

Assimilation de données géomagnétiques et dynamique dans le noyau terrestre

Nicolas Gillet¹, Dominique Jault¹, Nathanaël Schaeffer¹,
Alex Fournier², Julien Aubert², Chris Finlay³

¹ISTerre/CNRS/Univ. Grenoble
²IPG Paris, ³DTU Space, Copenhagen

Rencontres OSUG-LJK, Maison J. Kuntzmann, 18 mars 2013



Outlines

données géophysiques

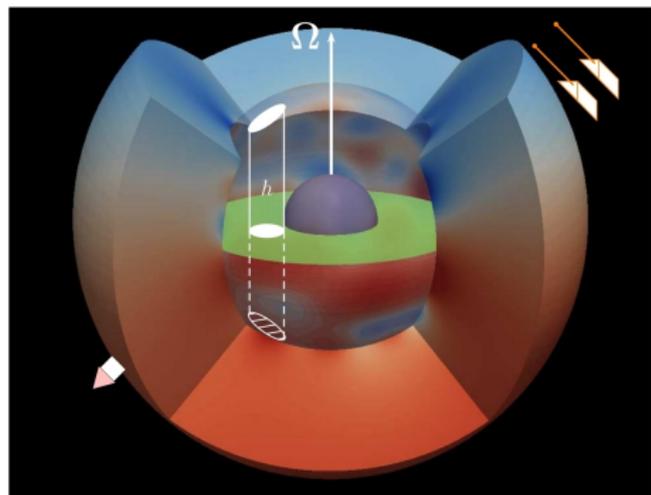
modélisations

pistes de réflexions

imagerie du champ magnétique à la surface du noyau

- mesure magnétique ($r \geq a$ le rayon terrestre) : principale contrainte sur la dynamique du noyau
 - manteau isolant : champ magnétique potentiel

$$\mathbf{B} = -\nabla V$$
- ⇒ contrainte sur le champ magnétique $B_r(t)$ à la surface du noyau ($r = c$)
- lien avec l'écoulement à la surface du noyau via équation d'induction

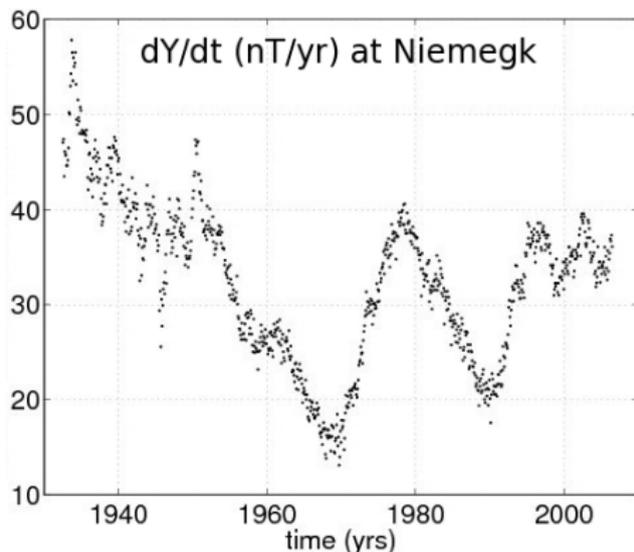
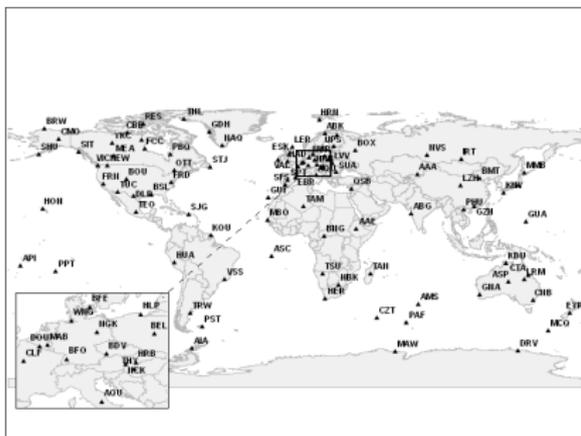


courtesy : A. Fournier

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

observatoires magnétiques (depuis 1840)

- couverture non globale
- ⇒ séparation imparfaite entre sources internes (noyau, induction) et externes (magnéto et ionosphère)

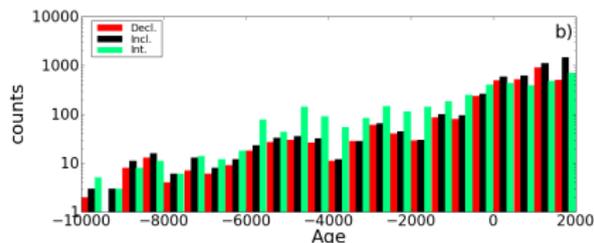
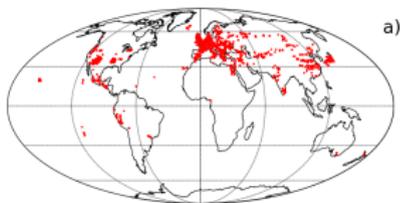


- dB/dt continu, non dérivable aux périodes interannuelles à pluri-décennales (secousses magnétiques)

⇒ spectre temporel $S(\omega) \propto \omega^{-4}$

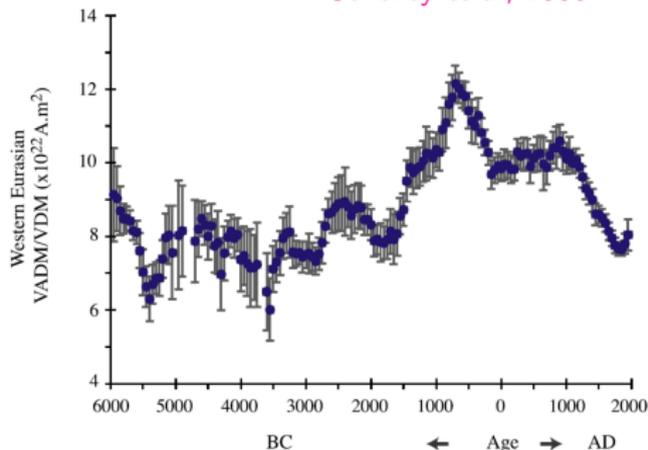
enregistrements archéomagnétiques (derniers 10,000 ans)

- couverture non globale
- importantes erreurs de datations



Donadini et al, 2009

Genevey et al, 2008



- $B(t)$ continu, non dérivable aux périodes centennales à pluri-millénaires (secousses archéomagnétiques)

⇒ spectre temporel $S(\omega) \propto \omega^{-2}$

mesures satellitaires

orbite basse (200 à 700 km), polaire

- en continu depuis 1999 (Oersted, Champ)
- couverture globale = séparation des sources internes/externes... mais :
 - perturbations mal modélisées à hautes latitudes
 - orbite polaire \Rightarrow dérive lente / axe Soleil-Terre
- \Rightarrow la surface terrestre n'est revisitée sous les mêmes conditions que tous les quelques mois
- \Rightarrow échantillonnage du noyau (qq mois au mieux)
 \neq échantillonnage des mesures (1 seconde)
- Swarm : lancement de 3 satellites prévu en septembre 2013
- \Rightarrow opportunité d'une meilleure séparation interne/externe

quelques temps caractéristiques pour le noyau

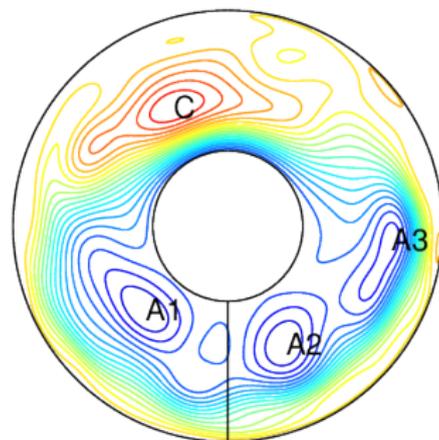
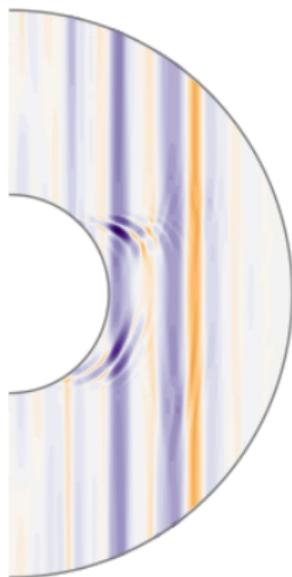
- | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| • propagation d'une onde inertielle | $T_{\Omega}(\ell) = c/\ell\Omega$ | 1 jour |
| • propagation d'une onde d'Alfvén | $T_B(\ell) = c\sqrt{\rho\mu}/B$ | 4 ans |
| • retournement d'un tourbillon | $T_U(\ell) = \ell/U(\ell)$ | 300 ans |
| • temps de diffusion magnétique | $T_{\eta}(\ell) = \ell^2/\eta$ | 100,000 ans |
| • temps de diffusion visqueux | $T_{\nu}(\ell) = \ell^2/\nu$ | 10^{11} ans |

\Rightarrow pour $\ell \simeq c$ la taille du noyau, on a

$$T_{\nu} \gg T_{\eta} \gg T_U \gg T_A \gg T_{\Omega}$$

invariance axiale (quasi-géostrophie) et gyre écentré

- calculs 3D : $(\mathbf{u}\nabla)\mathbf{u}$ négligeable et champ imposé ($T_A \gg T_\Omega$)
- QG pour $\ell > 50$ km

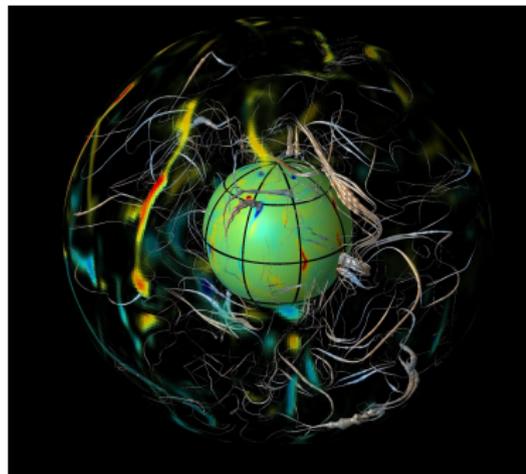


- inversions **cinématiques** QG :
circulation anticyclonique

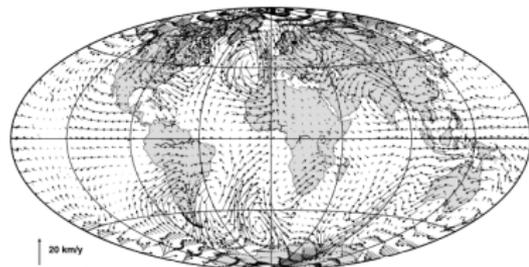
Pais & Jault, 2008

résultats d'assimilation séquentielle 3D

- covariances de l'état du noyau (\mathbf{B} , \mathbf{u} , Θ) calculées par intégration d'un modèle 3D de géodynamo
 - \mathbf{B} eq. d'induction
 - Θ eq. de la chaleur
 - \mathbf{u} eq. de quantité de mouvement
- filtre de Kalman de l'état du noyau à partir de données $B_r(t)$ en $r = c$
 - ⇒ - écoulements symétriques
 - gyre absent (comme demandé par l'a priori)

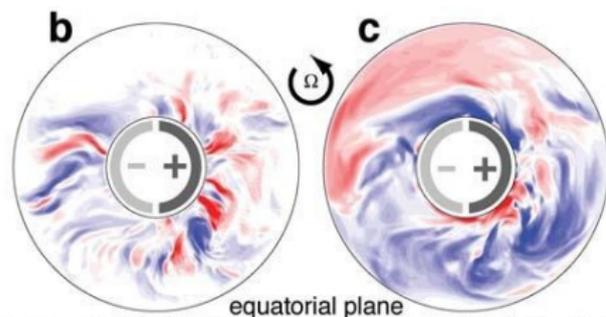


Aubert & Fournier, 2011



gyre anticyclonique : moteur thermique ou magnétique ?

- filtre de Kalman + calculs geodynamo 3D + **moteur thermique** non isotrope



Aubert, 2012

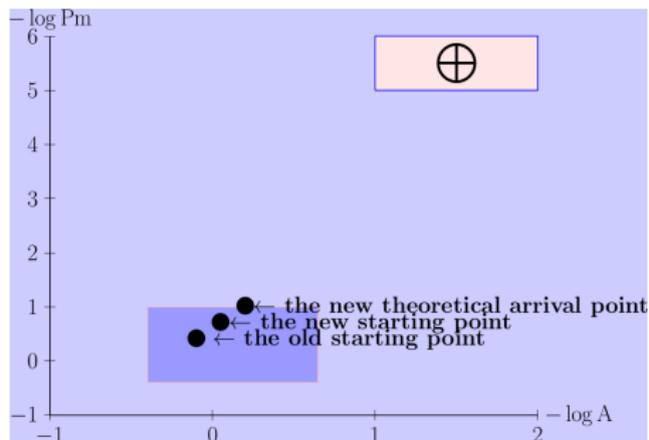
- situation des calculs 3D :

$$T_\nu \simeq T_\eta \gg T_U \simeq T_A \gg T_\Omega$$

- forces magnétiques $(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$ sous-estimées
- rôle de $(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u}$ sur-valorisé
- ... le bon régime asymptotique ?
- alternative : support magnétique du gyre $\Rightarrow B \geq 3 \text{ mT}$

base de données synthétique pour l'assimilation

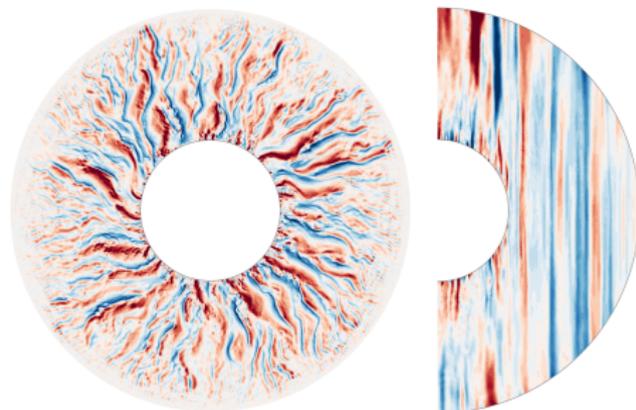
ANR AVS-geomag, IPGP/ISTerre



pas à pas vers le noyau...

- diminuer $P_m = T_\eta / T_\nu$
- diminuer $A = T_A / T_U$

calculs 3D les plus poussés



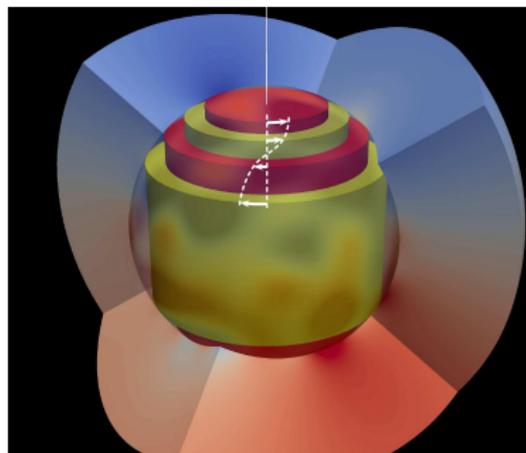
calculs N. Schaeffer

objectif : validation d'algorithmes
d'assimilation géomag

un modèle quasi-géostrophique du noyau

Canet, Fournier & Jault, 2009

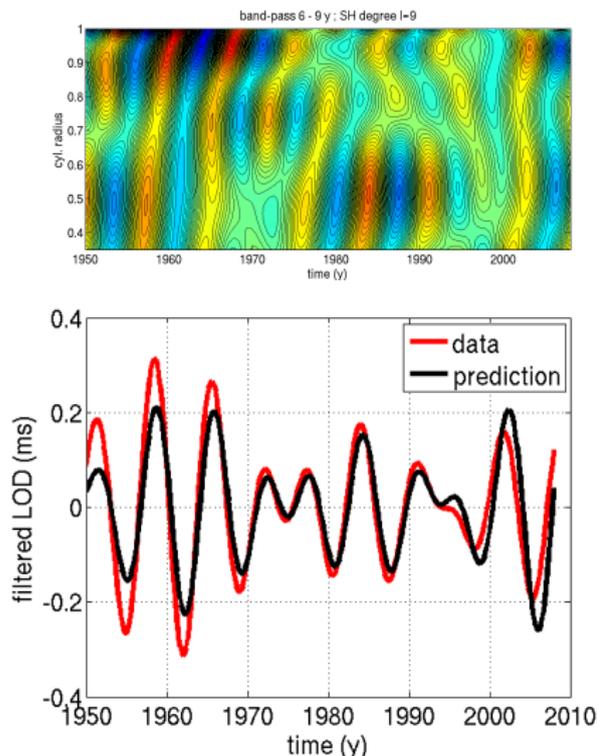
- pari : ignorer la thermique
 - QG : réduit le problème à 2D
 - configuration Earth-like :
 $T_D \gg T_U \gg T_A \gg T_\Omega$
- ⇒ dynamique $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ supportée par les forces magnétiques $(\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}$ et esclave de $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ dans le noyau
- sous-espace des ondes de torsion :
 vitesse de phase $V_A(s) \propto r.m.s.(B_s)$
 sur les cylindres géostrophiques



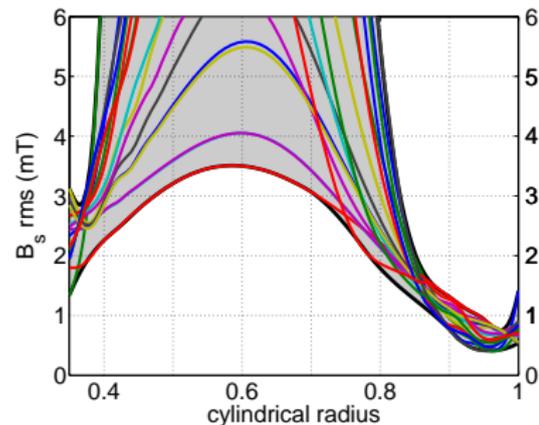
courtesy A. Fournier

assimilation variationnelle 1D : les ondes de torsions

Gillet, Jault, Canet & Fournier, 2010



- première image du champ dans le noyau



- 4 ans pour traverser le noyau
 $\Rightarrow \{B_s\} \geq 2 \text{ mT}$

l'opportunité Swarm

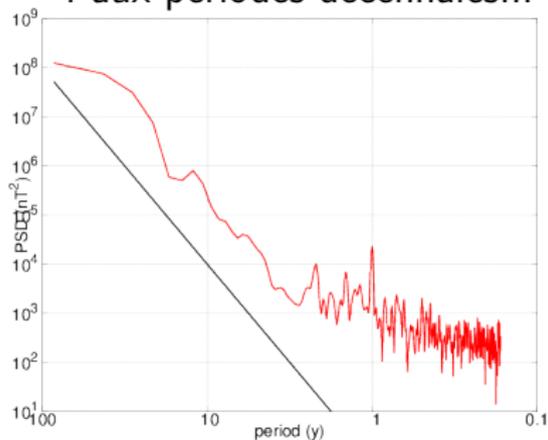
- meilleure séparation des sources externes/internes
 - ▶ quitter l'approximation du manteau isolant : modèles complets noyau+manteau+externe
 - ... caractériser le filtre magnétique passe-bas du manteau profond, par couplage entre induction dans le manteau et dynamique dans le noyau
 - physique rapide : ondes de Rossby
 - ▶ celles de plus grande taille sont les plus rapides
 - ▶ dans le cas d'un manteau faiblement conducteur : existe-t-il une fenêtre entre nos myopies spatiale (croûte magnétisée) et temporelle (variations externes) ?
 - ▶ selection des formes d'ondes par la stratification : confirmation de la couche moins dense suspectée par l'analyse des ondes sismiques traversant la partie supérieure du noyau ?
- Helfrich & Kaneshima, 2010

compréhension physique des spectres temporels observés ?

- efforts de caractérisation des spectres temporels des différentes sources aux différentes périodes :

pende -2 pour $T = \mathcal{O}(300)$ ans

-4 aux périodes décennales...



- complément stochastique des modèles déterministes :
e.g. process AR d'ordre n

$$\sum_n A_n \frac{\partial^n X}{\partial t^n} = w(t)$$

... spectre de pente $-2n$

- modélisation par effets sous-maille à hautes fréquences et/ou petites échelles ?

développements des algorithmes d'assimilation

- emboitement des époques pour le calcul de l'ébauche : satellites \in observatoires \in historiques \in archéomag
- relativement peu d'observations vu la complexité de la dynamique

\Rightarrow par nécessité : problèmes de petite taille

... opportunité pour la validation de développements méthodologiques

e.g. - prise en compte des corrélations temporelles importantes dans les erreurs de modélisation

- inversion de quantités bornées (par ex : quantités magnétiques B^2 intégrées le long de l'axe de rotation pour le modèle QG)