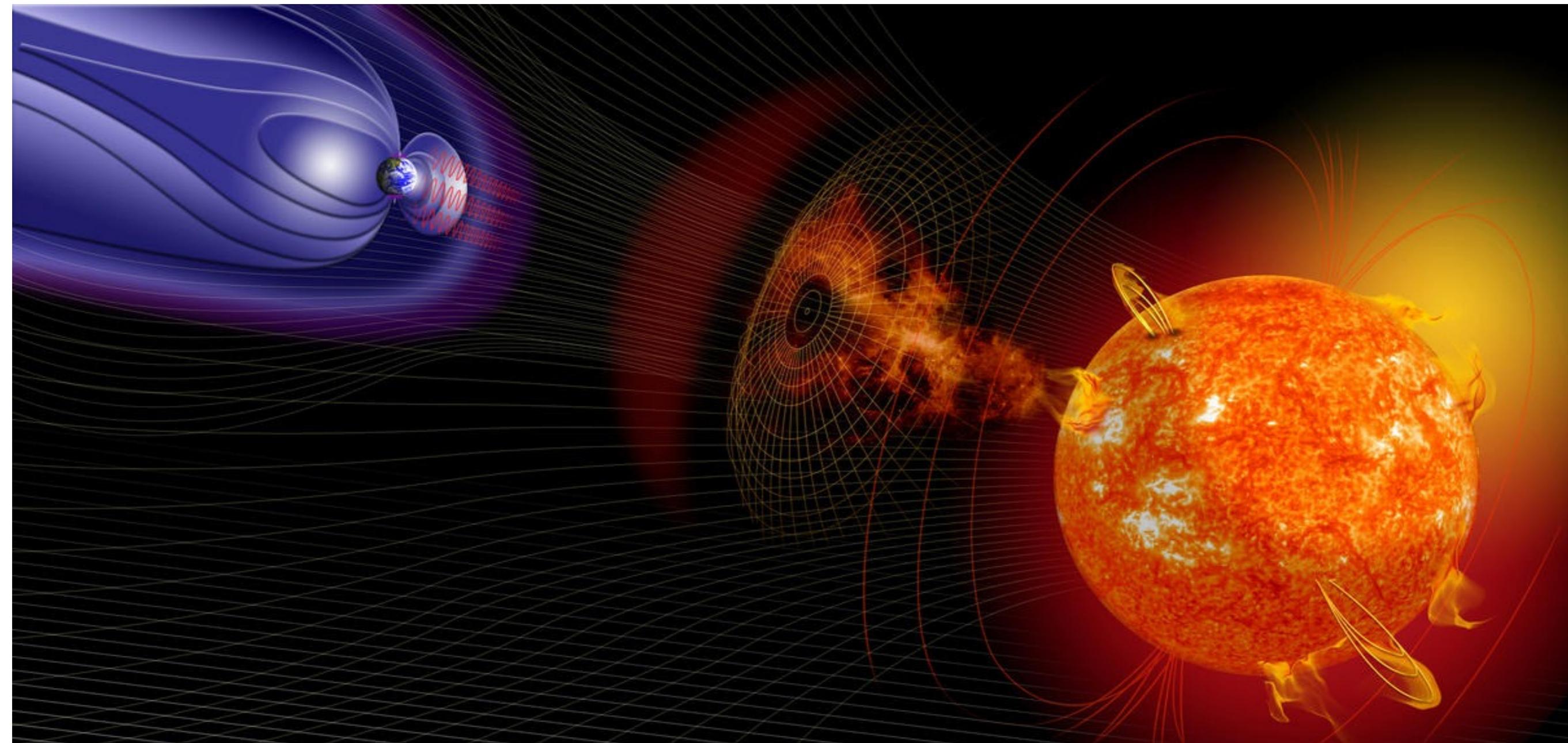


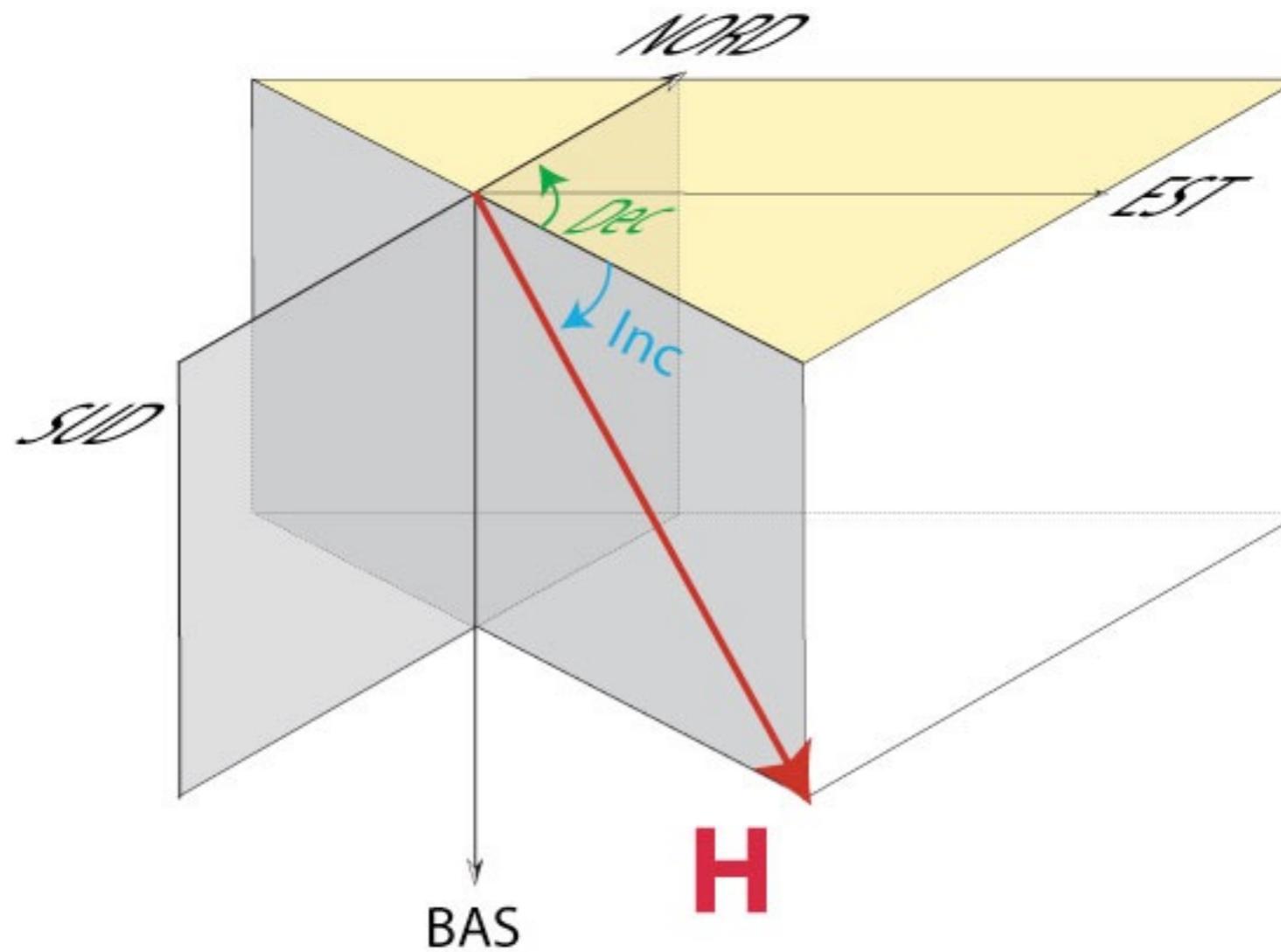
3: Le champ magnétique Terrestre



Youtube :Will the Earth magnetic field shift

3.1 Les éléments du champ Géomagnétique

Représentation directe du champ magnétique



3: Le Champ magnétique terrestre

3.2 Mesure du champ terrestre

Boussole Chinoise

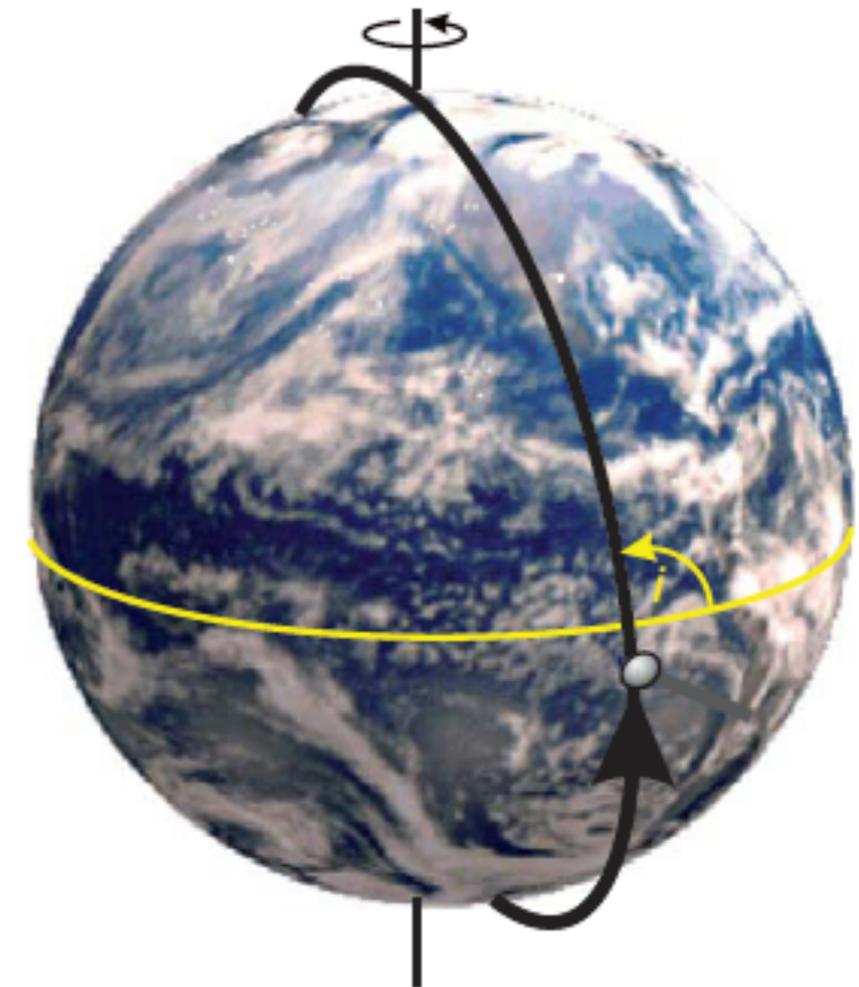
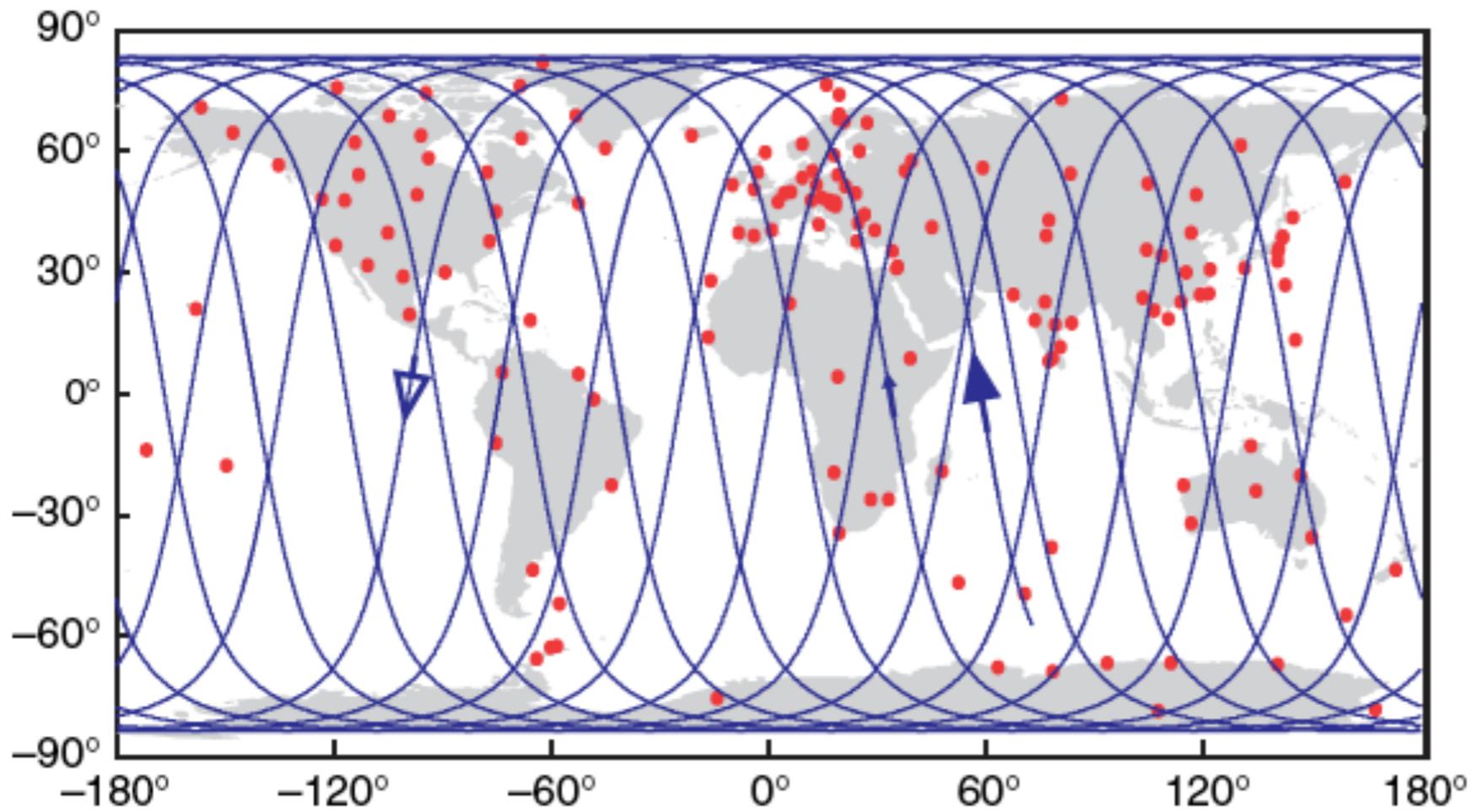


Boussole moderne



3.2 Mesure du champ terrestre

Réseau d'observation Terrestre (observatoires) + Mesures satellites



3.2 Mesure du champ terrestre

Mesures satellites

6 Satellites **POGO** de 1965 à 1971 : **P**olar **O**rbiting **G**eophysical **O**bservatory

MAGSAT (30/11/79 au 11/06/1980) : **MAG**netometer **SAT**ellite.

ØRSTED (23/02/1999 - 01/2014). (Satellite Danois).

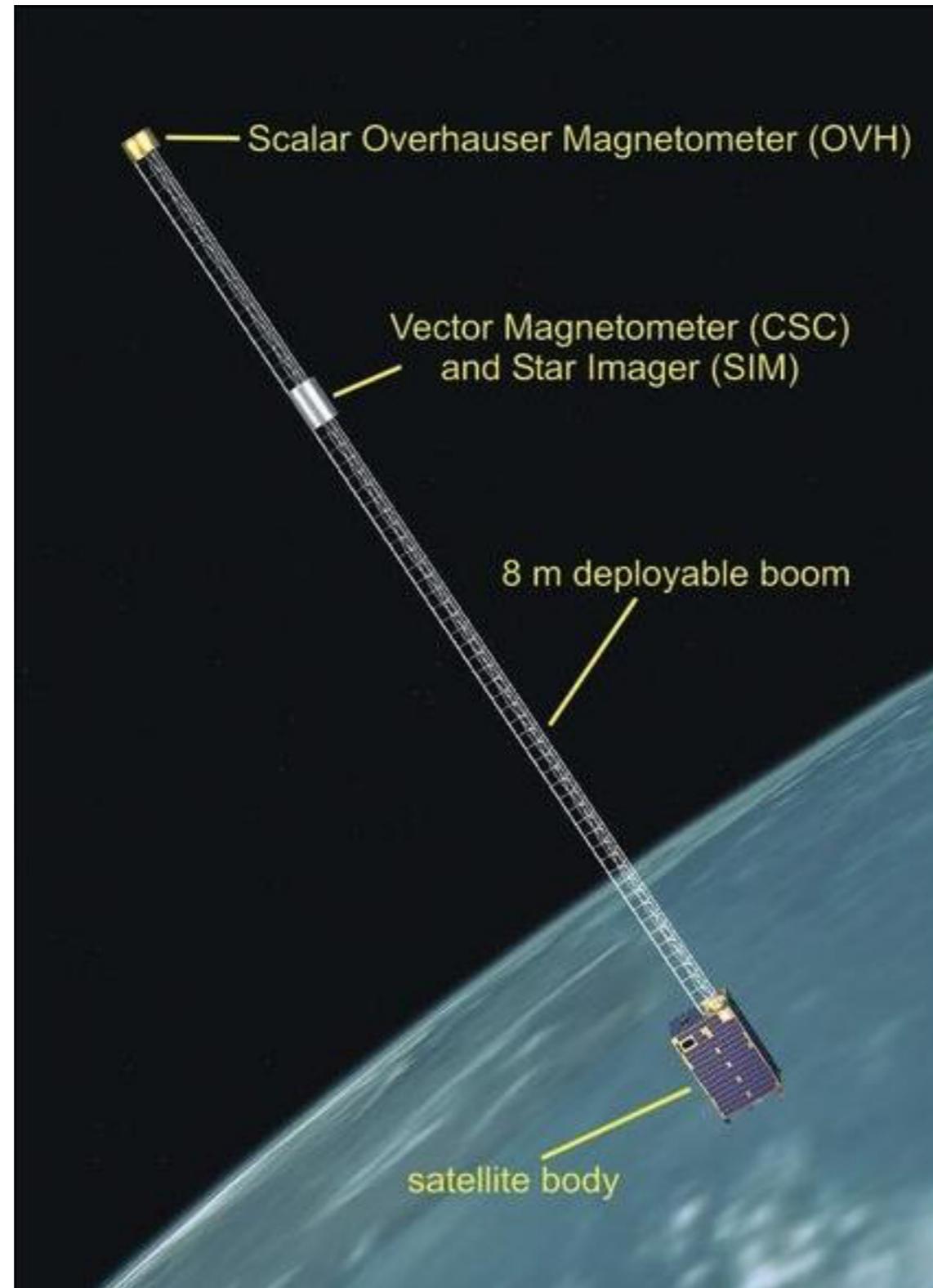
CHAMP (2000-2010) : **CH**Allanging **M**inisatellite **P**aylo

SWARM (22/11/2013)



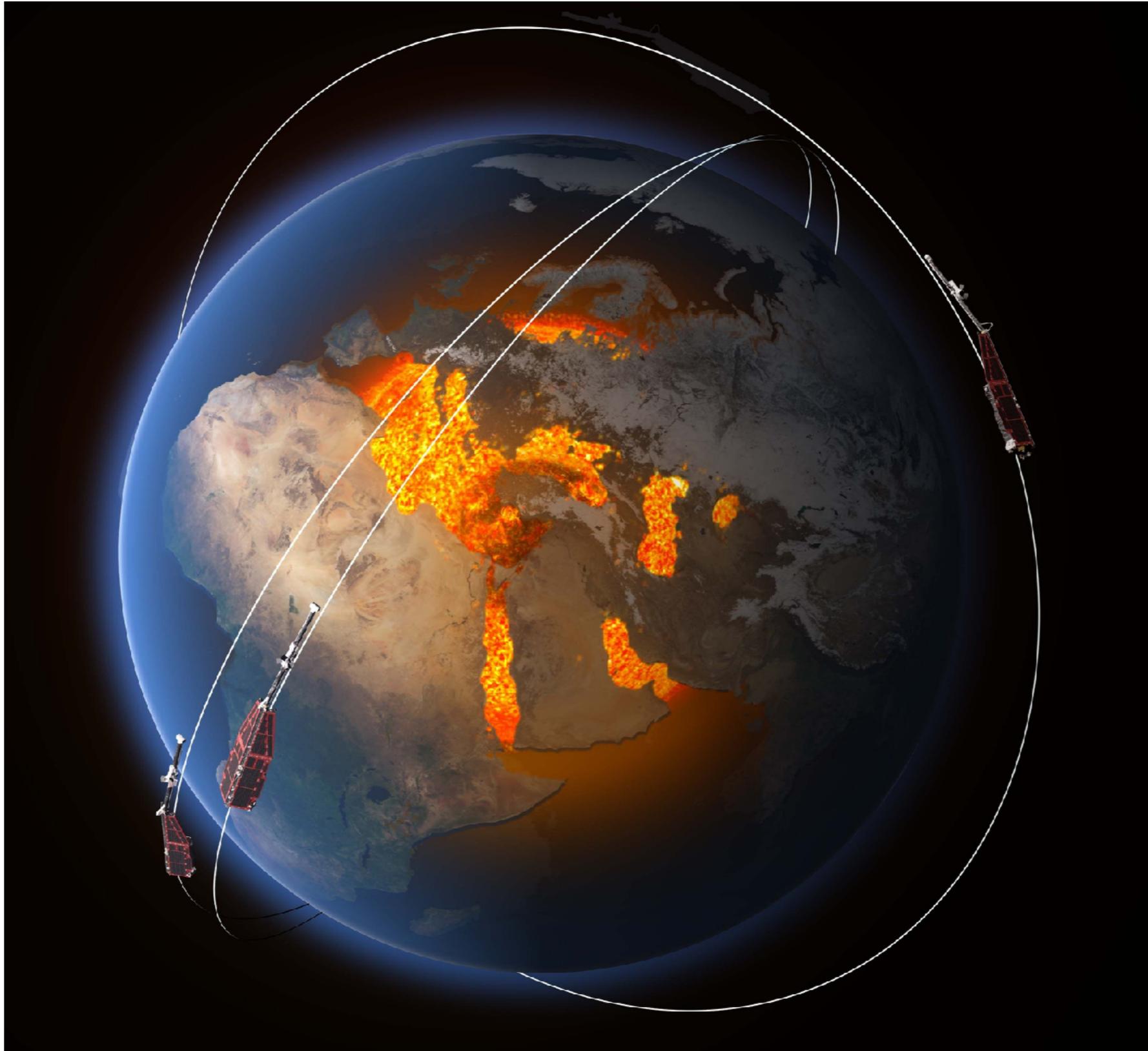
3.2 Mesure du champ terrestre

Ørsted



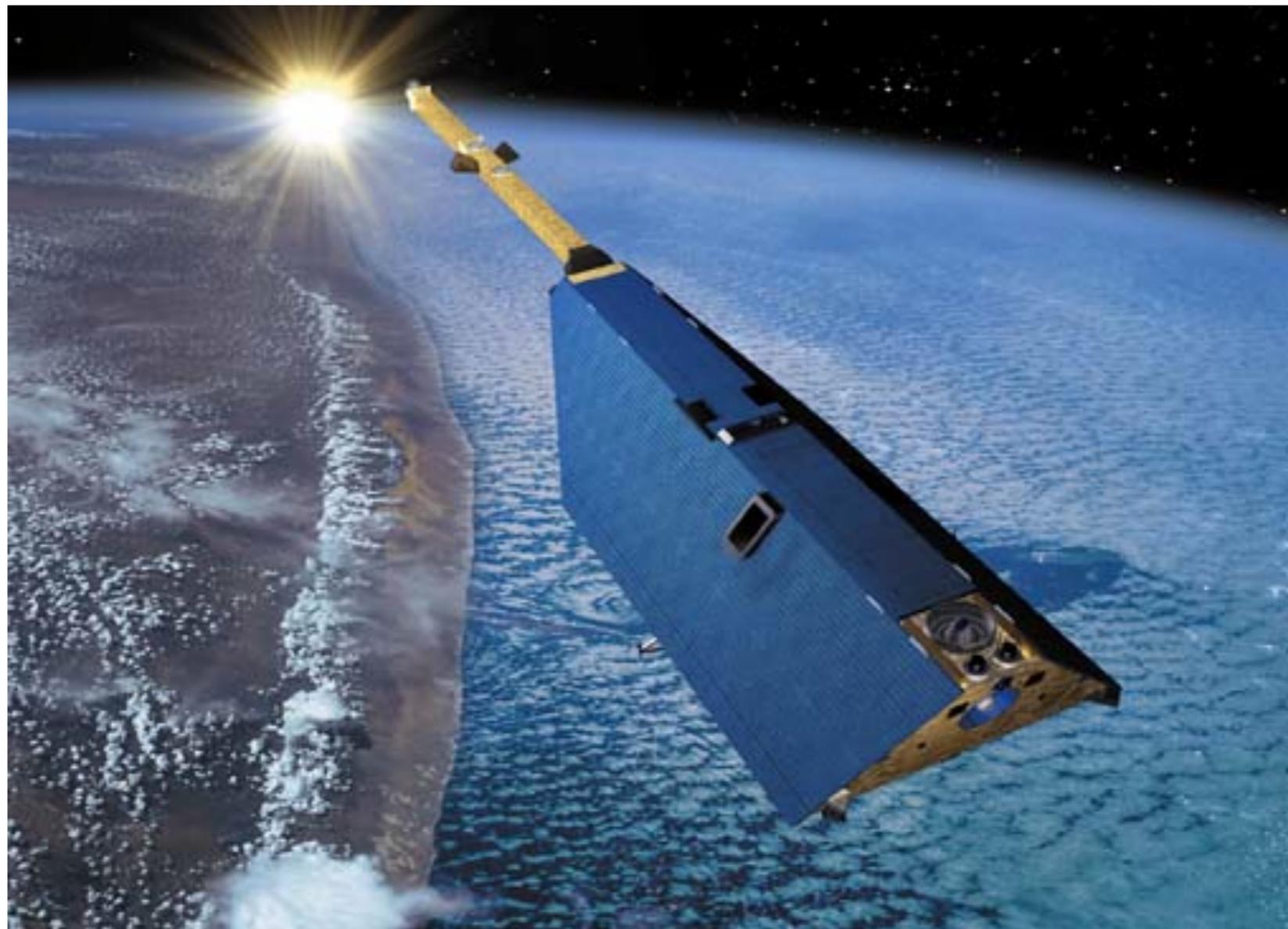
3: Le Champ magnétique terrestre

3.2 Mesure du champ terrestre



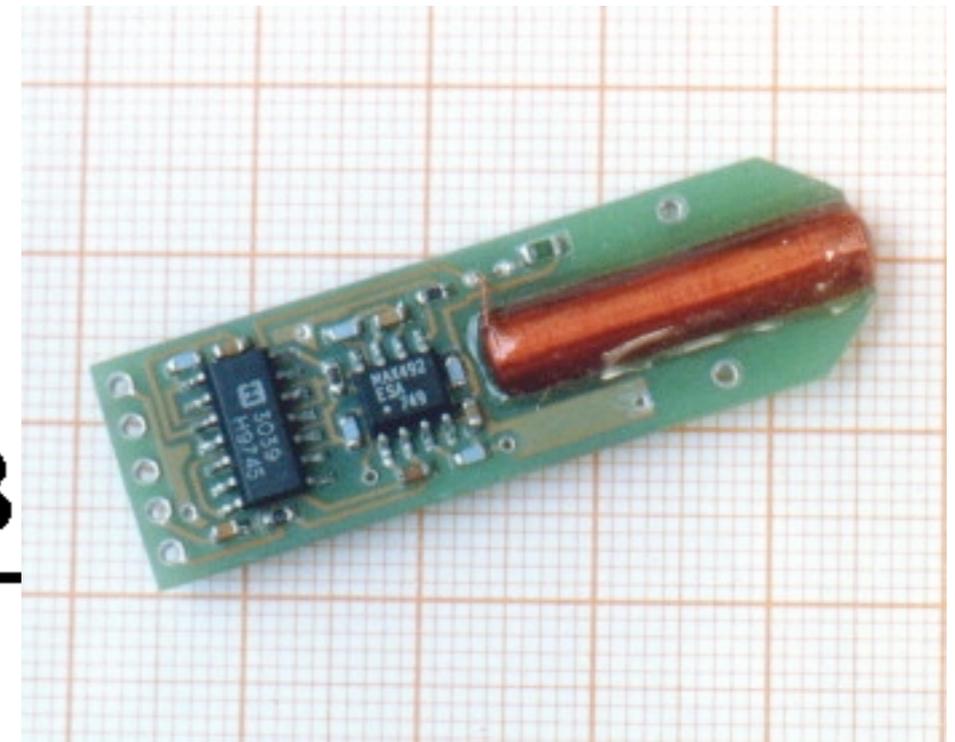
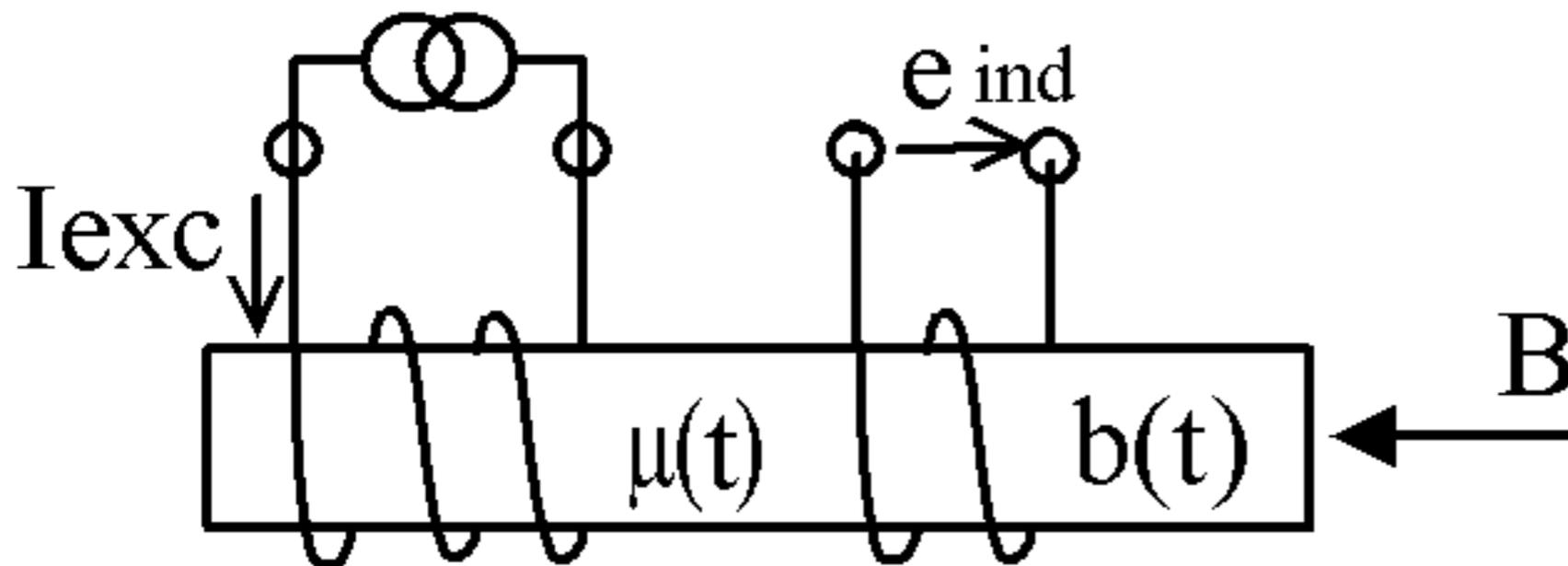
3.2 Mesure du champ terrestre

Mesures satellites



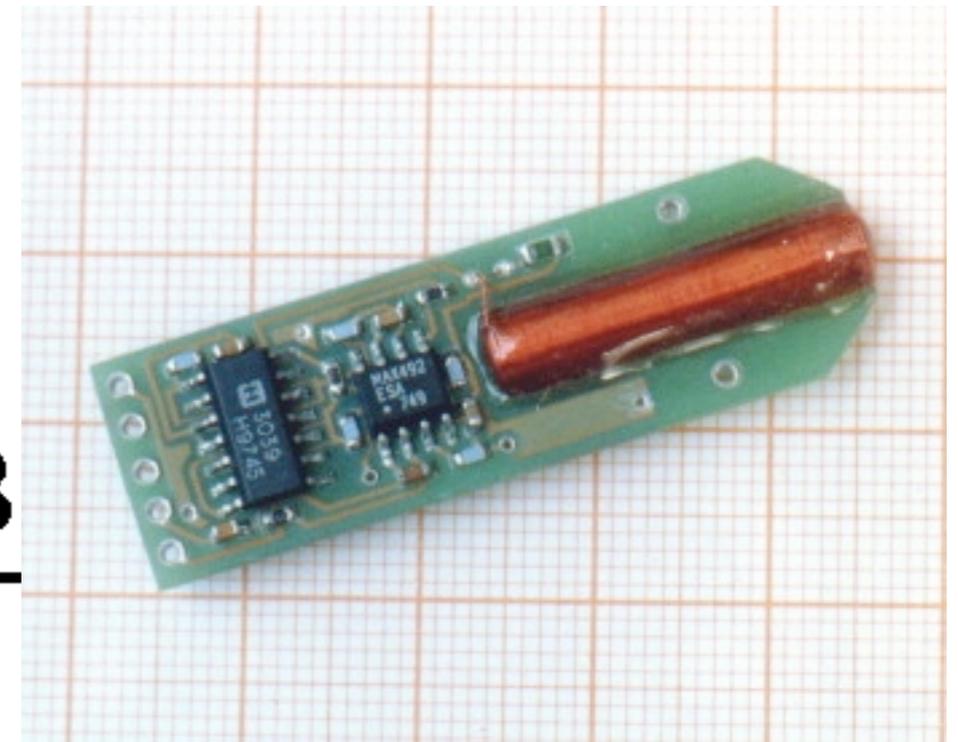
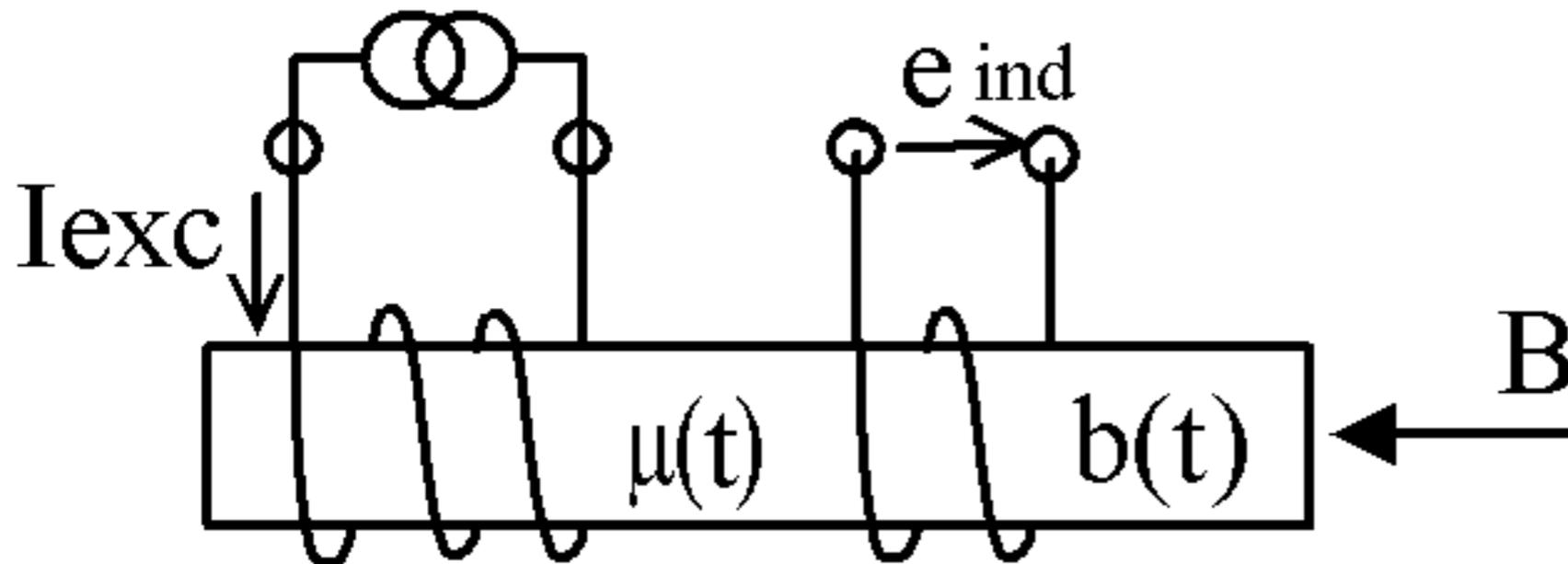
3.2 Mesure du champ terrestre

Magnétomètre Fluxgate (plage de mesure = 0.1 à 500 μT)



3.2 Mesure du champ terrestre

Magnétomètre Fluxgate (plage de mesure = 0.1 à 500 μT)

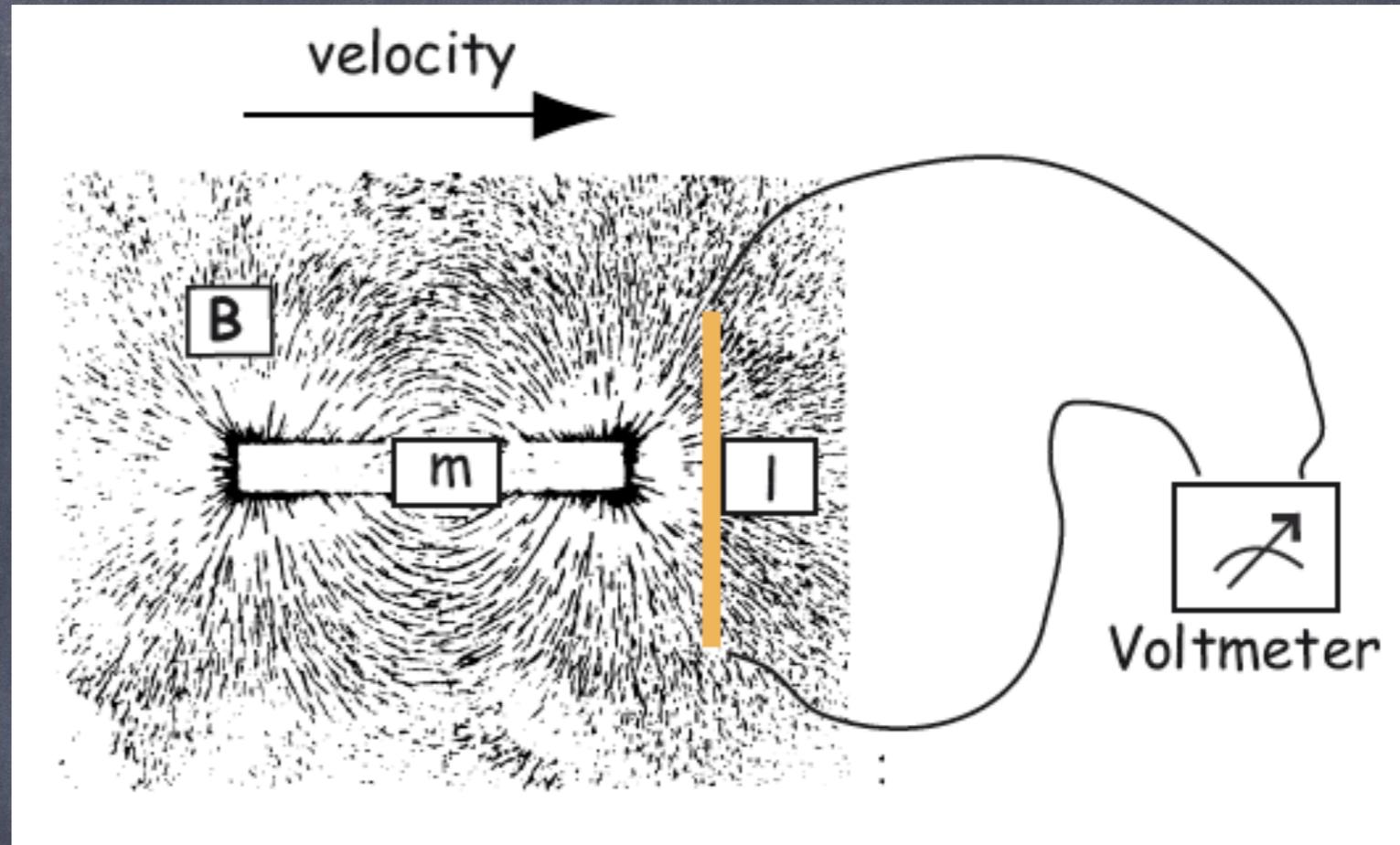


«Porte de Flux» : La tension mesurée sur $e_{ind} = 0$ quand le matériau est saturé, $\neq 0$ en dehors .

En présence d'un champ B , la courbe de saturation n'est plus symétrique. Le principe de mesure repose sur la mesure de cette dissymétrie.

1.4 : Le flux magnétique

Dans cette expérience, un moment magnétique (m) crée une induction magnétique B . Si l'on déplace la source avec une vitesse v , cela crée une tension électrique V dans un conducteur de longueur l .



vitesse m/s

$$V = v \cdot l \cdot B$$

tension en Volt

Donc $B = \left[\frac{V \cdot s}{m^2} \right]$
 Tesla

1.4 : Le flux magnétique

Loi de Faraday

Une autre façon de voir les choses est de considérer que l'induction magnétique est une densité de flux

un incrément de flux $d\phi = B \underbrace{dA}_{\text{incrément d'aire}}$

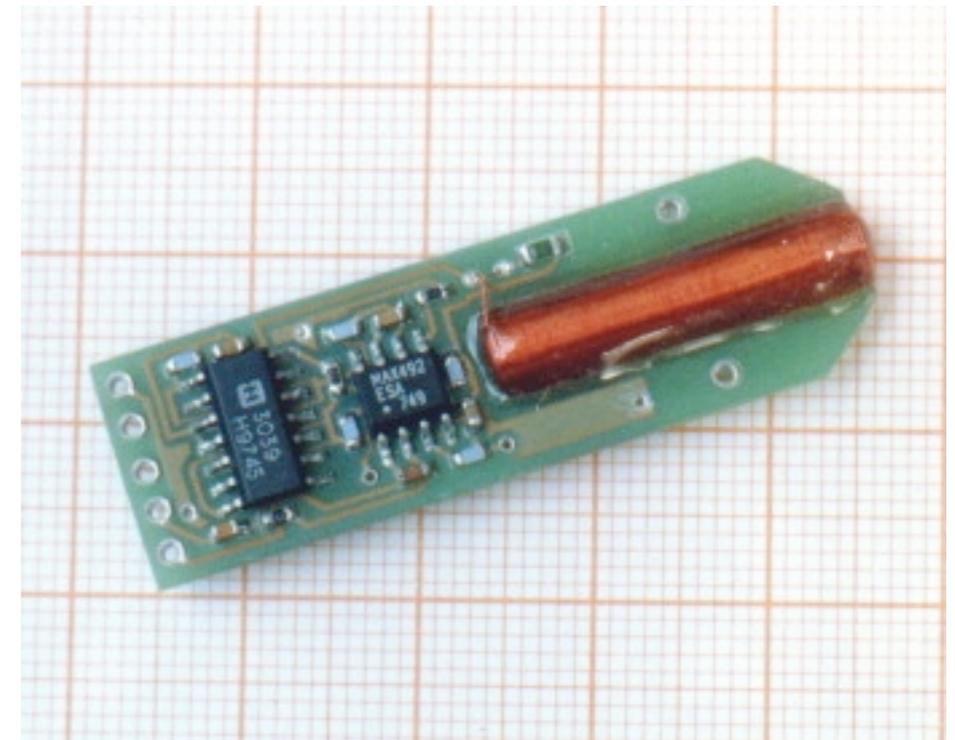
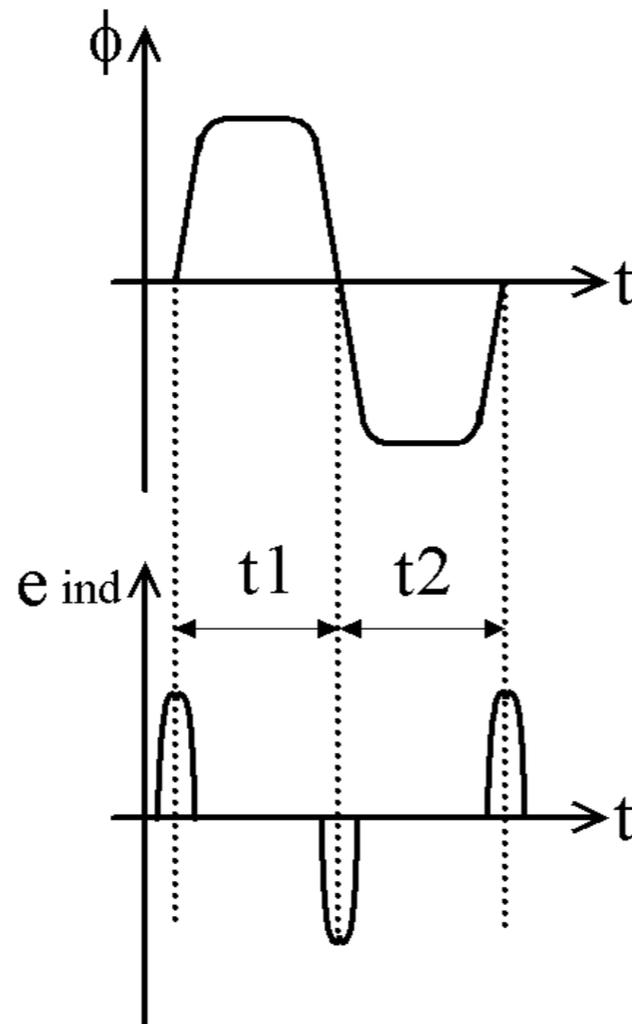
avec $dA = \underbrace{l}_{\text{longueur du conducteur}} \times \frac{ds}{dt} \leftarrow \text{déplacement}$
 $\leftarrow \text{temps}$

on a donc $\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\Delta}{dt} B, l = v B l = \mathcal{V}$

L'induction magnétique peut être quantifiée quand un conducteur électrique se déplace dans un champ d'induction ou vice versa.

3.2 Mesure du champ terrestre

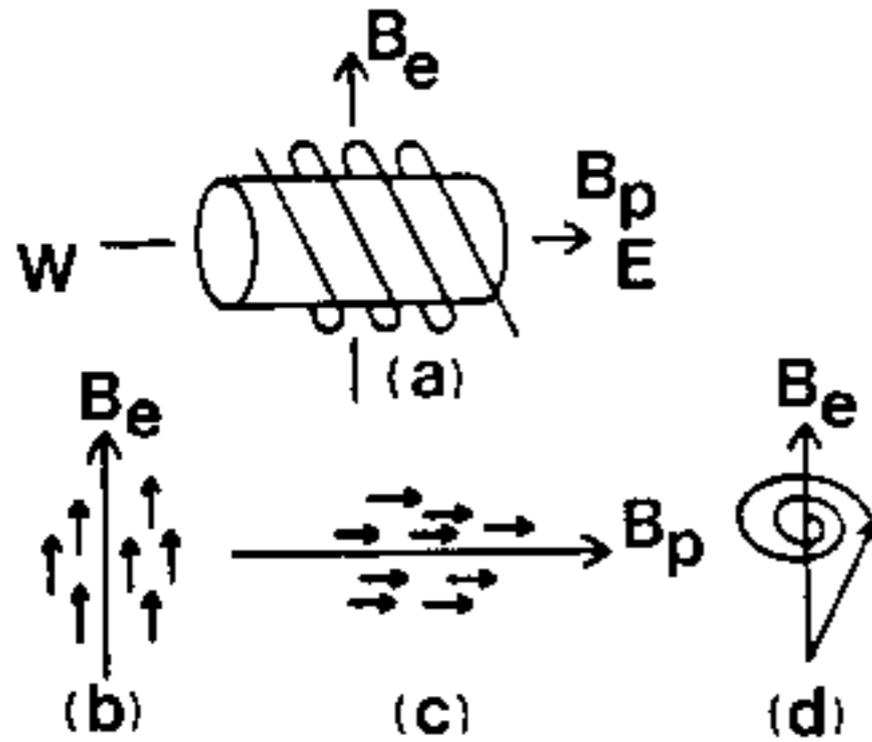
Magnétomètre Fluxgate (plage de mesure = 0.1 à 500 μT)



En présence d'un champ B , la courbe de saturation n'est plus symétrique. Le principe de mesure repose sur la mesure de cette dissymétrie.

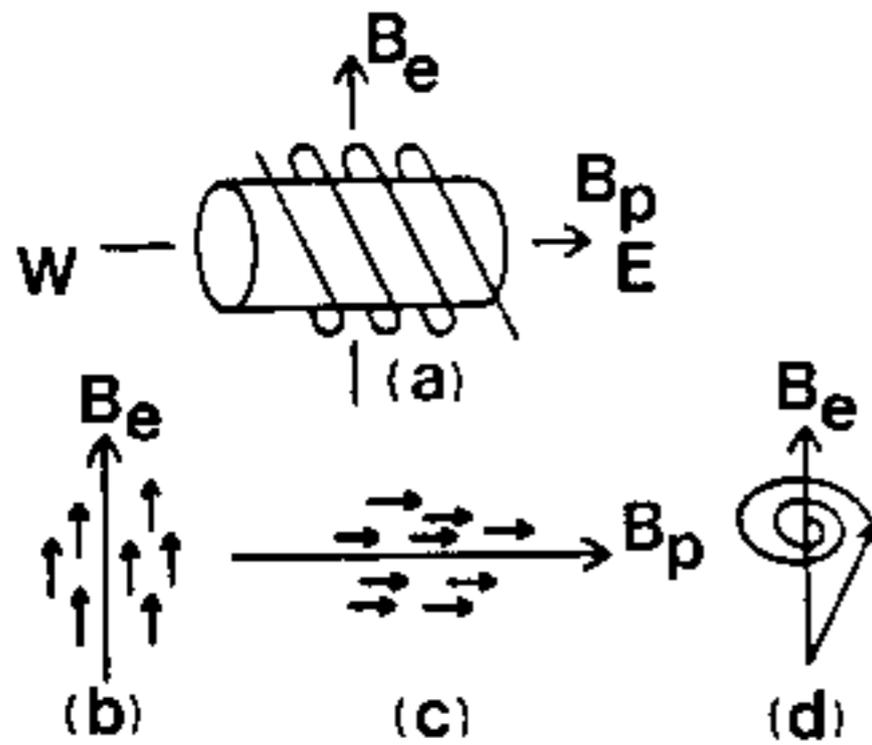
3.2 Mesure du champ terrestre

Magnétomètre à Protons (**intensité seulement**):



3.2 Mesure du champ terrestre

Magnétomètre à Protons (**intensité seulement**):



Le moment magnétique acquis se met à précessionner autour de B_{Earth} , avec une fréquence f (fréquence de Larmor) induisant une "fem" de fréquence identique dans la bobine

$$2\pi f = \gamma_p \|\vec{B}_E\|$$

avec $\gamma_p = 2.67513 \times 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ T}^{-1}$

3: Le Champ magnétique terrestre

3.2 Mesure du champ terrestre



3: Le Champ magnétique terrestre

3.2 Mesure du champ terrestre

(a)



(b)



3: Le Champ magnétique terrestre

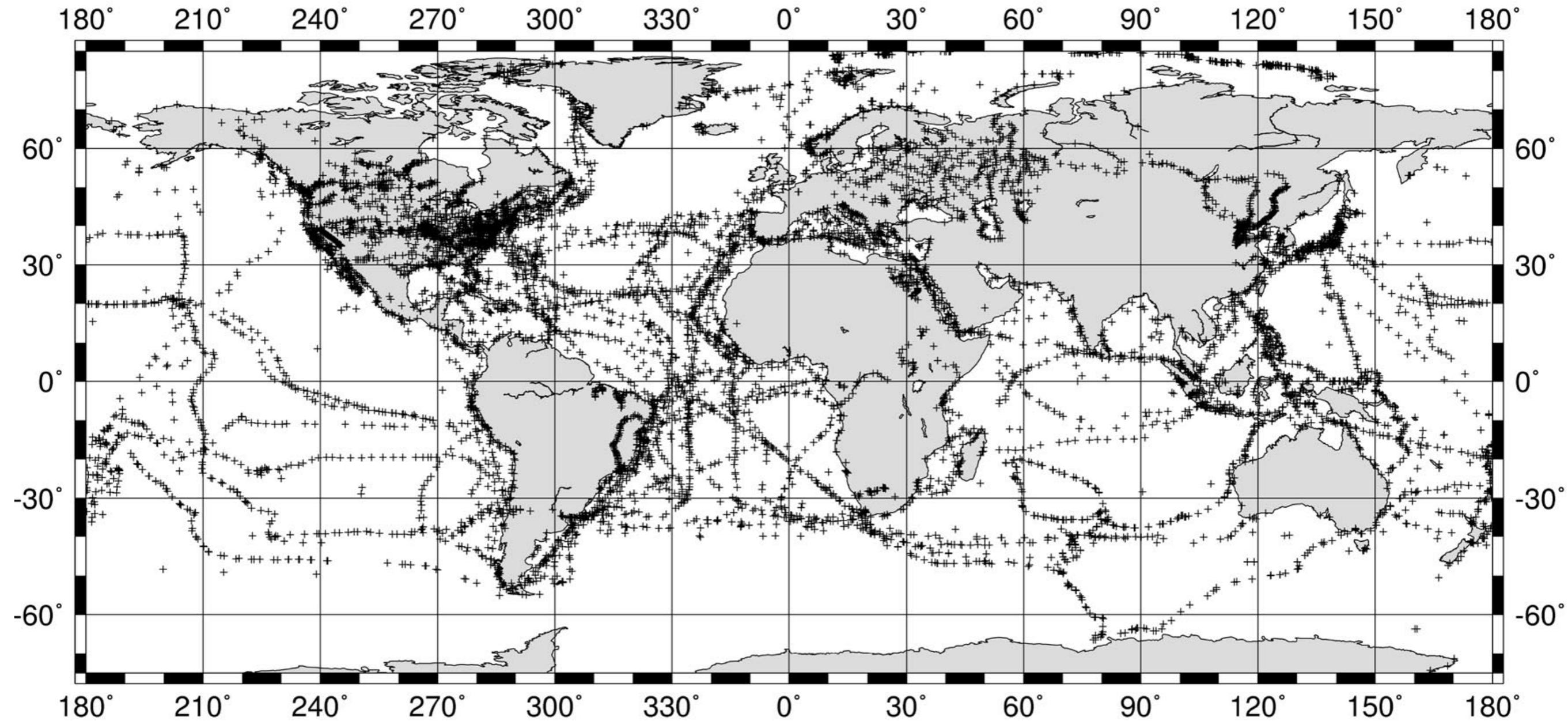
3.2 Mesure du champ terrestre



3: Le Champ magnétique terrestre

3.2 Mesure du champ terrestre

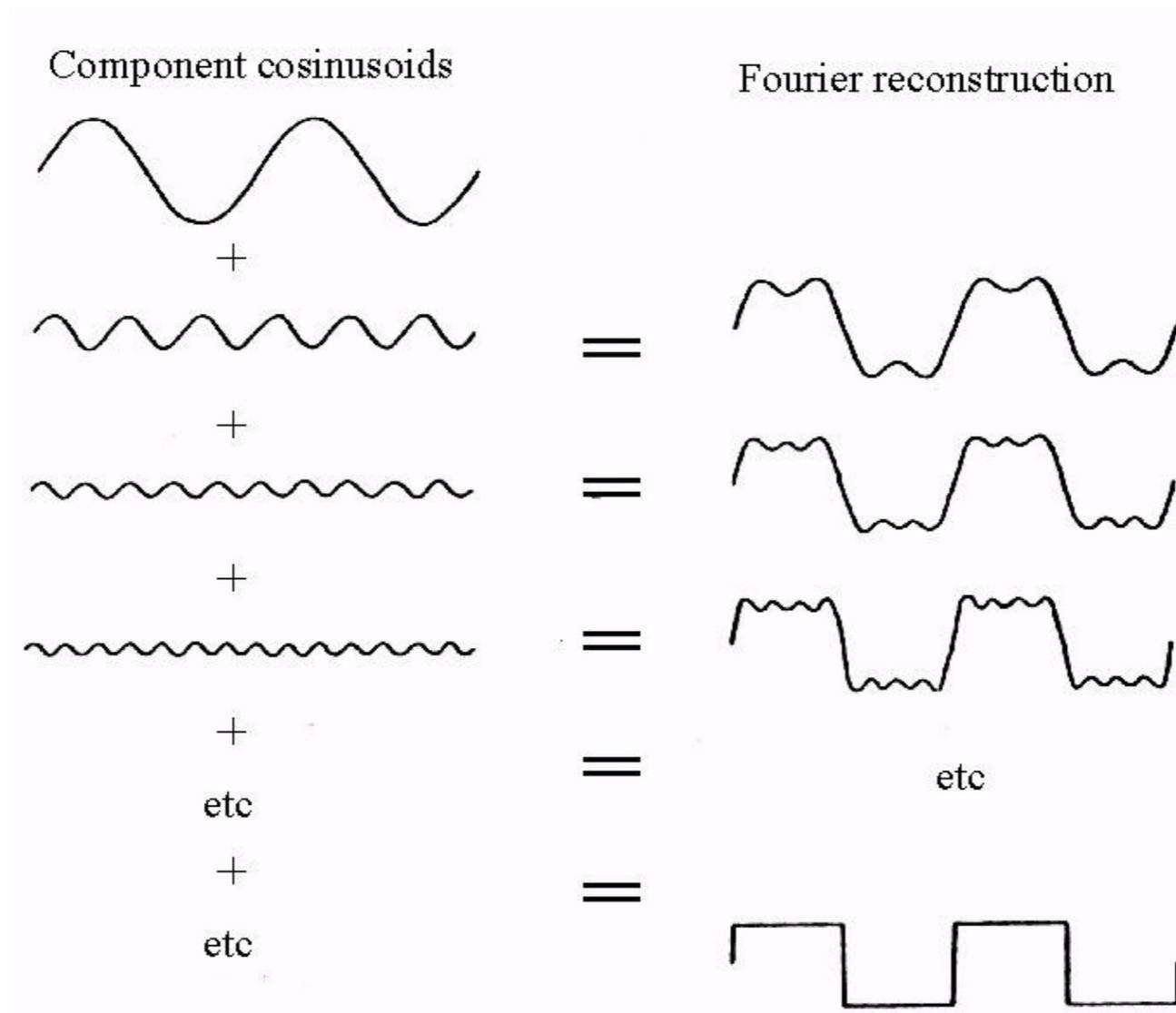
De 1590 à 1930: 151 560 Decl; 19 525 Incl, et 16 219 Intensités



3.3 Le champ magnétique de référence.

Une solution de l'équation de Laplace sur la sphère est donnée par un développement en harmoniques Sphériques (Gauss)

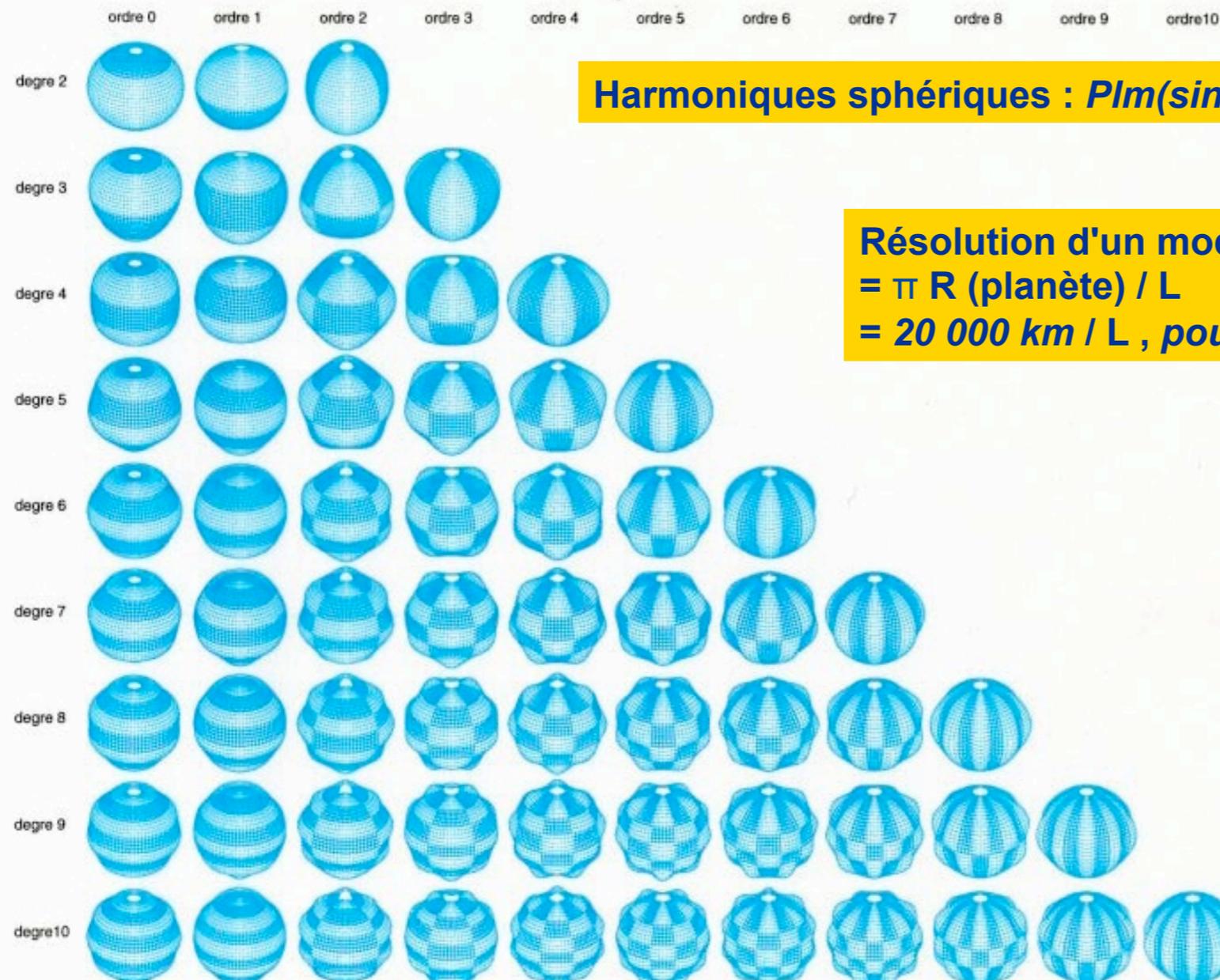
= equivalent des séries de Fourier.



3.3 Le champ magnétique de référence.

Une solution de l'équation de Laplace sur la sphère est donnée par un développement en harmoniques Sphériques (Gauss)

Harmoniques $P_{lm} \cos$



Harmoniques sphériques : $P_{lm}(\sin\phi) \cos m\lambda$, $P_{lm}(\sin\phi) \sin m\lambda$

Résolution d'un modèle
= πR (planète) / L
= 20 000 km / L , pour la Terre

3.3 Le champ magnétique de référence.

Une solution de l'équation de Laplace est, en coordonnées sphériques (r, θ, ϕ):

$$\Psi = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} \underbrace{(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi) P_l^m(\theta)}_{\text{Internal Sources}} + \left(\frac{r}{a}\right)^l \underbrace{(q_l^m \cos m\phi + s_l^m \sin m\phi) P_l^m(\theta)}_{\text{External Sources}} \right]$$



K.F. Gauss
(1777-1855)

3.3 Le champ magnétique de référence.

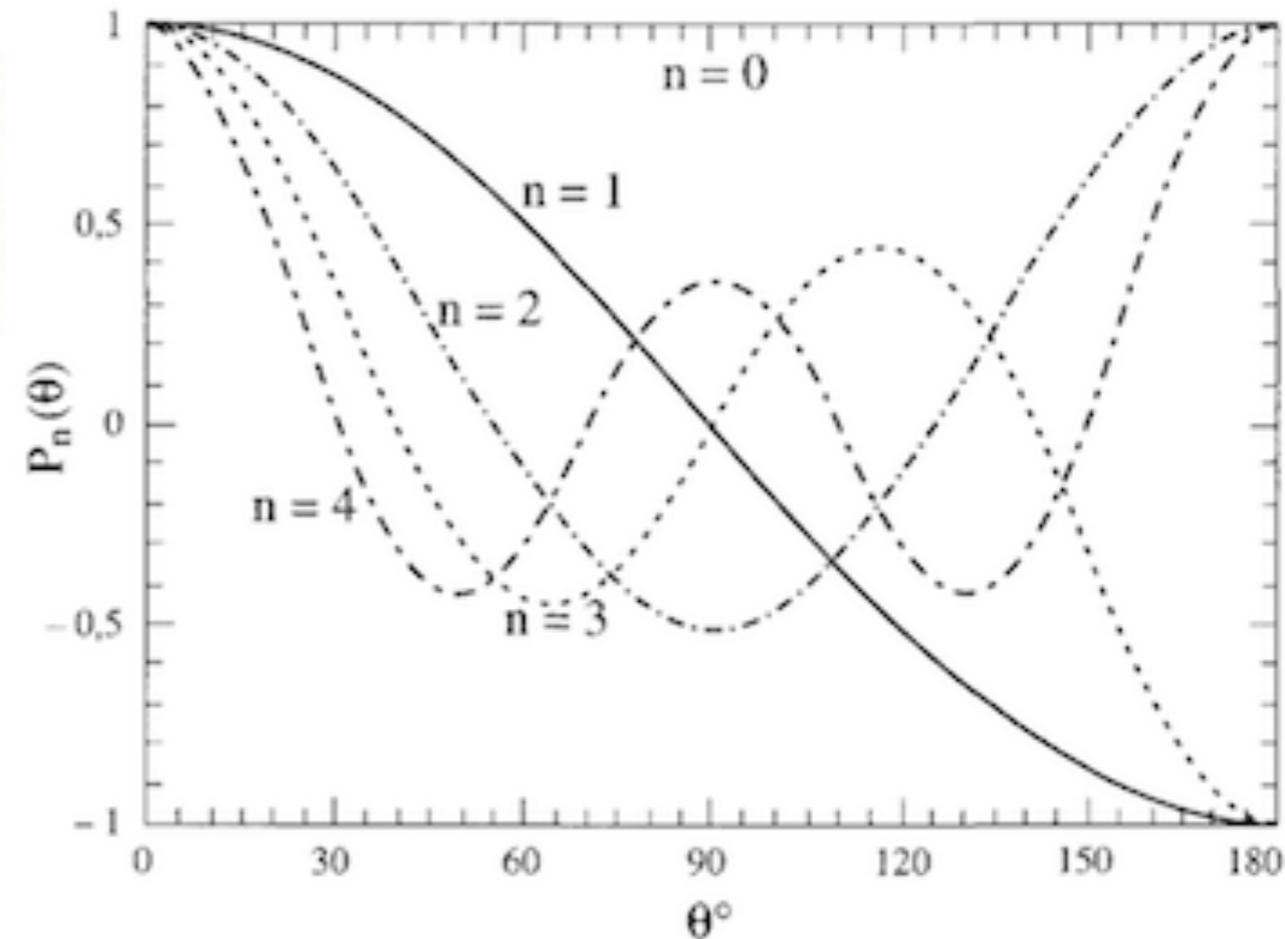
Une solution de l'équation de Laplace est, en coordonnées sphériques (r, θ, ϕ):

$$\Psi = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} (g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi) P_l^m(\theta) + \left(\frac{r}{a}\right)^l (q_l^m \cos m\phi + s_l^m \sin m\phi) P_l^m(\theta) \right]$$

Internal Sources
External Sources

a = rayon de la Terre

P_l^m = Polynomes proportionnels à des polynomes de Legendre.



3.3 Le champ magnétique de référence.

Une solution de l'équation de Laplace est, en coordonnées sphériques (r, θ, ϕ):

$$\Psi = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} (g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi) P_l^m(\theta) + \left(\frac{r}{a}\right)^l (q_l^m \cos m\phi + s_l^m \sin m\phi) P_l^m(\theta) \right]$$

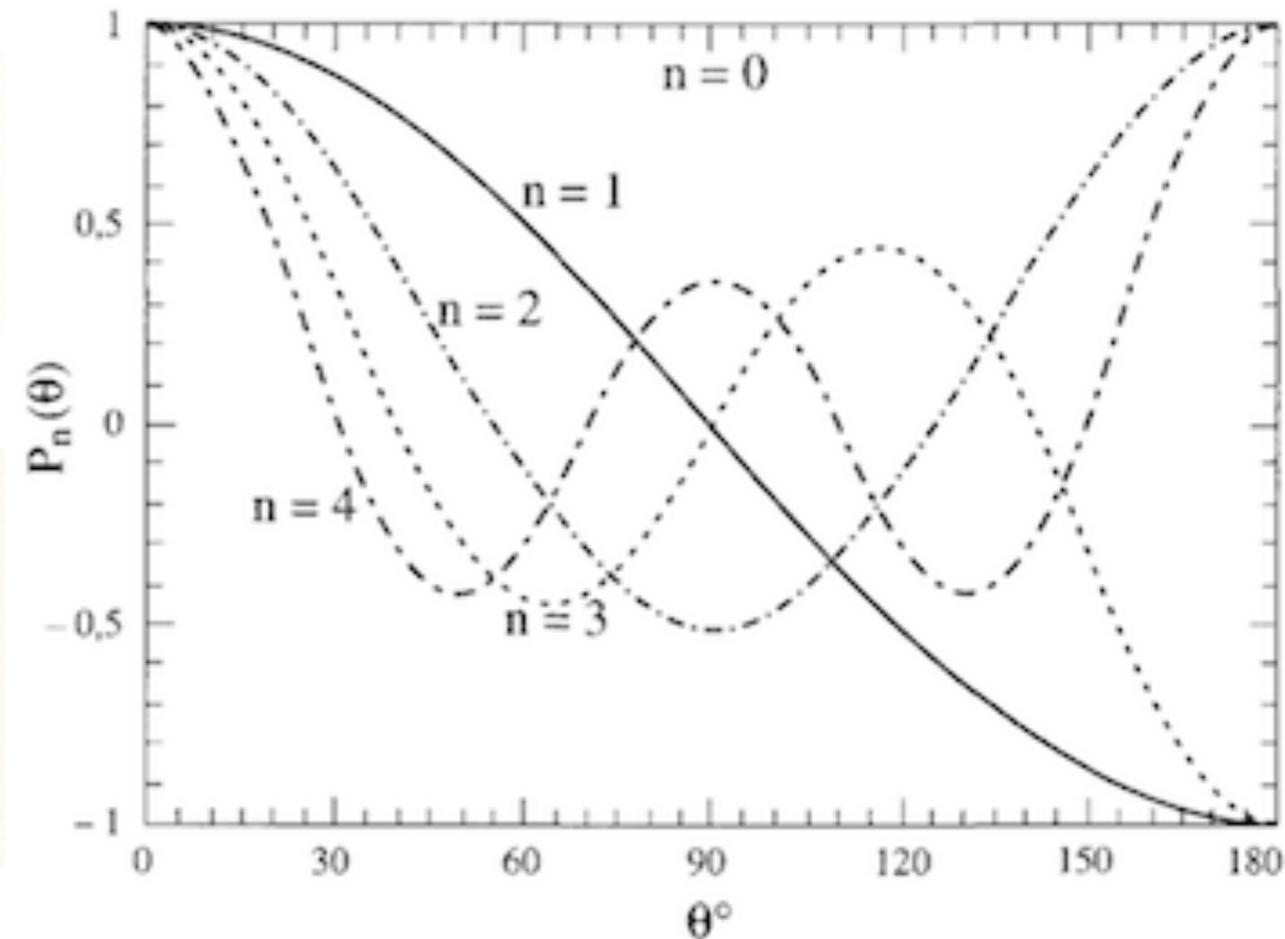
Internal Sources
External Sources

a = rayon de la Terre

P_l^m = Polynomes proportionnels à des polynomes de Legendre.

$$P_1^0 = \cos \theta \quad P_2^0 = \frac{1}{4} (3 \cos 2\theta + 1)$$

$$P_3^0 = \frac{1}{8} (5 \cos 3\theta + 3 \cos \theta)$$



3.3 Le champ magnétique de référence.

Une solution de l'équation de Laplace est, en coordonnées sphériques (r, θ, ϕ):

$$\Psi = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left[\left(\frac{a}{r}\right)^{l+1} \underbrace{(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi)}_{\text{Internal Sources}} P_l^m(\theta) + \left(\frac{r}{a}\right)^l \underbrace{(q_l^m \cos m\phi + s_l^m \sin m\phi)}_{\text{External Sources}} P_l^m(\theta) \right]$$

a = rayon de la Terre

P_l^m = Polynomes proportionnels
à des polynomes de Legendre.

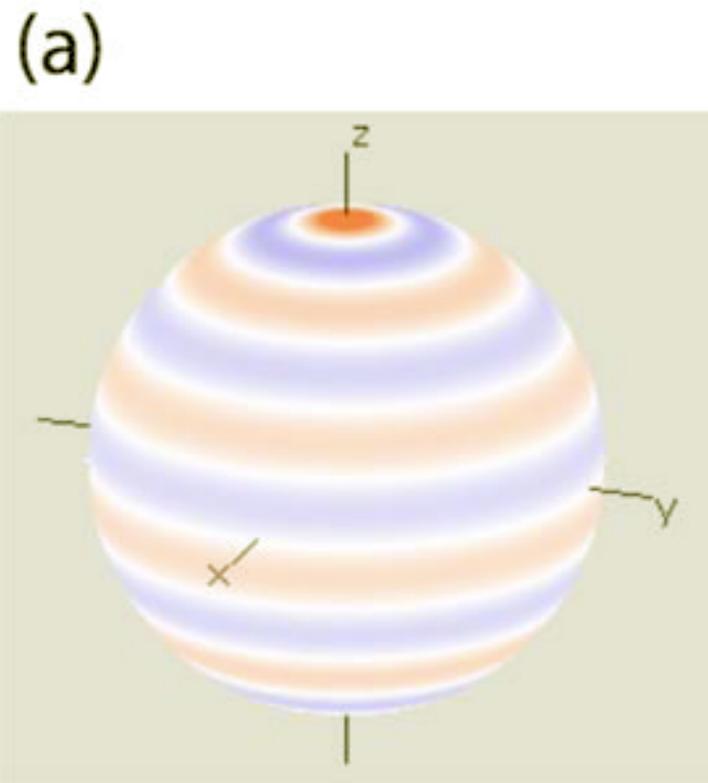
$g_e^m, h_e^m, q_e^m, s_e^m$: coefficients de Gauss.



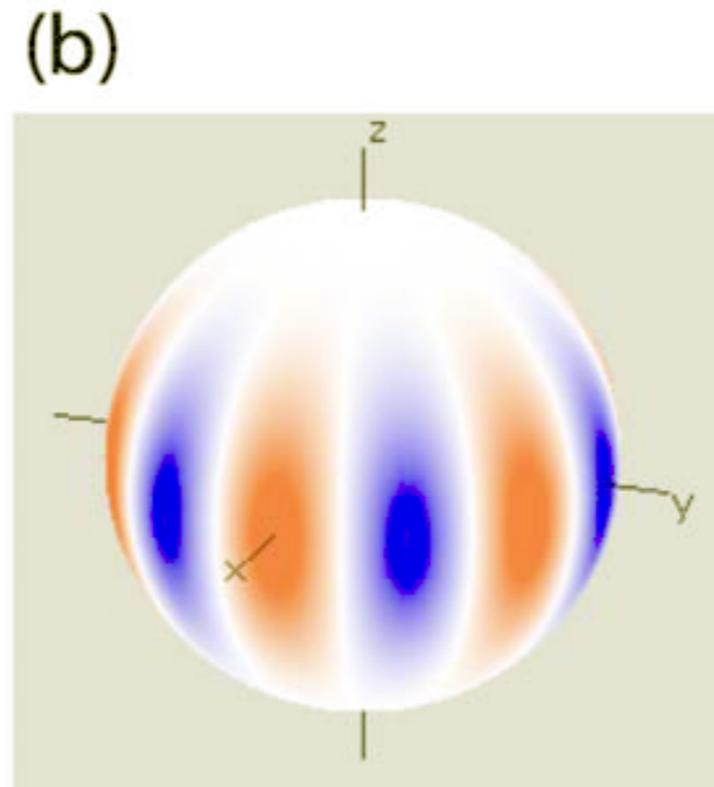
K.F. Gauss
(1777-1855)

3.3 Le champ magnétique de référence.

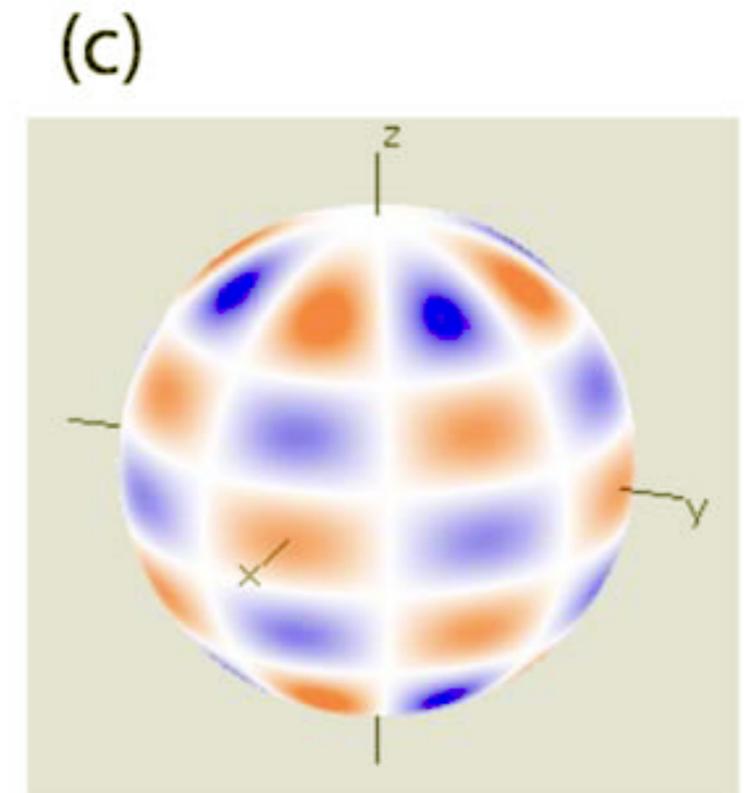
Formalisme extrêmement fécond !!!



$l=11, m=0$



$l=6, m=6$



$l=8, m=4$

3: Le Champ magnétique terrestre

3.3 Le champ magnétique de référence.

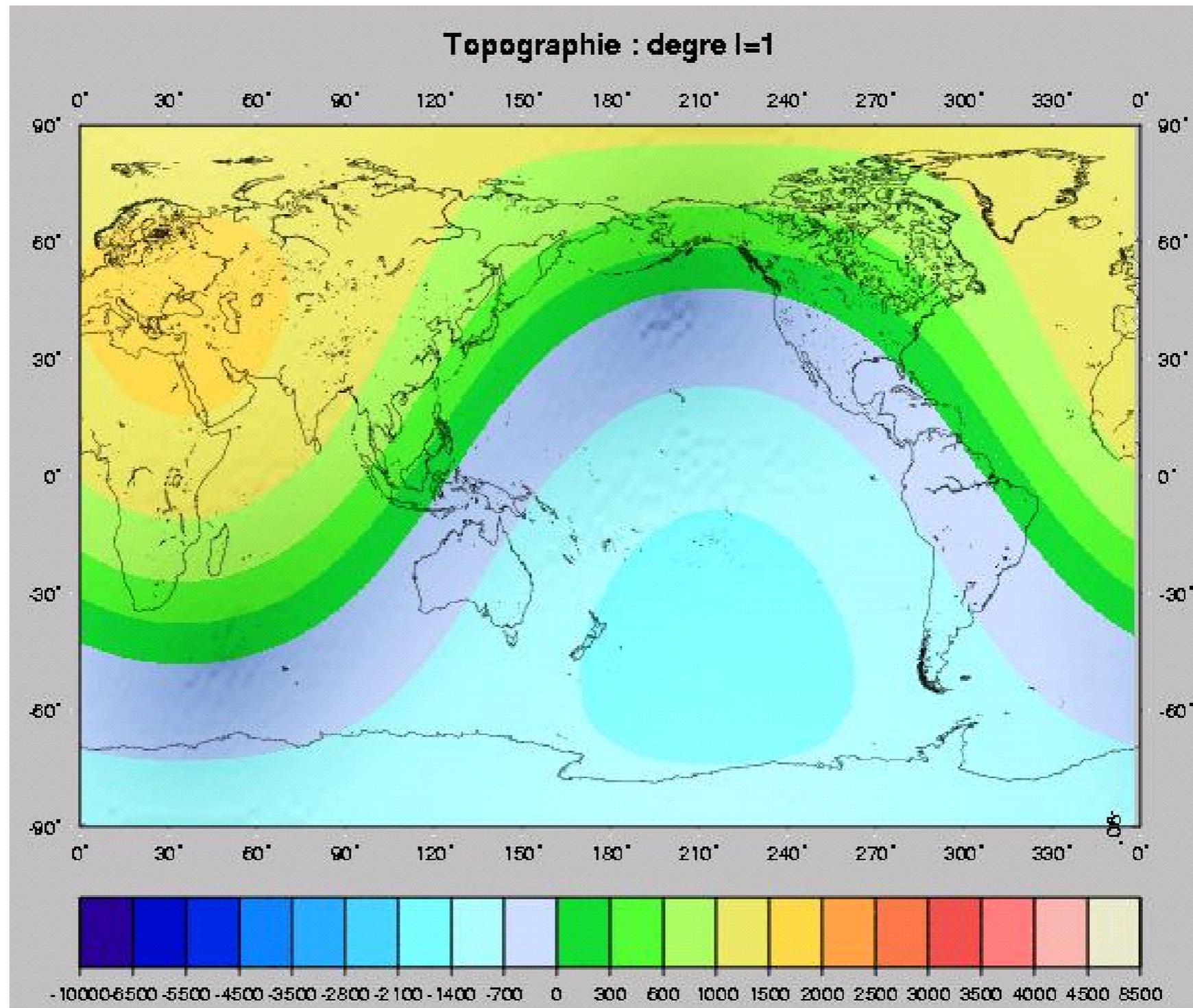
l	m	g (nT)	h (nT)	l	m	g (nT)	h (nT)
1	0	-29614.72	0	5	0	-216.82	0
1	1	-1727.74	5186.27	5	1	350.96	43.69
2	0	-2267.11	0	5	2	222.36	171.65
2	1	3071.78	-2477.69	5	3	-130.72	-133.88
2	2	1672.18	-457.63	5	4	-168.53	-40.26
3	0	1340.85	0	5	5	-11.83	106.79
3	1	-2289.53	-226.99	6	0	72.34	0
3	2	1252.52	296.26	6	1	67.76	-17.09
3	3	715.1	-492.28	6	2	73.98	63.84
4	0	935.35	0	6	3	-161.06	65.19
4	1	786.71	271.92	6	4	-5.13	-61.34
4	2	250.81	-231.63	6	5	17.03	1.33
4	3	-404.66	118.54	6	6	-90.53	44.11
4	4	109.91	-303.88				

3: Le Champ magnétique terrestre

3.3 Le champ magnétique de référence.

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/L3-cour-ylm.pdf>

Topographie de degré $n = 1$

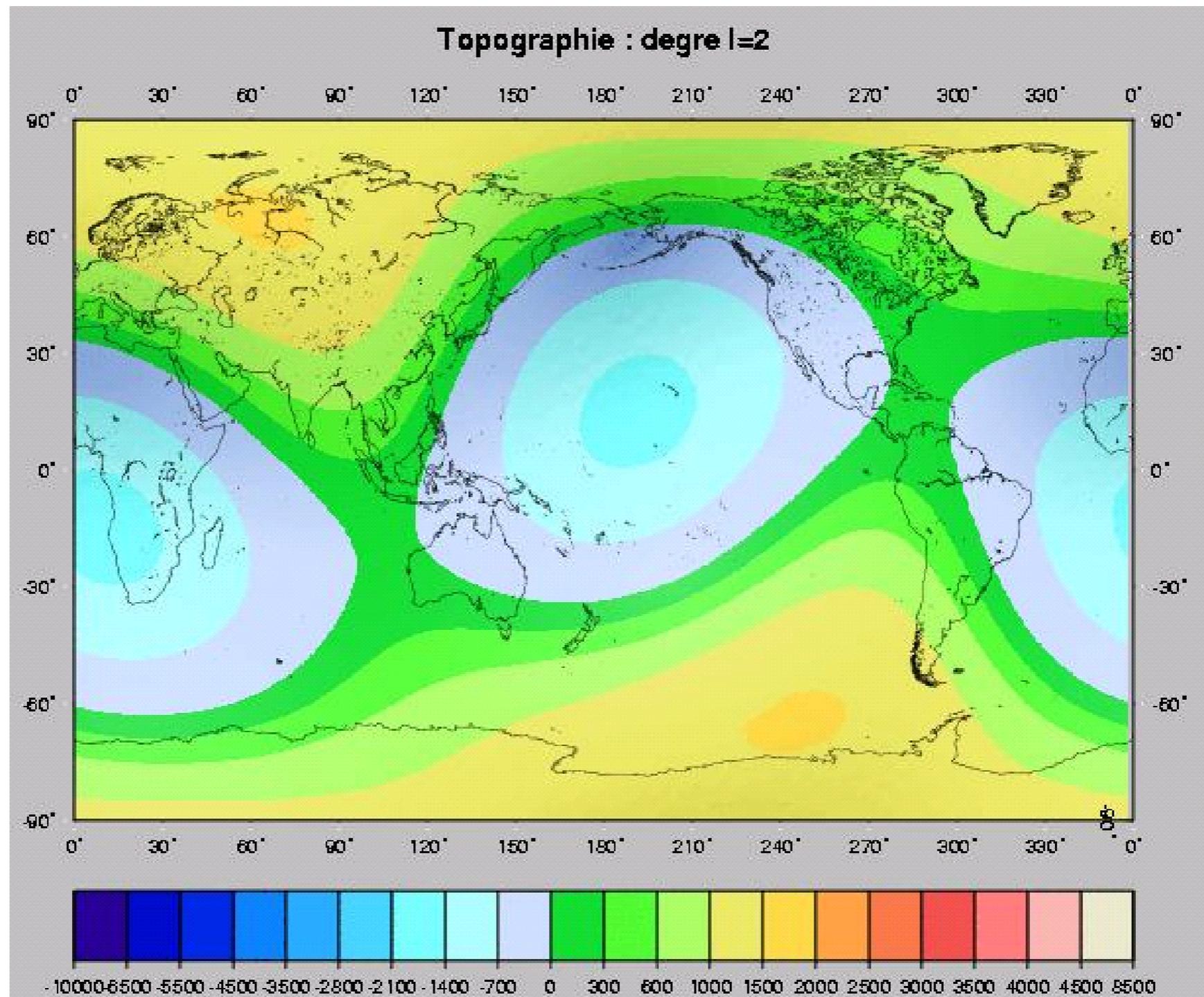


3: Le Champ magnétique terrestre

3.3 Le champ magnétique de référence.

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/L3-cour-ylm.pdf>

Topographie de degré $n = 2$

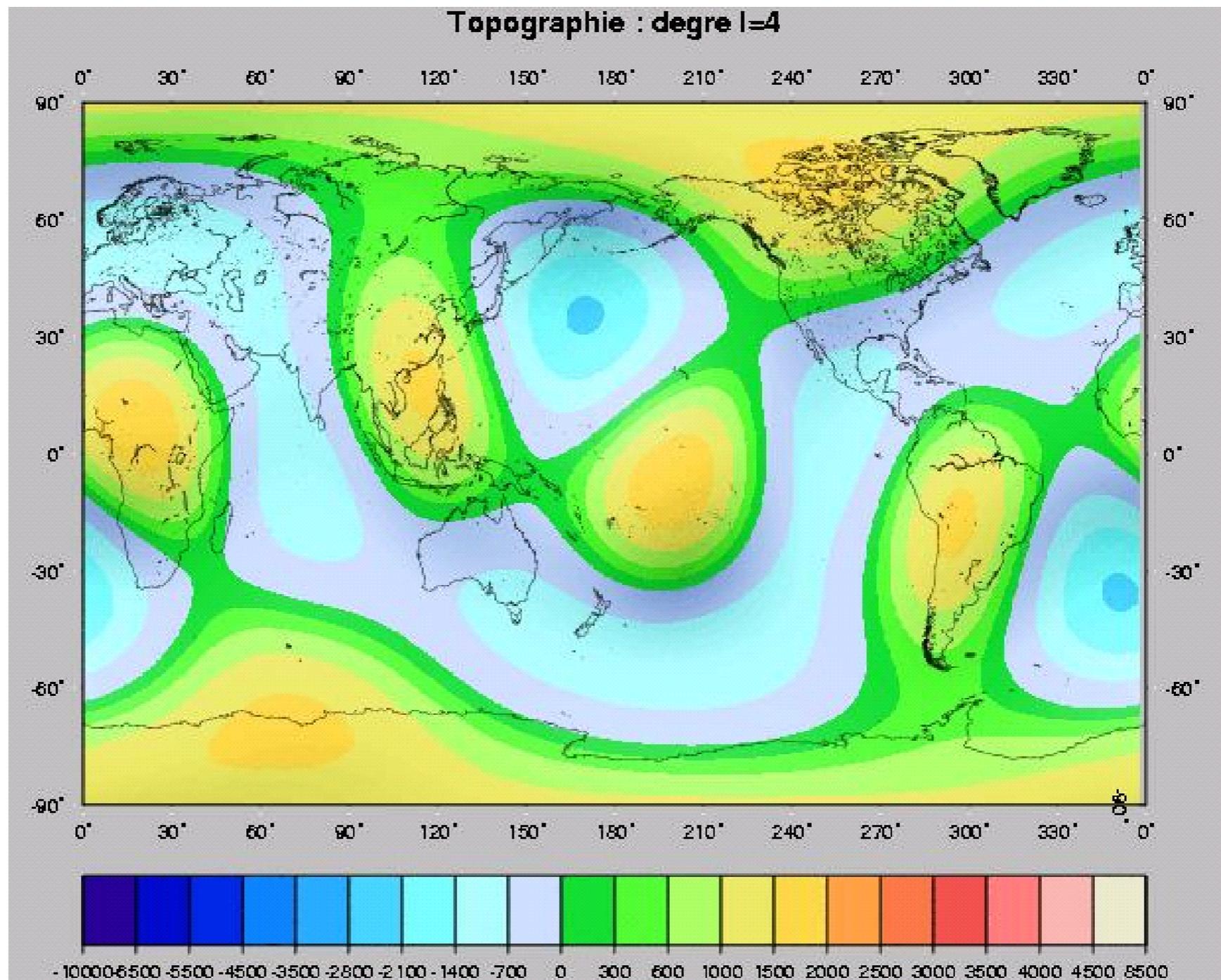


3: Le Champ magnétique terrestre

3.3 Le champ magnétique de référence.

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/L3-cour-ylm.pdf>

Topographie de degré $n = 4$

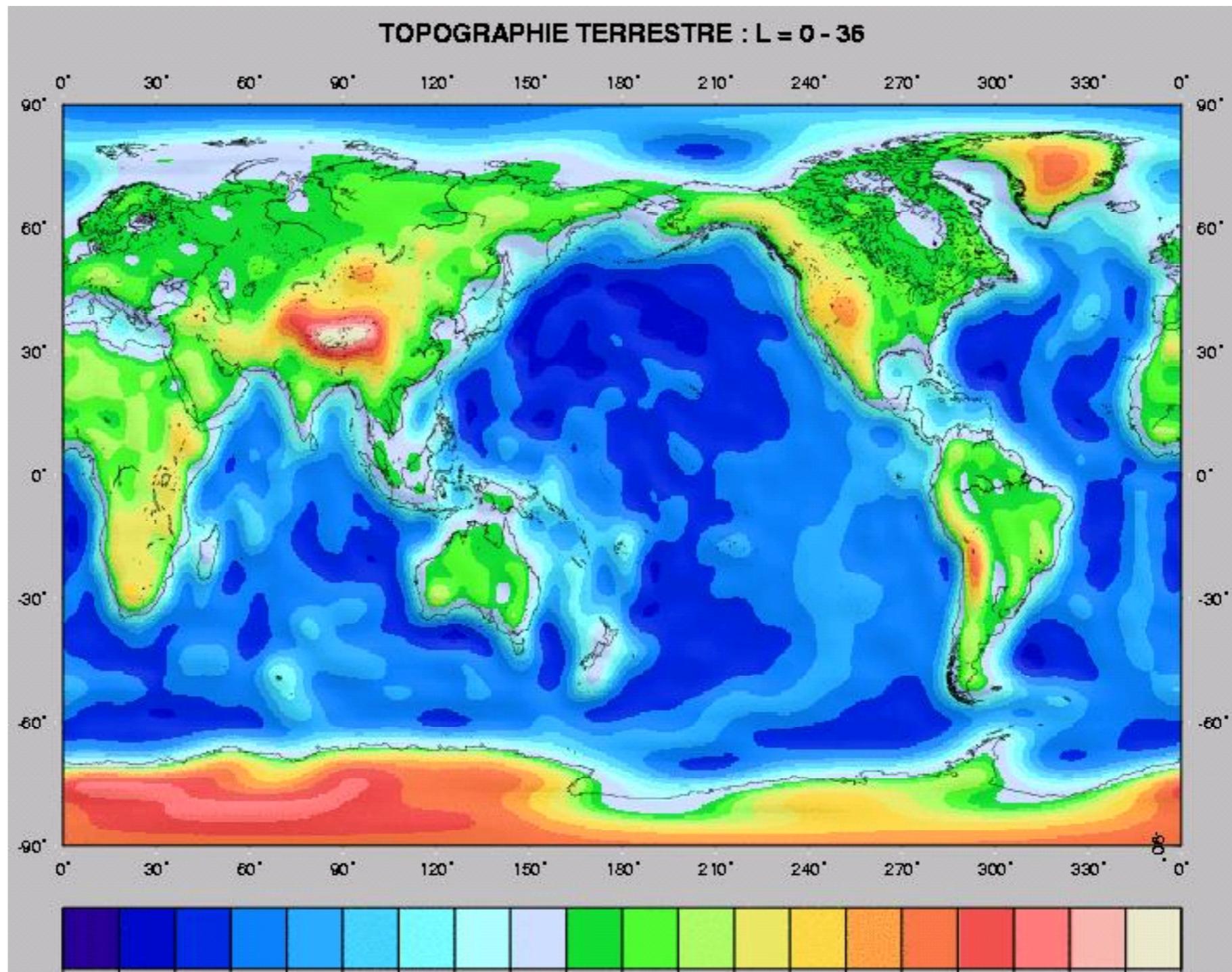


3: Le Champ magnétique terrestre

3.3 Le champ magnétique de référence.

<http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/L3-cour-ylm.pdf>

Topographie sommée sur les degrés $n = 1..36$



3.3 Le champ magnétique de référence.

Le formalisme de Gauss permet de mettre en évidence :

Champ d'origine externe: $< 1\%$ du champ total.

Champ d'origine interne: $> 99\%$ du champ total.

Champ principal
Champ crustal.

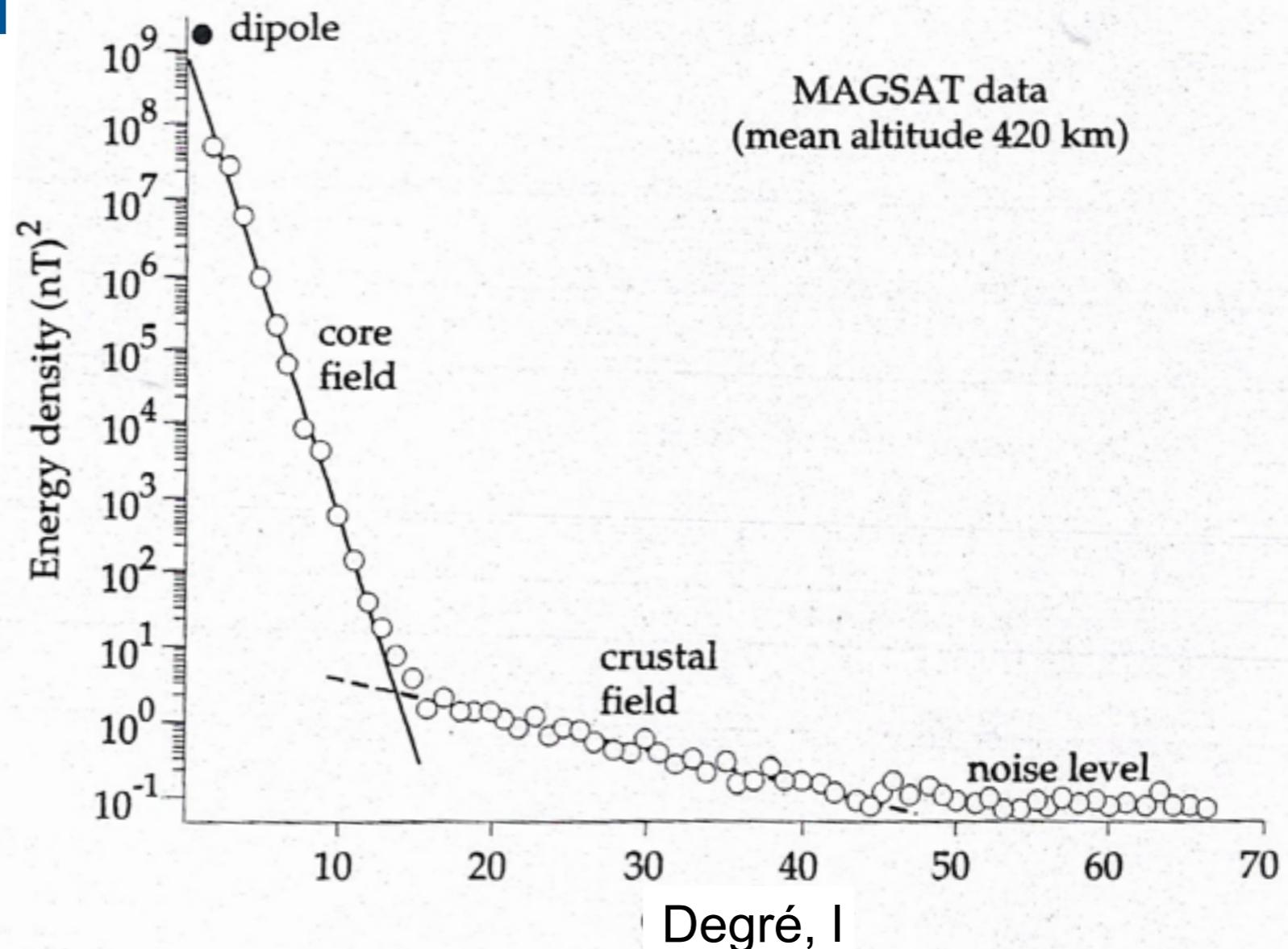
3.3 Le champ magnétique de référence.

Le formalisme de Gauss permet de mettre en évidence :

Champ d'origine externe: $< 1\%$ du champ total.

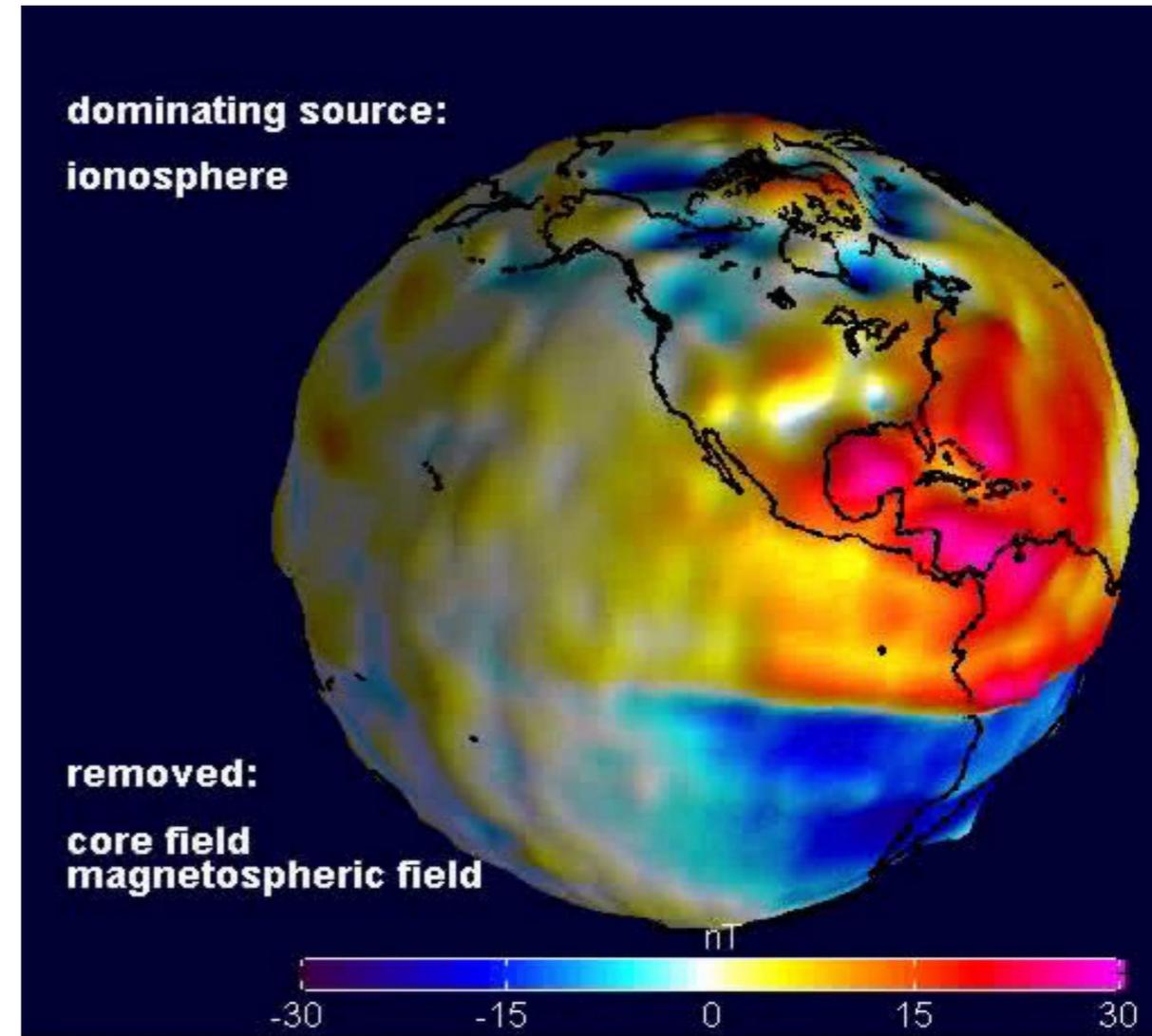
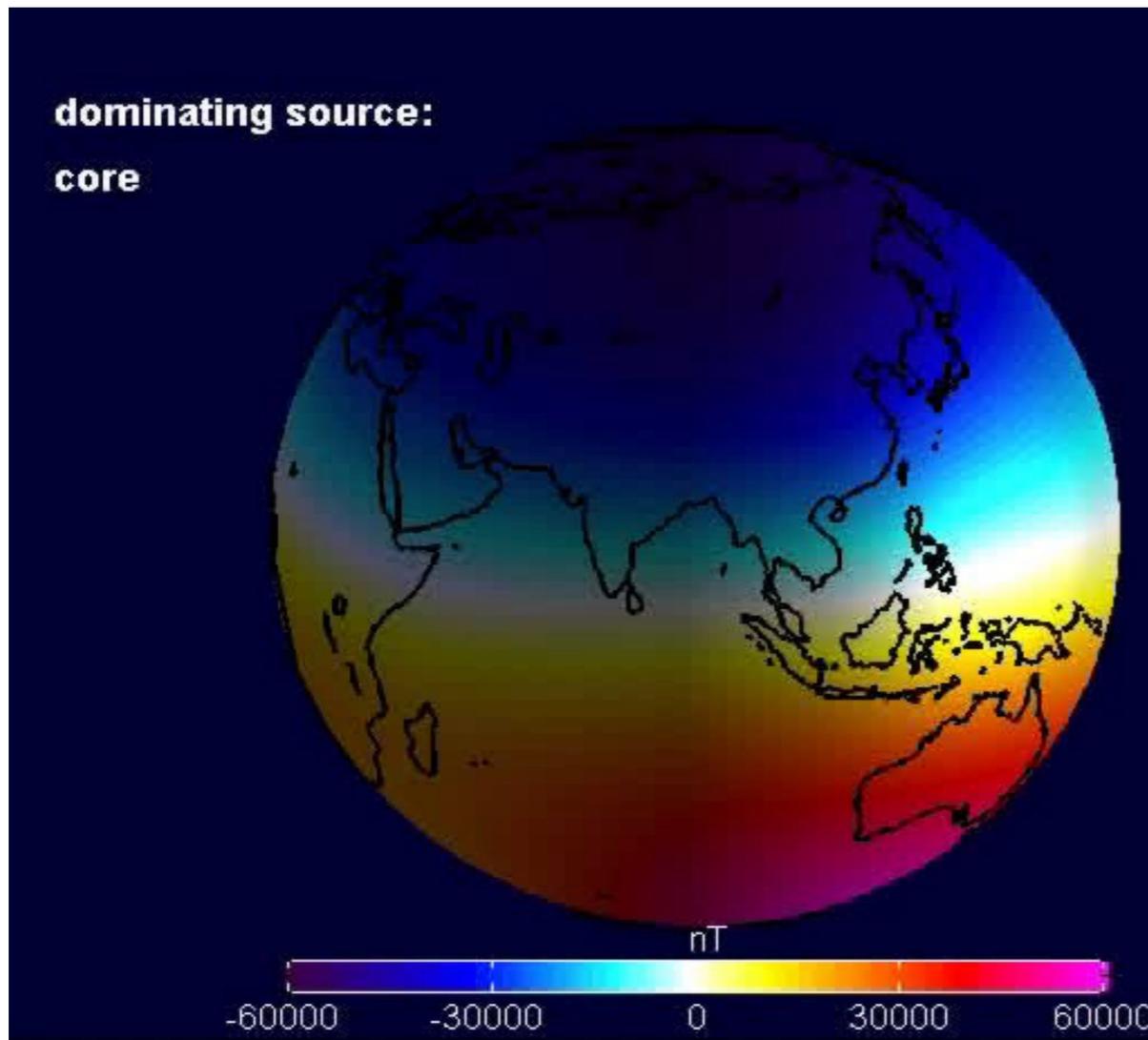
Champ d'origine interne: $> 99\%$ du champ total.

Champ principal
Champ crustal.



3.3 Le champ magnétique de référence.

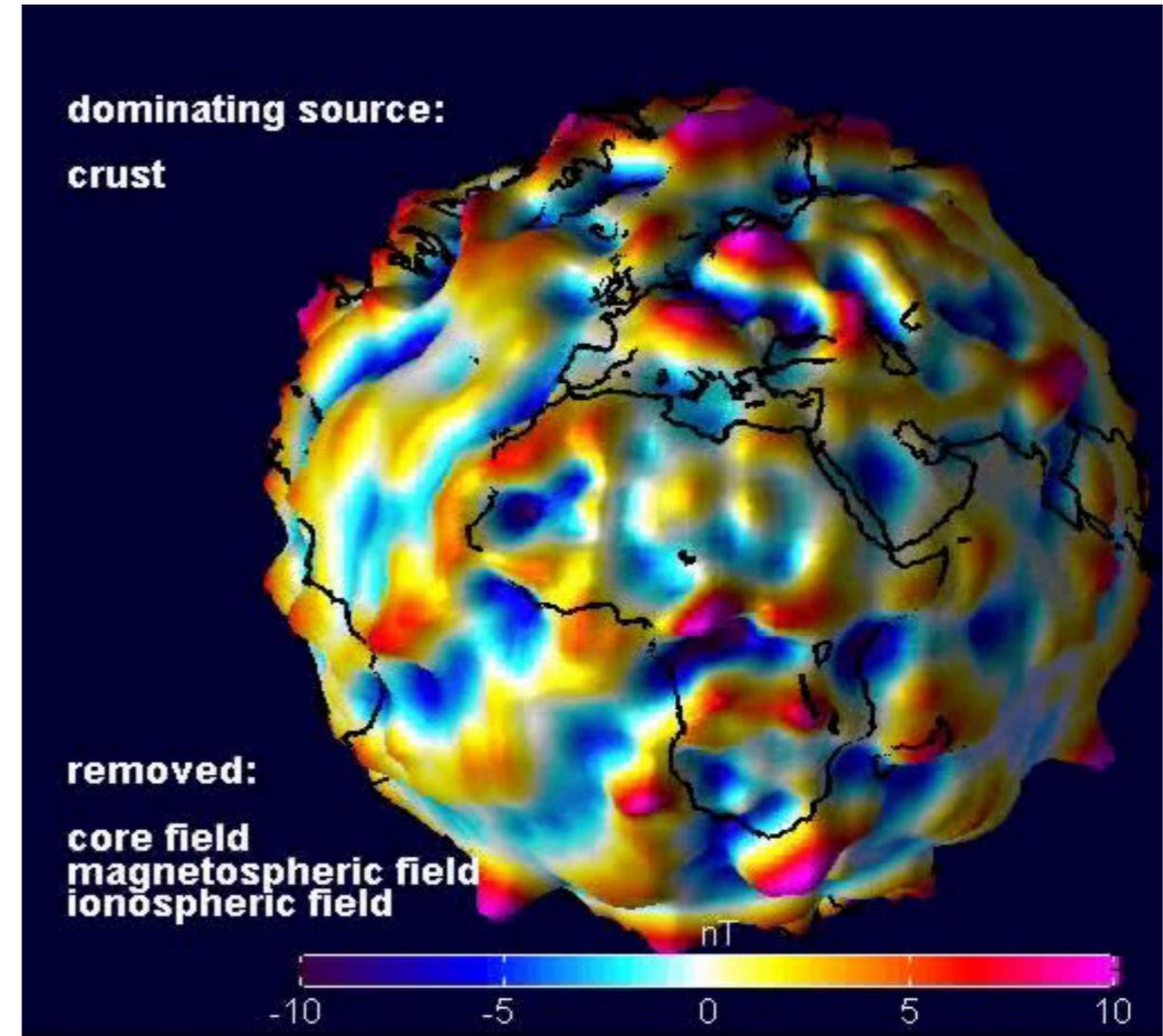
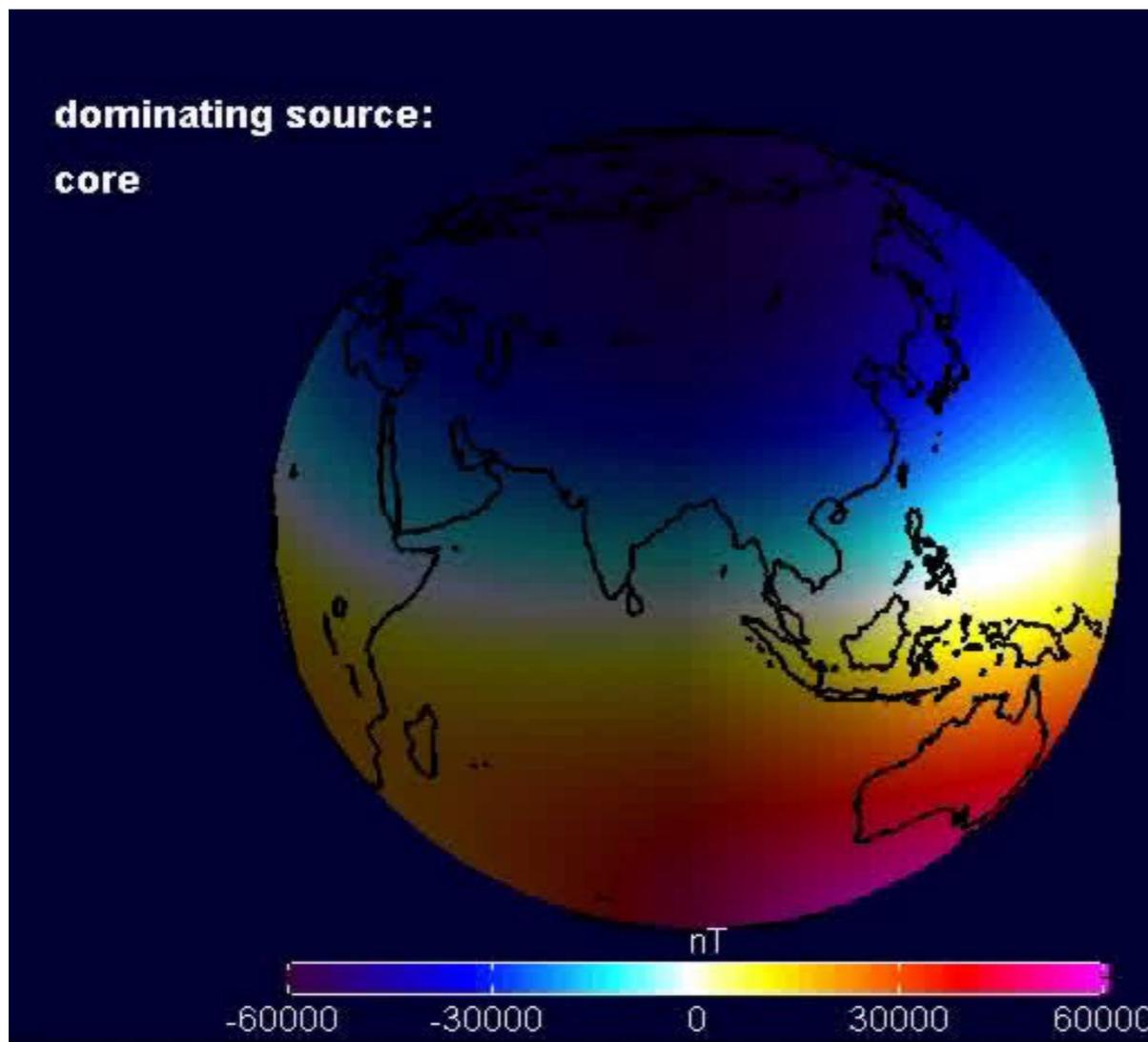
Le formalisme de Gauss permet de mettre en évidence :



3: Le Champ magnétique terrestre

3.3 Le champ magnétique de référence.

Le formalisme de Gauss permet de mettre en évidence:



3.4 Champ magnétique d'origine externe.

Prend sa source essentiellement dans la haute atmosphère.

«ionosphère»

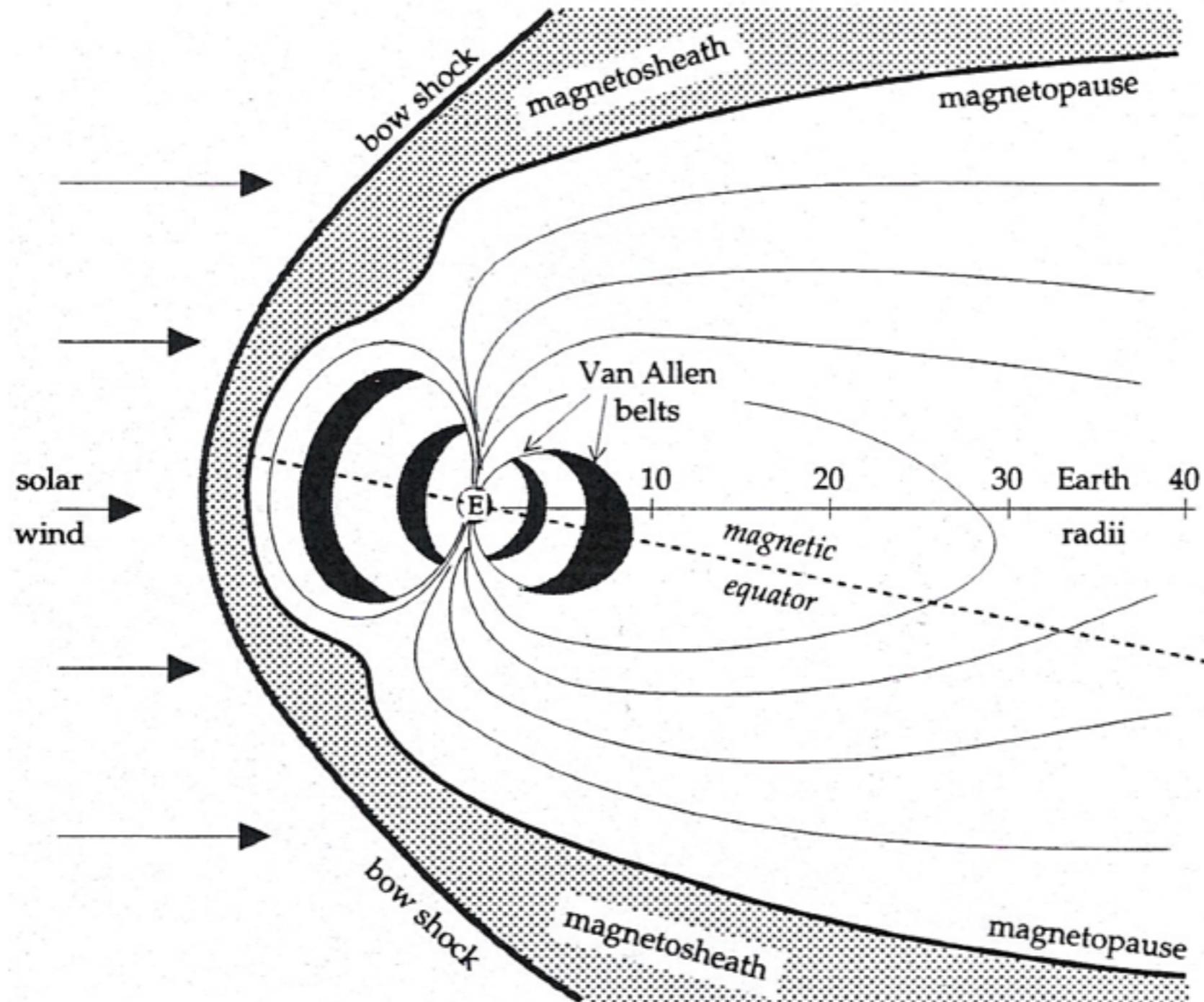
Les mouvements des particules chargées produisent des courants électriques à l'origine du champ magnétique externe.

Mouvements compliqués car structurés par le vent solaire (plasma = gaz ionisé présentant une faible densité de particules, électrons, protons et noyau d'He.).

Vitesse du vent solaire : entre 270 et 650 km/s suivant la température du plasma.

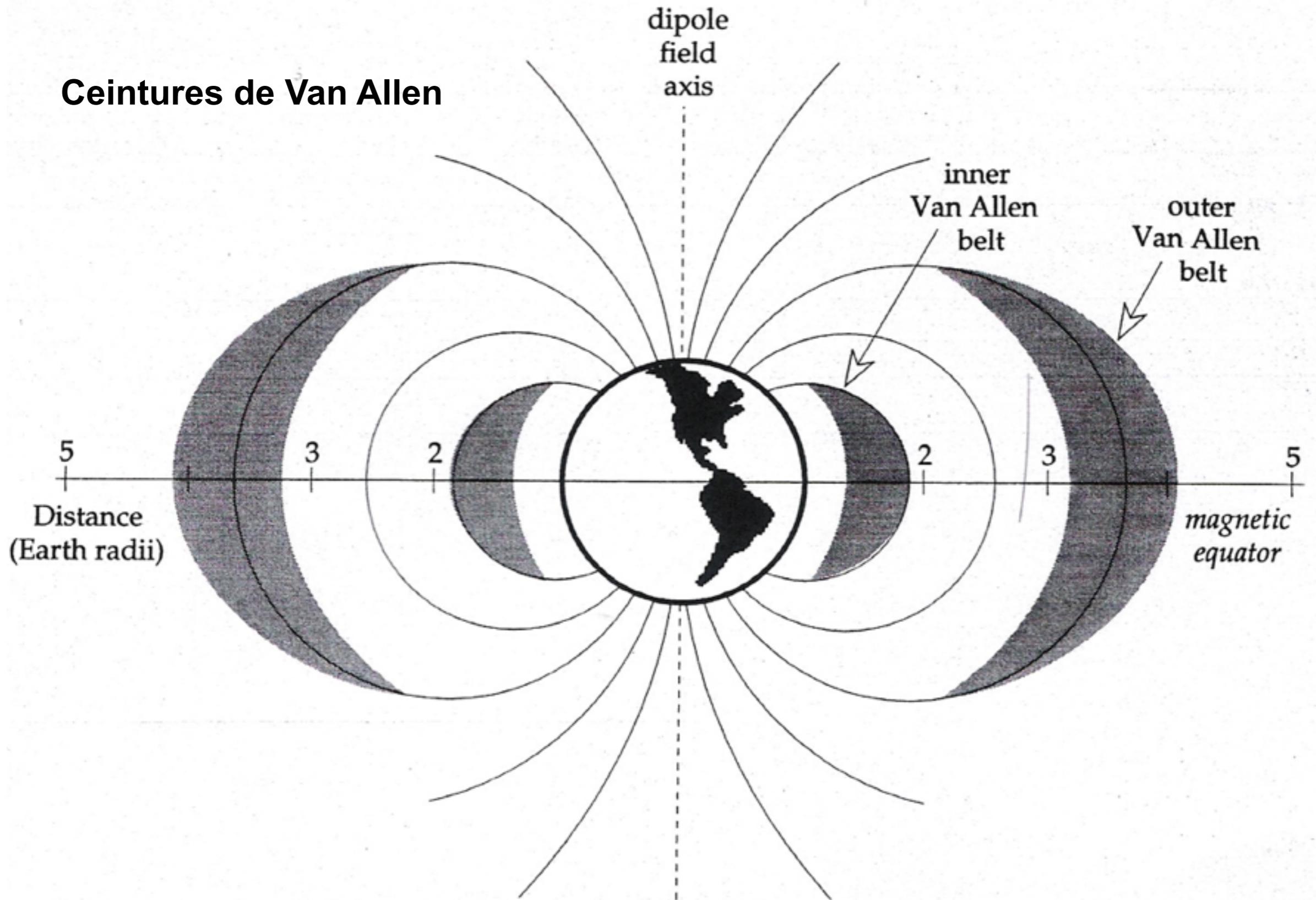
3.4 Champ magnétique d'origine externe.

Coupe de la magnétosphère



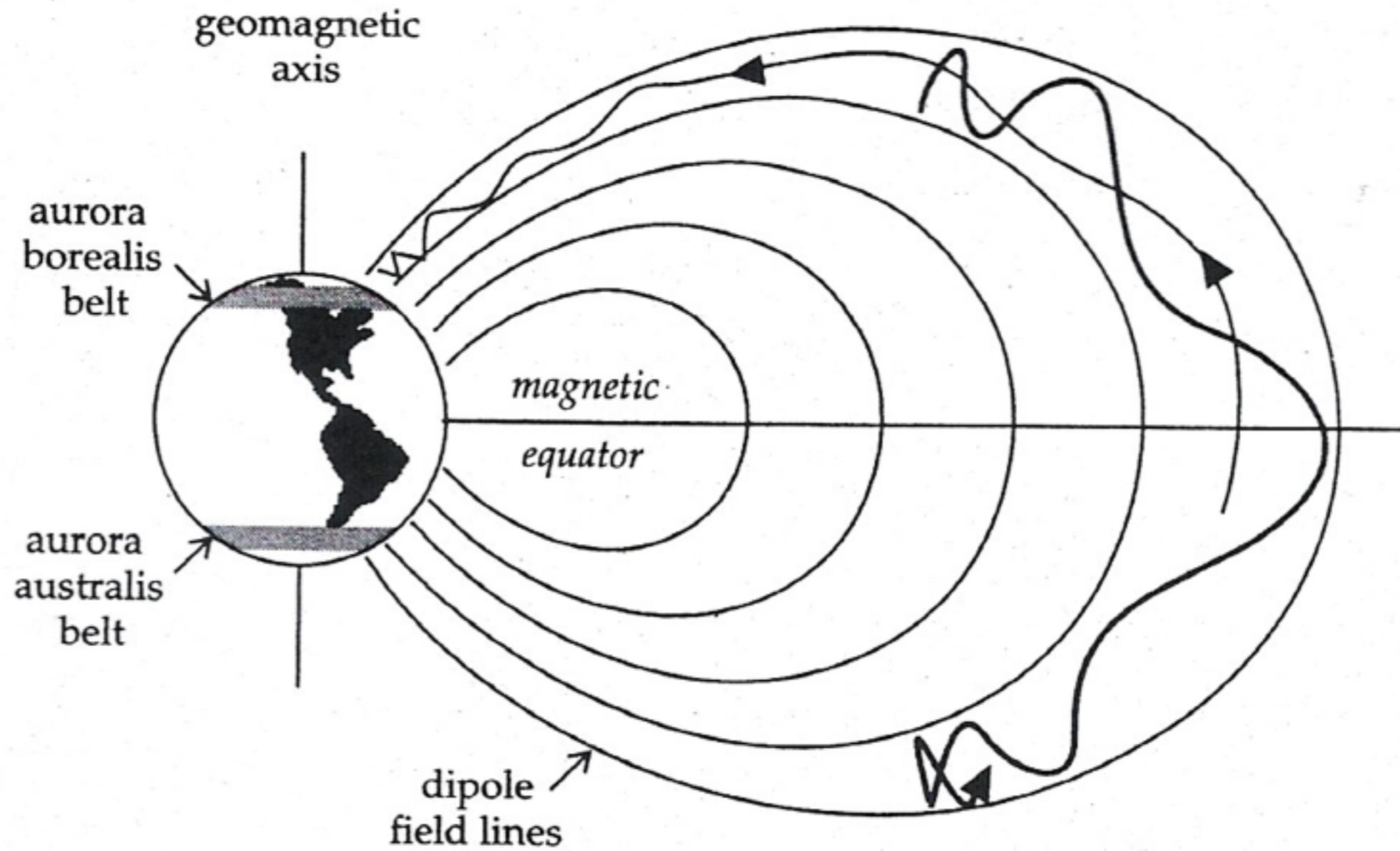
3.4 Champ magnétique d'origine externe.

Ceintures de Van Allen



3.4 Champ magnétique d'origine externe.

Ceintures de Van Allen



3: Le Champ magnétique terrestre

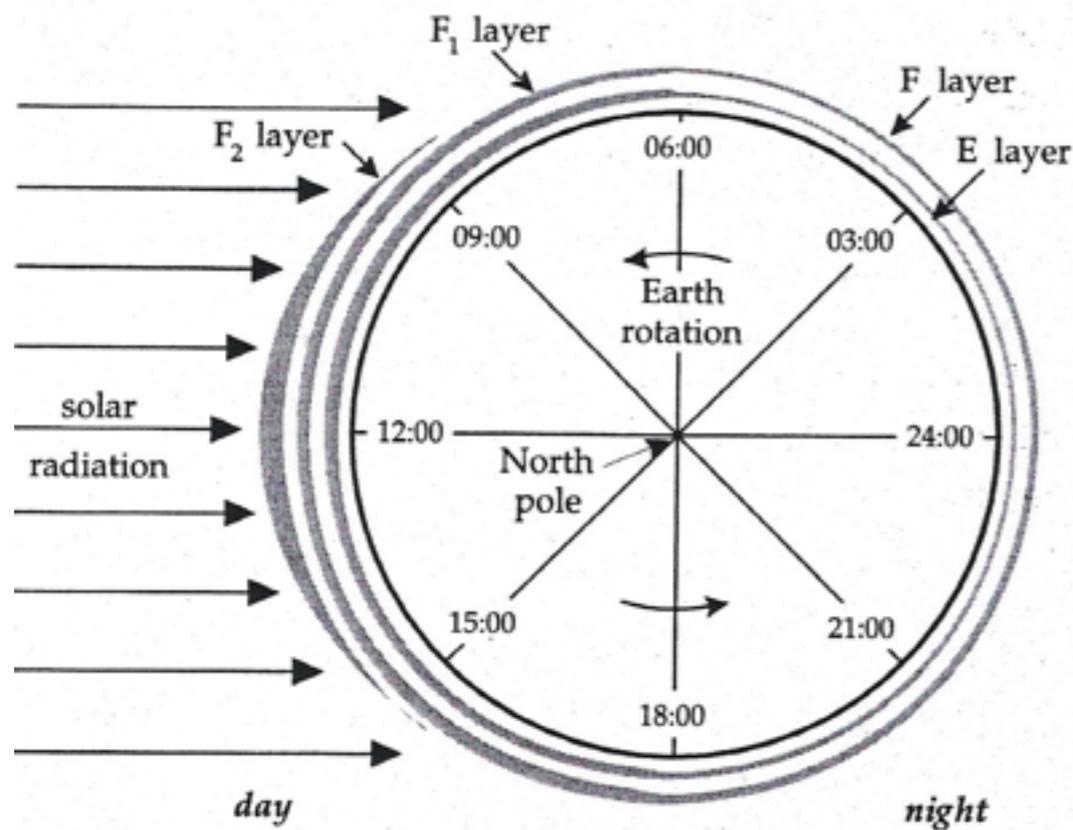
3.4 Champ magnétique d'origine externe.



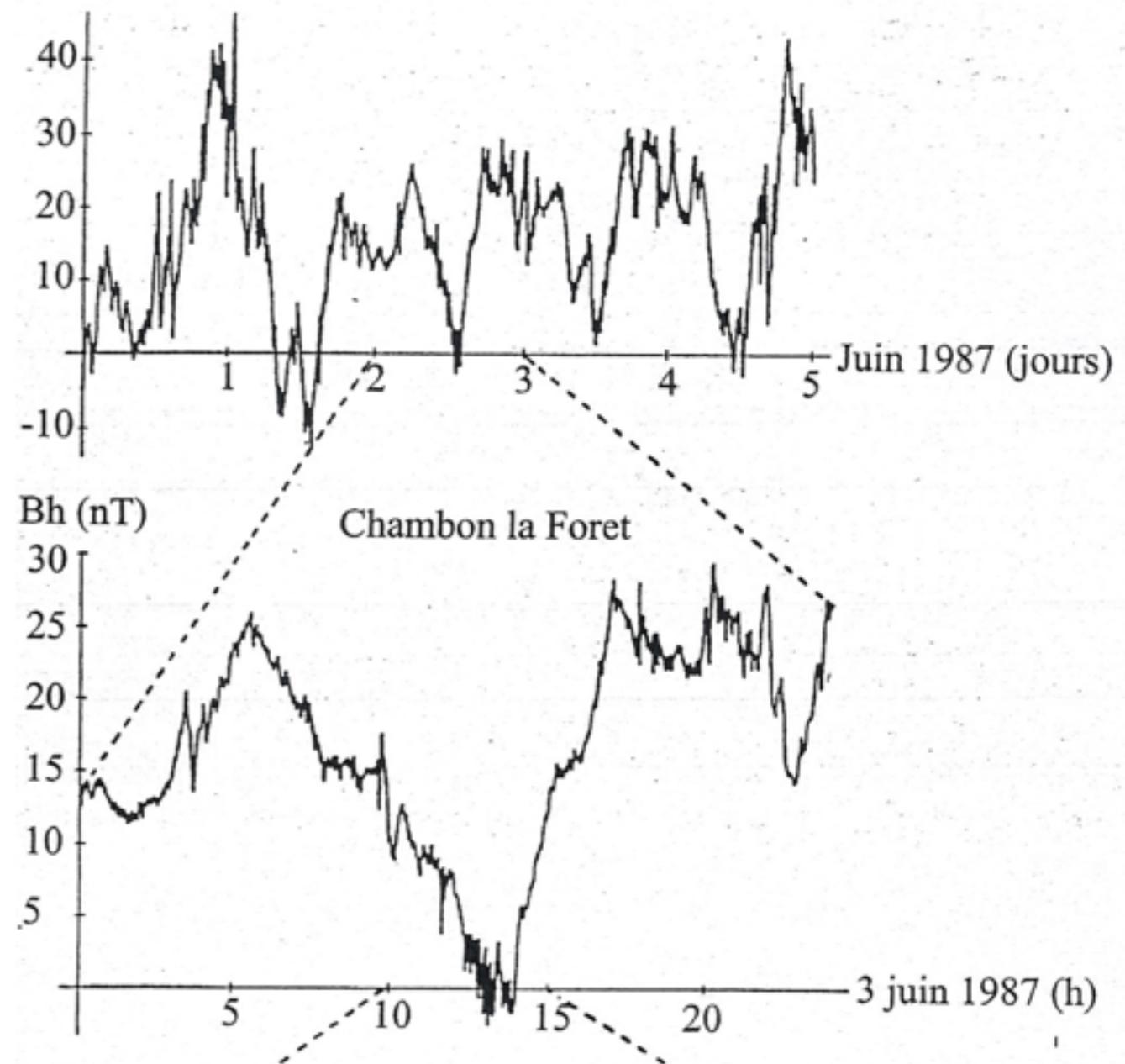
3: Le Champ magnétique terrestre

3.4 Champ magnétique d'origine externe.

Variation diurne : comme la terre tourne sous l'ionosphère, il existe un effet jour/nuit



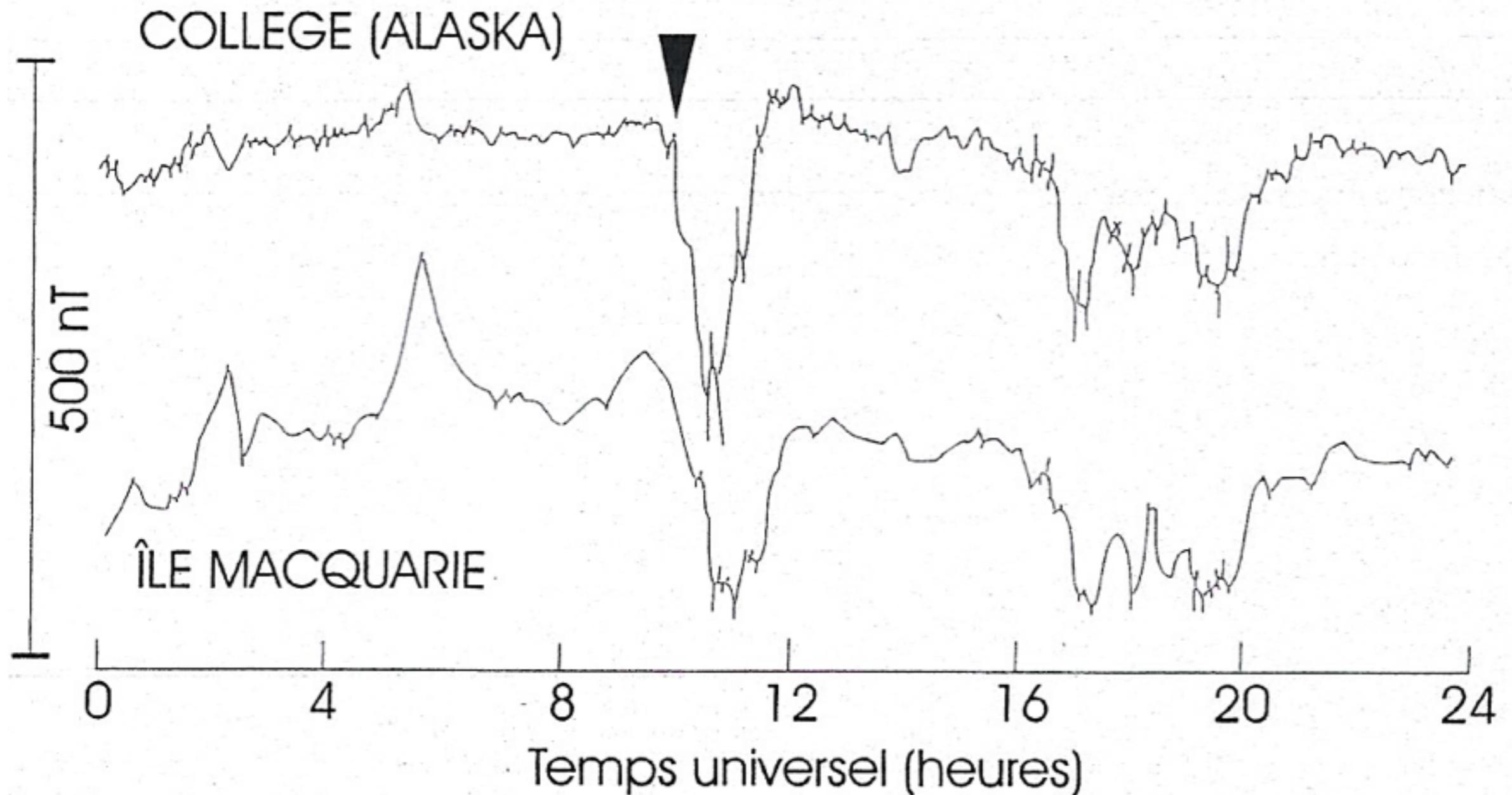
Amplitude : dizaine de nT



3.4 Champ magnétique d'origine externe.

Orages magnétiques : Sursaut d'activité solaire.

Désorganisation temporaire des courants dans l'ionosphère



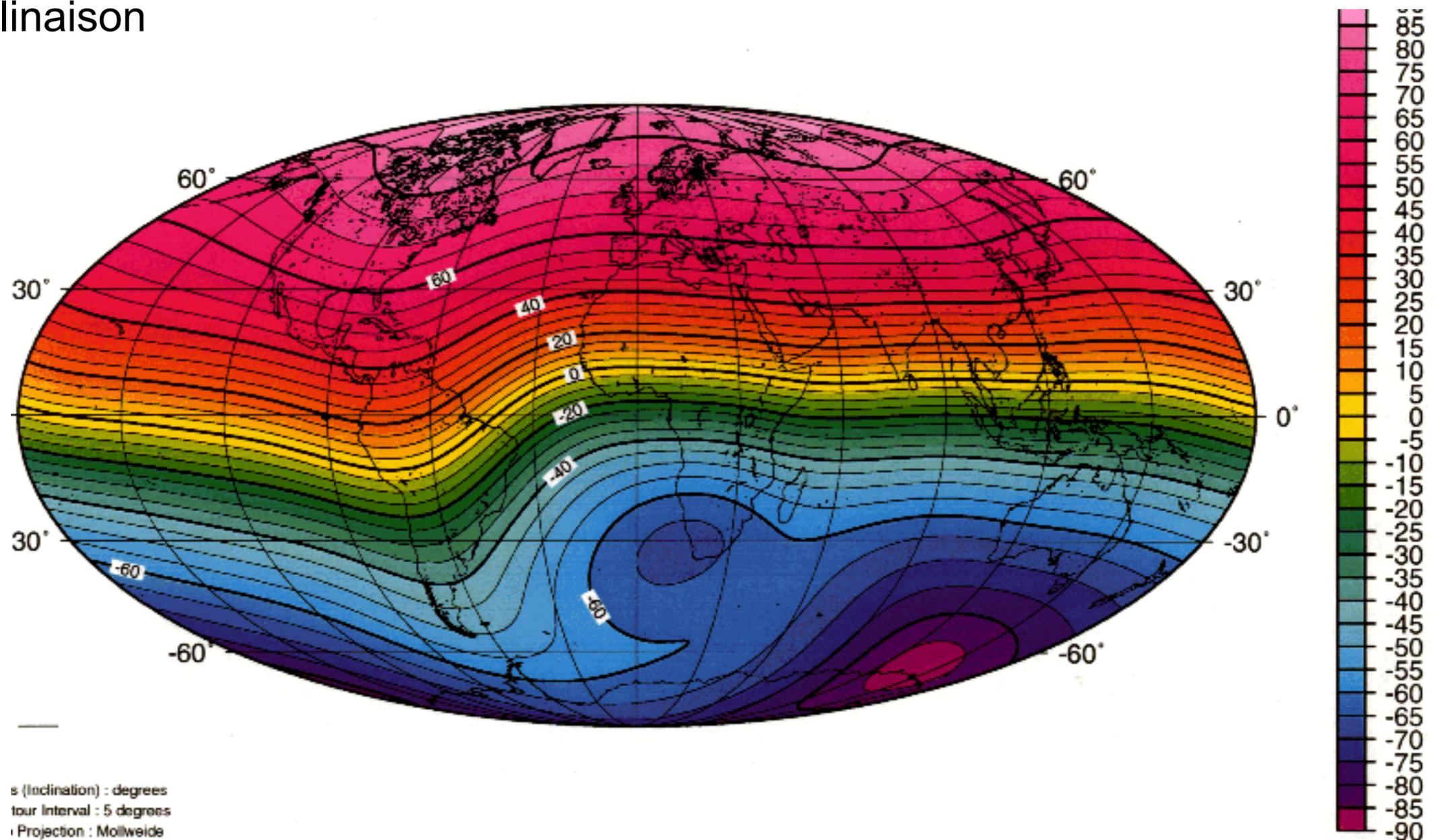
3: Le Champ magnétique terrestre

3.5 Le Champ magnétique principal

3.5 Le Champ magnétique principal

Dans le modèle de référence : le degré I jusqu'à 13

Inclinaison

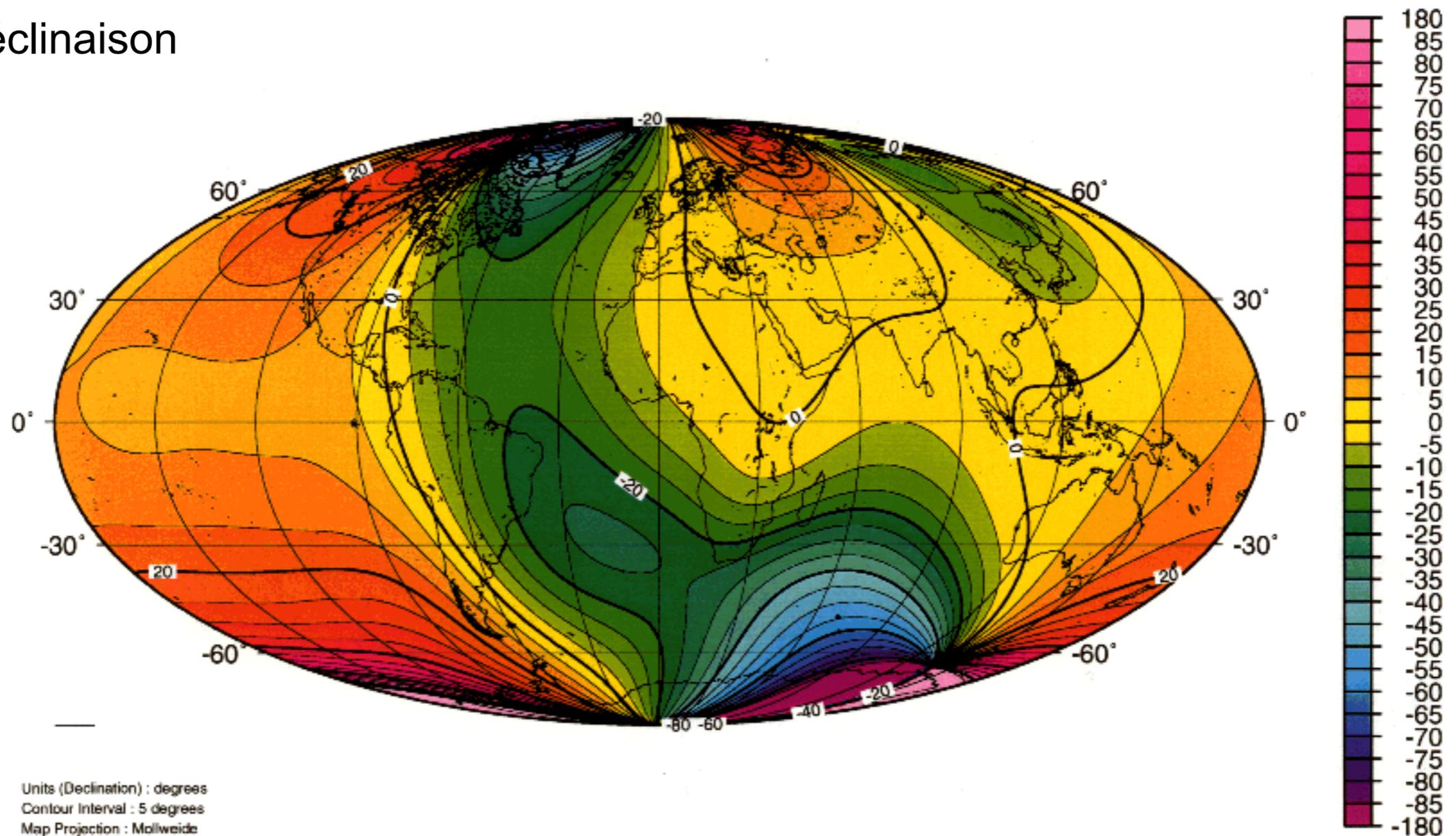


3: Le Champ magnétique terrestre

3.5 Le Champ magnétique principal

Dans le modèle de référence : le degré I jusqu'à 13

Déclinaison

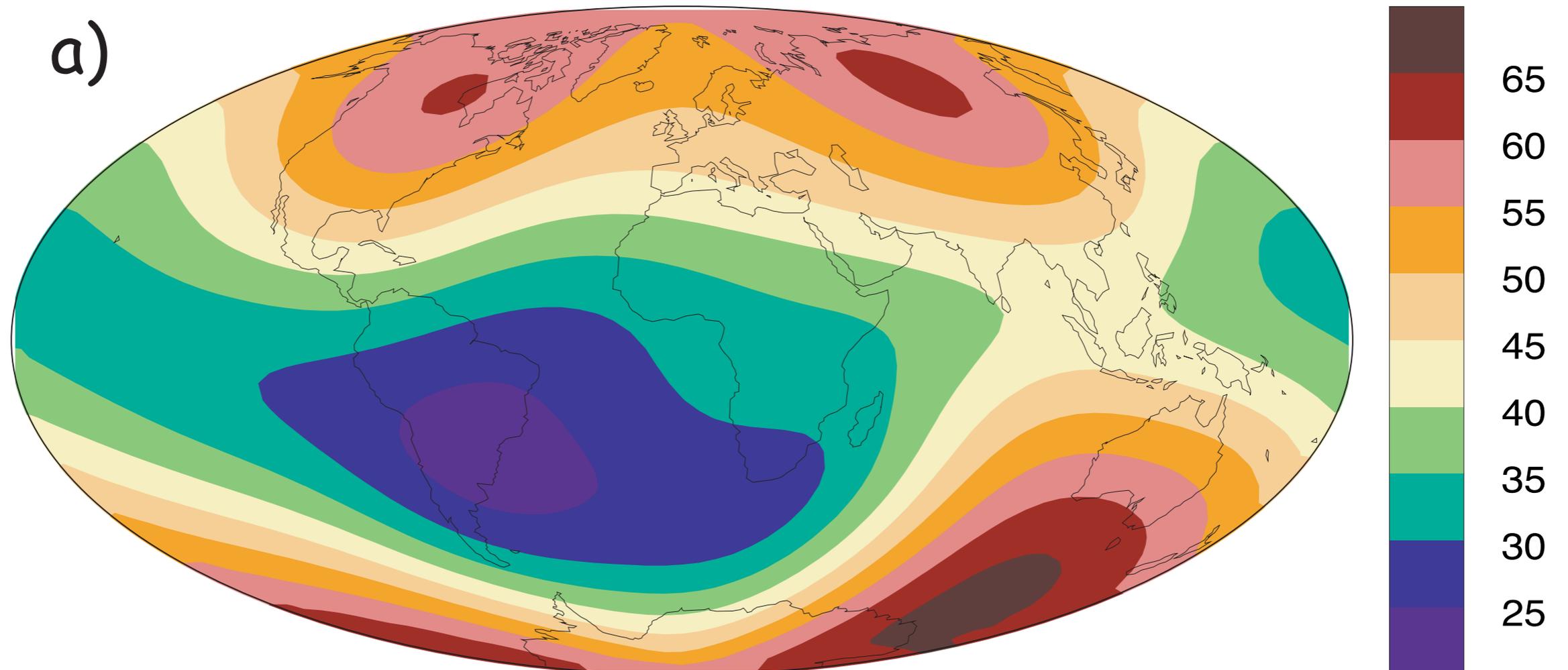


3: Le Champ magnétique terrestre

3.5 Le Champ magnétique principal

Dans le modèle de référence : le degré l jusqu'à 13

Intensité



3.5 Le Champ magnétique principal

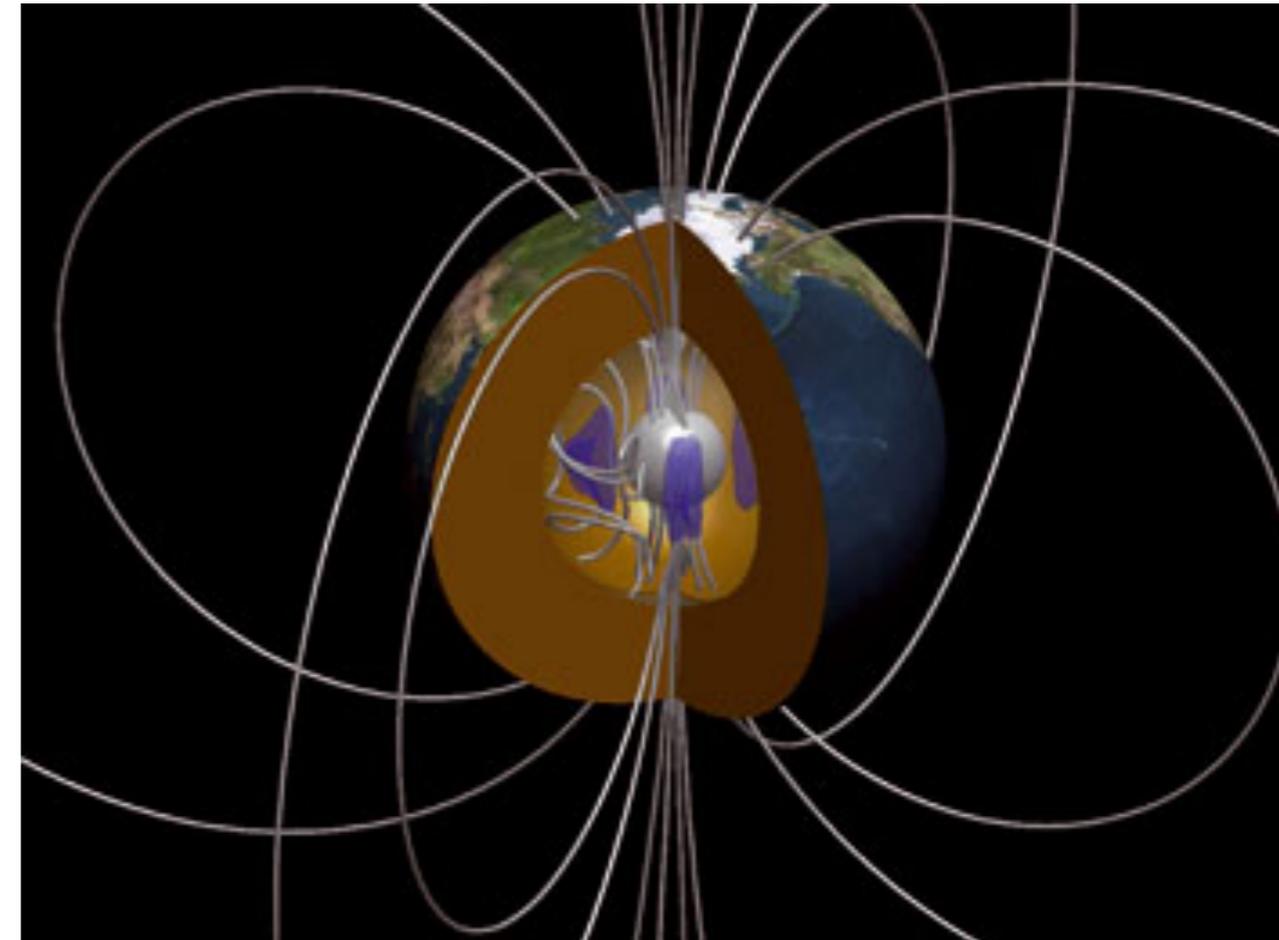
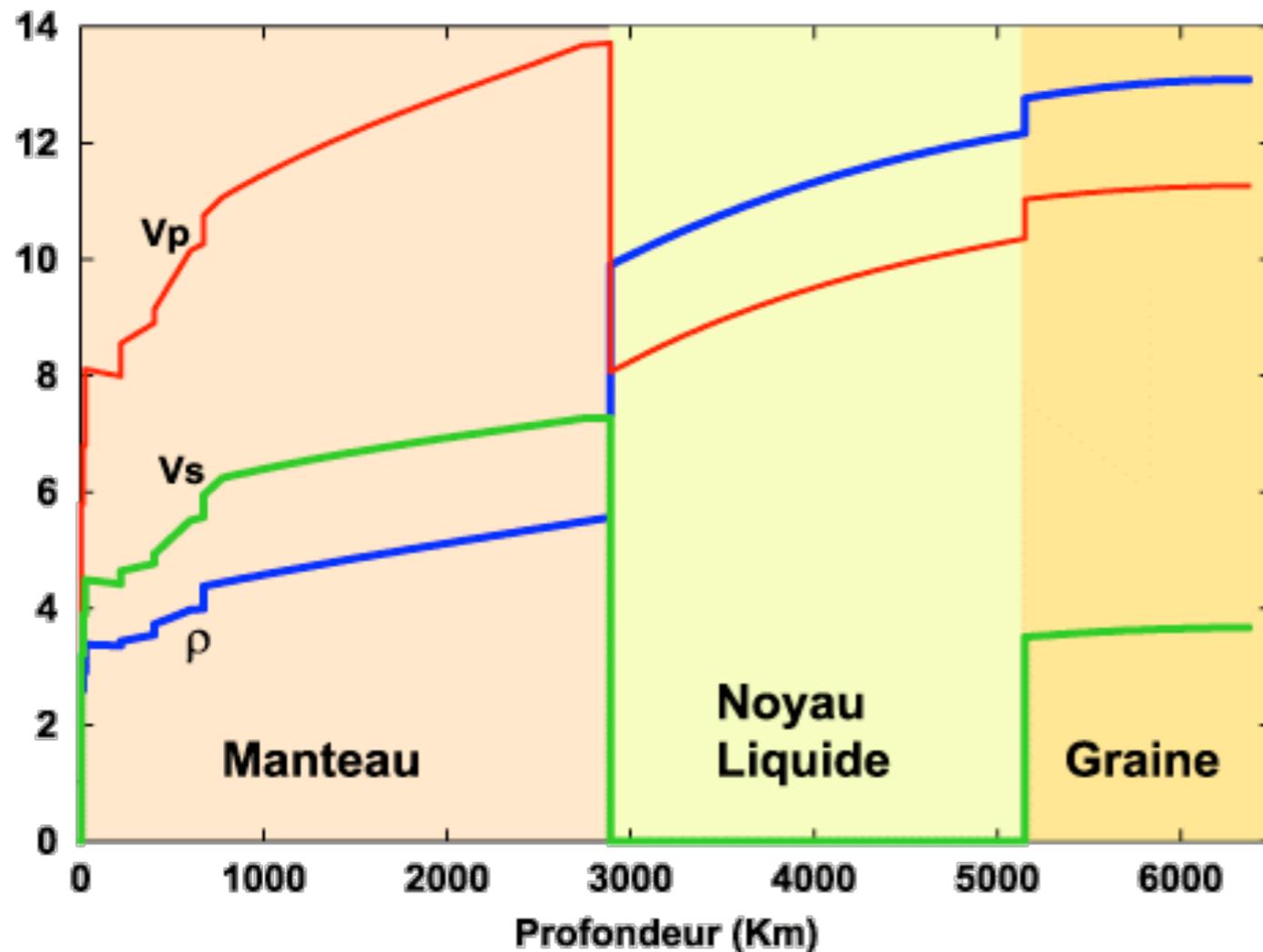
Dans le modèle de référence : le degré l jusqu'à 13

**Origine : Mouvement de matière électriquement conductrice
dans le noyau liquide**

3.5 Le Champ magnétique principal

Dans le modèle de référence : le degré l jusqu'à 13

Origine : Mouvement de matière électriquement conductrice dans le noyau liquide



3.5 Le Champ magnétique principal

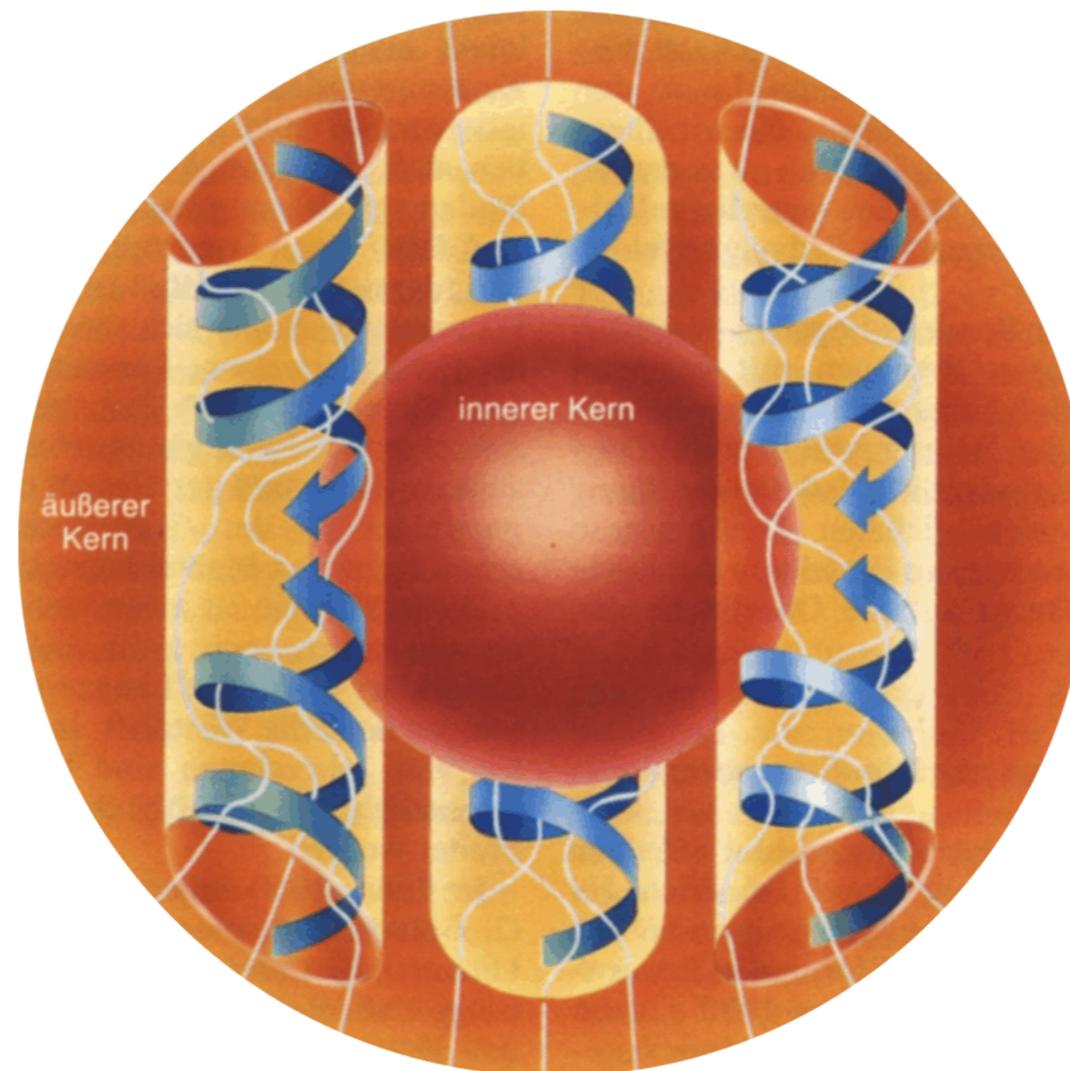
Propriétés physiques du noyau :

		Noyau	Manteau
Cond. Electrique	(S/m)	10^5-10^6	$10^{-2}-10^2$
Vitesse d'écoulement	(Km/a)	10^1	10^{-4}
Vp	(Km/s)	8	13.7

3: Le Champ magnétique terrestre

3.5 Le Champ magnétique principal

Forme de l'écoulement :



3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle / Champ non-dipôle

$$V_m = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \left(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi \right) P_l^m(\theta)$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle / Champ non-dipôle

$$V_m = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \left(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi \right) P_l^m(\theta)$$

Pour $l=1, m=0$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle / Champ non-dipôle

$$\psi_m = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \left(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi \right) P_l^m(\theta)$$

Pour $l=1, m=0$

$$\psi_m = a \times \left(\frac{a}{r} \right)^2 \times g_1^0 \times P_1^0(\theta)$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle / Champ non-dipôle

$$\psi_m = a \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r} \right)^{l+1} \left(g_l^m \cos m\phi + h_l^m \sin m\phi \right) P_l^m(\theta)$$

Pour $l=1, m=0$

$$\psi_m = a \times \left(\frac{a}{r} \right)^2 \times g_1^0 \times P_1^0(\theta)$$

avec $P_1^0(\theta) = \cos \theta$ on a donc

$$\psi_m = a^3 \times g_1^0 \times \frac{\cos \theta}{r^2}$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$, (dipôle axial centré)

avec $B_\theta = g_1^0 a^3$

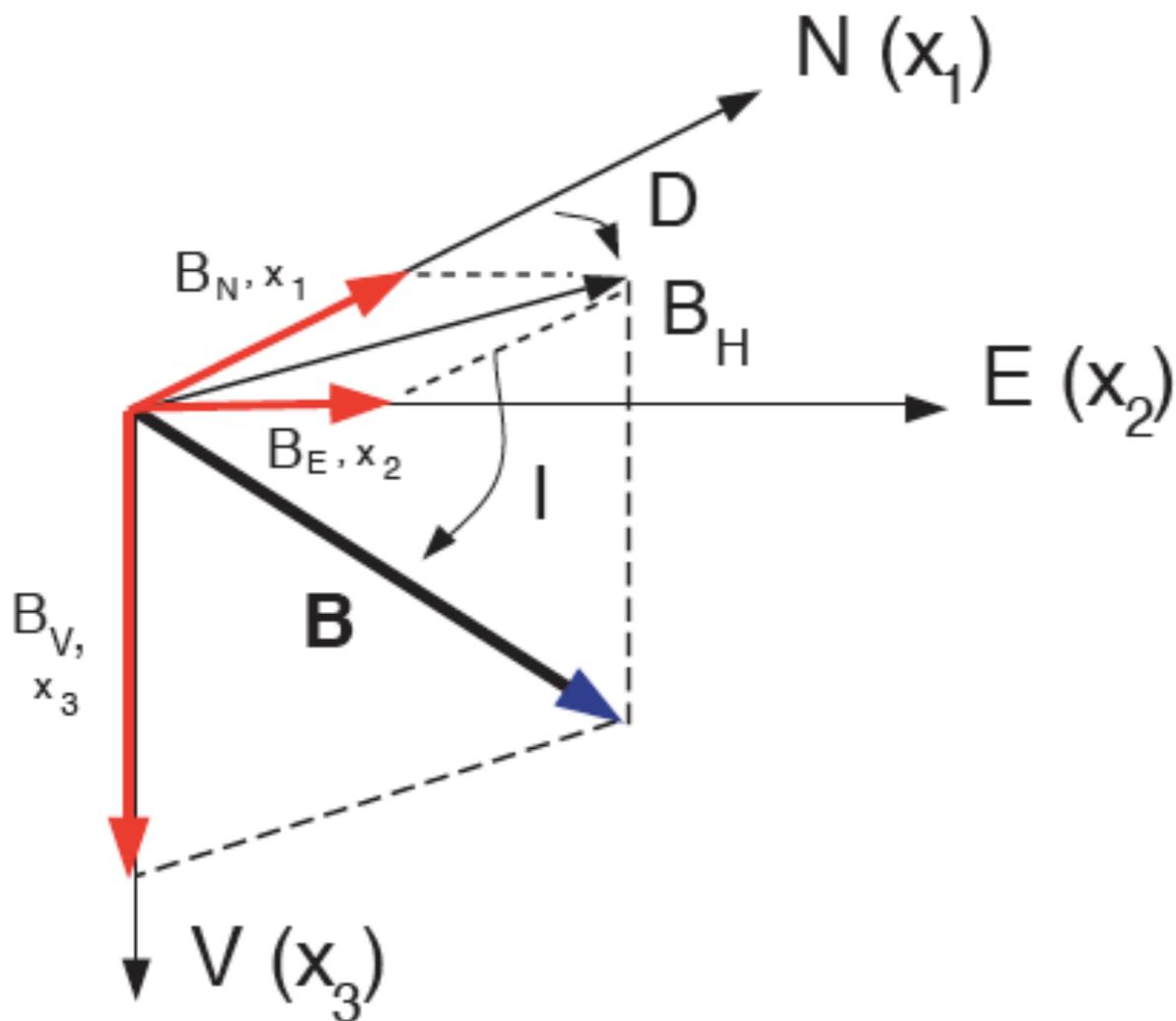
on a

$$\psi_m = \frac{B_\theta \cos \theta}{r^2}$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$, (dipôle axial centré)

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} = -\nabla \psi_m$$



$$\vec{B} =$$

$$\begin{cases} -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} = B_H \\ -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi_m}{\partial \phi} = B_\theta \\ -\frac{\partial \psi_m}{\partial r} = B_V \end{cases}$$

3.5 Le Champ magnétique principal

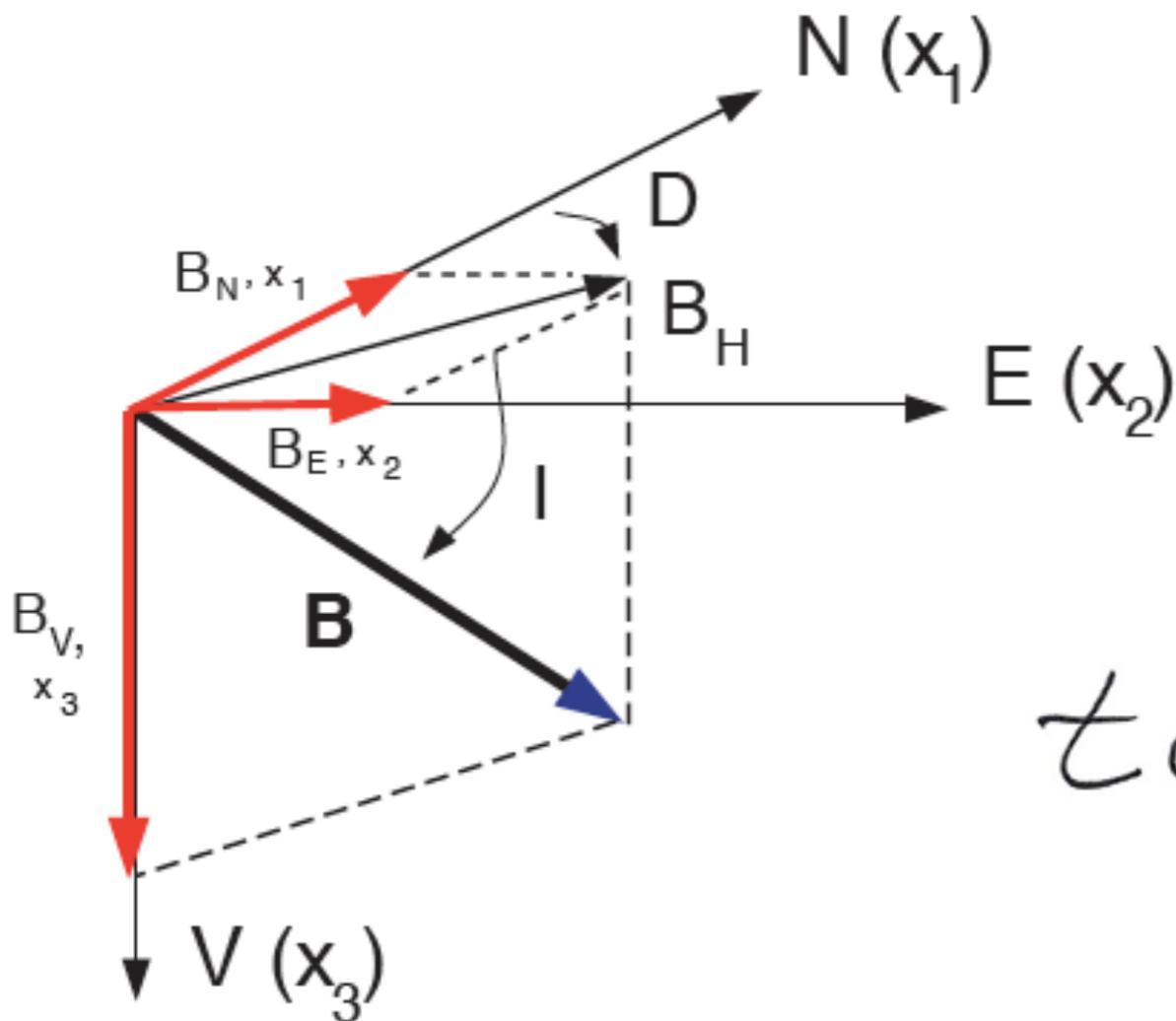
Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$, (dipôle axial centré)

$$\Psi_m = \frac{B_\phi \cos \theta}{r^2}$$

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_{\text{Nord}} \\ B_{\text{Est}} \\ B_{\text{vert.}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi_m}{\partial \theta} \\ -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Psi_m}{\partial \phi} \\ -\frac{\partial \Psi_m}{\partial r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{B_\phi \sin \theta}{r^3} \\ \emptyset \\ \frac{2 B_\phi \cos \theta}{r^3} \end{pmatrix}$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$, (dipôle axial centré)

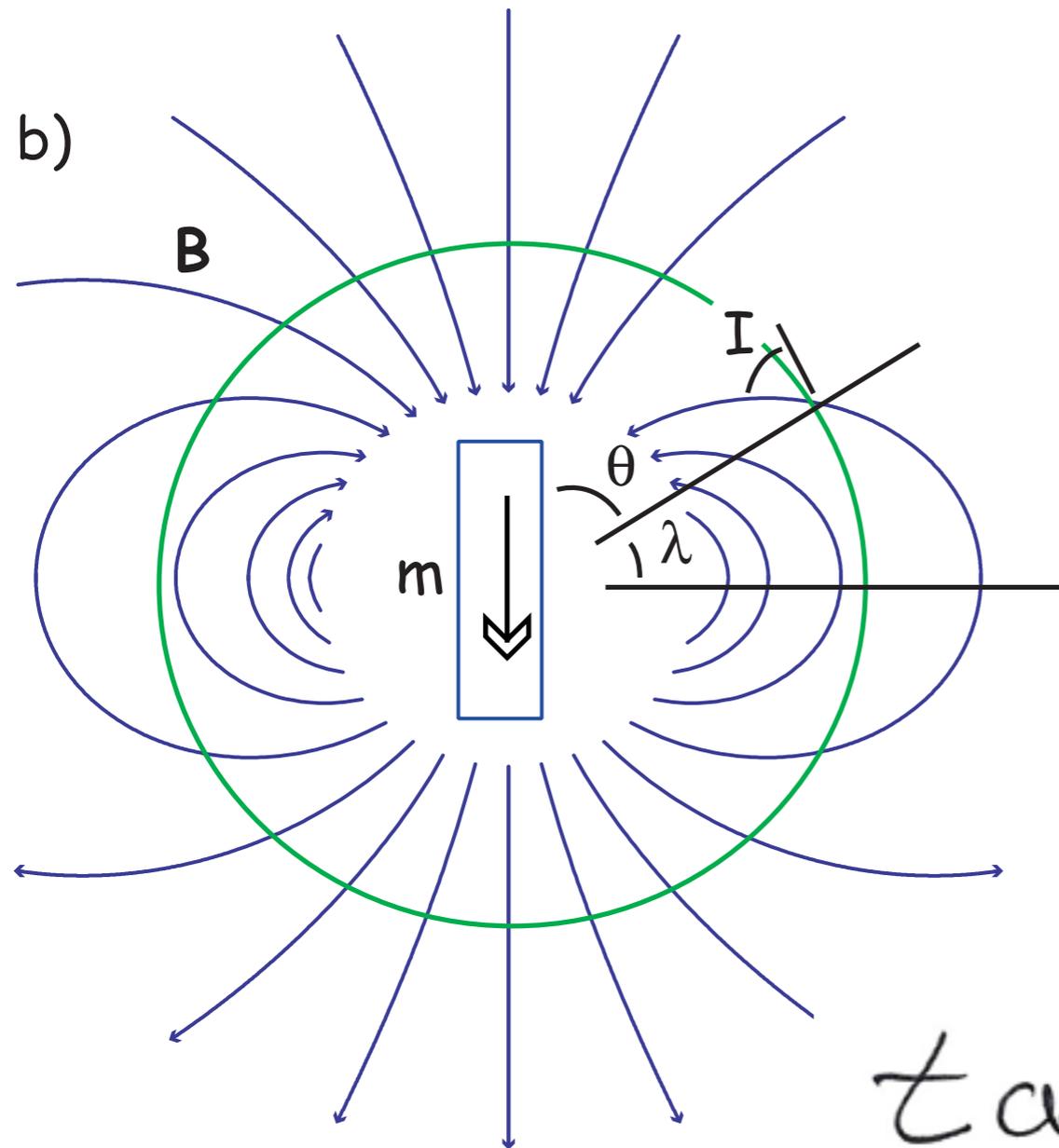


$$\tan I = \frac{B_V}{B_N} = \frac{2 \cos \theta}{\sin \theta}$$

$$\tan I = 2 \cot \theta$$

3.5 Le Champ magnétique principal

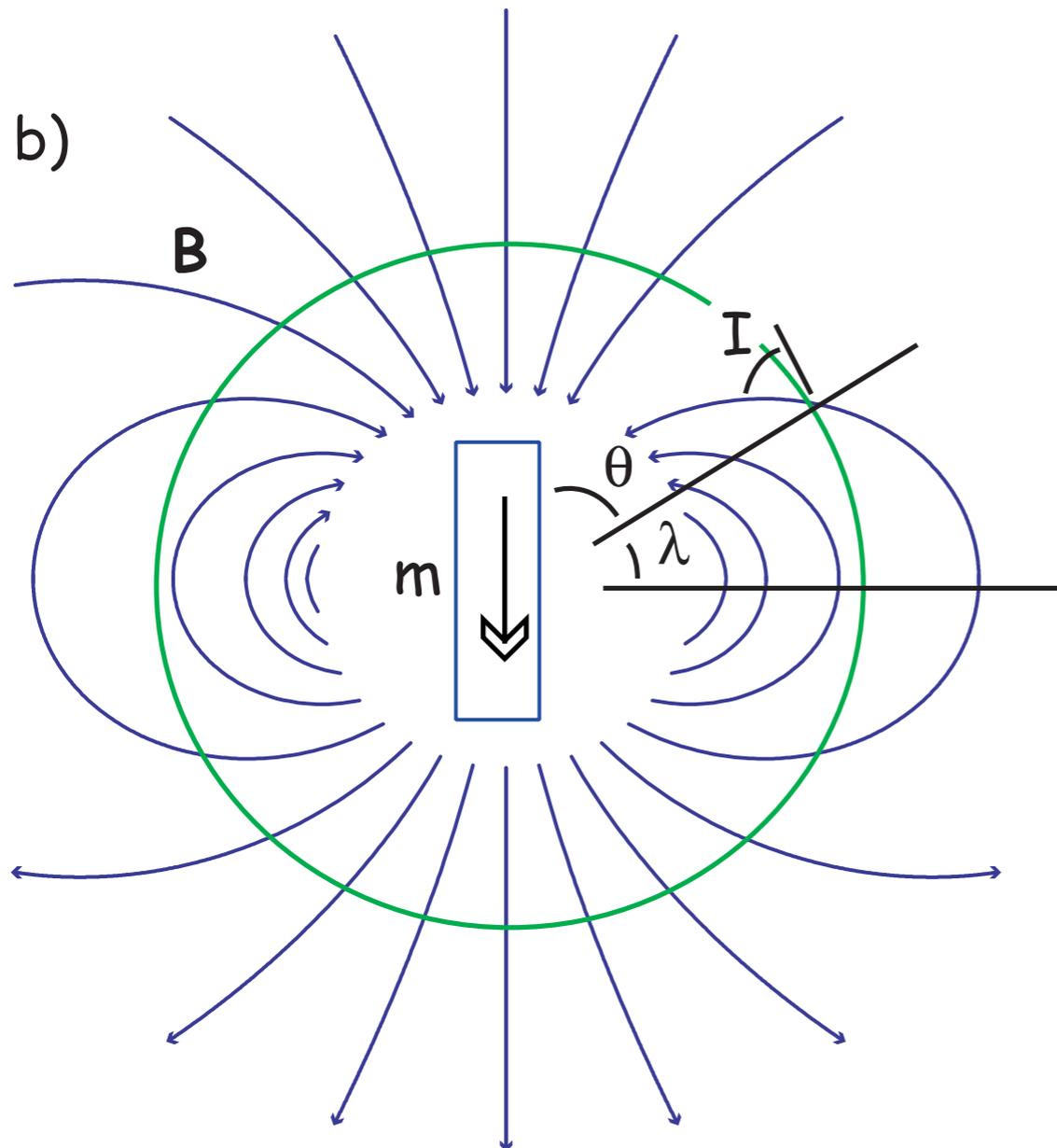
Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$, (dipôle axial centré)



$$2 \sin^2 \theta = 2 \cot \theta$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$, (dipôle axial centré)



$$\begin{aligned}
 \|\vec{B}\| &= \left(B_v^2 + B_r^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{B_0}{r^3} \left(\sin^2 \theta + 4 \cos^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}} \\
 &= \frac{B_0}{r^3} \left(1 + 3 \cos^2 \theta \right)^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$ et 1

g_1^0 dipôle axial centré

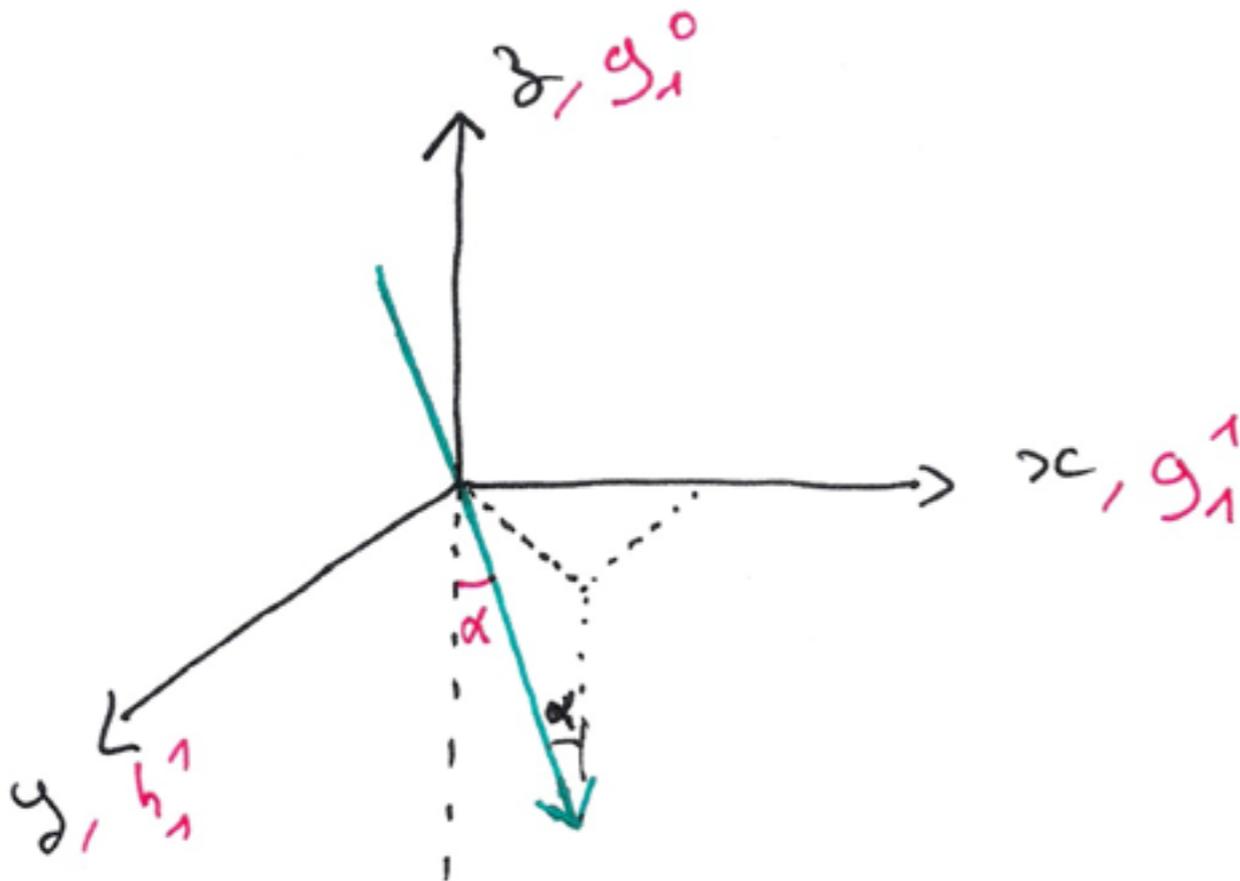
g_1^1 et h_1^1 : 2 dipôles orthogonaux
sur le plan équatorial.

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$ et 1

g_1^0 dipôle axial centré

g_1^1 et h_1^1 : 2 dipôles orthogonaux sur le plan équatorial.

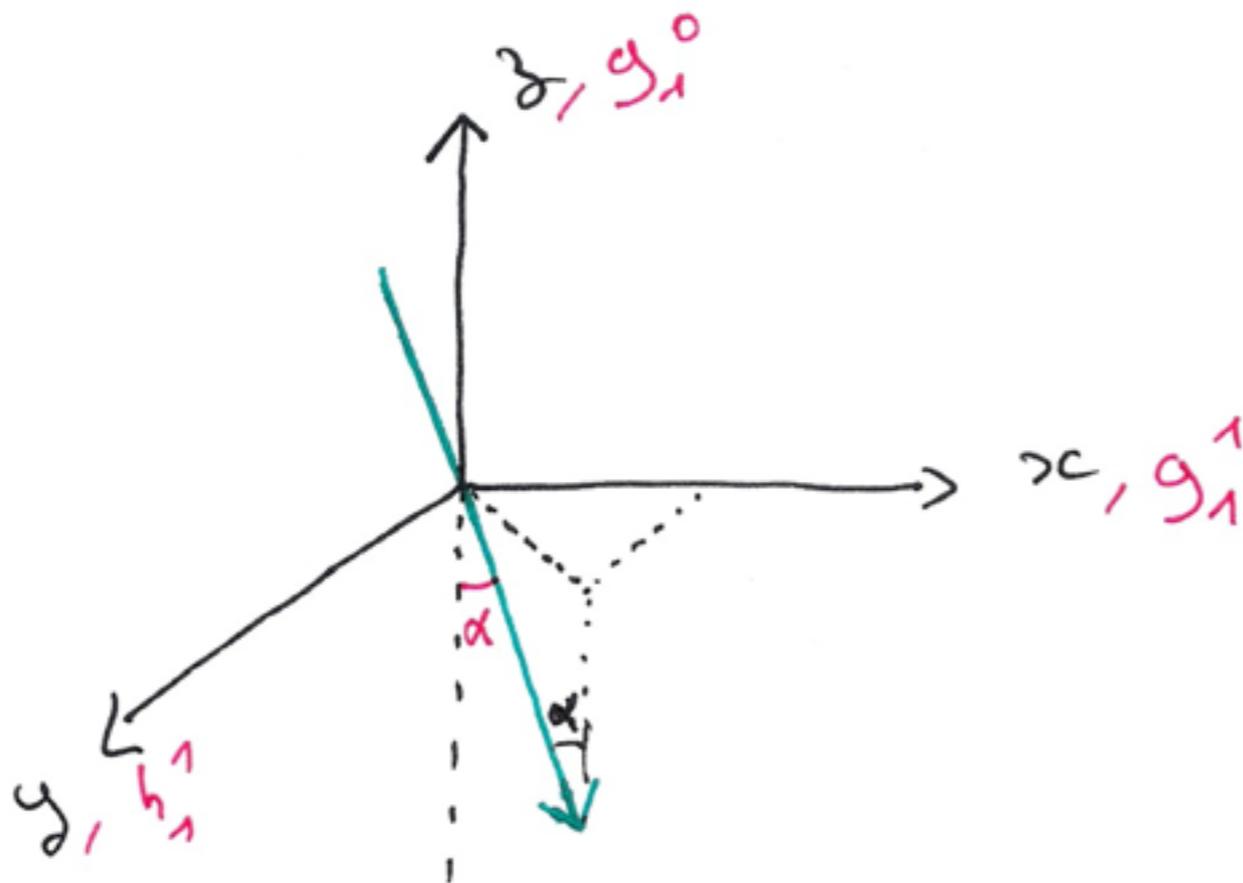


3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$ et 1

g_1^0 dipôle axial centré

g_1^1 et h_1^1 : 2 dipôles orthogonaux sur le plan équatorial.



$$\tan \alpha = \frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{g_1^0}$$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ dipôle : Degré $l = 1$, ordre $m = 0$ et 1

2015

\vec{F}_x : en 1995 $g_1^0 = -29614$ -29442

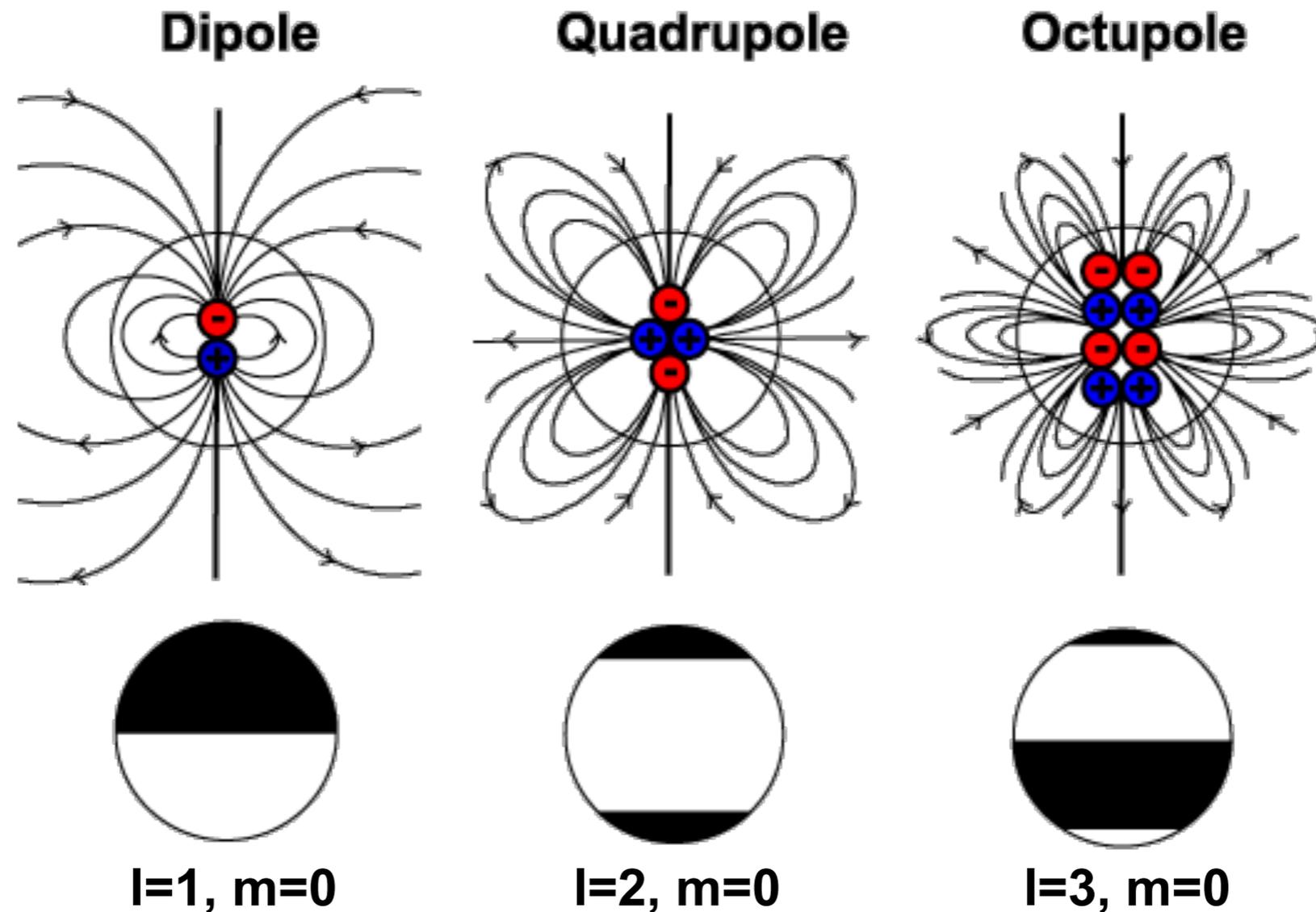
$g_1^1 = -1727$ -1501

$h_1^1 = 5186$ 4797

$\Rightarrow \alpha \approx 10,5^\circ$

3.5 Le Champ magnétique principal

Champ non-dipôle : Degré $l > 1$



3.5 Le Champ magnétique principal

Quelques définitions :

Pôles magnétiques : Endroit du globe terrestre où l'inclinaison du champ est verticale ($\pm 90^\circ$).

3.5 Le Champ magnétique principal

Quelques définitions :

Pôles magnétiques : Endroit du globe terrestre où l'inclinaison du champ est verticale ($\pm 90^\circ$).

Les 2 pôles (Nord et Sud) ne sont pas antipodaux

3.5 Le Champ magnétique principal

Quelques définitions :

Pôles magnétiques : Endroit du globe terrestre où l'inclinaison du champ est verticale ($\pm 90^\circ$).

Les 2 pôles (Nord et Sud) ne sont pas antipodaux

Pôles Géomagnétiques : Pôles magnétiques pour un champ 100% dipolaire

3.5 Le Champ magnétique principal

Quelques définitions :

Pôles magnétiques : Endroit du globe terrestre où l'inclinaison du champ est verticale ($\pm 90^\circ$).

Les 2 pôles (Nord et Sud) ne sont pas antipodaux

Pôles Géomagnétiques : Pôles magnétiques pour un champ 100% dipolaire

g_1^0 dipôle axial centré

g_1^{-1} et h_1^{-1} : 2 dipôles orthogonaux sur le plan équatorial.

3.5 Le Champ magnétique principal

Quelques définitions :

Pôles magnétiques : Endroit du globe terrestre où l'inclinaison du champ est verticale ($\pm 90^\circ$).

Les 2 pôles (Nord et Sud) ne sont pas antipodaux

Pôles Géomagnétiques : Pôles magnétiques pour un champ 100% dipolaire

g_1^0 dipôle axial centré

Ces 2 pôles sont antipodaux

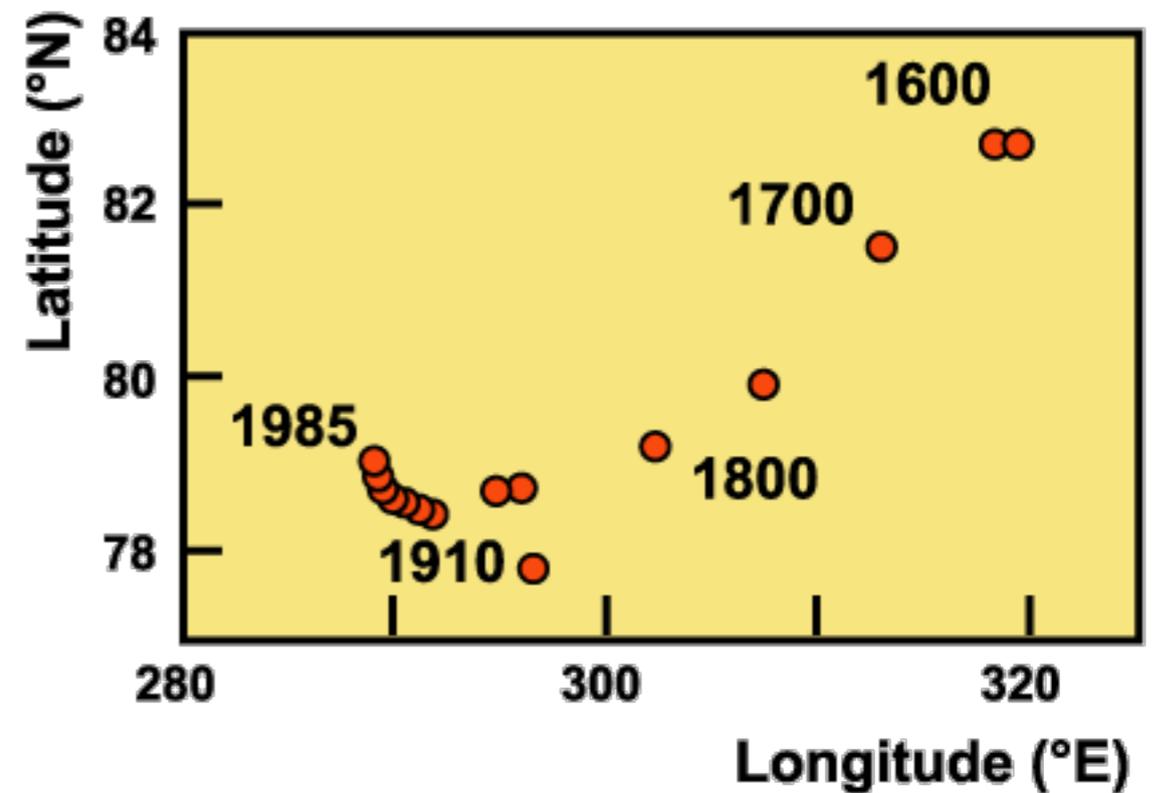
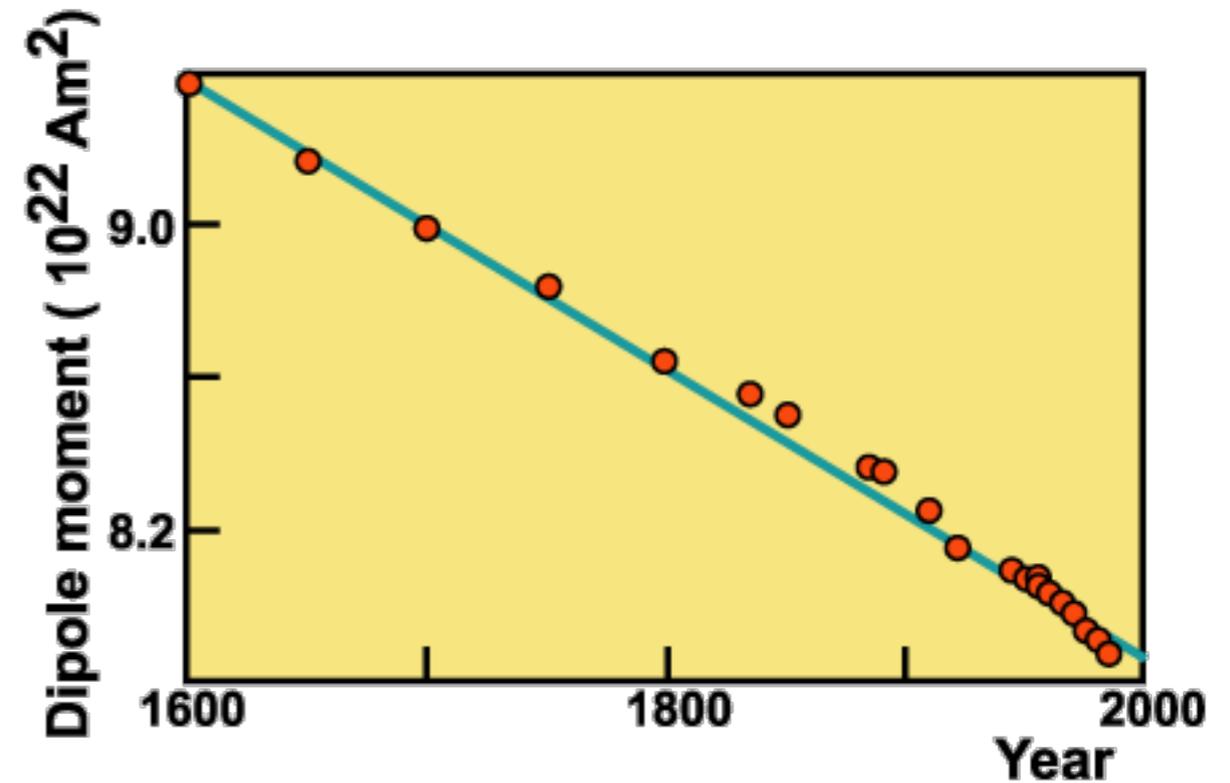
g_1^1 et h_1^1 : 2 dipôles orthogonaux sur le plan équatorial.

3.5 Le Champ magnétique principal

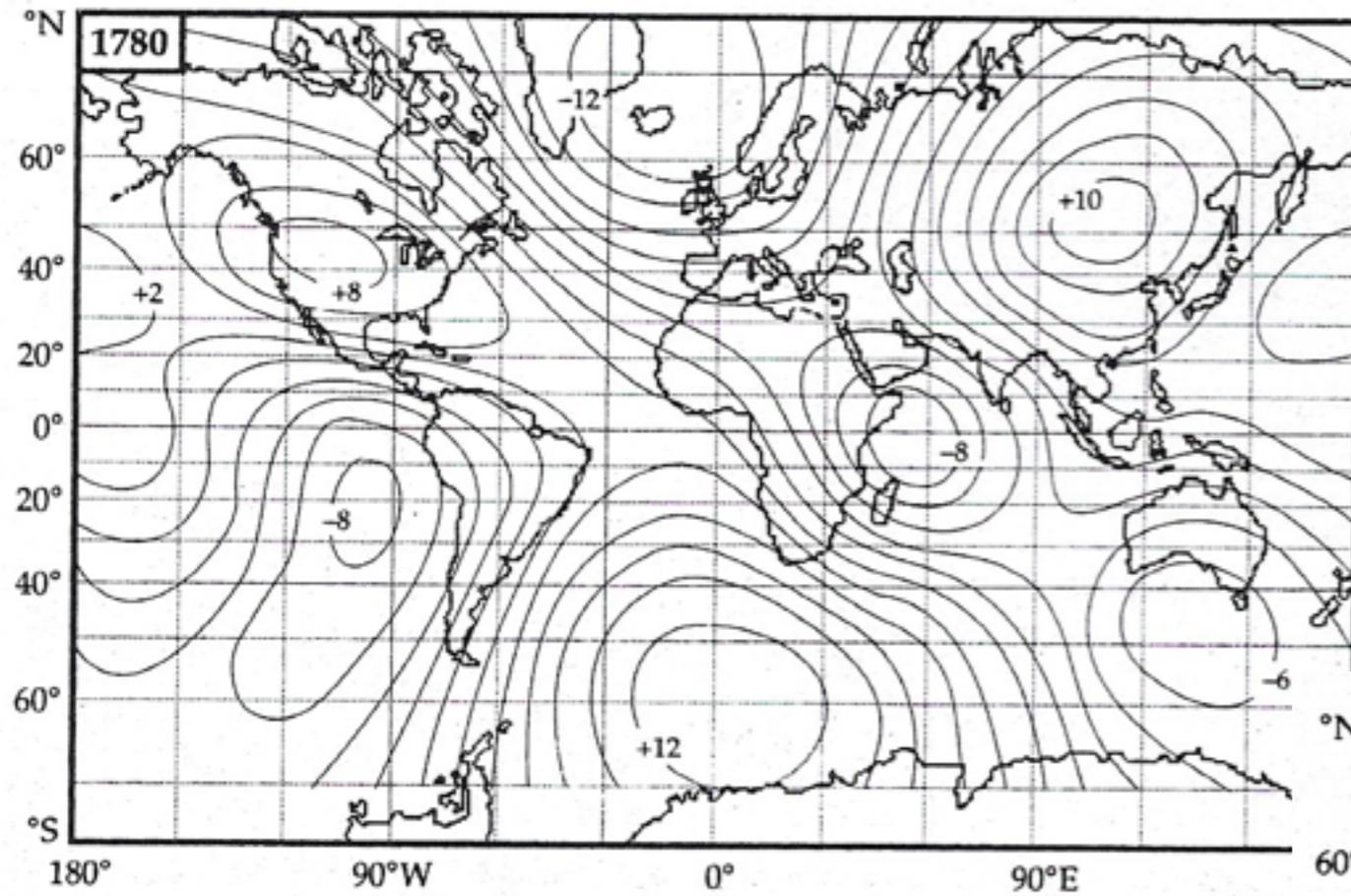
Variation séculaire du Champ dipôle

0.044 °/ an

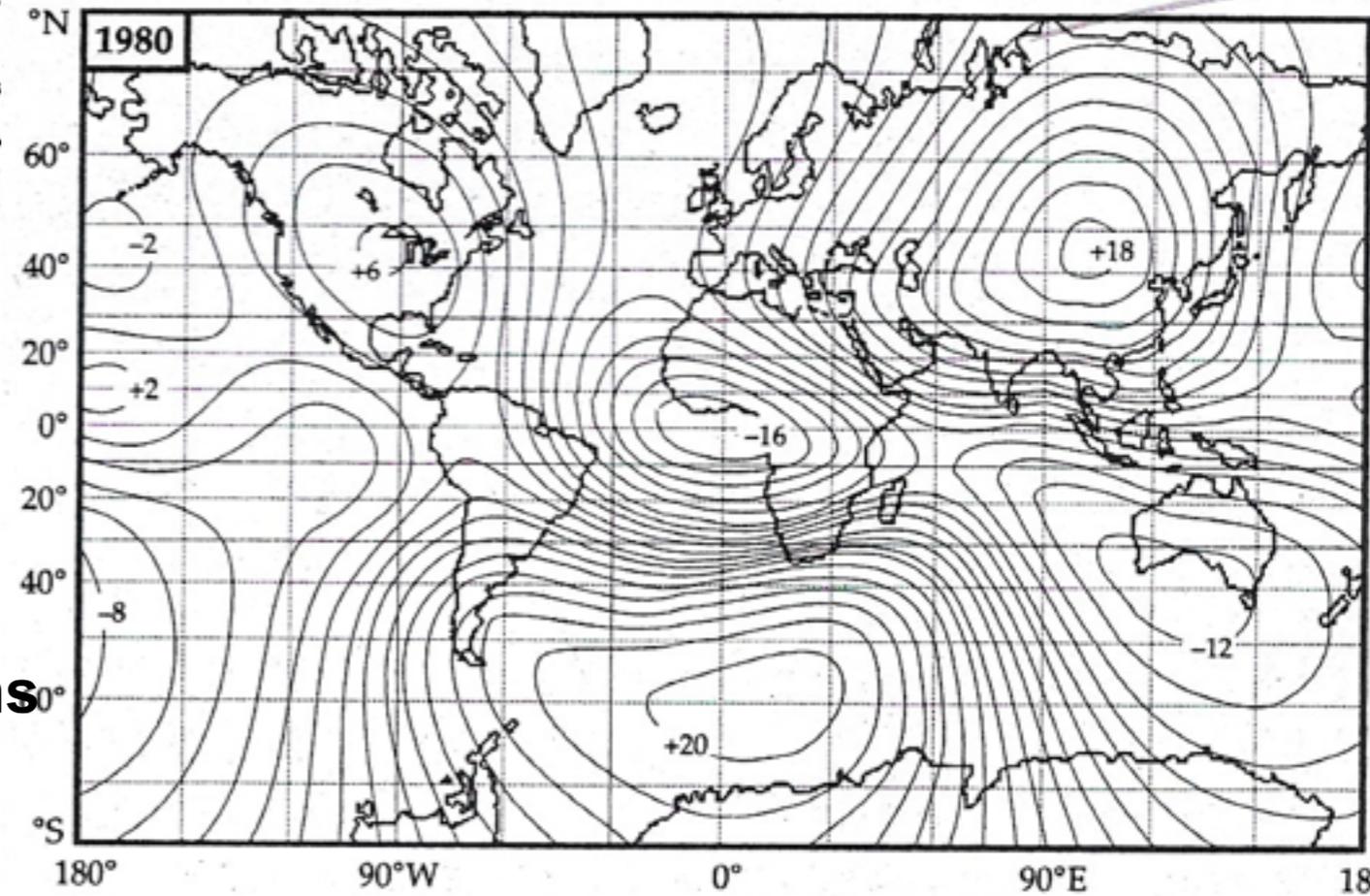
Pseudo période de 8000 ans



3.5 Le Champ magnétique principal



Variation séculaire
du Champ non-dipôle



2 types de variations :

chgt Intensité sans déplacement

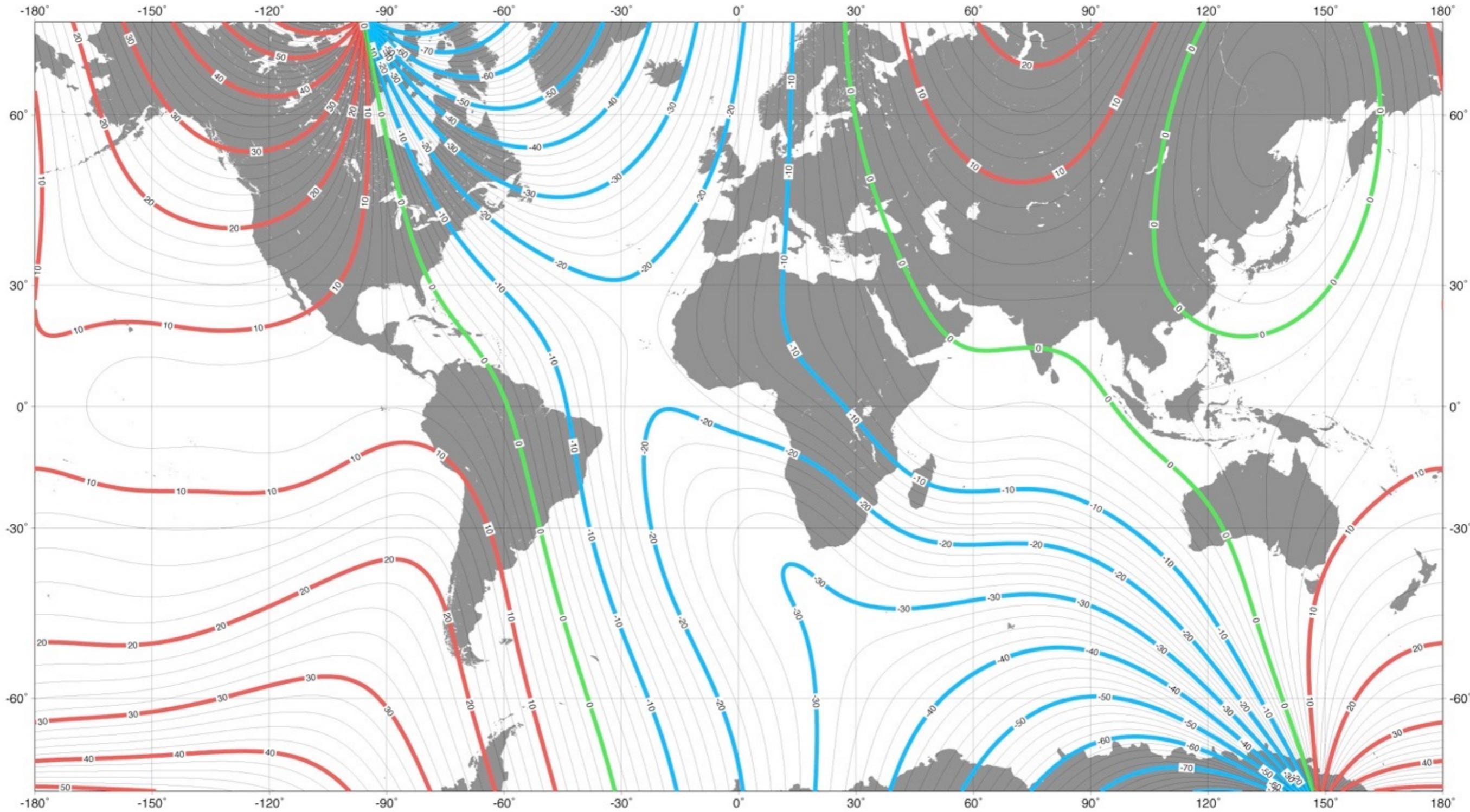
+

Dérive vers l'ouest

0.18°/an soit pseudo période de 2000 ans

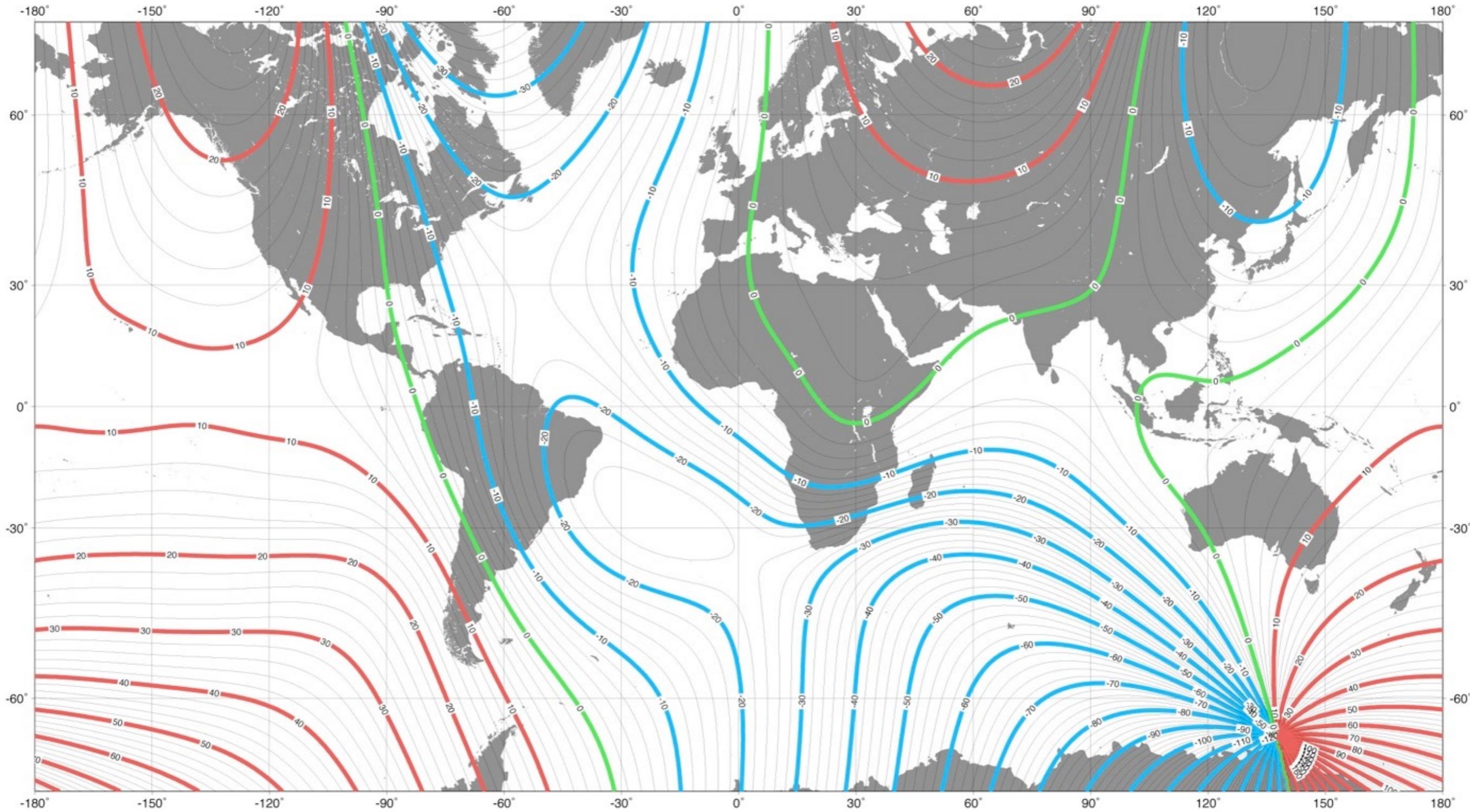
La variation séculaire du CMT

International Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 1900
Main Field Declination (D)



La variation séculaire du CMT

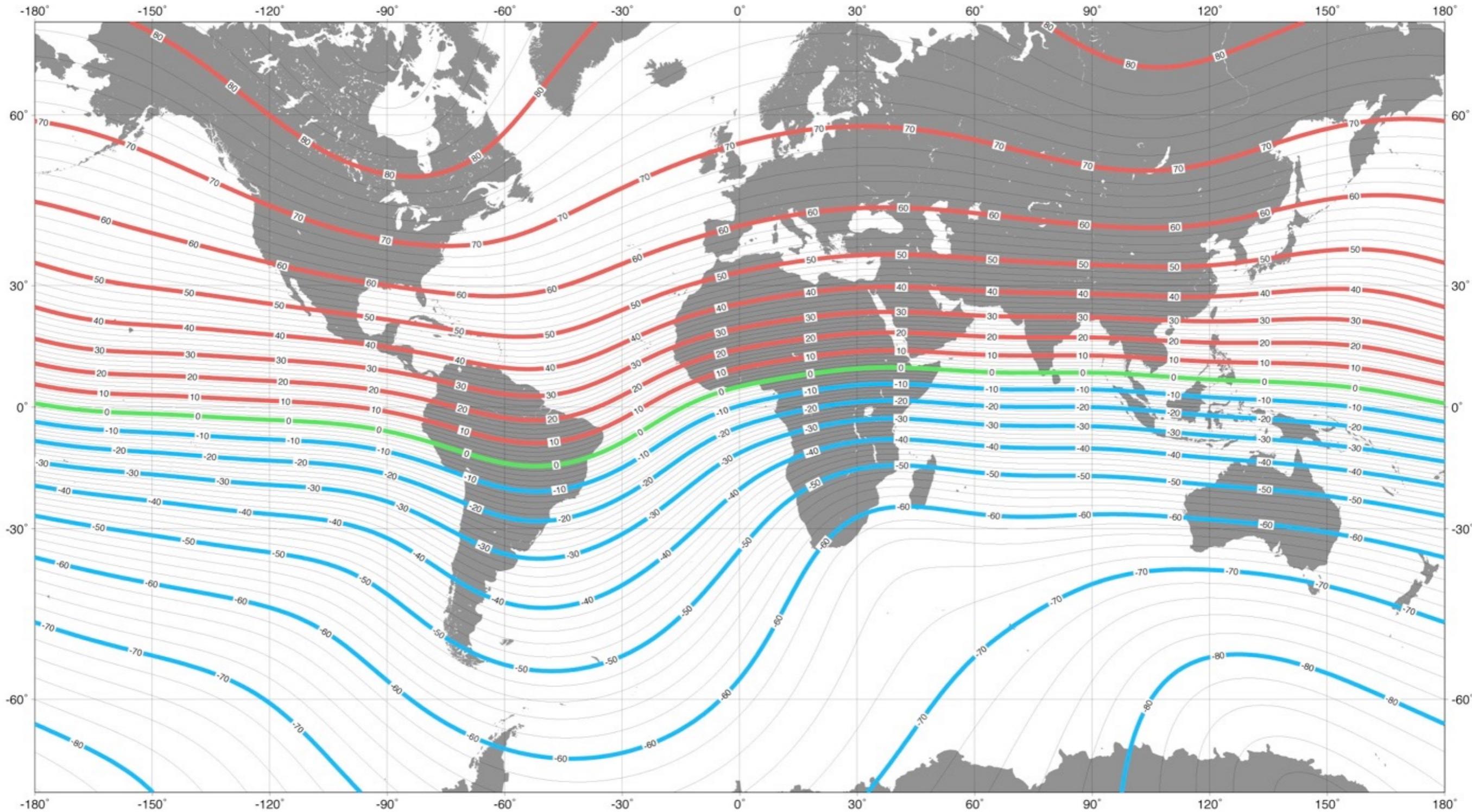
International Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 2010
Main Field Declination (D)



La variation séculaire du CMT

International Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 1900

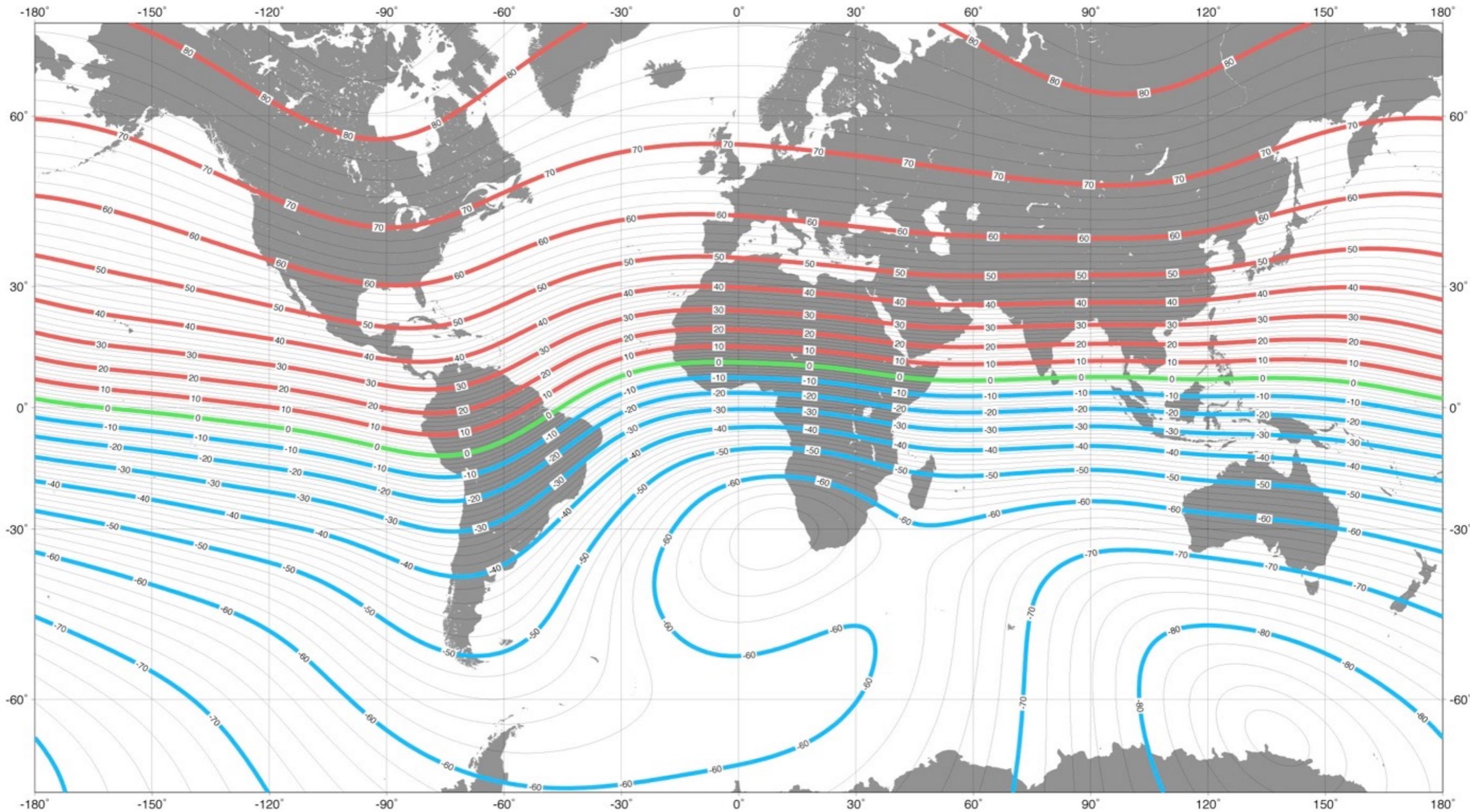
Main Field Inclination (I)



La variation séculaire du CMT

International Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 2010

Main Field Inclination (I)

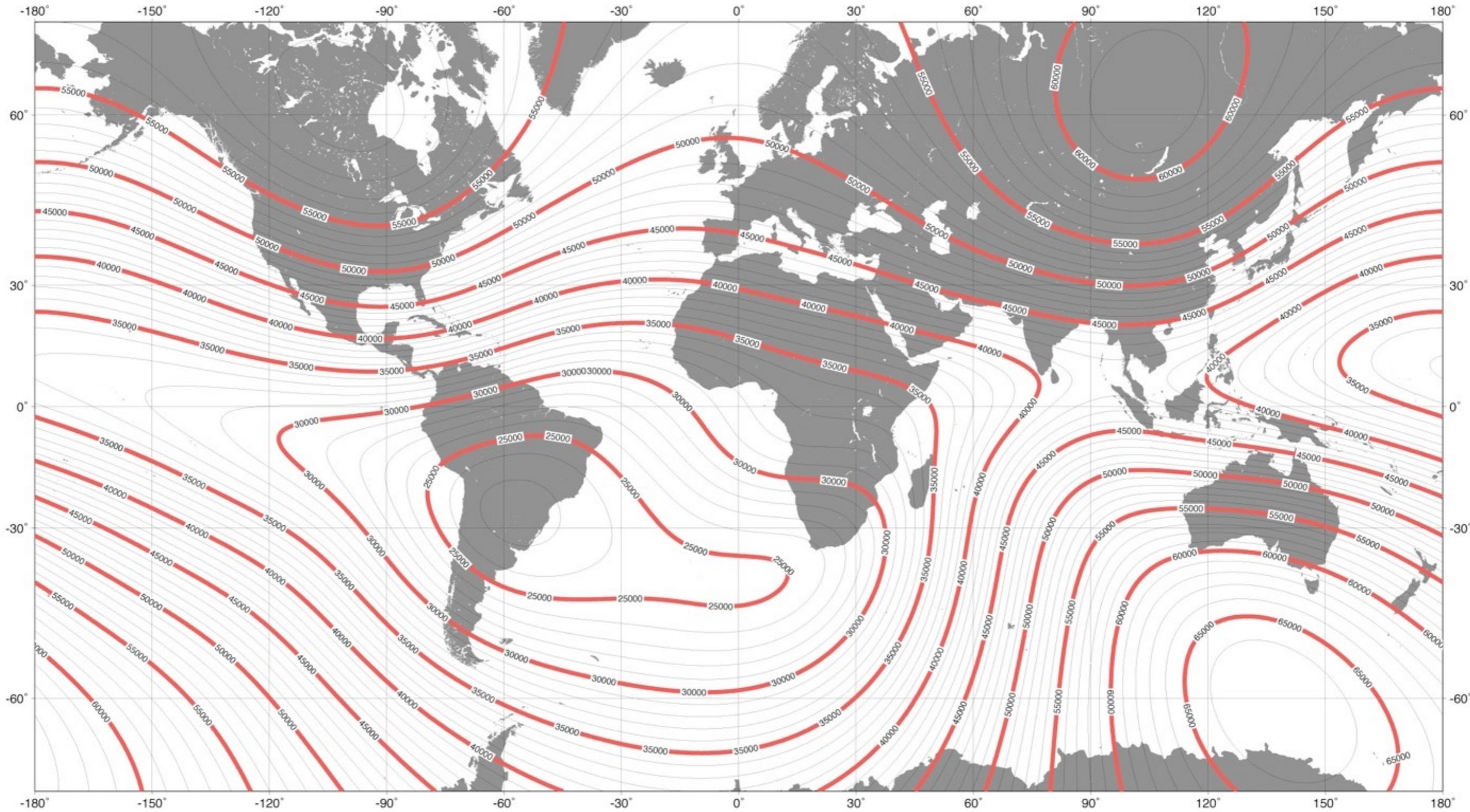


La variation séculaire du CMT

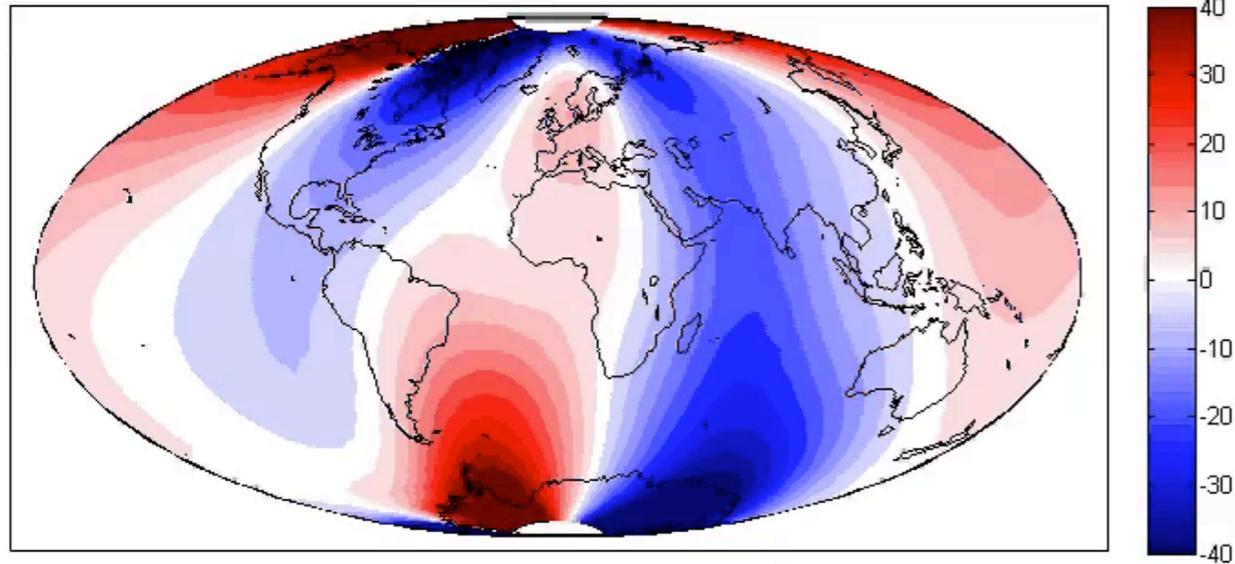
La variation séculaire du CMT

International Geomagnetic Reference Field Model -- Epoch 2010

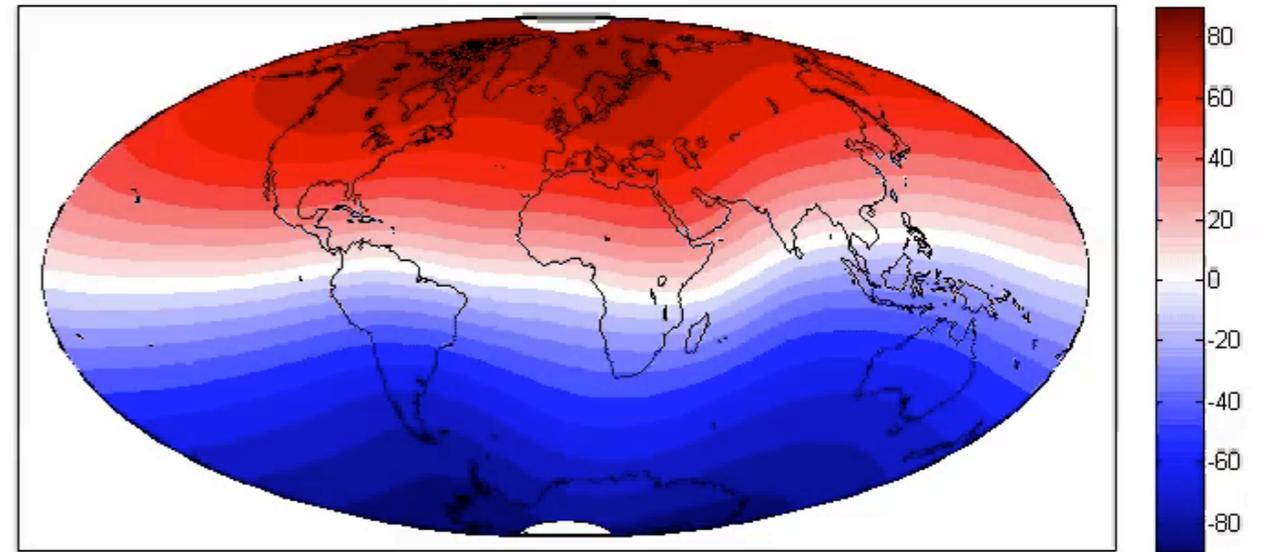
Main Field Total Intensity (F)



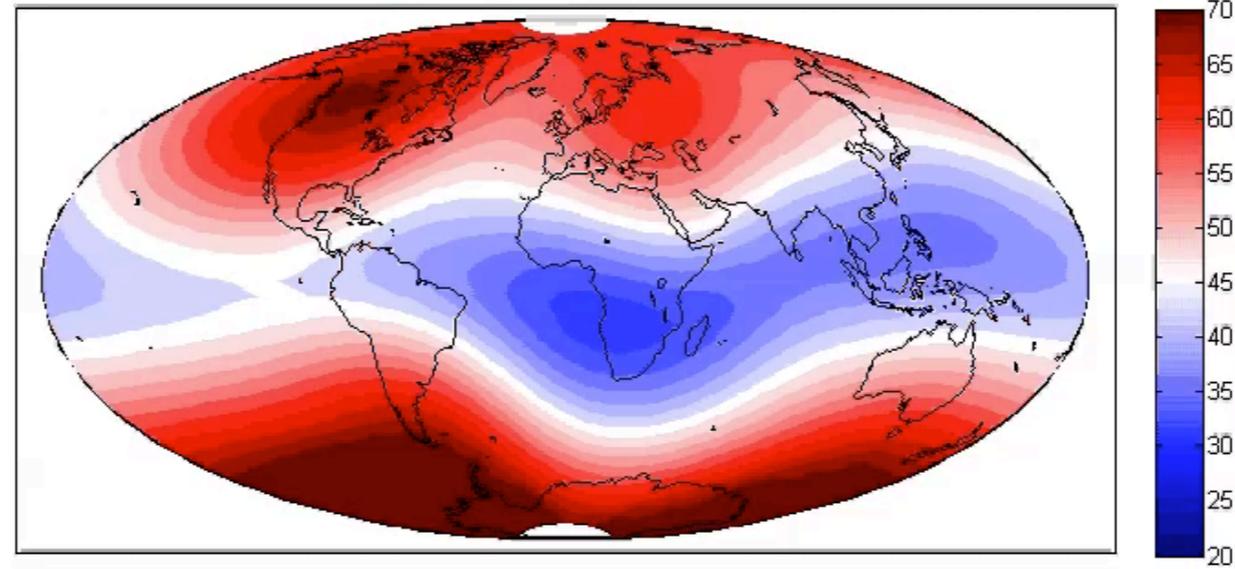
Declination ($^{\circ}$) map, Time = 1590



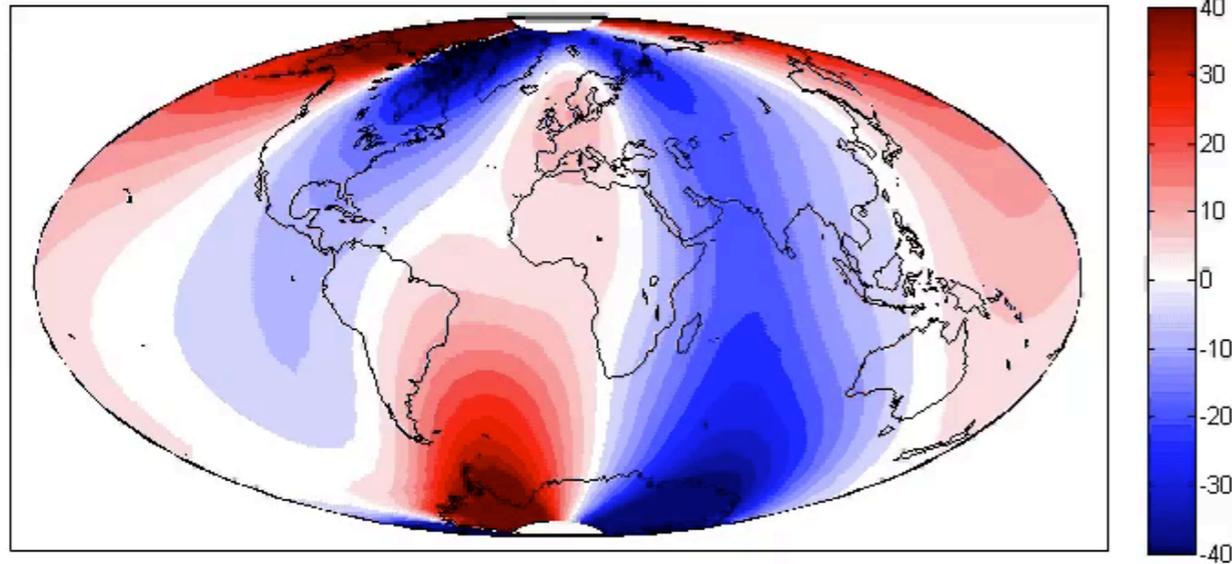
Inclination ($^{\circ}$) map, Time = 1590



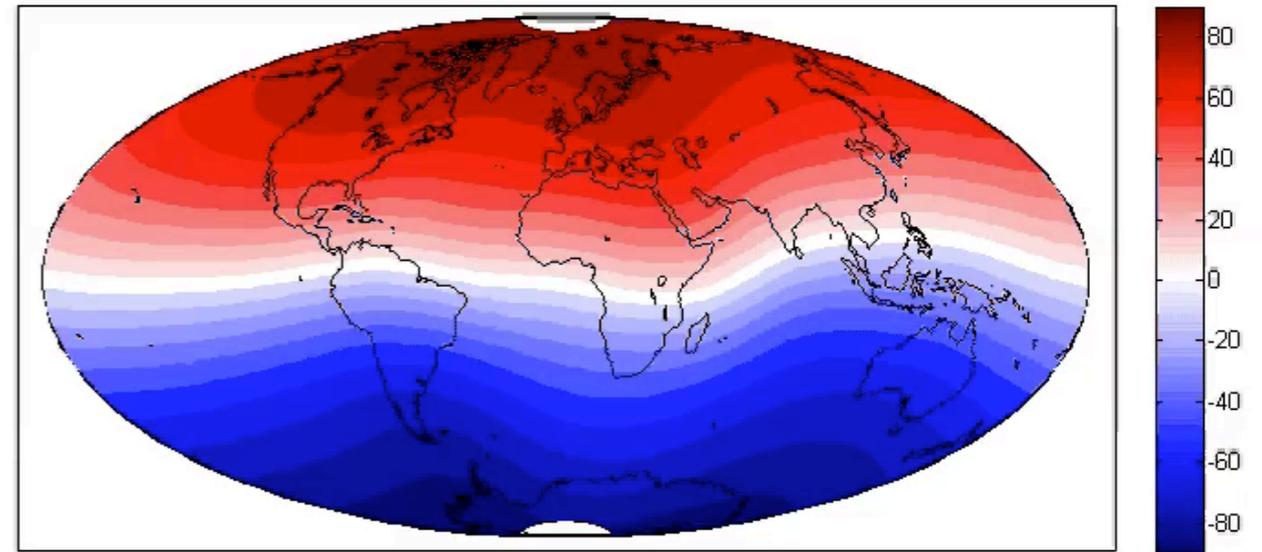
Intensity (μT) map, Time = 1590



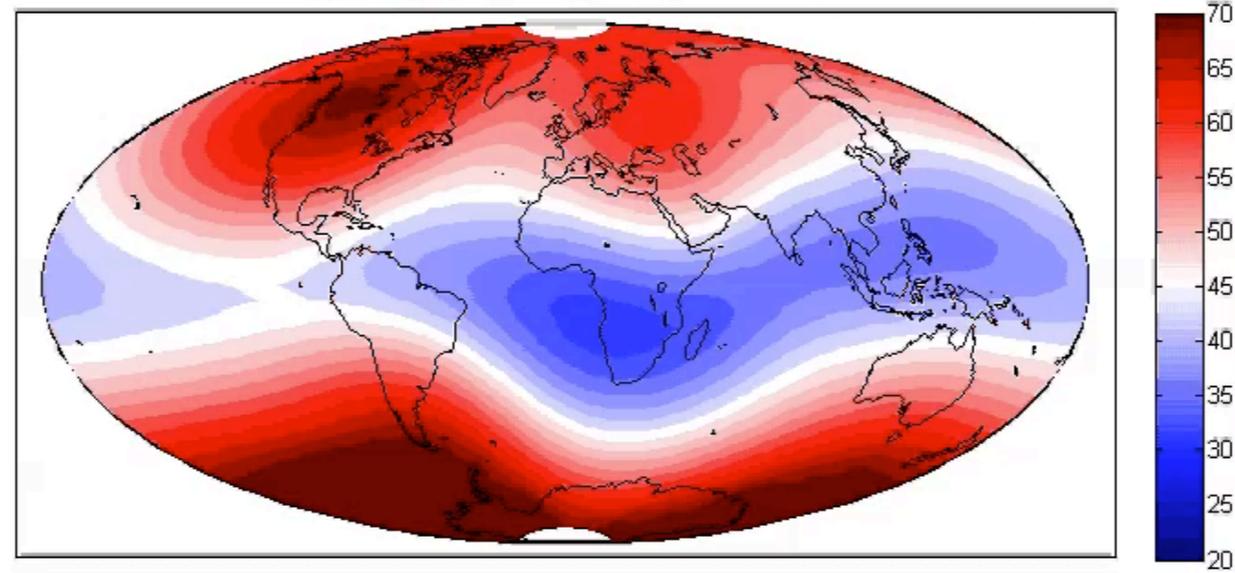
Declination ($^{\circ}$) map, Time = 1590



Inclination ($^{\circ}$) map, Time = 1590



Intensity (μT) map, Time = 1590



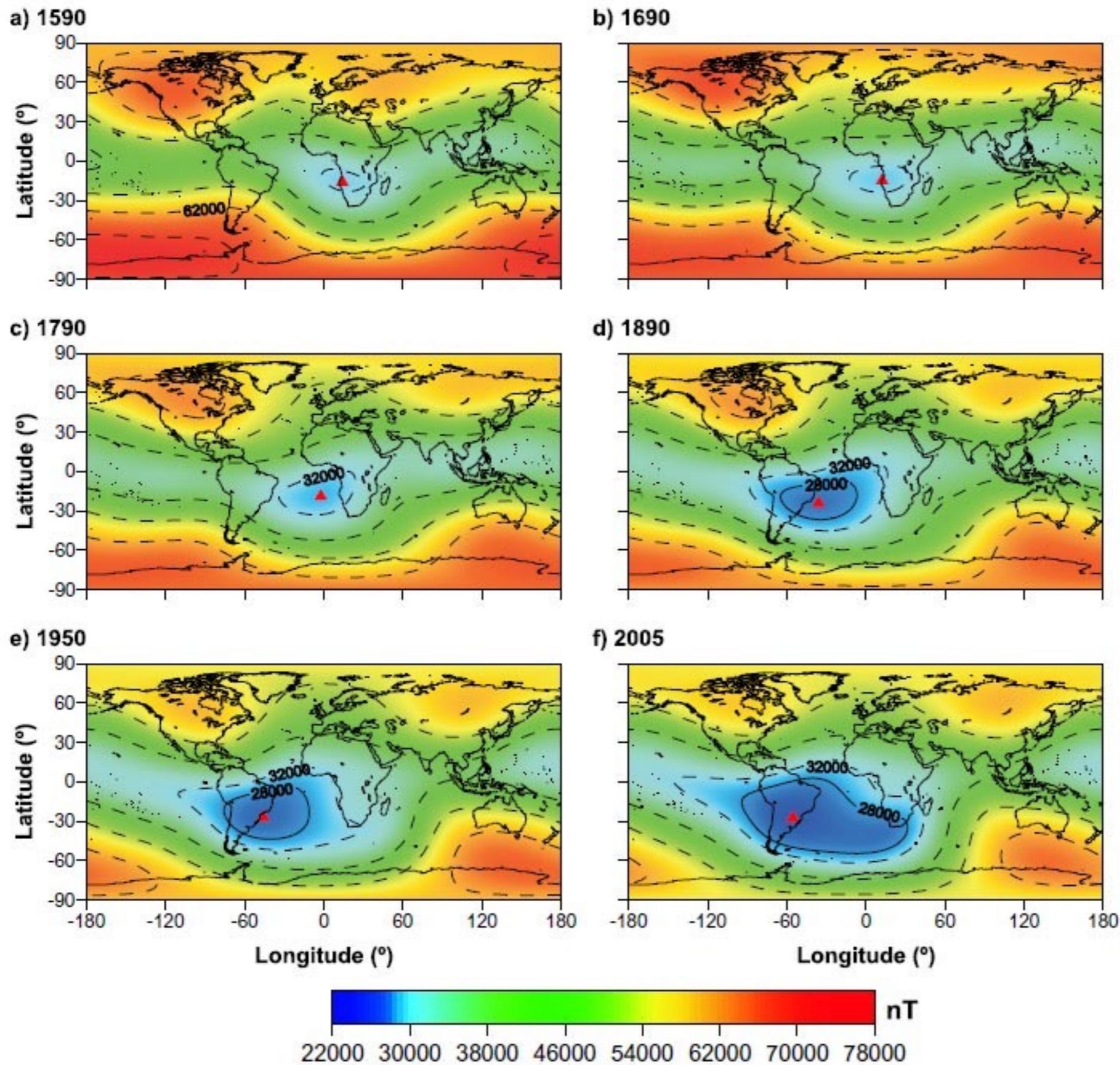
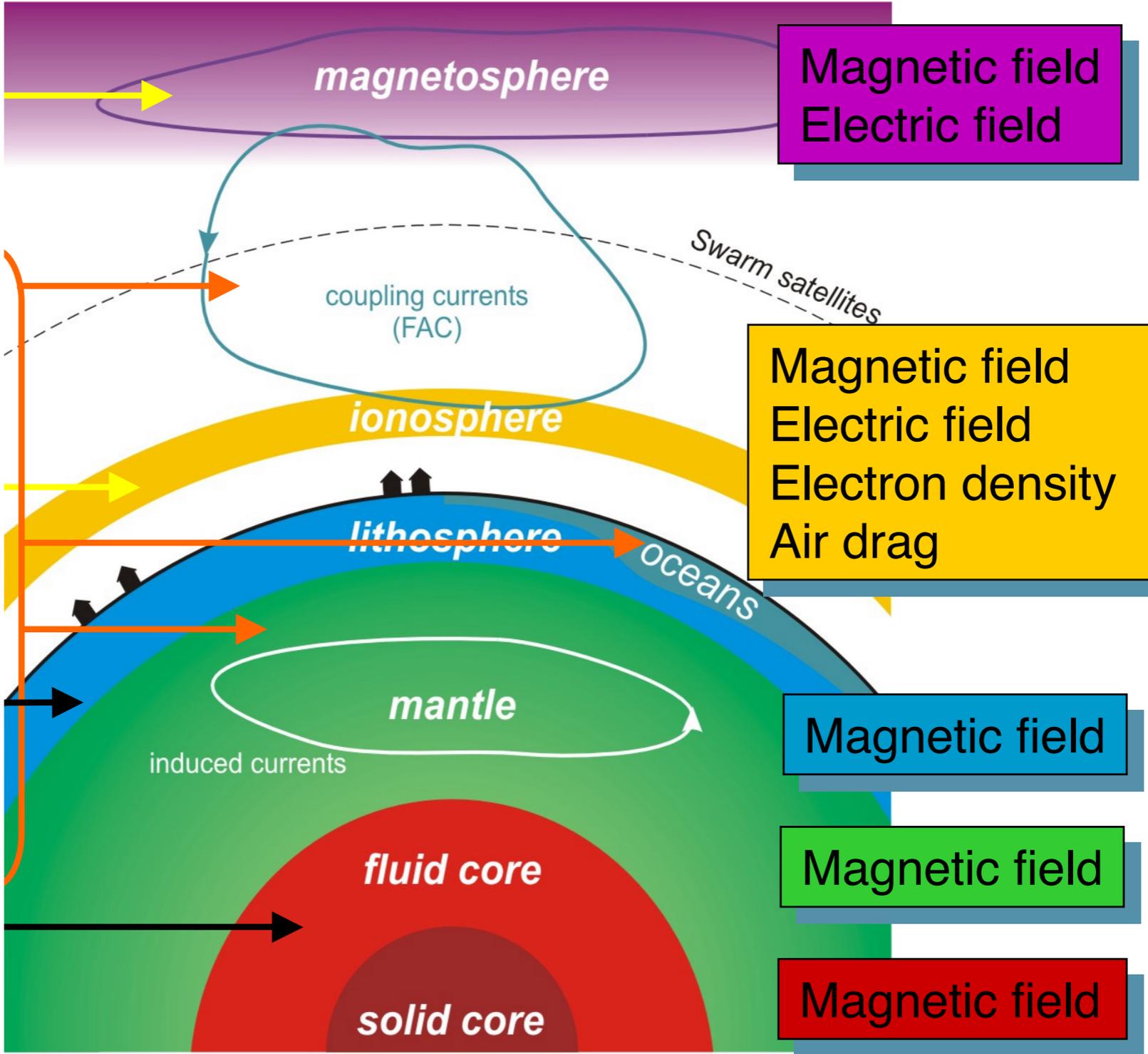


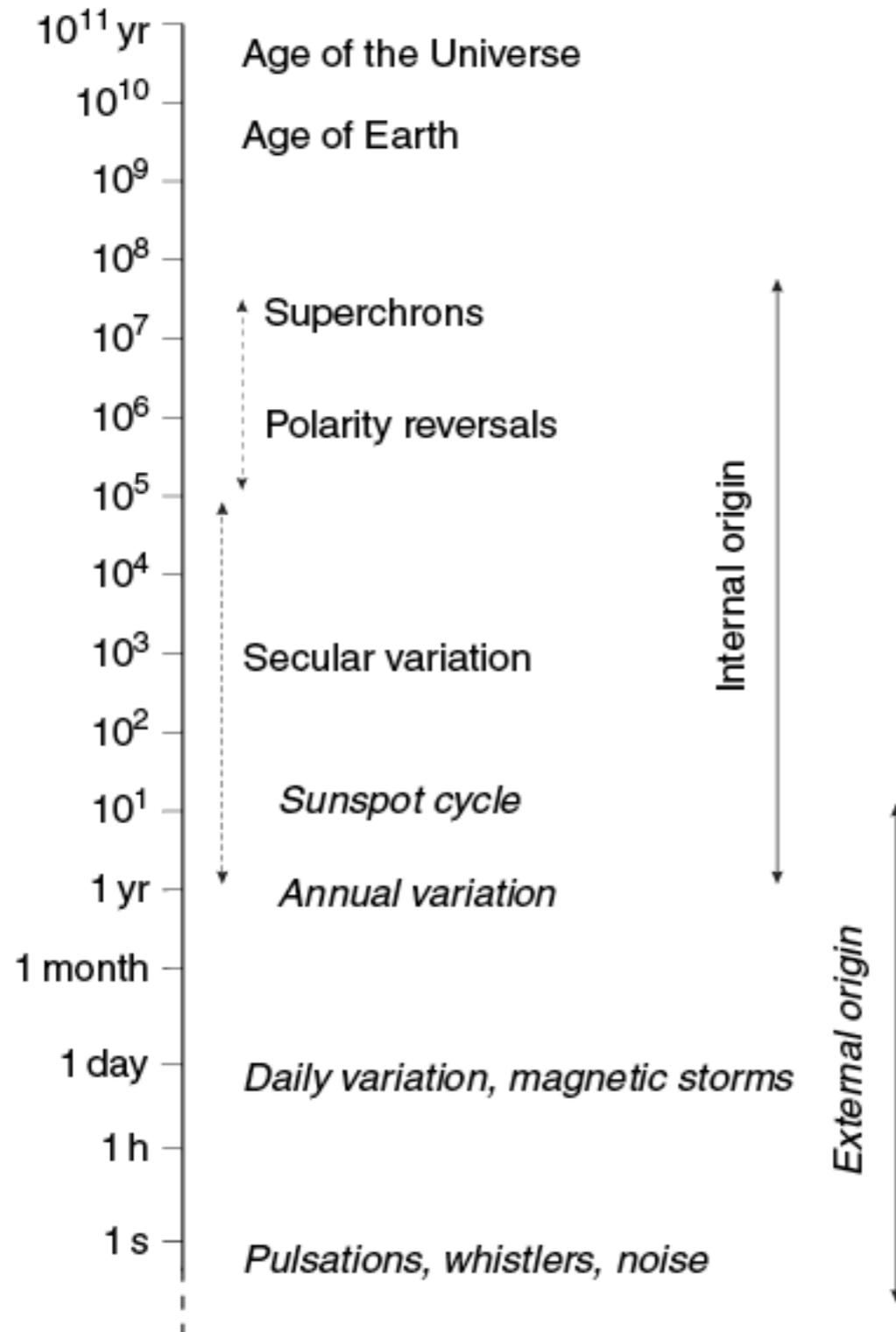
Fig. 1 – Examples of geomagnetic field total intensity maps obtained with GUFMI and IGRF models. The red triangle indicates the SAMA center, and the 28000nT contours shows the SAMA range influence area.

3: Le Champ magnétique terrestre

3.6 Pour conclure

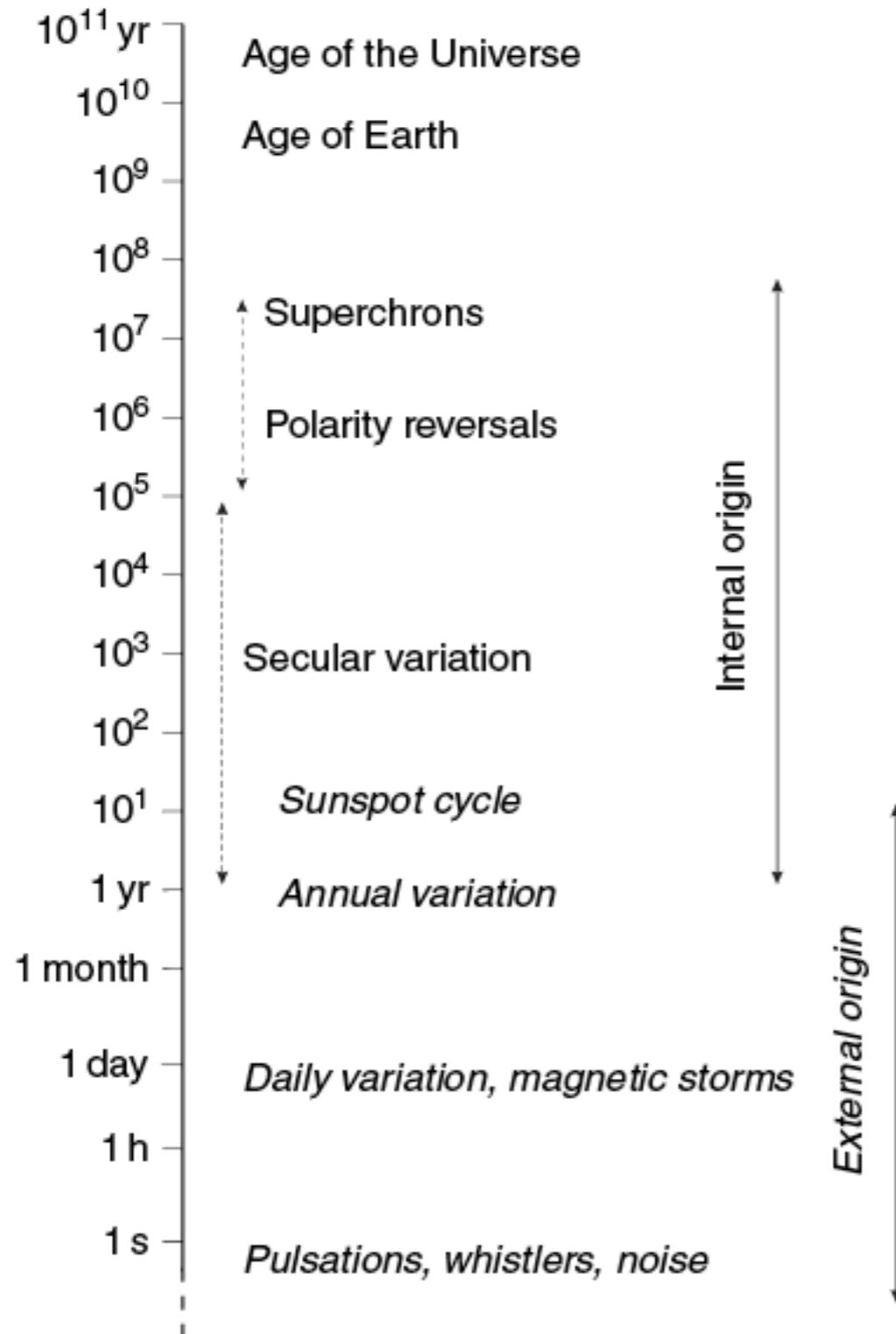


3.6 Pour conclure



Le Champ magnétique Terrestre se caractérise par de larges fluctuations en direction et en intensité.

3.6 Pour conclure



Le Champ magnétique Terrestre se caractérise par de larges fluctuations en direction et en intensité.



Il existe de nombreuses applications pour une meilleure connaissance de notre planète selon si l'on étudie :

**Les fluctuations du champ
ou
Le champ moyen.**