

# **La Tectonique des Plaques a cinquante ans**

**Xavier Le Pichon  
Collège de France, Aix-en-Provence**

“C’est une révolte”

“Non, sire, c’est une révolution.”

La Rochefoucauld à Louis XVI après la prise de la Bastille

Une révolte, une émeute peut changer le gouvernement, faire tomber le roi, mais le pays ne change pas fondamentalement. Une révolution change tout, l’ordre social comme l’ordre politique. On entre en terrain inconnu.

Les Français ont inventé et exporté la révolution. Pensons à la révolution russe. Ils aiment le mot révolution et l’utilisent à temps et contretemps. Mais dans le cas de l’apparition de la tectonique des plaques, le mot me paraît correct.

Peut être comparé à la **révolution physique** avec l'introduction de la relativité restreinte puis générale par Einstein entre 1905 et 1915 ou à la **révolution biologique** avec la découverte de la double hélice par Watson et Crick en 1954

- 1) Nouveau modèle quantitatif
- 2) Élargit beaucoup la discipline en rendant compte de phénomènes inexplicables en même temps qu'il l'unifie.
- 3) Conçu par de jeunes chercheurs: Einstein, 26 ans, Watson, 26 ans

- 1) **La tectonique des plaques, un modèle cinématique quantitatif de la surface de la Terre**
- 2) rend compte de phénomènes inexplicés comme la distribution des séismes et l'élargit (paléogéographie quantitative, dynamique de la Terre, etc..)en même temps qu'il unifie la géologie (pour la première fois, tectonique, sismologie et géodésie sont utilisées ensemble)
- 3) introduit en 1967 par de jeunes chercheurs

Il n'y a pas eu de révolution de la dérive des continents, alors qu'elle fut proposée par Wegener en 1915. Pourquoi ces 42 ans de stagnation?

- limite Trias-Jurassique  
-200 Ma



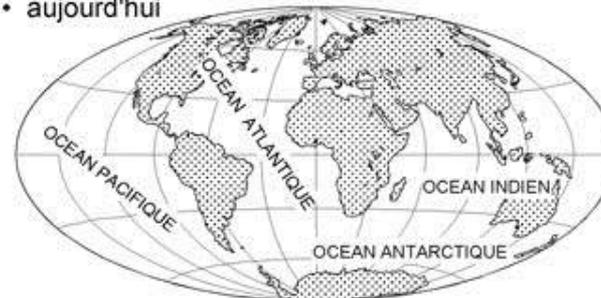
- limite Jurassique-Crétacé  
-140 Ma



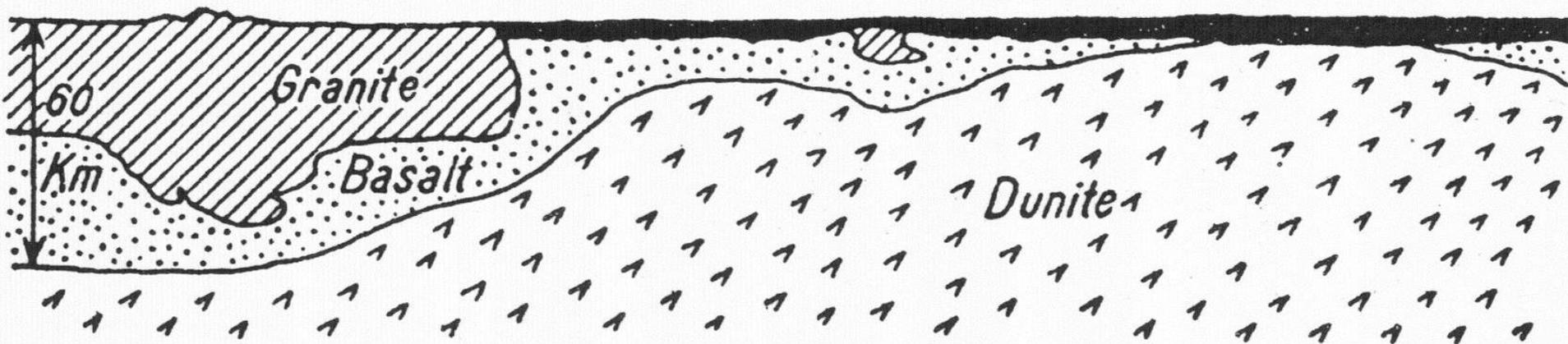
- limite Crétacé-Cénozoïque  
-65 Ma



- aujourd'hui



Le modèle de Wegener est celui d'un continent glissant sur le manteau ductile



D'après Wegener (1929)

*Continental drift is quantitatively insufficient and qualitatively unapplicable. It is an explanation which explains nothing which we wish to explain.*

*If evidence is conflicting, the scientific attitude is to look for a new idea that may reconcile.*

Harold Jeffreys, 1962

L'exploration des océans et la localisation détaillée de la sismicité globale à l'origine de cette révolution conceptuelle.

*« C'est le jour où le géologue s'est décidé à regarder par-dessus bord qu'il s'est aperçu que son bateau bougeait. »*

*Tuzo Wilson*

# Le fond des océans : un cimetière?

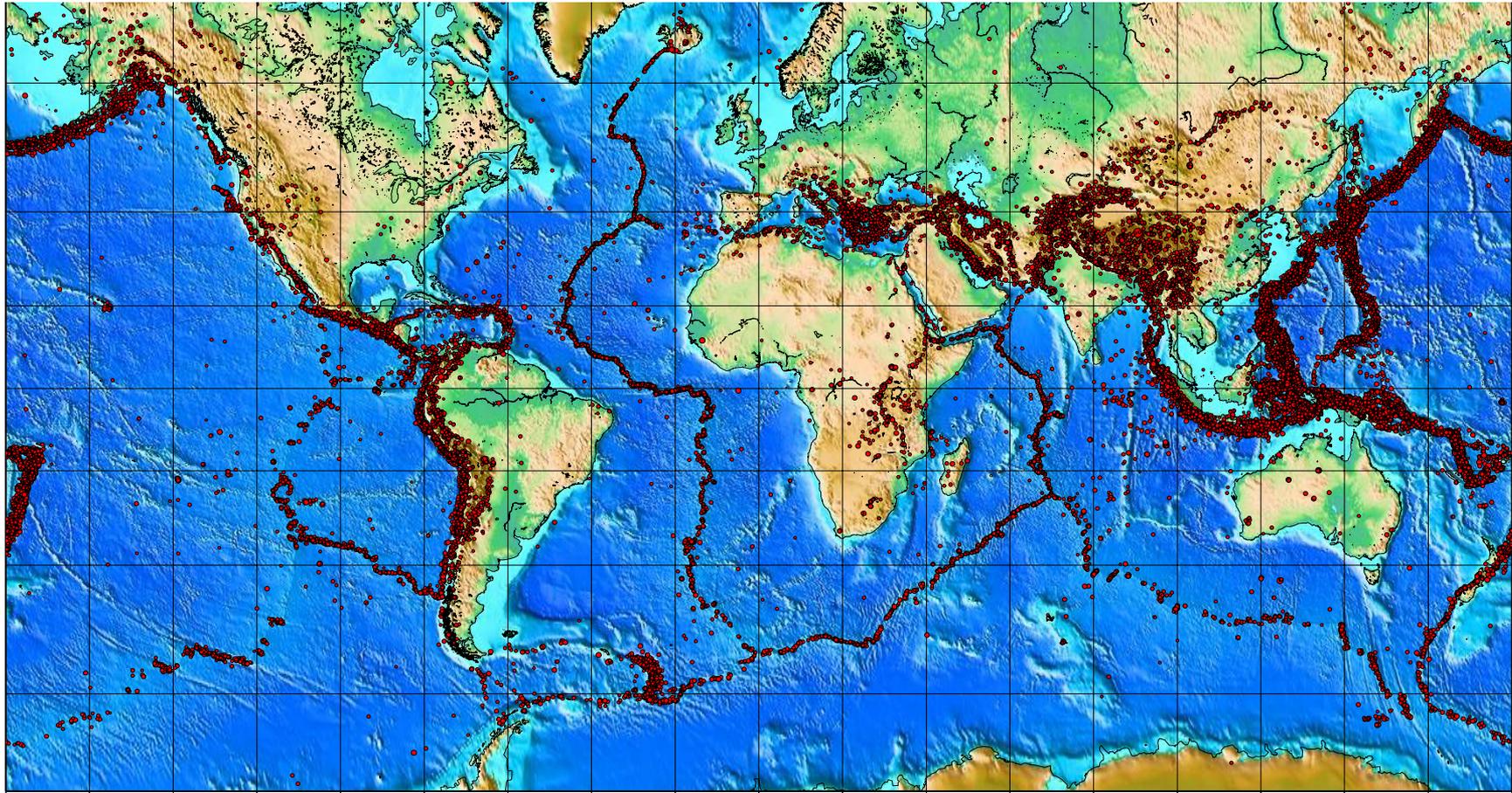
- 12 km de vase accumulés depuis leur origine il y a plus de 3 milliards d'années
- « La monotonie du fond de l'océan n'est rompue que par les carcasses d'animaux morts qui proviennent de la surface. »
- Archives les plus anciennes de l'histoire de la Terre

Pourtant, en 1959, lorsque je quittais l'université de Columbia à New York pour ma première campagne autour du monde sur le navire océanographique Vema, l'archétype de l'océan cimetièrre était déjà en train de s'effondrer devant les premiers résultats de l'exploration géophysique des fonds marins.

**Le fond des océans semblait être  
géologiquement jeune  
et tectoniquement très actif**







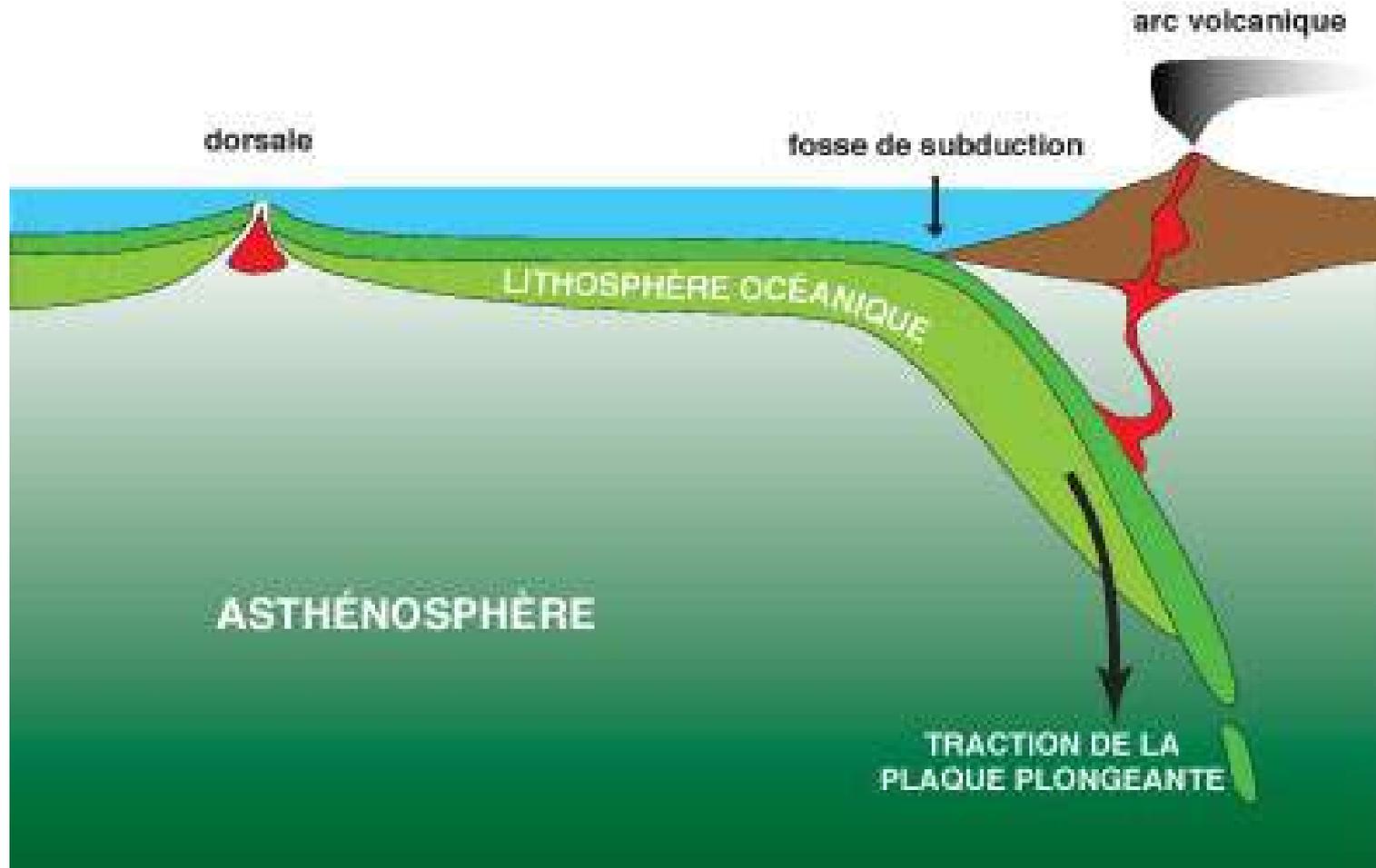
180° 160°W 140°W 120°W 100°W 80°W 60°W 40°W 20°W 0° 20°E 40°E 60°E 80°E 100°E 120°E 140°E 160°E 180°

## *De l'océan cimetière à l'océan Phénix:*

Nous étions en train de réaliser que le fond des océans est jeune. On sait aujourd'hui qu'il est **trente fois plus jeune que les continents** (âge moyen fond de l'océan: 64 Ma; âge moyen continents : 2 Ga).

Il devait donc se renouveler.

**1960 : Pour sortir de cette impasse, Harry Hess propose le modèle du Sea Floor Spreading (tapis roulant) qu'il présente modestement comme un essai en géopoésie.**



# 1963-1966

Au Lamont, le travail d'équipe était la règle. Il fallait travailler dur et passer de longs mois à la mer. L'océan était notre nouvelle frontière. Chaque campagne apportait son lot de découvertes. C'était enthousiasmant.

Nous n'avions que peu d'intérêt pour les spéculations telles que celles de Hess qui ne semblaient avoir que peu de liens avec les observations que nous faisons.

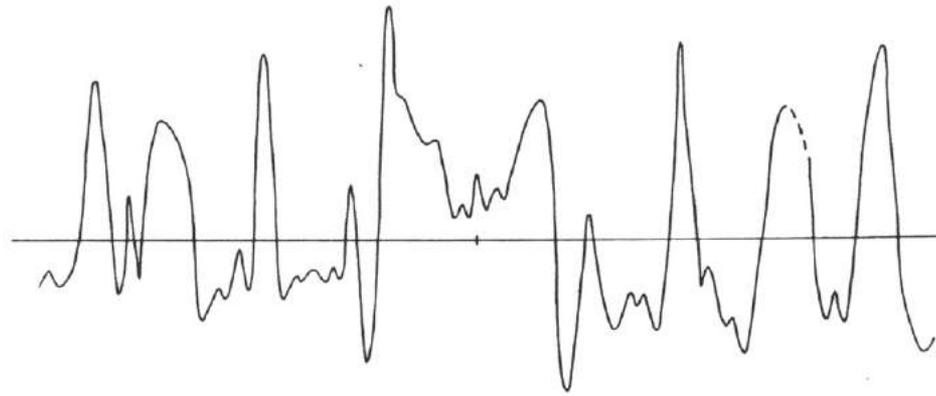
Pourtant le modèle du sea-floor  
spreading finit par s'imposer,  
quatre ans plus tard,  
en 1966,  
sur la base d'un seul profil  
d'anomalies magnétiques,  
**“le profil magique”.**

# Le profil magique

EAST PACIFIC RISE

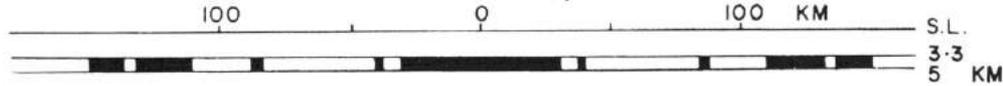
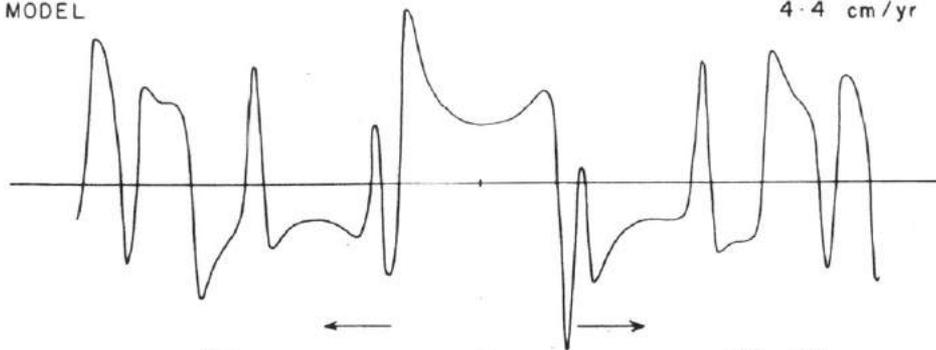
51° S

PROFILE REVERSED

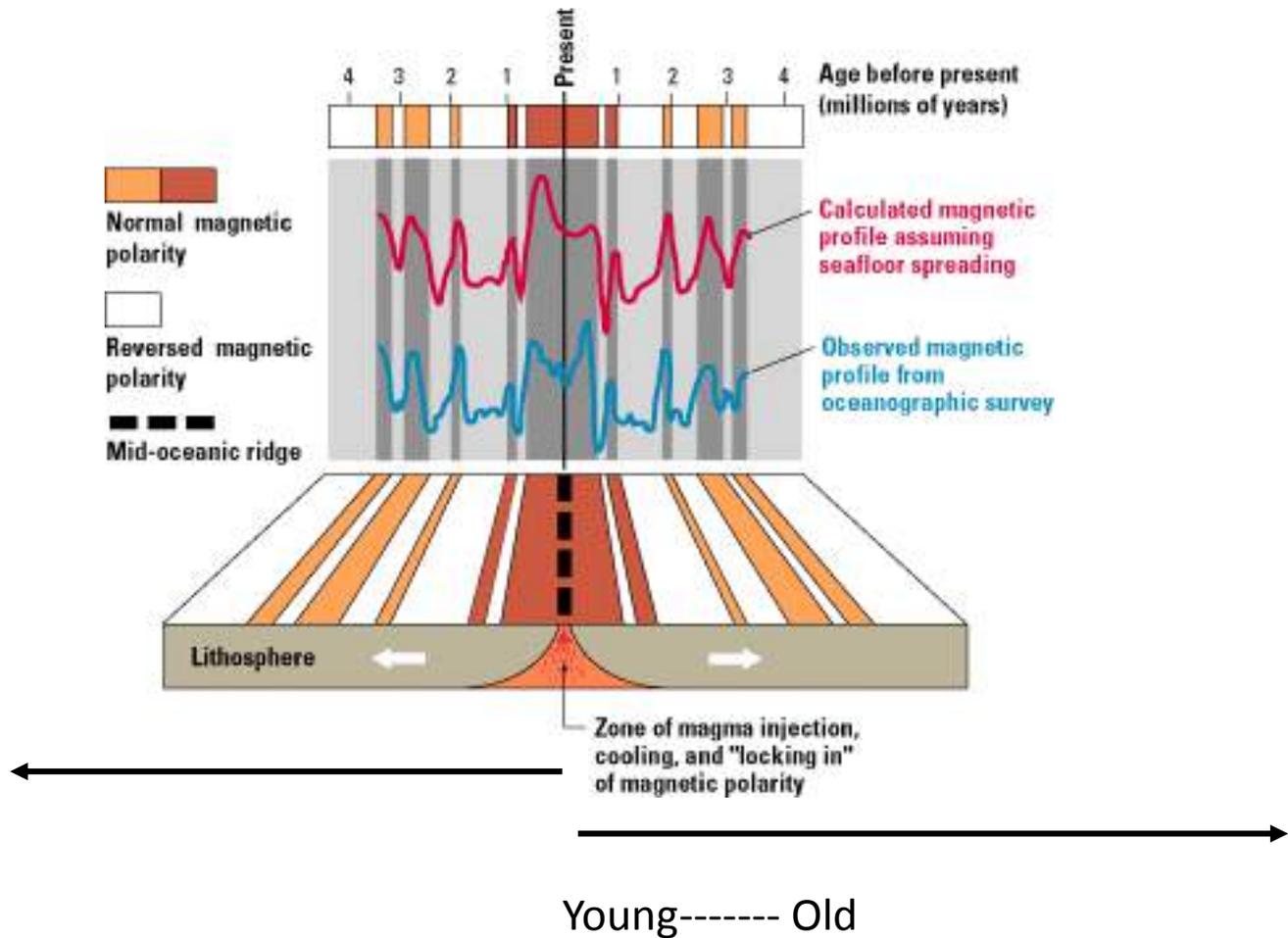


MODEL

4.4 cm/yr



After Pitman (1966)

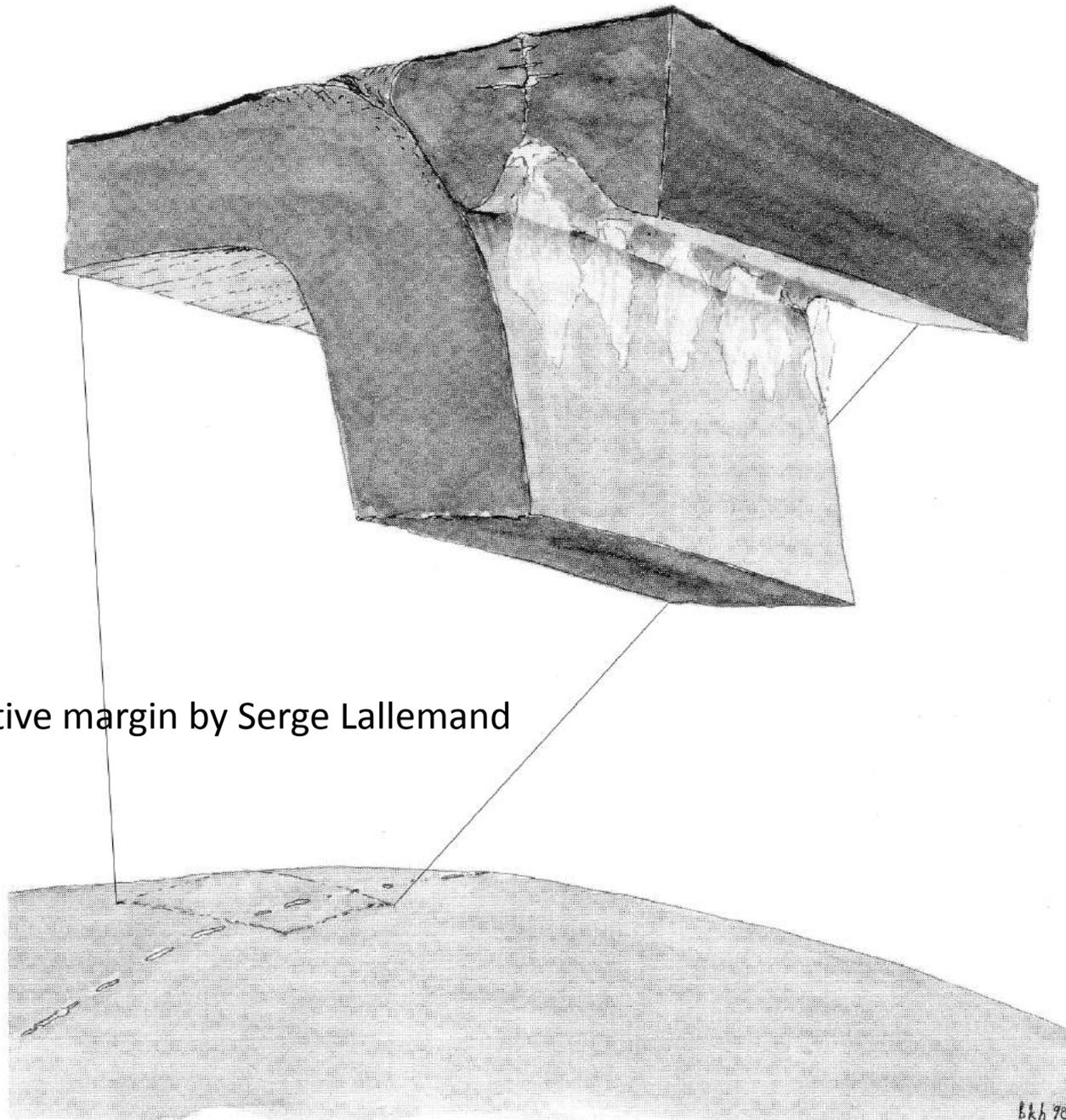


La surface de la Terre est donc mobile. Harry Hess avait raison. Mai 1966 marqua le début d'une course frénétique pour déchiffrer les anomalies magnétiques en termes d'âge des fonds et de vitesses de création des fonds à l'axe des Rifts.

**C'était devenu pour nous la priorité absolue!  
Mais ce n'était pas encore la tectonique des  
plaques. On ne comprenait toujours pas  
comment fonctionnait la Terre.**

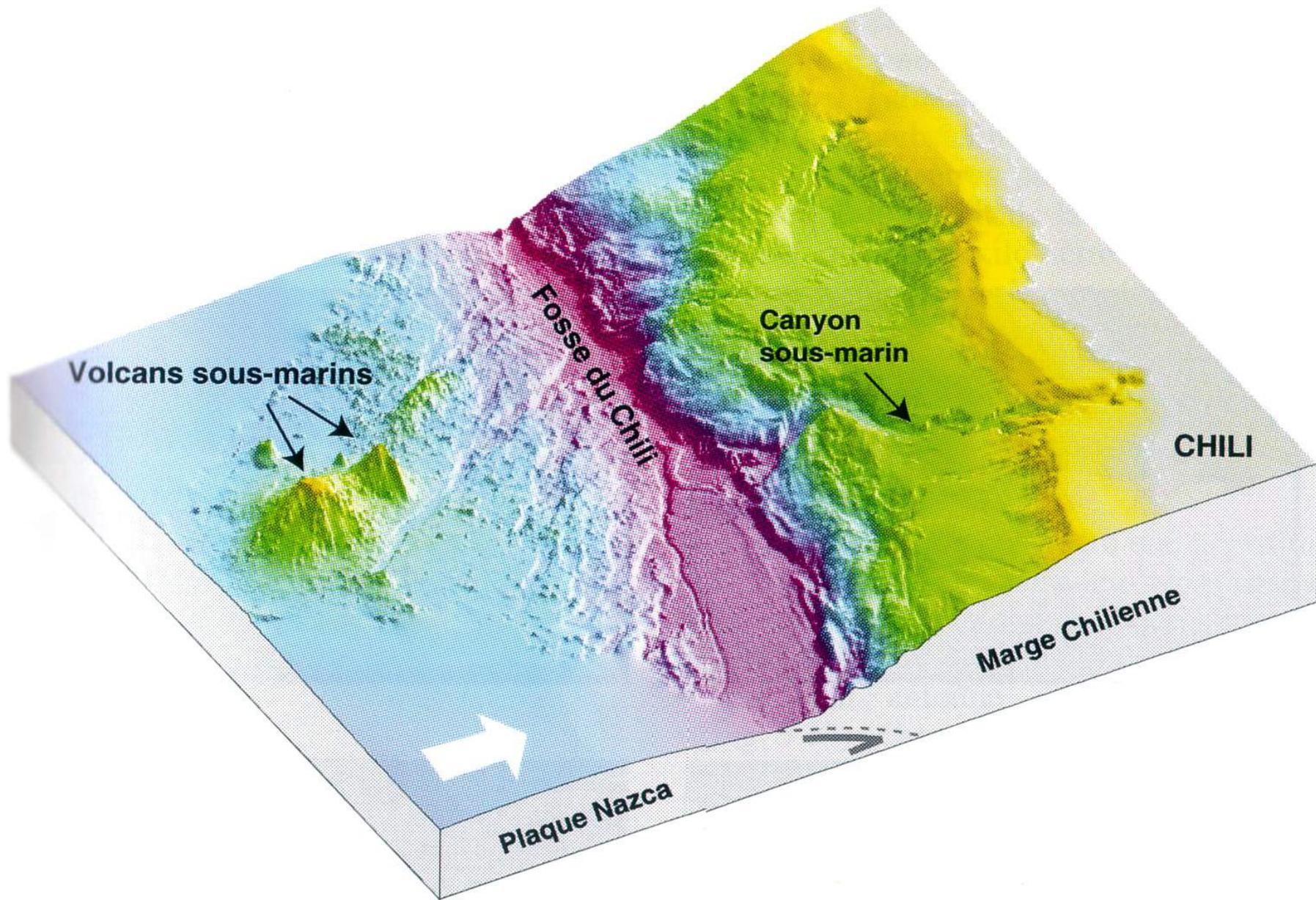
# Le problème de la subduction

Une zone de convergence supposée qui se manifeste en surface par de l'extension!



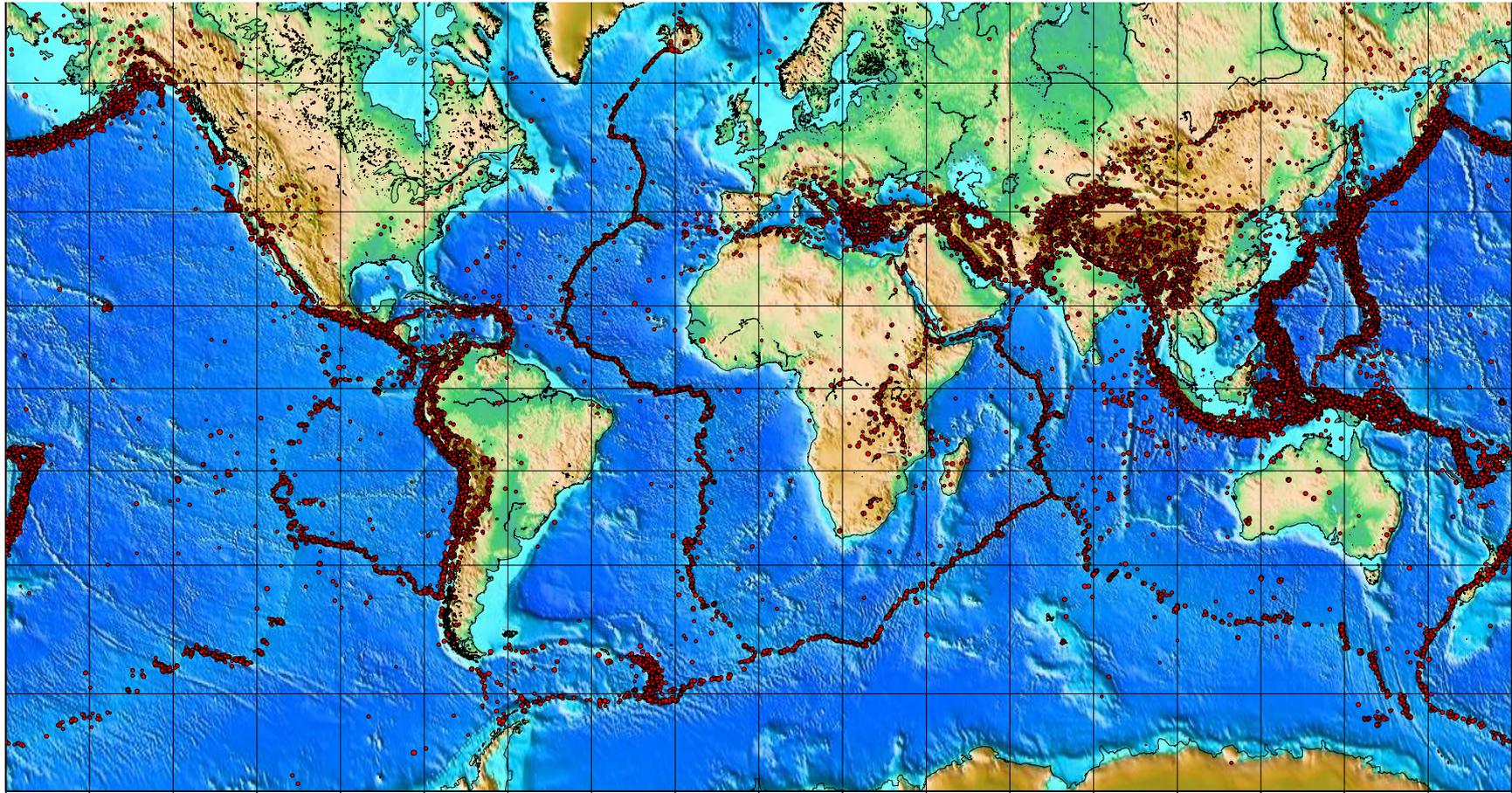
Cartoon of active margin by Serge Lallemand

lkh 78



# Le Problème Cinématique

Pas de correspondance directe  
entre zones d'extension (rifts)  
et zones de convergence (fossés)



180° 160°W 140°W 120°W 100°W 80°W 60°W 40°W 20°W 0° 20°E 40°E 60°E 80°E 100°E 120°E 140°E 160°E 180°

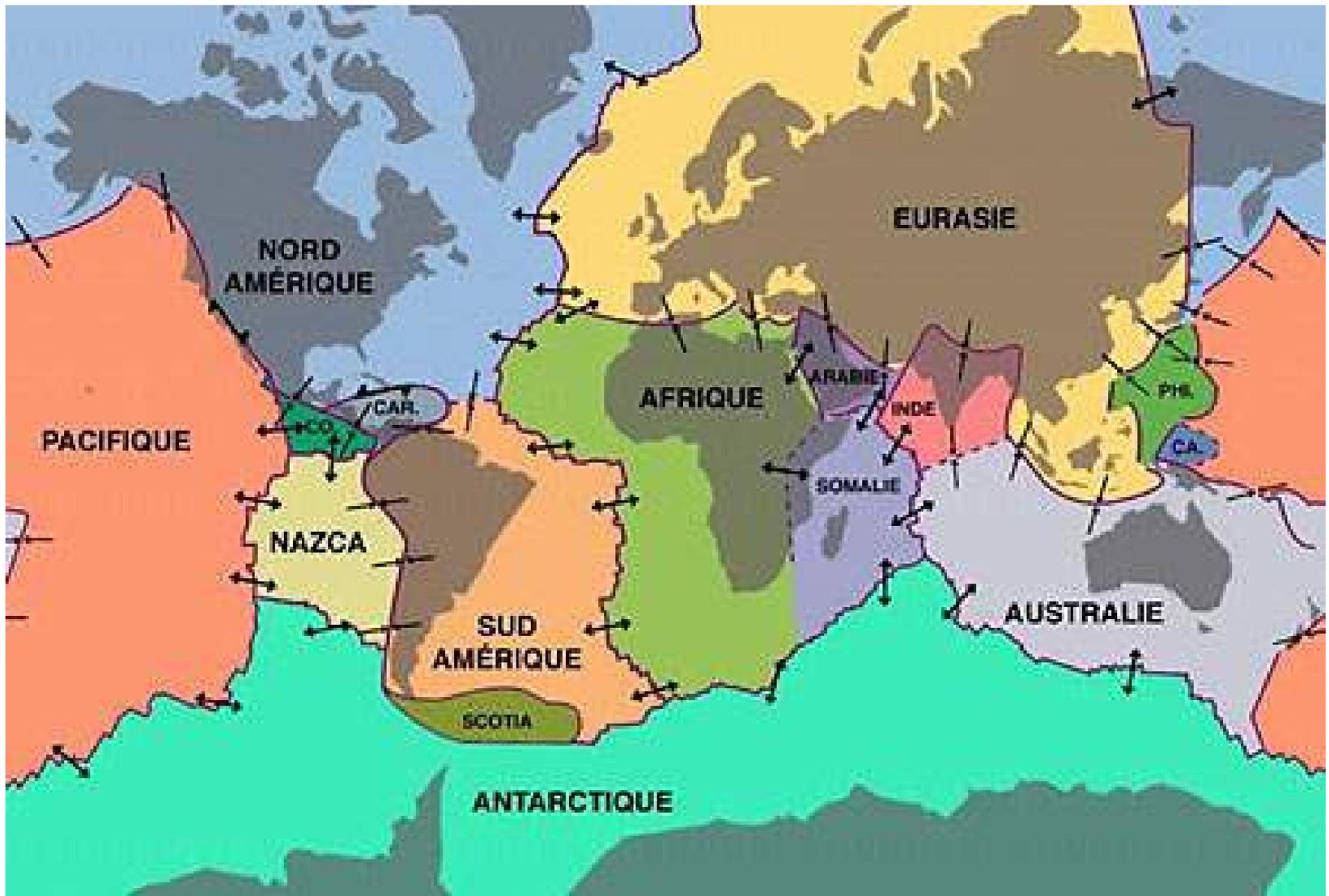
L'étape suivante commença un an plus tard quand Jason Morgan introduisit l'hypothèse cruciale

**“Consider the earth’s surface to be made of a number of rigid crustal blocks”**

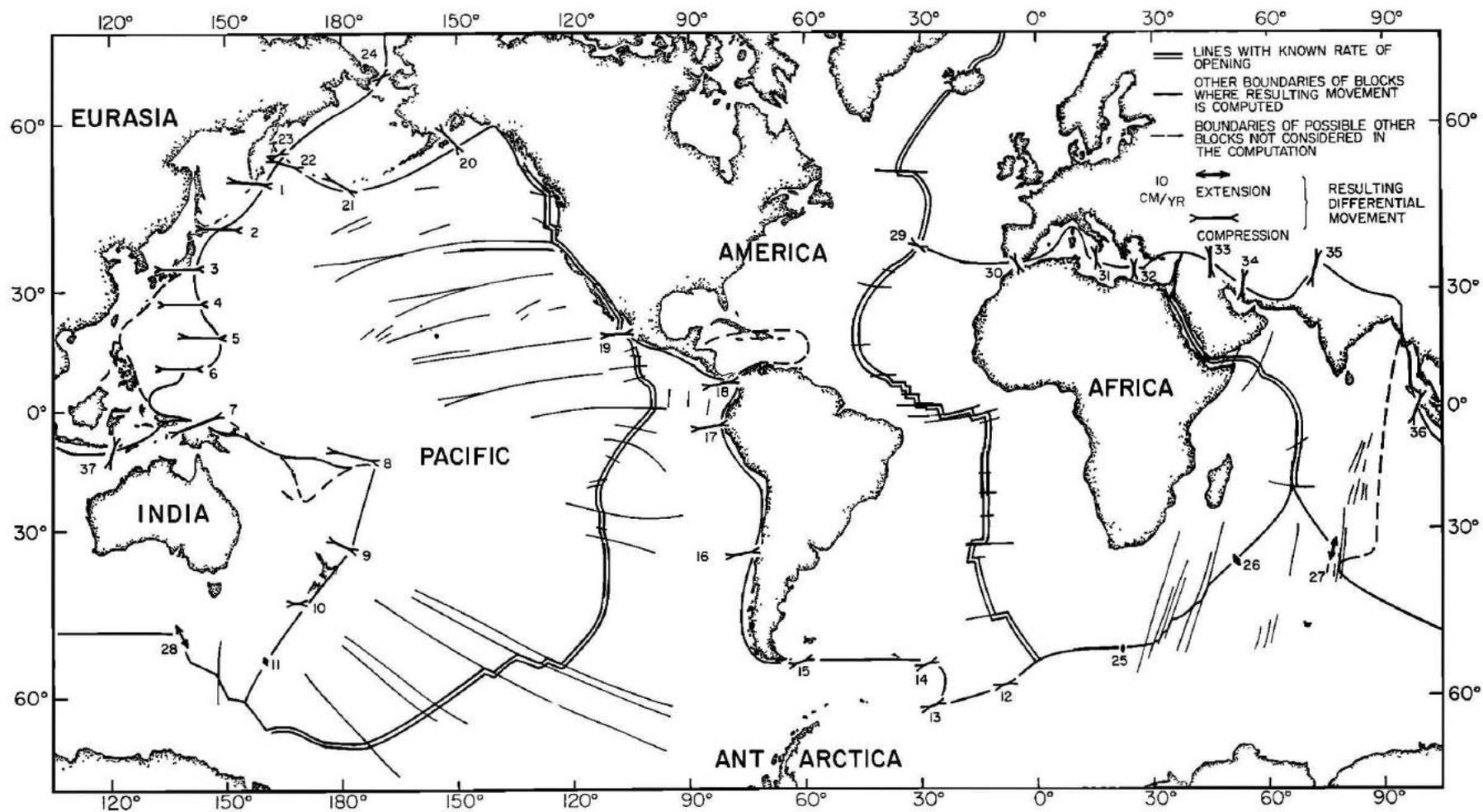
**Avec cette hypothèse, il devenait possible de calculer les mouvements des plaques.**

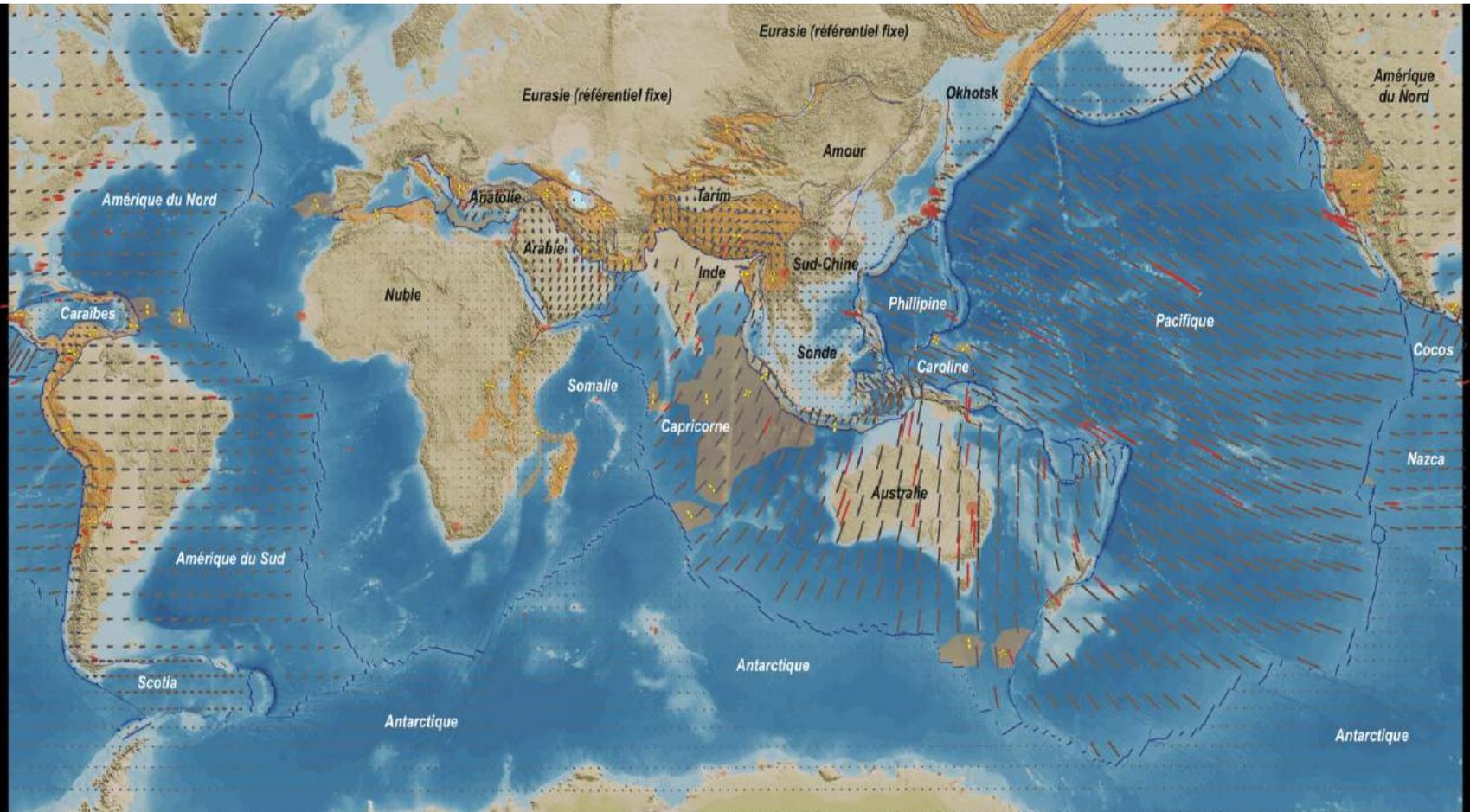
Cette idée d'abord n'intéressa personne. Je fus le seul à décider de consacrer toute mon énergie à l'appliquer pour quantifier les mouvements des plaques sur toute la Terre. Aucun de mes collègues n'accepta de se joindre à mon effort.

**L'hypothèse était trop nouvelle  
pour être appliquée aussitôt.**



# Six plates model





Échelle de la carte

Échelle de la carte

Échelle de la carte



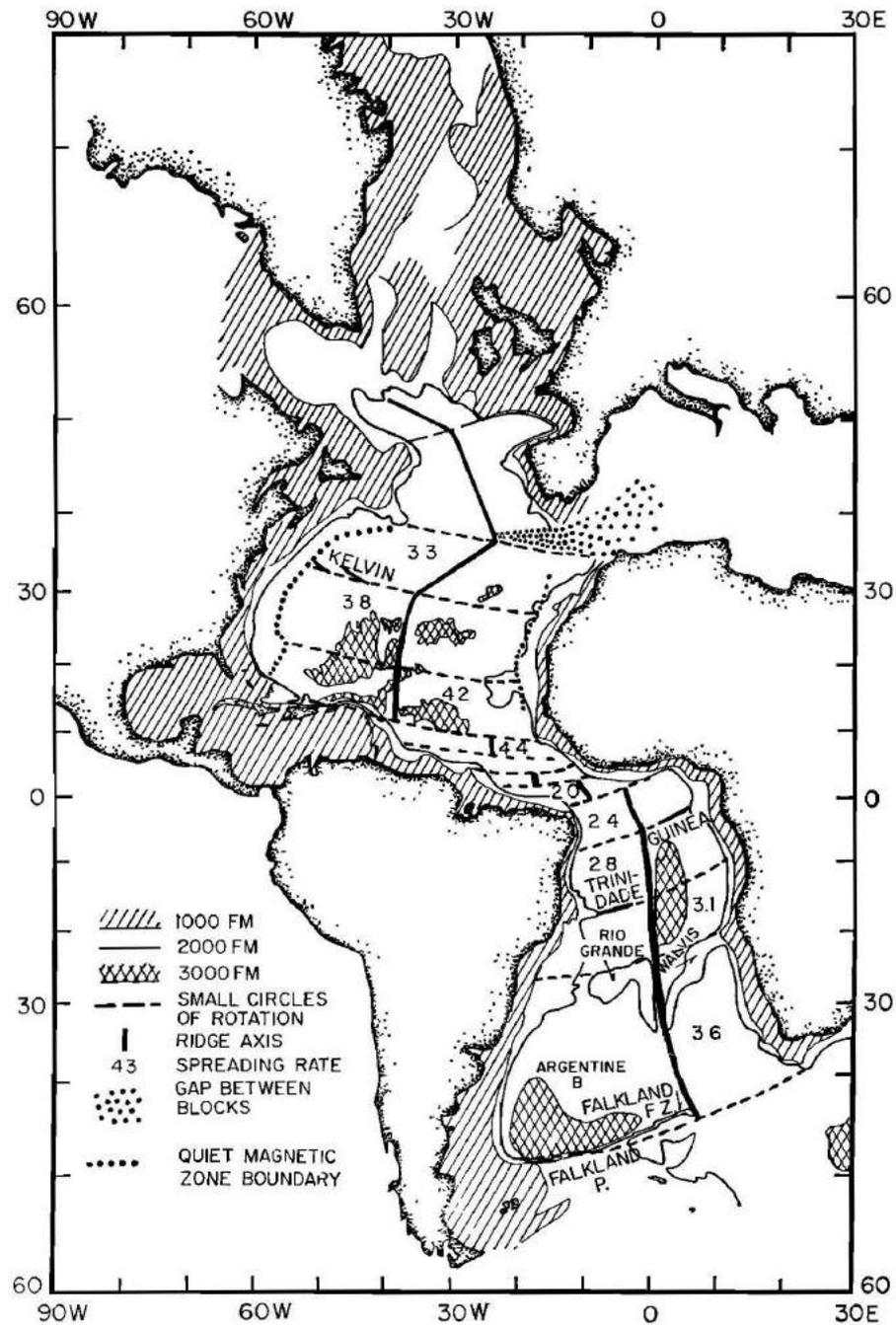
Échelle de la carte

Sonde

Plaque utilisée dans le modèle

Mais on pouvait également pour la première fois reconstruire la configuration des plaques dans le passé.

Reconstruction  
À l'anomalie 31  
(72 Ma)



Reconstruction  
De l'ouverture  
de l'Atlantique



Pouvait-on dire en 1967 que la tectonique des plaques était démontrée?

Il faudra attendre les forages du Glomar Challenger entre 1968 et 1975, puis la mesure géodésique du mouvement des plaques à partir des années 80, pour que l'on puisse parler de démonstration.

# Une vision sociologique

Un modèle mis en place par des chercheurs sur le terrain, principalement jeunes, et combattu principalement par les gens au pouvoir ayant beaucoup investi dans les modèles précédents.

Une résistance qui s'effrite au fur et à mesure que l'efficacité du modèle se confirme et qui se cristallise à la fin sur quelques rares scientifiques de renom tel Jeffreys.

En fin de compte, la quasi-totalité de la communauté scientifique adopta cette théorie à cause de son efficacité d'ensemble même s'il restait quelques observations importantes qui restaient inexpliquées ou pire qui paraissaient en contradiction avec la théorie.

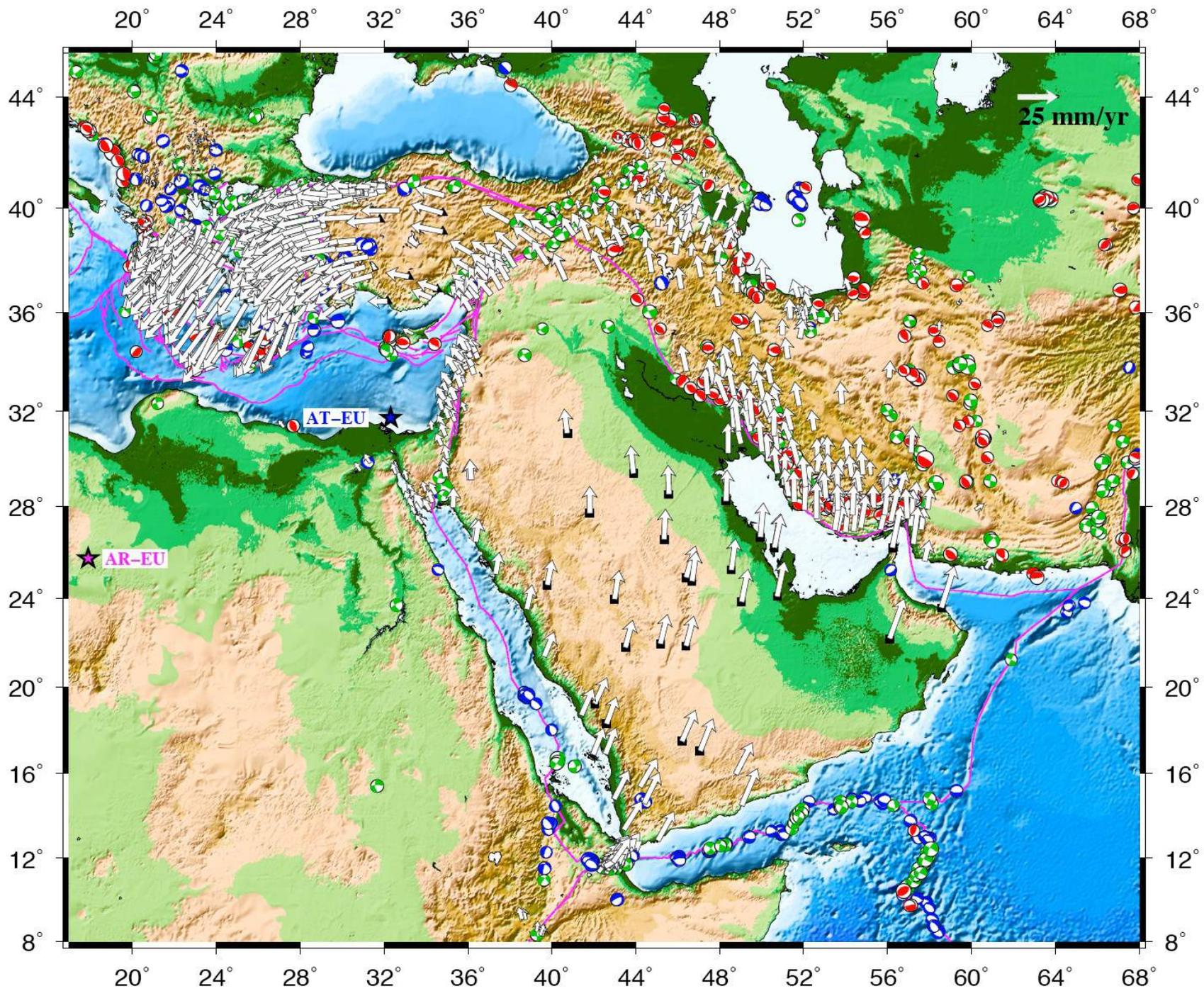
L'adoption se fit avant que la théorie n'ait été démontrée.

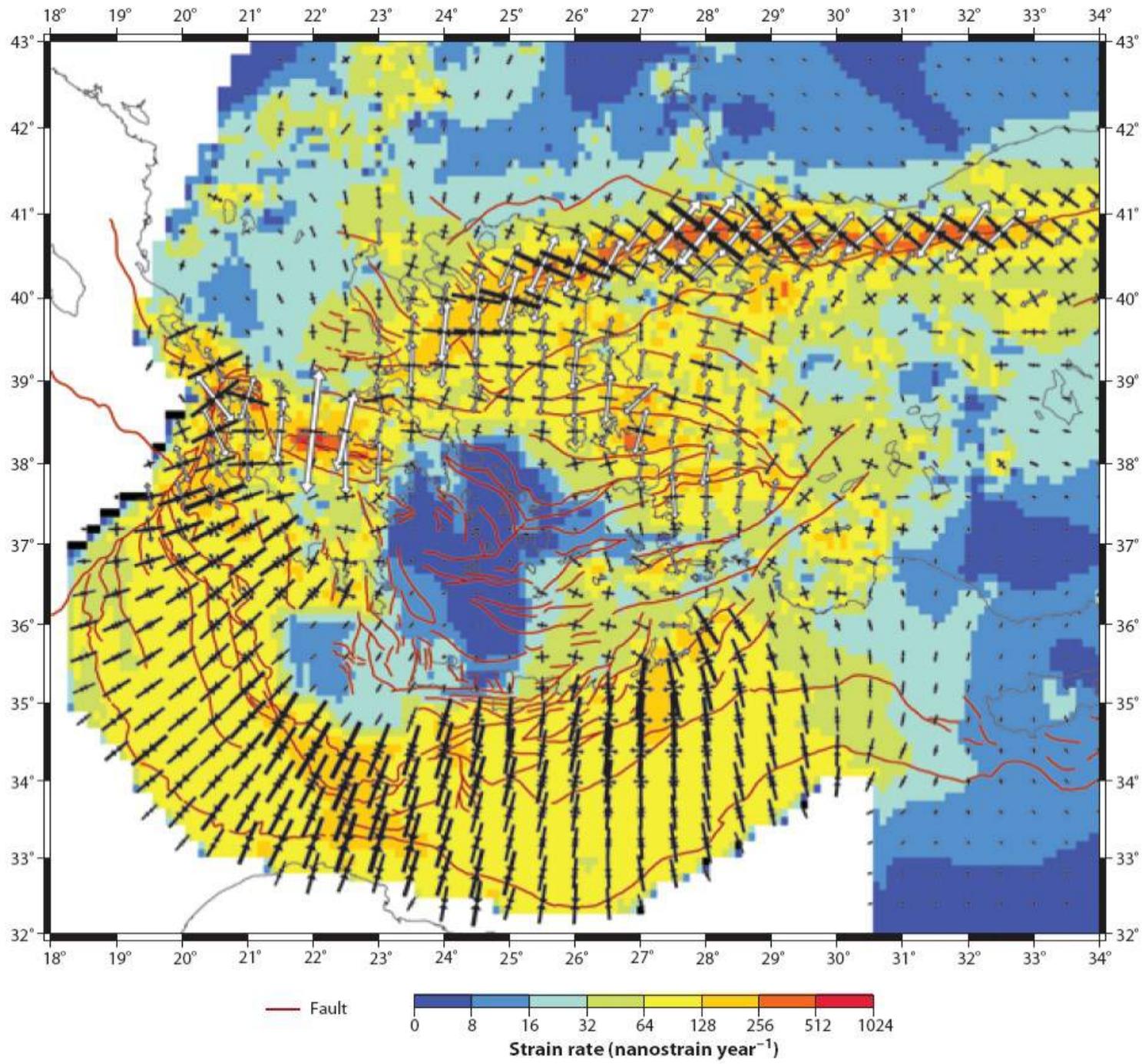
Comment cette hypothèse est-elle  
devenue une théorie  
dominante en position d'autorité?

*Les chercheurs en science expérimentale  
sont pragmatiques. Nous avons utilisé le  
modèle qui rendait le mieux compte des  
observations et qui prédisaient les résultats  
que nous pouvions vérifier.  
On l'utilisait parce que "cela marchait".*

# **Une cinématique 4D de la surface de la Terre**

Cette cinématique 4D (le temps étant pris en compte grâce à l'inertie de ces phénomènes) a remodelé les sciences de la terre. Elle a permis en particulier de comprendre que le principal moteur des plaques est leur propre poids.





Le modèle était validé et adopté mais en fait on ne savait pas grand chose de concret sur les phénomènes géologiques impliqués dans ces modèles.

**Je vais en prendre un exemple avec les frontières de plaque.**

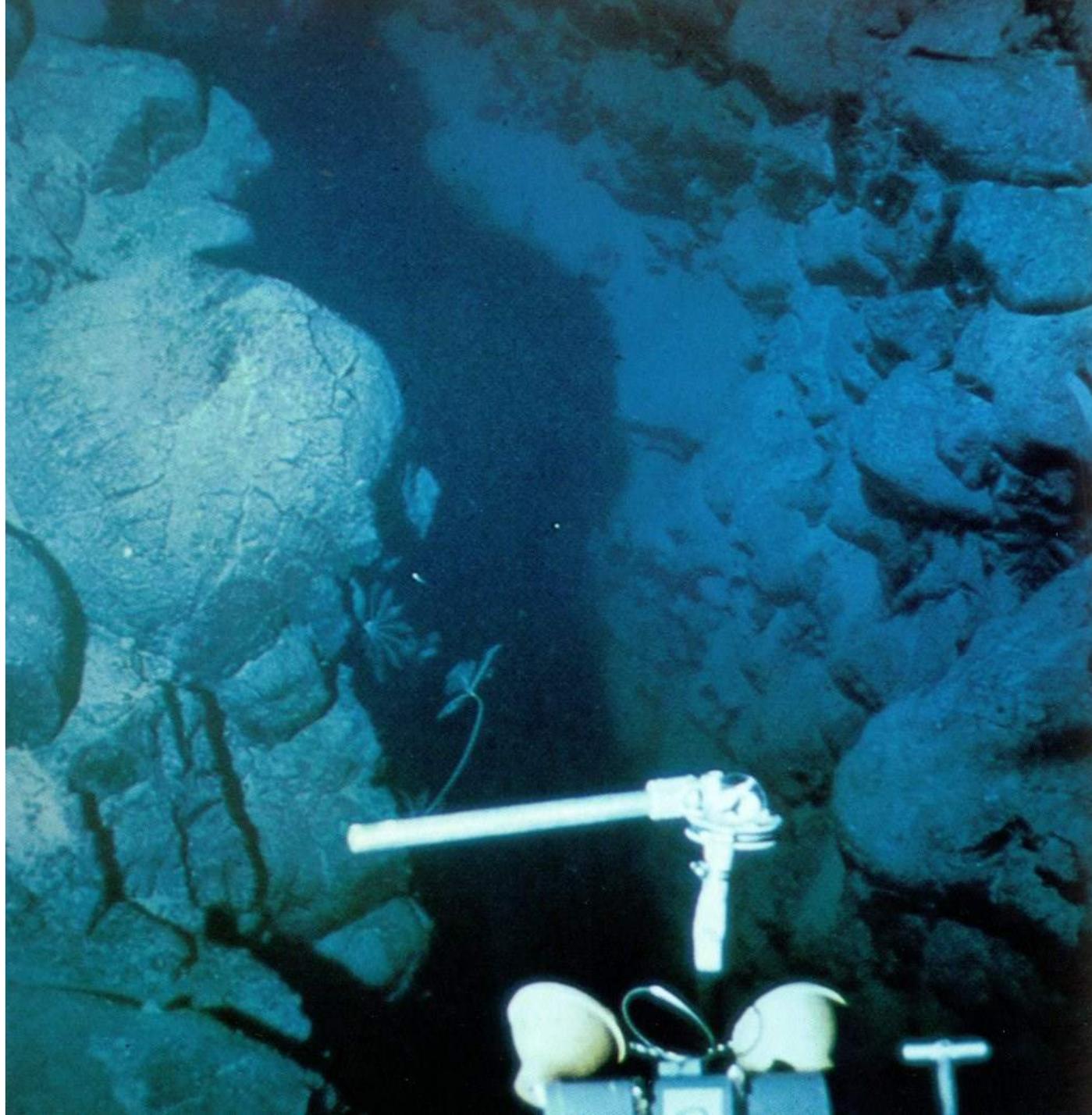
Au début de l'année 1968, je rentrais en France décidé à explorer ces frontières de plaques sous-marines qui étaient essentiellement inconnues.

**Ce fut le début de l'exploration sous-marine:**

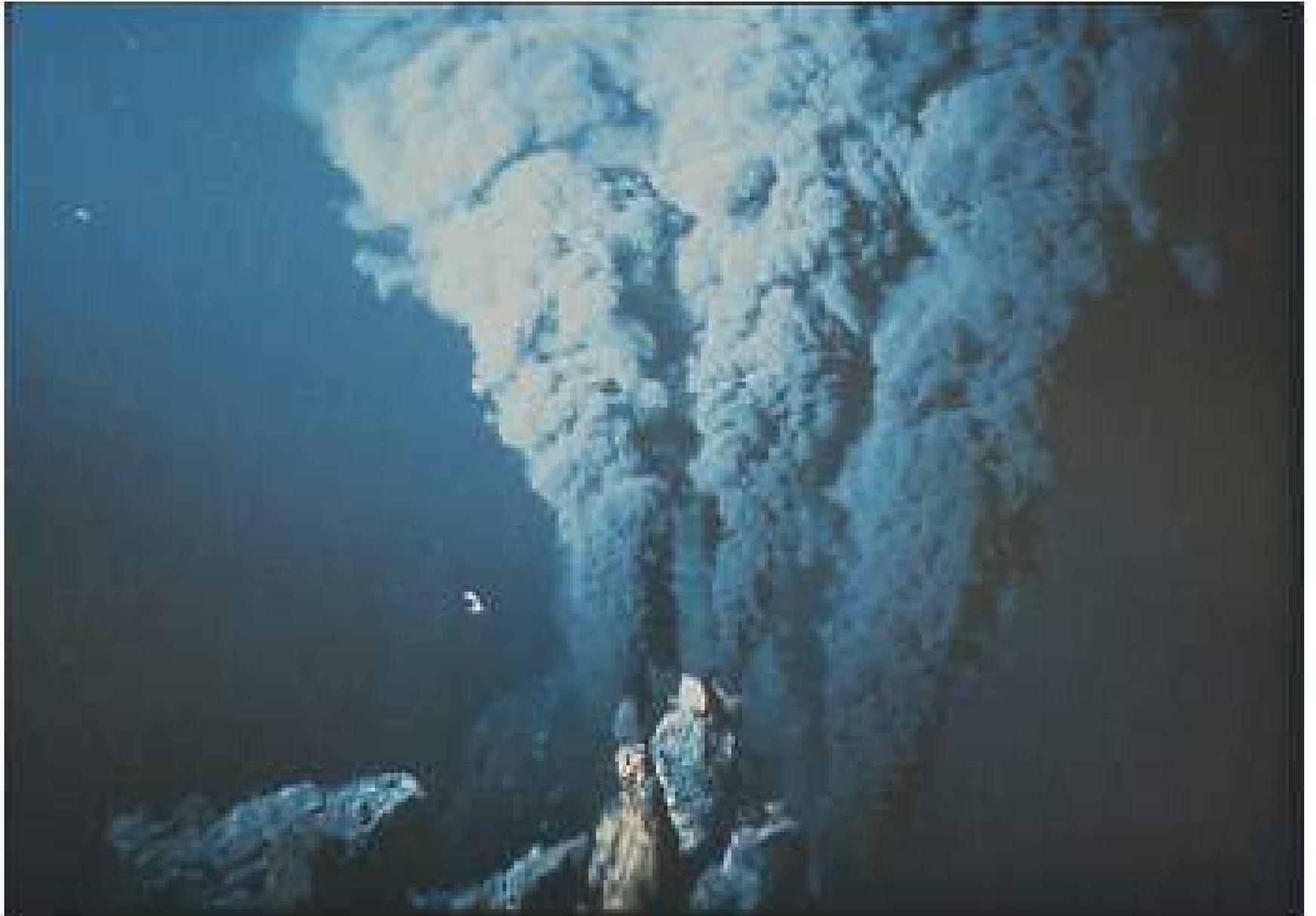
- d'abord dans le Rift Atlantique en 1973 et 1974 avec le projet franco-américain FAMOUS,
- puis dans la fosse hellénique en 1979 avec le projet HEAT
- enfin dans les fosses japonaises en 1985 avec le projet franco-japonais KAIKO.

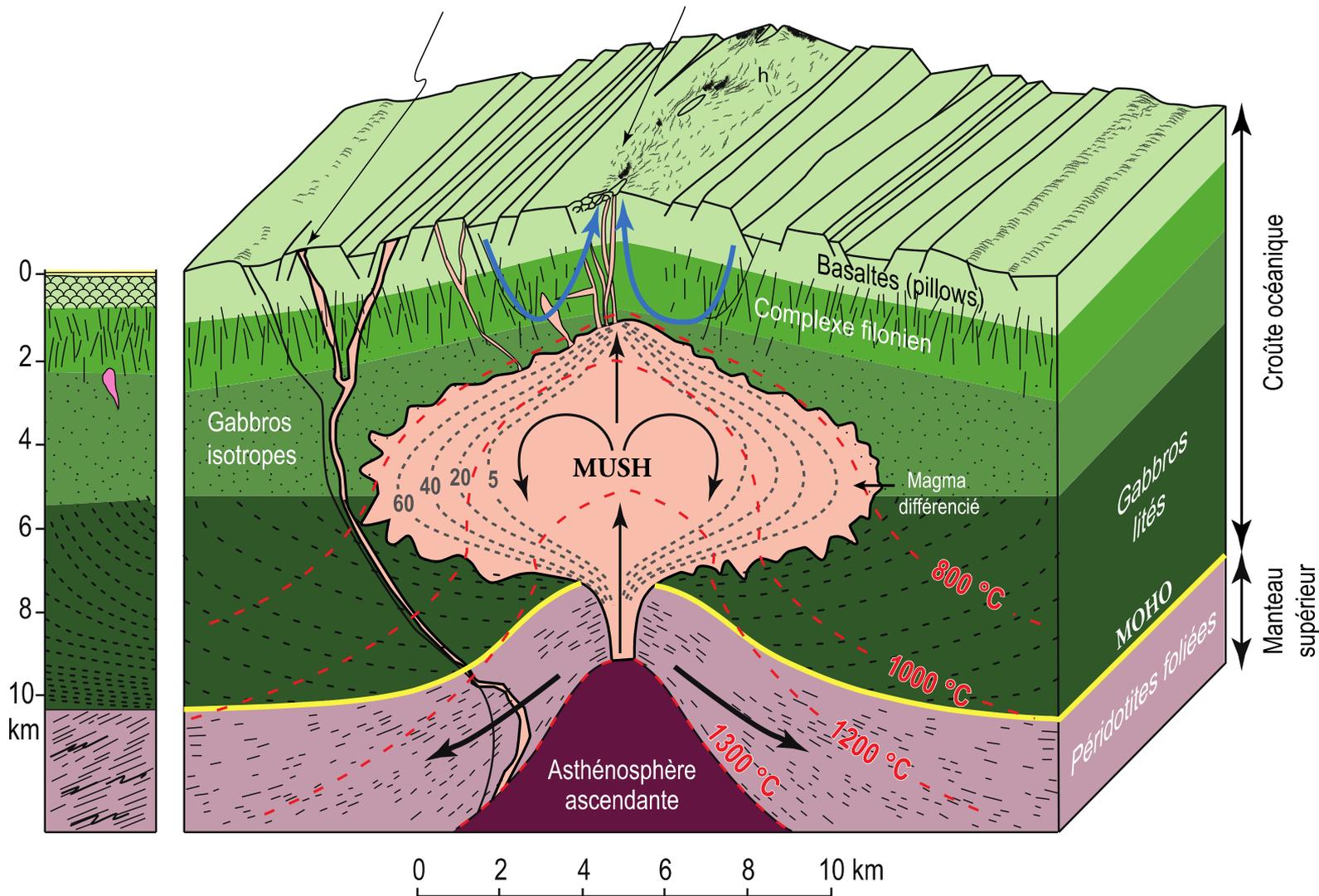










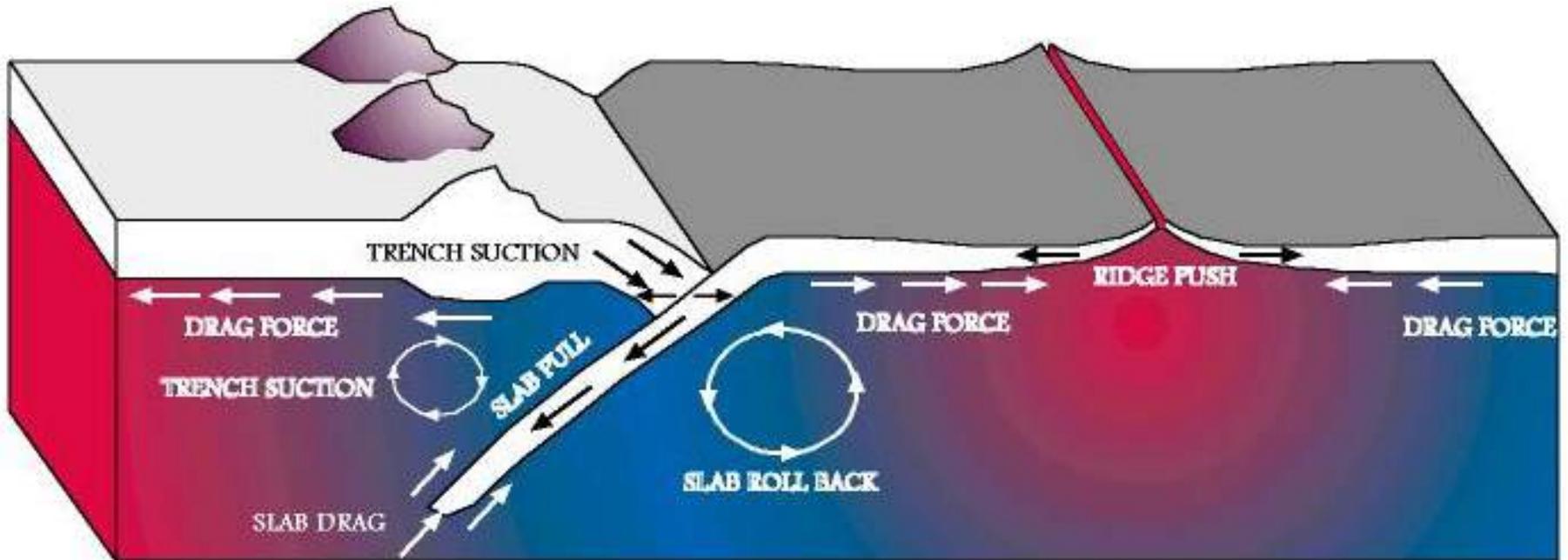


# Dynamique

Convection avec couche thermique limite

**Les plaques bougent par elles-mêmes!**

# Forces déplaçant les plaques: ridge push et slab pull

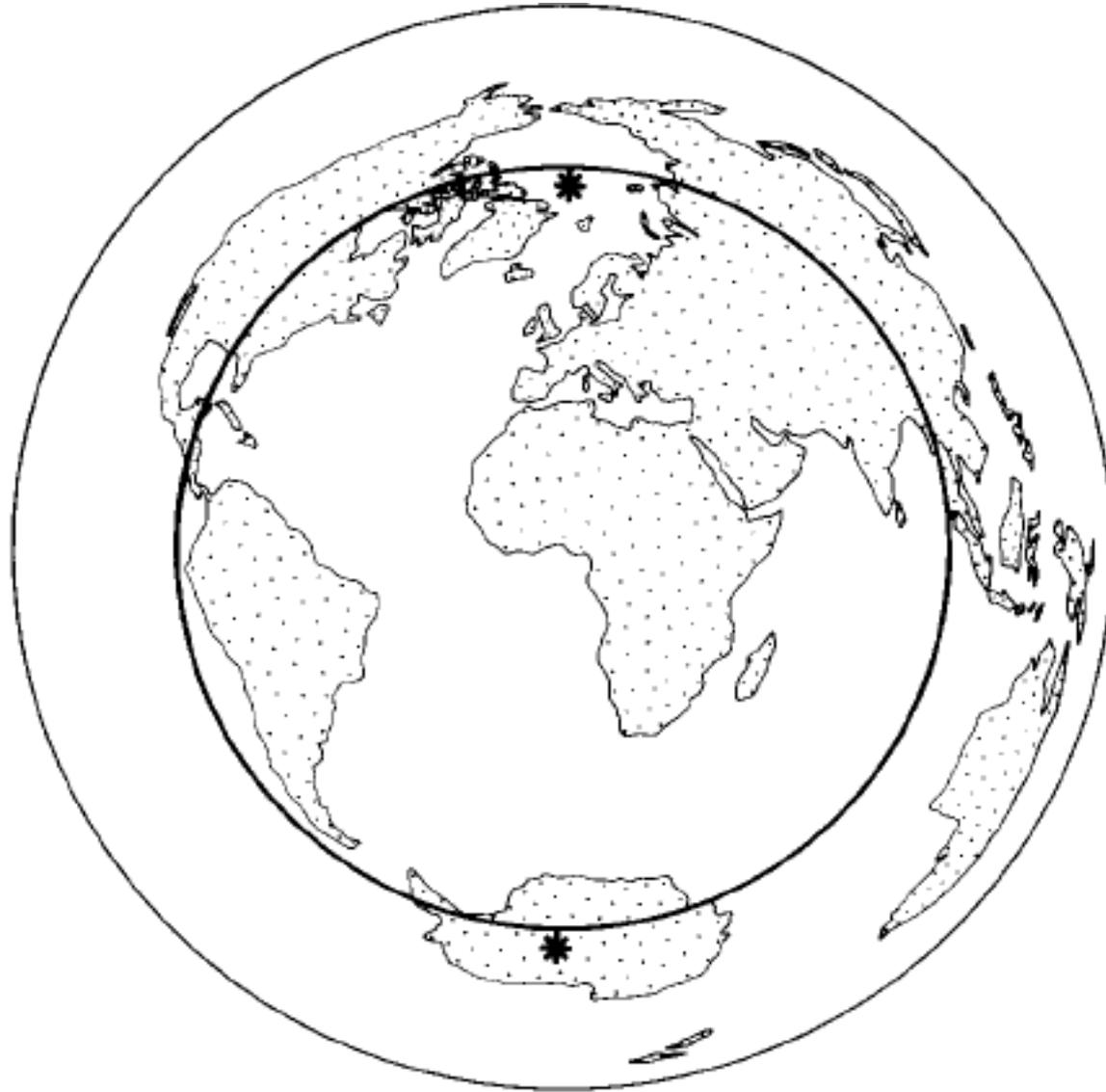


# Le ballet des continents

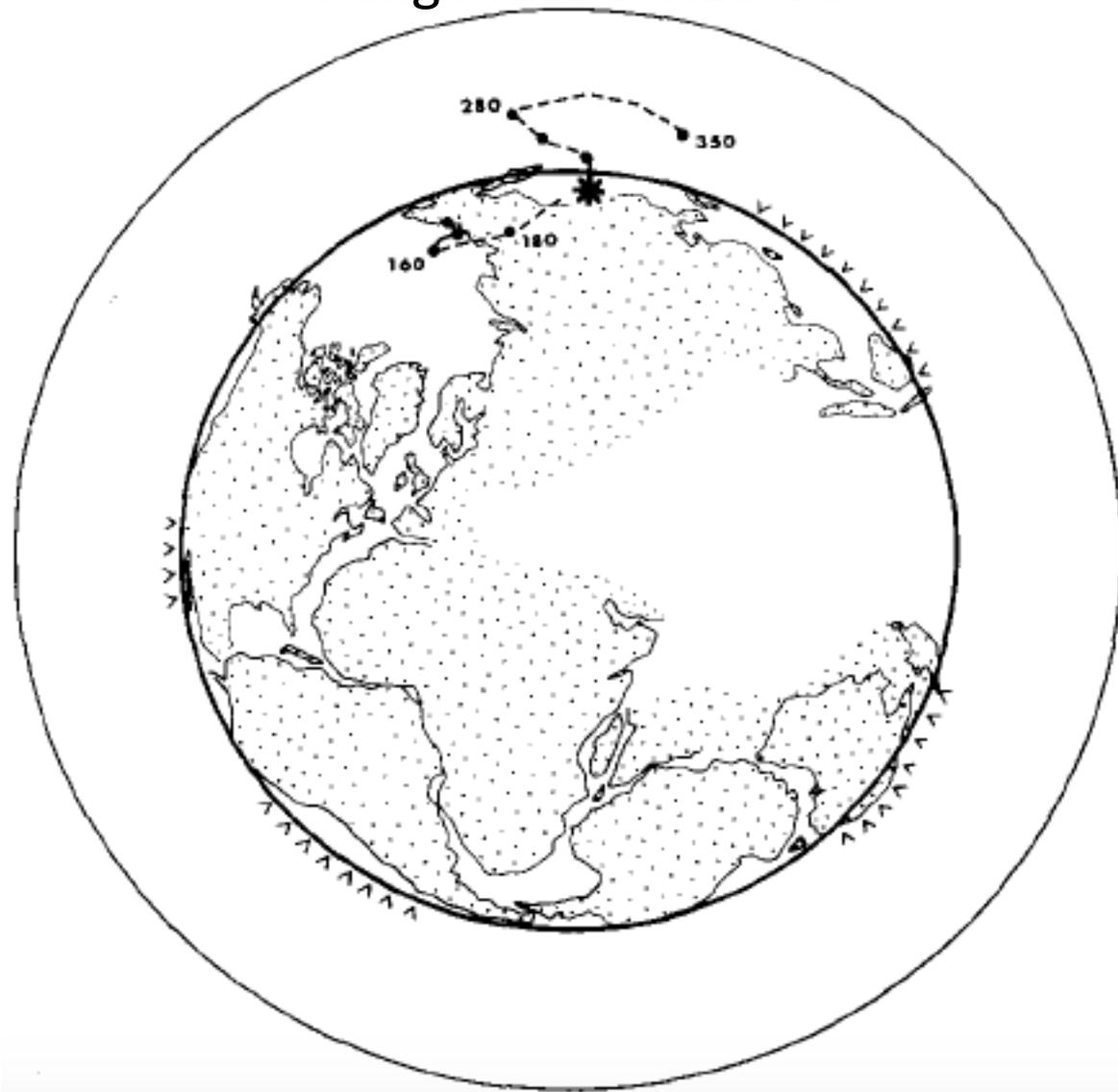
Quatre Supercontinents ont précédé la  
Pangée. Pourquoi?

2.7 Ga	Premier supercontinent?
1.87 Ga	Nuna
1.0 Ga	Rodinia
0.6 Ga	Gondwana
0.3 Ga	Pangea

# Terre actuelle



# Pangea 0.3 à 0.18 Ga



# Avant les Plaques

La Tectonique des Plaques actuelle  
avec subduction froide  
n'existe que depuis 0.6 Ga.

Entre 0.6.GA et 2.9 Ga environ,  
Il s'agissait d'une subduction chaude.

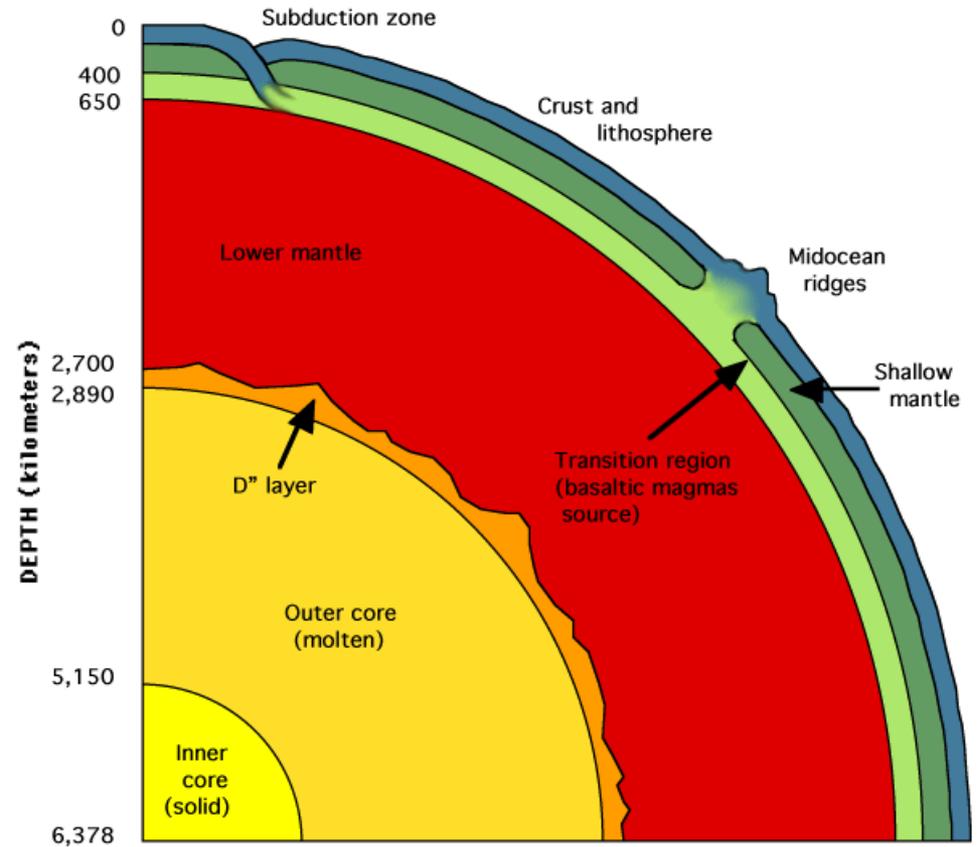
Auparavant, une subduction avec couvercle stagnant.

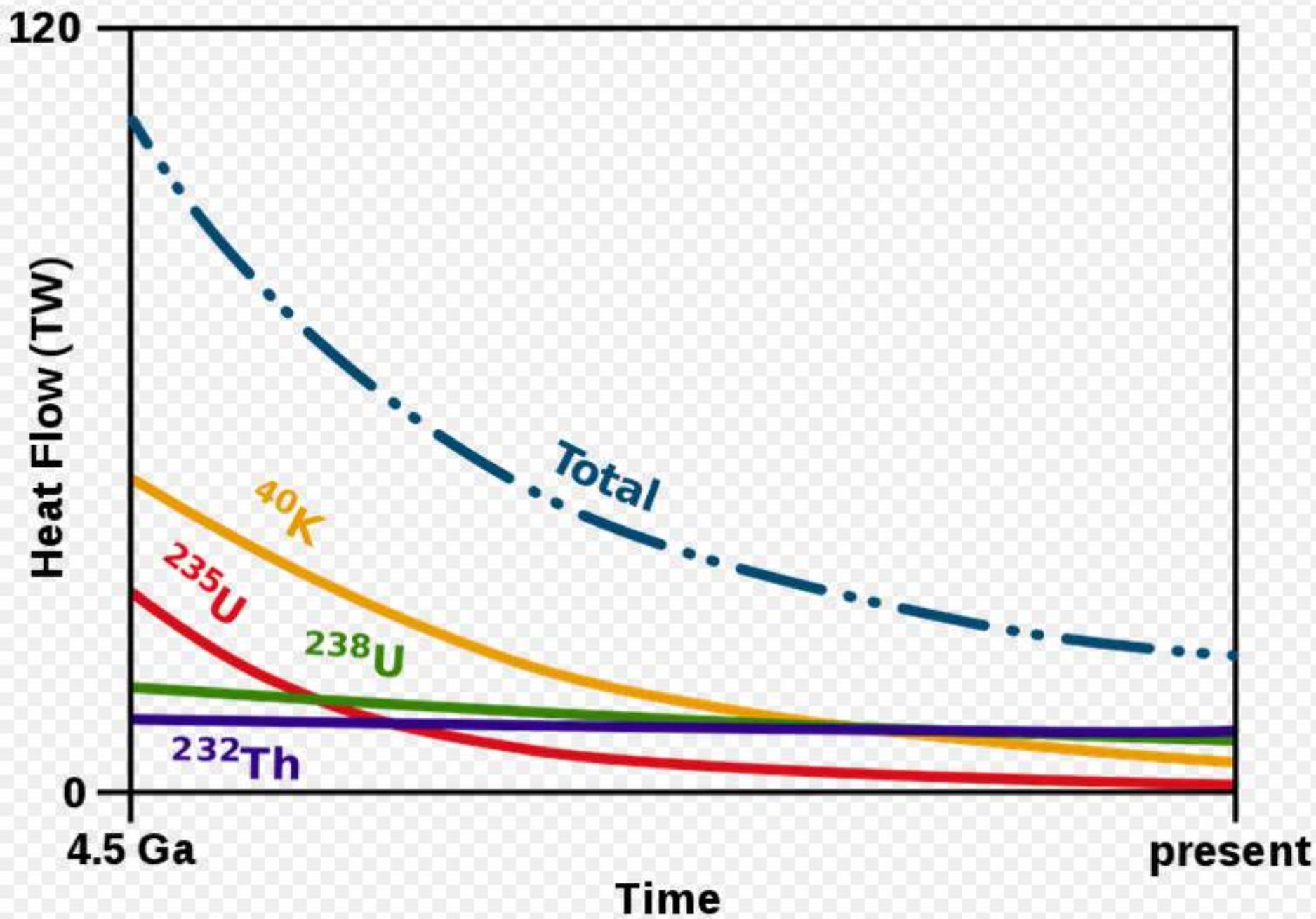
## Pourquoi?

La Terre est une centrale thermique alimentée par l'énergie radioactive.

Elle se refroidit par convection solide avec une couche thermique limite rigide.

La convection s'accompagne d'un processus de raffinage principalement grâce à la fusion partielle par décompression adiabatique.





Au début de la formation de la Terre, celle-ci était en fusion suite à l'énergie d'accrétion.

Puis suivit un refroidissement rapide avec formation du noyau de métal et début de la géodynamo qui produit le champ magnétique terrestre.

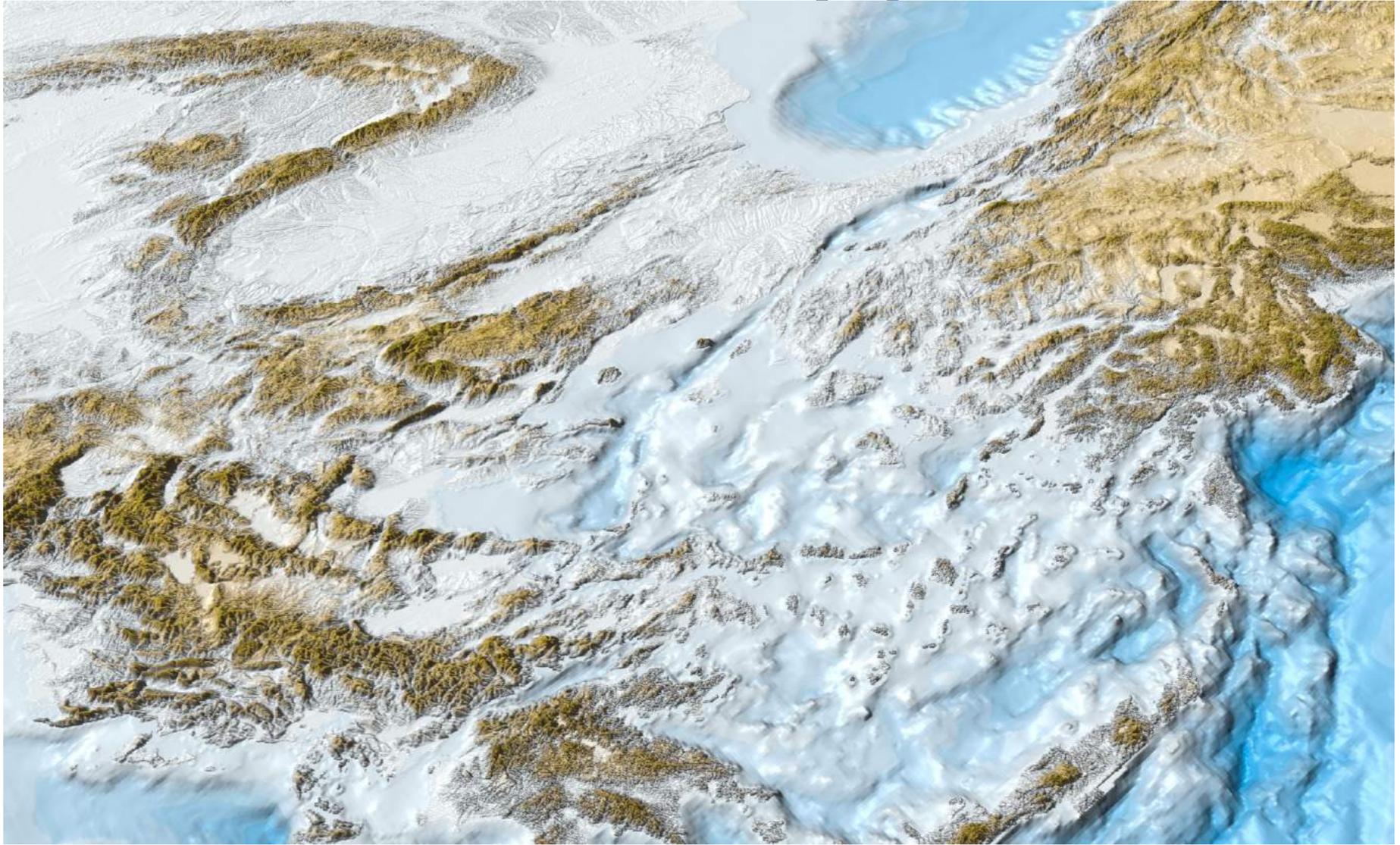
Une fois solidifiée, le refroidissement plus lent nécessita près de 4 Ga pour que notre lithosphère acquière les caractéristiques que nous lui connaissons aujourd'hui.

**Il a fallu plus de 4 Ga pour produire la  
Tectonique des Plaques à l'origine de notre  
environnement.**

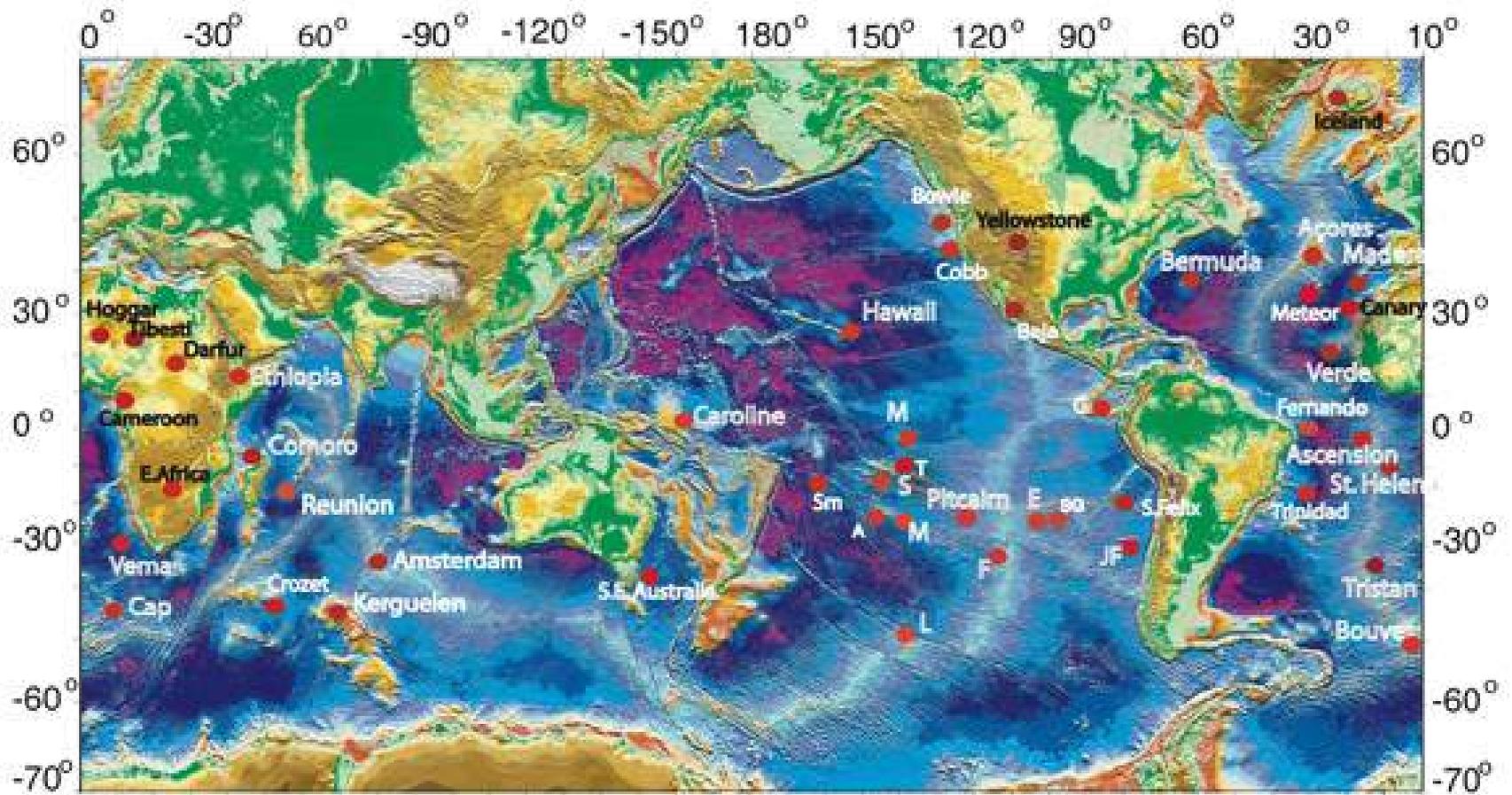
**Mais cette énergie s'épuise inexorablement!**

**Nous nous situons sans doute à un optimum  
de conditions d'environnement  
pour l'extraordinaire aventure  
que nous vivons aujourd'hui.**

# De la confrontation des plaques à la confrontation des peuples







A=Arago smt. , M=Macdonald smt., L=Louisville smt. F=Foundation smt. JF=Juan Fernandez Isl., G=Galapagos, M=Marquises Isl., T=Tuamotu, SG=Sal y Gomez Isl., Sm= Samoa Isl., L=Louisville smt. S=Society Isl.  
 Satellite altimetry map of Sandwell and Smith (1997) reproduced by D. Aslanian (Ifremer).