

Mécanique des Fluides Géophysiques.

## 6. Géomagnétisme et Paléomagnétisme.

1

### PLAN

- I Introduction à la Terre profonde et au noyau Terrestre**
- II Le champ magnétique présent**
- III Le champ paléomagnétique – Propriétés magnétiques des matériaux**
- IV La Dynamique des Fluides du Noyau Terrestre**

2

# I Introduction au Noyau Terrestre

3

## LA TERRE PROFONDE

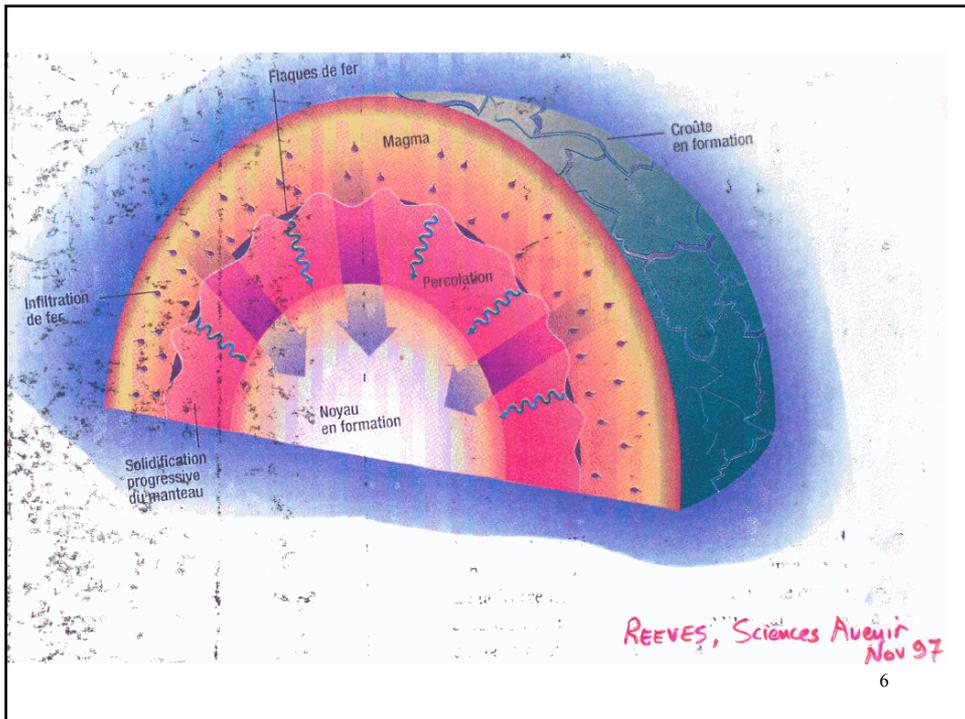
	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
Origine	•		•
Structure radiale	•		•
Composition	•	•	
Température,	•	•	

4

## LA TERRE PROFONDE

	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accrétion, chaleur →</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fusion, percolation, différenciation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? Convection du manteau</li> <li>• ? Filtration du noyau vers le manteau</li> </ul>
<b>Structure radiale</b>	•		•
<b>Composition</b>	•	•	
<b>Température,</b>	•	•	

5



6

## LA TERRE PROFONDE

	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accrétion, chaleur →</li> </ul>	Fusion, percolation, différenciation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? Convection du manteau</li> <li>• ? Filtration du noyau vers le manteau</li> </ul>
<b>Structure radiale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1936 : Inge Lehman, Triplification des ondes, nouvelle frontière graine-solide/noyau liquide</li> <li>• Ellipticité à 1 km près.</li> <li>• Anisotropie de la graine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1914 : Gutenberg, rayon de du noyau à 1%</li> <li>• 1926 : Jeffreys : noyau liquide</li> <li>• PREM : modèle globale axisymétrique (inversion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Années 1980 : Tomographie 3D, Structure hétérogène, couche D'' sur environ 300Km</li> <li>• Ultra Low Velocity Zone (ULVZ) sur environ 50 Km</li> </ul>
<b>Composition</b>	•	•	
<b>Température,</b>	•	•	

7

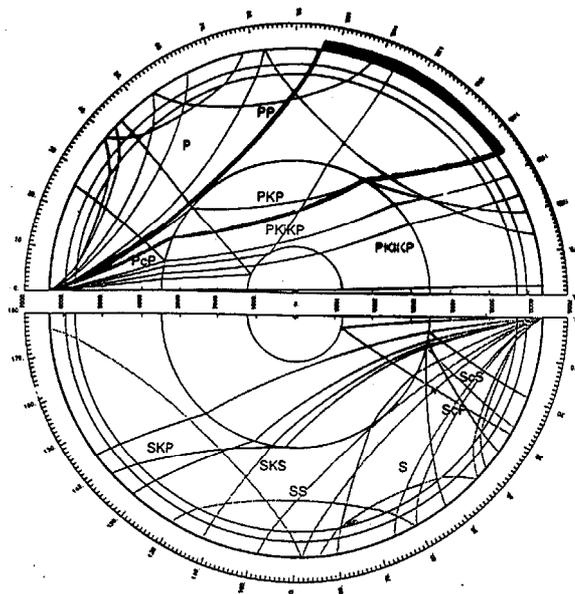
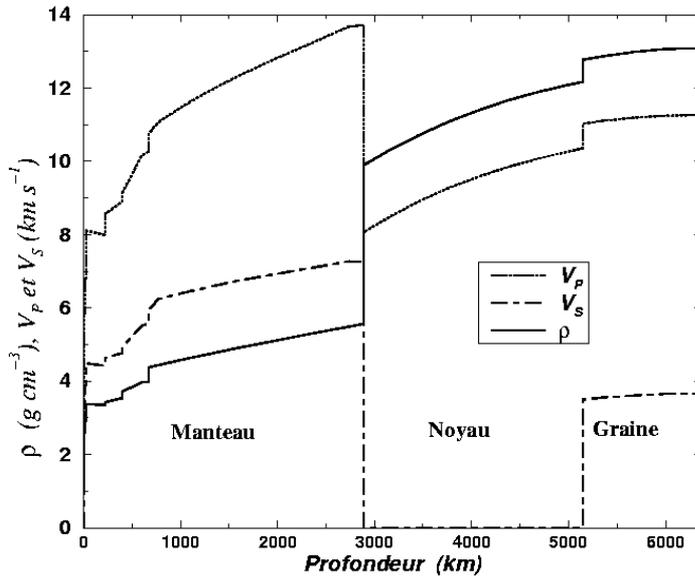


Figure 5.15. Paths of seismic rays through the Earth, illustrating their nomenclature. Figure by courtesy of B.L.N. Kennett.

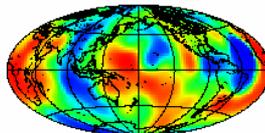
8



9

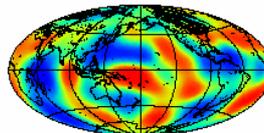
## MANTLE TOMOGRAPHIC MODELS

depth 2886 Km



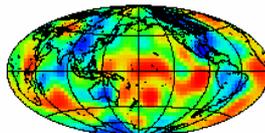
$$-3\% < \delta V_s / V_s < 8\%$$

*Sylvander and Souriau, 1996*



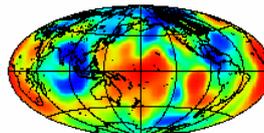
$$-2.5\% < \delta V_p / V_p < 1.5\%$$

*Wysession, 1996*



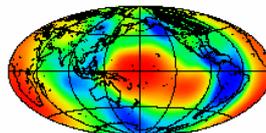
$$-4.5\% < \delta V_s / V_s < 4\%$$

*Li and Romanowicz, 1995*



$$-4.5\% < \delta V_s / V_s < 3.5\%$$

*Dziewonski et al., 1996*



$$-4\% < \delta V_s / V_s < 3\%$$

*Masters et al., 1996*

10

## LA TERRE PROFONDE

	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accrétion, chaleur →</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fusion, percolation, différenciation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? Convection du manteau</li> <li>• ? Filtration du noyau vers le manteau</li> </ul>
<b>Structure radiale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1936 : Inge Lehman, Triplification des ondes, nouvelle frontière graine-solide/noyau liquide</li> <li>• Ellipticité à 1 km près.</li> <li>• Anisotropie de la graine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1914 : Gutenberg, rayon de du noyau à 1%</li> <li>• 1926 : Jeffreys : noyau liquide</li> <li>• PREM : modèle globale axisymétrique (inversion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Années 1980 : Tomographie 3D, Structure hétérogène, couche D'' sur environ 300Km</li> <li>• Ultra Low Velocity Zone (ULVZ) sur environ 50 Km</li> </ul>
<b>Composition</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fer principalement</li> <li>• Phase du fer stable à haute pression ?? (explication de l'anisotropie..)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1950 : Birch, équation d'état du fer à haute pression (thermodynamique)</li> <li>• 80 à 90% de Fer + éléments légers.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ?? Résidu du manteau + Fer Noyau, hétérogénéité de conductivité thermique ?, électrique ?..</li> </ul>
<b>Température,</b>	•	•	

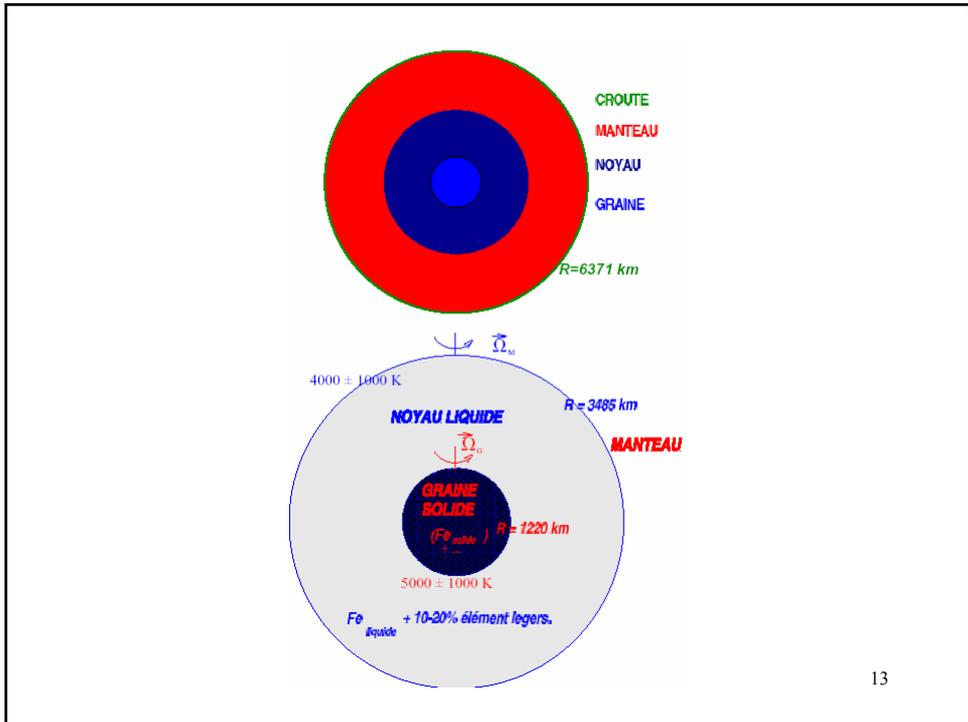
11

Table 2  
Composition of the core and the bulk earth

CORE (Wt%)	BULK EARTH (Wt%)
Fe = 79.39 ± 2	O = 32.436
Ni = 4.87 ± 0.3	Si = 17.221
Si = 7.35	Al = 1.507
S = 2.30 ± 0.2	Mg = 15.866
O = 4.10 ± 0.5	Fe = 28.176
	Ca = 1.607
	K = 0.0192
	S = 0.7010
	Na = 0.249
	Ti = 0.0710
	Ni = 1.6147
<u>In ppm</u>	<u>In ppm</u>
Mn = 5 820	Mn = 2 600
Cr = 7 790	Cr = 4 290
Co = 2 530	Co = 870
P = 3 690	P = 1 240

[Allègre et al., 1995]

12



13

## LA TERRE PROFONDE

	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
<b>Origine</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accrétion, chaleur</li> <li>→</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fusion, percolation, différenciation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? Convection du manteau</li> <li>• ? Filtration du noyau vers le manteau</li> </ul>
<b>Structure radiale</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1936 : Inge Lehman, Triplification des ondes, nouvelle frontière graine-solide/noyau liquide</li> <li>• Ellipticité à 1 km près.</li> <li>• Anisotropie de la graine.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1914 : Gutenberg, rayon de du noyau à 1%</li> <li>• 1926 : Jeffreys : noyau liquide</li> <li>• PREM : modèle globale axisymétrique (inversion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Années 1980 : Tomographie 3D, Structure hétérogène, couche D'' sur environ 300Km</li> <li>• Ultra Low Velocity Zone (ULVZ) sur environ 50 Km</li> </ul>
<b>Composition</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fer principalement</li> <li>• Phase du fer stable à haute pression ? ? (explication de l'anisotropie..)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1950 : Birch, équation d'état du fer à haute pression (thermodynamique)</li> <li>• 80 à 90% de Fer + éléments légers.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? ? Résidu du manteau + Fer Noyau, hétérogénéité de conductivité thermique ?, électrique ?..</li> </ul>
<b>Température</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? T°</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ? T°</li> <li>• Différence de 1000°K si noyau liquide bien mélangé, adiabatique.</li> <li>• Calculer le profil de Température avec le diagramme de phase de Fer+ éléments légers...</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hétérogène probablement. Couverture thermique.</li> </ul>

14

	<b>Graine</b>	<b>Noyau Liquide</b>	<b>Frontière Noyau-Manteau ou CMB</b>
<b>Flux de Chaleur</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux du noyau : il faudrait connaître celui du manteau précisément. (éléments radioactifs K ? ?).</li> </ul>	
<b>Age, Durée de vie</b>	•	•	•
<b>Rôle dans le système Terre</b>	•	•	
<b>Vitesse, Dynamique</b>	•	•	

15

	<b>Graine</b>	<b>Noyau Liquide</b>	<b>Frontière Noyau-Manteau ou CMB</b>
<b>Flux de Chaleur</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux du noyau : il faudrait connaître celui du manteau précisément. (éléments radioactifs K ? ?).</li> </ul>	
<b>Age, Durée de vie</b>	• 2 Milliards ? ?	• <4.56 Milliards	• ?
<b>Rôle dans le système Terre</b>	•	•	
<b>Vitesse, Dynamique</b>	•	•	

16

	<b>Graine</b>	<b>Noyau Liquide</b>	<b>Frontière Noyau-Manteau ou CMB</b>
<b>Flux de Chaleur</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux du noyau : il faudrait connaître celui du manteau précisément. (éléments radioactifs K ? ?).</li> </ul>	
<b>Age, Durée de vie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 Milliards ? ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt;4.56 Milliards</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>?</li> </ul>
<b>Rôle dans le système Terre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rejets d'éléments légers lors de la cristallisation <u>CONVECTION THERMIQUE ET COMPOSITIONNELLE</u></li> <li>Stabiliser l'écoulements dans le noyau ? ?</li> <li>Super rotation ; : rôle dans la dynamo ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Génération du champ magnétique</li> <li>-transport de la chaleur par la convection</li> <li>Intervient dans l'équilibre du moment cinétique de la Terre (variation de la longueur du jour)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande constante dans la dynamique du noyau</li> <li>Couverture thermique</li> <li>Guide de conductivité électrique ? ?</li> <li>Influence de la topographie</li> <li>Couplage gravitationnelle</li> </ul>
<b>Vitesse, Dynamique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li></li> </ul>	

17

	<b>Graine</b>	<b>Noyau Liquide</b>	<b>Frontière Noyau-Manteau ou CMB</b>
<b>Flux de Chaleur</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Flux du noyau : il faudrait connaître celui du manteau précisément. (éléments radioactifs K ? ?).</li> </ul>	
<b>Age, Durée de vie</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 Milliards ? ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt;4.56 Milliards</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>?</li> </ul>
<b>Rôle dans le système Terre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rejets d'éléments légers lors de la cristallisation <u>CONVECTION THERMIQUE ET COMPOSITIONNELLE</u></li> <li>Stabiliser l'écoulements dans le noyau ? ?</li> <li>Super rotation ; : rôle dans la dynamo ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Génération du champ magnétique</li> <li>-transport de la chaleur par la convection</li> <li>Intervient dans l'équilibre du moment cinétique de la Terre (variation de la longueur du jour)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande constante dans la dynamique du noyau</li> <li>Couverture thermique</li> <li>Guide de conductivité électrique ? ?</li> <li>Influence de la topographie</li> <li>Couplage gravitationnelle</li> </ul>
<b>Vitesse, Dynamique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>0,1%, 0,2% de super rotation ? ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A la surface du noyau, 0.0001 m/s...</li> <li>Tomographie du noyau ? ?</li> </ul>	

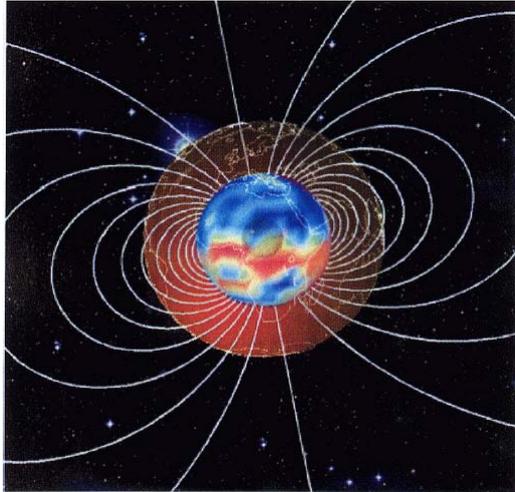
18

	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
Champ magnétique		•	
Age	•		
Rôle	•	•	•
Origine des inversions ??	•	•	•

19

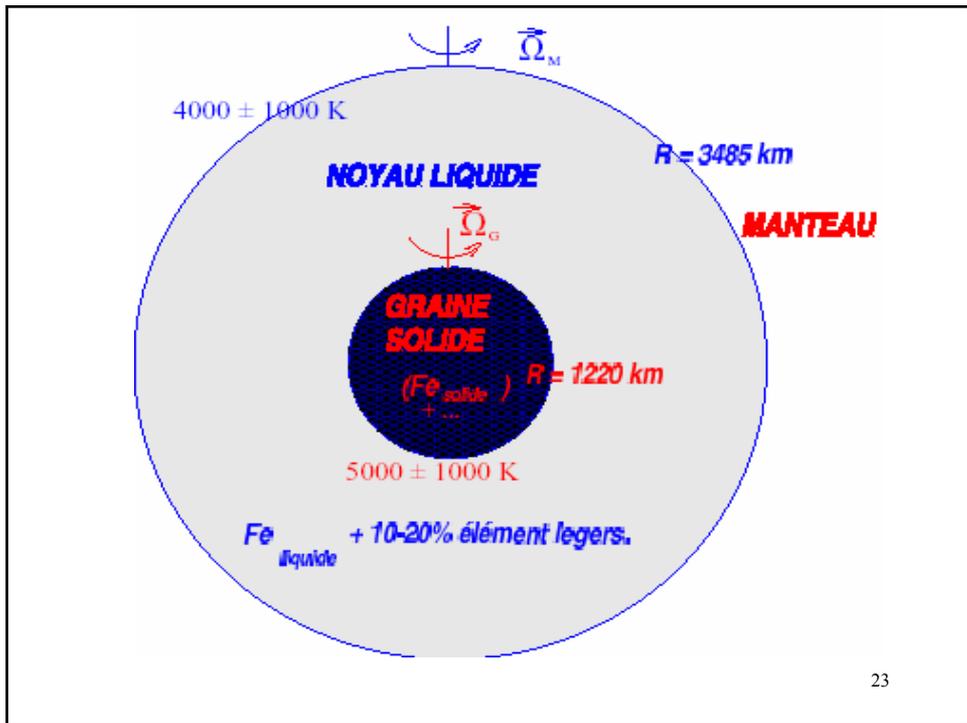
	Graine	Noyau Liquide	Frontière Noyau-Manteau ou CMB
Champ magnétique		• Dipolaire	
Age	• Au moins depuis 3,6 milliards d'années		
Rôle	•	•	•
Origine des inversions ??	•	•	•

20



*Lignes de champ magnétique dipolaire  
et  
Br à la surface Noyau-manteau*

	<b>Graine</b>	<b>Noyau Liquide</b>	<b>Frontière Noyau-Manteau ou CMB</b>
<b>Champ magnétique</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Dipolaire</li> </ul>	
<b>Age</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Au moins depuis 3,6 milliards d'années</li> </ul>		
<b>Rôle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stabiliser le champ magnétique ?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lieu de génération du champ magnétique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superchron ??</li> </ul>
<b>Origine des inversions ??</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>?</li> </ul>



23

## II) Le champ magnétique présent.

24

**Définition:** Lorsque dans une région de l'espace, on a attaché à chaque point une grandeur scalaire vectorielle, on a défini ce qu'on appelle un **CHAMP** (respectivement scalaire ou vectoriel).

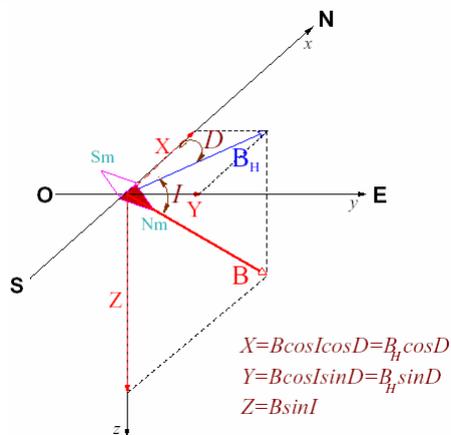
## Champ magnétique vectoriel

$$\vec{B}(\vec{X}, t)$$

Définir la région d'étude  
+ les conditions aux limites

25

### LES ELEMENTS DU CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE.



- La **Déclinaison**  $D$  est l'angle entre le Nord Géographique et la composante horizontale du champ magnétique. Elle est comptée positivement vers l'est.
- L' **Inclinaison**  $I$  est l'angle entre le champ total et sa composante horizontale. Elle est comptée positivement vers le bas.

26

## HISTORIQUE DE LA DECOUVERTE DU CHAMP MAGNETIQUE.

- Propriétés attractives connues depuis anciens grecs (Thalès, 6ème siècle AC) et les vieux chinois (3ème siècle AC). « tzhu shih » « pierre qui s'aiment »
- première boussole (cuillère), 1<sup>er</sup> siècle AC
- Découverte de la déclinaison en Europe au 15<sup>ème</sup> siècle
- 1600, William Gilbert (docteur de la reine Elisabeth I)

### *Magnus magnes ipse est globus terrestris*

- Première propriété attribué globalement à la Terre (87 ans avant la gravitation de Newton).
- 1634 , Gellibrand : la déclinaison change au cours du temps
- 1702 : première carte de déclinaison de Halley.
- 1840 : Gauss démontre que le champ magnétique terrestre est d'origine INTERNE.

27

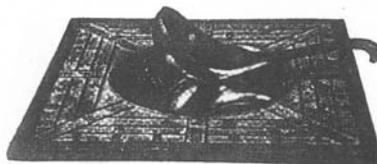
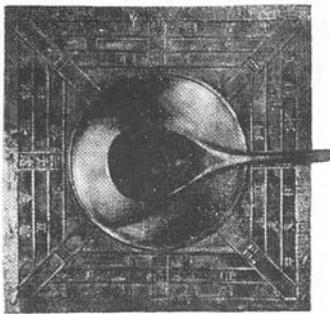


Fig. 1.1. Model lodestone spoon (shao) and bronze earth plate of the shih constructed by Wang Chen-To (1948). This is probably the earliest form of magnetic compass. North is to the left. Reproduced from Needham (1962) with the kind permission of Cambridge University Press.

28

## REPRESENTATION DES DONNEES DU CHAMP MAGNETIQUE.

On représente les éléments du champ B en traçant sur un planisphère les lignes d'égales valeurs de la composante :

*Isogones* : ligne d'égale valeur de *déclinaison* magnétique

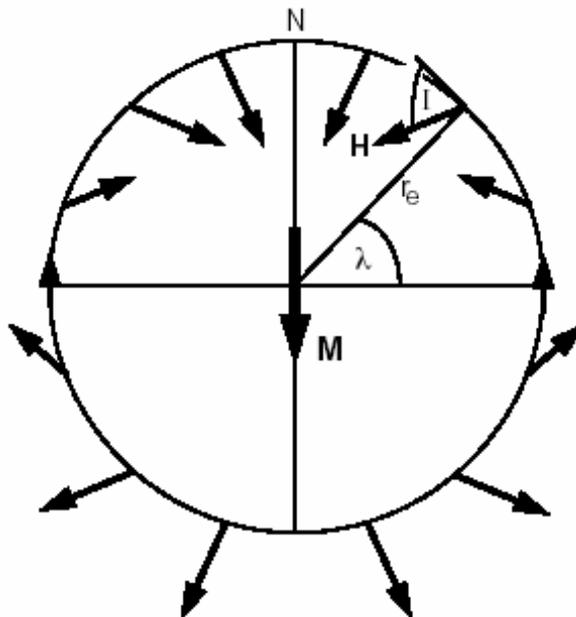
*Isoclines* : ligne d'égale valeur de l'*inclinaison* magnétique

*Isogames* : ligne d'égale valeur pour les autres valeurs

→ cartes de variations à grandes échelles de longueurs d'ondes de l'ordre de 3000

→ km (40000/13). Pour aller au delà il faut un réseau plus dense.

29



30

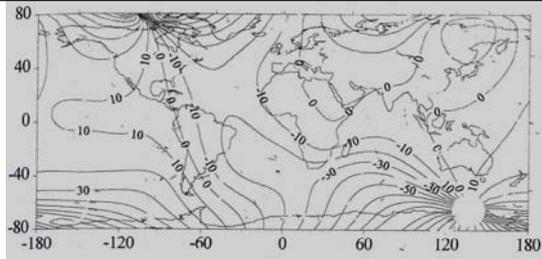


Fig. 2.3a. Isogonic chart for 1990 showing the variation in declination in degrees over the Earth's surface.

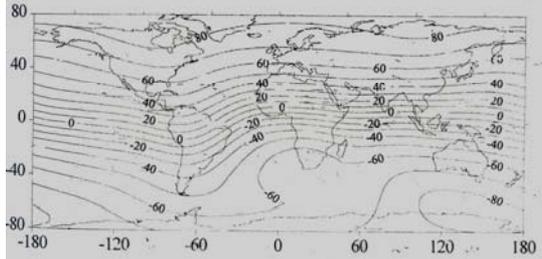


Fig. 2.3b. Isoclinic chart for 1990 showing the variation of inclination in degrees over the Earth's surface.

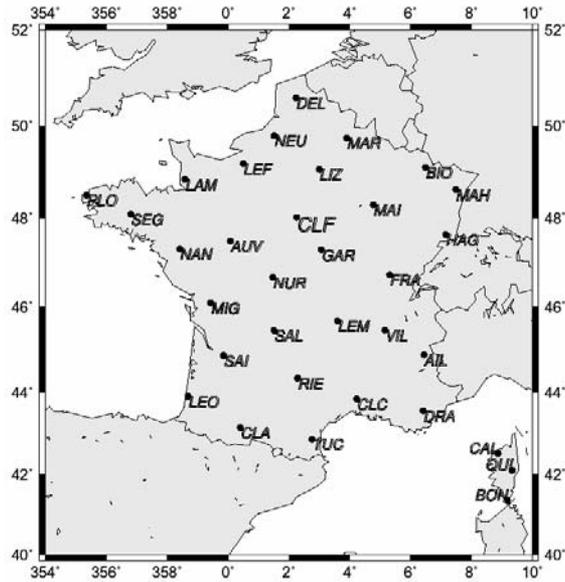
31

## LES MESURES DU CHAMP MAGNETIQUE.

• Mesures permanentes

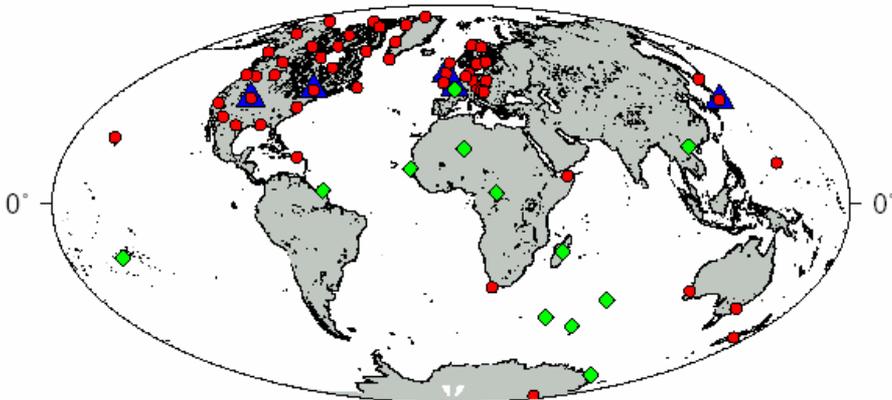
32

## Carte des stations de répétitions françaises.

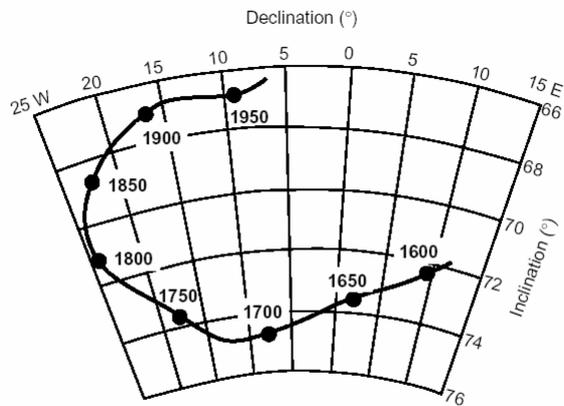


33

## Réseau intermagnet.



34



**Figure 1.7** Historic record of geomagnetic field direction at Greenwich, England. Declination and inclination are shown; data points are labeled in years A.D.; azimuthal equidistant projection. Redrawn after Malin and Bullard (*Phil. Trans. Roy. Soc. London*, v. A299, 357–423, 1981.)

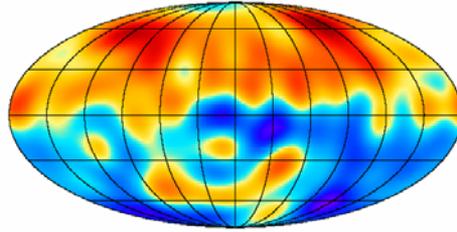
35

## LES MESURES DU CHAMP MAGNETIQUE.

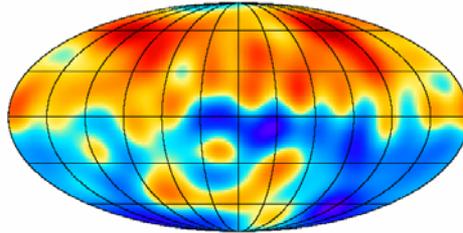
- Mesures permanentes.
- Mesures temporaires.

36

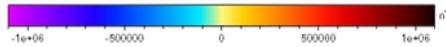
Composante radiale du champ magnétique  
à la surface du NOYAU



1980, données du satellite MAGSAT



2000, données du satellite OERSTED



37

ANALYSE DU CHAMP MESURE

$$B_{total} = B_{interne} + B_{secondaire} + B_{externe}$$

38

## ANALYSE DU CHAMP MESURE

*B*secondaire

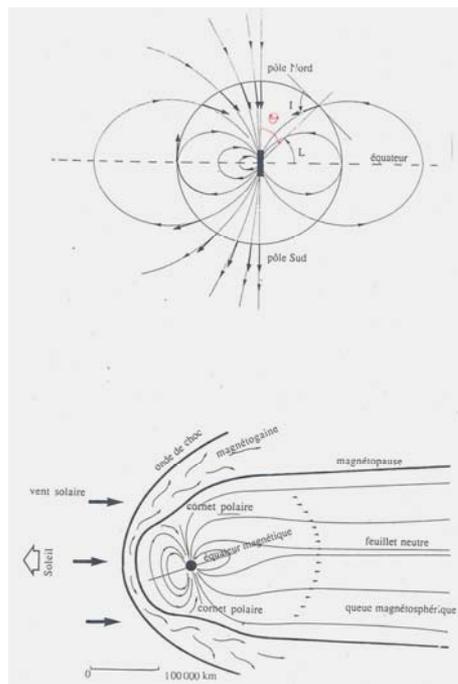
Croûte terrestre

*B*externe

Soleil

39

## Magnétosphère



40

## Le champ magnétique terrestre d'origine INTERNE

- Le champ magnétique dipolaire
- Le champ magnétique non-dipolaire

41

Dans un isolant:

$$\vec{Rot}\vec{B} = \mu_0\vec{J} = \vec{0}$$

le champ magnétique à l'extérieur du noyau dérive d'un potentiel scalaire  $V$ ,  $\vec{B} = -\vec{\nabla}V$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \rightarrow \text{div}(\text{grad}V) = \Delta V = 0$$

Equation de Laplace à résoudre en coordonnées sphérique

Décomposition de  $\vec{B}$  en harmoniques sphériques.

Hypothèse: solution à variables séparables

$$V = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)$$

On en déduit:

$$V(r, \theta, \phi) = \left(Kr^J + \frac{K'}{r^{J+1}}\right) \times P_m^J(\theta) \times e^{im\phi}$$

1840 (Gauss)

Champ magnétique terrestre d'ORIGINE INTERNE.

42

### LE CHAMP MAGNETIQUE DIPOLAIRE 1)

On peut considérer la basse atmosphère (sous l'ionosphère) et le manteau au premier comme isolant électrique. On peut alors écrire les équations de Maxwell appliquées à un isolant

$$\text{Rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J} = \vec{0}$$

alors on en déduit que le champ magnétique à l'extérieur du noyau dérive d'un potentiel scalaire  $V$ ,  $\vec{B} = -\vec{\nabla}V$ .

$$V(r) = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \vec{M} \cdot \vec{r}$$

à une distance  $r$  du centre.

$$\vec{B} = -\vec{\nabla}V(r)$$

en coordonnées sphériques.

$$\vec{\nabla}V = \left( \frac{\partial V}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta}, \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \right)$$

d'où

$$B_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2}{r^3} M \cos \theta$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{r^3} M \sin \theta$$

$$B_\phi = 0$$

$\theta$  étant la colatitude.

43

### LE CHAMP MAGNETIQUE DIPOLAIRE 2)

Si l'on pose  $B = \vec{B}$  alors

$$B^2 = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{M}{r^3}\right)^2 (4 \cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{M}{r^3}\right)^2 (1 + 3 \cos^2 \theta)$$

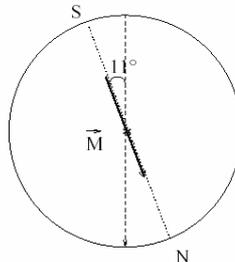
$$B = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \cdot \left(\frac{M}{r^3}\right) \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}$$

En sachant que,  $M = 7.97 \cdot 10^{22} \text{ A/m}^2$

$$\left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \cdot \left(\frac{M}{r^3}\right) = 3.08 \cdot 10^{-5} T = 30800 nT$$

A remarquer:

$$Z = -B_r \text{ et } H = -B_\theta \quad (B_\phi = 0)$$



44

## DEFINITIONS DES DIFFERENTS POLES.. DU CHAMP MAGNETIQUE.

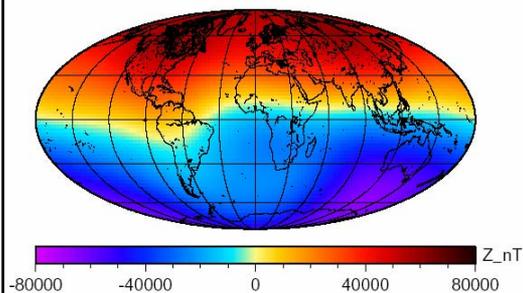
**Nord Géographique** : Intersection de l'axe de rotation avec la surface du globe.

**Pôles Géomagnétiques** : Intersection de l'axe du dipôle avec la surface du globe.

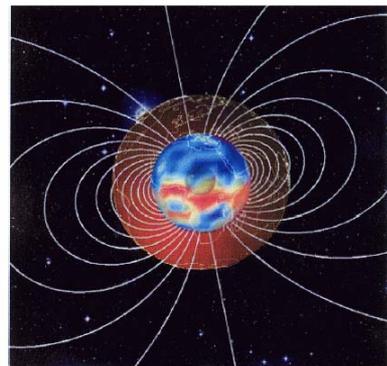
**Pôles Magnétiques** : 2 points près des pôles géomagnétiques où le champ magnétique est vertical.

45

## Le champ magnétique dipolaire



Oersted 2000



Dipolar magnetic field

**80 à 90 % de l'énergie totale du champ magnétique terrestre**

46

***Pôles magnétiques (modèle 1995)***

**79.0 N et 105.1 Ouest**

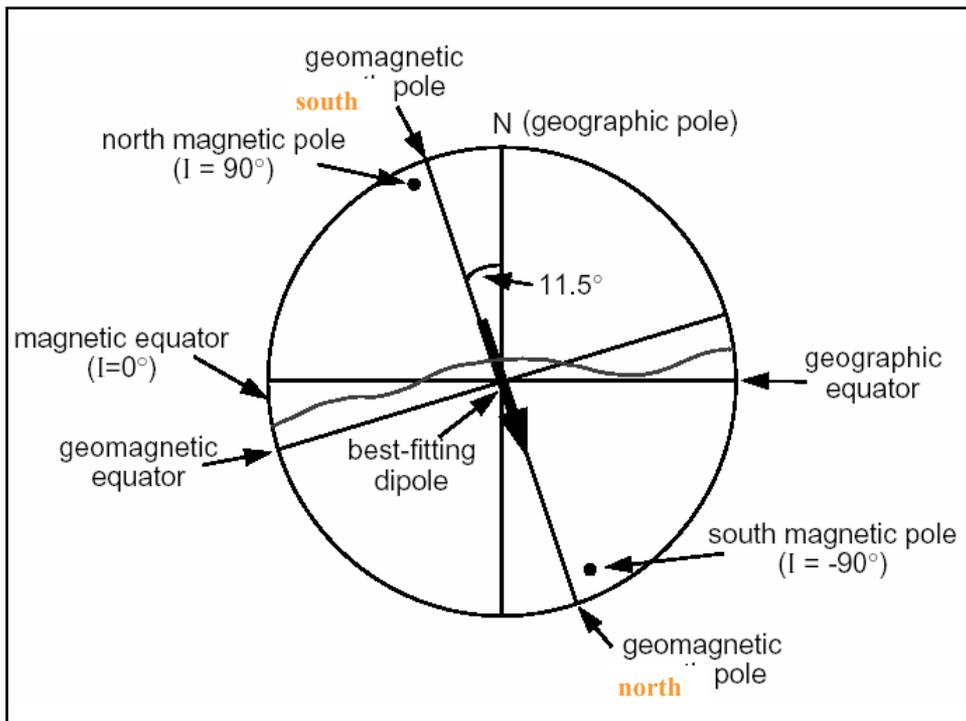
**64.7 S et 138.6 E**

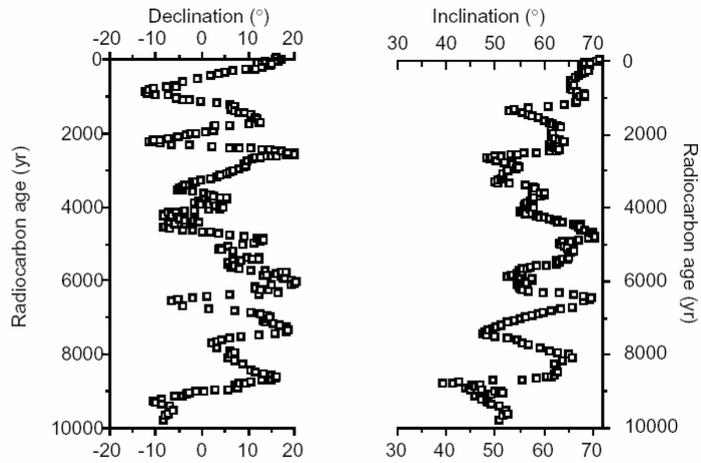
***Pôles géomagnétiques (modèle 1995)***

**79.3 N et 71.5 Ouest**

**79.3 S et 108.5 E**

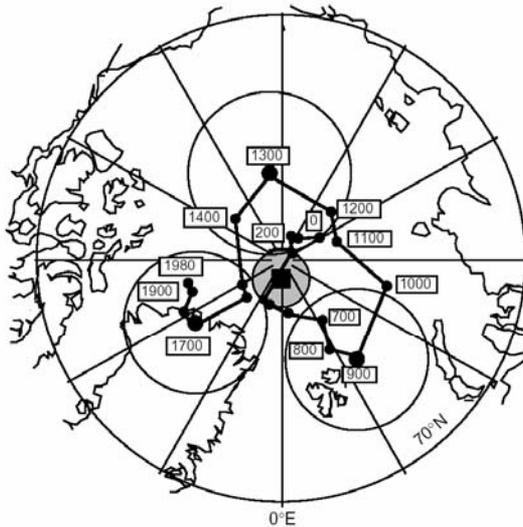
47



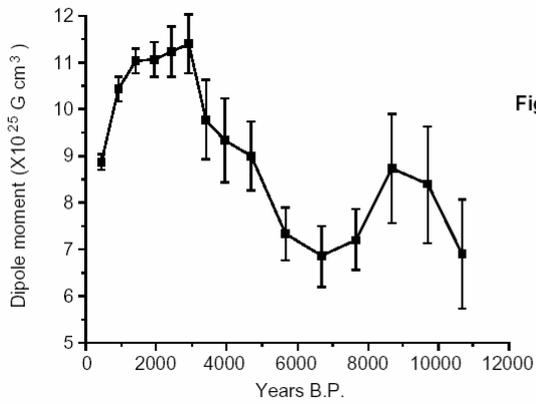


**Figure 1.8** Record of Holocene geomagnetic secular variation recorded by sediments in Fish Lake in southeastern Oregon. Declination and inclination are shown against radiocarbon age. Data kindly provided by K. Verosub.

49



**Figure 1.9** Positions of the north geomagnetic pole over the past 2000 yr. Each data point is the mean geomagnetic pole at 100-yr intervals; numbers indicate date in years A.D.; circles about geomagnetic poles at 900, 1300, and 1700 A.D. are 95% confidence limits on those geomagnetic poles; the mean geomagnetic pole position over the past 2000 yr is shown by the square with stippled region of 95% confidence. Data compiled by Merrill and McElhinny (1983).



**Figure 1.10** Geomagnetic dipole moment over the past 10,000 years. Means for 500-yr intervals are shown to 4000 yr B.P.; 1000-yr means are shown from 4000 to 10,000 yr B.P.; error bars are 95% confidence limits. Redrawn after Merrill and McElhinny (1983).