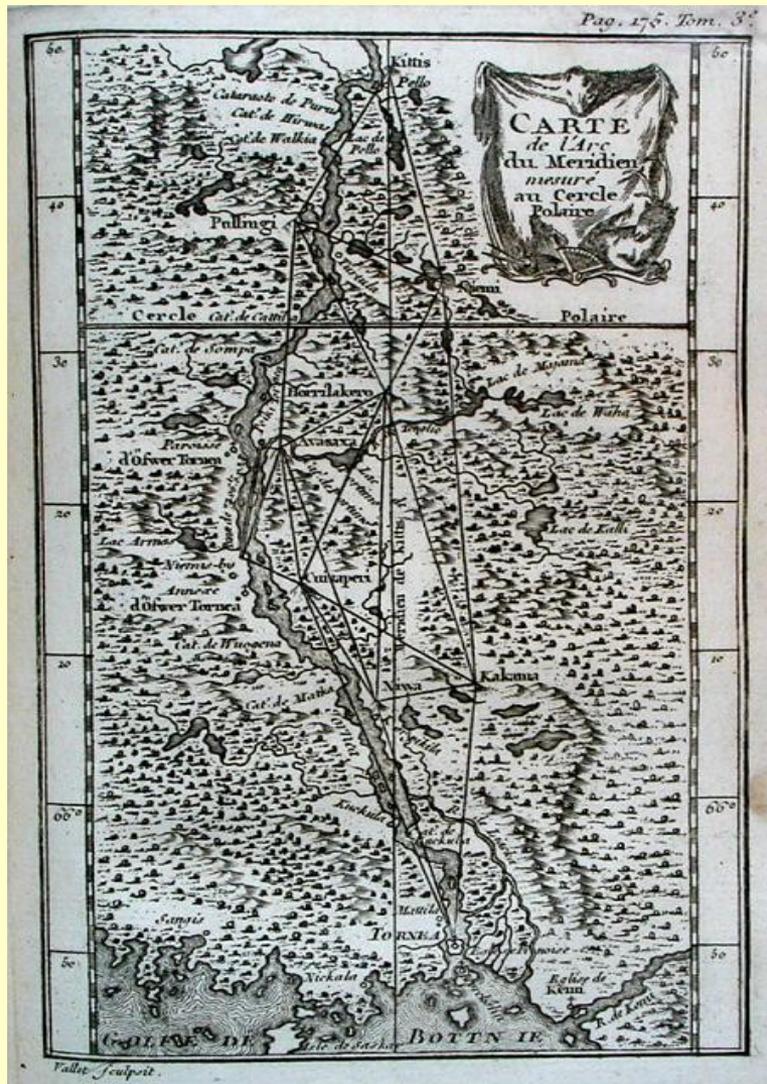


Le géoïde, les ellipsoïdes, la forme de la Terre, en 2017

F. Chambat

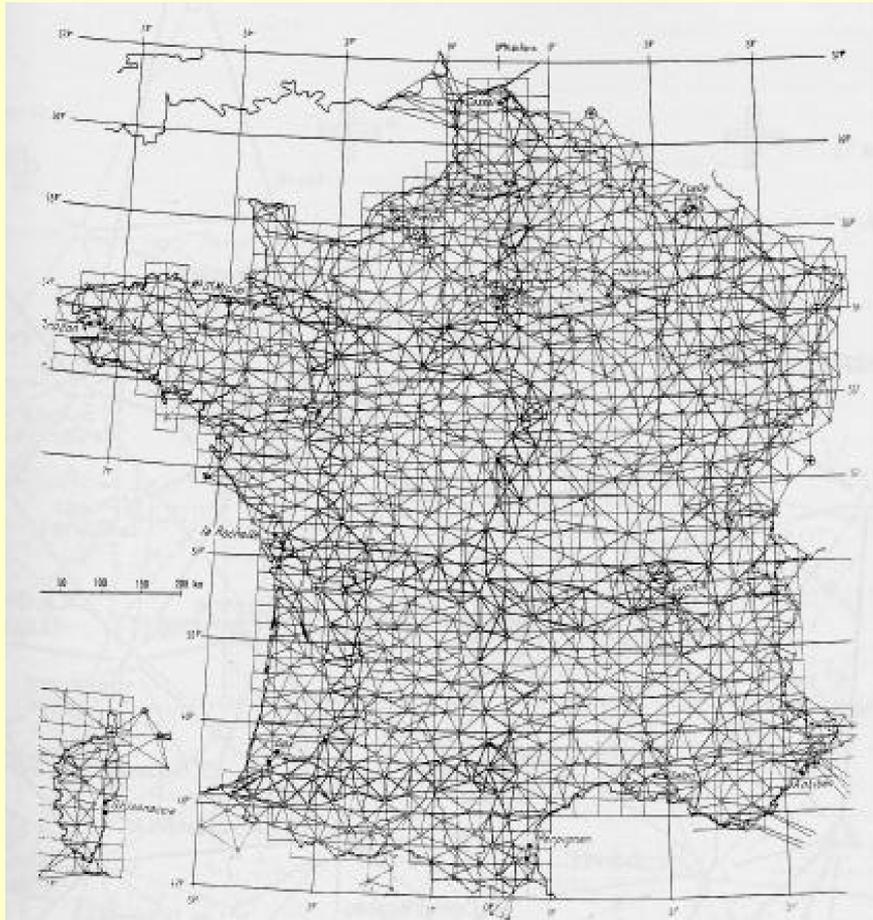


Triangulation
(Fernel, Snellius)



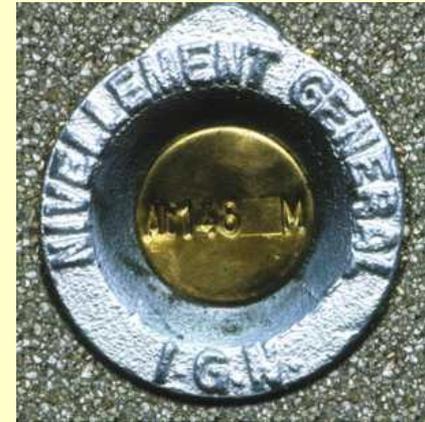
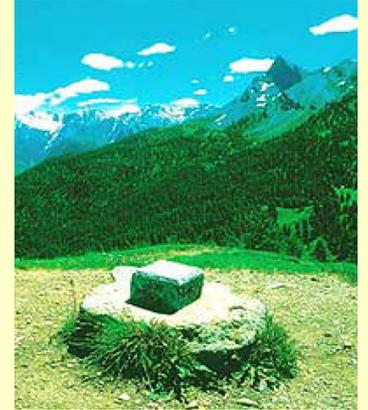
Exemple :

Maupertuis,
La Figure de la Terre
1738.
(expédition 1736)



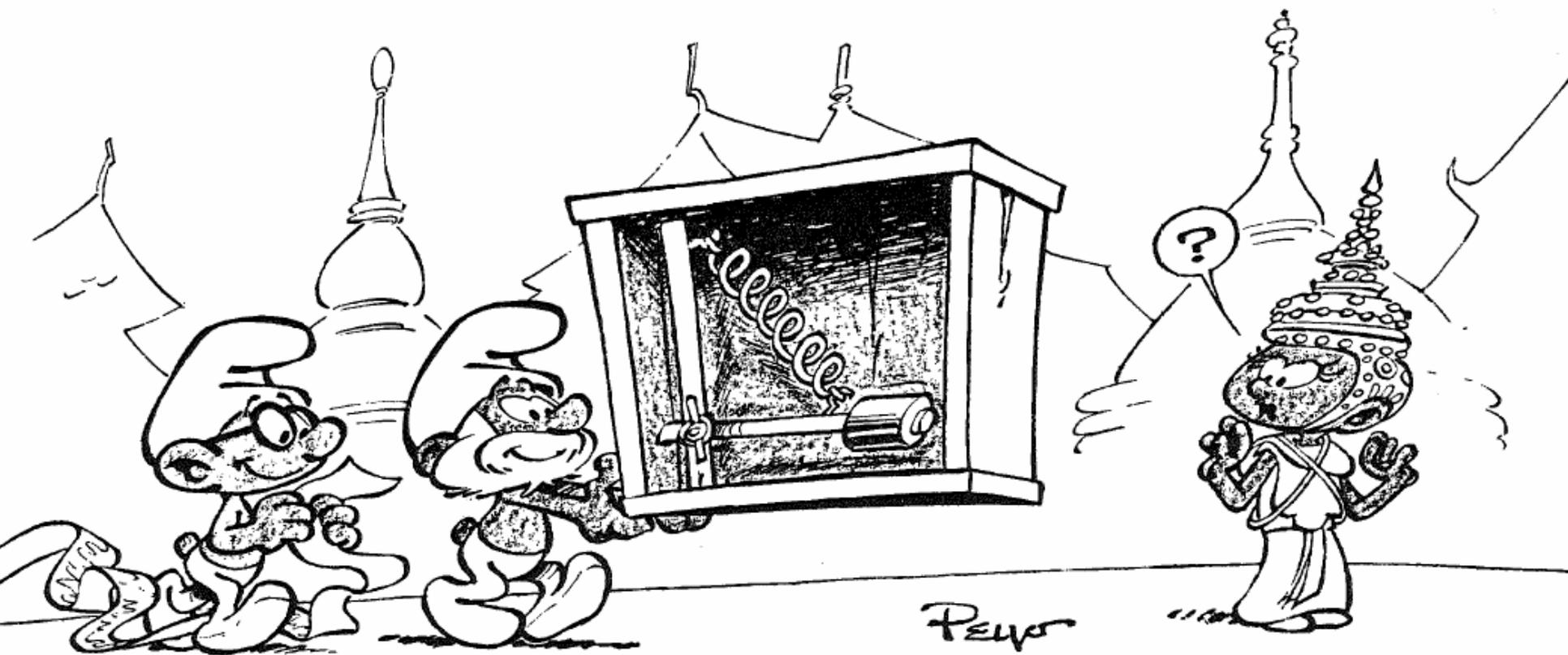
Nouvelle
triangulation de
la France (1991),
1er ordre 800
points

Puis 5000, 60000
points

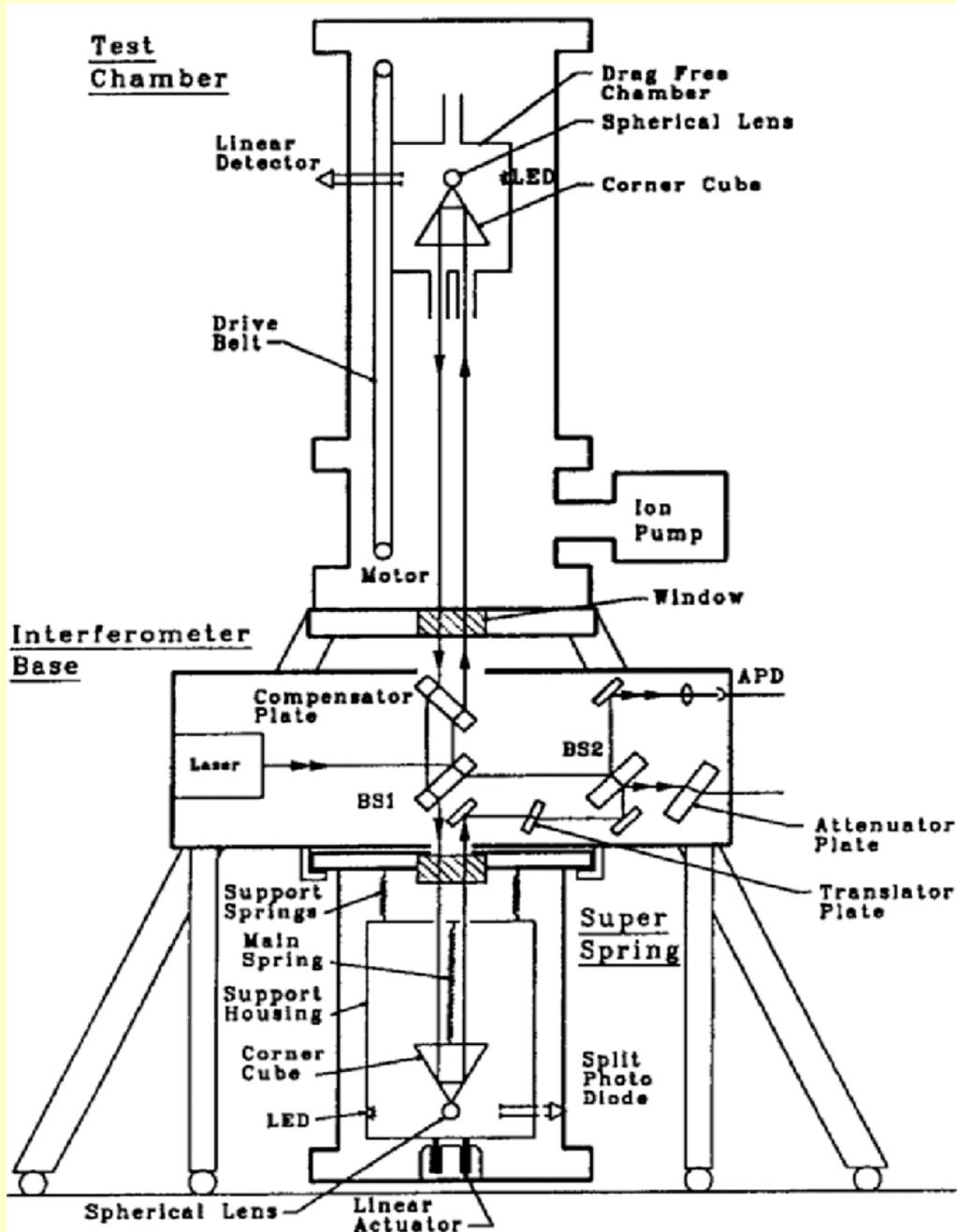


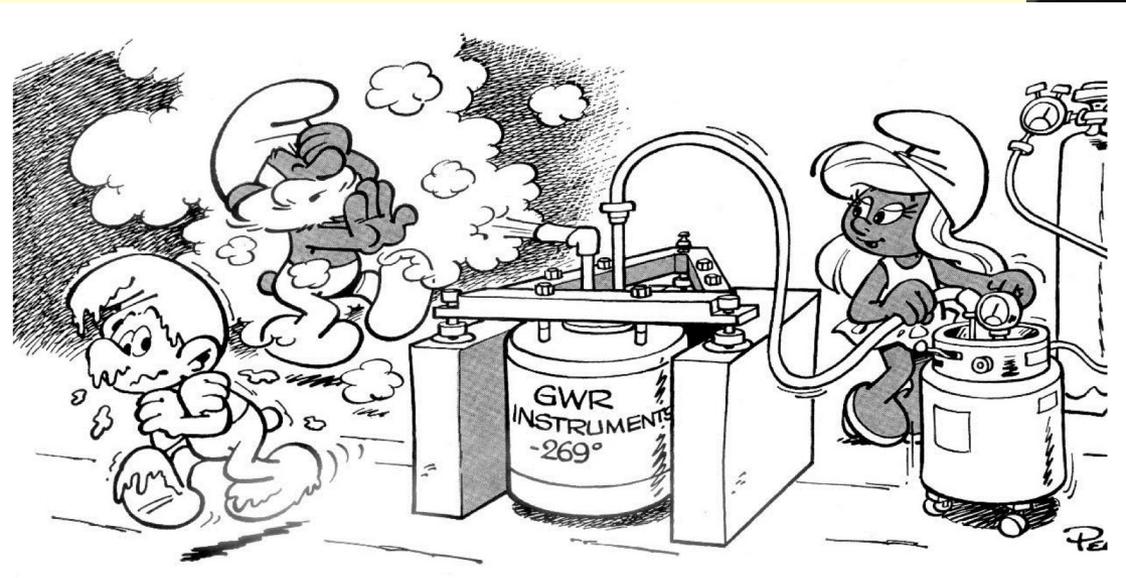
Mesures du géoïde et de la pesanteur

Gravimètre relatif :



Absolu :

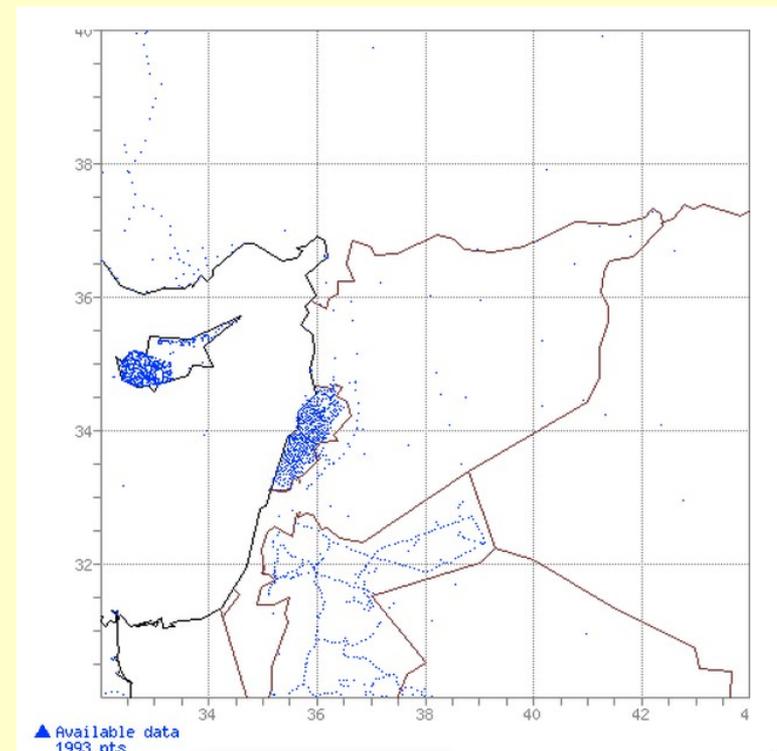
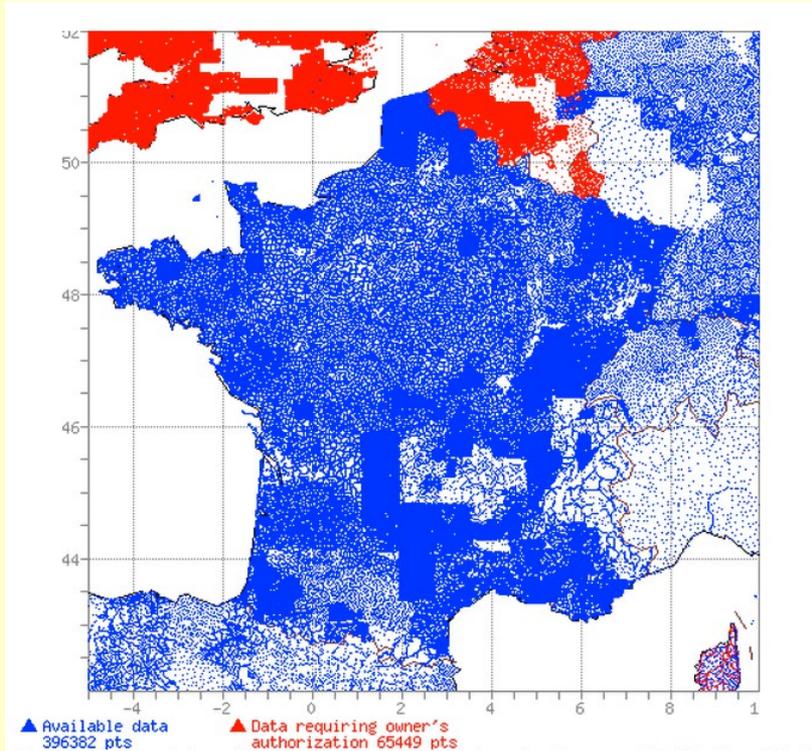




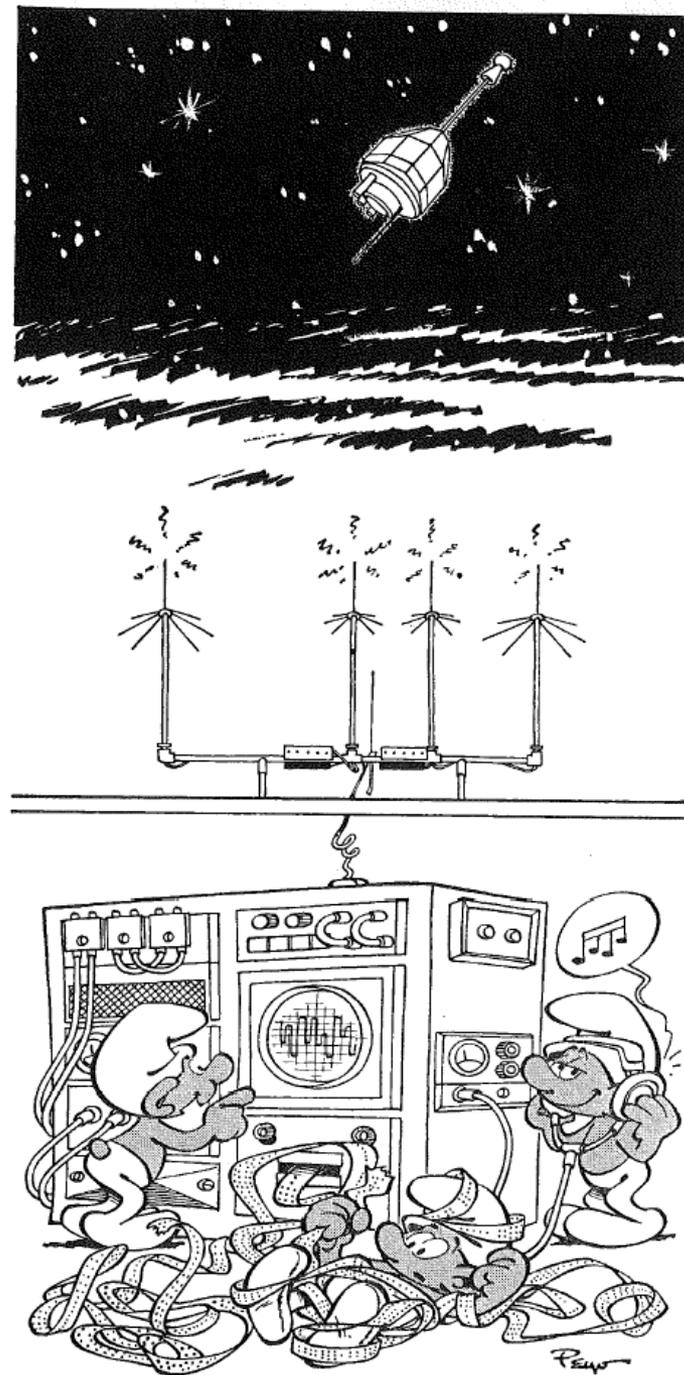
Précisions des gravimètres

A ressort	10^{-7} g	
Absolu	10^{-8} g	
Supraconducteurs	10^{-9} g	(un adulte à 2 m)

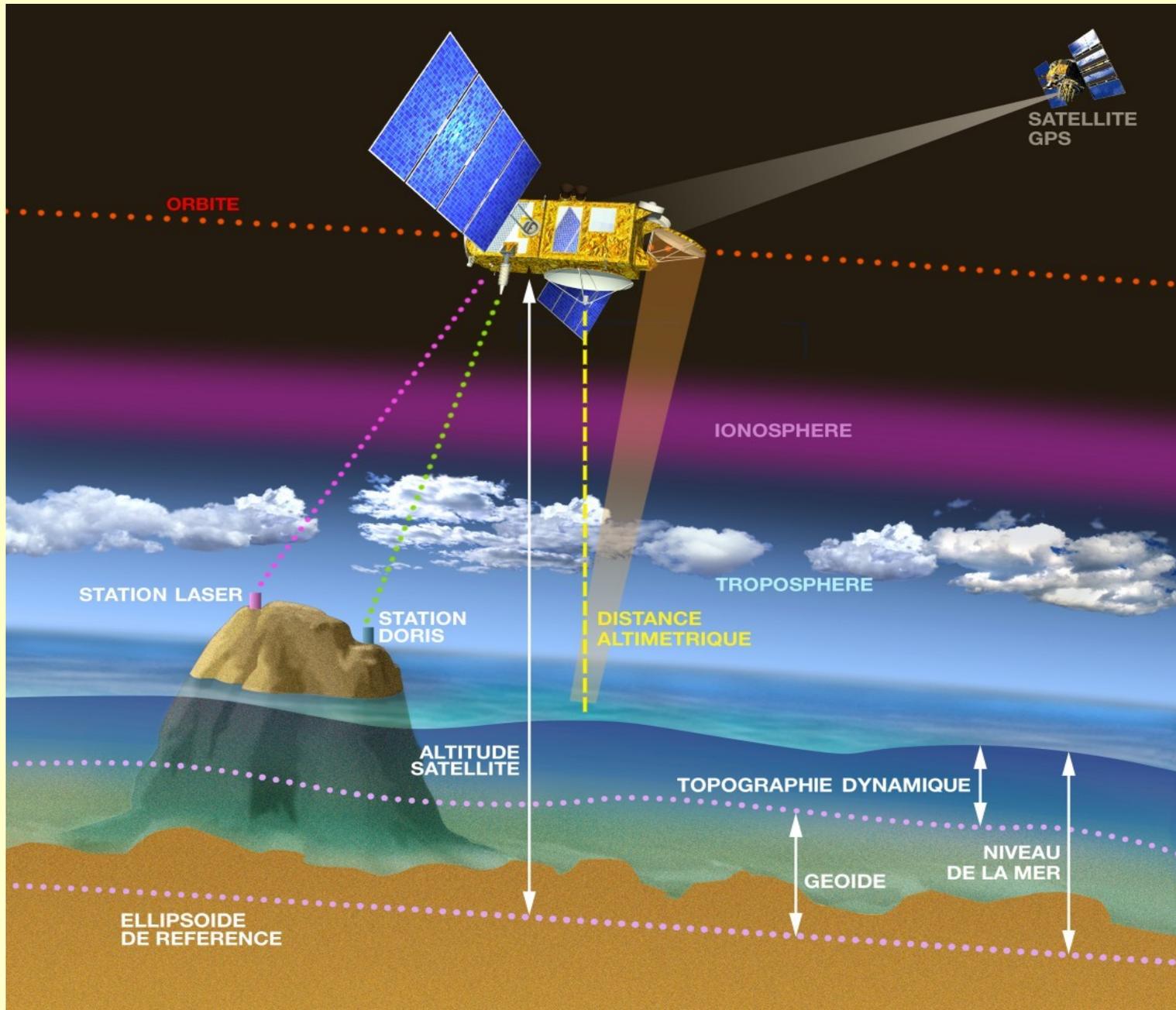
Plus ou moins de couverture

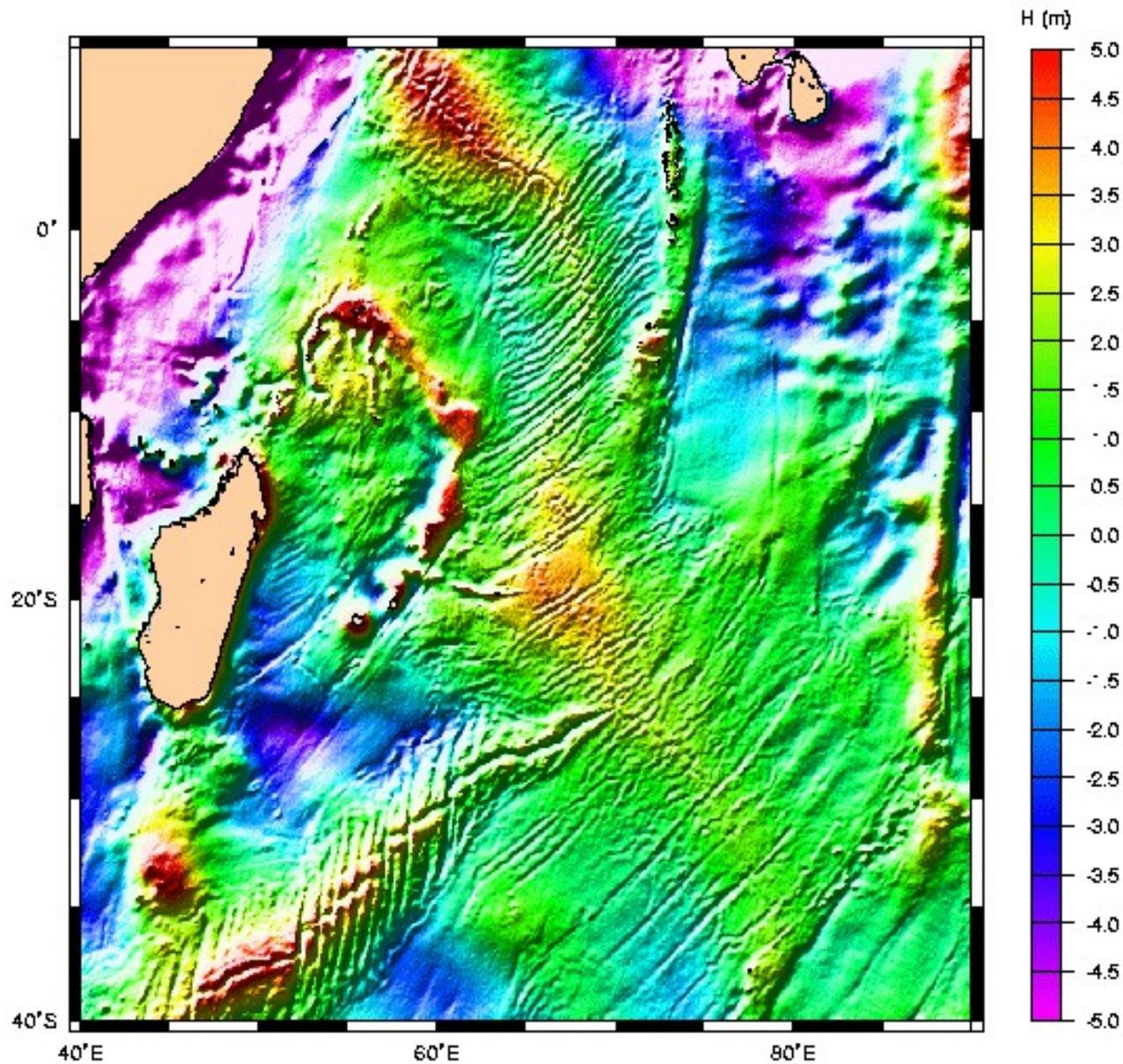


Pour une couverture
globale :
des mesures par
satellites artificiels



Des mesures de surface de la mer par altimétrie



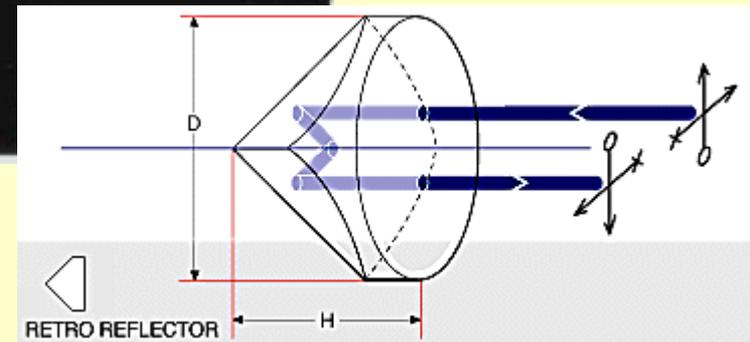
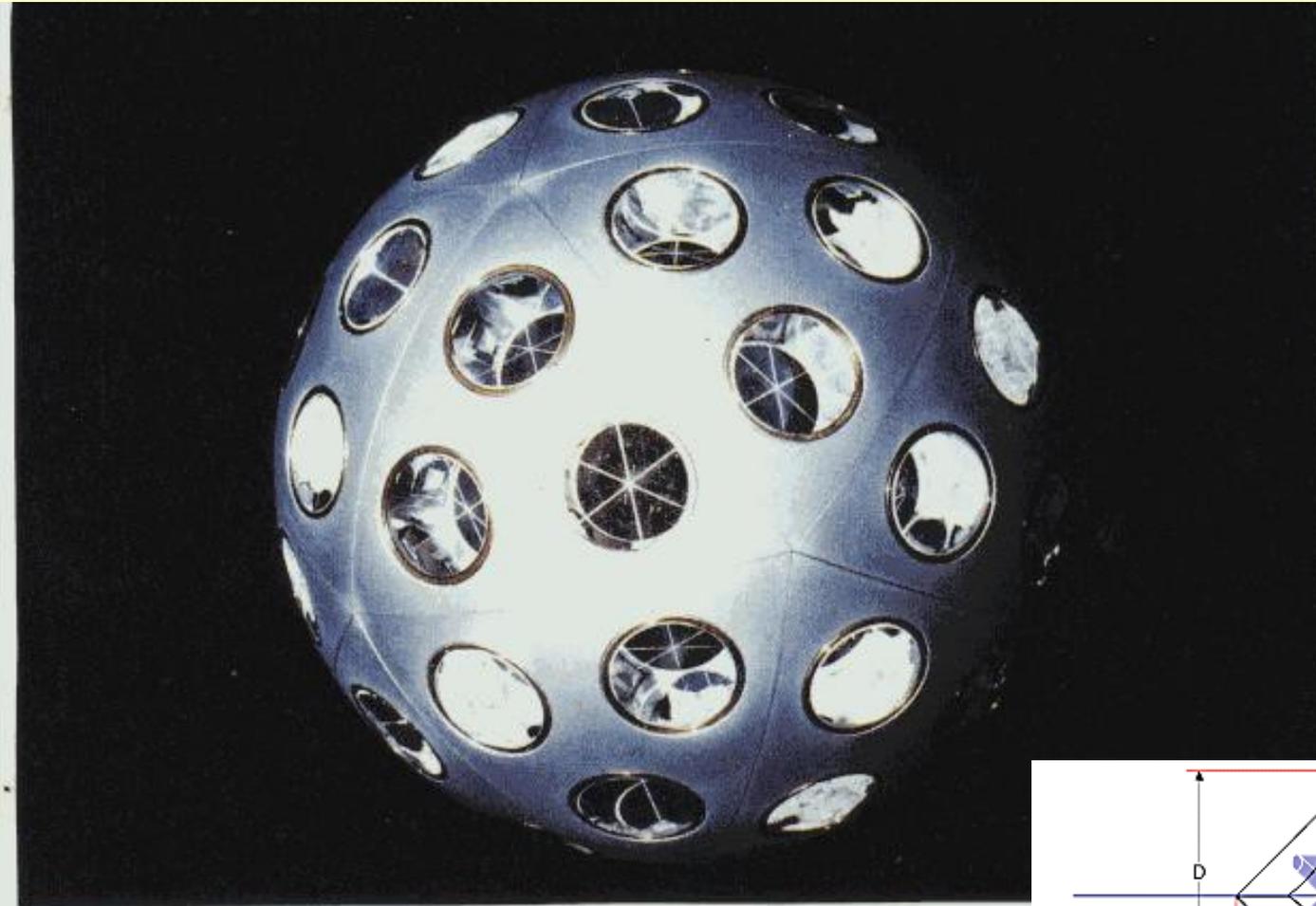


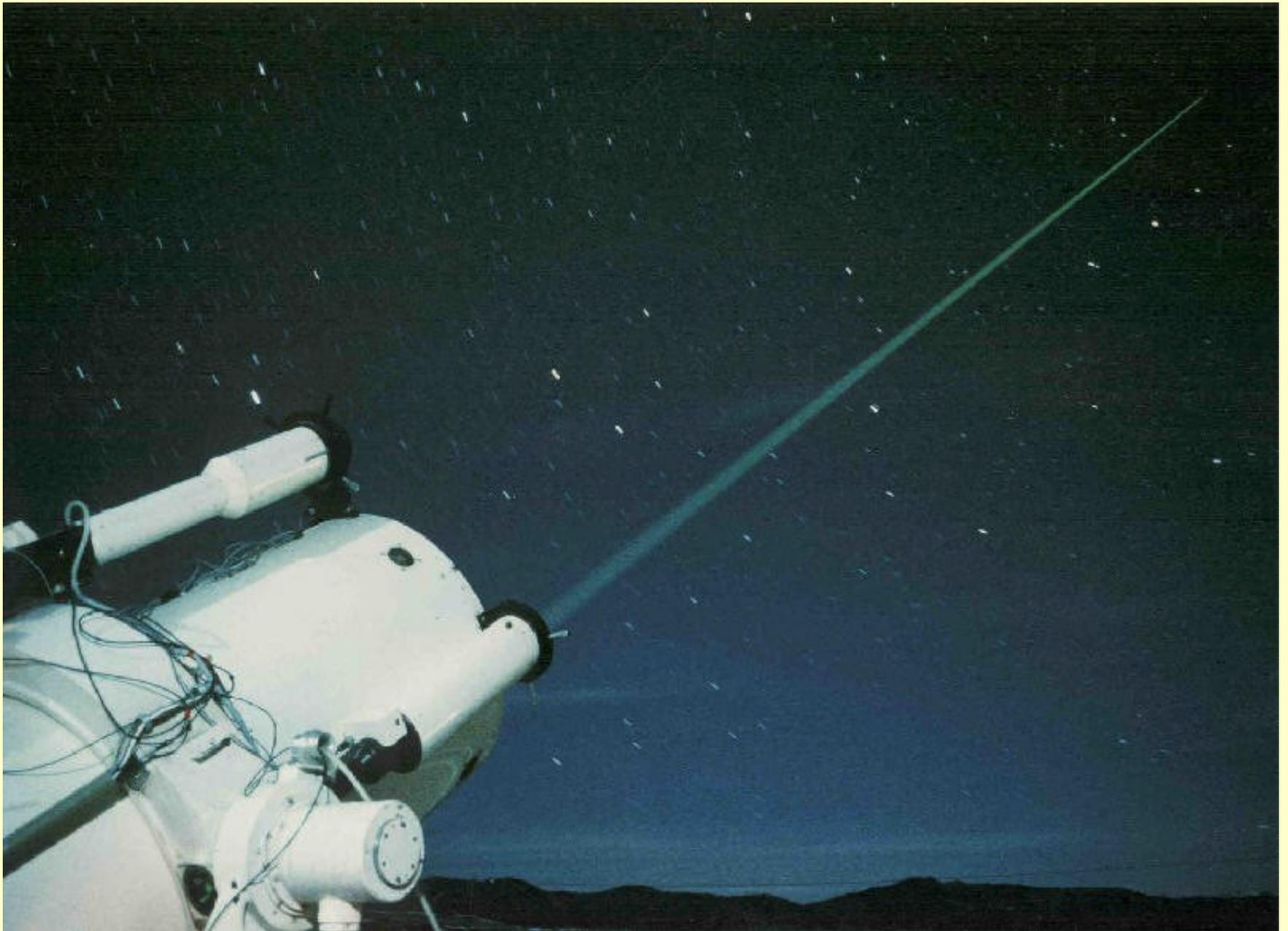
Détail de la Surface Moyenne Océanique : dorsales dans l'Océan Indien, près de Madagascar

Satellites : Geosat, TOPEX/POSEIDON, ERS-1, ERS-2

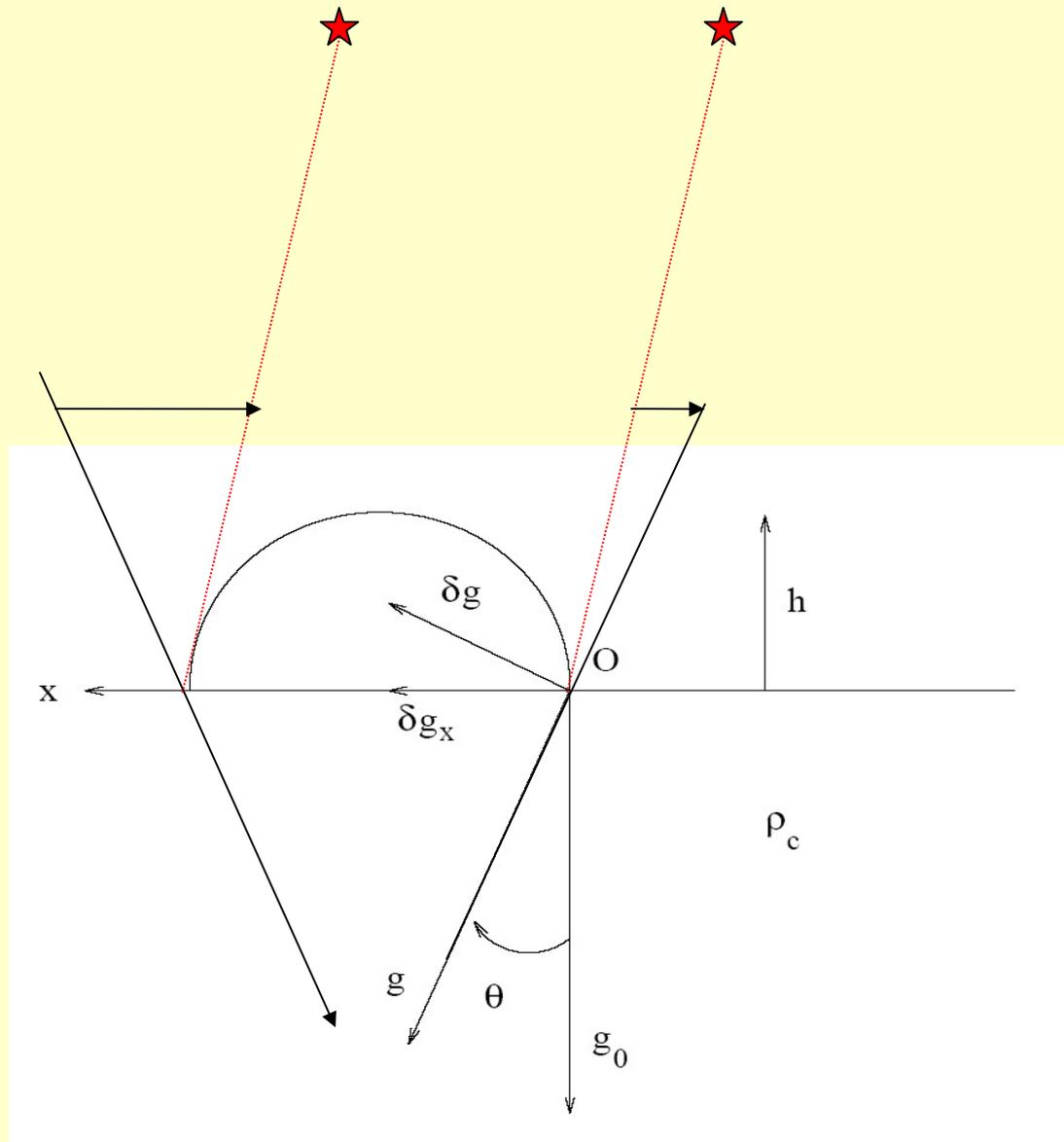
<http://www.jason.oceanobs.com/html/portail/galerie>

Satellite géodésique





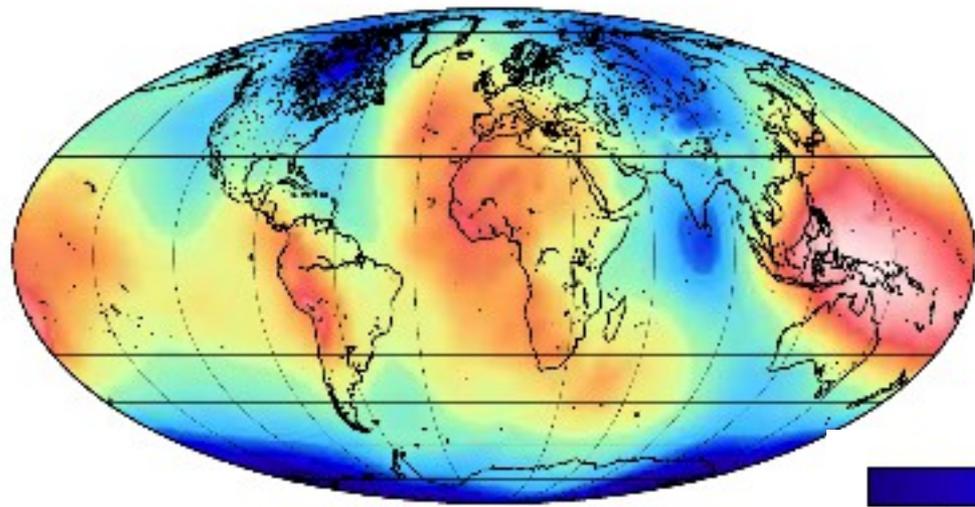
Déviations de la verticale



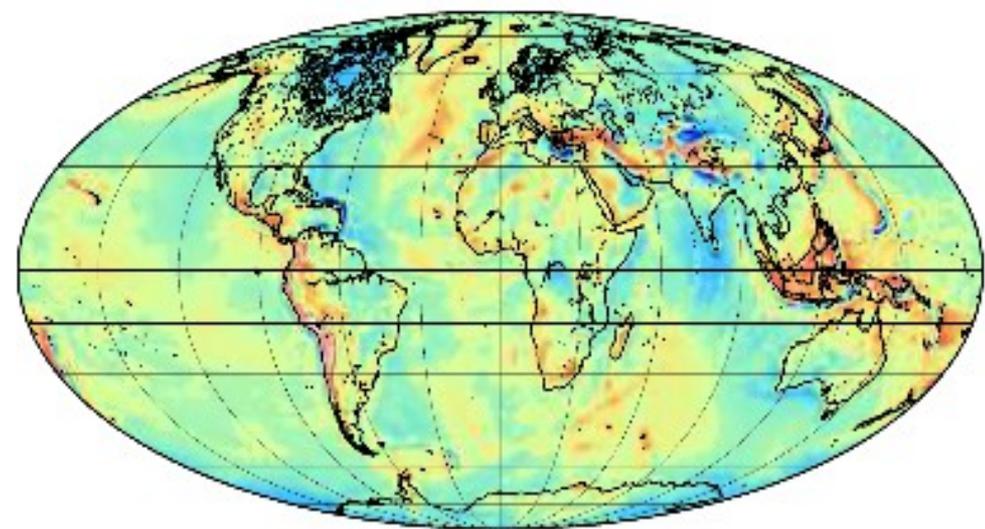
Bouguer 1749
Maskelyne 1774
--> 4,5

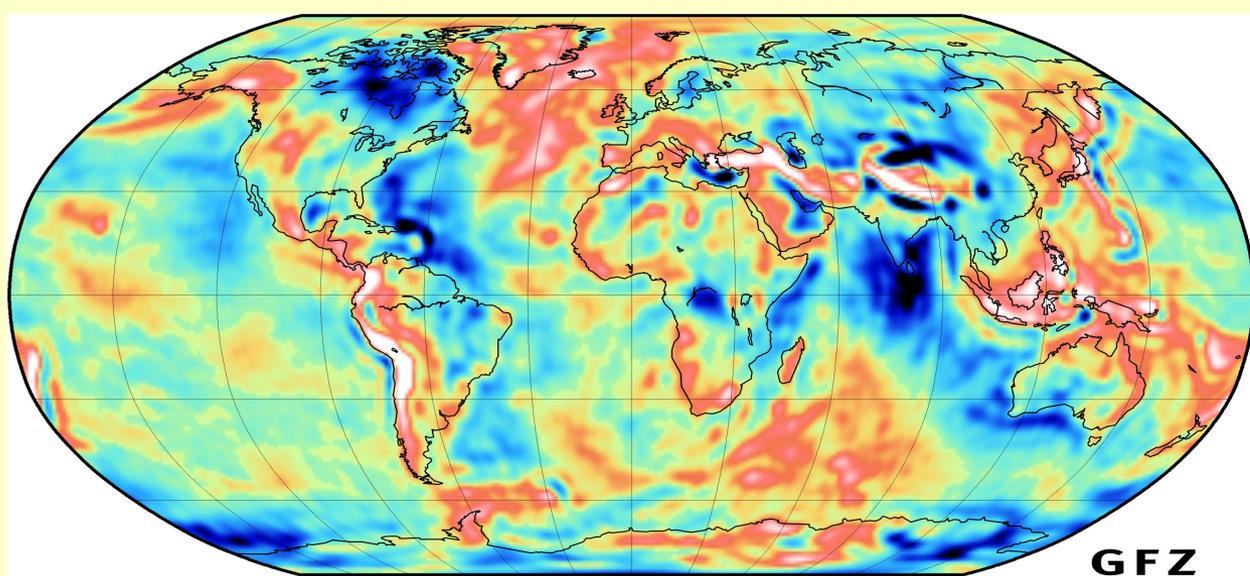


Observed Geoid m



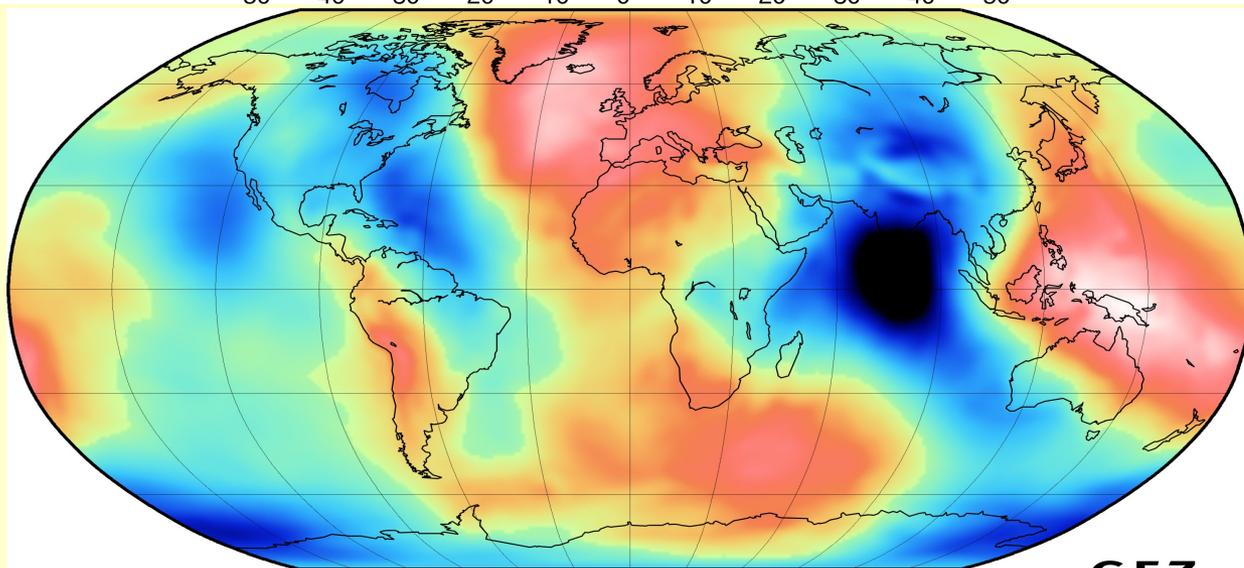
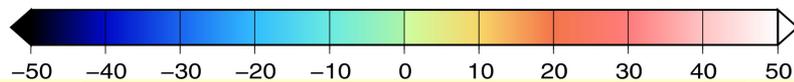
Observed Gravity mGal





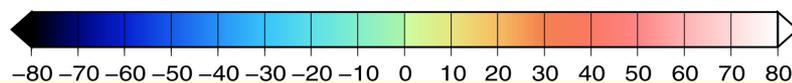
EIGEN-CHAMP03S

GFZ
POTSDAM

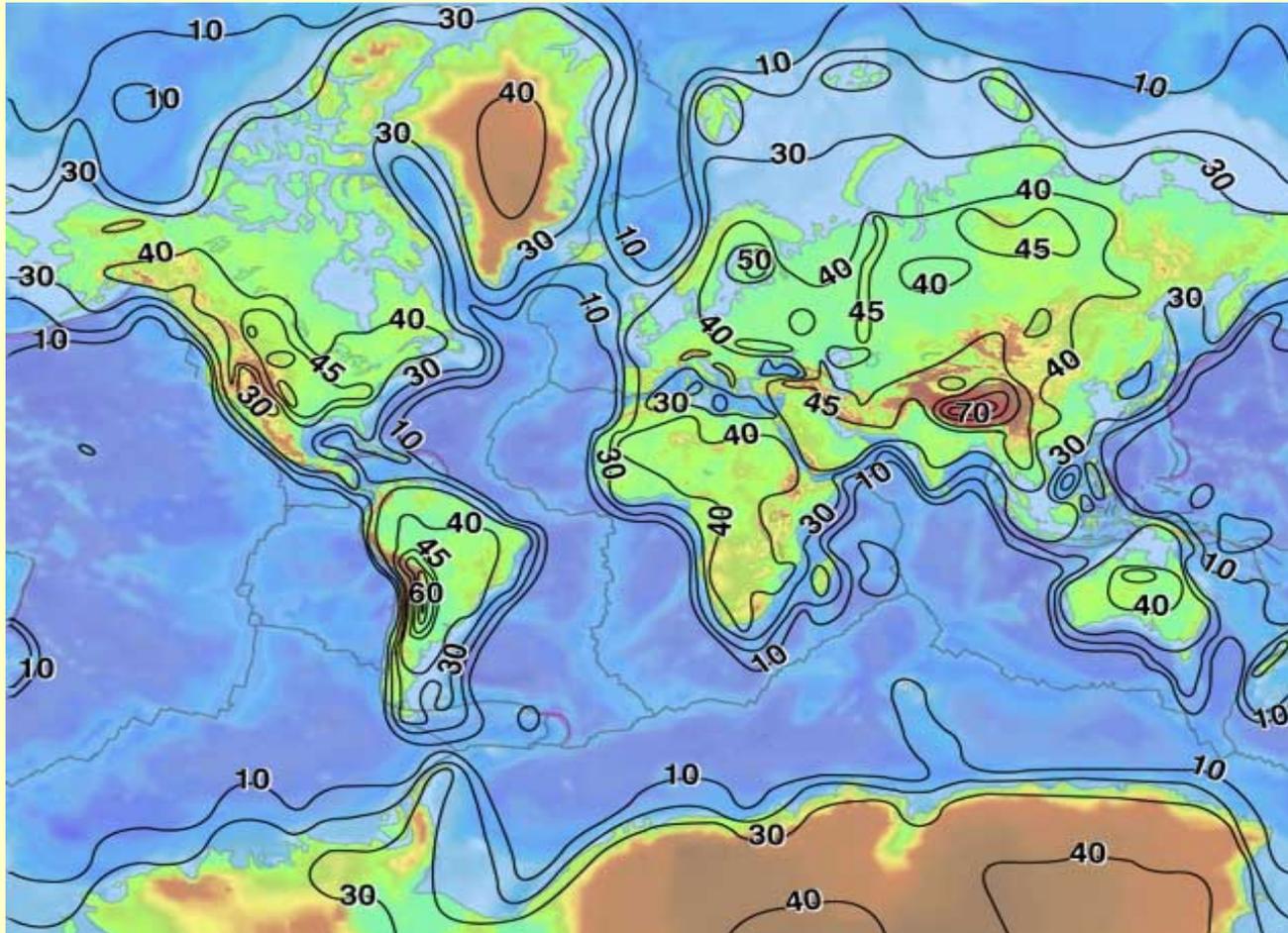


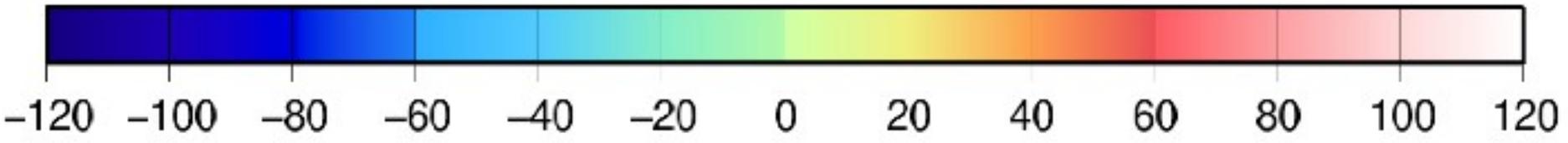
EIGEN-CHAMP03S

GFZ
POTSDAM

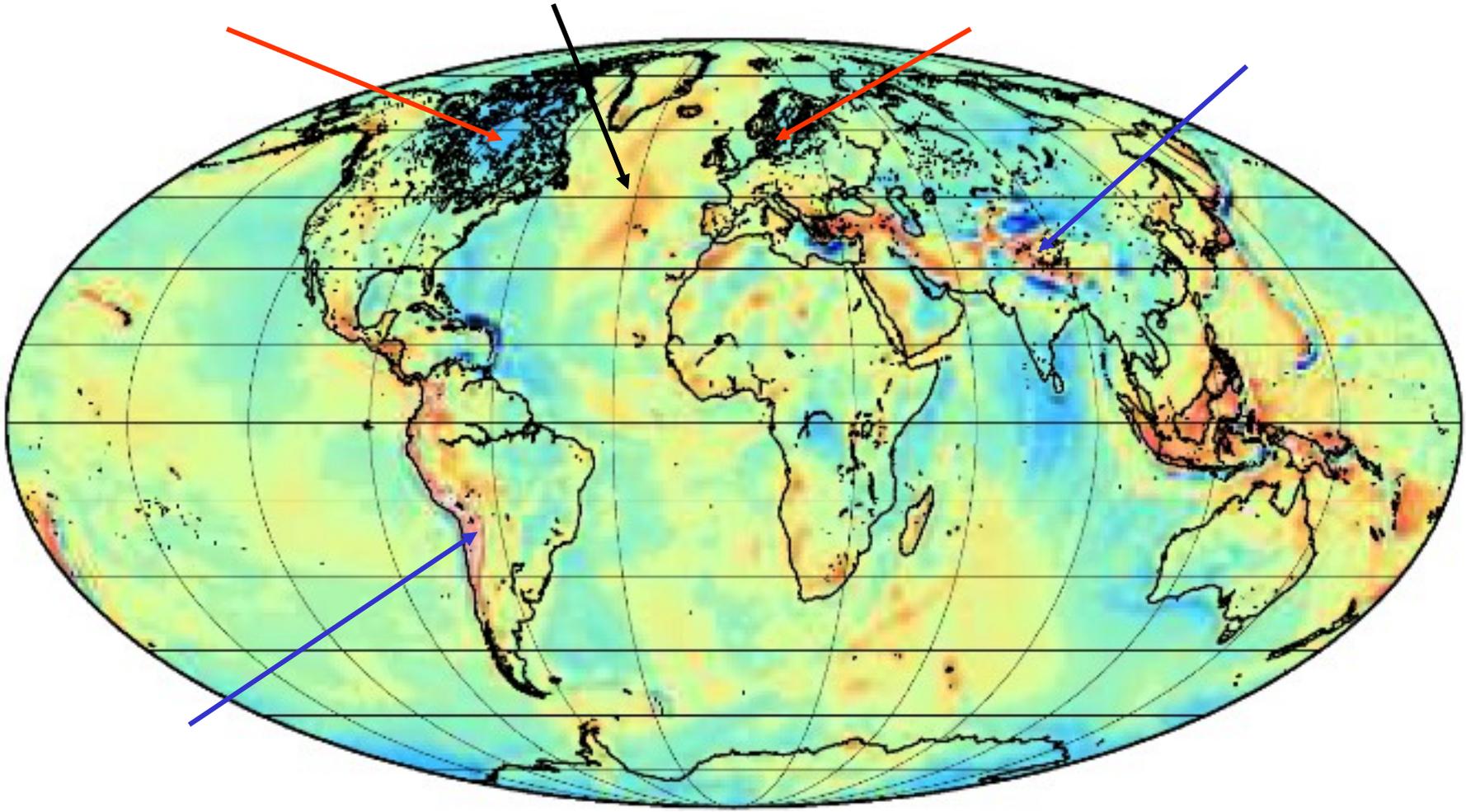


Épaisseur de la croûte continentale





Observed Gravity mGal



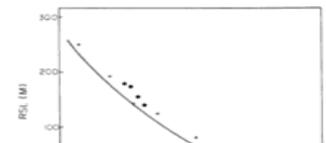


Norvège

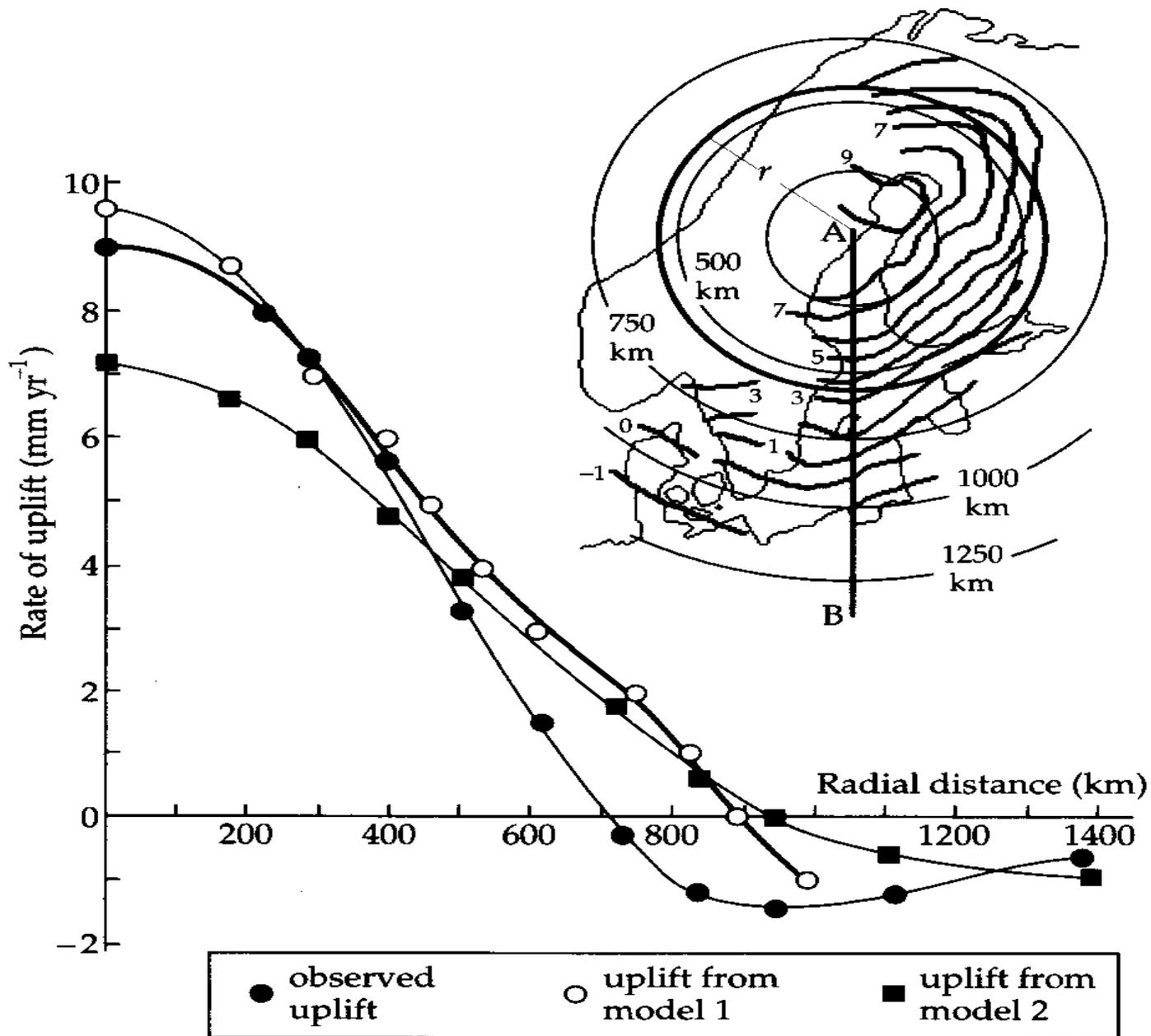
Canada



FIGURE 4.1 (a) This photograph shows a flight of raised beaches that are located in the Richmond Gulf on the southeast shore of Hudson Bay near the center of postglacial rebound. (b) The relative sea-level (RSL) curve from the Richmond Gulf beaches shown in (a). The age of individual horizons is determined by ^{14}C dating of relict beach material.



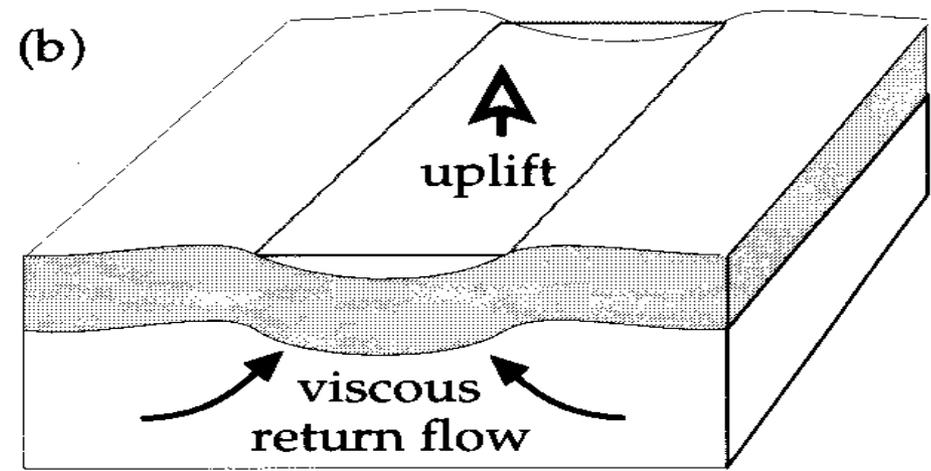
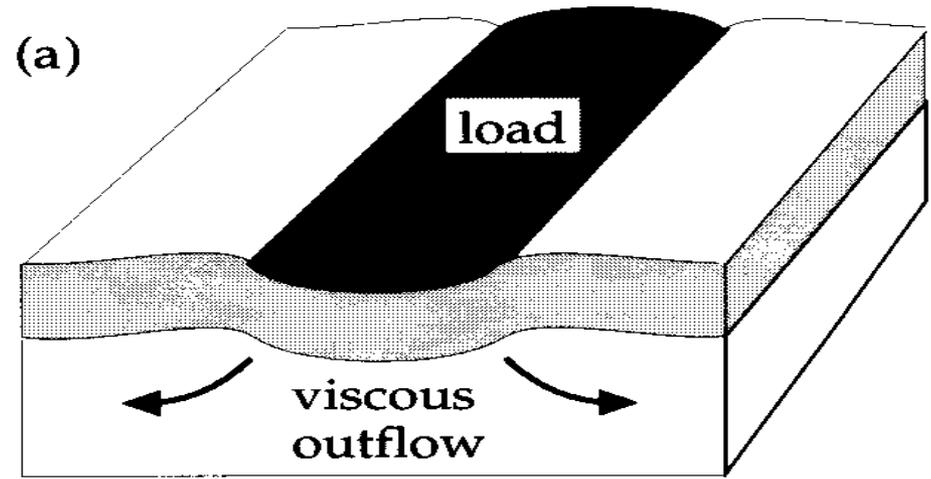




Canada, Scandinavie

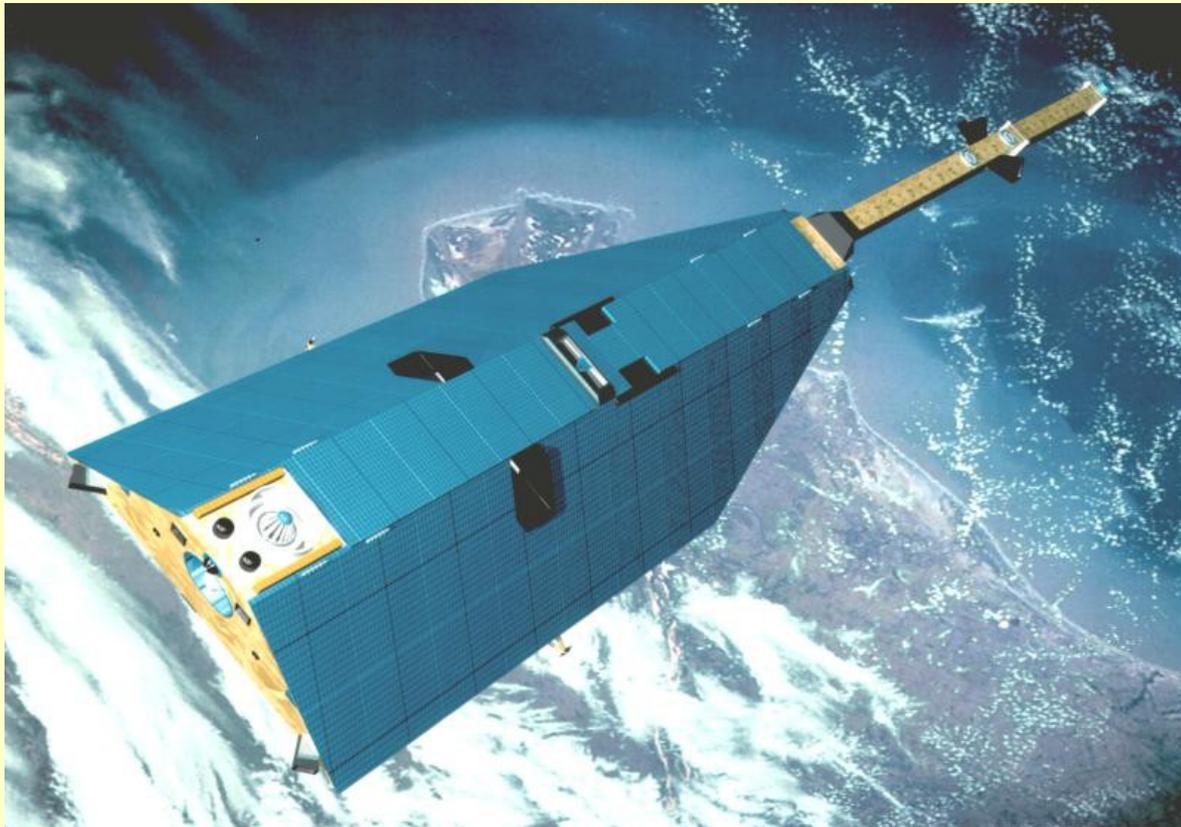
Canada :

$dg = 50 \text{ mGal} \rightarrow dh = ? \text{ m}$



Observations et résultats récents

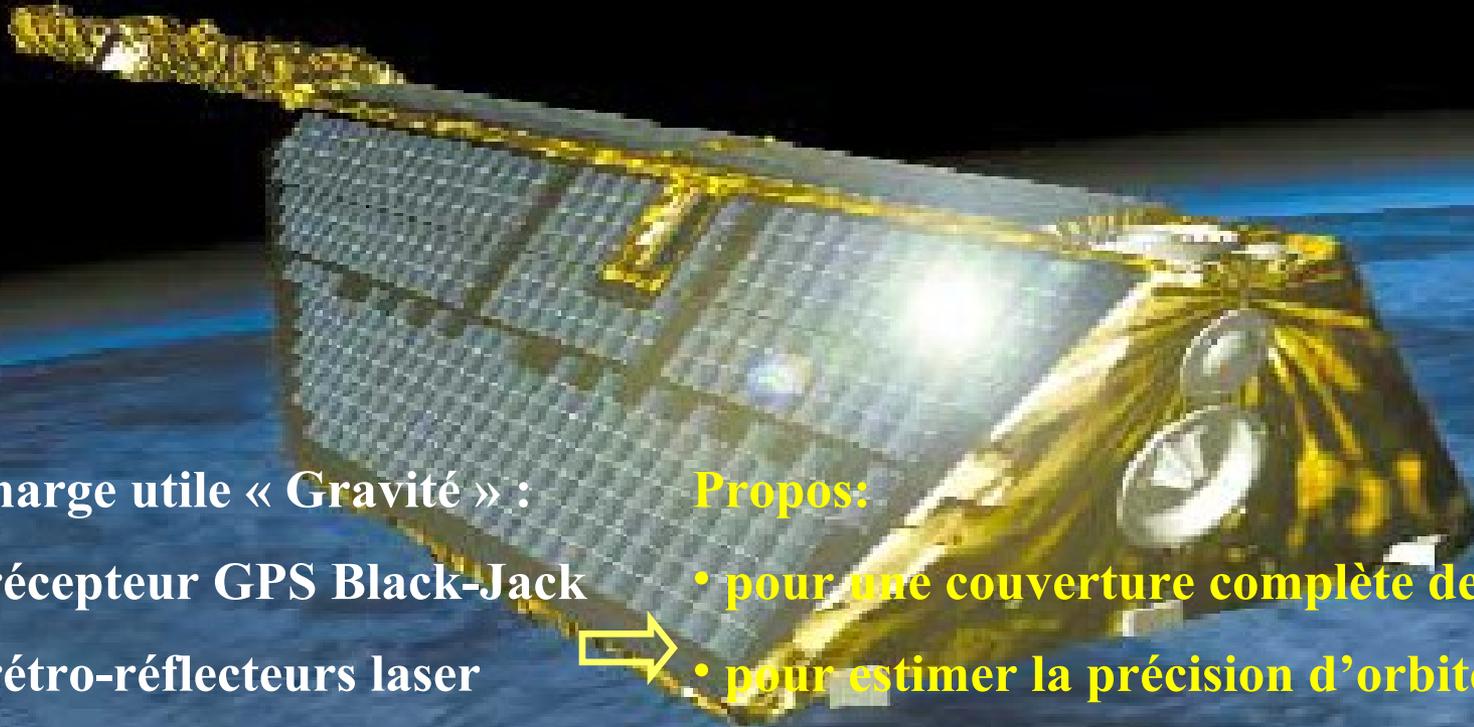
S'affranchir des forces de surface,
mesurer des gradients et des variations temporelles



CHAMP

(Catastrophes and Hazards Monitoring and Prediction)

CHALLENGING Mini-satellite Payload



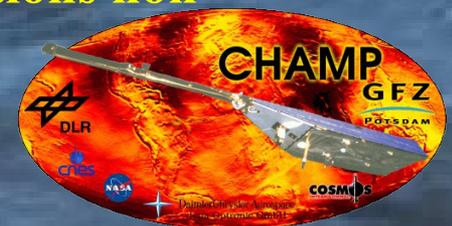
2000

Charge utile « Gravité » :

- récepteur GPS Black-Jack
- rétro-réflecteurs laser
- accéléromètre STAR

Propos:

- pour une couverture complète de l'orbite
- pour estimer la précision d'orbite
- pour mesurer les accélérations non-gravitationnelles



GRACE

Gravity Recovery and Climate Experiment

2002



Charge utile :

- récepteur GPS Black-Jack
- rétro-réfecteurs laser
- système inter-satellite dual
- accéléromètres Super-STAR

Propos:

- pour une couverture complète de l'orbite
- pour estimer la précision d'orbite
- pour mesurer les perturbations gravitationnelles relatives (au micron près)
- pour mesurer les accélérations non-gravitationnelles



University of Texas at Austin
Center for Space Research



GOCE

Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

Lancé en mars 2009



Charge utile :

- récepteur GPS (GRAS, ESA)
- rétro-réflecteurs laser
- gradiomètre (6 accelerometres)

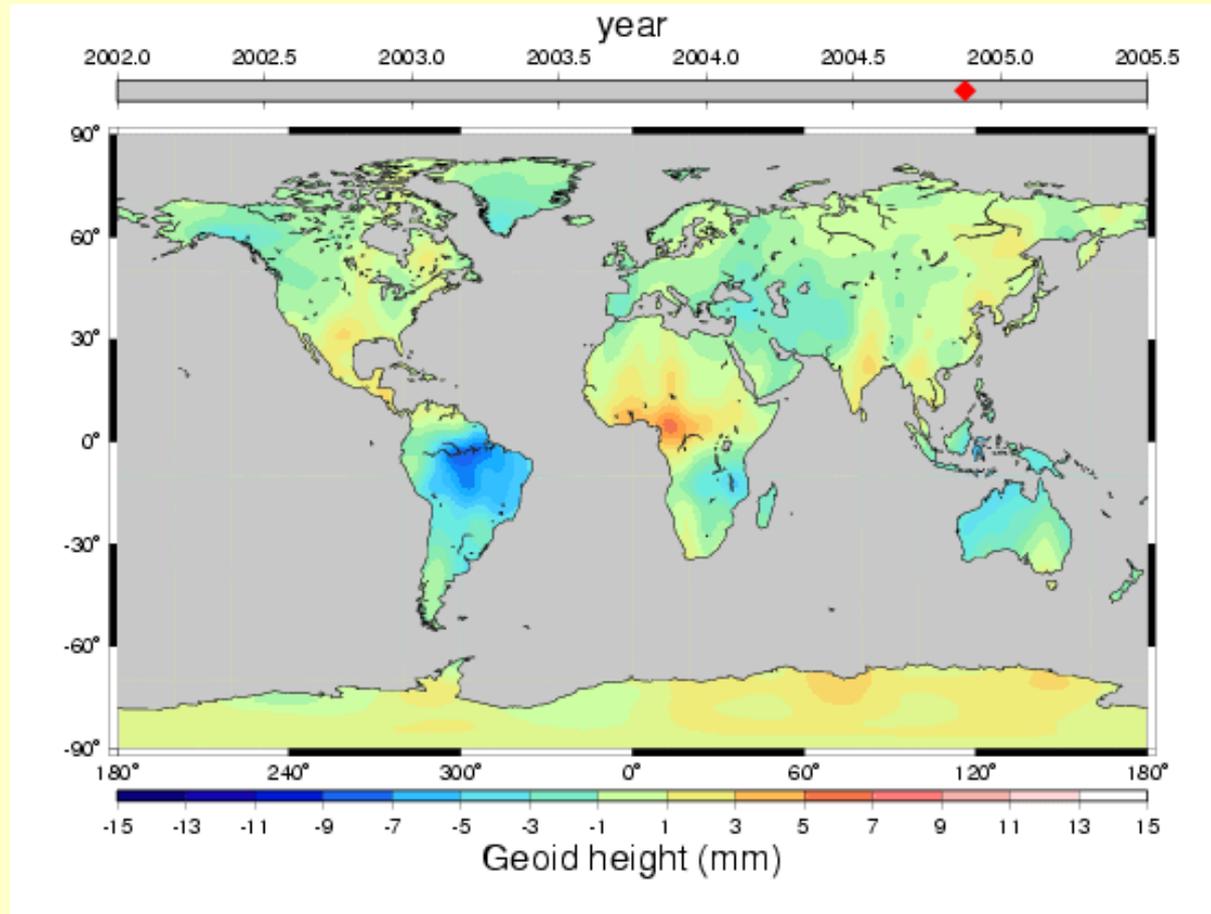
Propos:

- pour une couverture complète de l'orbite
- pour estimer la précision d'orbite
- pour mesurer *in situ* les accélérations gravitationnelles différentielles + les accélérations non-gravitationnelles

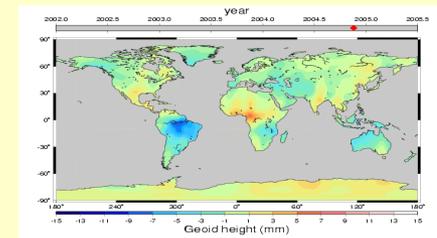
Variations temporelles

3 years of geoid variations from GRACE and LAGEOS data at 10-day intervals over the period from July 29th, 2002 to September 30th, 2005

R Biancale, J-M Lemoine, G Balmino, S Bruinsma, F Perosanz, J-C Marty (CNES/GRGS, Toulouse, France), S Loyer (Noveltis, Toulouse, France), P Gégout (EOST, Strasbourg, France) <http://bgi.cnes.fr:8110/geoid-variations/README.html>



95 images (86 images + 9 images corresponding to gaps in the temporal series) of the geoid differences (in millimeters) between monthly solutions and EIGEN_GL04S over the continents.



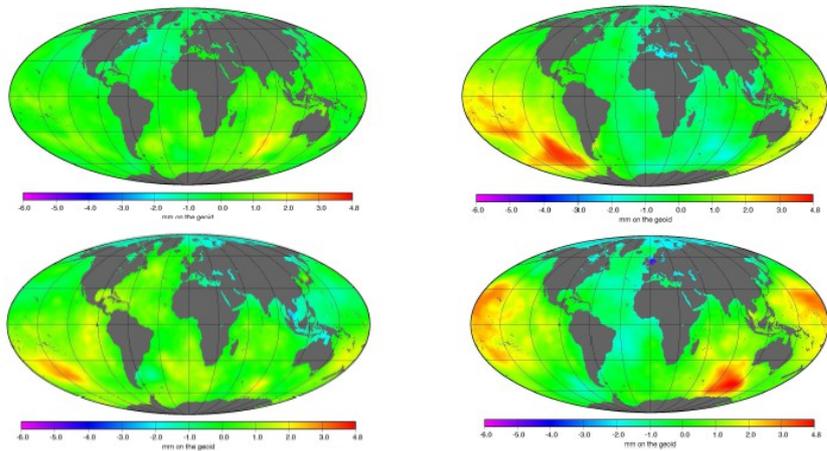


FIG. 4.3 – Effet sur le géoïde de la circulation océanique en mm. Haut : mars 2002 (à gauche) et juin 2002 (à droite). Bas : septembre 2002 (à gauche) et décembre 2002 (à droite).

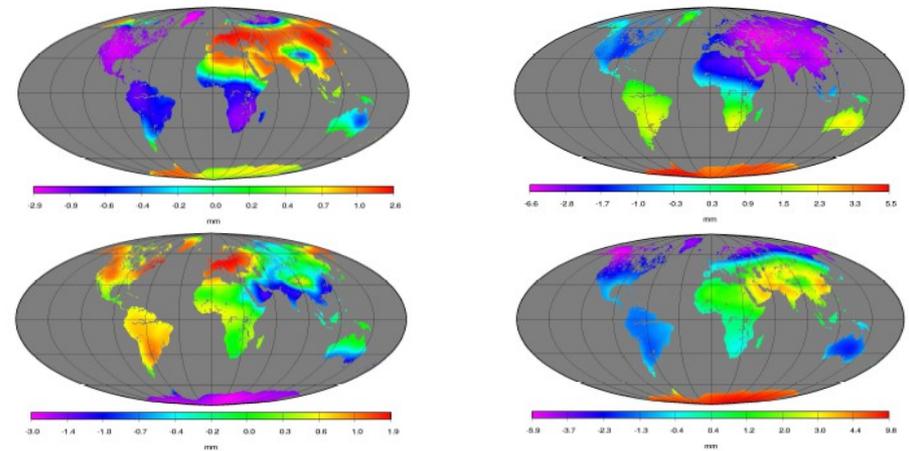


FIG. 4.4 – Effet sur le géoïde de la pression atmosphérique au dessus des continents en mm. Haut : mars 2003 (à gauche) et juin 2003 (à droite). Bas : septembre 2003 (à gauche) et décembre 2003 (à droite).

Modélisation de l'influence de différents phénomènes sur le géoïde (Panet, 2005) :

- Circulation océanique (<5 mm)
- Enneigement (<8 mm)
- Pression atmosphérique (<5 mm)
- Humidité du sol (<6 mm)

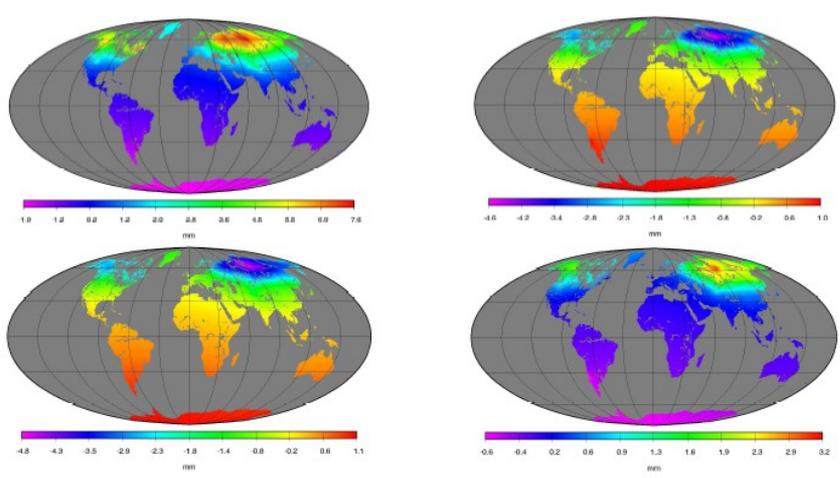


FIG. 4.5 – Effet sur le géoïde de l'enneigement hors calottes polaires en mm. Haut : mars 2003 (à gauche) et juin 2003 (à droite). Bas : septembre 2003 (à gauche) et décembre 2003 (à droite).

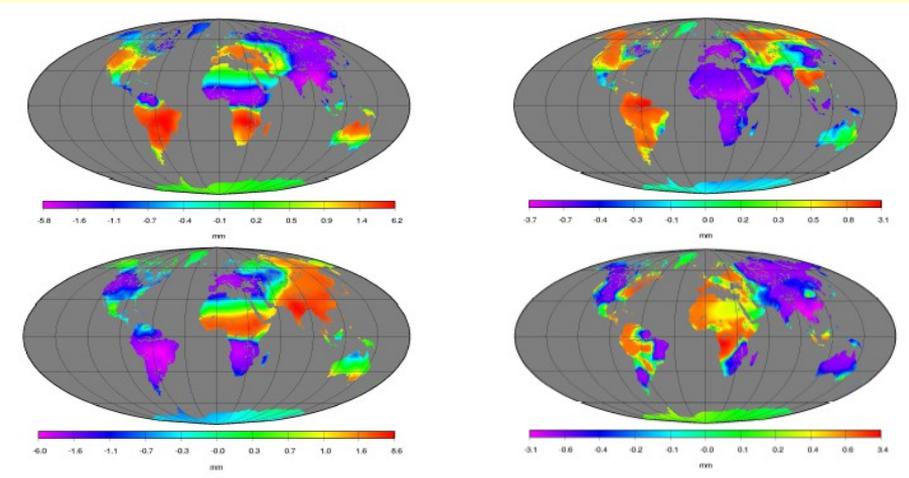
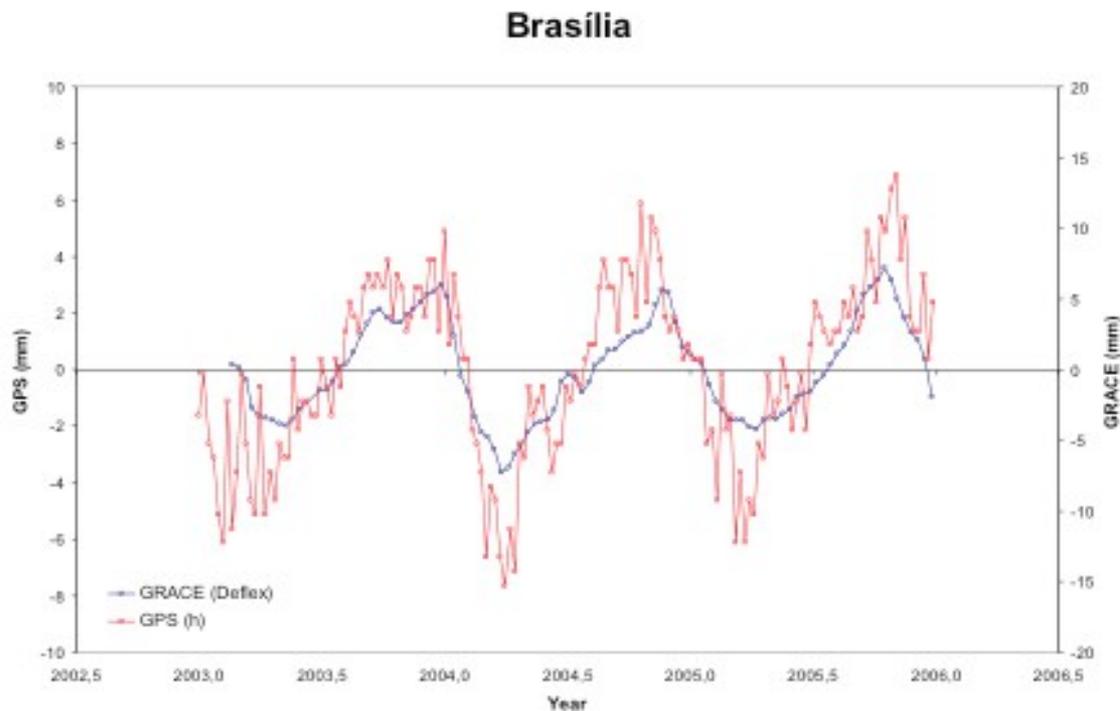
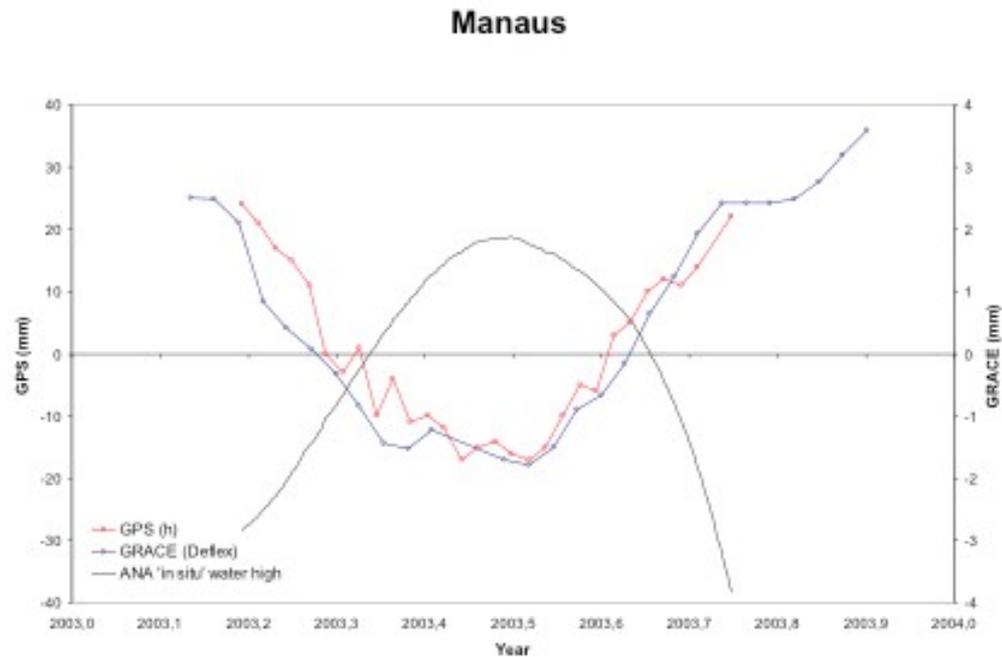


FIG. 4.6 – Effet sur le géoïde de l'humidité du sol en mm. Haut : mars 2003 (à gauche) et juin 2003 (à droite). Bas : septembre 2003 (à gauche) et décembre 2003 (à droite).

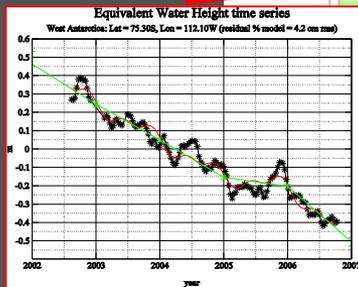
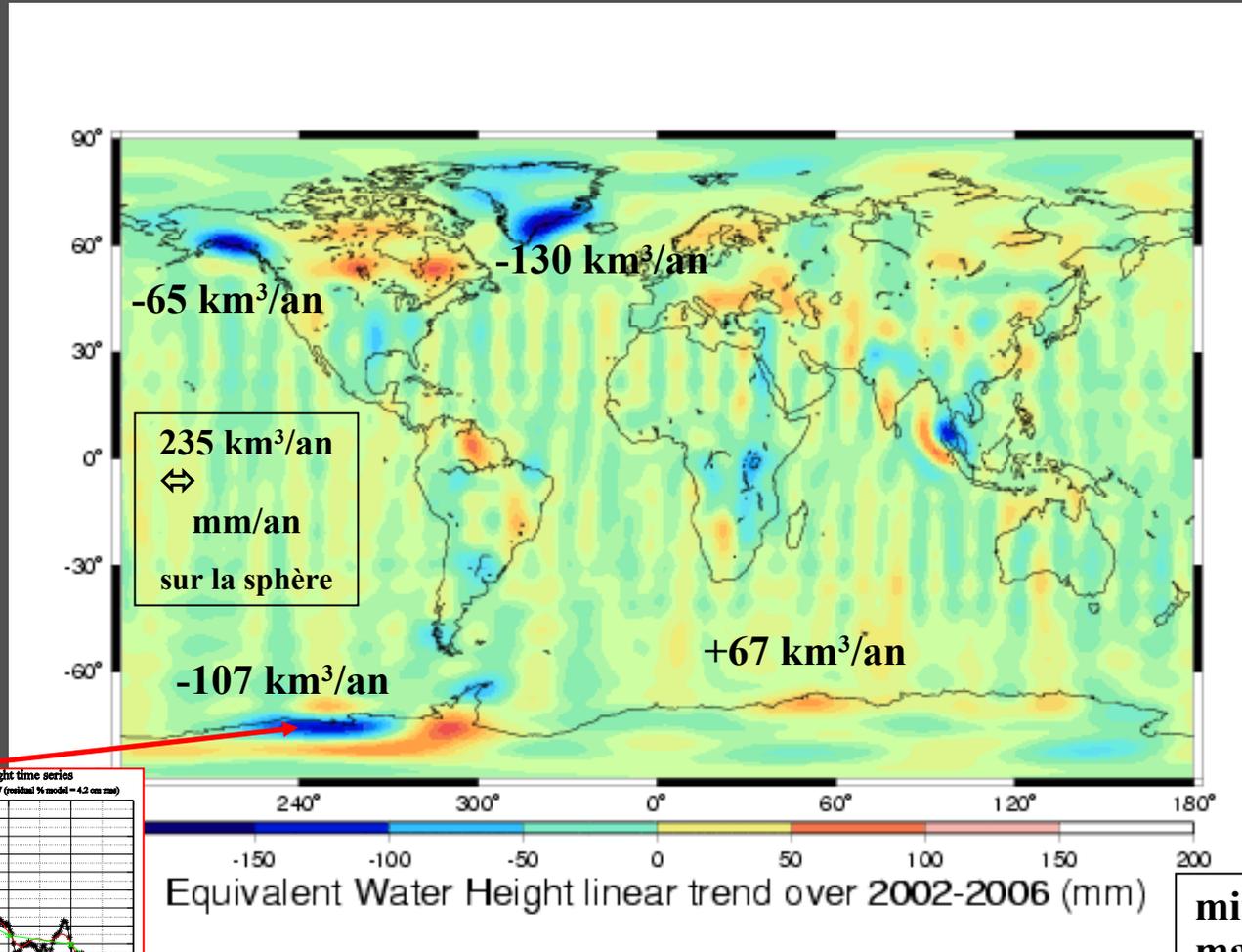
Charge hydrologique: déformations à Manaus (en 2003) et Brasilia (sur 3 ans) comparées au signal GRACE



Série historique de la déformation de la croûte à partir de **GRACE (en bleu)** et **GPS (en rouge)**. Les données en noir représentent le niveau d'eau *in-situ*.

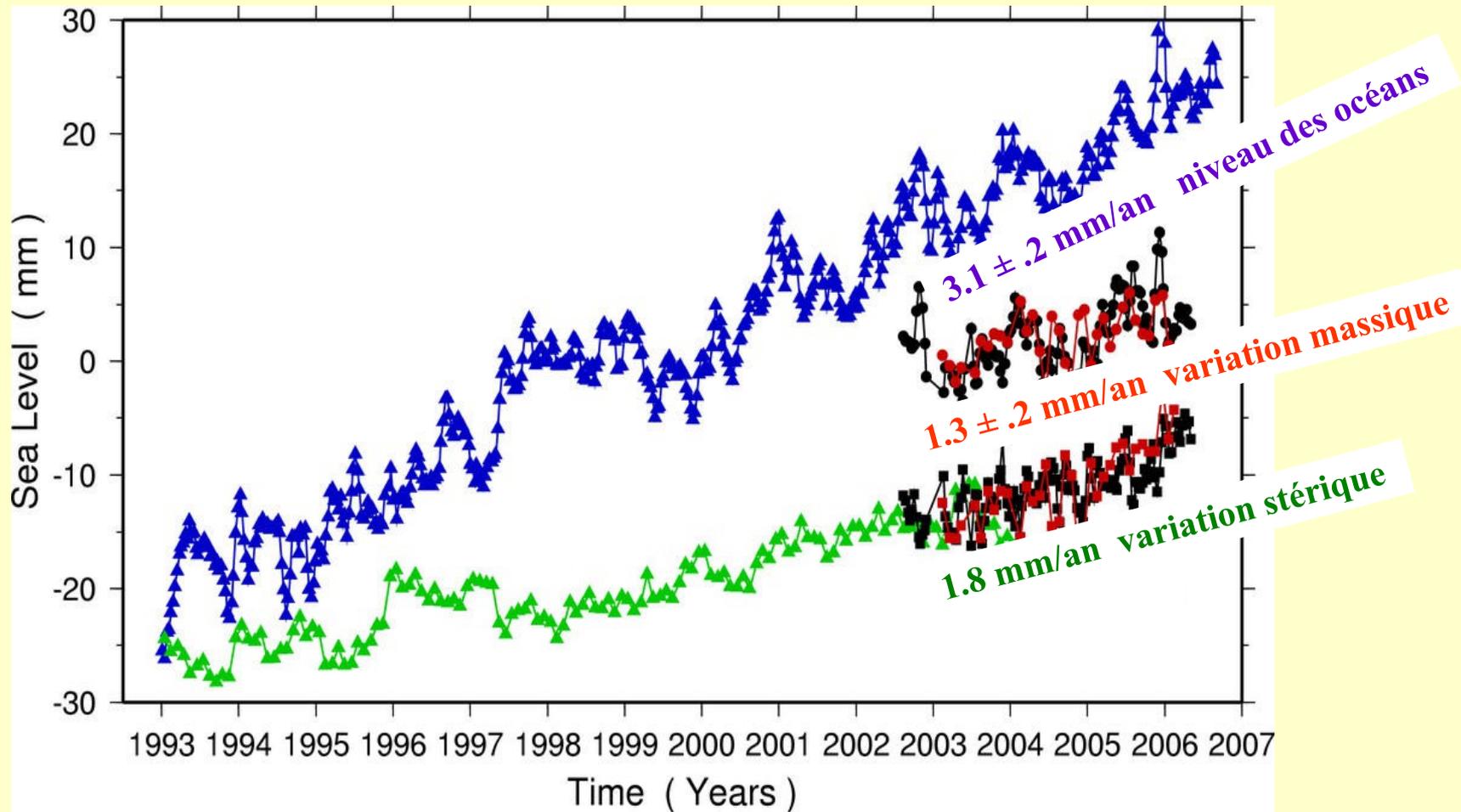
Tendances linéaires sur 2002-2006

en hauteur d'eau équivalente (m/an)



minimum : -18 cm/an
maximum : +9 cm/an
rms global : 2 cm/an

Variations du niveau moyen des océans détectées par les missions GRACE et Jason



Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data, A. Lombard (LEGOS) & al., 2006

Baie d'Hudson (Paulson et al., 2007)

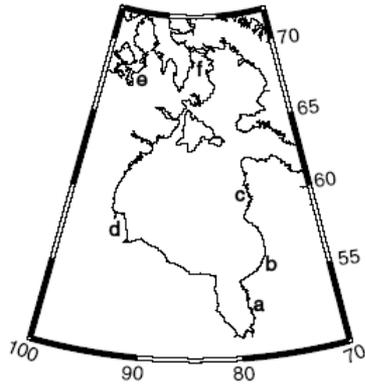
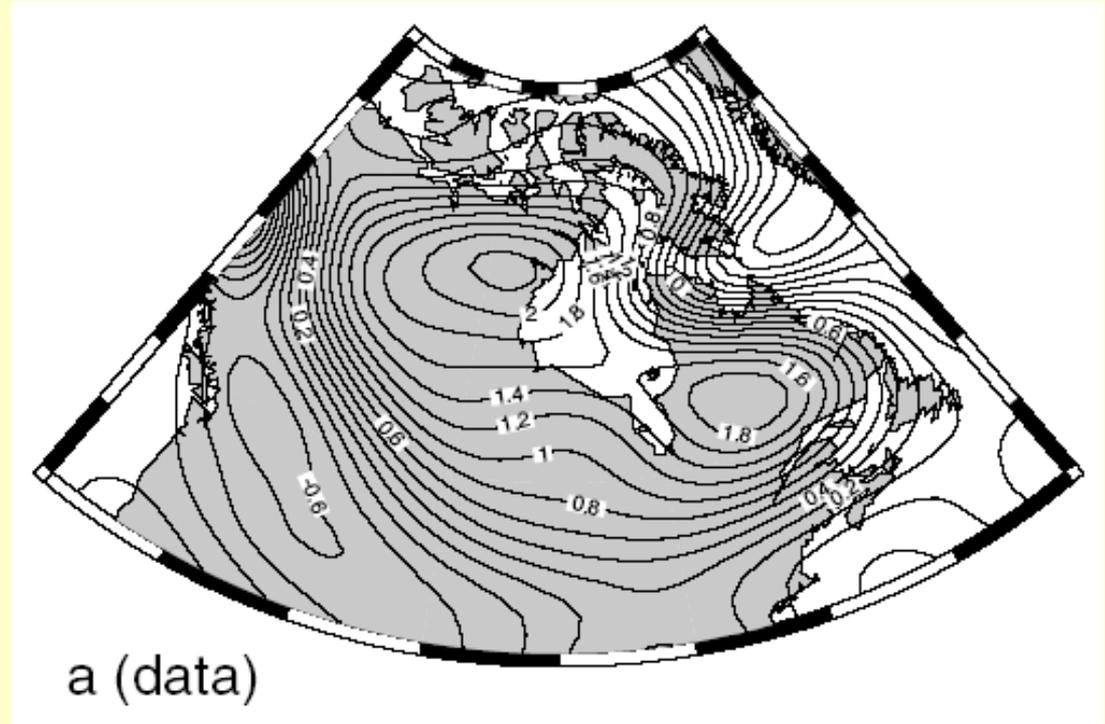
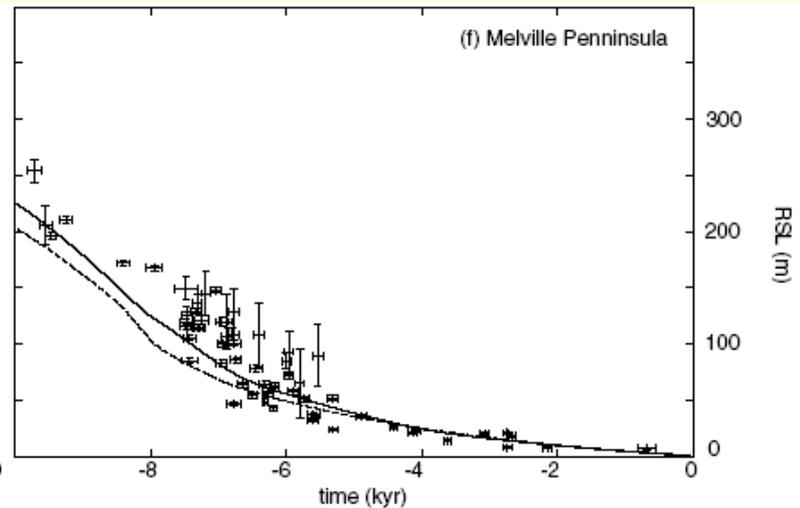
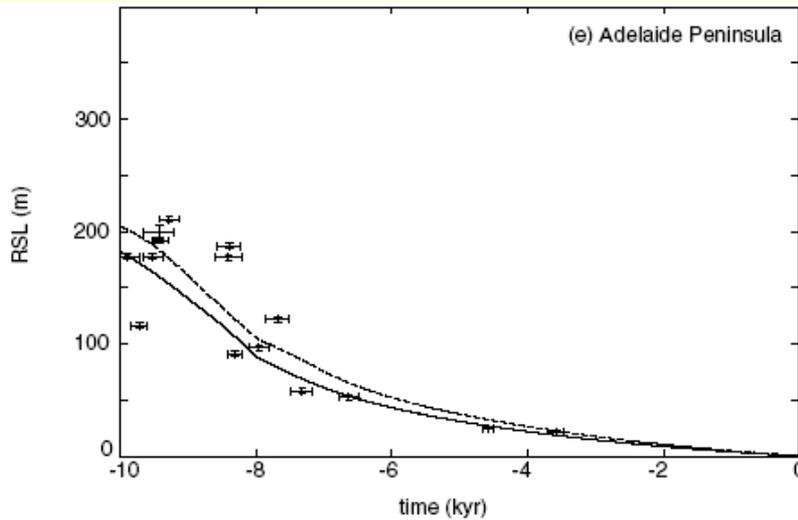


Figure 1. Sites of RSL measurements used in this study. Place names are: (a) James Bay, (b) Richmond Gulf, (c) Ottawa Island, (d) Churchill, Manitoba, (e) Boothia Peninsula and (f) Melville Peninsula.



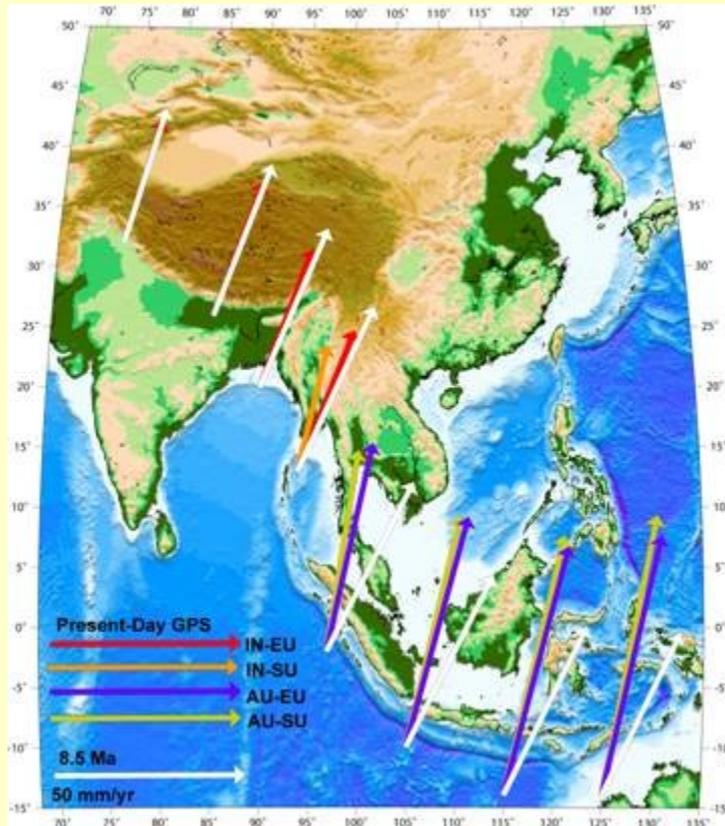
Variation de gravi en microGal/an ->

$$\begin{aligned}
 dg/dt &= 2ME \Gamma \Lambda dh/dt \\
 &= 2ME6,7e-11.3300. 100 \text{ m} / 8000 \text{ an} \\
 &= 1,71 \text{ E-10 Gal / an}
 \end{aligned}$$

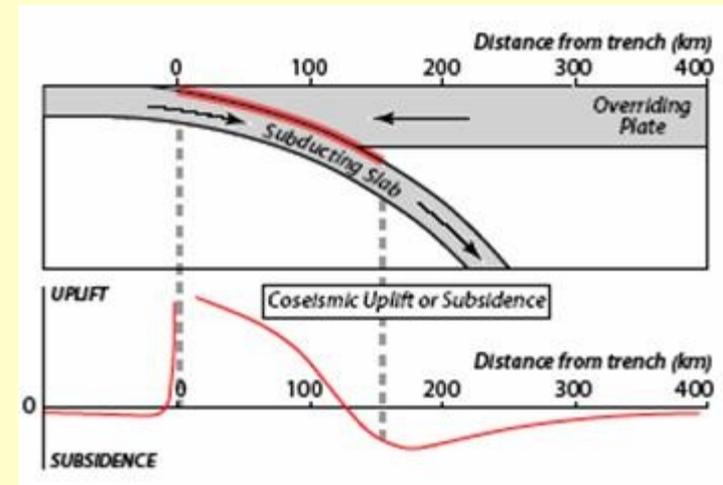


Séisme de Sumatra

26 décembre 2004, M=9,2



Vitesses GPS et $> 8\text{Ma}$
dans le référentiel Eurasie
(Royer, 2004).



Mouvement vertical cosismique,
modèle de dislocation élastique
(Meltzner, 2006).

Différences de géoïdes, année par année (Panet et al., 2007).

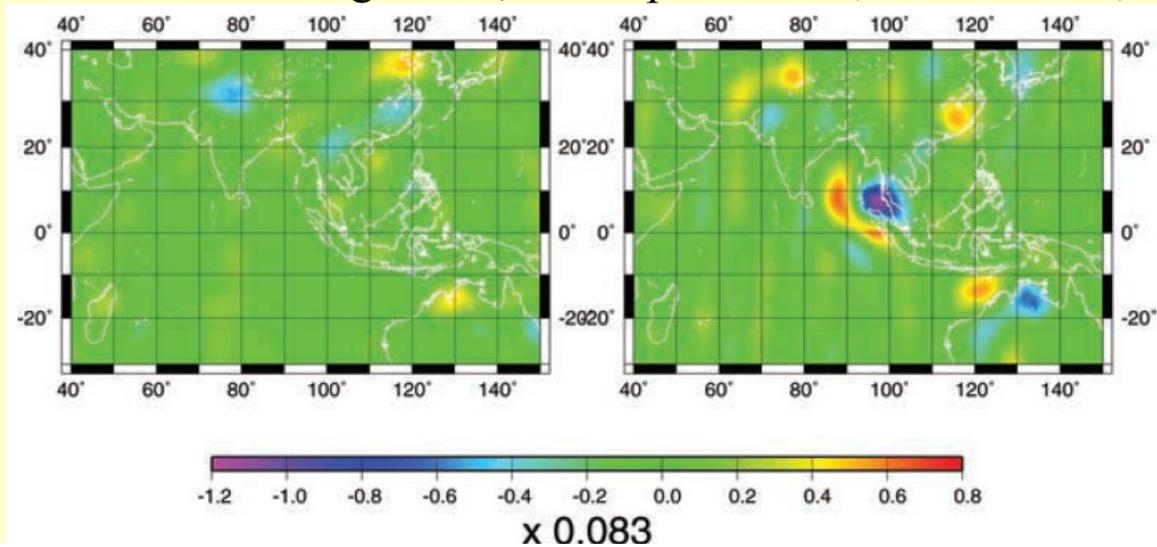


Figure 5. Continuous wavelet analysis coefficients at 500 km scale of the geoid difference (mm) between 2005 and 2004, stacked over 9 months (right-hand panel), and of the geoid difference between 2004 and 2003, stacked over 9 months (left-hand panel).

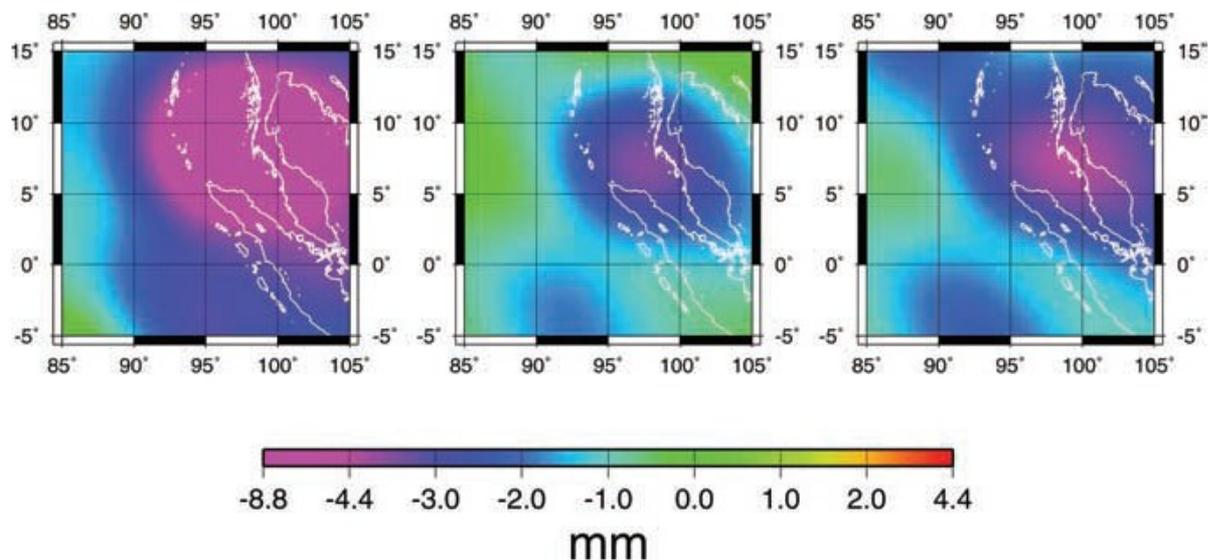
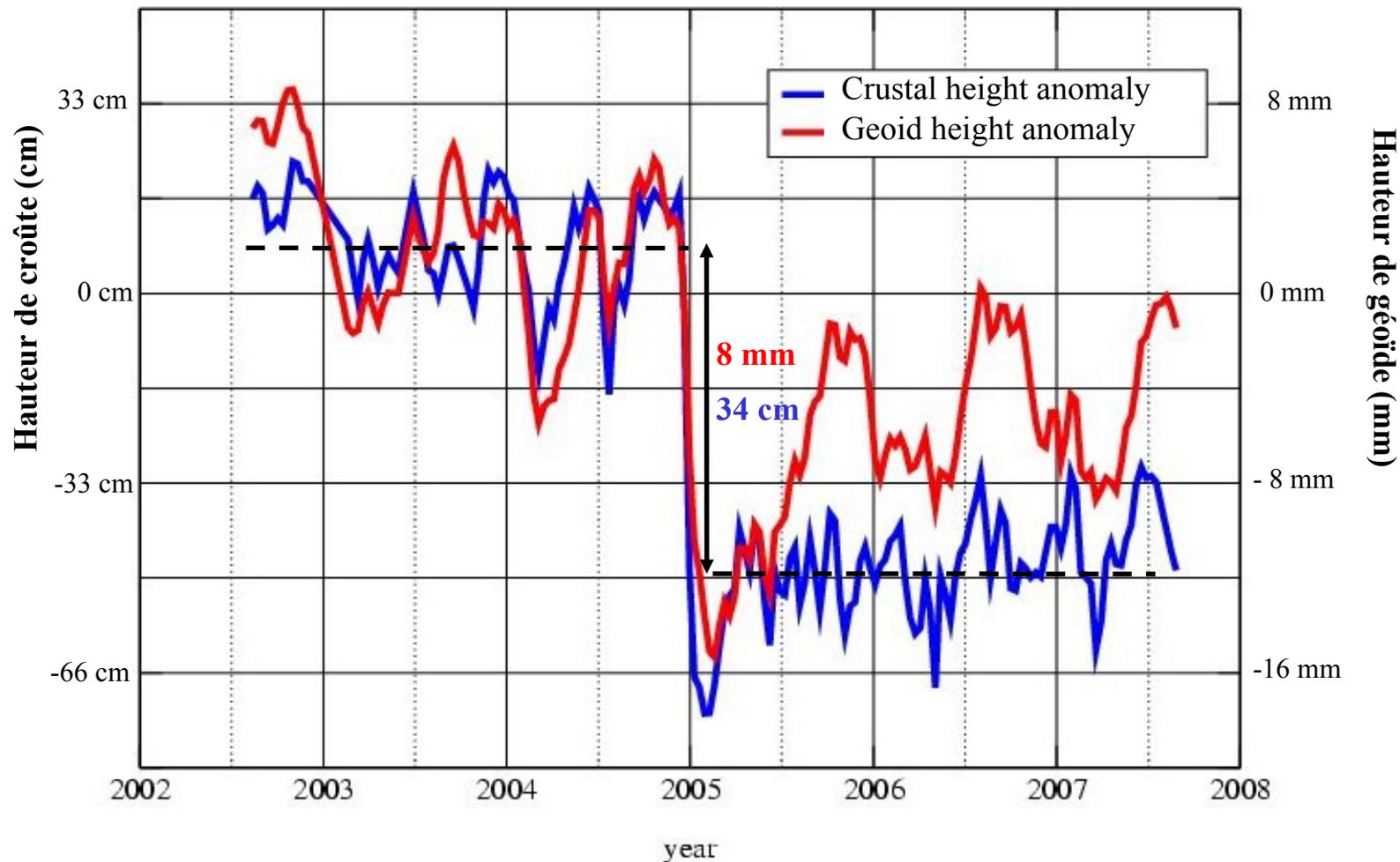


Figure 2. Maps of geoid anomalies in mm over the Sumatra area. Left-hand panel: map of difference between years 2005 and 2004, stacked over 1 month (i.e. 2005 January minus 2004 January). Centre panel: map of difference between years 2005 and 2004, stacked over 4 months. Right-hand panel: map of difference between years 2005 and 2004, stacked over 9 months.

Détection par GRACE de l'événement sismique de Sumatra du 26 décembre 2004

Andaman Sea: Lat = 07.50N, Lon = 096.50E



La forme de la Terre est
autant une affaire de
physique que de géométrie



**CHIMBORAZO 6310 m.s.n.m.
EL VOLCAN MAS ALTO DEL MUNDO
DESDE EL CENTRO DE LA TIERRA**

Referencia: Norma Internacional HAYFORD 1909
La distancia en Kilómetros al Centro de la Tierra entre
EL CHIMBORAZO y el EVEREST

CHIMBORAZO	6.384 Km.	687
EVEREST	6.382 Km.	467
Diferencia	2 Km.	220

**Chimborazo, carabela de nieve en la mitad del mundo, tu nivel
vértice es el punto más alto de la Tierra y más cercano al Sol**

Enrique Veloz C.

Posición respecto al Datum Horizontal WGS 84
Chimborazo: Lat. $1^{\circ} 38.1'$ - Long. $78 48.1 W$

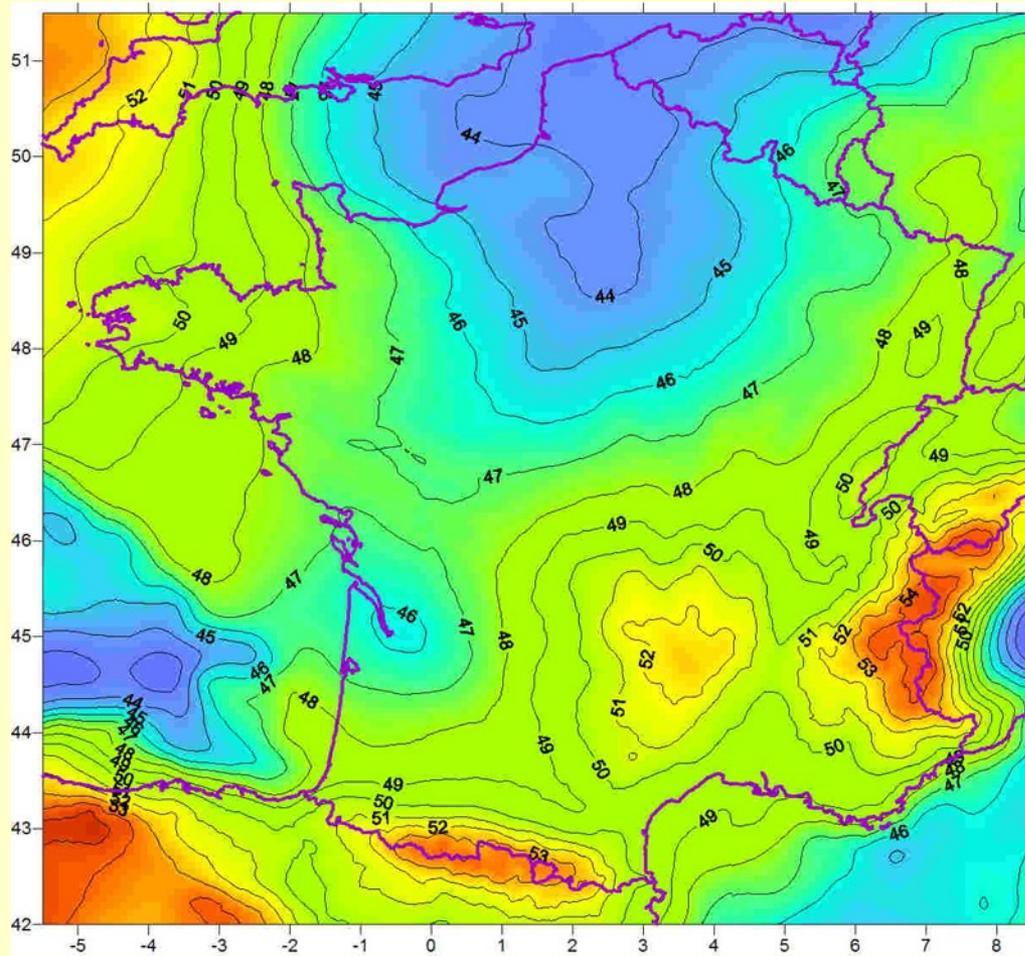
El 4 de Enero de 1880, la cumbre del Chimborazo 6310 metros
fue conquistada por primera vez por el inglés Edward Whymper
y los italianos Louis y Jean Antoine Carrell.

Instituto Geográfico Militar
ECUADOR

Institut Geographique National
FRANCE

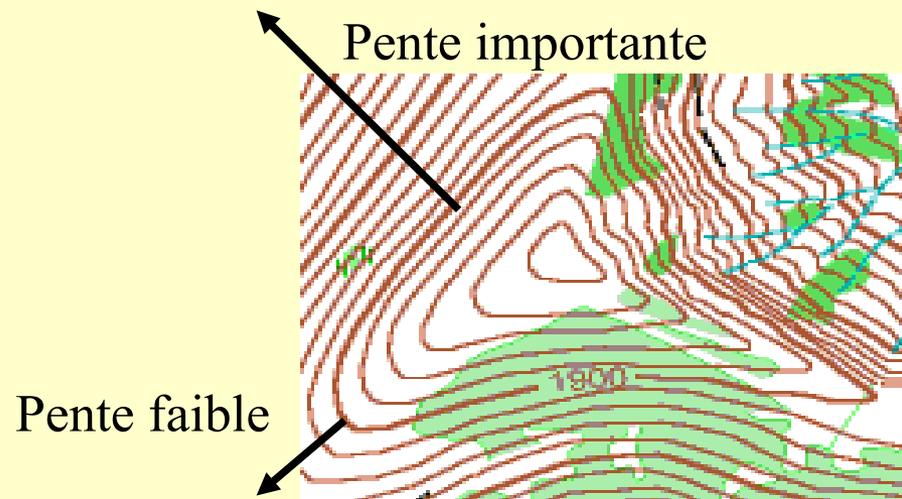
Bonus

Quasi-géoïde RAF09

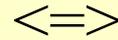


~~Dictionnaire de géologie
« *Géoïde* : Surface où la pesanteur
est constante et qui passe par le niveau moyen
des mers. »~~

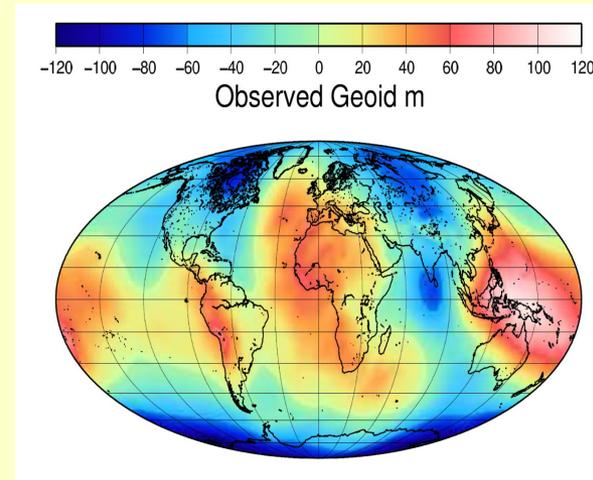
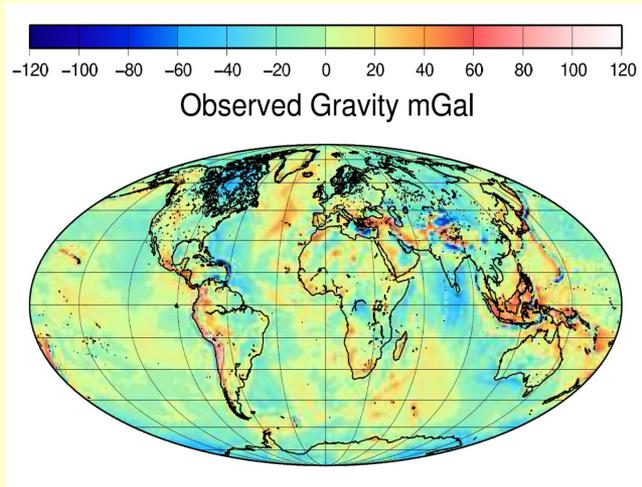
C'est comme pour les courbes de niveau :



Connaître $|g|$ sur toute
la surface de la Terre



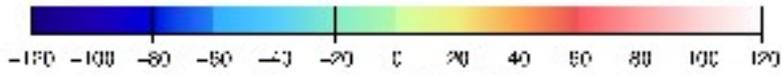
Connaître le géoïde sur toute
la surface de la Terre



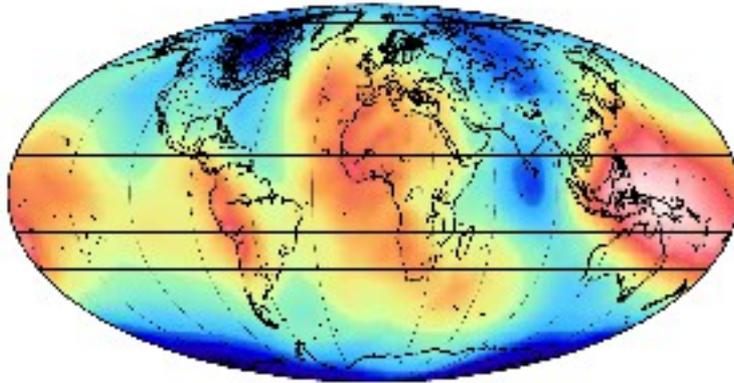
Connaissance de topo \Leftrightarrow connaissance des pentes.

Pour les physiciens c'est parce que le potentiel est harmonique à l'extérieur.

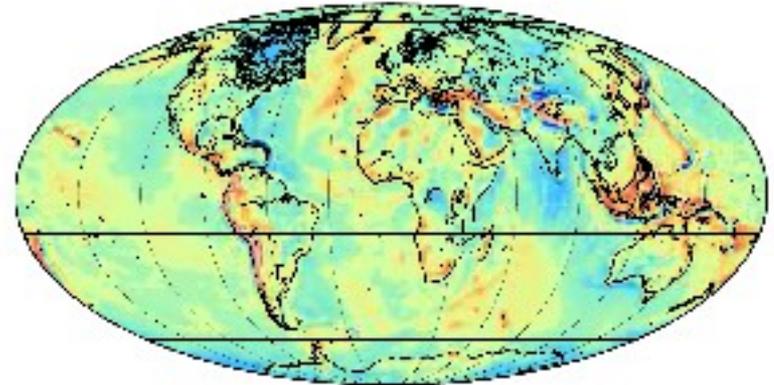
On peut aussi le comprendre en se rappelant que géoïde et pesanteur proviennent de la même distribution de masse (densité) :



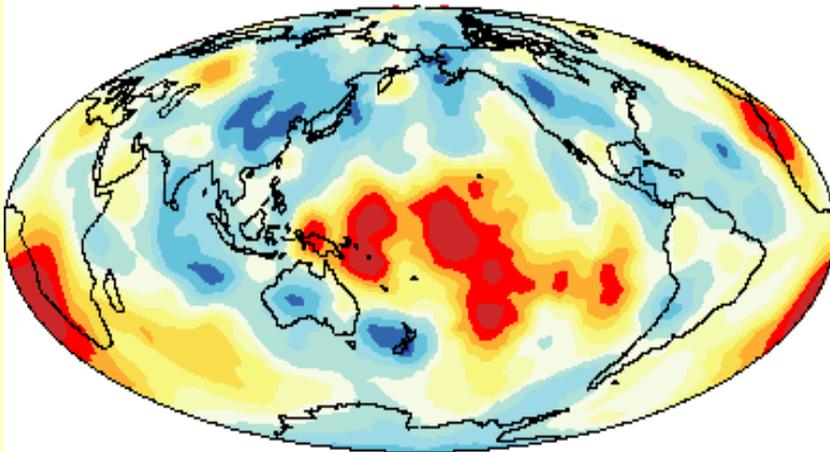
Observed Geoid m



Observed Gravity mGal

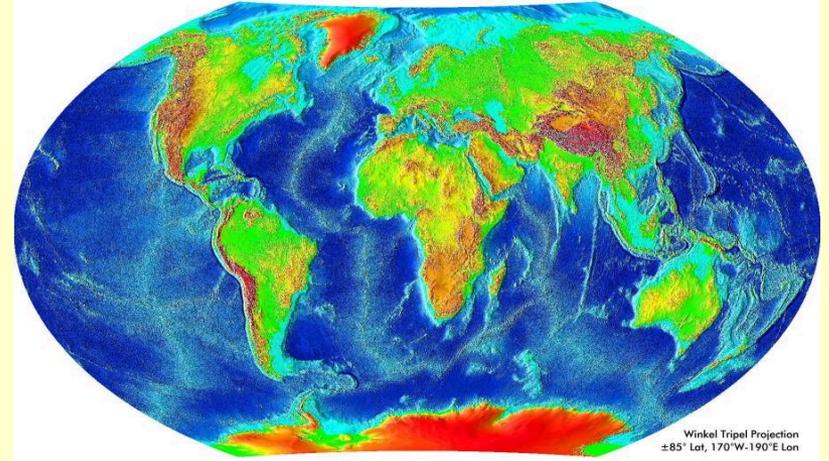


Shear velocity at the bottom of the mantle



GLOBE 30" topography (resampled to 5')

overlayed on
Smith & Sandwell "Measured and Estimated Bathymetry" resampled from 2' to 5'



Winkler Tripel Projection
±85° Lat, 170°W-190°E Lon

Notions fondamentales sur le champ de gravité, la pesanteur, le géoïde, la forme de la Terre
 Questions, difficultés fréquentes
 Résultats modernes

Le modèle de quasigéoïde QGF98

Données:

Données gravimétriques:
BGI terrestre + Morelli
+ Sandwell (converties)

Modèle mondial:
DSU91A

Modèle numérique de terrain:
résolution 140 * 140 m

Méthode de calcul:

Retrait restauration,
méthode du terrain résiduel,
intégrations classiques

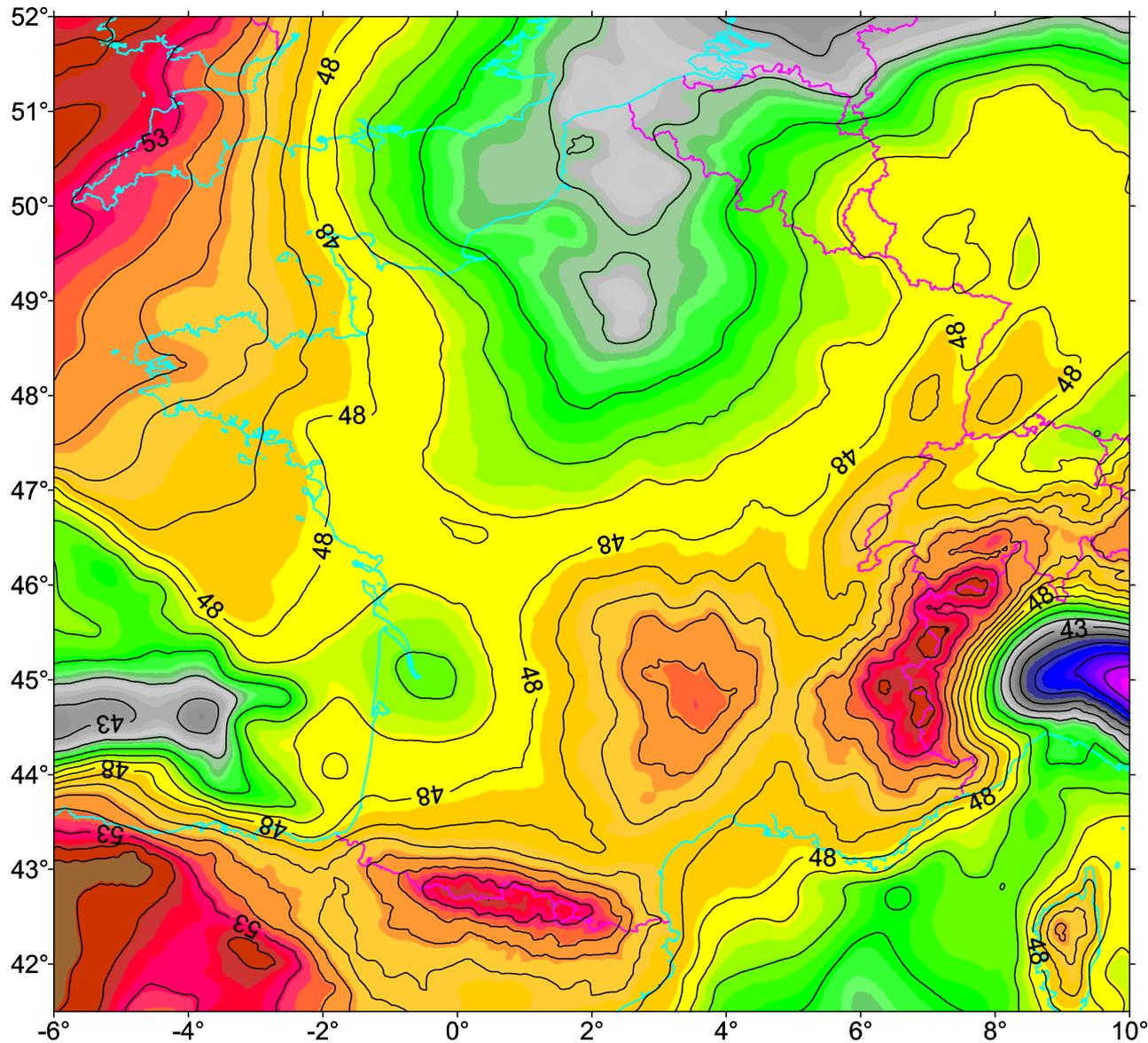
Rayon des corrections
de terrain: 110 km

Rayon d'intégration
de Stokes: 2°

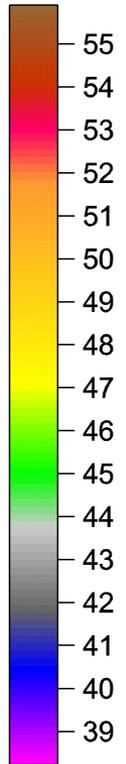
Logiciels:

Gravsoft
(Forsberg and Tscherning)

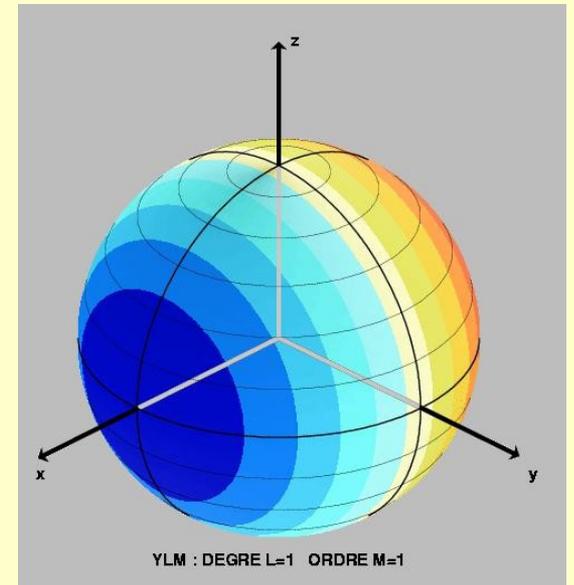
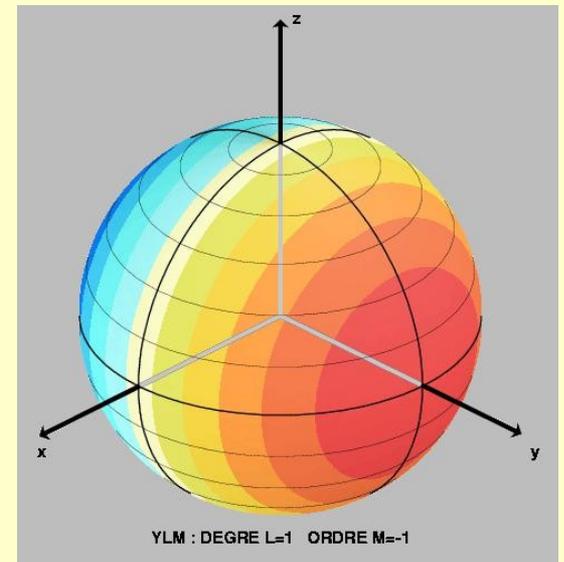
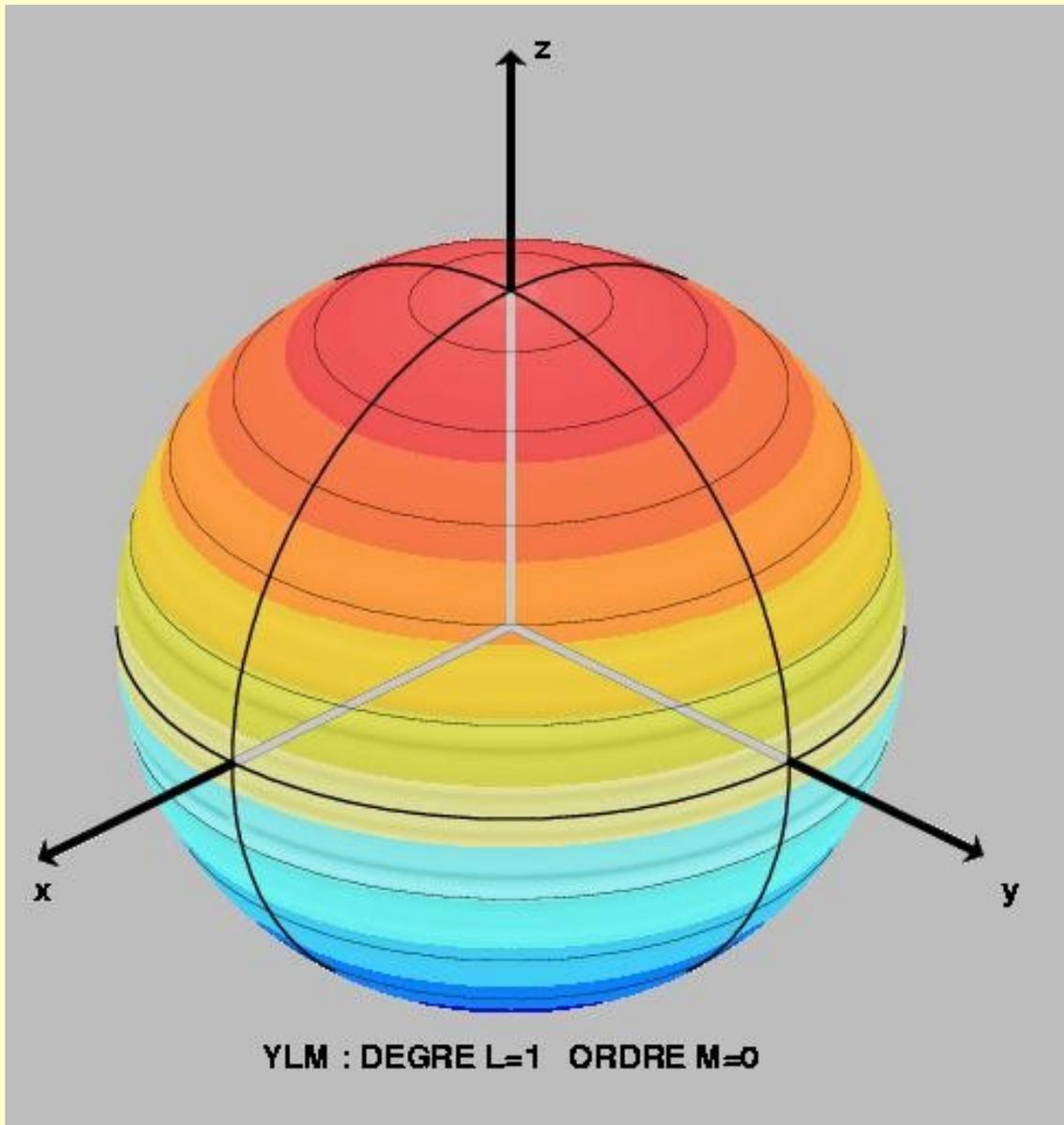
Logiciels de l'auteur

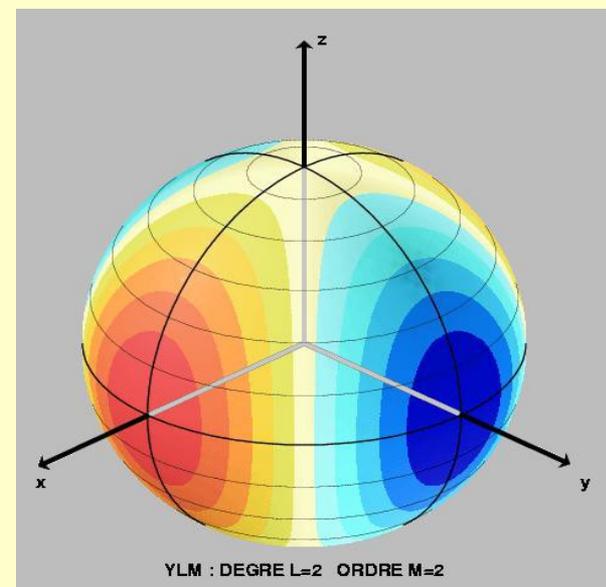
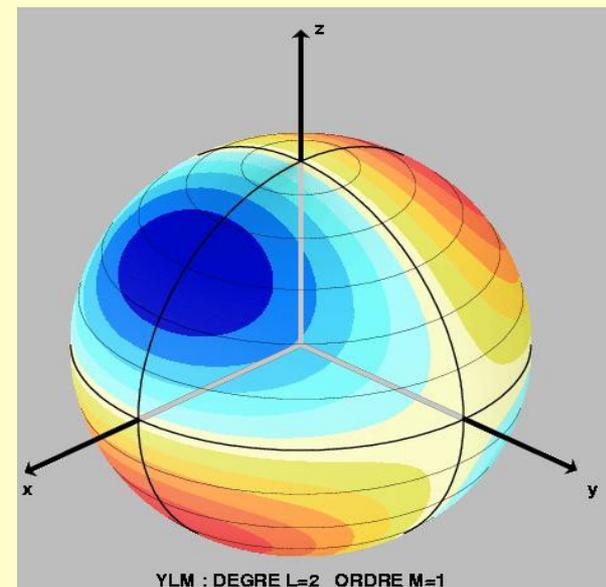
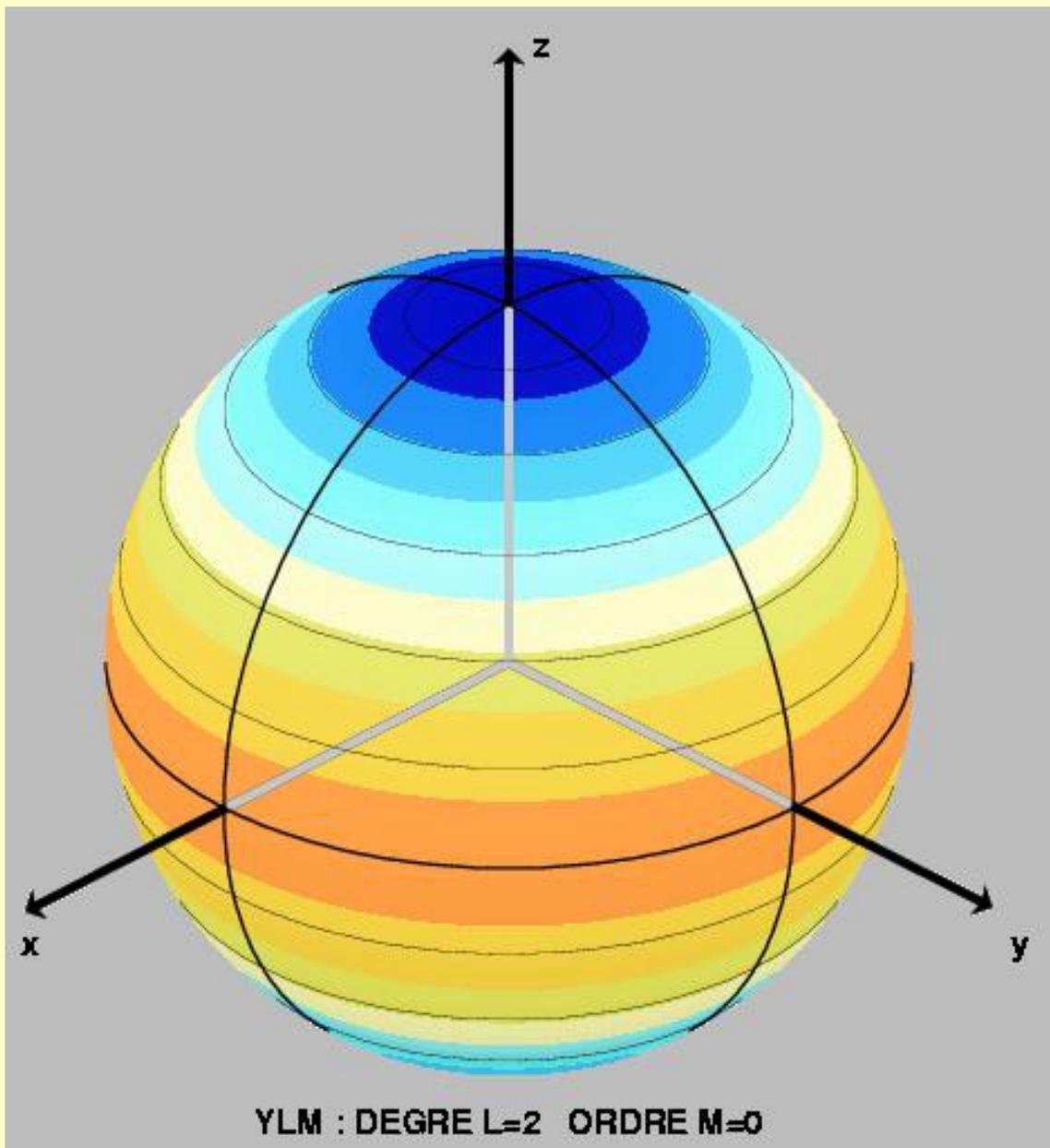


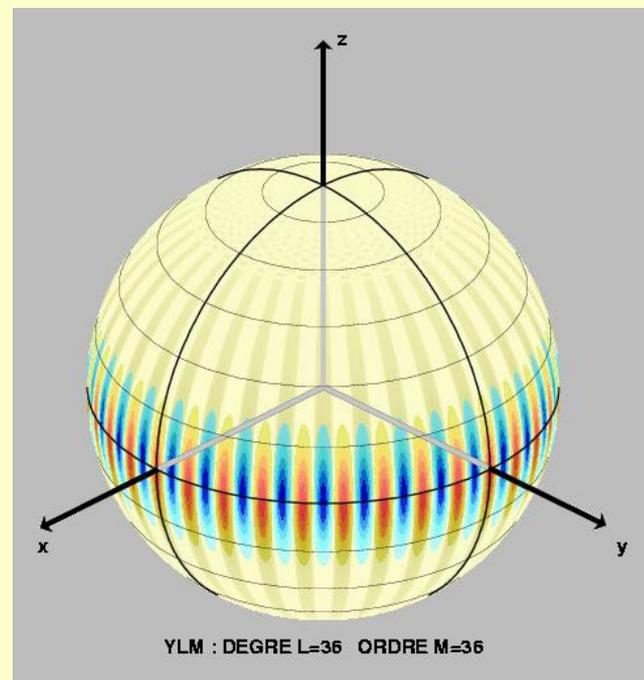
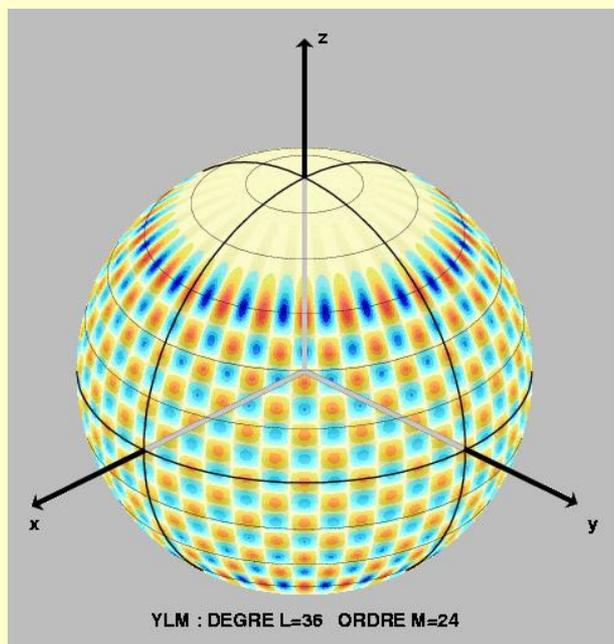
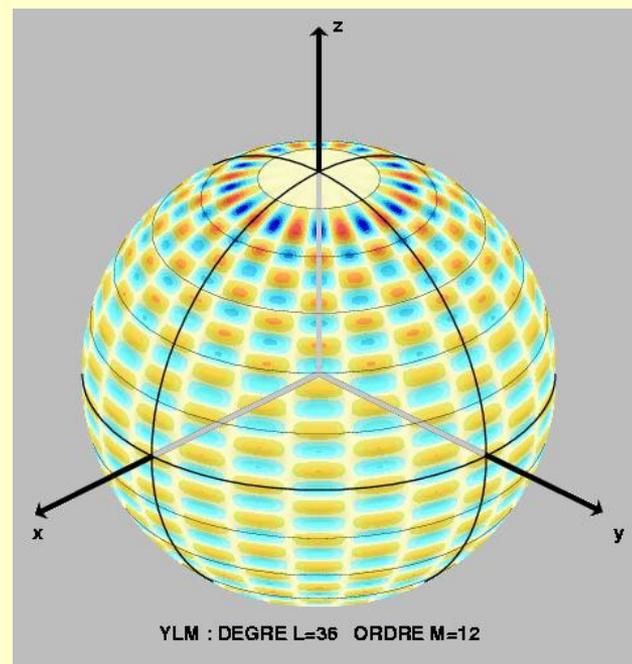
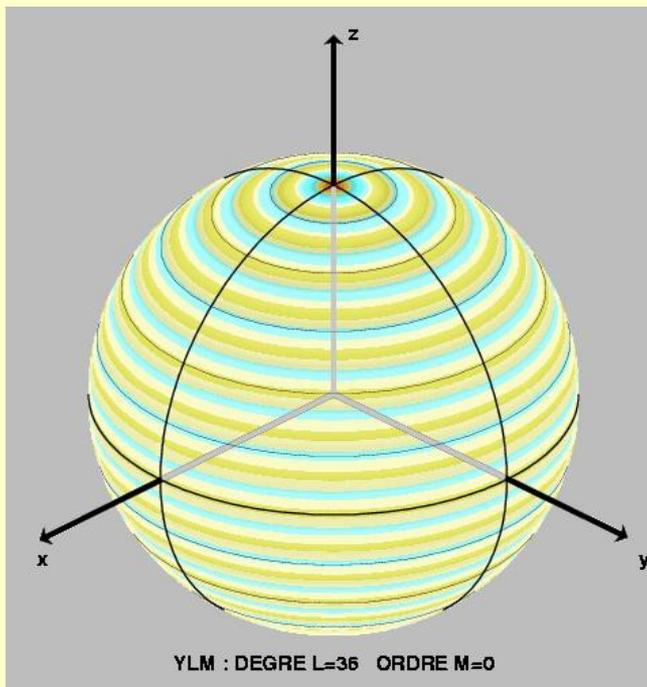
Mètres



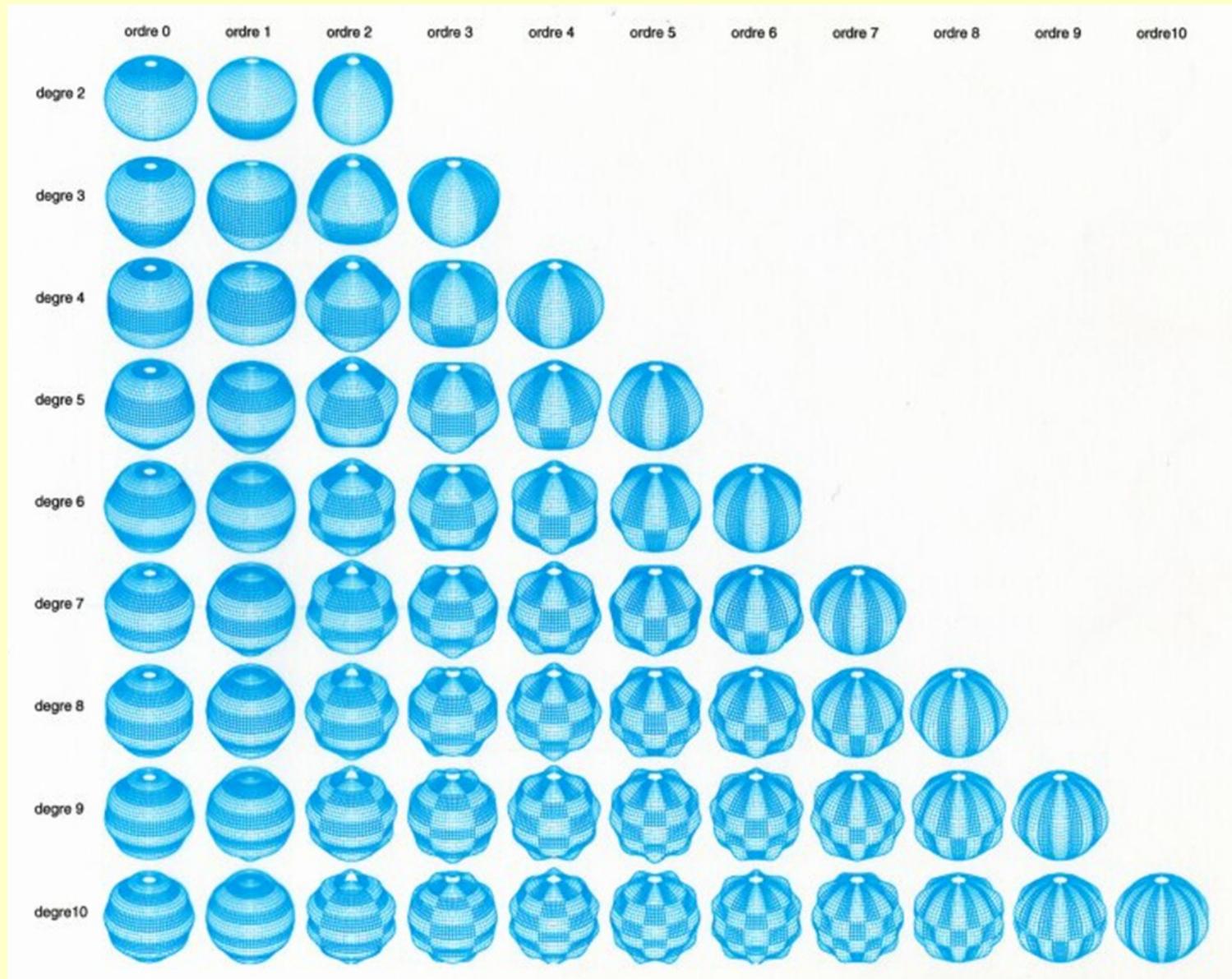
H. Duquenne



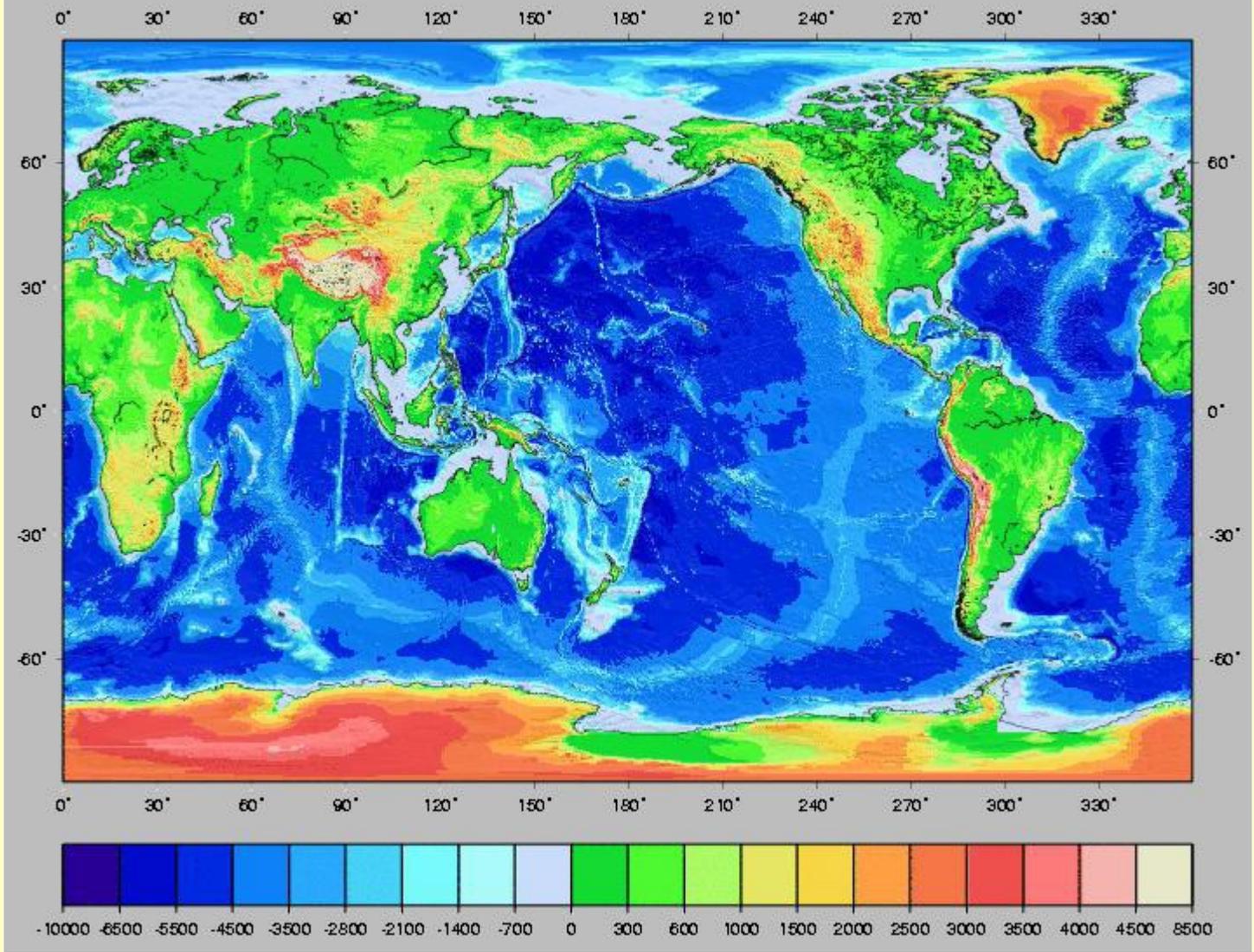




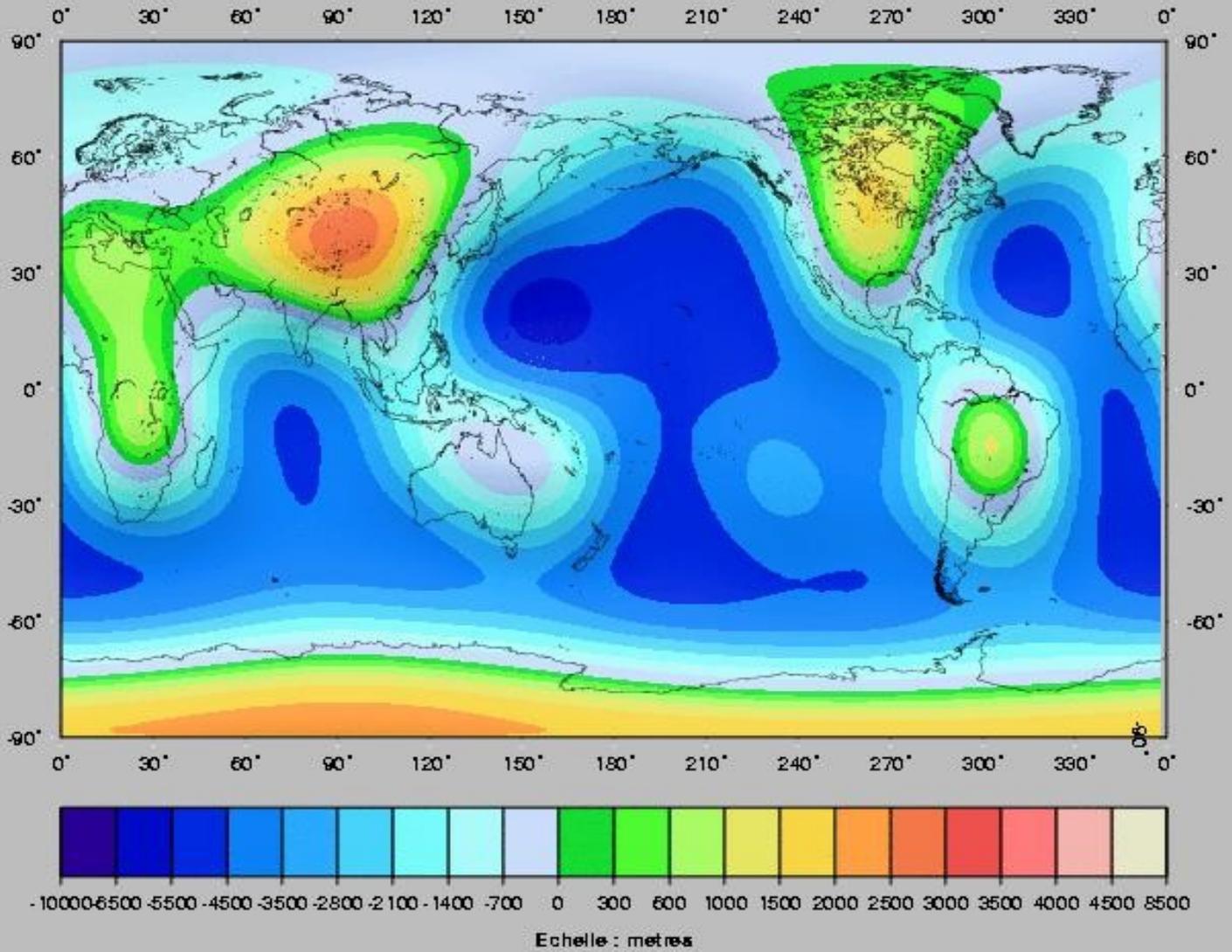
Harmoniques sphériques (cosinus)



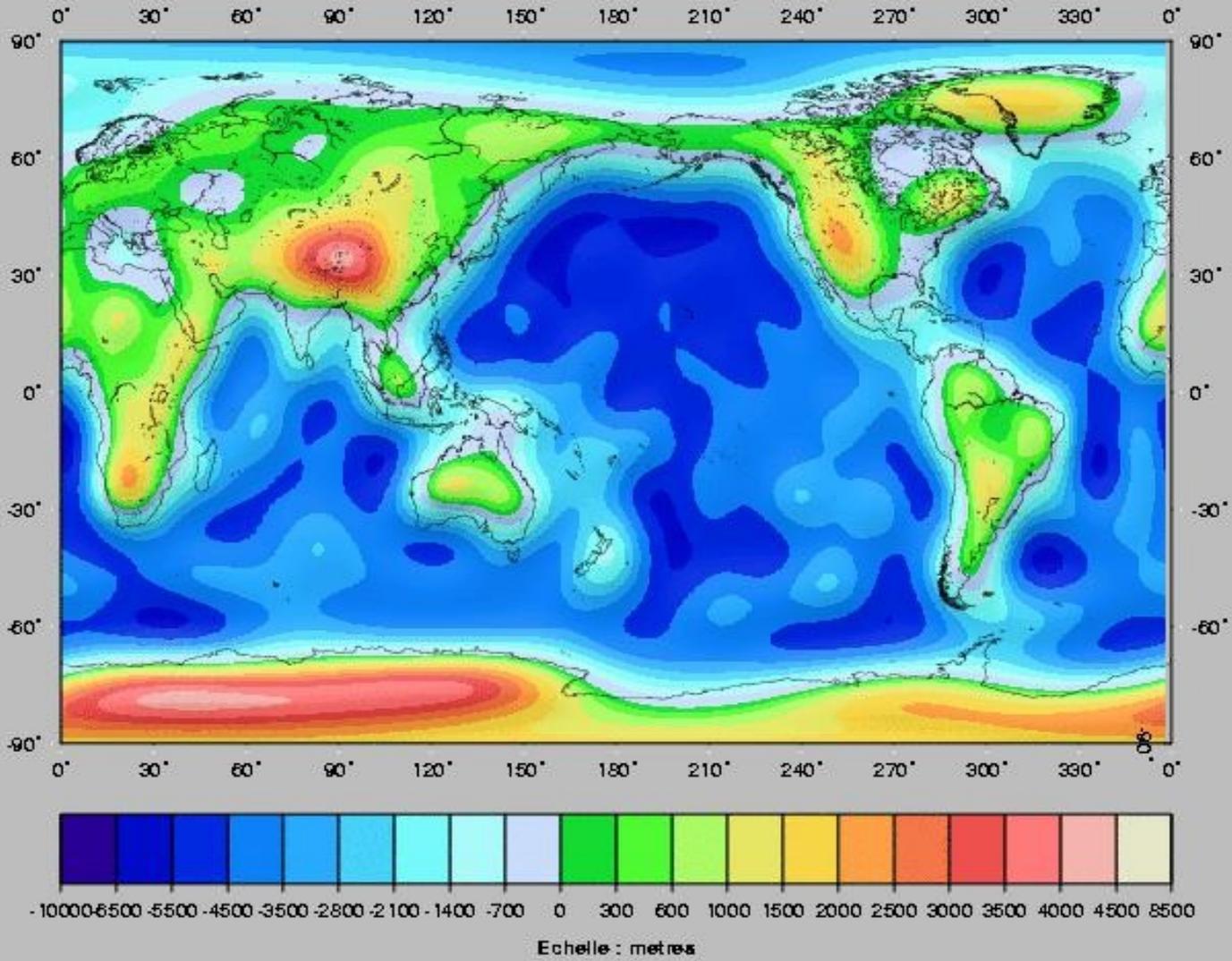
TOPOGRAPHIE TERRESTRE : grille 10'x10'



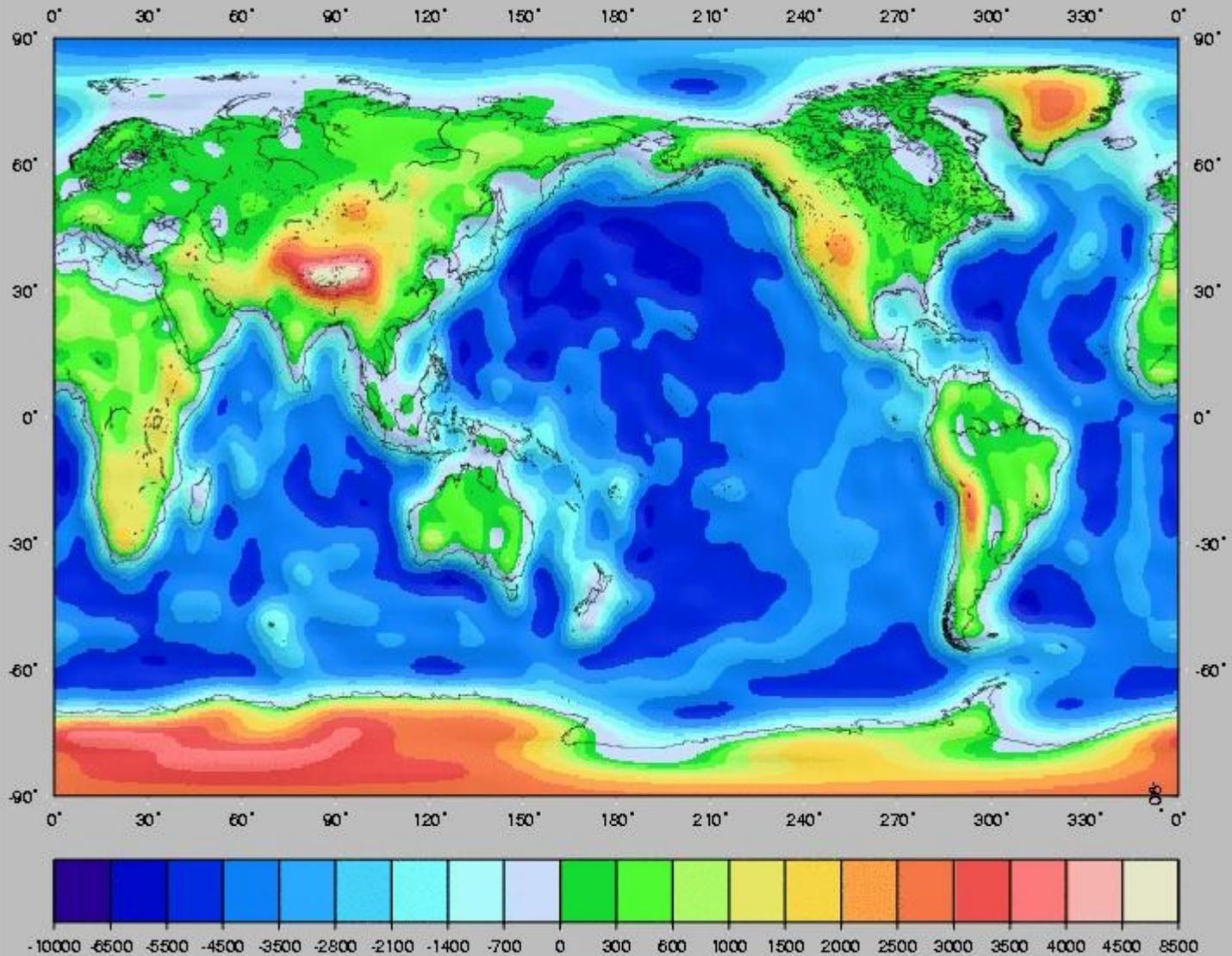
Topographie : degre l = 0 -> 6

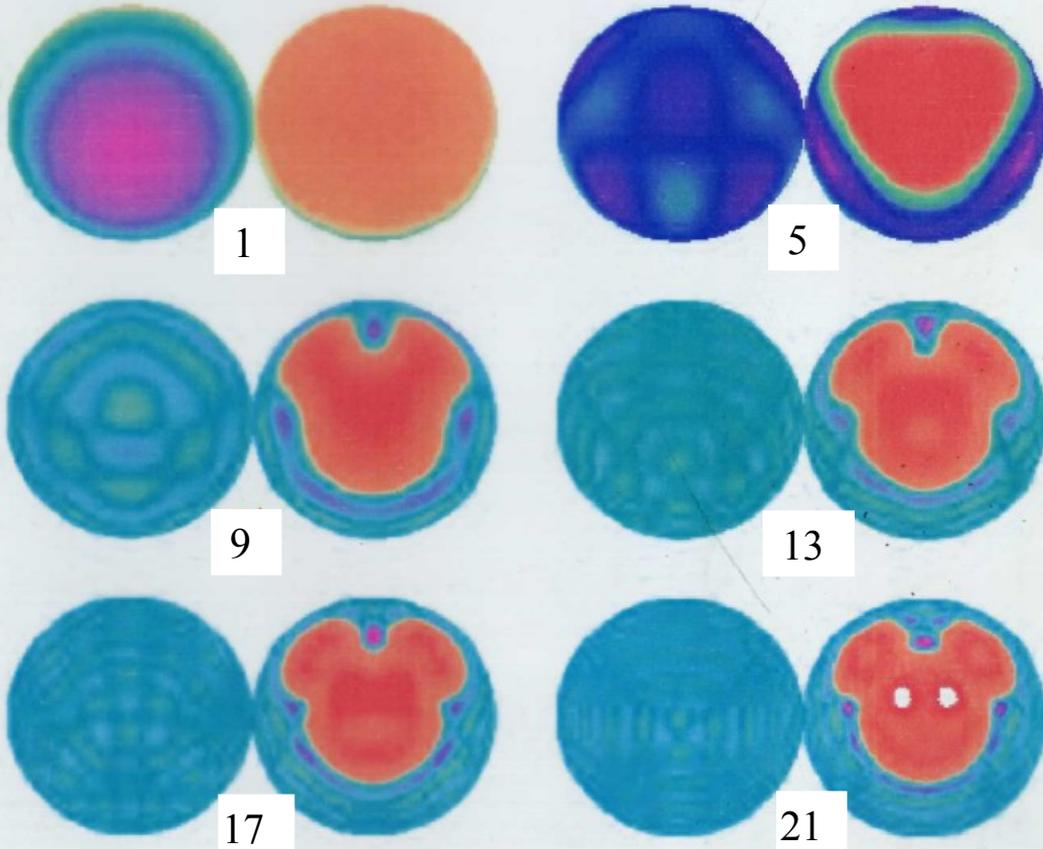
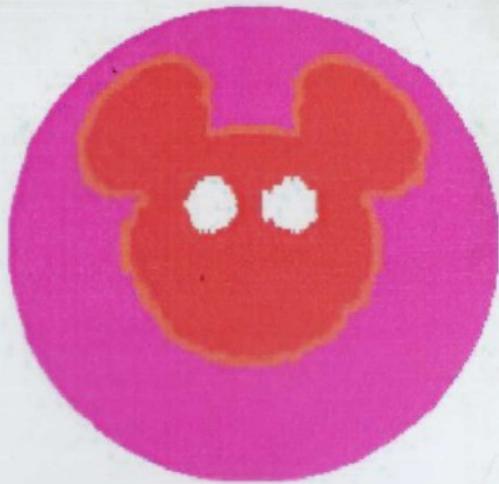


Topographie : degre l = 0 -> 16



TOPOGRAPHIE TERRESTRE : L = 0 - 36





On appelle *longueur d'onde* d'une harmonique sphérique, ou plus généralement, d'une structure spatiale, la distance entre deux retours à zéro de la fonction, ou la taille de la structure, ou sa longueur "caractéristique" de variation.

Longueur d'onde d'une harmonique de degré l :

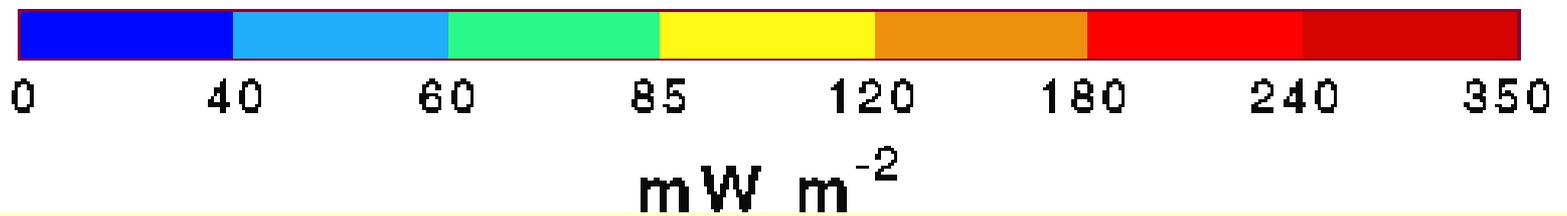
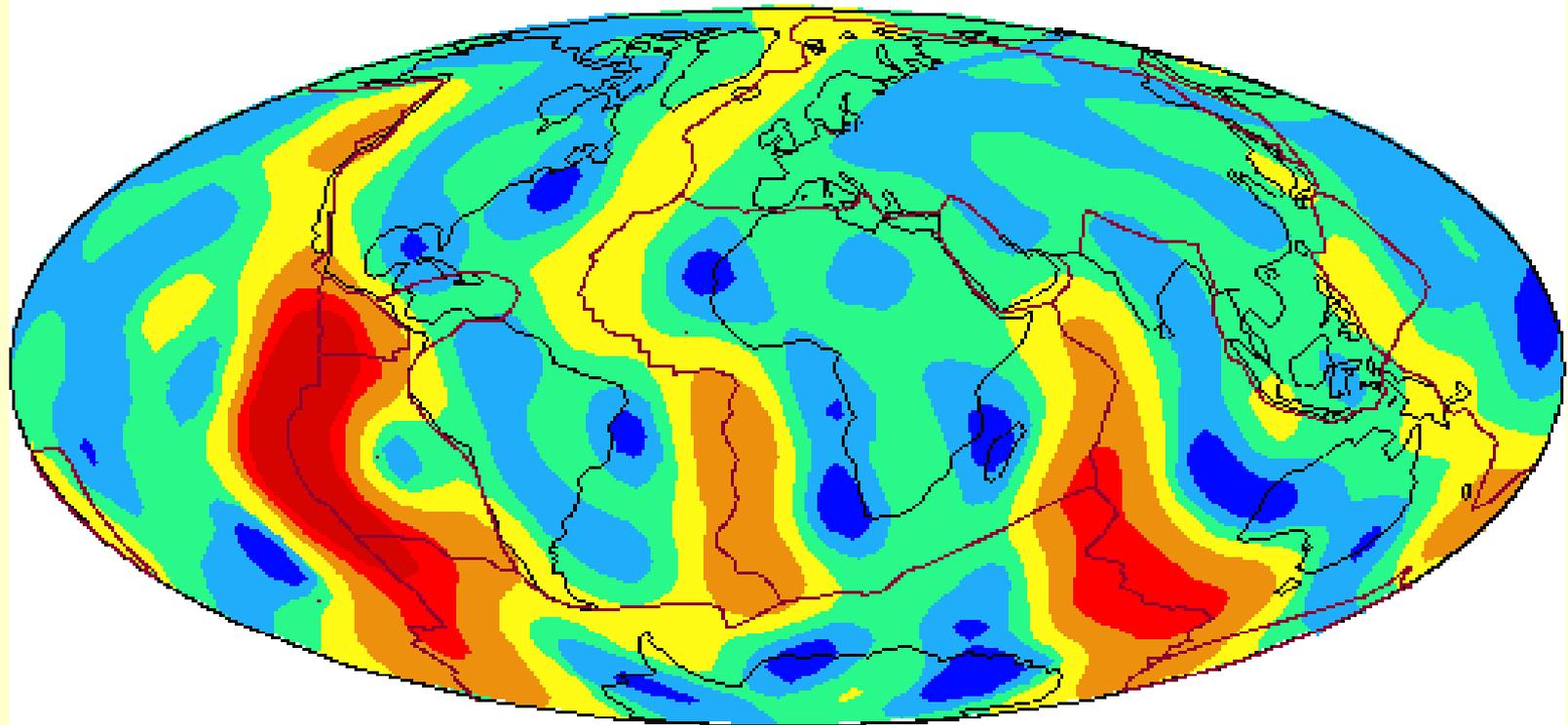
$$\lambda \text{ (radians)} = 2\pi / l$$

$$\lambda \approx \text{(km)} = 40\,000 \text{ km} / l$$

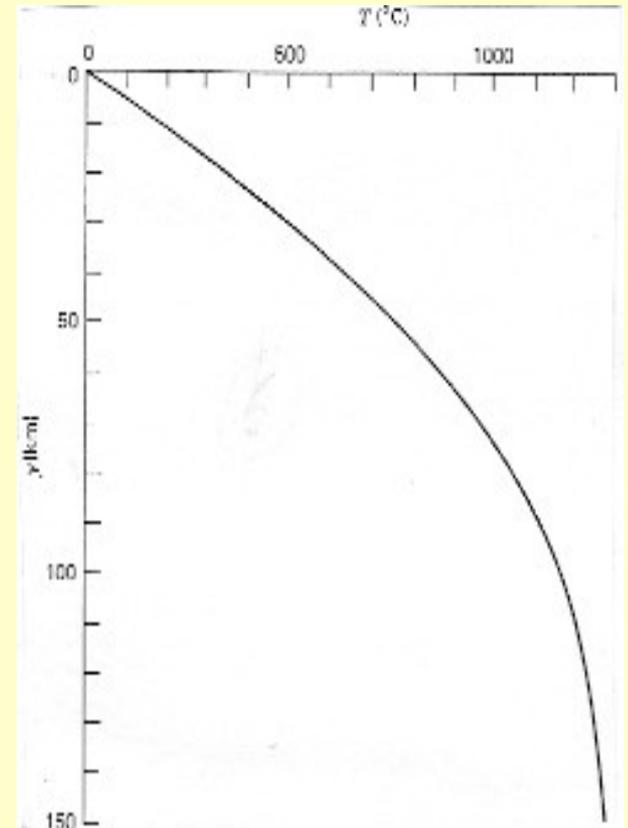
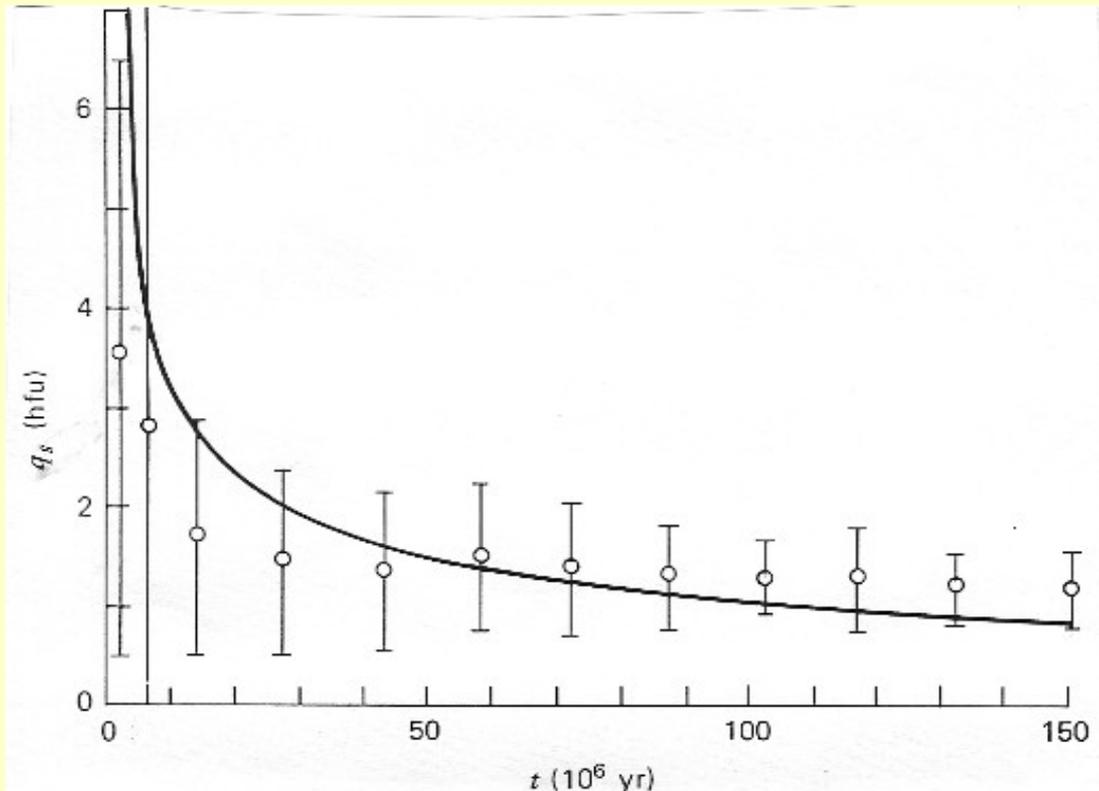
Ex. : un développement au degrés $l = 20$ a une résolution spatiale de $40000/20 = 2000 \text{ km}$: il contient des longueurs d'onde supérieures à 2000 km .

Global Heat Flow Map (Degree 12 Spherical Harmonic)

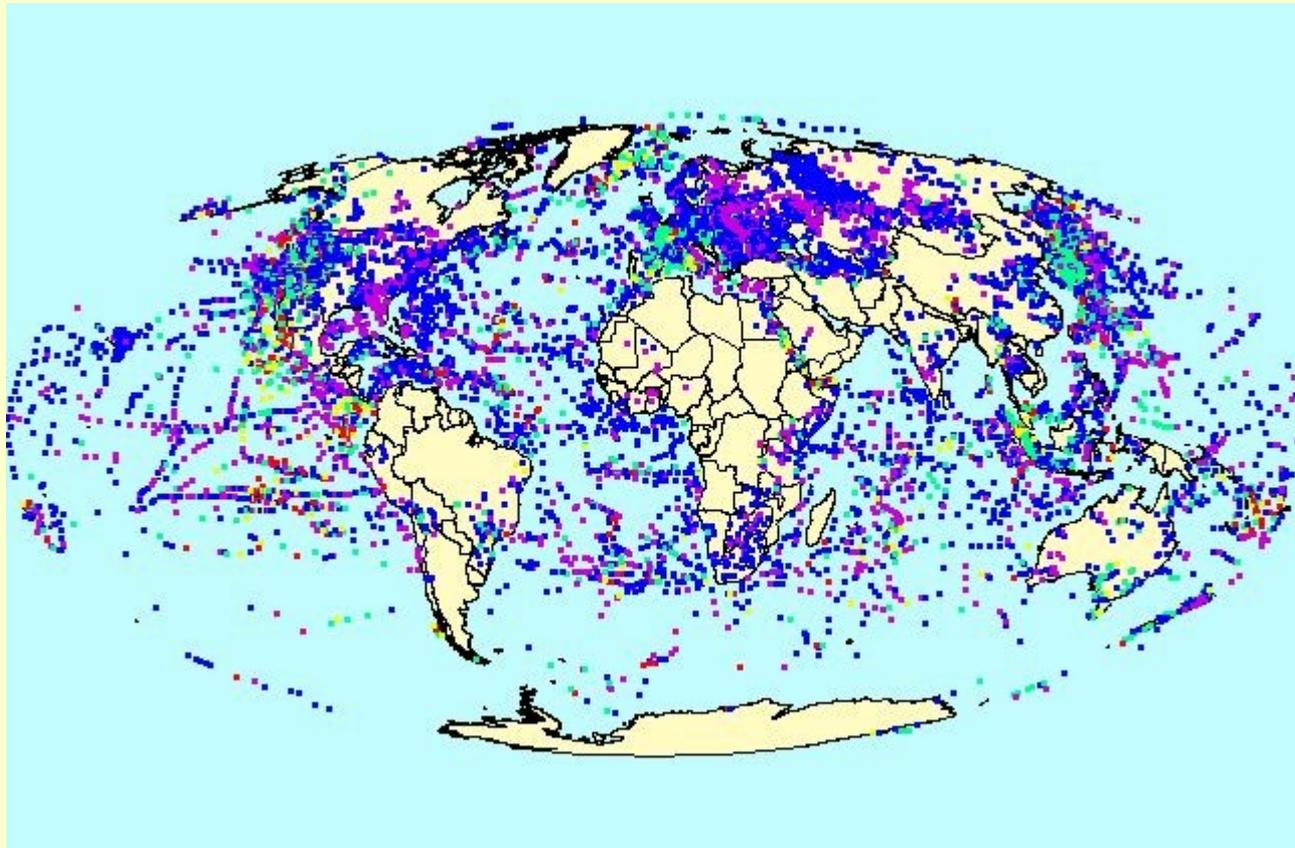
Heat Flow



Flux de chaleur en différents points des fonds océaniques



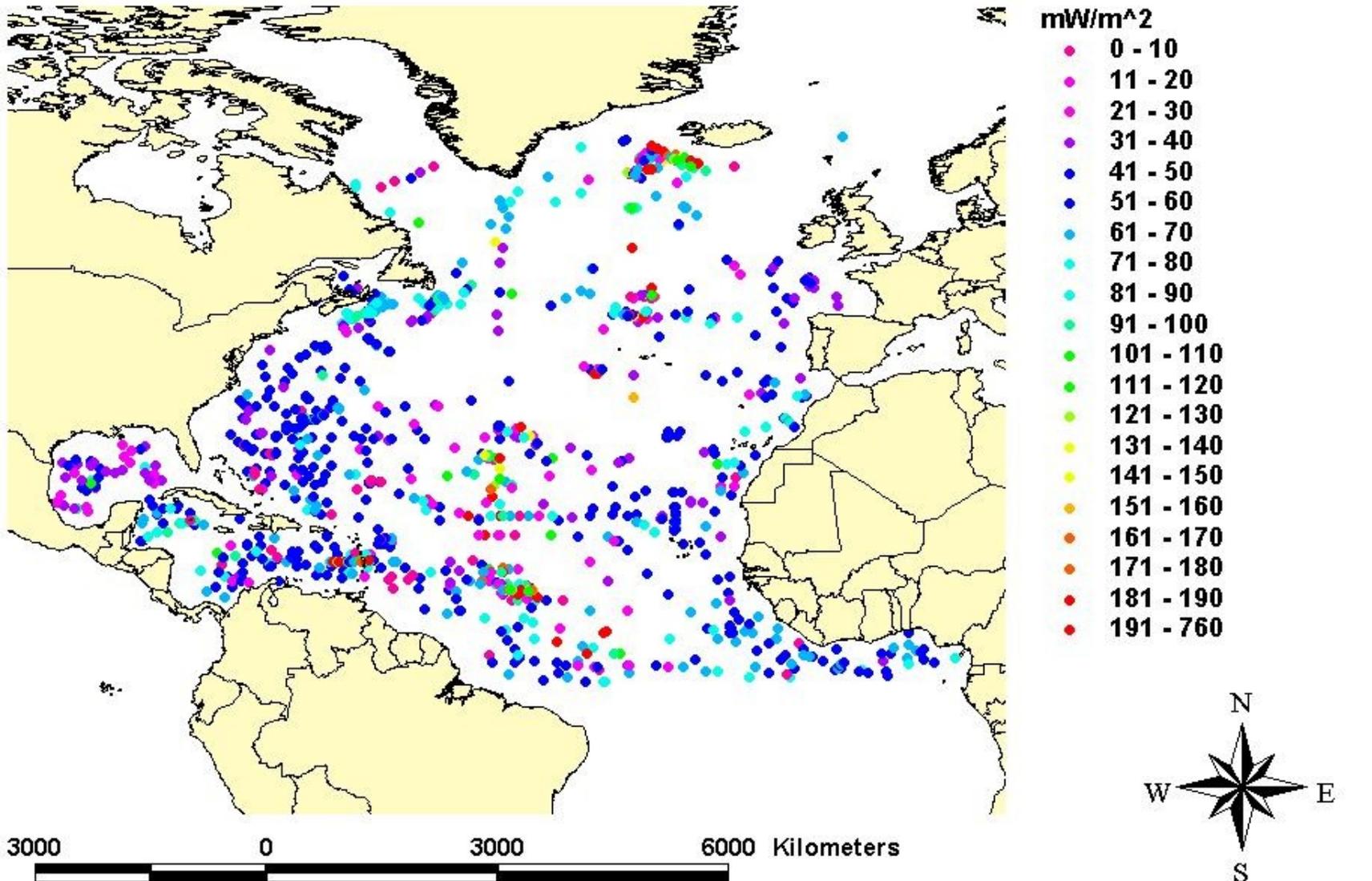
Géotherme correspondant à un âge de 60.4 MA
(âge moyen de la lithosphère océanique)



Global Heat Flow (mW / m²) :

0-40 violet
40-80 blue
80-120 green
120-240 yellow
240+ red

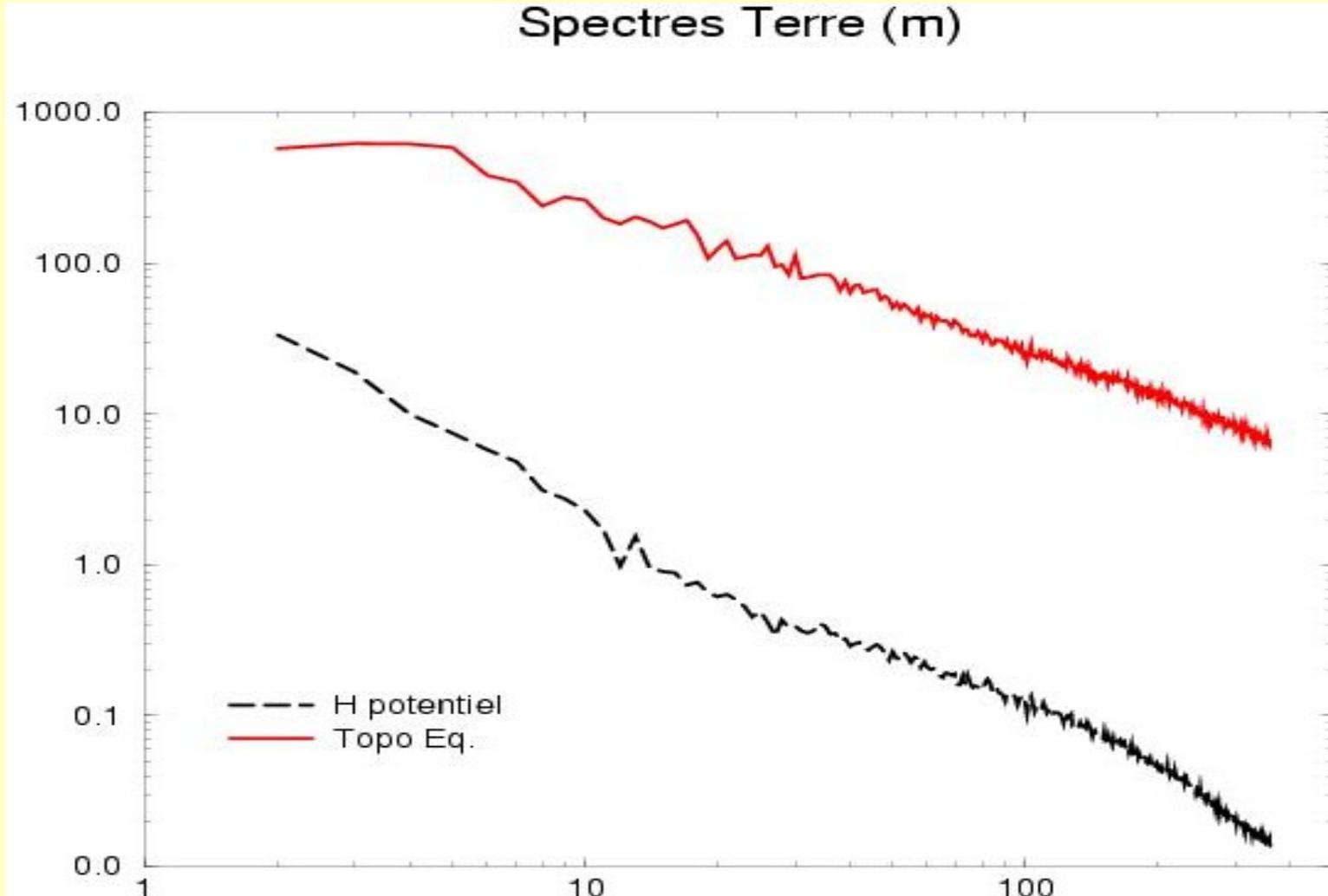
North Atlantic



En harmoniques sphériques

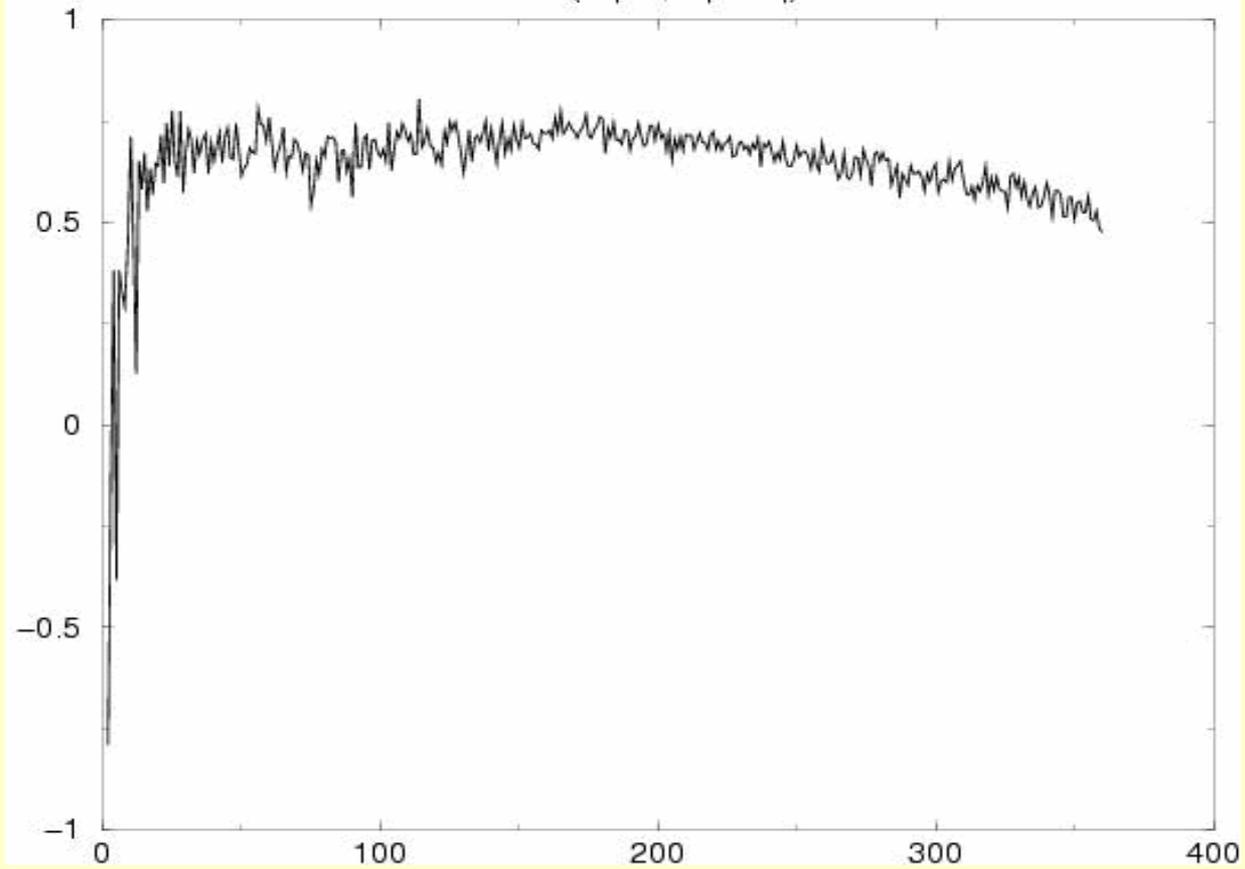
Une topographie h de degré l devrait créer un géoïde $N \sim 1.5 h / (l+1/2)$

Une anomalie de degré l à un rayon r devrait créer un géoïde $N \sim (r/R)^{l+1}$



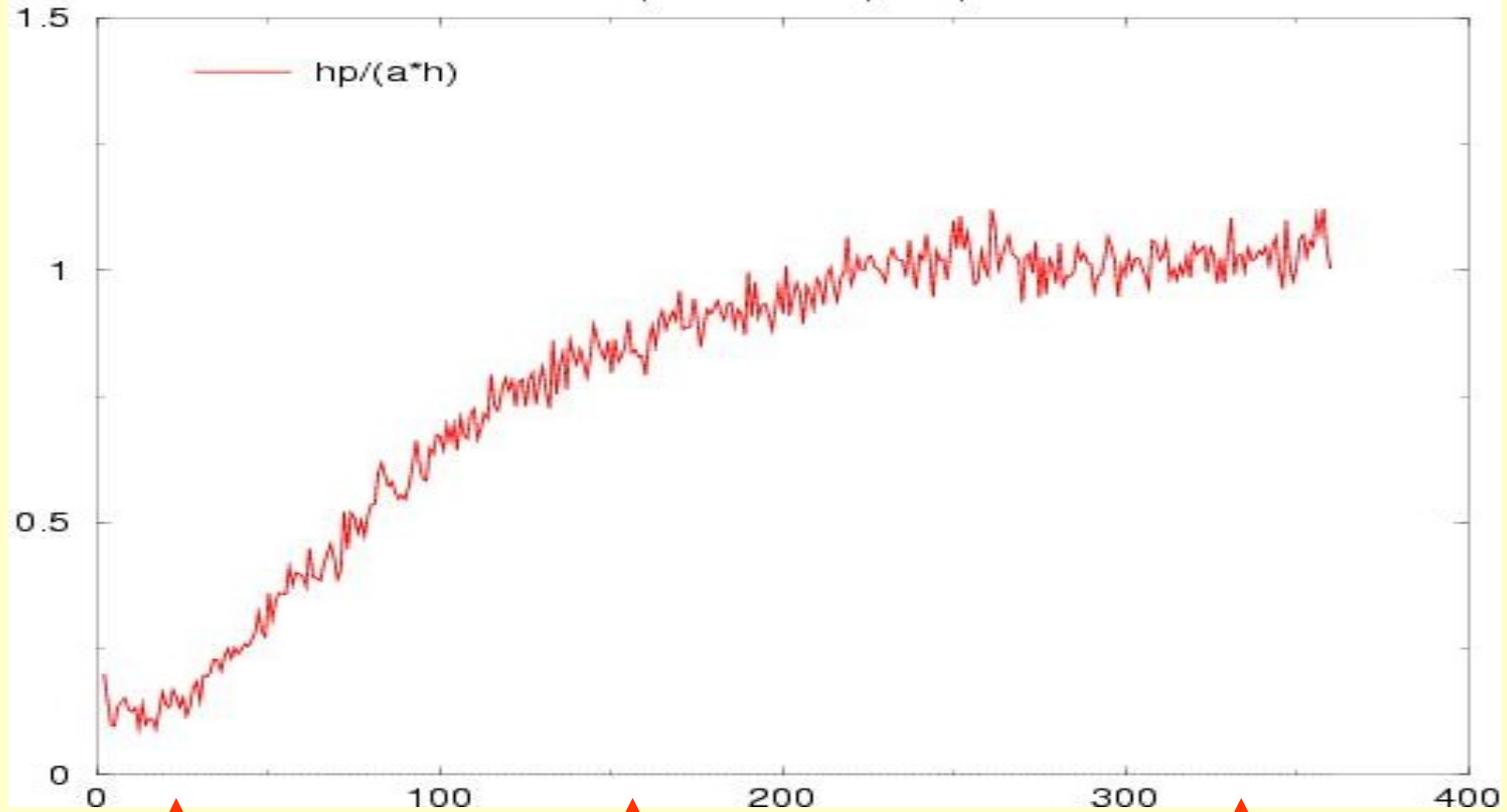
Correlation Terre

cor (H pot, topo eq)



Admittances Terre

H potentiel / topo eq



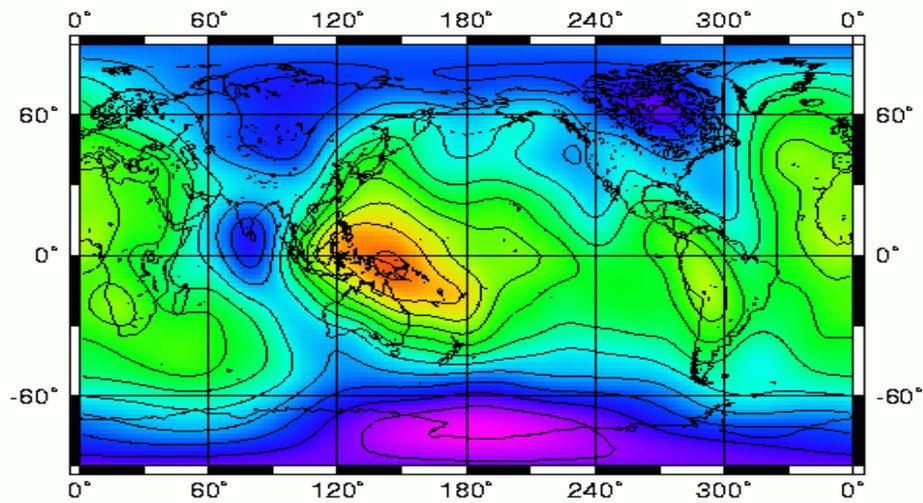
↑
Topo compensée :
Gravi ← manteau

↑
Gravi ← lithosphère

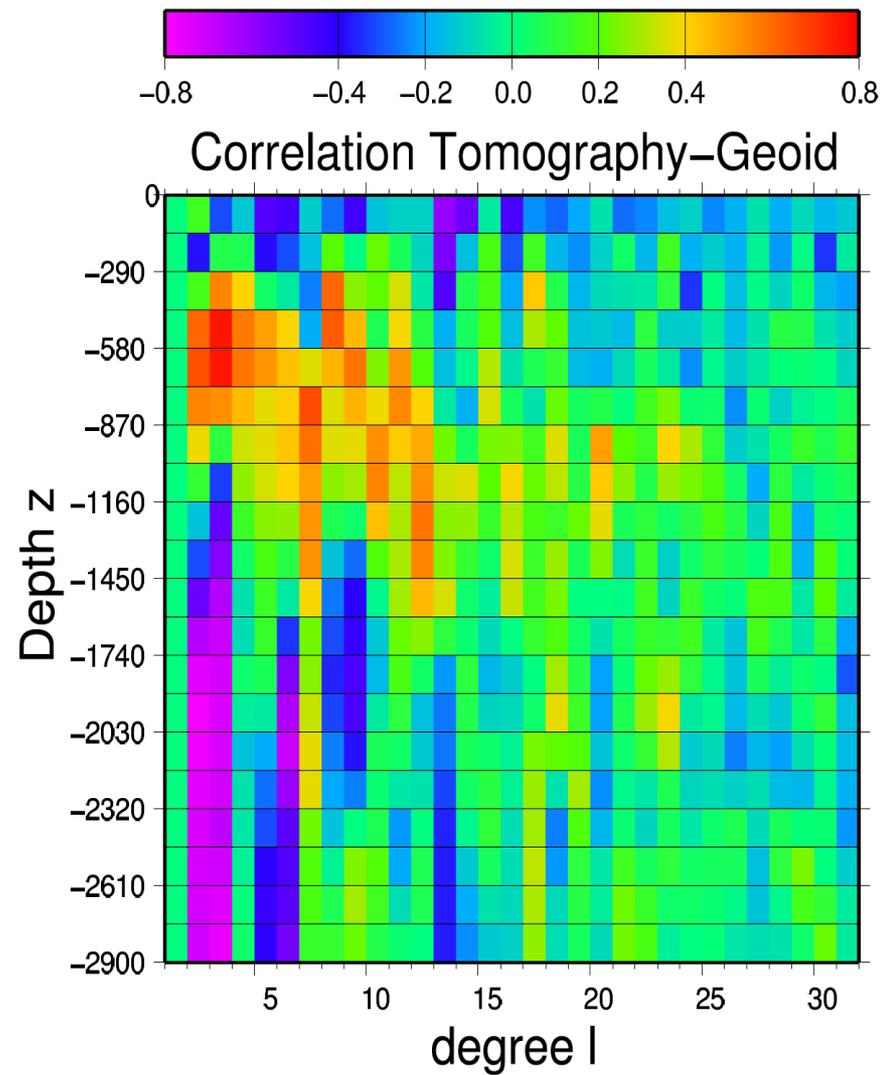
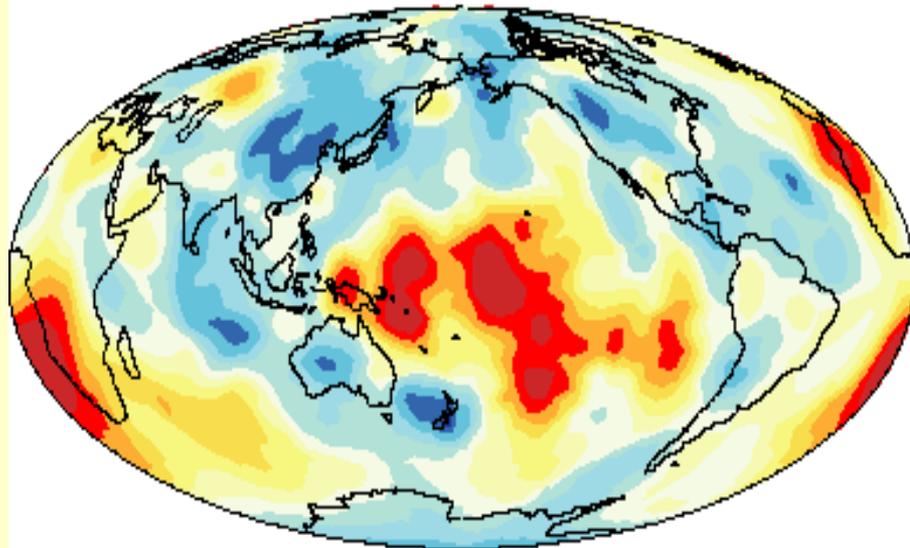
↑
Topo non compensée :
Gravi ← topo

→ Origine du champ de gravi à grande longueur d'onde ?

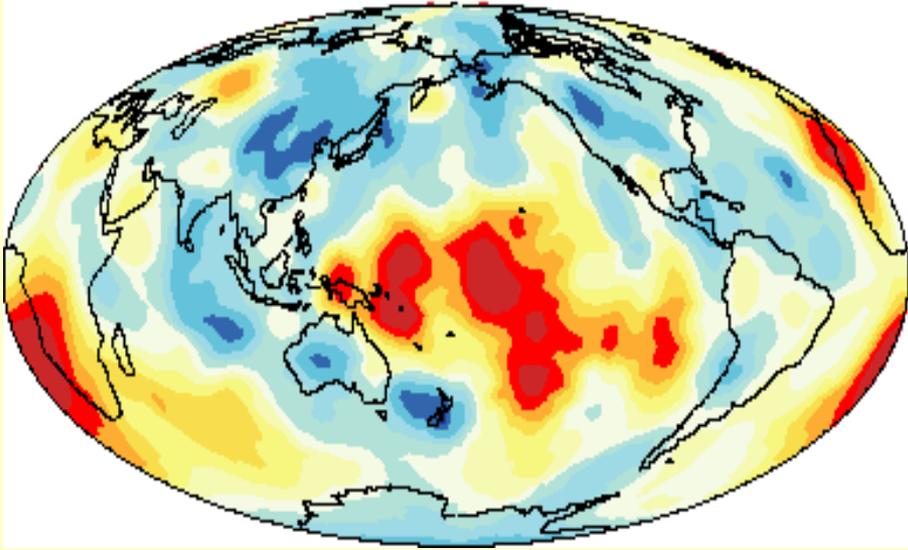
GEOIDE



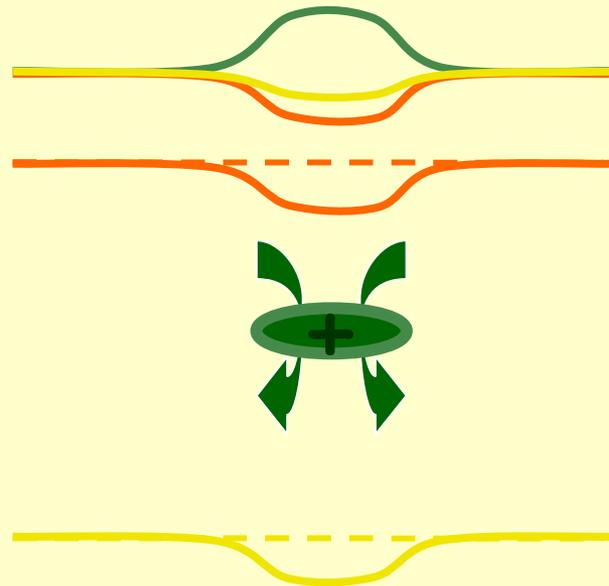
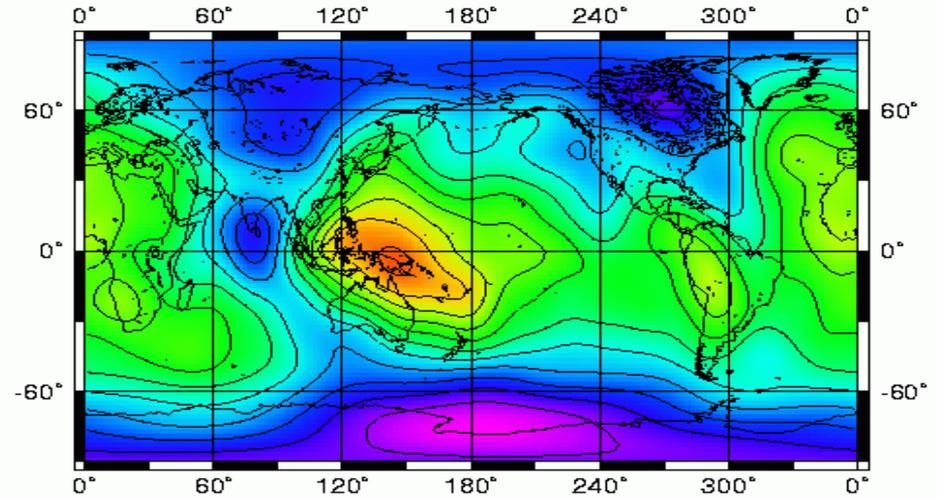
Shear velocity at the bottom of the mantle



Shear velocity at the bottom of the mantle



GEOIDE

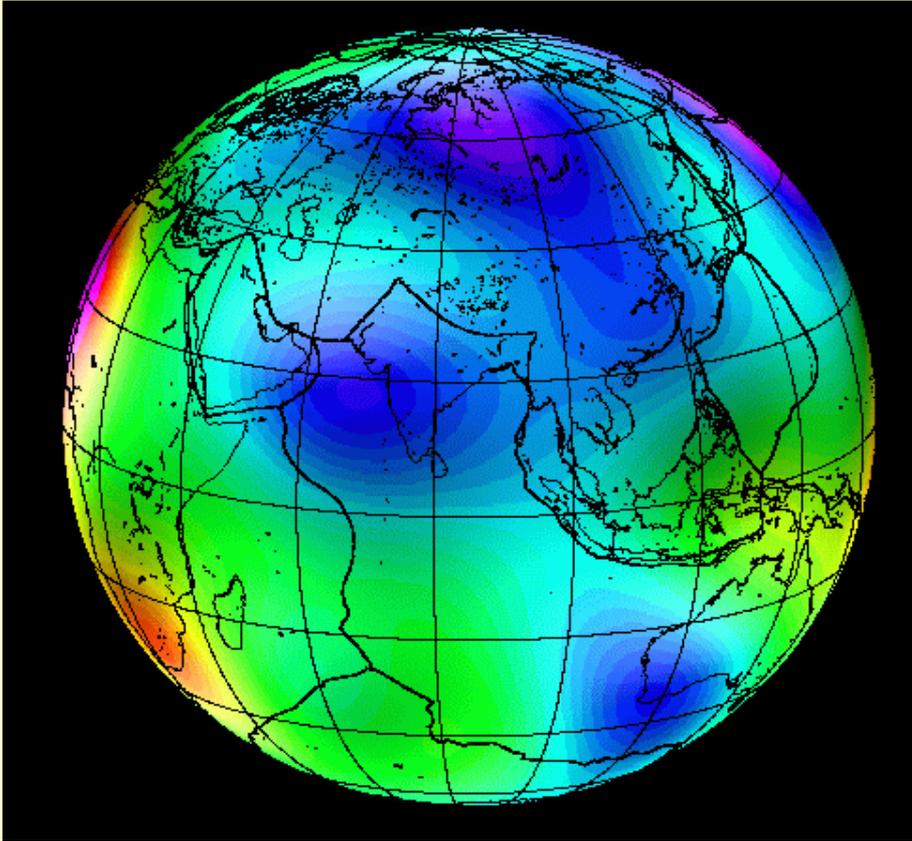


GEOIDE

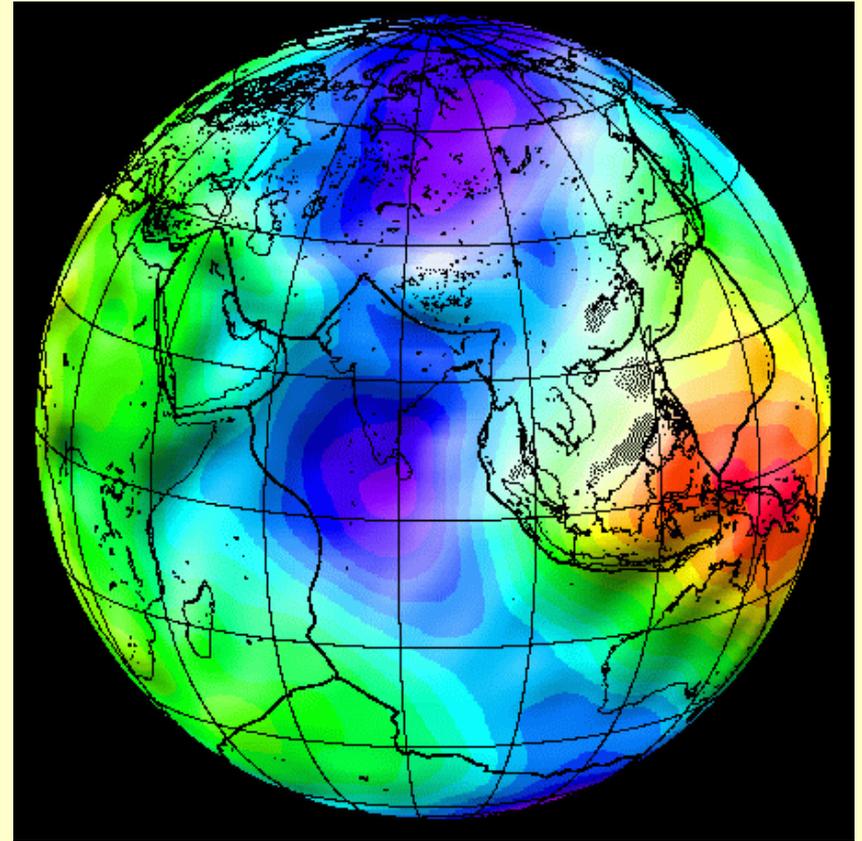
surface

manteau

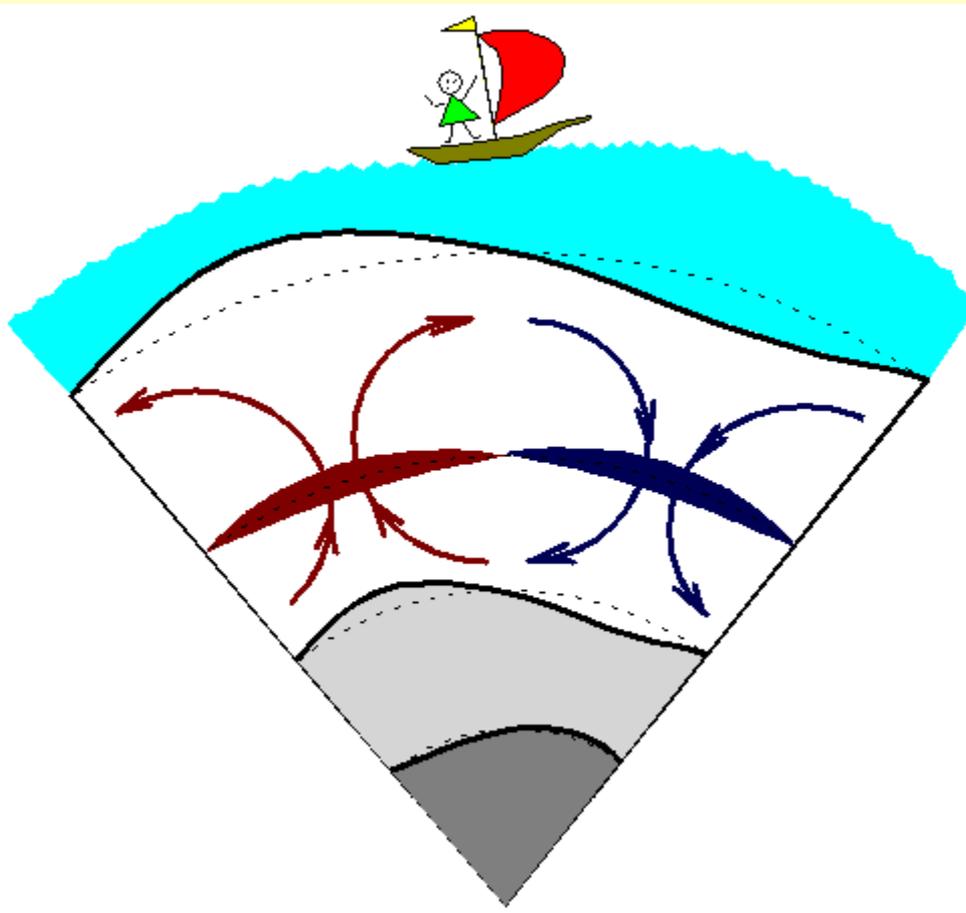
noyau



Anomalies de masse dans le manteau inférieur détectées par tomographie sismique.

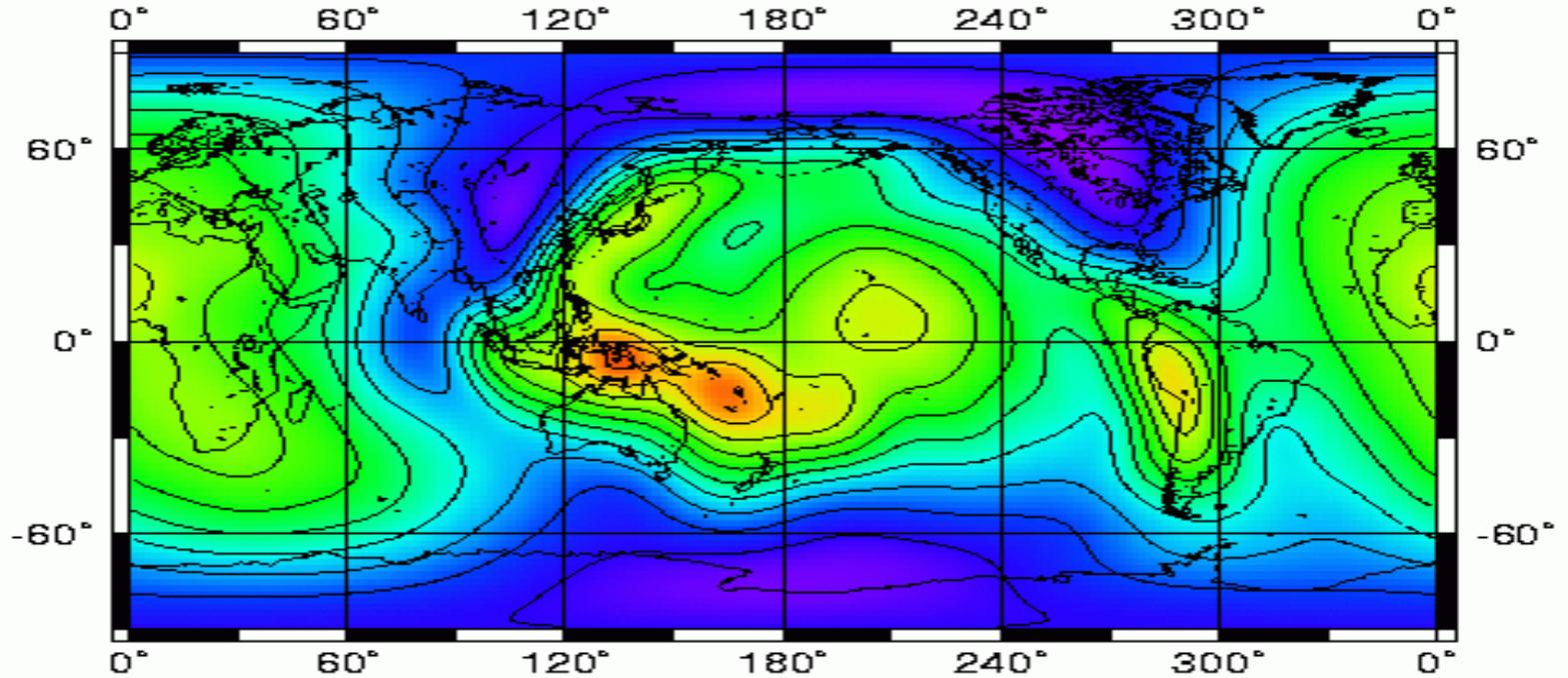


Ondulations du Géoïde.

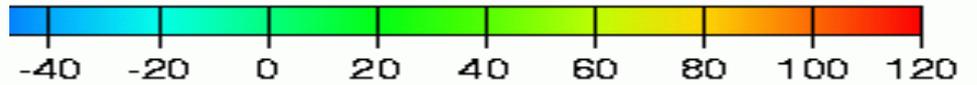


Résoudre les équations de la mécanique prenant en compte des anomalies volumiques, calculer les déformations d'interfaces, calculer le champ de gravité avec les anomalies volumiques ET les anomalies dues aux déflexions d'interfaces.

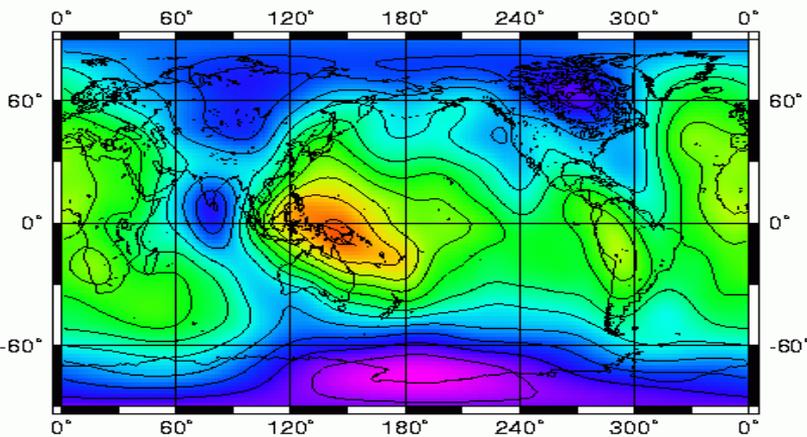
GEOIDE SYNTH.

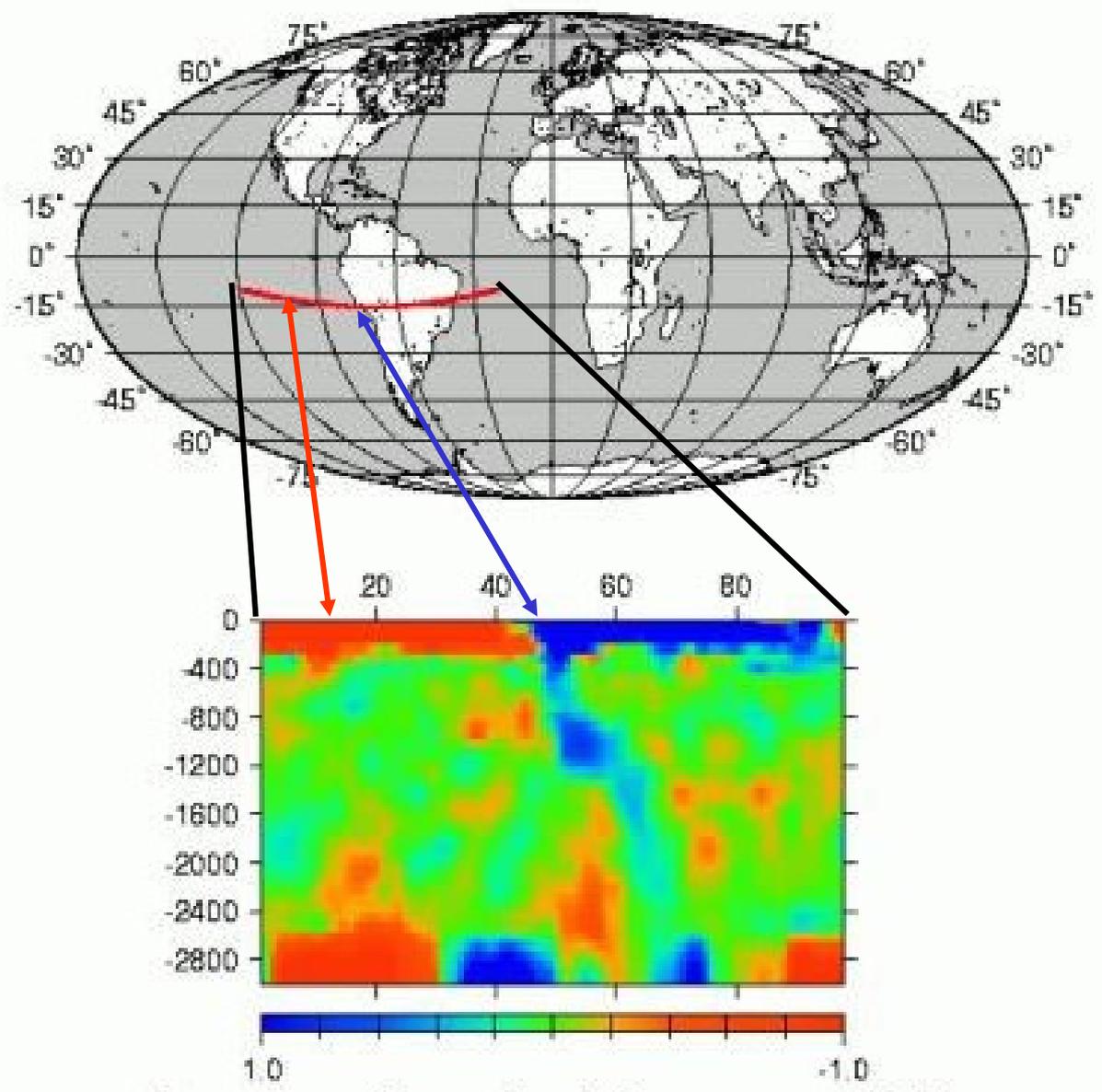


GEOIDE

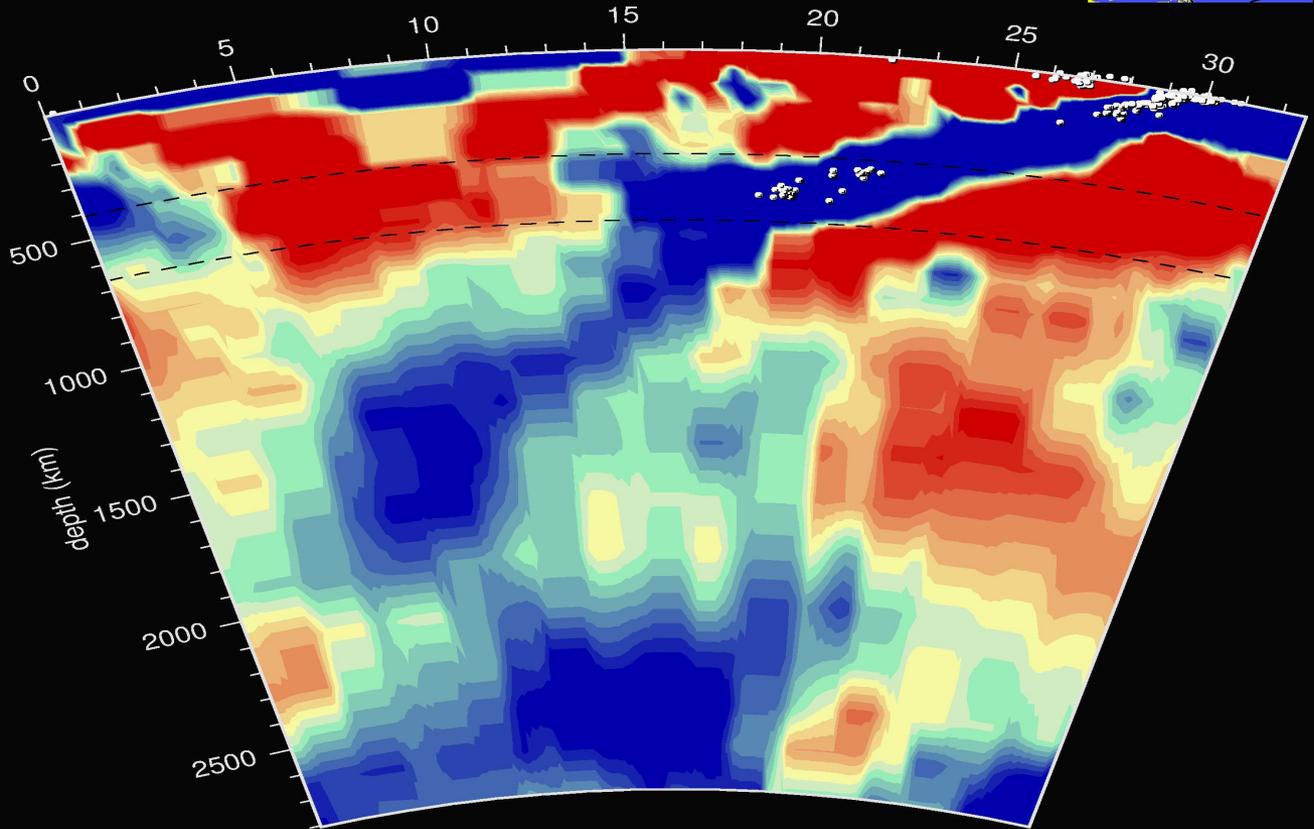
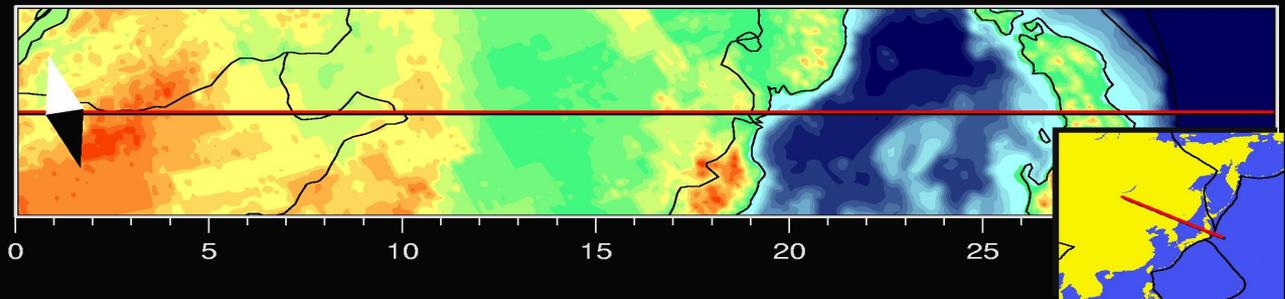


metres

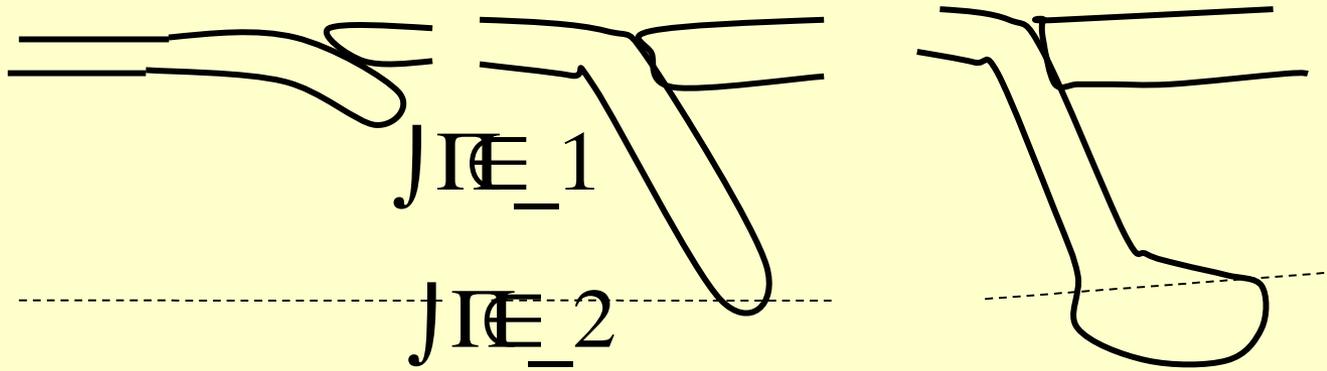
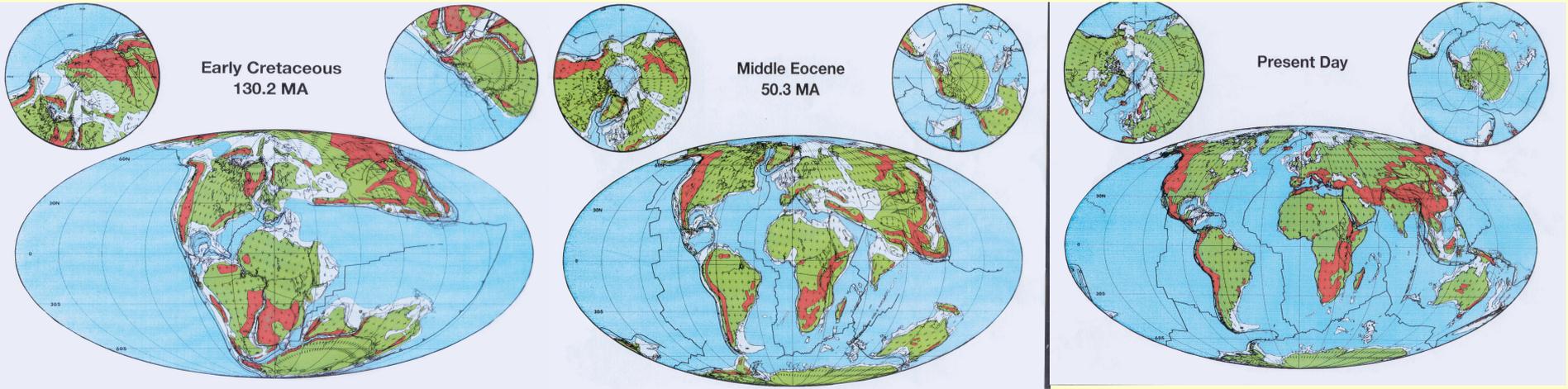




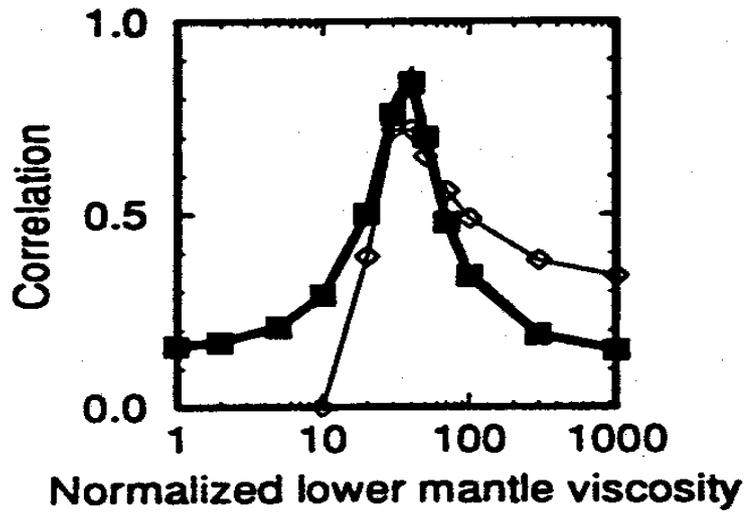
Anomalie de Vitesse (%)



-0.5%  +0.5%



COMP. VS. OBS. GEOID



Une prédiction optimale du géoïde est

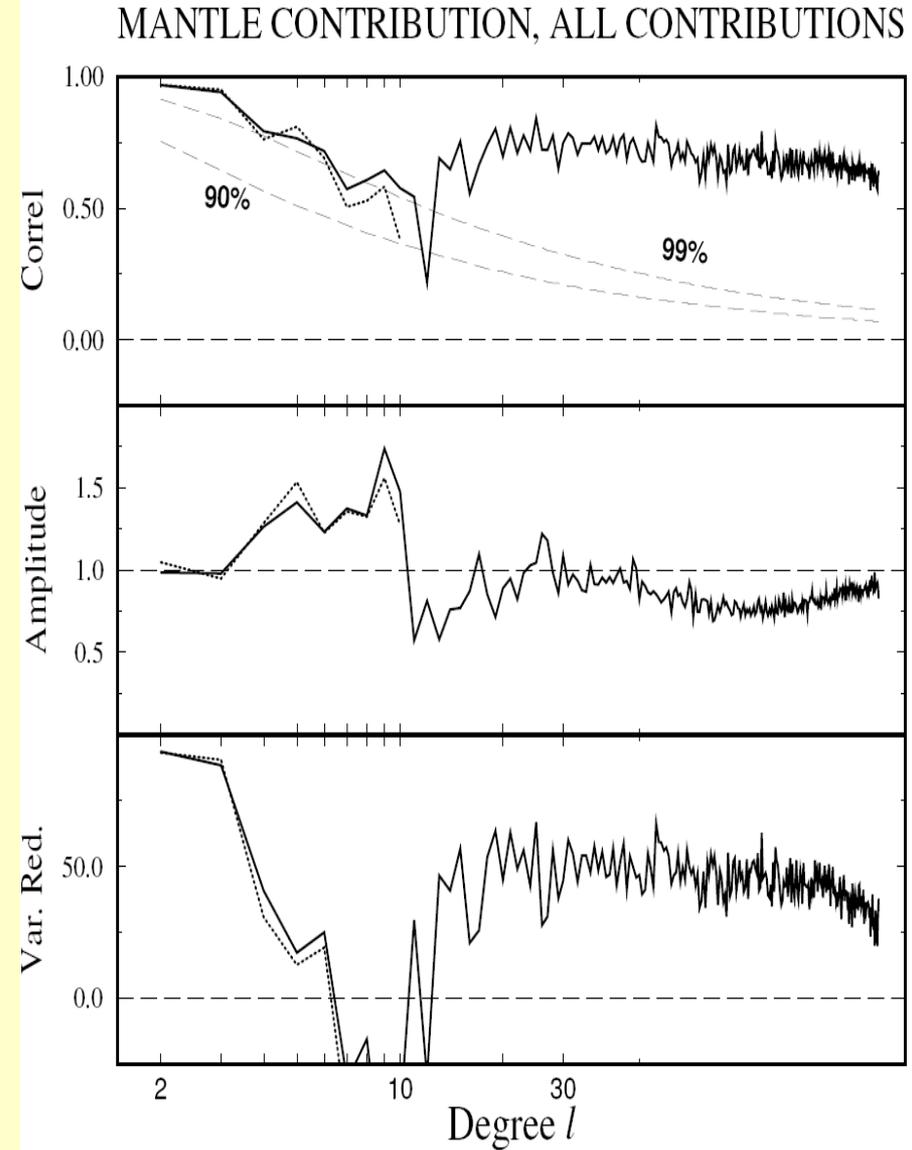
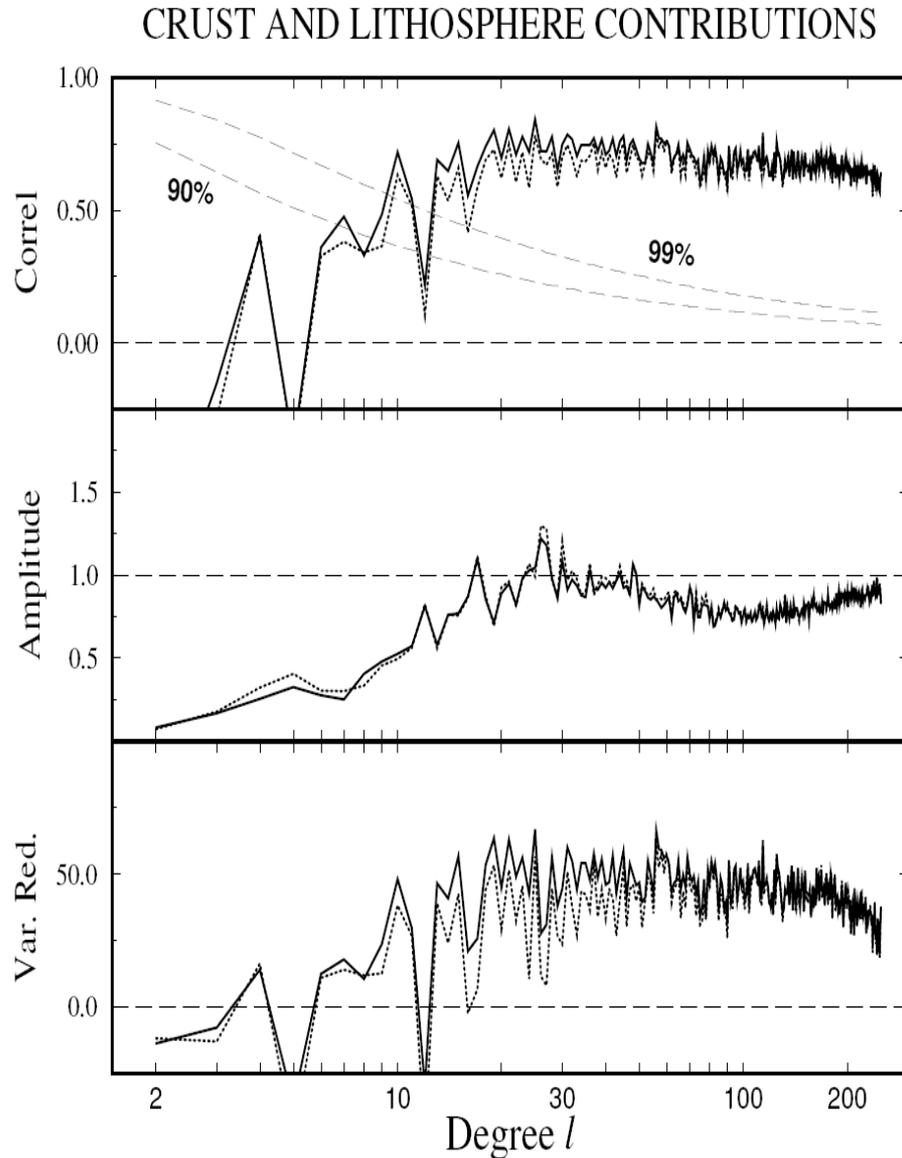
obtenue si la viscosité du manteau

terrestre passe de

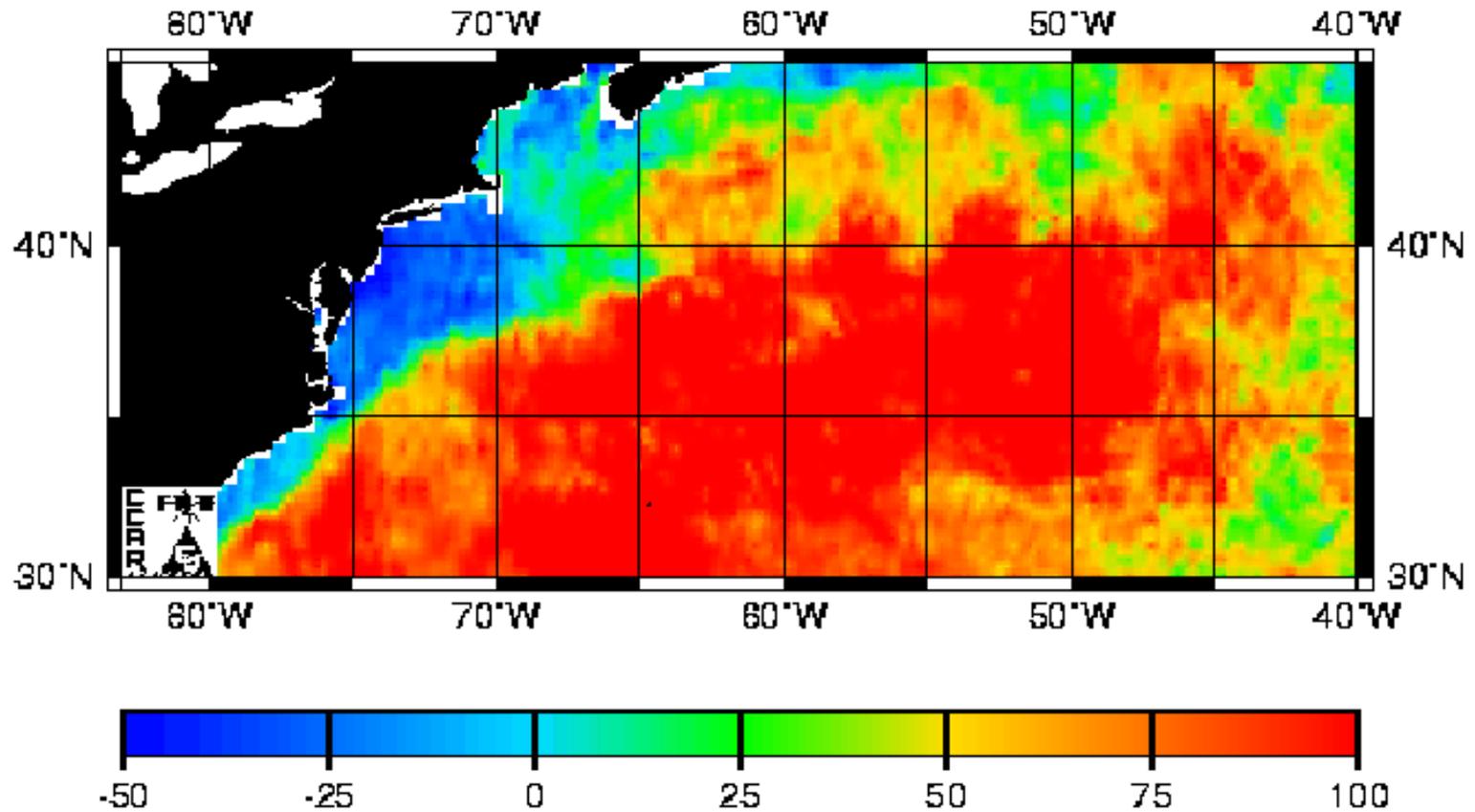
$\sim 10^{20}$ Pa.s dans les premiers 700 km

à

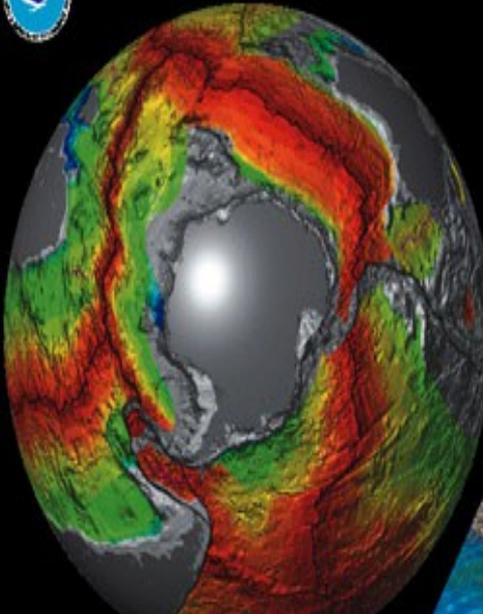
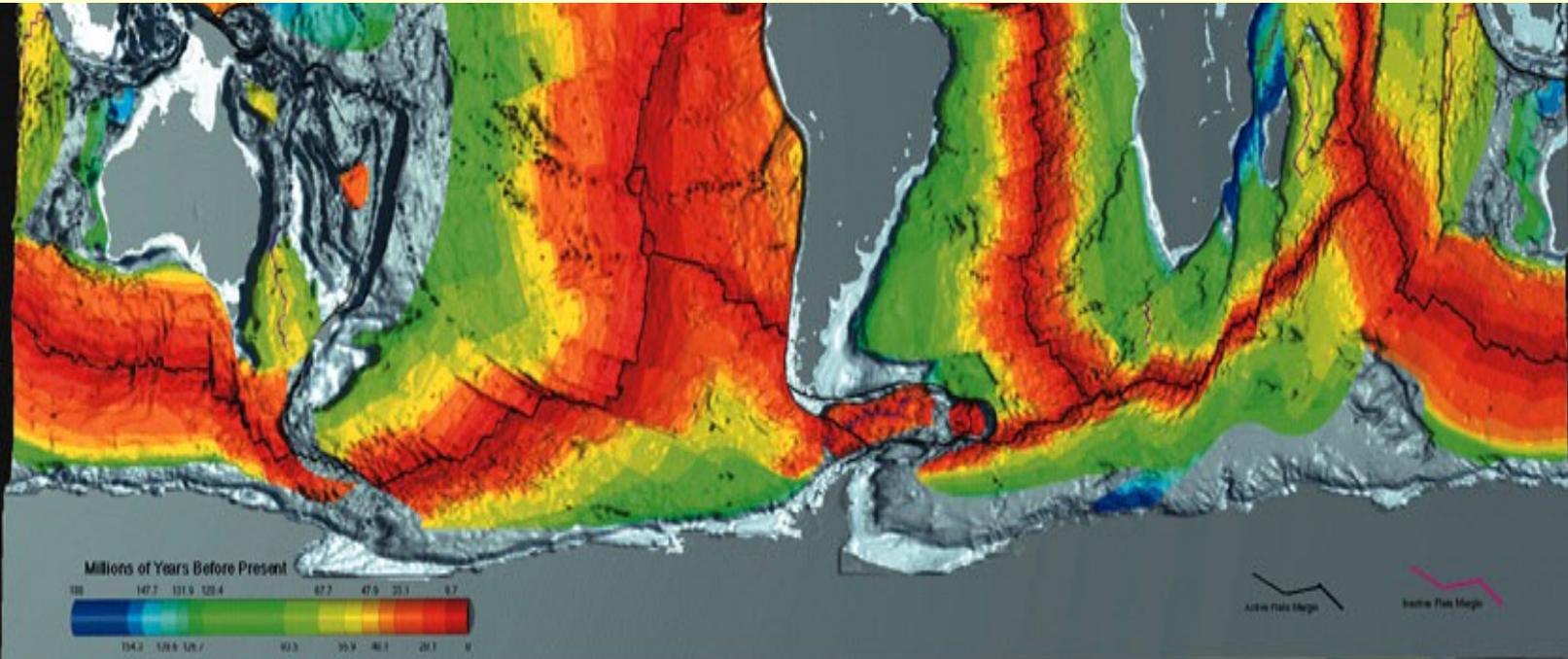
Bilan : des grandes longueurs d'onde associées aux plaques subductées dans le manteau, des longueurs d'onde moyennes associées à la structure de la lithosphère compensée isostatiquement.



TOPEX/ERS-2 Analysis Nov 17 2003



Gulf Stream, courant chaud, S->N, topographie dynamique ~1m
Vitesse (géostrophique) orthogonale à ∇p , // à ∇h .
Le géoïde est retranché



Principal Investigators and Contributors

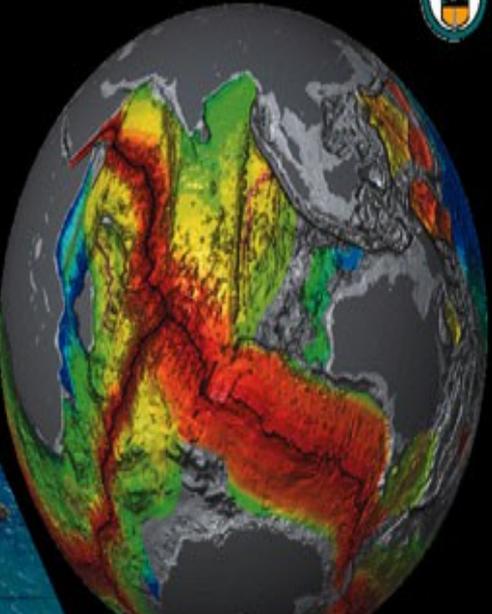
- U.S. Bureau of Oceanographic Research, U.S. Geological Survey, Washington, D.C. 20548
- W. S. Kidd, Geological Survey of Canada, Ottawa, Ontario, Canada
- U.S. Dept. of Commerce, OCE, 1200 22nd St. SE, Washington, D.C. 20548
- S. R. Hart, U.S. Geological Survey, Washington, D.C. 20548
- U.S. Dept. of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington, D.C. 20548

The color image representing oceanic ages was created from a digital age grid of the ocean floor with grid cells determined by 1-degree squares and measurements of global bathymetry and sedimentation rates. The age of each grid cell was determined by linear interpolation between adjacent isochrons in the direction of spreading. Ages for ocean floor between the oldest identified magnetic anomaly and continental shelf were interpolated by extending the ages of younger magnetic anomaly segments from continental shelf and geotectonic plate models. The geotectonic grid is subject to modification pending on data coverage. The magnetic anomalies are then applied to color images derived from 30-degree geographic data. Light gray areas are unmeasured continental shelf materials. The color gray color indicates land. Age-color contour image by Peter W. Zandt, SOLEI 0222 02-0120.

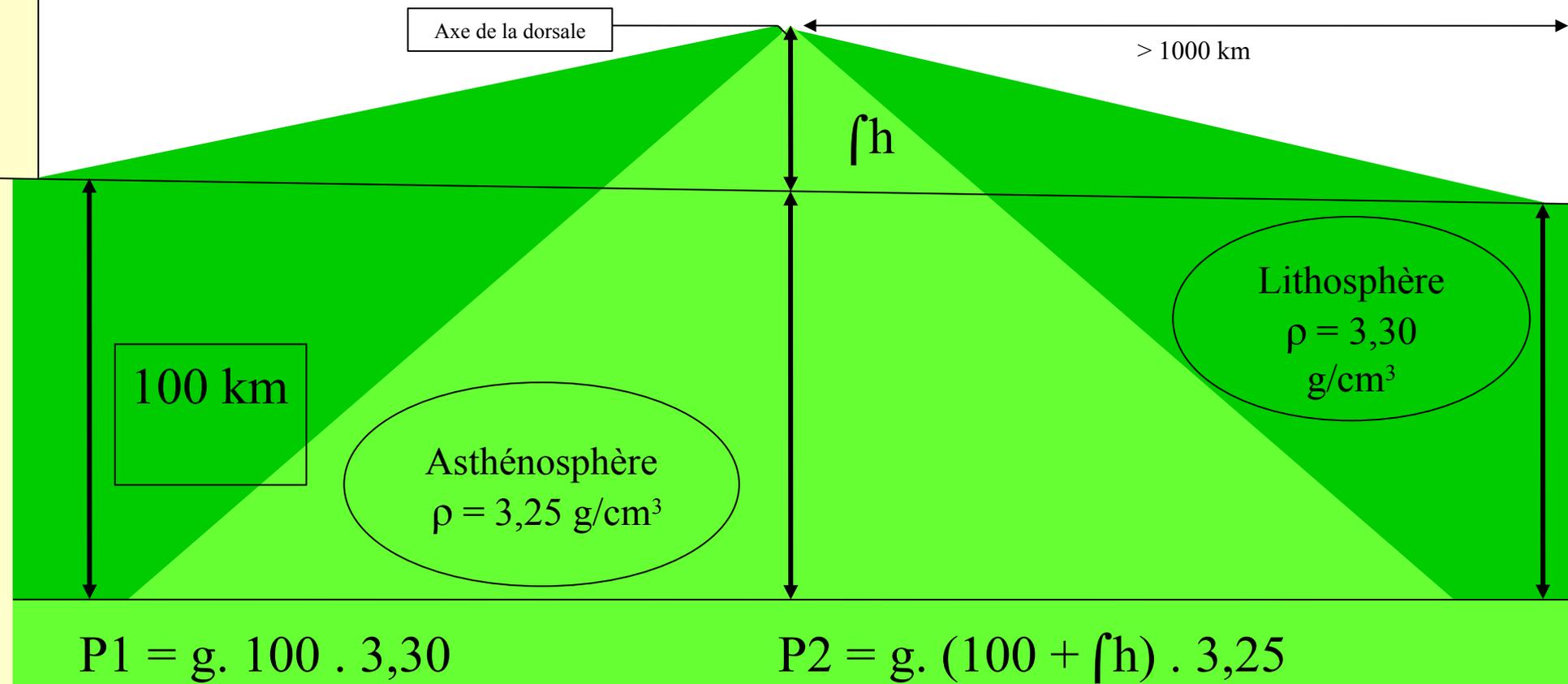
Age of the Ocean Floor

World Data Center A for Marine Geology and Geophysics Report MG2-12 (1998)
Published by the National Geophysical Data Center

U.S. Department of Commerce
 Albany District Director
 National Oceanic and Atmospheric Administration
 2, James Beale, Silver Spring, Maryland 20910
 National Environmental Satellite, Data, and Information Service
 Robert B. Blanton, Assistant Administrator for Marine and Atmospheric Division
 National Geophysical Data Center
 Michael B. Longbridge, Acting Director



La topographie des dorsales

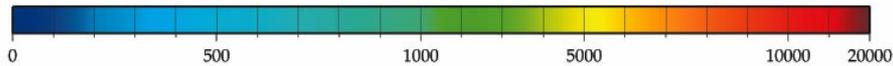
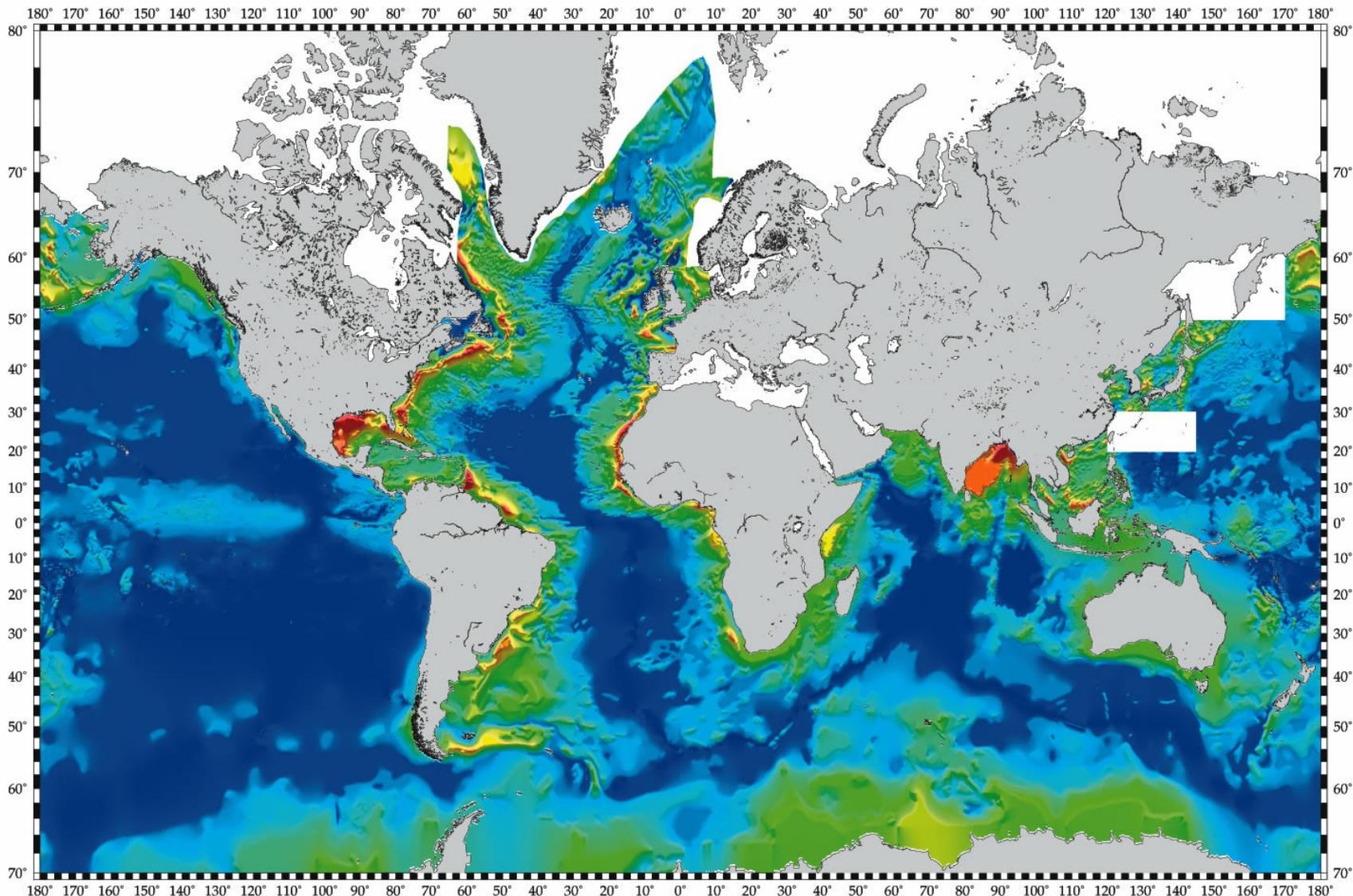


$$P1 = P2 \rightarrow$$

$$f h = 1,5 \text{ km}$$

(en négligeant la présence de la croûte et de l'eau de l'océan)

Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas



Thickness in Meters



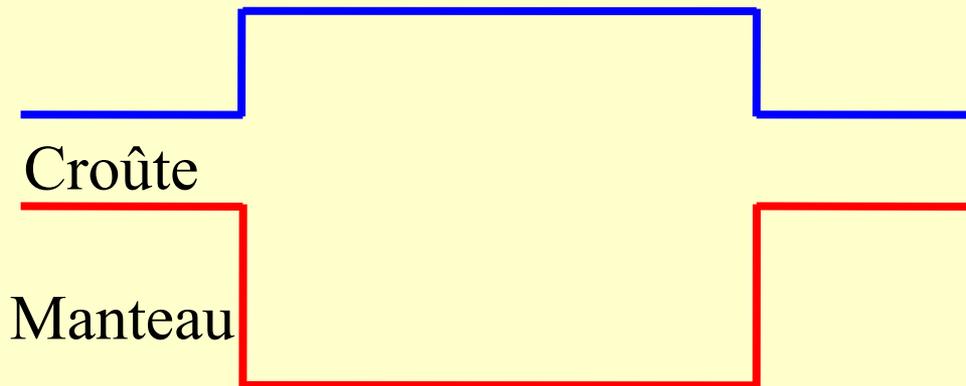
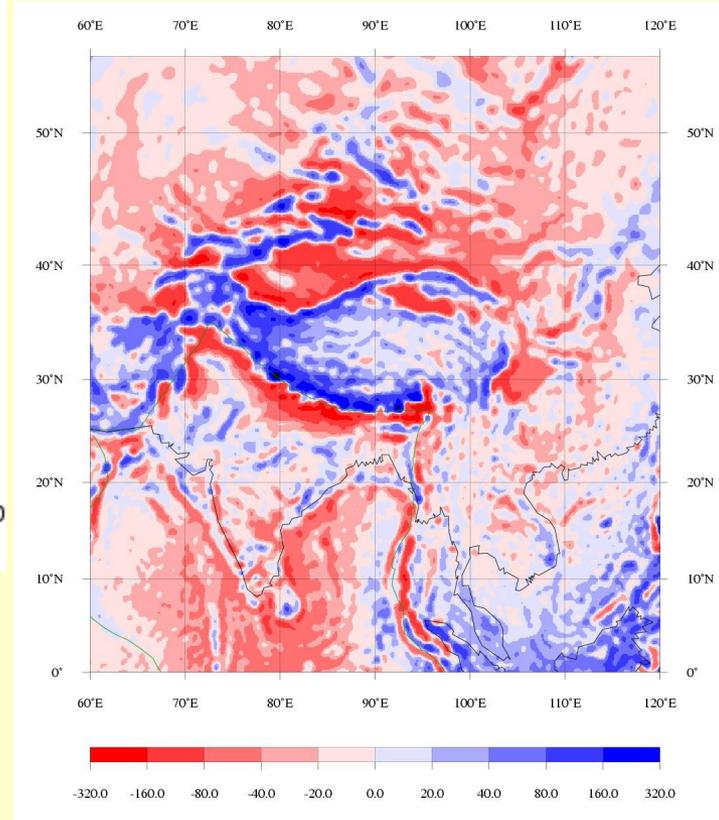
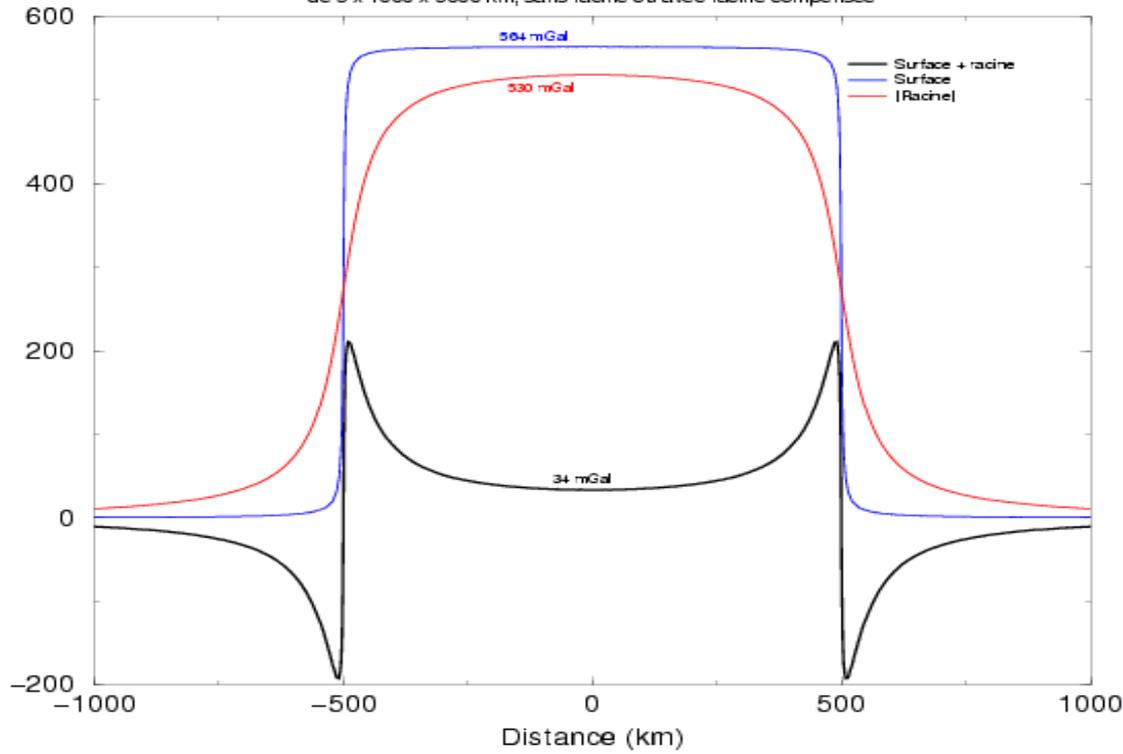
A digital total sediment thickness database for the world's oceans and marginal seas is being compiled by the National

The distribution of sediments in the oceans is controlled by five primary factors:

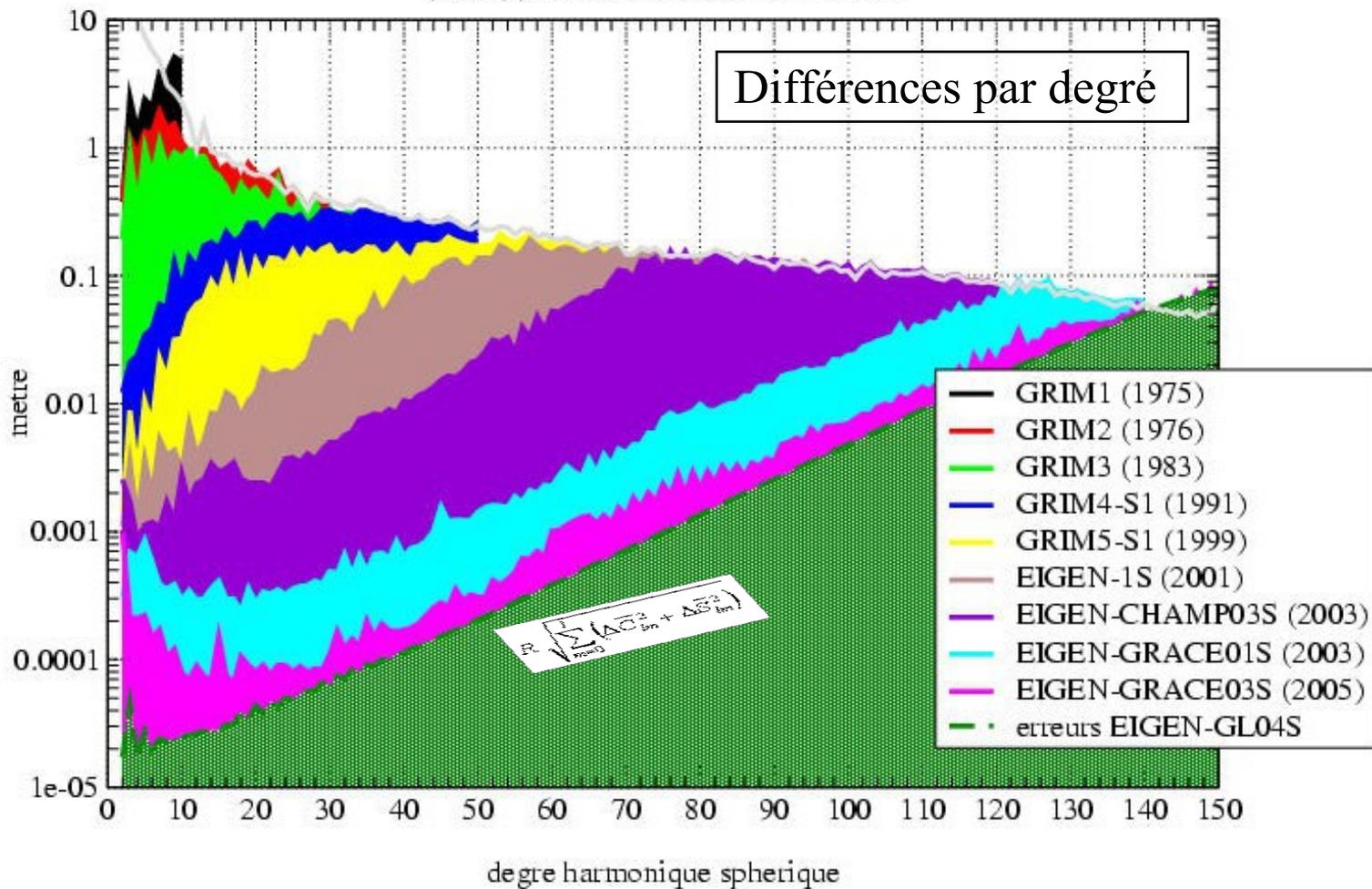
The data values are in meters and represent the depth to acoustic basement. It should be noted that acoustic basement

Attraction d'un plateau

de 5 x 1000 x 5000 km, sans racine ou avec racine compensée



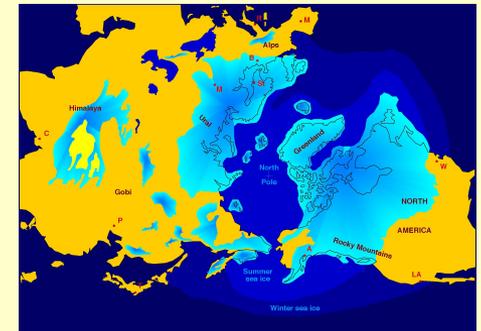
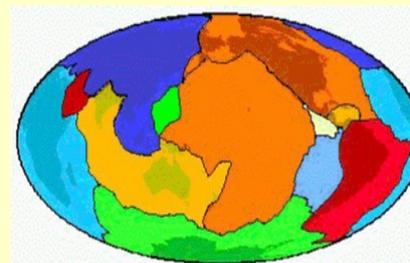
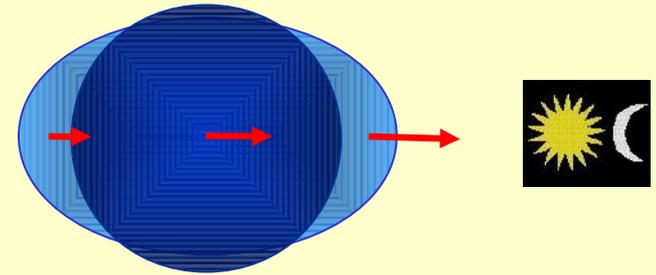
Evaluation des modèles GRIM et EIGEN par différence (en hauteur de géoïde) au modèle EIGEN-GL04S (2006)



Longueur d'onde :	4000 km	800 km	400 km	267 km
Résolution :	2000 km	400 km	200 km	133 km

Principales déformations physiques:

- marées terrestres (< 5 cm sur le géoïde)
- effets de surface et charge (< 1 cm)
 - marées océaniques
 - courants océaniques
 - pression atmosphérique
 - hydrologie
 - rebond post-glaciaire
- marée polaire (< 1 mm)
- tectonique
- tremblements de Terre



(fin du Pléistocène)

Simulation GOCE

sur 60 days

altitude: 250 km

inclinaison: 96.5°

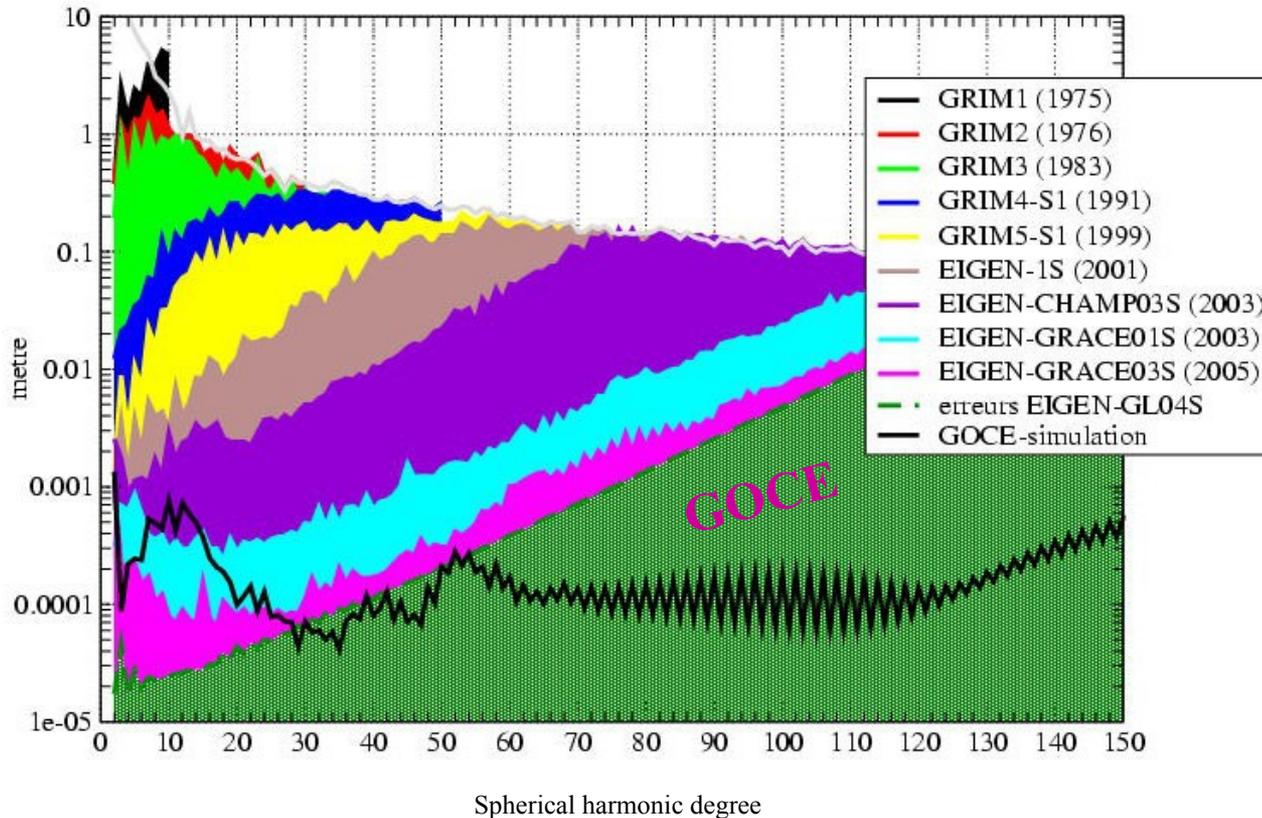
exentricité: 0.001

Données

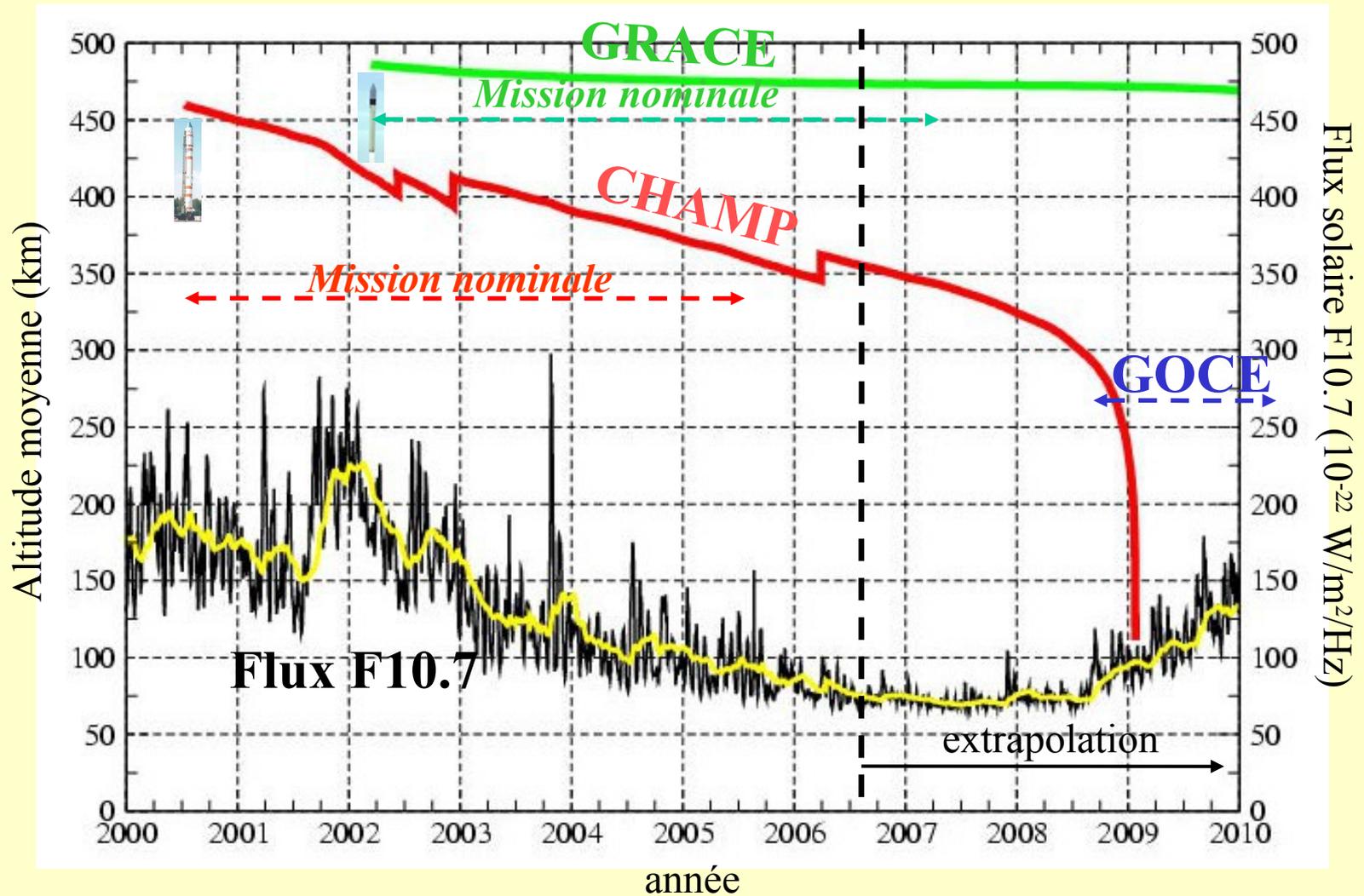
SST / 10s (dérivées partielles jusqu'au degré 120), bruit blanc : 15 mm rms

SGG / 4s (filtrés à la période de coupure de 220 s, dérivées partielles jusqu'au degré 240)

Geoid spectrum



Evolution des orbites de CHAMP/GRACE/GOCE



Geoïde et topographie de Venus

Peu de compensation, planète peu active

