

Les mouvements du noyau et le(s) couplage(s) noyau-manteau

Gauthier Hulot

Equipe de Géomagnétisme
Institut de Physique du Globe de Paris,

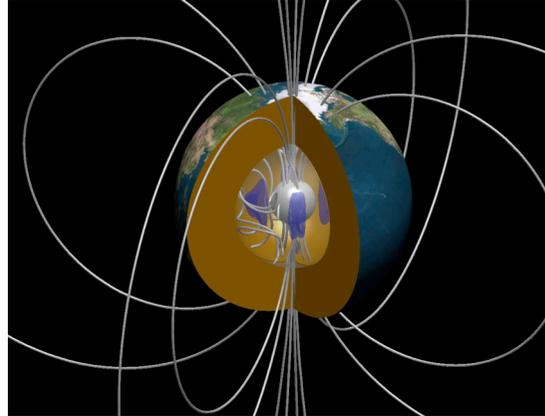
Sorbonne Paris Cité

Pôle de recherche et d'enseignement supérieur



Quels mouvements, quels couplages ?

Les mouvements dont il sera question sont (principalement) les **mouvements de convection** qui résultent de ce que, comme le manteau, le noyau de la Terre se refroidit.



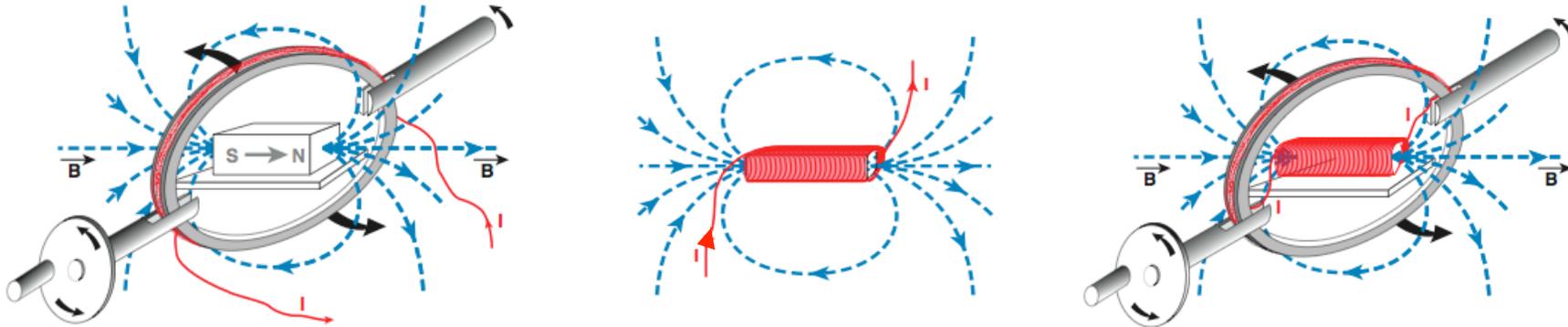
J. Aubert, IPGP

Ces mouvements ont plusieurs particularités importantes pour notre propos :

- ils sont **responsables de l'entretien et des variations du champ magnétique principal de la Terre**;
- ils sont **influencés par la rotation de la Terre et le champ magnétique qu'ils engendrent**;
- ils sont **influencés par les conditions aux limites thermiques imposées par le manteau**;
- ils **échangent du moment cinétique avec le reste de la Terre**.

Les couplages noyau-manteau dont il sera question sont donc **des couplages thermiques et des couplages mécaniques**.

Comment un champ magnétique peut-il être produit et maintenu à partir du seul mouvement d'un conducteur ?



(G. Hulot, J. Dyon, IPGP)

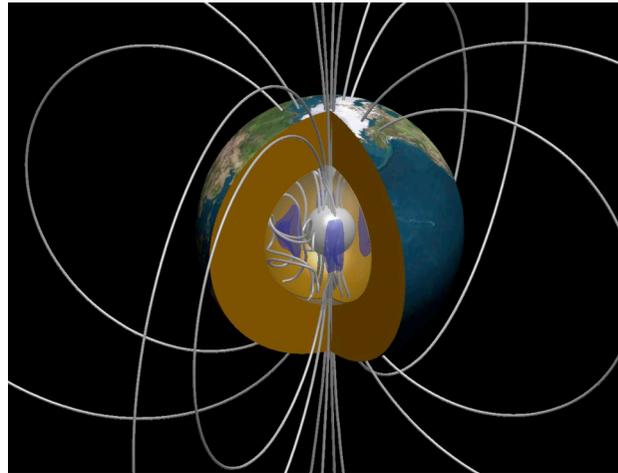
1) Principe de la dynamo classique (Faraday): on peut faire apparaître un courant électrique par le déplacement d'un conducteur en présence d'un champ magnétique produit par un aimant.

2) Principe de l'électro-aimant (Oersted): un courant électrique est une source de champ magnétique.

3) Principe de la dynamo auto-entretenu: faire en sorte que les deux phénomènes s'entretiennent mutuellement, en remplaçant l'aimant par un électroaimant alimenté par la dynamo.

Nous obtenons ainsi une dynamo auto-entretenu, qui engendre un courant électrique et un champ magnétique à partir du seul mouvement des conducteurs ! L'énergie mécanique fournie compense les pertes ohmiques.

La géodynamo est une dynamo auto-entretenue fluide



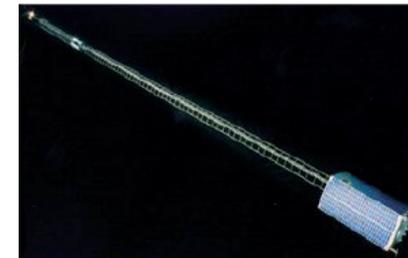
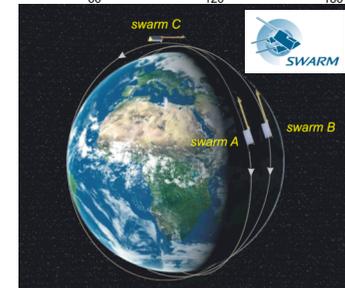
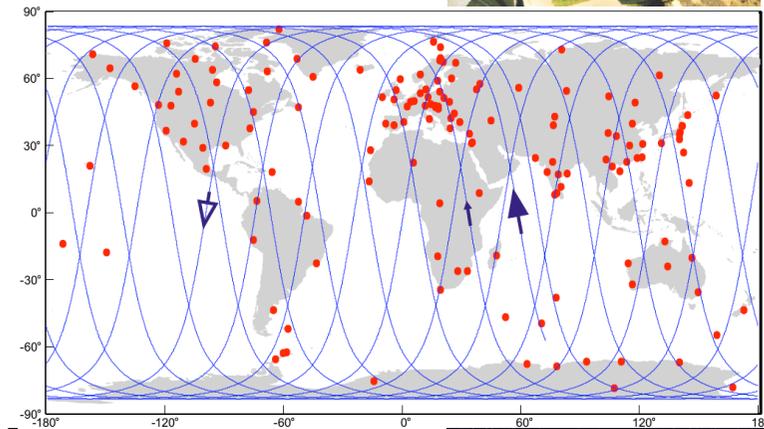
J. Aubert, IPGP

- Le **noyau conducteur de la Terre** agit comme **une dynamo fluide** (à la graine près);
- Les **mouvements** du conducteur sont **dûs à la convection thermique**.
- Mais ils sont **influencés par la rotation de la Terre** (via la force de Coriolis) **et par le champ magnétique engendré** (via la force de Lorenz).
- Ce sont ces forces qui « **structurent** » **la convection et lui permettent d'agir comme une dynamo**, malgré l'absence de contrainte géométrique (les « bobinages » de l'exemple précédent).

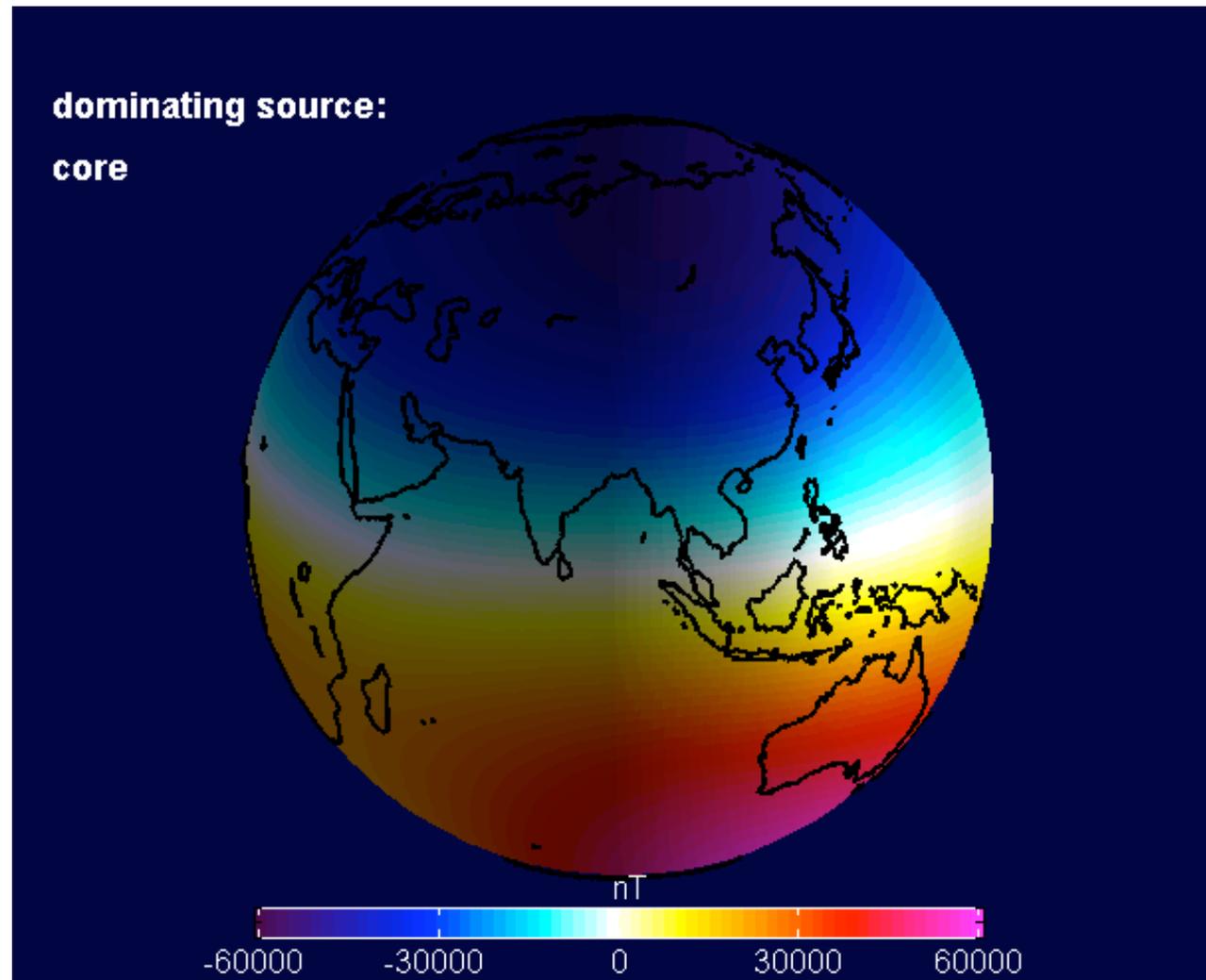
Pour « voir » les mouvements du noyau, il faut d'abord « observer » le champ de la géodynamo



Halley, 1701

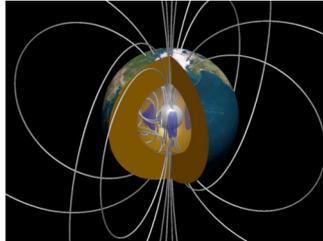


Ce qui n'est pas si simple... car le champ magnétique terrestre a aussi d'autres sources que celle de la géodynamo

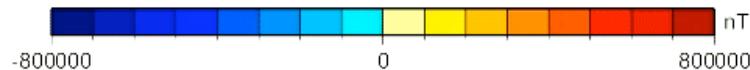
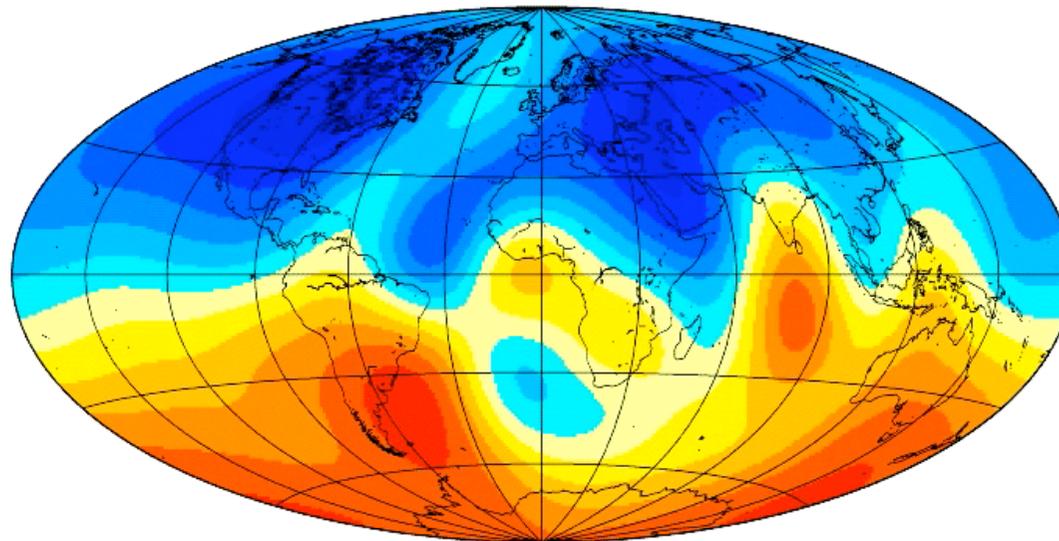


N. Olsen,
DTU Space,
Copenhagen, DK

**Mais on peut isoler le signal de la géodynamo, « remonter »
les lignes du champ principal,...**



1590



Jackson et al.,
Phil. Trans. R. Soc
2000

**et voir évoluer le champ produit par la géodynamo à la
surface du noyau.**

Et les mouvements du noyau ?

Les mouvements à la surface du noyau peuvent être « reconstruits »

Dans le noyau, l'évolution du champ magnétique est gouvernée par :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \eta \Delta \vec{B}$$

dont la composante radiale s'écrit, à la surface du noyau:

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\vec{\nabla}_H \cdot (\vec{u} B_r) + \frac{\eta}{r} \Delta(r B_r)$$

Cette équation montre que **les variations observées dans B_r à la surface du noyau** (le film précédent) **sont le résultat de l'action des mouvements à la surface du noyau, et de la diffusion du champ.**

Les mouvements à la surface du noyau peuvent être « reconstruits »

Dans le noyau, l'évolution du champ magnétique est gouvernée par :

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{u} \times \vec{B}) + \eta \Delta \vec{B}$$

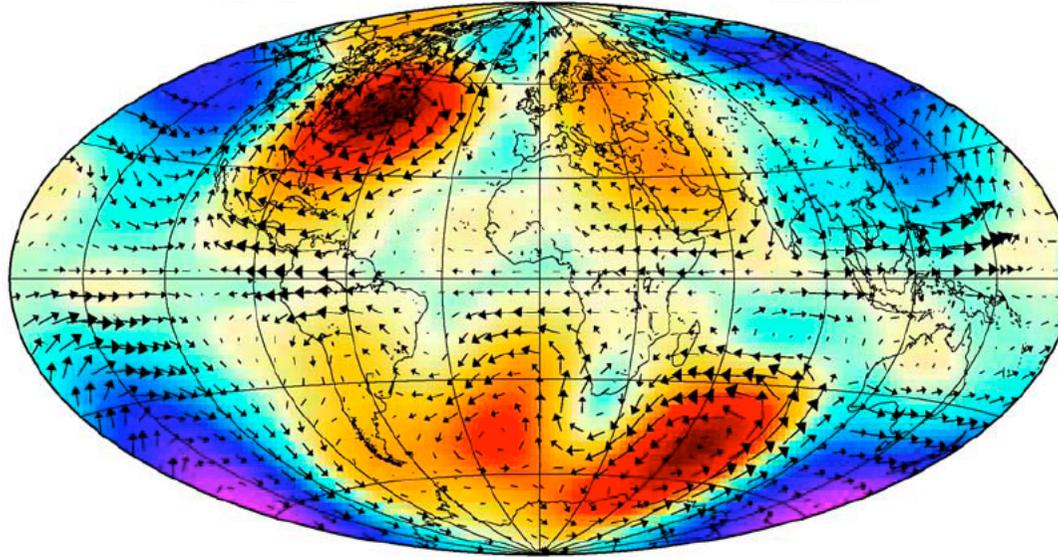
dont la composante radiale s'écrit, à la surface du noyau:

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} = -\vec{\nabla}_H \cdot (\vec{u} B_r) + \frac{\eta}{r} \Delta (r B_r)$$

Cette équation montre que **les variations observées dans B_r à la surface du noyau** (le film précédent) **sont le résultat de l'action des mouvements à la surface du noyau, et de la diffusion du champ.**

La diffusion est un phénomène secondaire (mais pas totalement négligeable, cf. Chulliat and Olsen, JGR, 2010) **à l'échelle séculaire.**

Exemple de mouvements « géostrophiques » reconstruits à la surface du noyau pour l'époque 1990

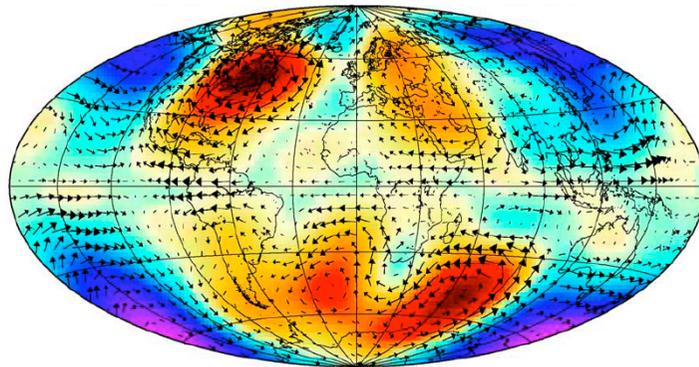


Eymin et Hulot, PEPI, 2005

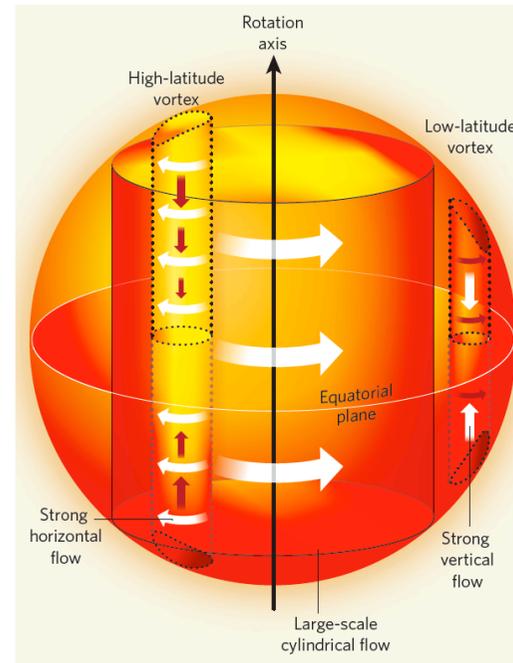
On retiendra:

- l'organisation relativement symétrique par rapport à l'équateur autour de zones de hautes (rouge) et basses (bleu) pressions dynamiques
- l'ordre de grandeur des mouvements: 20 km/an (60 m/jour)

Ces mouvements sont-ils conformes à ce que l'on attend d'un point de vue théorique ?



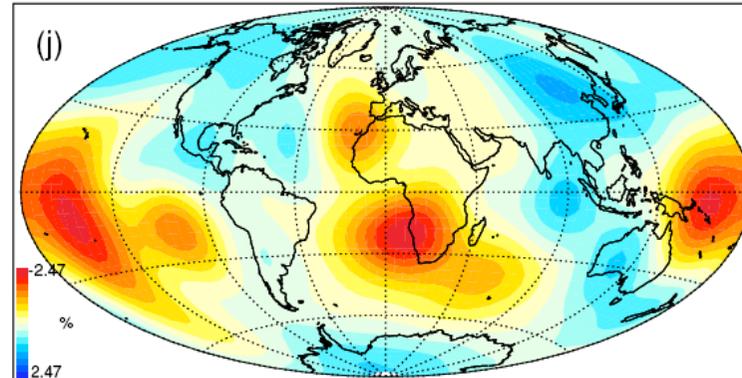
Eymin et Hulot, PEPI, 2005



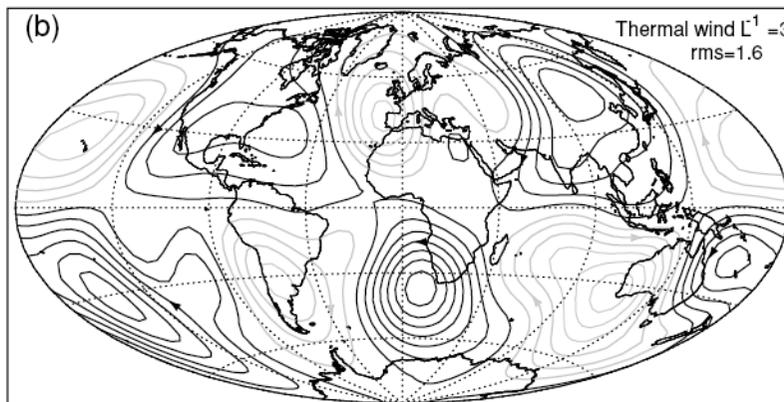
Jackson, Nature, N&V, 2010

- La théorie prédit qu'**aux échelles de temps courtes, les mouvements sont largement bi-dimensionnels** sous l'influence de la rotation rapide de la Terre (théorie quasi-géostrophique, Jault, PEPI, 2008).
- Mais la théorie prédit aussi que **par « couplage thermique », la composante lentement variable des mouvements** (quasi-stationnaire à l'échelle du siècle) **est susceptible d'être influencée par les conditions aux limites thermiques imposées par le manteau** (Aubert et al., PEPI, 2007).

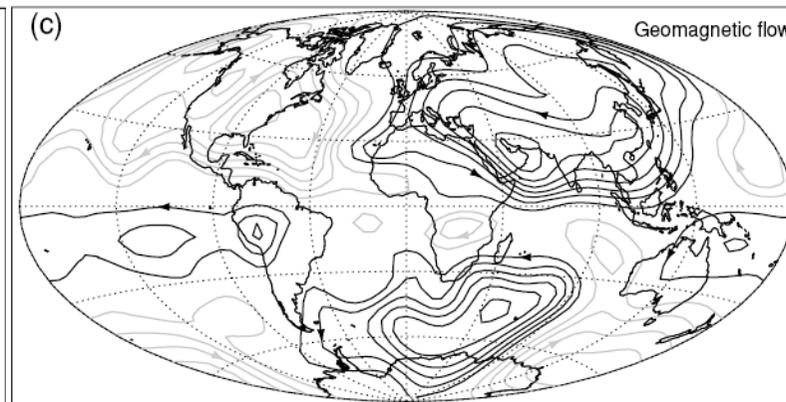
Mise en évidence du couplage thermique



Tomographie
Master et al, 2000



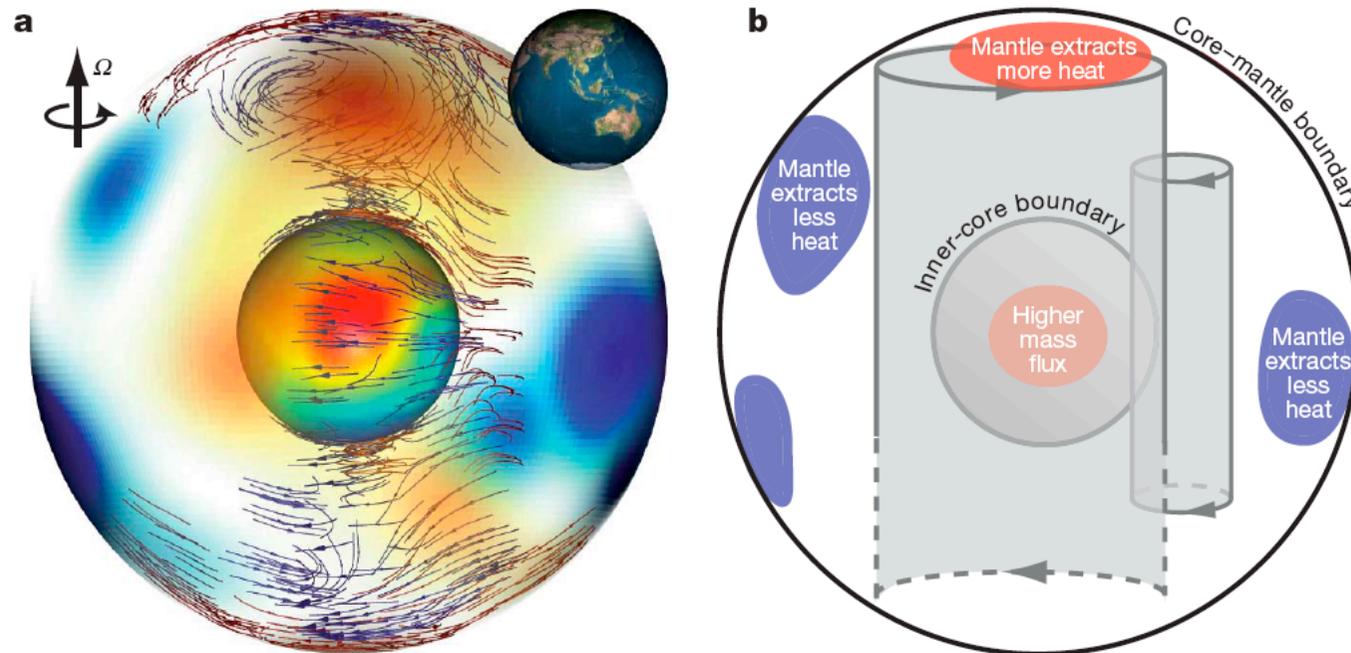
Prédit, Amit et al., EPS, 2008



Observé, Amit and Olson, PEPI, 2006

L'influence du manteau sur le mouvement moyen au cours des derniers siècles est probable

Ce couplage thermique pourrait même contrôler en partie la croissance de la graine



Aubert et al, Nature, 2008

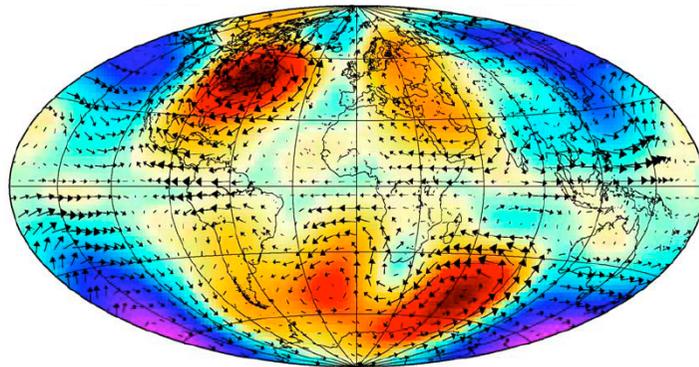
à condition qu'au long terme, la graine reste « bloquée » par rapport au manteau via un couplage (mécanique) gravitationnel. Ceci est plausible, mais fait encore l'objet de débats (cf. Dumberry and Mound, GJI, 2010).

Et les couplages mécaniques ? Vaste sujet...

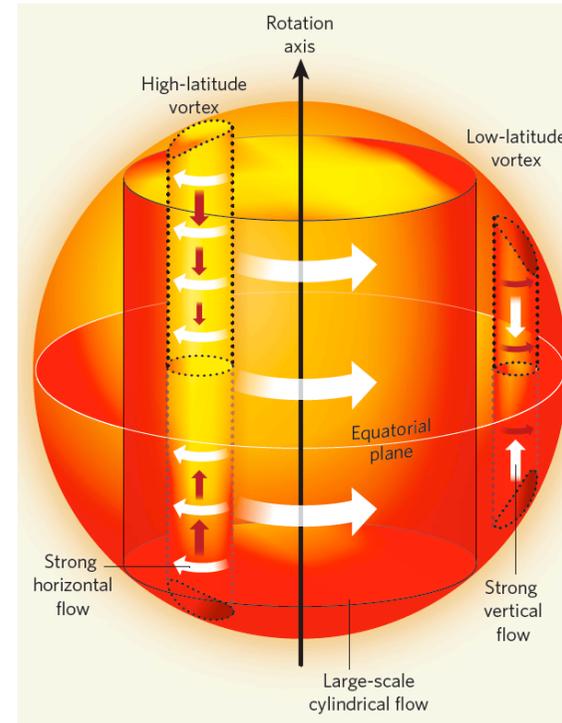
- Ces couplages concernent la façon dont le noyau liquide peut échanger du moment cinétique avec le manteau (mais aussi avec la graine), et donc modifier la durée du jour et influencer le mouvement du pôle de rotation.
- Ils peuvent être visqueux, topographiques, gravitationnels, électromagnétiques.
- Ils ont fait l'objet de très nombreuses études...
- **Le fait de disposer de cartes des mouvements à la surface du noyau permet en effet de les étudier, au moins pour ce qui concerne leur rôle potentiel aux échelles de temps séculaires à décennales.**
- Ces études ont montré que **les couplages visqueux sont certainement négligeables**, tandis que **tous les autres couplages sont susceptibles de contribuer.**
- Mais les résultats les plus probants sont ceux qui ont permis de montrer (sans qu'il soit nécessaire de préciser la nature du couplage) que certaines **des irrégularités de la durée du jour peuvent effectivement être expliqués par un échange de moment cinétique entre le noyau et le manteau.**

C'est ce dernier point que je vais maintenant illustrer avant de conclure.

Les mouvements reconstruits à la surface du noyau permettent d'estimer le moment cinétique axial du noyau



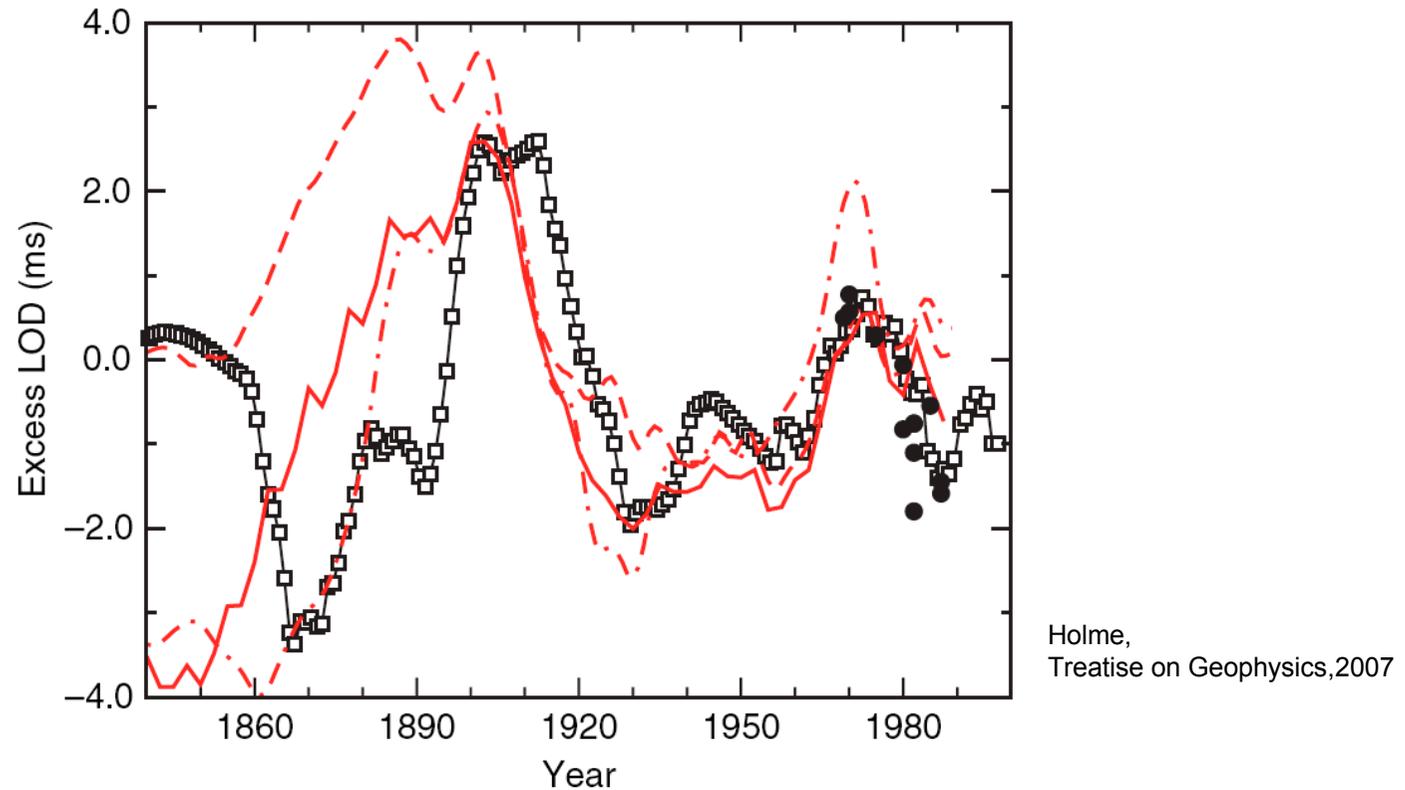
Eymin et Hulot, PEPI, 2005



Jackson, Nature, N&V, 2010

- Rappelons que la théorie prédit qu'**aux échelles de temps courtes, les mouvements sont largement bi-dimensionnels** sous l'influence de la rotation rapide de la Terre.
- On peut donc **isoler la partie rapidement variable des mouvements** vus à la surface du noyau, la prolonger dans le corps du noyau et en déduire le moment cinétique axial associé.
- En outre, de manière remarquable (Jault et al., Nature, 1988), il apparaît que **seuls les mouvements zonaux de grande échelle portent ce moment cinétique.**

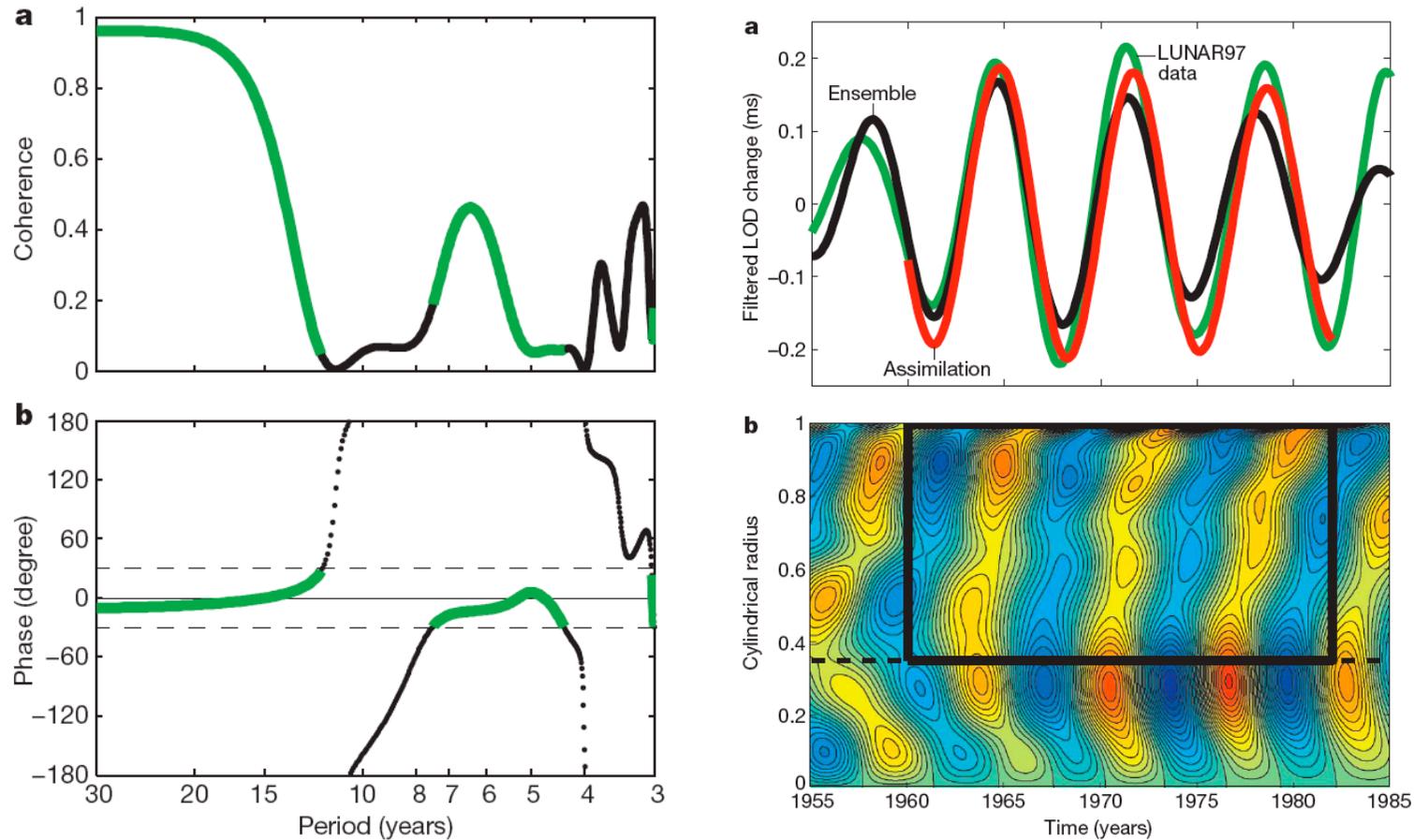
Variations de la durée du jour prédites et observées



L'accord n'est certes pas parfait, mais l'ordre de grandeur et les constantes de temps sont remarquablement semblables...

... et c'est heureux, car aucun autre « réservoir » de moment cinétique n'est en mesure d'expliquer ces variations de la durée du jour (Hide, 1969).

Variations de la durée du jour prédites et observées



L'accord est encore plus remarquable pour un signal périodique de 6 ans, dont l'origine reste cependant à élucider (Gillet et al., Nature, 2010)

Pour conclure

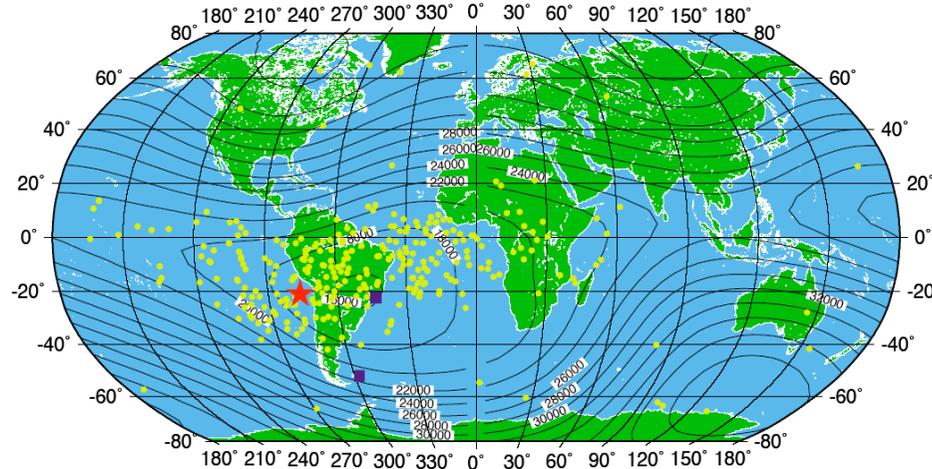
L'étude des mouvements du noyau et du couplage noyau-manteau nécessite de faire de nombreuses hypothèses :

- que le champ magnétique est engendré par une dynamo fluide auto-entretenu,
- que l'on peut exploiter les observations magnétiques pour reconstituer des cartes du champ magnétique à la surface du noyau,
- que l'on peut ensuite reconstruire les mouvements à la surface du noyau,
- que l'on peut enfin interpréter ces cartes en termes de superposition de mouvements influencés par le couplage thermique avec le manteau, et de mouvements rapides pouvant être prolongés dans le cœur du noyau.

Le fait qu'à l'issue de toutes ces étapes, on soit en mesure de rendre compte raisonnablement des variations de la durée du jour observée de façon totalement indépendante constitue donc bien plus qu'une explication satisfaisante de ces variations. Cela **prouve aussi que l'étude de la dynamique du noyau à partir des données magnétiques est fondée sur de bonnes bases.**

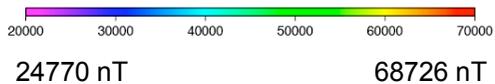
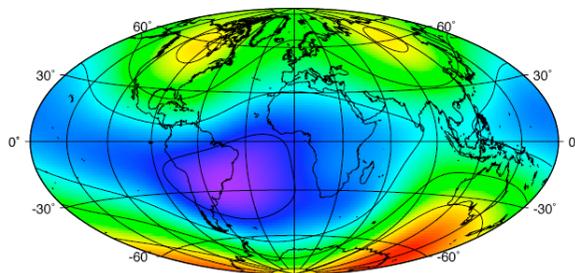
Prochaine étape ? Développer l'assimilation de données et peut-être même prédire l'évolution à moyen terme du champ magnétique terrestre...

L'Anomalie de l'Atlantique Sud « Triangle des Bermudes » du spatial en orbite basse

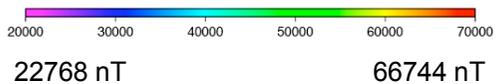
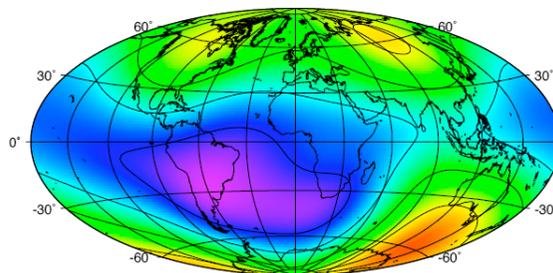


Heitzler
et al., 2002

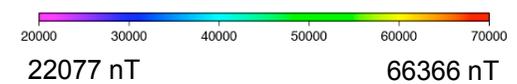
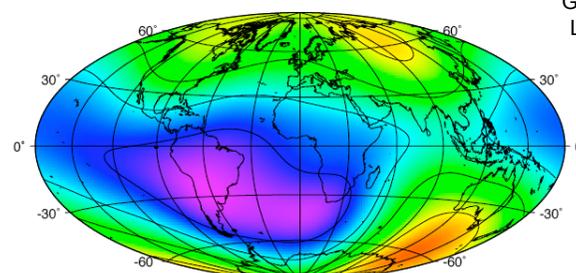
IGRF 1945



IGRF 2005



IGRF 2005 pour 2030



G. Hulot,
L. Silva,
IPGP

L'anomalie devrait s'intensifier et s'étendre...