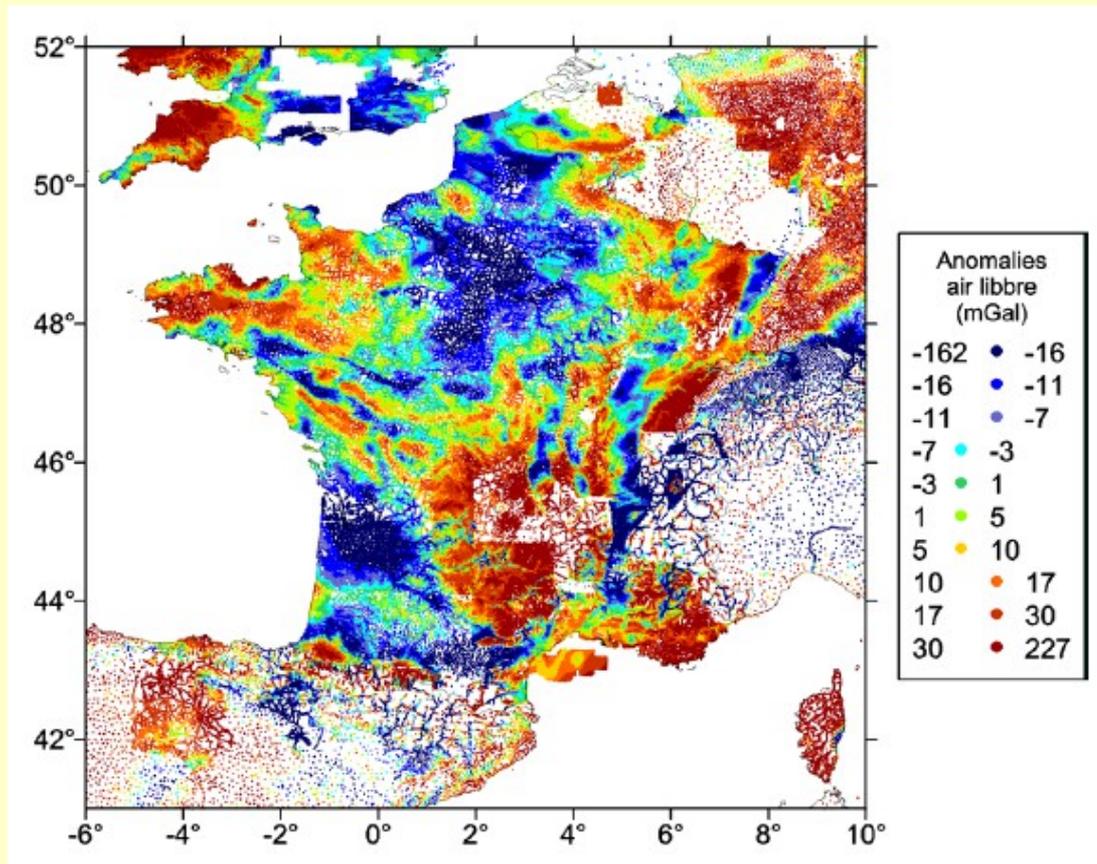
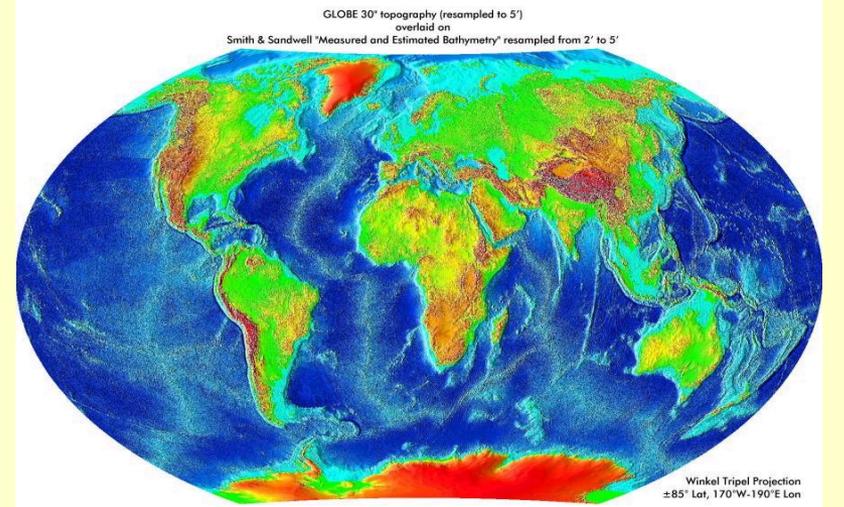
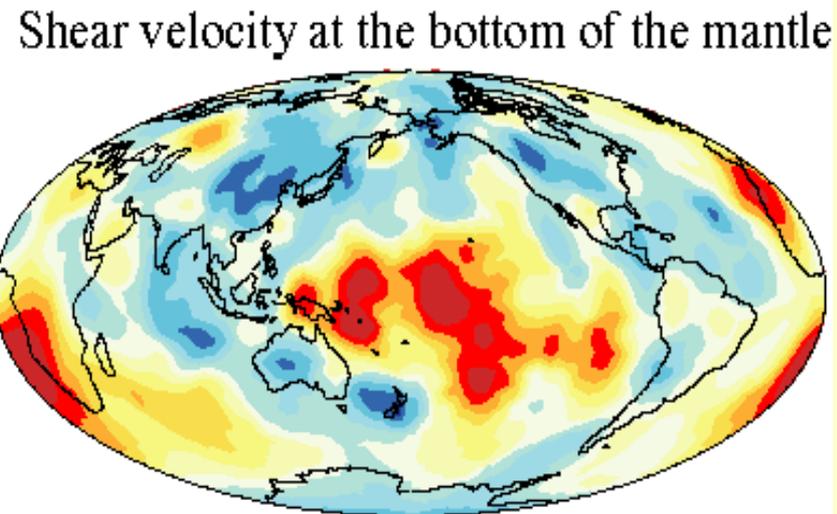
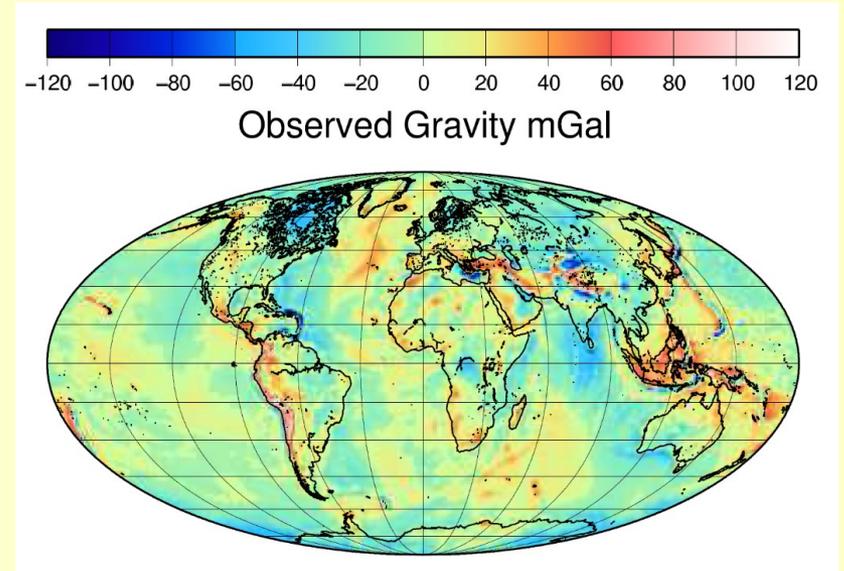
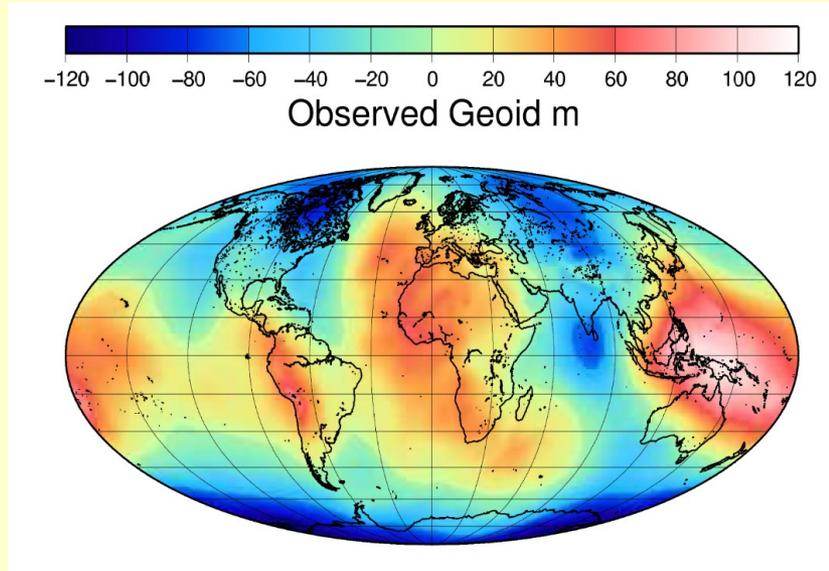


Géοide, pesanteur et forme de la Terre

Frédéric Chambat, ENS – Lyon, frederic.chambat.free.fr





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

Plan

I. Pourquoi la Terre est sphérique ?

... ou ellipsoïdale ?

II. Ce qui nous intéresse : les *anomalies*

(par rapport à l'ellipsoïde)

du géoïde, de la pesanteur

III. Mesures du géoïde et de la pesanteur

IV. Interprétations à différentes *longueurs d'ondes*

V. Résultats récents : variations temporelles à

grande échelle

I. Pour quoi la Terre est sphérique, ... ou ellipsoïdale

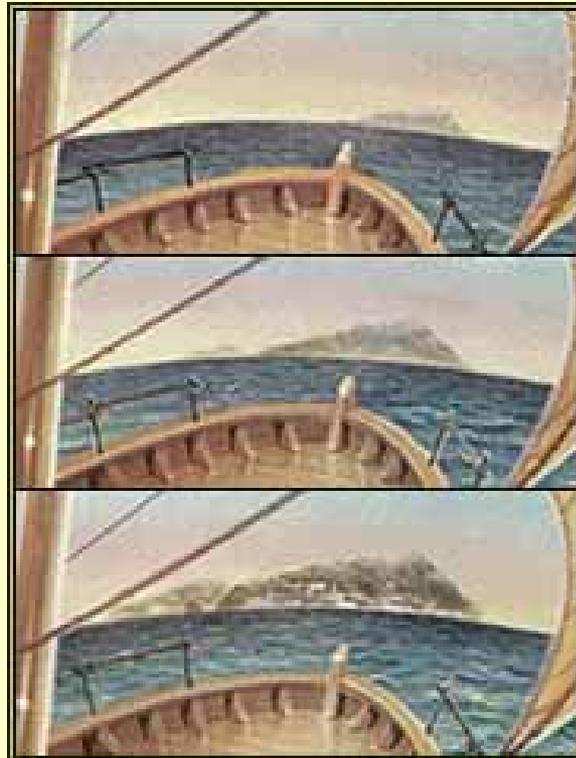
La Terre sphérique

Anaximandre (VI^e siècle av. J.-C.). Terre sans support.

Parménide (v. 515-450 av. J.-C.), école pythagoricienne, Terre sphérique.

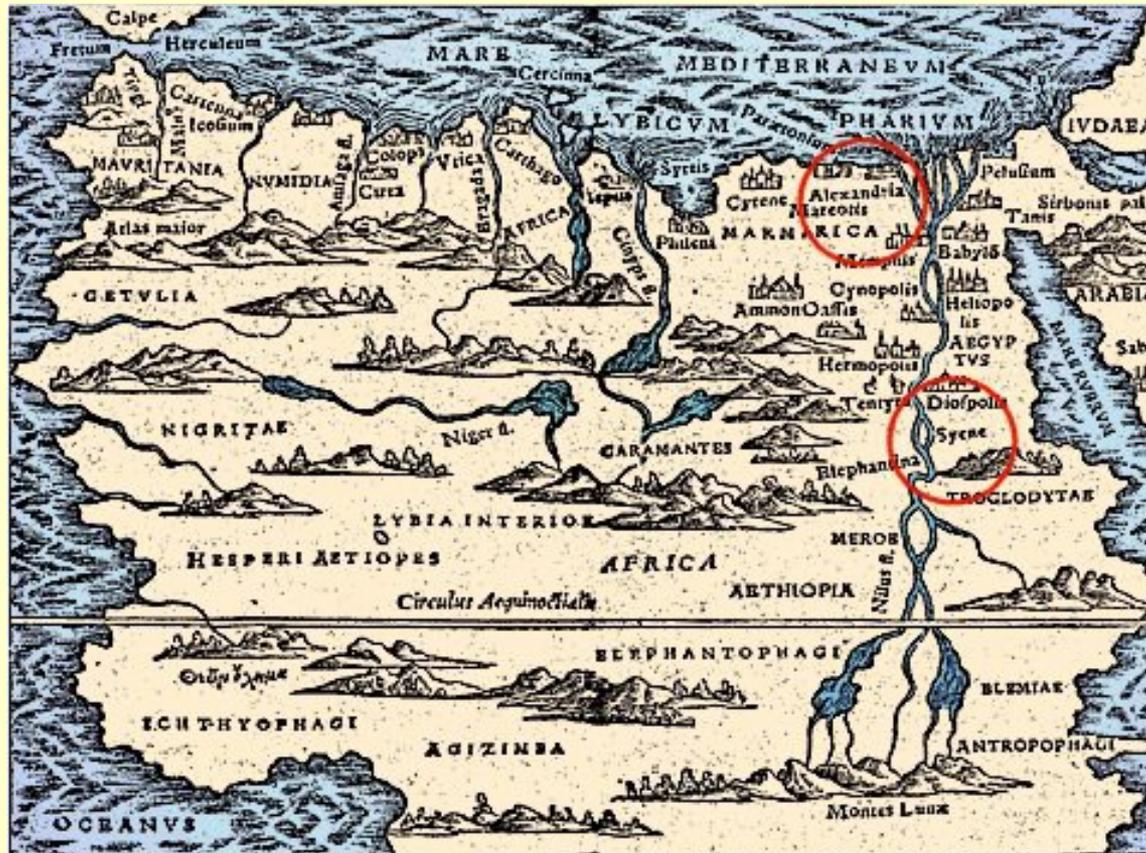
(**Pythagore**, v. 560-480 av. J.-C.).

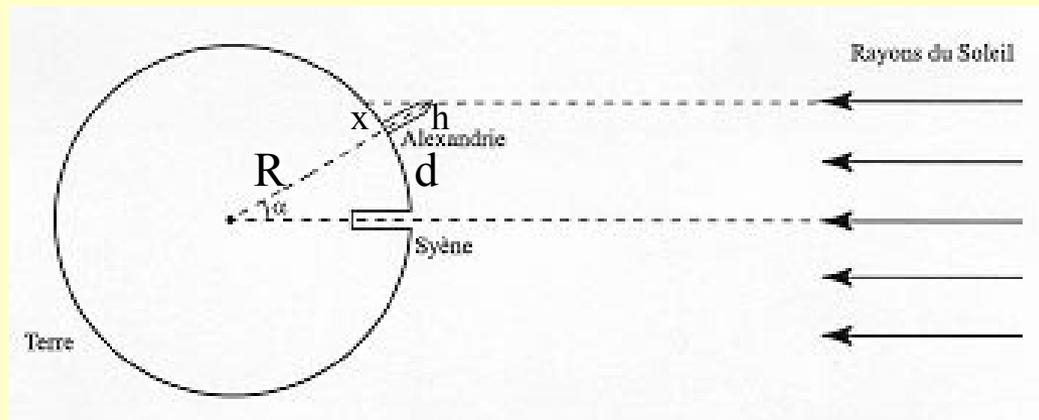
Aristote (v. 384-322 av. J.-C.). Arguments pour la sphéricité.



Eudoxe (v. 400-355 av. J.-C.). Première mesure connue.

Eratosthène (284-192 av. J.-C.). Première bonne mesure connue.

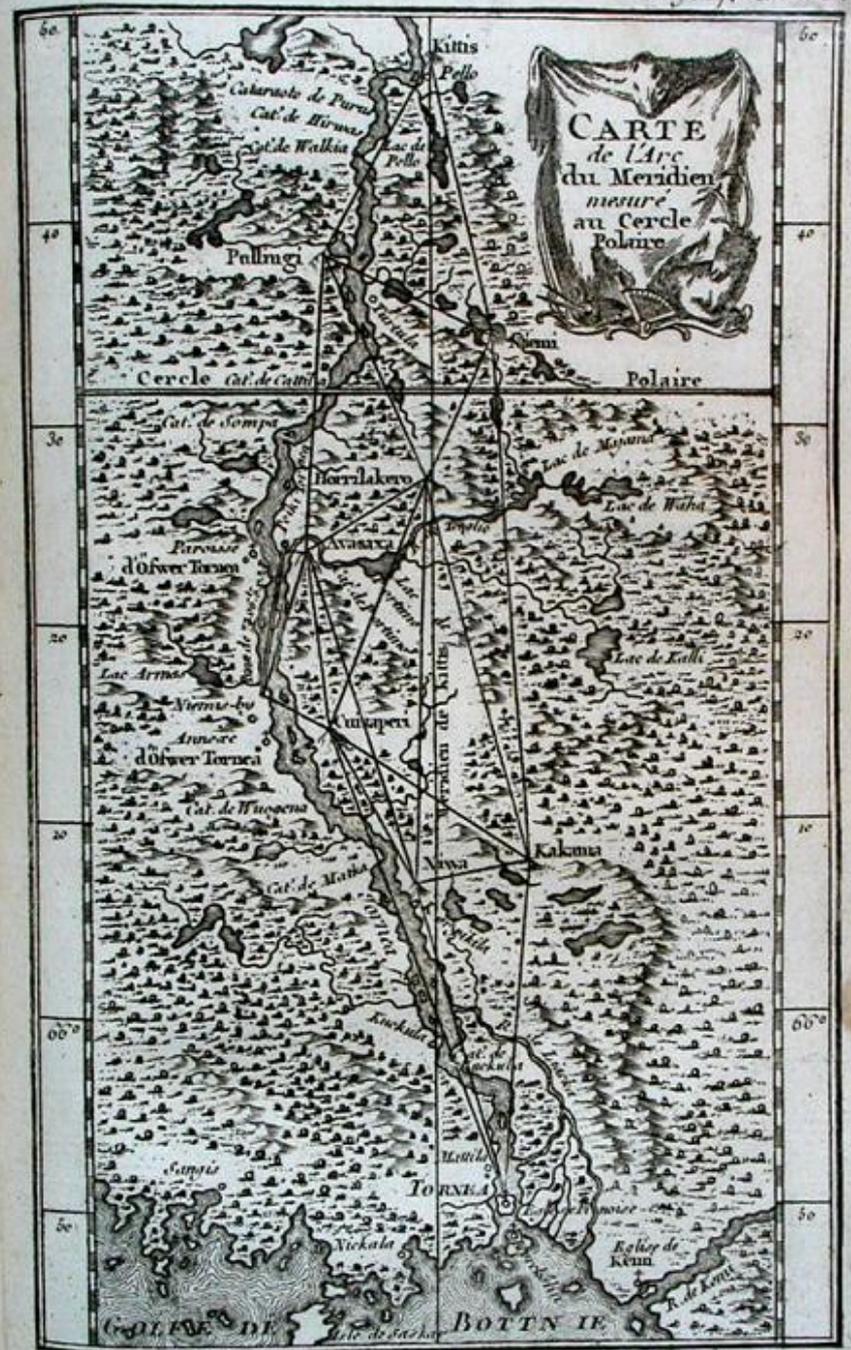




$$\text{tg } \alpha = x / h$$

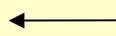
$$d = \alpha R$$

$$R = d / \alpha$$

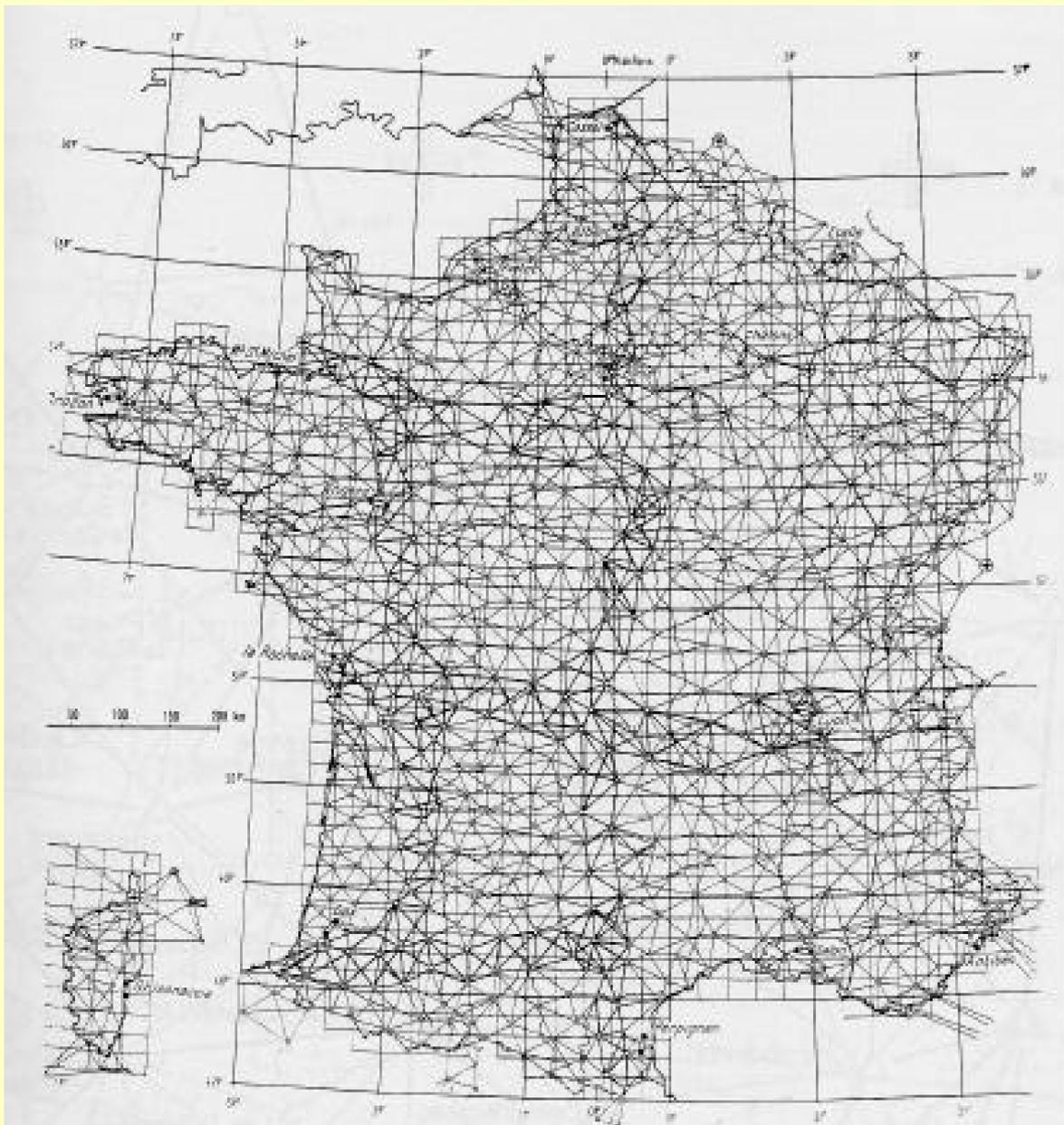


Par triangulation
(Fernel, Snellius)

Exemple :

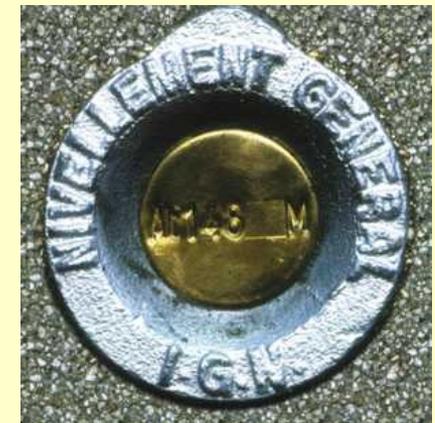
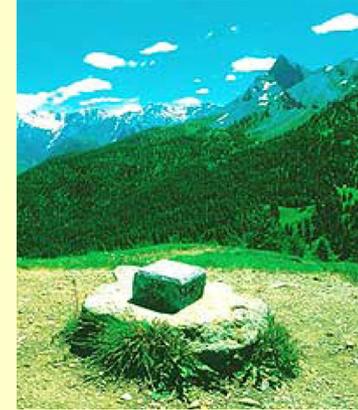


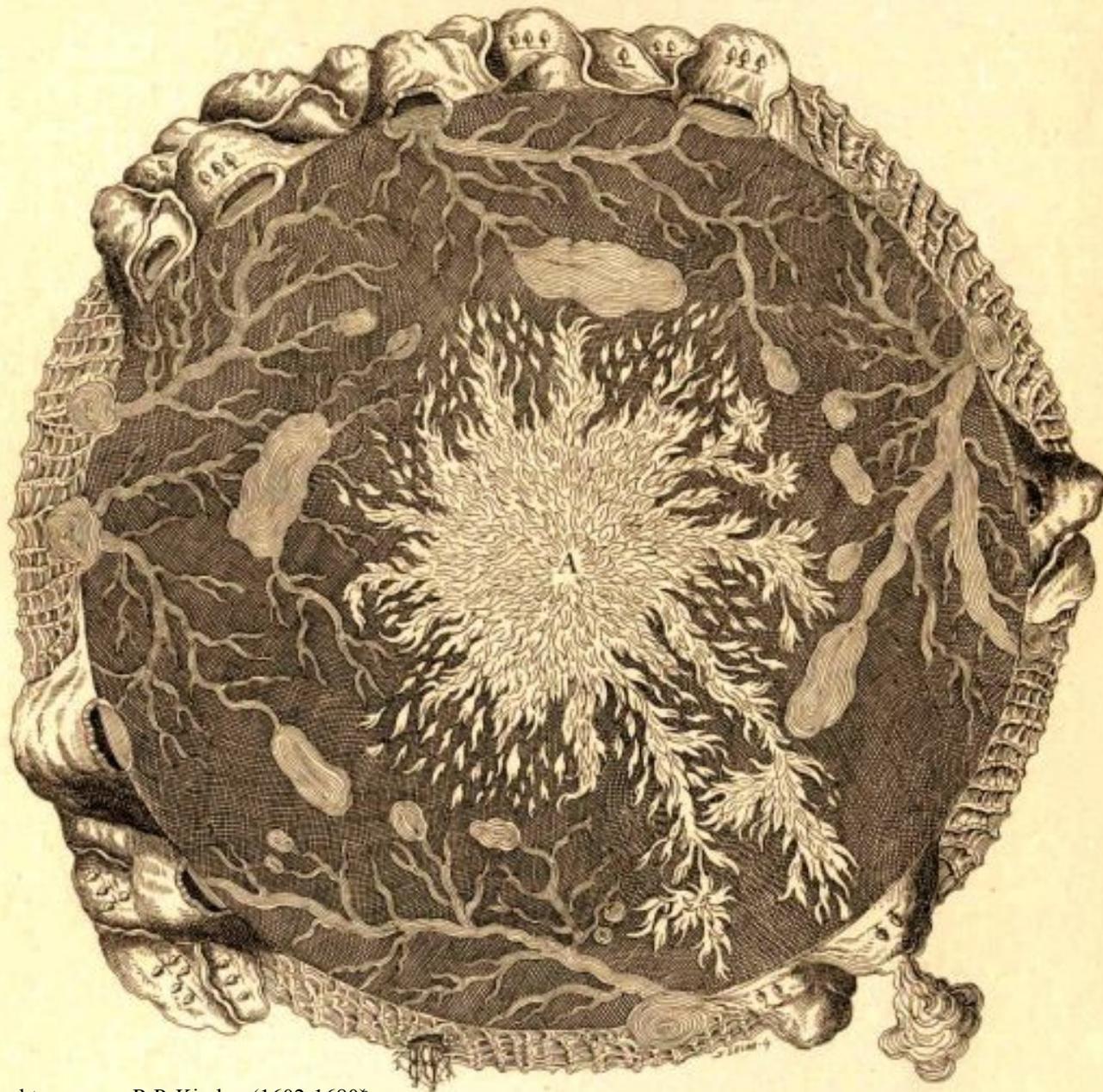
Maupertuis,
La Figure de la Terre
1738.
(expédition 1736)



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

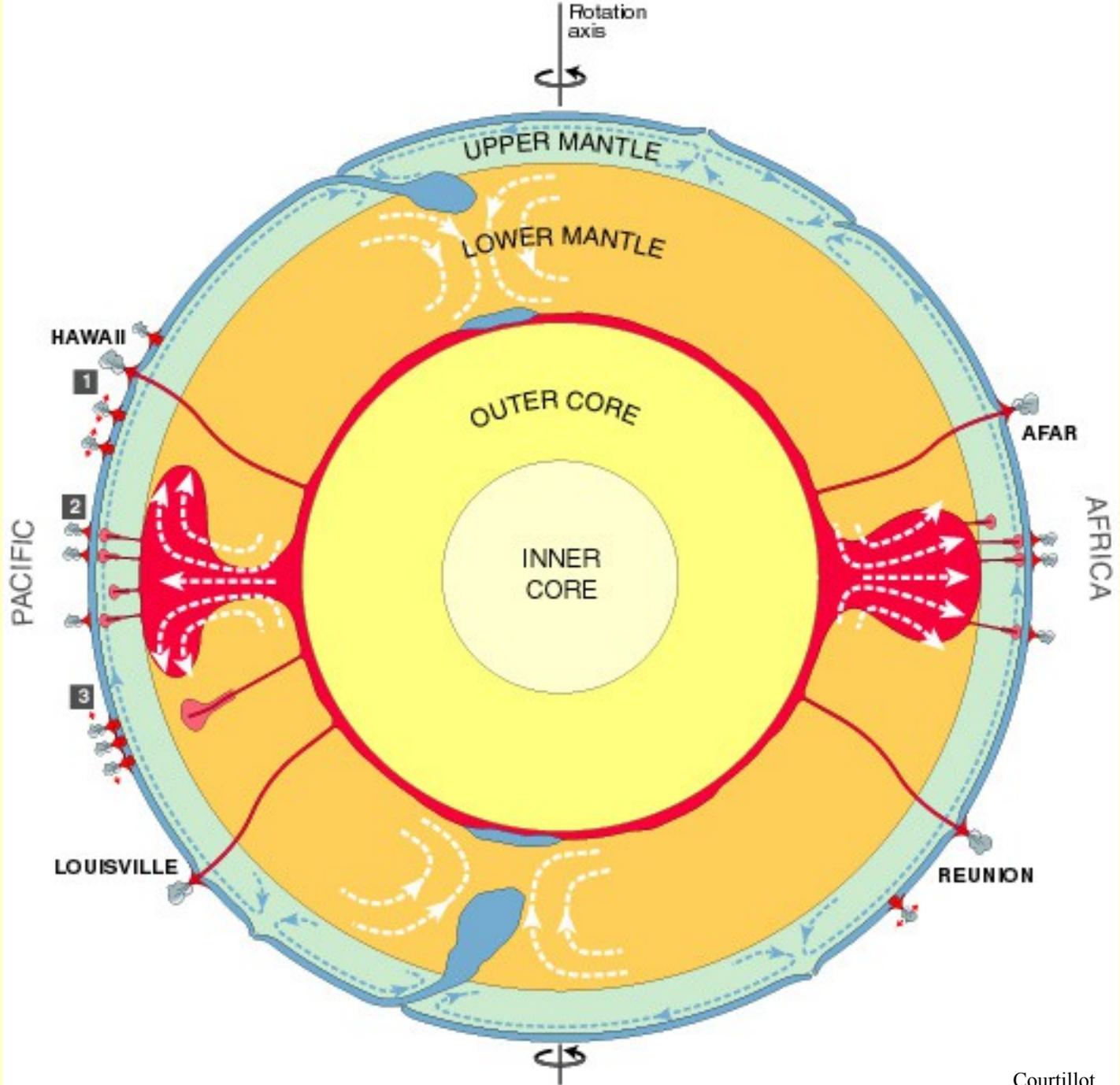
Puis 5000, 60000 points

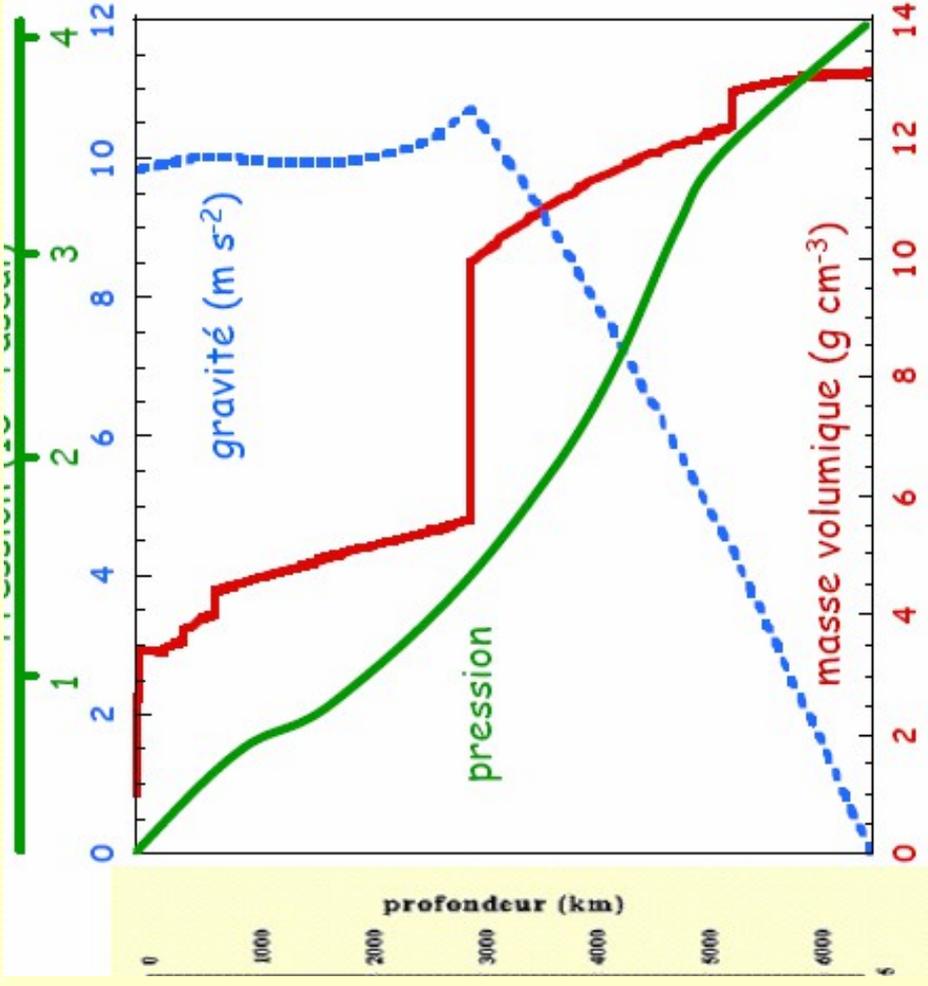




Mundus subterraneus , R.P. Kircher (1602-1680)

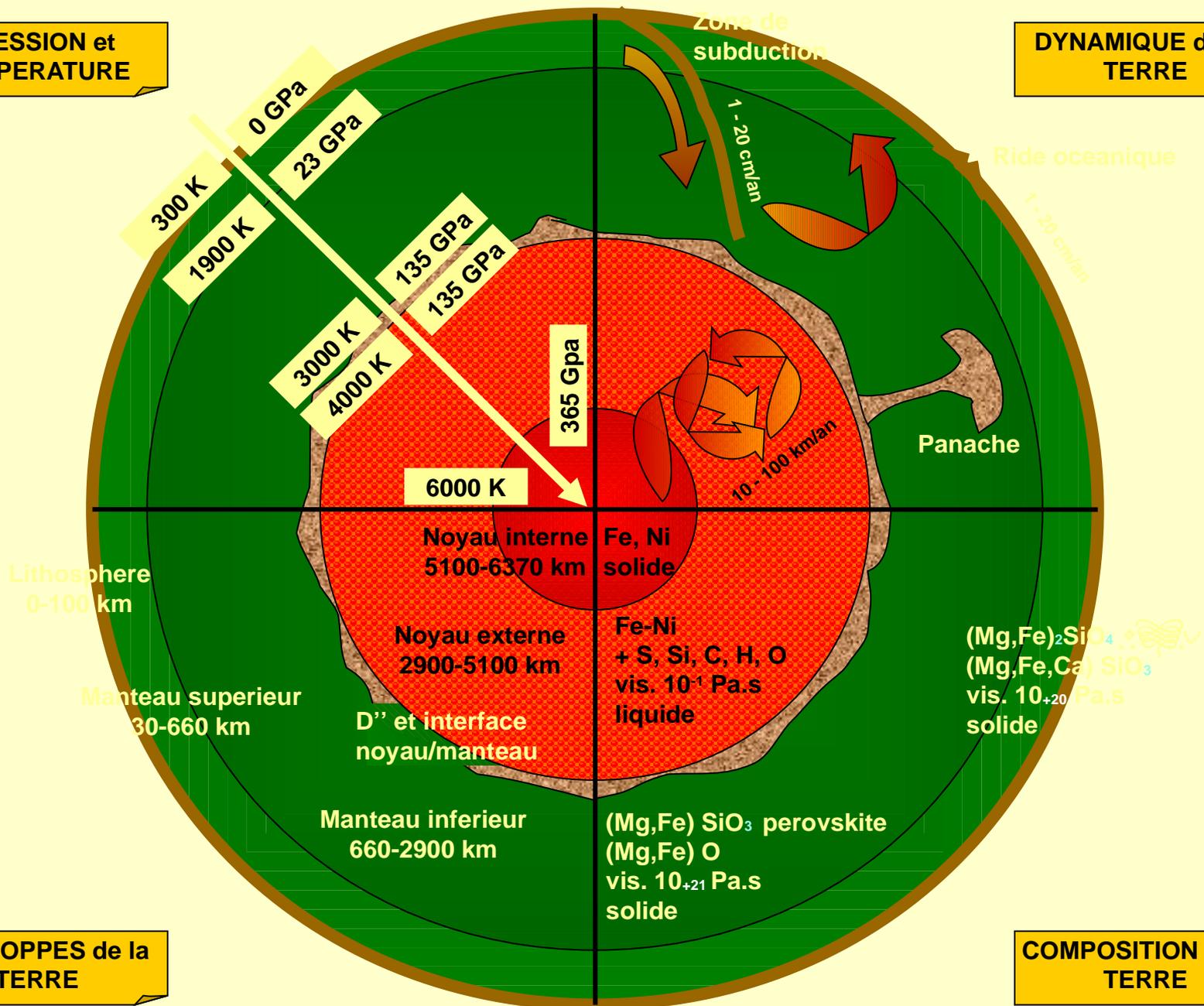
Le centre de la Terre imaginé au 17eme siècle





PRESSION et TEMPERATURE

DYNAMIQUE de la TERRE



ENVELOPPES de la TERRE

COMPOSITION de la TERRE

Sismologie

- Structure radiale au 1^{er} ordre

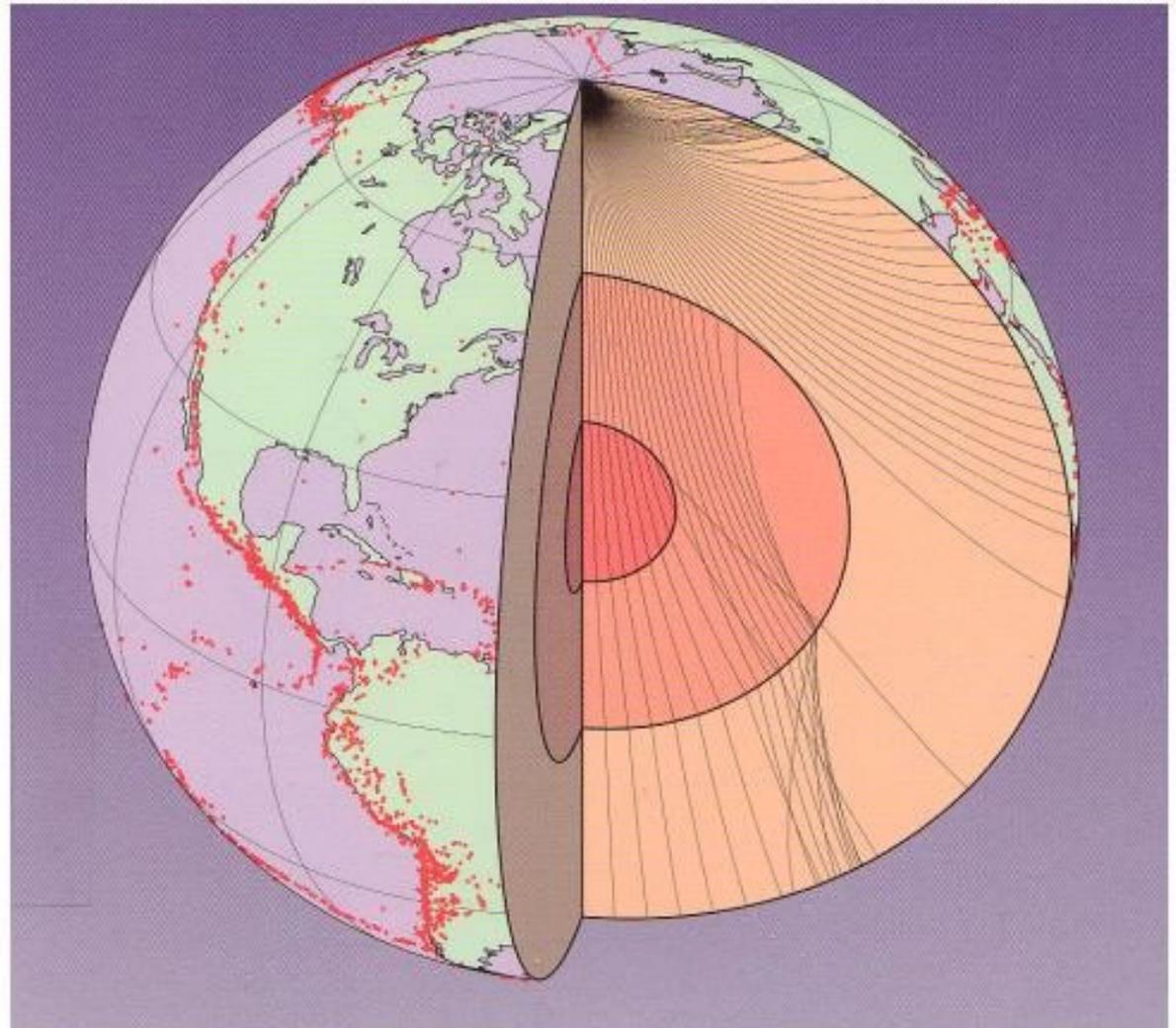


Figure
(1959).

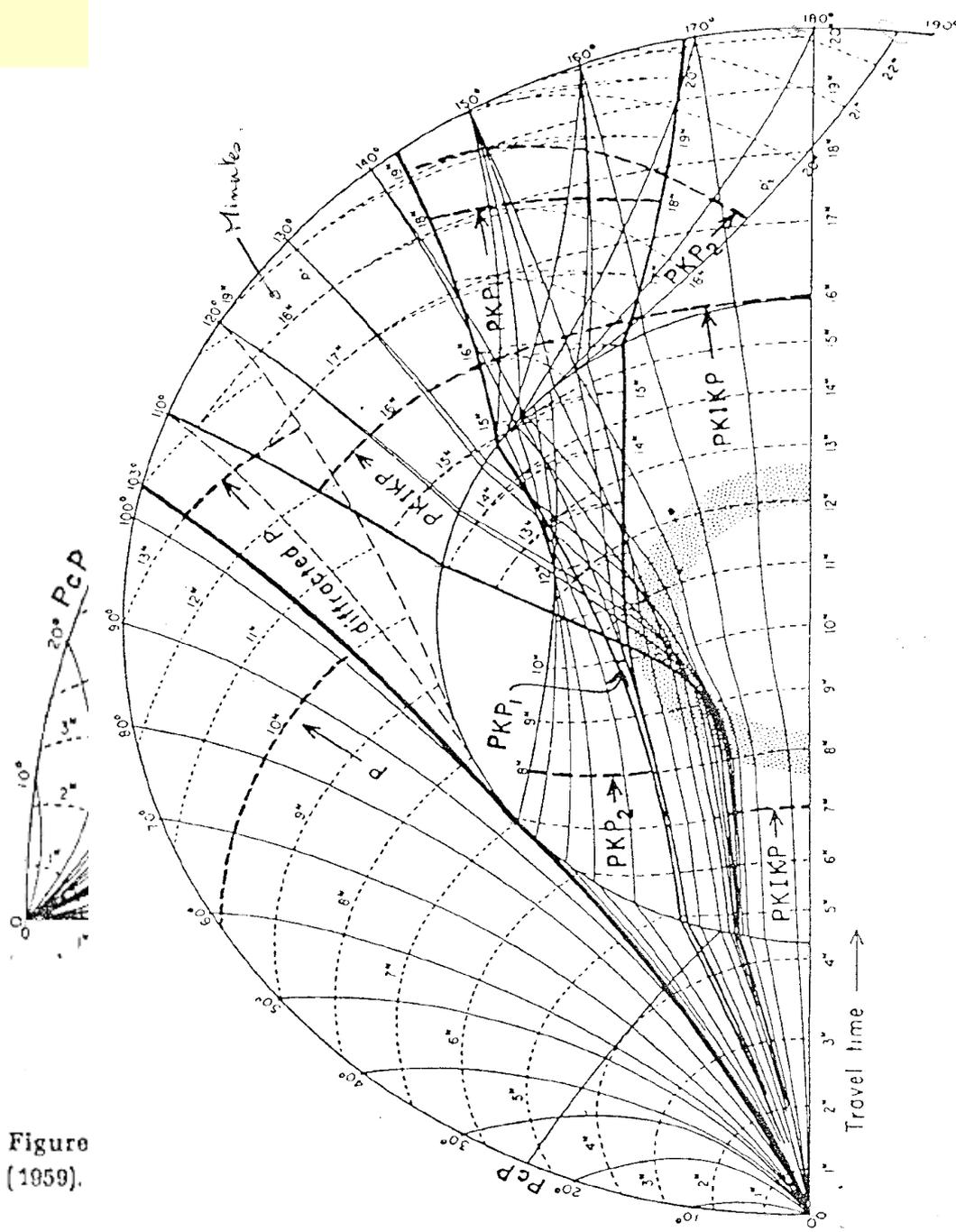
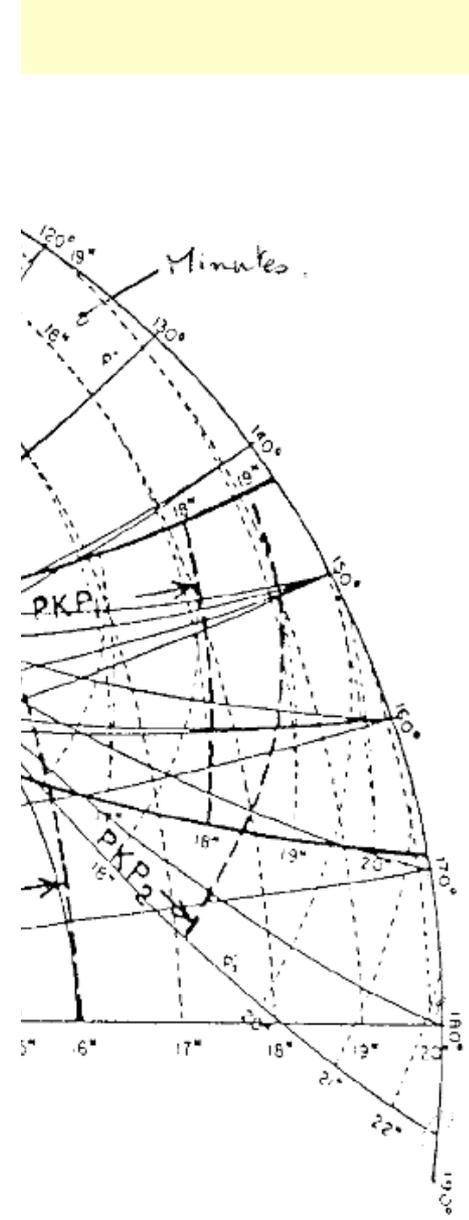


Figure 6.13. Rays and wavefronts for compressional waves in the Earth. Reproduced, by permission, from Gutenberg (1959). (Copyright Academic Press.)

by permission, from Gutenberg



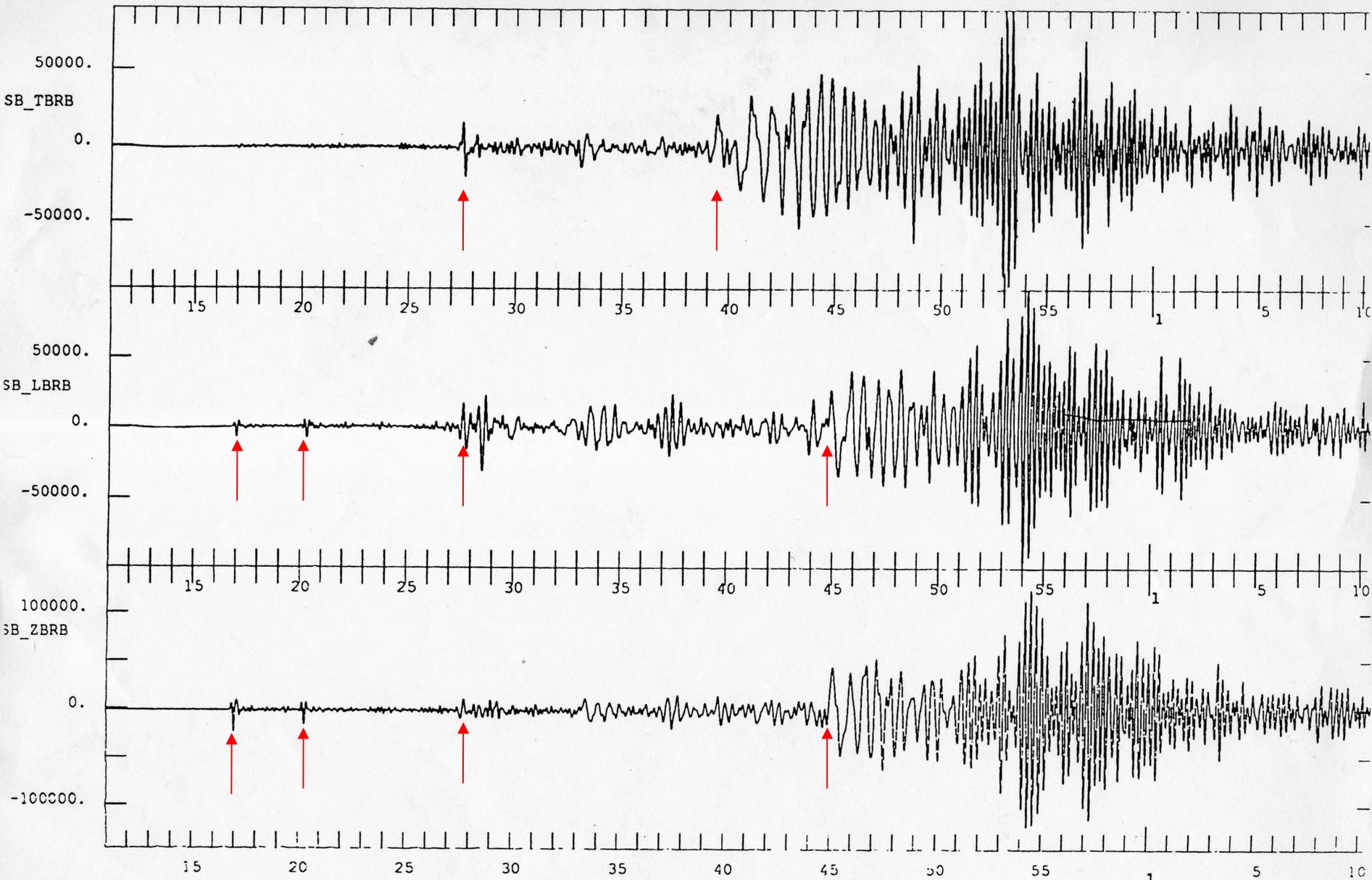
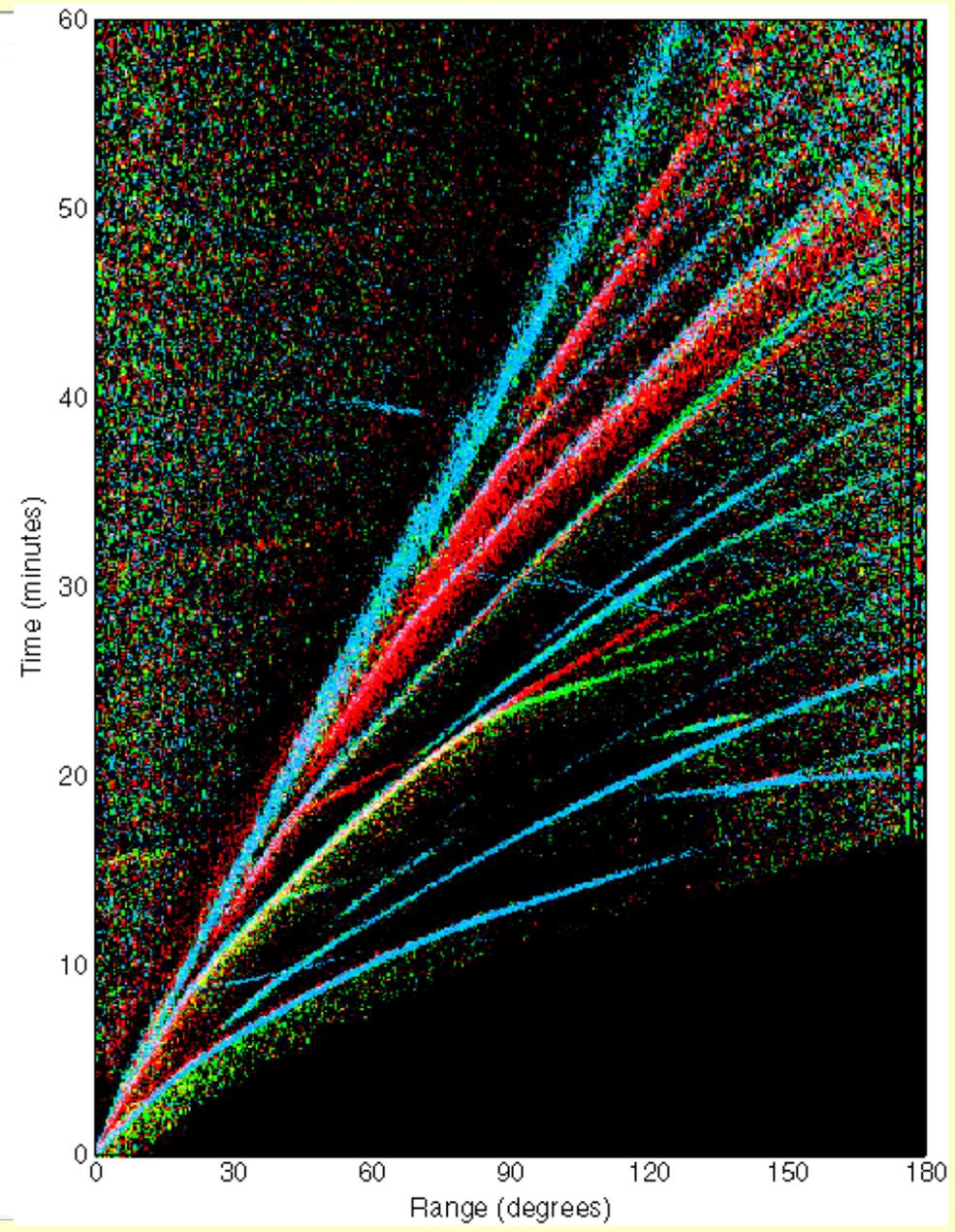
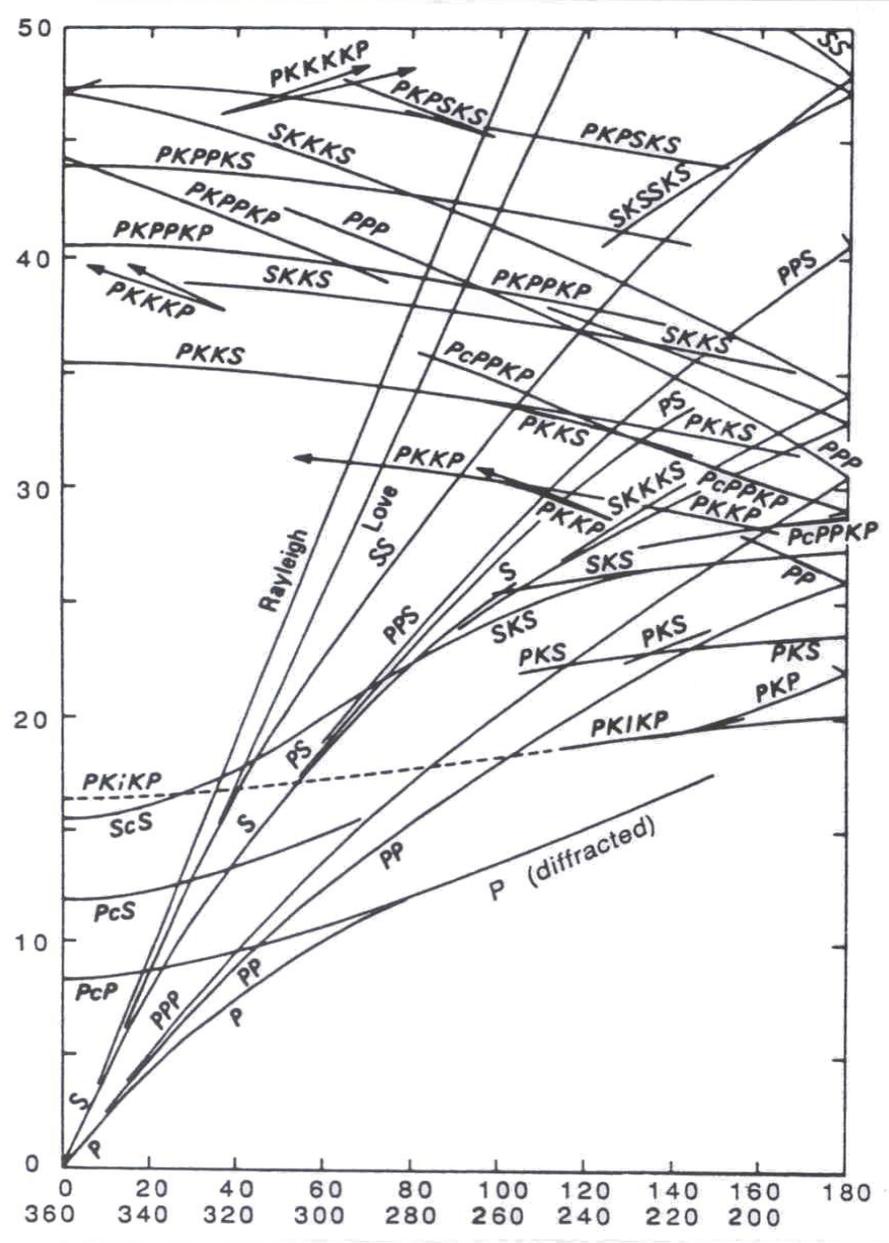


Fig. 18 - Sismogrammes enregistrés par une station du réseau GEOSCOPE lors du séisme de _____, en _____, le 17 oct 1989. La station sismique est située à Saint-Sauveur-en-Rue, près de Saint-Étienne, en France. Chaque trace représente :



30000 sismogrammes, 1000 séismes

Exercice : pourquoi la Terre est sphérique ?

Donnée : la contrainte maximale d'une roche en surface est

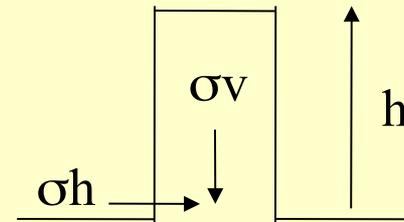
$$\sigma_{\max} \sim 3 \text{ kbar}$$

$$\sigma_h = 0$$

$$\sigma_v = \rho g h$$

$$\sigma_h - \sigma_v = \sigma_{\max}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow h_{\max} &= \sigma_{\max} / \rho g \\ &= 3 \cdot 10^8 / 3000 / 10 \\ &= 10 \text{ km} \end{aligned}$$



Sur Mars $g = 3,7$, $h = 27 \text{ km}$ (Olympus Mons)

Rayon à partir duquel un astre est sphérique?

$$g = G M / R^2 = 4 \pi G \rho R / 3$$

$$h_{\max} = \sigma_{\max} / \rho g$$

L'astre n'est plus sphérique quand $h = R$ ou $R/2$

On trouve $R = 500 \text{ km} = \text{gros astéroïdes} \ll \text{planètes}$

Les planètes ont la forme d'un fluide (parfait)†

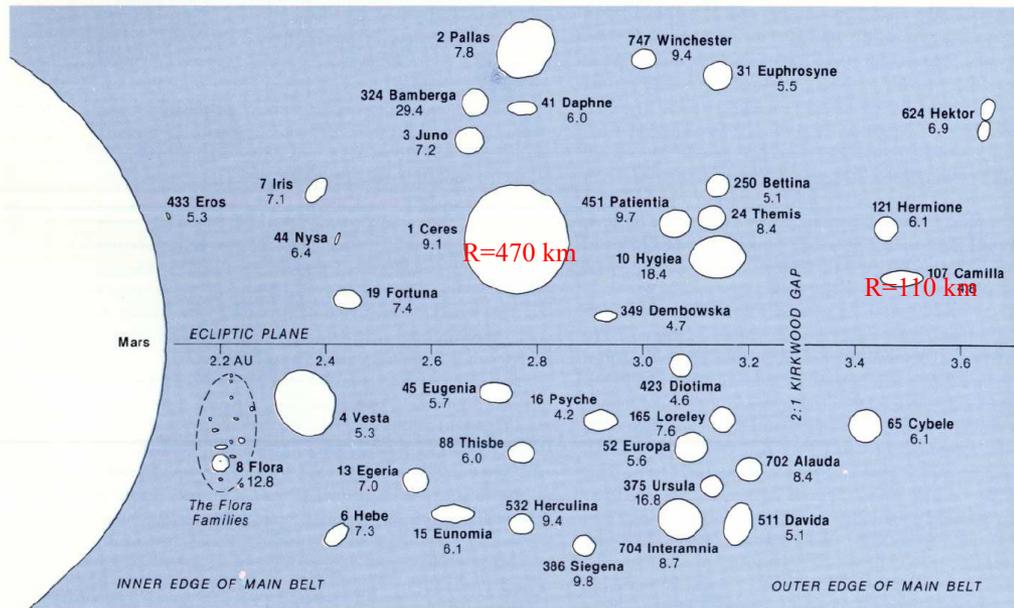
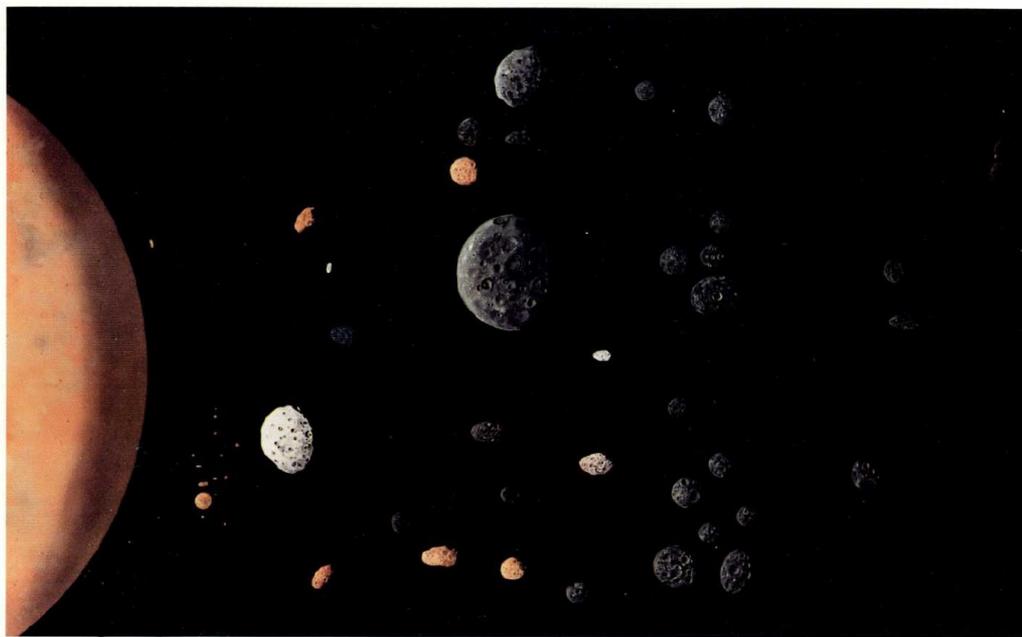
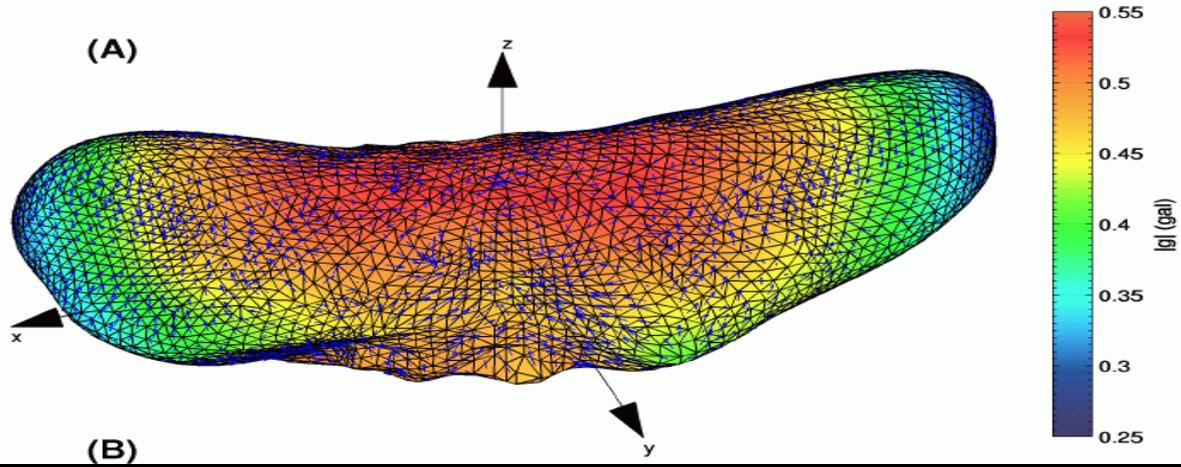
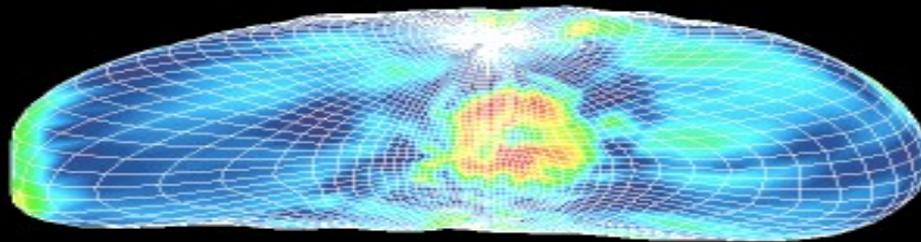


Figure 3. This representation of the physical properties of interesting asteroids includes most of the asteroids larger than about 200 km in diameter. They are portrayed in their correct relative sizes and shapes (the limb of Mars is shown for comparison); colors and albedos are also indicated. The bodies are positioned at their correct relative distances from the Sun. Asteroids located near the top or bottom of the diagram occupy relatively eccentric or inclined orbits (or both), while those shown near the ecliptic plane move in relatively circular, noninclined orbits. Rotation periods, in hours, are given in the lower panel. Among the special smaller asteroids indicated are members of the Flora families larger than 15 km in diameter, but this illustration would be hopelessly cluttered if all asteroids of comparable size were shown – an estimated 1,150 asteroids in the main belt alone have diameters larger than 30 km, yet only five Flora family asteroids attain that size. Note the contact-binary Trojan asteroid 624 Hektor.

EROS



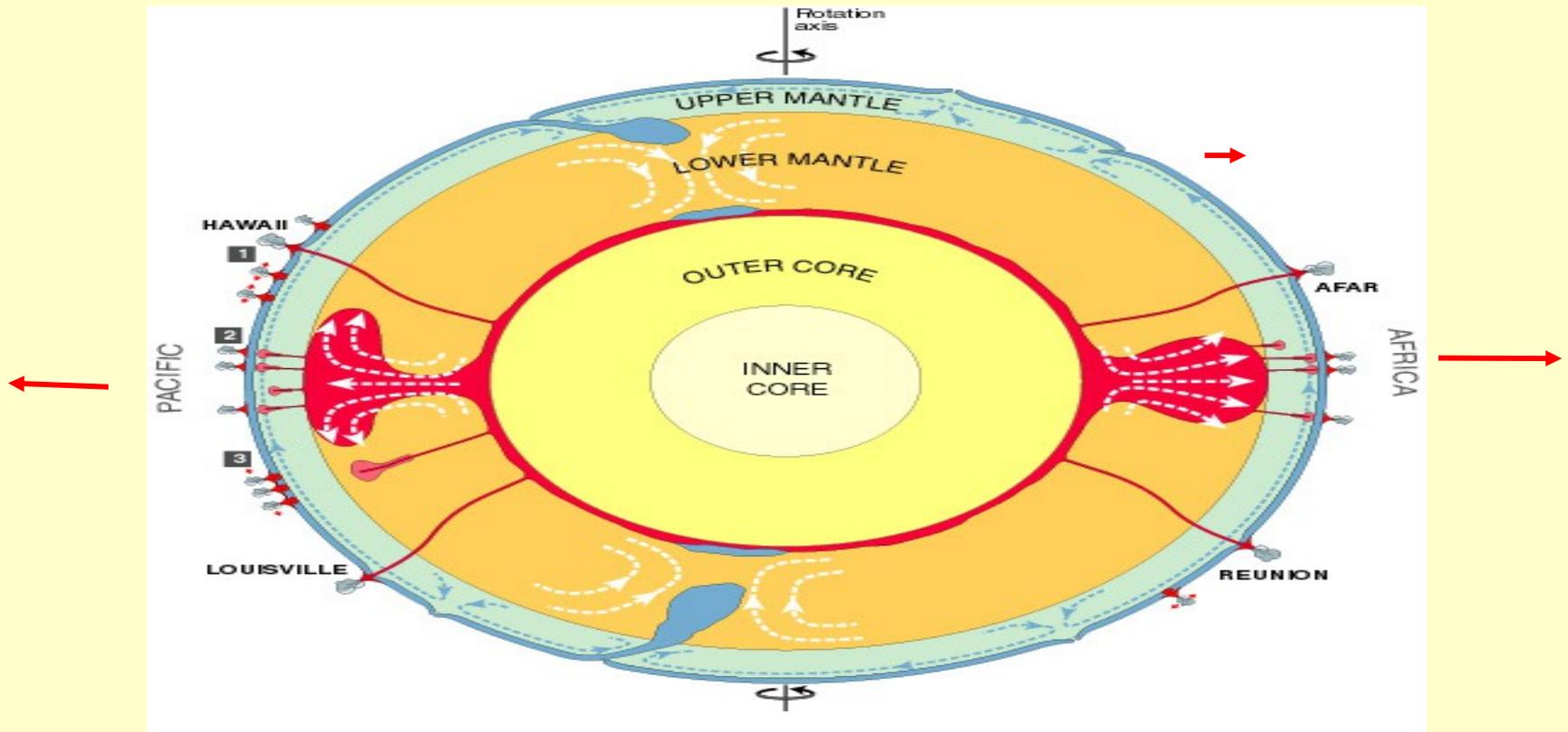
The shape of 433 Eros from the NEAR-Shoemaker Laser Rangefinder



Effet de la rotation diurne

gravité = attraction de la Terre

pesanteur = attraction + accélération centrifuge (axifuge)



& **aplatissement** de la Terre aux Pôles, d'environ 1/300.

L'ellipsoïde de référence

$a = 6\,378\,137,0$ m le rayon équatorial

$c = 6\,356\,752,3$ m le rayon polaire

$(f = a - c/a = 1/298,257$ l'aplatissement géométrique)

M la masse

$\omega = 7,292\,115 \times 10^{-5}$ rad/s la vitesse angulaire de rotation

$g(\text{colat}) = 9,780327 (1 + 0,0053 \sin^2(\text{lat}))$

Notion d'anomalies

Vous pesez (100 kg) :

983 N au pôle Nord

978 N à l'équateur

978.05 N en Indonésie

977.95 N en Inde

976 N au sommet de l'Everest

Pesanteur = celle d'un ellipsoïde + anomalies

10 m/s² 10⁻³ m/s²

Forme du géoïde = ellipsoïde + anomalies

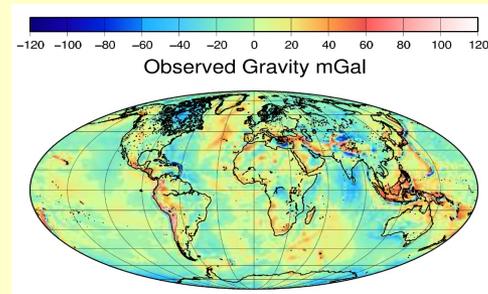
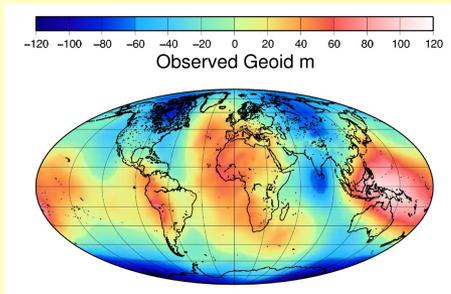
10 km 100 m

Exemple :

Anomalies à l'air libre = pesanteur mesurée –
pesanteur de l'ellipsoïde de référence à l'altitude de mesure

“Hauteur” du géoïde = hauteur du géoïde au dessus de l'ellipsoïde

II. Les anomalies de la pesanteur et du géoïde



$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2$$

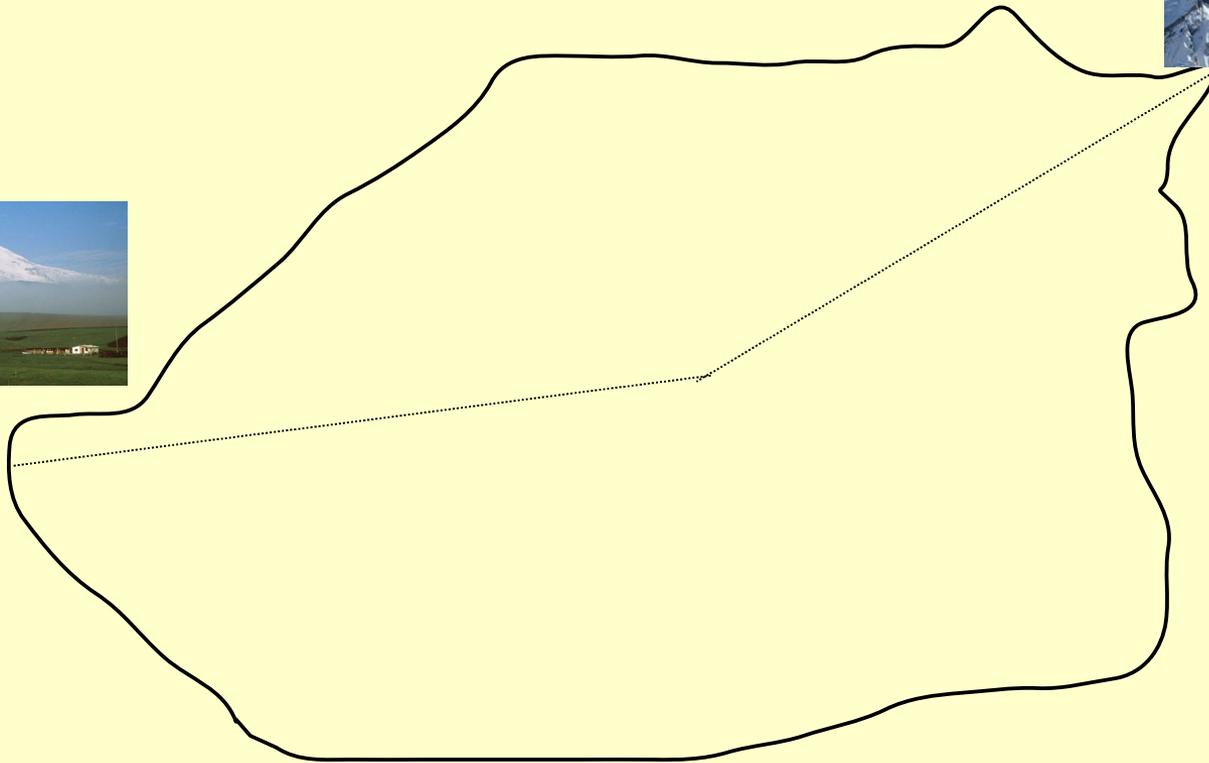
$$100 \text{ mGal} = 10^{-3} \text{ m/s}^2 = 10^{-4} \text{ g}$$

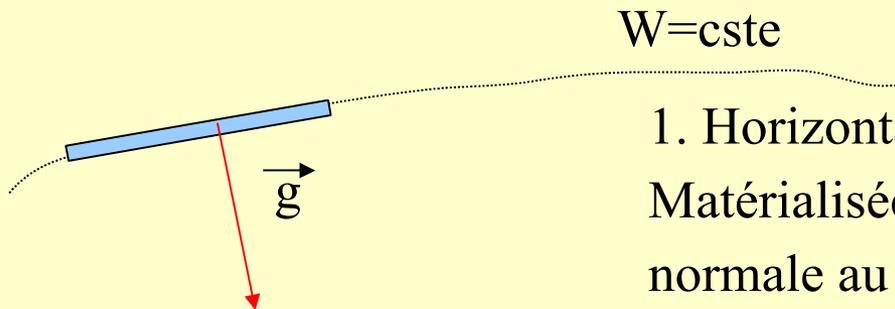
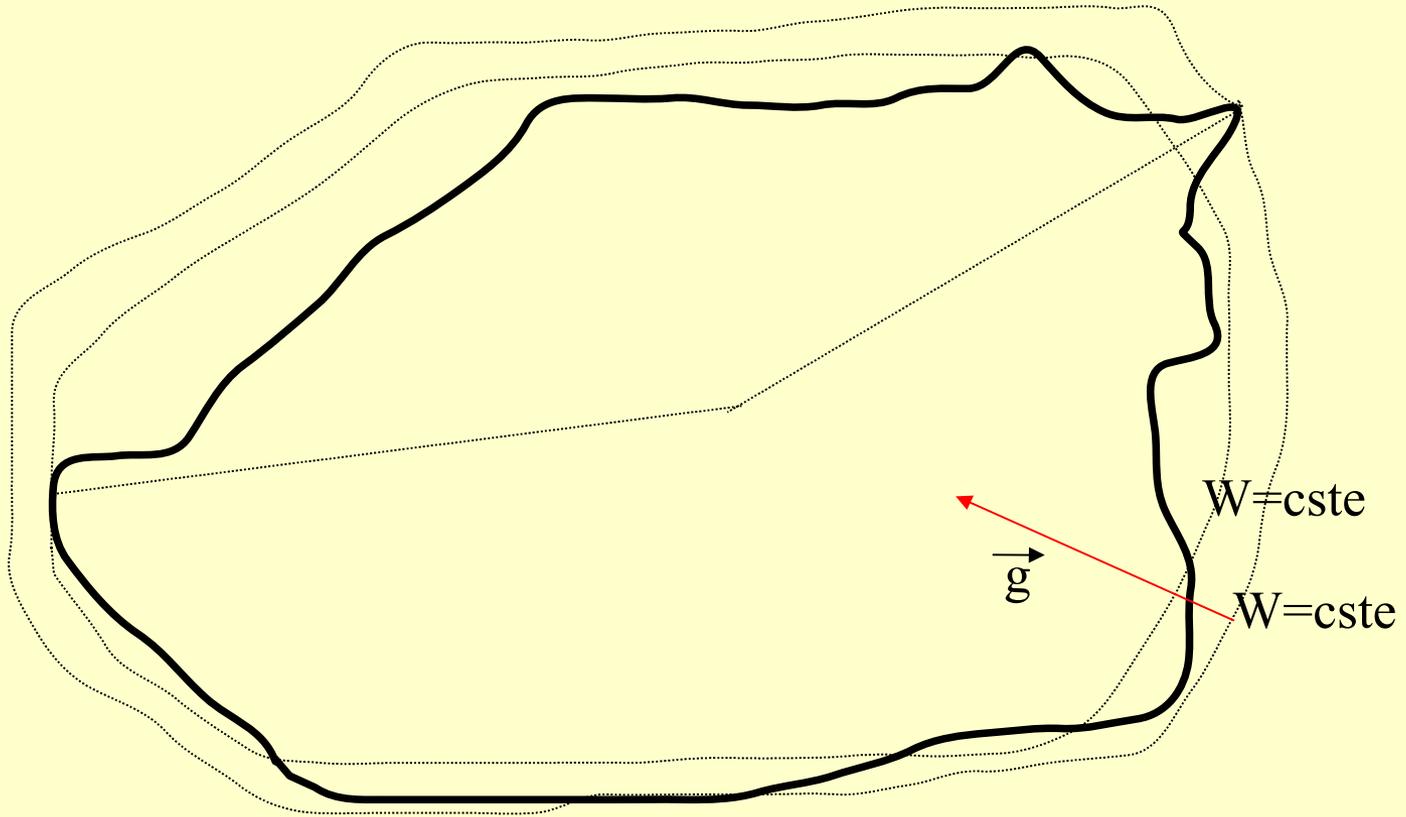
Le géoïde

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

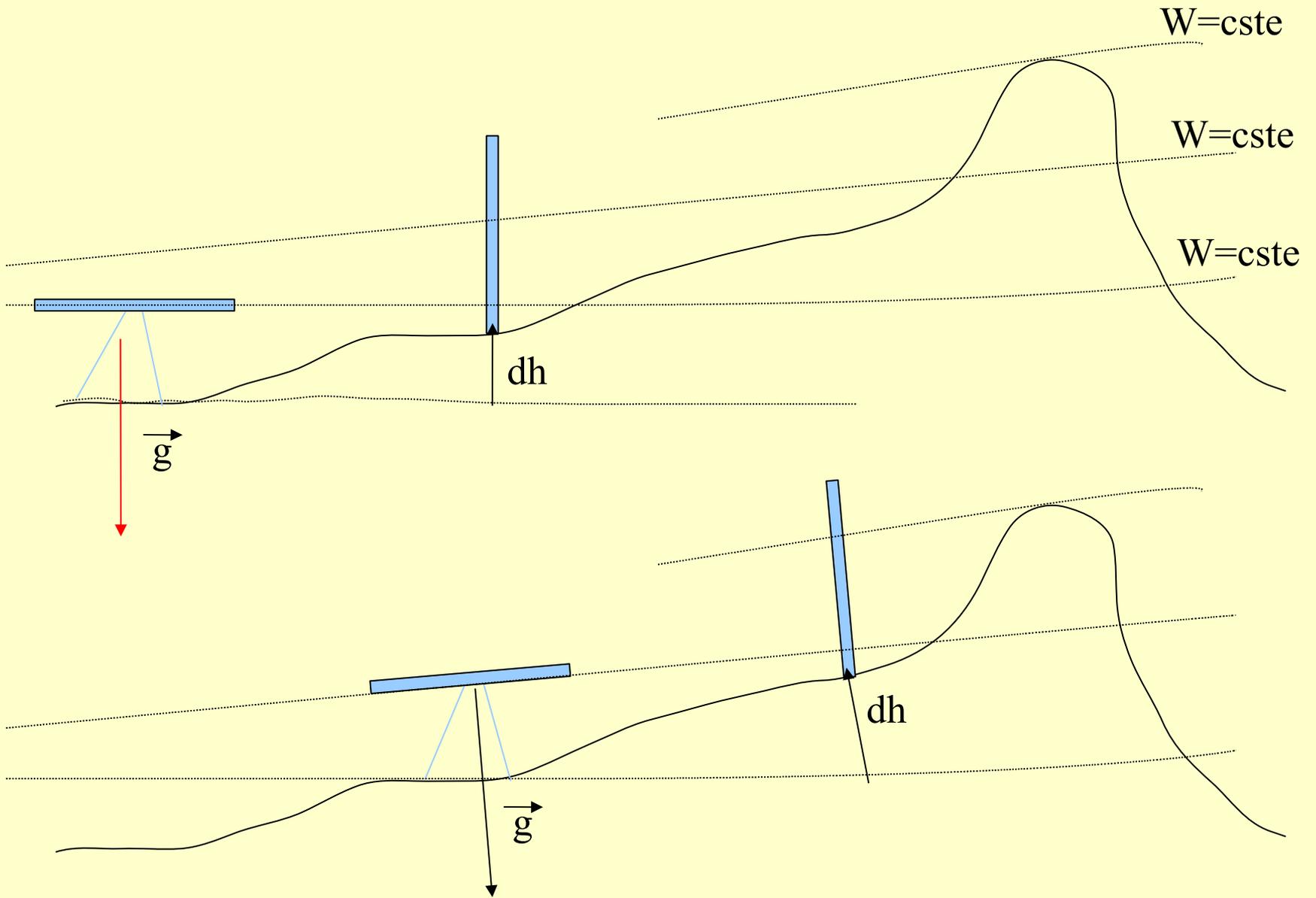


Pourquoi l'Everest est moins « haut » que le Chimborazo ?
Ou plutôt, plus haut ?





1. Horizontale = Equipotentielle
 Matérialisée par le niveau à bulle et la
 normale au fil à plomb

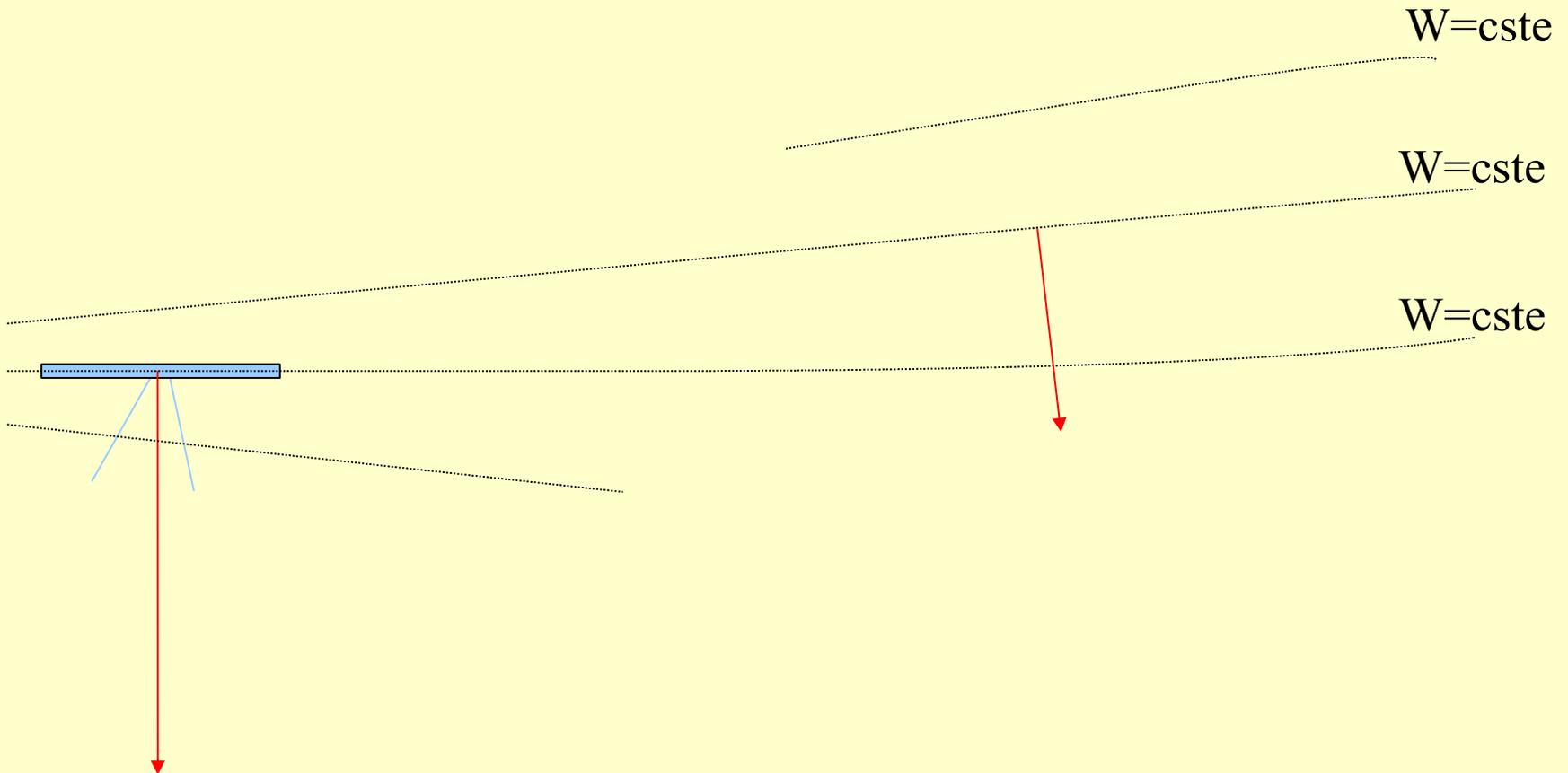


2. $W = \text{cste} \Leftrightarrow h = \text{cste}$ (à très peu près)

$$\vec{g} = \overrightarrow{\text{grad}} W$$

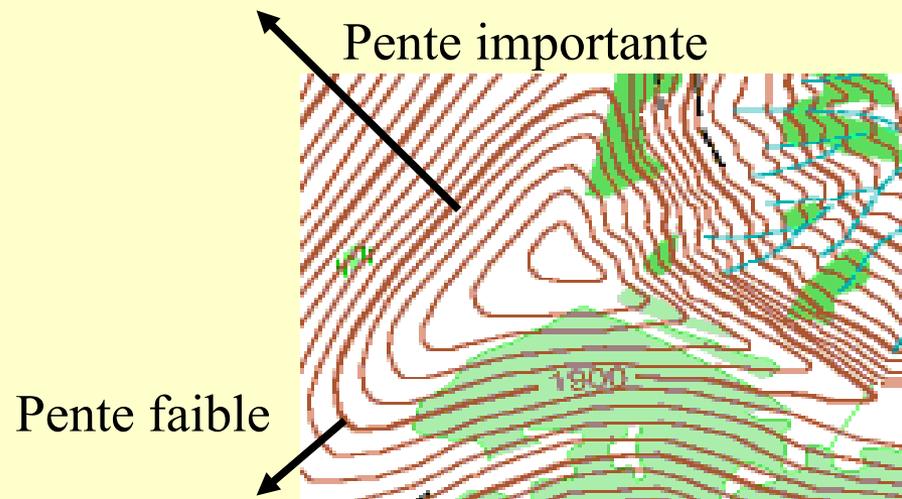
3. Pesanteur :

direction de g : normale aux équipotentielles,
intensité de g : proportionnelle à la variation de W ,
la pesanteur n'est pas constante sur le géoïde.



~~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 :



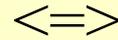
4. La surface d'un fluide est horizontale :
elle matérialise donc une équipotentielle et
une perpendiculaire à g .

La surface des océans (supposés au repos)
est donc une équipotentielle : on l'appelle le géoïde.

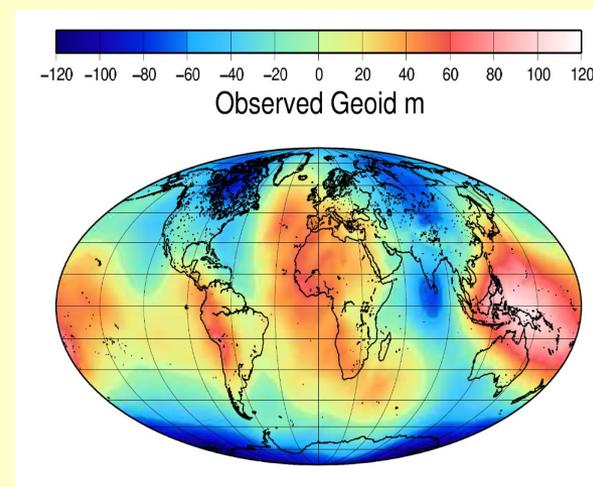
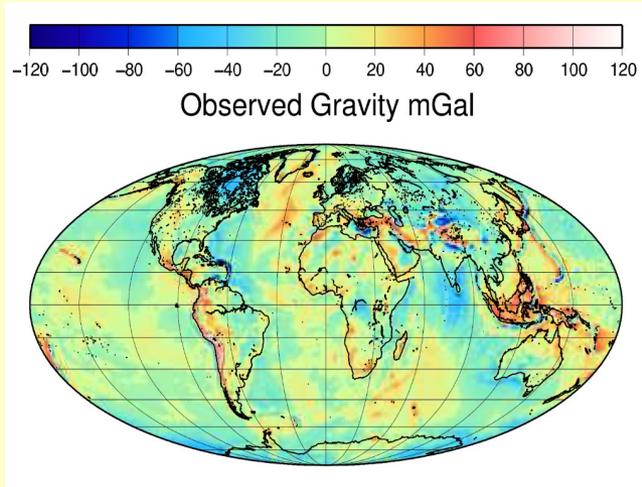
C'est la surface d'altitude $h=0$.

Intensité de la pesanteur et forme du géoïde ne sont
donc *a priori* pas liés mais ...

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



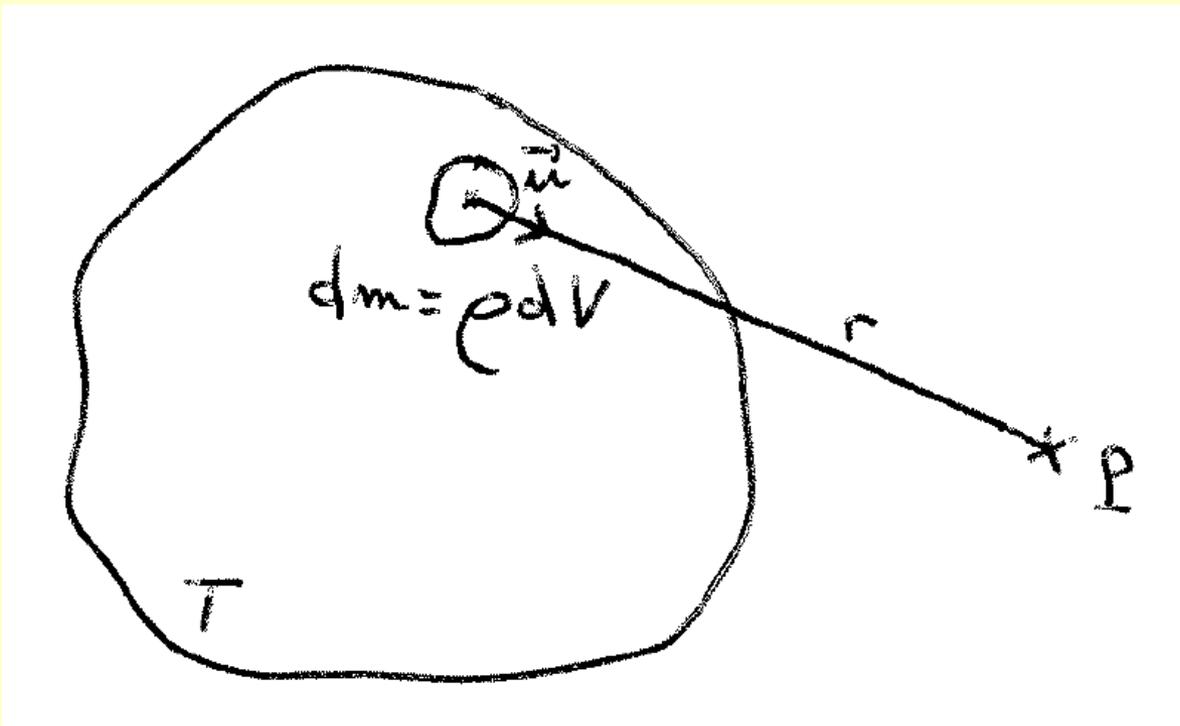
Connaître le géoïde sur toute
la surface de la Terre



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) :

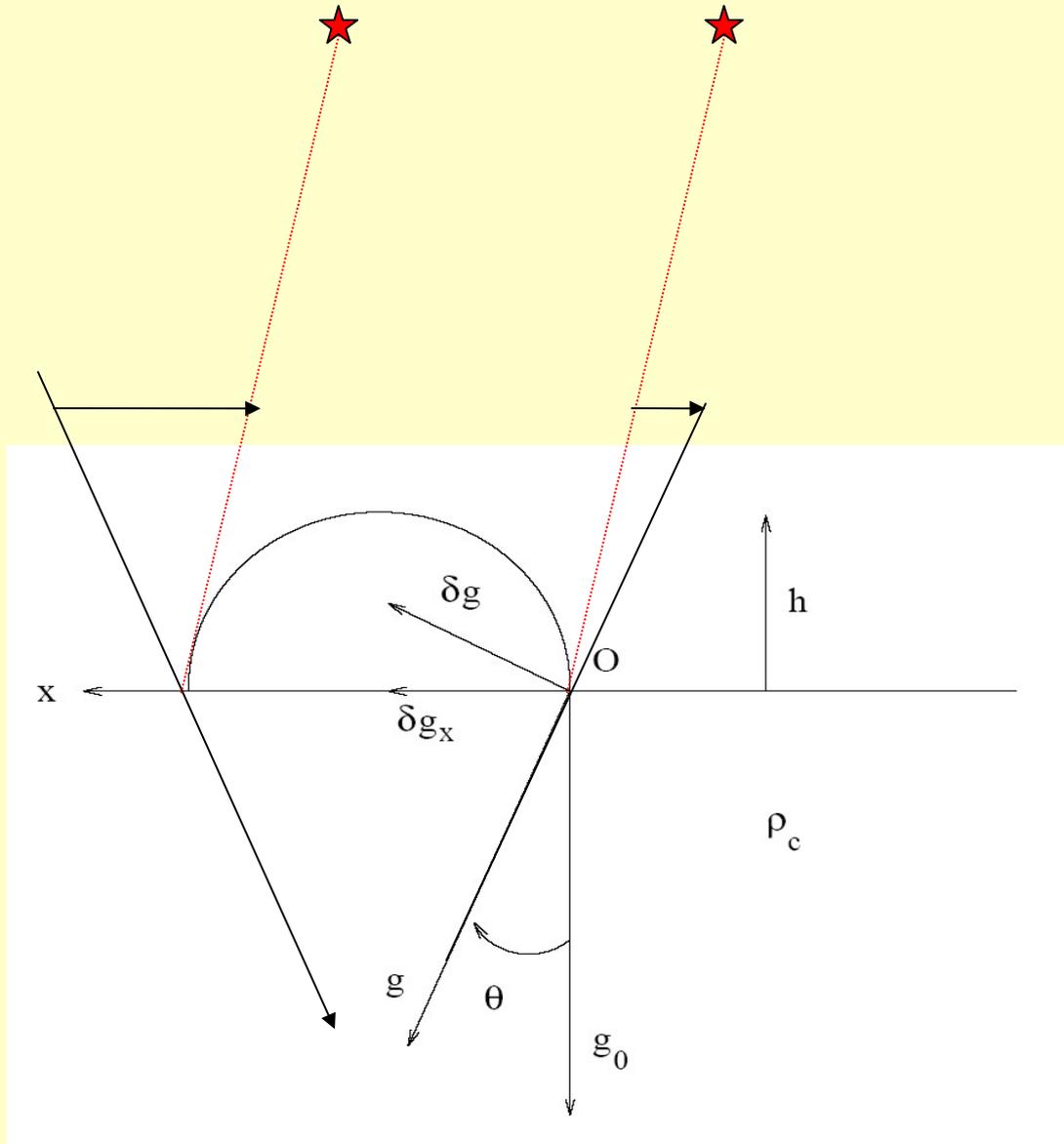


$$\vec{g} = -G \int_T \frac{\vec{u}}{r^2} dm + \text{acc}^n \text{ centrifuge}$$

$$W = G \int_T \frac{1}{r} dm + \text{pot. centrifuge}$$

(pesanteur = gravité + accélération centrifuge)

Ordre de grandeur des déviations de la verticale ?



Bouguer 1749
Maskelyne 1774
--> 4,5

Le modèle de quasigéoïde QGF98

Données:

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

Modèle mondial:
OSU91A

Modèle numérique de terrain:
resolution 140 * 140 m

Méthode de calcul:

Retrait restauration,
méthode du terrain résiduel,
intégrations classiques

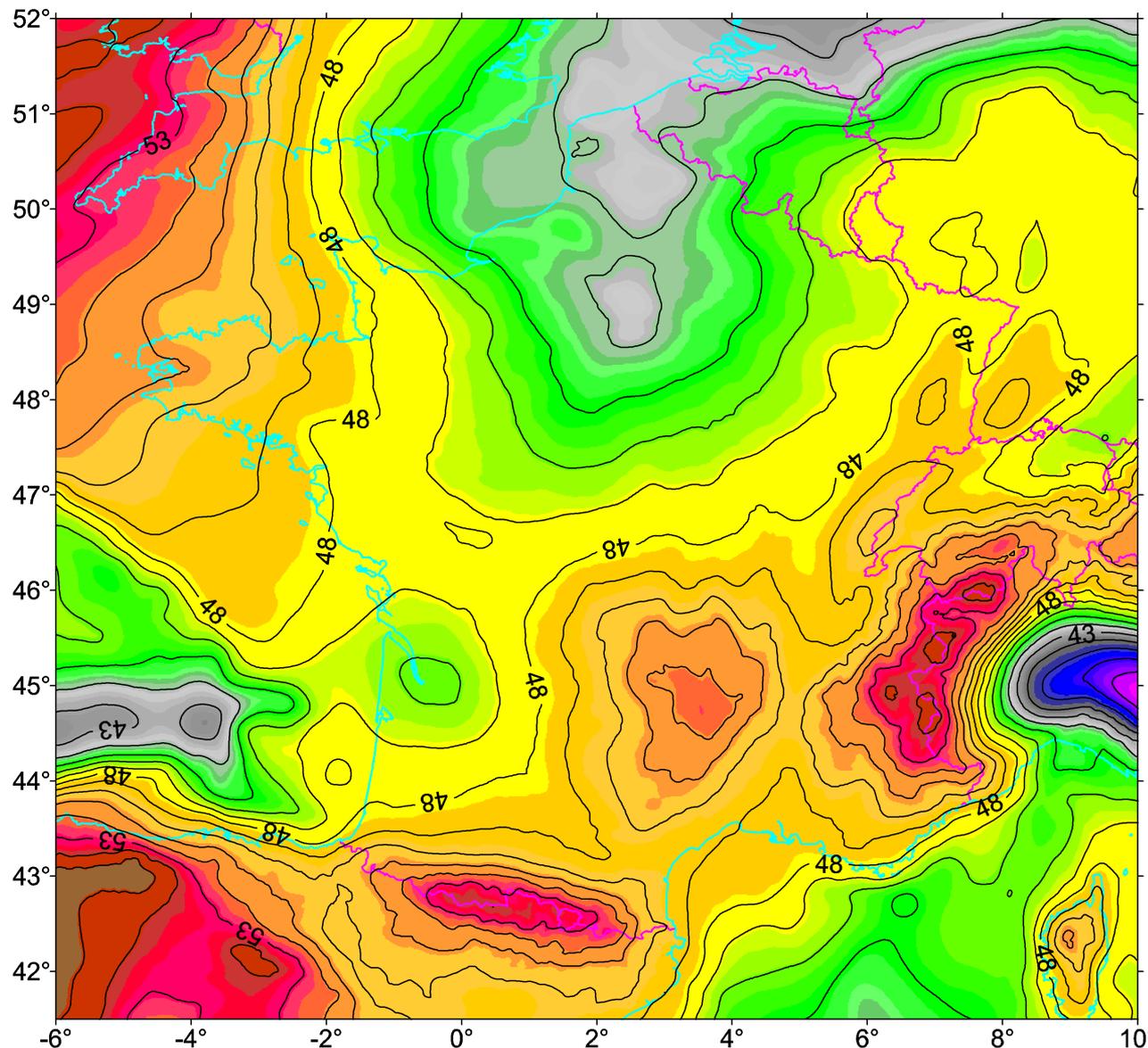
Rayon des corrections
de terrain: 110 km

Rayon d'intégration
de Stokes: 2°

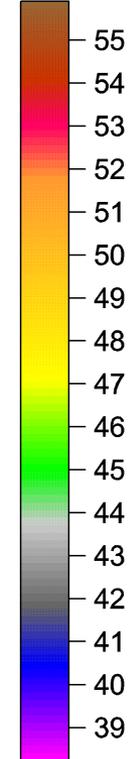
Logiciels:

Gravsoft
(Forsberg and Tscherning)

Logiciels de l'auteur



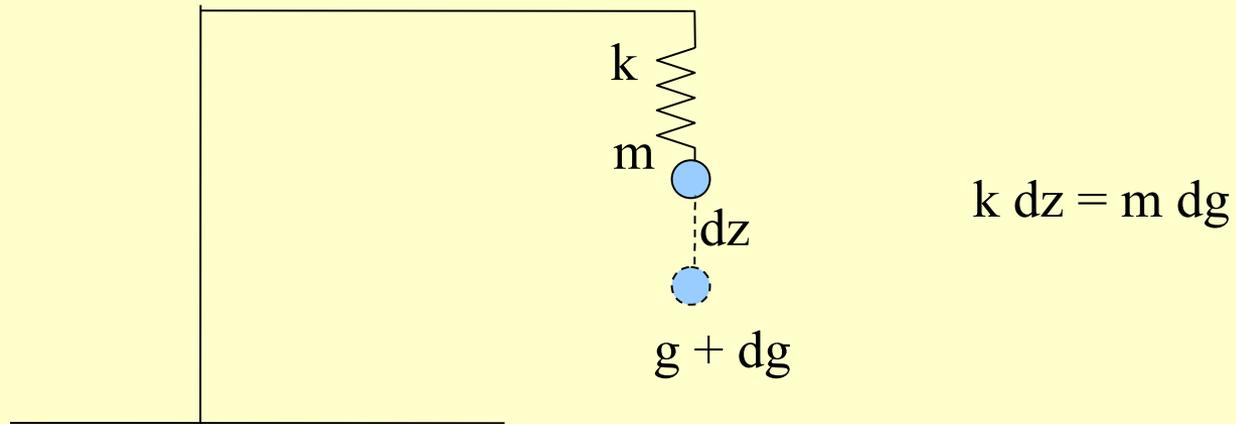
Mètres

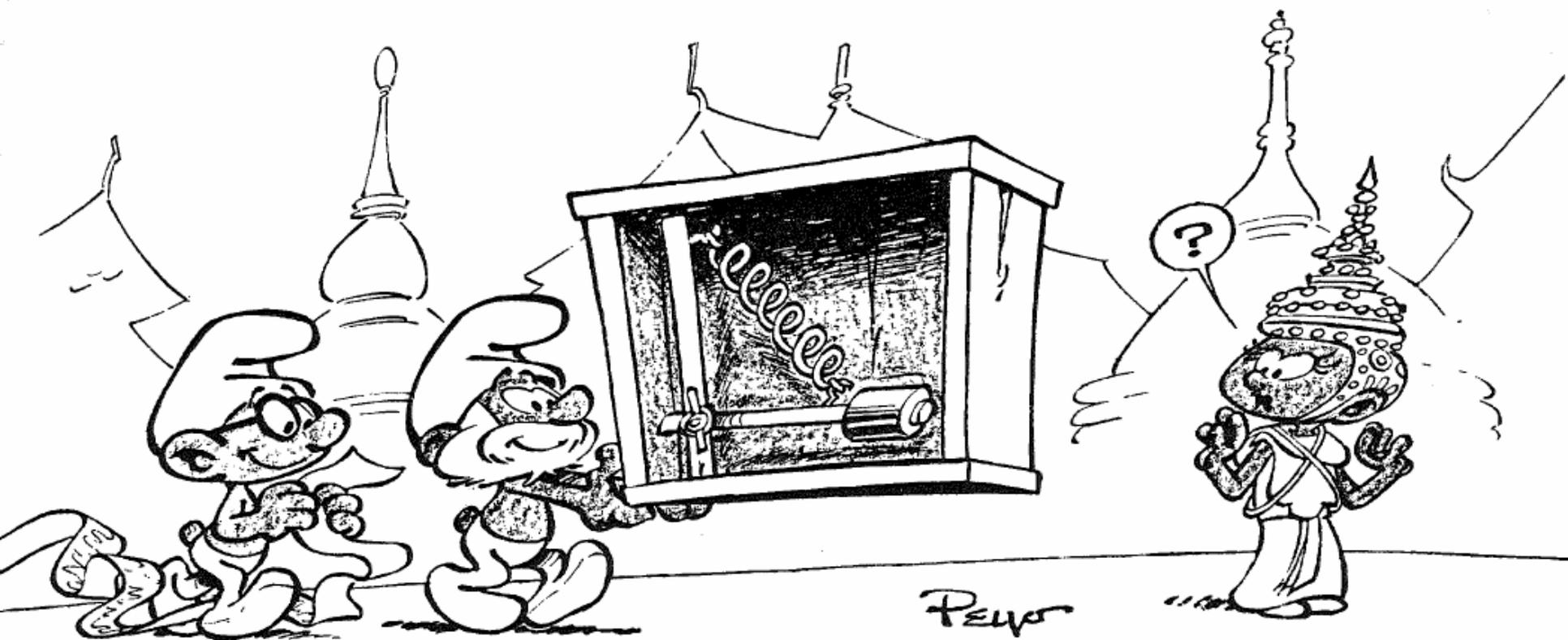


III. Mesures du géoïde et de la pesanteur

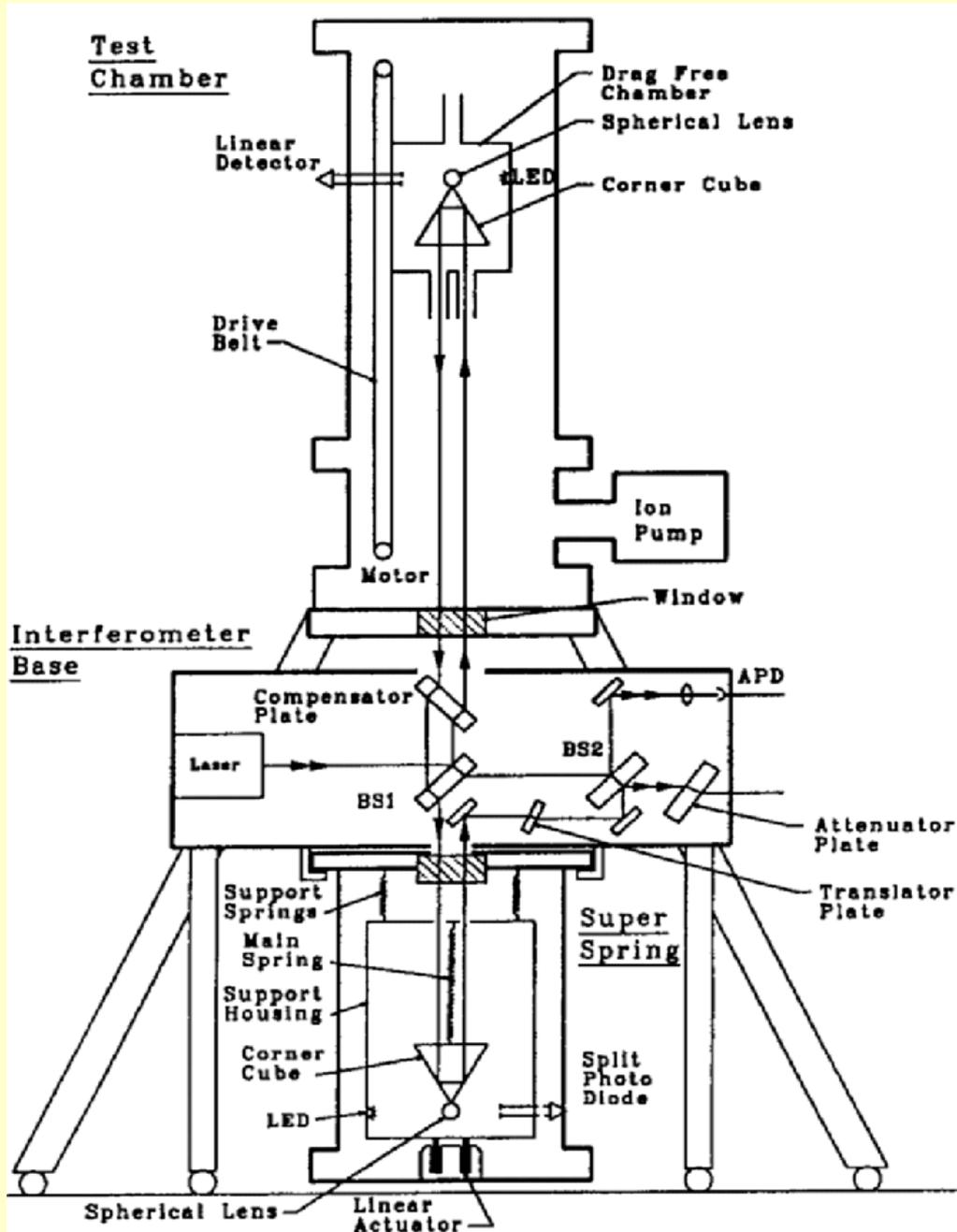
Gravimètres relatifs ou absolus

Relatif :





Absolu :

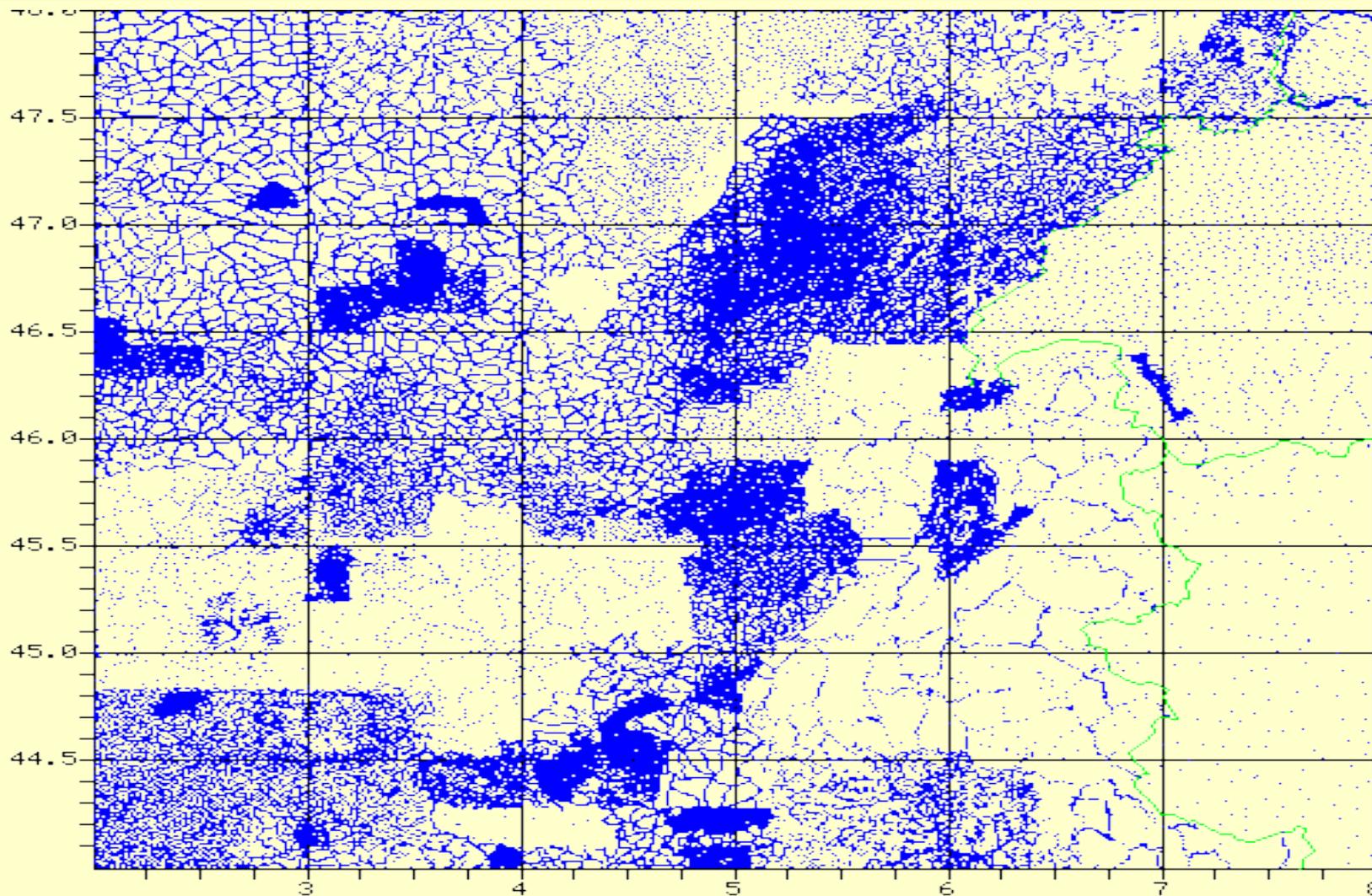


Mesures locales du champ de gravité

Précisions des gravimètres

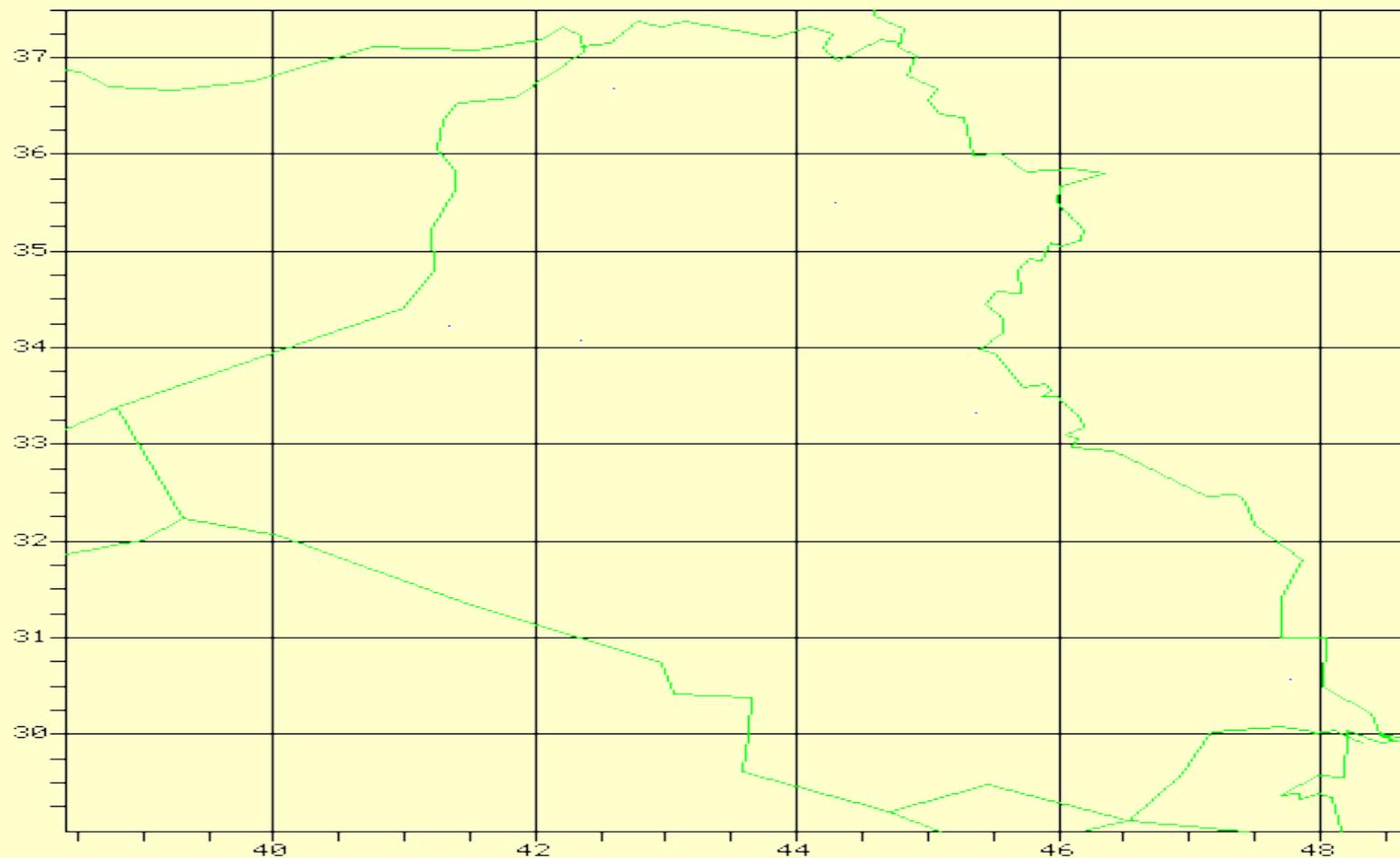
A ressort	1	$\mu\text{m/s}^2$	
Absolu	0.1	$\mu\text{m/s}^2$	
Supraconducteurs	0.003	$\mu\text{m/s}^2$	(un adulte à 1.5 m)

Dense...



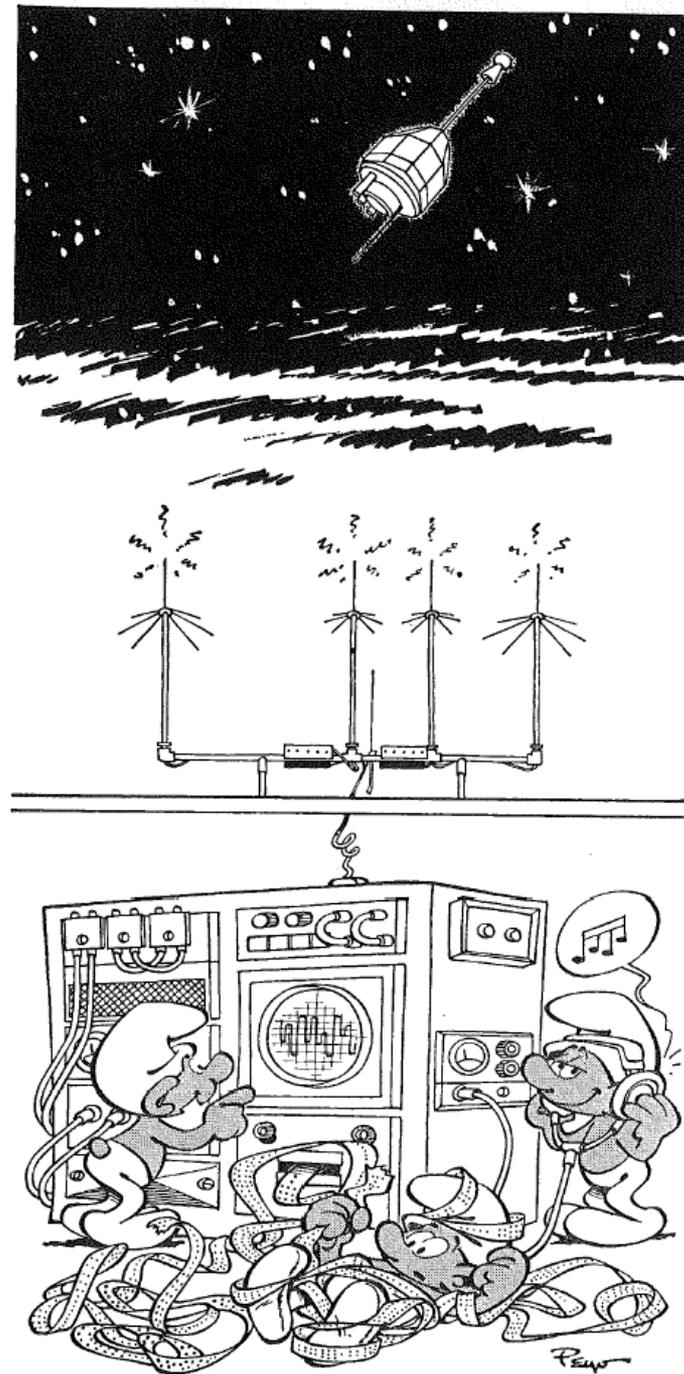
▲ Données publiques
114121 pts

Moins dense...

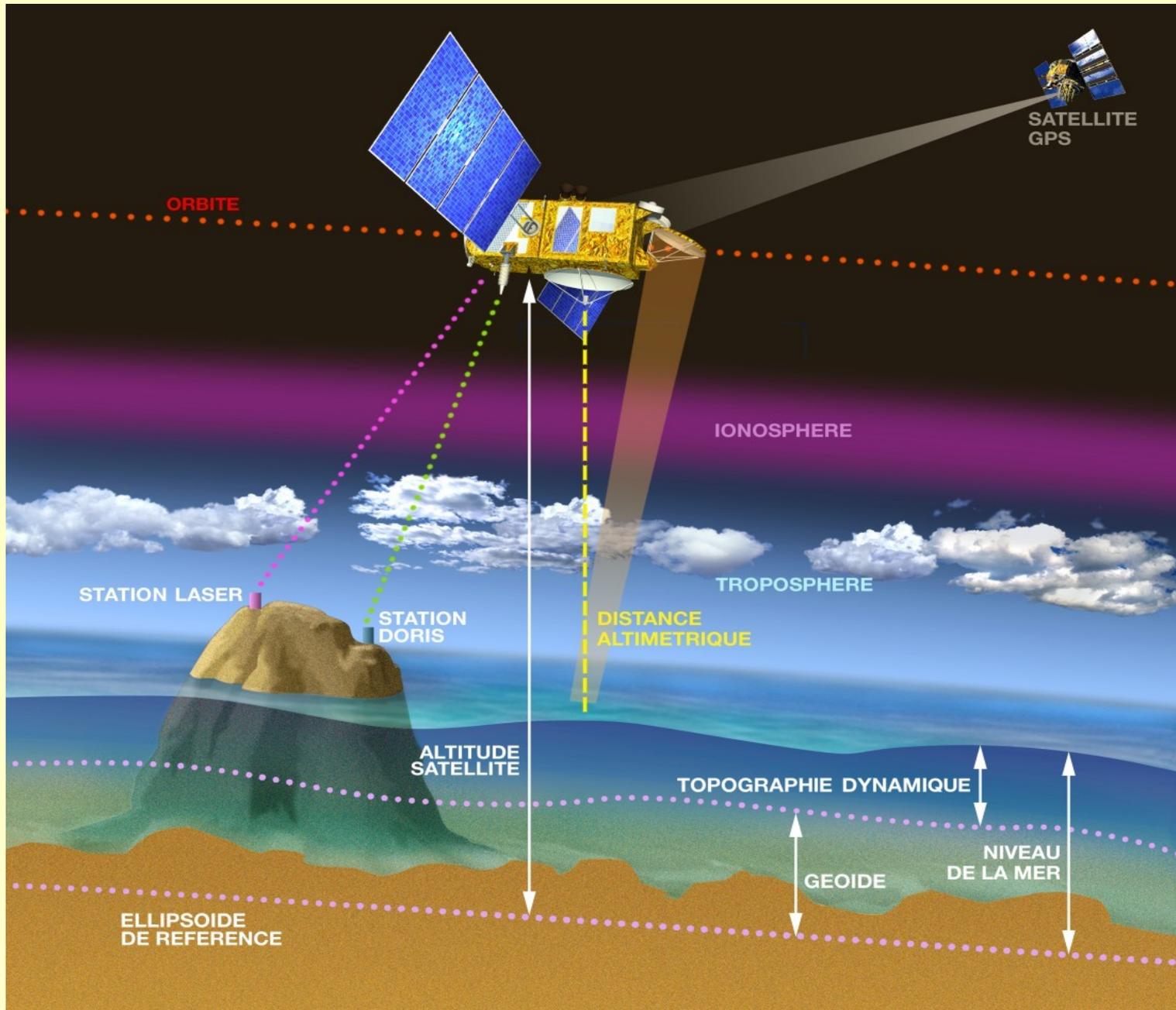


▲ Données publiques
12 pts

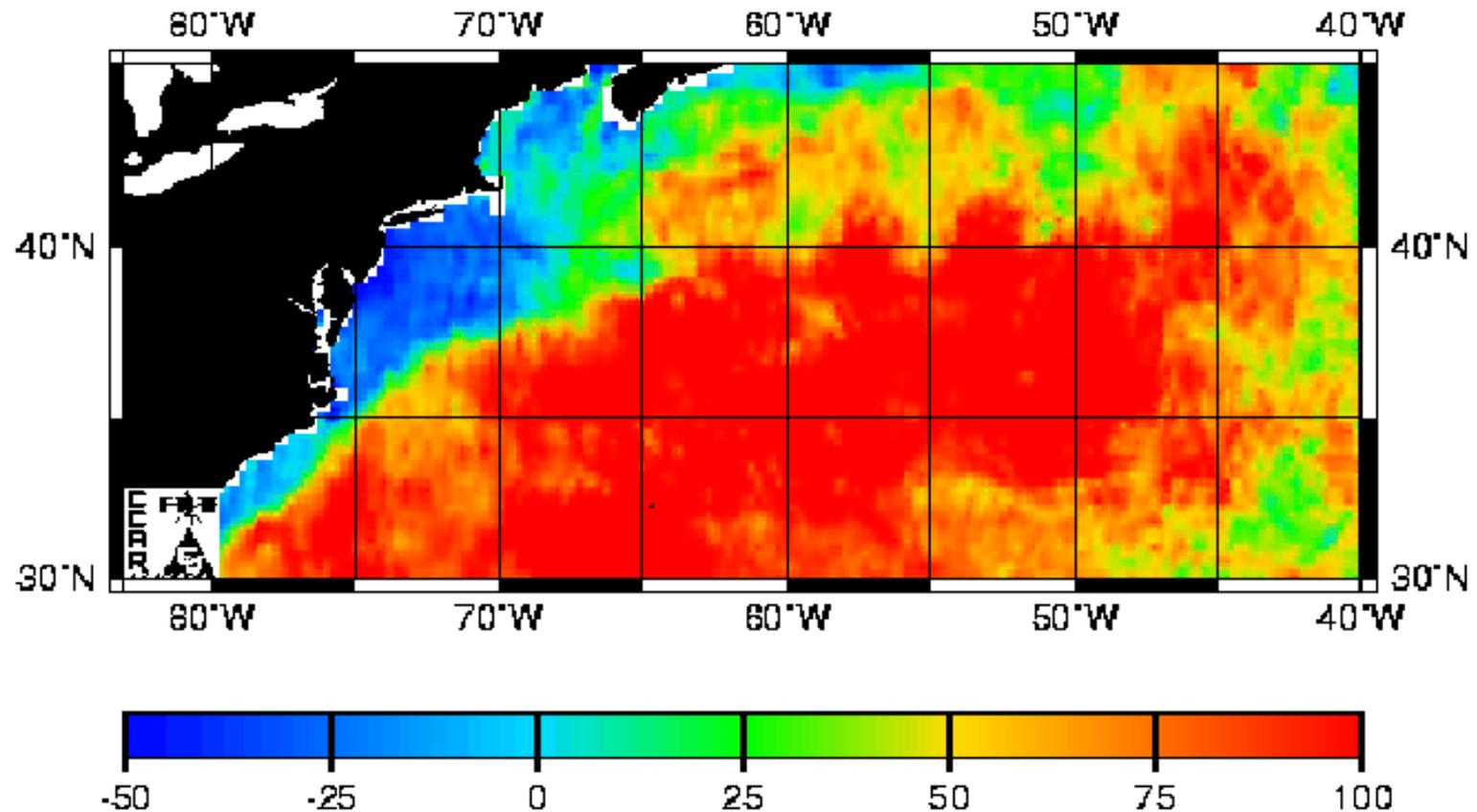
Pour une couverture
globale :
des mesures par
satellites artificiels



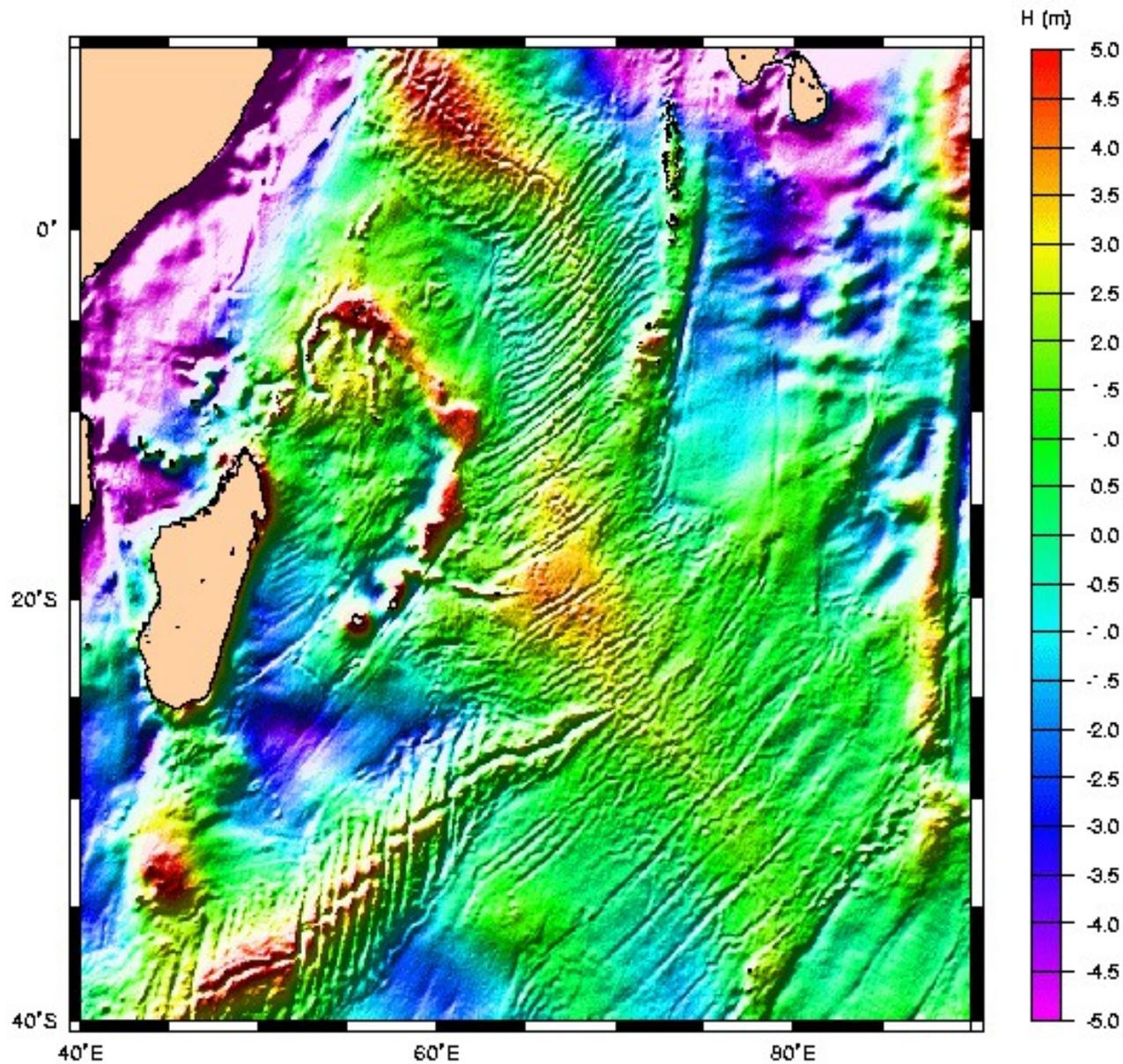
Des mesures de surface de la mer par altimétrie



TOPEX/ERS-2 Analysis Nov 17 2003



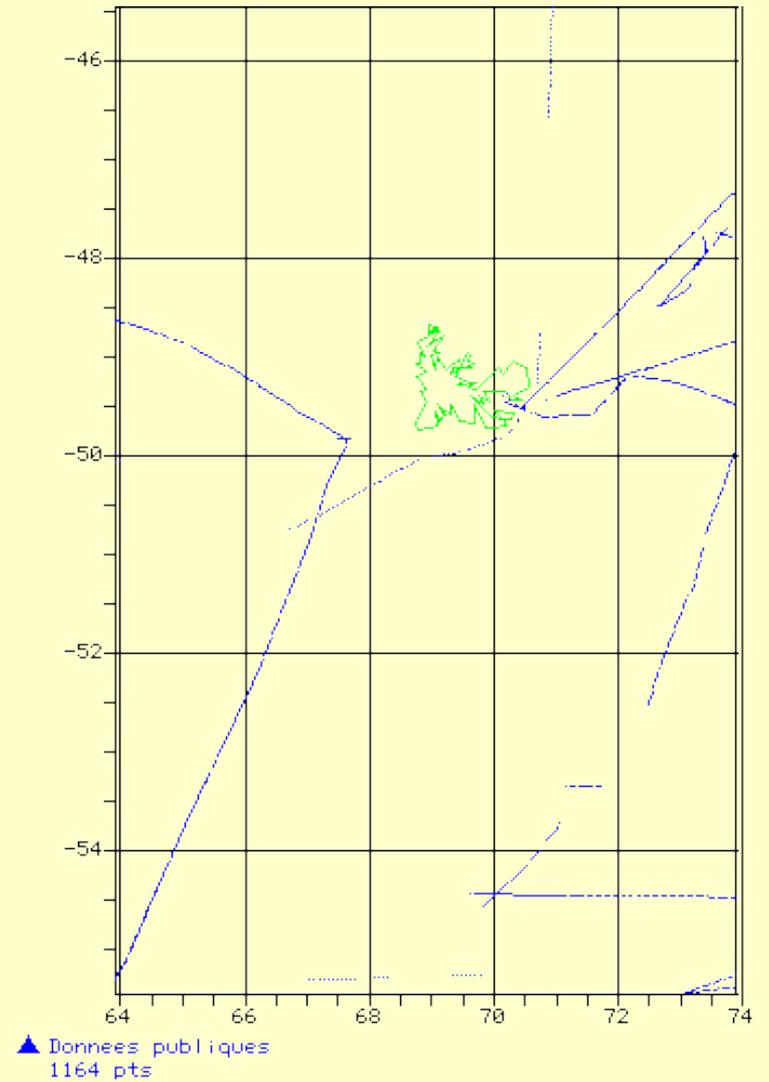
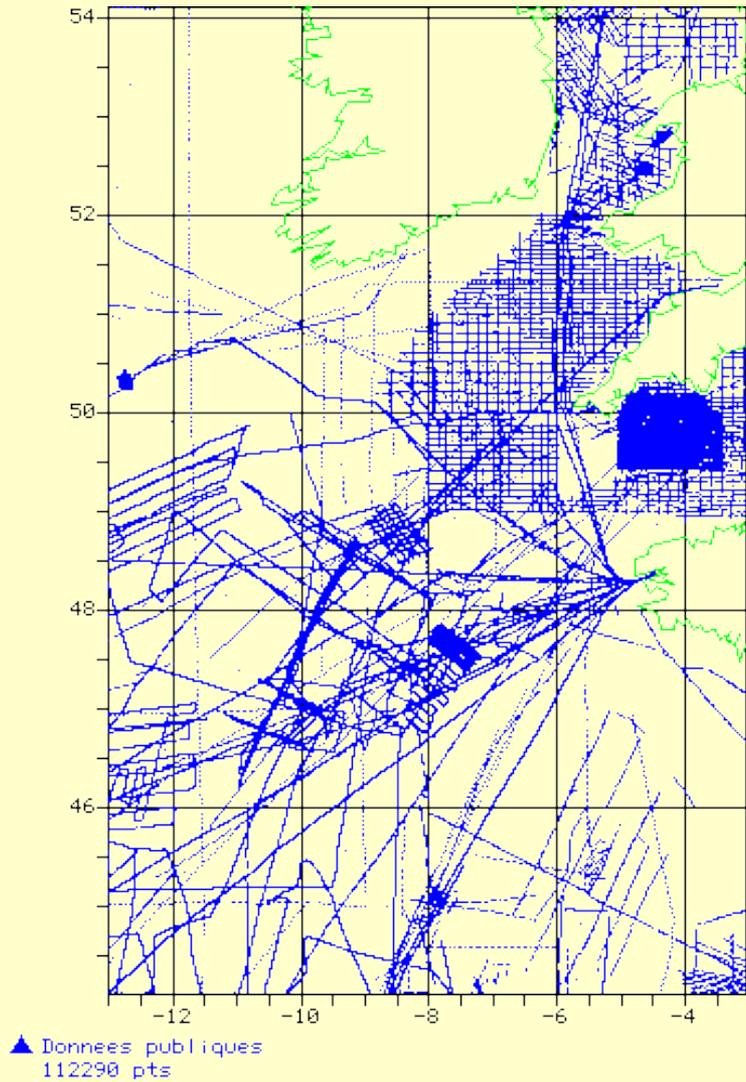
Gulf Stream, courant chaud, S->N, topographie dynamique ~1m
Vitesse (géostrophique) orthogonale à ∇p , // à ∇h .
Le géoïde est retranché



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

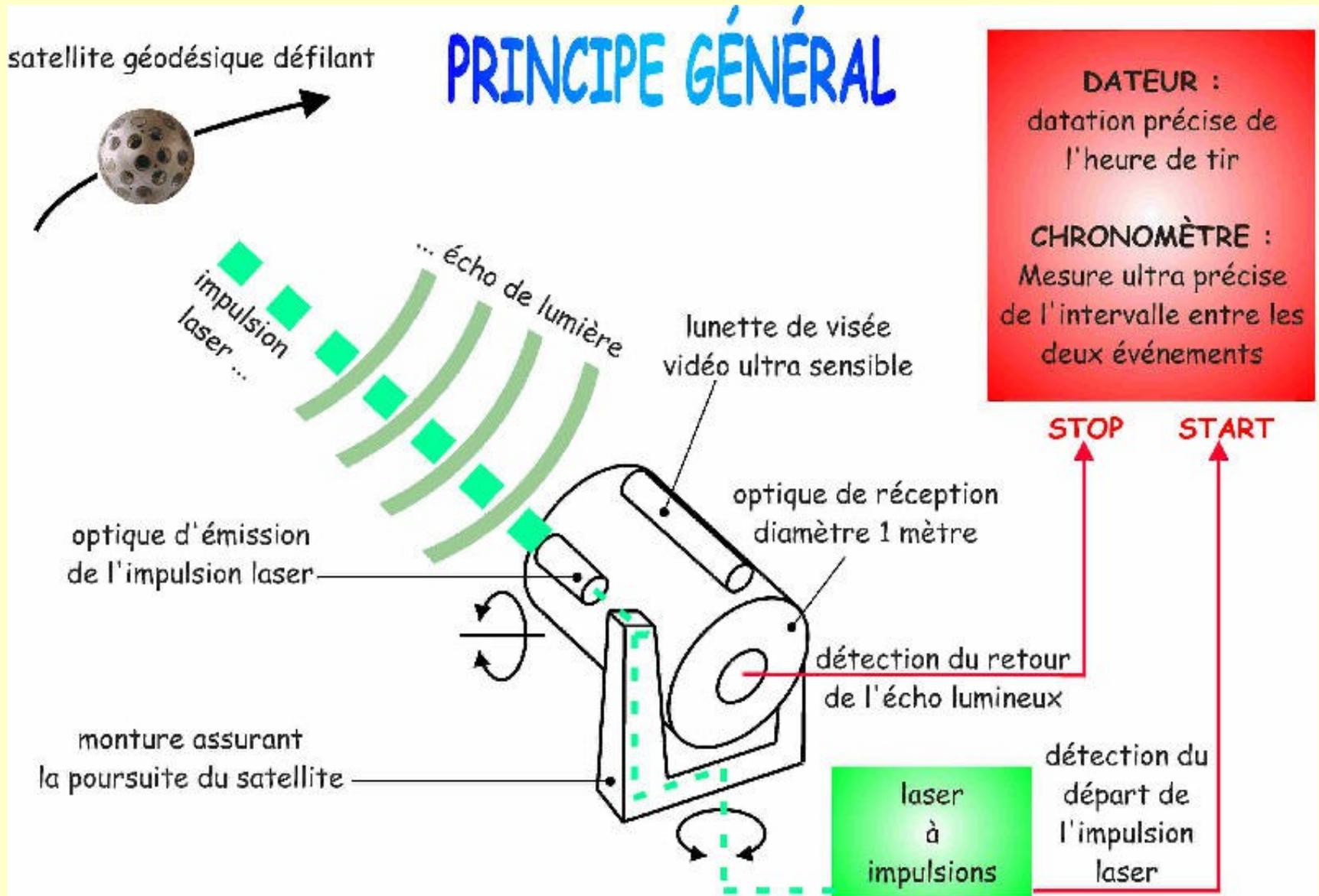
Satellites : Geosat, TOPEX/POSEIDON, ERS-1, ERS-2

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

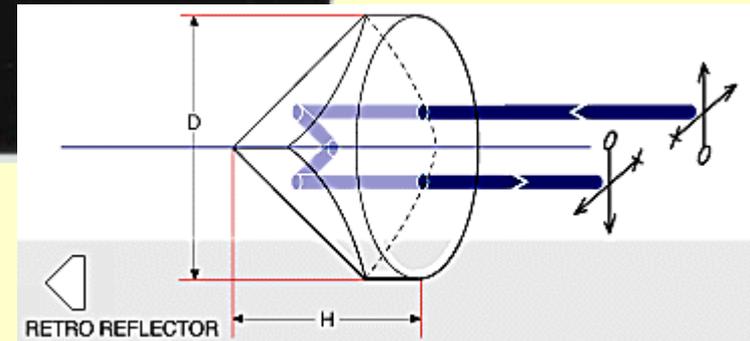
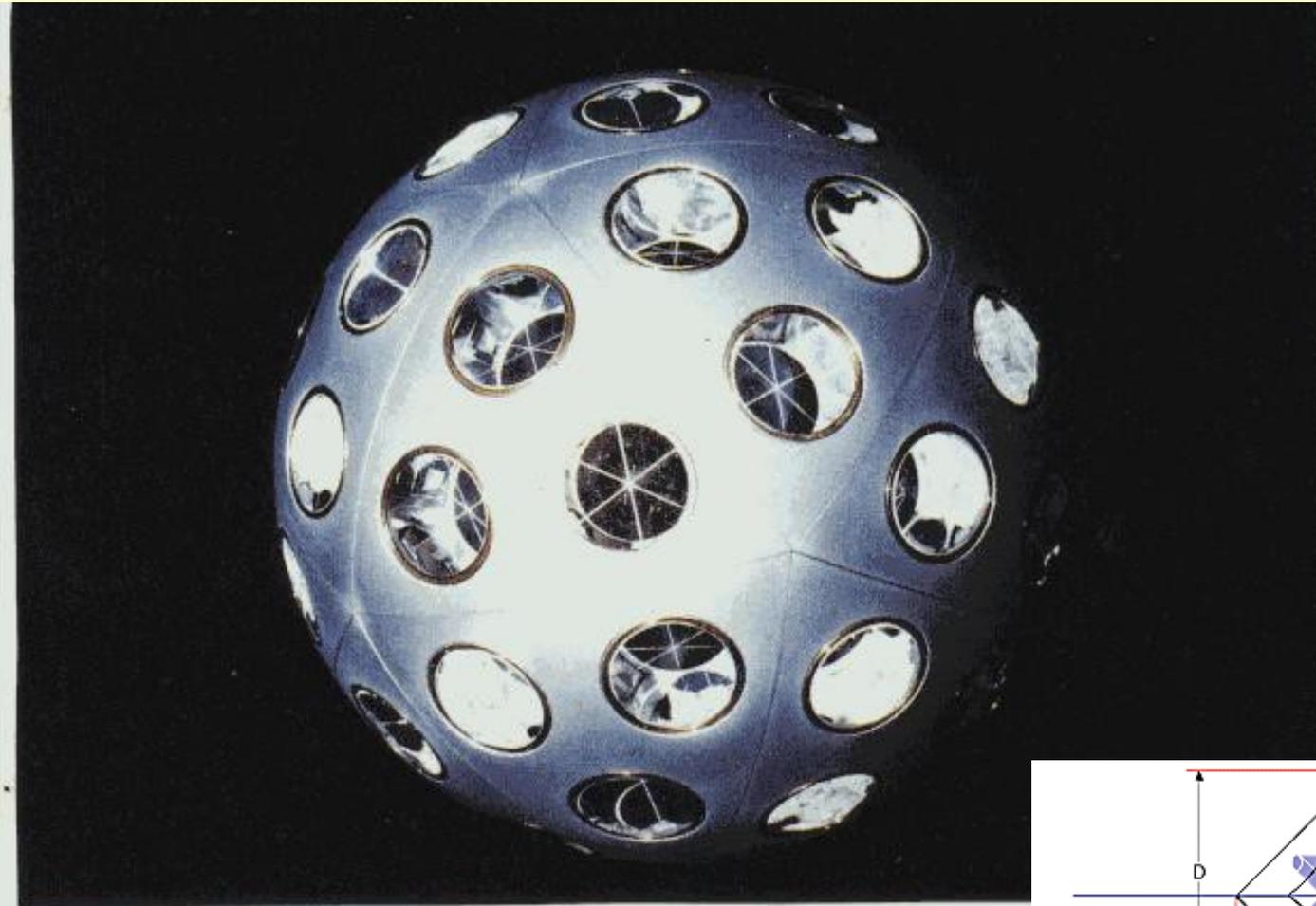


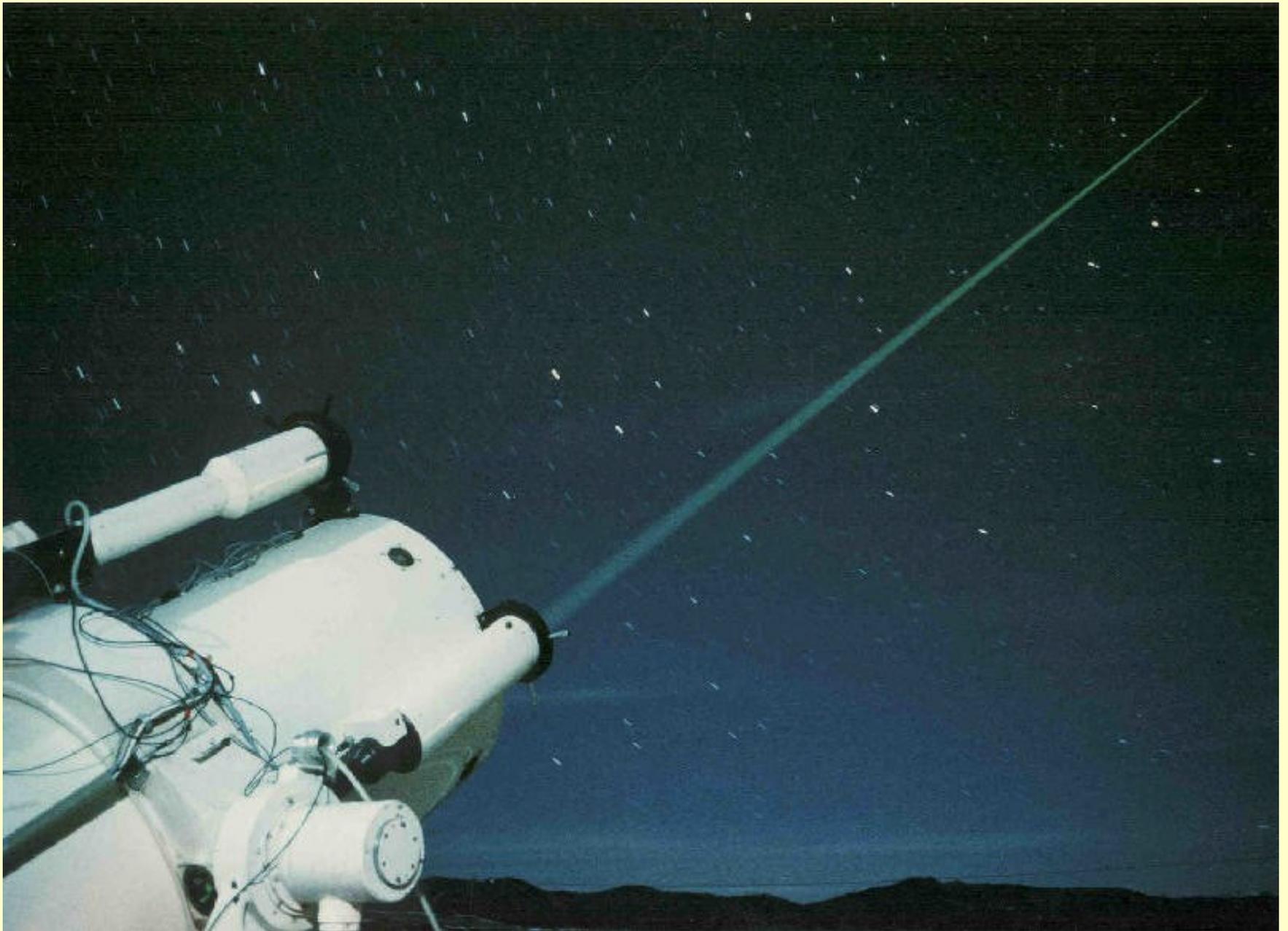
Traces de bathymétries

Des suivis de trajectoires

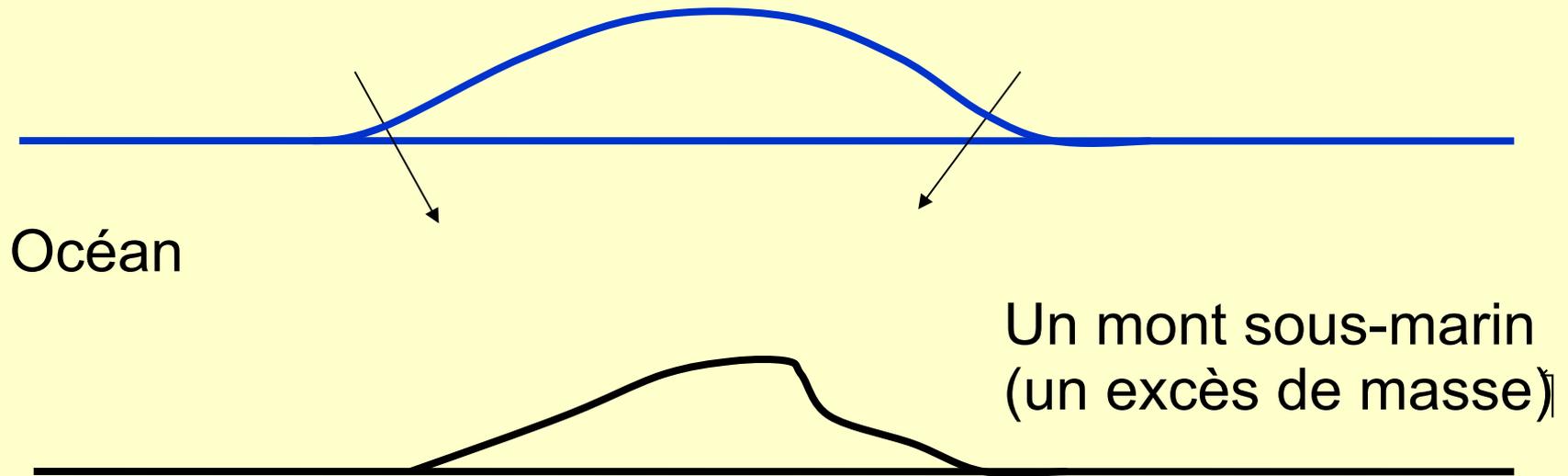


Satellite géodésique



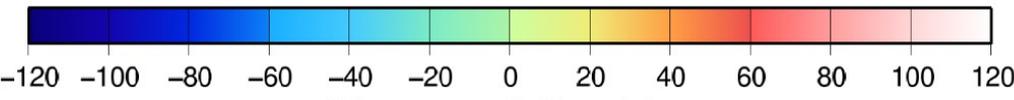


IV. Interprétations à différentes longueurs d'ondes

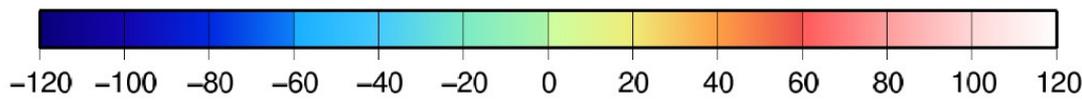
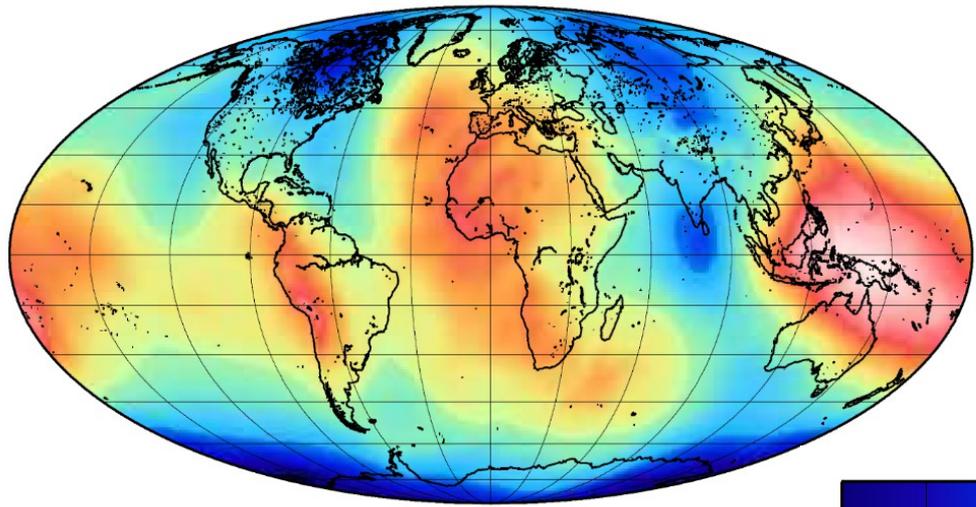


L'anomalie de gravité est > 0
La surface de l'océan fait une bosse

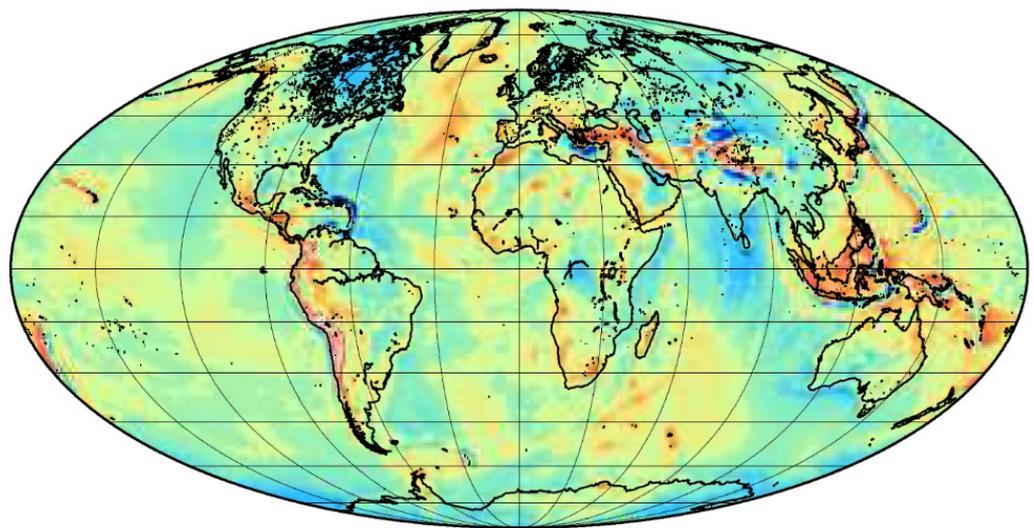
Pb de de la gravimétrie :
plusieurs solutions pour
l'interprétation des données



Observed Geoid m



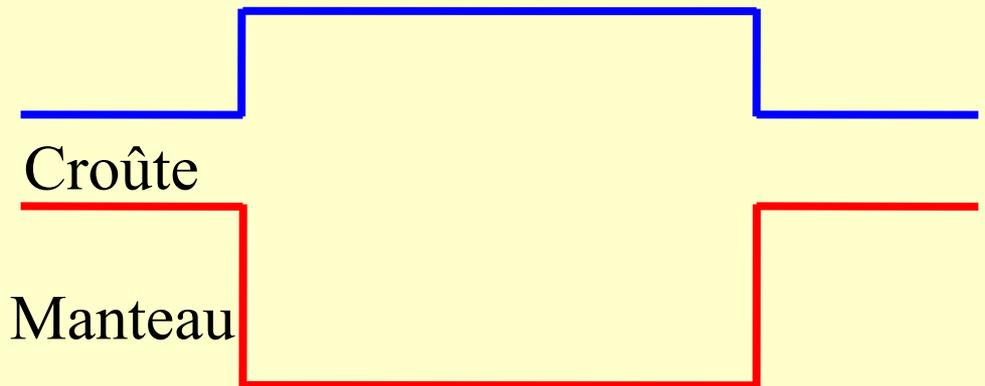
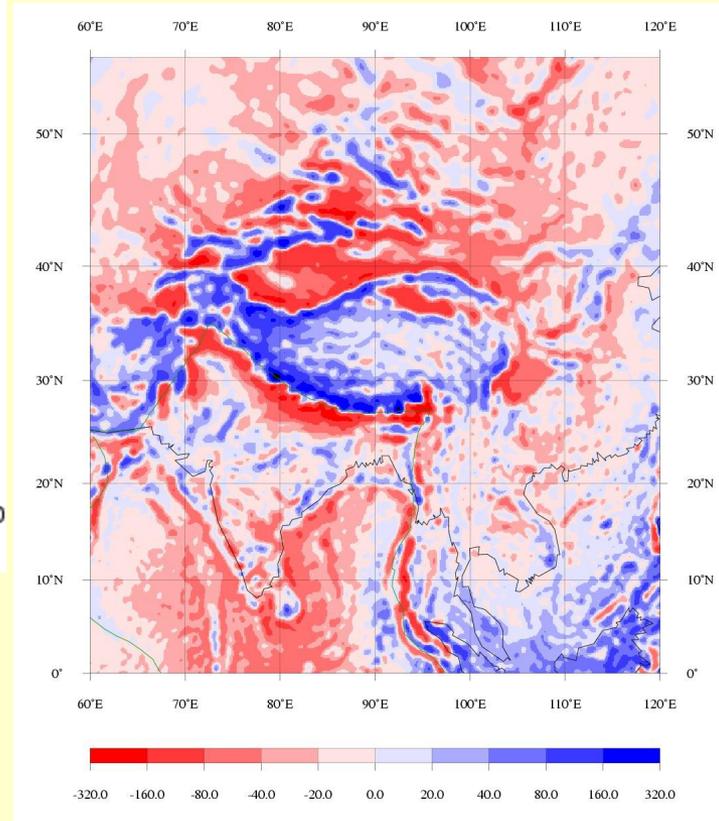
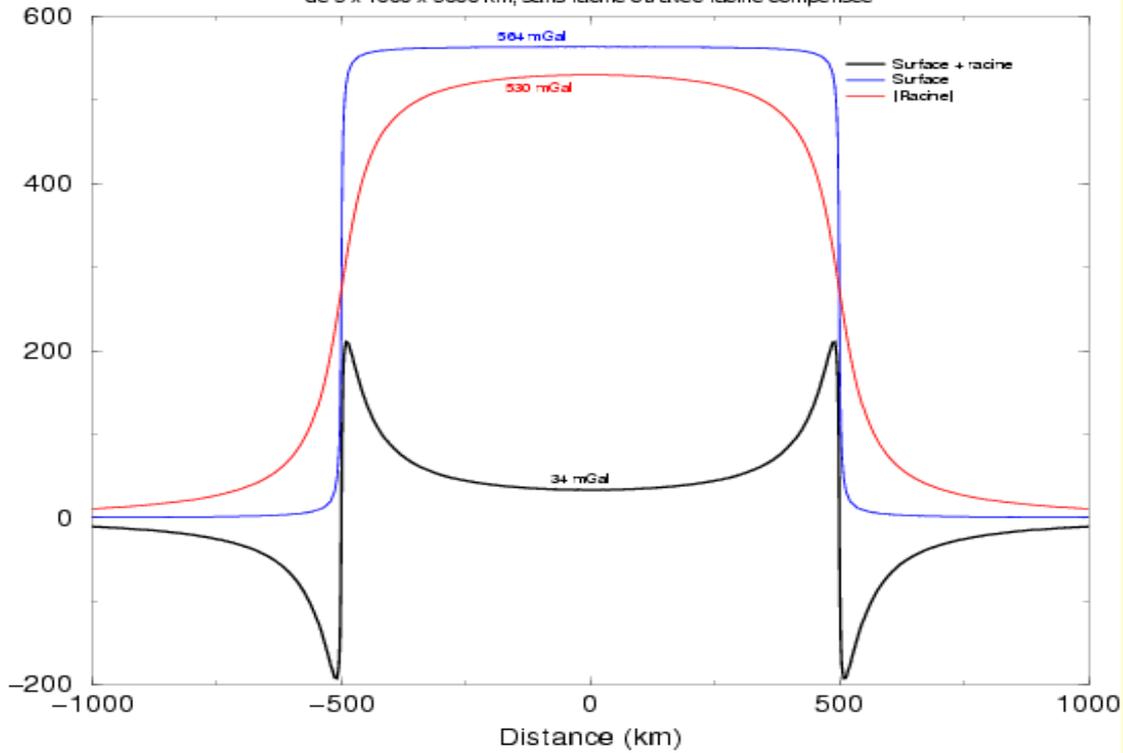
Observed Gravity mGal



Très peu de corrélation avec la topographie de surface.
Celle-ci est compensée en profondeur : c'est l'isostasie (Archimède)

Attraction d'un plateau

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





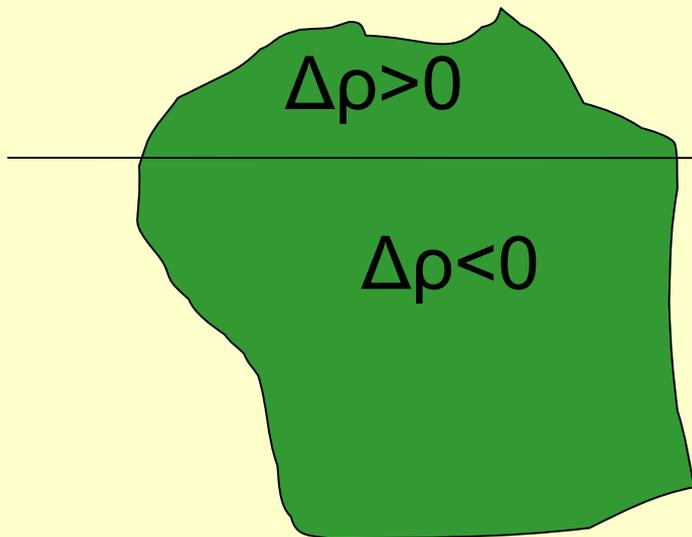
Archimède :

Masse de glace =

masse d'eau remplacée

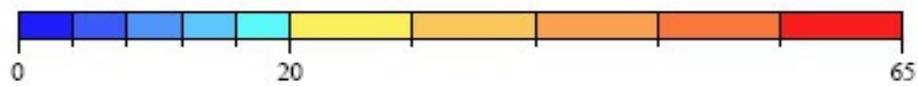
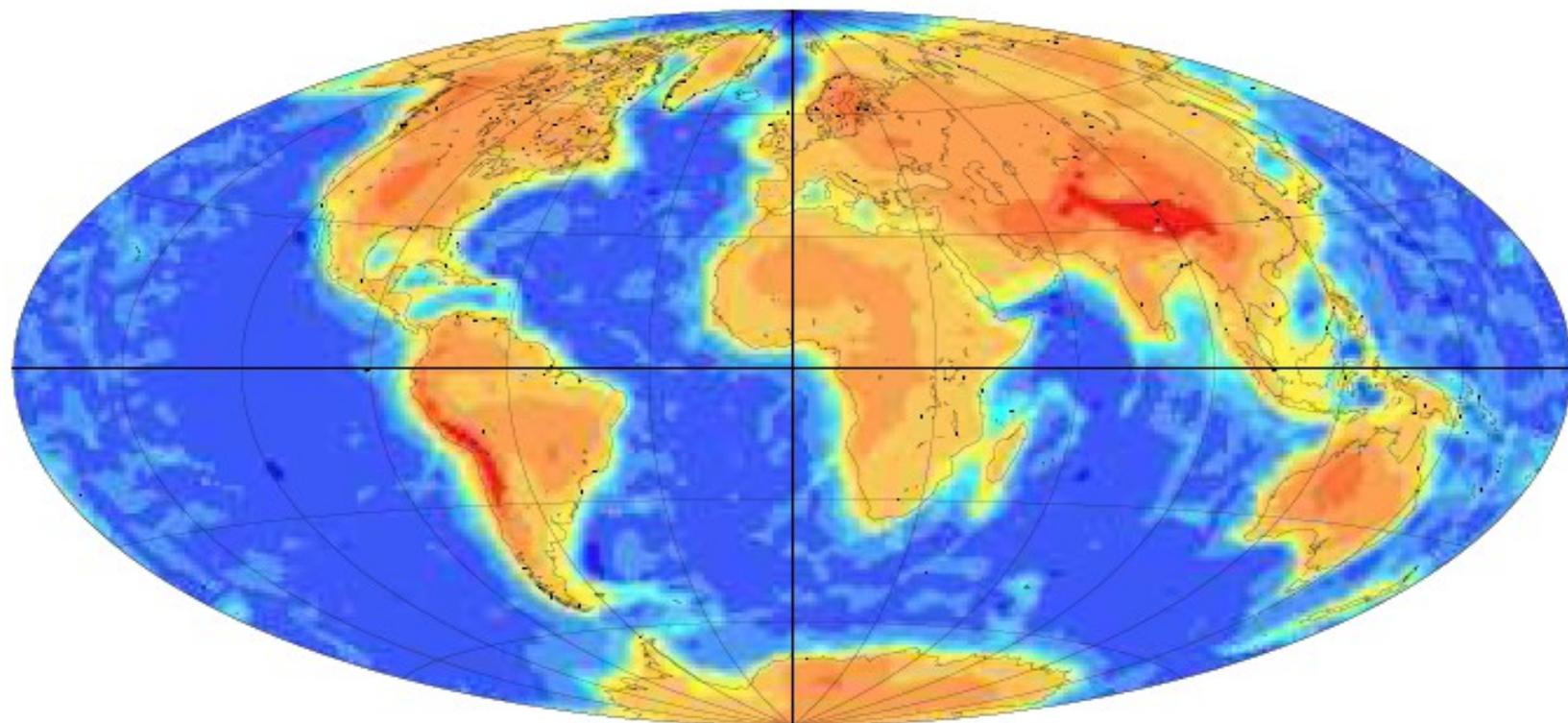
=> anomalie de g faible

Isostasie : les anomalies de g sont beaucoup plus faibles que celles qui résulteraient uniquement de l'attraction de la topographie de surface



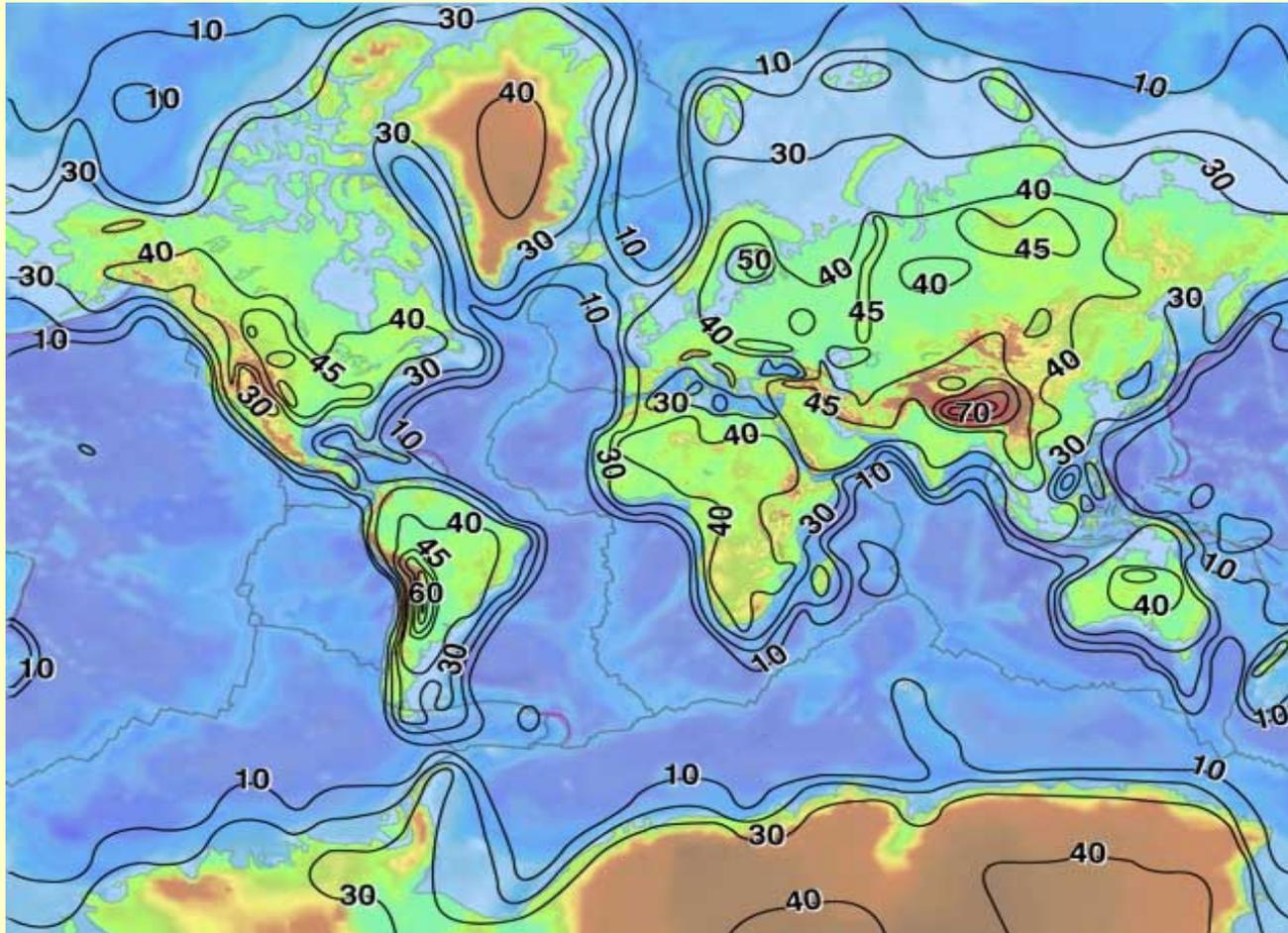
Epaisseur de croute

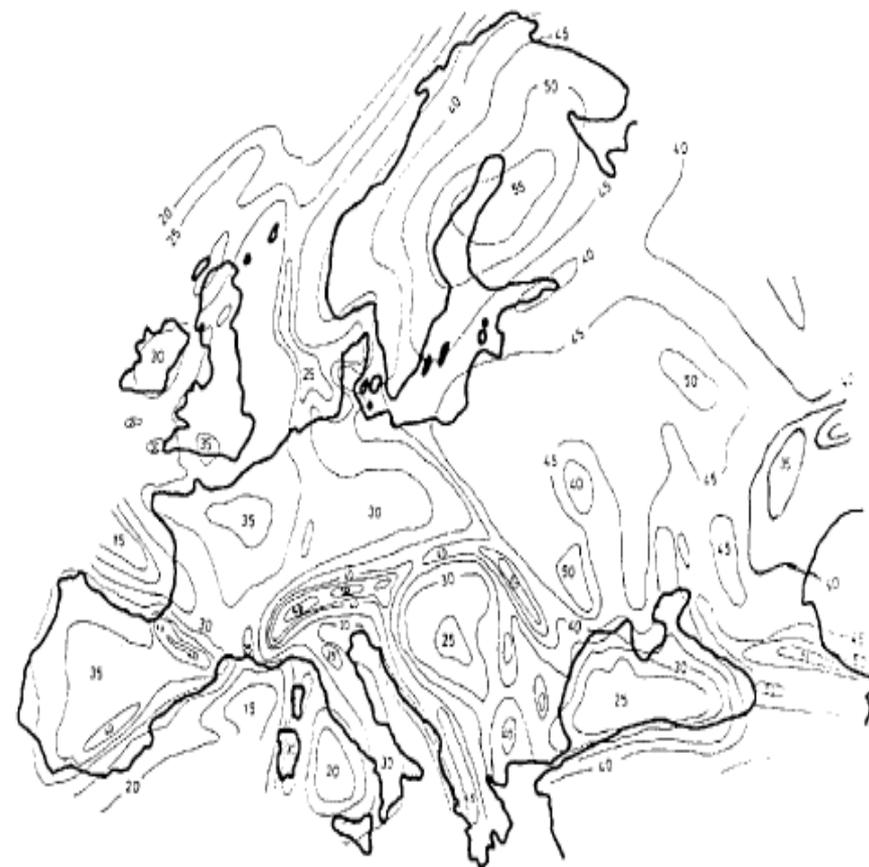
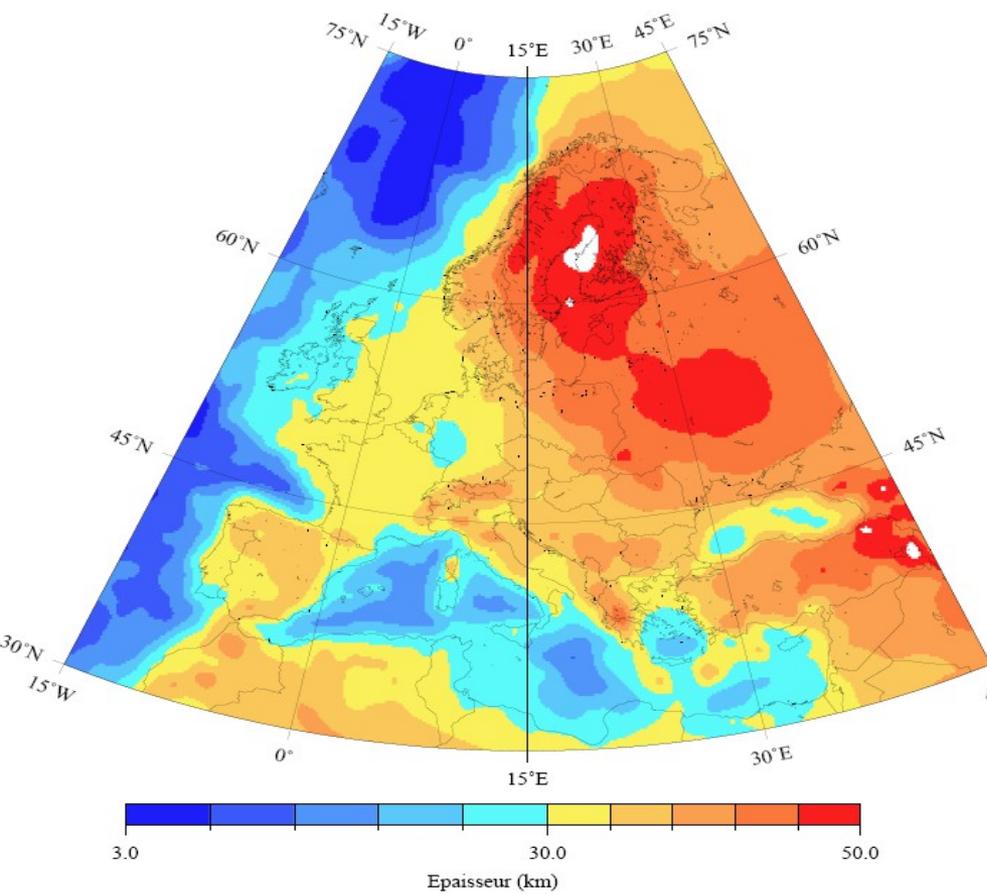
Modèle 1906; $l_{\max}=360$



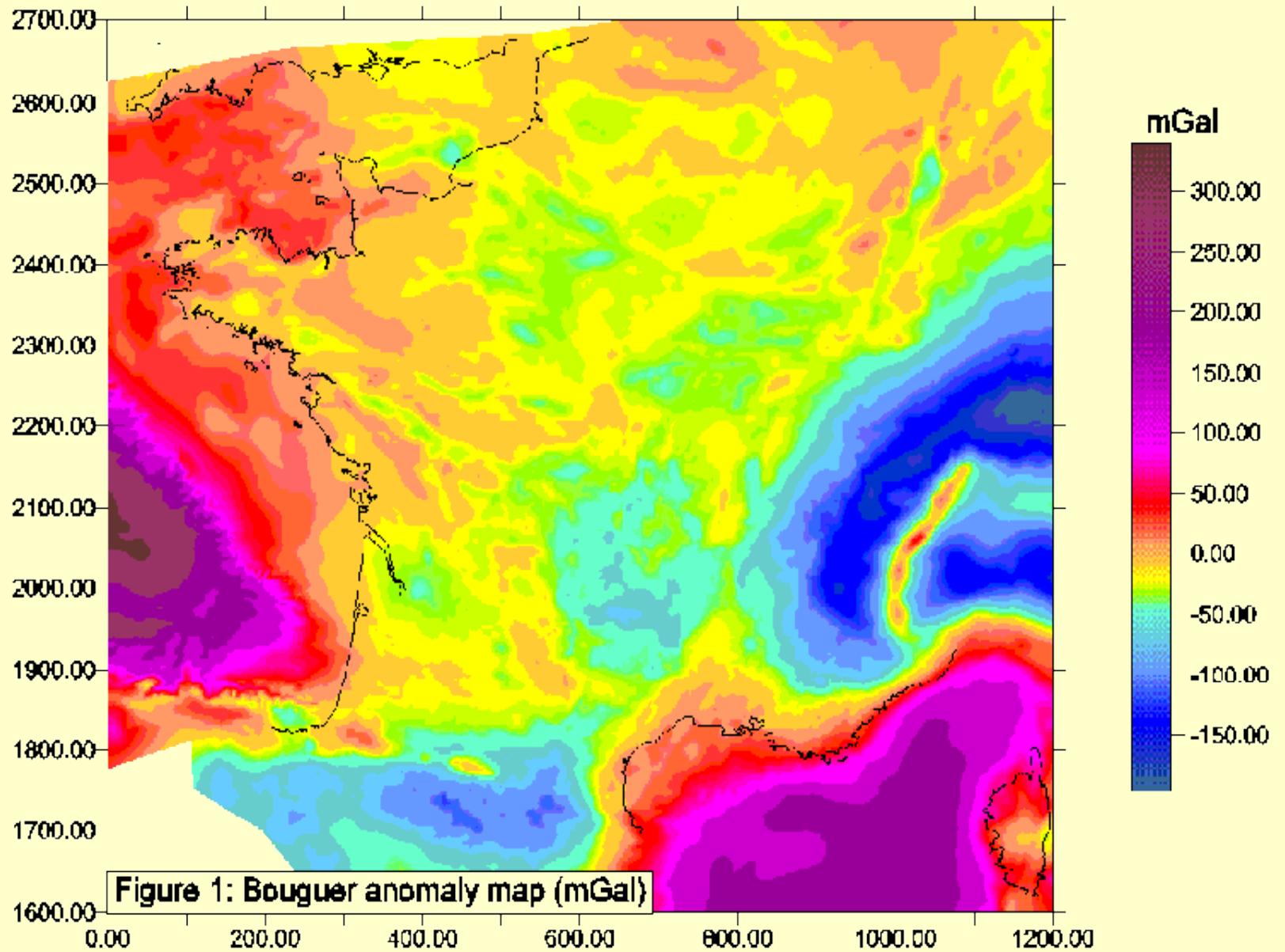
Epaisseur (km)

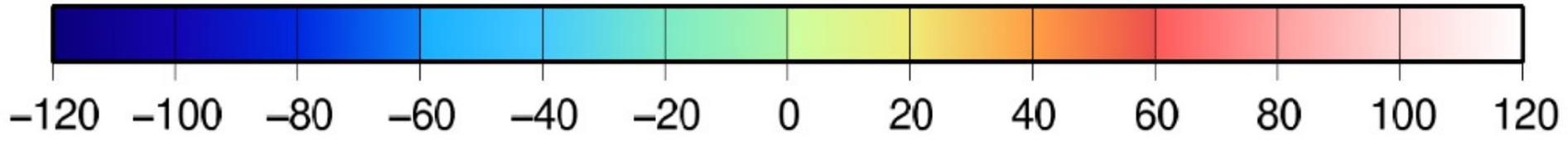
Épaisseur de la croûte continentale



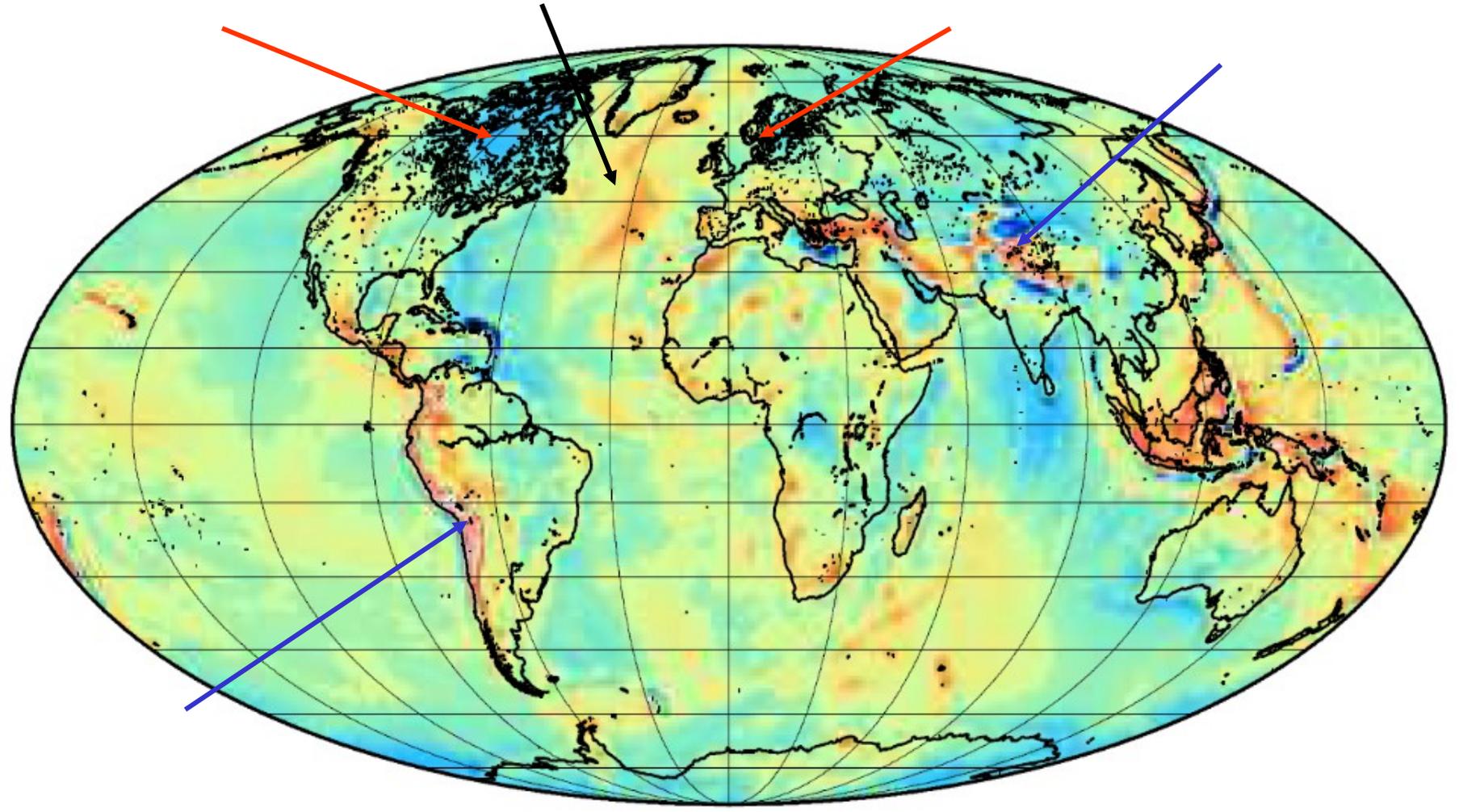


Epaisseur de la croûte (Europe)

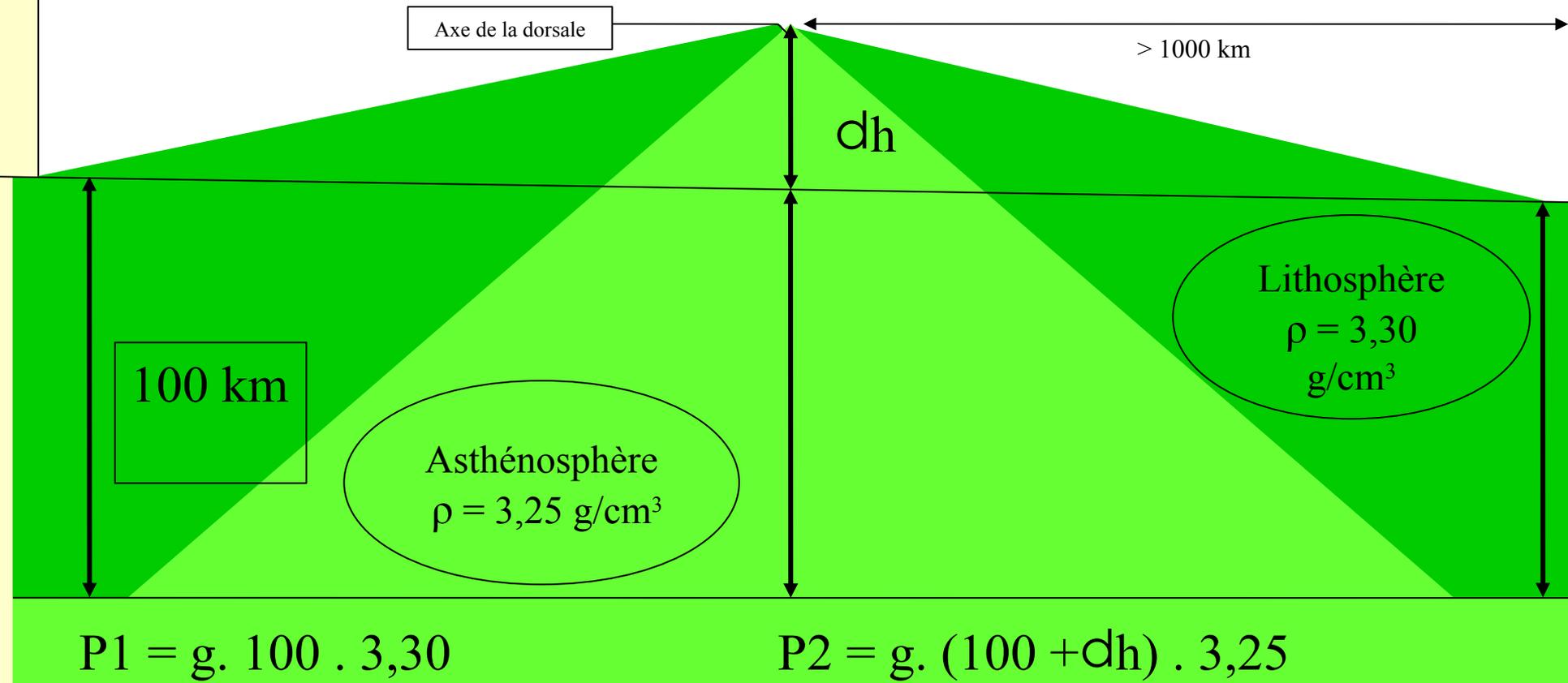




Observed Gravity mGal



La topographie des dorsales



$$P1 = g. 100 . 3,30$$

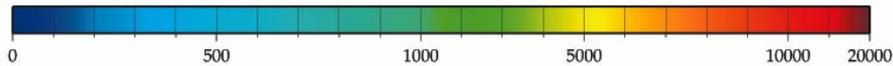
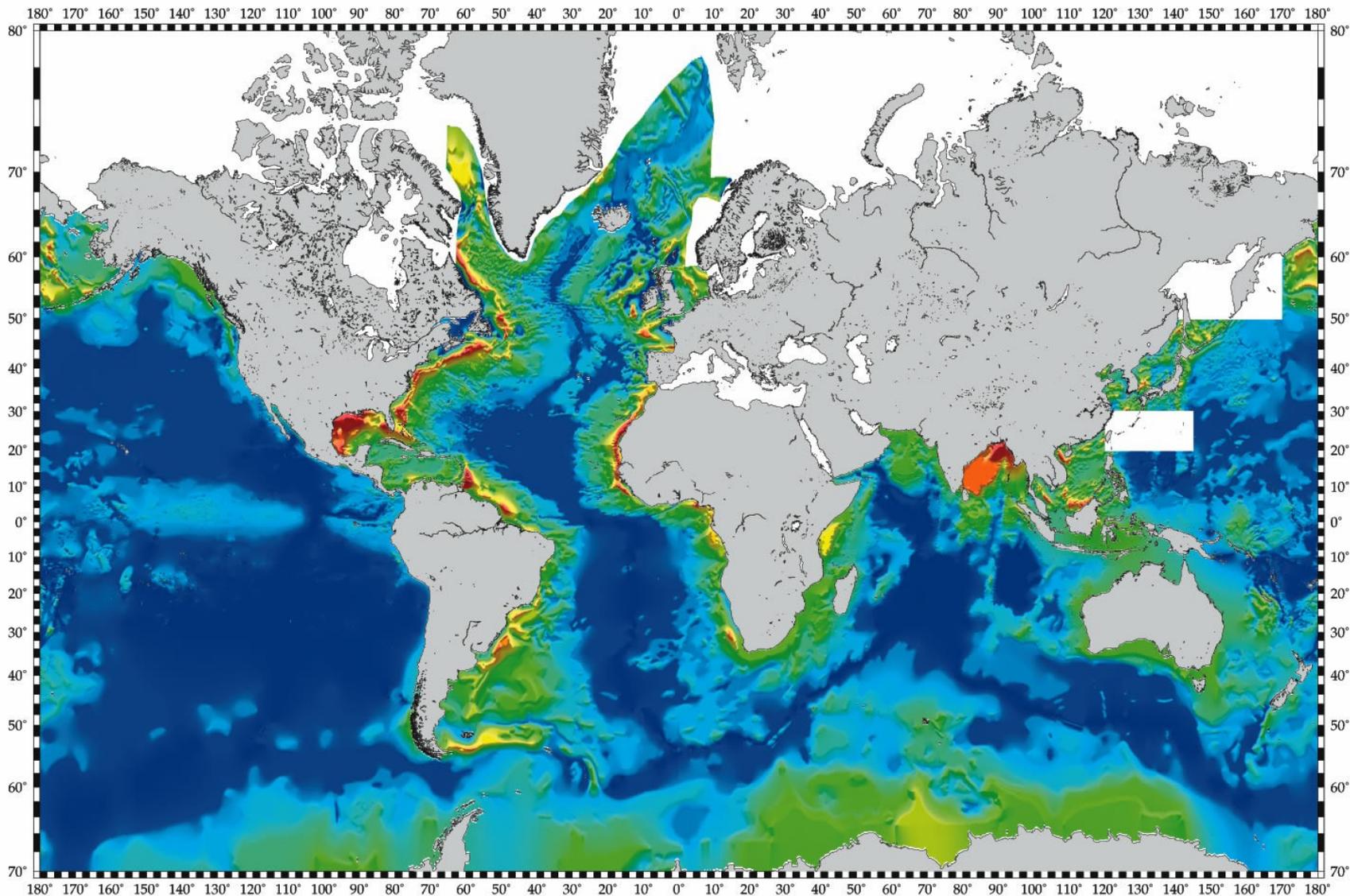
$$P2 = g. (100 + dh) . 3,25$$

$$P1 = P2 \rightarrow$$

$$dh = 1,5 \text{ km}$$

(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

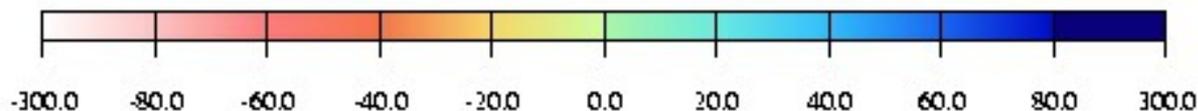
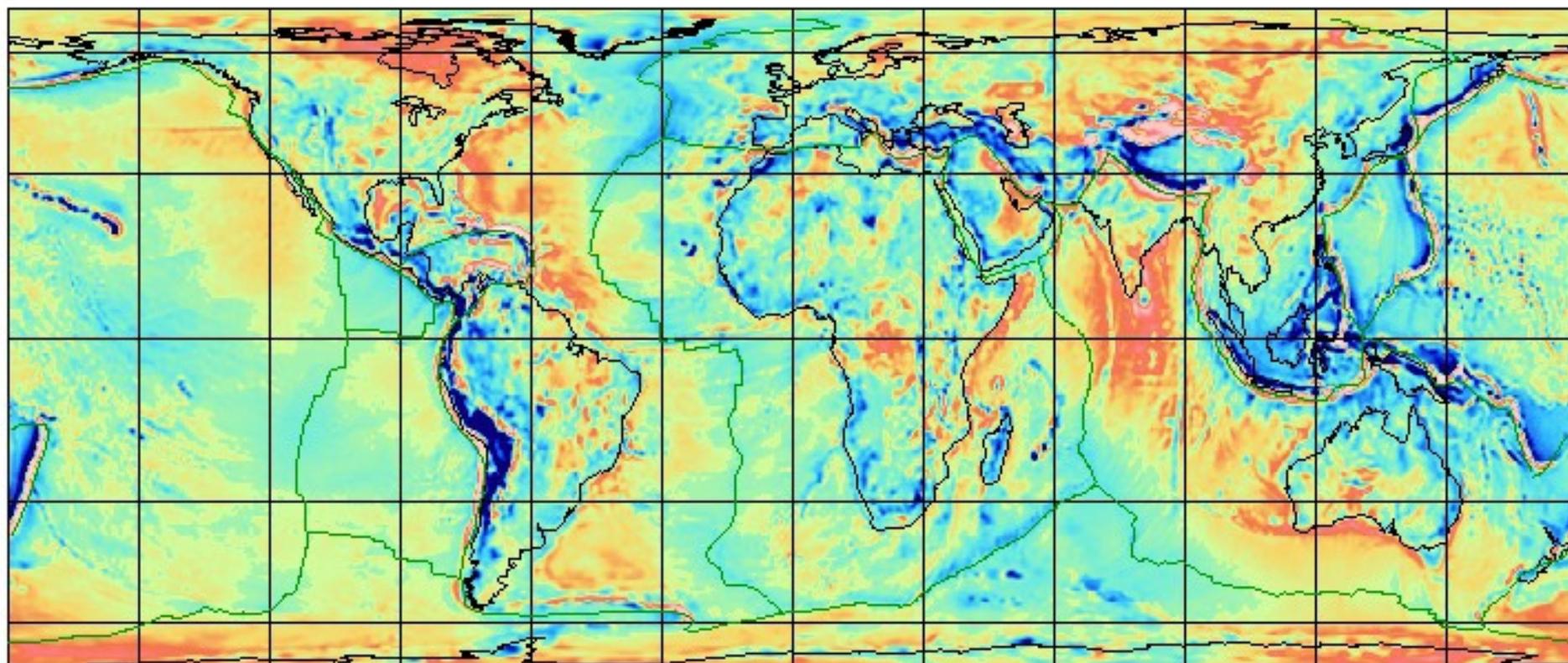


A digital total sediment thickness database for the world's oceans and marginal seas is being compiled by the National

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

Gravity anomalies



Gravity (mGal)

F. Chambat, ENS-Lyon, 2004
(from EGM96 model)

Précision géoïde : 30 cm à 400 km de résolution

50 cm à 167 km de résolution

Précision gravité : 1.5 mgal à 400 km de résolution

5.4 mgal à 167 km de résolution

Précision Grim 5,
 $l=120$,
résolution 170 km,
Balmino,
« mission Goce »

Tibet

$$\begin{aligned} dg &= \text{attraction d'un plateau homogène d'épaisseur } h \\ &= 2 \pi G \rho h = 2 \times 3,14 \times 6,67 \cdot 10^{-11} \times 2700 \times 5\,000 \\ &= 500 \text{ mGal} \gg \text{anomalie observée} \end{aligned}$$

Deux effets :

Une topo compensée = attraction faible mais non nulle

(les structures superficielles ont une influence légèrement + grande que les profondes sur la gravi)

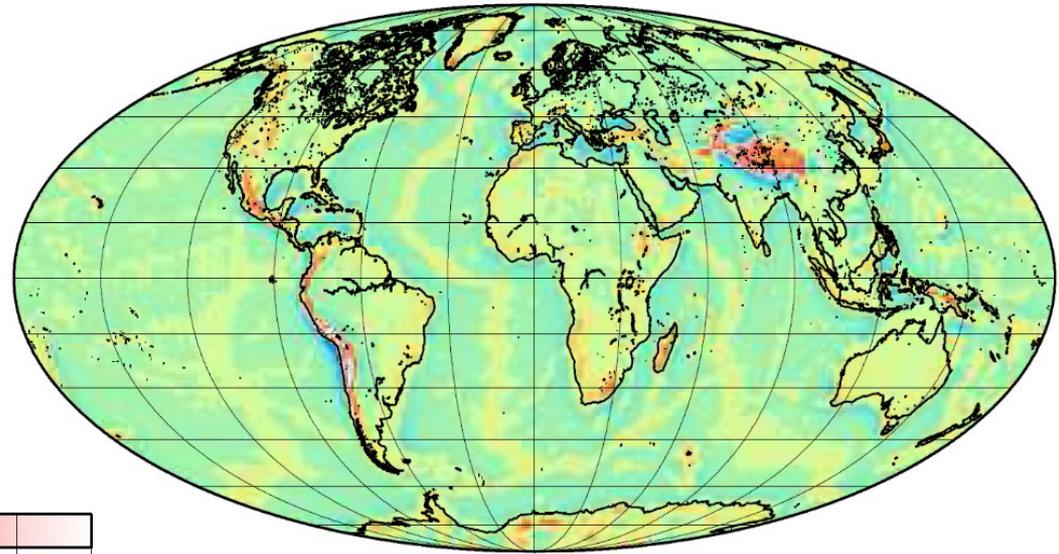
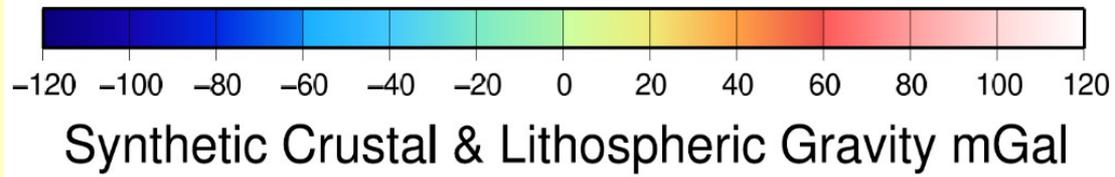
Compensation non parfaite

Dorsales

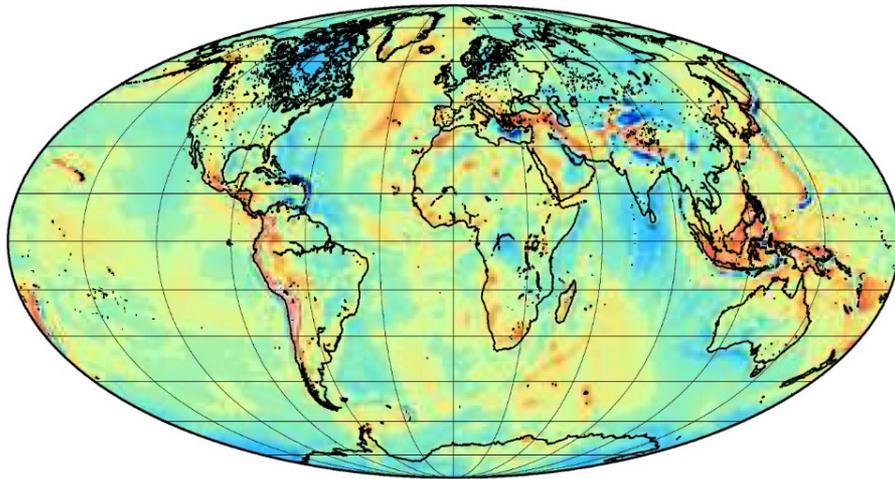
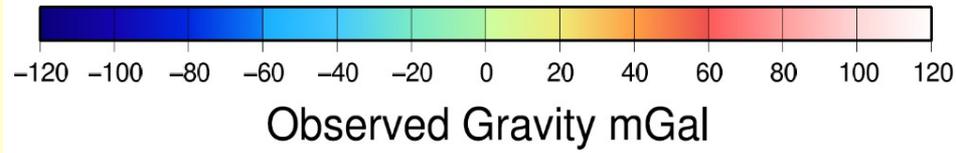
Idem : différence de bathymétrie $h=2-3$ km entre la dorsale et le plancher le plus ancien. L'anomalie gravi de ce h est \gg anomalie observée donc compensée par les variations latérales de densité (dit autrement par l'épaississement de la lithosphère) dues au refroidissement.

Léger résidu d'anomalies positives sur l'Atlantique Nord (et pas sur le Pacifique) ; plusieurs explications possibles probablement vraies toutes les deux :

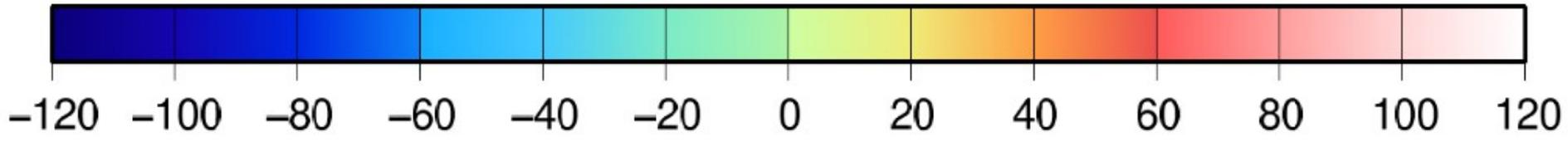
1. les sédiments, plus proches de la surface et donc avec une contribution + grande, sont importants dans l'Atlantique Nord (cf. carte)
2. le Pacifique est plus rapide, donc une même bathy h se trouve plus loin de la dorsale dans le Pacifique, donc la bathy du Pacifique est à plus grande longueur d'onde, or on a vu que les grandes longueurs d'ondes se compensaient mieux.



Pesanteur calculée à partir d'un modèle de lithosphère compensée



Un exemple où la lithosphère n'est pas à l'équilibre :



Observed Gravity mGal

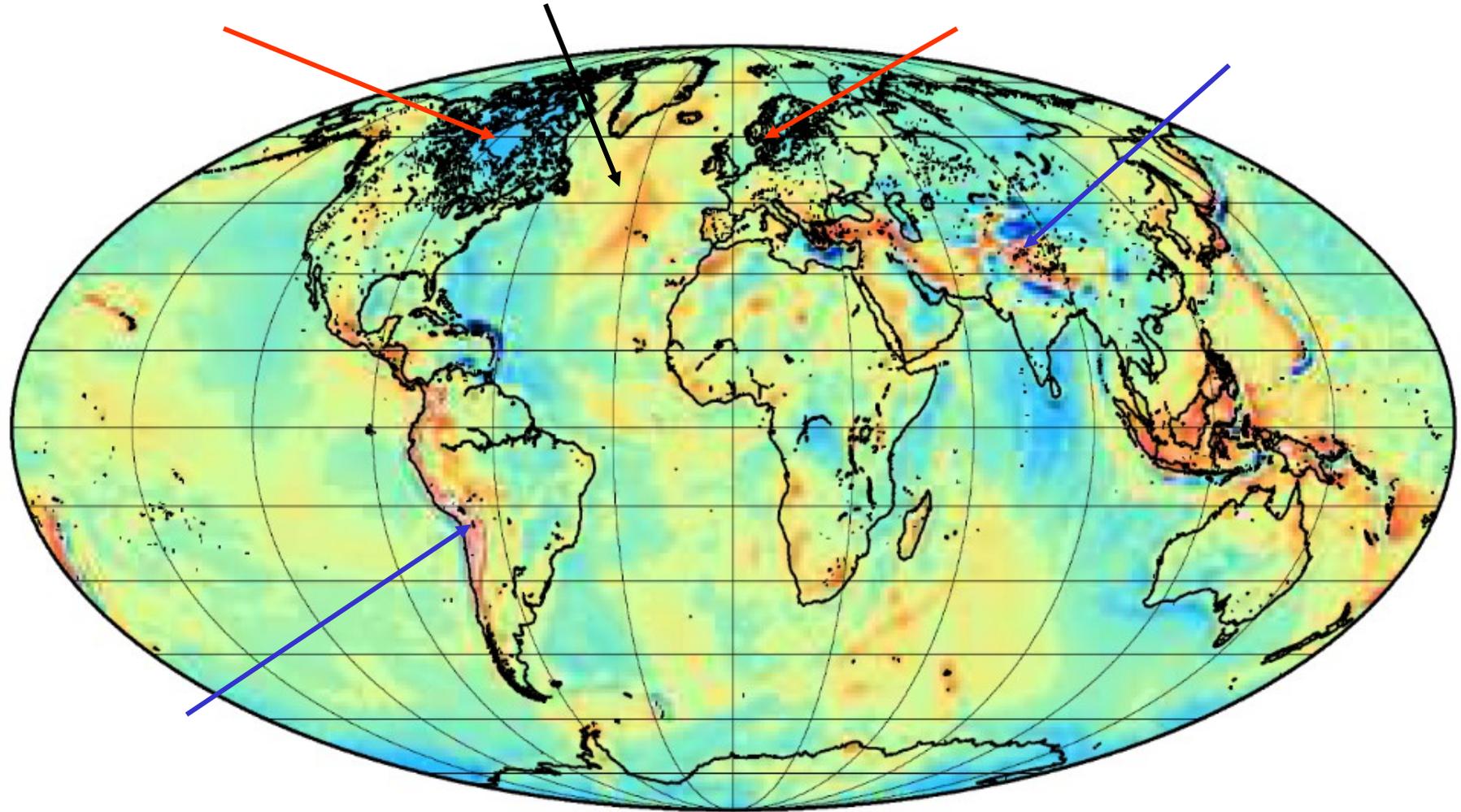
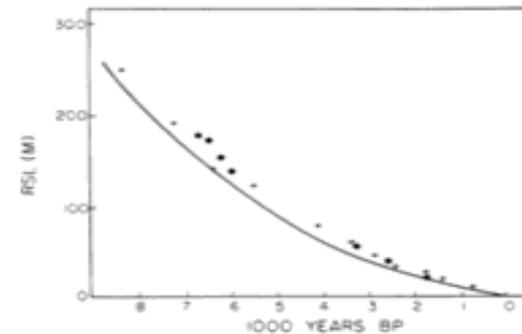




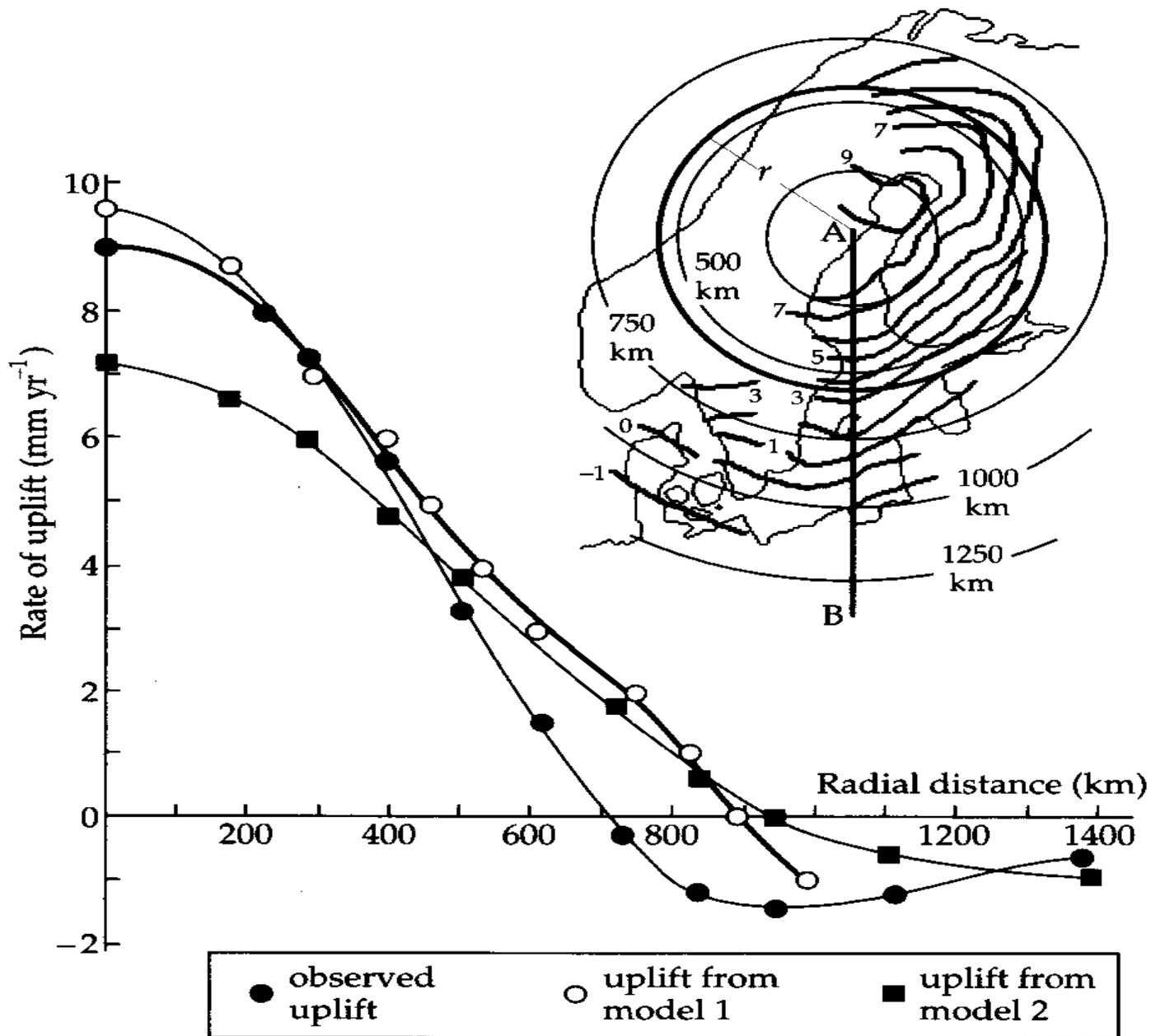
FIGURE 4.1 (a) This photograph shows a flight of raised beaches that are located in the Richmond Gulf on the southeast shore of Hudson Bay near the center of postglacial rebound. (b) The relative sea-level (RSL) curve from the Richmond Gulf beaches shown in (a). The age of individual horizons is determined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



ent-day rates of RSL fall in the three regions that were previously ice covered are approximately 1 cm/yr. The main observational data that have been employed to dem-

rebound. Individual relict beaches in the sequence may be dated using the radiocarbon method and their heights above present-day sea level plotted as a function of their age to

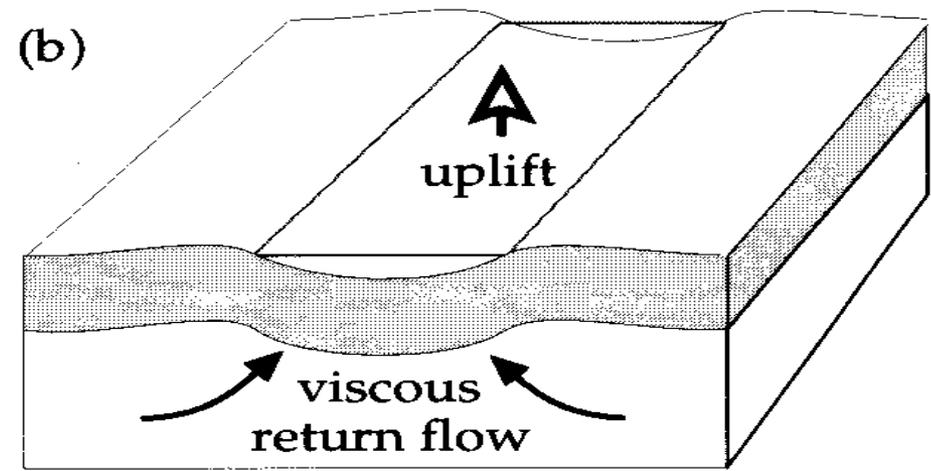
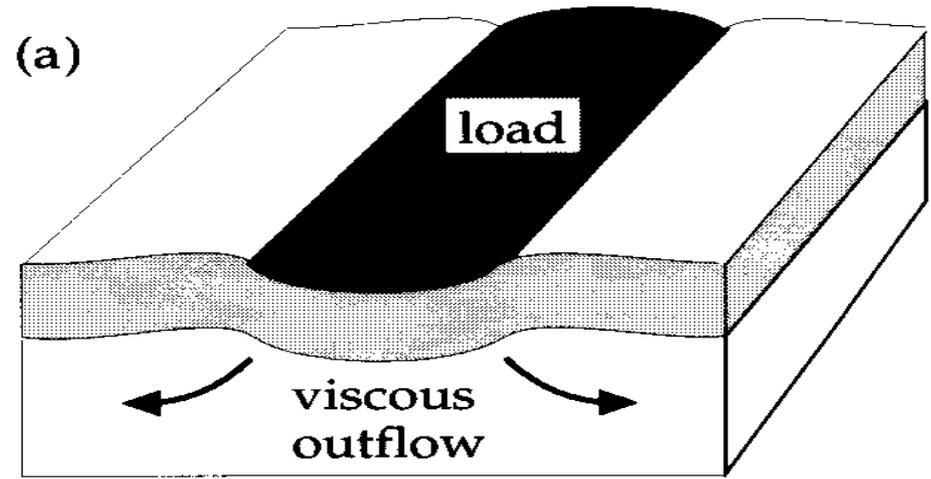




Canada, Scandinavie

Canada :

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



Données : $g_0 = 9,82 \text{ ms}^{-2}$ gravité de la Terre sphérique, $R_T = 6371 \text{ km}$ son rayon, $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ constante de gravitation, $\rho_c = 2700 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_m = 3200 \text{ kg/m}^3$ les densités de la croûte et du manteau supposés homogènes.

I. Isostasie

1. Rappeler la relation entre la topographie h et l'épaisseur H de la racine crustale dans le cas de l'équilibre isostatique.

2. Il y a 250 Ma la chaîne hercynienne était comparable à l'Himalaya ($h = 8000 \text{ m}$). En supposant que la croûte est en équilibre isotatique, à l'actuel comme à l'hercynien, que pouvez-vous dire sur les roches que l'on trouve actuellement dans le Massif Central à une altitude de 1000 m ?

3. Soit un bassin de 1000 m de profondeur, avec un taux de sédimentation constant de 0,5 mm/an, combien de temps faut-il, en supposant l'équilibre isostatique réalisé, pour combler ce bassin ?

II. Anomalies de pesanteur

1. Pour la pesanteur à la surface de l'ellipsoïde de référence on donne la formule approchée :

$$\gamma_E(\theta) = 978,03267(1 + 0,0052789 \sin^2 \theta). \quad (1)$$

Que signifie θ ? En quelle unité est donné ici γ ? Que vaut la pesanteur aux pôles et à l'équateur de l'ellipsoïde ?

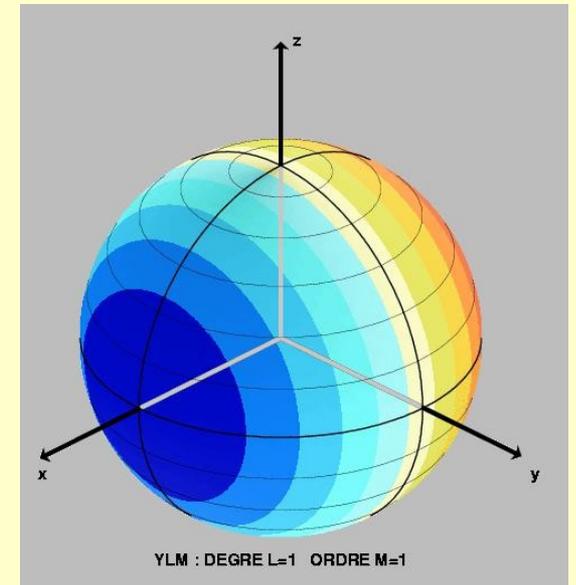
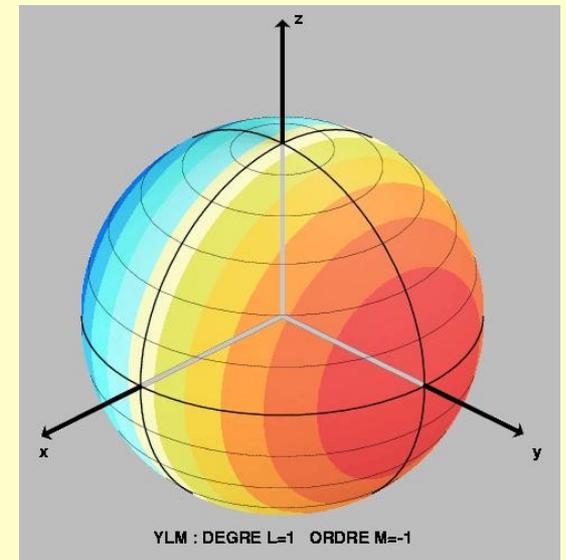
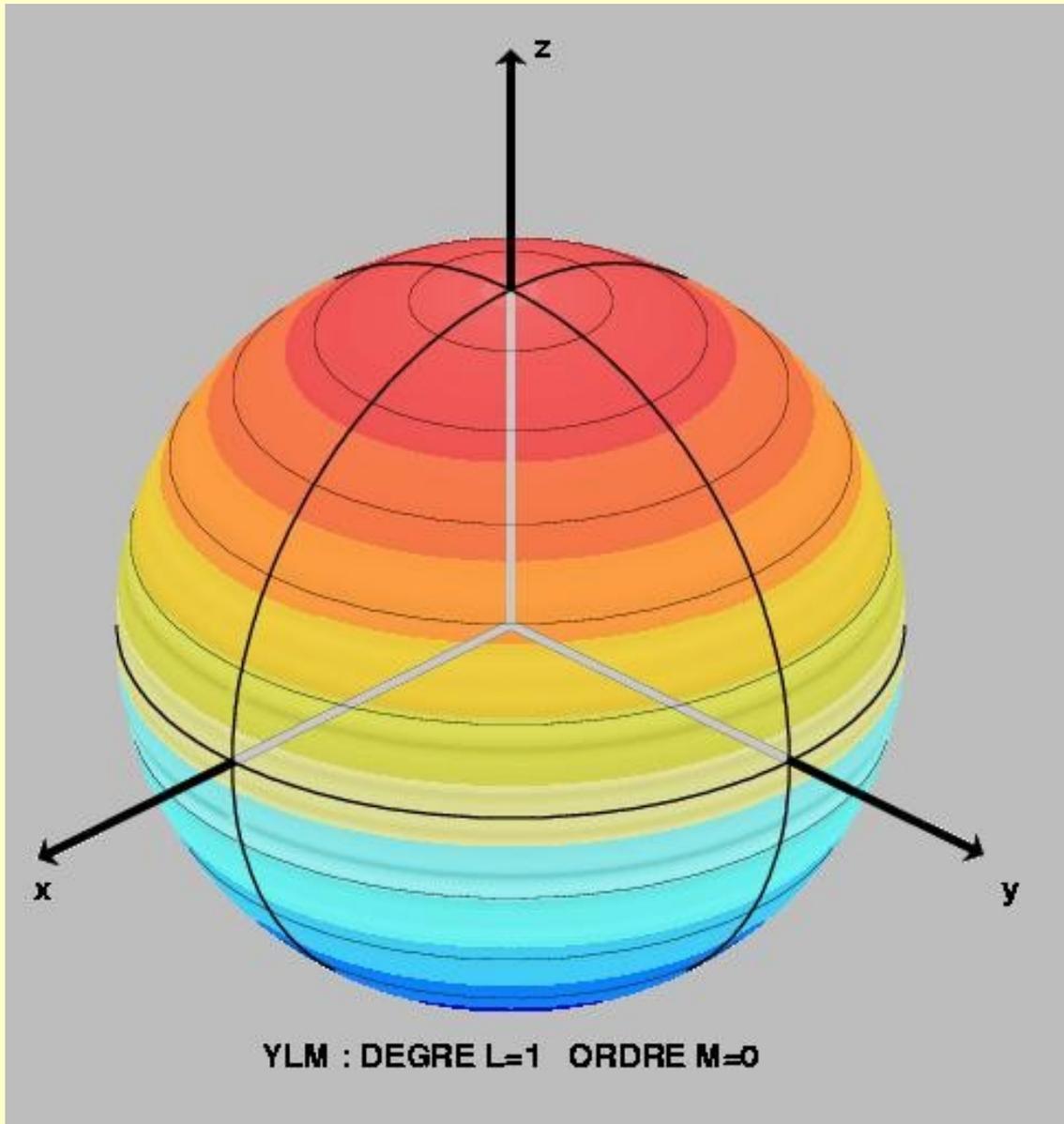
2. On mesure sur la plateau des Andes (altitude 5 km, latitude -20°) une pesanteur $\gamma_{mes} = 977,18336 \text{ Gal}$ (l'effet de la marée est retiré). Que valent les anomalies de pesanteur à l'air libre et de Bouguer ? A votre avis la croûte est-elle en équilibre isostatique, pourquoi ?

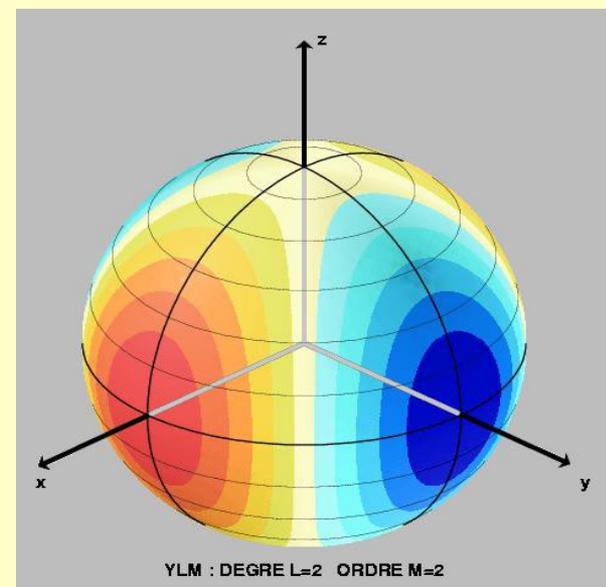
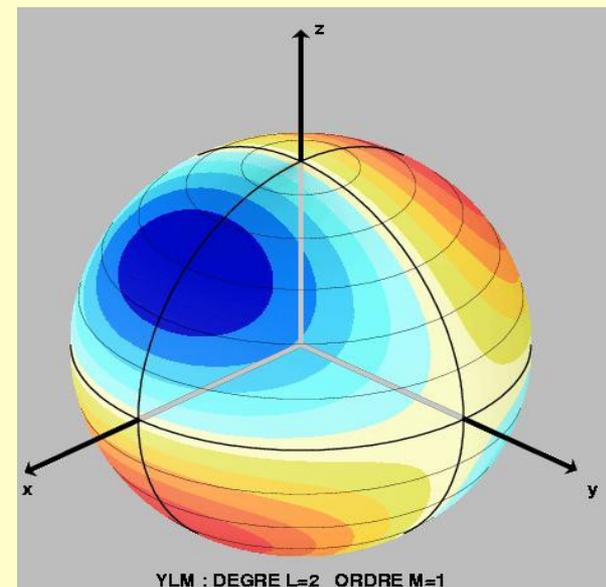
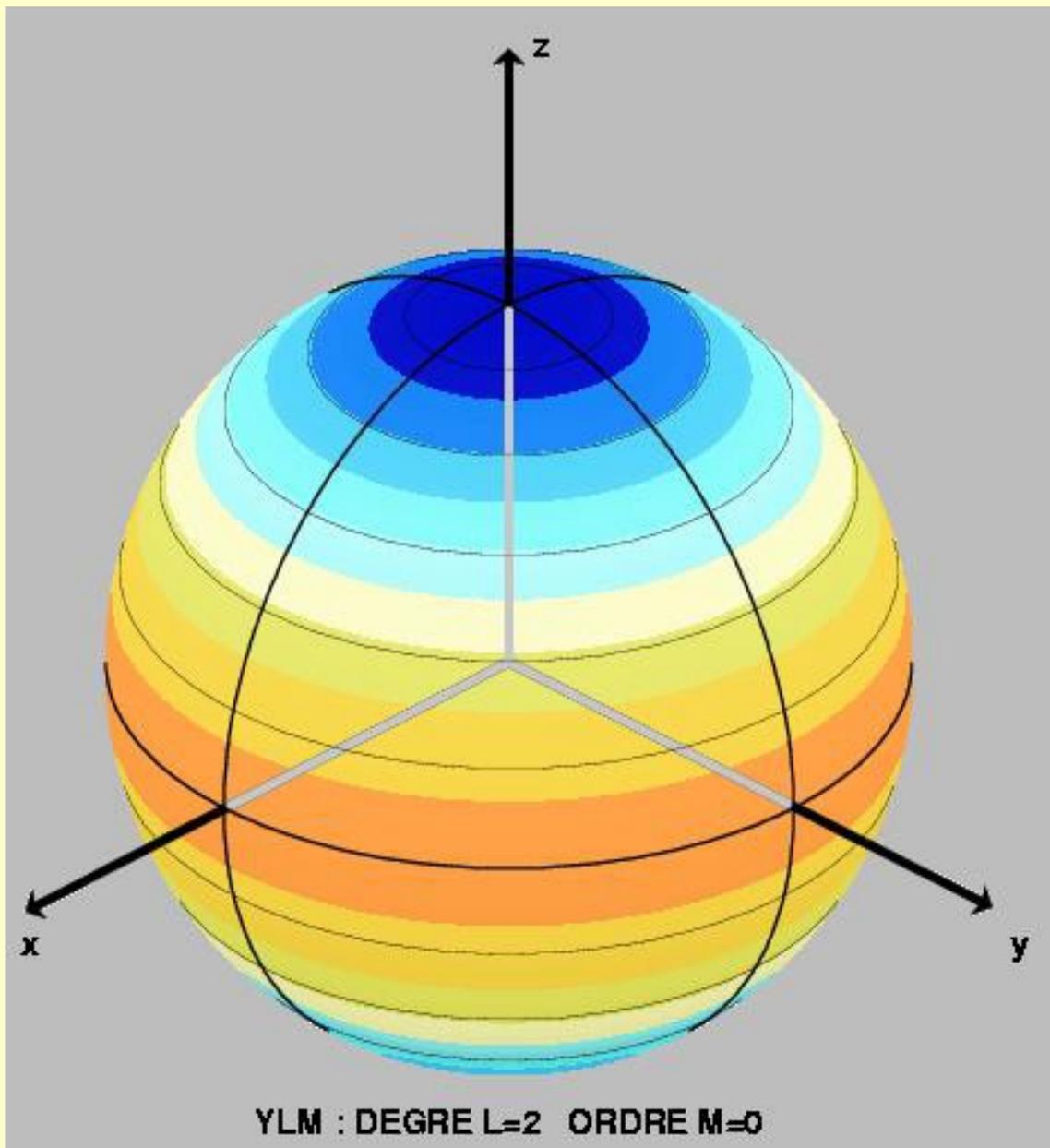
Exercices type

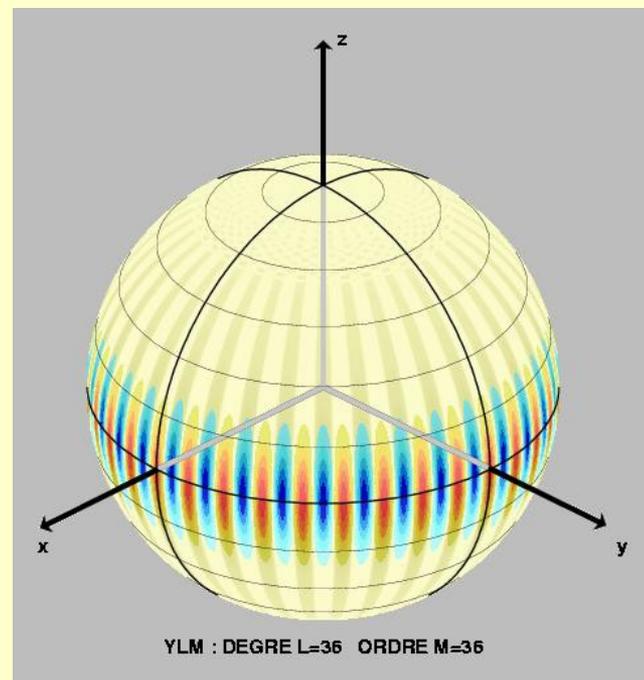
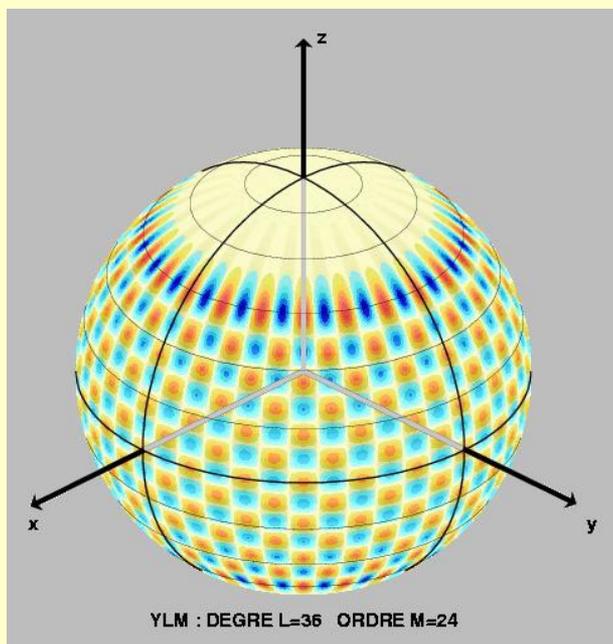
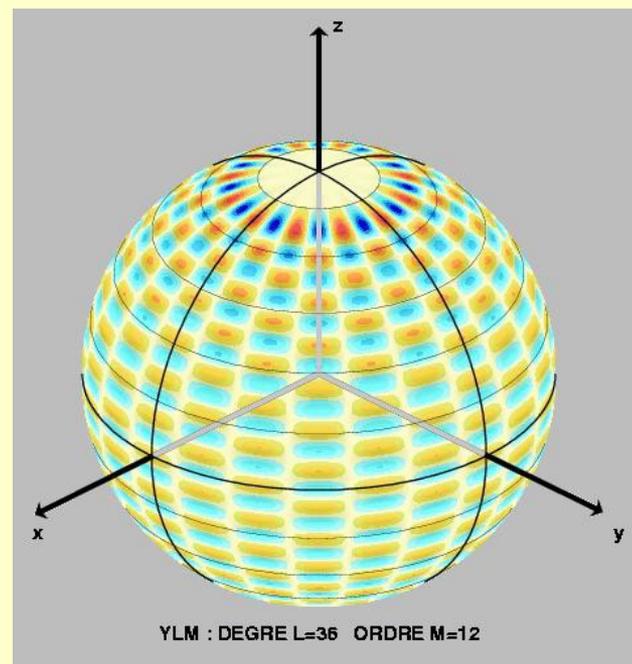
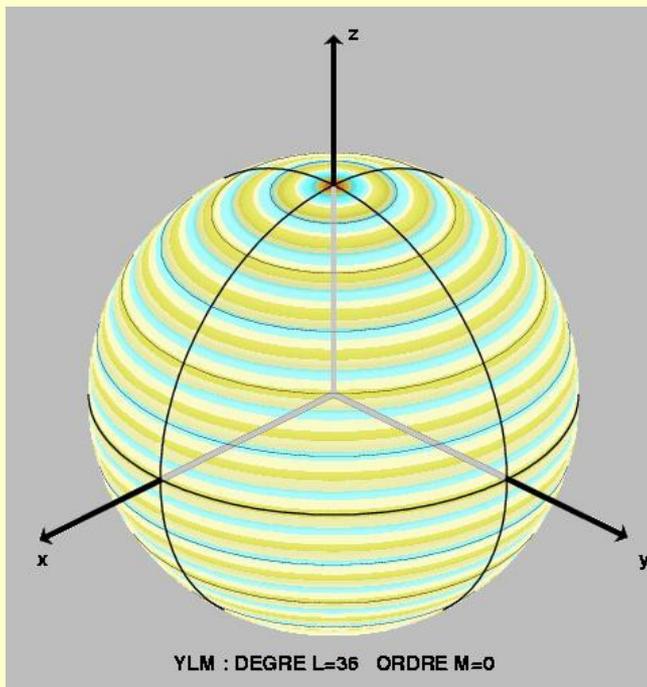
Pour aller plus loin dans l'interprétation globale du champ :
représentation du champ en harmoniques sphériques

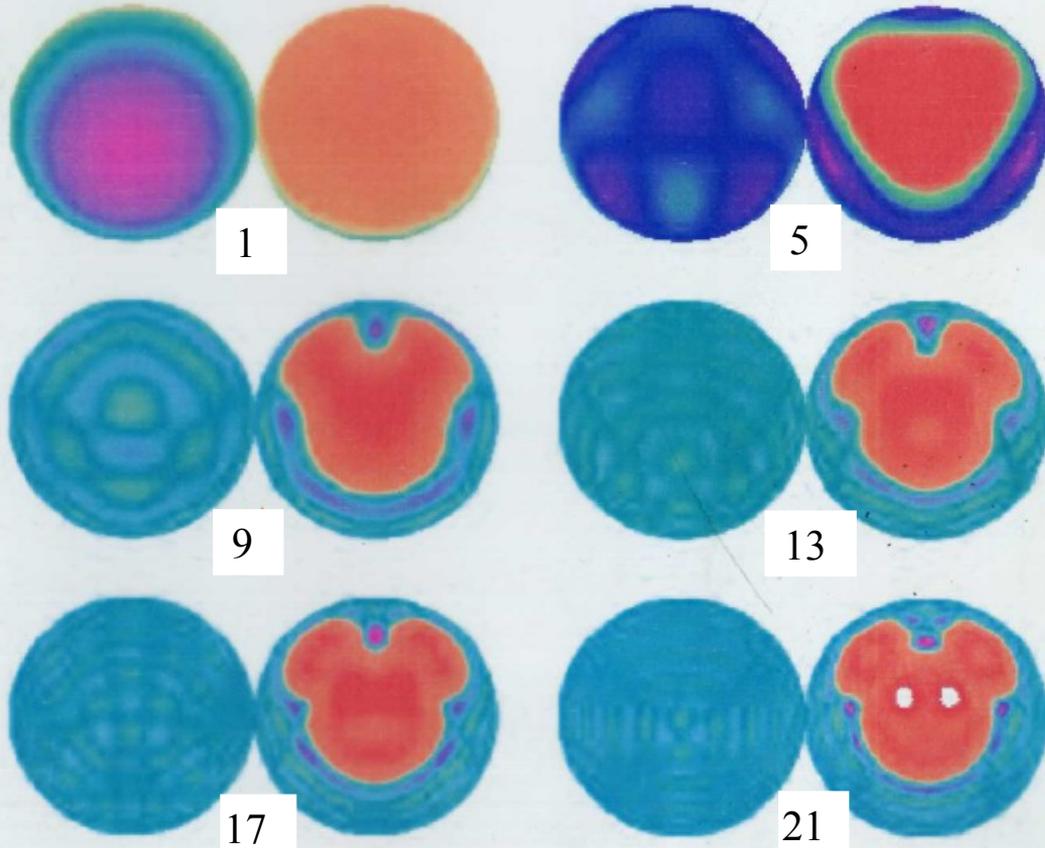
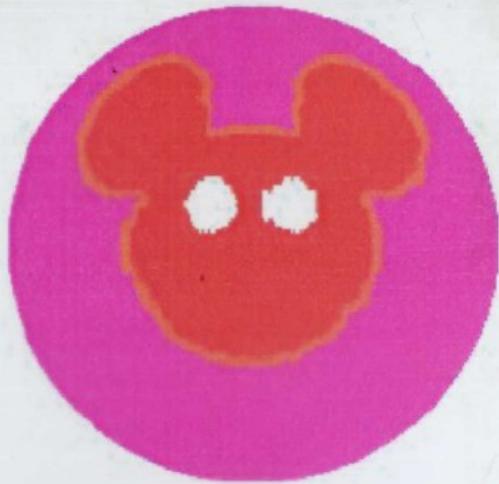
$$V(r,\theta,\Phi)=\sum C_{lm} (R/r)^{l+1} Y_{lm}(\theta,\Phi)$$

$l=300 \quad \sim 100\,000$ termes









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.

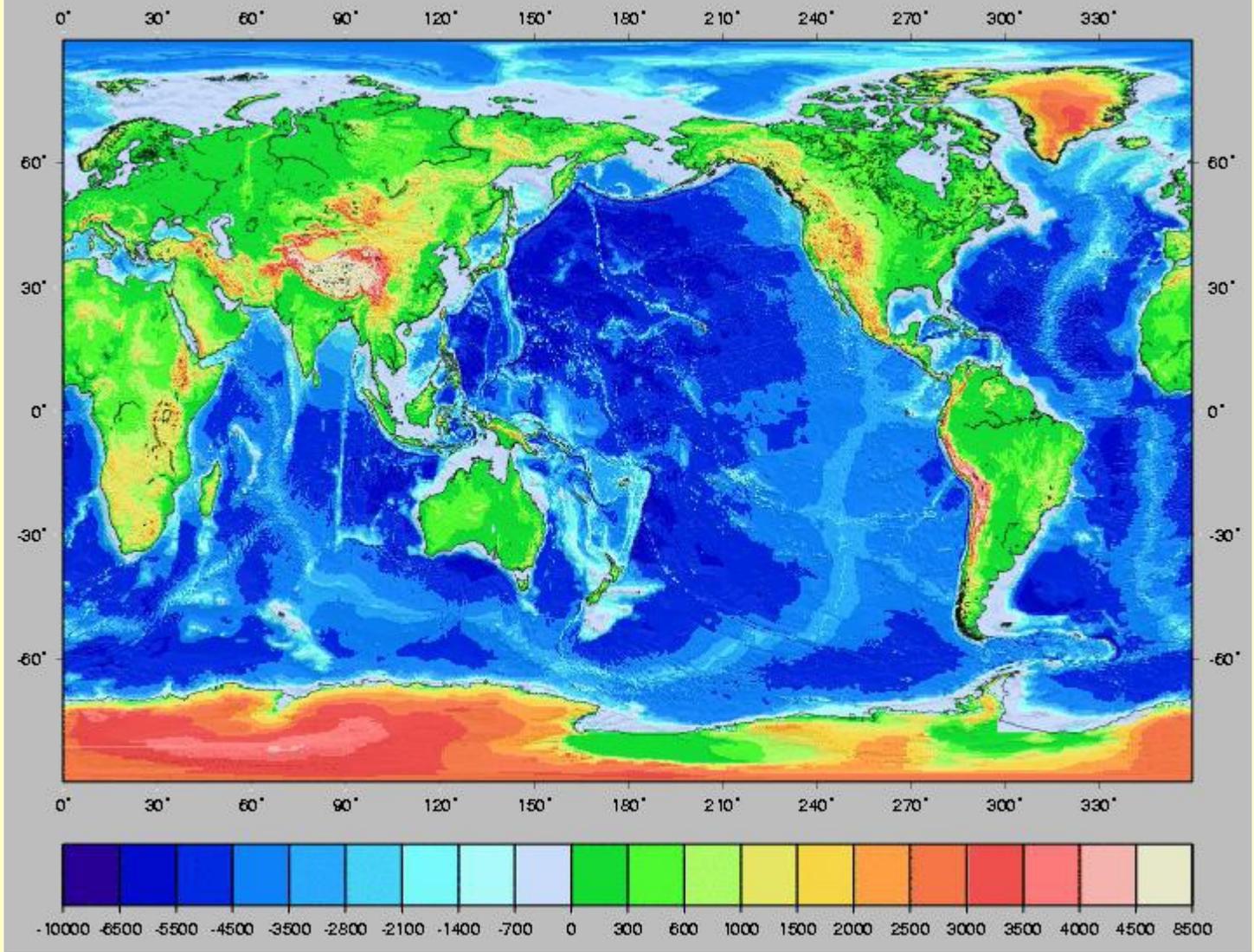
Longueur d'onde d'une harmonique de degré l :

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

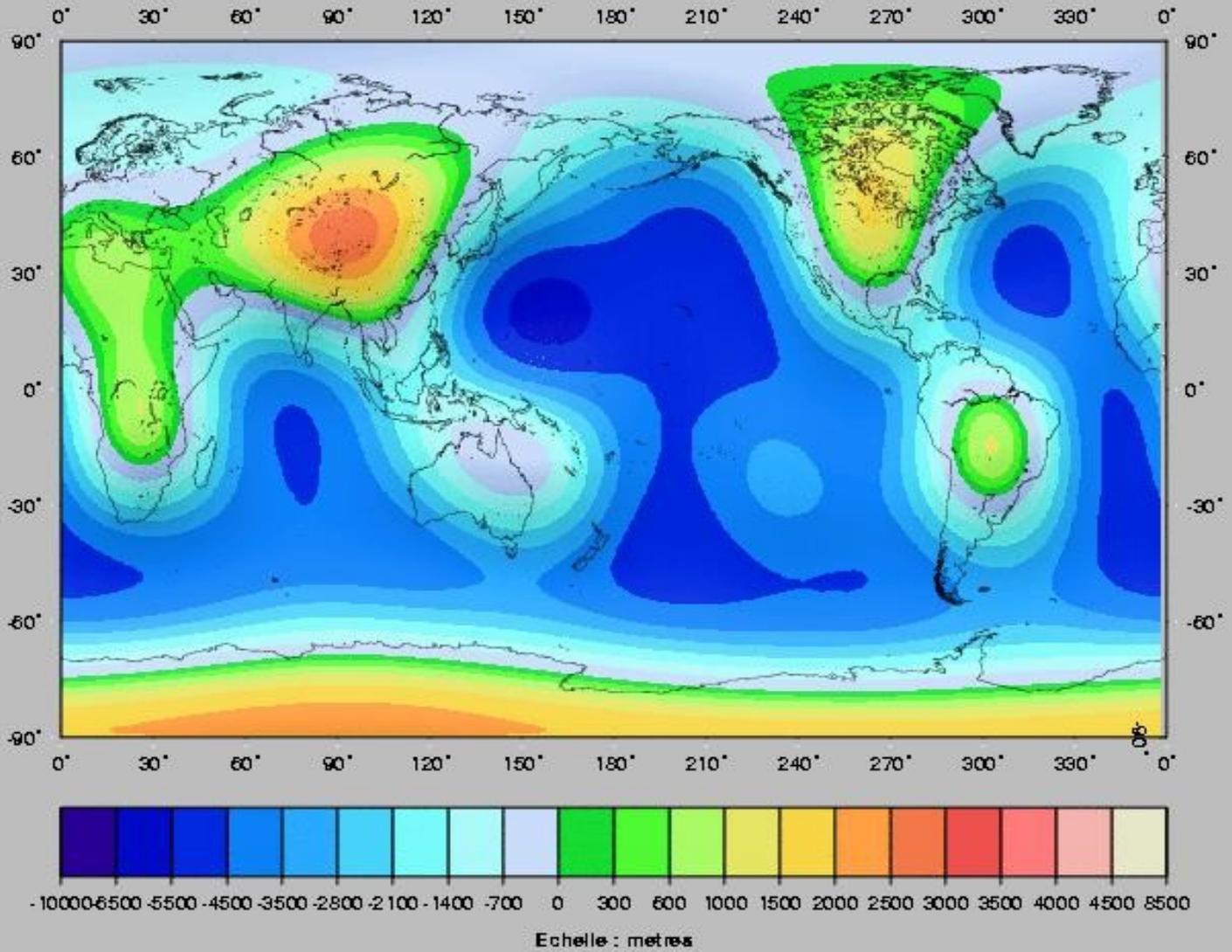
$$\lambda R \text{ (km)} = 40\,000 \text{ km} / l$$

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

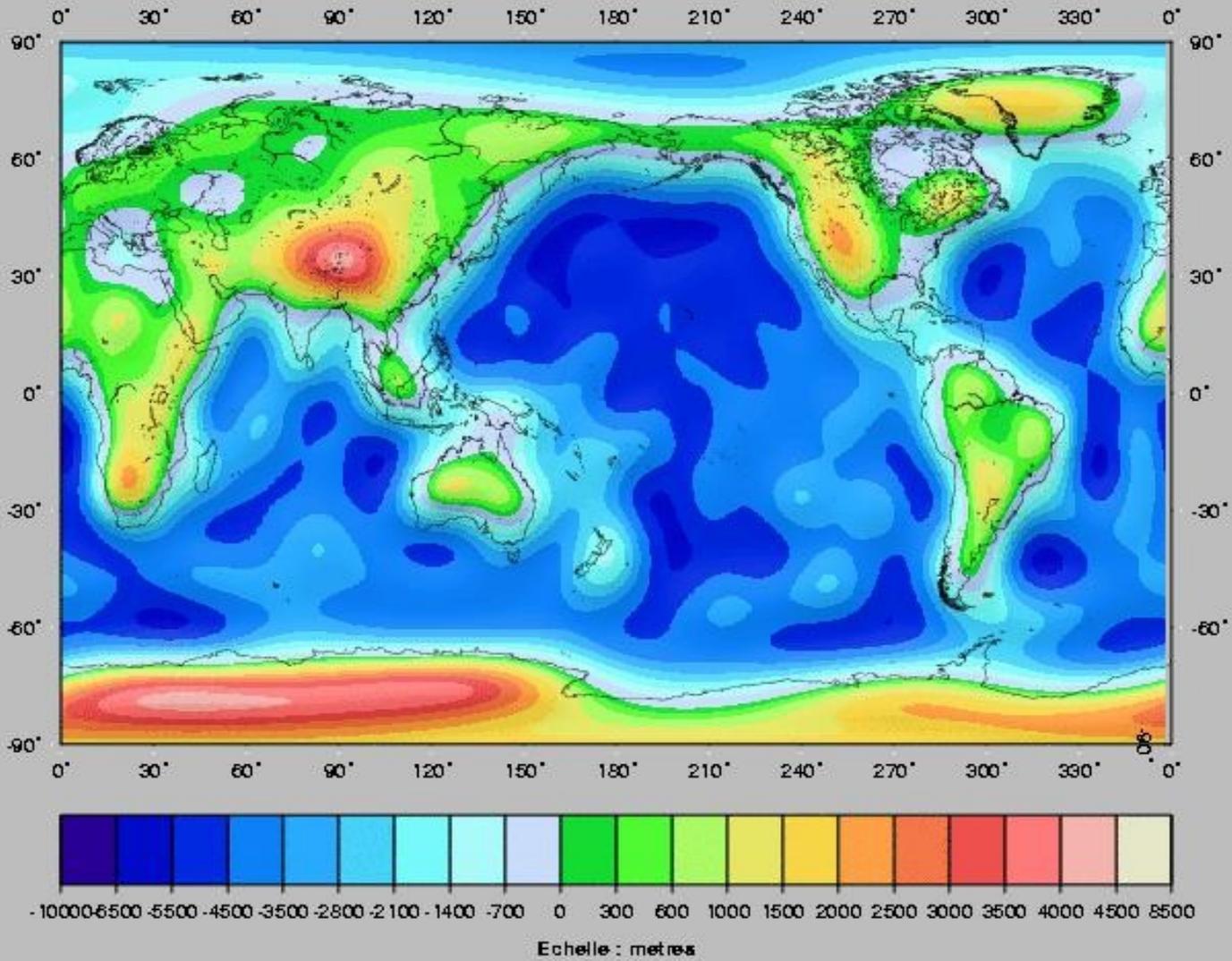
TOPOGRAPHIE TERRESTRE : grille 10'x10'



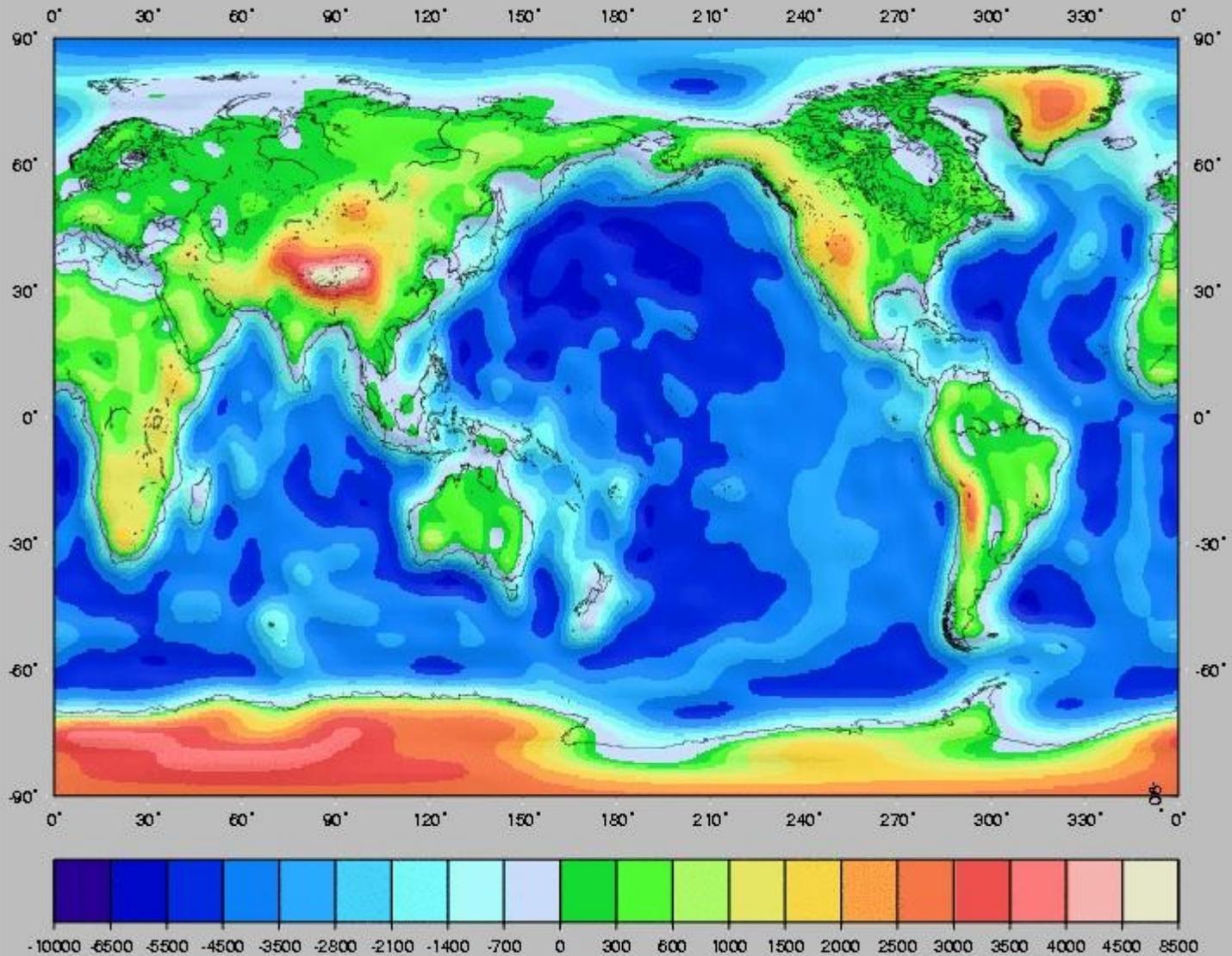
Topographie : degre l = 0 -> 6



Topographie : degre l = 0 -> 16

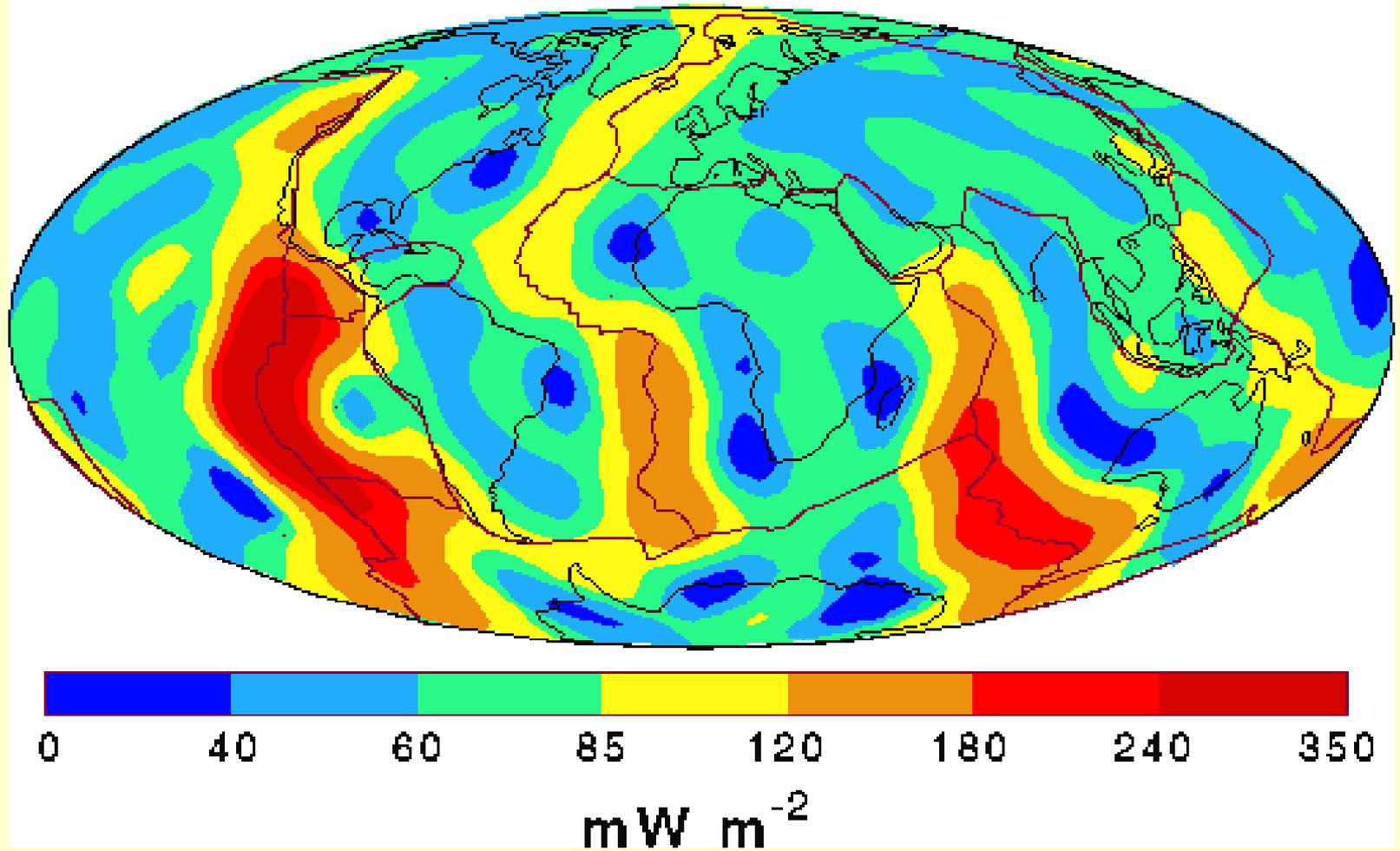


TOPOGRAPHIE TERRESTRE : L = 0 - 36

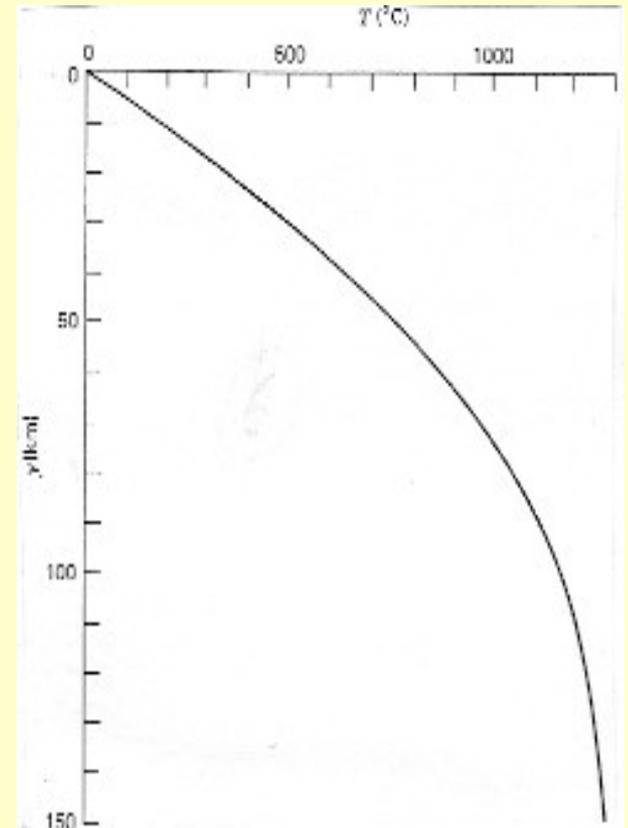
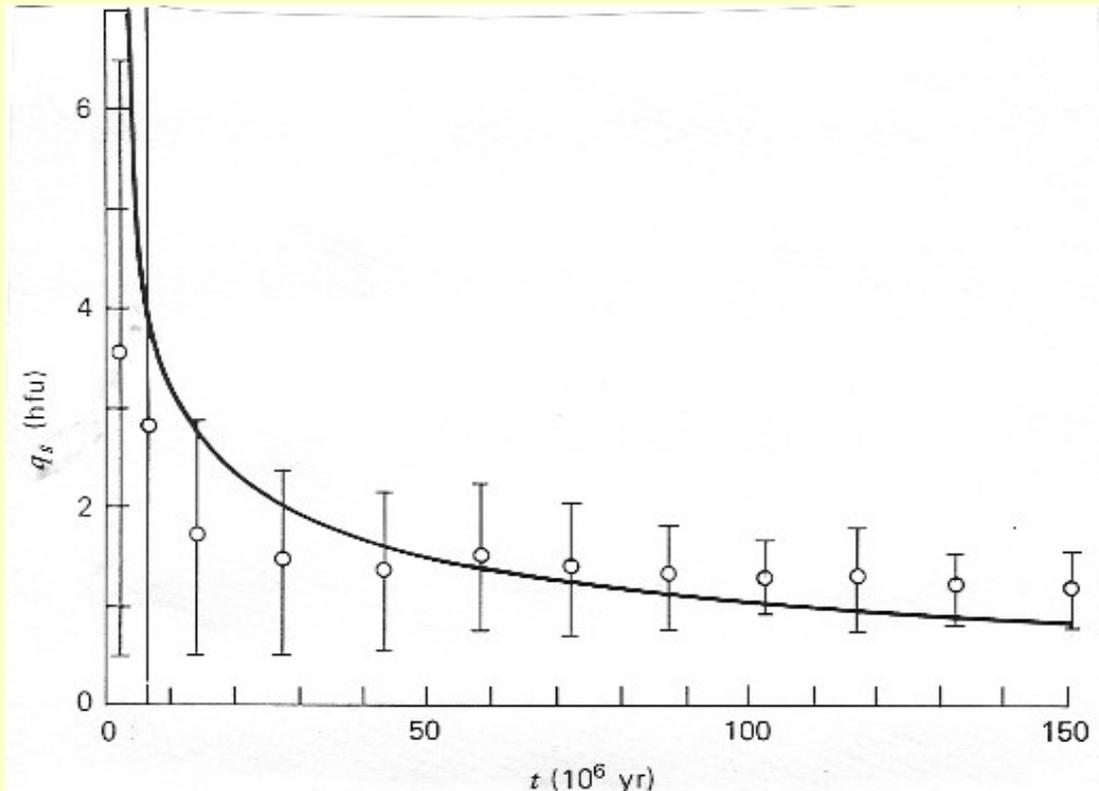


Global Heat Flow Map (Degree 12 Spherical Harmonic)

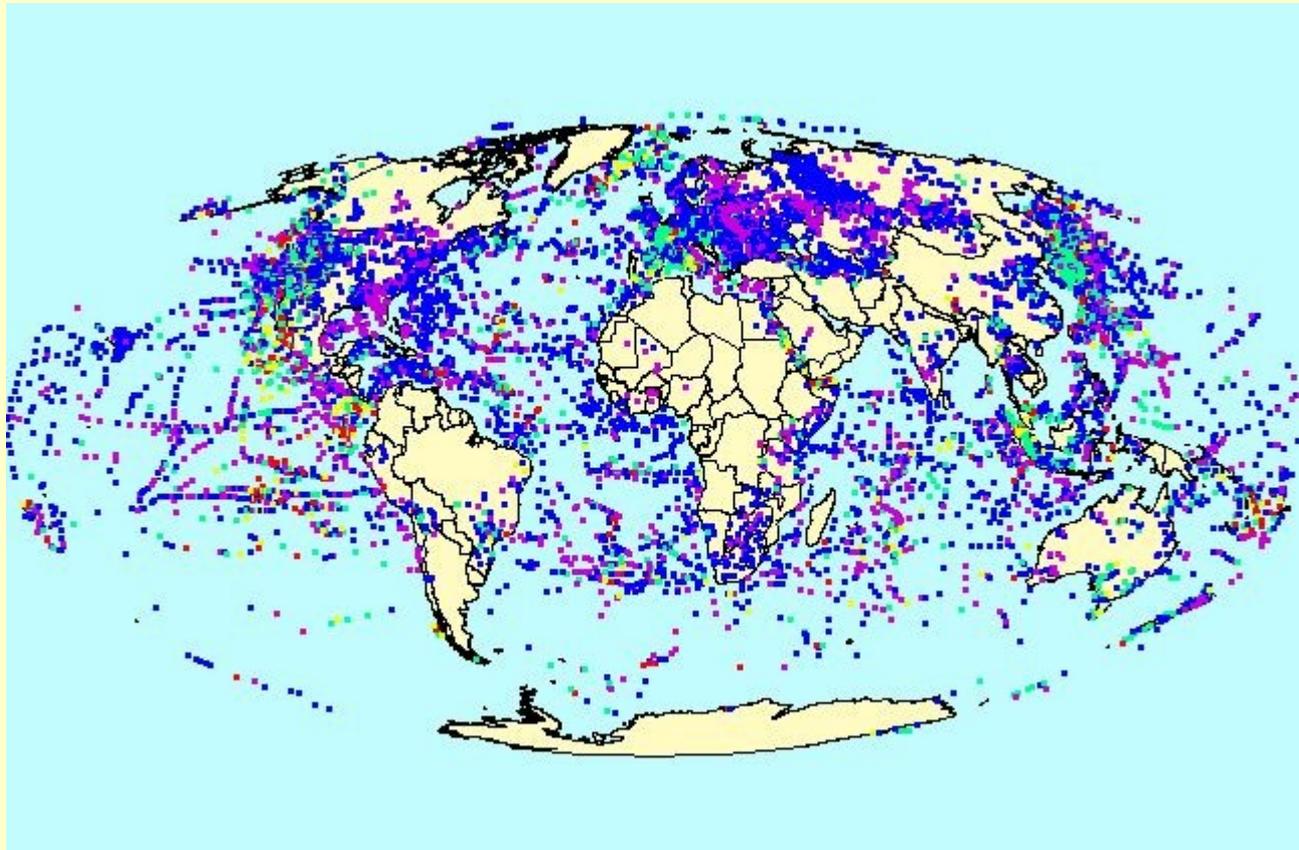
Heat Flow



Flux de chaleur en différents points des fonds océaniques



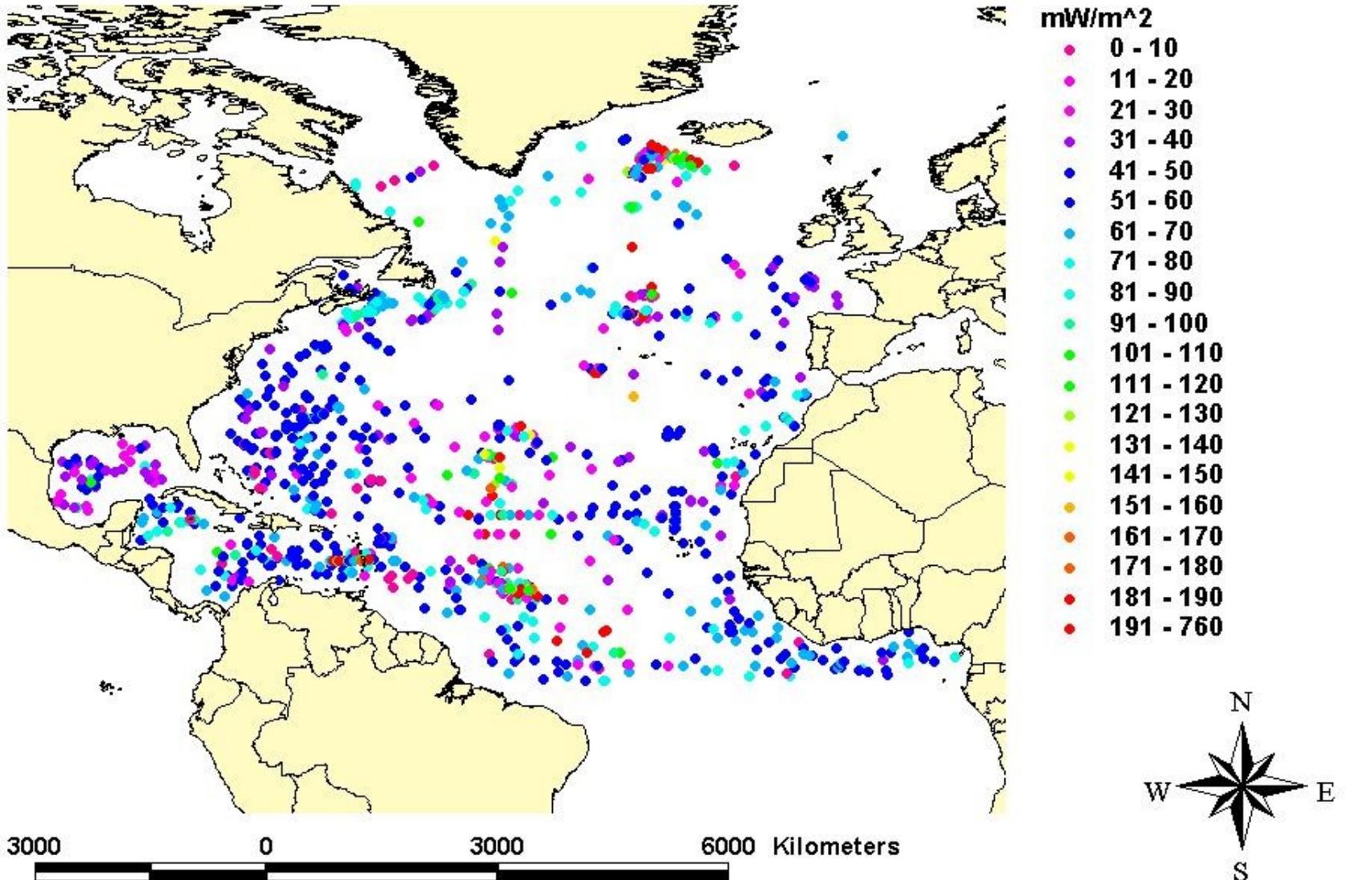
Géotherme correspondant à un âge de 60.4 MA
(âge moyen de la lithosphère océanique)



Global Heat Flow (mW / m²) :

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

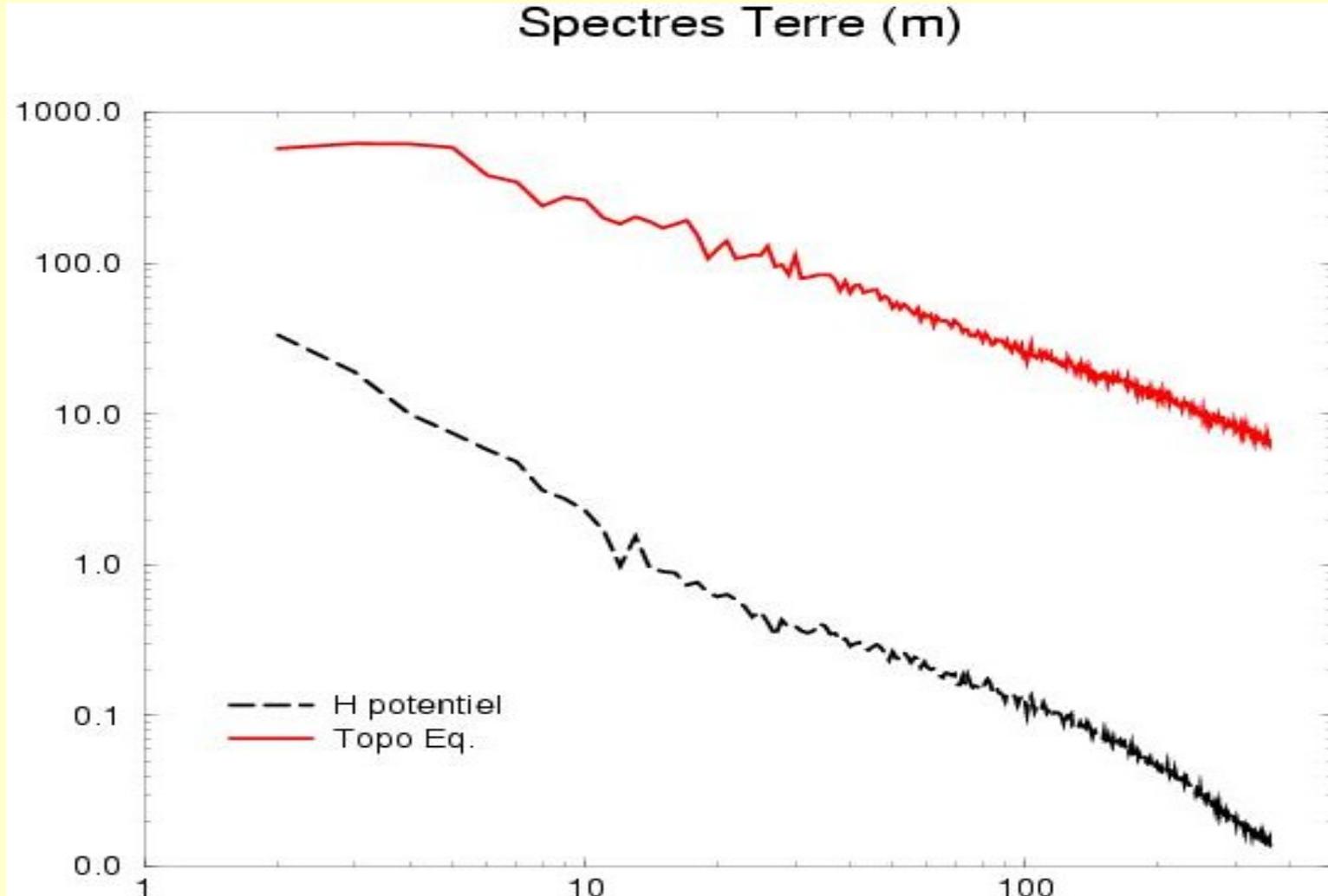
North Atlantic



En harmoniques sphériques

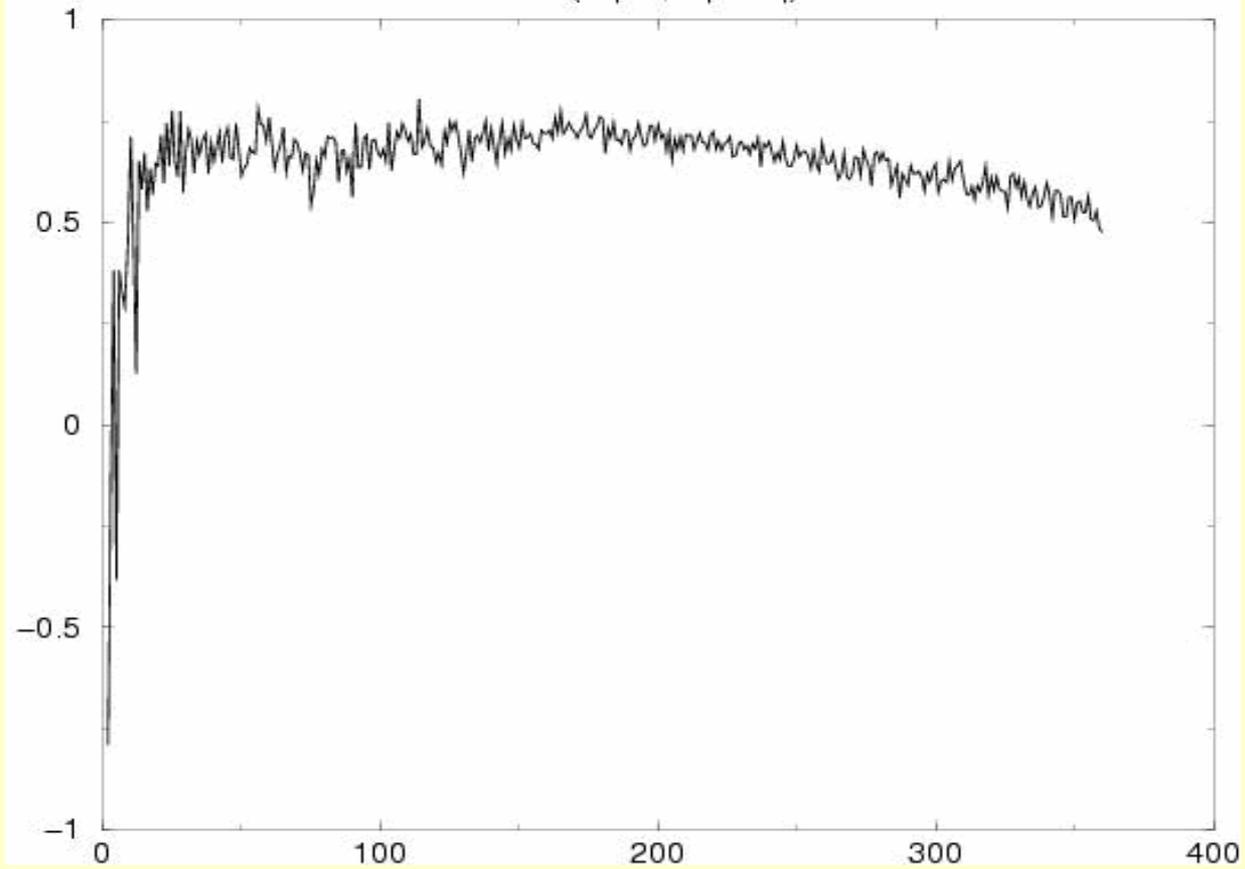
Une topographie h de degré l devrait créer un géoïde $N \sim 1.5 h / (l+1/2)$

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



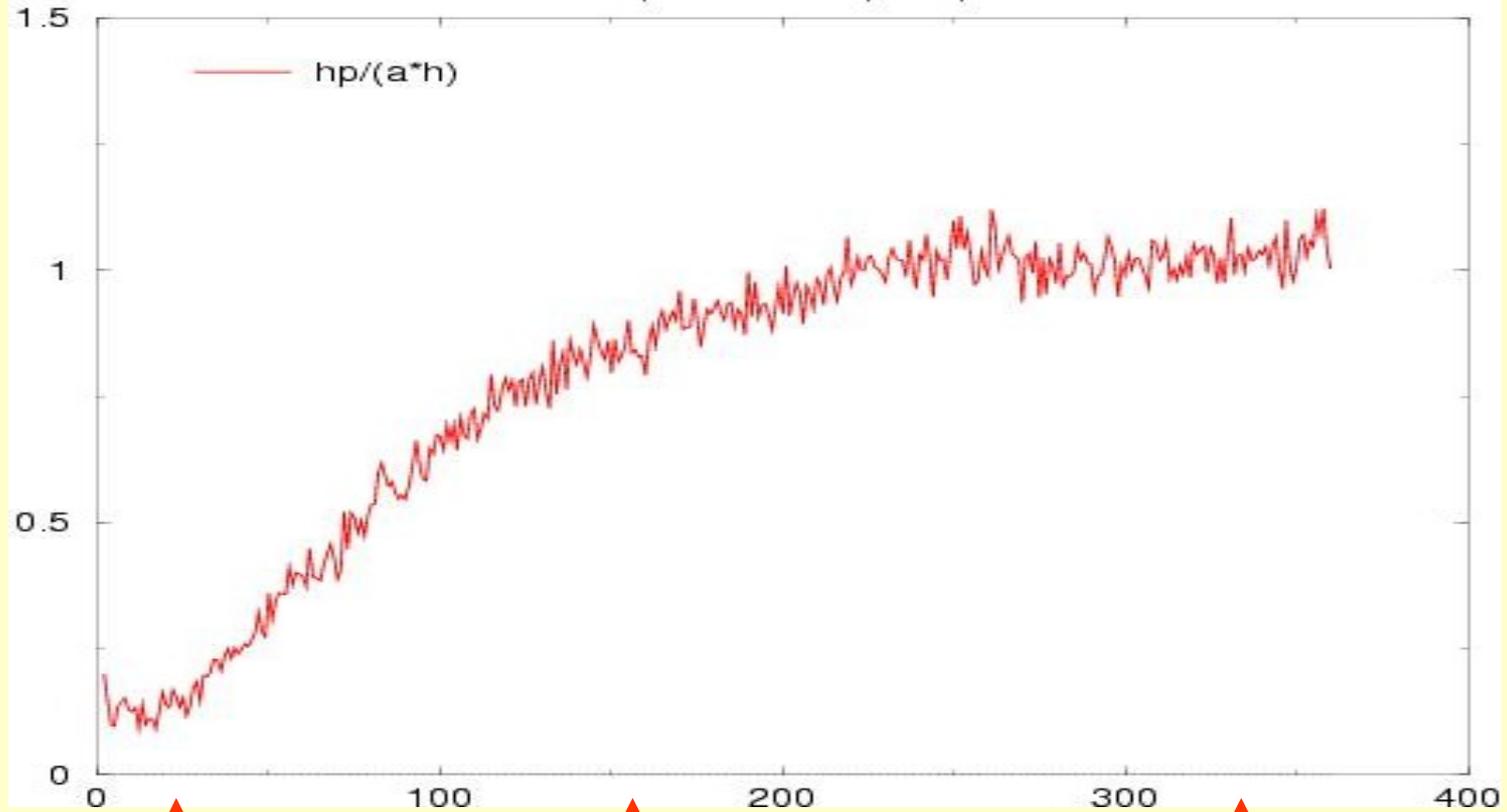
Correlation Terre

cor (H pot, topo eq)



Admittances Terre

H potentiel / topo eq



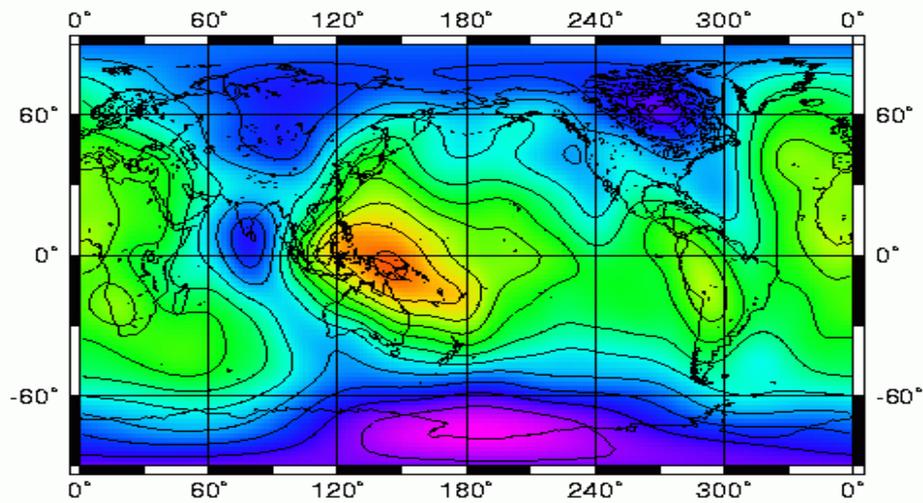
↑
Topo compensée :
Gravi ← manteau

↑
Gravi ← lithosphère

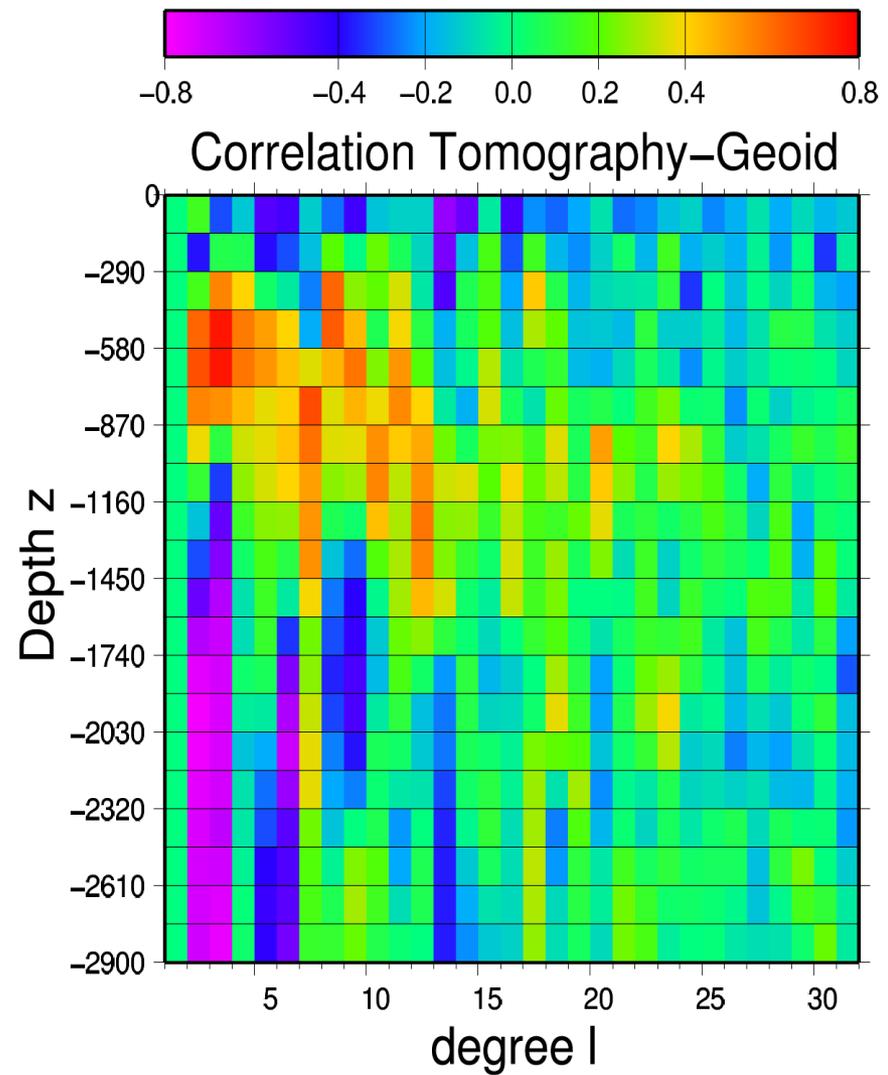
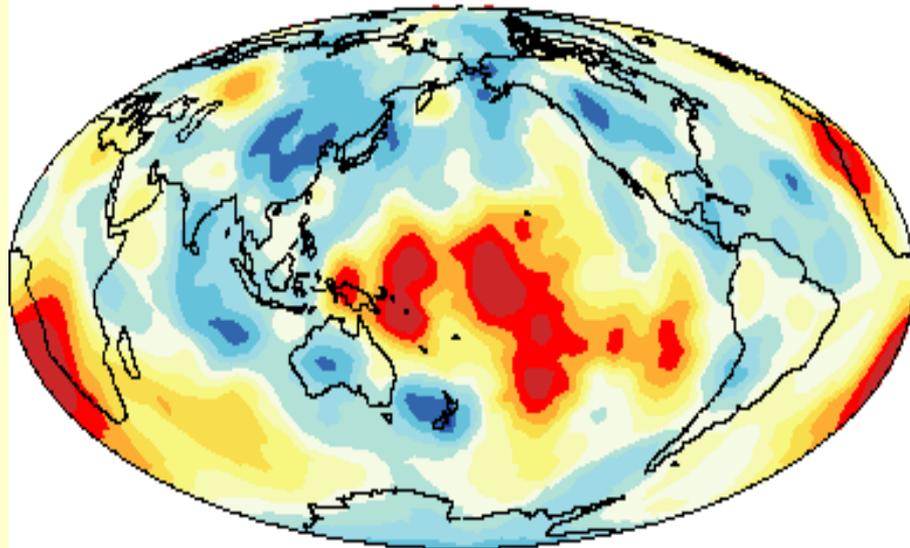
↑
Topo non compensée :
Gravi ← topo

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

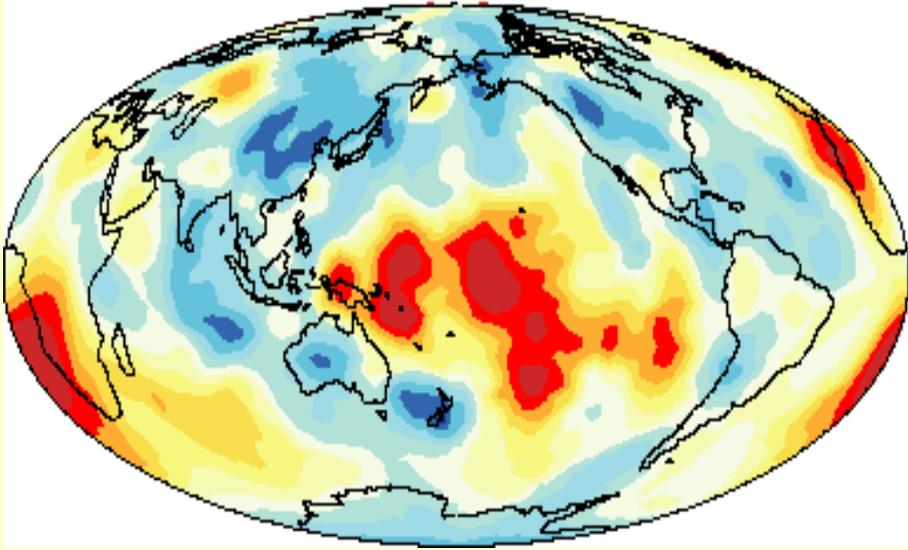
GEOIDE



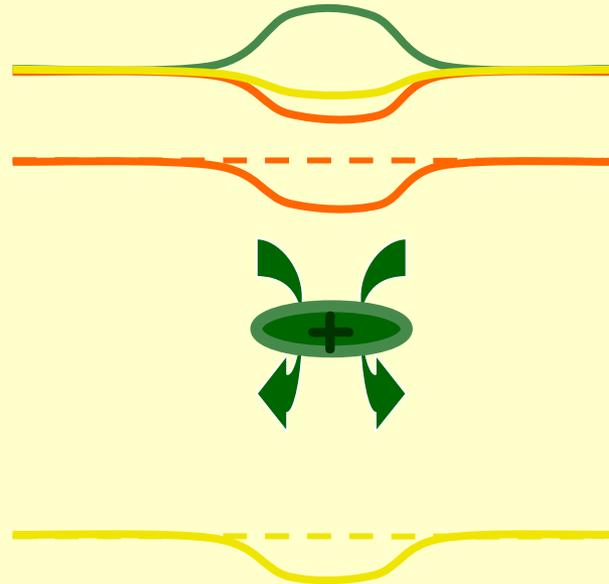
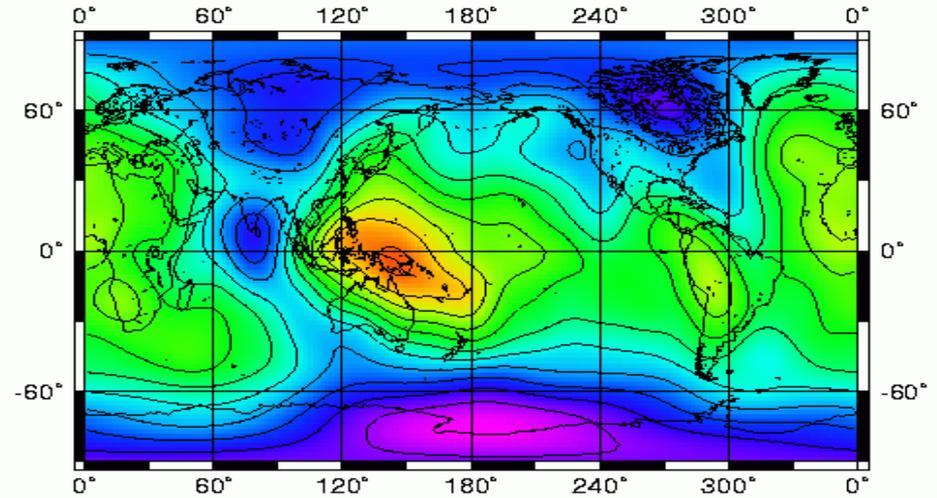
Shear velocity at the bottom of the mantle



Shear velocity at the bottom of the mantle



GEOIDE

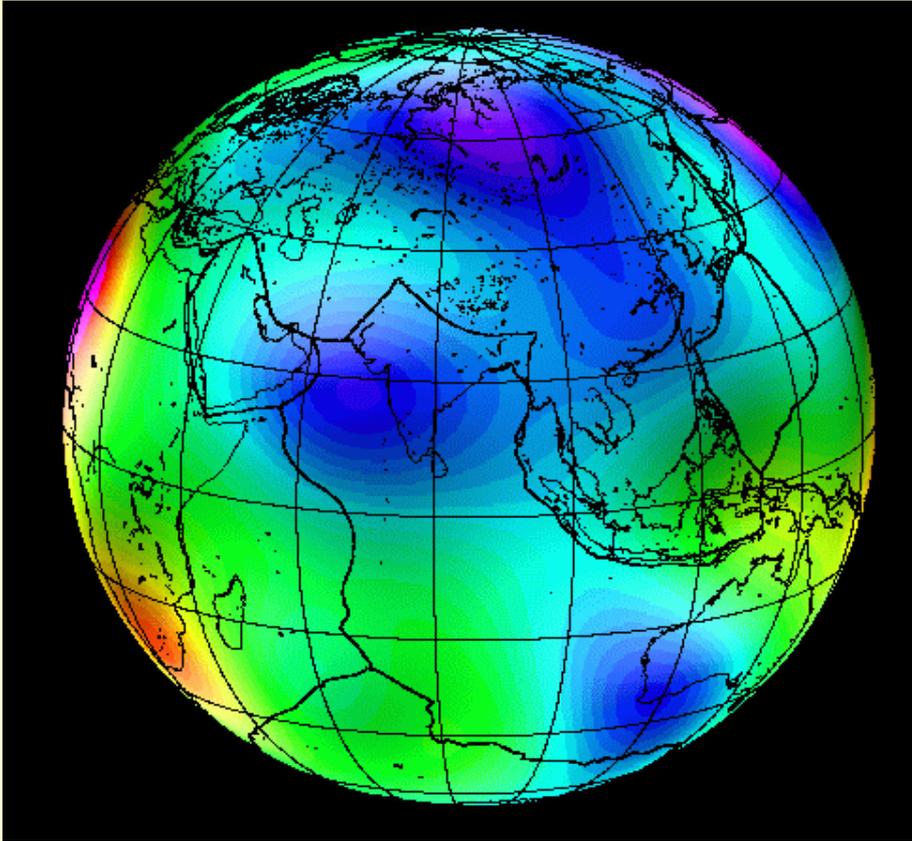


GEOIDE

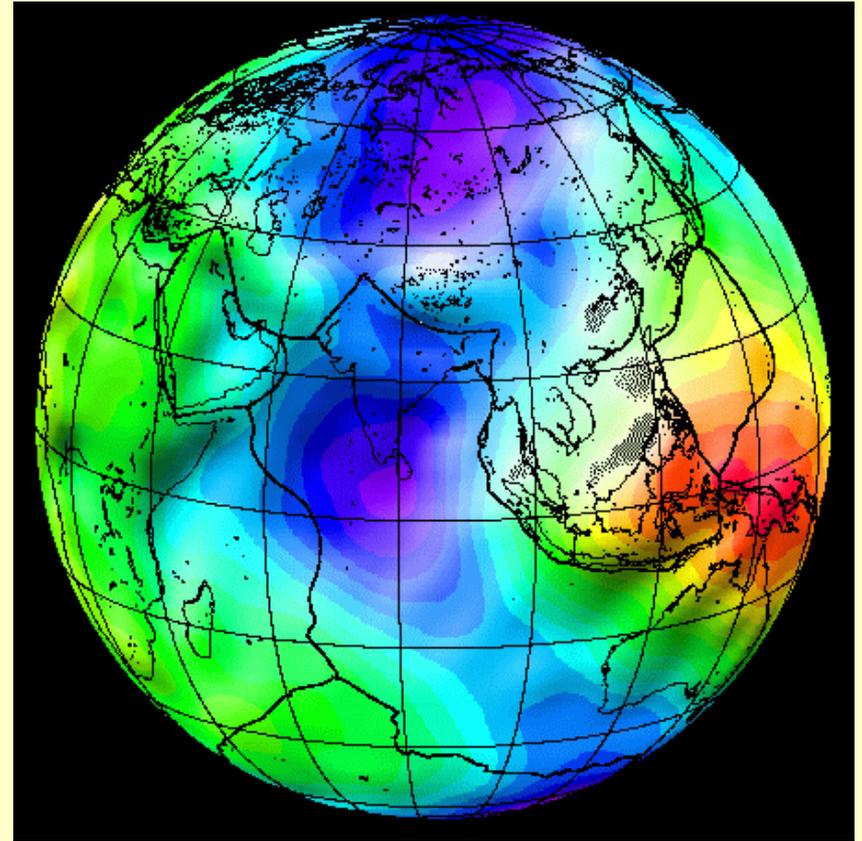
surface

manteau

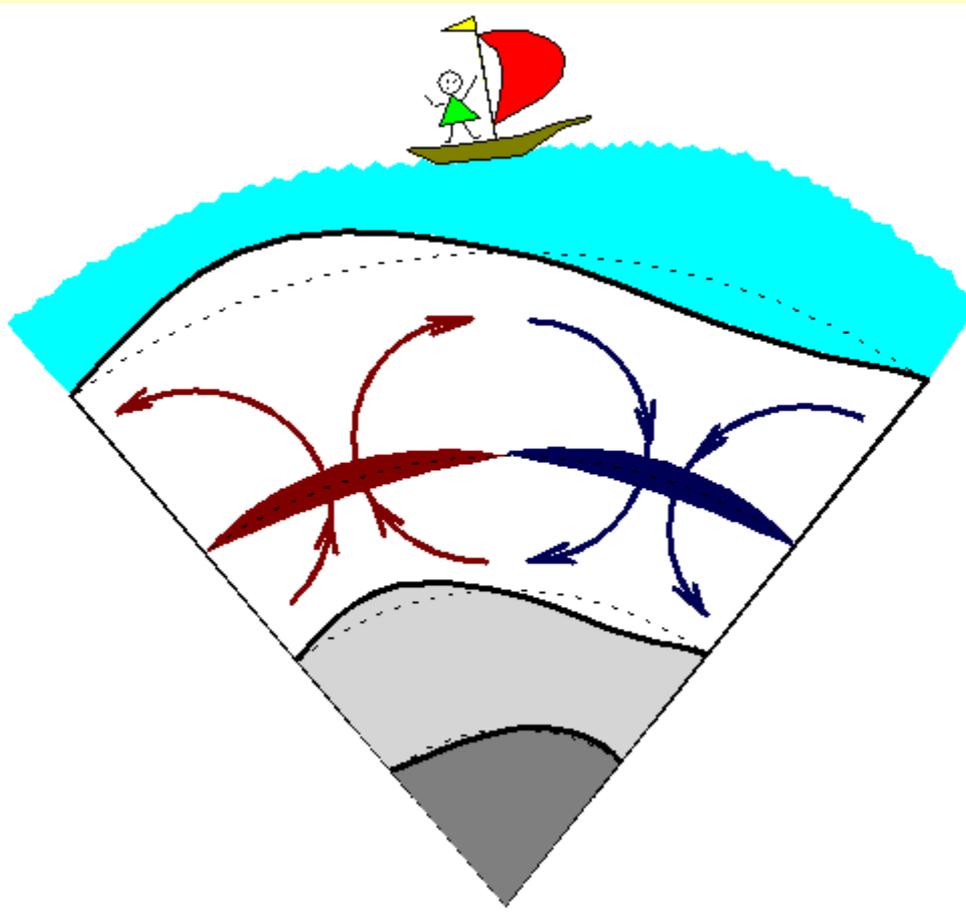
noyau



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

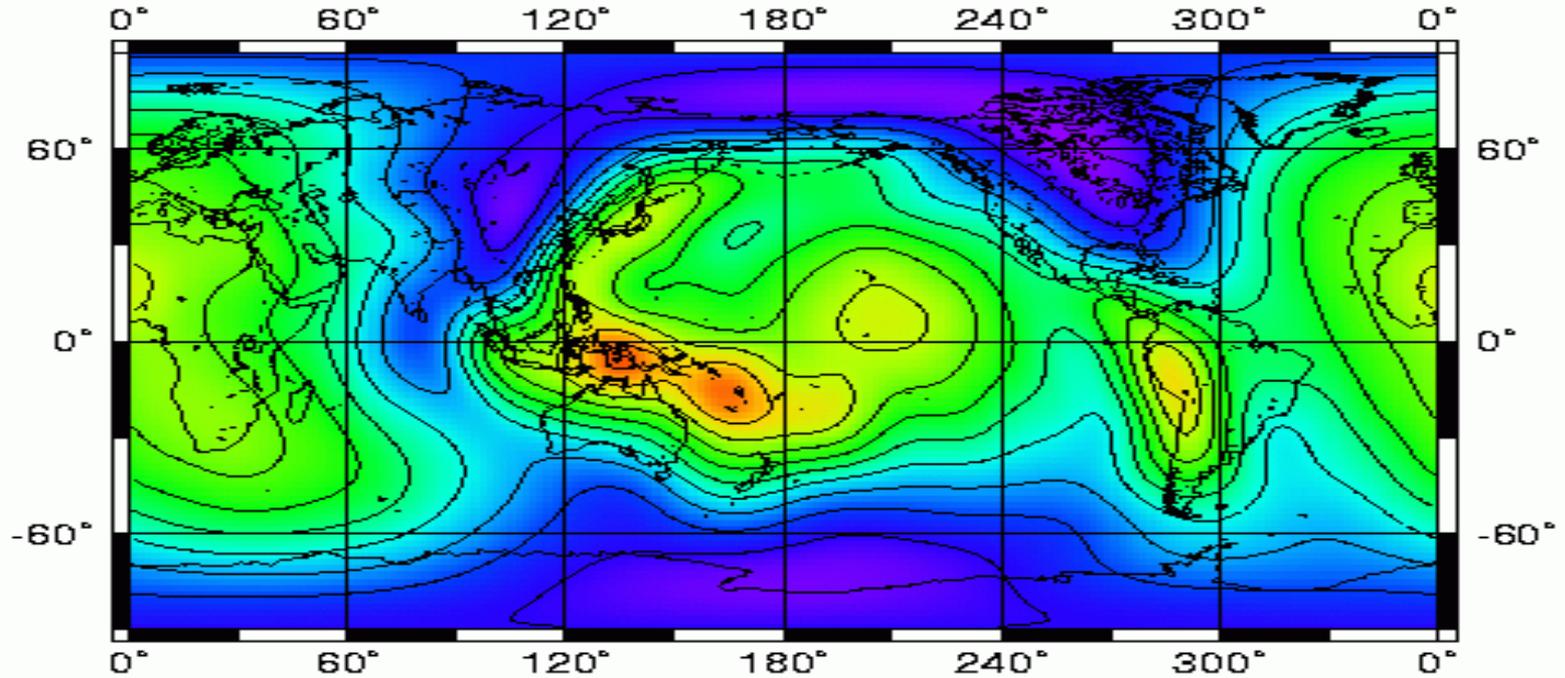


Ondulations du Géoïde.



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.

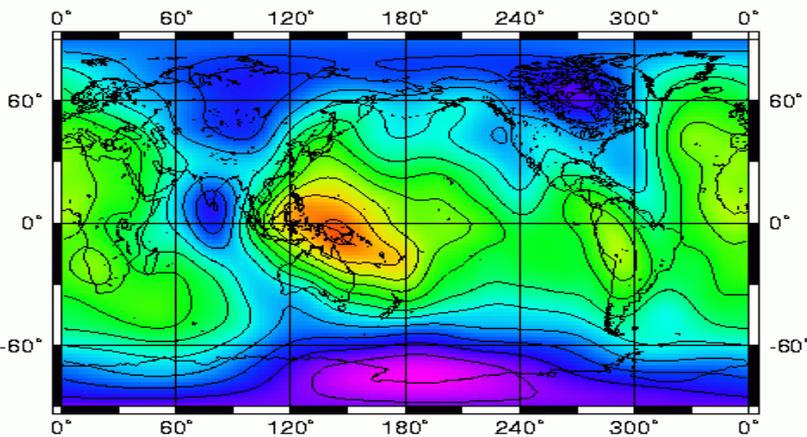
GEOIDE SYNTH.

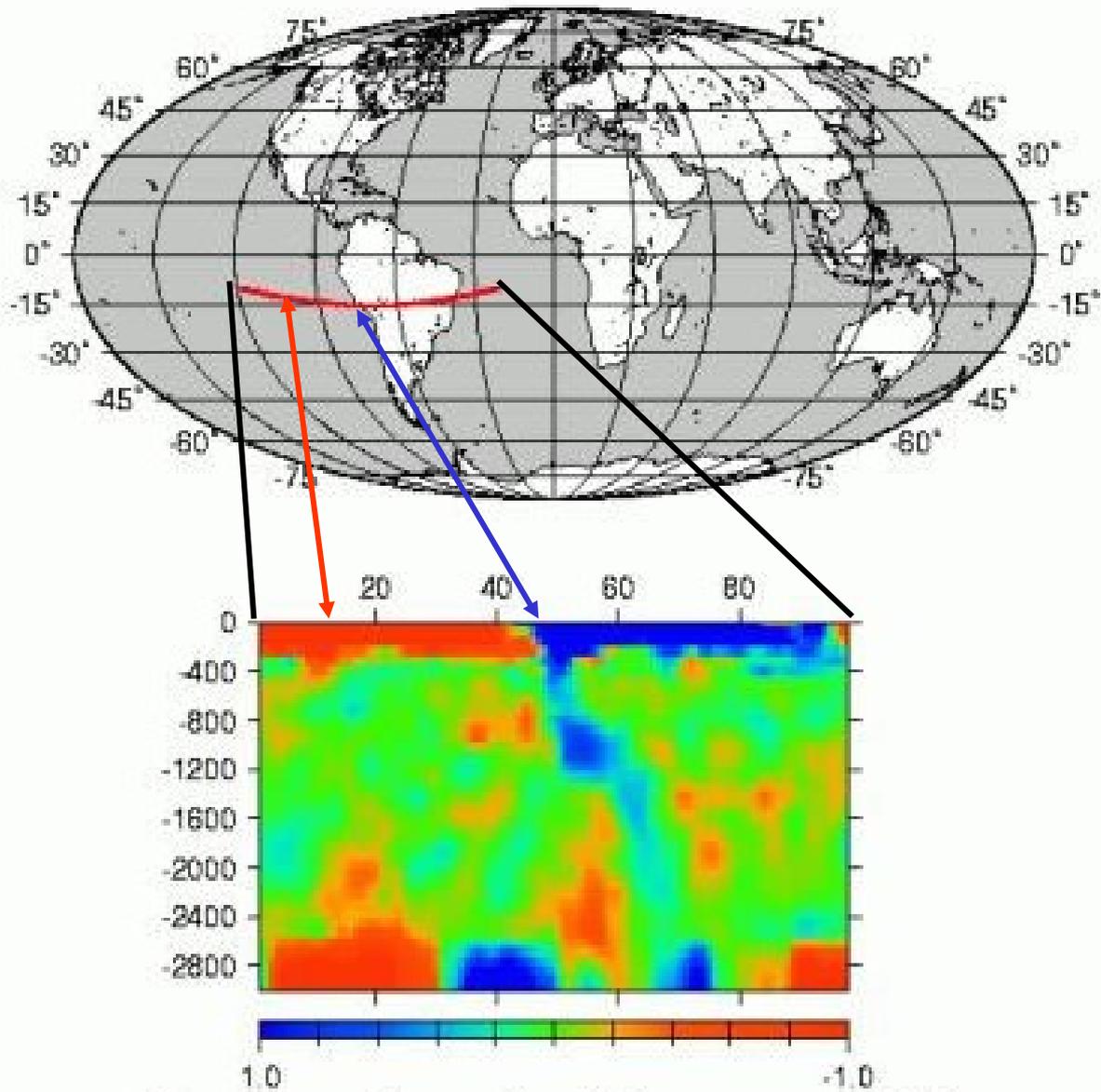


GEOIDE

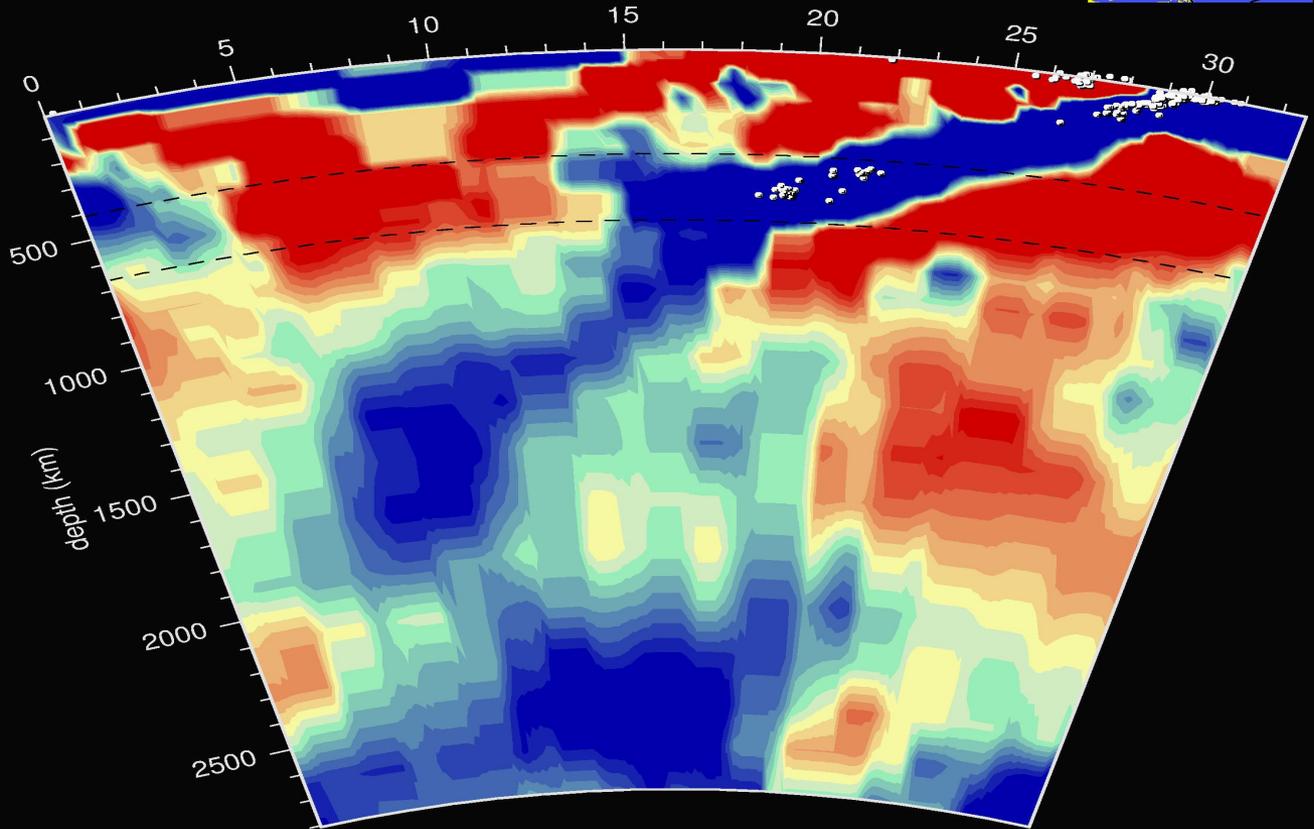
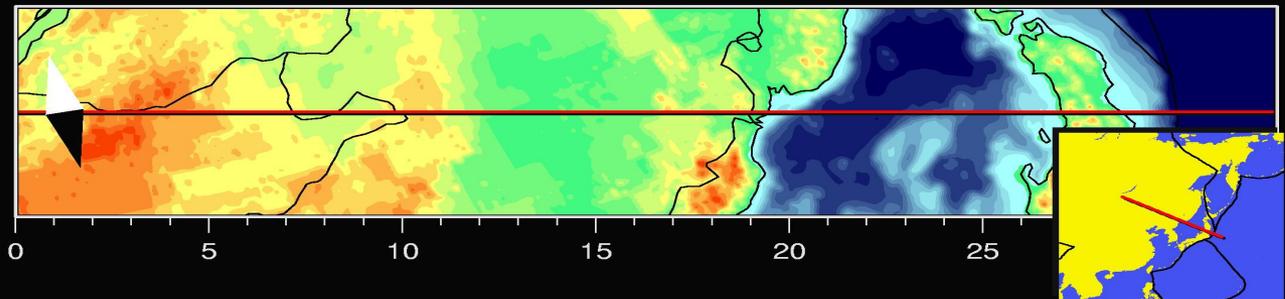


metres

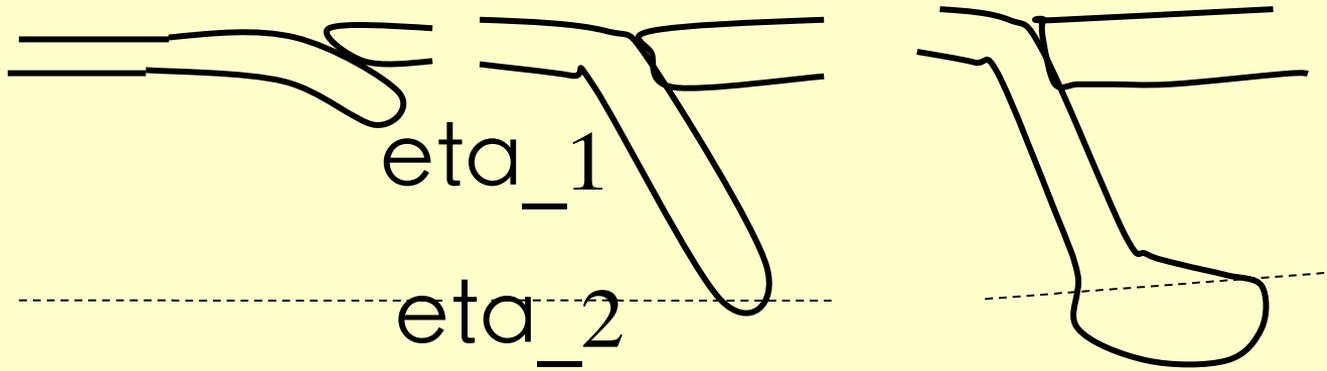
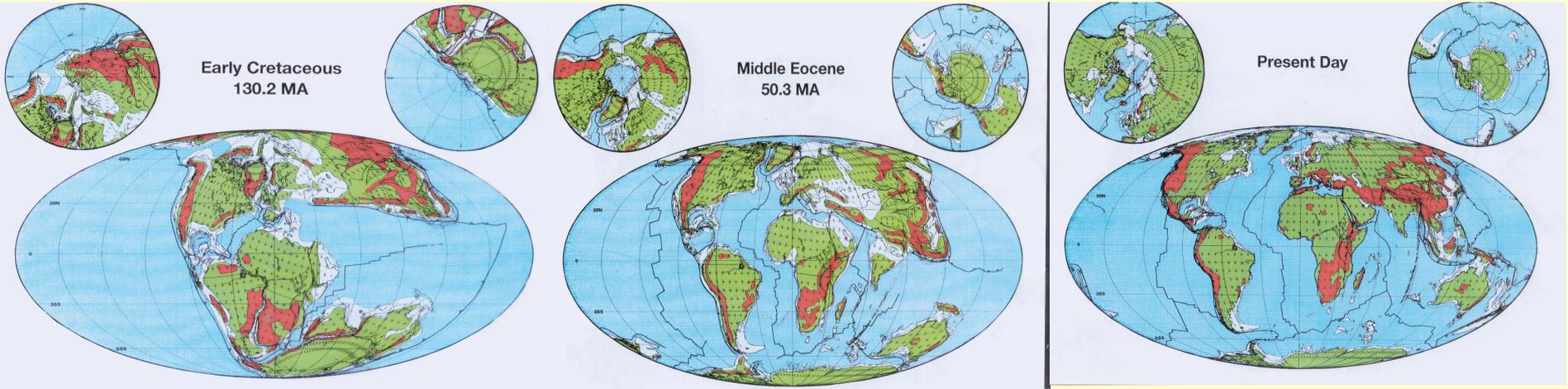




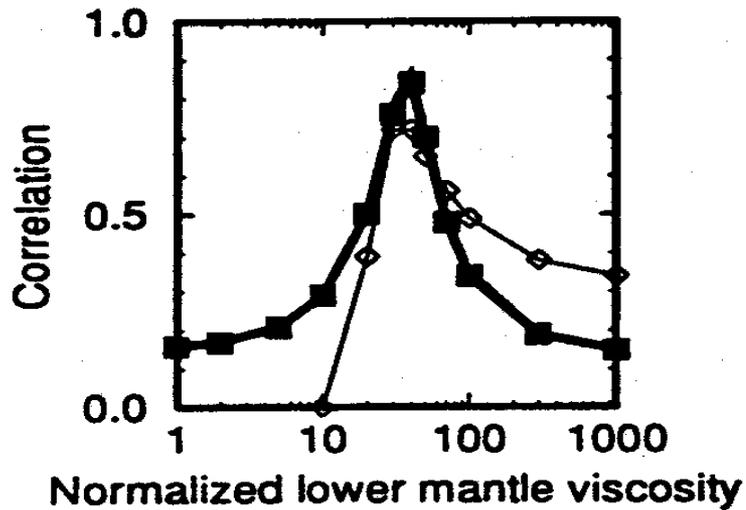
Anomalie de Vitesse (%)



-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

$\sim 10^{22}$ Pa.s dans le manteau inférieur

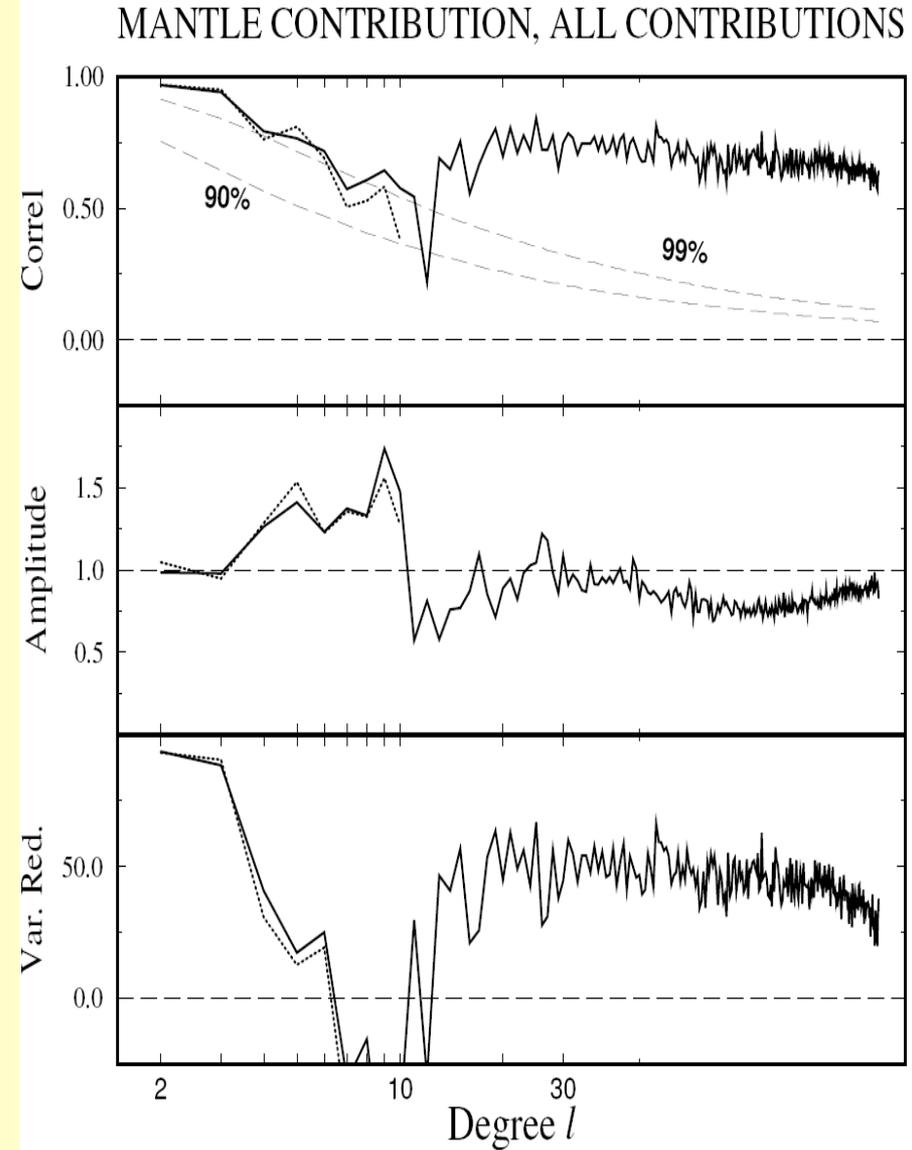
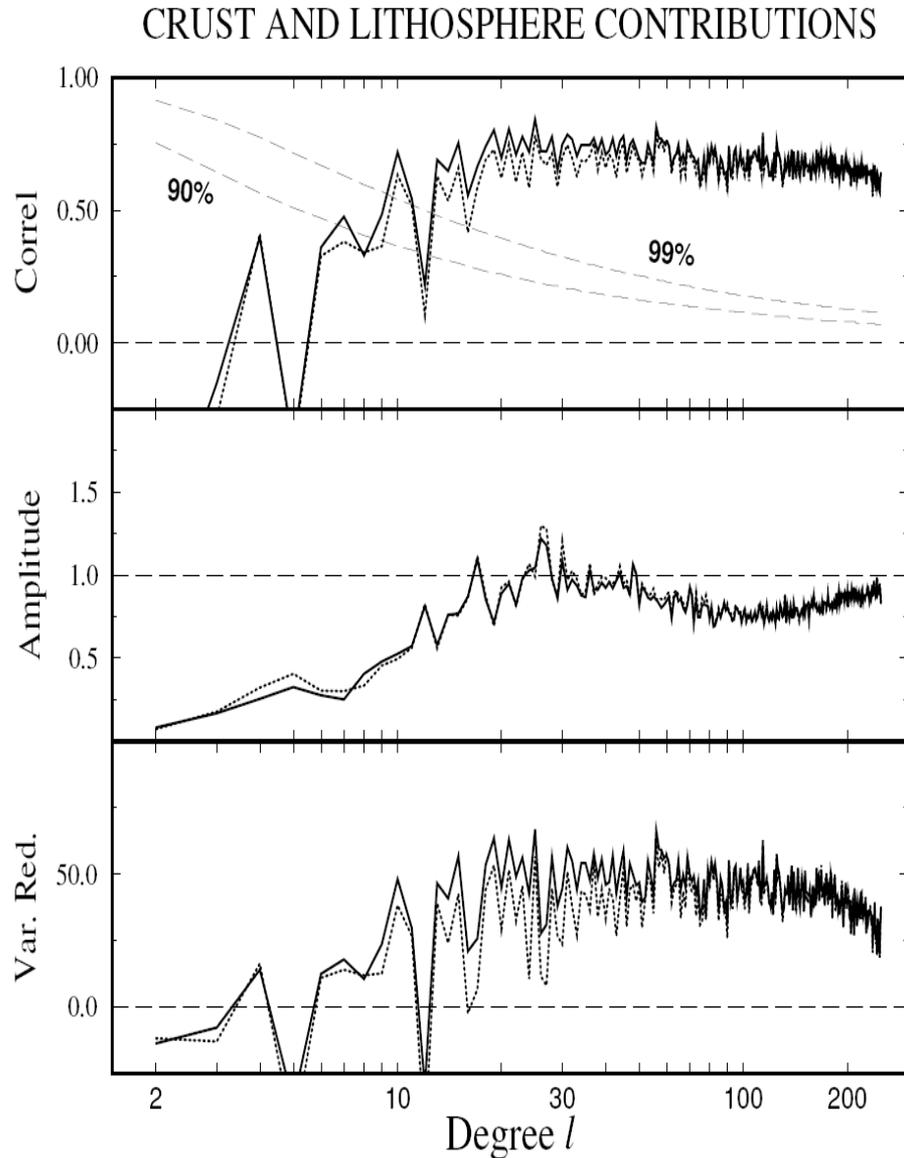
Le géoïde:

Un fossile de 120 Ma de tectonique des plaques

Une image du manteau profond.

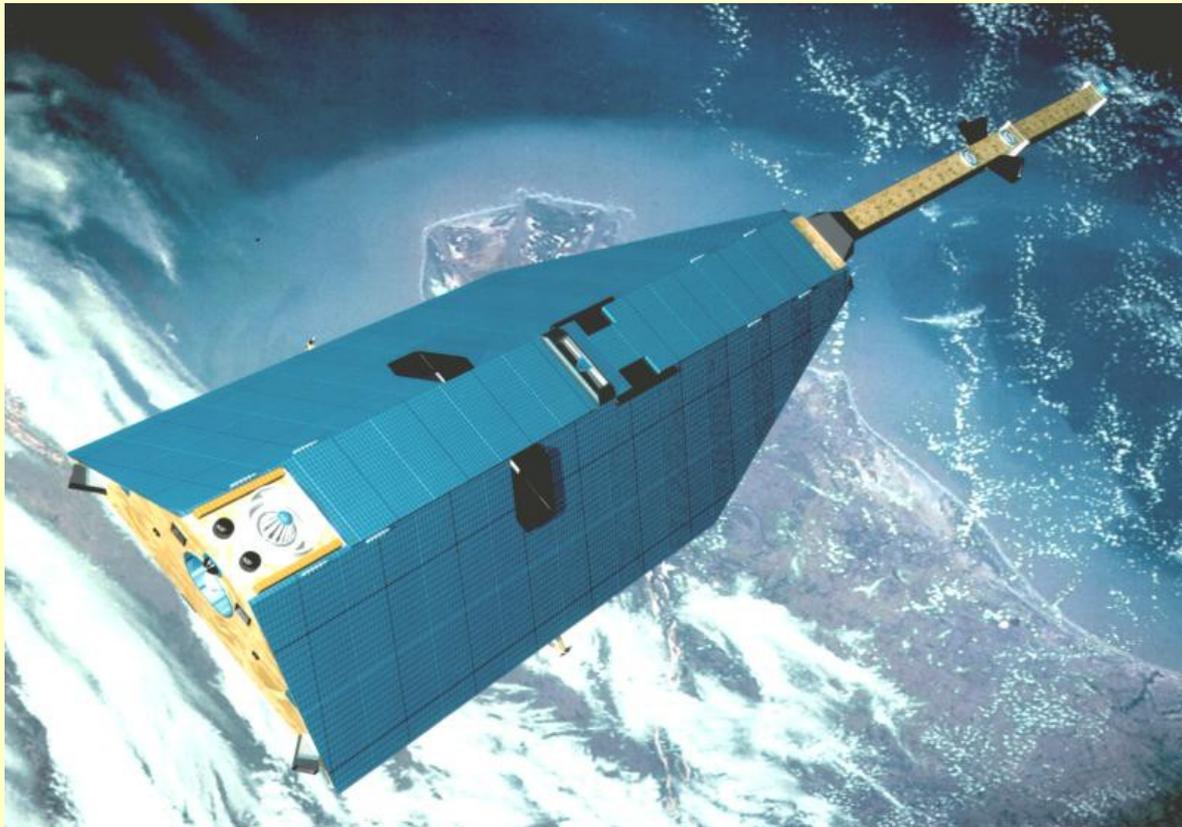
Un manteau fluide mais très visqueux!

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.



VI. Résultats récents : variations temporelles à grande échelle

Mesurer l'accélération dans l'espace (Champ)
pour s'affranchir des forces de surface



CHAMP

(Catastrophes and Hazards Monitoring and Prediction)

CHALLENGING Mini-satellite Payload

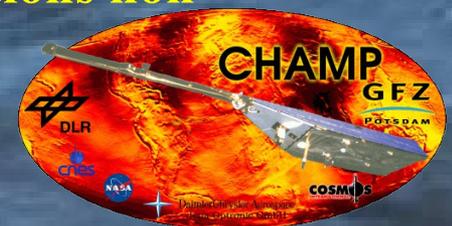
2000

Charge utile « Gravité » :

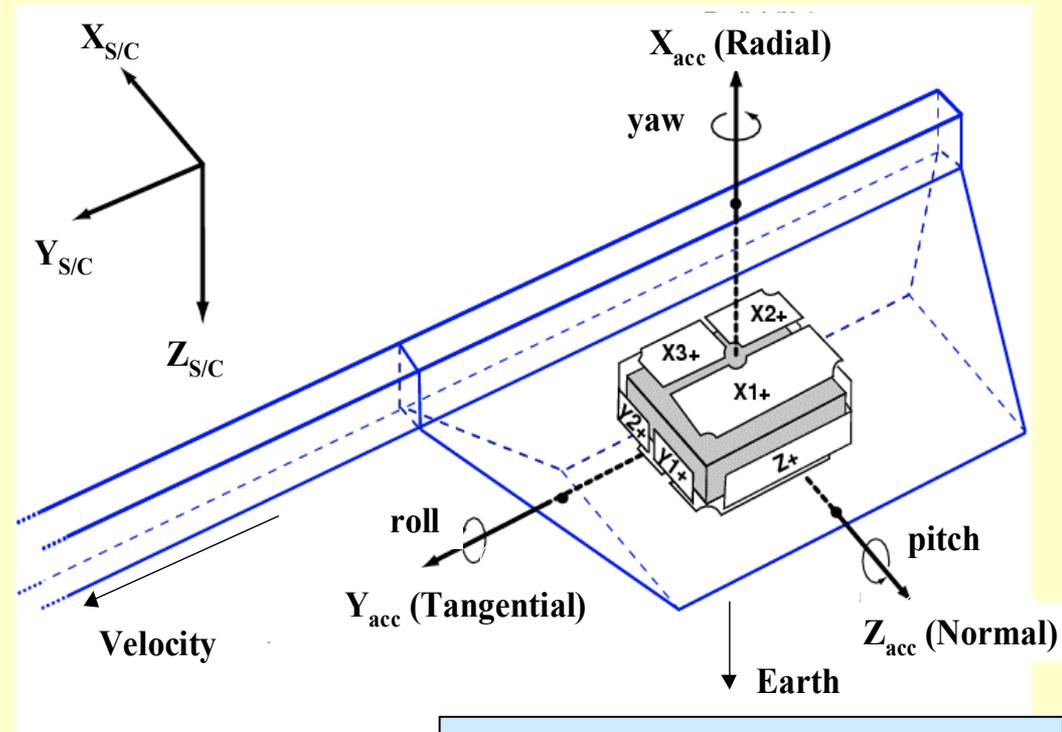
- récepteur GPS Black-Jack
- rétro-réflecteurs laser
- accéléromètre STAR

Propos:

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



L'accéléromètre STAR



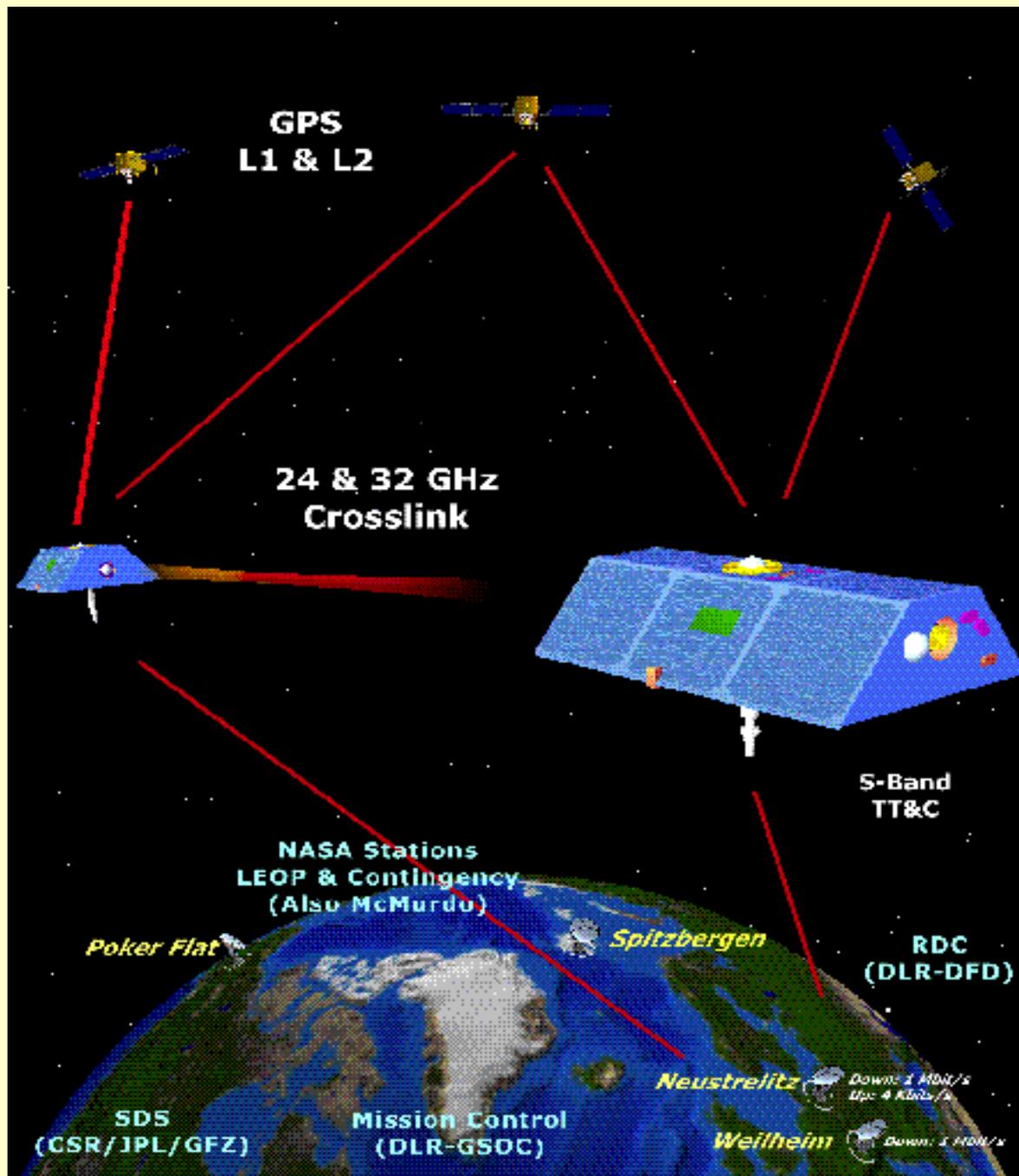
Définition des axes de STAR par rapport au satellite

- Sensor mass: 6 kg
- Interface unit mass: 3 kg
- Full power consumption: 4.5 W
- Sensor dimensions: 20 cm x 20 cm x 20 cm
- Proof mass dimensions: 3 cm x 3 cm x 1 cm
- Mass of the proof mass: 72 g
- Resolution in 10^{-1} to 10^{-4} Hz band:
 - in translation: $3 \cdot 10^{-9}$ m/s² along X and Y and $3 \cdot 10^{-8}$ m/s² along Z
 - in rotation: $5 \cdot 10^{-7}$ rd/s² around X and Y and 10^{-7} rd/s² around Z



On mesure maintenant aussi les *dérivées* de la gravité

Grace



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

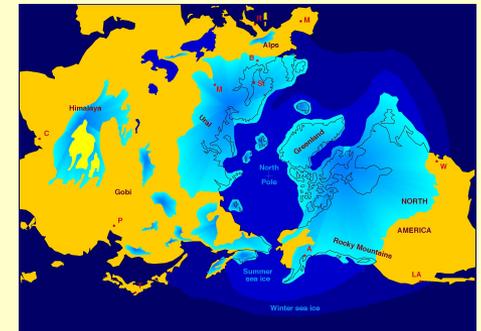
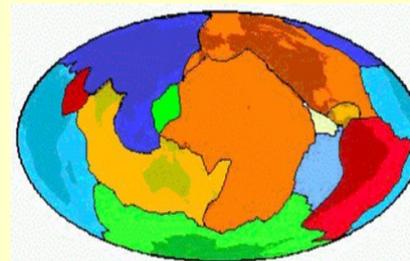
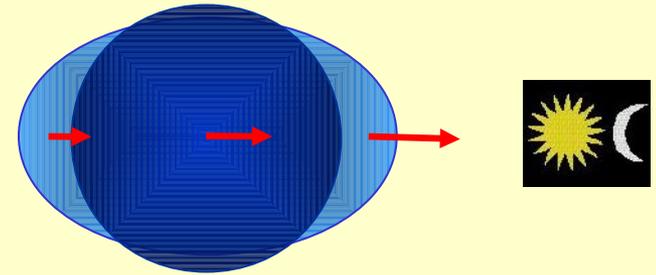


University of Texas at Austin
Center for Space Research



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

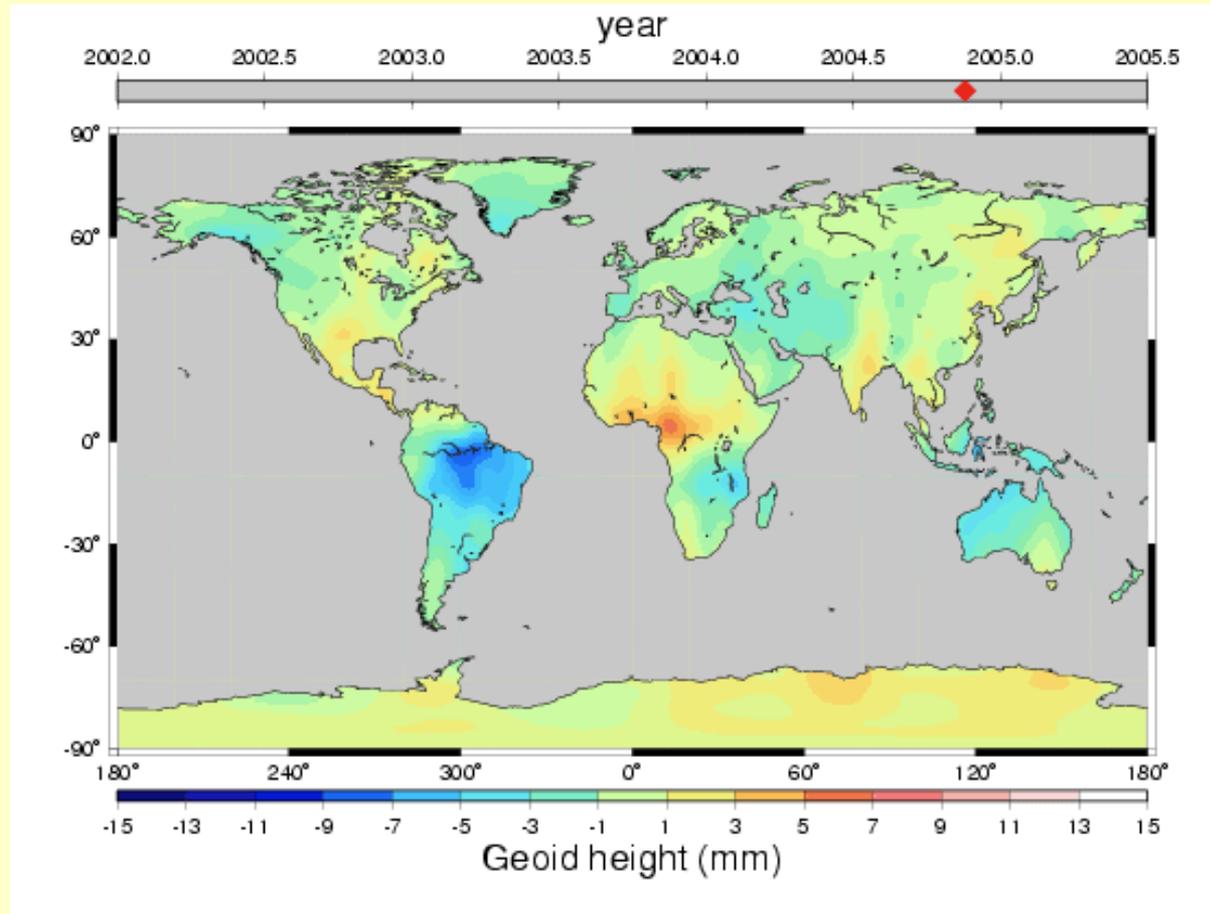


(fin du Pléistocène)

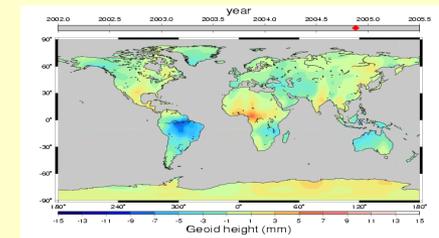
Variations temporelles

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.



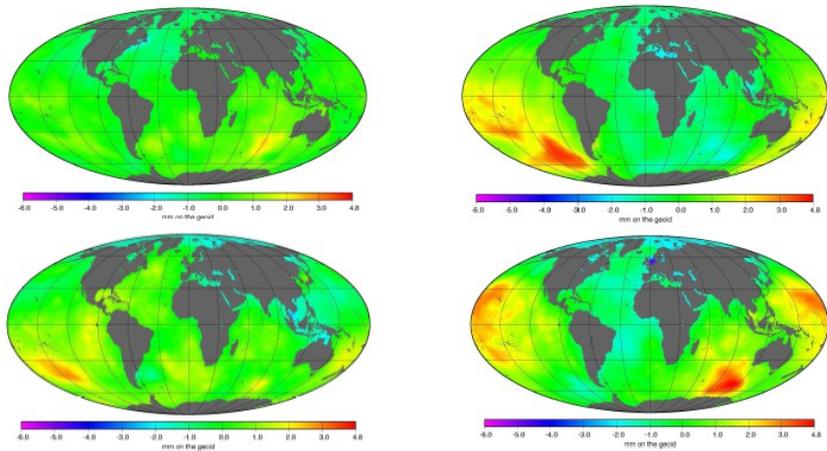


FIG. 4.3 – Effet sur le géoïde de la circulation océanique en mm. Haut : mars 2002 (à gauche) et juin 2002 (à droite). Bas : septembre 2002 (à gauche) et décembre 2002 (à droite).

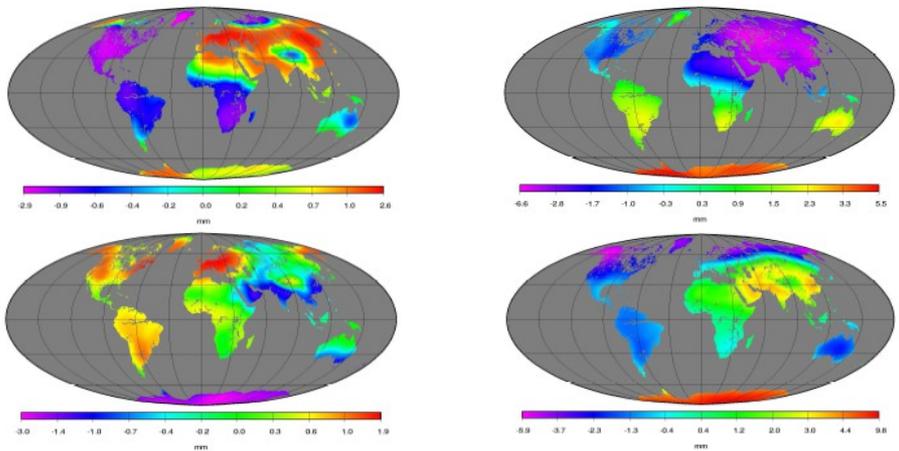


FIG. 4.4 – Effet sur le géoïde de la pression atmosphérique au dessus des continents en mm. Haut : mars 2003 (à gauche) et juin 2003 (à droite). Bas : septembre 2003 (à gauche) et décembre 2003 (à droite).

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)

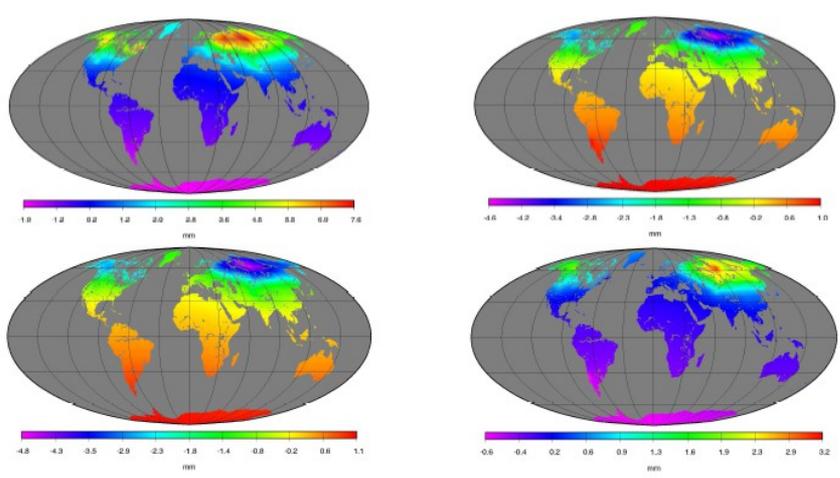


FIG. 4.5 – Effet sur le géoïde de l'enneigement hors calottes polaires en mm. Haut : mars 2003 (à gauche) et juin 2003 (à droite). Bas : septembre 2003 (à gauche) et décembre 2003 (à droite).

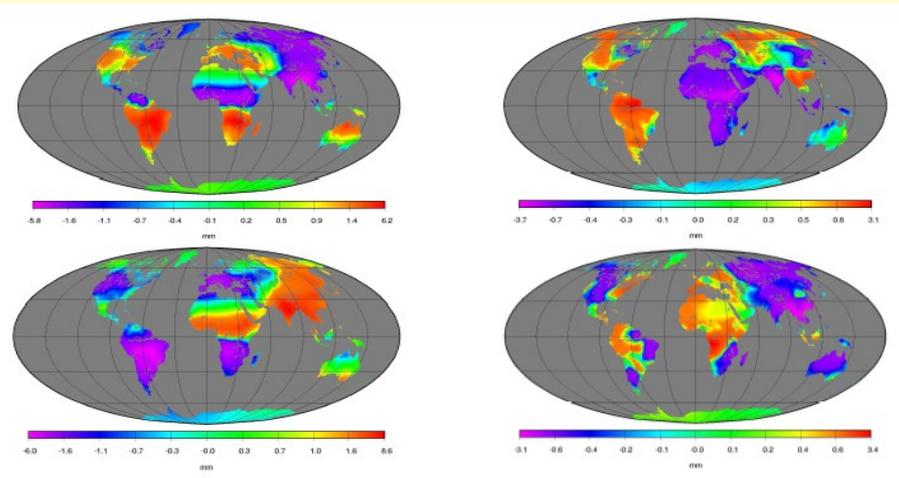
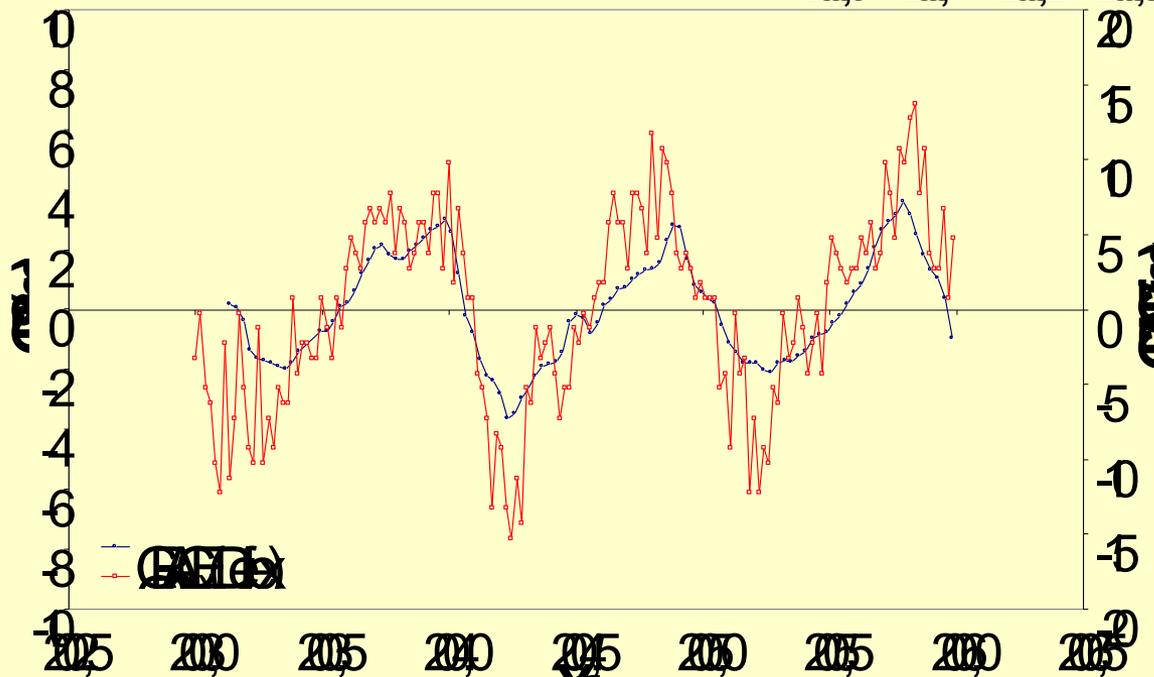
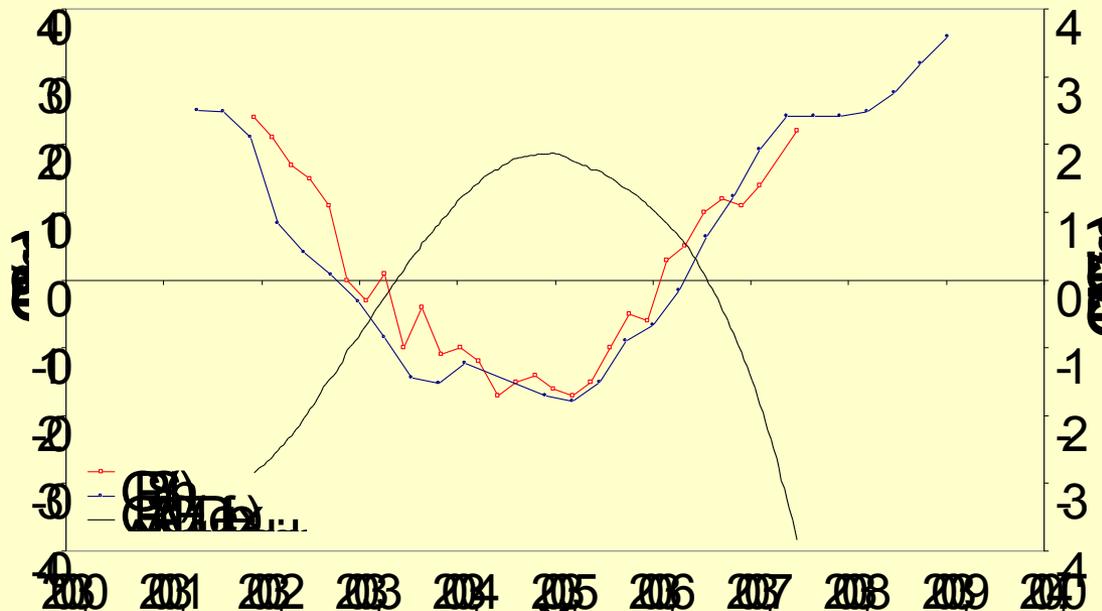


FIG. 4.6 – Effet sur le géoïde de l'humidité du sol en mm. Haut : mars 2003 (à gauche) et juin 2003 (à droite). Bas : septembre 2003 (à gauche) et décembre 2003 (à droite).

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)** à la station de **Manaus**. Les données en noir représentent le niveau d'eau *in-situ*.

Série historique de la déformation de la croûte à partir de **GRACE (en bleu)** et **GPS (en rouge)** à la station de **Brasilia**.

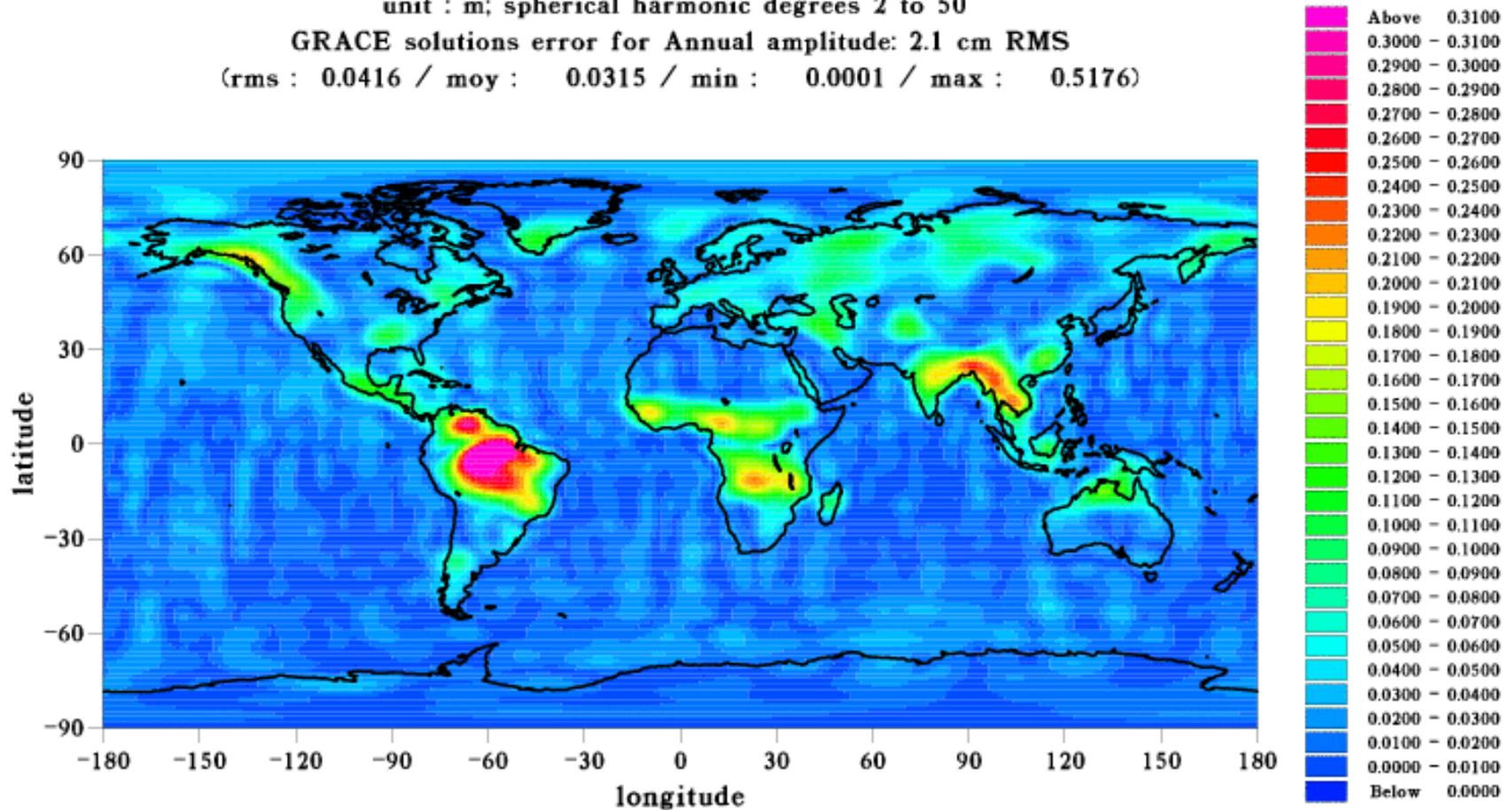
Variations hydrologiques annuelles détectées par GRACE

Annual amplitude from GRACE over 5 years
(mid-2002 to mid-2007) in Equivalent Water Height.

unit : m; spherical harmonic degrees 2 to 50

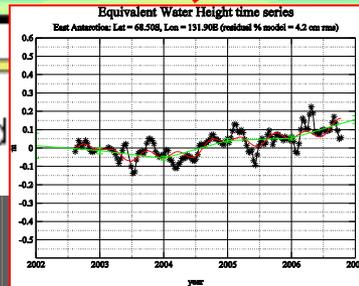
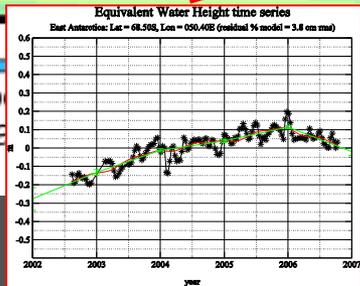
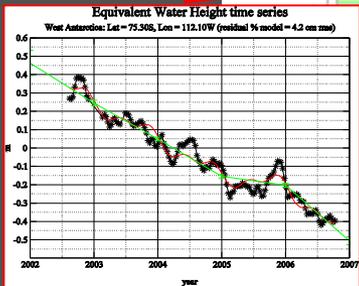
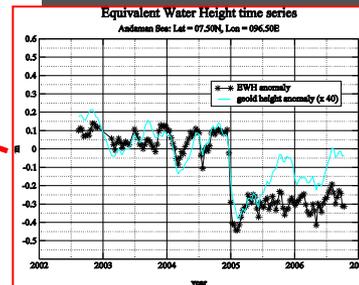
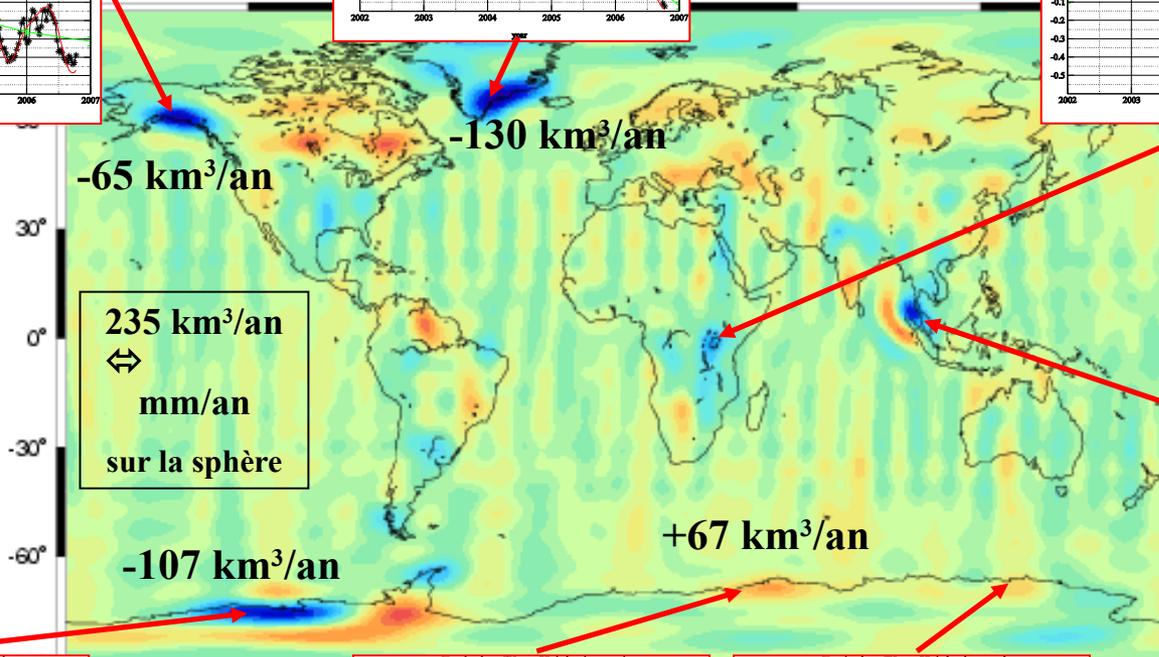
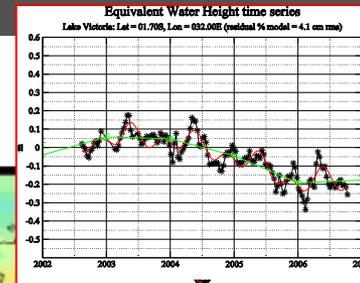
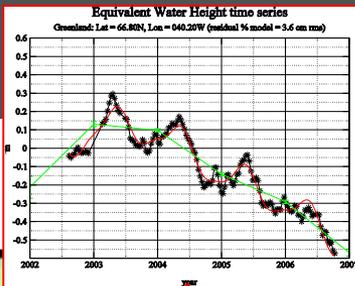
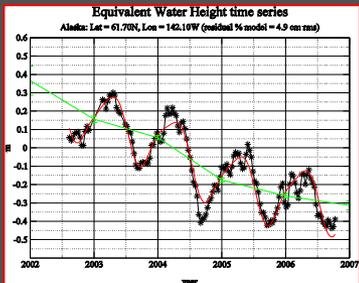
GRACE solutions error for Annual amplitude: 2.1 cm RMS

(rms : 0.0416 / moy : 0.0315 / min : 0.0001 / max : 0.5176)

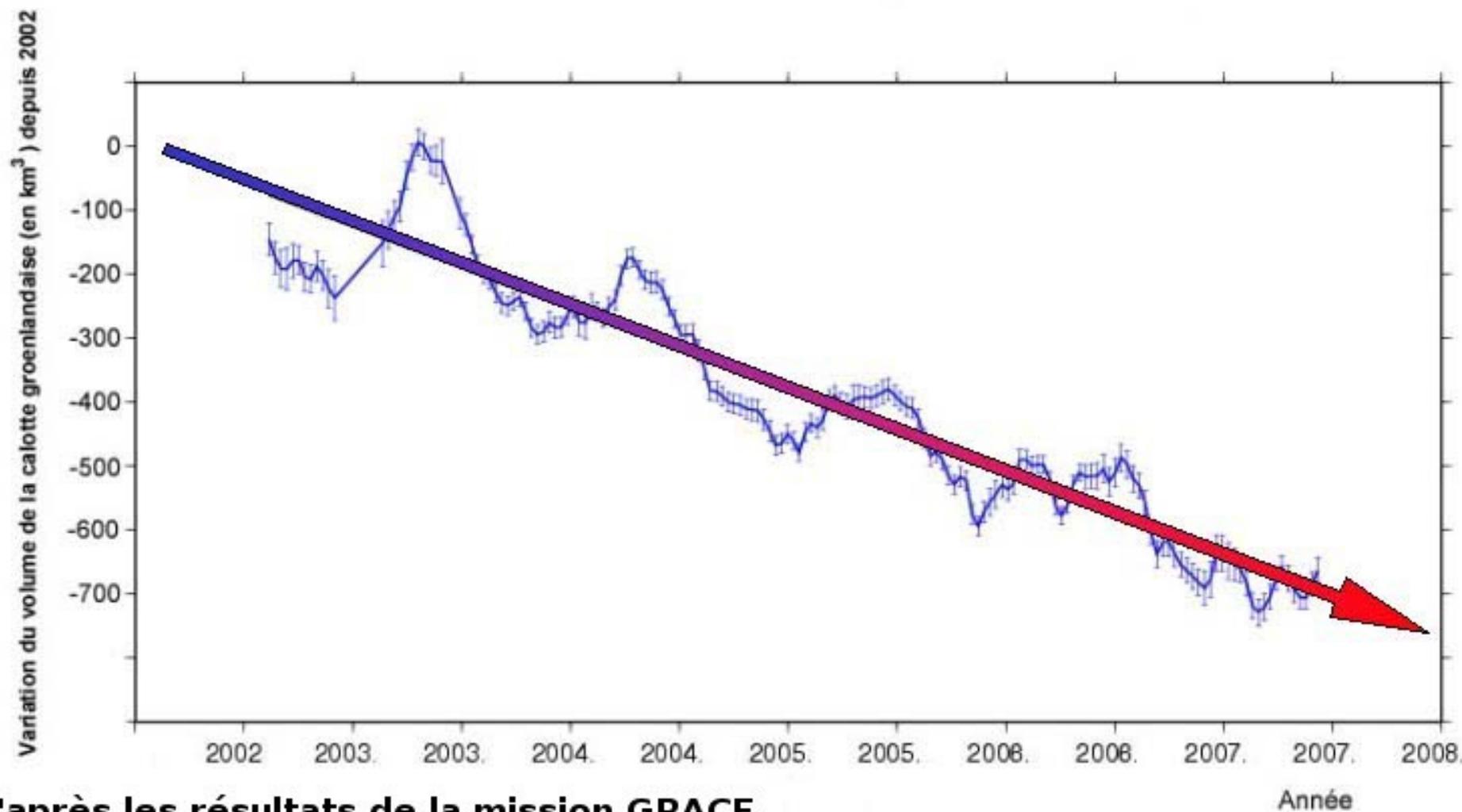


Tendances linéaires sur 2002-2006

en *équivalente (m/an)*

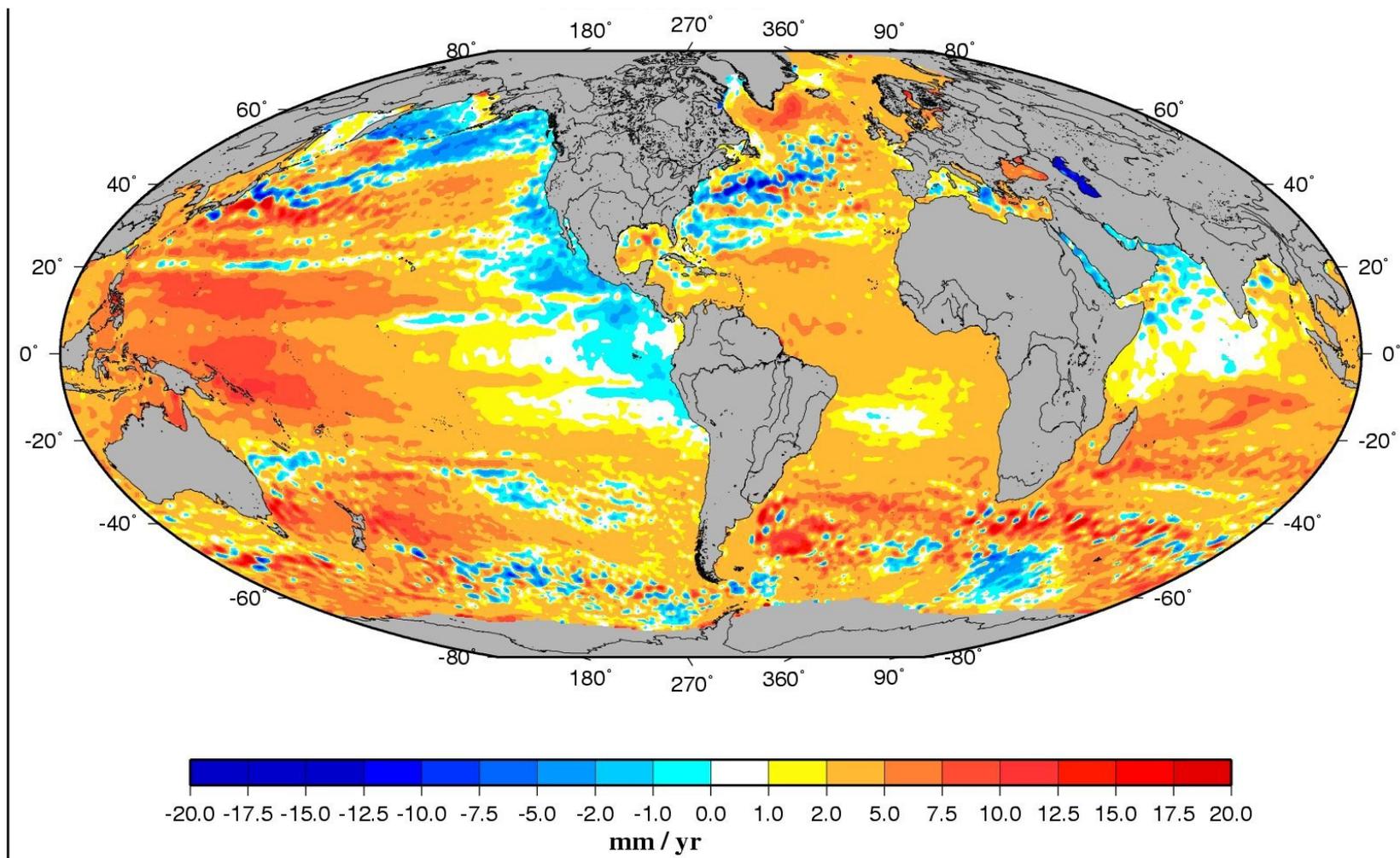


minimum : -18 cm/an
 maximum : +9 cm/an
 rms global : 2 cm/an



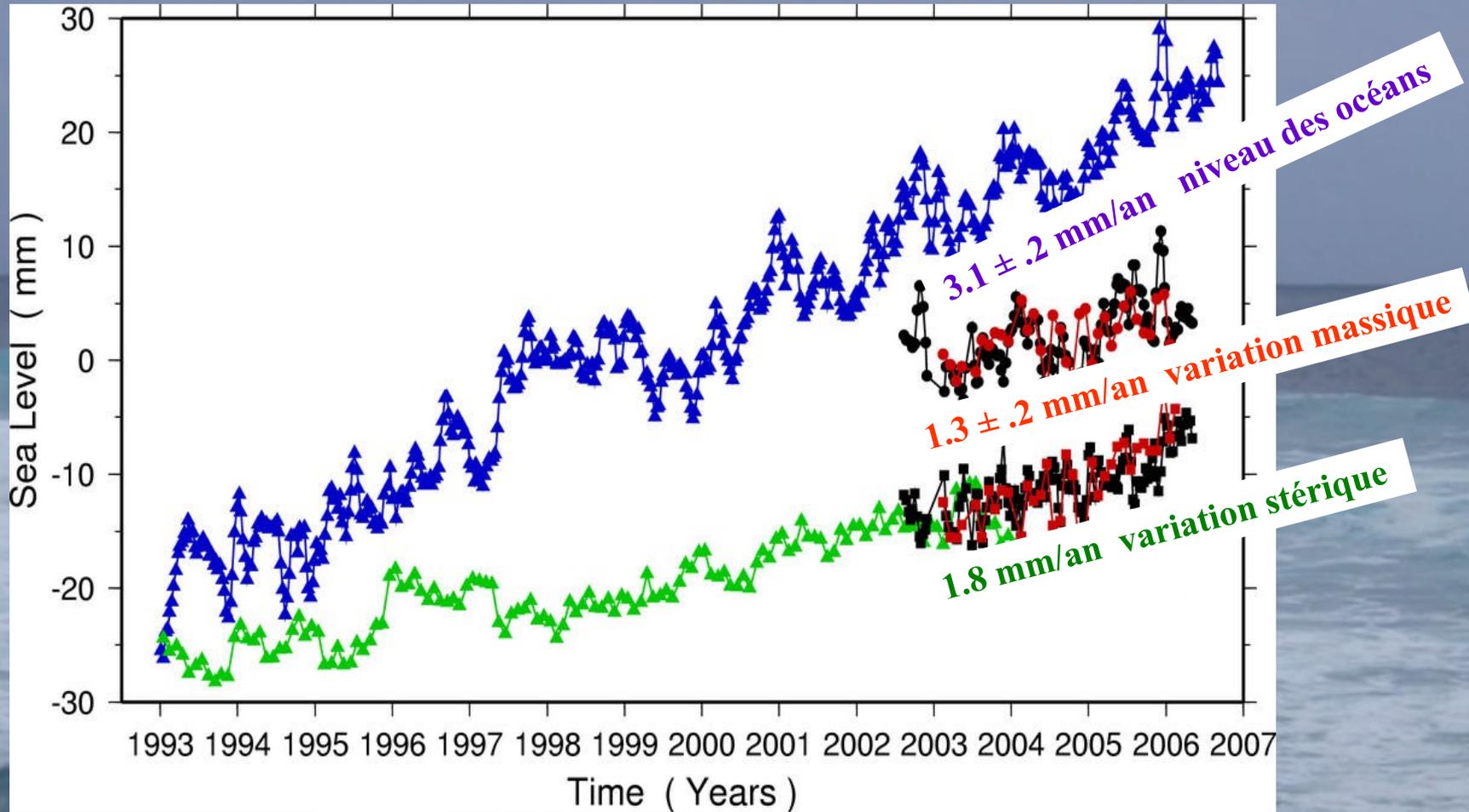
D'après les résultats de la mission GRACE

Carte des vitesses linéaires de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2007, observées par les satellites altimétriques Topex/Poseidon et Jason-1

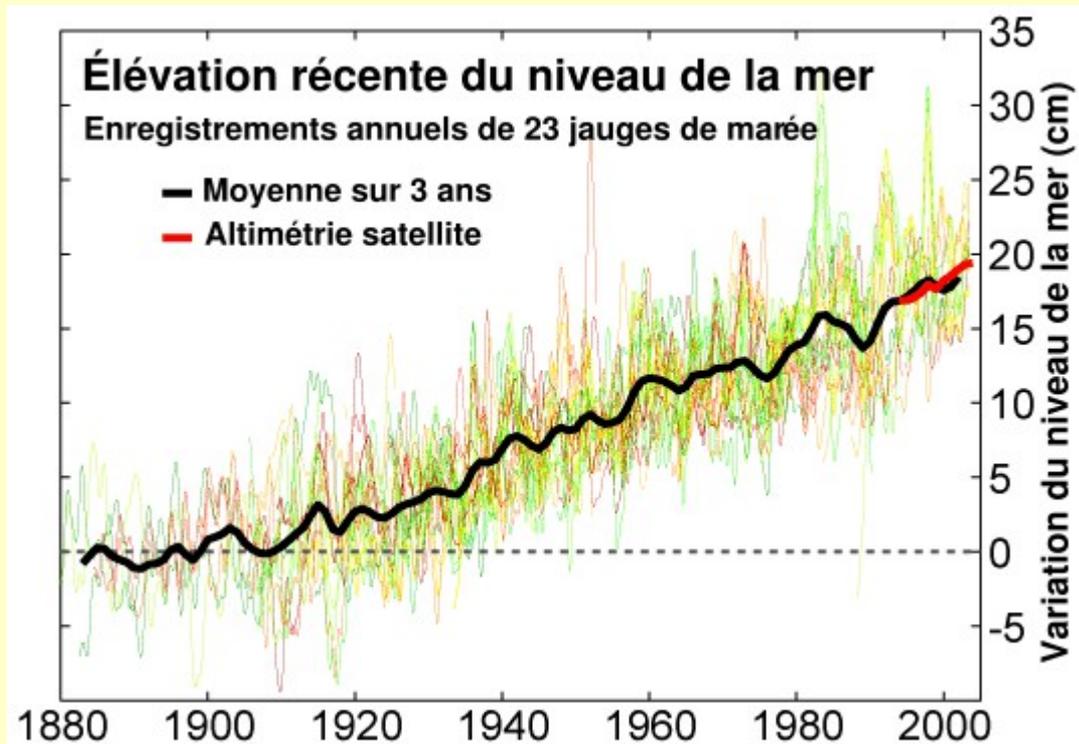


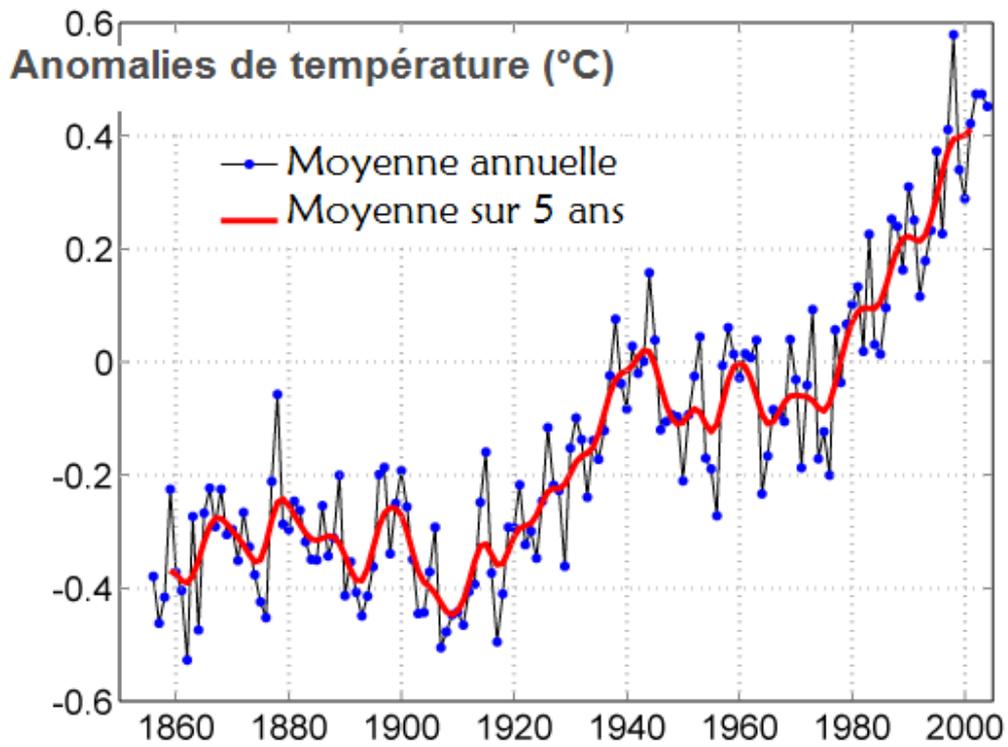
LEGOS/CNES-CLS

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

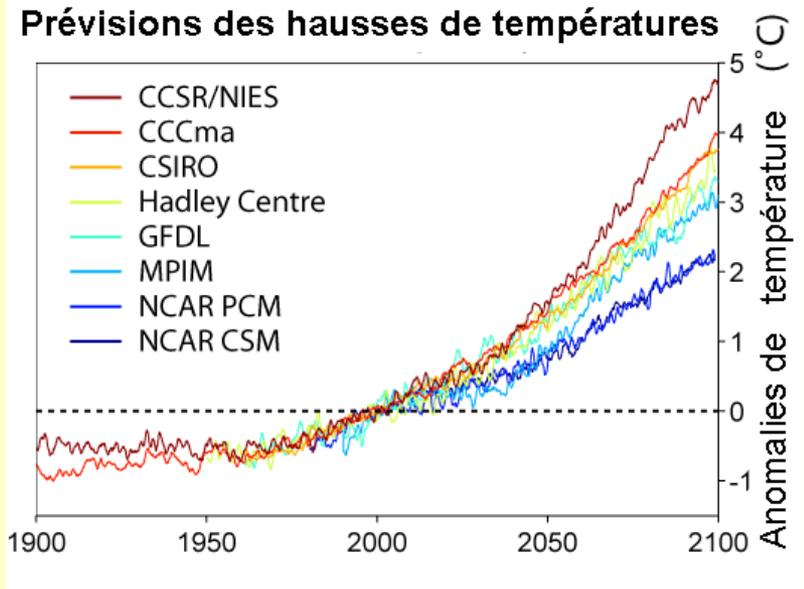


Estimation of steric sea level variations from combined GRACE and Jason-1 data, A. Lombard (LEGOS) & al., 2006

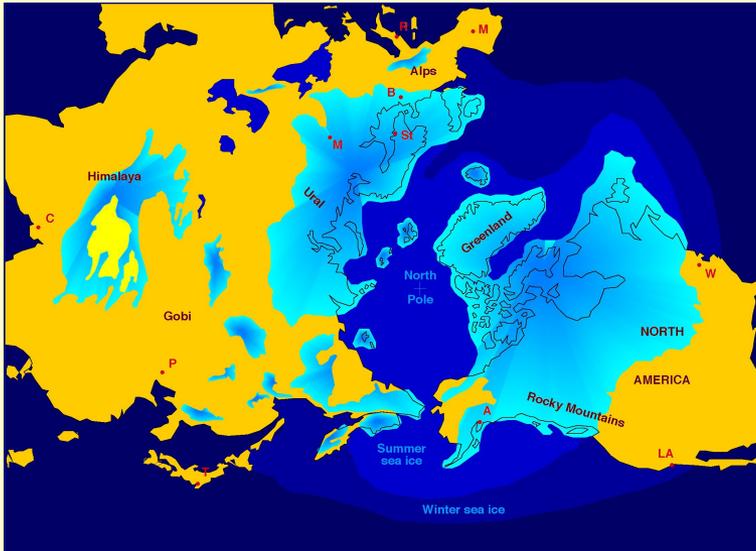




Evolution de la température globale depuis 1850



Rebond post-glaciaire



Couverture de glace à la fin du Pleistocène

En fait, empiriquement (Wahr et al., 2002):

$$w_r \approx \sum_{l=2}^L \frac{2l}{2} \frac{1}{m=0} \sum_{m=0}^l N_{lm} R_{lm}$$

Déformation séculaire du géoïde (issue de GRACE):

$$N_{lm} R_{lm} \approx R_{lm} \approx \bar{P}_{lm} \sin^l \theta \cos^m \phi, \quad C_{lm} R_{lm} \cos^m \phi, \quad S_{lm} R_{lm} \sin^m \phi,$$

$l=2 \quad m=0$

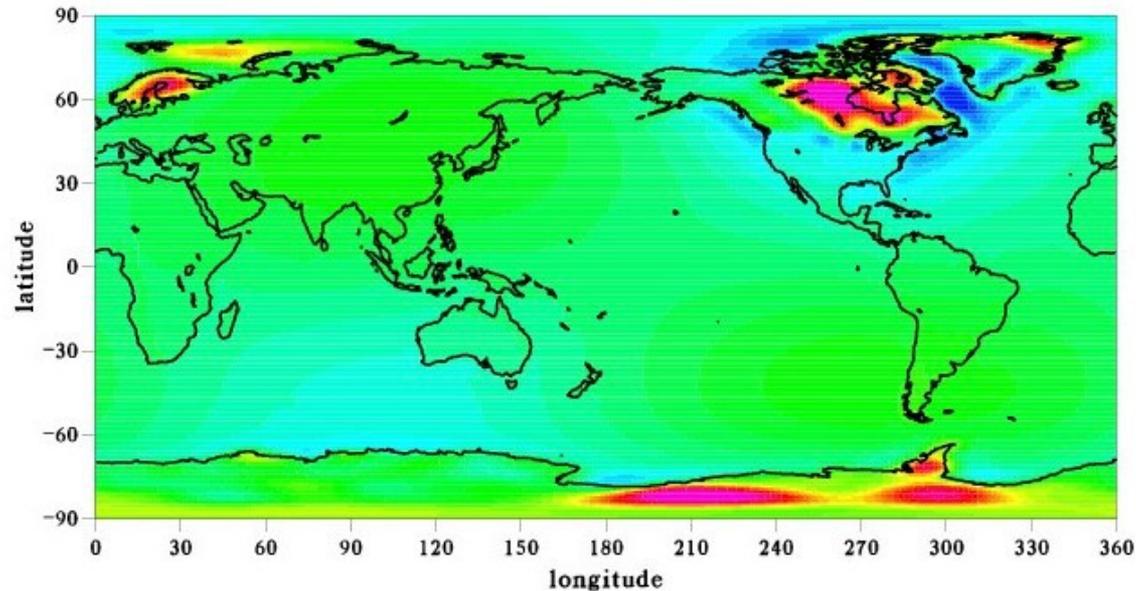
$$h_{croûte} \approx \frac{g}{4\pi G \rho_e} \sum_{l=2}^{50} \frac{2l}{1} \frac{1}{k_f} N_l R_{geoid}$$



Vitesse de déformation de surface (mm/a)

Modèle ICE-5G (Peltier & al.)

(rms : 1.4712 / moy : 0.0000 / min : -6.6735 / max : 16.2808)



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

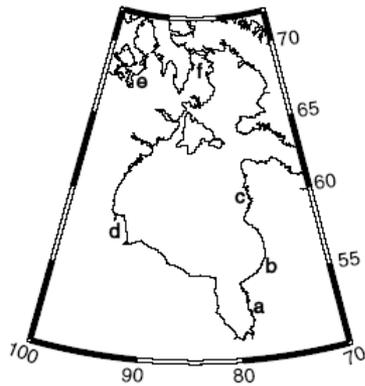
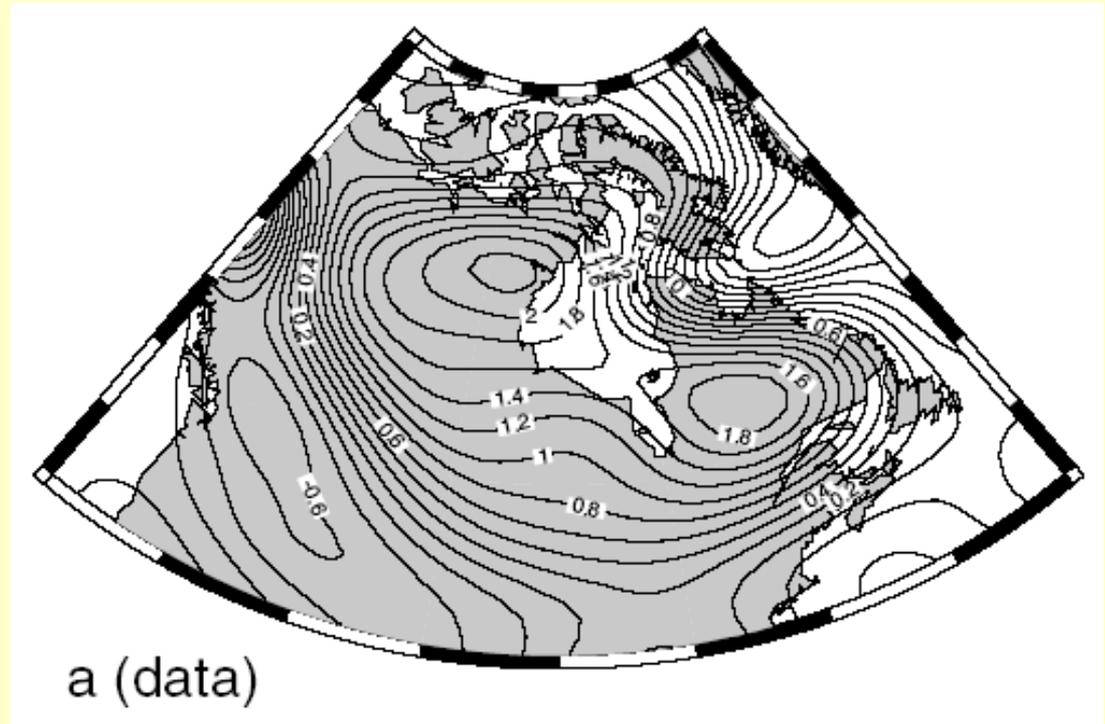
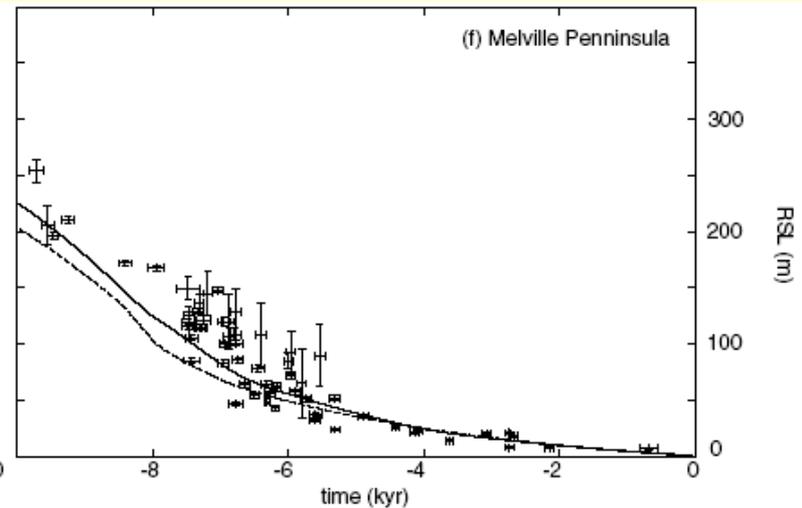
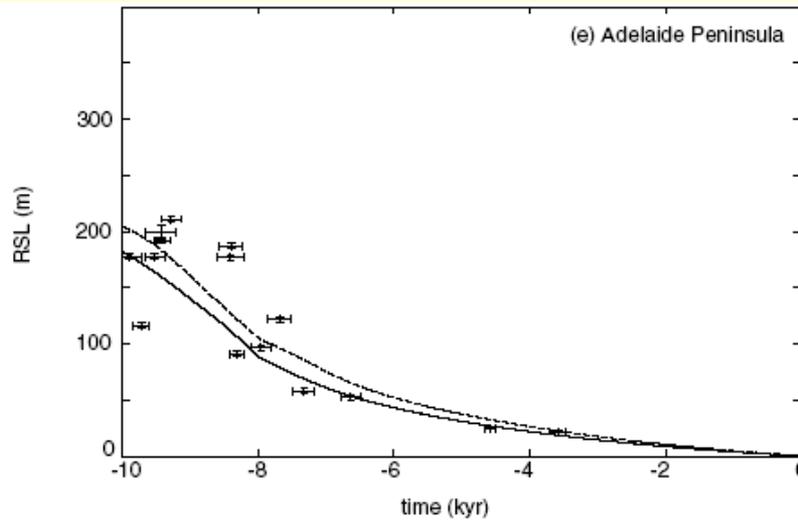


Figure 1. Sites of RSL measurements used in this study. Place names are: (a) James Bay, (b) Richmond Gulf, (c) Ottawa Island, (d) Churchill, Manitoba, (e) Boothia Peninsula and (f) Melville Peninsula.

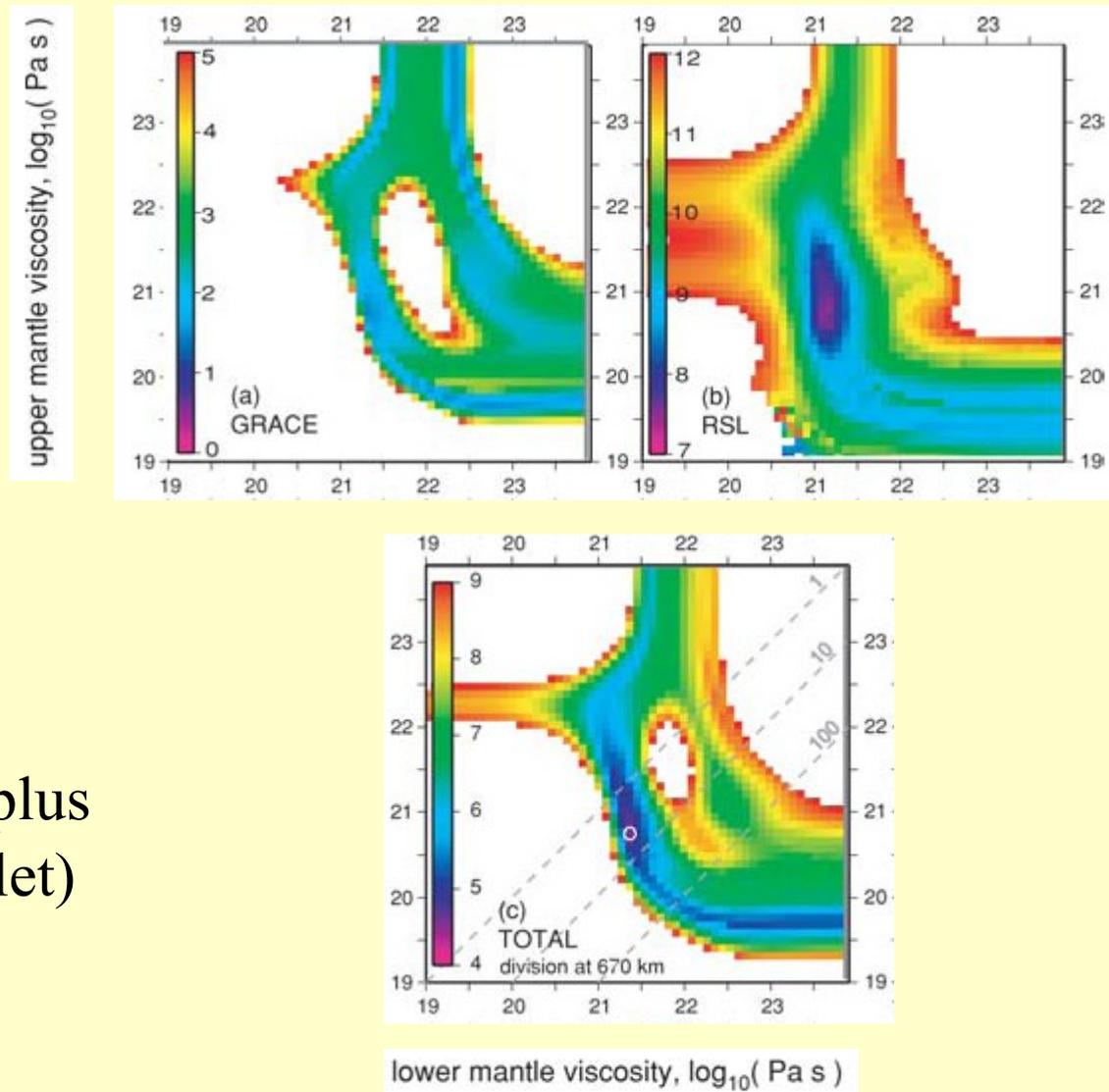


Variation de gravi en microGal/an ->

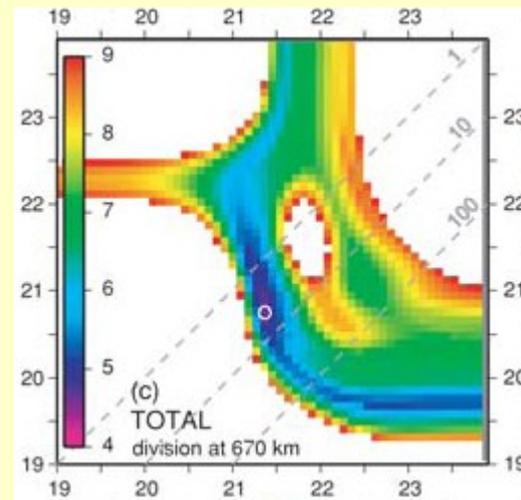
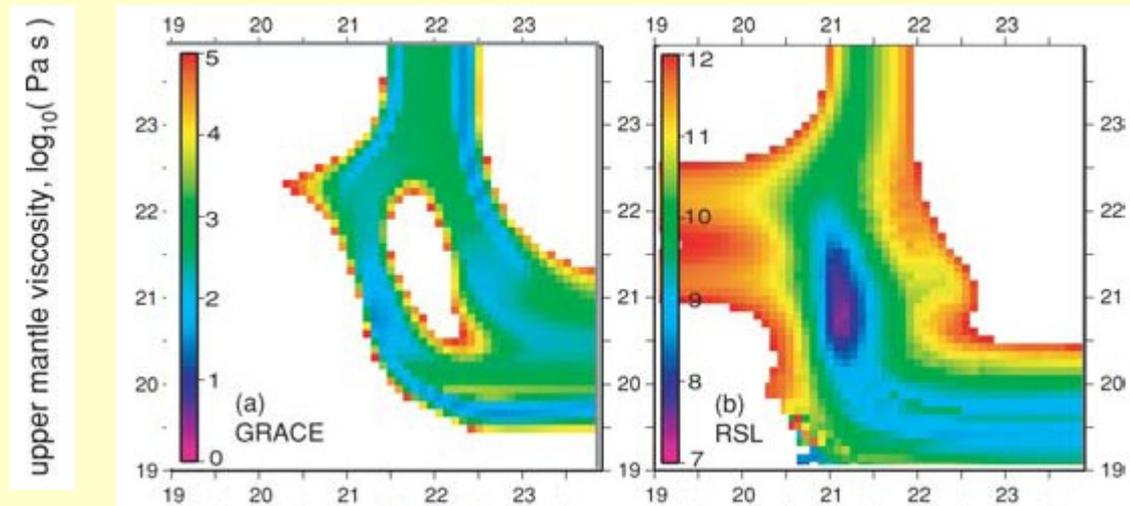
$$\begin{aligned}
 dg/dt &= 2\pi G \rho h / dt \\
 &= 2\pi \cdot 6,7e-11 \cdot 3300 \cdot 100 \text{ m} / 8000 \text{ an} \\
 &= 1,7 \text{ microGal} / \text{an}
 \end{aligned}$$



Viscosités les plus probables (violet)



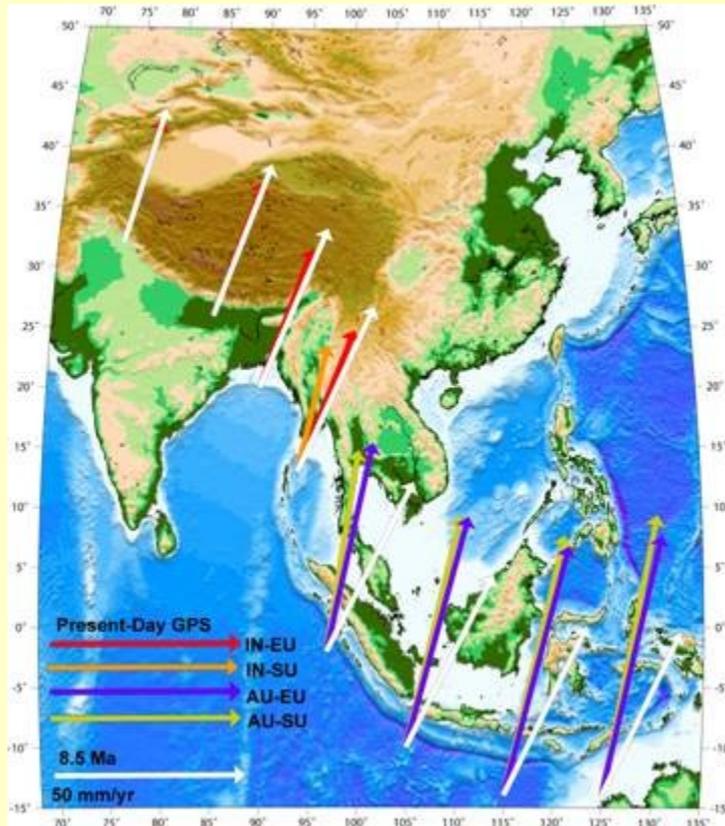
Viscosités les plus probables (violet)



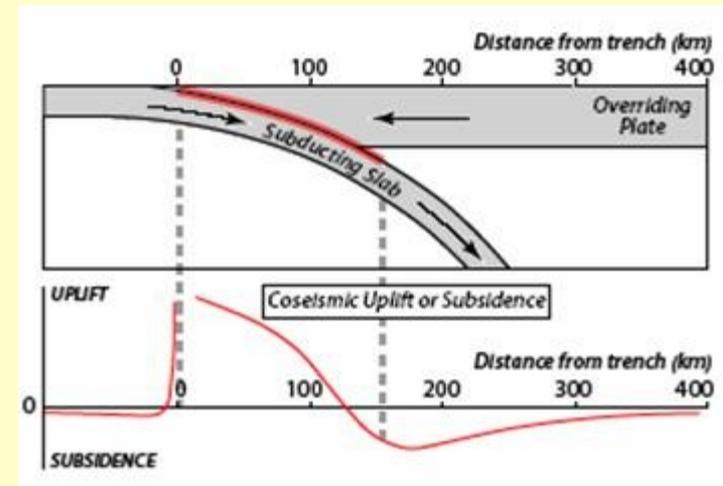
lower mantle viscosity, $\log_{10}(\text{Pa s})$

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).

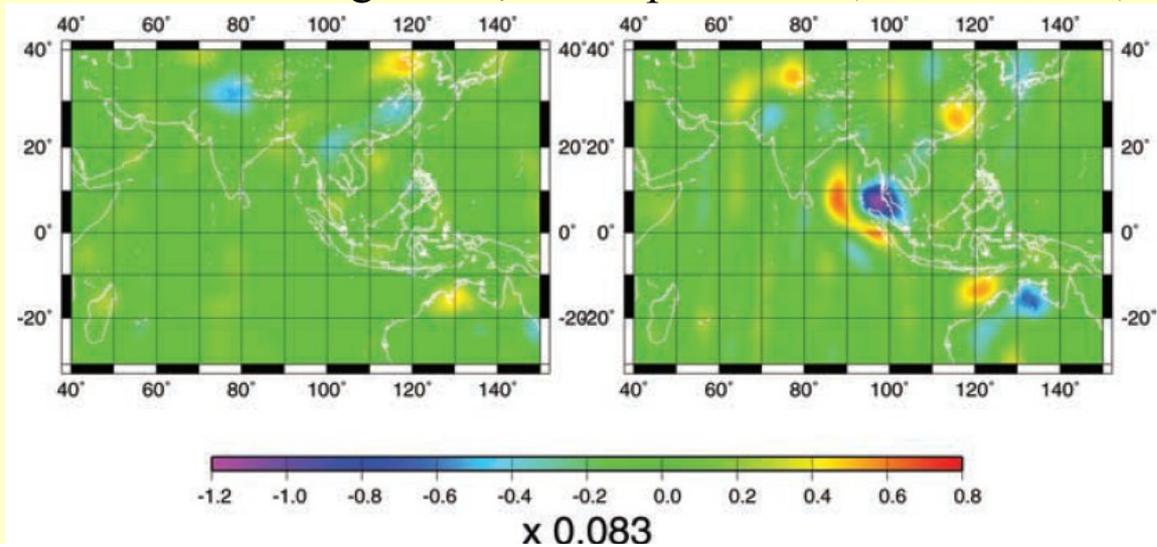


Figure 5. Continuous wavelet analysis coefficients at 500 km scale of the geoid difference (mm) between 2005 and 2004, stacked over 9 months (right-hand panel), and of the geoid difference between 2004 and 2003, stacked over 9 months (left-hand panel).

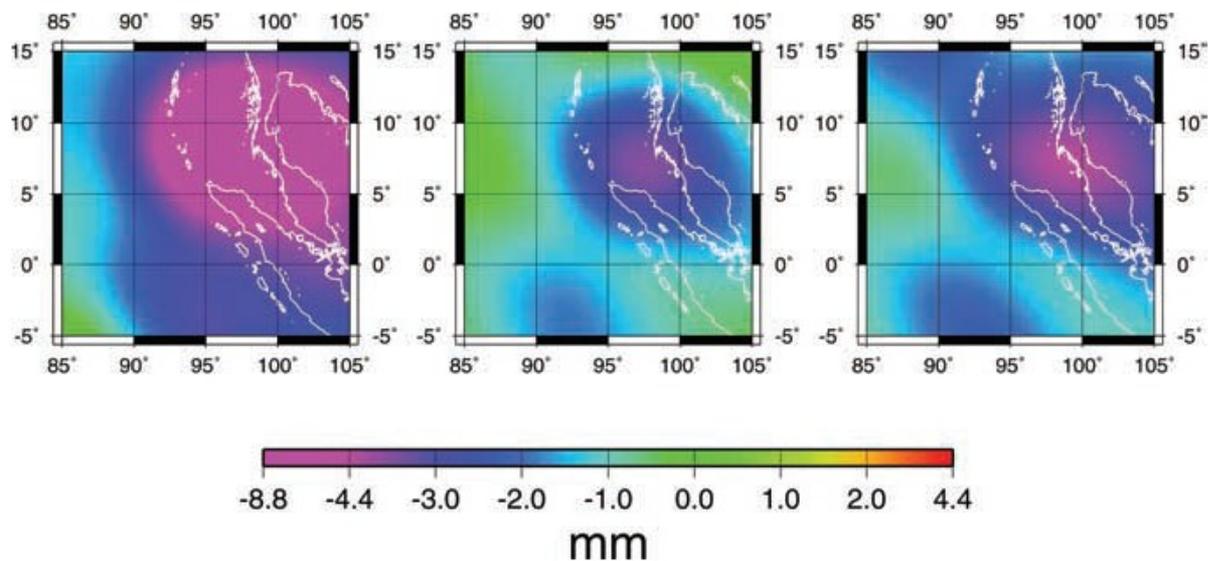


Figure 2. Maps of geoid anomalies in mm over the Sumatra area. Left-hand panel: map of difference between years 2005 and 2004, stacked over 1 month (i.e. 2005 January minus 2004 January). Centre panel: map of difference between years 2005 and 2004, stacked over 4 months. Right-hand panel: map of difference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

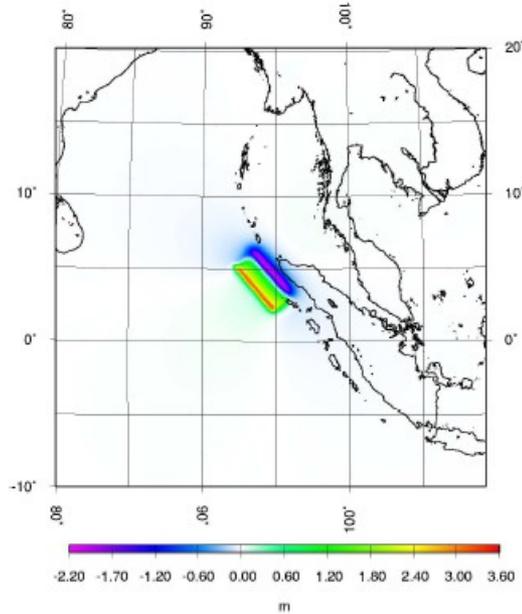


FIG. 4.15 – Déplacements verticaux en m : modèle 1

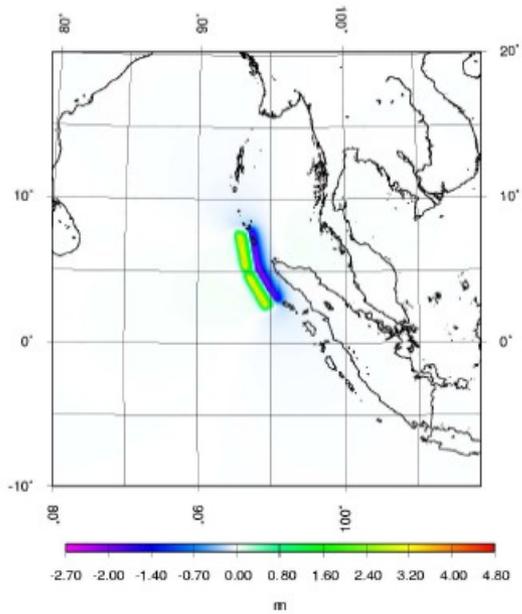


FIG. 4.16 – Déplacements verticaux en m : modèle 2

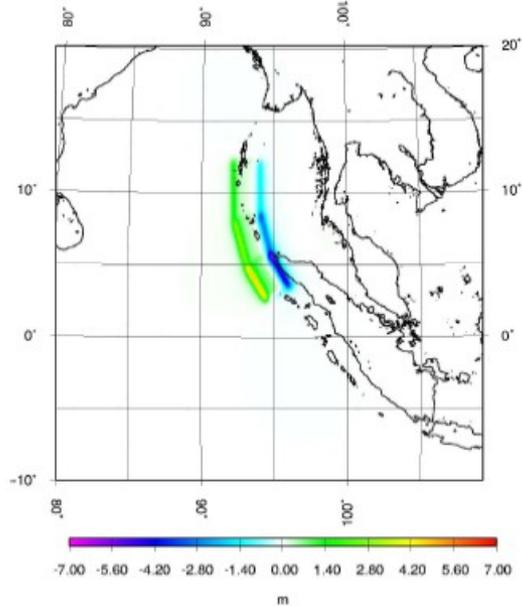


FIG. 4.17 – Déplacements verticaux en m : modèle 3

(Panet, 2005).

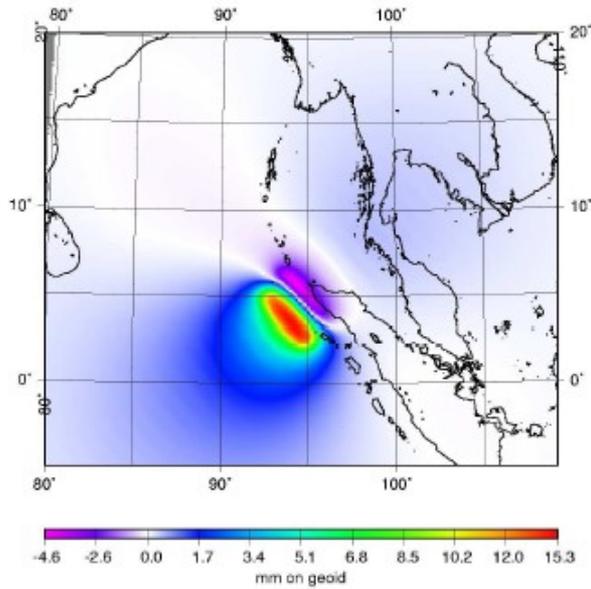


FIG. 4.18 – Effet sur le géoïde en mm : modèle 1

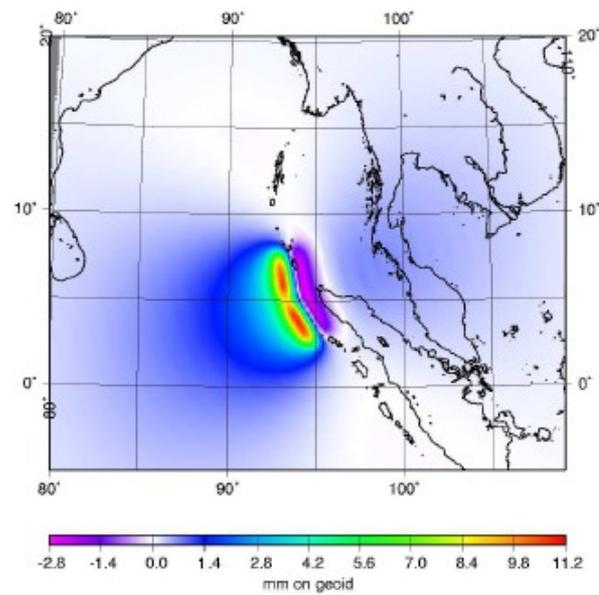


FIG. 4.19 – Effet sur le géoïde en mm : modèle 2

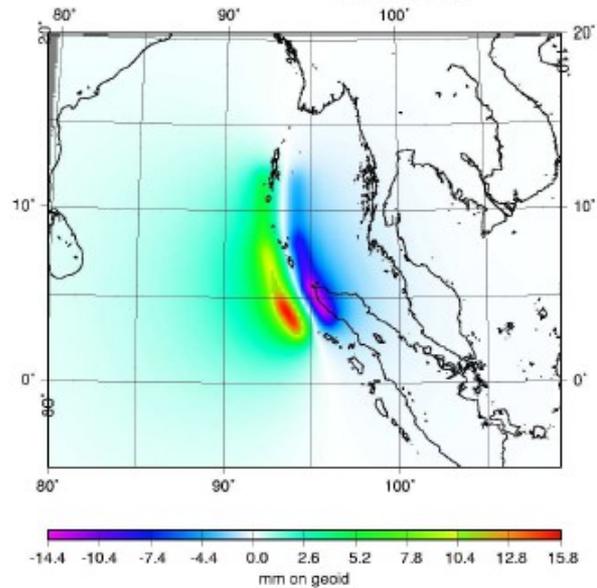
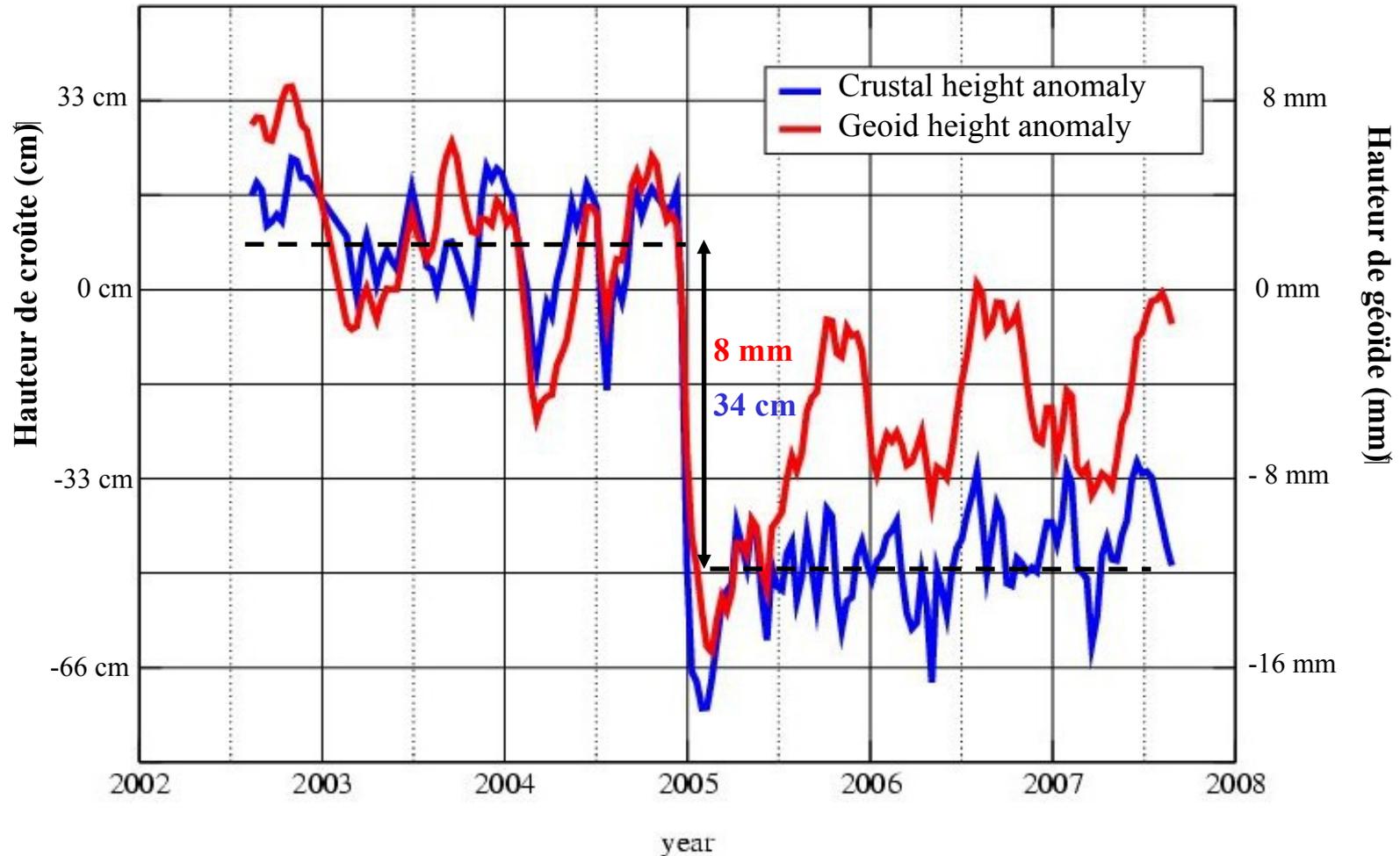


FIG. 4.20 – Effet sur le géoïde en mm : modèle 3

(Panet, 2005).

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

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



GOCE

Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer

Lancé en mars 2009



Charge utile :

- récepteur GPS (GRAS, ESA)
- rétro-réfecteurs laser
- gradiomètre

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

Gradiomètre = 6 accéléromètres répartis 2 à 2 sur 3 axes

bruit $\sim 3 \text{ mE.Hz}^{-1/2}$



$10^{-12} \text{ m.s}^{-2}.\text{Hz}^{-1/2}$ pour des accéléromètres distants de 0.5 m

1 Eötvös = 10^{-9} s^{-2}

x

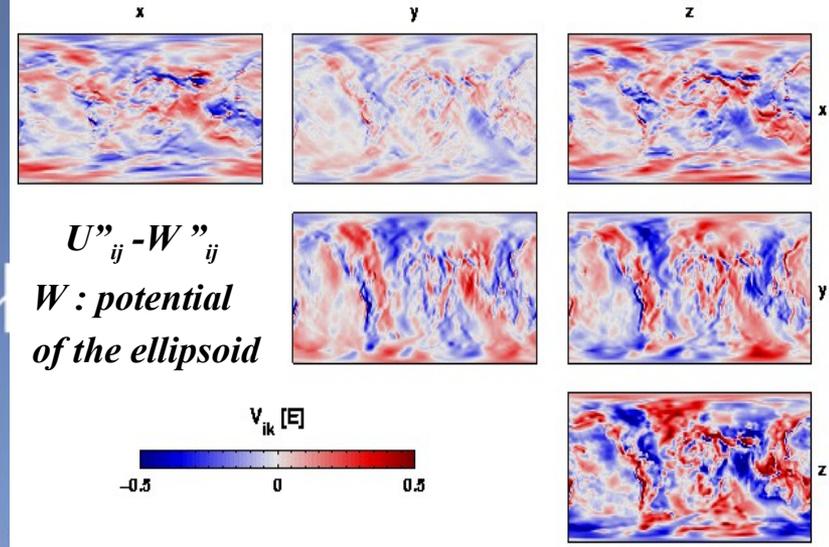
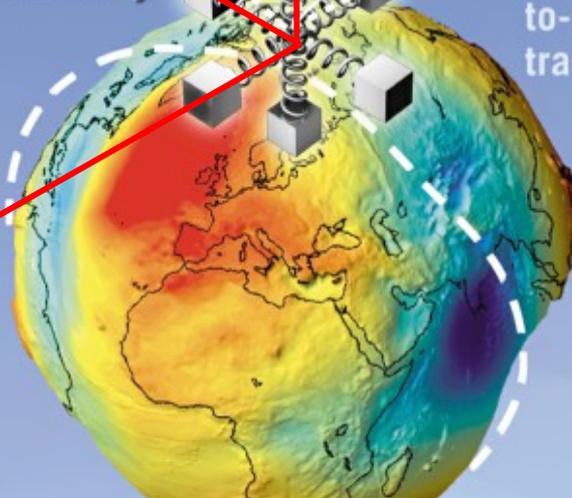
gradiometry

satellite-to-satellite tracking

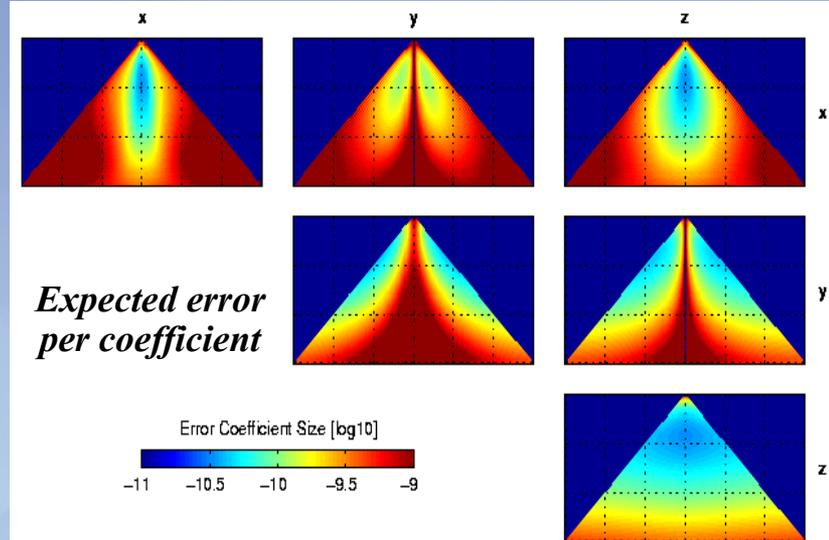
Objectifs de précision de géoïde:

2 mm / 2 mgal
à la résolution de 100 km

y



Combiné avec les mesures GPS : SST-h1



Gradiométrie : SGG, mesure du Gradient de Gravité par Satellite

En conclusion :

Une topographie de surface compensée par la croûte et la lithosphère (isostasie ou équilibre isostatique) à grande et moyenne longueurs d'onde (>100 km)

Avec des zones de déséquilibre (ex. rebond post-glaciaire)

Un champ de grande longueur d'onde provenant du manteau, notamment des plaques subductées.

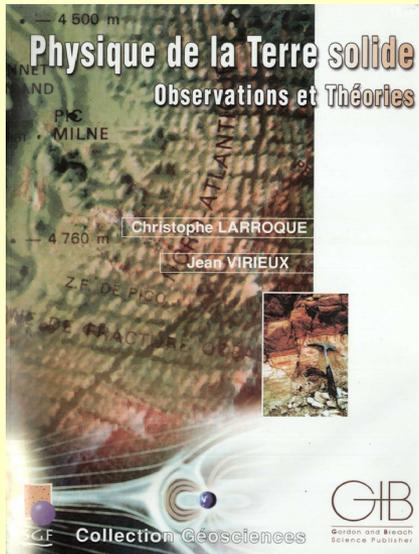
Et maintenant on mesure des variations temporelles.

Quelques références en français.

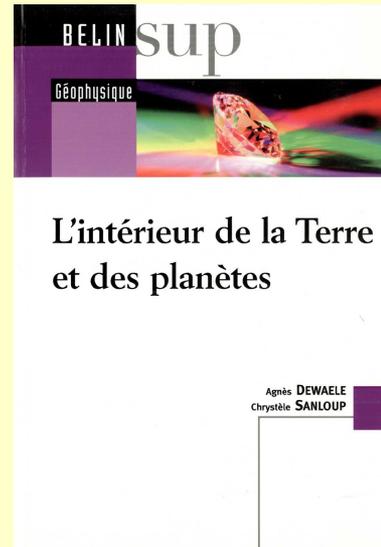
Les articles de Wikipedia sur la figure de la Terre et des livres :

Larroque et Virieux

le + complet en géophysique

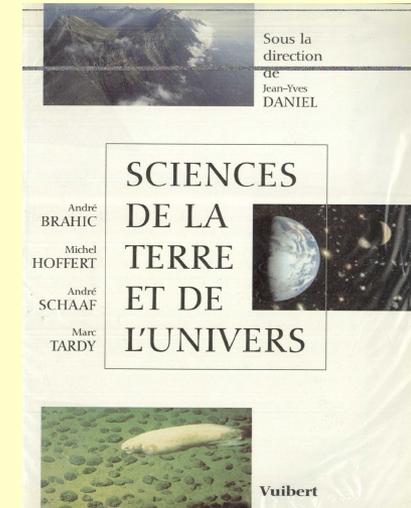


Dewaele et Sanloup



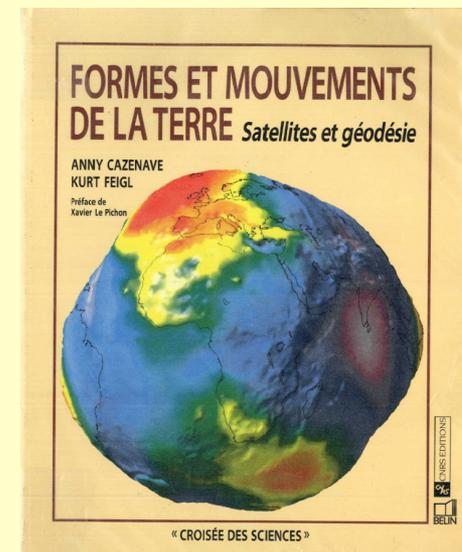
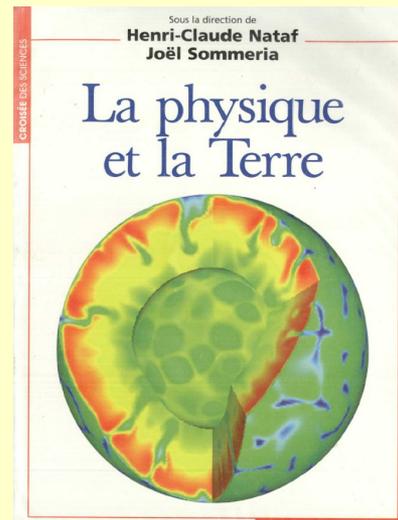
Brahic et col.

généraliste en sc. de la Terre



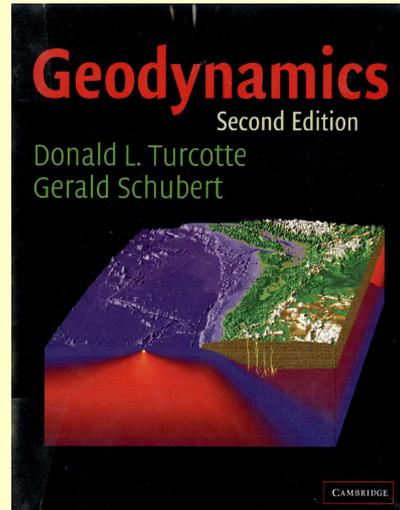
Nataf et Sommeria

Cazenave et Feigl

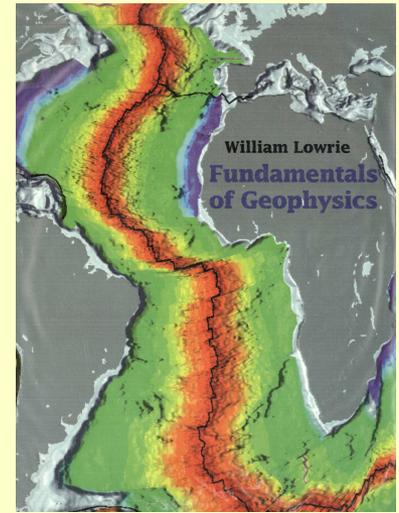


En anglais :

Turcotte et Schubert
beaucoup de petits
modèles physiques
illustrant des résultats
modernes

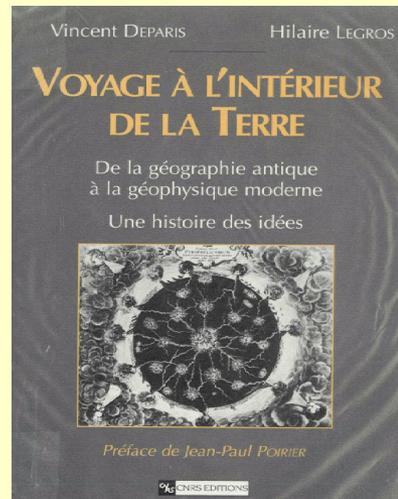


Lowrie
cours plus classique

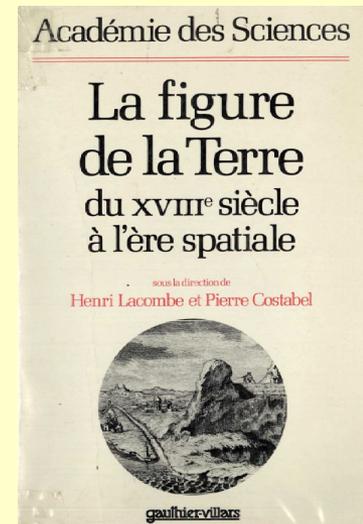


Et sur l'histoire :

Deparis et Legros,
Histoire de la géophysique



**Lacombe et
Costabel (Ed.)**



Ce diaporama sera à :

<http://frederic.chambat.free.fr/ens/>

Geoïde et topographie de Venus

Peu de compensation, planète peu active

