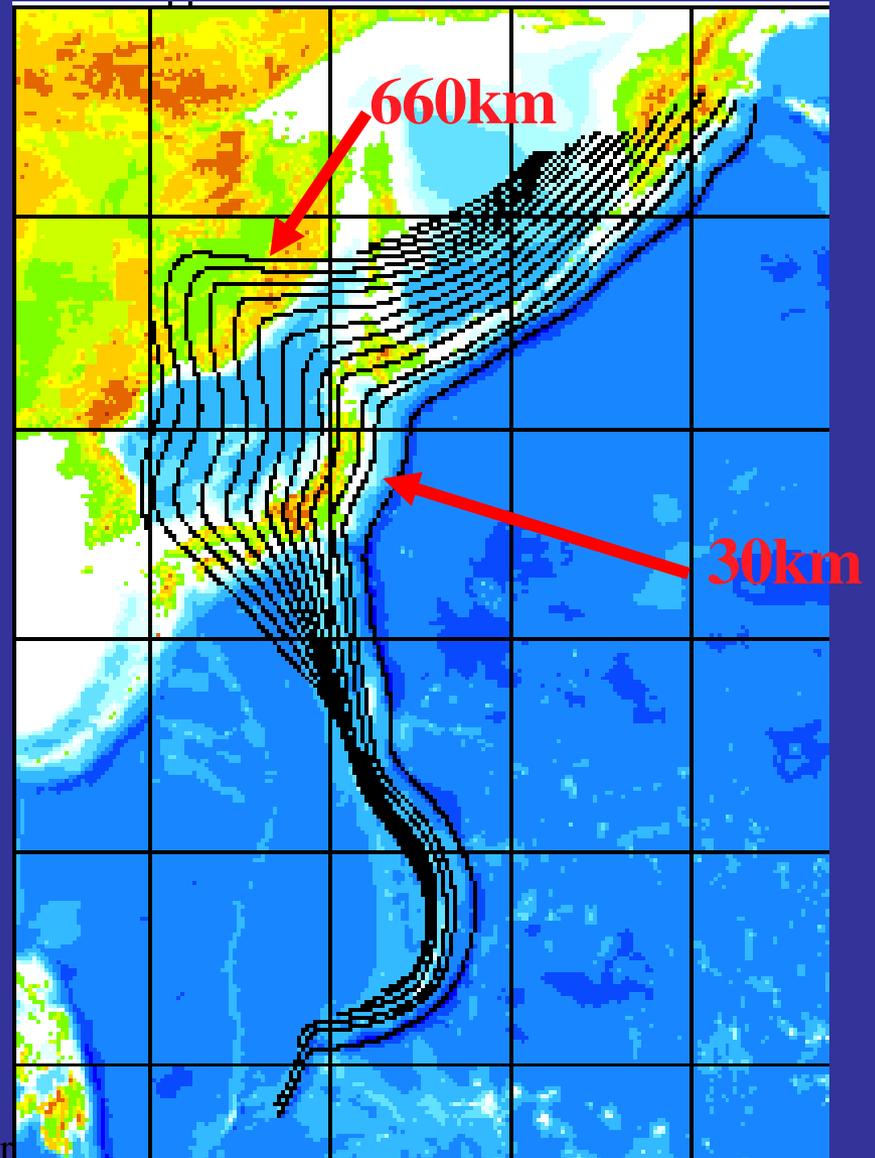
Figure 5.4-1: Cartoon of a subduction zone.



Double zone sismique



Pendage du slab



Zones de subduction

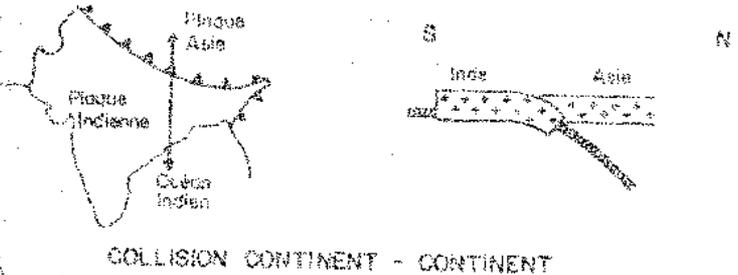
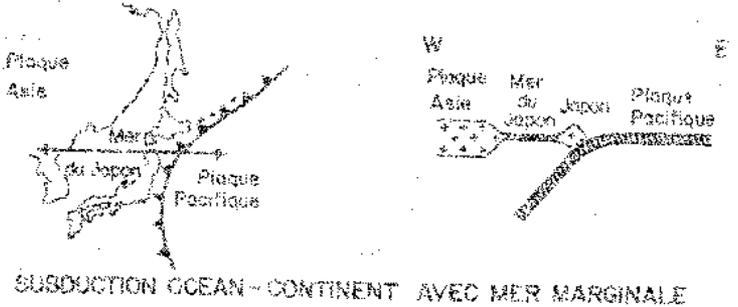
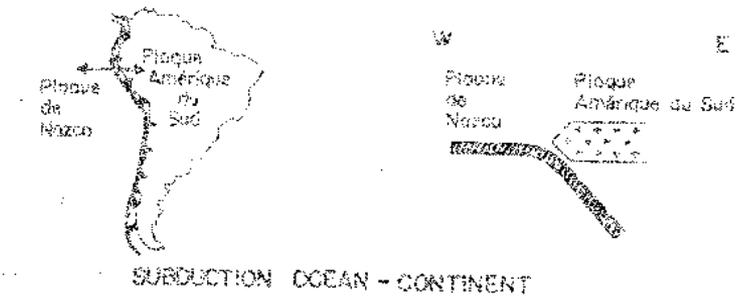
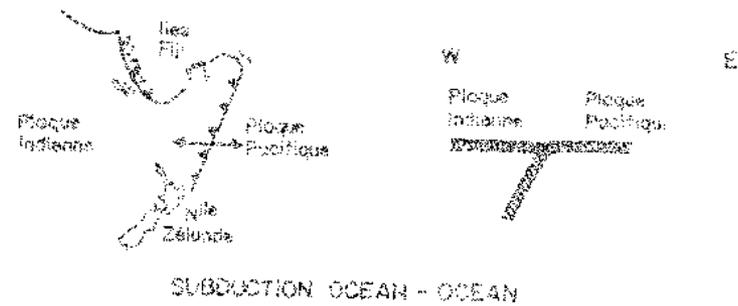
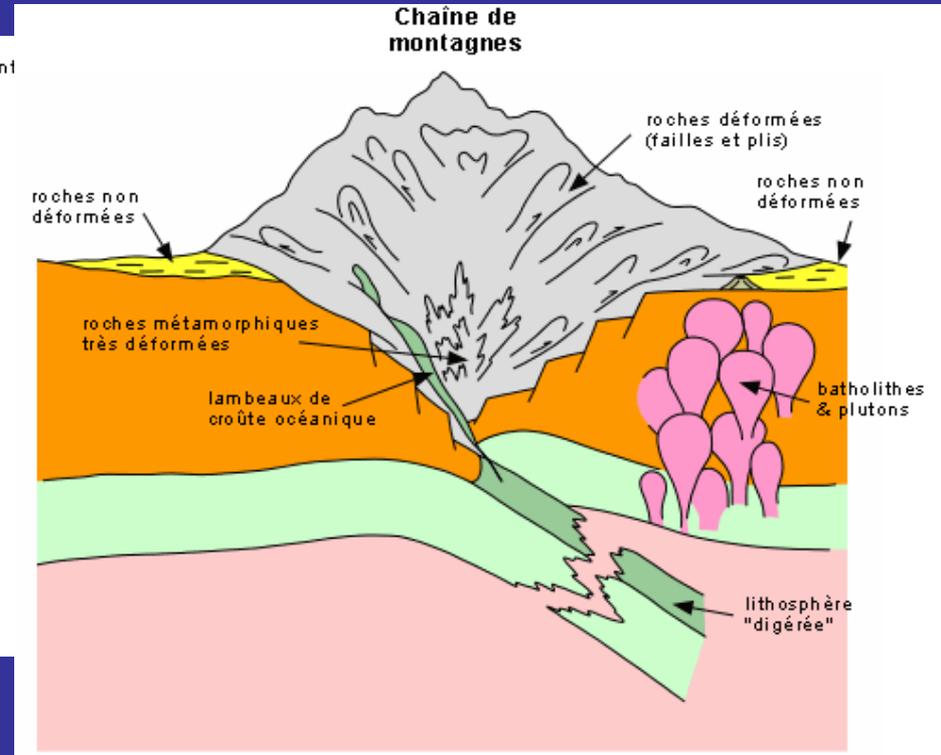
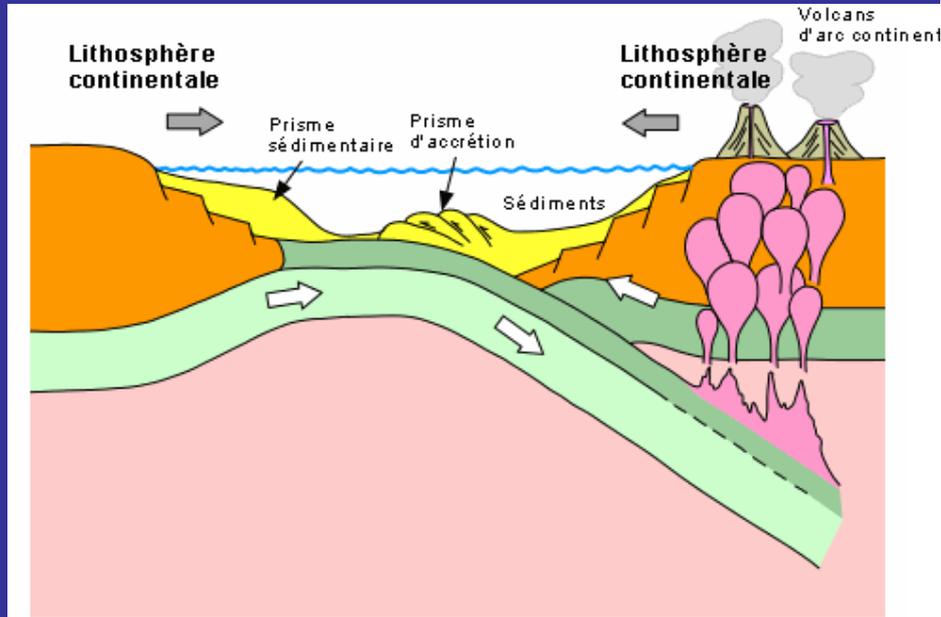
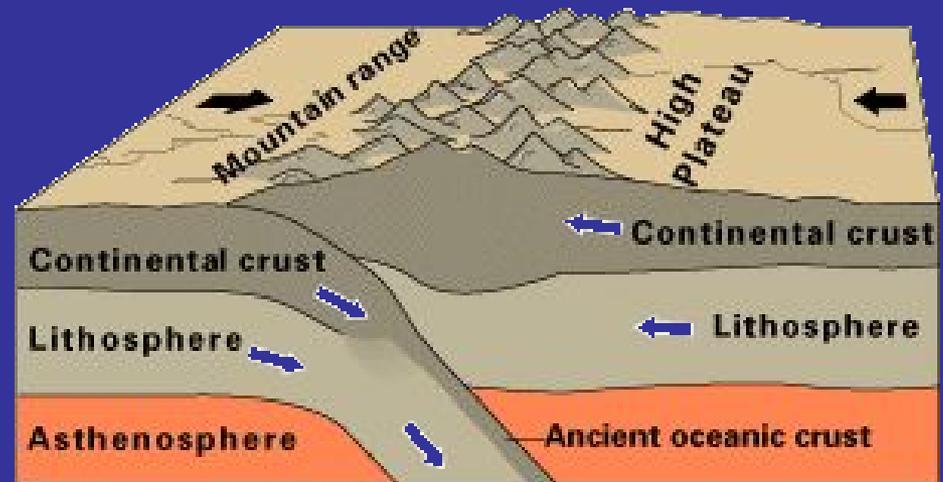
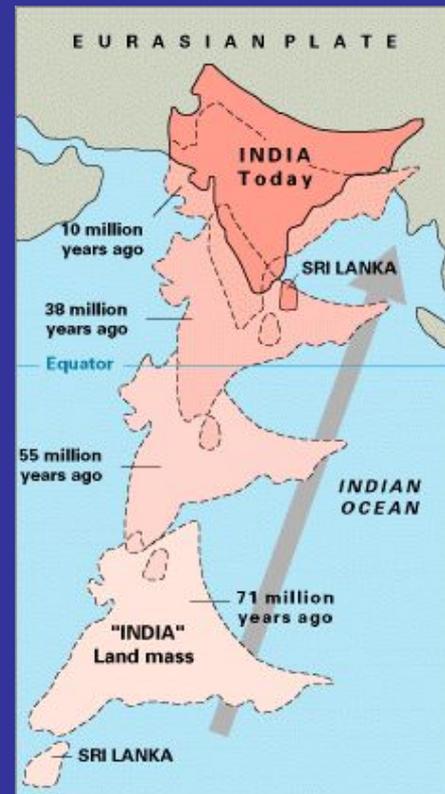


Fig. 18 — Cette série de schémas illustre les différentes topologies qui peuvent exister lors des phénomènes de subduction. Nous avons choisi de représenter chaque cas par un exemple concret et pour chacun nous avons dessiné la situation en carte et en coupe. La coupe correspond à la ligne dessinée sur la carte avec flèches. Elle indique le prolongement du plan de Benioff. Les quatre grands types représentés sont les subductions océan-océan, océan-continent sans et avec mer marginale, enfin, le cas un peu particulier de la collision continent-continent.

Zones de collision

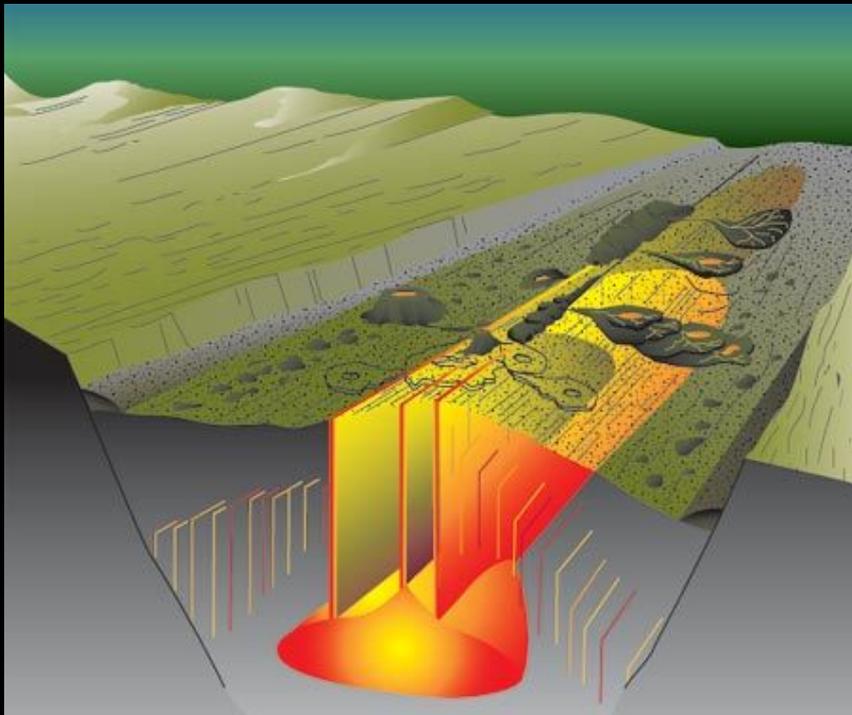




Centres d'expansion et zones de subduction

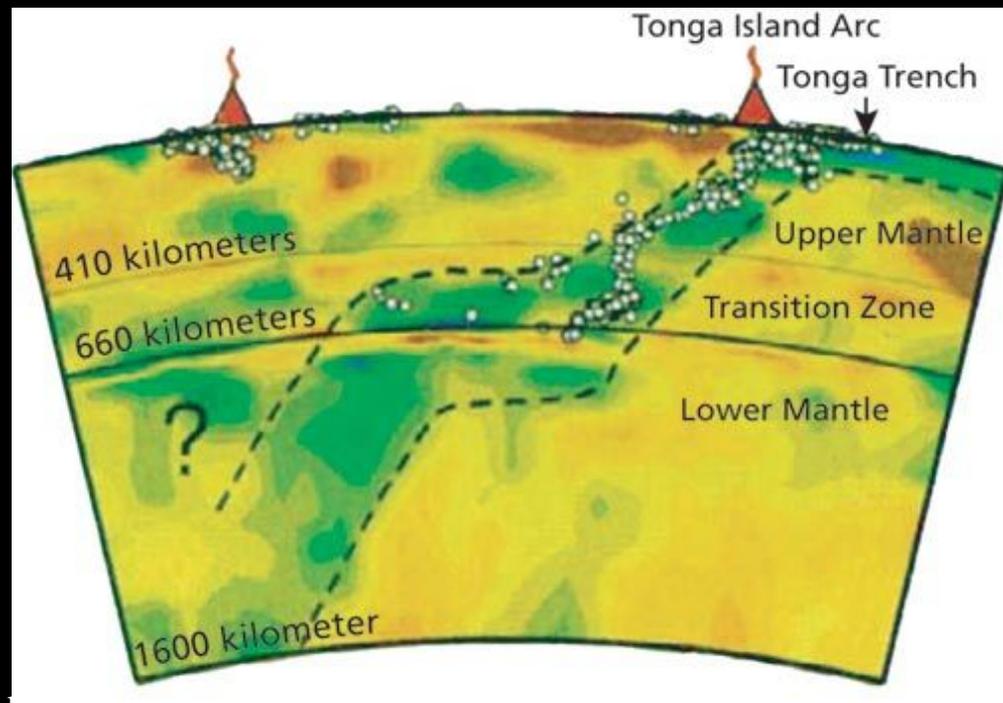
Comprendre cinématique & dynamique des processus aux frontières

Systèmes Océaniques plus simples que les continentaux



2007

Smith & Cann, 2004



Machine terrestre

Van der Hilst, 1995

AU-DELÀ DE LA TECTONIQUE DES PLAQUES:

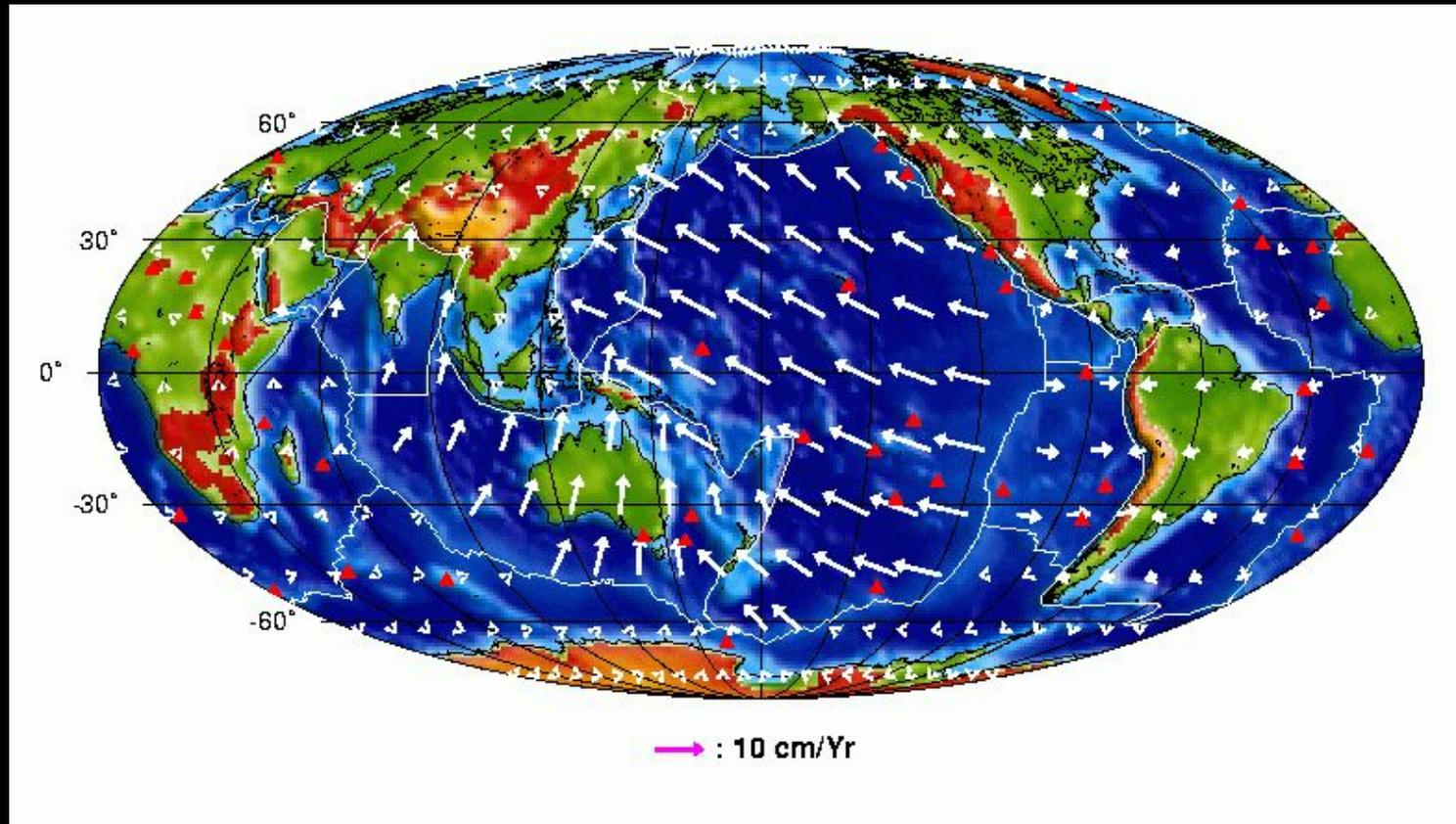
LES PANACHES MANTELLIQUES



2007

Machine terrestre

Tectonique des Plaques

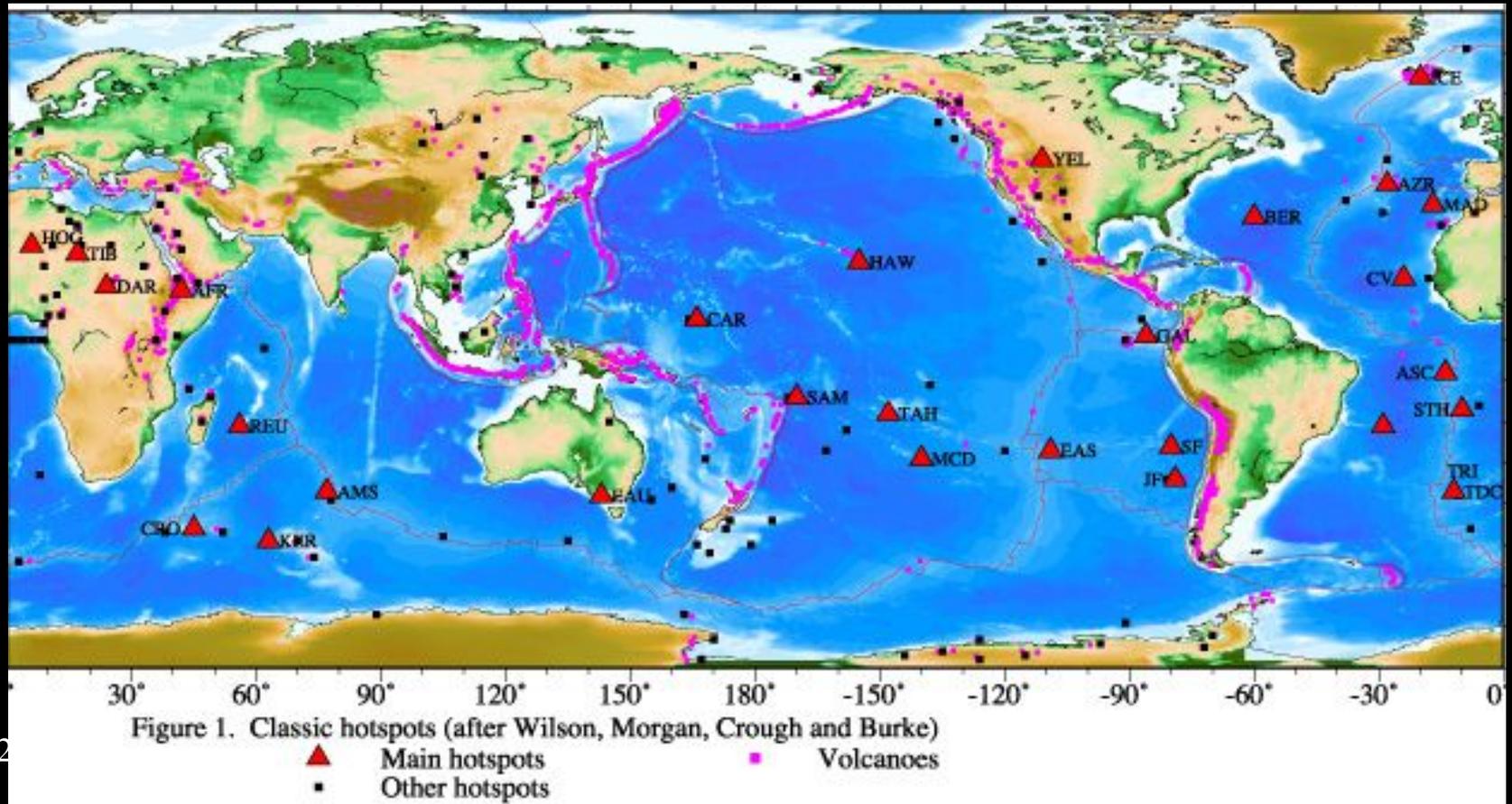


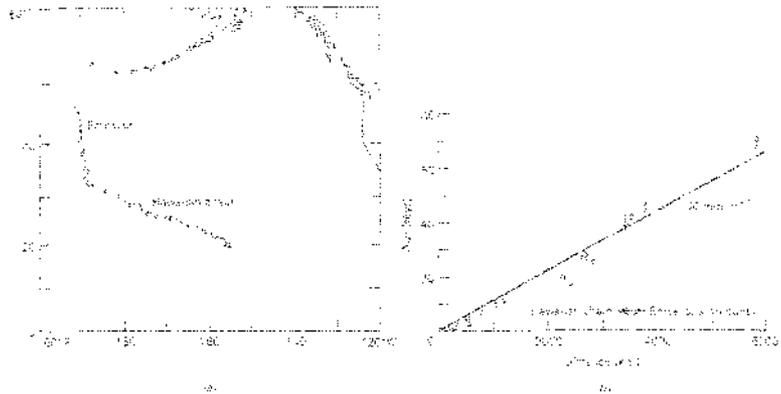
TYPES DE POINTS CHAUDS (HOTSPOTS):

INTRAPLAQUE CONTINENTAL (Afar, Yellowstone,...)

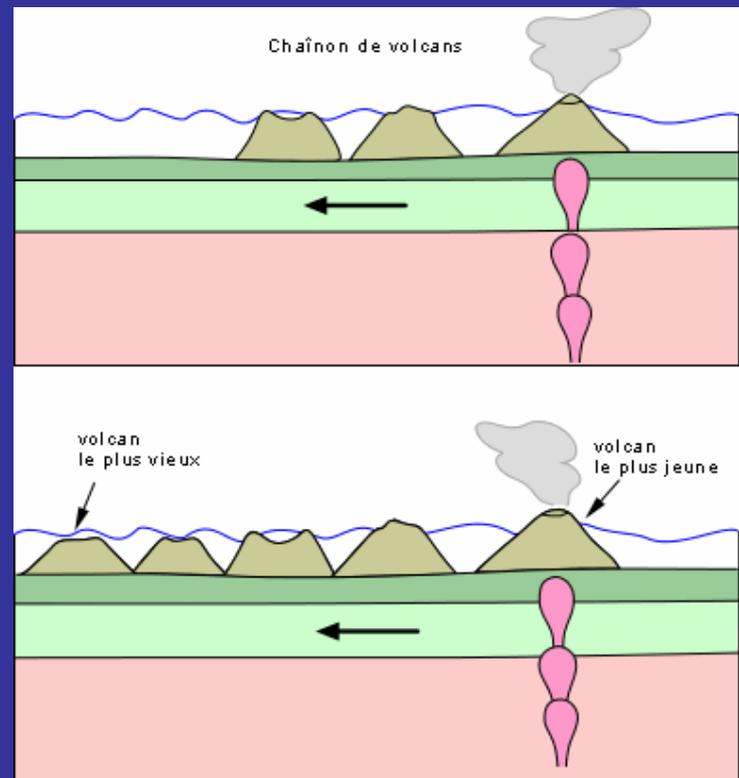
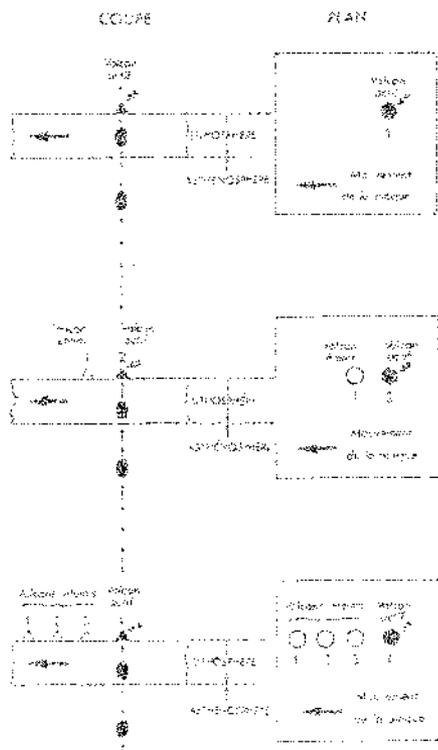
INTRAPLAQUE OCEANIQUE (Réunion, Hawaii,...)

SUR ou PROCHE DORSALE (Islande, Açores, Pâques...)

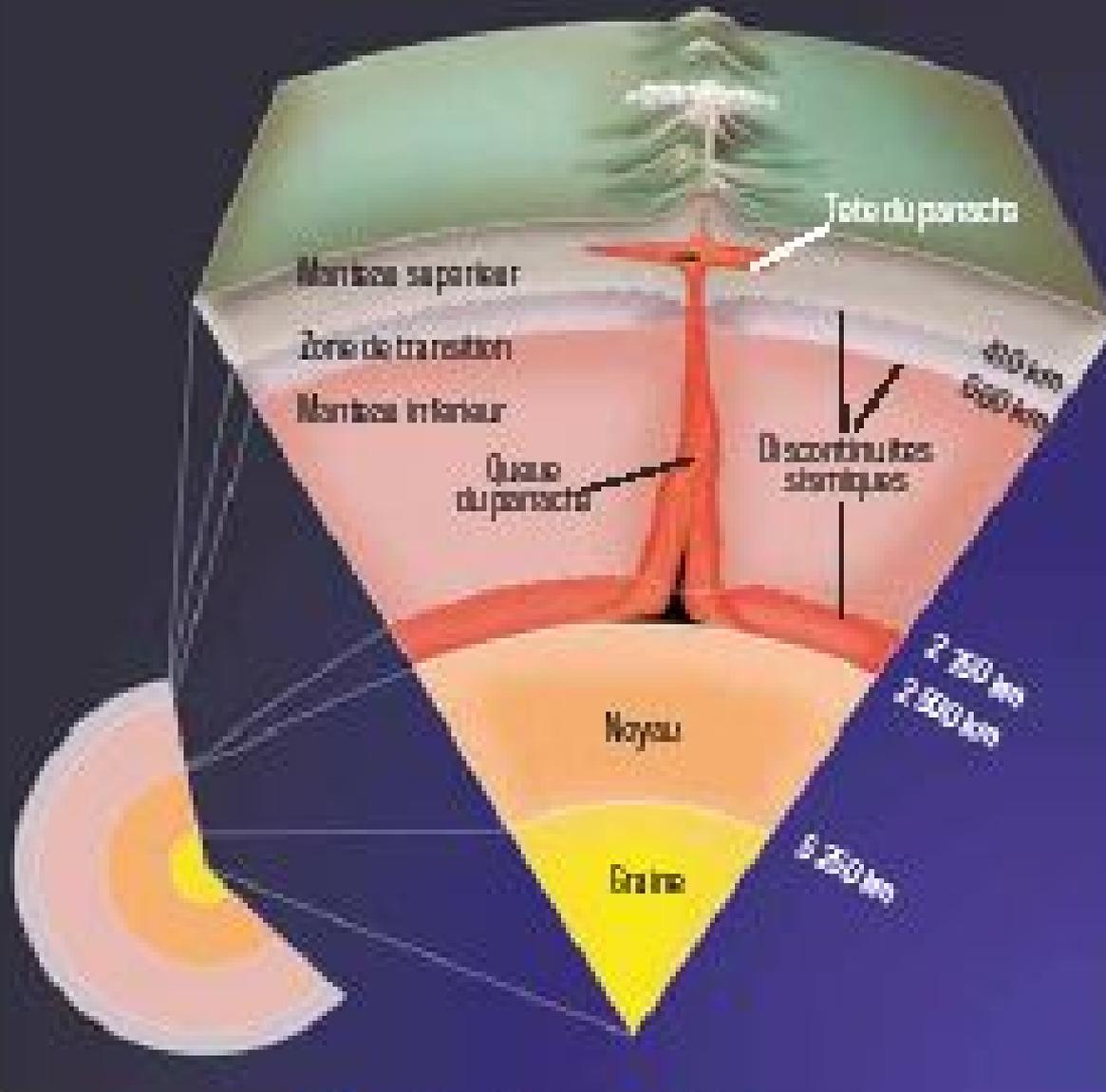




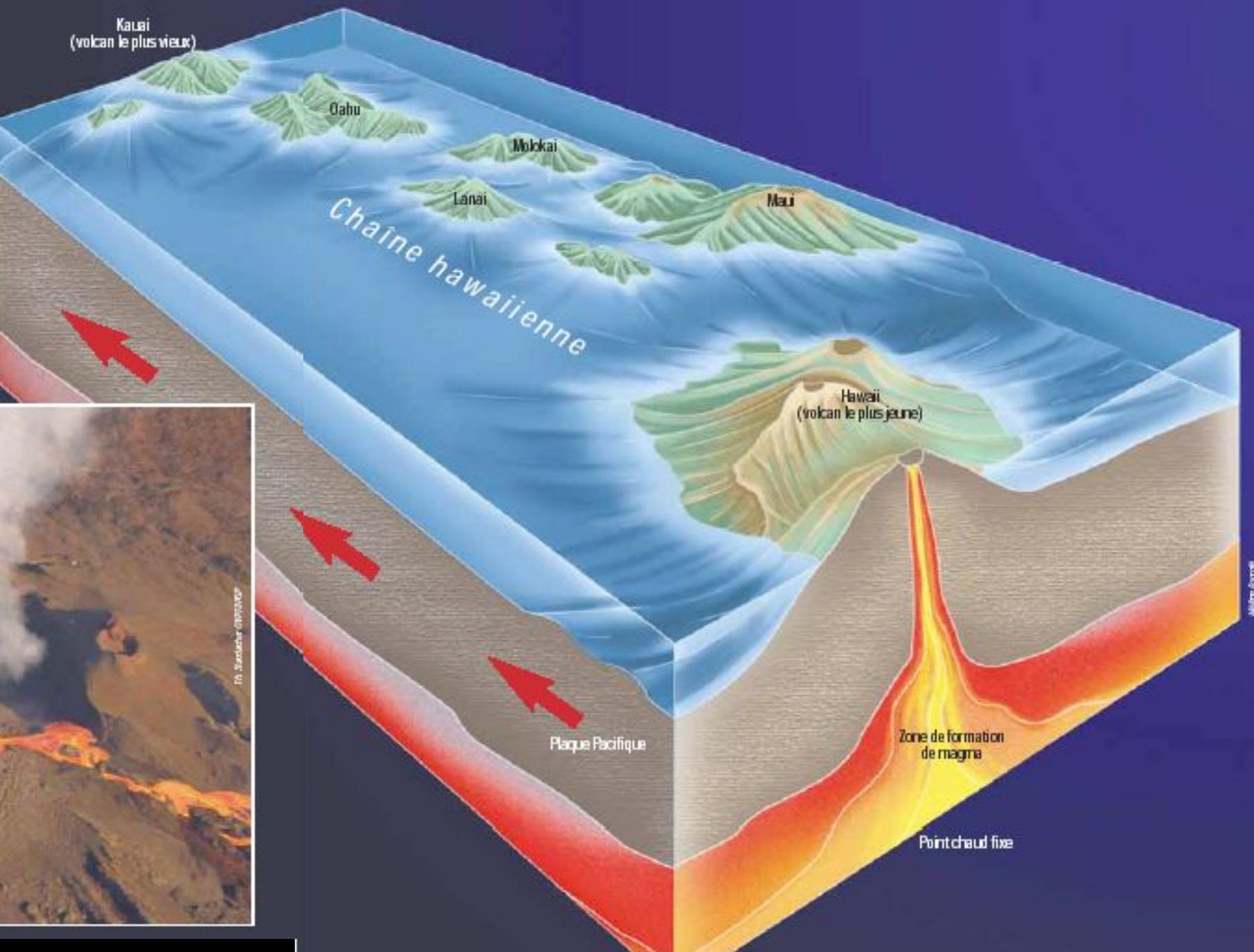
(a) The Hawaiian-Emperor Chain of islands and seamounts. (b) The ages of volcanic rocks on the islands and seamounts as a function of the distance from the center of active volcanism on the island of Hawaii.



Modèle qualitatif



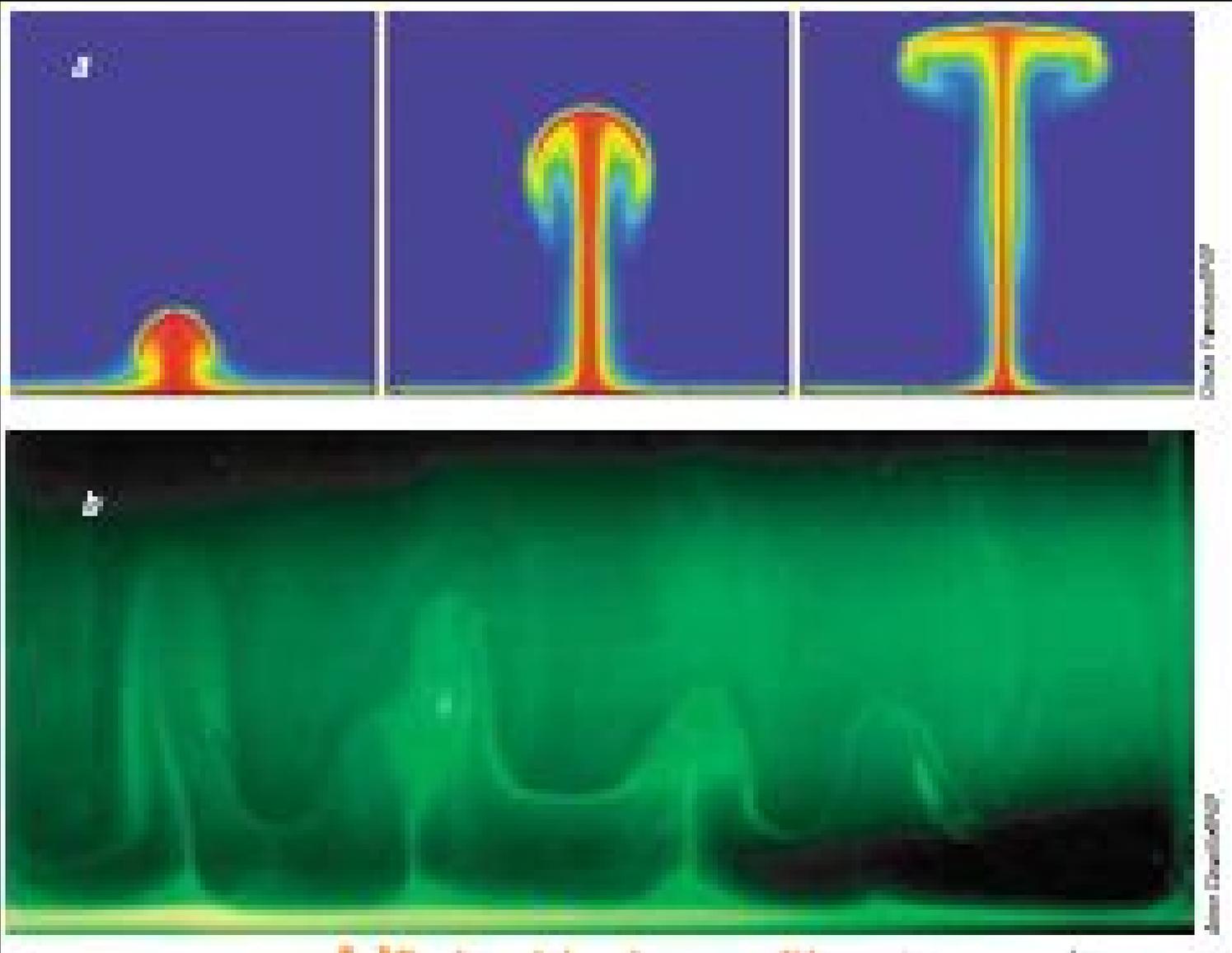
Adrian P. ...



Dr. Sandrine Gervais

Walter Bourne

Naissance, vie et mort d'un panache



Christophe Farnetani

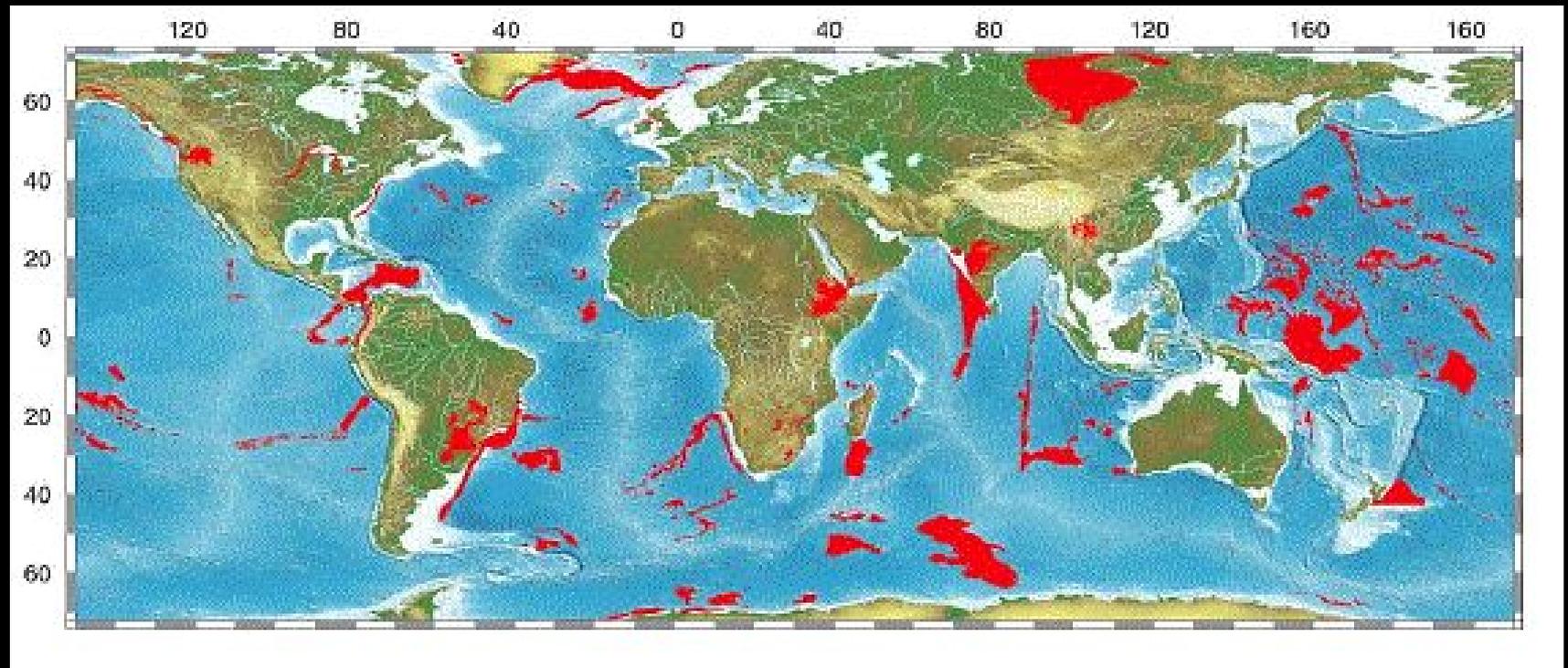
Christophe Farnetani

2007

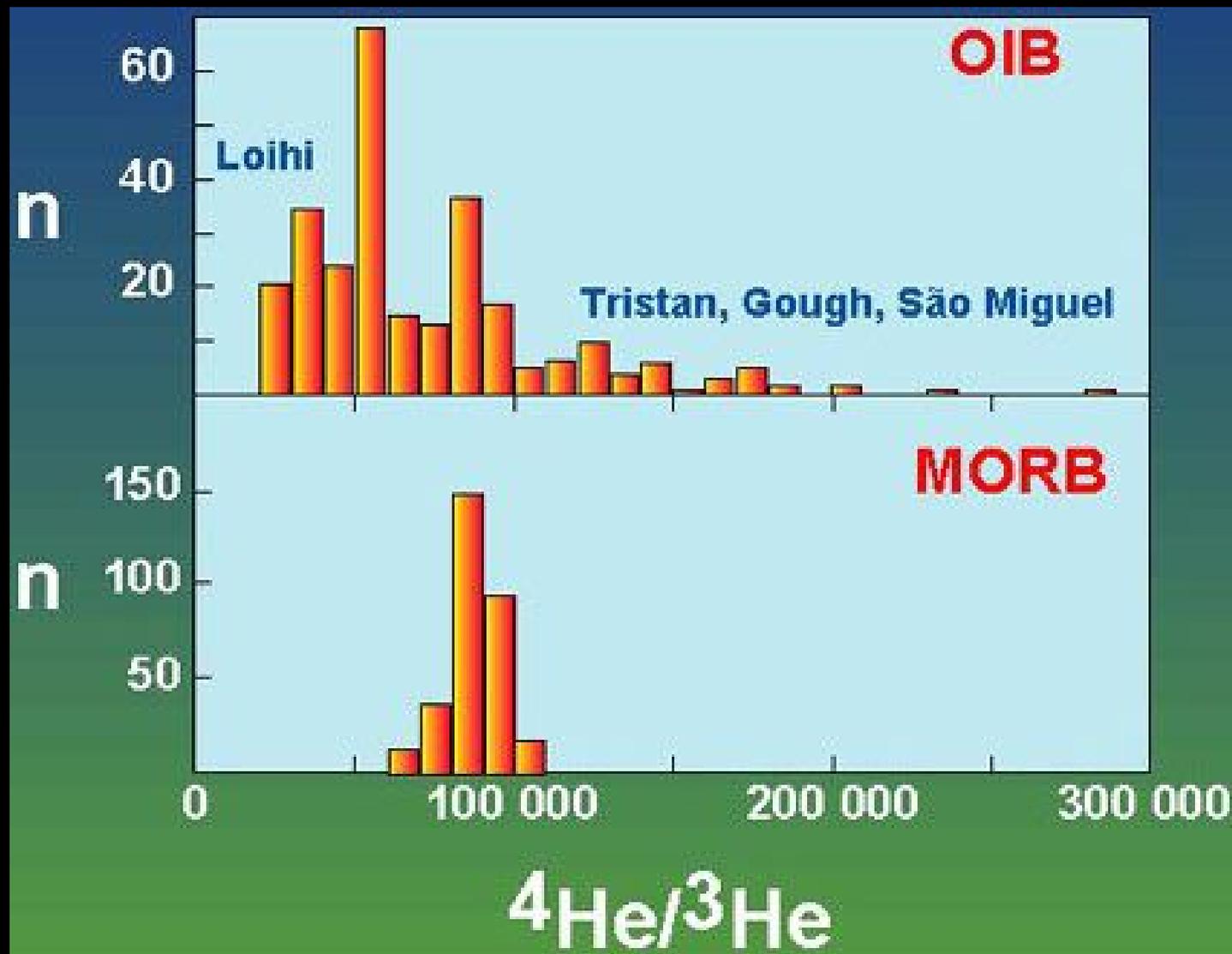
Machine terrestre

Farnetani (haut), Davaille (bas), IPG Paris

LIP: Large Igneous Provinces: Grandes Provinces Ignées



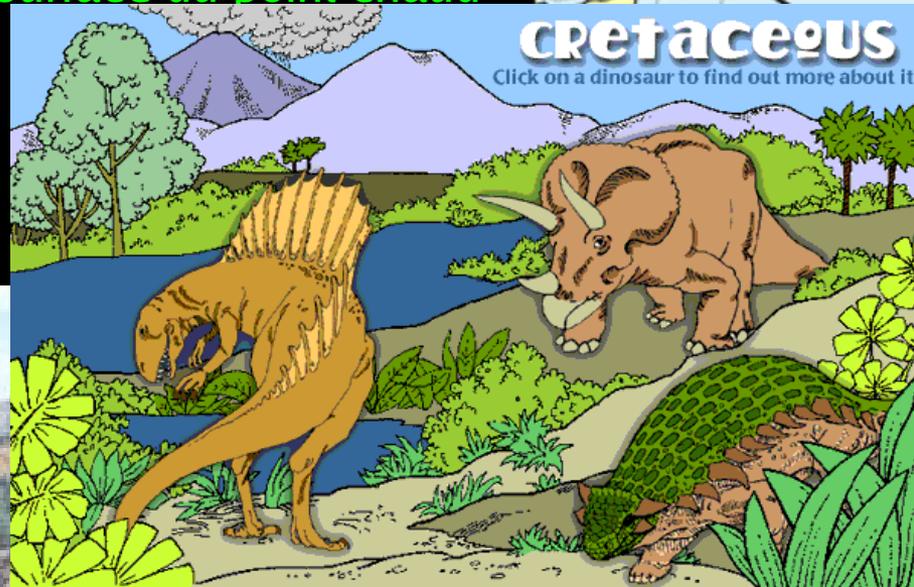
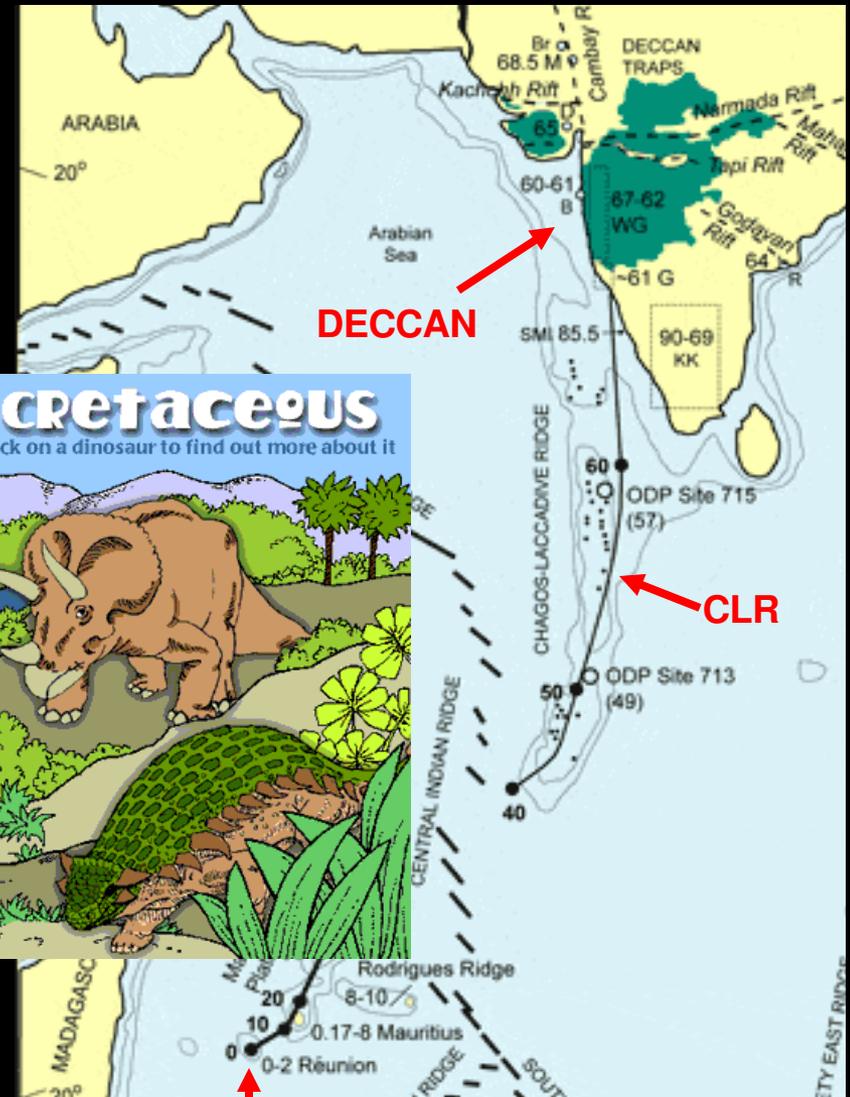
Basaltes: 2 Types de signature géochimiques



LIP:Grandes Provinces Ignées

DECCAN TRAPS OF INDIA

- Origine du point chaud de la Réunion situé sous l'Inde India au Crétacé
- Plusieurs kilomètres d'épaisseur
- CLR serait la trace en surface du point chaud



1,200-m-thick exposed section through Deccan flood basalts (H. Steh)

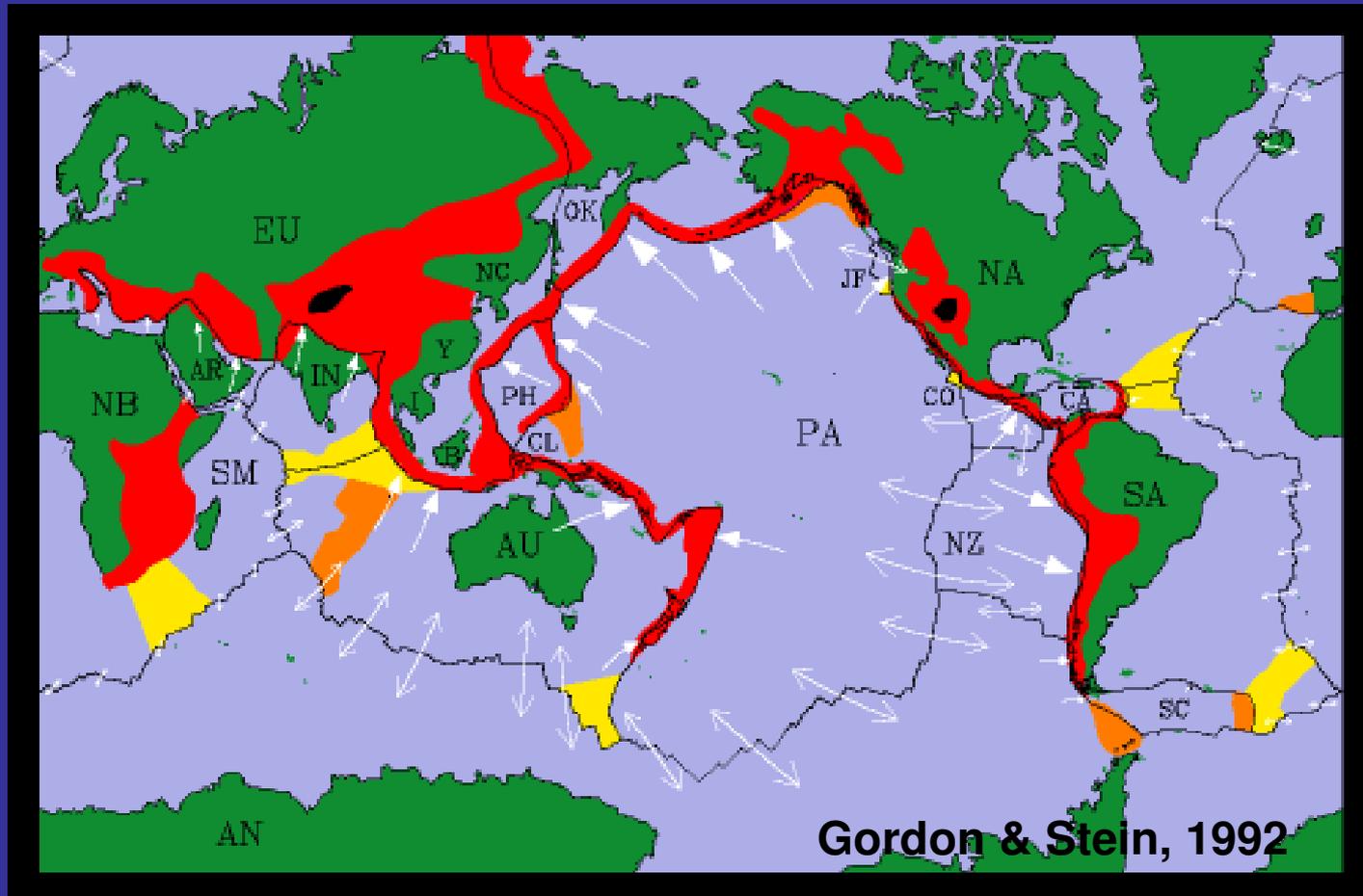
Machine terrestre

PRESENT REUNION HOTSPOT

PANACHES

- Inexpliqués par Tectonique des plaques
- Permettent de définir un repère absolu
- Origine en profondeur?
- Rôle géodynamique, biologique?

Frontières de plaques: Généralement connues mais incomplètement



En certains endroits: Océan Indien Méditerranée, NO
Asie, etc. frontières de plaques mal définies

**Points Triples
évoluent et
migrent avec le
temps**

**Kula-Farallon-
Pacific PT migre**

**La Plaque Kula
disparaît**

**Farallon se
divise en
plaques Juan de
Fuca, Rivera, et
Cocos**

**Les centres
d'expansion de
Cocos-Nazca se
forment**

QuickTime® et un
dcompresseur Animation
sont requis pour visionner cette image.

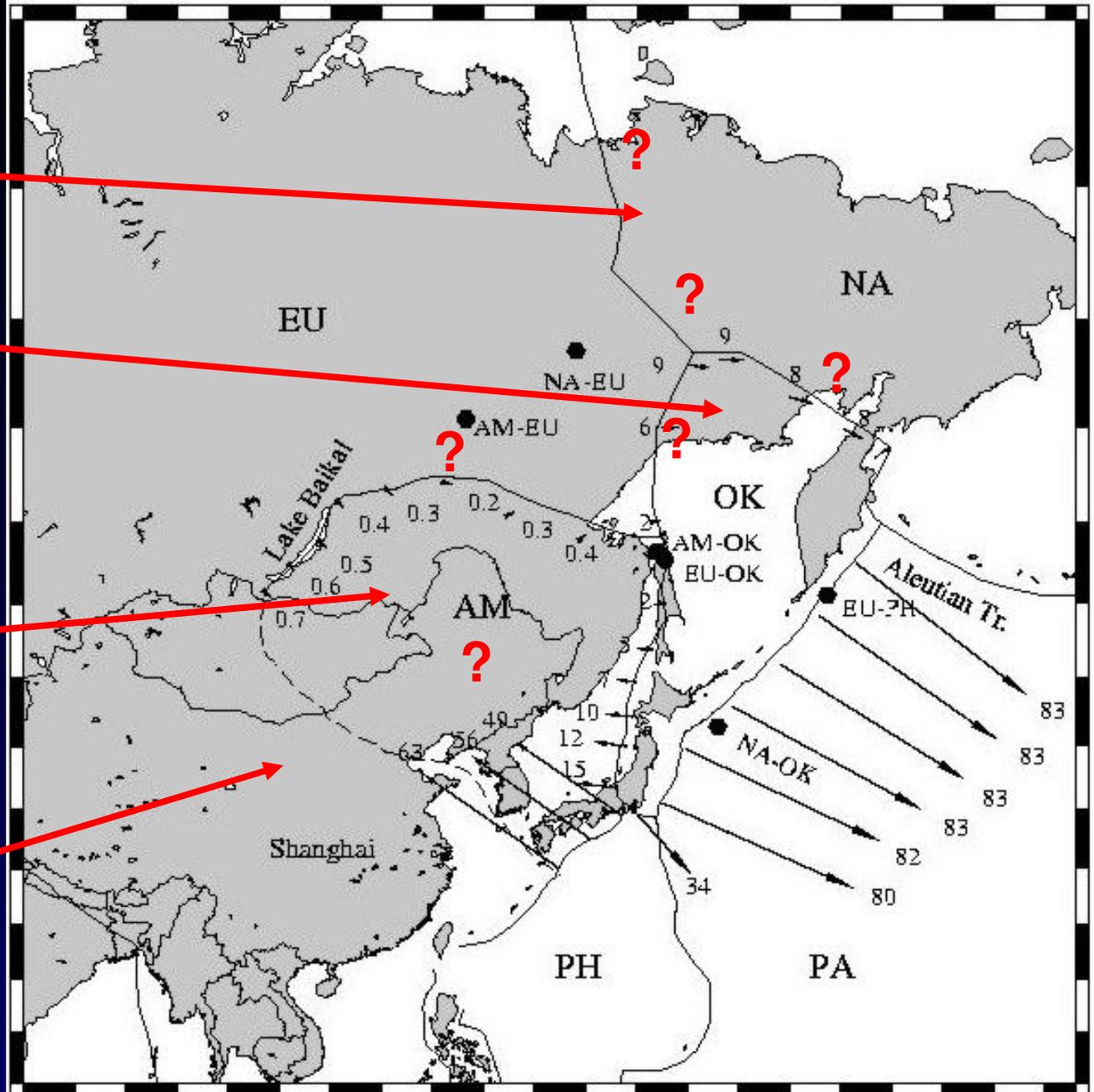
ASIE Nord-Ouest

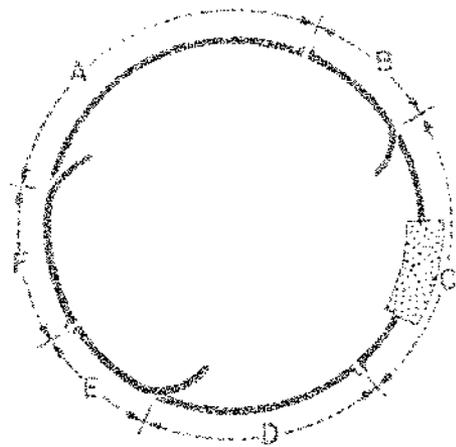
Pas d'évidence
claire sur la
frontière Nord
Américaine

Peut-être la plaque
Okhotsk distincte
de l'Amérique du
nord

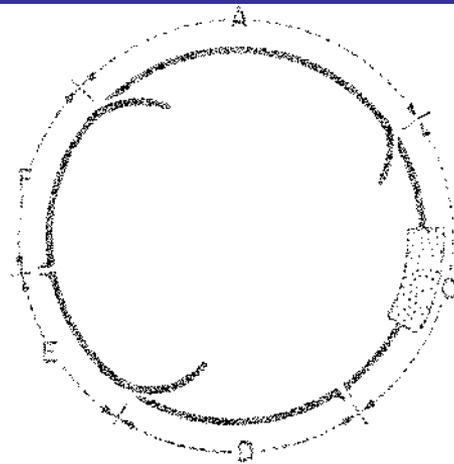
Peut-être la plaque
Amour à l'est du
rift de Baikal
distincte de
l'Eurasie

Peut-être une
plaque Chine du
Nord?

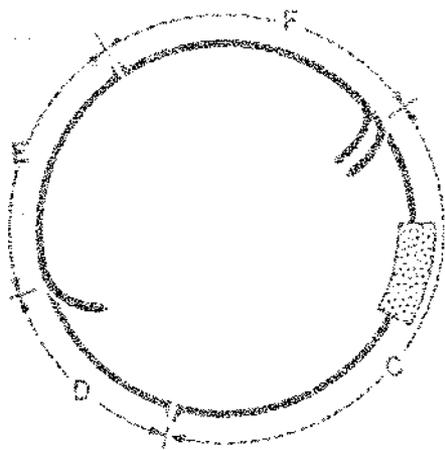




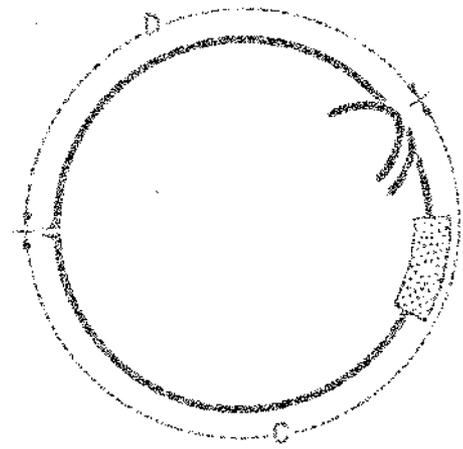
(1) Situation initiale



(2) Disparition de la dorsale A-B et donc de la plaque B



(3) Collision Fosse-Fosse non bloquante parce que les deux plans sont parallèles, et disparition de la plaque A

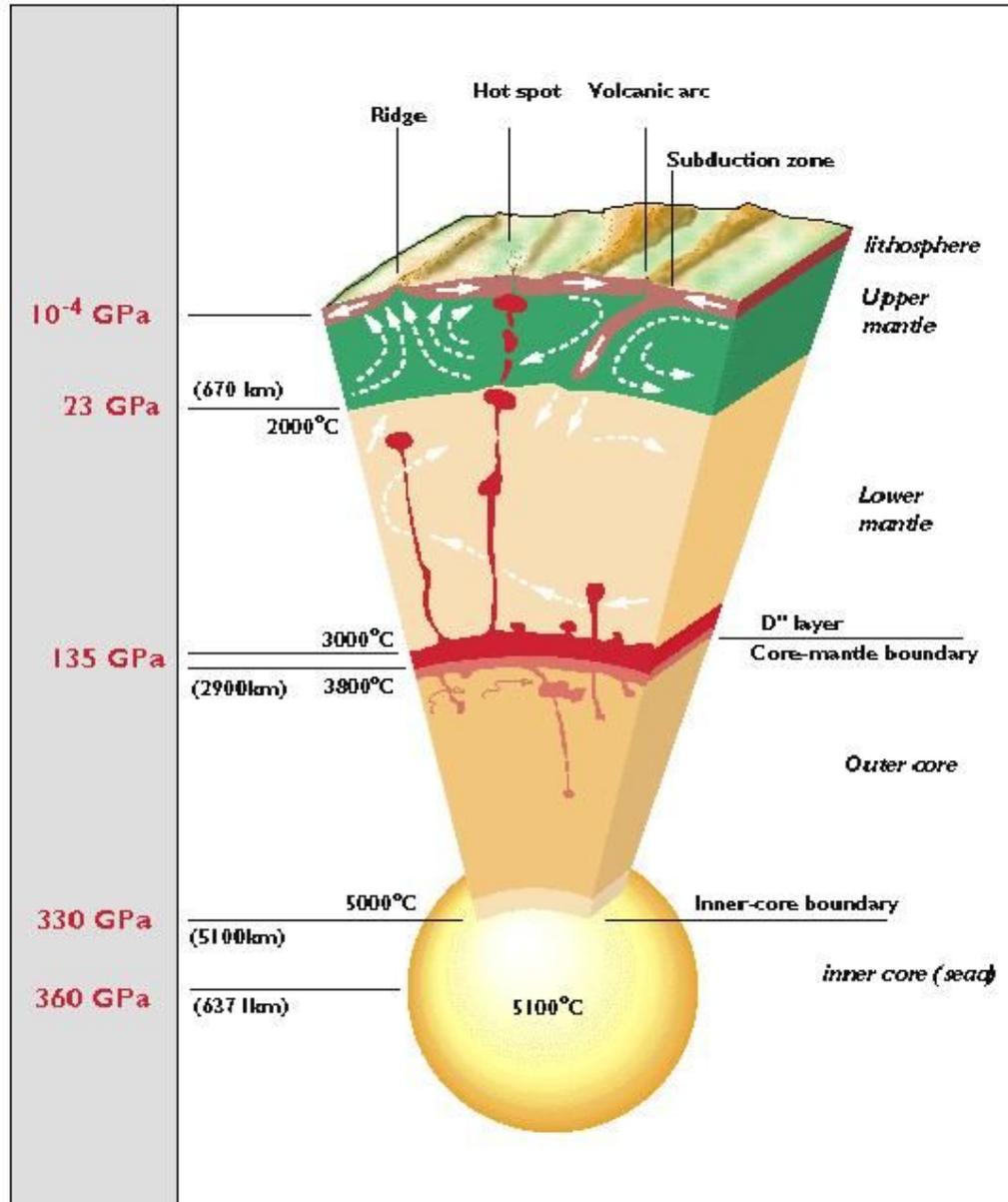


(4) Stade théorique ultime la dorsale E-F a été engloutie, la plaque E ensuite, et nous assistons à une collision Fosse-Fosse bloquante. Il ne reste plus que deux plaques C et D sans fosse. Une fosse doit s'ouvrir!

... Cette série de schémas théoriques où la situation géodynamique est représentée par une coupe méridienne symbolique est destinée à montrer une suite d'événements qui conduisent forcément à une situation qui ne peut se débloquer que par une création d'un nouvel élément fondamental, ici une fosse.

DYNAMIQUE DE LA TERRE ET SISMOLOGIE?

Points Chauds?



Modèle Classique de Panache (Morgan, 1971)

