

How do we gain knowledge on the internal structure of planets ?

- Earth: Seismology gives **radial & 3D structure** (*Radial structure for the Moon also available*).
- Other planets & moons:
 - Density, composition of surface, cosmic abundances: **Internal composition**
 - Oblateness & rotational period: **Mass distribution**
 - Variations in gravity: **Lithosphere thickness, interior dynamics**
 - Magnetic field: **Conducting fluid layers**
 - Energy output: **Interior energy sources**
- Need: **Behaviour of material at high T & P**

Densities of the Terrestrial Planets

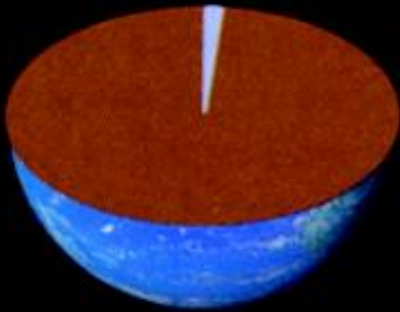
<i>Planet</i>	<i>Mean density (kg/m³)</i>	<i>Uncompressed density (kg/m³)</i>
Mercury	5430	5300
Venus	5240	4000
Earth	5515	4100
Moon	3360	3300
Mars	3940	3700



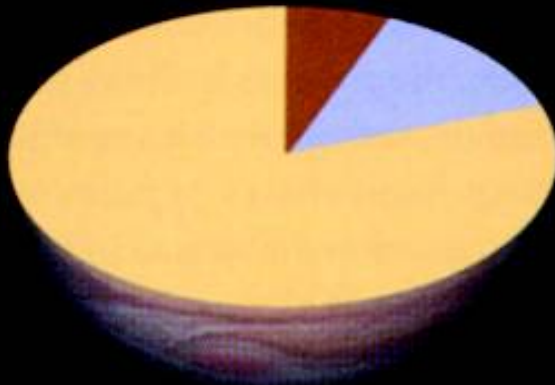
Composition of Terrestrial bodies:

- **Formed hot** = primitive material differentiated into metal core + rocky mantle & crust
- **Moon much less metal** than Earth although at same distance from Sun !
- **Venus and Earth seem similar**, but surfaces are quite different !

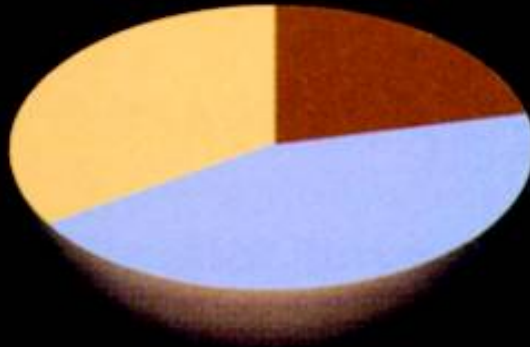
Earth



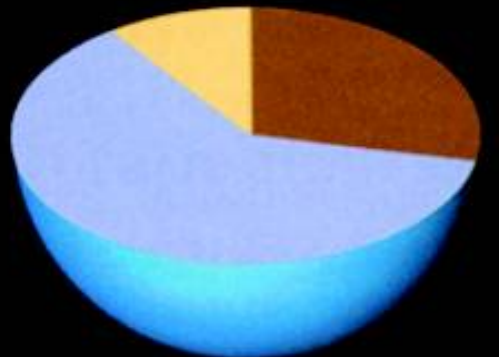
Jupiter



Saturn



Uranus, Neptune



~"rock"

~"gas"

~"gas"

~"ice"

- Good horizontally-averaged description:

$$\frac{dP}{dr} = -g(r)\rho(r) \qquad P(r) = -\int_R^r g(r')\rho(r')dr'$$

- Gravity depends on radial density distribution:

$$g(r) = \frac{GM(r)}{r^2} \qquad M(r) = \int_0^r \rho(r)4\pi r^2 dr$$

- Many phase change can occur in planetary interiors:

- *Solid to liquid (melting)*
- *Several solid phases depending on T, P (particularly in rocks)*
- *Transitions molecular to atomic*
- *Transition to 'metallic' (overlapping, mobile electrons) at high pressure.*
- *Supercritical fluid: no distinction between liquid and gas*

Hydrogen phase diagram

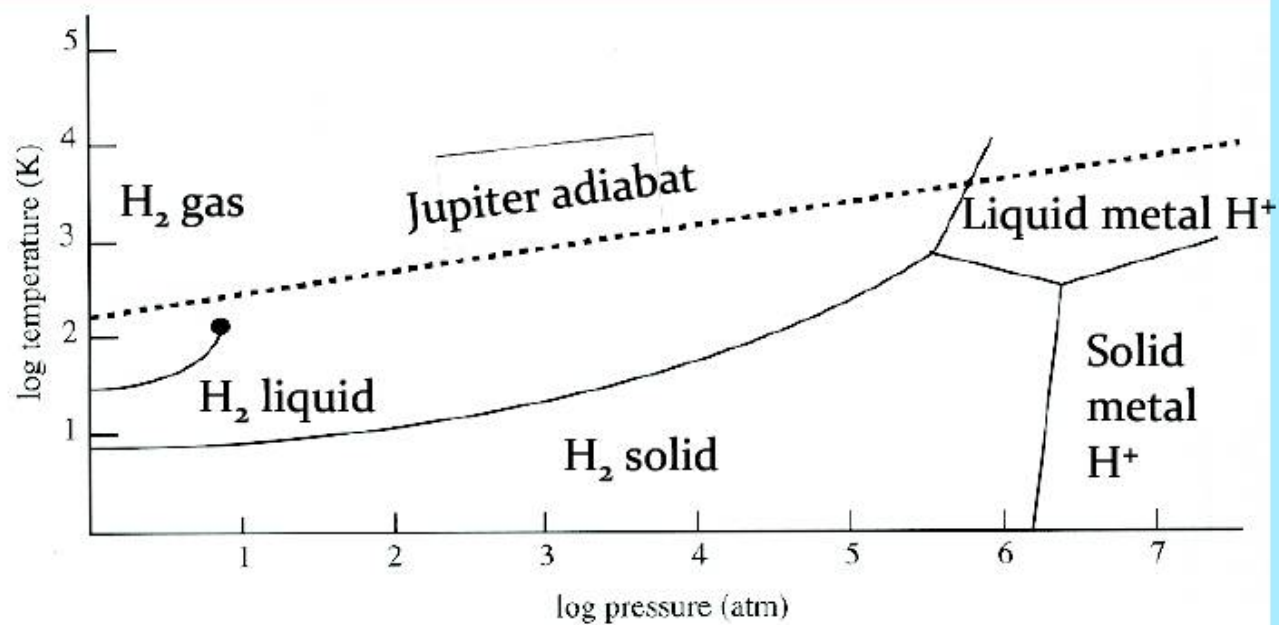


FIGURE 10.3 The phase diagram of hydrogen. The line marked Jupiter adiabat marks the temperature and pressure conditions thought to exist inside the planet. The boundary into the H^+ liquid region marks the beginning of a conductive liquid core; the exact location of this boundary is still uncertain.

Iron phase diagram

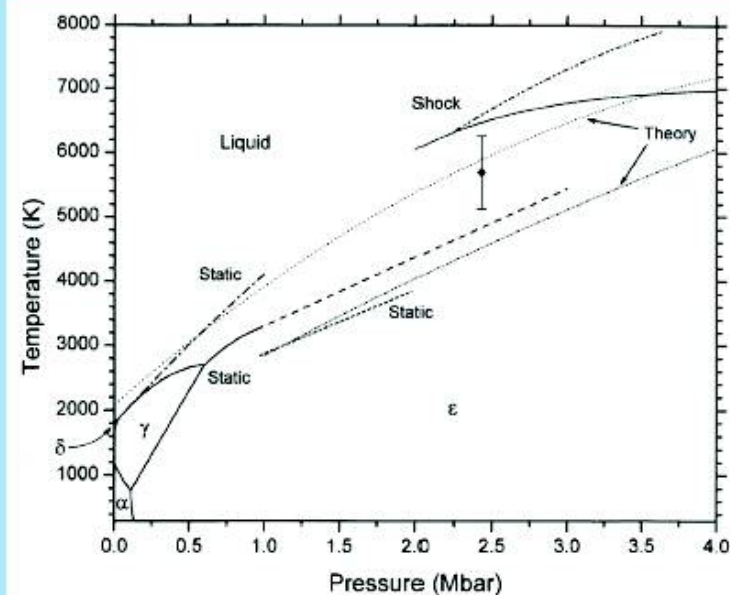


FIGURE 6.5 Phase diagram of iron under high temperature and pressure, based upon: (i) Experiments using a diamond anvil cell ('static' measurements). The solid (measured) line is extrapolated to higher temperatures and pressures via the dashed line. (ii) Shock wave experiments at higher temperature and pressure, as indicated by the two lines and the diamond. (iii) The thin dotted lines are theoretical calculations of the melting curve of iron for conditions appropriate to Earth's core. The data were assembled from many different sources. (Diagram courtesy of Stephen A. Gramsch, Carnegie Institution of Washington)

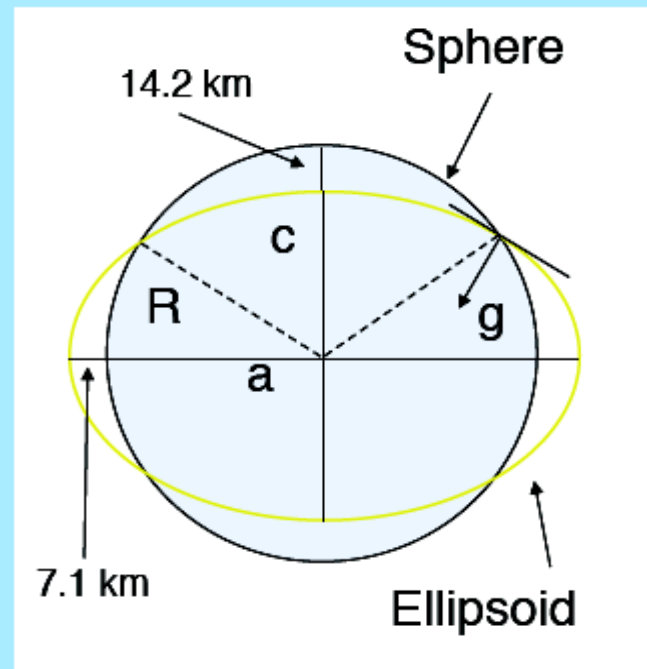
- Melting temperature increases more rapidly with depth than adiabatic increase in temperature: The central part of planetary cores is solid.
- Effect of impurities, e.g., S: decreases the melting temperature (At $P = 10^5$ Pa: T_{melt} for Fe, FeS, and 27% FeS-73% Fe eutectic are: 1808 K, 1469 K, and 1262 K, respectively).

1- GRAVIMETRY

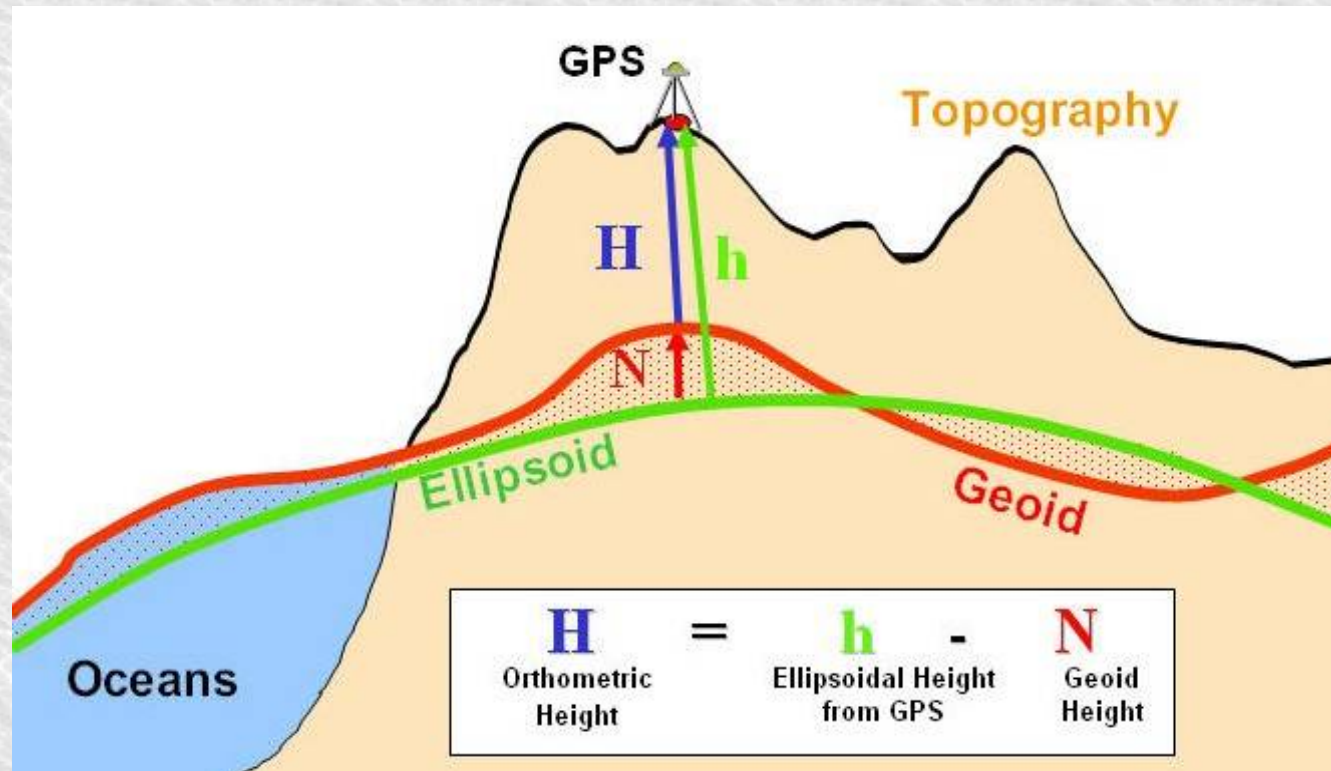
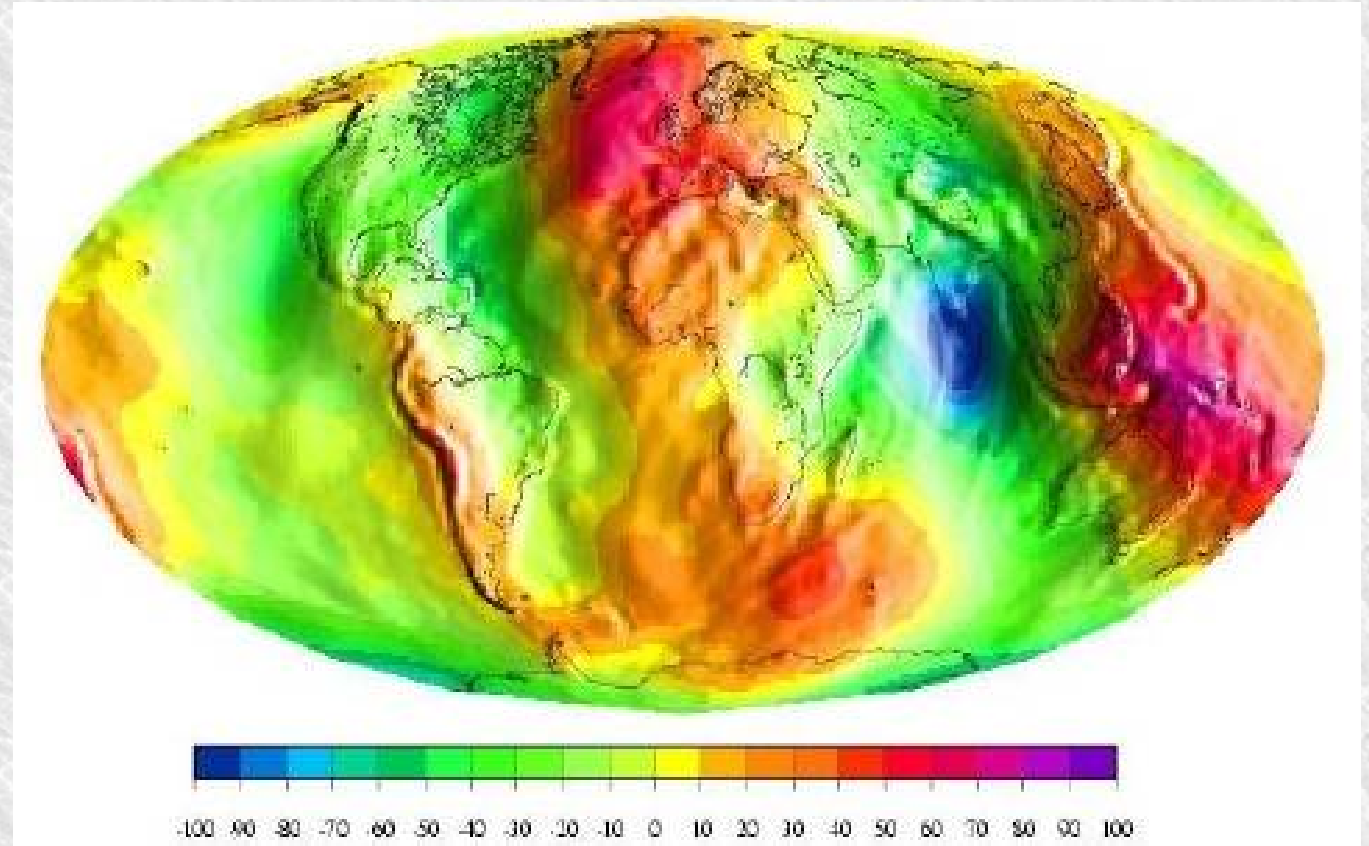
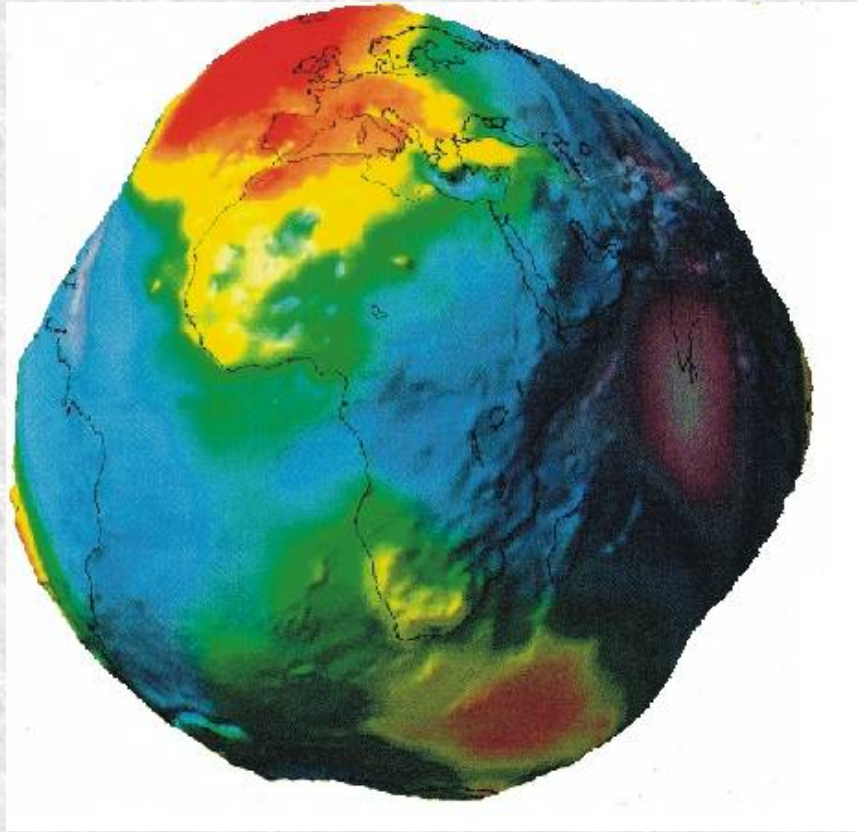
- Topography induces stress
- If stress larger than strength of material, material breaks and flows, reducing topography.
- **Large bodies:** large g , small topography
- **Small bodies:** small g , large topography
- If topography \sim size of body \Rightarrow potato
- **Oblate** spheroid due to rotation

Reference ellipsoid, equipotential & geoid

- For a homogeneous planet, the reference reference ellipsoid is an **equipotential**.
- Due to additional shape perturbations (the Earth is pear-shaped!), and lateral variations in density, the true equipotential is **not** an ellipsoid.
- The **true** equipotential is called the **geoid** (or planetoid for other planets).



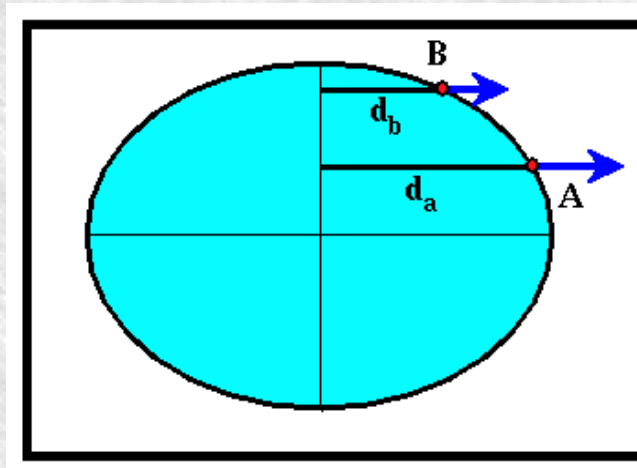
Ellipsoïde et Géoïde



La Forme de la Terre

En 1743, Clairaut montra que la forme de la Terre n'est pas seulement affectée par sa rotation, mais aussi par la répartition interne de sa masse. Il définit la forme théorique de la Terre selon la répartition à symétrie ellipsoïdale de ses masses. Cette surface est l'**Ellipsoïde de référence**.

Pôle Nord : 90° N	9,83245 ms ⁻²
Paris : 49° N	9,8094 ms ⁻²
Equateur : 0° N	9,7803 ms ⁻²
Java : 6° S	9,7818 ms ⁻²
Melbourne : 38° S	9,7999 ms ⁻²



La forme de la Terre est un ellipsoïde.
 $R_c = 6357$ km, $R_e = 6378$ km.

$$\mathbf{R_A > R_B}$$
$$\mathbf{donc g_A < g_B}$$

Clairaut montra que sur une ellipsoïde de référence, le champ de pesanteur ne dépend que de la latitude:

$$g = 978031,85(1 + 0,0053024.\sin^2\phi + 0,0000059.\sin^22\phi) \text{ mgal}$$

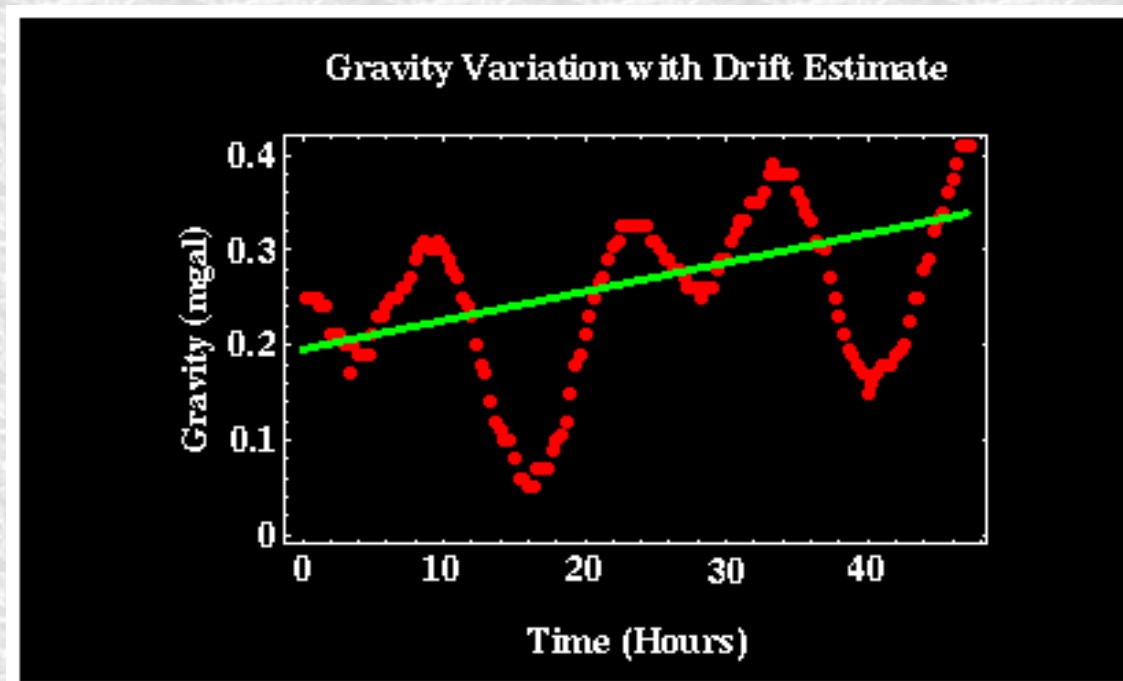
g_0 = Gravité normale pour une terre ellipsoïdale,

Φ = latitude

Unité utilisée : mgal (= 10⁻⁵ m.s⁻²). 1 gal = 1 cm.s⁻²

Cette expression de g est appelée **correction latitudinale**

Les causes de la variation de l'accélération gravitaire



Variations temporelles dues à:

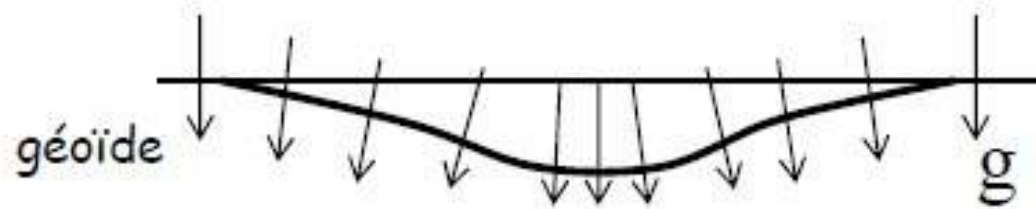
- des changements de réponse du gravimetre lui-meme (**dérive instrumentale**),
- des changement causés par l'attraction du Soleil et de la Lune (**effet de marée**).

Variations spatiales dues à:

- la forme ellipsoïdale et la rotation de la terre (**effet latitudinal**),
- Differentes élévations des points d'observation (**effet d'altitude**),
- la masse additionnelle de materiel entre points plus élevés (**effet de plateau**),
- la topographie pres du point d'observation (**effet topographique**),
- **déplacement du support** (avion ou bateau...)

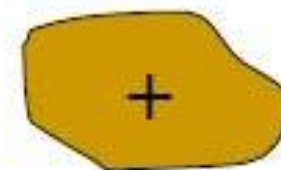
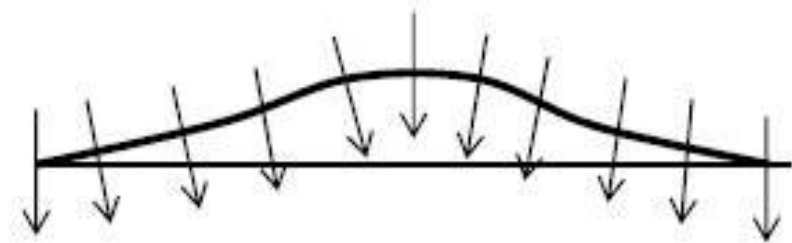
Effet d'un excès ou défaut de masse sur le géoïde

défaut de masse



$$\Delta\rho < 0$$

excès de masse



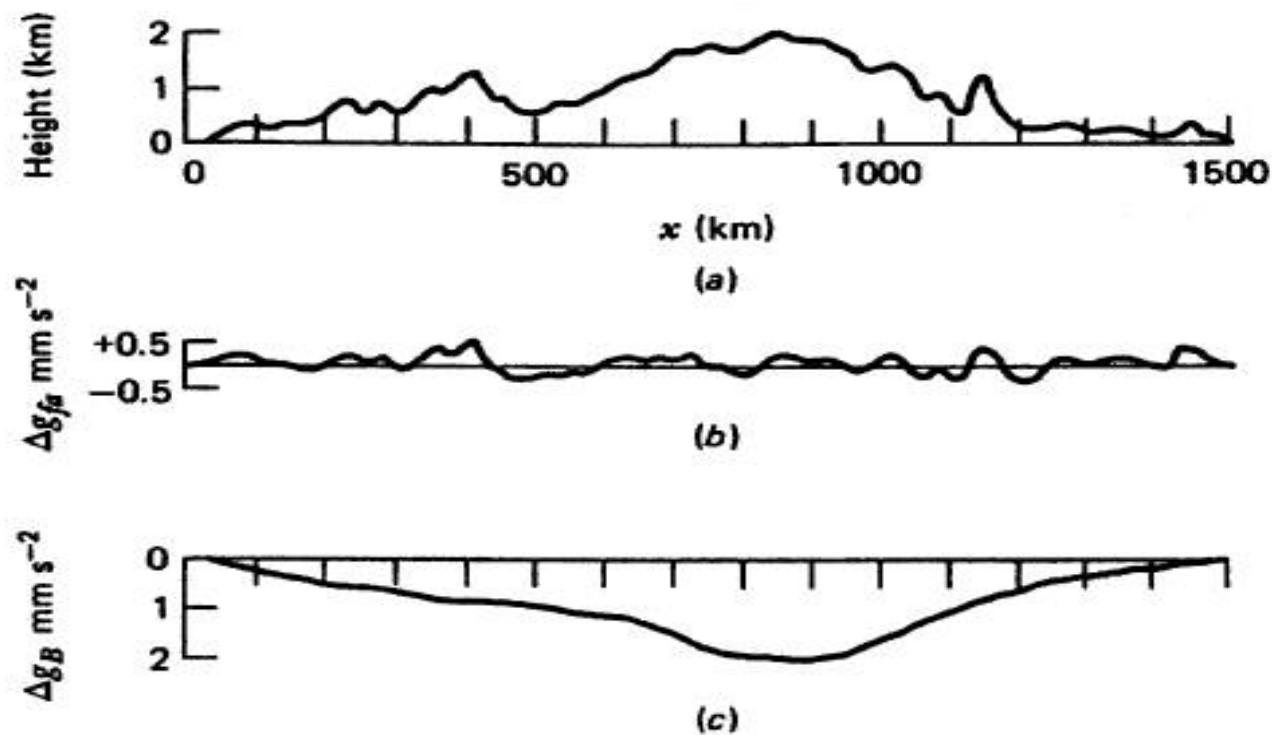
$$\Delta\rho > 0$$

L'anomalie de Bouguer

Cette anomalie correspond à la prise en compte des principaux effets : air libre, plateau, et topographie.

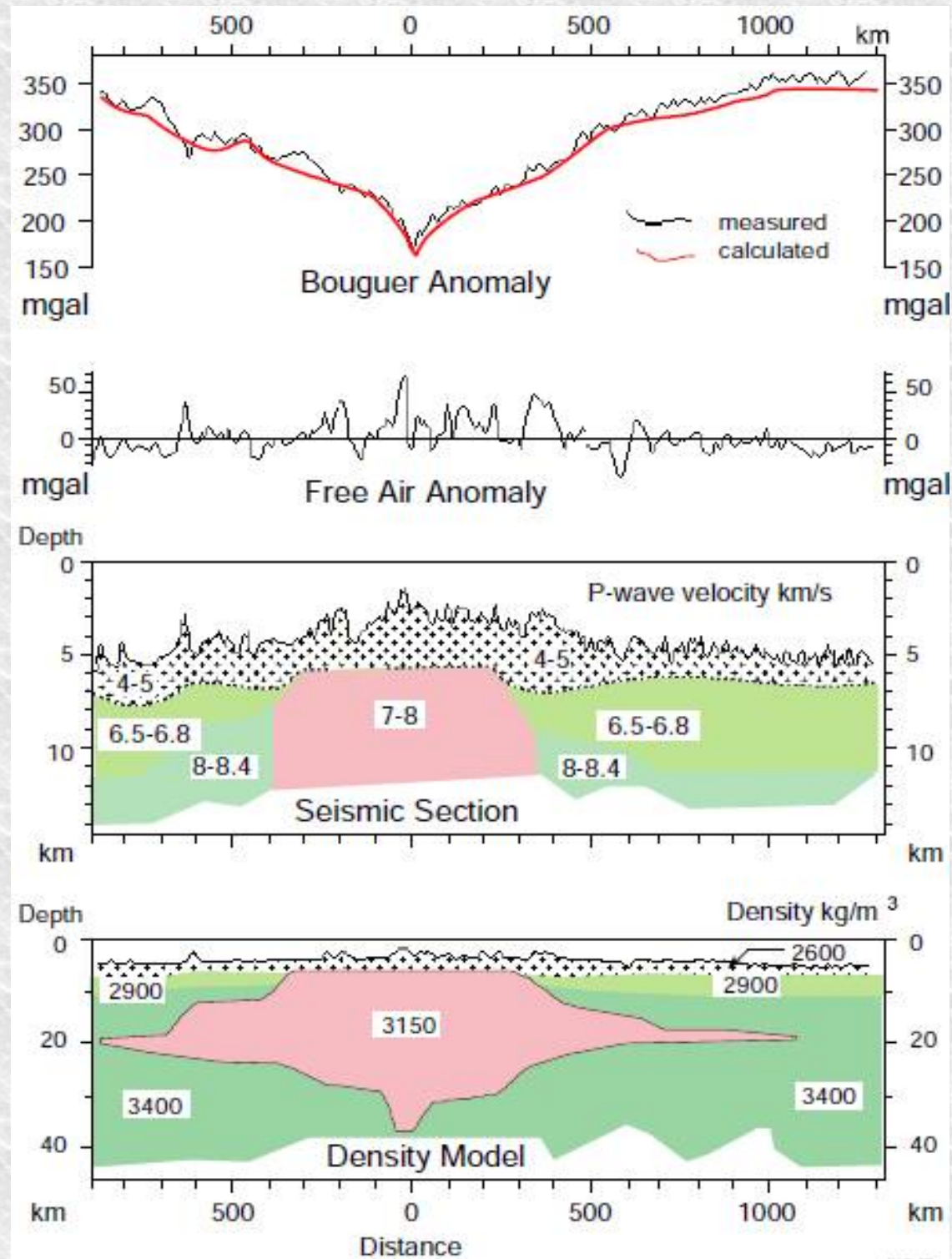
$$A_B = g_m - g_{ref} + 0,3086h - 0,0419d.e + Dg_T + C_{dérive-instr}$$

Cette anomalie est généralement anti-corrélée avec l'altitude.
Elle révèle les objets et les phénomènes dynamiques de taille inférieure à 1000 km comme les montagnes

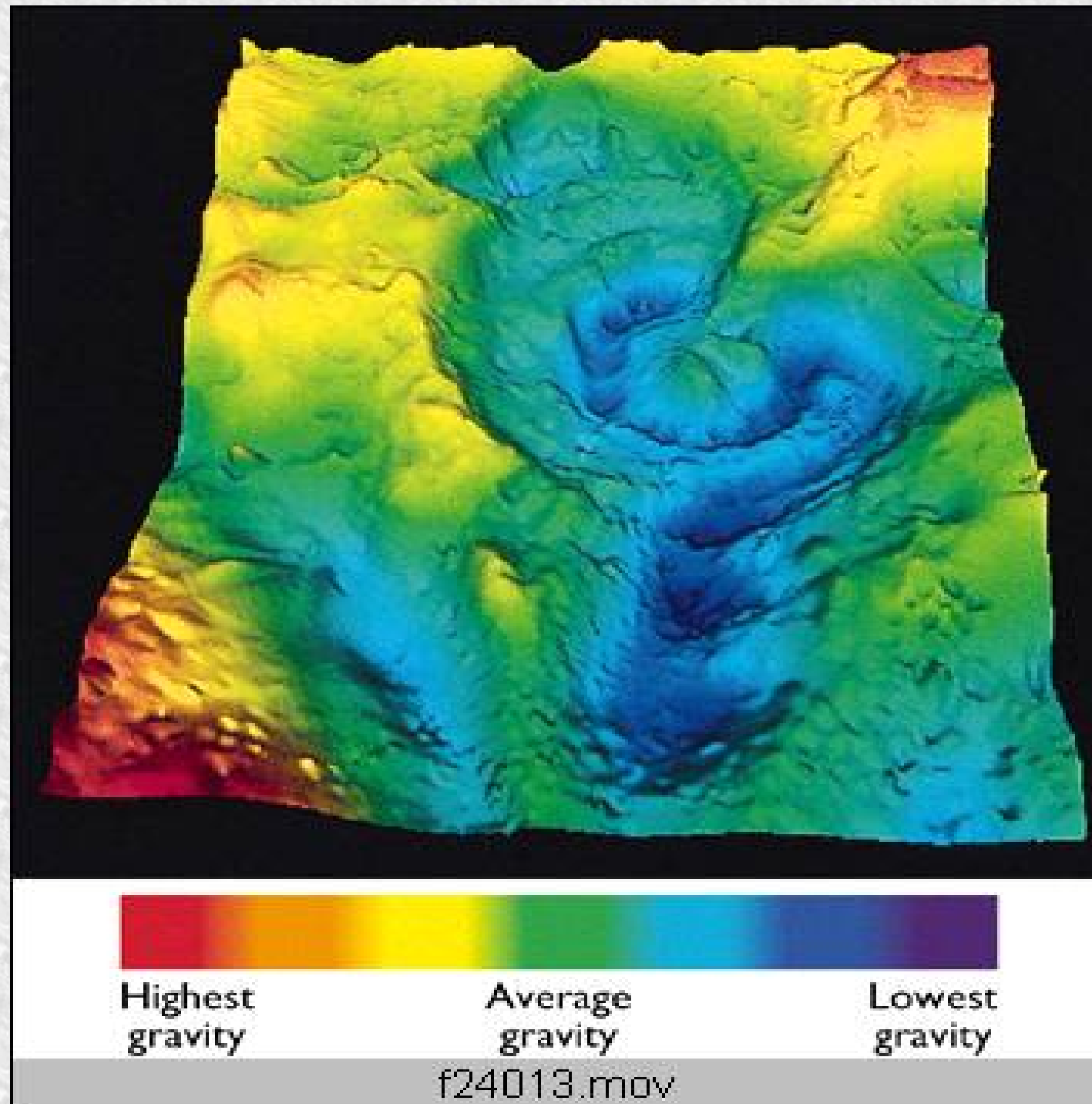


Exemple de correspondance : topographie (a), anomalie à l'air libre (b), anomalie de Bouguer (c)

Ride medio-oceanique Atlantique (32 deg N)

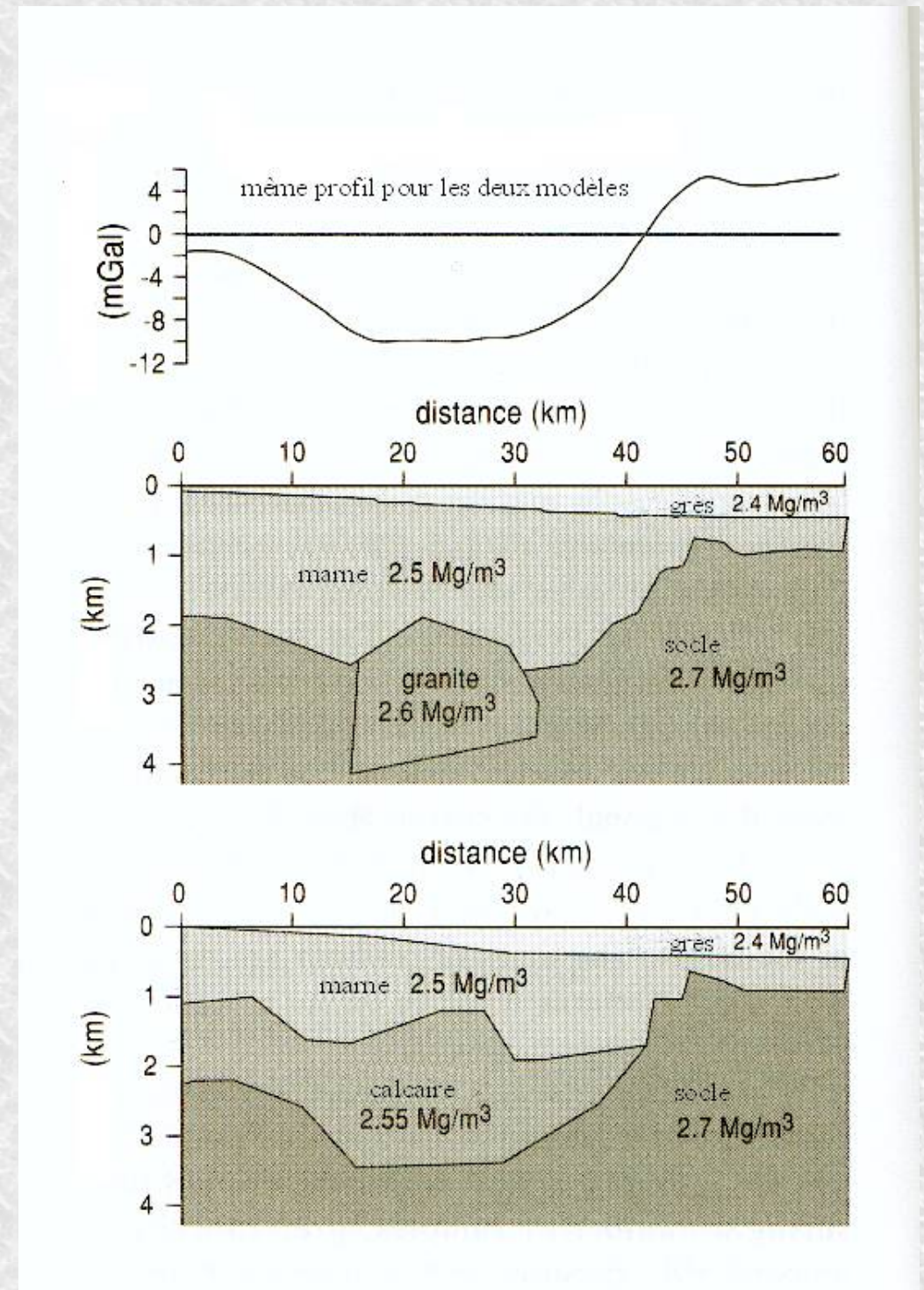
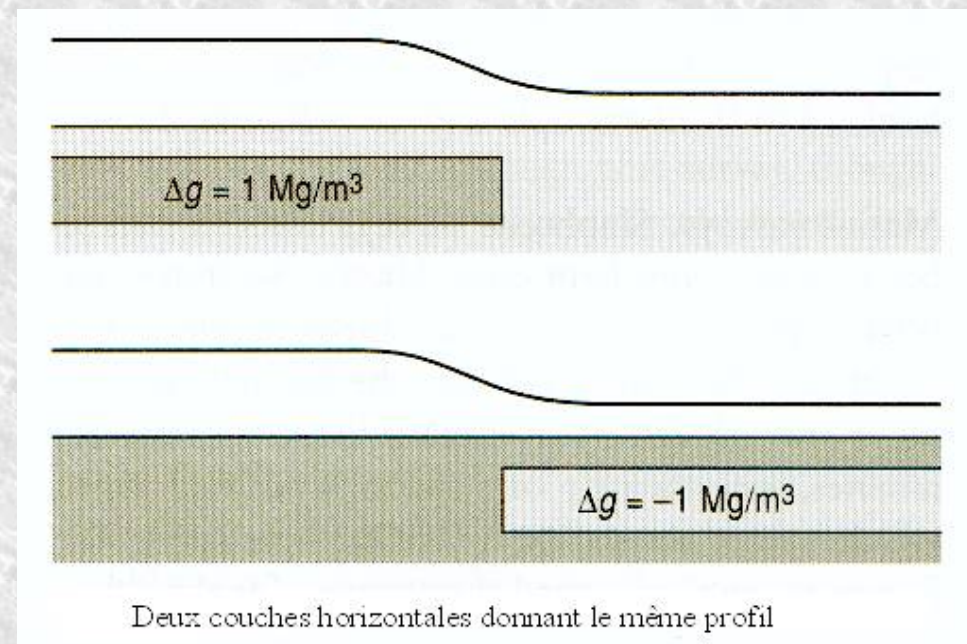
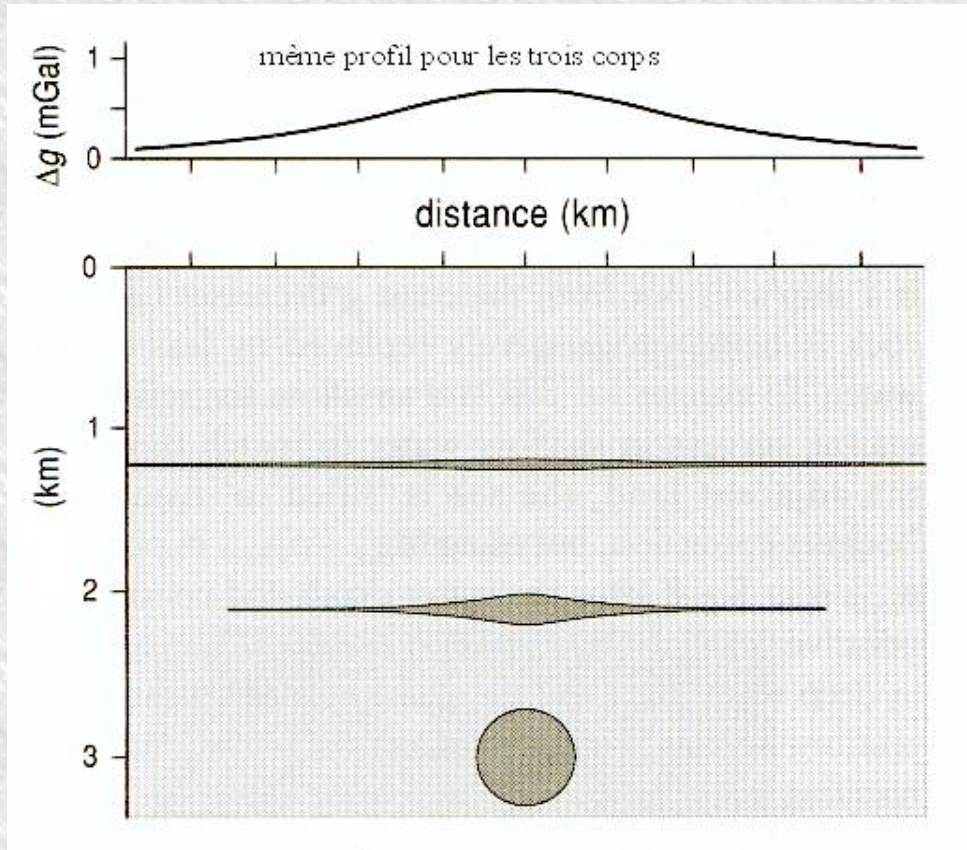


Mise en évidence du cratère d'impact météoritique il y a 65Ma dans le Yucatan (Mexique) par méthode gravimétrique (cratère de 180 km!)



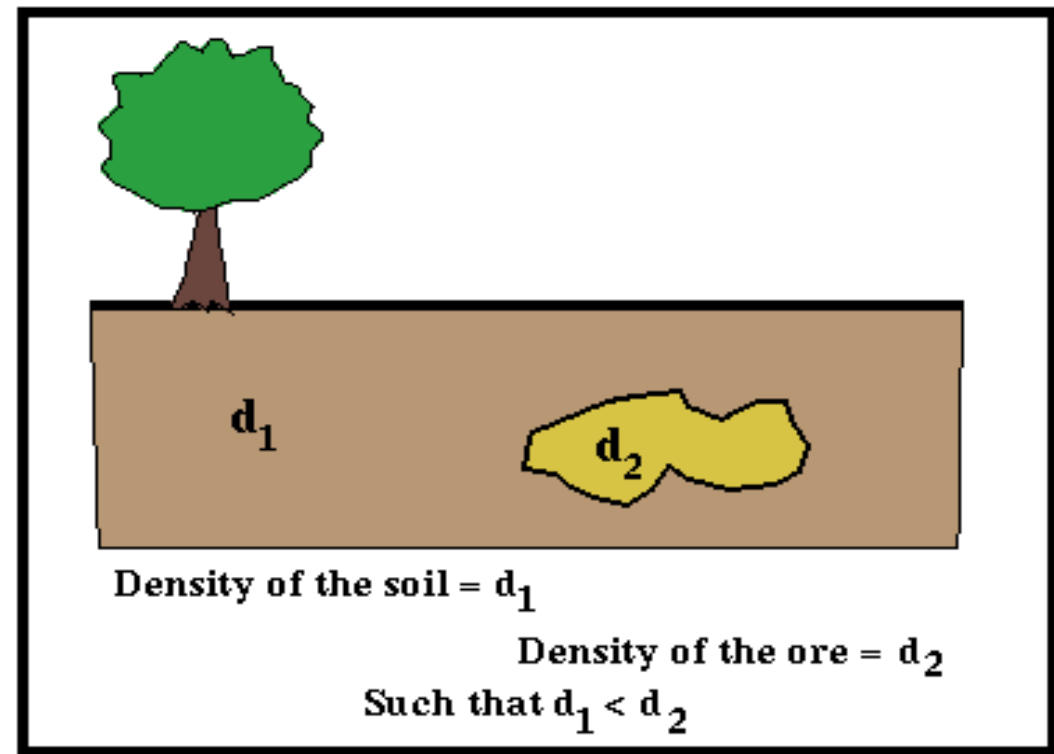
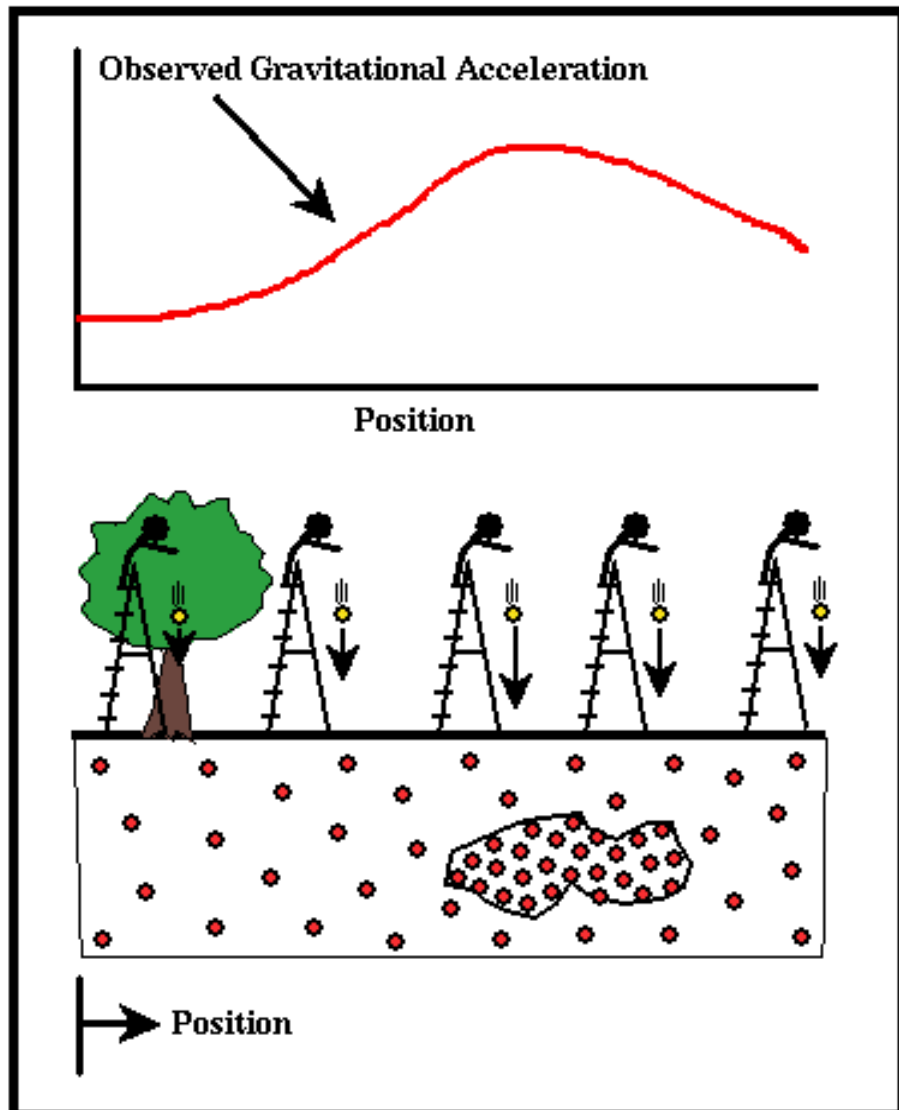
Non-unicité de la reconstruction

Trois exemples de différentes structures:



Exemple du chercheur d'or

Un chercheur d'or parcourt la surface terrestre avec un gravimètre, sachant que s'il ya une poche d'or, la densité de cette poche est supérieure ($d_1 < d_2$).



Décrivons ce qu'une balle subit comme **accélération gravitaire** si elle chute depuis une échelle. Son accélération est:

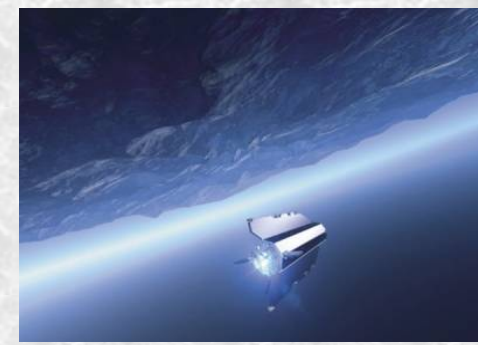
- proportionnelle aux masses qu'elle a sous elle.
- augmente aussi quand les points masses se rapprochent.

On peut donc faire tomber la balle à différentes positions de la surface du sol, et parce qu'il ya un nombre de points de masses variable dessous la balle, l'accélération gravitaire varie, et on obtient un **profile gravitaire**.

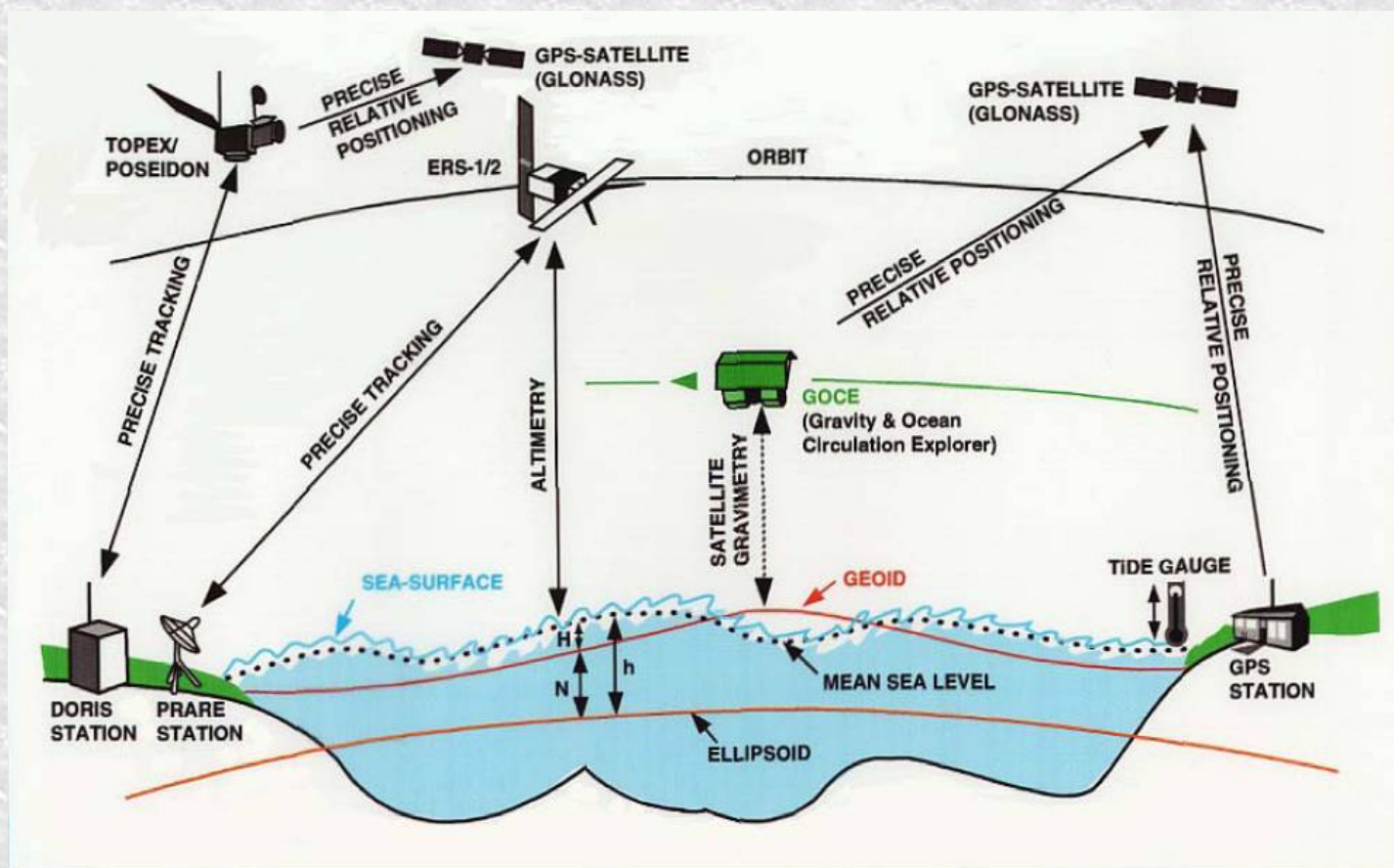
Ce n'est pas la valeur absolue qui compte, mais le contraste de densité et l'amplitude des variations du profile.

Gravimétrie satellitaire

Le mouvement d'un objet en orbite autour d'un astre dépend directement de la répartition de ses masses internes. Donc, on mesure très précisément l'orbite d'un satellite, et on en déduit l'information sur le champ de pesanteur. C'est la gravimétrie spatiale, e.g. Grace, Goce.

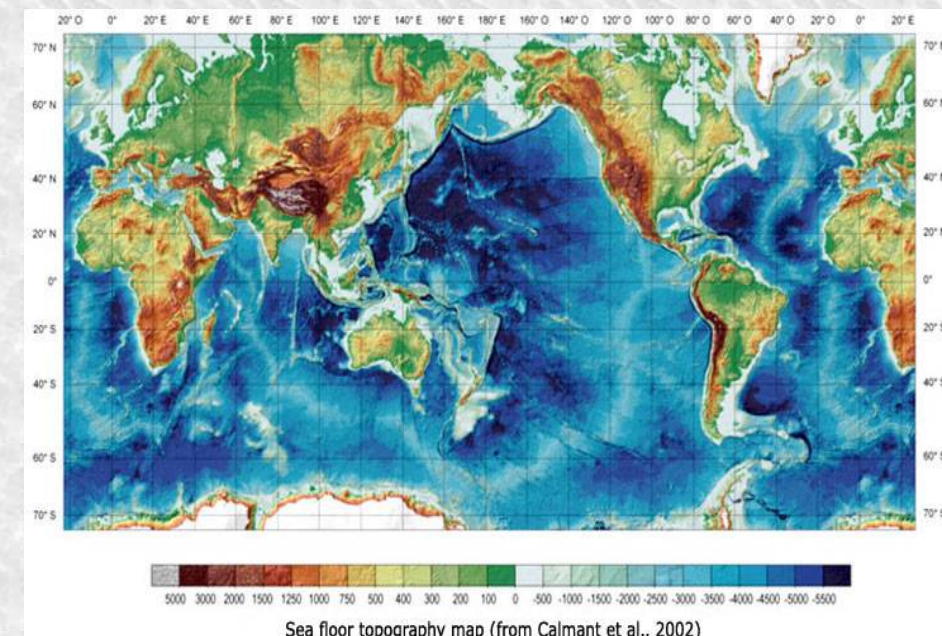


Topographie globale des fonds marins, à partir des données altimétriques, obtenue par une inversion au sens des moindres carrés de la surface moyenne altimétrique à haute résolution (GOCE) et les sondages par navires GOCE.



$N = \text{Geoid Height (Geoid - Ellipsoid)}$
 $H = \text{Sea-Surface Topography (Mean Sea Level - Geoid)}$

$h = H + N : \text{Sea-Surface Height (Mean Sea Level - Ellipsoid)}$



L'examen des cartes d'anomalies de Bouguer à Grande échelle montre que les chaînes de montagnes Sont systématiquement associées à des anomalies négatives

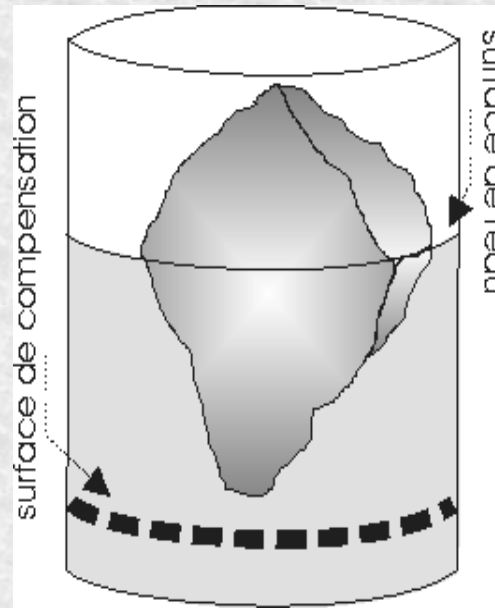


Il existe donc un défaut de masse sous les chaînes de montagnes. En d'autres termes, l'excès de masse dû à la topographie serait « compensé » par un défaut de masse en profondeur.



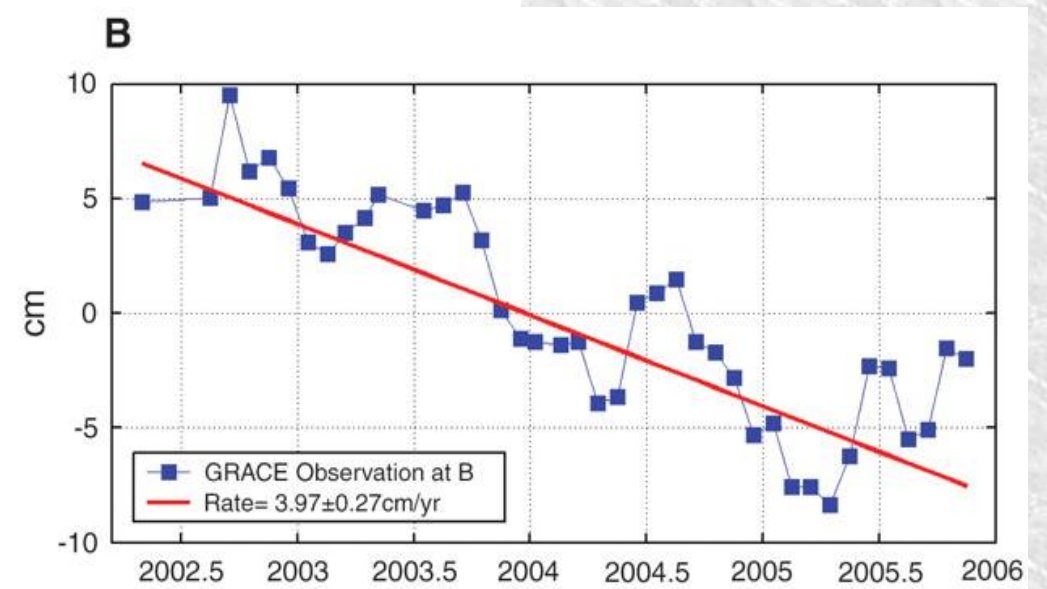
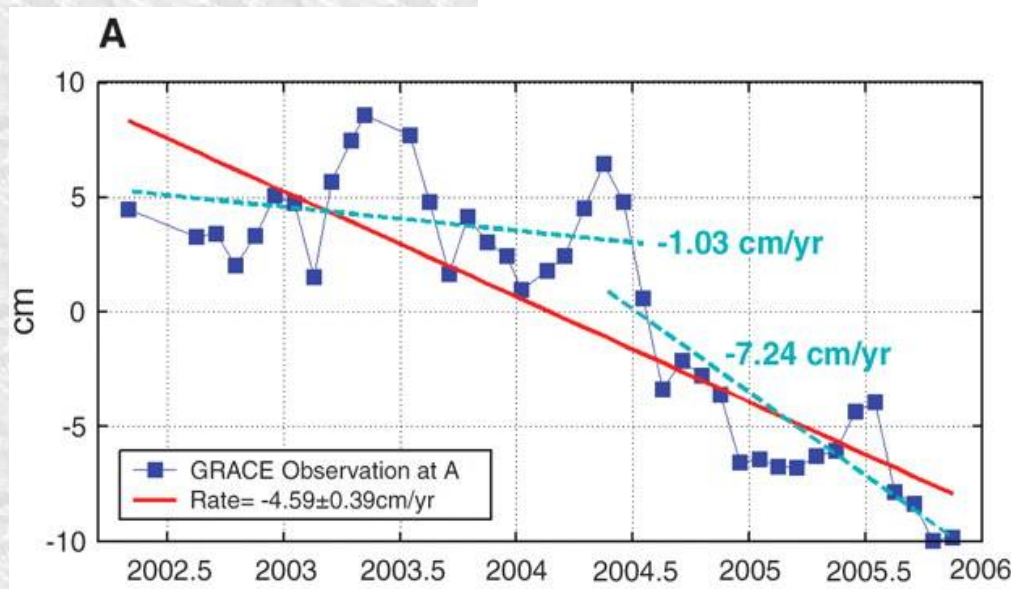
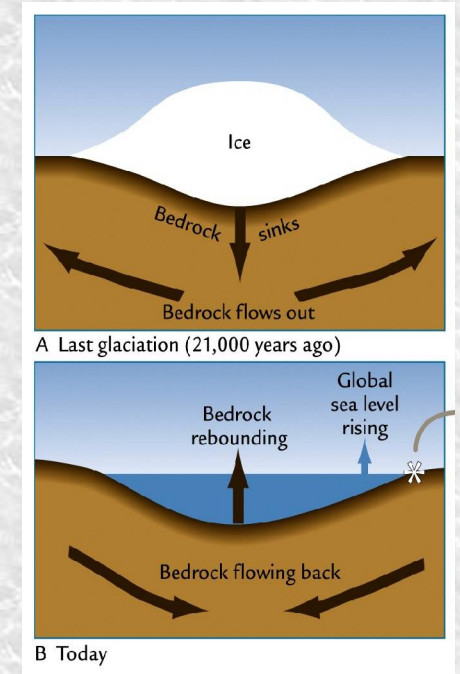
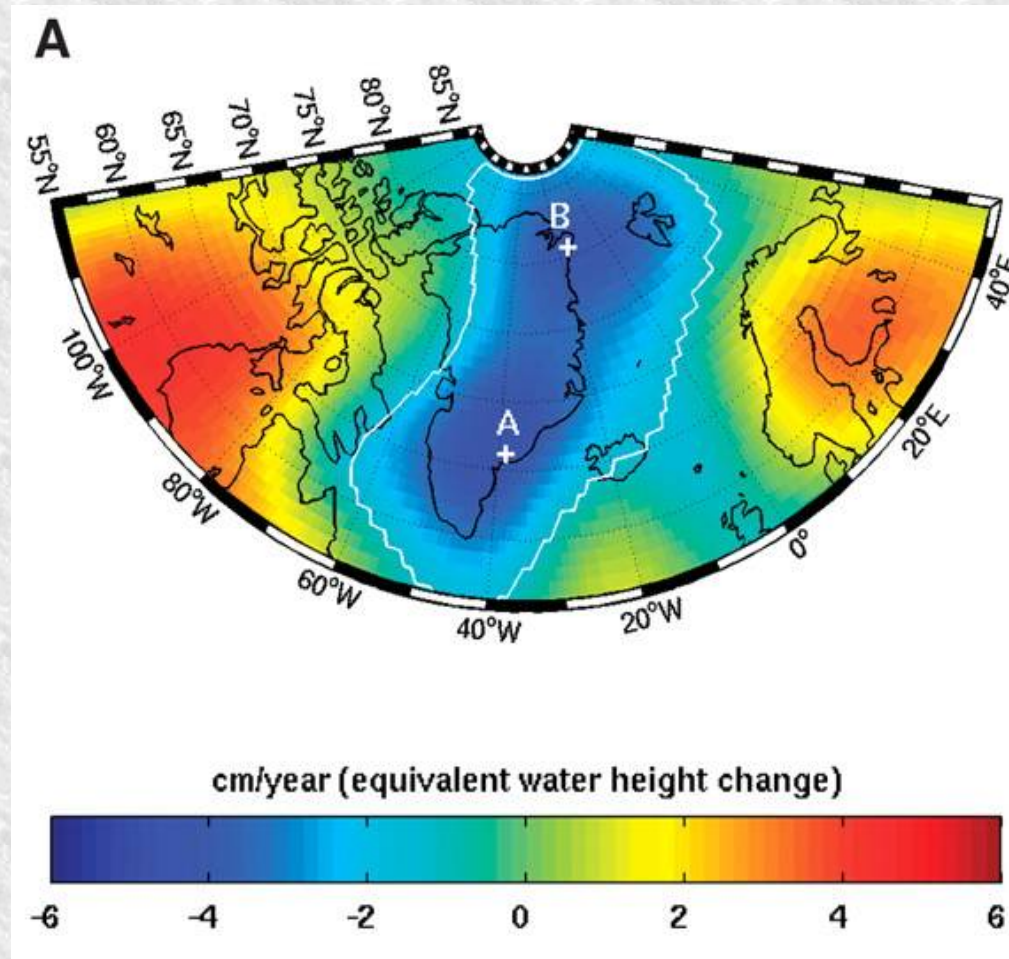
Phénomène d'isostasie (principe d'Archimède):

C'est un phénomène dynamique qui réajuste en permanence l'altitude de la surface de compensation



Diminution de la calotte glacière du Groenland

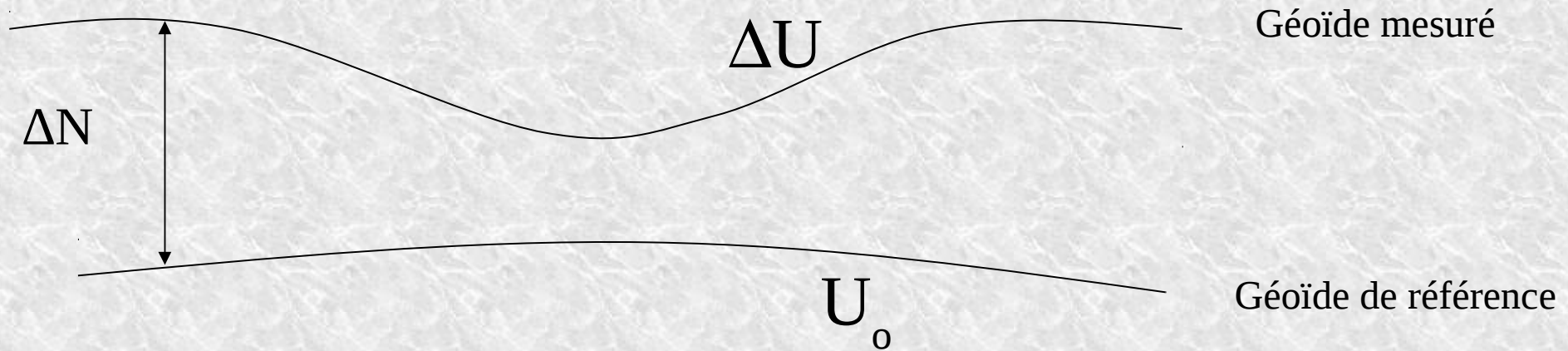
Volume de la Calotte
du Groenland :
 $2,5 \cdot 10^6 \text{ km}^3$



L'anomalie du géoïde

- Le champ de gravité dérive d'un potentiel :

$$\vec{g} = -\vec{\nabla}U$$



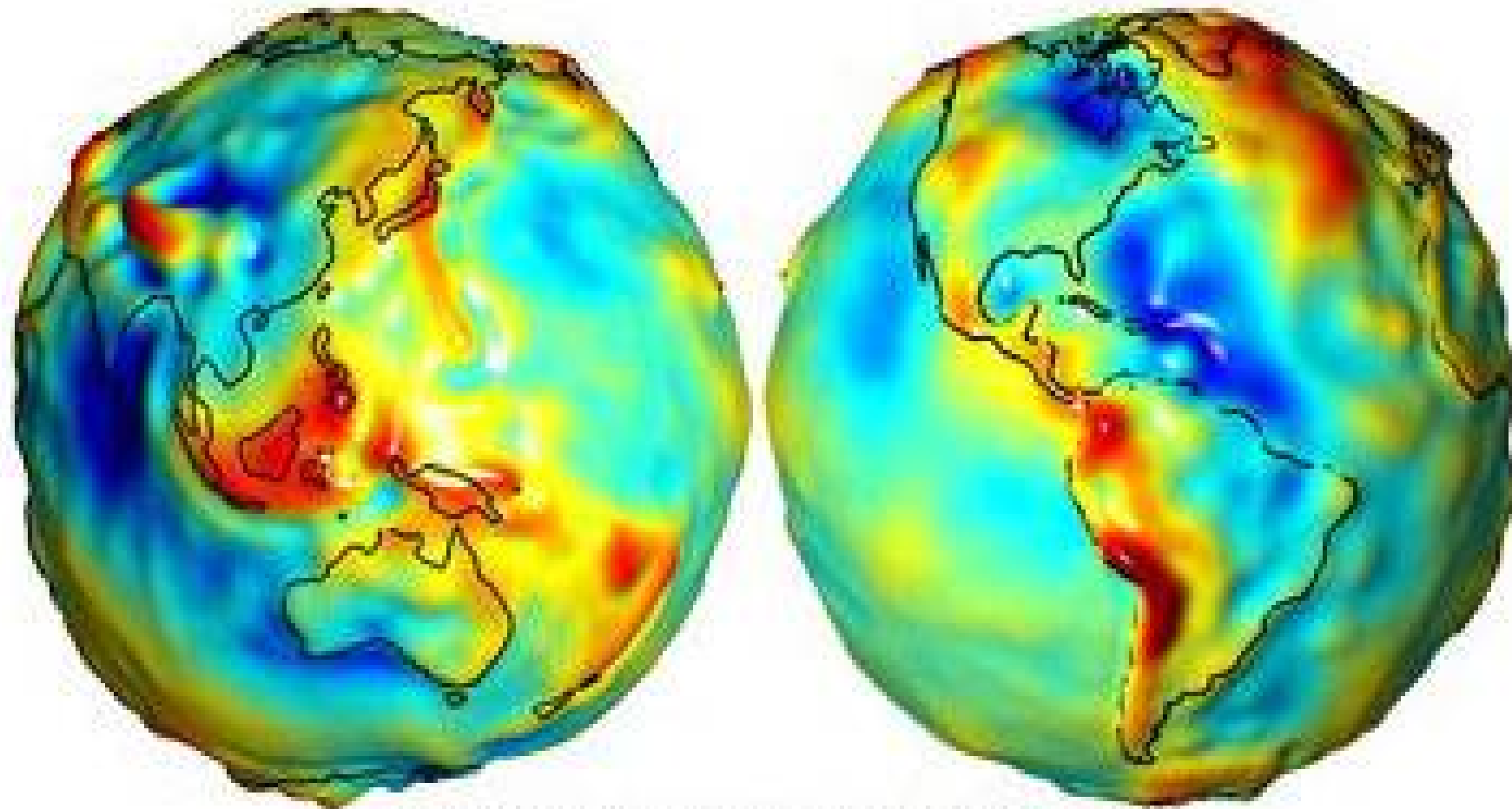
L'anomalie du potentiel : $\Delta U = U_{m0} - U_0$

L'anomalie du géoïde ΔN se relie à ΔU : $\Delta U = U_0 - U_{m0} = -g_0 \cdot \Delta N$

En intégrant le potentiel gravitationnel d'un disque cylindrique infinitésimal, on montre que:

$$\Delta N = -\frac{2\pi G}{g_0} \int_0^h y \Delta \rho(y) dy$$

*Les anomalies positives du Geoïde sont plutôt corrélées
avec des zones de subduction*



Earth's Gravity Field Anomalies (milligals)

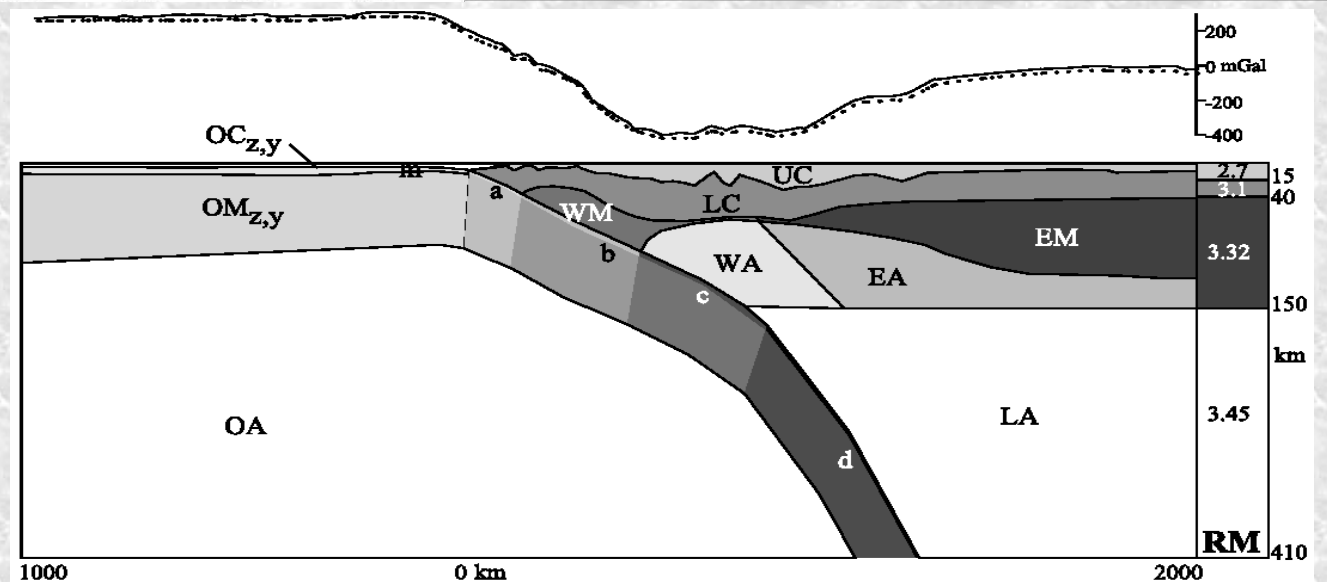
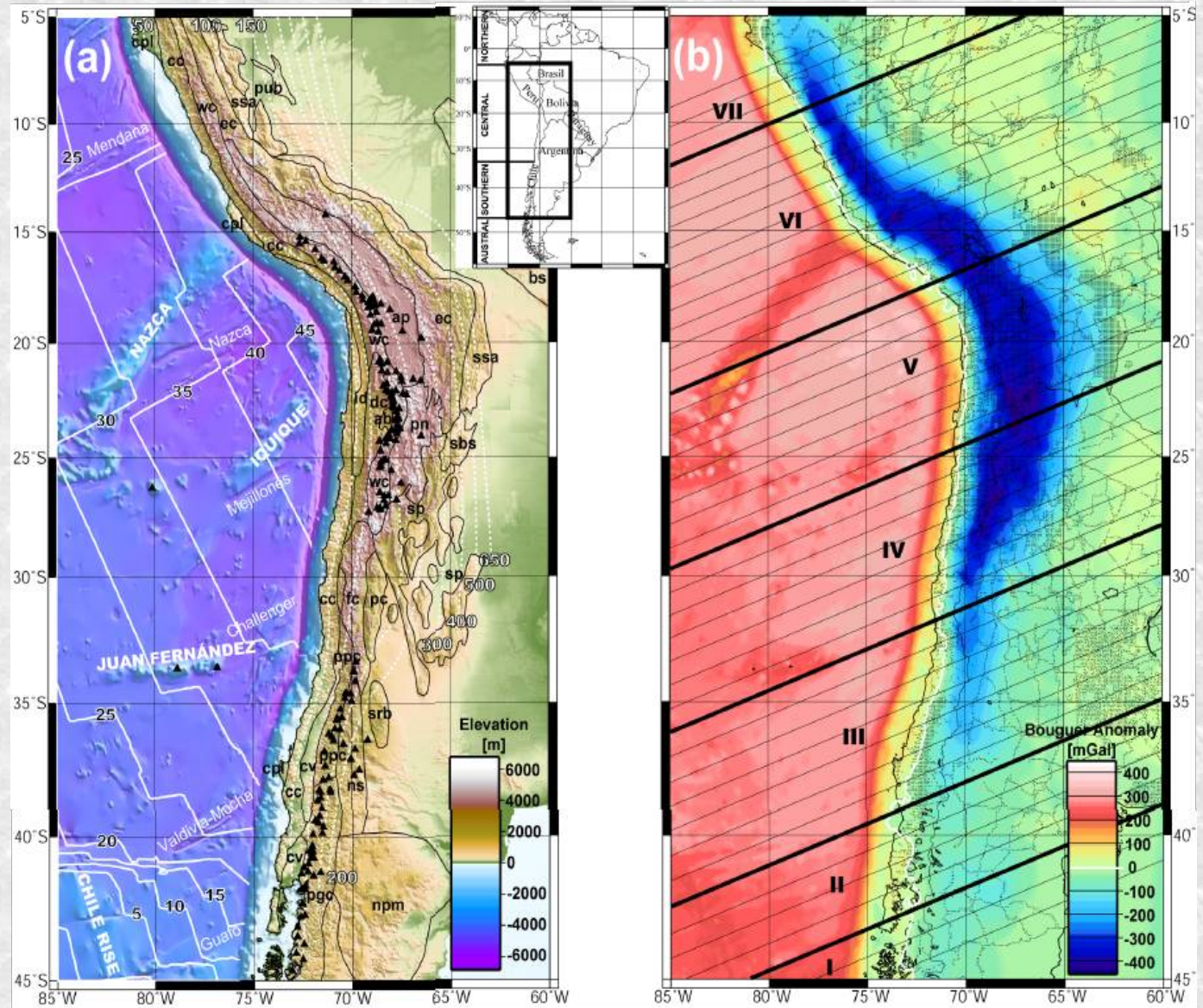


Anomalie de Bouguer au niveau des Andes

Les anomalies positives du Geoïde (ΔN) se corrèlent avec le relief au dessus de zones de subductions...

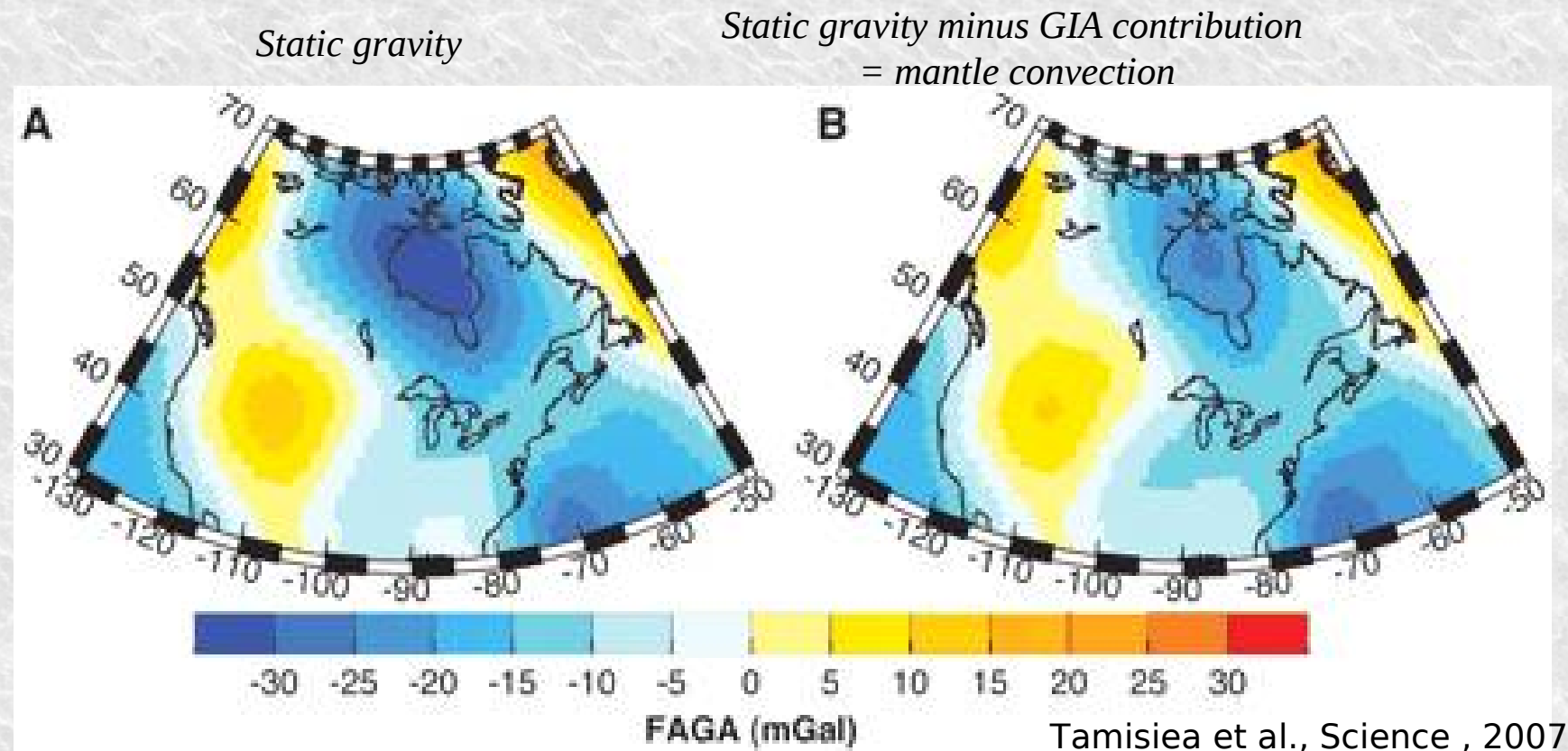
L'Anomalie de Bouguer est anti-corrélée avec le relief (l'altitude) des Andes:

- effet <0 de la racine crustale,
- effet >0 de l'exces de poids de la plaque plongeante.



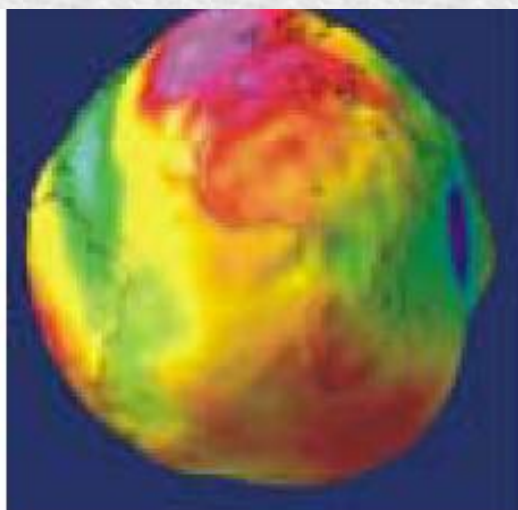
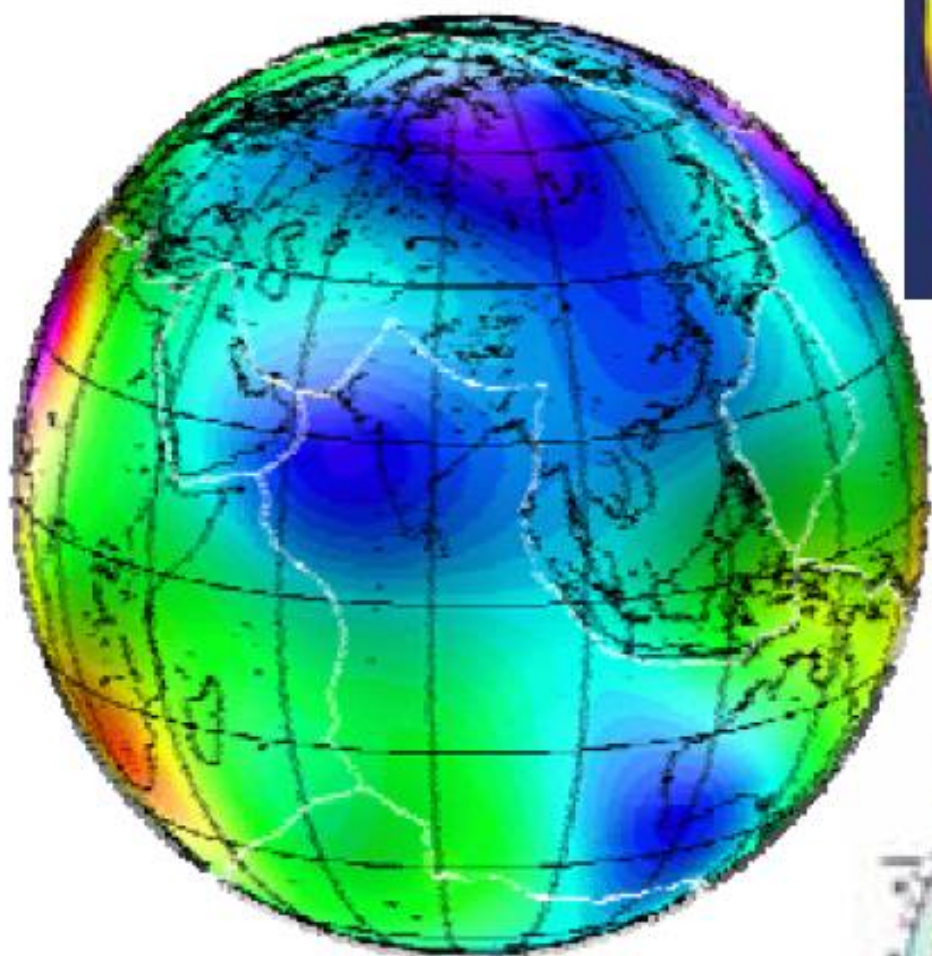
Anomalies de très grande étendue: les anomalies mantelliques.

La théorie de l'isostasie ne rend pas compte des anomalies gravimétriques globales (> 500 km). Il n'est pas rare d'avoir une anomalie résiduelle après avoir soustrait les effets des accidents topographiques et de leurs racines.

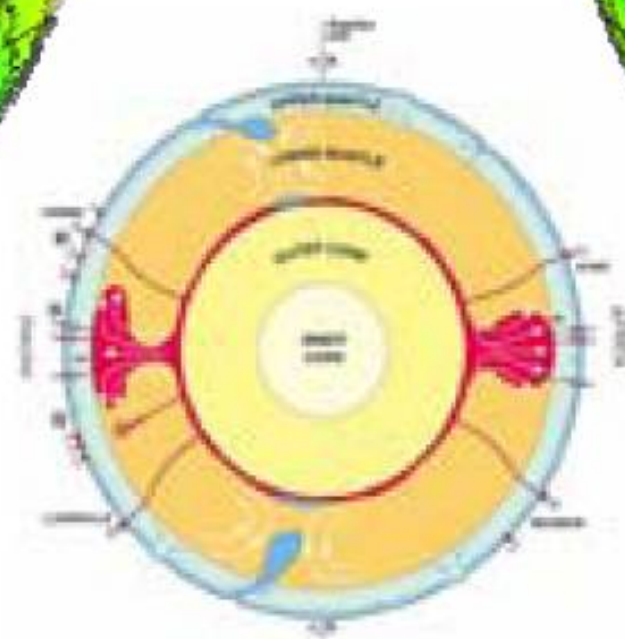
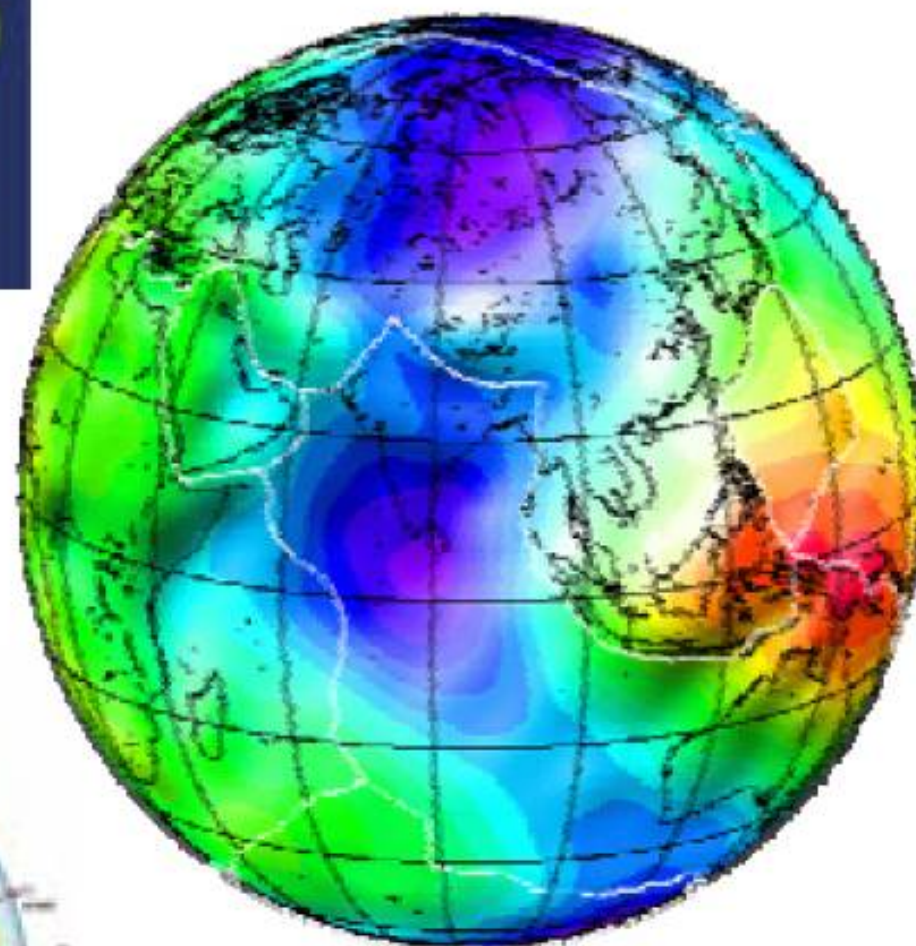


- * Ces résidus sont associés à la convection dans l'asthénosphère.
- * Les variations de masse volumique à une même profondeur s'expliquent par une variation de température (α est le coef. d'expansion thermique): $\rho_m = \rho_0(1 - \alpha \cdot \Delta T)$
- * La bonne corrélation entre les anomalies résiduelles de très grande étendue et les traces en surface de la tectonique des plaques appuyent cette hypothèse.

Géoïde



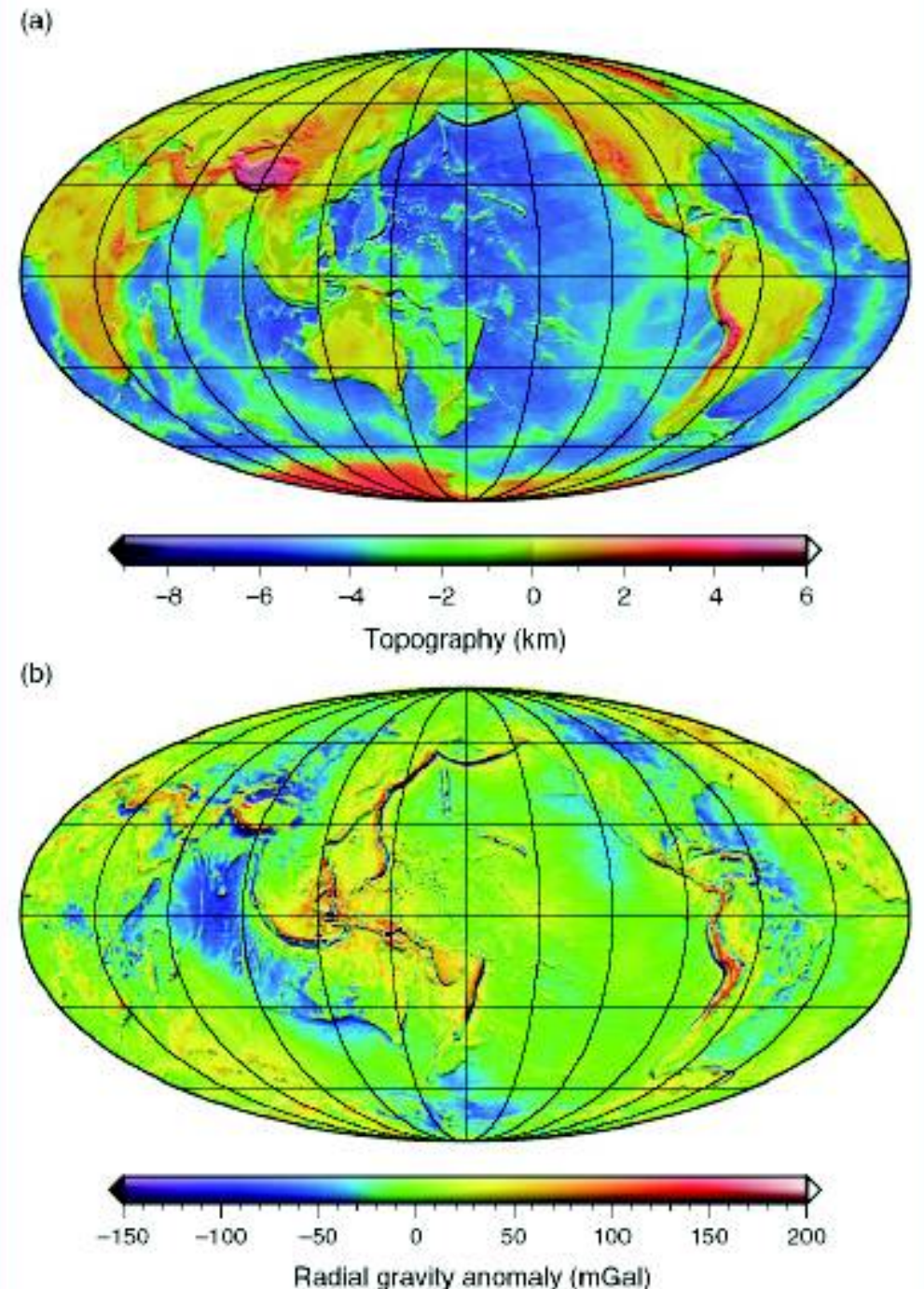
Sismique



*Confirmation éclatante des courants
de convection mantellique*

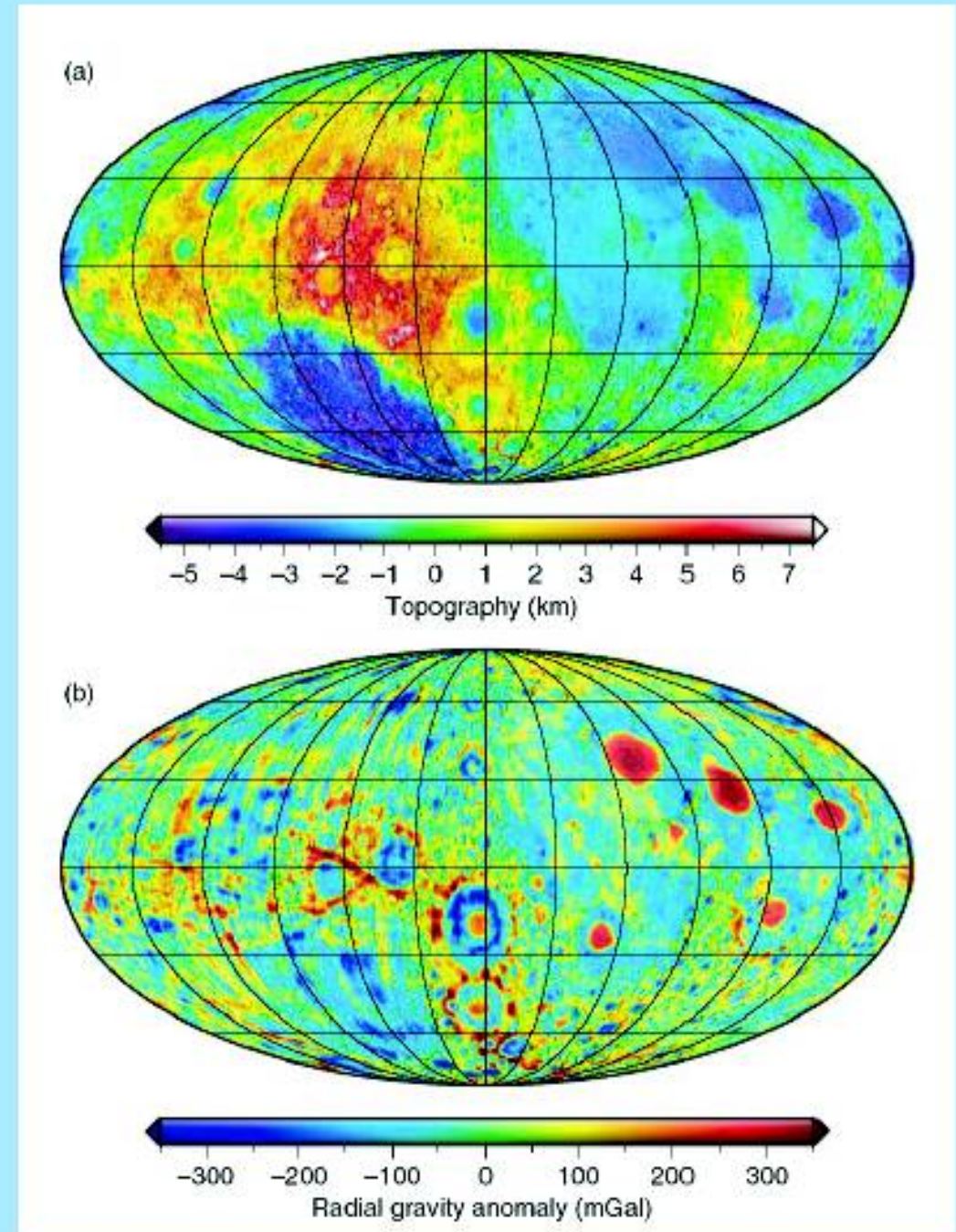
Topography and free-air anomalies

- Regional topography is compensated at depth, but not local topography.
- Subduction zones are associated with strong negative gravity anomalies.
- Cordillera along subduction zones are also visible, but as gravity high.



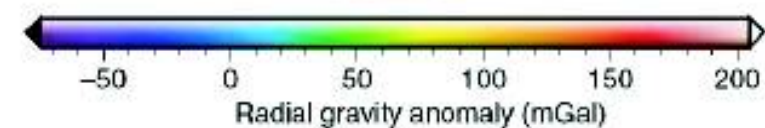
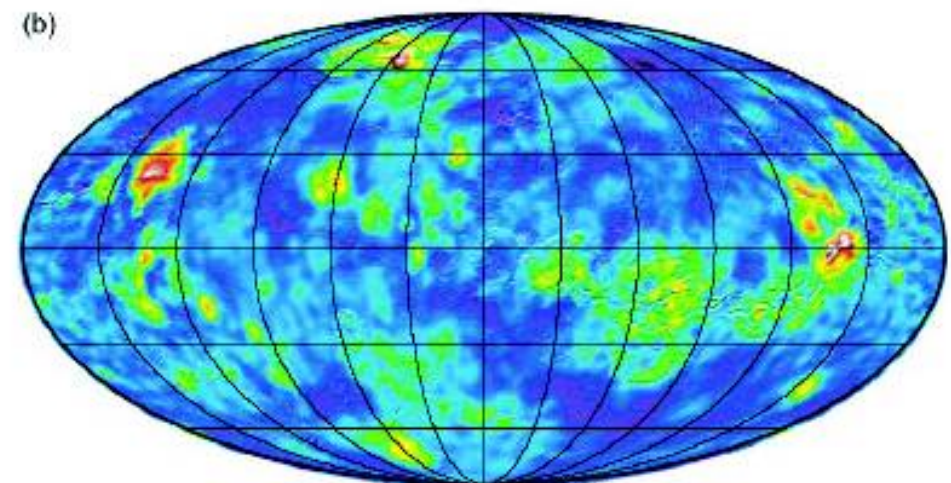
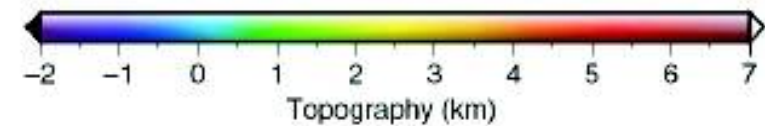
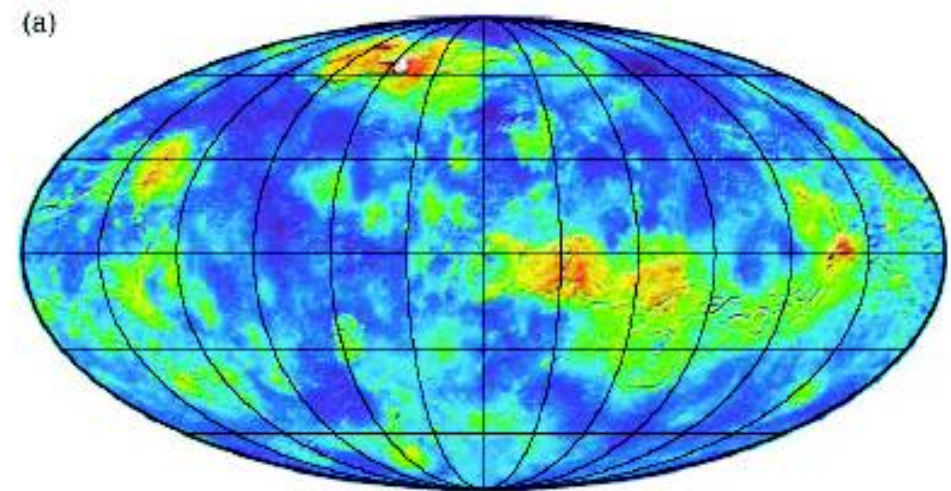
Moon: Topography & gravity anomalies

- Most of Highlands seem to be isostatically compensated ...
- ...but large positive gravity anomalies above nearside impact basins, and large negative anomalies surrounding some other impact basins ...
- Gravity highs (in basins) might be linked to mantle uplift and basalt flood after impact, and gravity lows to lithospheric flexure at the same time (*not certain, however, given uncertainties in the data*).



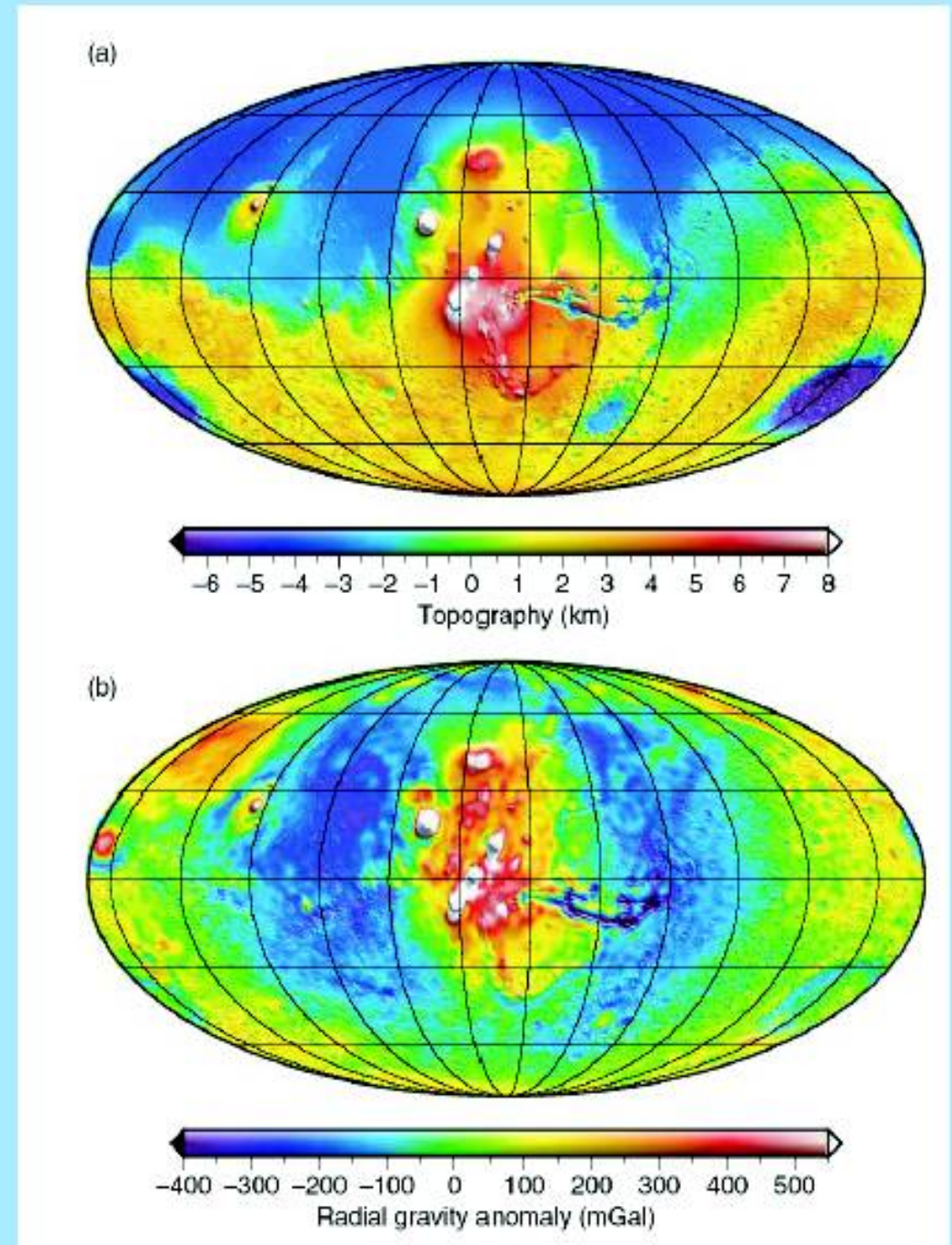
Venus: Topography & gravity anomalies

- Highlands: Isthmar Terra to the north, Aphrodite Terra along the equator, and Beta regio.
- Gravity highs over Beta regio, Isthmar, and east of Aphrodite.
- Regional topography is not fully compensated (free-air anomalies correlate with topography), indicating dynamic support from mantle (dynamic topography).

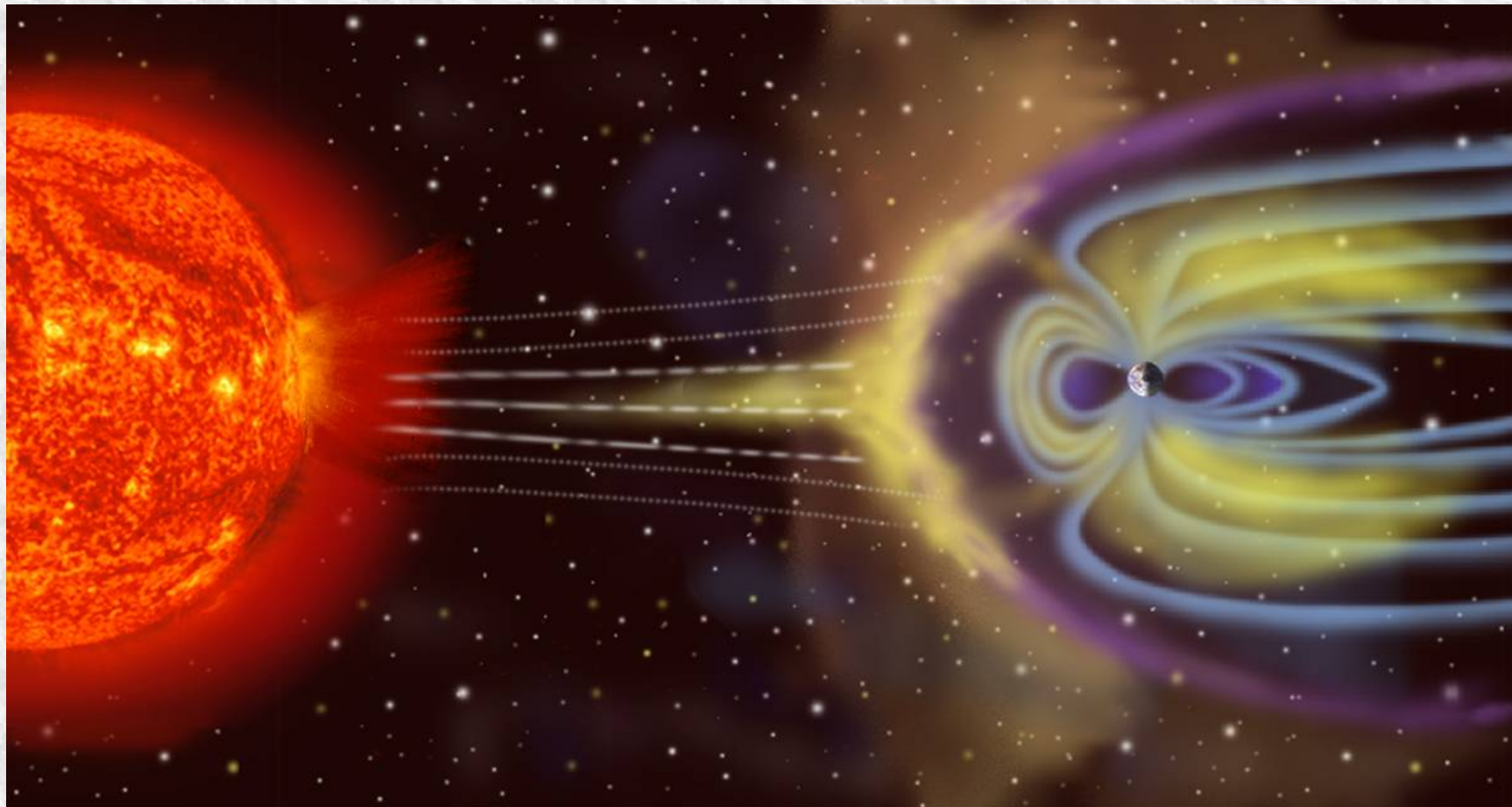
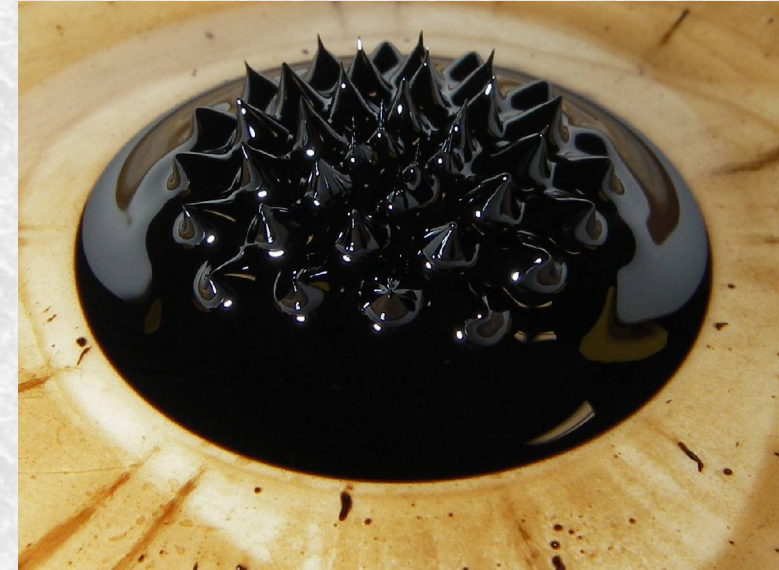


Mars: Topography & gravity anomalies

- North/South dichotomy (low plains in the north, highlands in the south).
- Tharsis volcanic rise.
- Regional topography is only partially compensated at depth (Tharsis appears as high positive gravity anomalies). As for Venus, dynamic topography may dominate + thick lithosphere (elastic support)



2-MAGNETISME

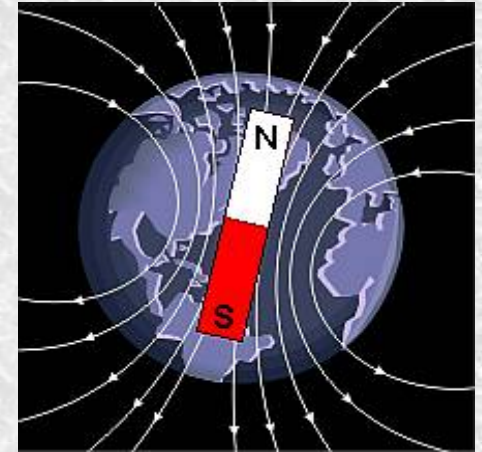


L'unité du champ magnétique terrestre : le Tesla (T)

A la surface de la Terre, le champ magnétique terrestre varie de $25 \mu\text{T}$ à $60 \mu\text{T}$.

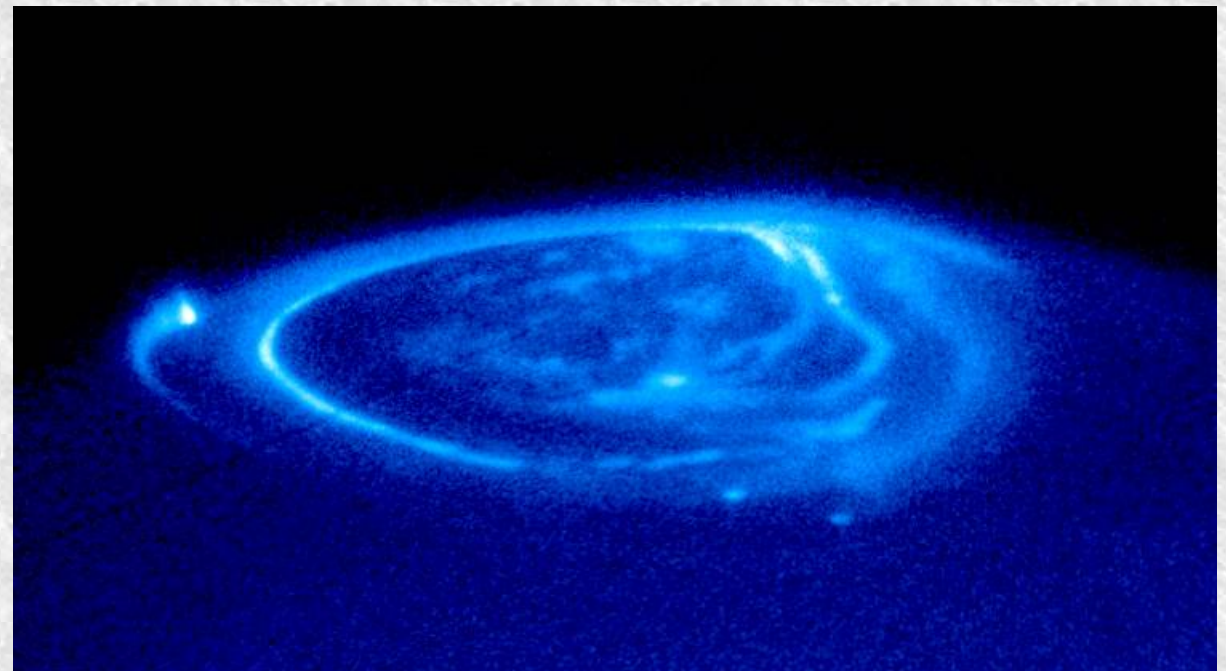
Le champ magnétique moyen en France vaut :

$$H = 45 \mu\text{T} \quad D = -6^\circ \quad I = +64^\circ$$



Et sur les autres planètes du système solaire:

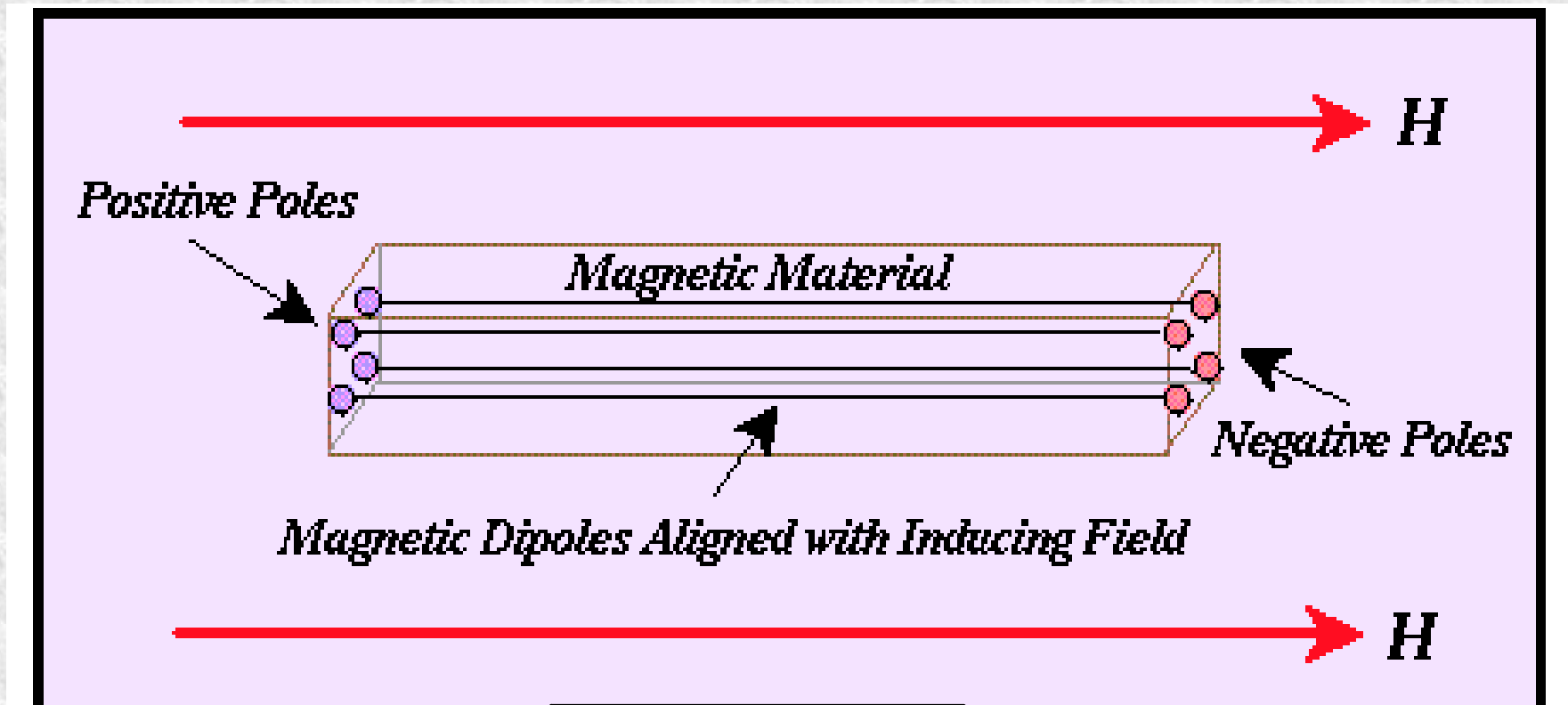
	Intensité relative Du champ /Terre
Mercure	0,01
Vénus	0
Mars	0,0012
Jupiter	17000
Saturne	500
Uranus	50
Neptune	30



Aurore au pôle de Jupiter, supposée liées aux mouvements de l'hydrogène métallique du noyau

L'Induction magnétique

L'Aimantation magnétique (J) est un champ induit par le champ externe H .



$$J = \chi H$$

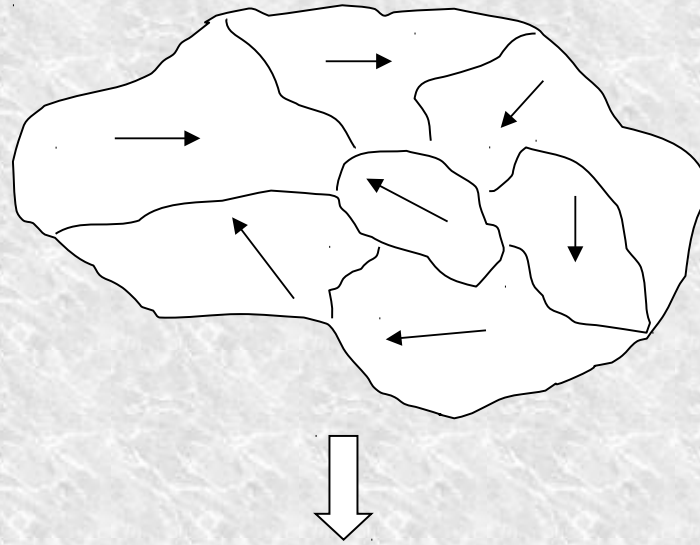
la **susceptibilité magnétique, χ** :

- est sans dimension,
- dépend des propriétés physique du matériau considéré,
- peut être positive ou négative (signé opposé de I et H),
- c'est sa distribution spatiale qui est recherchée en prospection magnétique.

Le magnétisme des roches


A - Dans une roche les minéraux magnétiques se répartissent suivant une matrice de grains magnétiques.

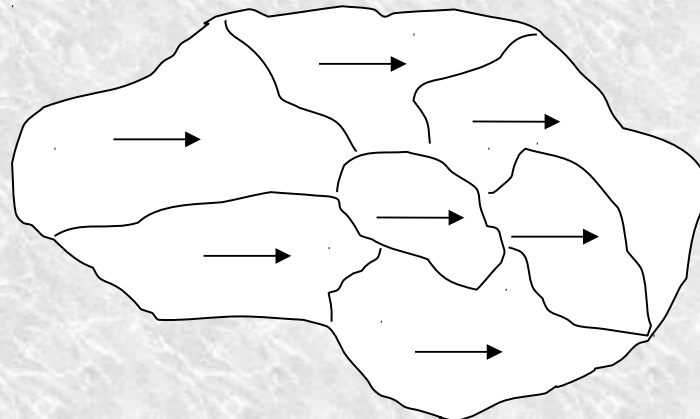
$$\vec{H} = \vec{0}$$



$$\vec{J} \approx 0$$

B- Sous l'effet d'un champ extérieur ces grains s'orientent collectivement pour donner naissance à l'aimantation de la roche.

$$\vec{H} \neq \vec{0}$$




$$\vec{J} \approx \chi \cdot \vec{H}$$

L'aimantation dépend de la présence de minéraux magnétiques:

Diamagnétisme : Découvert par M.Faraday (1846); causé par les électrons en orbite externe en présence d'un champ magnétique externe. Aimantation très faible. L'eau, l'air, la silice, la calcite. Elle disparaît lorsque le champ est interrompu (**absence de rémanence**).

$$\vec{J} \sim \chi_{dia} \cdot \vec{H} \quad \chi_{dia} < 0$$

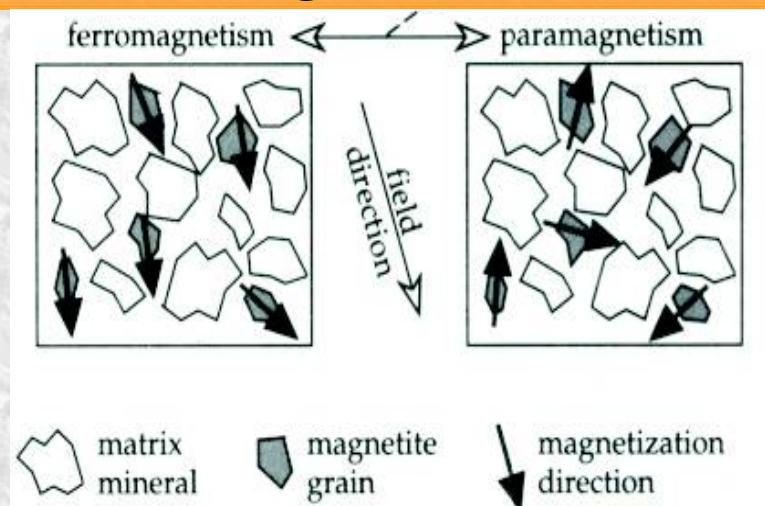
Paramagnétisme : Ce magnétisme existe dans un corps dont les atomes ont un **nombre impair** d'électrons en orbite externe. **Leur spin** s'aligne dans la direction du champ externe.

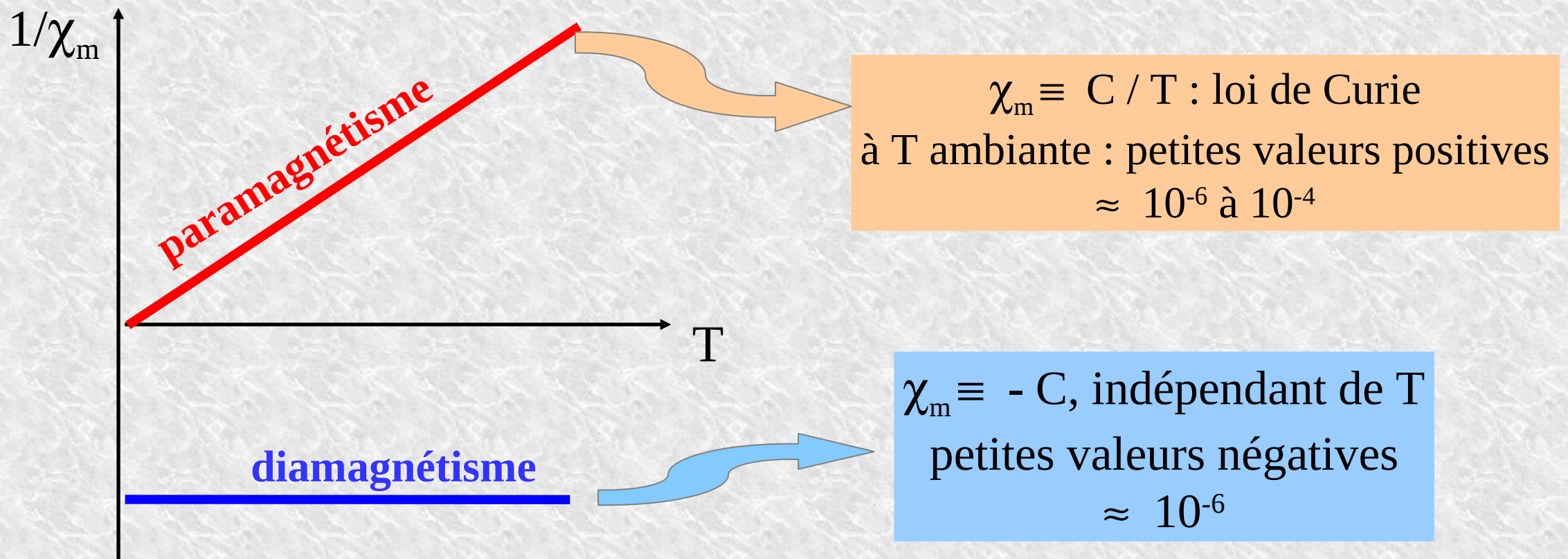
- Il n'est observable qu'à basses températures (il disparaît à la **température de Curie**).
- **Pas de rémanence** (calcium, oxydes de Nickel).

$$\vec{J} \sim \chi_{para} \cdot \vec{H} \quad \chi_{para} > 0$$

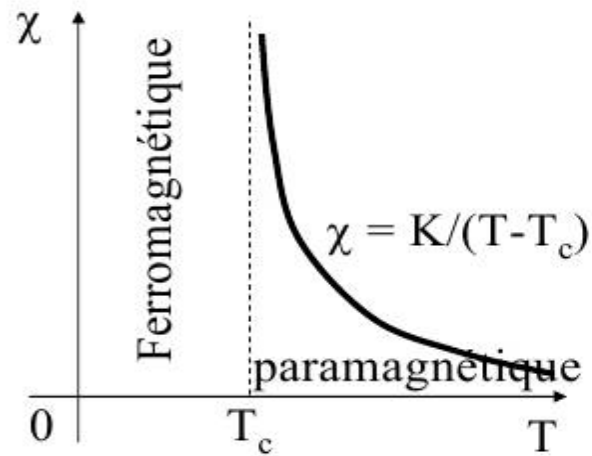
Ferromagnétisme : Cas particulier du paramagnétisme, avec un **alignement quasiment parfait des spins électroniques** avec le champ inducteur externe.

- L'aimantation du corps est forte et se caractérise par un **phénomène de rémanence**.
- Ces corps ont donc la capacité d'enregistrer l'**histoire magnétique**.





La température de Curie



Il existe une température critique (T_c) à laquelle la matière ferromagnétique ($\chi \approx 10^3$) devient paramagnétique ($\chi \approx 10^{-3}$).

Expérience du clou

corps	Fe	Co	Ni	Magnétite Fe_3O_4	Hématite Fe_2O_3	Awaruite Ni_3Fe
T_c (°C)	770	1131	558	580	680	620

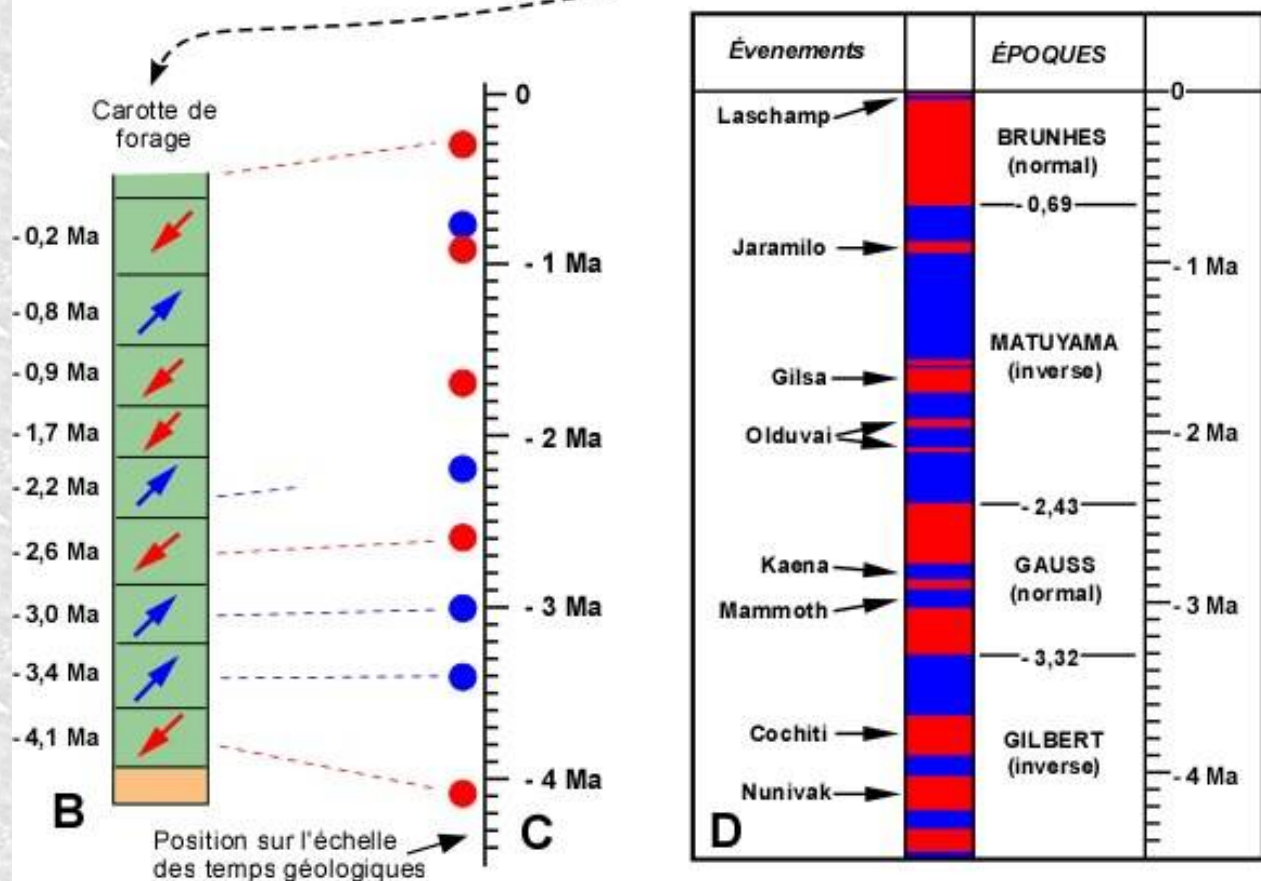
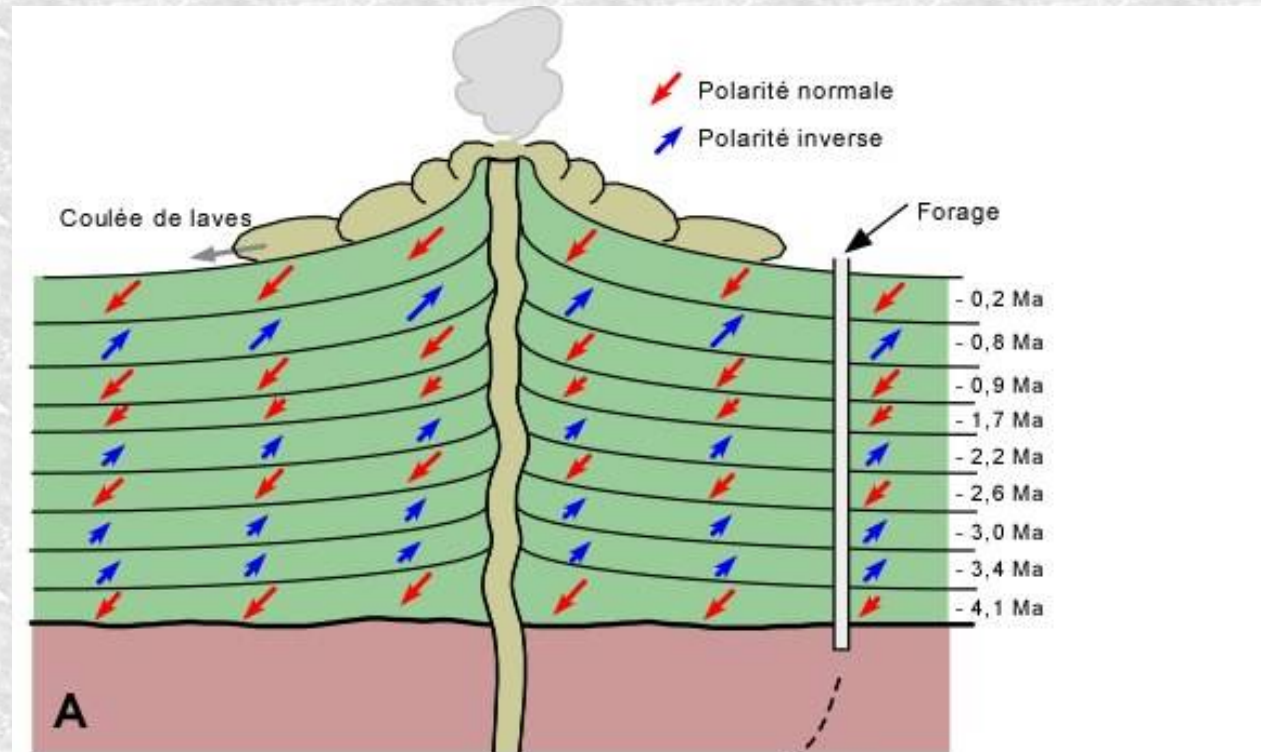
L' Aimantation Thermo-rémanente (ATR)

Si une roche volcanique chaude acquiert une aimantation, puis se refroidit sous sa température de Curie, alors si elle contient des susceptibilités suffisamment élevées, une partie de l'aimantation induite subie est conservée: c'est **l'Aimantation Rémanente**.

L'aimantation thermo-rémanente est observée généralement dans les roches volcaniques et métamorphiques.

En refroidissant, une coulée de lave enregistre et fossilise la direction et l'intensité du champ magnétique existant au moment où sa température passe au-dessous de la température de Curie.

Ainsi, des coulées de lave successives donneront une image du C.M.T en direction et en intensité. Mais, cette Image est discontinue du fait du caractère aléatoire des éruptions.



Variation des mesures du champ magnétique dans le temps

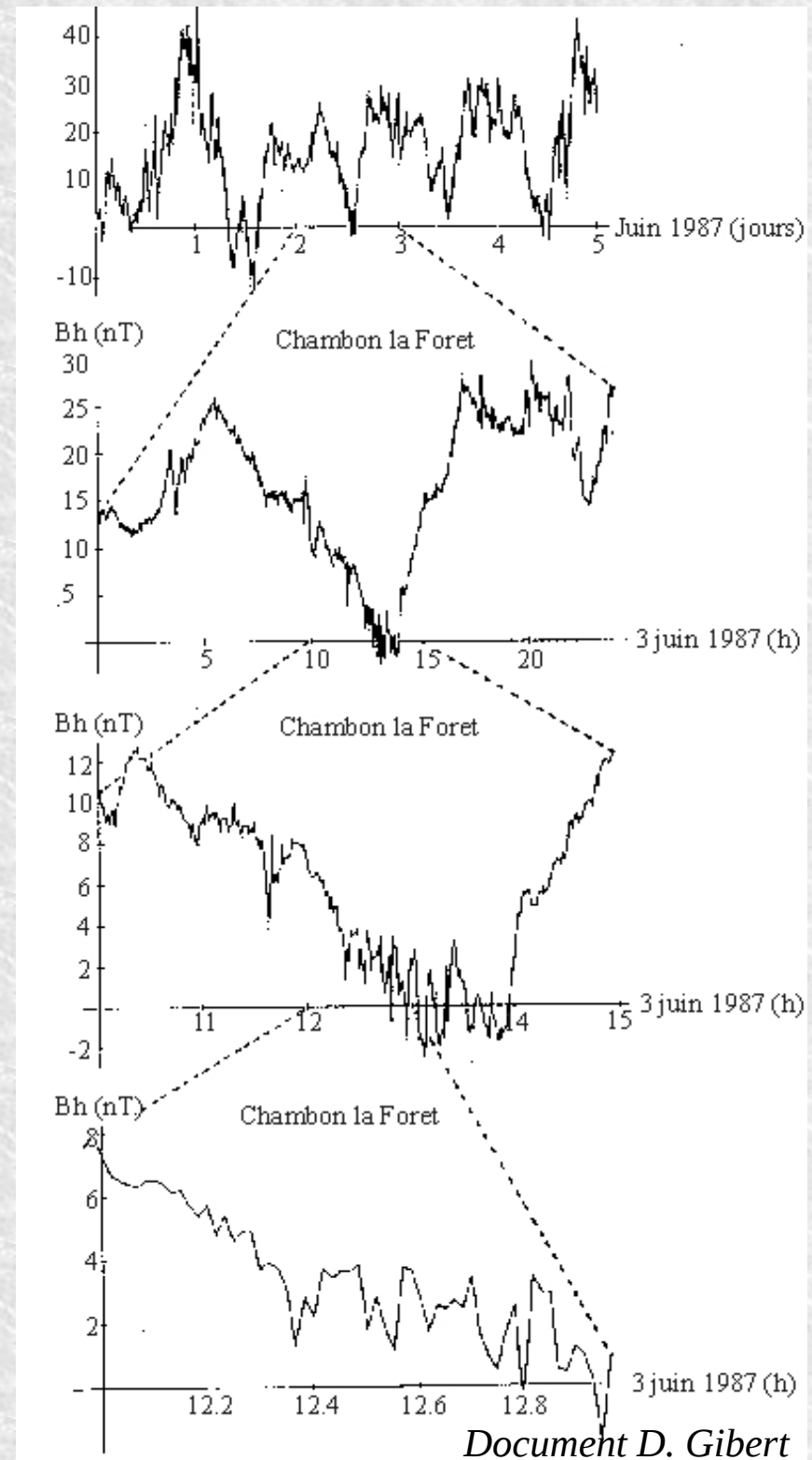
Les fluctuations d'origine externe (solaire).

- Fluctuations journalières, mensuelles, annuelles, de l'ordre de 20-30nT/jour.
- Les orages magnétiques peuvent avoir une amplitude de 1000nT: ne pas explorer ces jours là!

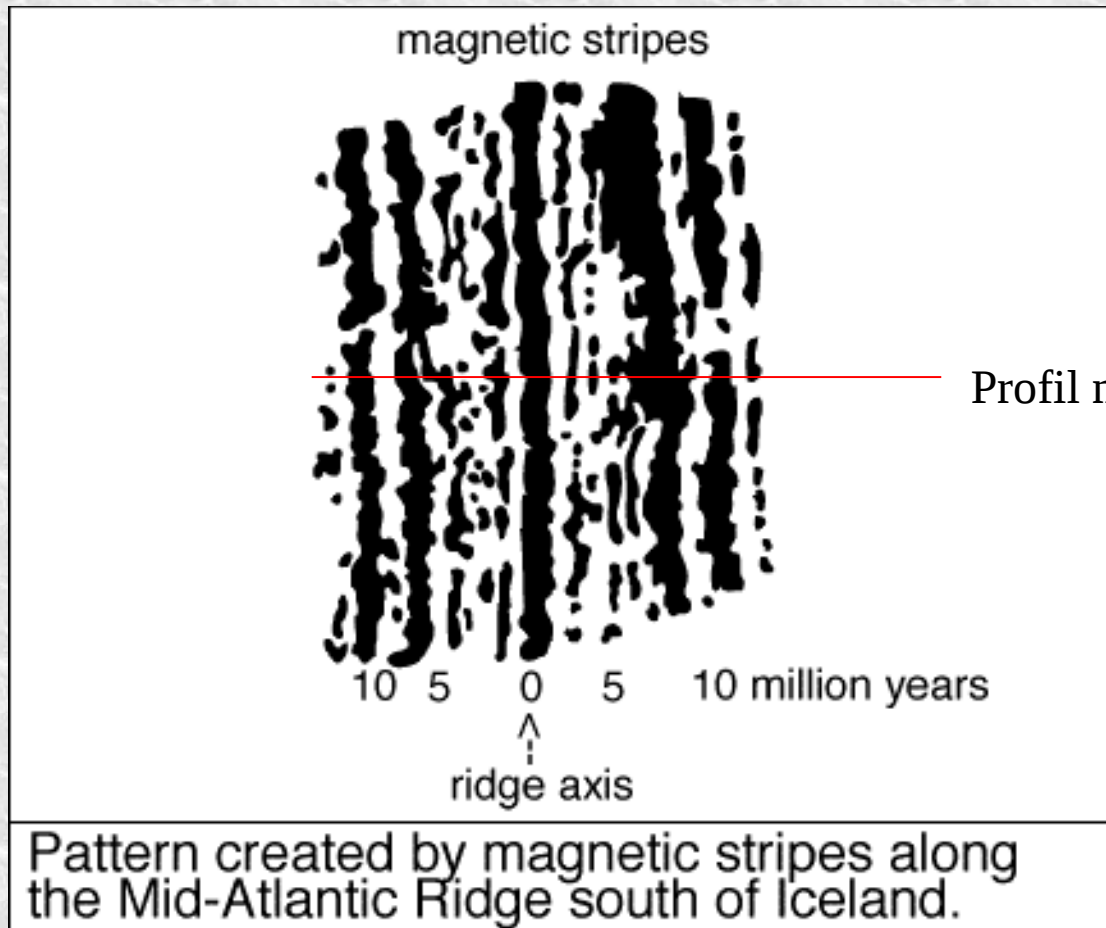
Les fluctuations d'origine interne.

- * Variations **séculaires** (100 ans et un peu +), elles ont lieu lentement.
- * Les excursions géomagnétiques (durée du phénomène $\approx 4\ 000$ ans).
- * Les inversions géomagnétiques (durée du phénomène $\sim 10\ 000$ ans)

L'observation à Chambon la Forêt



La cartographie des fonds marins révèle des anomalies magnétiques symétriques

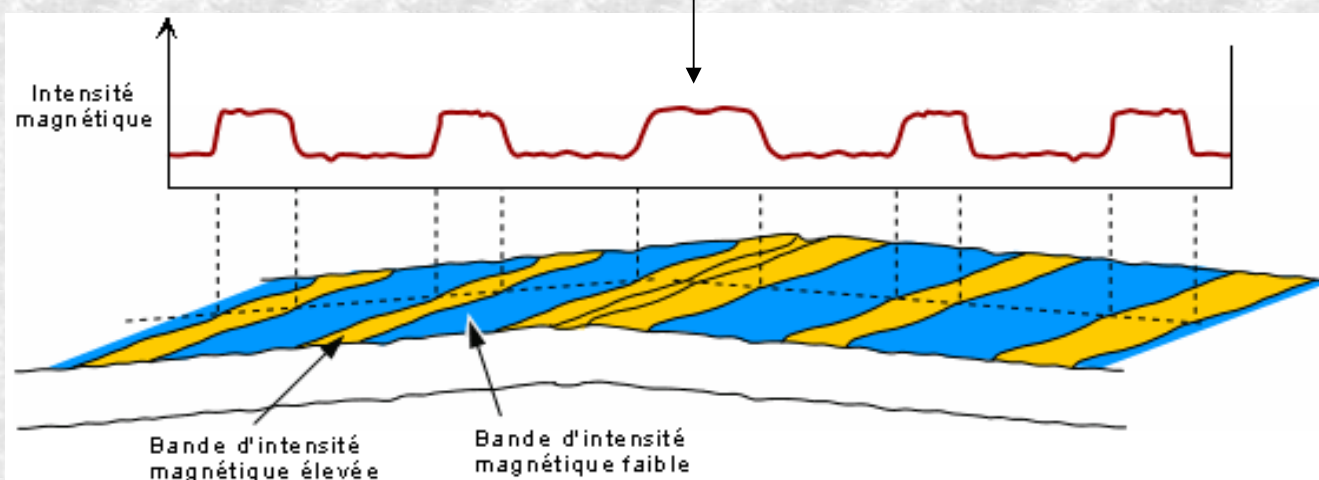


Axe de symétrie = dorsale médio-océanique.

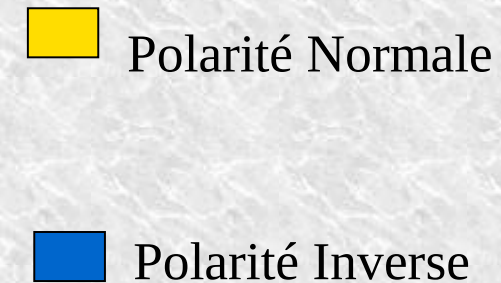
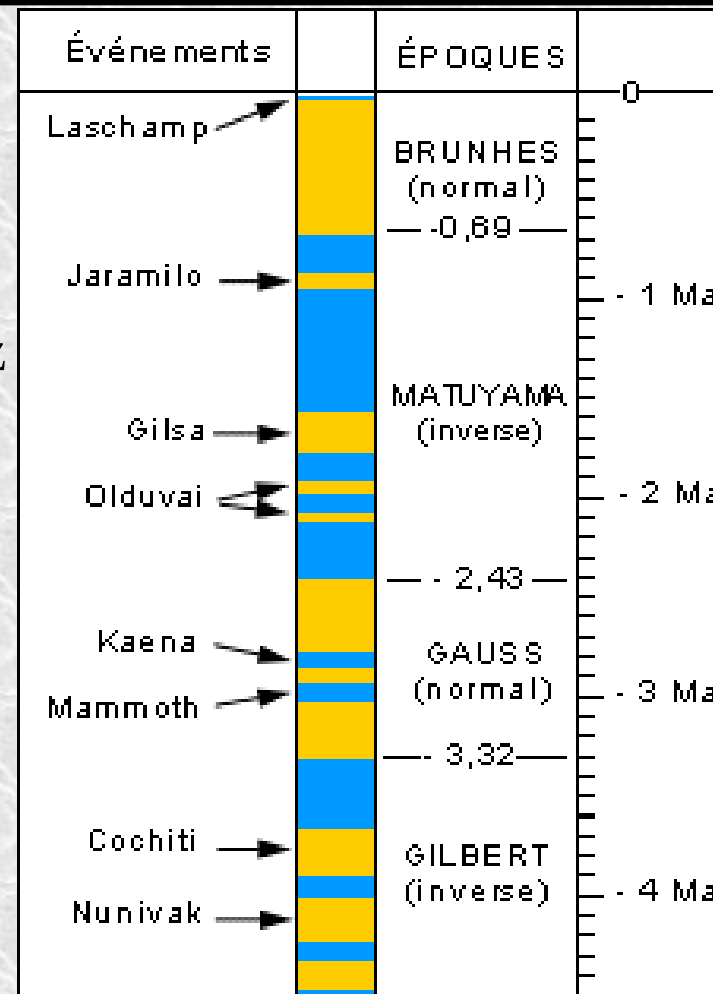
Profil magnétique

Grâce à l'analyse des anomalies magnétiques du plancher océanique et à la datation des séquences d'inversion sur la terre, les paléomagnéticiens ont mis au point une échelle de temps de la polarité géomagnétique. L'intervalle de temps entre deux inversions est nommé **intervalle de polarité**.

Le dernier renversement a eu lieu il y a **780 000 ans**. Ces basculements des pôles nécessitent plusieurs milliers d'années, au cours desquels les pôles se déplacent lentement tandis que la magnétosphère s'amenuise.

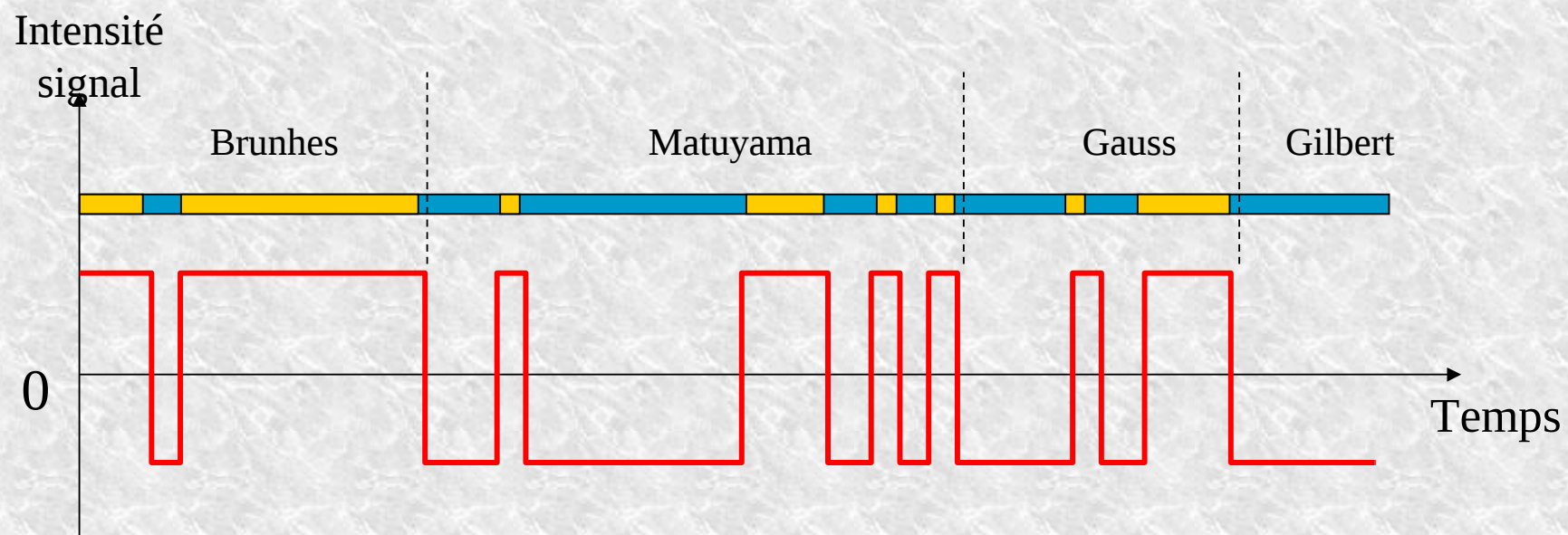


*PALEOMAGNETISME: La succession des inversions géomagnétiques permet de tracer une **Échelle magnétostratigraphique***



Le nombre d'inversions est assez élevé dans la période récente : 4 à 5 Inversions par million d'années (on parle de CHRON). Le rythme n'est pas régulier.

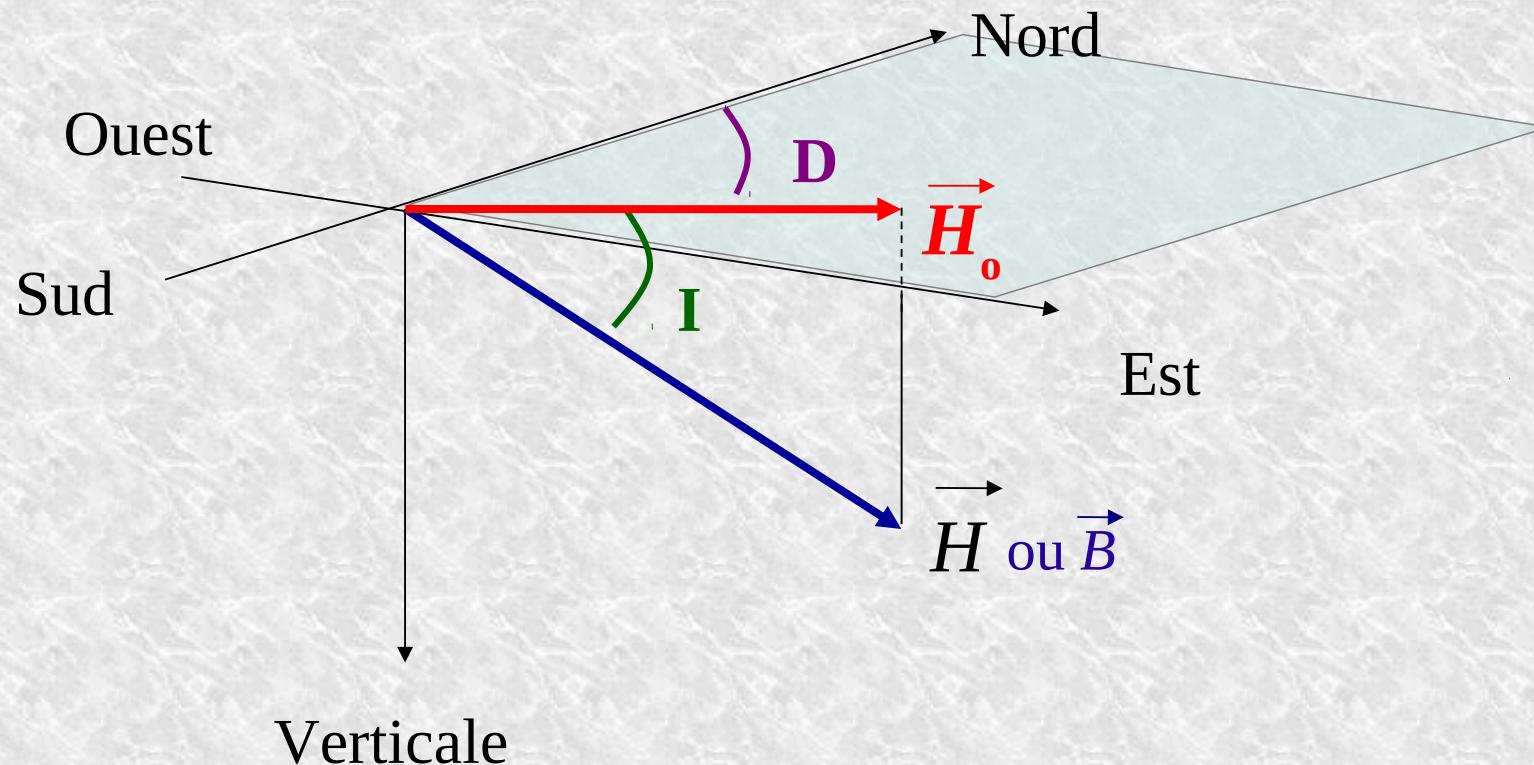
Cette échelle peut se traduire en un signal :



Inclinaison et Déclinaison du champ H

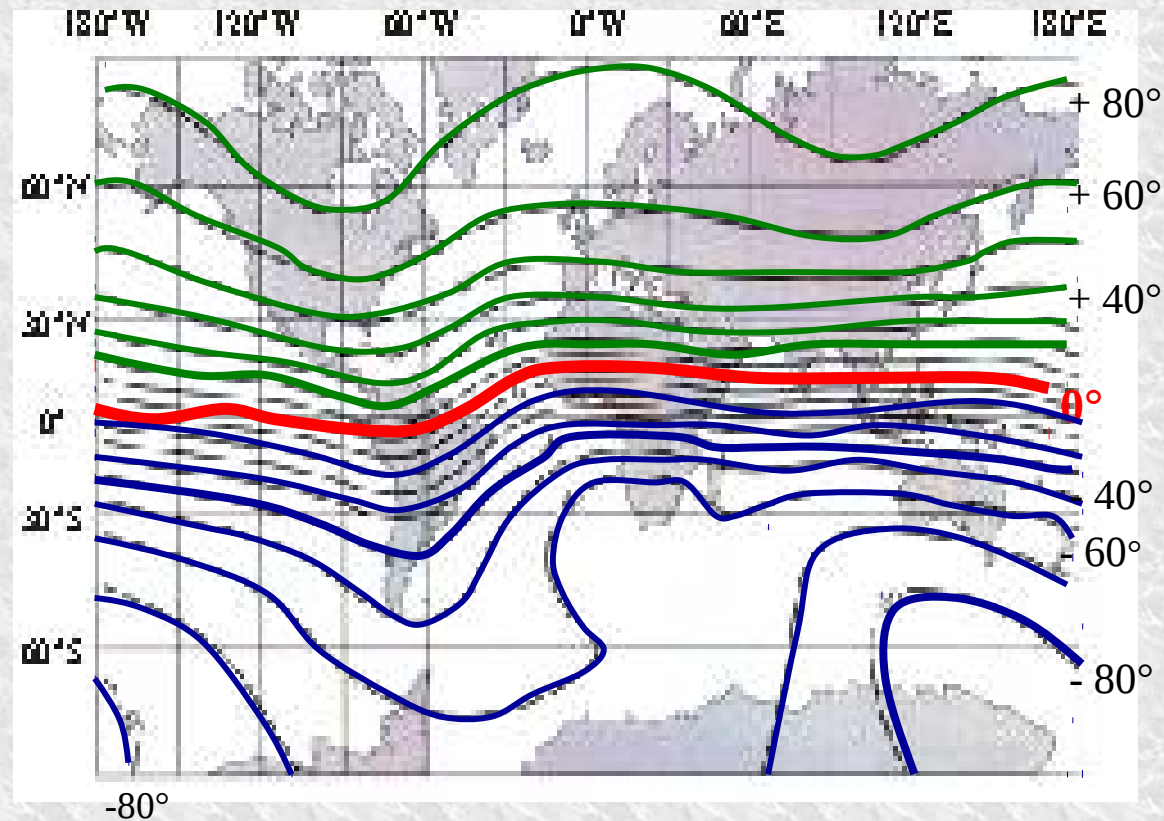
Le champ magnétique est un vecteur, noté généralement \vec{H}

Dans un espace à 3 dimensions, ce vecteur peut être représenté par 3 paramètres : l'Inclinaison (I), la Déclinaison (D), l'Intensité (H).



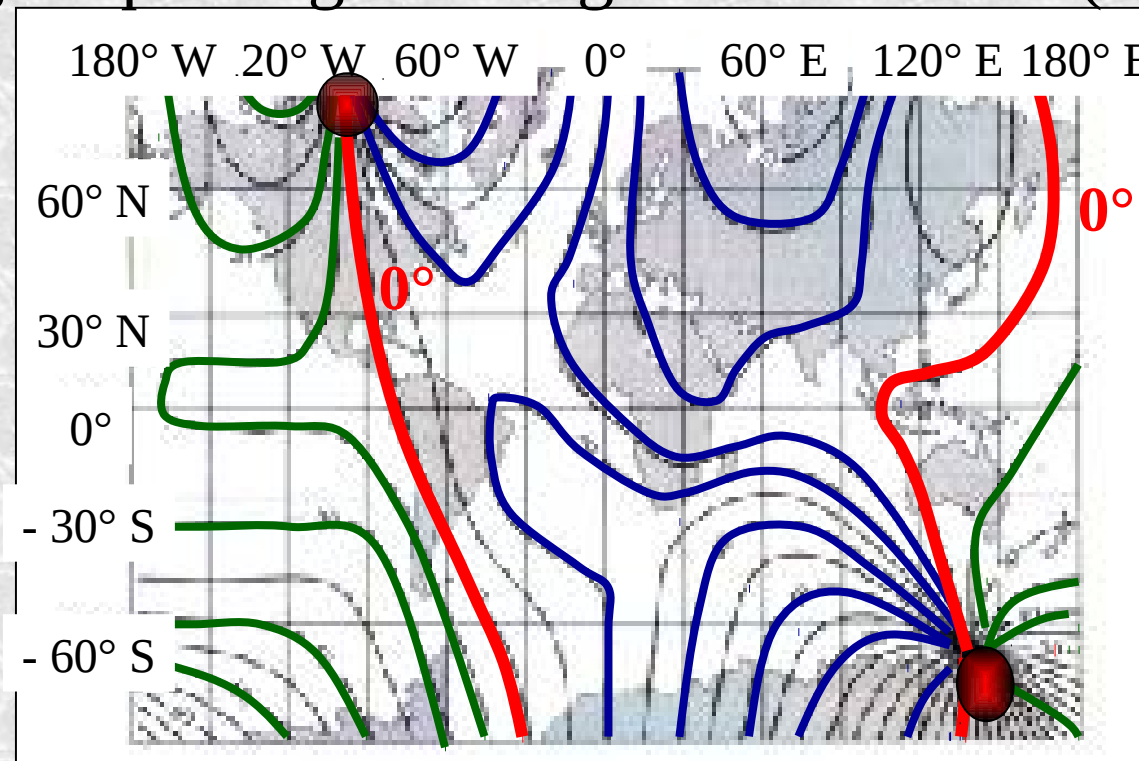
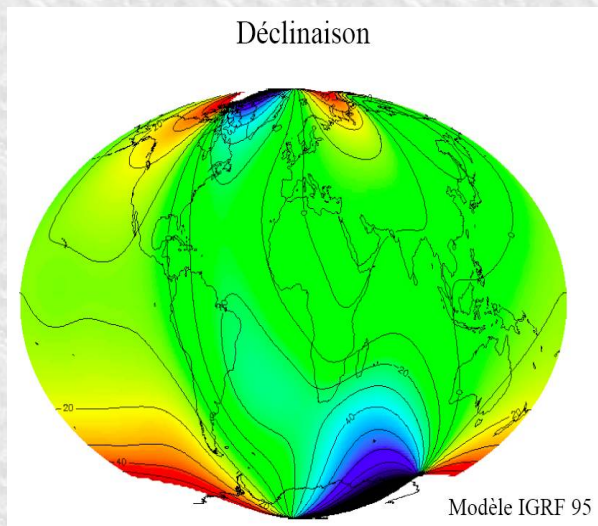
- I : angle que fait le C. M. avec le plan horizontal.
- D : angle que fait la composante horizontale de H avec le Nord géographique

Carte isocline : lignes d'égal inclinaison (I) du C. M. T



L'inclinaison magnétique présente globalement une symétrie par rapport à l'équateur

Carte isogonique : lignes d'égal déclinaison (D) du C. M. T



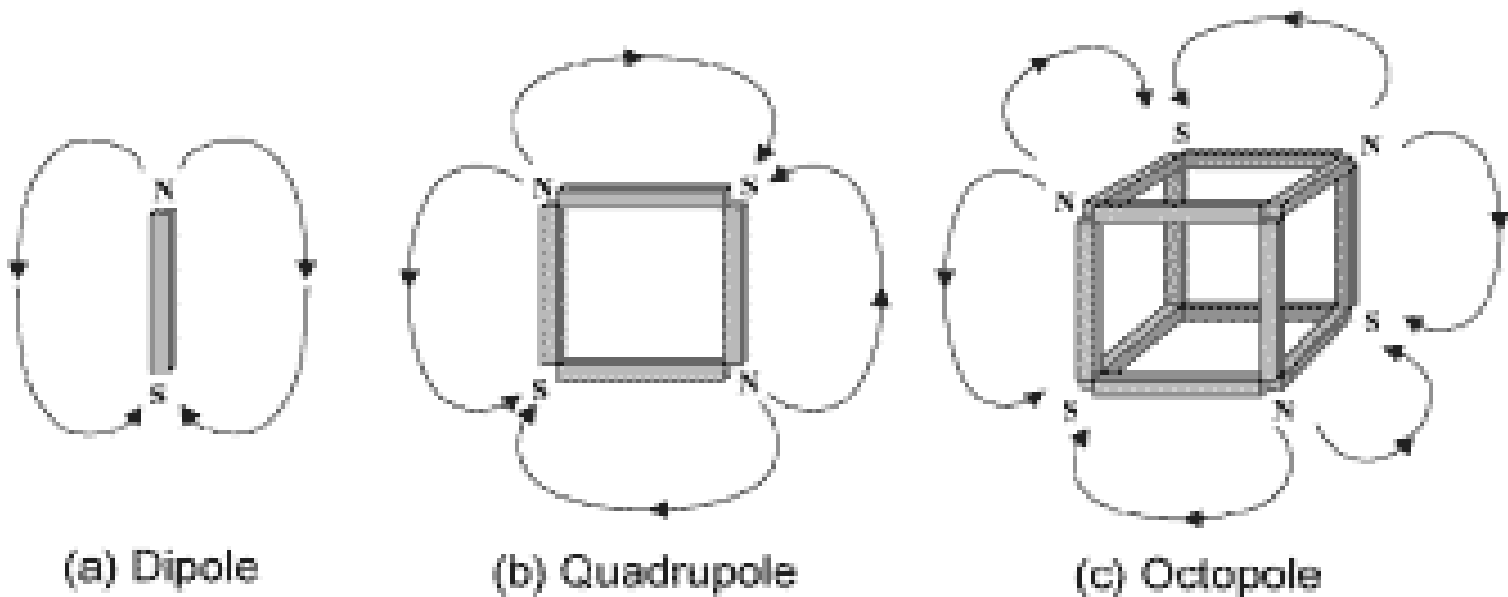
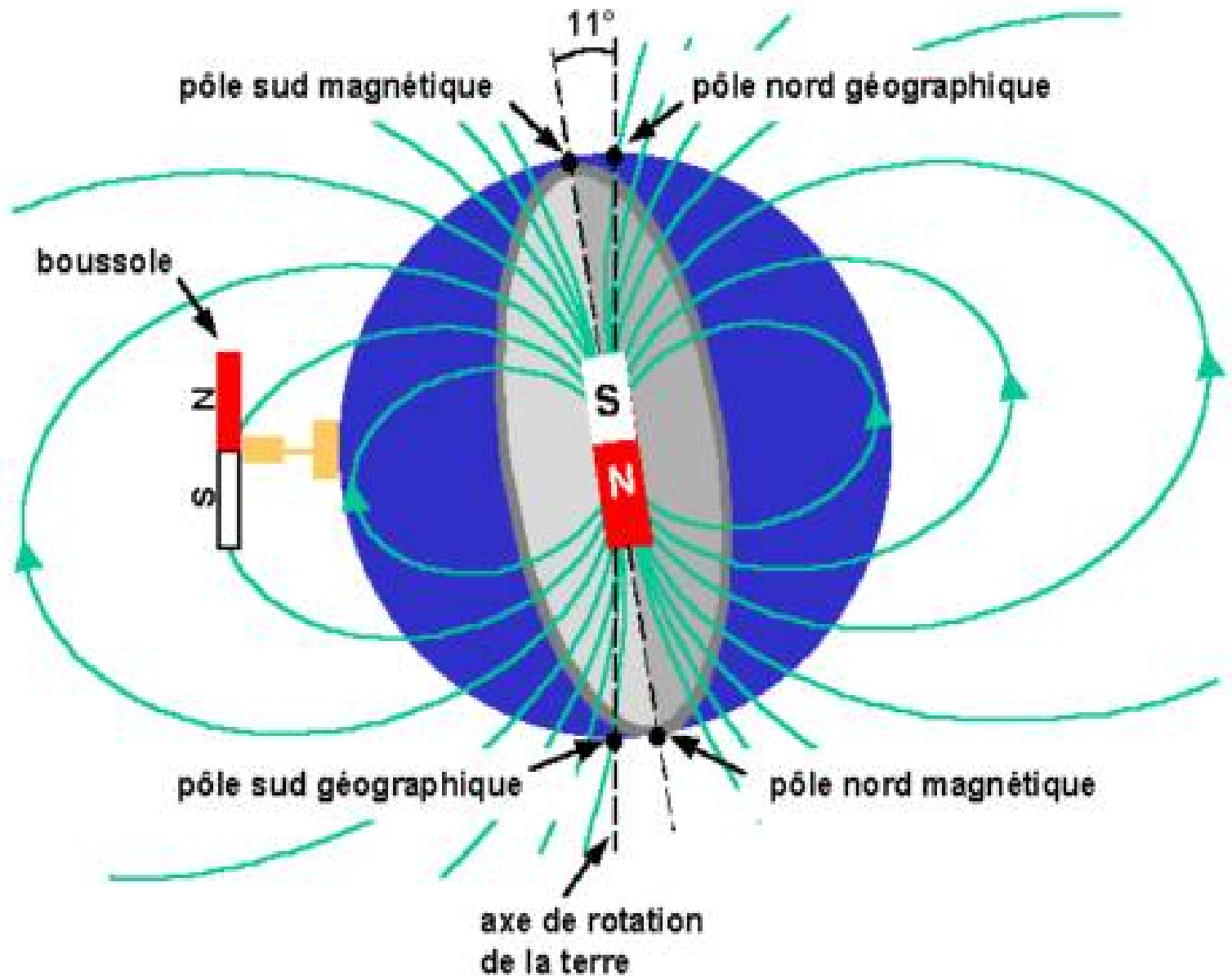
La déclinaison magnétique présente une certaine symétrie Nord / Sud

Champ Dipolaire et Champ Non-Dipolaire

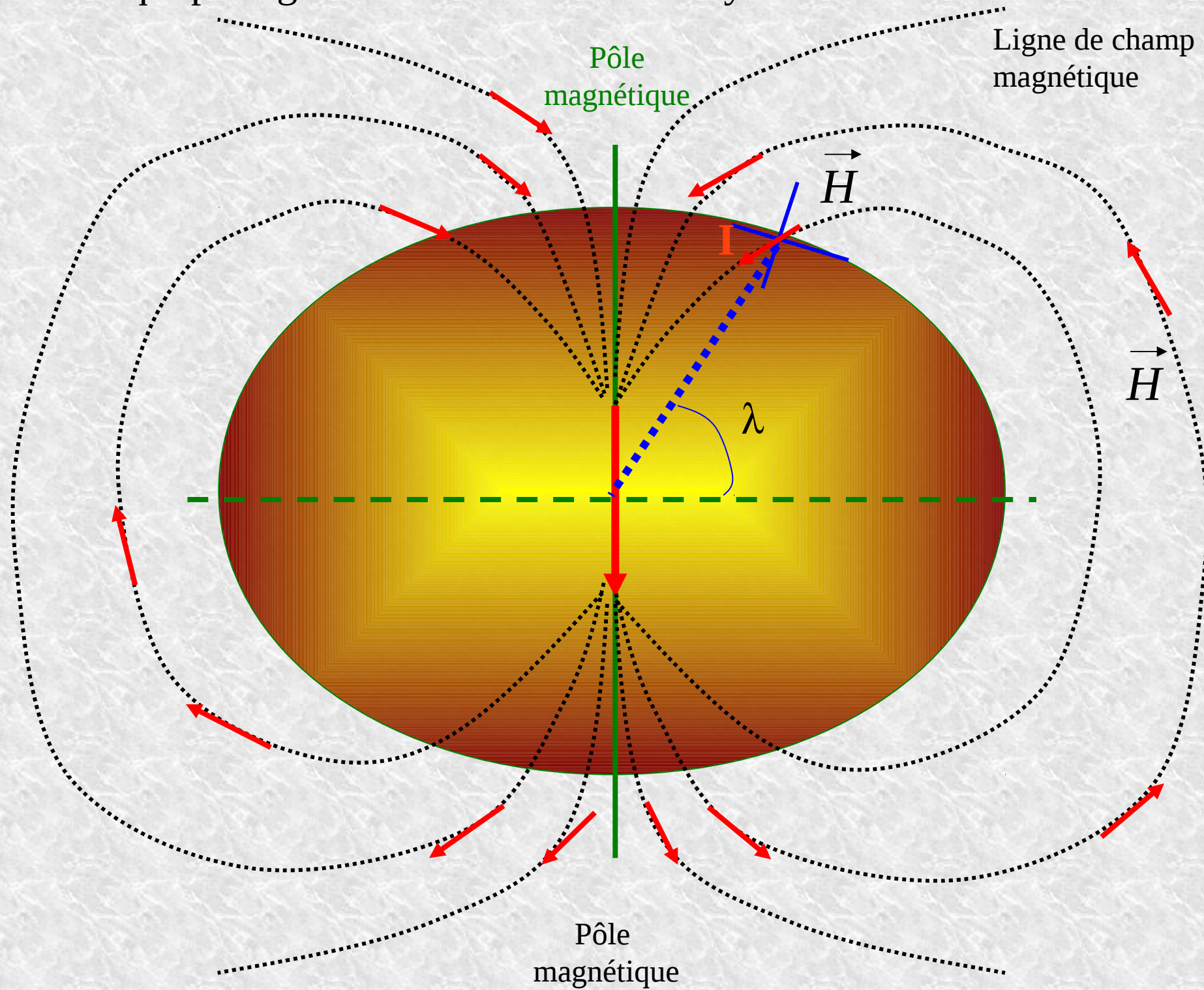
En première approximation, le Champ Magnétique de la Terre est un **dipôle géocentré**.

Pour être plus précis, environ 90% du C. M. T actuel peut être représenté par un dipôle. Les 10% restant forment ce que l'on appelle un **champ non-dipolaire**.

L'axe de ce dipôle est incliné de $11,9^\circ$ par rapport à l'axe des pôles géographiques.



Le dipôle crée autour de la Terre des *lignes de champ magnétique* qui protègent la Terre de certains rayonnements solaires.



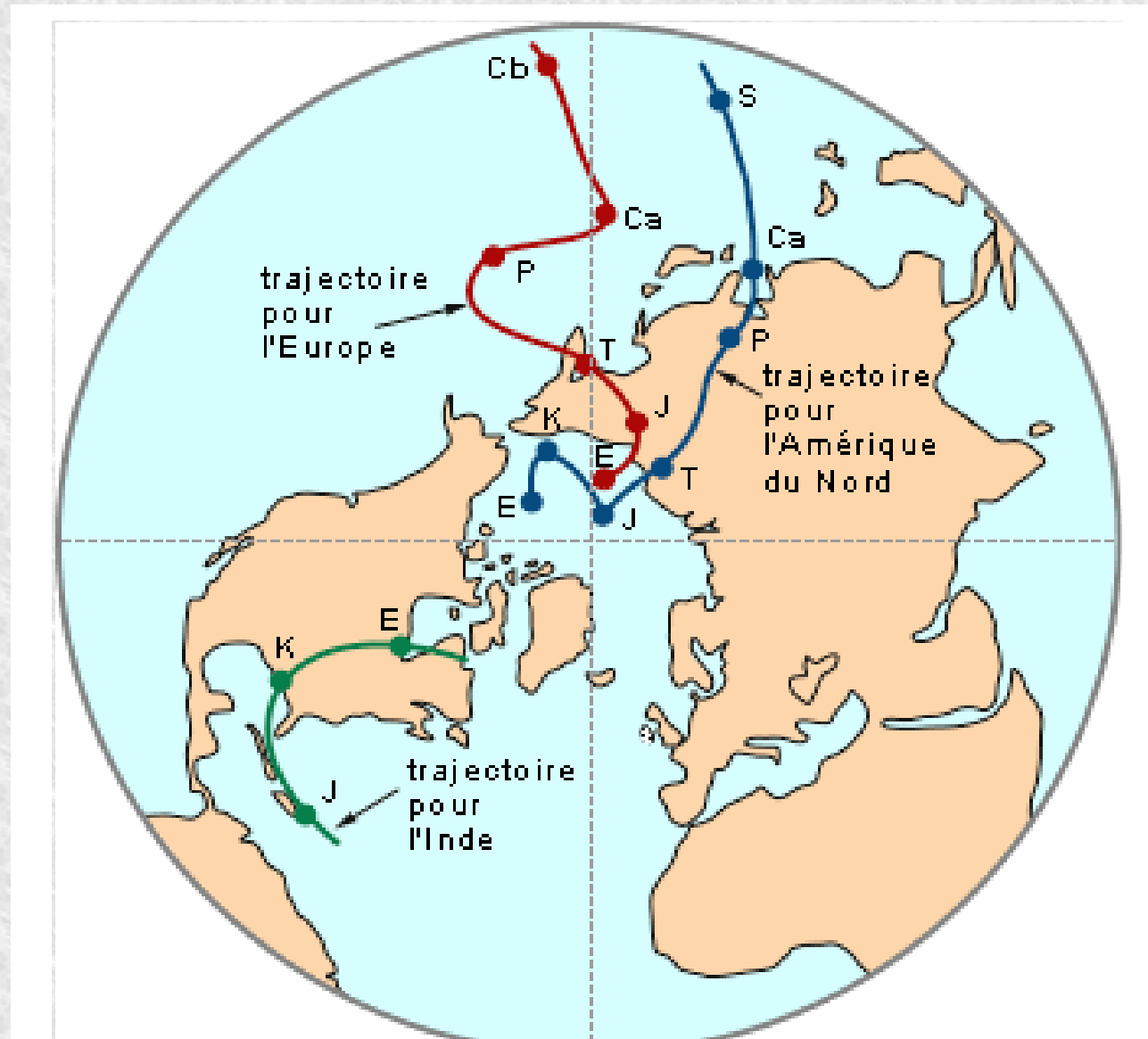
Grâce au caractère dipolaire, nous avons la relation :

I : inclinaison magnétique, λ : latitude du site d'observation

$$\text{tg} I = 2.\text{tg} \lambda$$

La relation $tgI=2tg\lambda$ permet de définir un **Pôle Géomagnétique Virtuel**

Trajectoire du P. G. V
pour l'Europe, l'Amérique et l'Inde.



E=Éocène (50 Ma); J=Jurassique (175 Ma); T=Trias (225 Ma); P=Permien (260 Ma); Ca=Carbonifère (320 Ma); S=Silurien (420 Ma); Cb=Cambrien (530 Ma).

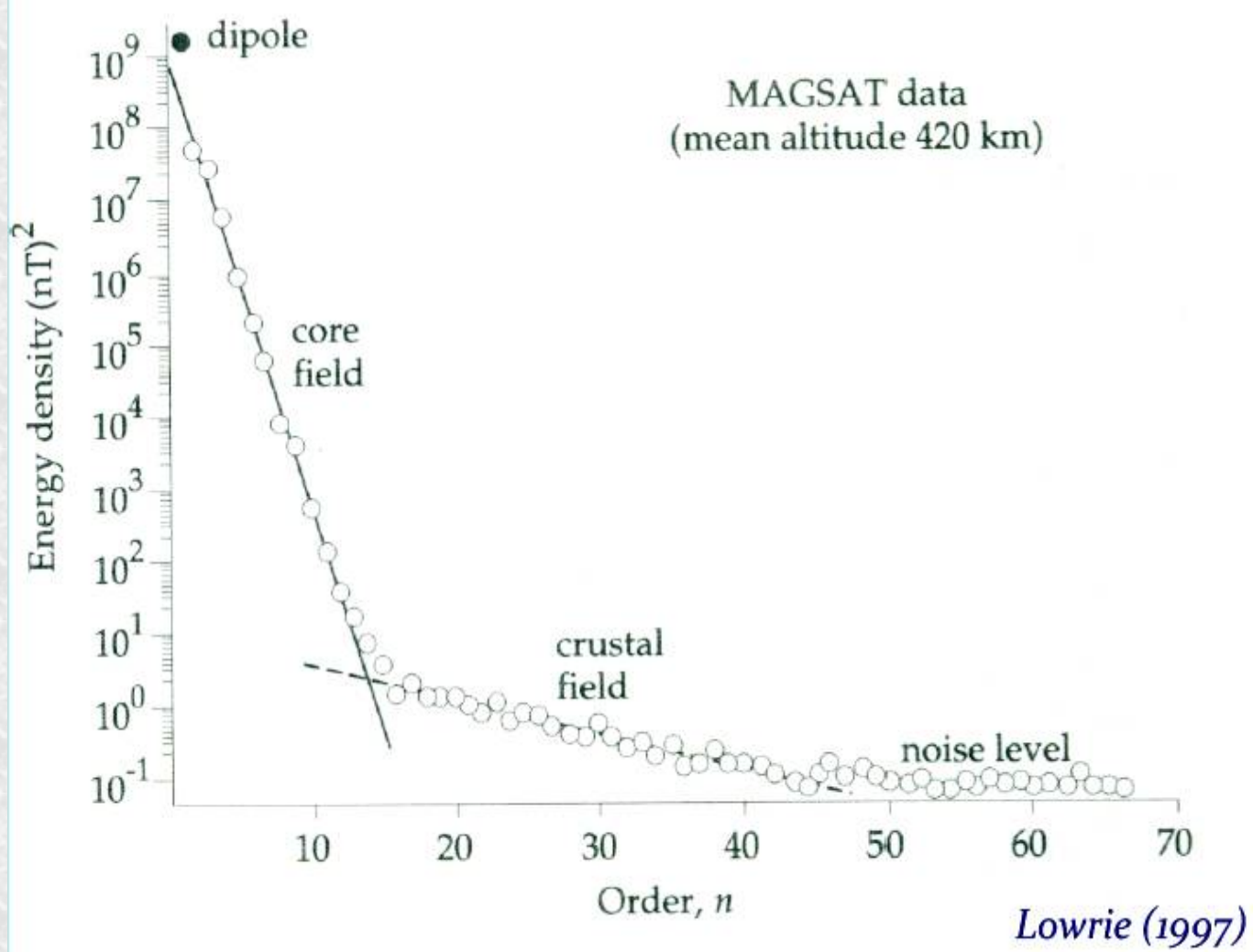
- The magnetic field derives from a pseudo-potential Ψ , which can be expanded in **spherical harmonics**. $n = 1$ correspond to a *dipole*, $n = 2$ to a *quadrupole*, etc.

$$\psi(r, \theta, \phi) = R \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n r^n + \frac{B_n}{r^{n+1}} \right) \sum_{l=0}^{\ell=n} Y_n^l(\theta, \varphi)$$

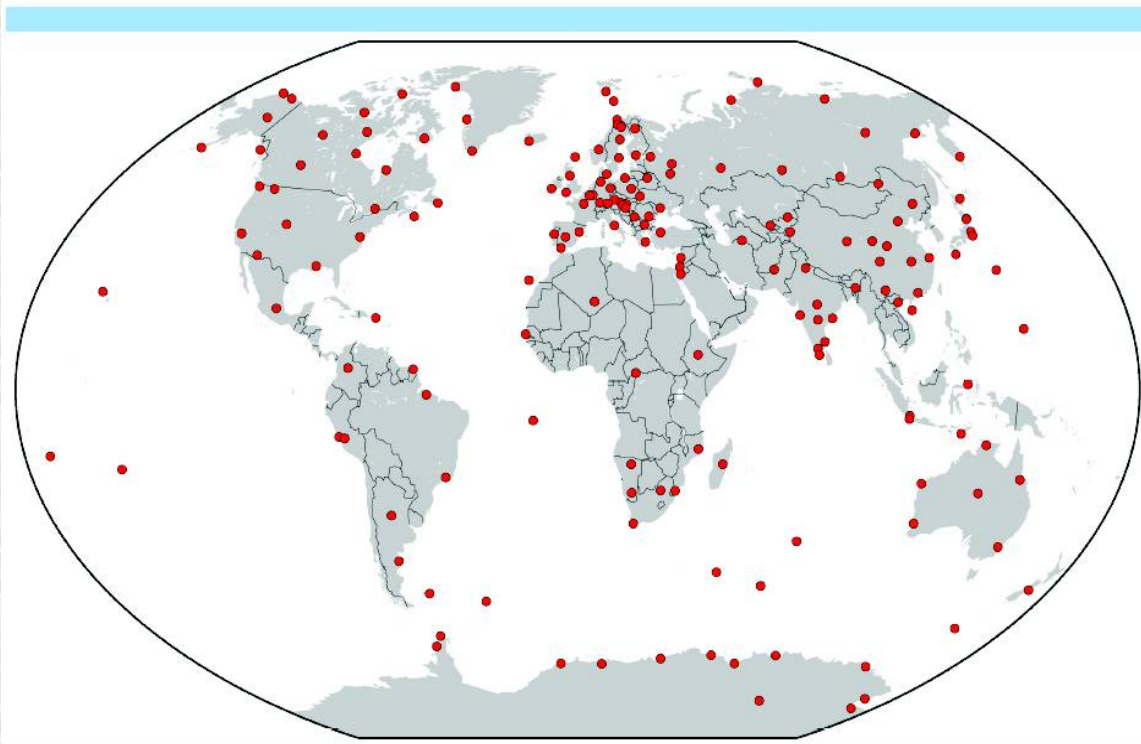
- *Gauss (1838)*: At Earth's surface external contributions are very small!
=> Internal origin!
- First order approximation: ~ Dipole field
- Magnetic field ~ aligned with rotation axis.



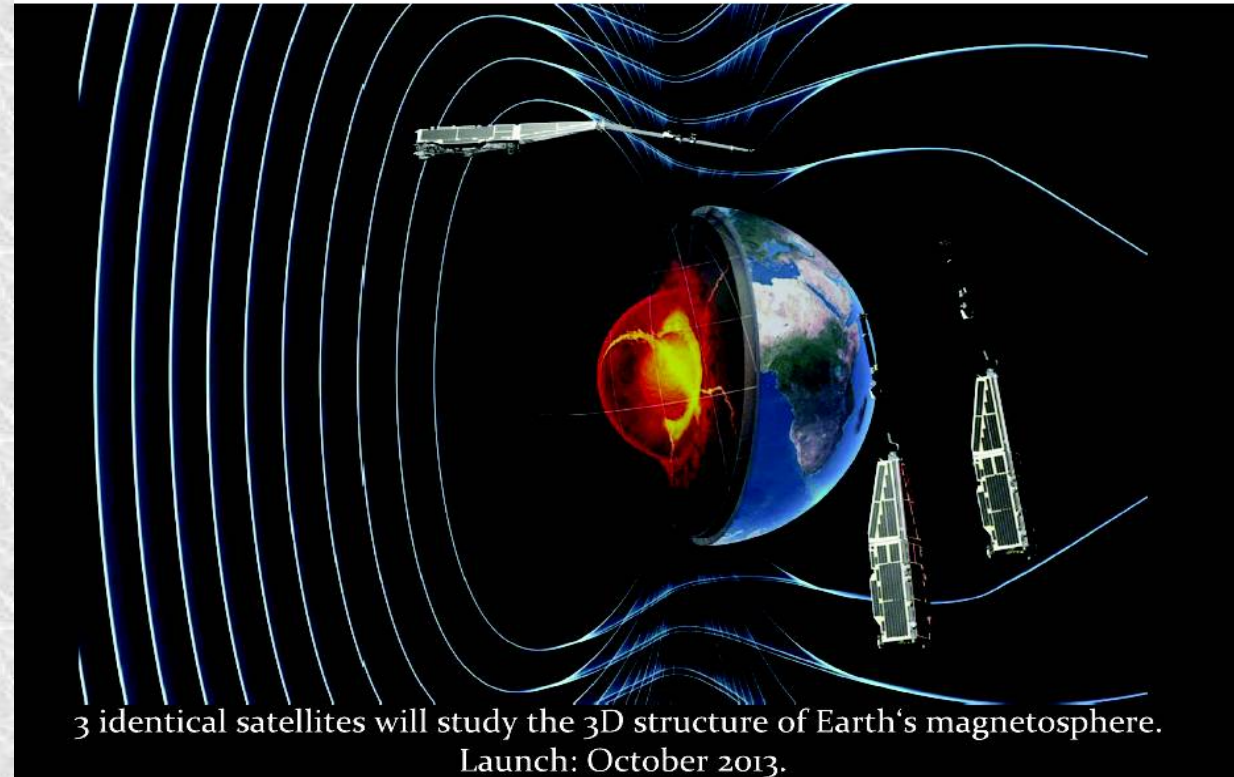
Carl Friedrich Gauss (1777-1855)



Network of geomagnetic observatories

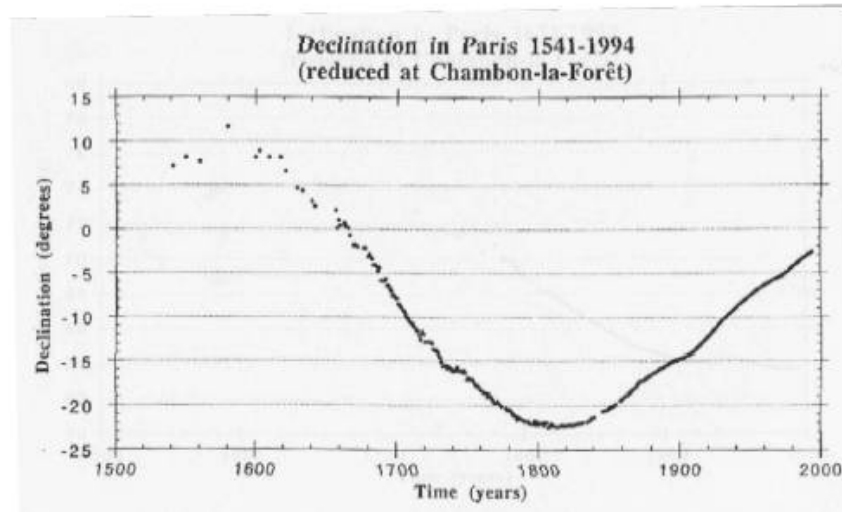


SWARM satellites

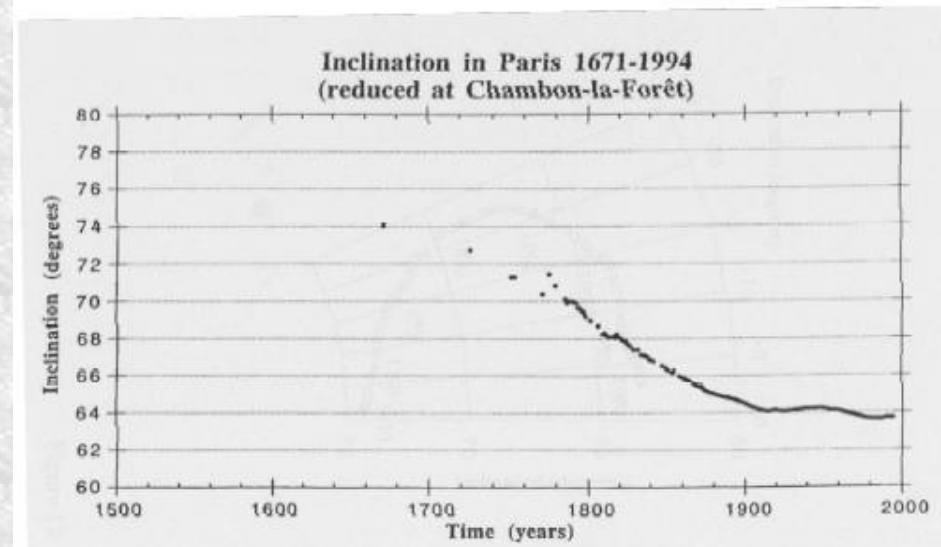


Variations de l'inclinaison et de la déclinaison observées en France sur 300 ans

Paris, St Maur et Chambon la forêt



Inclinaison



Depuis le XVII^e siècle, l'inclinaison a varié de 74° à 65°, et la déclinaison est passée de 10° Est à 23° Ouest au début du XIX^e siècle, pour revenir autour de 10° Ouest de nos jours.



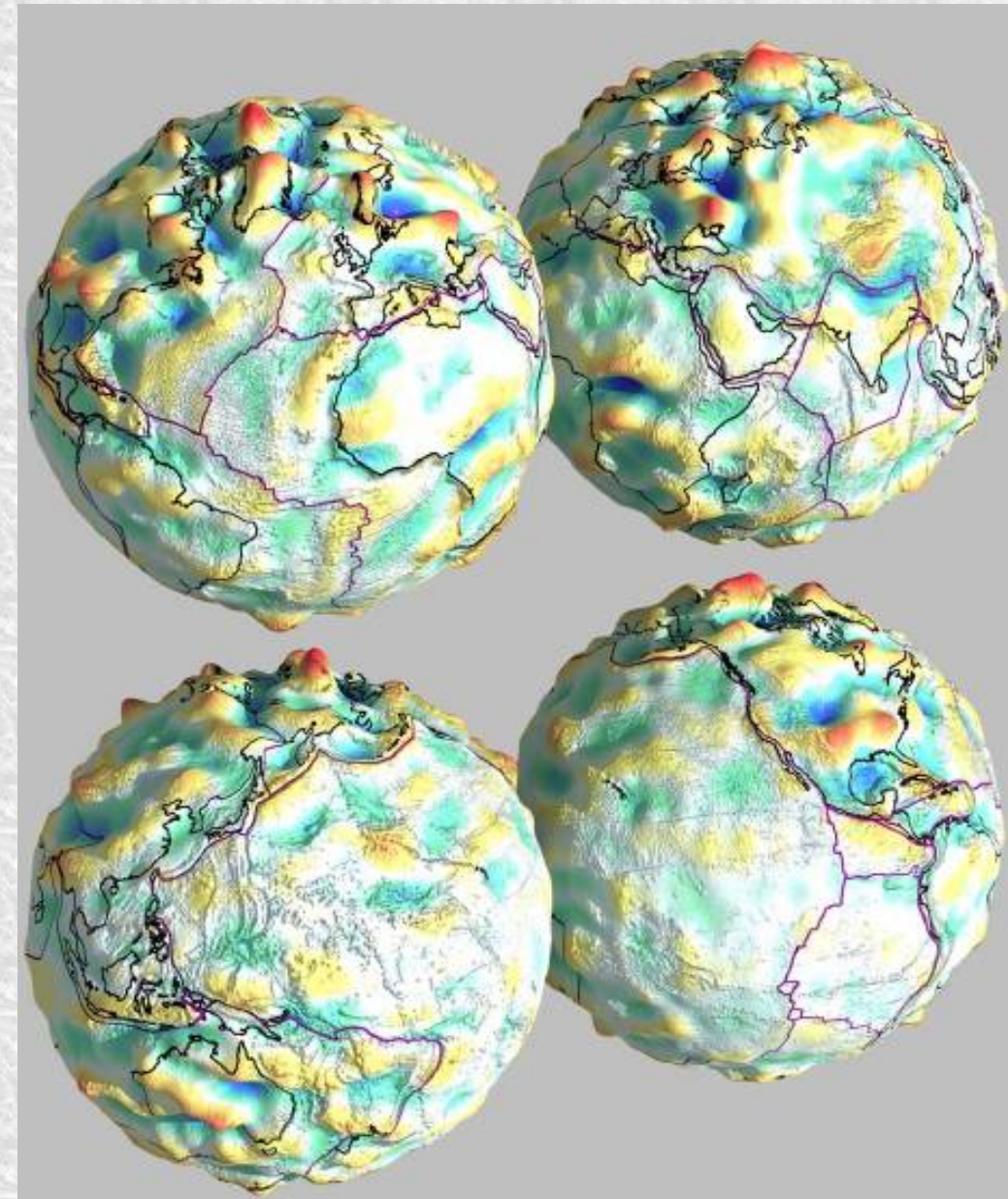
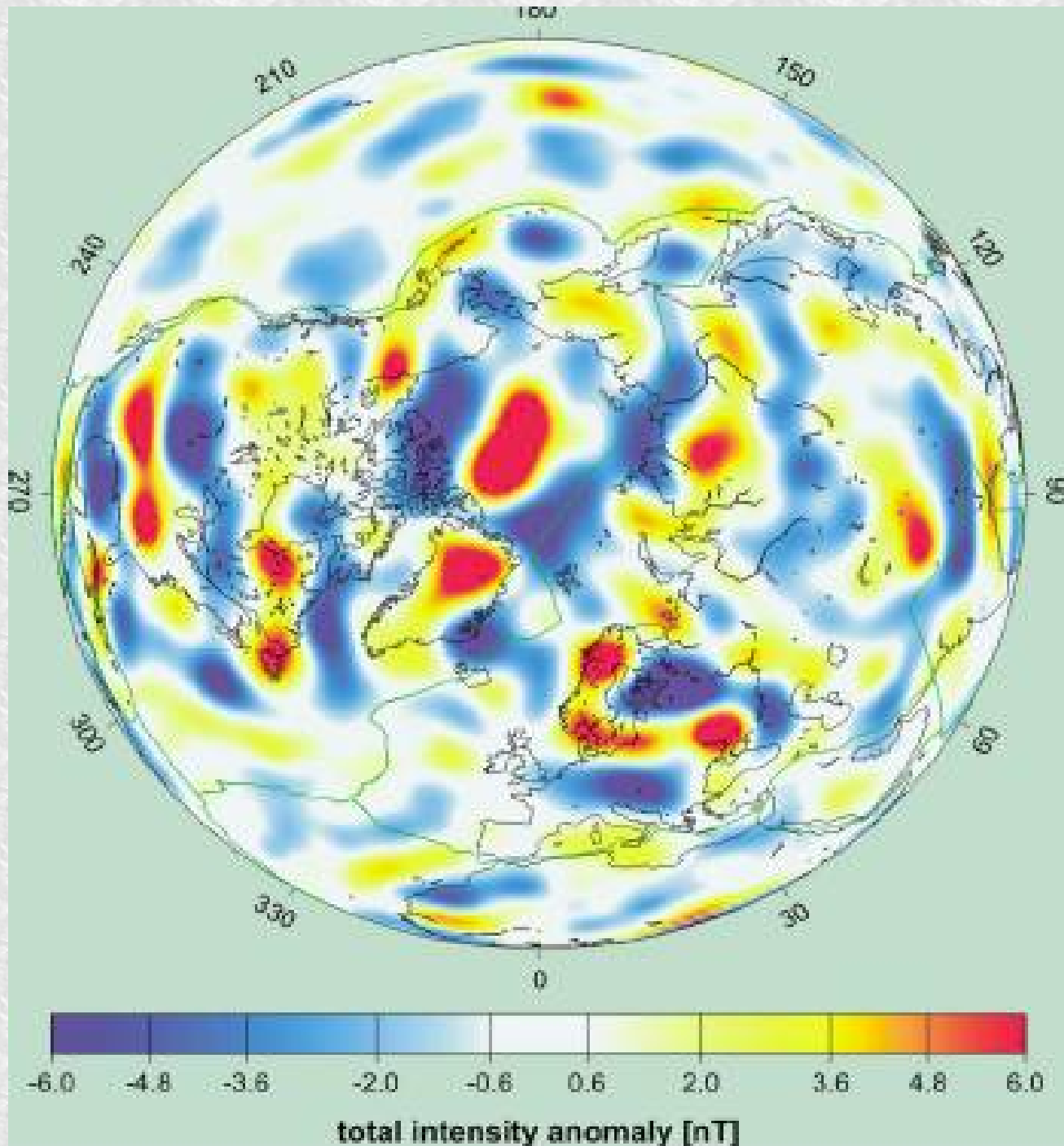
Trois origines du champ magnétique terrestre:

A- le champ magnétique crustal, associé à l'aimantation des roches, dû à la fois au champ induit par le champ principal actuel et par leur aimantation remanente.

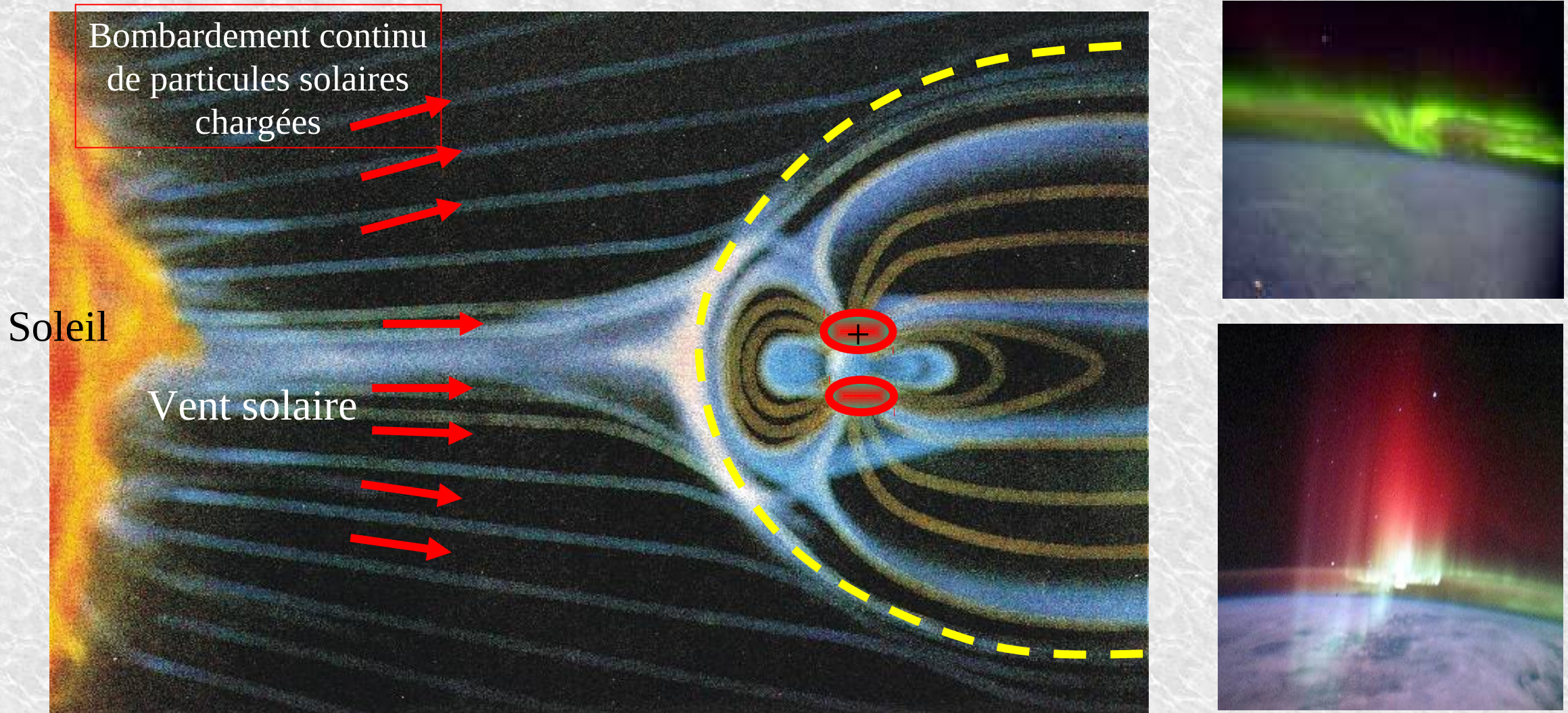
B- le champ magnétique externe, plus faible, dû aux interactions de la ionosphere terrestre avec le vent solaire : c'est l'origine des variations rapides temporelles.

C- le champ principal, dû à des courants électriques dans le noyau terrestre; en exploration géophysique il tient lieu de champ magnétique inducteur

Anomalies du Champ magnétique : *A - Effet de la croûte*



B – Effet externe



L'interaction entre le vent solaire et le CMT conduit à la déformation de la Magnétosphère.

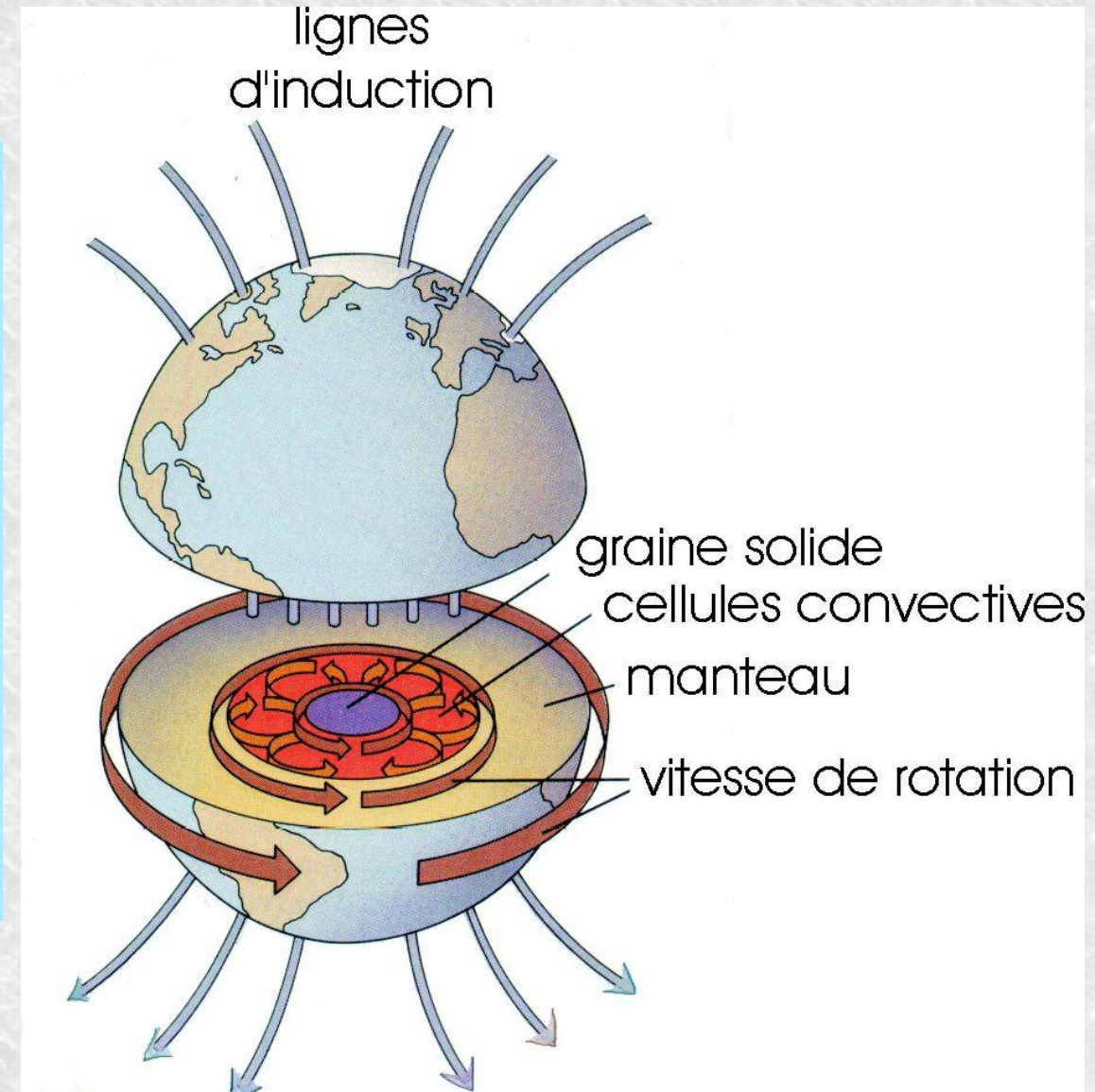
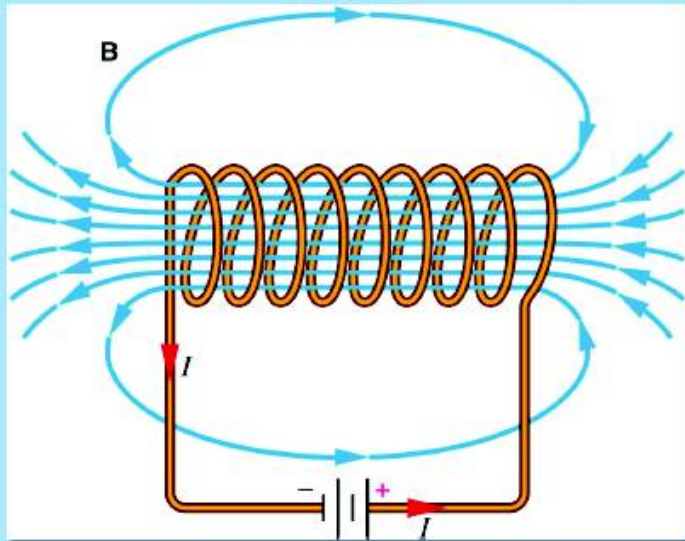
Les particules solaires interagissent avec les lignes de champ magnétique par l'intermédiaire de la Force de Lorentz.

Les **orages magnétiques** résultent de cette interaction.

Les **aurores polaires** sont les témoins de ces collisions entre les Particules solaires et le CMT (émission de photons).

C- cause interne: des forces capables de générer et maintenir les mouvements de matière du noyau !

- Variable electric current running through a wire creates magnetic field (e.g., solenoid, linear wire, ...).
- Charge moving in a magnetic field experiences a force, causes current which adds to the original current/field.



- **Les gradients thermiques** qui génèrent des mouvements de convection.
- **Les gradients de concentration chimique** résultant de la cristallisation de la graine au dépend du noyau liquide.
- **La rotation de la Terre**. Elle structure l'écoulement, mais ne l'entretient pas.

Maxwell's equations (1872)

Unify electric & magnetic forces

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{E}} = \frac{\rho_C}{\epsilon_0}$$

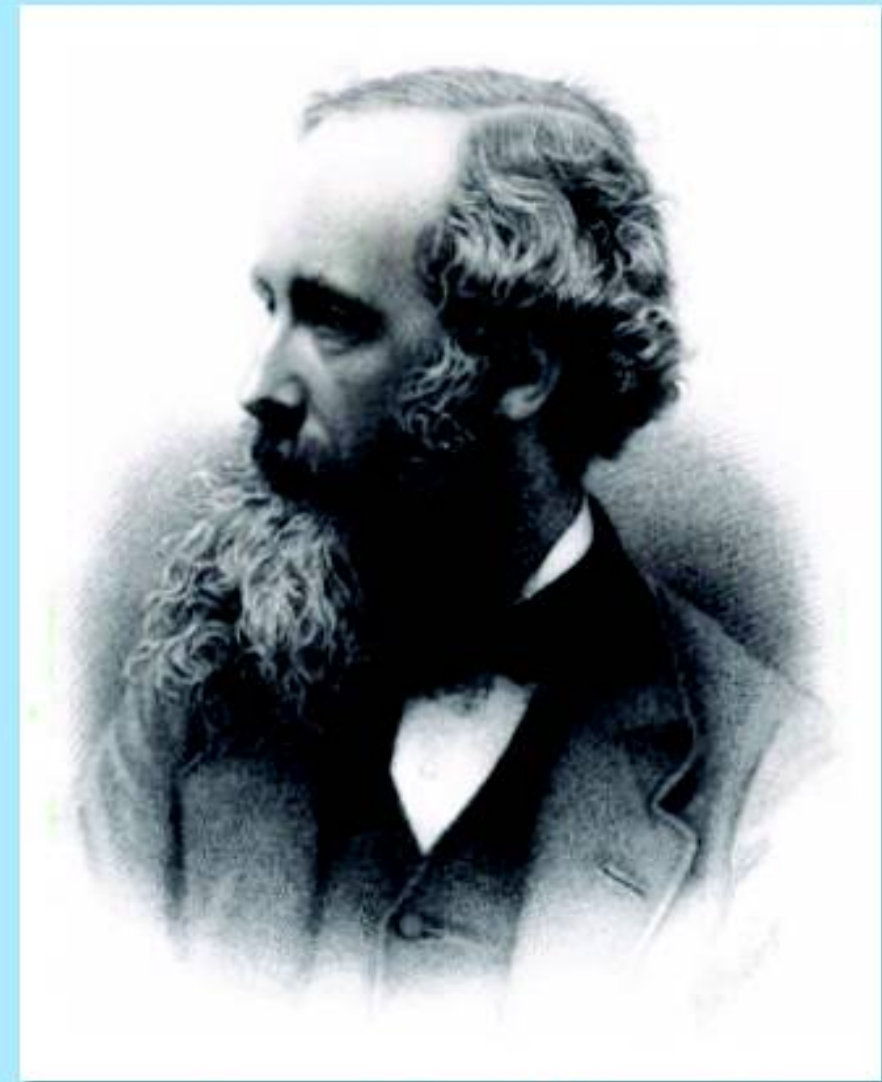
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{B}} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t}$$

(Faraday's law)

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \vec{\mathbf{j}} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{\mathbf{E}}}{\partial t}$$

(Ampère's law)



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

The dynamo equation

$$\frac{\partial \vec{\mathbf{B}}}{\partial t} = \lambda \nabla^2 \vec{\mathbf{B}} + \vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

1st term: Ohmic dissipation, thus diffusion

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}} = \vec{\mathbf{v}} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{B}}) - \vec{\mathbf{B}} \cdot (\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathbf{v}}) \quad \text{2nd term: Advection and stretching}$$

- If this acts to strengthen field (by bunching together field lines) faster than diffusion, then self-sustaining magnetic field is generated.
- Required for field not to decay with time:

$$|\vec{\nabla} \times \vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}| \geq |\lambda \nabla^2 \vec{\mathbf{B}}|$$

Boils down to:

$$\text{Re}_{mag} = \frac{vR}{\lambda} \geq 1$$

Magnetic Reynolds number

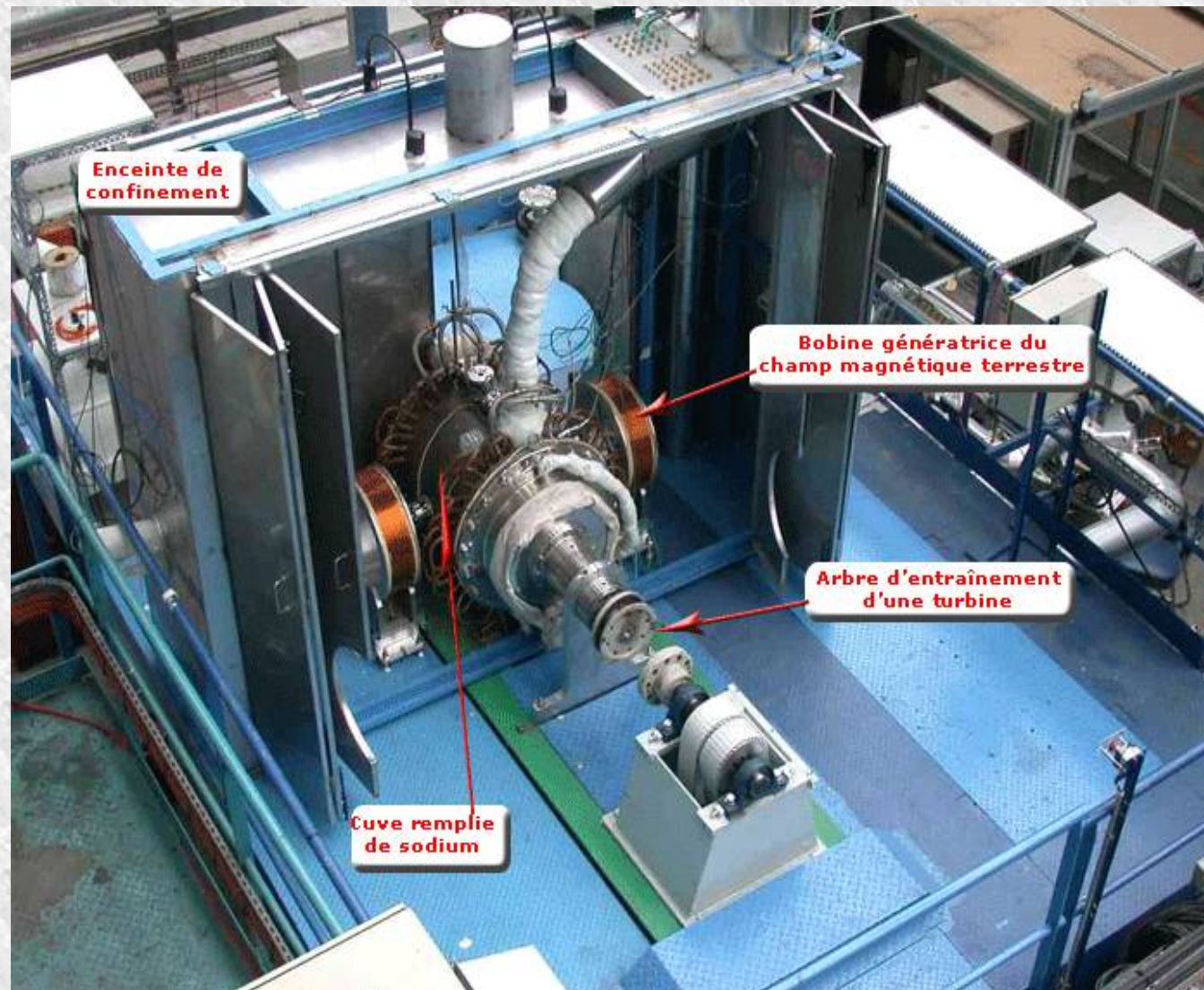
Done more rigorously:

$\text{Re}_{mag} > 40 \Rightarrow$ Generation of global magnetic field

Modélisation expérimentale de la dynamo terrestre

<http://www-cadarache.cea.fr/fr/activites/fission/dtn/Plateformes/Sodium/VKS.php>

L'expérience VKS (Von Karman Sodium, collaboration ENS-Paris-Lyon, CEA-Saclay) a mis en évidence l'apparition spontanée d'un champ magnétique dans un fluide conducteur turbulent (1999-2006). Le phénomène reproduit les principales caractéristiques de la dynamo terrestre avec un ordre de grandeur respecté. Le seuil d'apparition de l'effet dynamo correspond à un nombre de Reynolds magnétique de 30. C'est par cette expérience qu'il a aussi été observé pour la première fois au laboratoire, dans l'écoulement très turbulent de sodium liquide, des renversements du champ magnétique semblables à ceux du champ magnétique terrestre.



'Alpha' effect ...

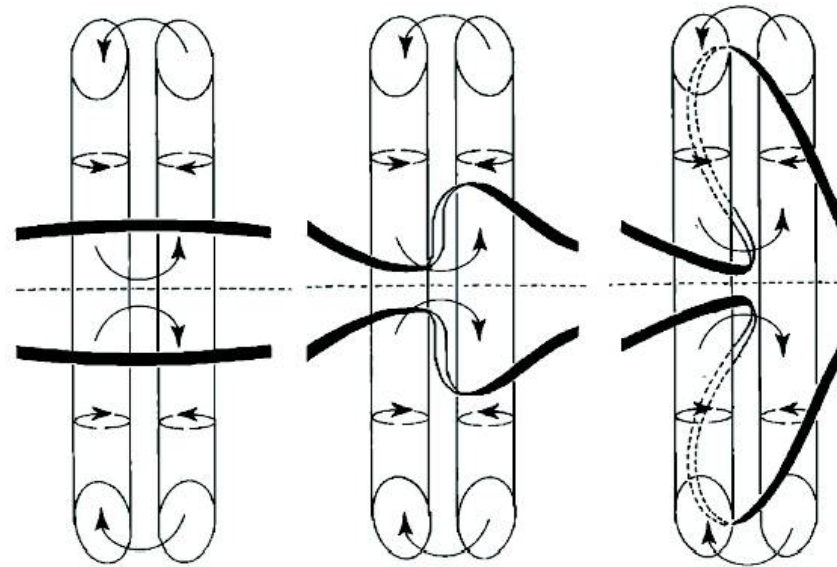


Figure 5a. Schematic illustration of the generation of poloidal field from initial toroidal field by columnar convection. Small arrows indicate the primary (columnar) flow and larger arrows indicate the secondary circulation along the column axes and between columns.

Alpha effect: Turns toroidal field into poloidal field (due to convection in the core).

... and 'Omega' effect

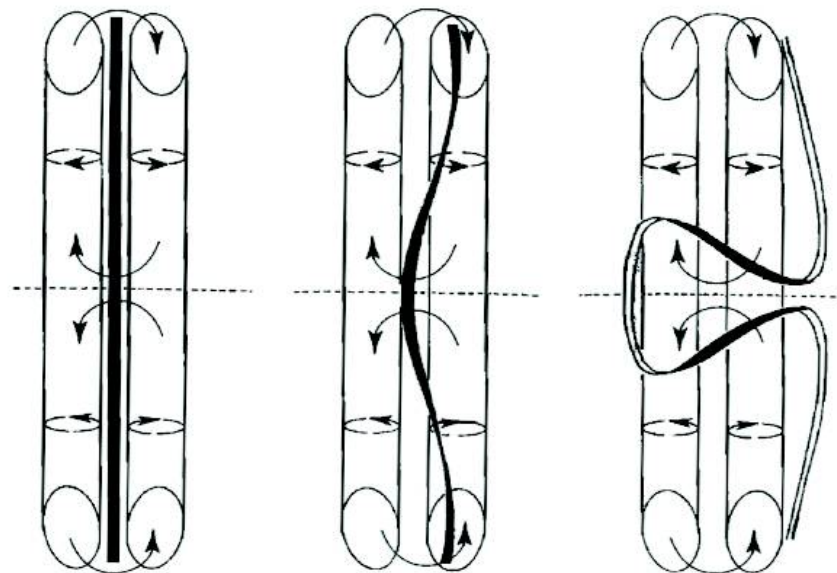
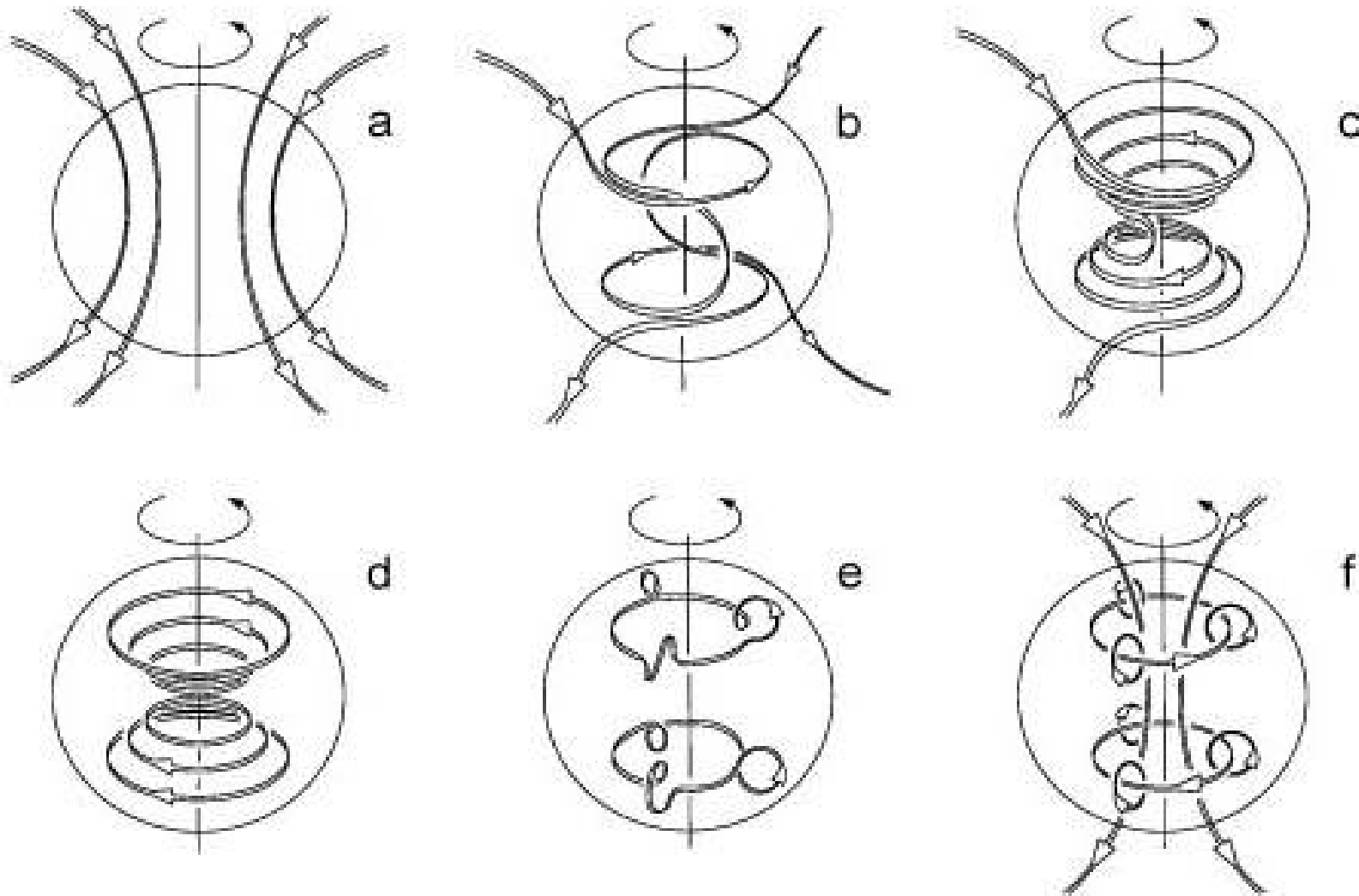


Figure 5b. Schematic illustration of the generation of toroidal field from initial poloidal field by columnar convection.

Omega effect: Turns poloidal field into toroidal field (due to differential rotation of the fluid core).

The Alpha – Omega Dynamo Cycle



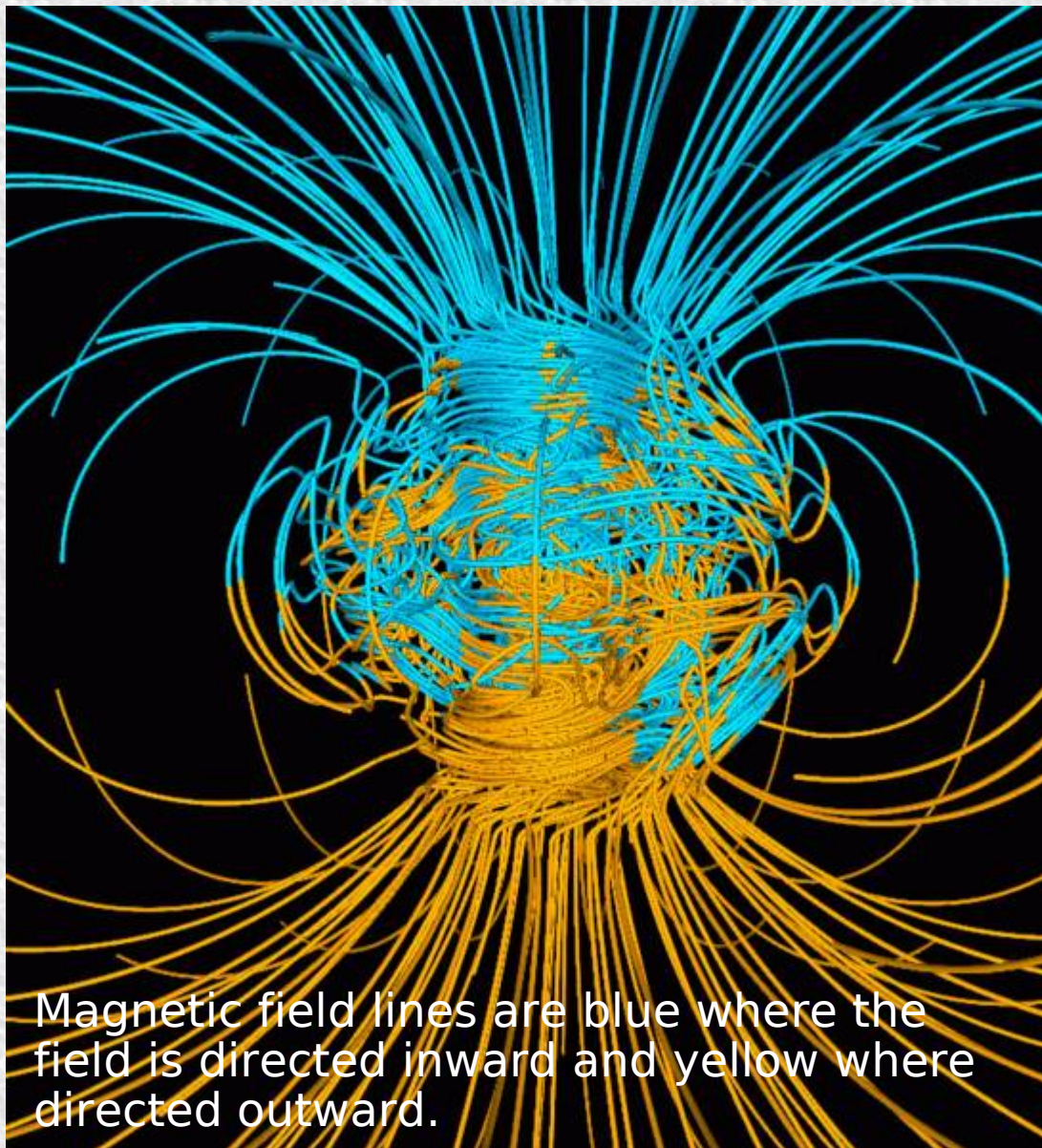
Consider an initial dipolar poloidal field, such as in (a). The omega-effect consists of (b,c) differential rotation, wrapping the magnetic field around the rotational axis, thereby creating (d) a quadrupolar toroidal field magnetic field inside the core. A closure of the dynamo cycle requires a bit of symmetry breaking, brought about by the alpha-effect, whereby (e) helical upwelling and downwelling creates loops of magnetic field. These loops coalesce (f) to reinforce the original dipolar field.

Love, J. J., 1999. *Astronomy & Geophysics*, 40, 6.14-6.19.

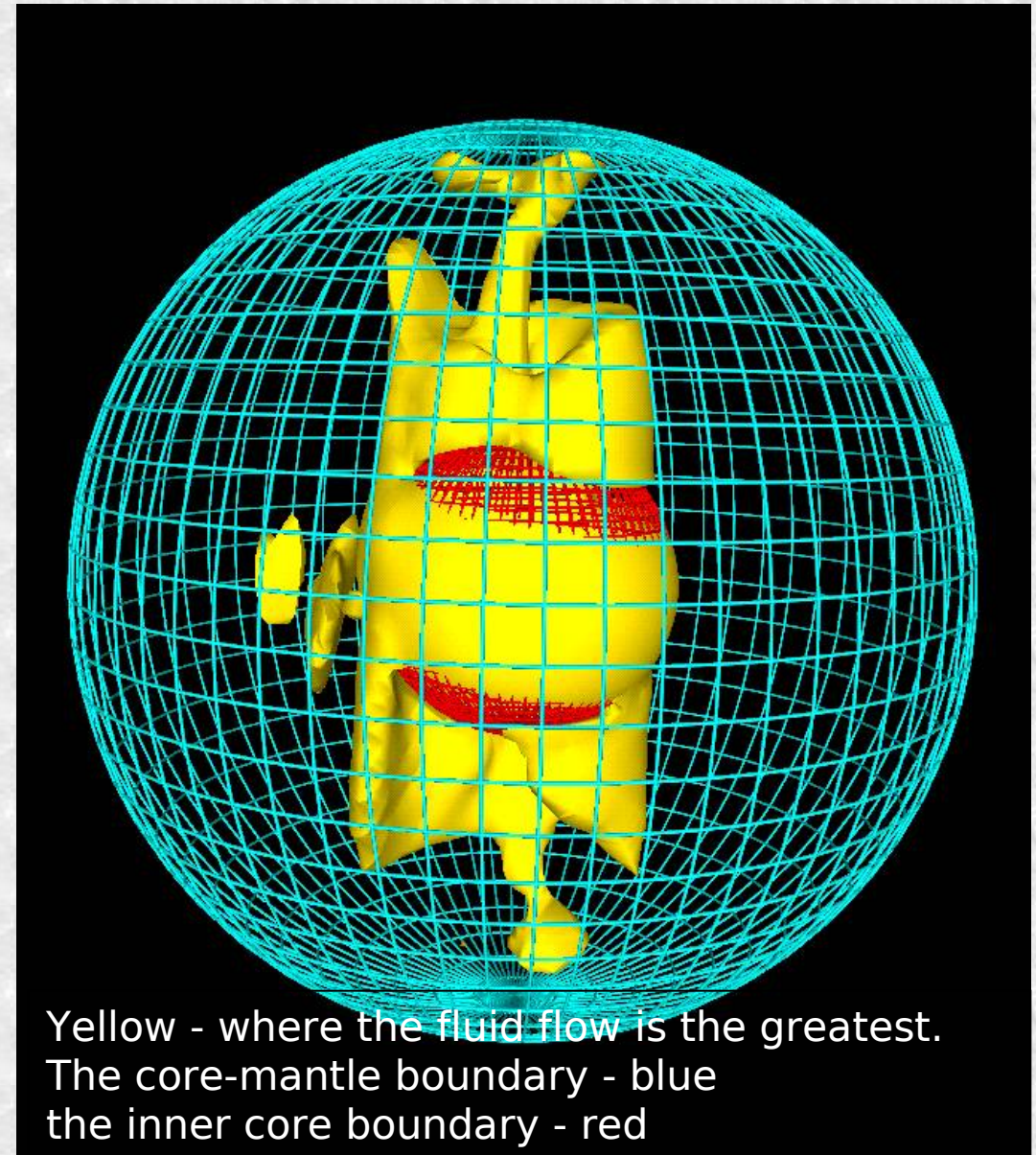
Modélisation numérique de la dynamo terrestre

Glatzmaier-Roberts model: with the dimensions, rotation rate, heat flow and the material properties of the Earth's core ; Simulation spans more than 300.000 years and took several thousand CPU hours on a Cray C-90 supercomputer.

The flows form an imaginary "tangent cylinder" due to the effects of large rotation, small fluid viscosity and the presence of a solid inner core within the spherical shell of the outer core.



Magnetic field lines are blue where the field is directed inward and yellow where directed outward.

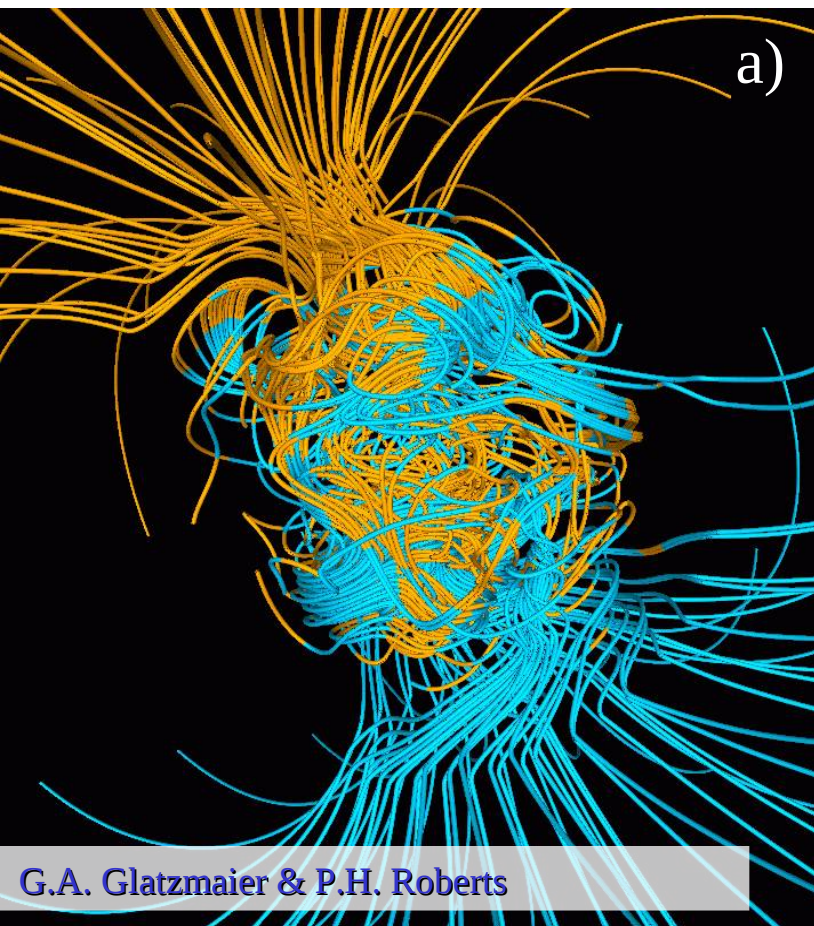


Yellow - where the fluid flow is the greatest.
The core-mantle boundary - blue
the inner core boundary - red

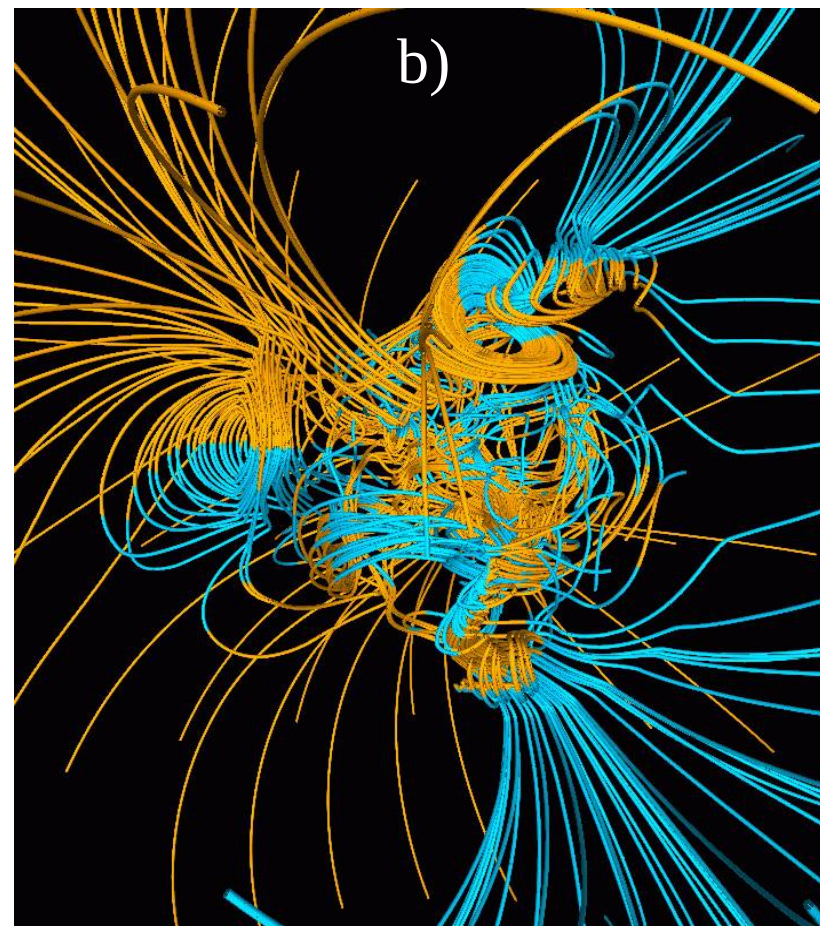
Simulation d'inversion de polarité

- 36.000 years into the simulation magnetic dipole underwent polarity reversal
- over a period of a 1000 years.
- the magnetic dipole moment decreases down to 10%

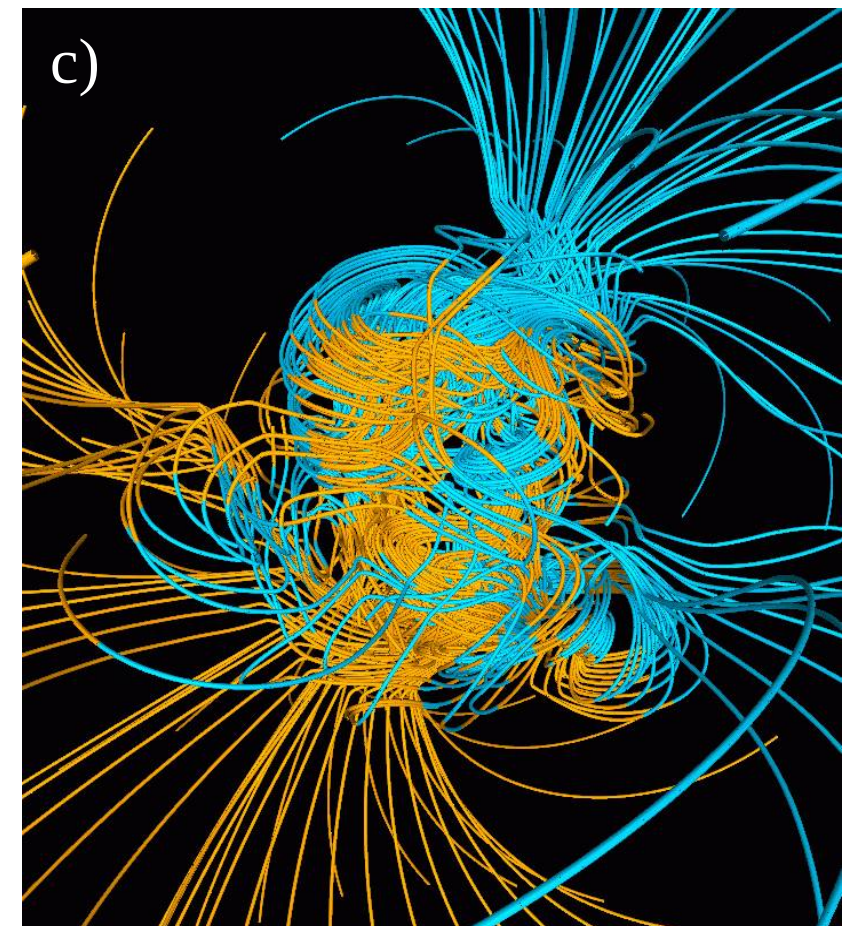
500 yr before



Middle of reversal



500 yr after



Venus: No magnetic field

- Core completely solid?
- Core completely liquid?
- Just not enough heat flux through core-mantle boundary due to stagnant lid convection?
- Still deflects solar wind due to ions in its ionosphere.

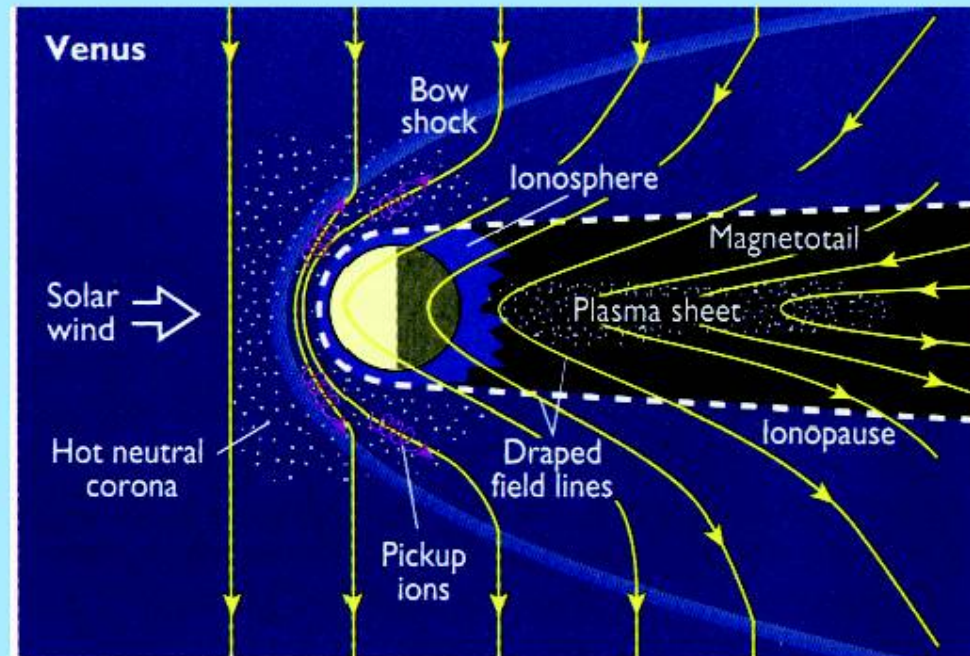
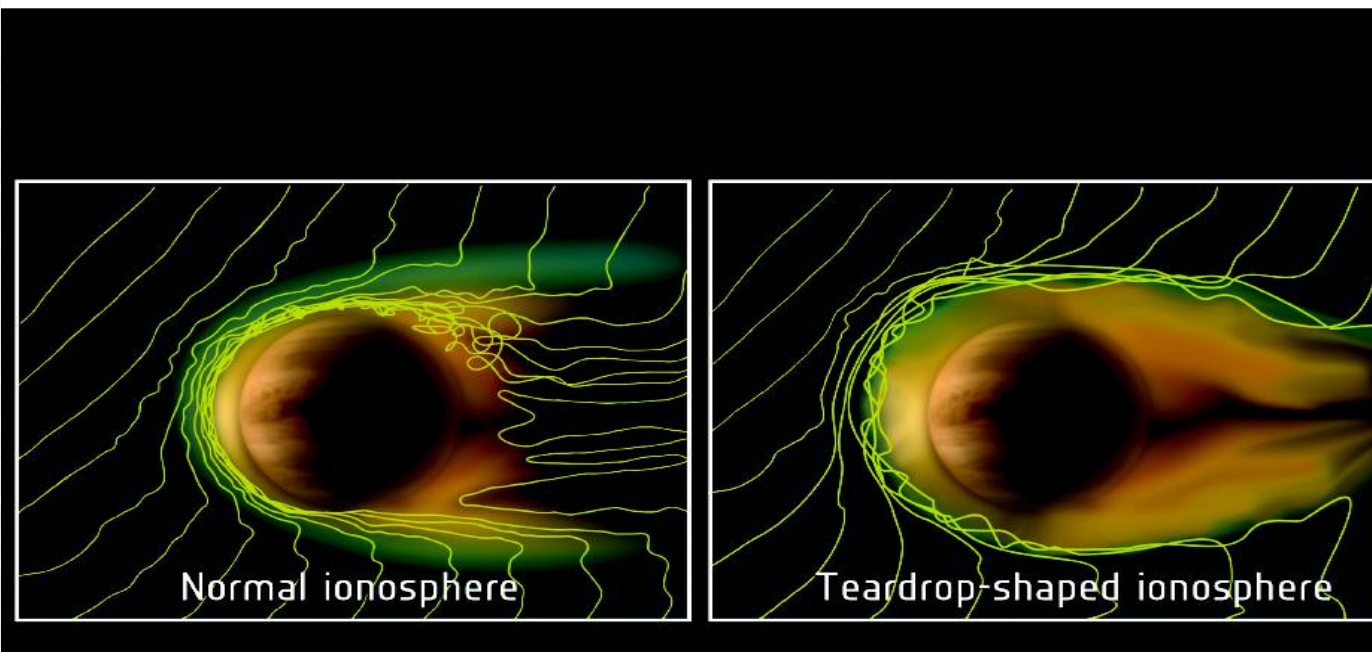


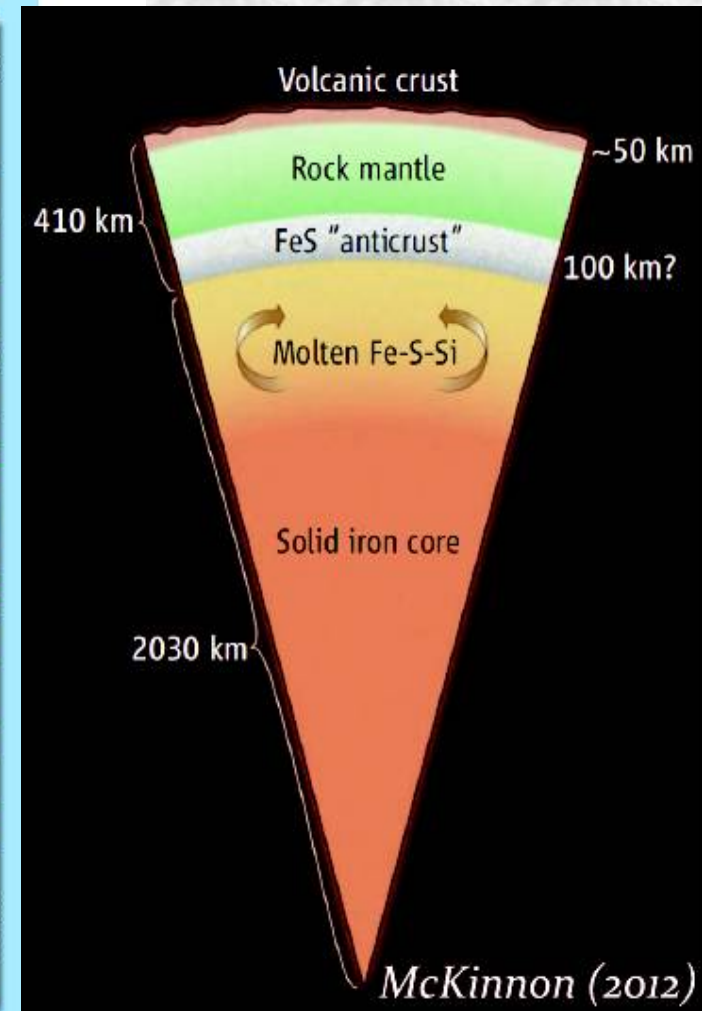
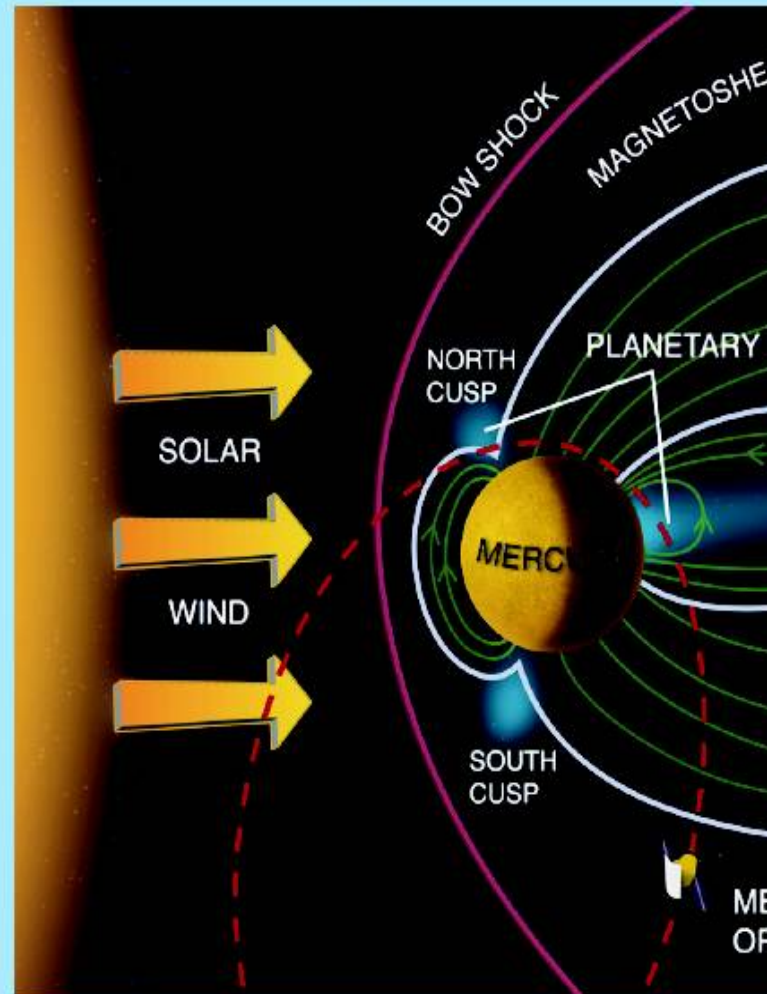
Figure 22. Even though it has no intrinsic magnetic field, Venus still interacts with and diverts the solar wind by virtue of its ionosphere and extended corona of hot gas derived from the upper atmosphere.

Venus' ion tail (2013)



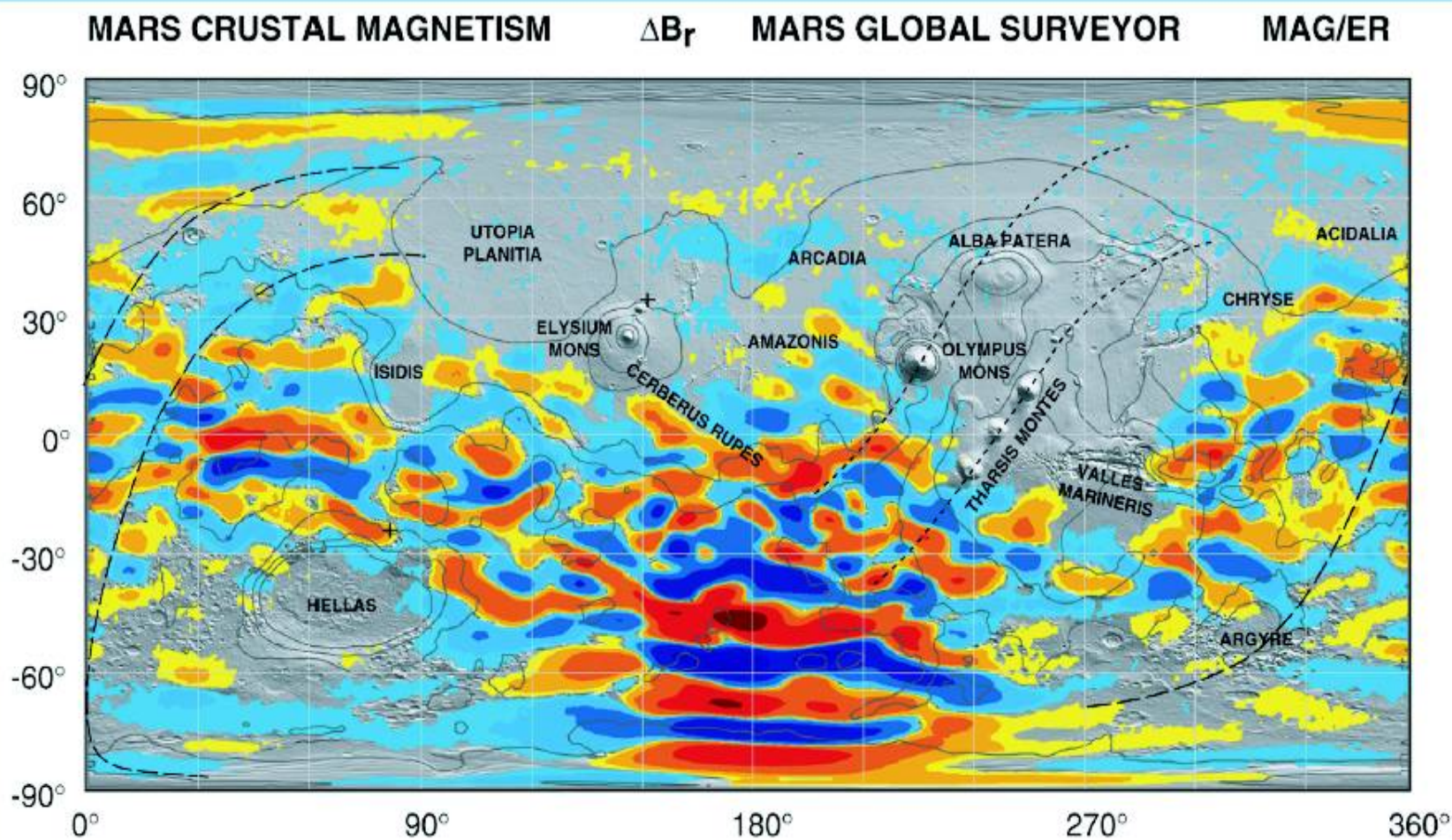
Mercury

- Mercury has a magnetic field, 1/100 as strong as Earth's (at surface)
- Same polarity as Earth.
- Inclination: 14° .
- Evidence of liquid iron core?
- Surprising because expected Mercury to have cooled and solidified by now.
- Field interacts with solar wind.



- Magnetosphere is smaller, and radiation belts would be within the planet.
- No ionosphere: plasma mainly originates from solar wind (*some ions may originate from surface sputtering*), and particle motion is less perturbed than in Earth magnetosphere.

Mars



- No dynamo, remnant magnetism in the crust

- Had a dynamo early on
- Due to early plate tectonics?
- CMB heat flow nowadays too low

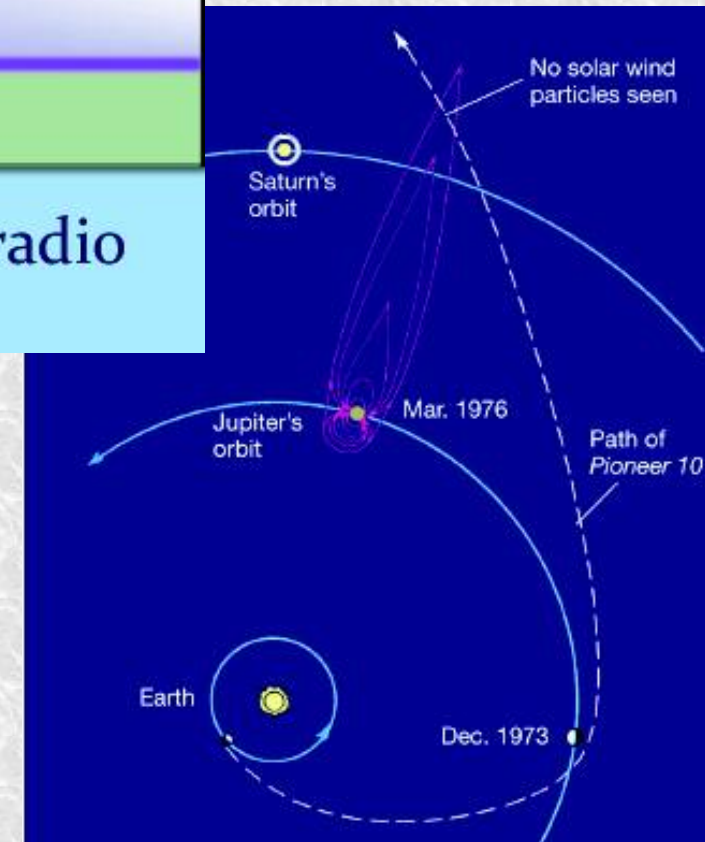
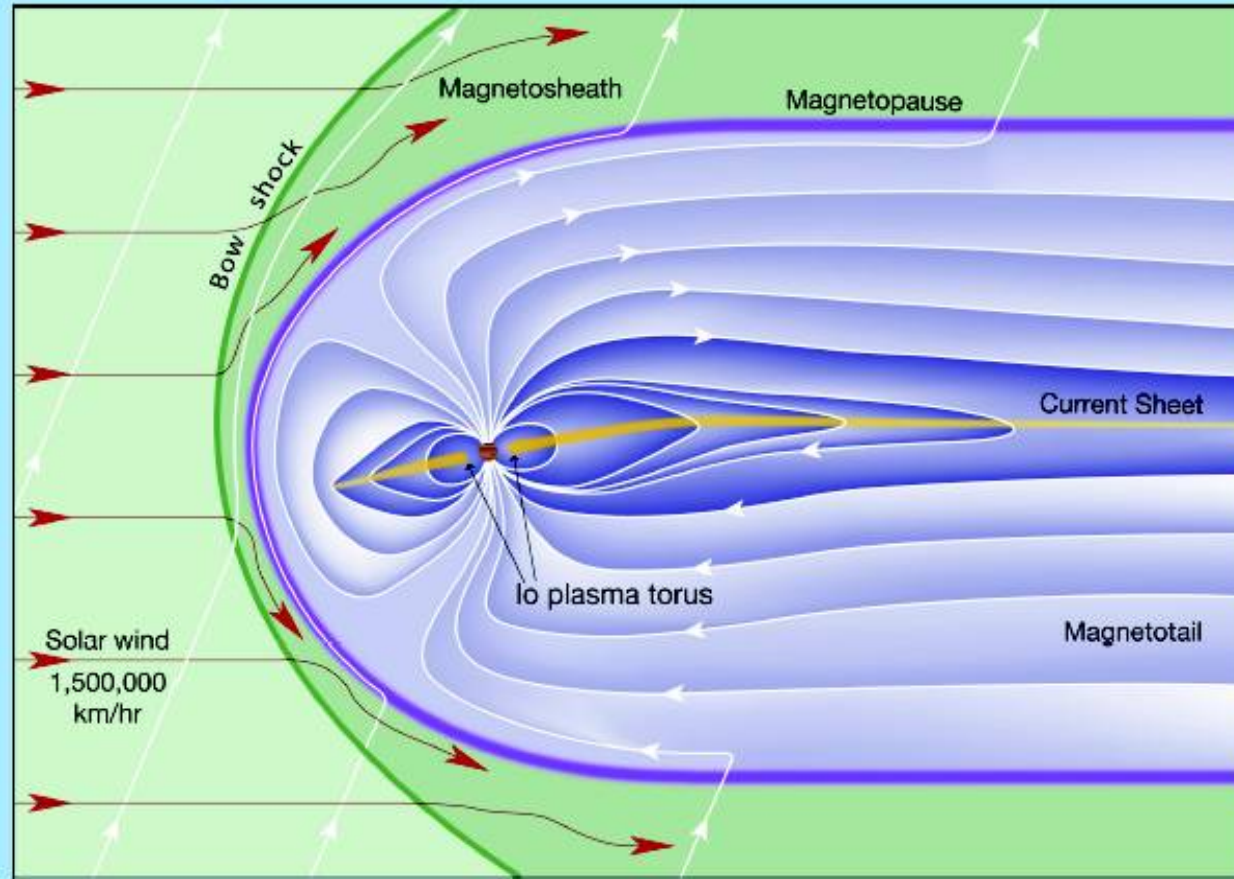
- Interaction with solar wind

- Thin atmosphere, but ionosphere deflects solar wind during quiet conditions
- Energetic bursts of cosmic rays or solar flares can hit the surface of the planet



Jupiter's magnetosphere I

- Field stronger than Earth's by factor 12 at equator, magnetic moment 19,000 times stronger.
- Opposite polarity than Earth magnetic field.
- Inclination: 9.6° .
- Jupiter's magnetosphere is alike those from other planets, but much larger. *It extends up to ~80 Jupiter radius, and Tail extend up to Saturn's orbit!*
- Important effects: magnetosphere, Io plasma torus and radio broadcasts.



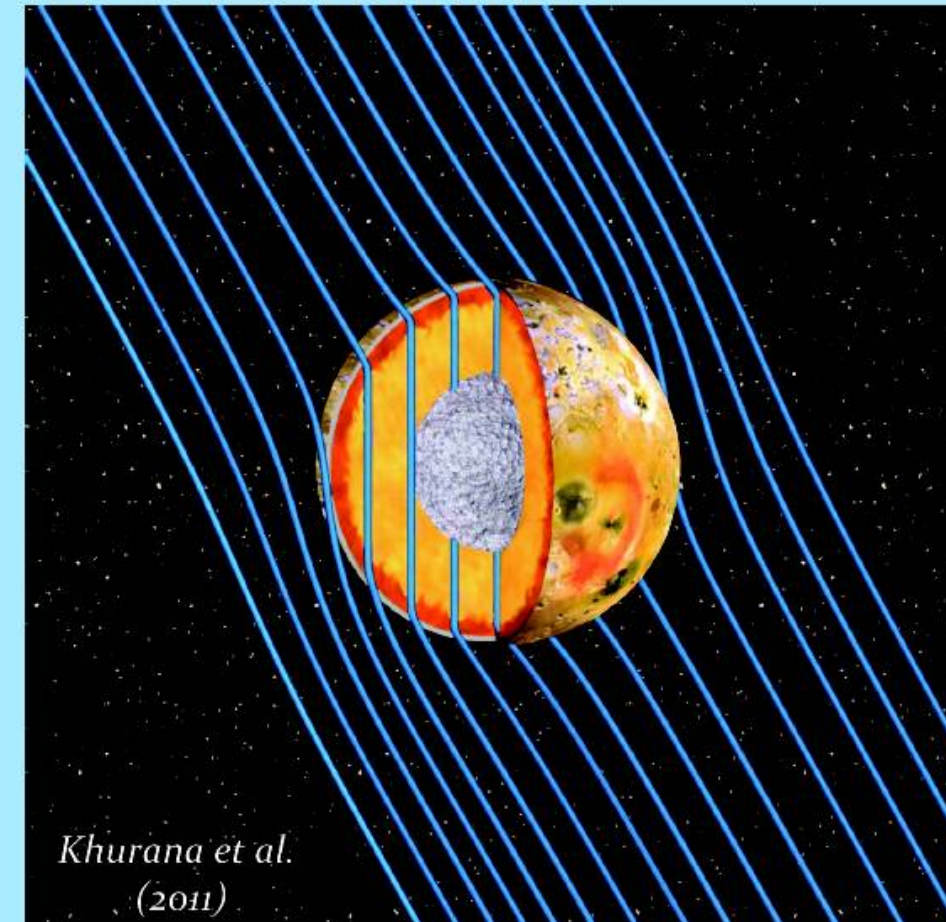
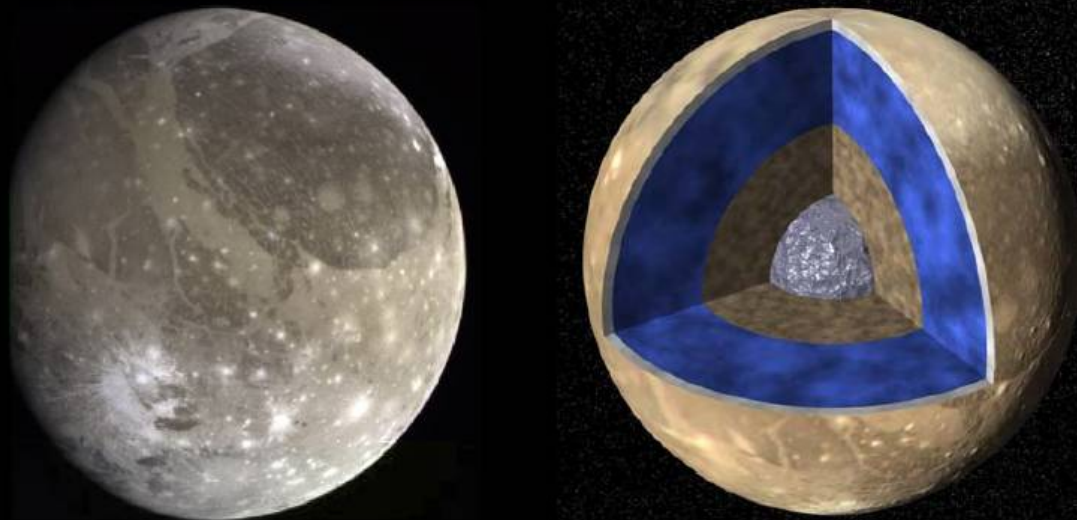
- Callisto and Ganymede are similar in size and density: Why so different?
- Ganymede must have got hotter - why?
 - Larger, thus more radioactive heating.
 - More tidal heating?
 - Formed closer to Jupiter, thus formed faster and warmer?
 - Small difference in T makes a difference in ice phase transitions, thus divergent path.

Io's interior

- Measured magnetic field induced by Jupiter's inside Io.

Ganymede's interior

- Ganymede is differentiated, which means it has denser material in its central region and lighter material (ice) near the surface.
- Ganymede has an iron core and its own *magnetic field*.
- This means that Ganymede's interior was once hot enough to separate iron from rock!



Jupiter's radio emissivity is due to a disc of plasma around the planet: charged particles moves with relativistic velocity

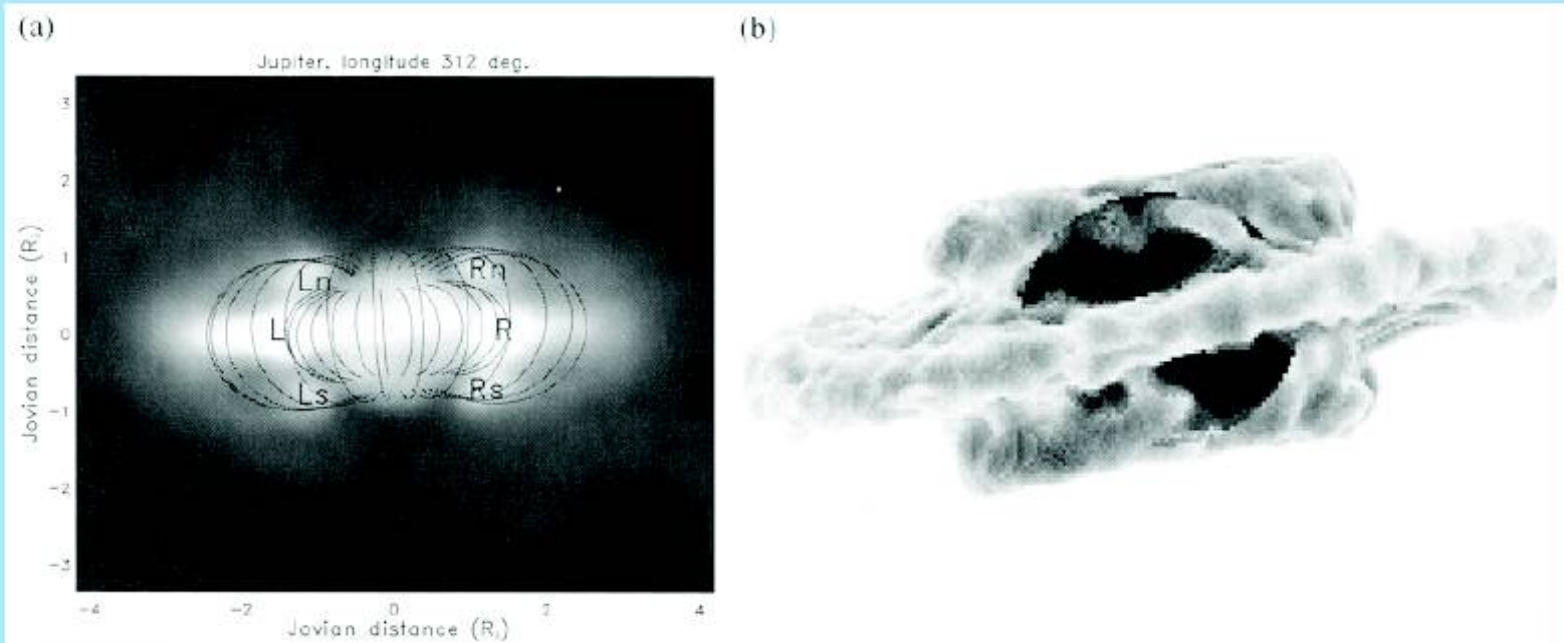
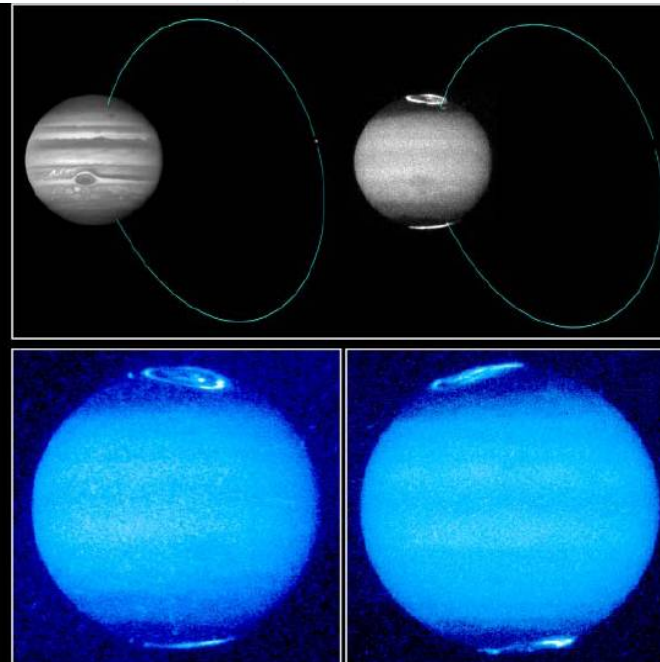


FIGURE 7.38 (a) Image of Jupiter's flux density at a wavelength of 20 cm, taken with the VLA (Very Large Array) at a longitude $\lambda_{III} \sim 312^\circ$. The spatial resolution is $0.3 R_J$. Several magnetic field lines (at $\mathcal{L} = 1.5$ and $\mathcal{L} = 2.5$) are superposed. (Adapted from de Pater *et al.* 1997) (b) A 3-D representation of the apparent radio emissivity of the planet. The data were taken with the VLA at a wavelength of 20 cm. The central meridian longitude is 110° . (de Pater and Sault 1998)

- Like northern lights on Earth
- Due to material from Io
- Lightning also observed at top of clouds



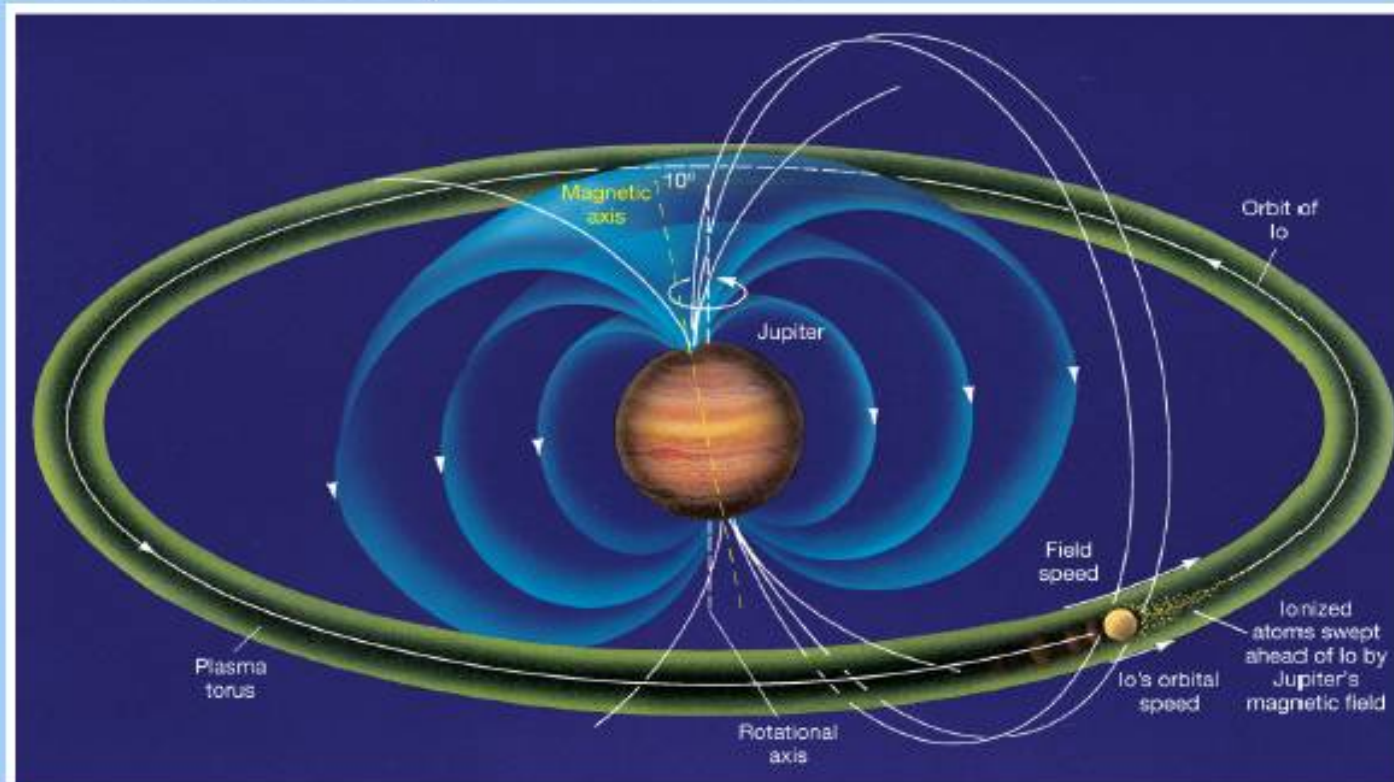
Jupiter Aurora

HST · WFPC2

PRC96-32 · ST ScI OPO · October 17, 1996
J. Clarke (University of Michigan) and NASA

Io plasma torus & sulphur tail I

- On Io sulphur is emitted by volcanoes.
- Some escapes into space and is dragged ahead of Io by Jupiter's magnetic field.
- Becomes ionized, creating a plasma torus around Jupiter.
- Concentrated magnetic field lines link Io to Jupiter.
- Jupiter aurorae caused by ions from Io.



Ganymede

Ganymede has an intrinsic magnetic field.

- A possible origin: currents in a conductive water ocean below the ice layer.
- However, part of the field seems to have a deep origin (metallic core ?)

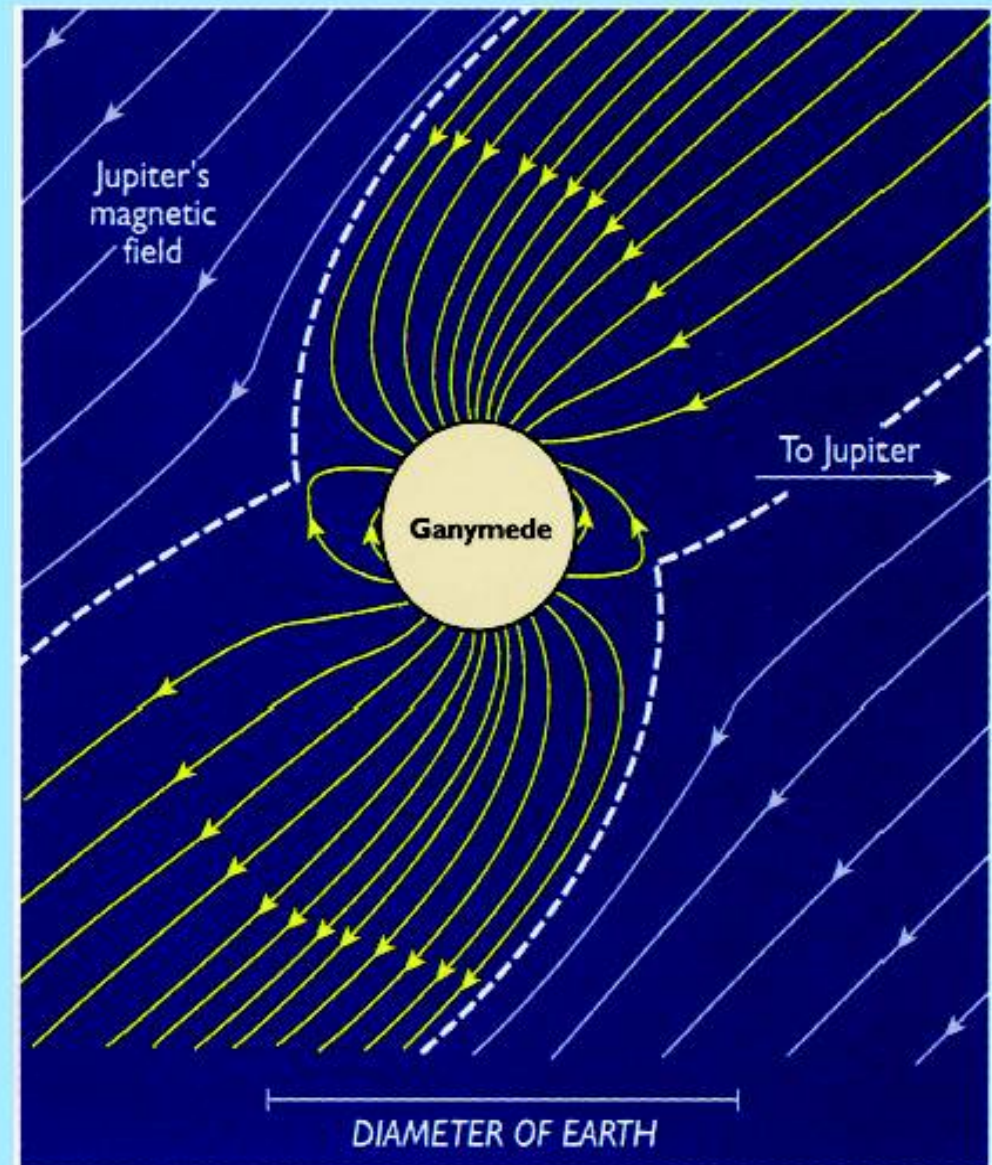
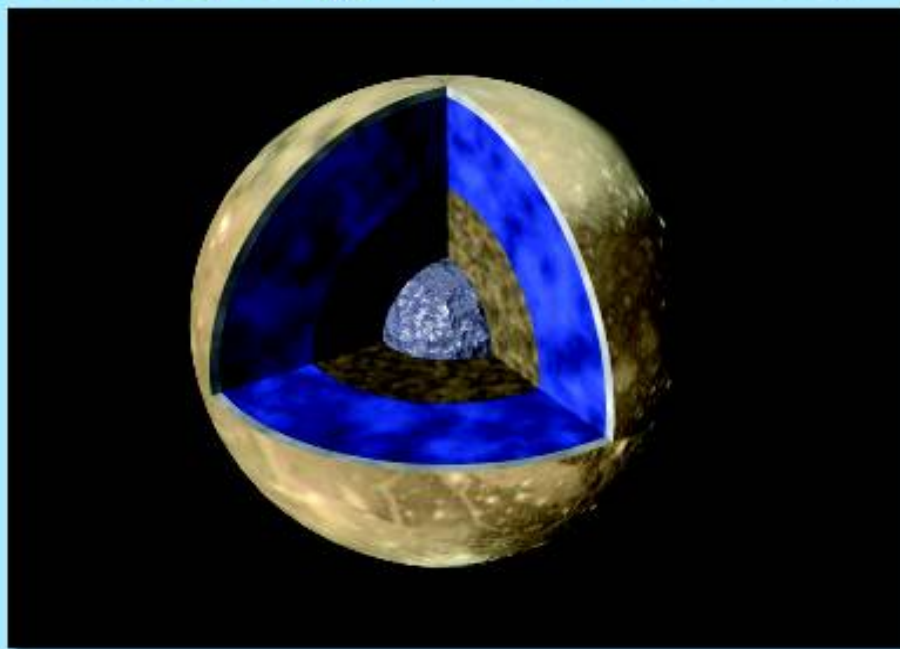
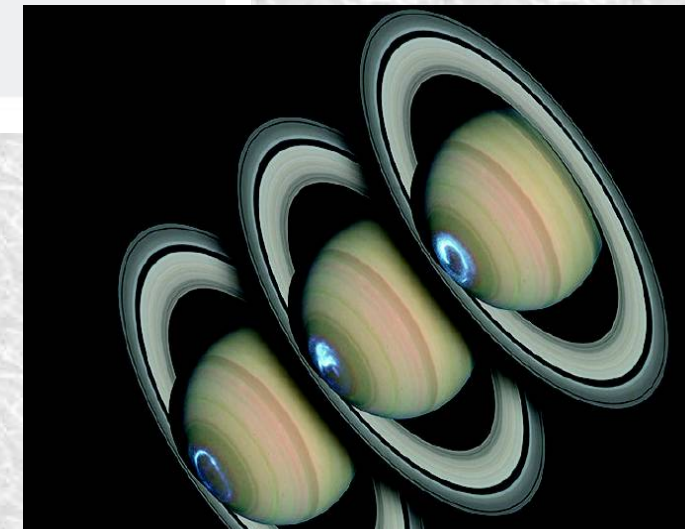
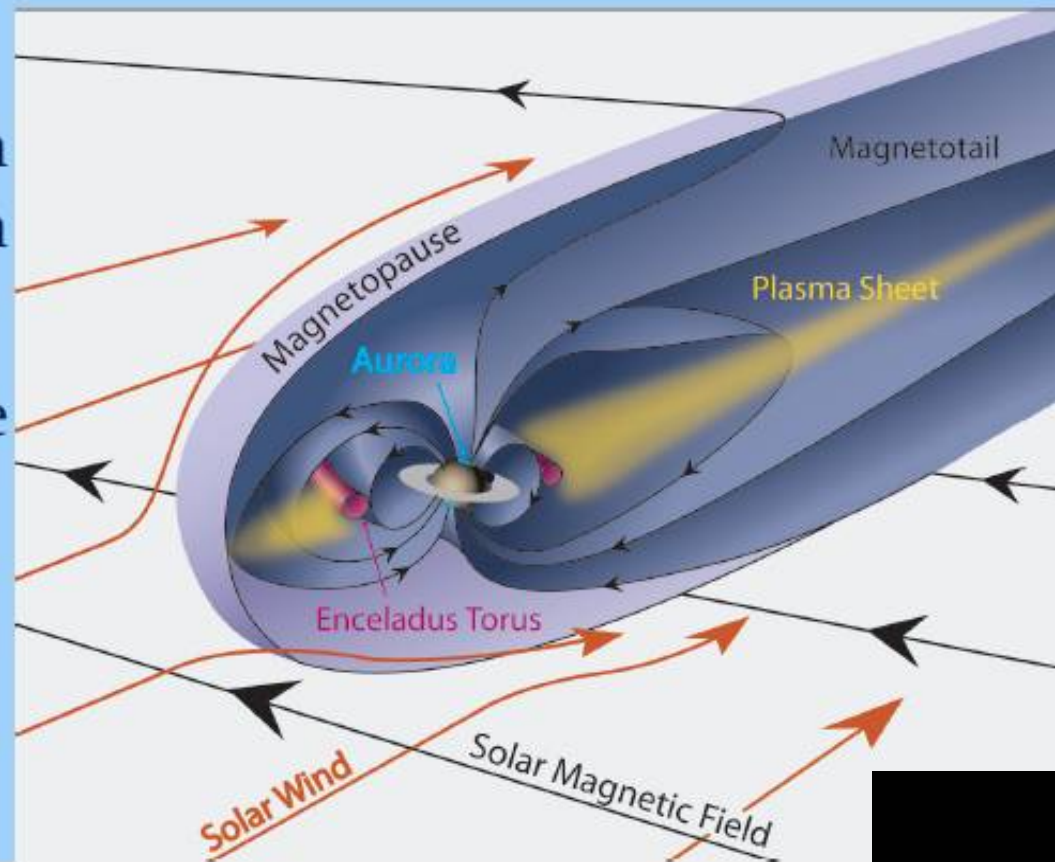


Figure 20. The magnetosphere of Ganymede is shown for conditions at the time of Galileo's first two flybys in 1996, from a perspective in front of the moon along its orbit. Gray lines represent the magnetic field of Jupiter, and yellow lines those attached to Ganymede.

Saturn's magnetosphere I

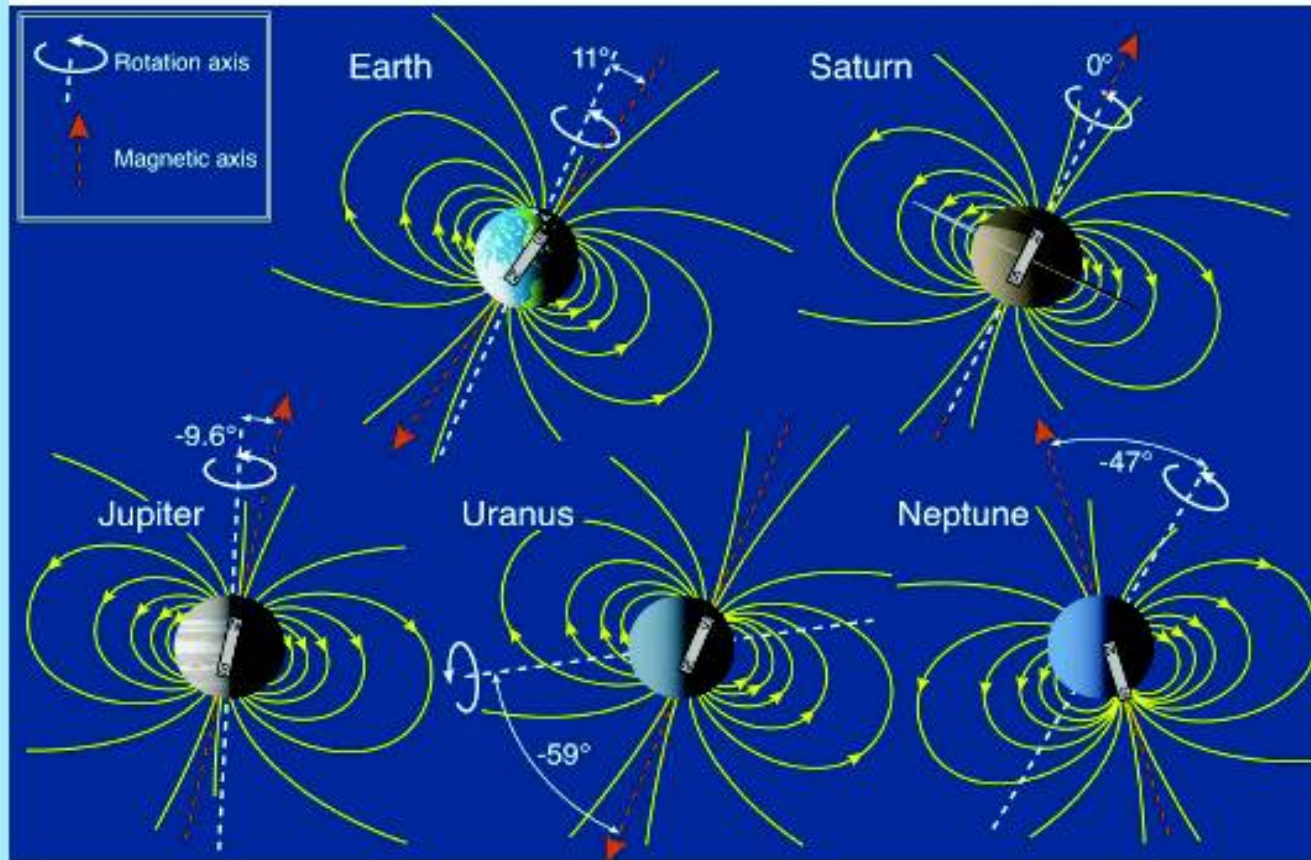
- Align within 1° of rotation axis.
- Opposite polarity than Earth magnetic field.
- Larger than magnetic field of the Earth (*dipole moment ~600 times that of the Earth, but equatorial field about similar*), but much smaller than Jupiter's one
- Also due to convection in liquid metallic hydrogen layer.
- Saturn's magnetosphere extends up to $\sim 20 R_{\text{Saturn}}$
- Also displays aurorae.



Compilation: Planetary magnetic fields

Characteristics of Planetary Magnetic Fields

	Rotation period (days)	Dipole moment (Earth=1)	Field at equator (gauss)	Polarity same as Earth's?	Angle between axes	Typical magnetopause distance (R_p)	Plasma sources
Mercury	58.65	0.0007	0.003	yes	14°	1.5	W
Venus	243.02(R)	< 0.0004	< 0.00003	—	—	—	W,A
Earth	1.00	1	0.305	yes	10.8°	10	W,A
Mars	1.03	< 0.0002	< 0.0003	—	—	—	—
Jupiter	0.41	20,000	4.28	no	9.6°	80	W,A,S
Saturn	0.44	600	0.22	no	< 1°	20	W,A,S
Uranus	0.72(R)	50	0.23	no	58.6°	20	W,A
Neptune	0.67	25	0.14	no	47°	25	S



Note: S.I. unit for B is Tesla,
 $1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gauss}$.

For the Earth:

$$B = 0.305 \text{ G} = 3.05 \times 10^{-5} \text{ T}$$

Compilation: Magnetospheric plasmas

Magnetosphere are filled with plasma of different composition and origin.

TABLE 7.3 Plasma Characteristics of Planetary Magnetospheres.

	Mercury	Earth	Jupiter	Saturn	Uranus	Neptune
Maximum density (cm^{-3})	1	1000–4000	>3000	~100	3	2
Composition	H^+	O^+ , H^+ , N^+ , He^+	O^{n+} , S^{n+} , SO_2^+ , Cl^+	O^+ , H_2O^+ , H^+	H^+	N^+ , H^+
Dominant source	solar wind	ionosphere ^a	Io	rings, satellites	atmosphere	Triton
Production rate (ions s^{-1})	?	2×10^{26}	$>10^{28}$	10^{26}	10^{25}	10^{25}
Ion lifetime	minutes	days ^a , hours ^b	10–100 days	1 month	1–30 days	1 day
Plasma motion controlled by:	solar wind	rotation ^a solar wind ^b	rotation	rotation	solar wind + rotation	rotation (+ solar wind?)

After Kivelson and Bagenal (1999).

^a Inside plasmasphere.

^b Outside plasmasphere.

Compilation: Sizes of magnetospheres

