

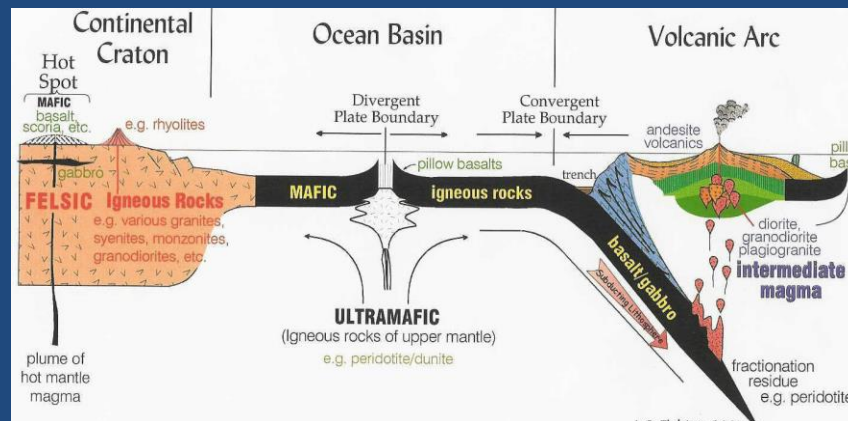
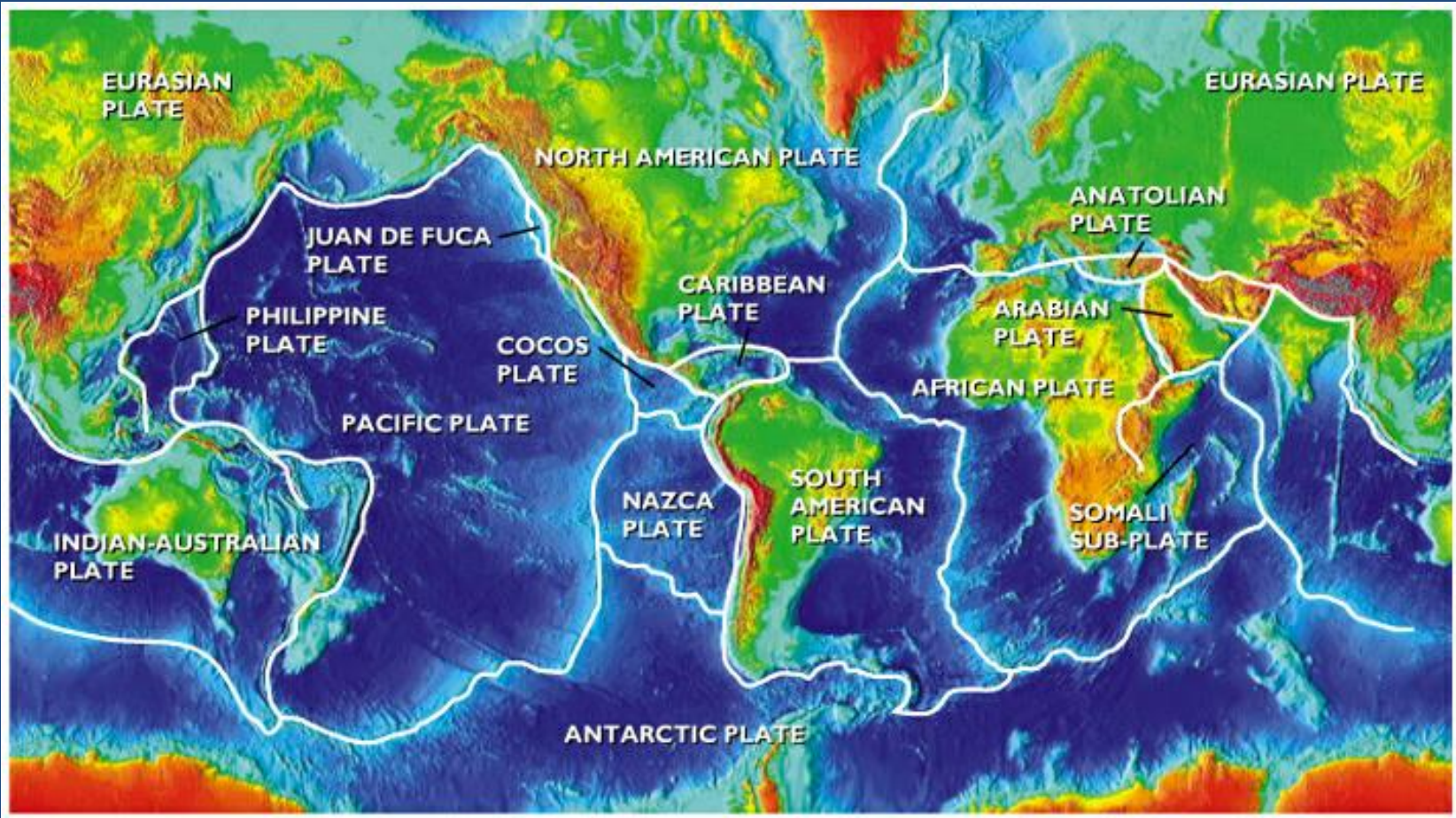
Apports du Paléomagnétisme à la tectonique des plaques

Formaterre, Lyon, 2013

Jean Besse

Institut de Physique du Globe de Paris



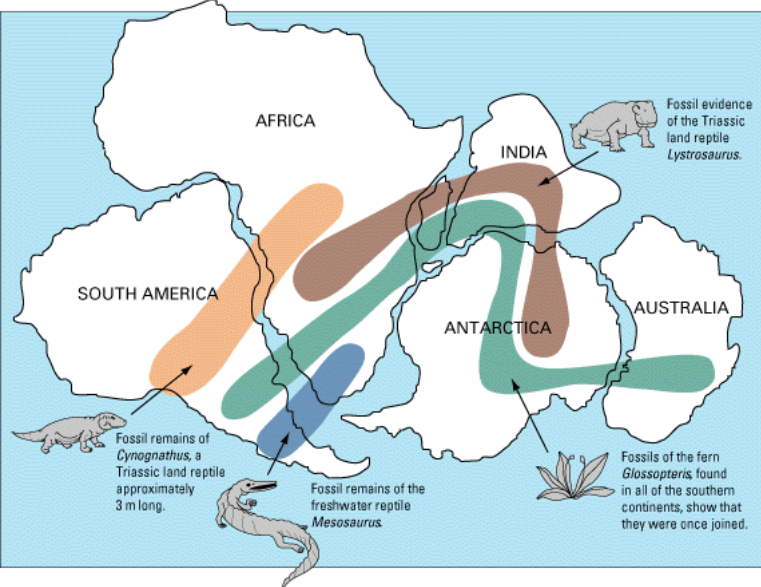


Alfred Wegener (1880-1930)

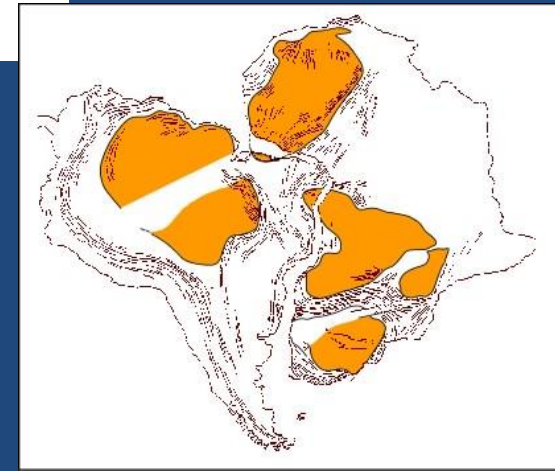
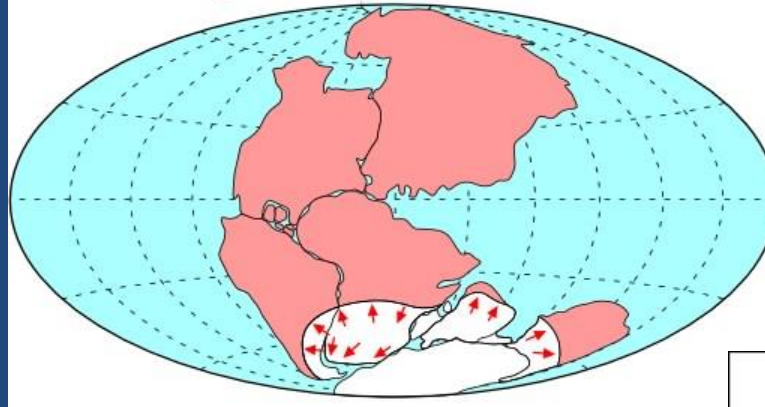
Dérive des continents



« La première idée des translations continentales me vint à l'esprit en 1910. En considérant la carte du globe, je fus subitement frappé de la concordance des côtes de l'Atlantique, mais je ne m'y arrêtai point tout d'abord, parce que j'estimai de pareilles translations invraisemblables. En automne 1911, j'eus connaissance (...) de conclusions paléontologiques admettant l'existence d'une liaison ancienne entre le Brésil et l'Afrique. Cela m'engagea à faire un examen préalable et sommaire des résultats connexes au problème des translations. »



La solution de Wegener





Malgré des observations plutôt convaincantes, l'idée d'une dérive des continents (avec les translations qu'elle supposait) est repoussée massivement par la communauté des géophysiciens, faute de mécanisme pour l'expliquer: Harold Jeffreys calcule en effet que la terre est trop rigide....

40 ans plus tard seulement, de nouvelles découvertes en apportent la preuve:

- Exploration des océans (Bathymétrie)

- Sismologie -> localise les frontières de plaques et les plaques en subduction

- Pétrographie expérimentale -> montre que le manteau est « plastique » sur de grandes échelles de temps.

- Magnétisme

40 ans plus tard seulement, de nouvelles découvertes en apportent la preuve:

-Exploration des océans (Bathymétrie)

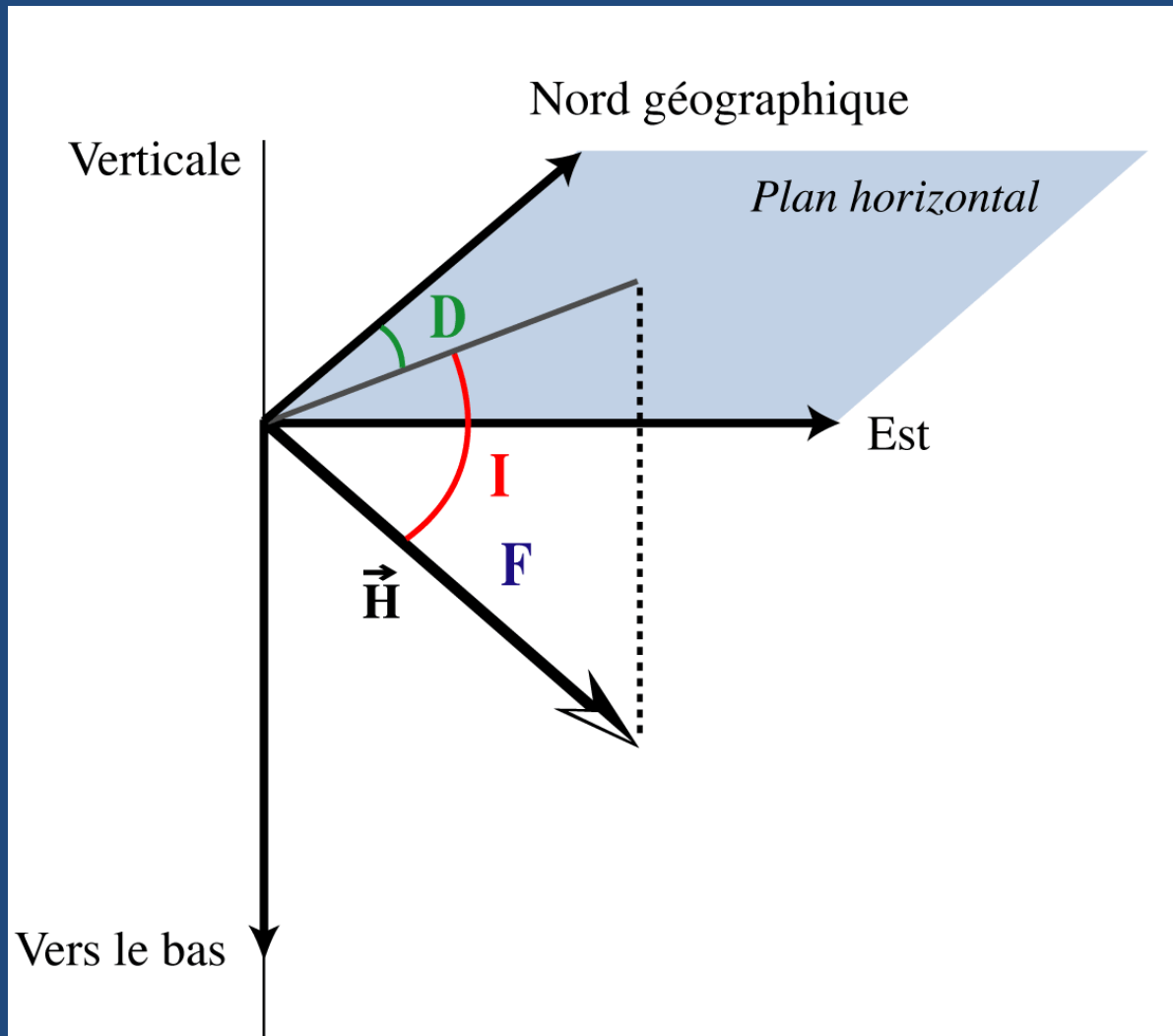
-Sismologie -> localise les frontières de plaques et les plaques en subduction

-Pétrographie expérimentale -> montre que le manteau est « plastique » sur de grandes échelles de temps.

-Magnétisme: Contribution majeure

Le champ magnétique en un point est un vecteur que l'on peut définir par:

- son intensité F
- sa direction décrite elle-même par deux angles :
l'inclinaison I et la déclinaison D



Les mesures directes du champ géomagnétique

⇒ Sur le champ actuel : Observatoires+ Satellites



*Satellites Oerstedt, Magsat,
dans quelques jours, Champ*

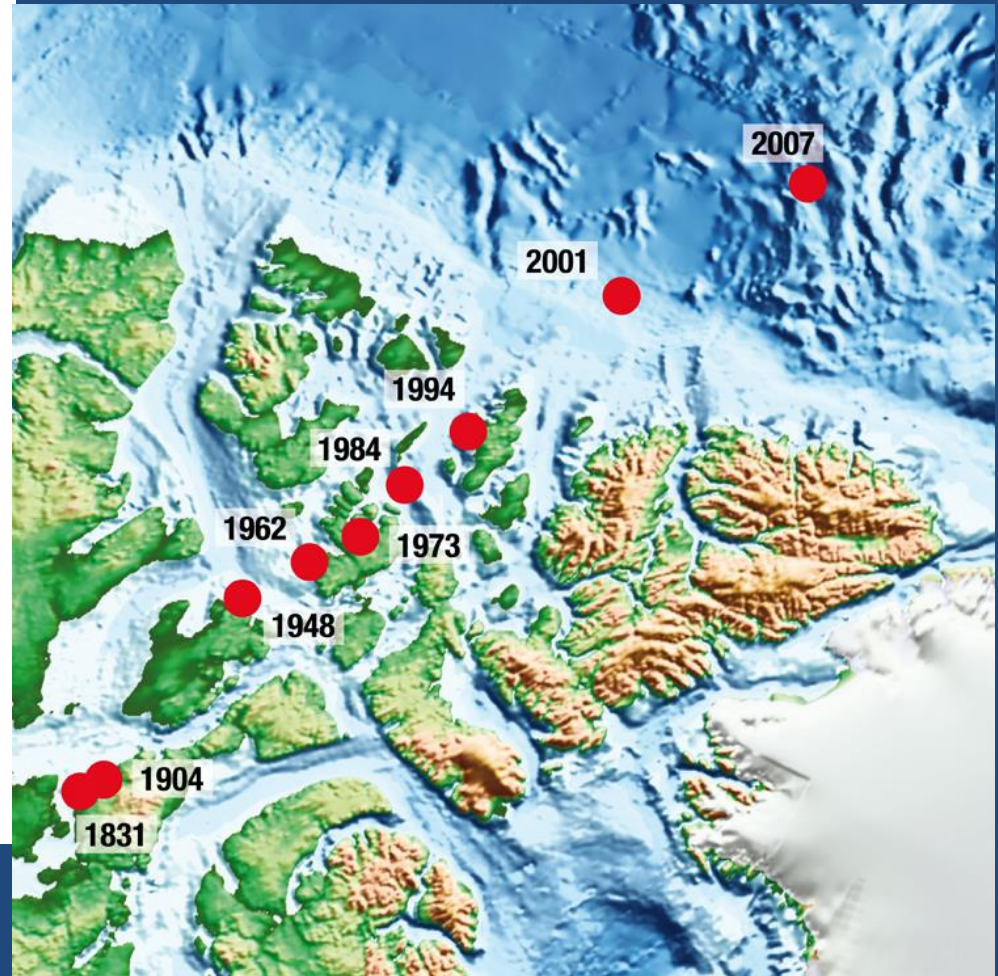
⇒ Sur le champ des 3-4 derniers siècles
Géomagnétisme historique



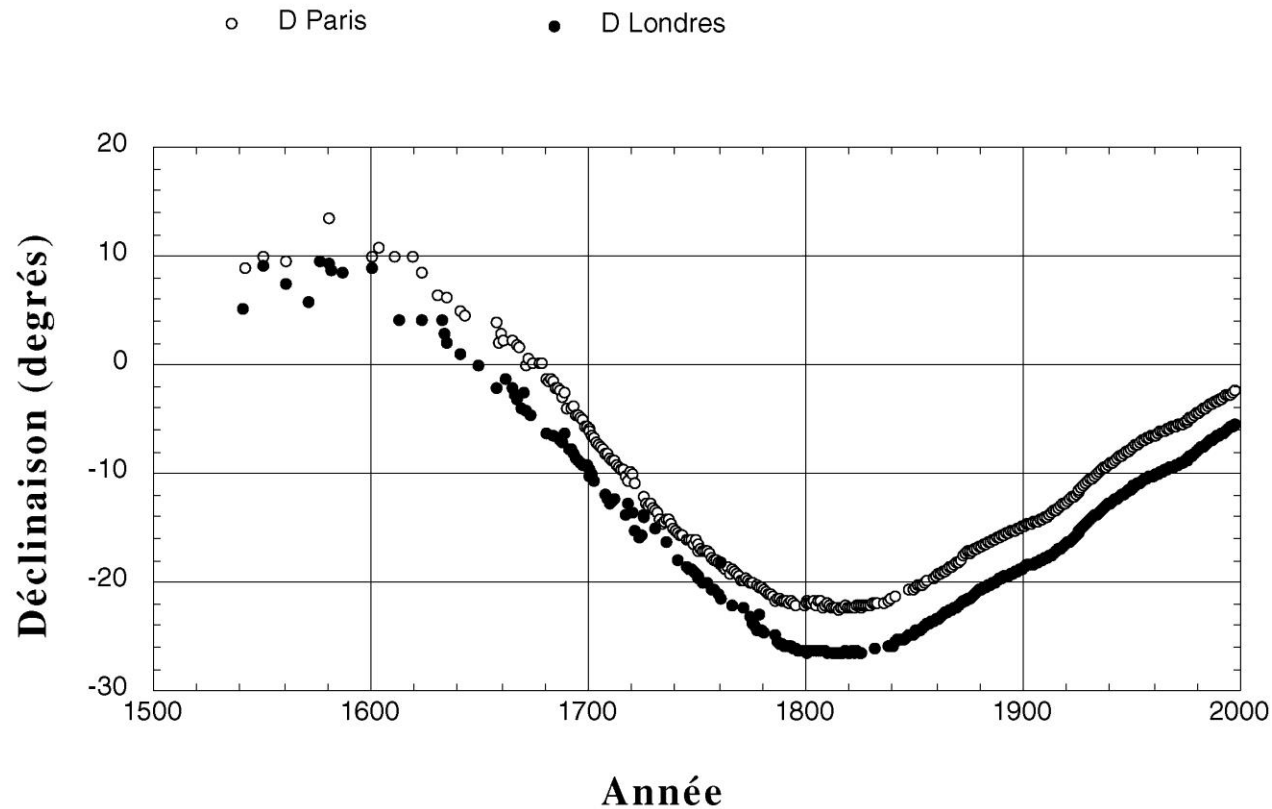
Observatoire de Chambon-la-forêt

La dérive du pôle nord magnétique depuis 180 ans

Actuellement environ 65 km par an



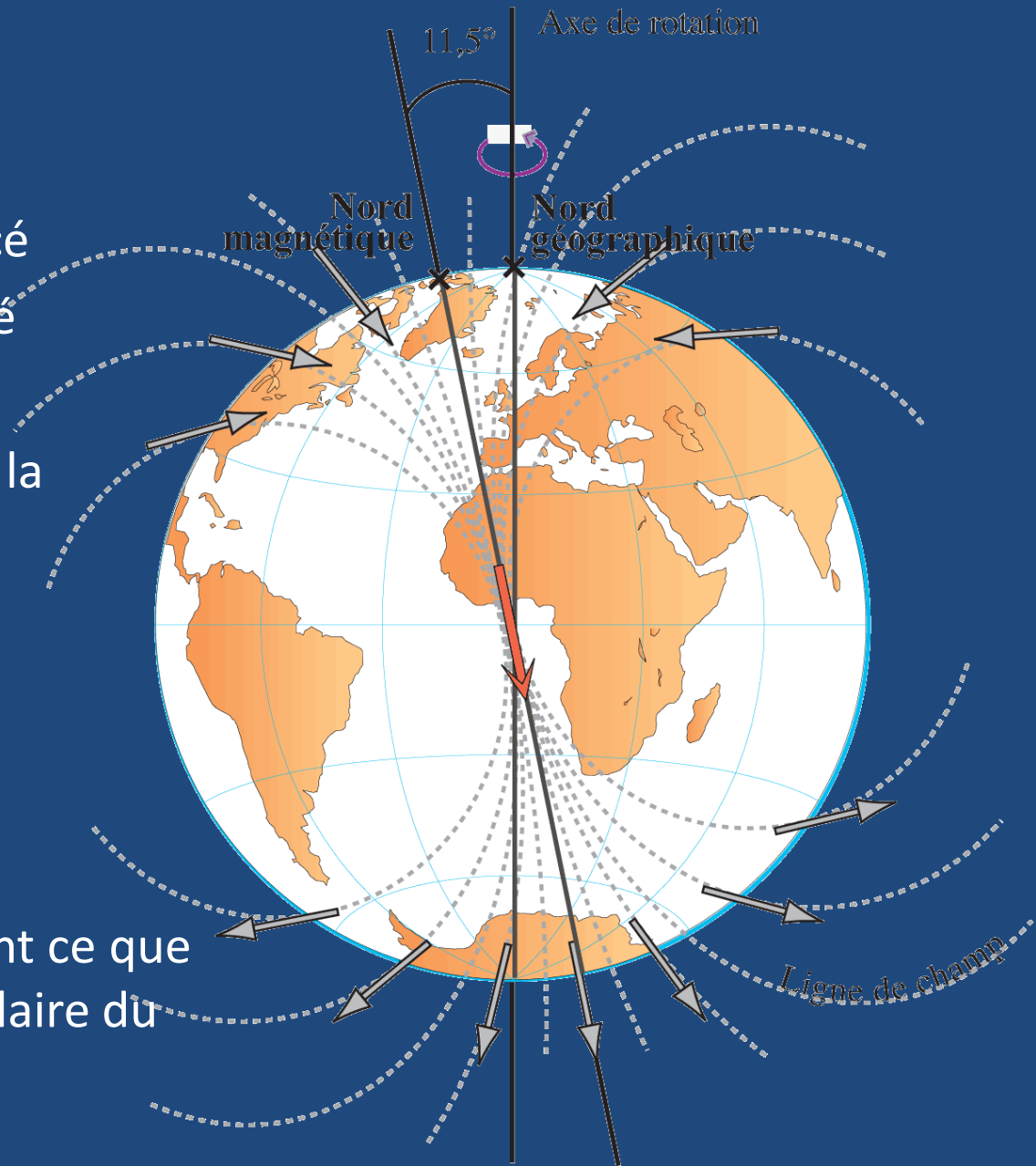
La déclinaison magnétique à Paris et à Londres observée depuis 1540



Le champ magnétique varie au cours du temps

⇒ Le champ magnétique Terrestre est en première approximation (à 90%) celui que produirait un dipôle placé au centre de la terre et incliné d'un angle de $11,5^\circ$ par rapport à l'axe de rotation de la terre.

⇒ Les 10% restants constituent ce que l'on appelle la partie non dipolaire du champ géomagnétique.



Qu'en est-t-il pour les périodes plus anciennes?

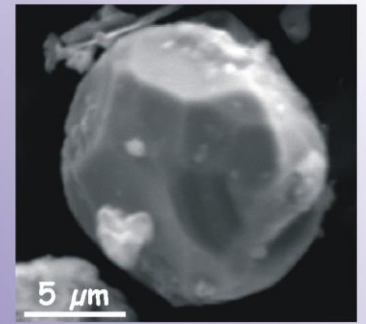
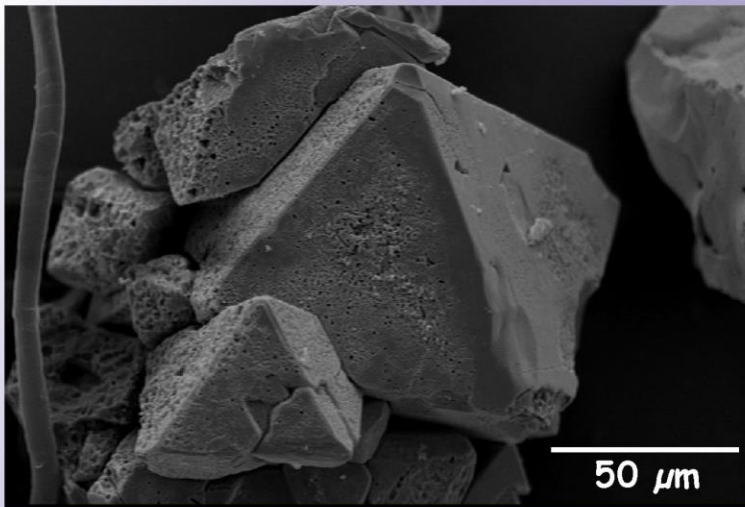
Beaucoup de matériaux archéologiques ou géologiques s'aimantent dans la direction du champ magnétique qui leur est appliqué et en conservent la mémoire....

⇒ Au travers des derniers millénaires
Archéomagnétisme



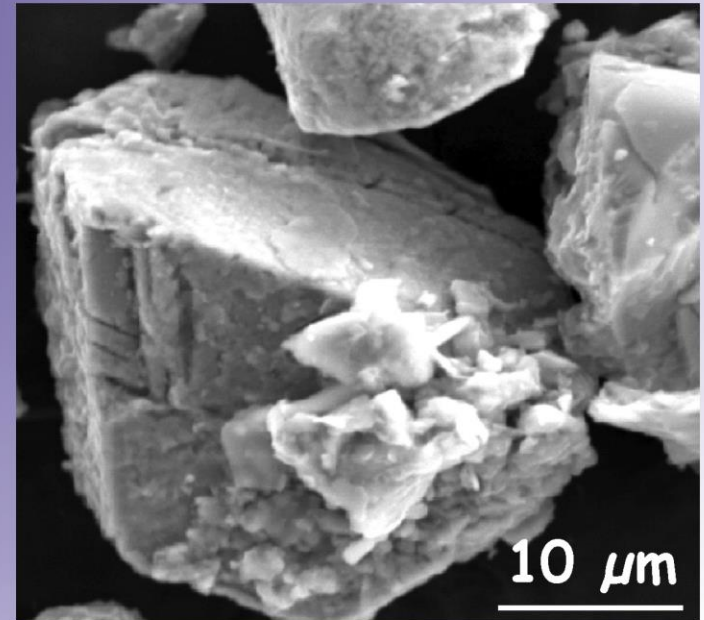
⇒ Aux échelles des temps géologiques
Paléomagnétisme





Magnétite - Fe_3O_4

Un minéral omniprésent dans tout les types de roches, quelles soient sédimentaires, ignées ou métamorphiques.

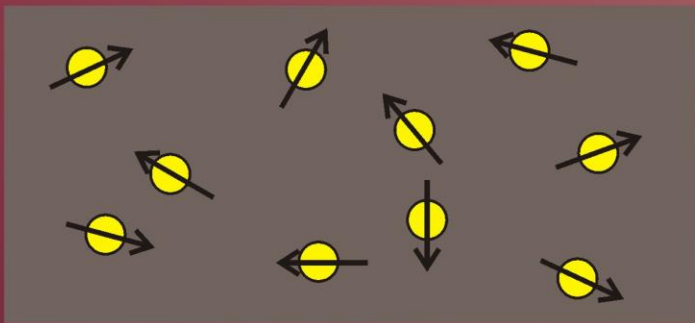


Aimantation Thermorémanente

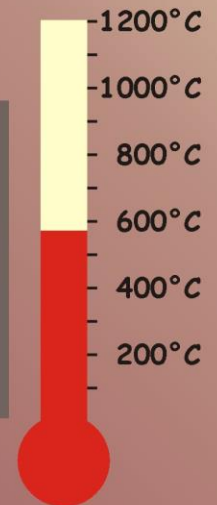
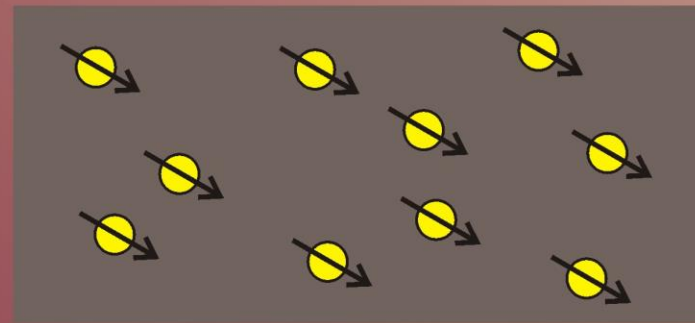
—●→ grain de magnétite



Champ magnétique
terrestre



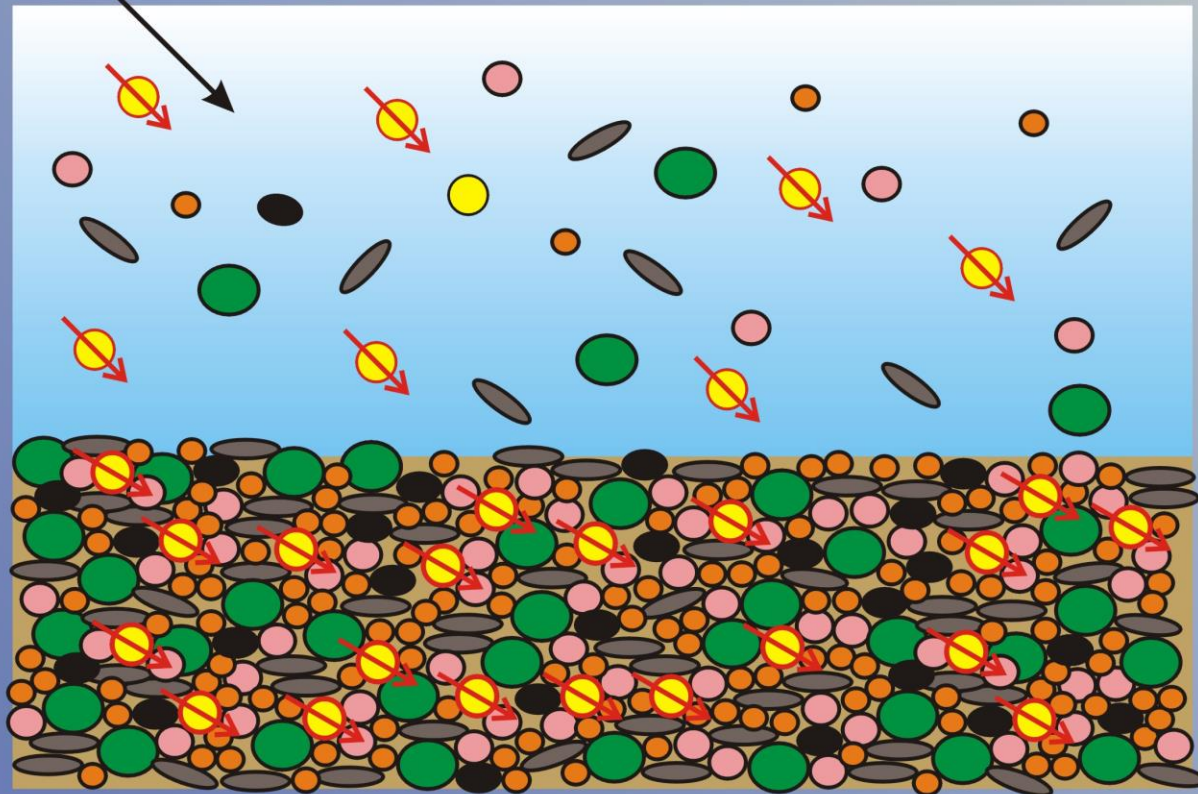
Champ magnétique
terrestre



Aimantation Rémanente Détritique

Champ magnétique terrestre

grain de magnétite



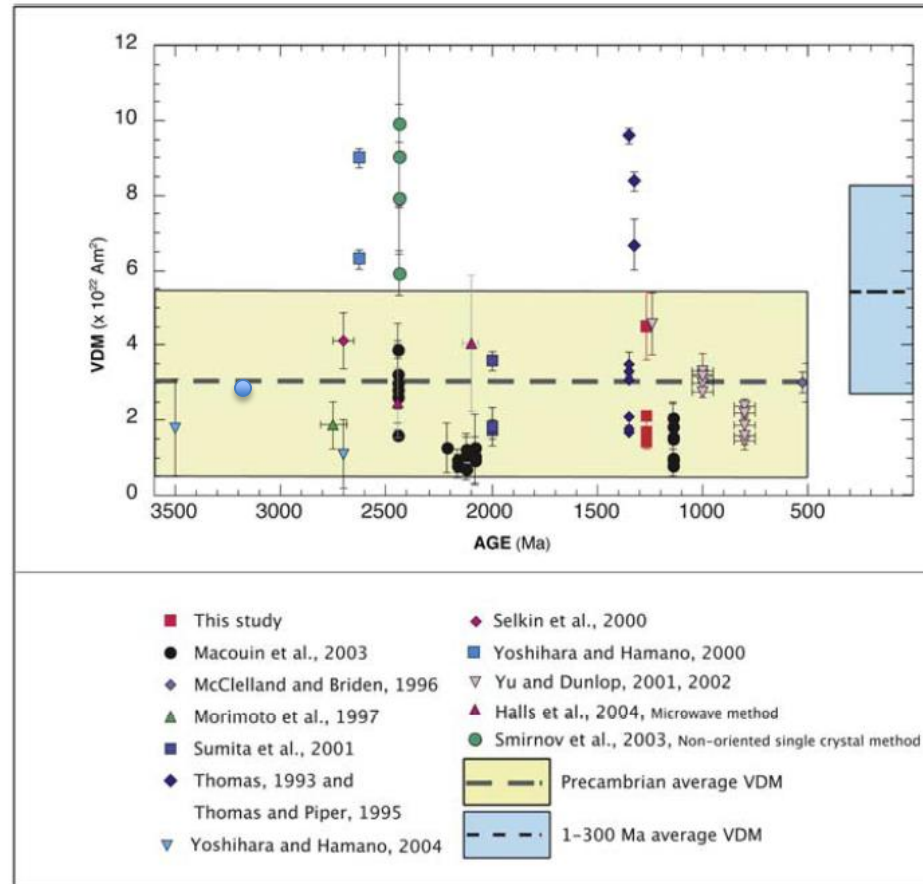


Figure 6. Variation of Virtual Dipole Moment (VDM) over the 3–0.5 Ga period.

L'aimantation de la magnétite est stable sur des temps
>>> âge de la Terre (Théorie de Néel)

-Mesures de l'aimantation rémanente des échantillons de roches au laboratoire

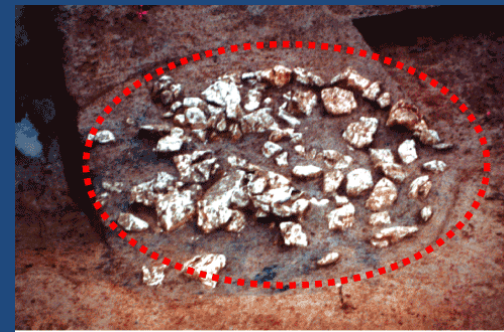
-Tests de stabilité de l'aimantation:

- Techniques de laboratoires (Désaimantations)
- Techniques statistiques (test du pli, des inversions, etc...)

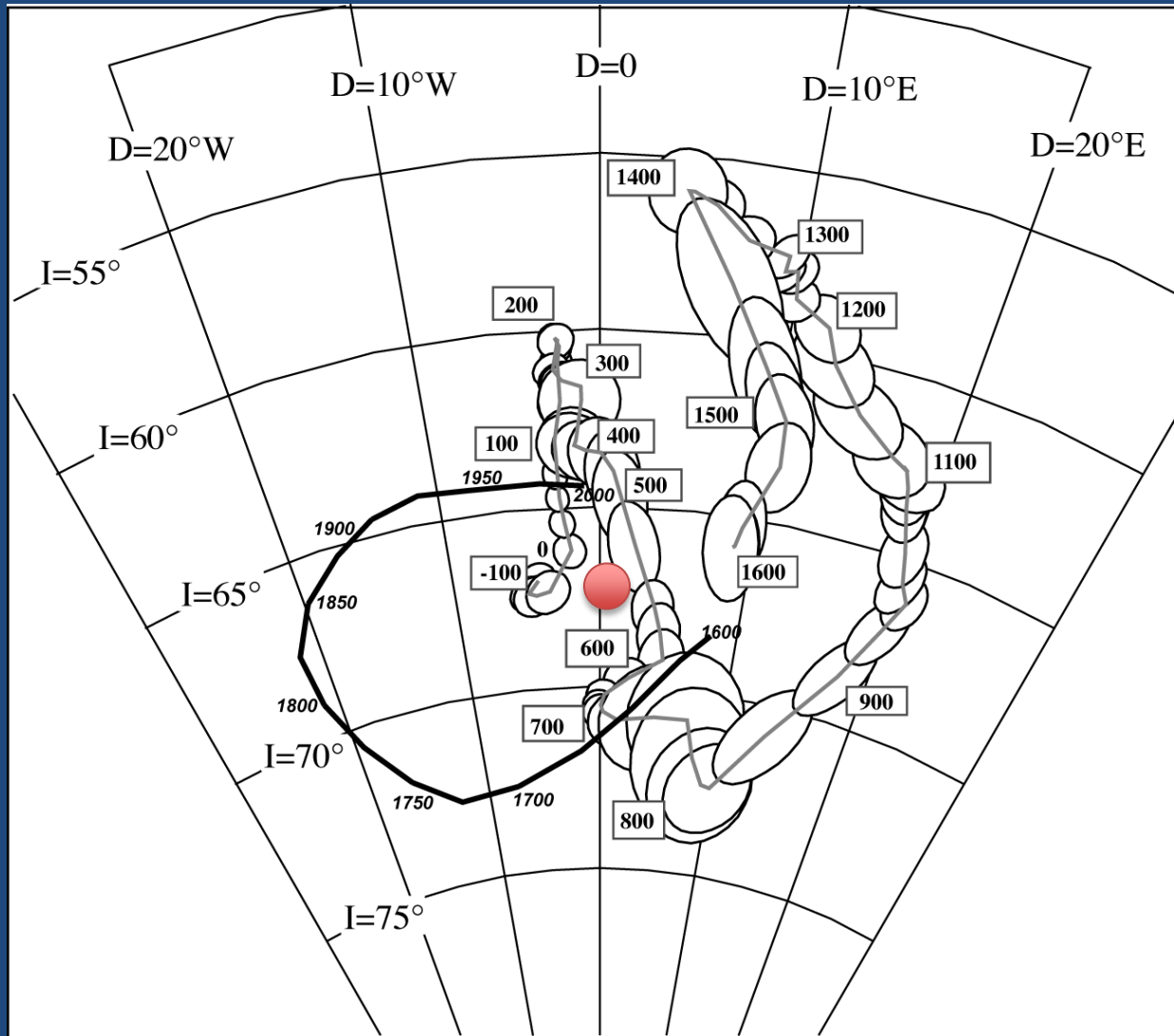


Mesures du champ Ancien: l'Archéomagnétisme.

- les foyers
- les fours domestiques
- les fours de potier
- les briques
- les tuiles
- les céramiques
- les coulées volcaniques



Variations directionnelles du champ géomagnétique à Paris depuis le premier siècle avant J.-C.

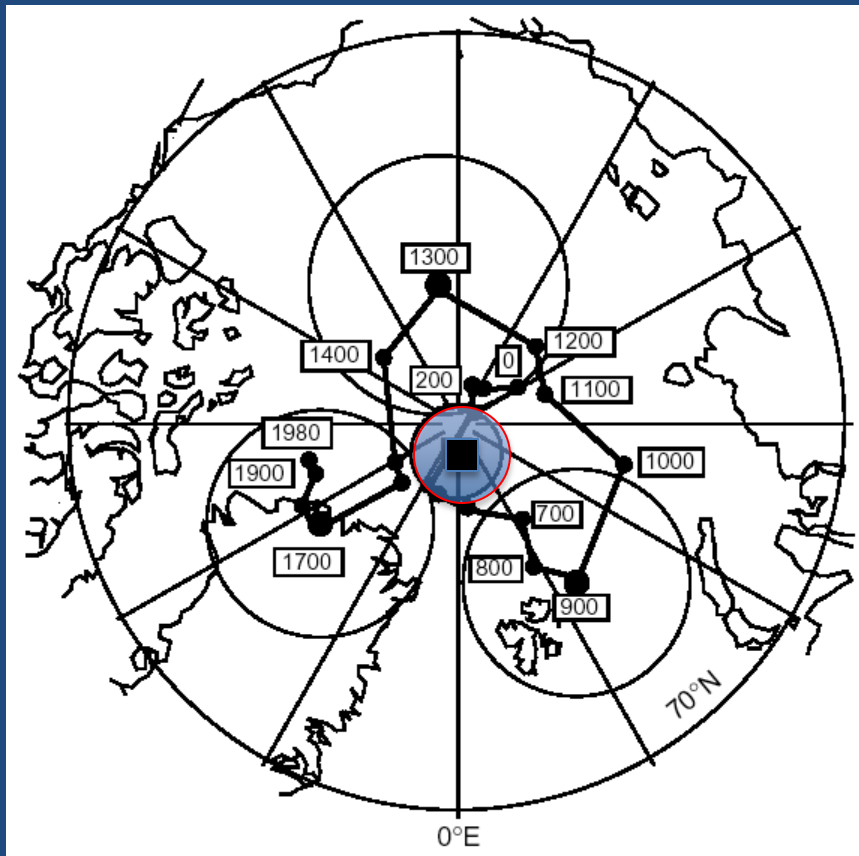


Variations très importantes:

De 2000 à 100 avant J.C.

- 20° en Inclinaison
- 40° en Déclinaison!

Mais la moyenne sur 2000 ans n'est pas loin de celle que produirait un dipôle axial centré. (Point rouge)



A partir des directions archéomagnétiques, on peut calculer la position successive des pôles Nord Magnétiques depuis 2000 ans: la variation est aussi importante que précédemment

On peut en faire la moyenne!

Cette moyenne contient le pôle géographique actuel

Mesure du champ ancien: Paléomagnétisme.

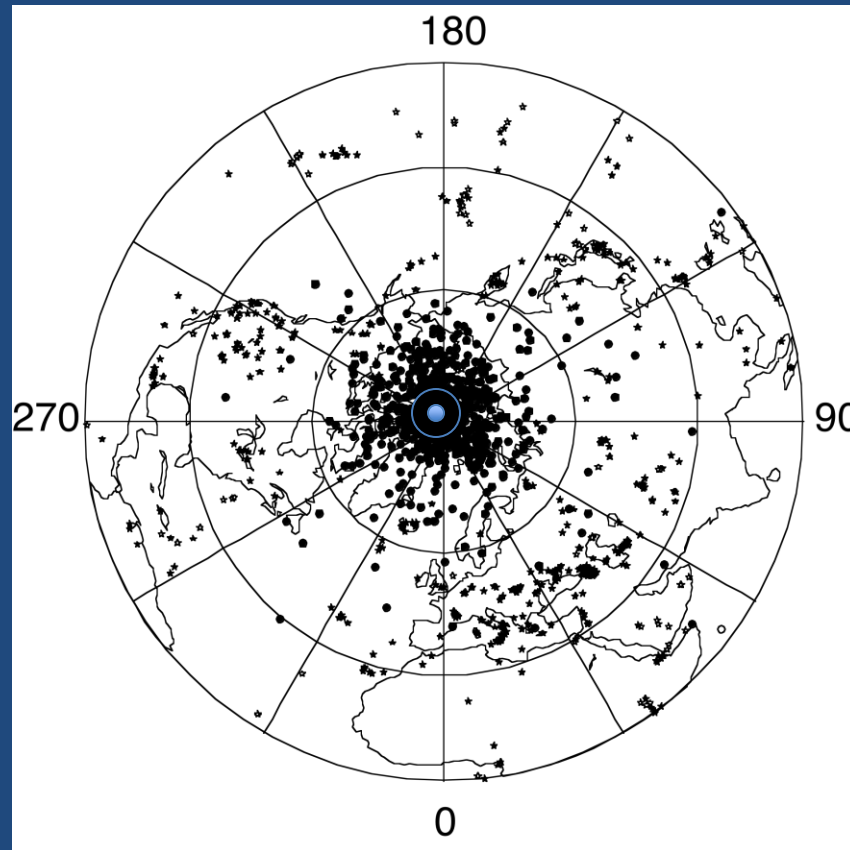


Photo Mathilde Cannat

- Roches Volcaniques
(Datation radiométriques)

- Sédiments:
(datation par stratigraphie et par paléontologie)





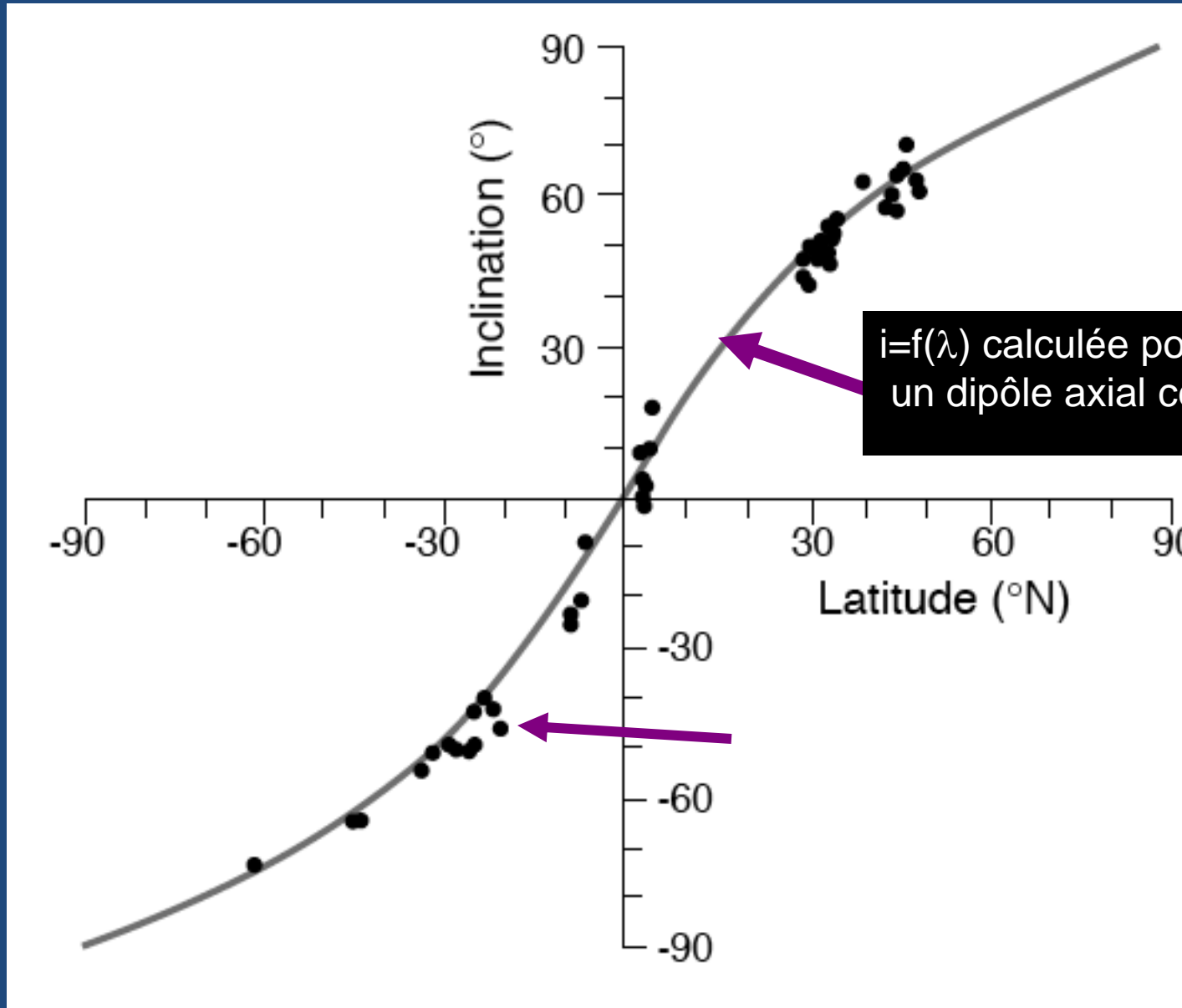
Données paléomagnétiques
entre 0 et 5 Millions d'années
(Ma)

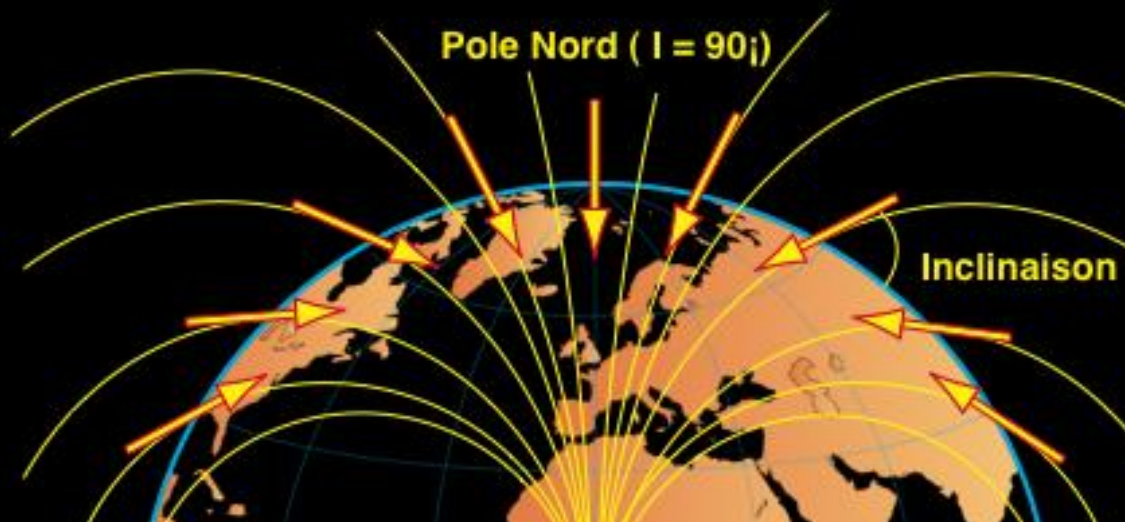
On peut également en faire la
moyenne!

La moyenne des données
Paléomagnétiques récentes (0-5Ma)
contient également le pôle
géographique

LE CHAMP « MOYEN » EST DIPOLAIRE !!!!

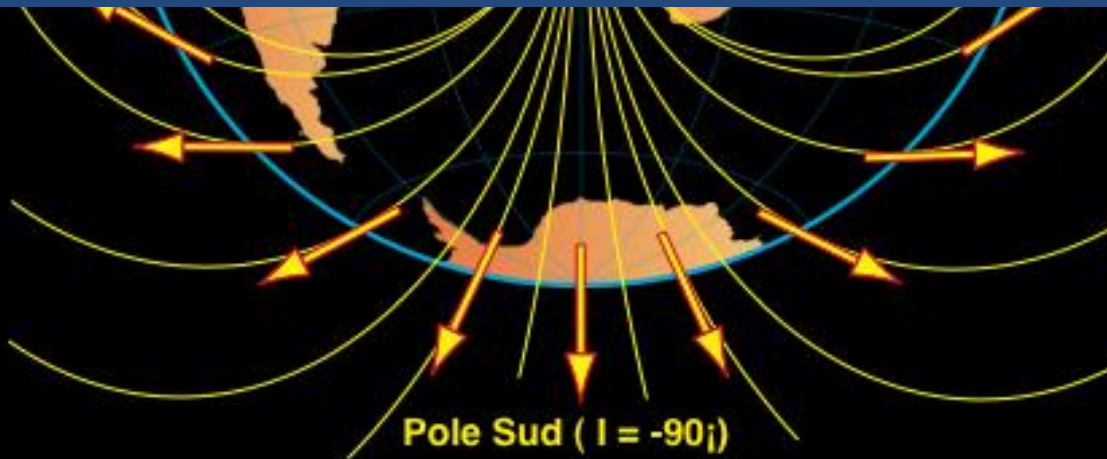
Vérification de la Dipolarité du CMT pour les données Pliocènes et quaternaire (Opdyke and Henry, 1969)





• Tout se passe comme si le champ magnétique était en moyenne celui que produirait un dipôle axial centré (petit aimant court placé au centre de la terre, et suivant l'axe de rotation de celle-ci).

ON VA RETROUVER LA LATITUDE DE FORMATION
ET LA ROTATION DE LA ROCHE ANALYSEE.
Manque la paléolongitude.

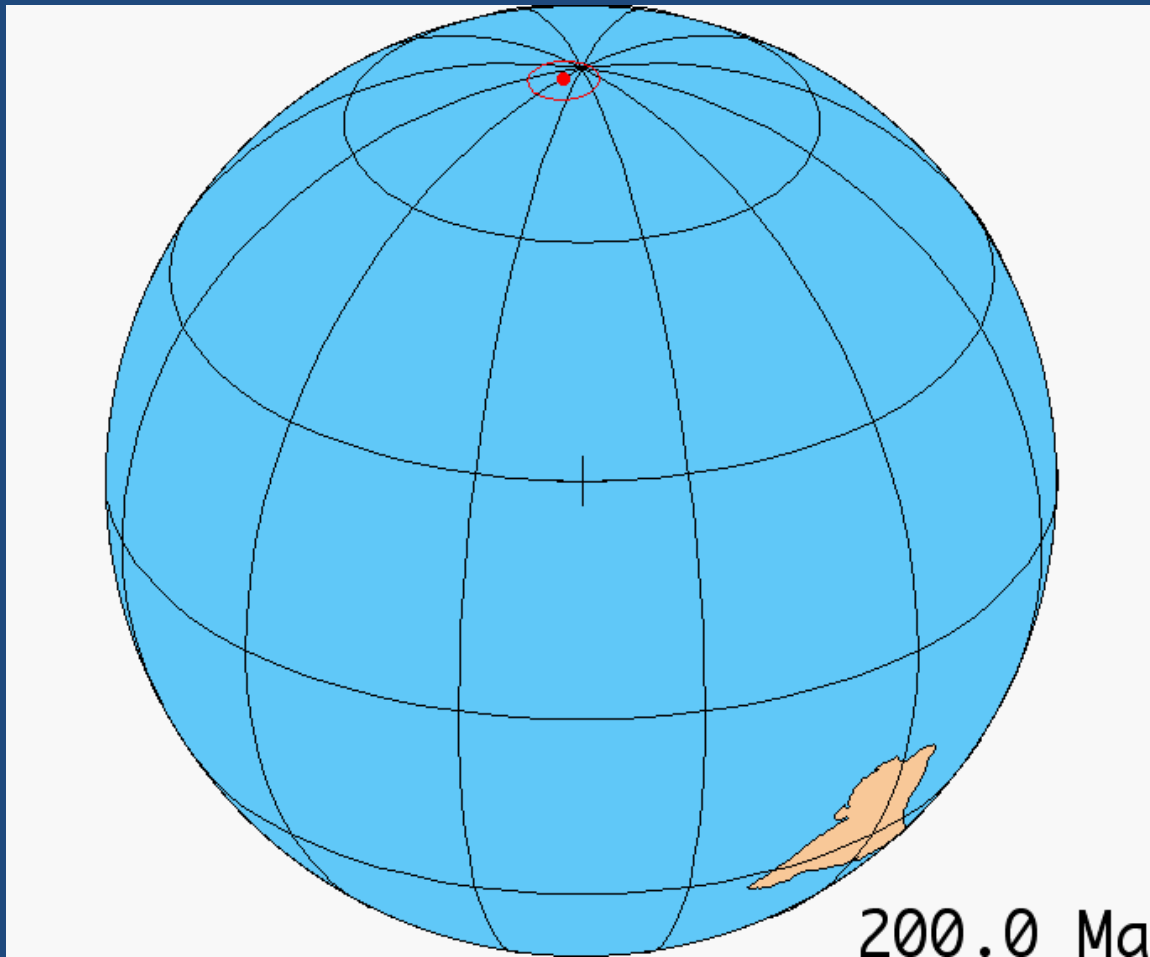


• Prélevant des roches datées, on va pouvoir mesurer en laboratoire les directions du champ magnétique qu'elles ont fossilisées lors de leur formation.

Mouvement de l'Inde depuis 200Ma



la position de l'Inde depuis 200Ma

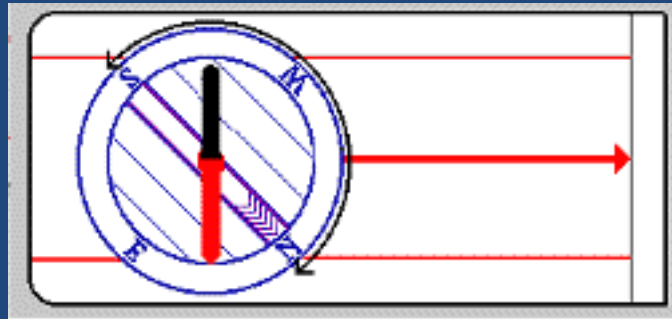


En fait, ce n'est pas le pôle magnétique qui dérive, ni l'axe de rotation de la Terre, mais c'est la plaque qui se déplace par rapport à l'axe.

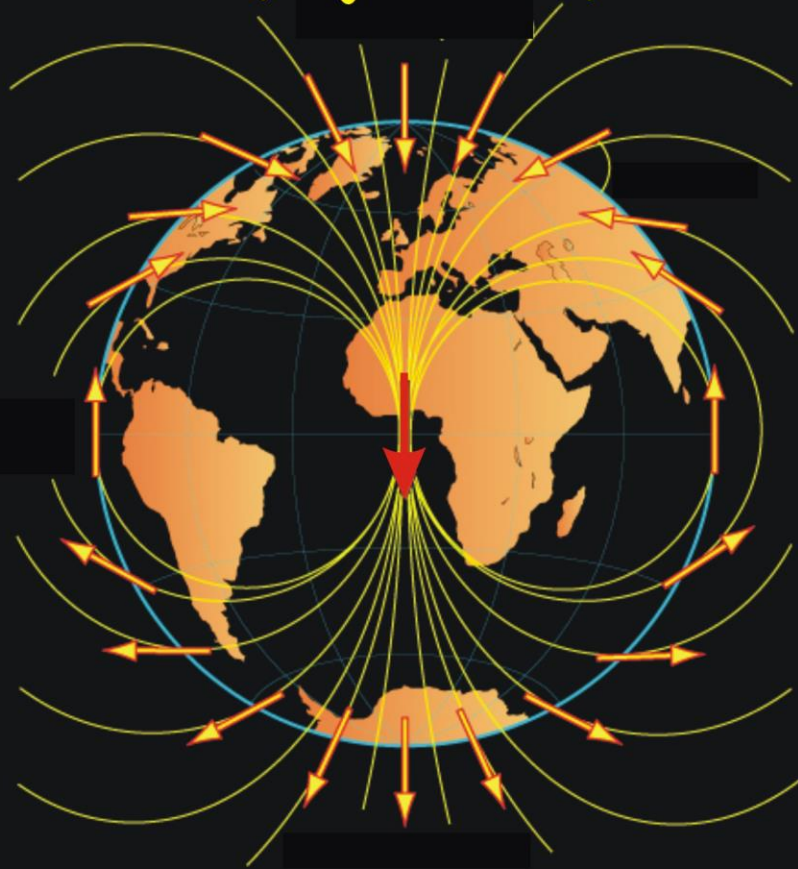
(Egalement démontré par les climats anciens).

Et le jeu de reconstruction des continents peut presque commencer!!!!

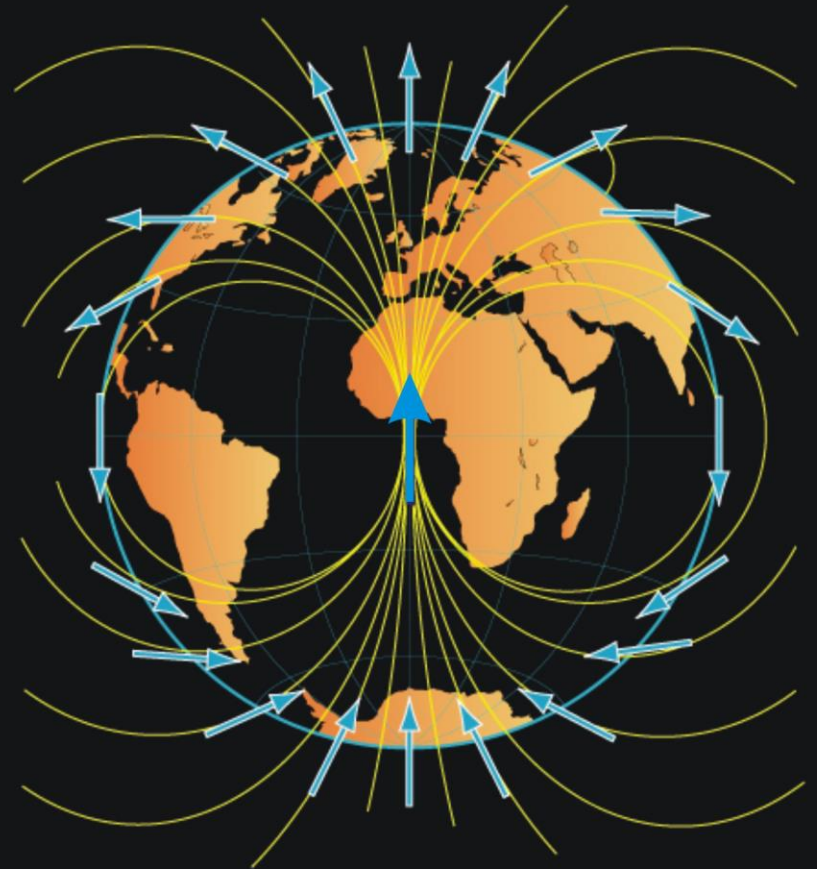
Mais auparavant, une autre
propriété fondamentale du champ
magnétique terrestre:
il s'inverse.



Polarité Normale (Aujourd'hui)



Polarité Inverse



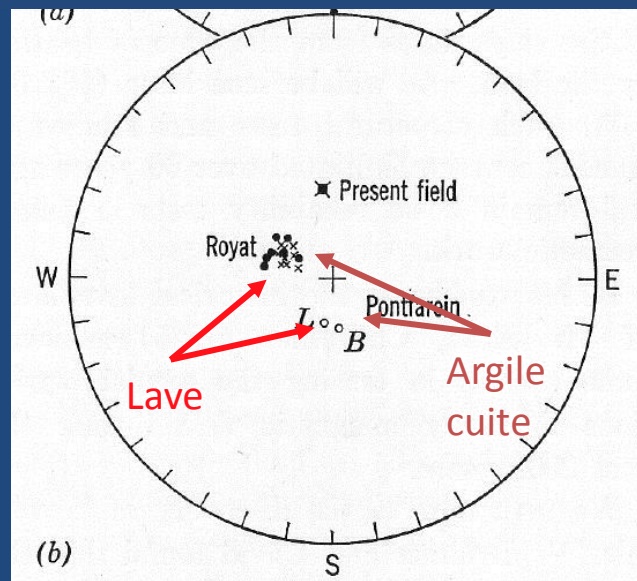


C'est à un Français,
Bernard Brunhes, qu'on
peut attribuer la
découverte de
l'aimantation inverse
des roches naturelles et de
l'éventuelle
inversion du champ
magnétique terrestre dans
les années 1910.

La
« coulée de Brunhes et l'argile
cuite »
à Pontfarein
(A côté de Saint Flour)

(photos Carlo Laj)





Résultats de
David et Brunhes
in Irving (1964)

« Ce qui ressort de ces nombres, c'est d'abord que le pôle Nord est, dans ces échantillons, tourné vers le Sud; c'est surtout que ce pôle Nord est ici en haut au lieu d'être en bas. L'inclinaison est négative.

Donc, si la direction d'aimantation de l'argile métamorphisée nous donne la direction du champ terrestre à l'époque de la coulée, nous savons qu'en un moment de l'époque miocène, aux environs de Saint-Flour, le pôle Nord était dirigé vers le haut; c'est le pôle Sud de la terre qui était le plus voisin de la France centrale. »

(d'Après Courtillot, V., and J.-L. Le Mouél in Rev. Geophys., 2007)

A Terre, grâce aux progrès de la datation radiométriques par méthode K/Ar on établit progressivement une échelle magnétique des temps.

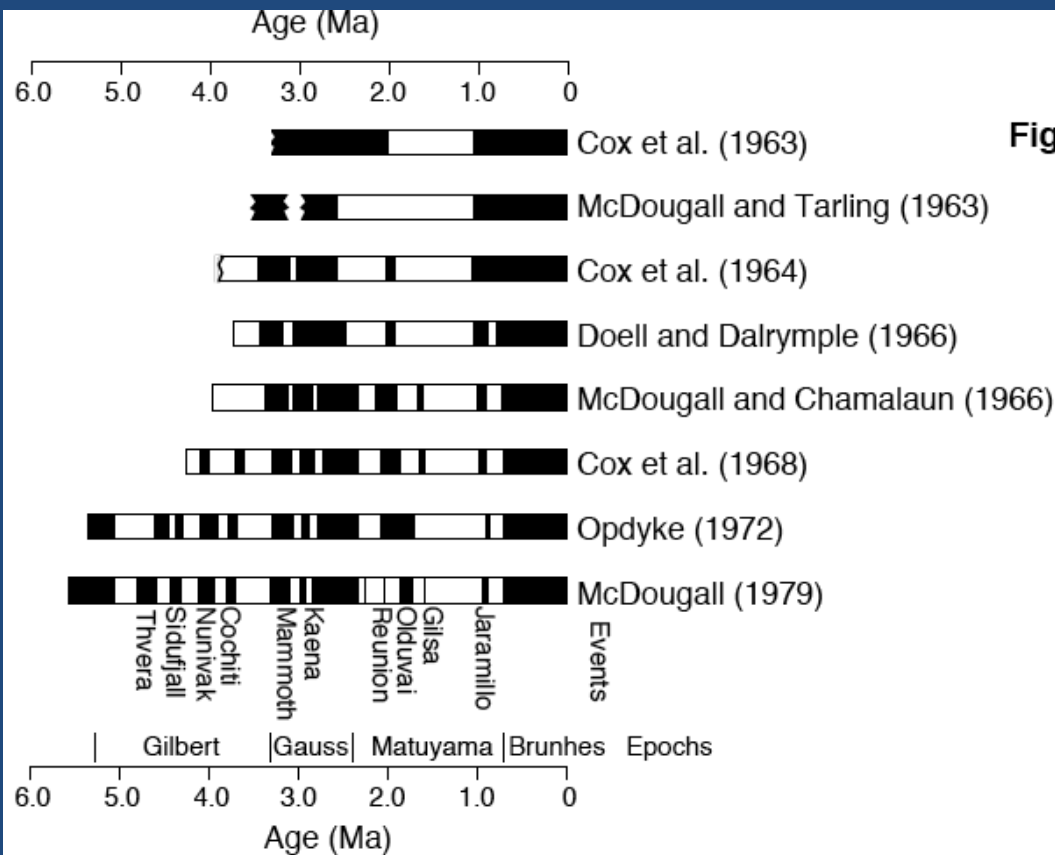


Figure 9.1 Evolution of the Pliocene–Pleistocene geomagnetic polarity time scale between 1963 and 1979. On this and all subsequent polarity columns or time scales, black intervals indicate normal polarity and white intervals indicate reversed polarity; references are given at the right of each time scale; the “event” and “epoch” nomenclature applied to this portion of the time scale is given at the bottom. Adapted from McDougall (1979).

En Mer, on mesure indépendamment l'aimantation du plancher
Océanique et ses « *Anomalies* » Magnétiques, sans comprendre à quoi
elles correspondent.

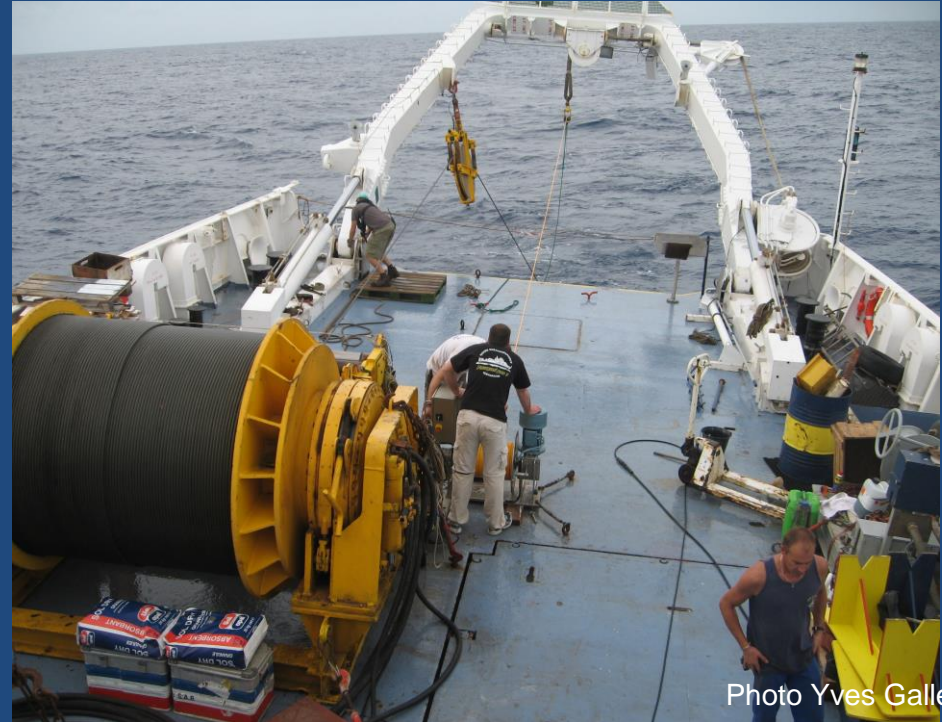
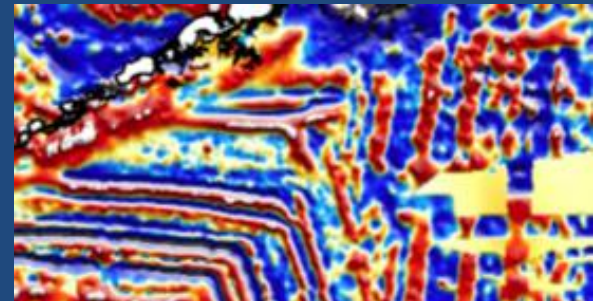
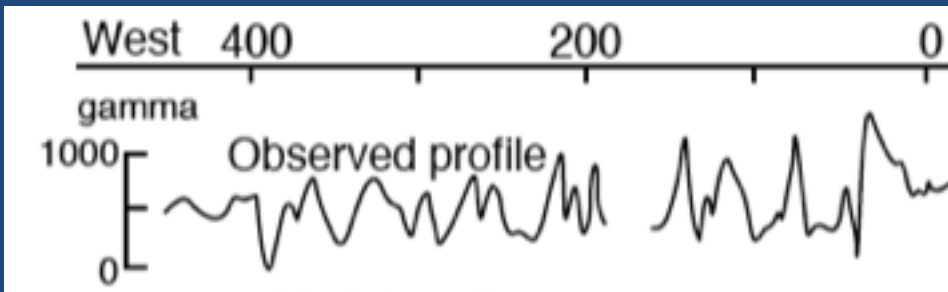
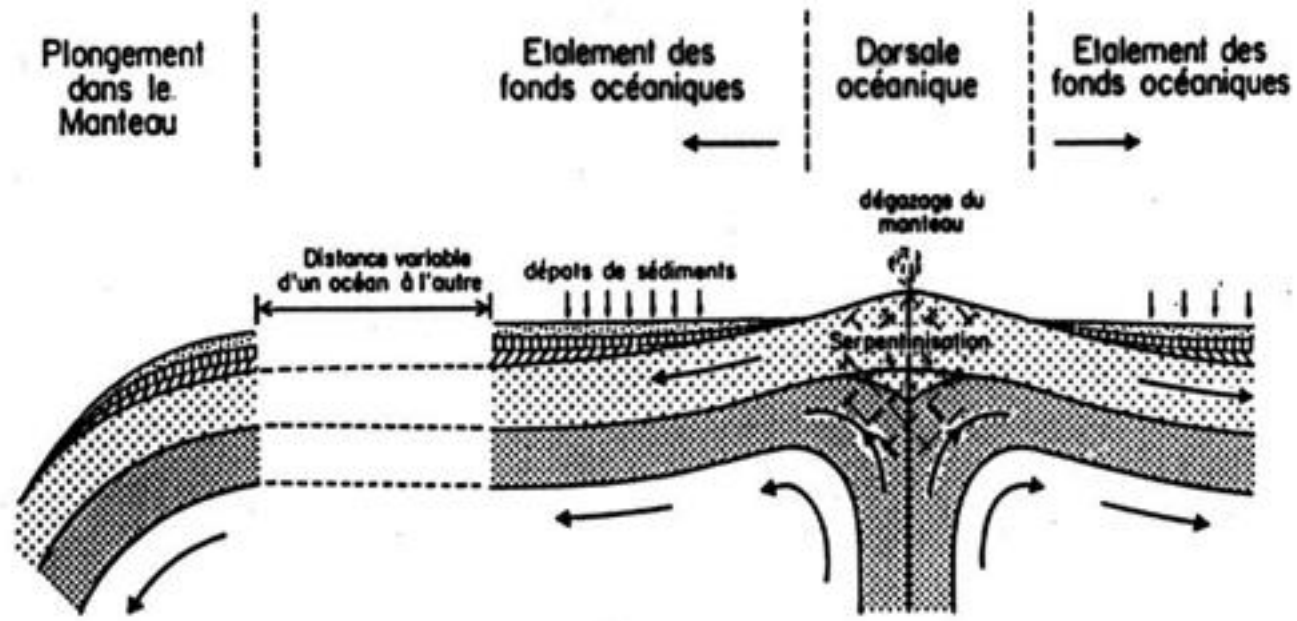


Photo Yves Gallet





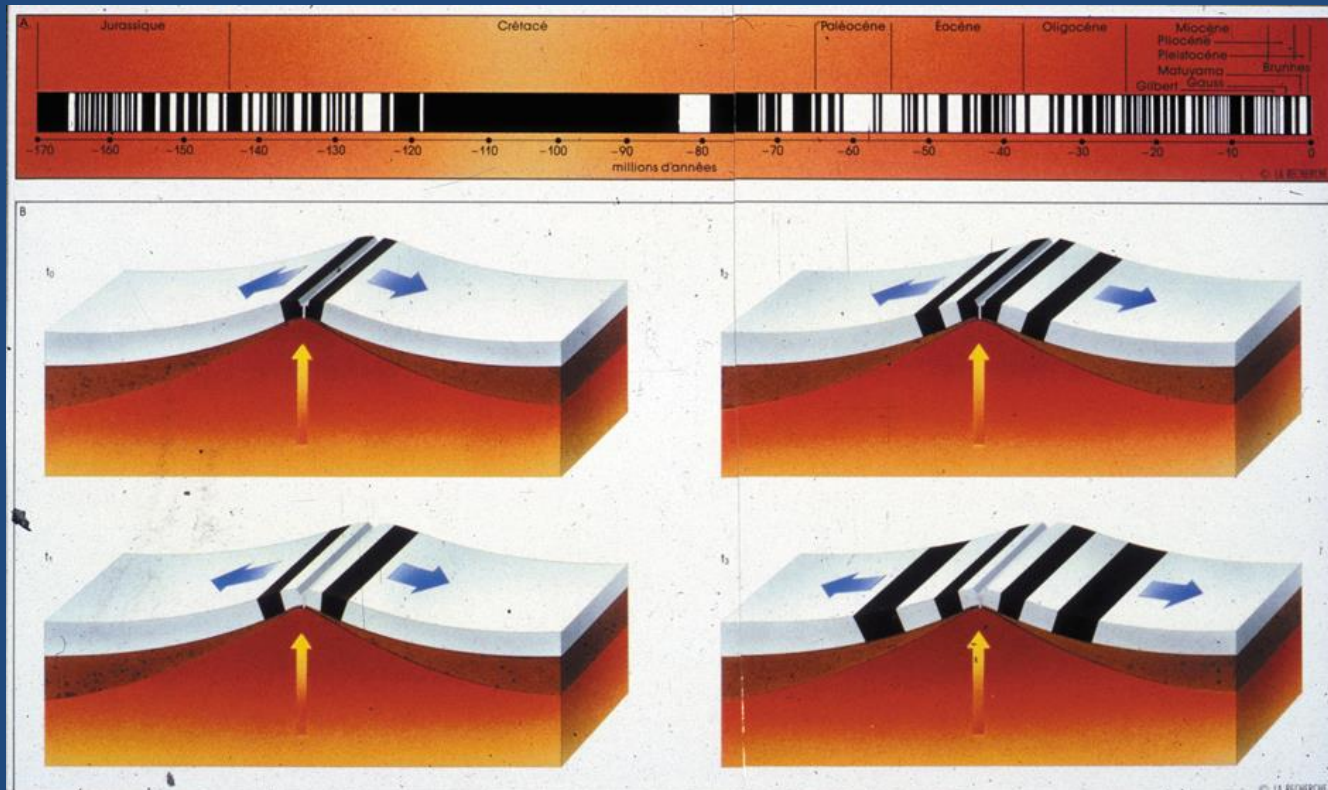
L'hypothèse de Harry Hess en 1962.

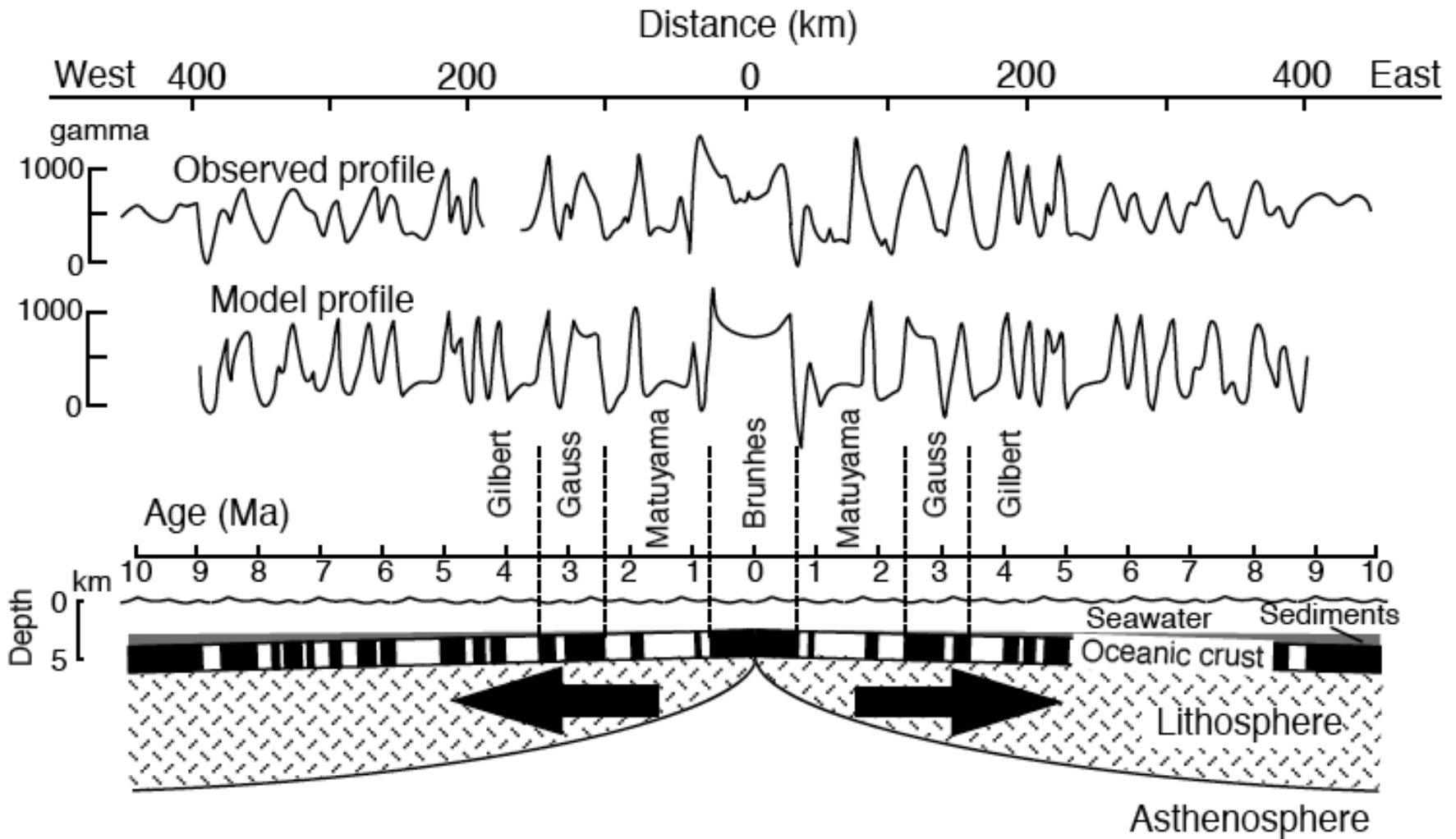
Harry Hesse cherchait à expliquer la topographie des fonds océaniques dans les années 60.

- Il pensait que le manteau terrestre était affecté par de larges courants de convection:
- les parties ascendantes sont la cause des dorsales médio-océaniques,
- les parties descendantes se trouvent au niveau des grandes fosses comme au pourtour du Pacifique.
- Le plancher océanique se forme perpétuellement au niveau des dorsales; il dérive de part et d'autre de ces dernières et vient s'engloutir dans le manteau au niveau des fosses.

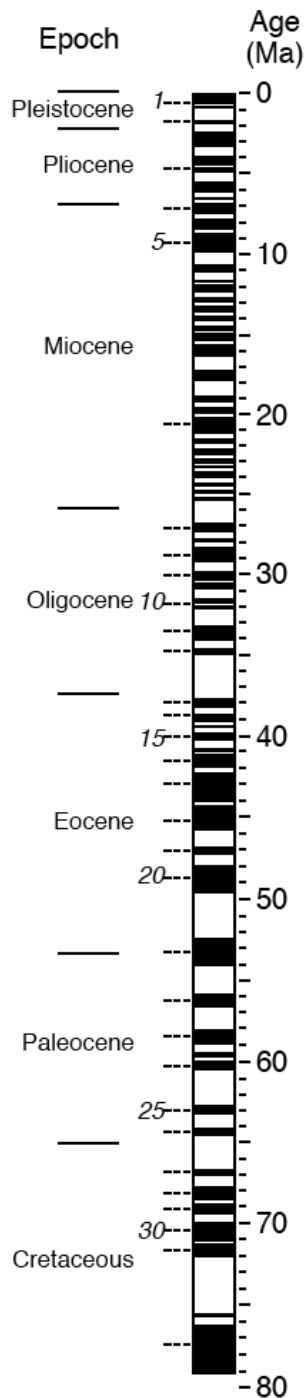
Au début des années 60, Vine et Matthews, ainsi que Morley de façon indépendante des deux premiers, ont eu l'idée de faire le rapprochement entre trois choses:

- 1) les inversions de la polarité du magnétisme terrestre au cours des temps géologiques;
- 2) les bandes d'anomalies de l'intensité du champ magnétique sur les fonds océaniques;
- 3) l'hypothèse de Harry Hess que les fonds océaniques s'étaient de part et d'autre des dorsales.





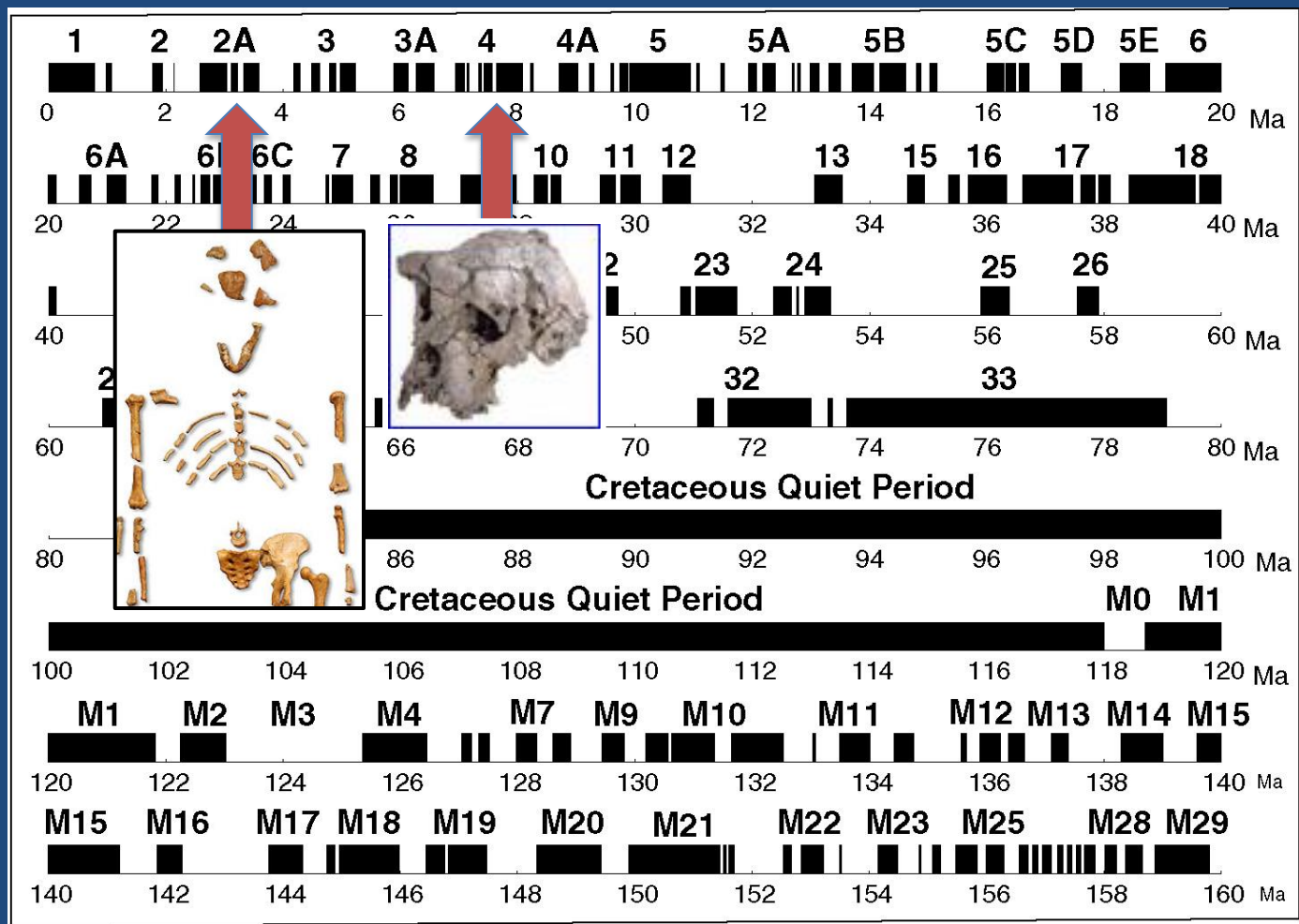
Un profil d'anomalies magnétiques mesurées perpendiculairement à la ride Océanique



Premières échelles des inversions

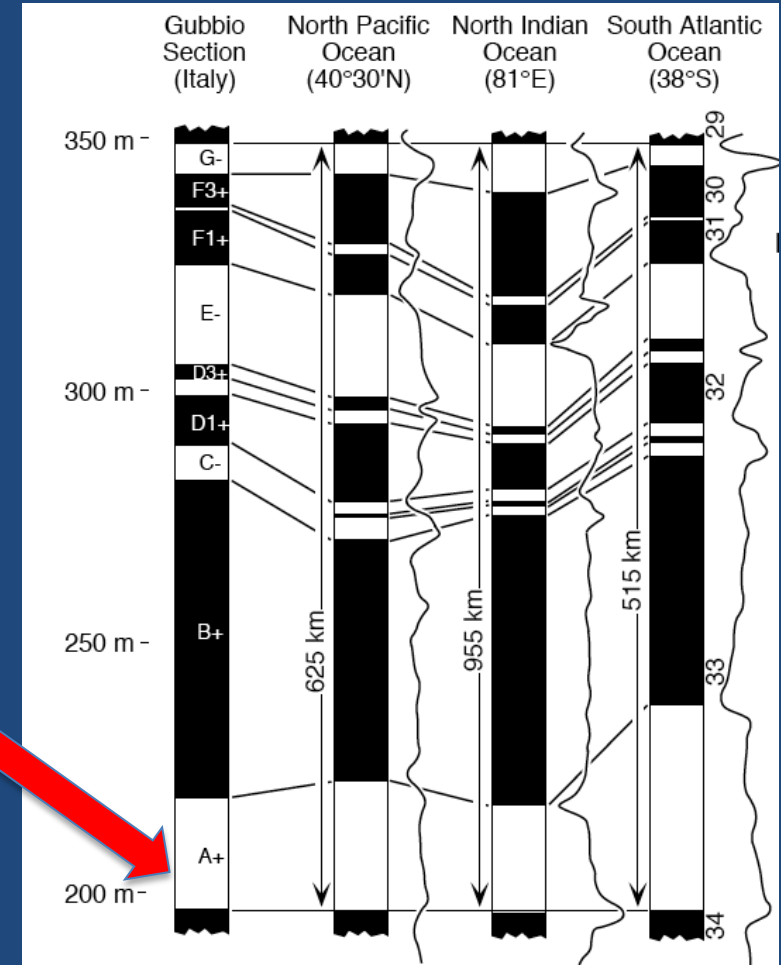
Heirtzler et al (1968)

- 1) Comparaison avec l'échelle à terre (connue jusqu'à 3.35 Ma)
- 2) Déduction de la vitesse d'expansion et de l'âge des fonds océaniques
- 3) Extrapolation de l'âge des anomalies magnétiques en utilisant une vitesse d'expansion uniforme
- 4) Erreur de seulement 5Ma à 70Ma!

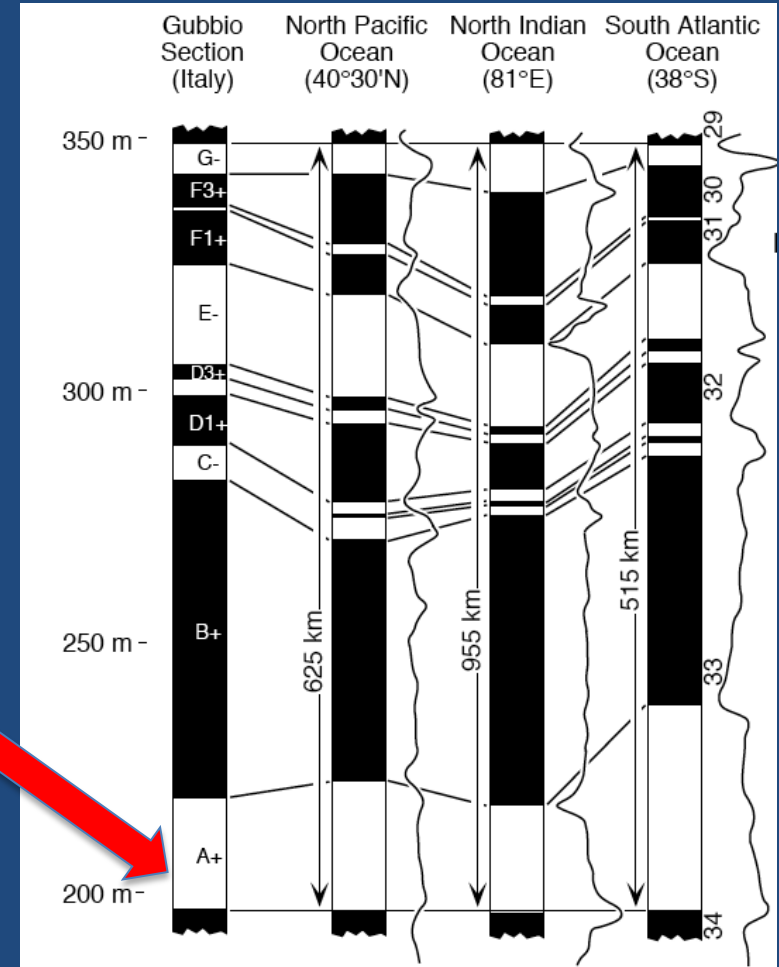


Echelle des inversions du champ géomagnétique, d'après Cande et Kent (1995) et Kent et Gradstein (1985). Chaque ligne représente 20 millions d'années, du plus récent vers le plus ancien de haut en bas. Les périodes de polarité normale, identique à la polarité actuelle du champ magnétique terrestre, sont marquées en noir, et les périodes inverses en blanc.

On compare les séries sédimentaires à terre avec les anomalies de divers Océans



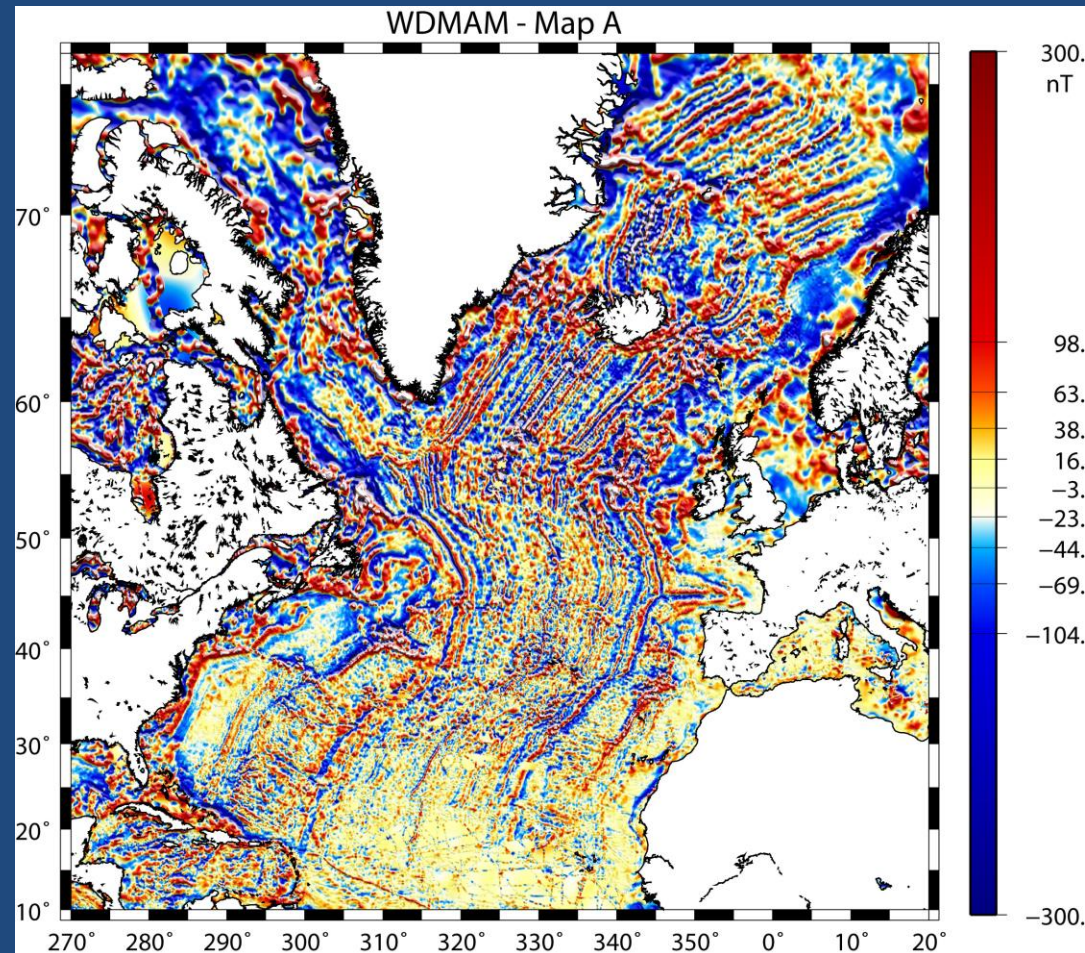
On compare les séries sédimentaires à terre avec les anomalies de divers Océans

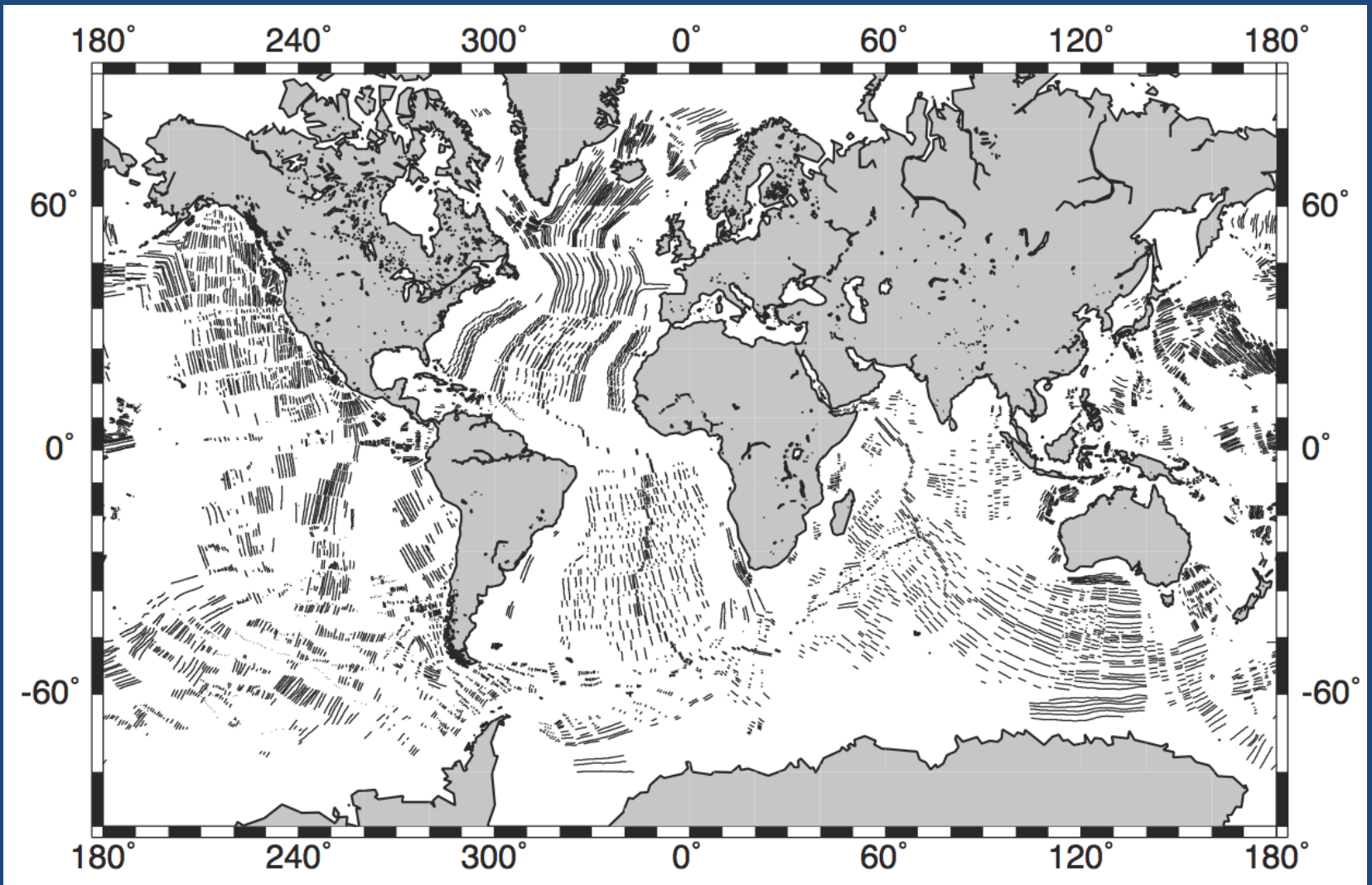


- Les inversions sont globales
- Processus simultané à la surface du globe

Reconstruction des Océans

- (1) Le champ géomagnétique s'inverse de manière irrégulière au cours des temps géologiques.
- (2) Une inversion donnée se produit de façon synchrone sur toute la planète.
- (3) La croûte océanique se forme assez régulièrement à l'axe des dorsales océaniques.
- (4) Les roches de cette croûte, et notamment les basaltes extrusifs, acquièrent lors de leur refroidissement une aimantation rémanente de la polarité du champ.

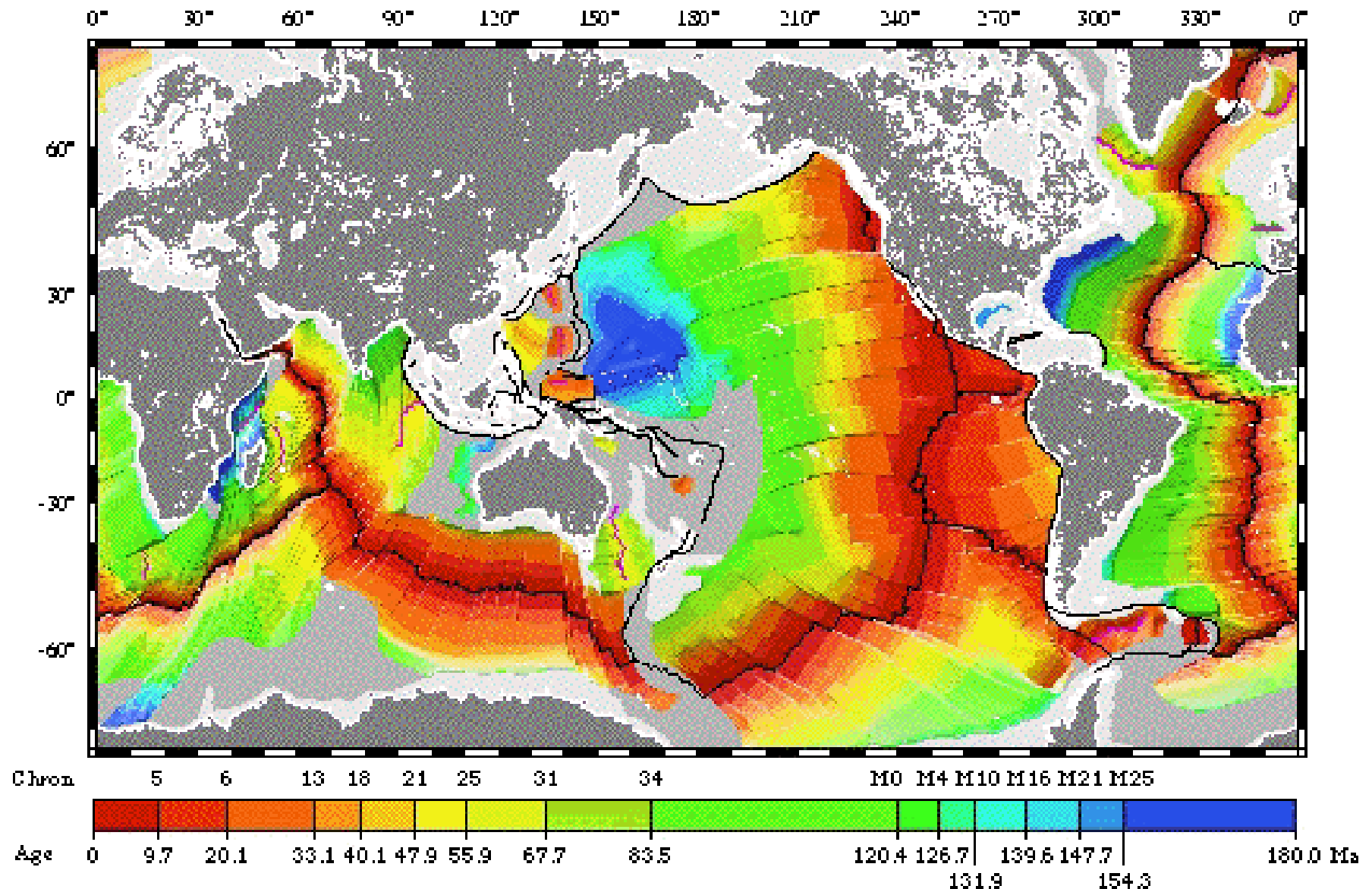




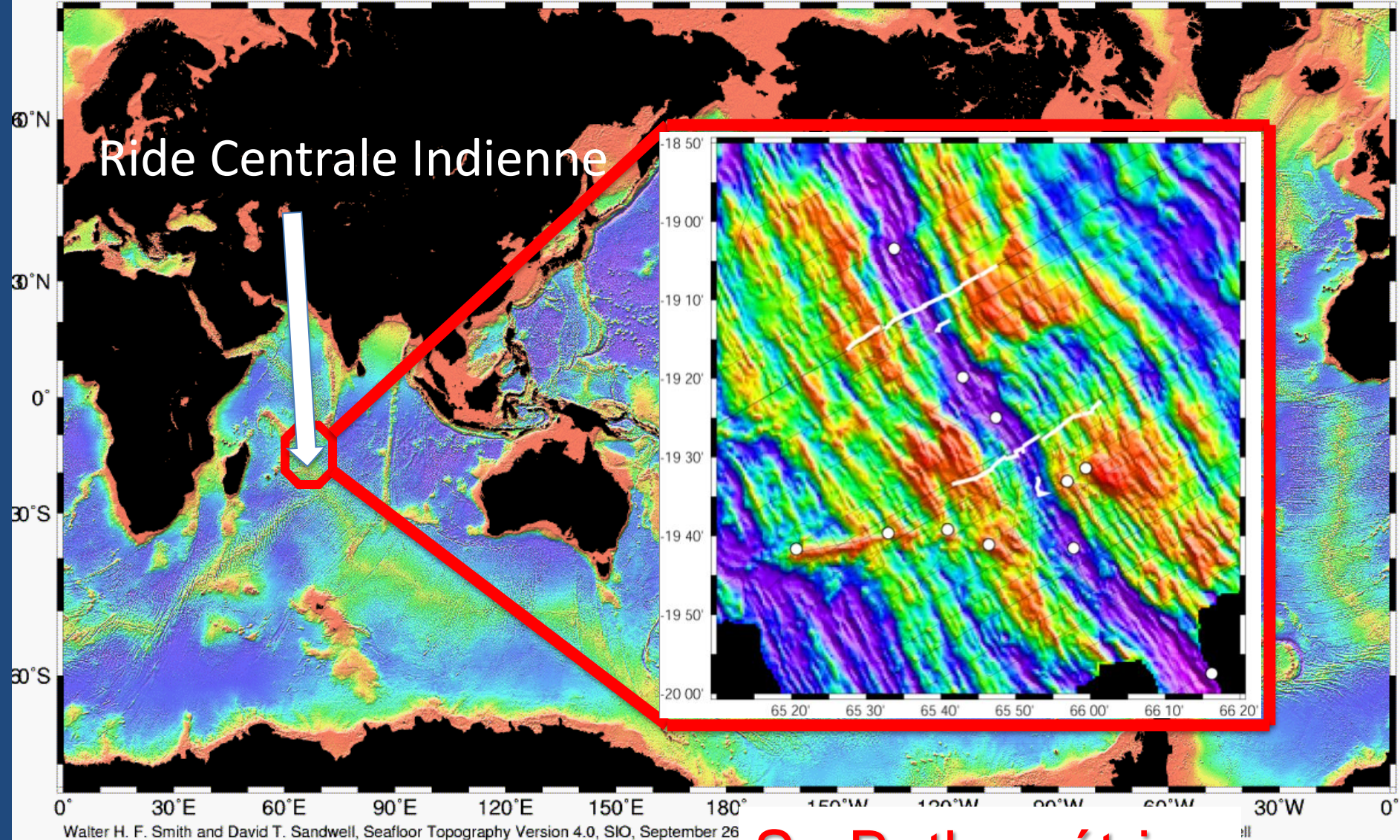
Carte des linéations magnétiques identifiées dans les bassins océaniques.
Cande et al. (1989).

Digital Isochrons of the Ocean Floor

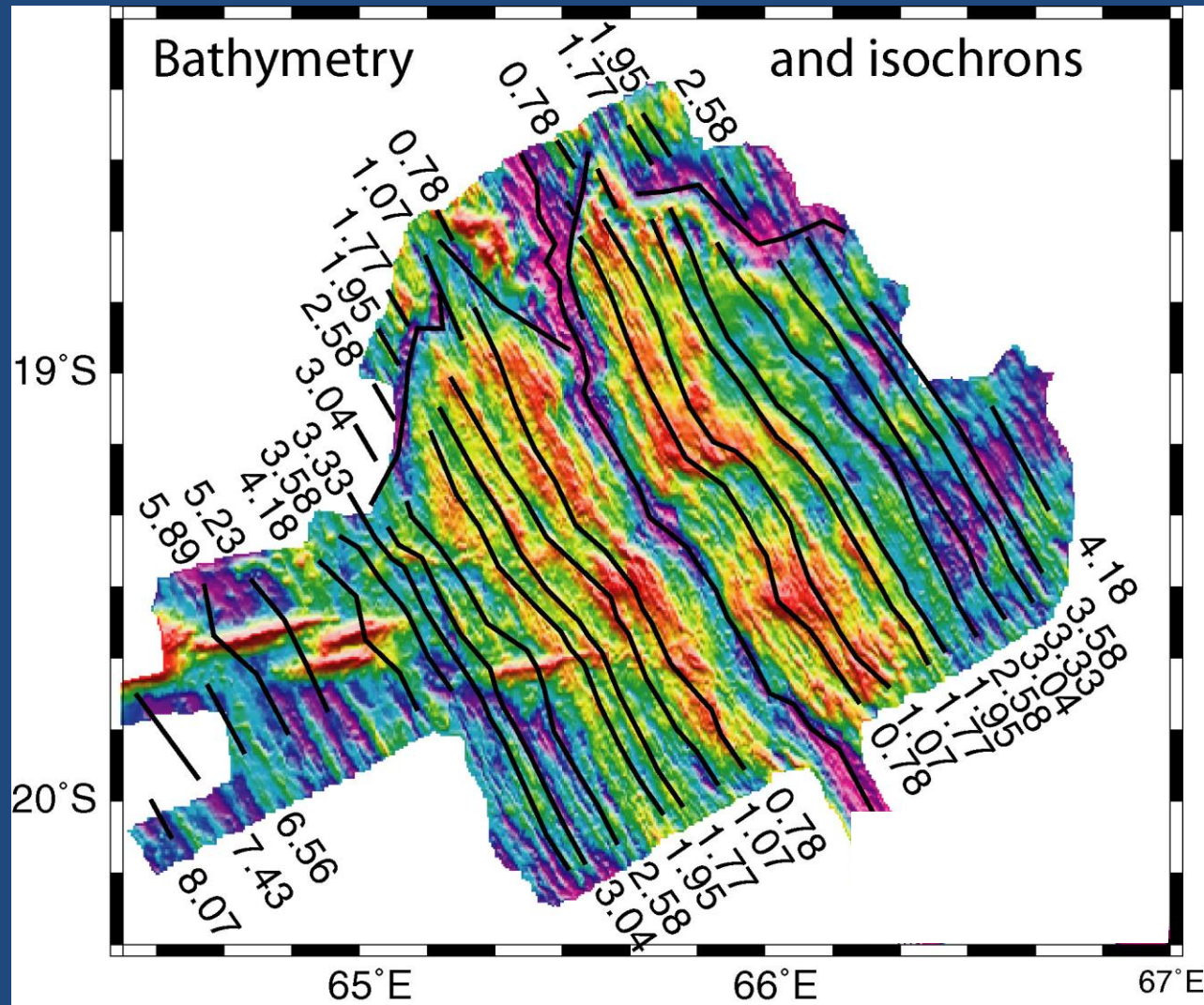
R.D. Müller, W.R. Roest, J.-Y. Royer, L.M. Gahagan, J.G. Sclater



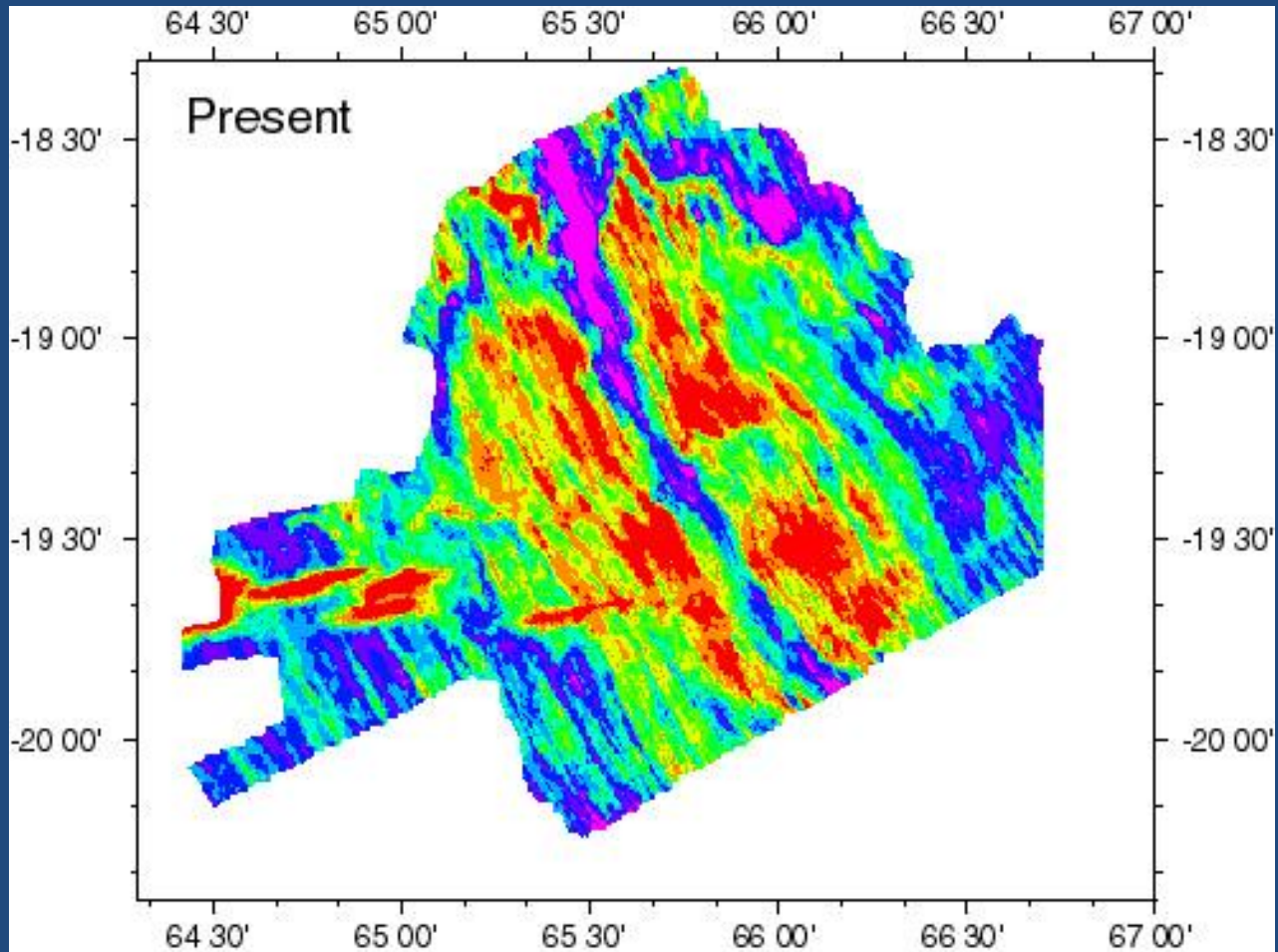
Exemple de reconstruction de la Ride Centrale Indienne



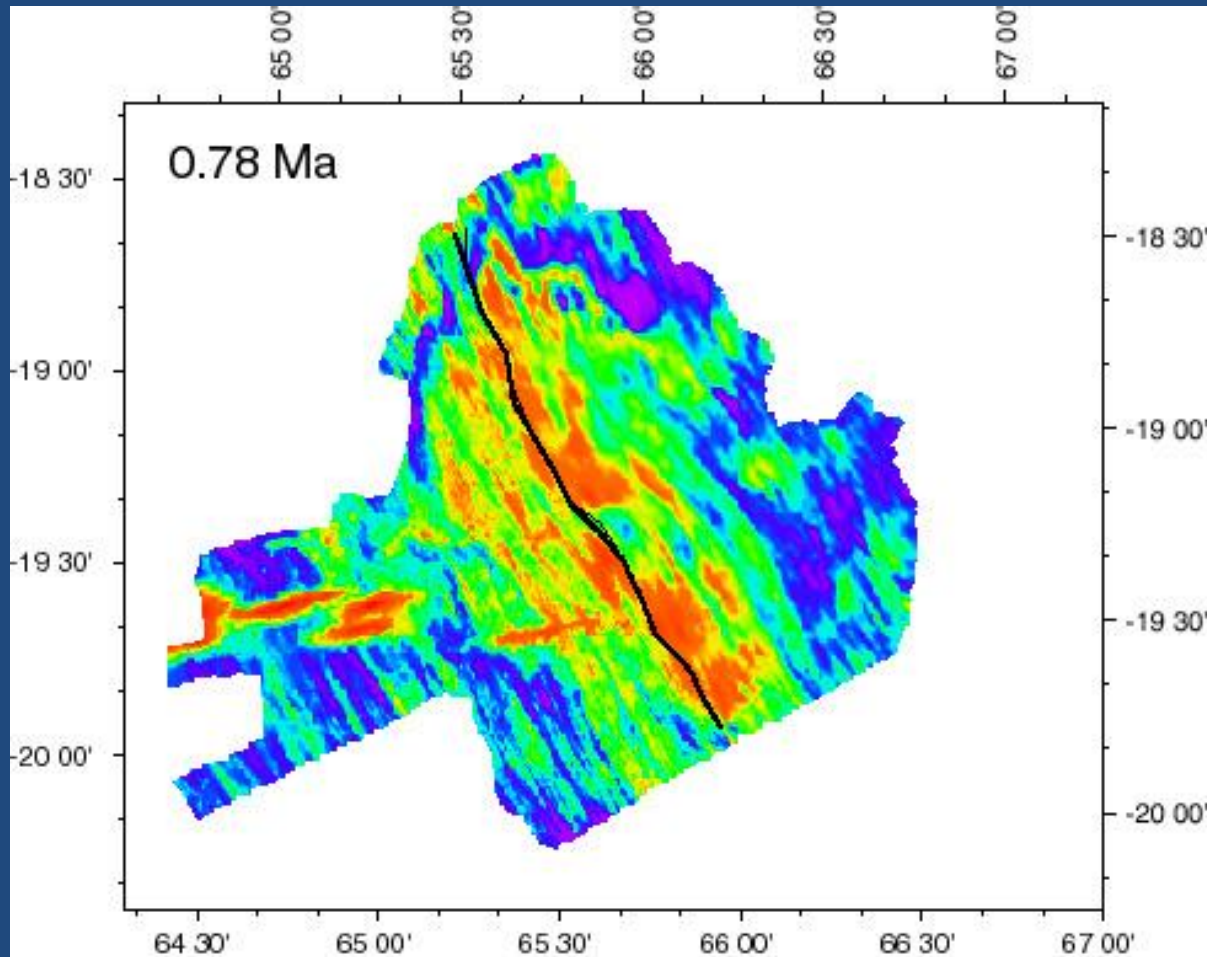
Ses anomalies magnétiques ...



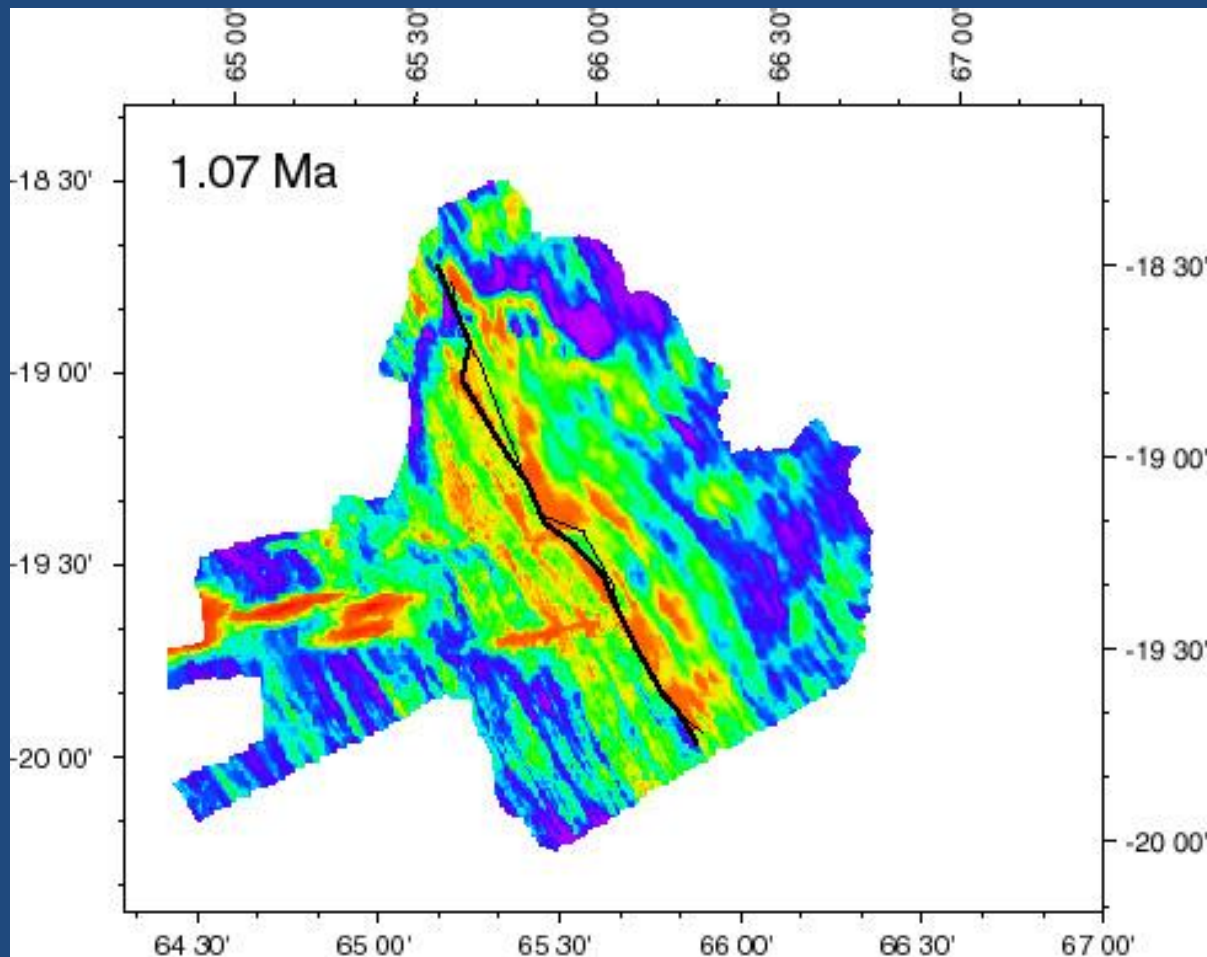
Actuel



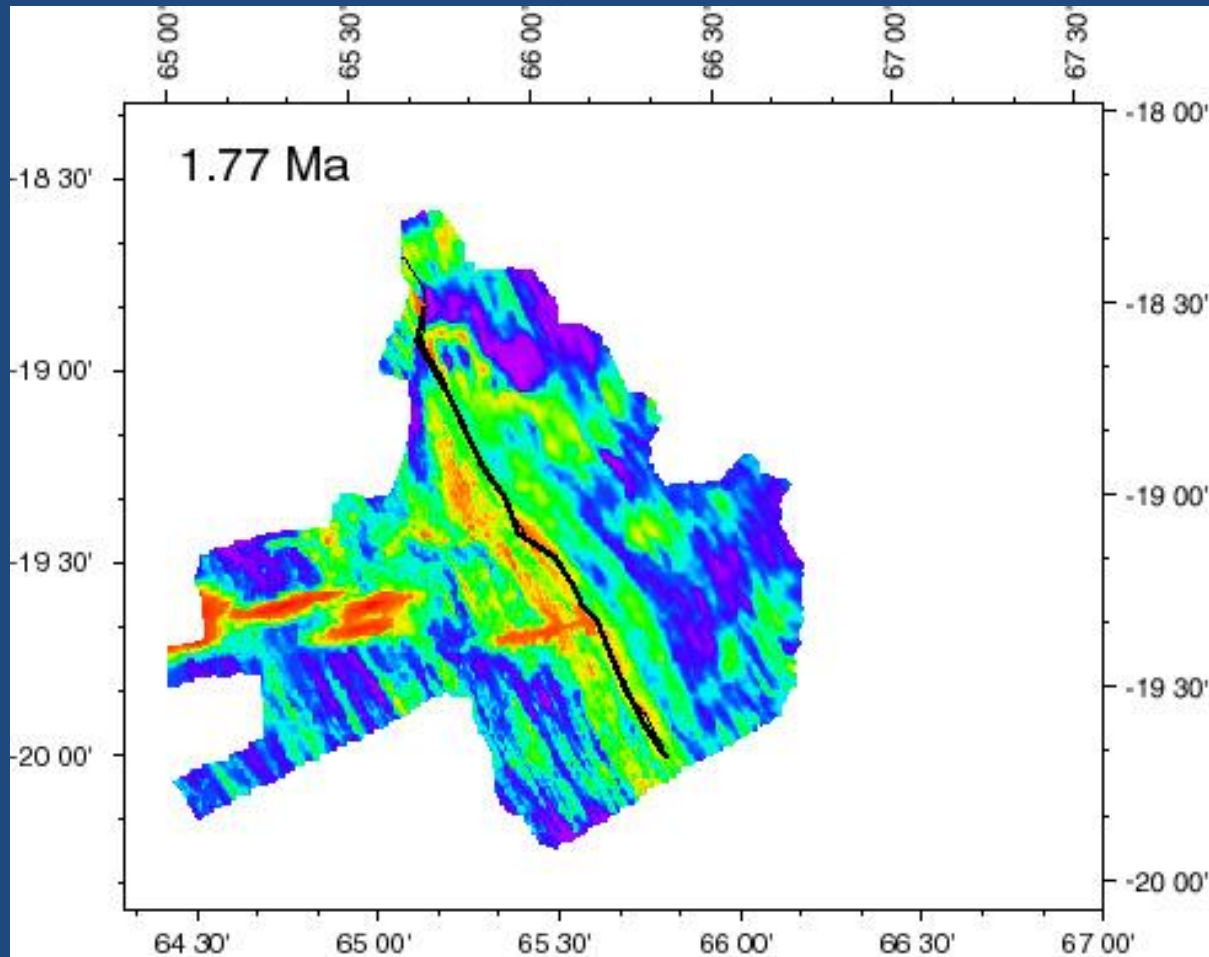
0.78Ma



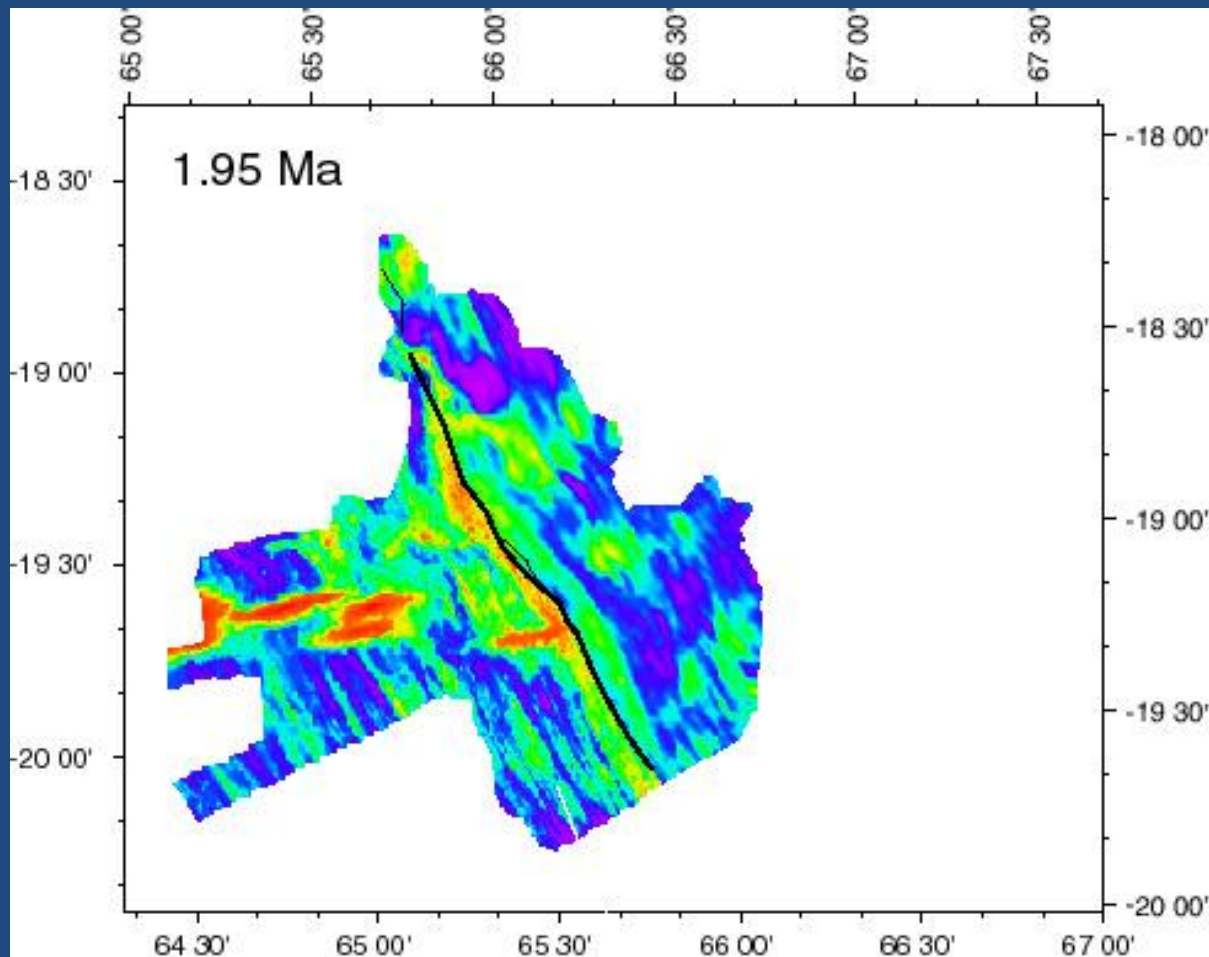
1.07Ma



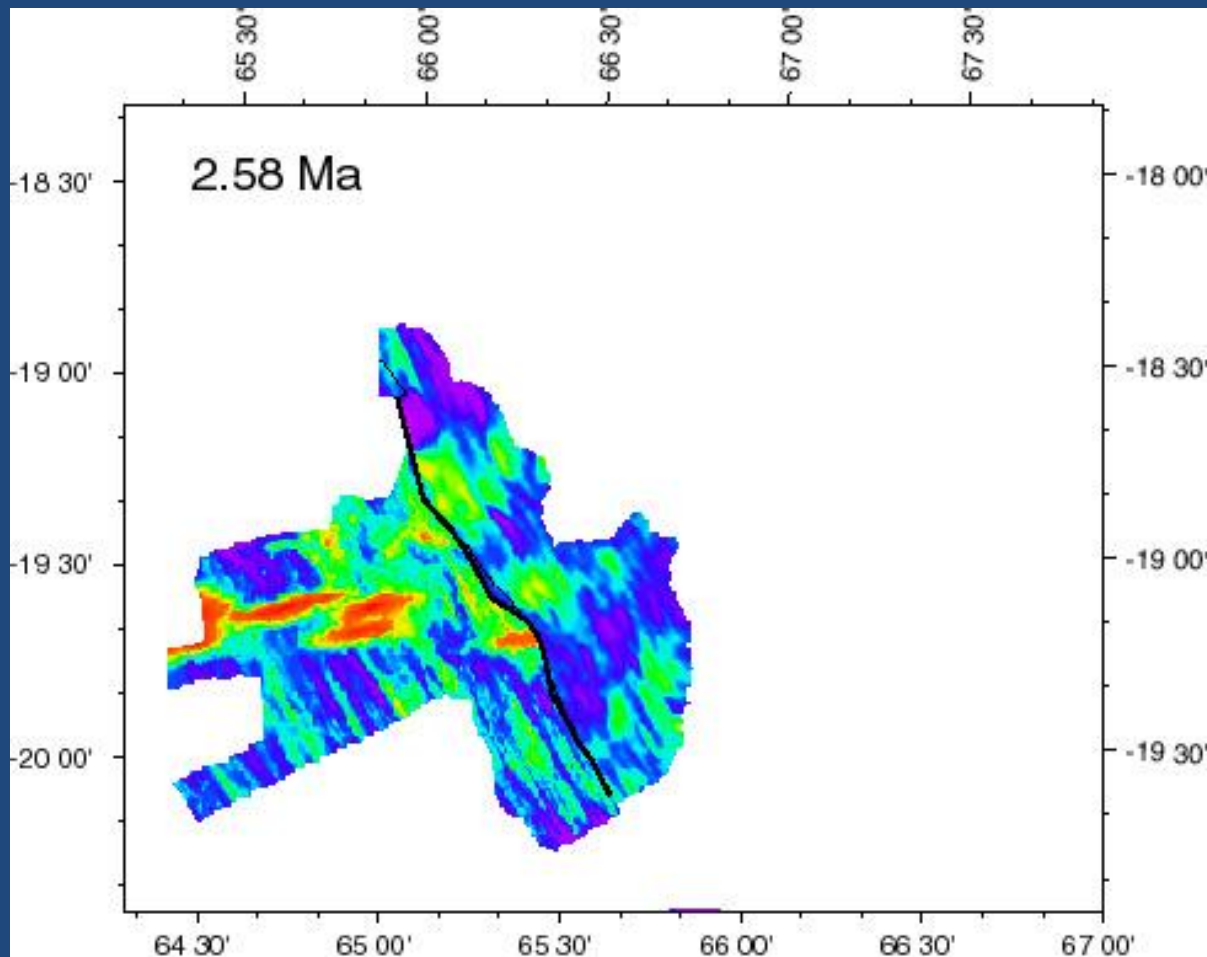
1.77Ma



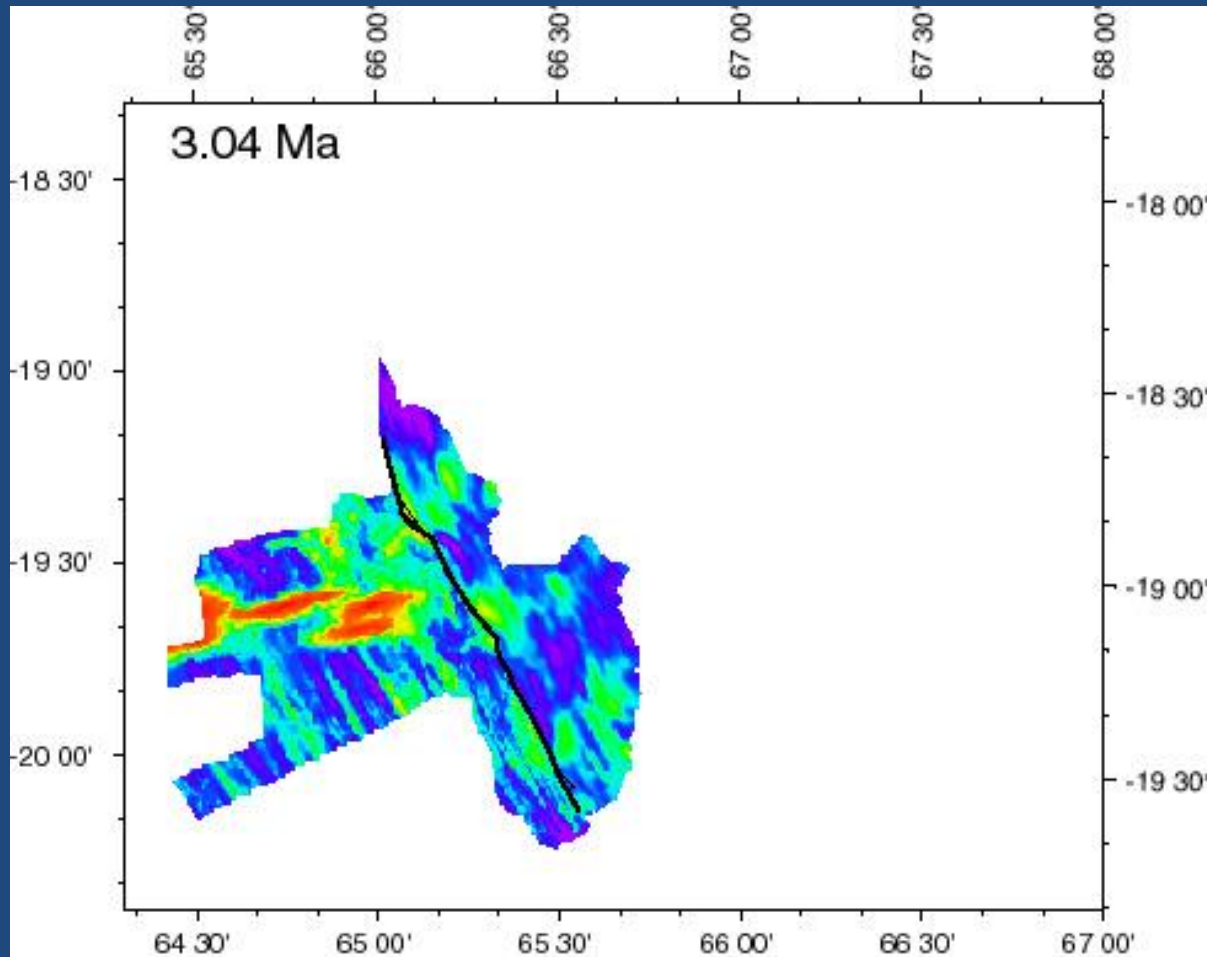
1.95Ma



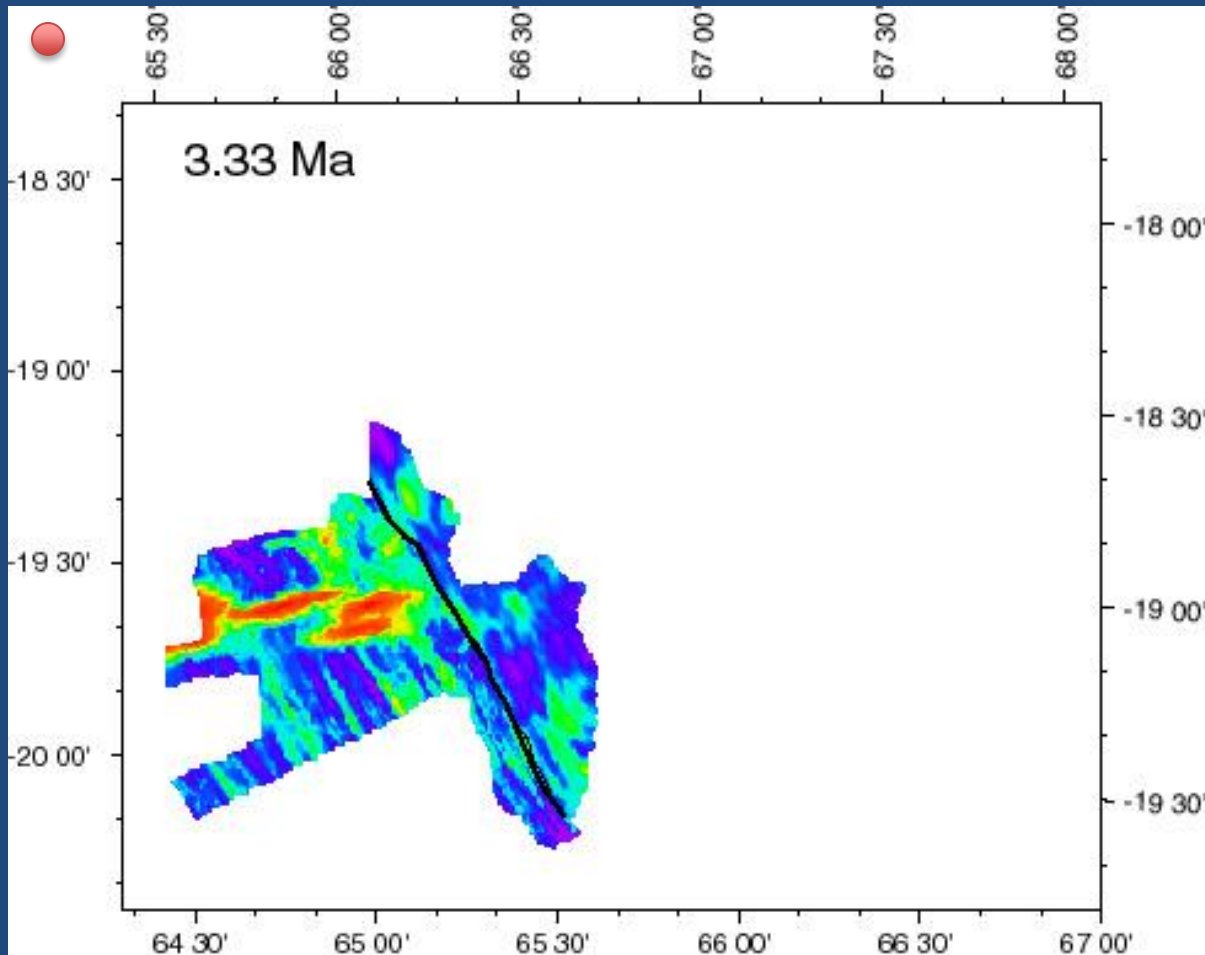
2.58Ma



3.04Ma

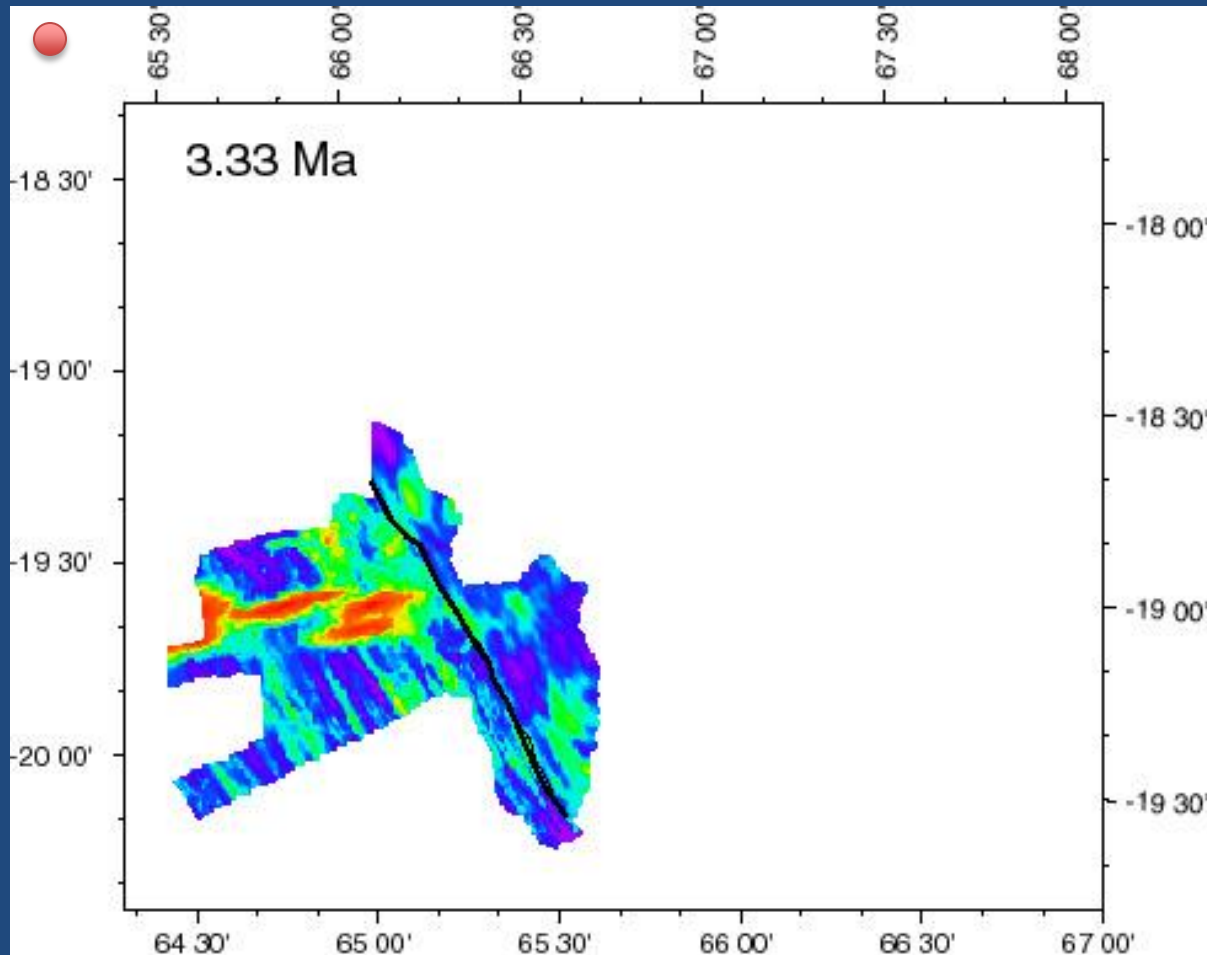


3.33Ma



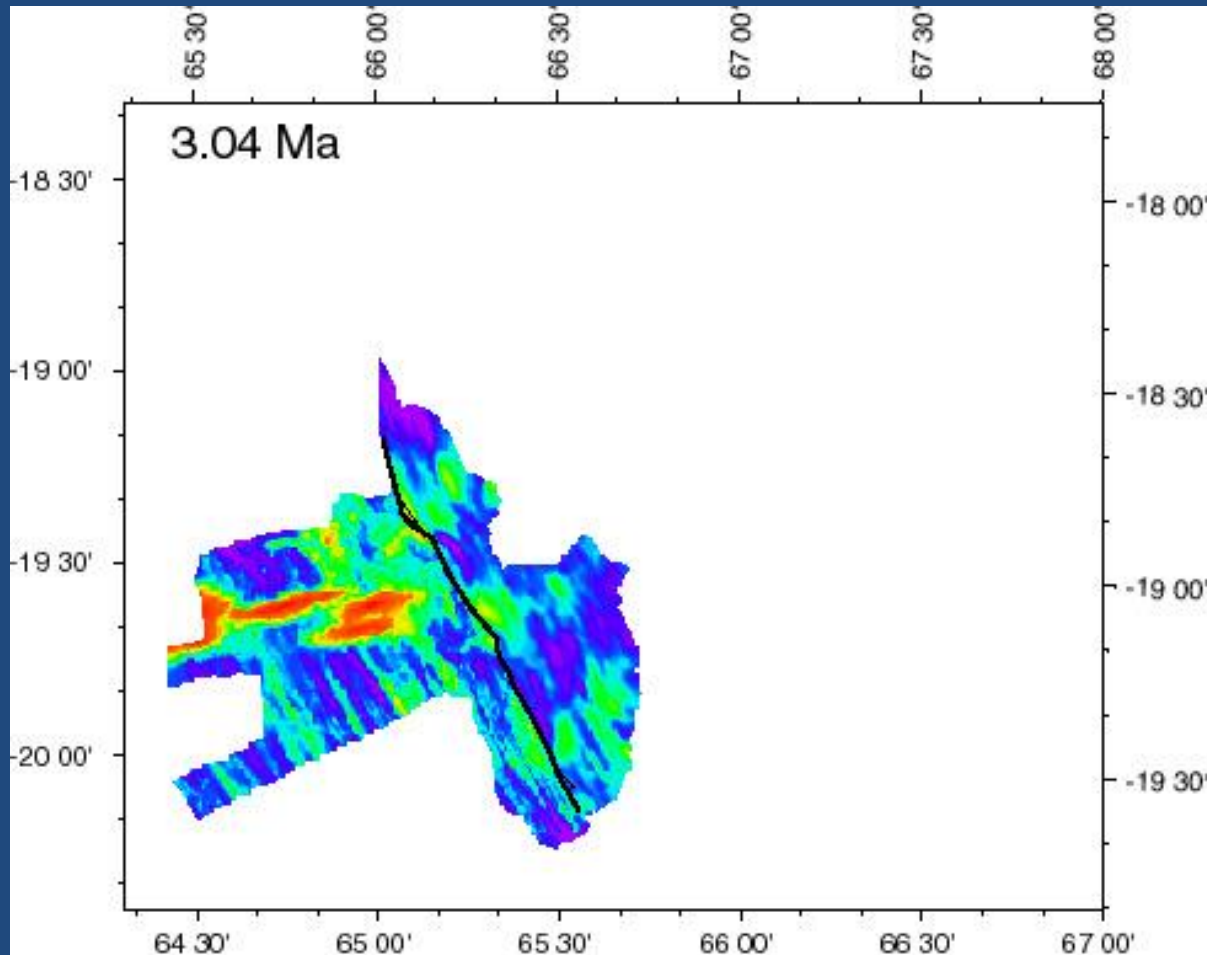
3.33Ma

(on va maintenant du passé vers le présent)



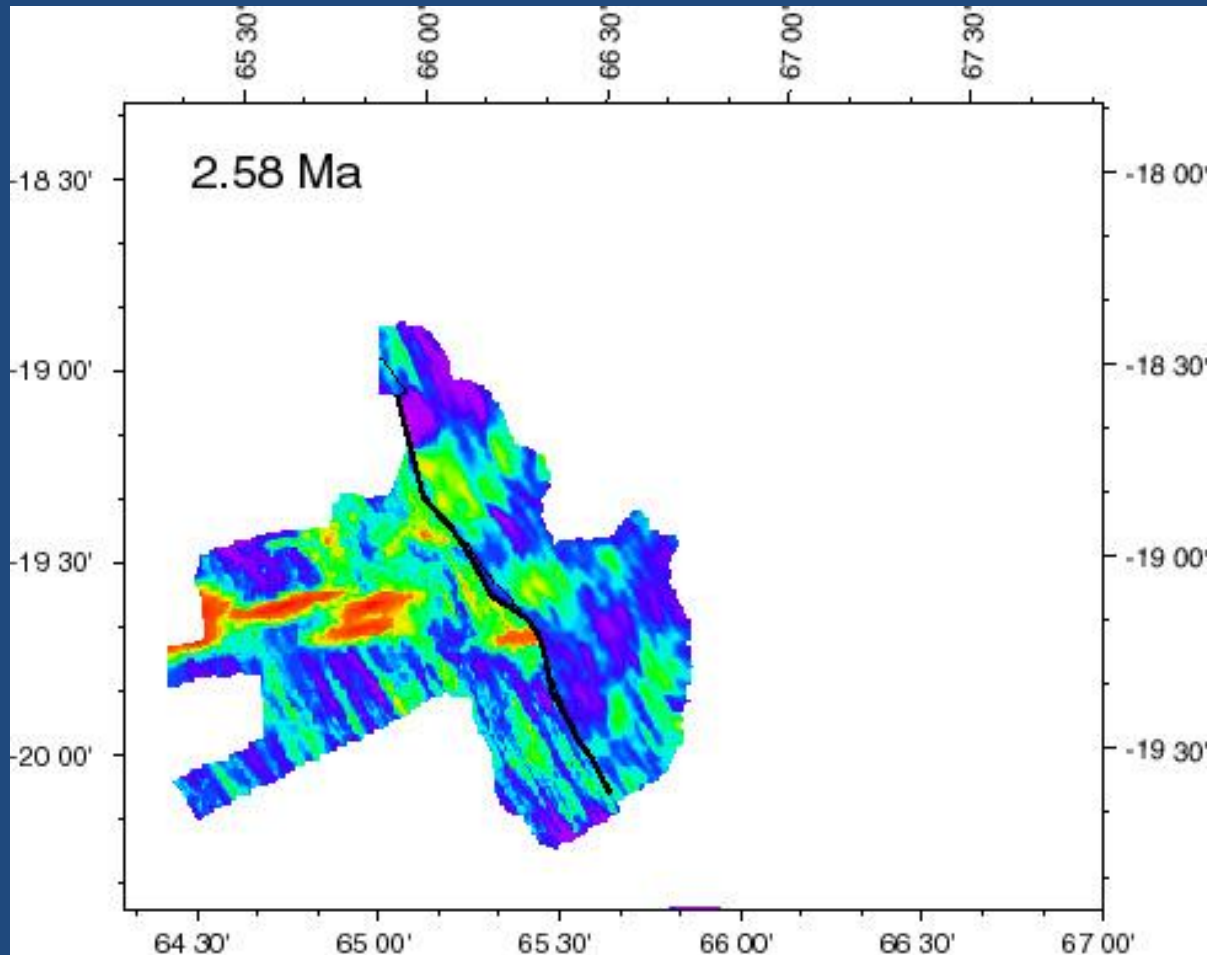
3.04Ma

(on va maintenant du passé vers le présent)



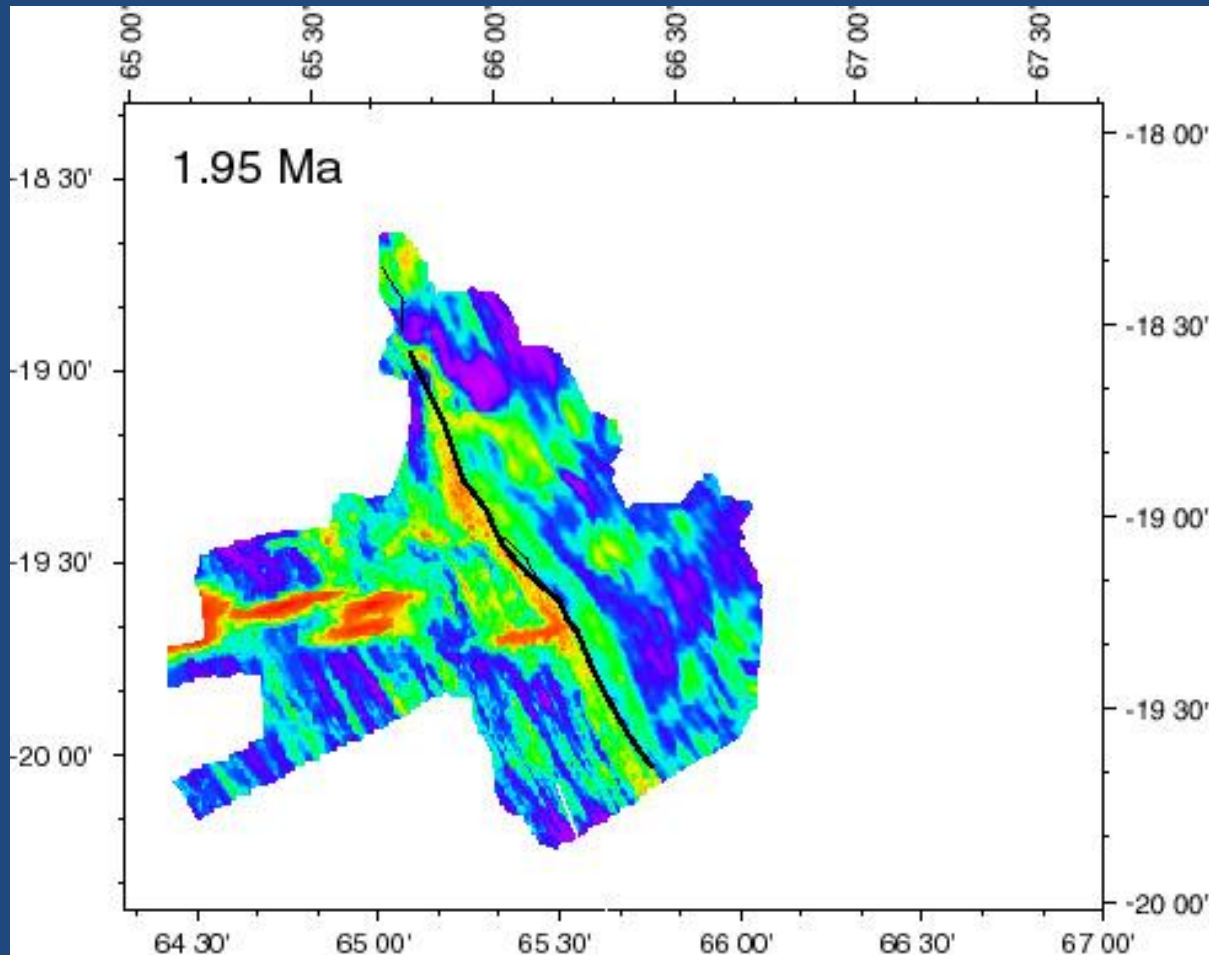
2.58Ma

(on va maintenant du passé vers le présent)



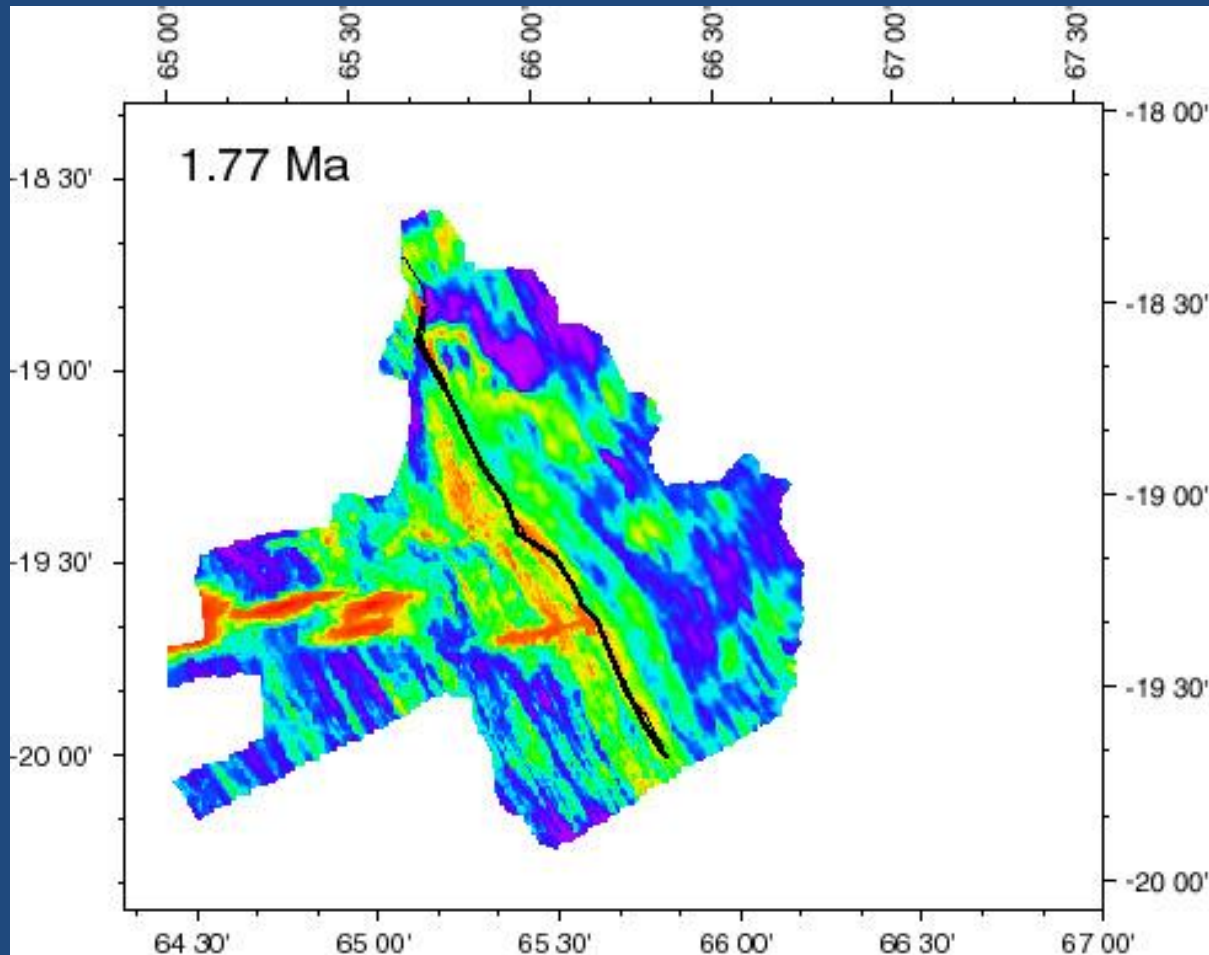
1.95Ma

(on va maintenant du passé vers le présent)



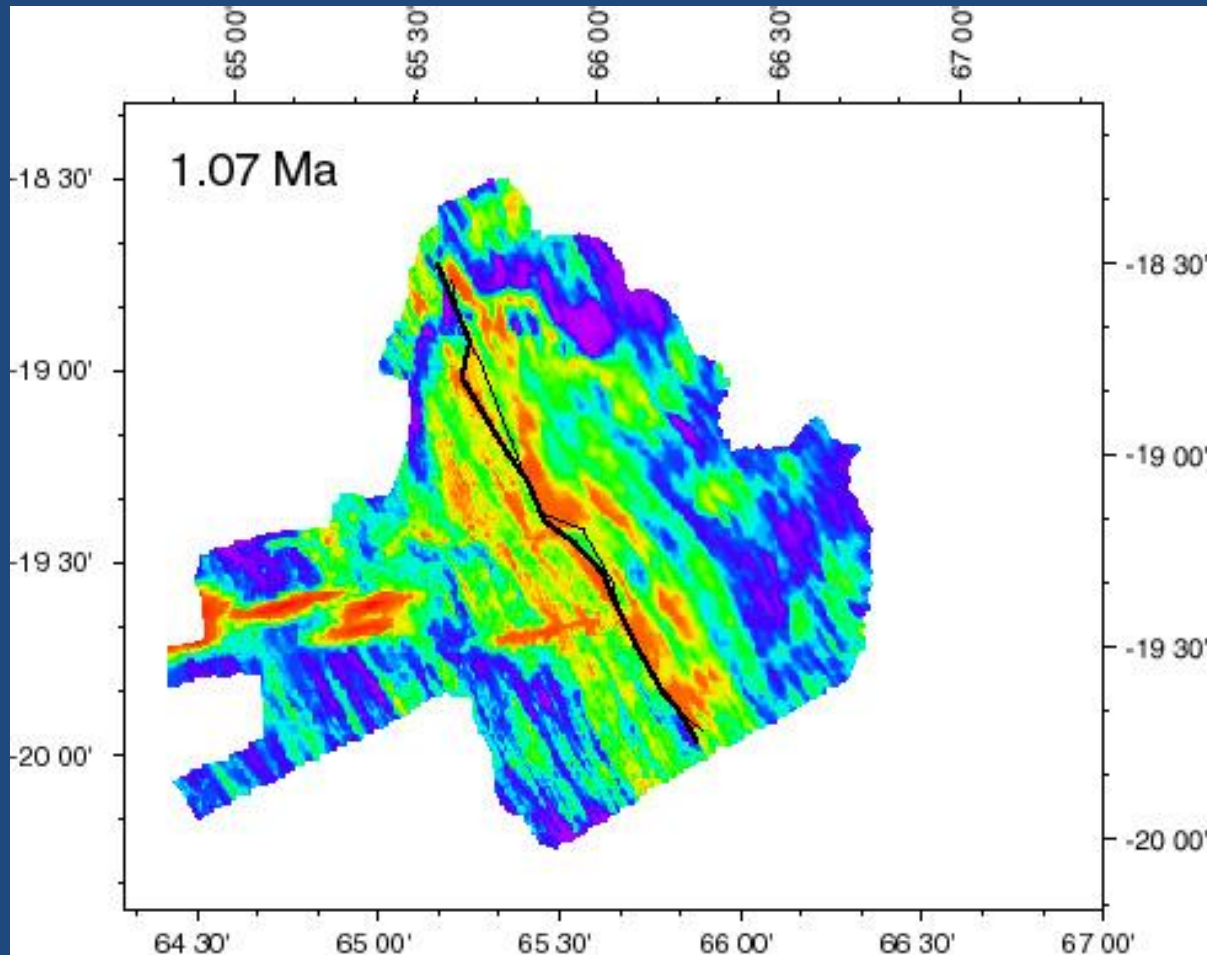
1.77Ma

(on va maintenant du passé vers le présent)



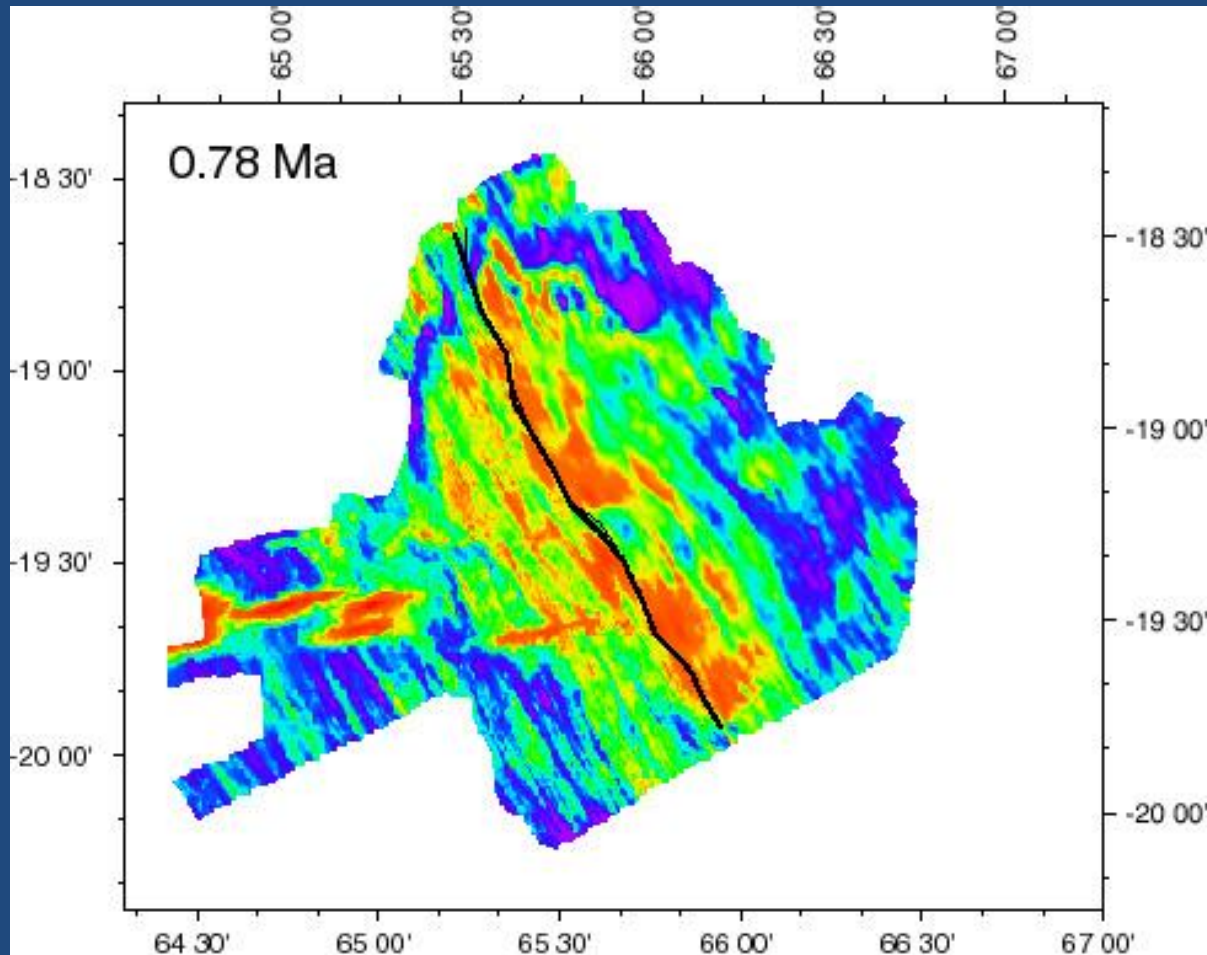
1.07Ma

(on va maintenant du passé vers le présent)

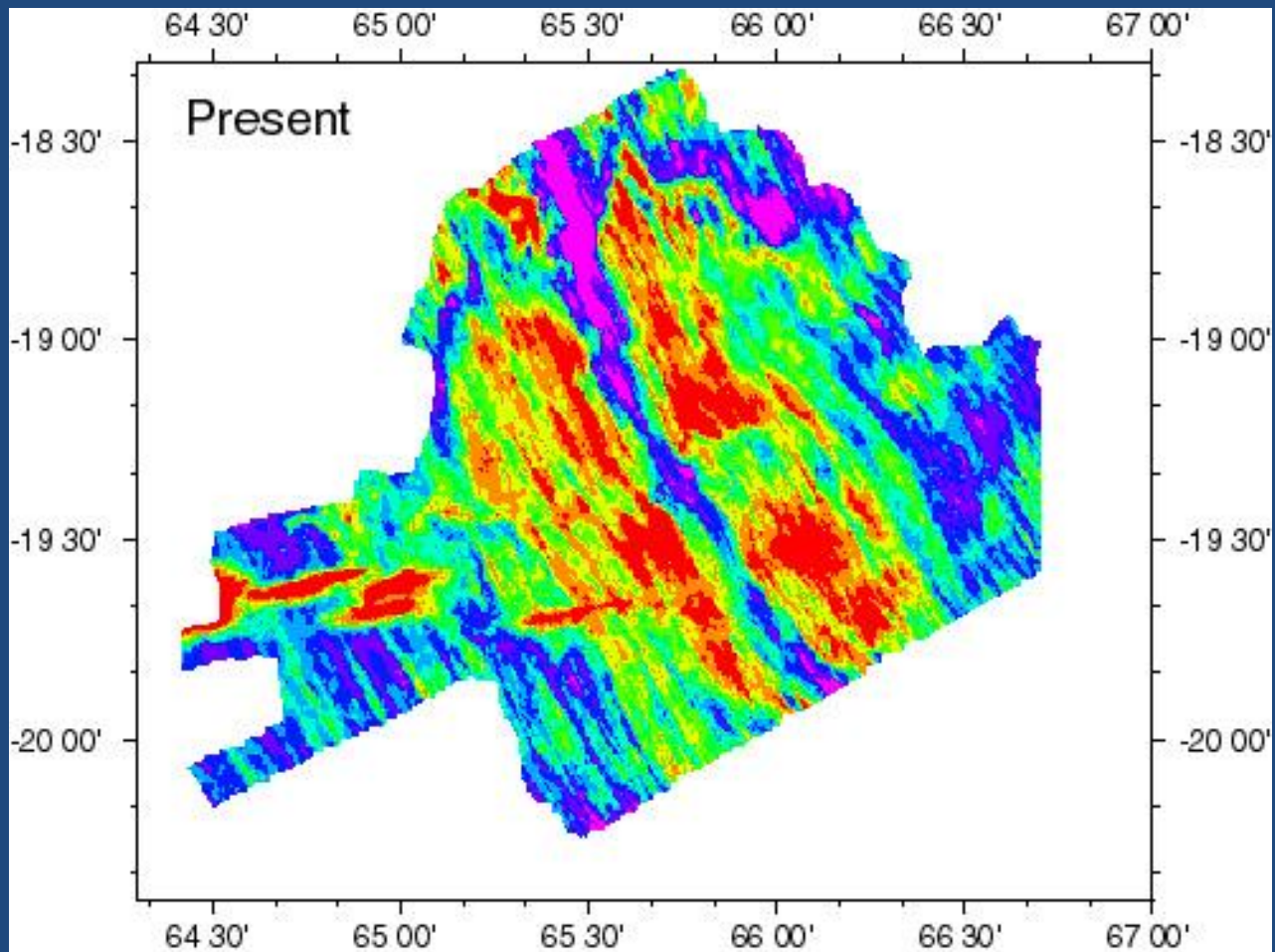


0.78Ma

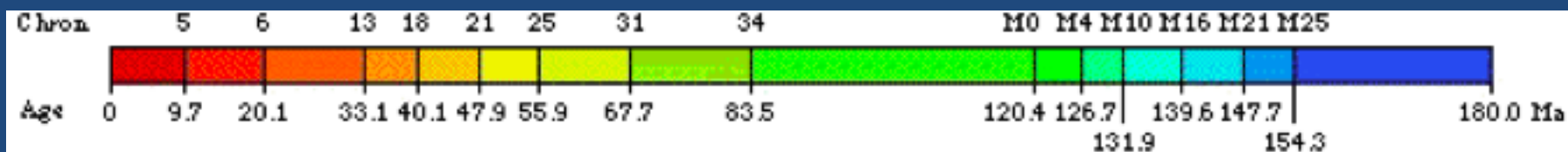
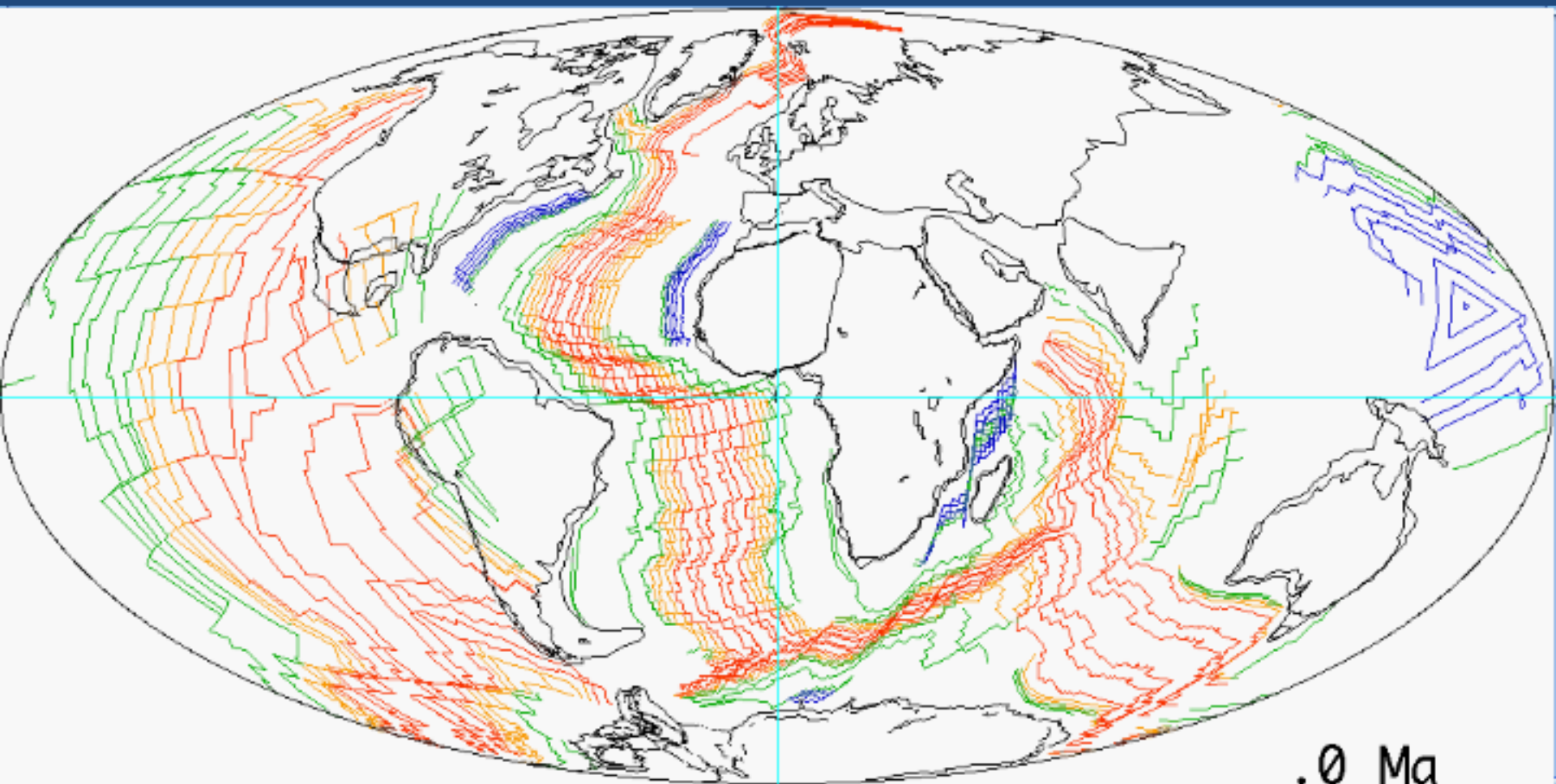
(on va maintenant du passé vers le présent)

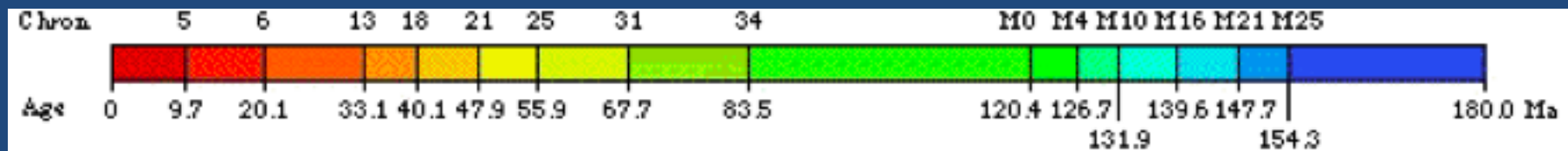
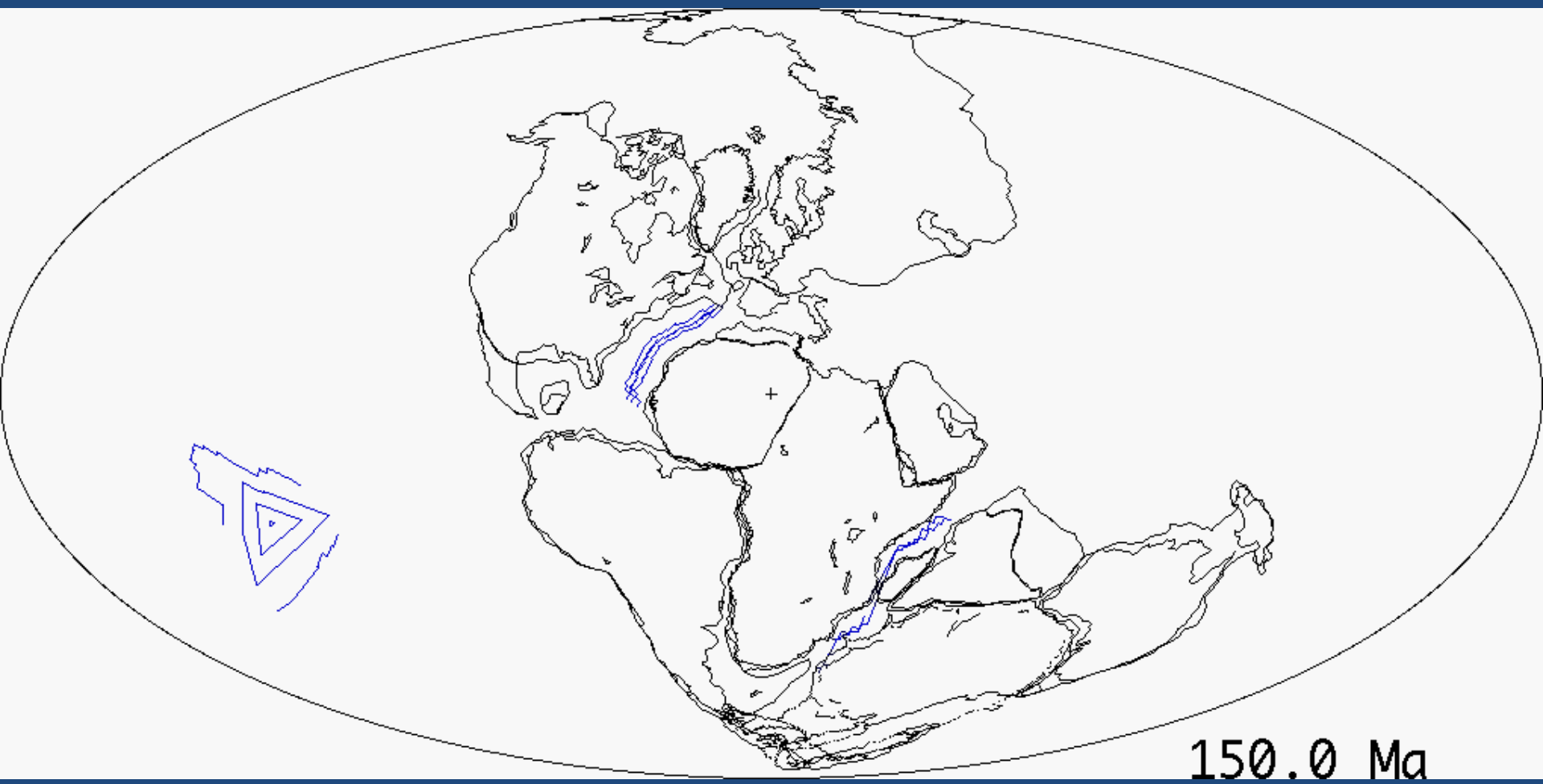


Actuel



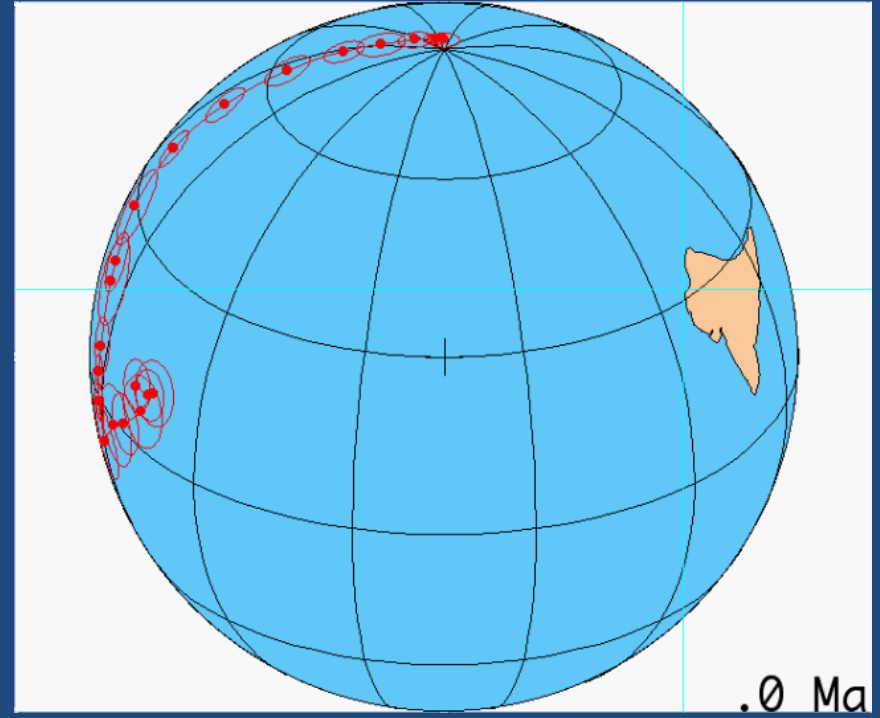
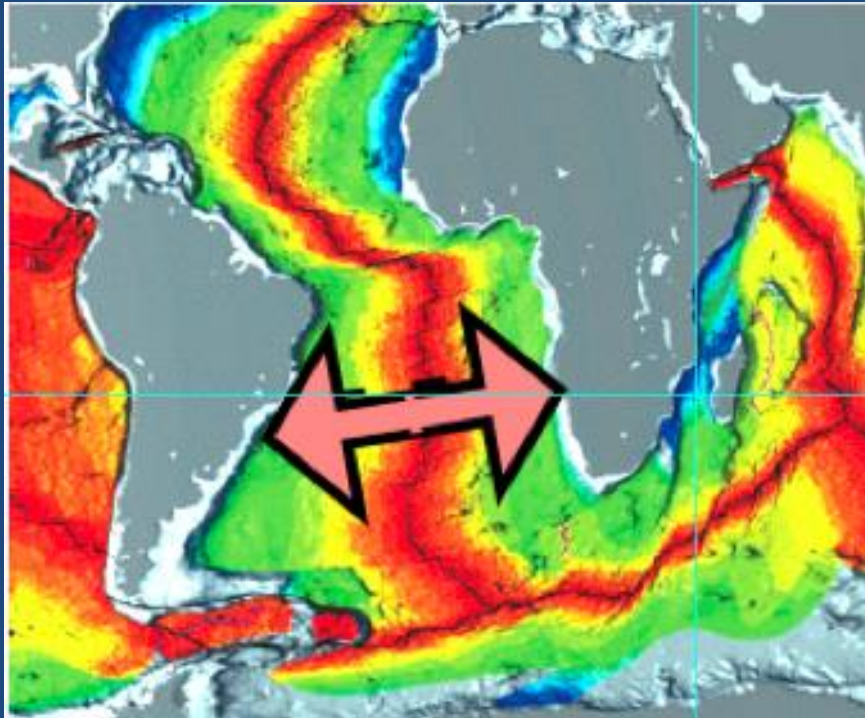
Isochrones depuis 150 Ma.

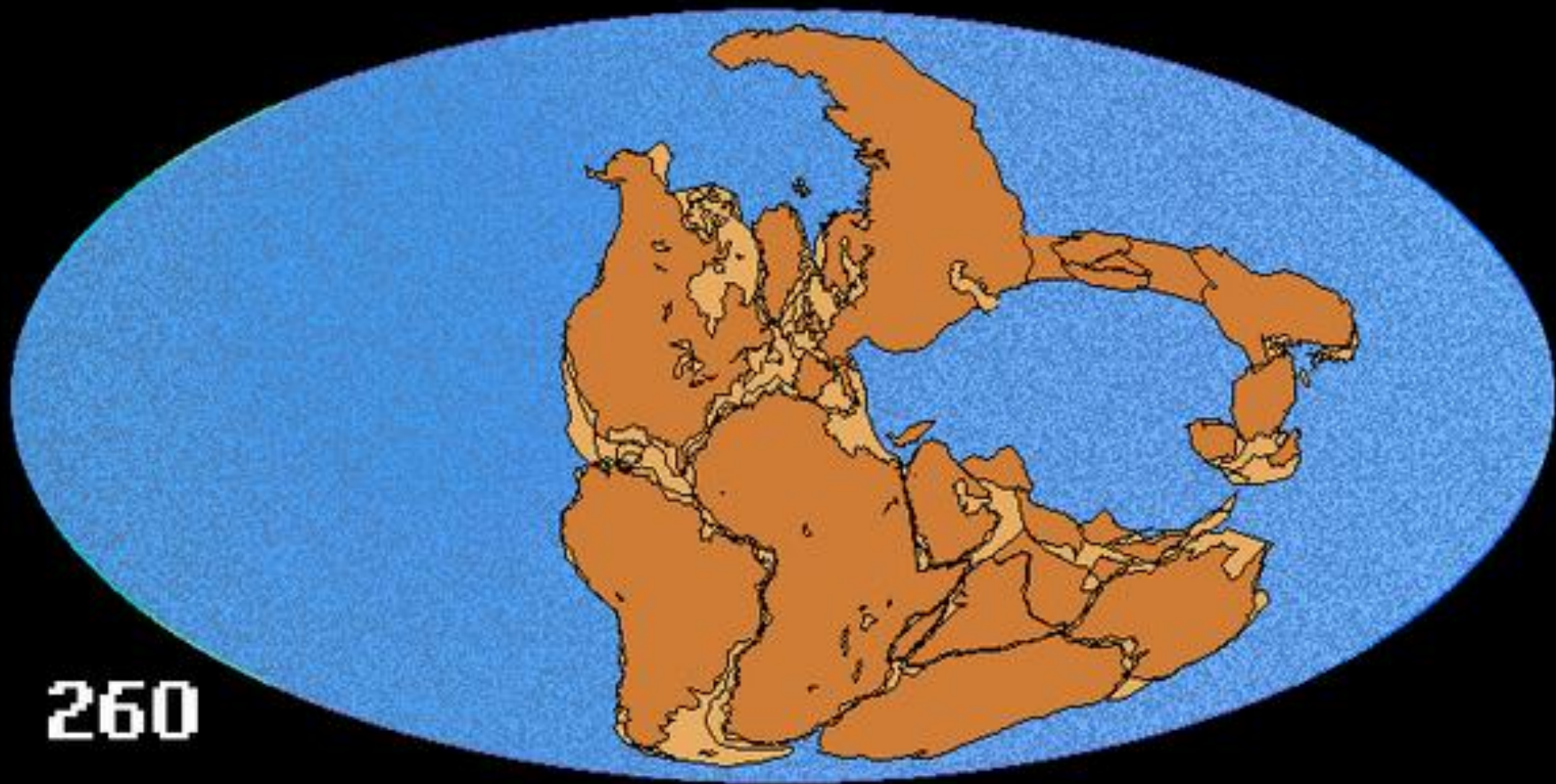




Reconstructions basées sur le magnétisme

- La position des continents entre eux est fixée par le magnétisme des océans
- La position « Absolue » (par rapport à l'axe de rotation de la Terre) est donnée par le Paléomagnétisme

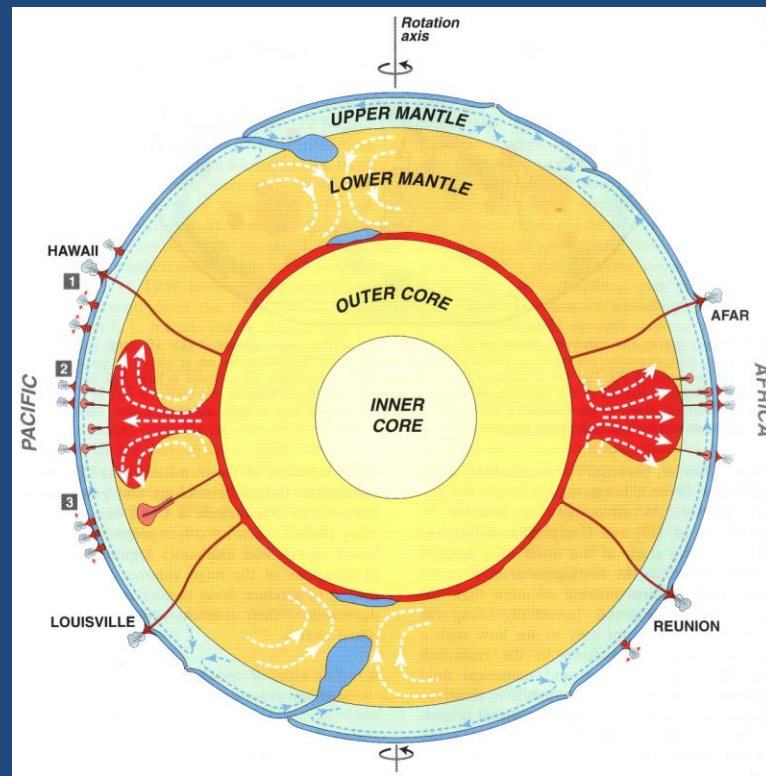
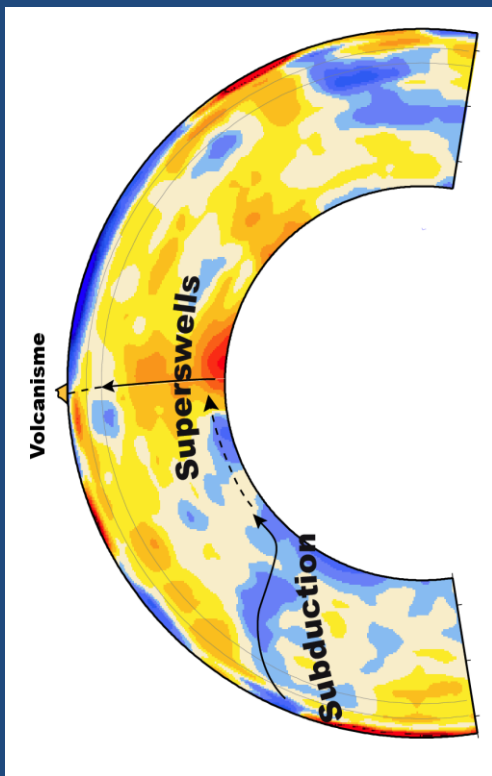




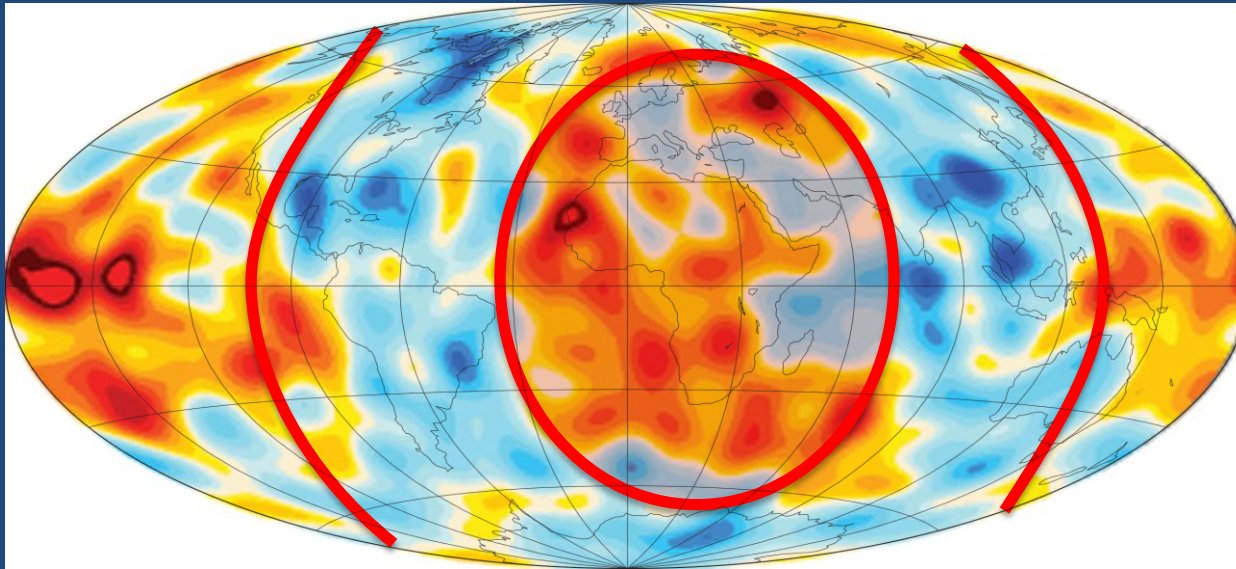
260

Mais nous avons passé sous silence des développements passionnants actuels :

On peut reconstruire l'histoire des plaques et de la convection en 4 dimensions en utilisant la position des objets géologiques et la tomographie sismique.



- Subductions autour du Pacifique -> Matériel froid qui descend dans le manteau
- Courants chauds de retour : situés actuellement sur l'équateur
- On peut contraindre la position de ces objets dans le temps grâce au Paléomag.

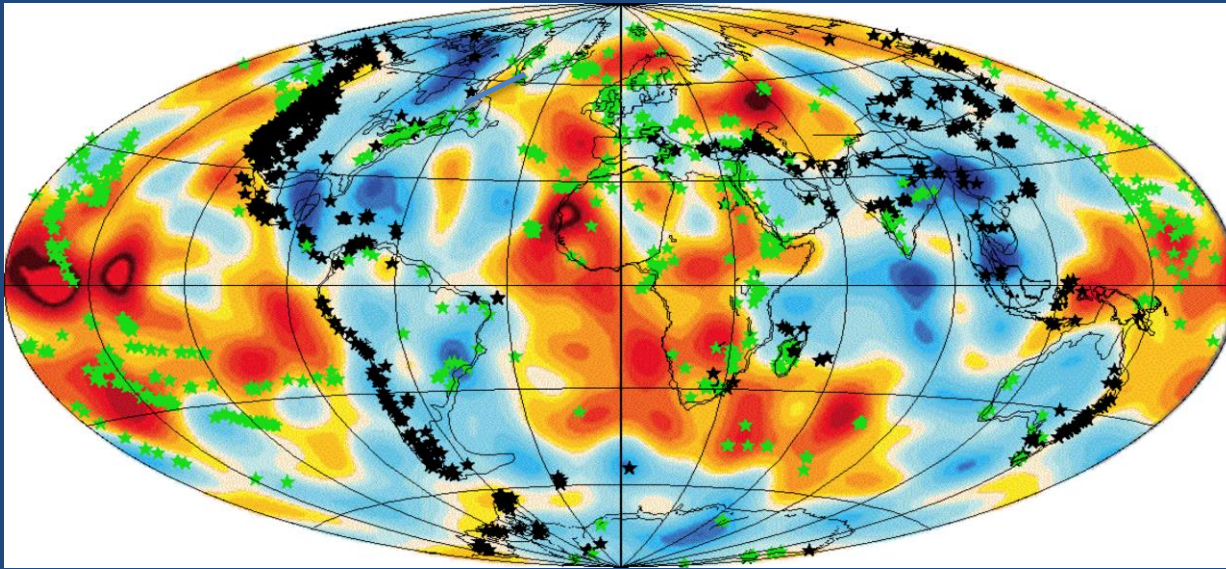


- Anomalies de vitesse sismique lentes (en rouge) interprétées comme matériel chaud, moins dense au dessus duquel on a les upwellings
- Anomalies de vitesse sismique rapide (en bleu) interprétées comme matériel froid et plus dense (subductions)

Disposition relative: bel objet de degré 2 avec :

- Zones à vitesse lente centrée sur l'équateur
- Zones à vitesse rapide passant par les pôles

Ces structures sont elles permanentes?



Position des volcans sur 200 Ma en coordonnées géographiques actuelles

Noir: V. Calco-alkalin = subductions

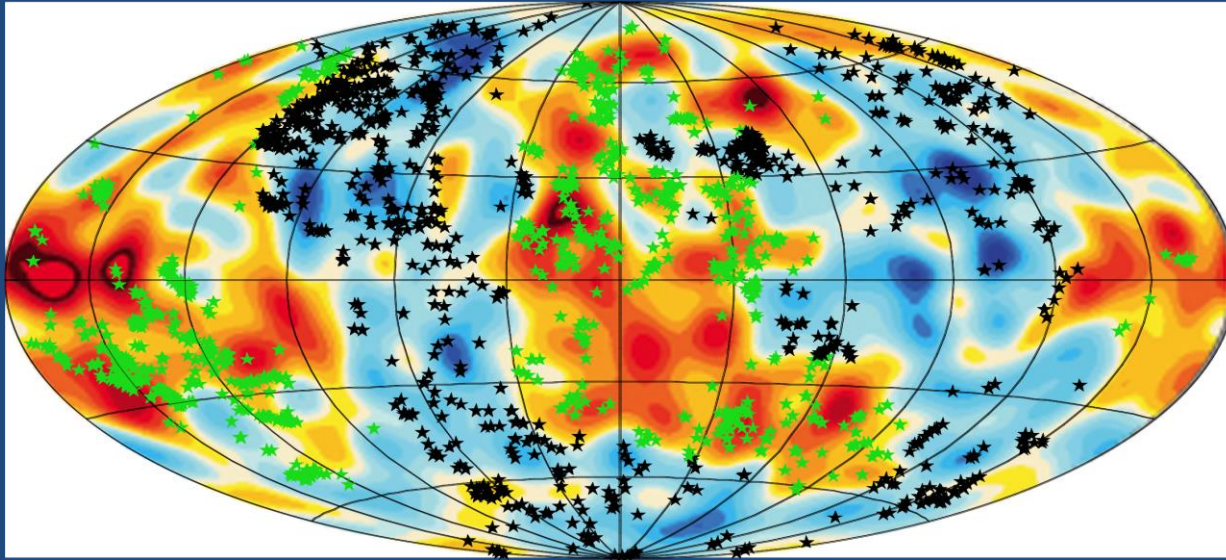
Vert: V. Alcalin = volcanisme intra-plaques

Constitution d'une base de données volcaniques, A partir des bases :

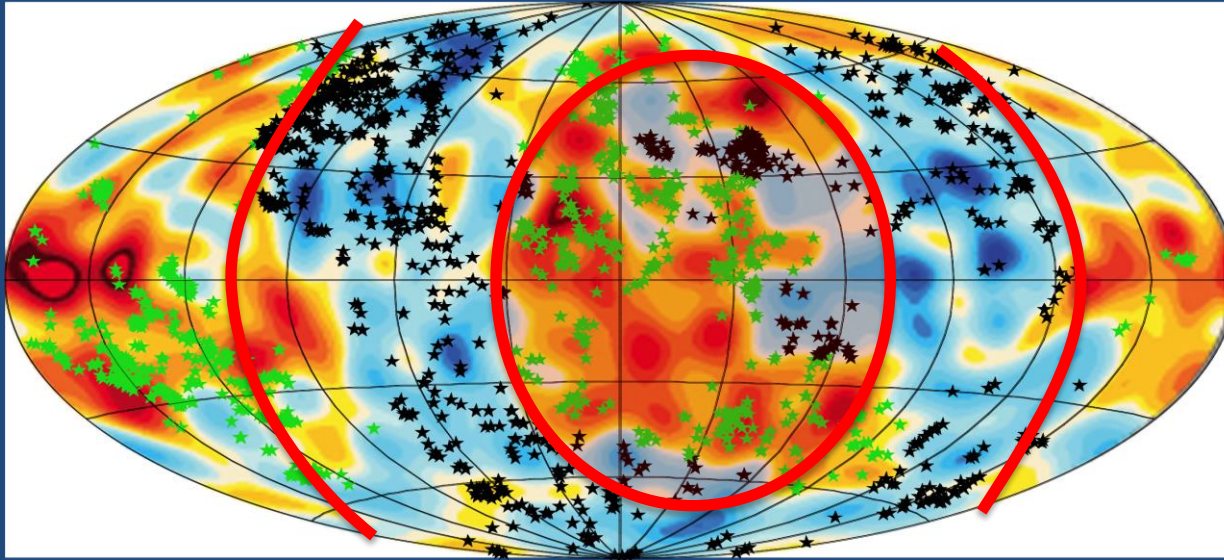
-USGS, Georoc Mainz, GPMDB, Clouard and Bonneville

Environ 20.000 données depuis le Précambrien

RECONSTRUCTION sur 200 Ma DE LA POSITION D'ERUPTION DES VOLCANS



RECONSTRUCTION DE LA PALEOPOSITION D'ERUPTION DES VOLCANS



-Volcans intraplaques (en Vert)

-> Occupent l'espace « chaud » à la CMB

-> Couvrent la période 200-0 Ma-> Permanence de cette structure.

-Volcans de subduction (en Noir)

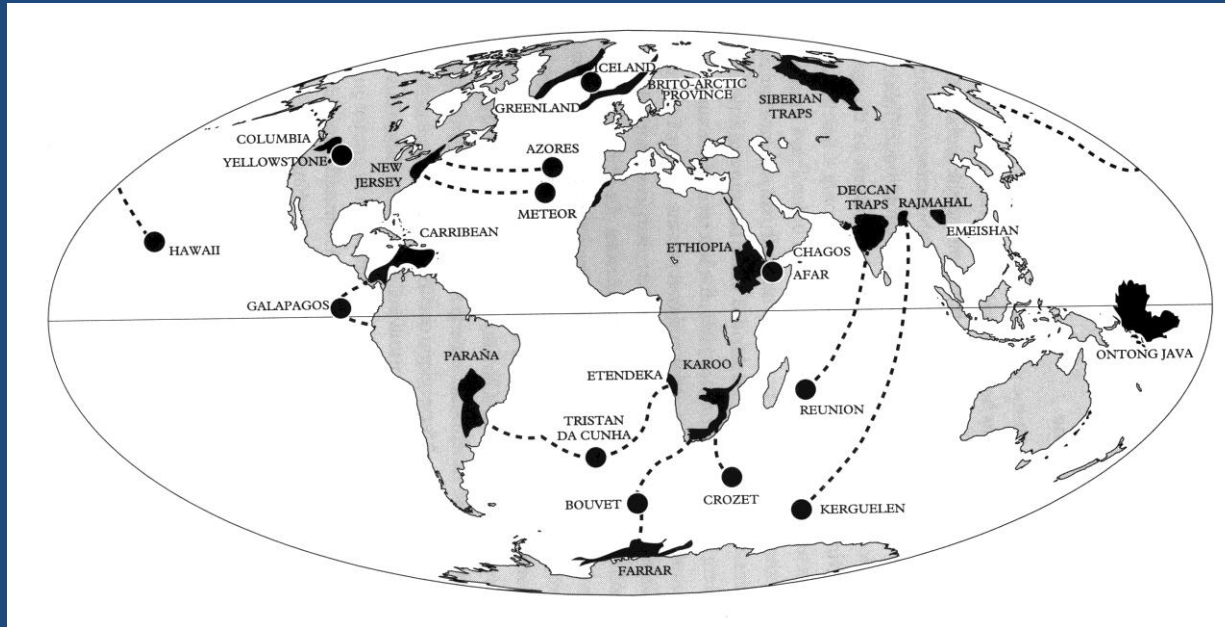
-> Marquent la position en Surface des subductions (depuis, ici 200Ma)

-> « balaiant » l'espace « froid » de la tomographie

-> Les subductions issues du volcanisme ancien viennent tangenter les dômes.

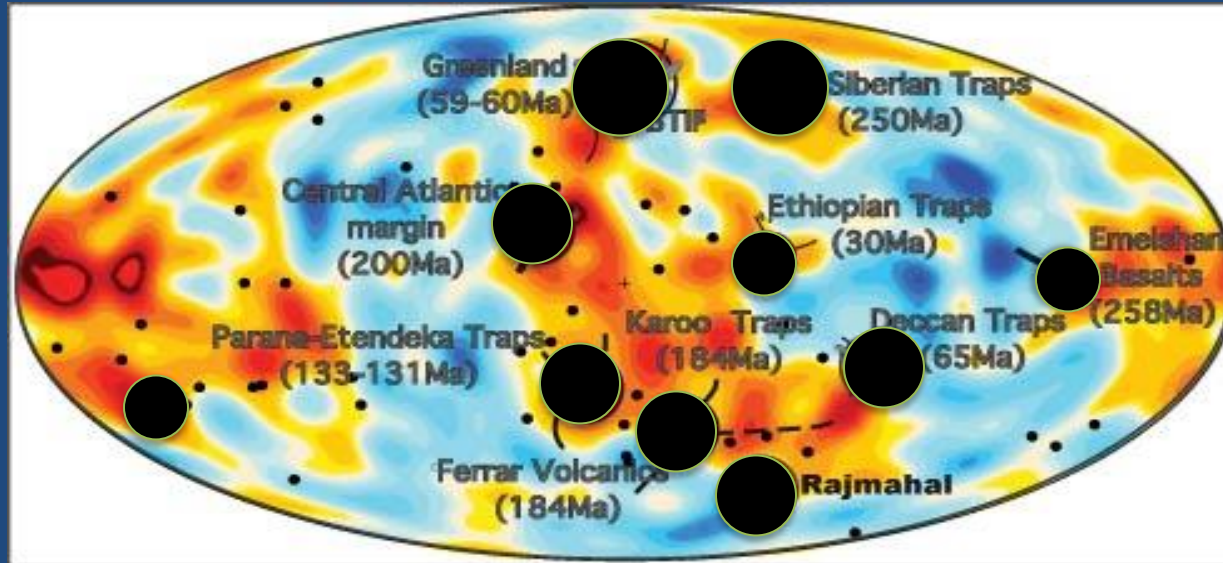
**Traps volcaniques:
gigantesques épisodes volcaniques
(1million de Km2, 1million de KM3, 1 Million d'années
Associés aux grands épisodes océaniques
responsables potentiels des grandes extinctions.**





Besse et
 Stutzmann 08
 Davaille et al, 07

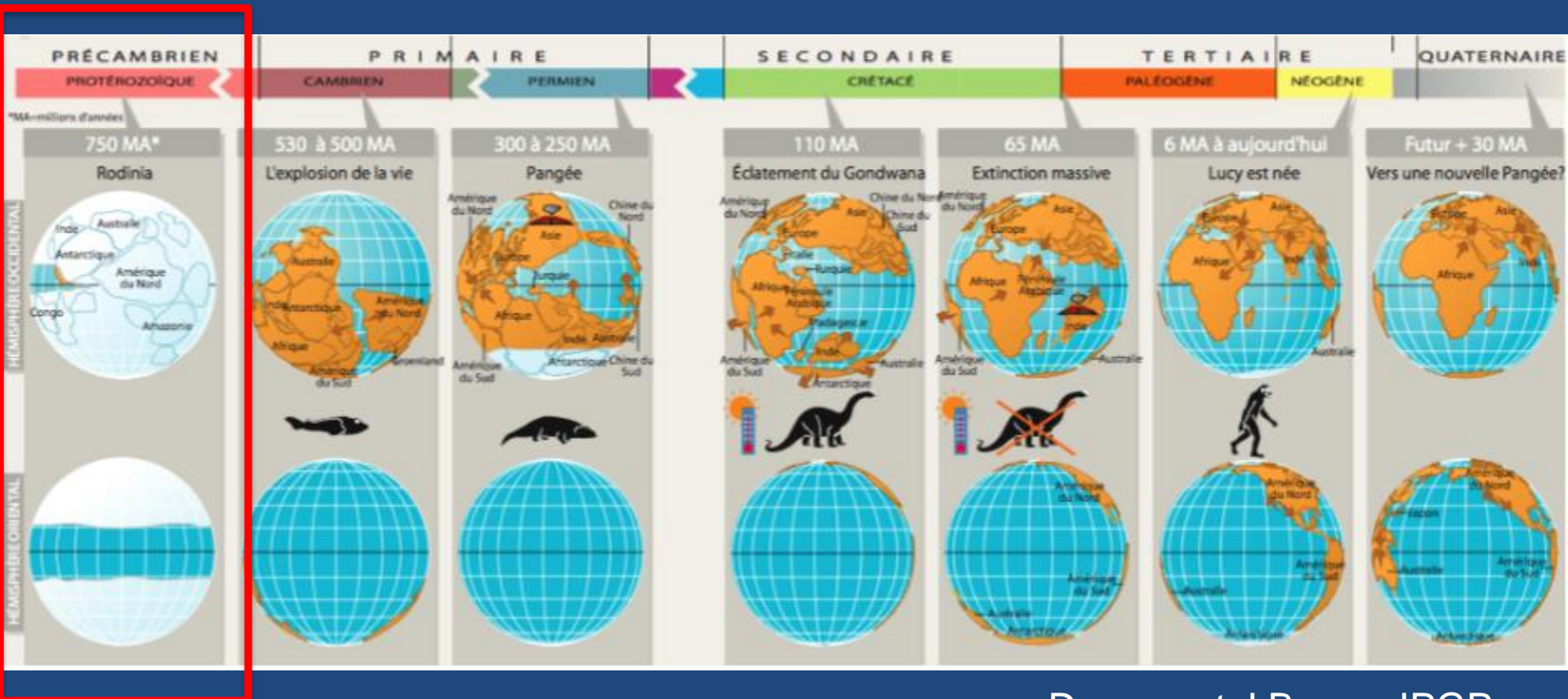
Les Traps volcaniques, gigantesques éruptions liées aux grandes ouvertures océaniques et aux extinctions ont probablement leur origine à la CMB, sur le pourtour des super panaches, restés fixes par rapport à l'axe de rotation de la Terre.



Besse et
Stutzmann 08
Davaille et al, 07

Reconstruire l'histoire de la Terre, du climat, de la vie, du manteau,

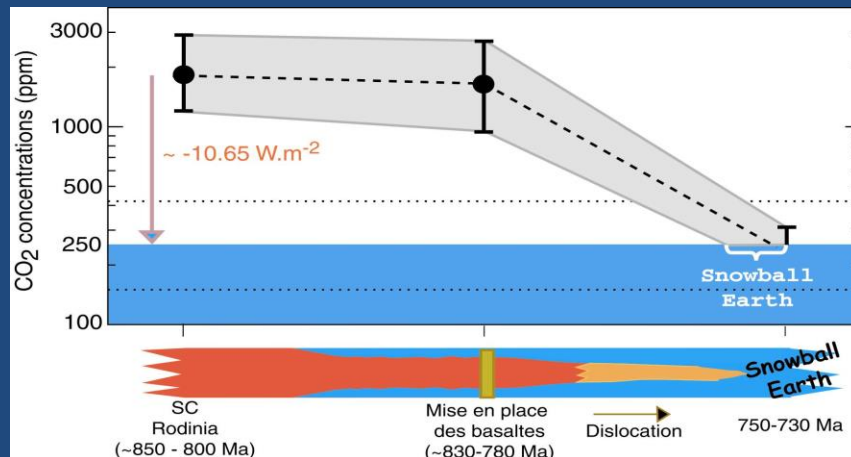
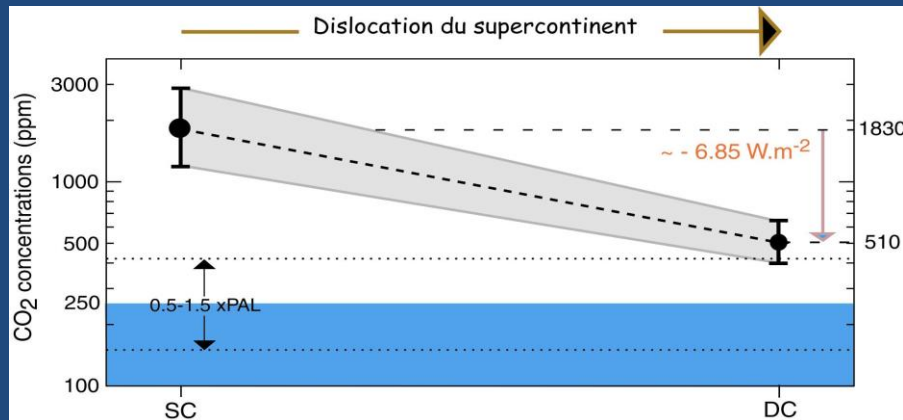
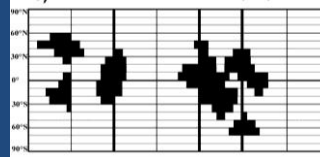
La croûte terrestre est un acteur particulier en tant qu'interface entre le manteau ET les enveloppes superficielles



Document J.Besse, IPGP

« SNOWBALL EARTH »

La Terre « Boule de Neige »



On reconstruit la position des continents en utilisant les données paléomagnétiques: Dislocation du « Super Continent Rodinia ». L'éclatement de celui ci favorise l'érosion, donc le piégeage de CO₂

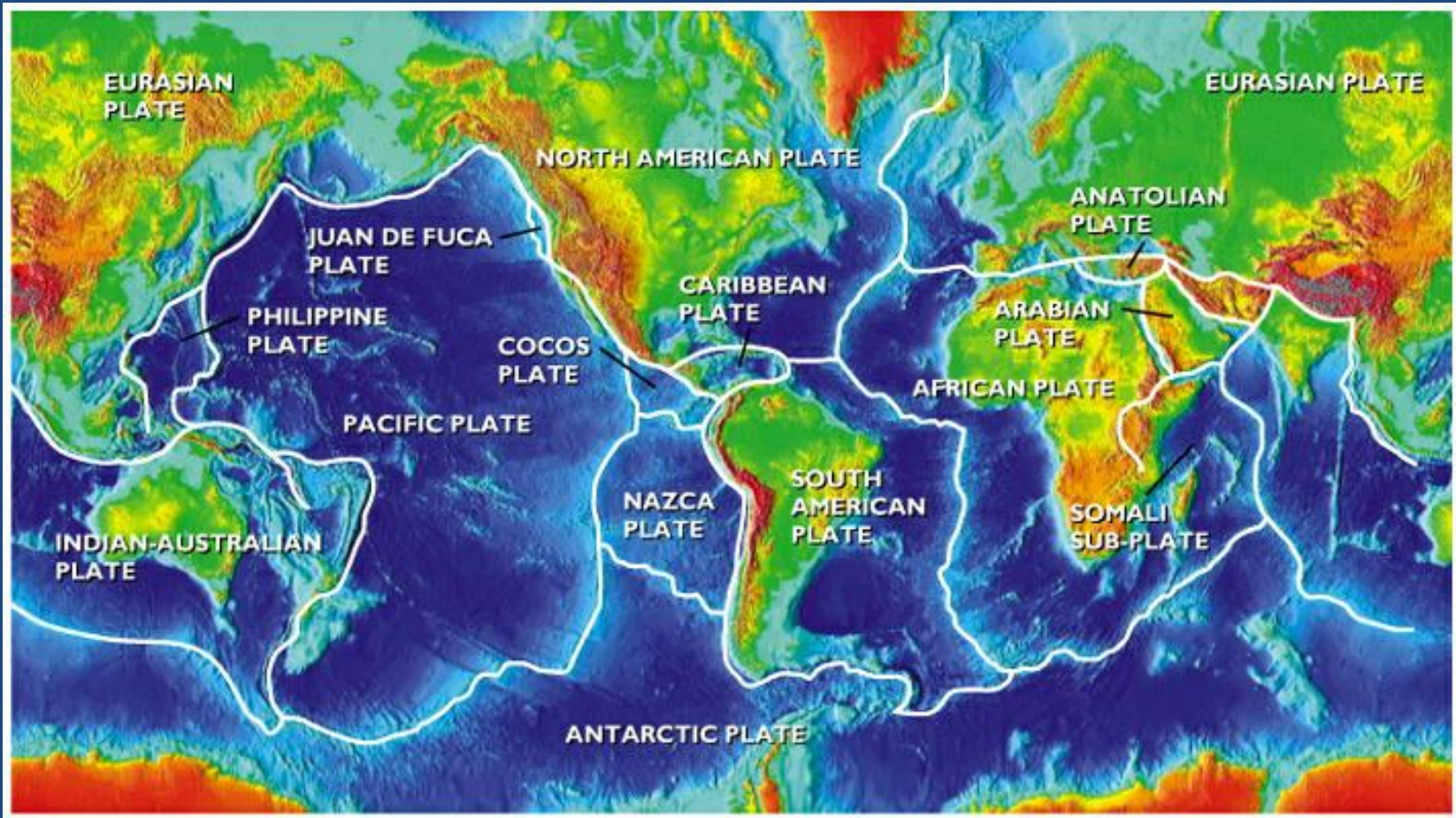
On simule l'évolution du CO₂ atmosphérique en utilisant un modèle couplé climat / Cycles géochimiques globaux

(Goddéris et al., EPSL 2003, Donnadieu et al., 2004)

Avec le 'pompage' du CO₂ on créé les conditions favorables à un englacement de notre Planète

A photograph of a sunset over a mountain range. The sun is a bright, glowing orb in the upper right quadrant, casting a warm orange and yellow light across the sky. The mountains in the background are silhouetted against the bright sky. In the foreground, the dark silhouettes of trees and foliage are visible on both sides. The word "Merci," is written in a white, cursive font in the center of the image.

Merci,



1945 Artur Holmes

1962 Harry Hess propose l'expansion des fonds océaniques

1960... Vine et Matthews (et Morley) valident cette théorie par les inversions du CMT

1965 Tuzo Wilson propose le nom de plaque pour les différents pièces de la lithosphère

1967 Jason Morgan propose que la surface de la terre était composée de 12 plaques rigides qui se déplacent relativement l'une à l'autre.

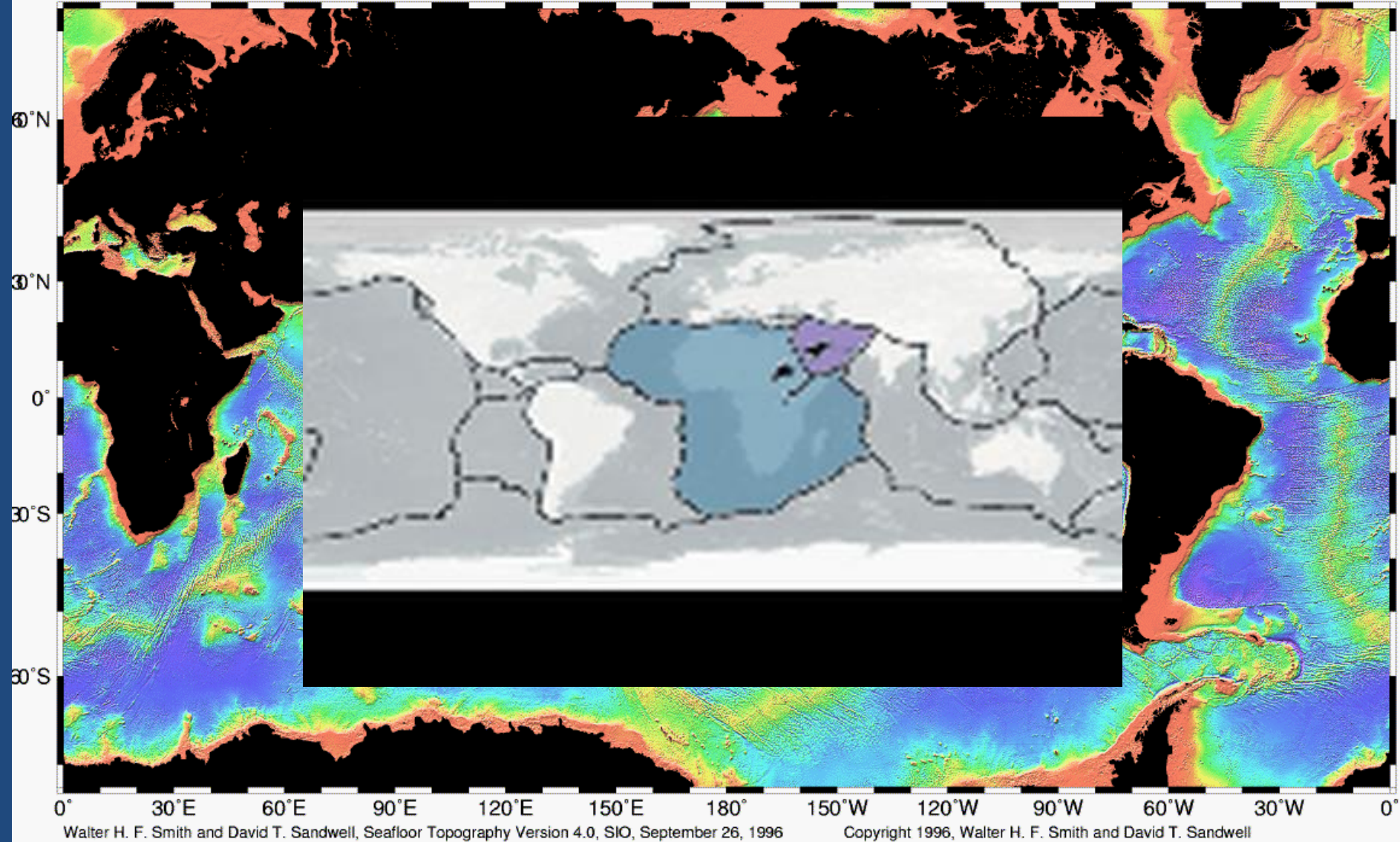
1967 Xavier Le Pichon a édité une synthèse montrant l'endroit et le type des frontières ainsi que leur direction relatives

Support théorique:
Théorie dynamo



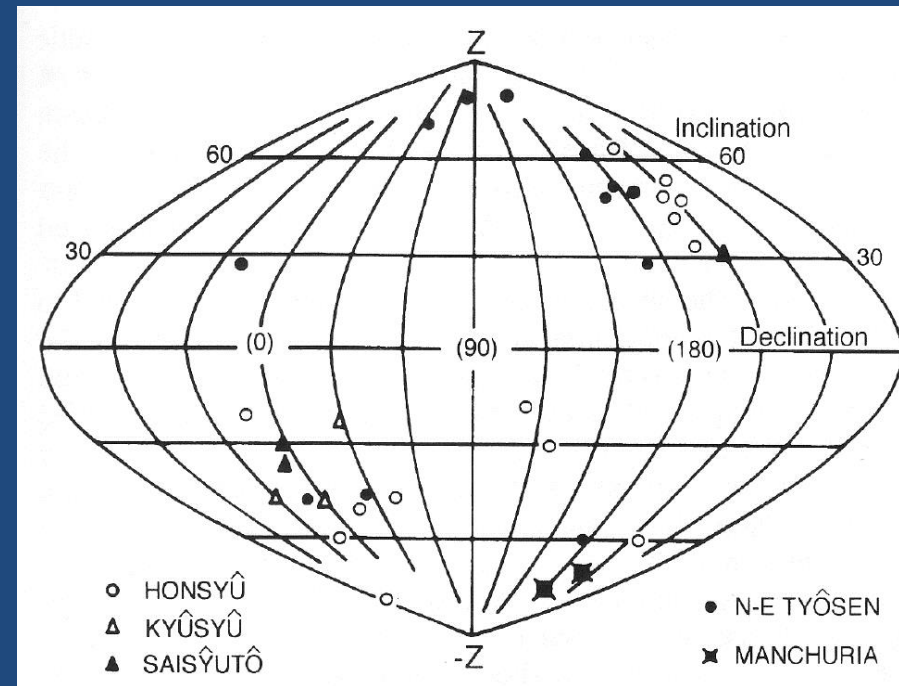
•Le champ magnétique observé à la surface de la Terre trouve principalement son origine dans le noyau terrestre, composé de fer et de nickel fondu en convection qui agit comme une dynamo autoentretenue.

Et propose une théorie de l'expansion des Océans...



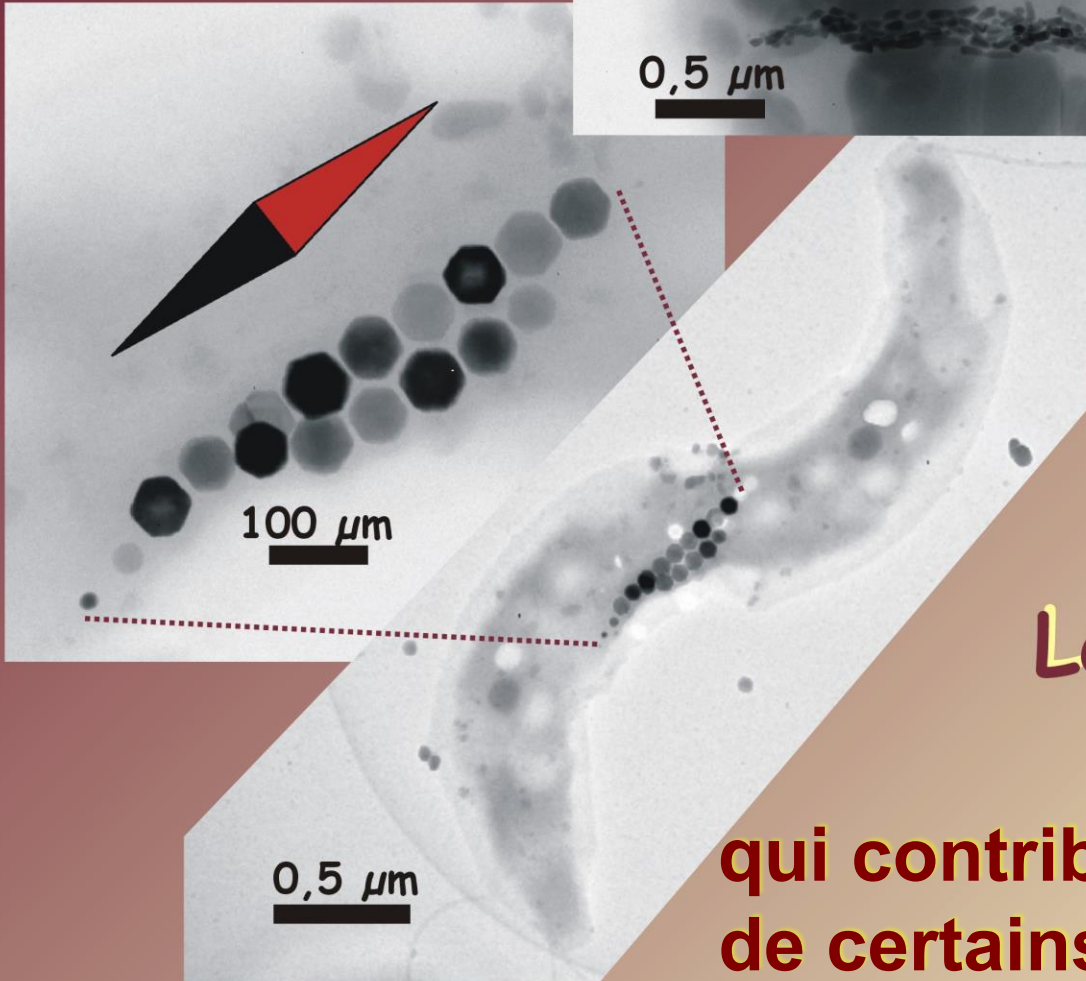
Matuyama étudie >100 basaltes tertiaires provenant de 38 sites au Japon et en Mandchourie (Chine du Nord).

De nombreuses laves sont aimantées de manière inverse et la polarité est corrélée à la position stratigraphique.



La polarité du CMT dépend de manière organisée du temps.

Certaines bactéries synthétisent également de la magnétite..



Les magnétosomes

qui contribuent à l'aimantation de certains sédiments...

Fréquence des inversions au cours des temps géologiques

(D'après Gallet et Pavlov)

Middle Cambrian magnetostratigraphic data

