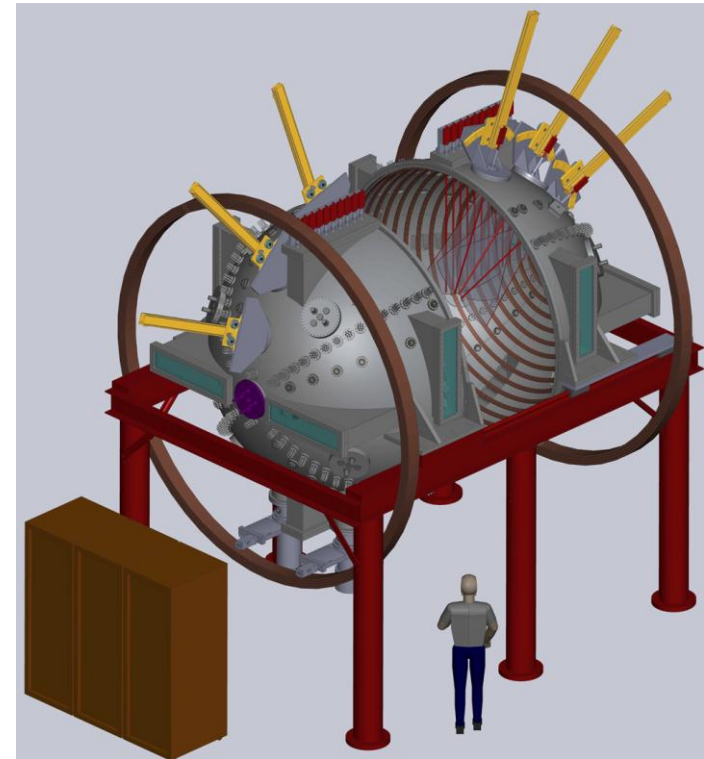
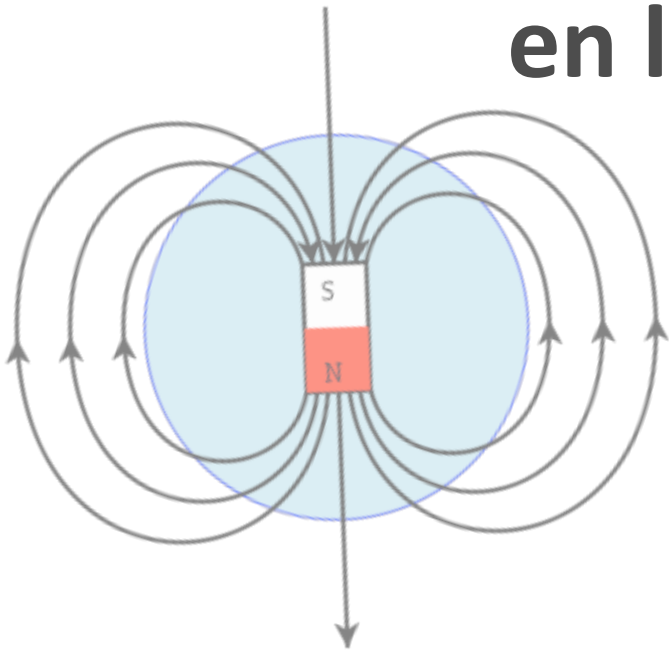


Reproduire le champ magnétique terrestre en laboratoire



Nicolas Plihon
Laboratoire de Physique
Ecole Normale Supérieure de Lyon & CNRS

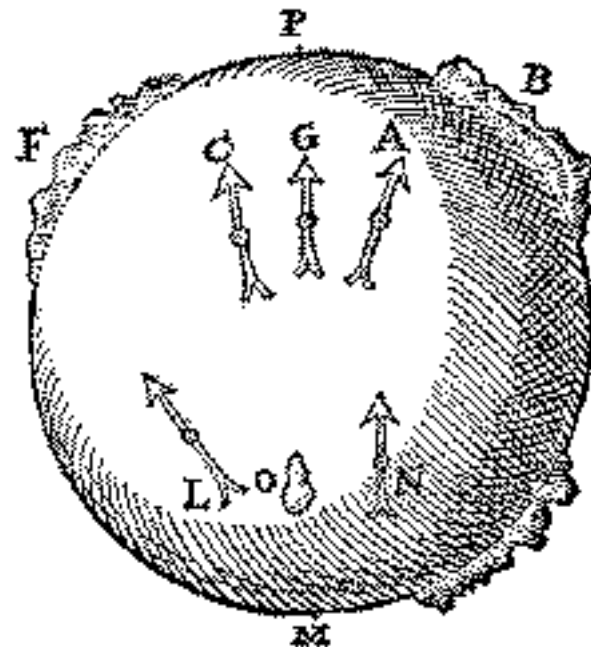
Le champ magnétique terrestre

Magnétisme connu depuis l'âge du fer

Navigation à l'aide d'une « aiguille du sud »
depuis au moins II^es. av. JC



Modèle de la Terre par Gilbert
(Londres, 1600)



Gilbert, De Magnete (1600)

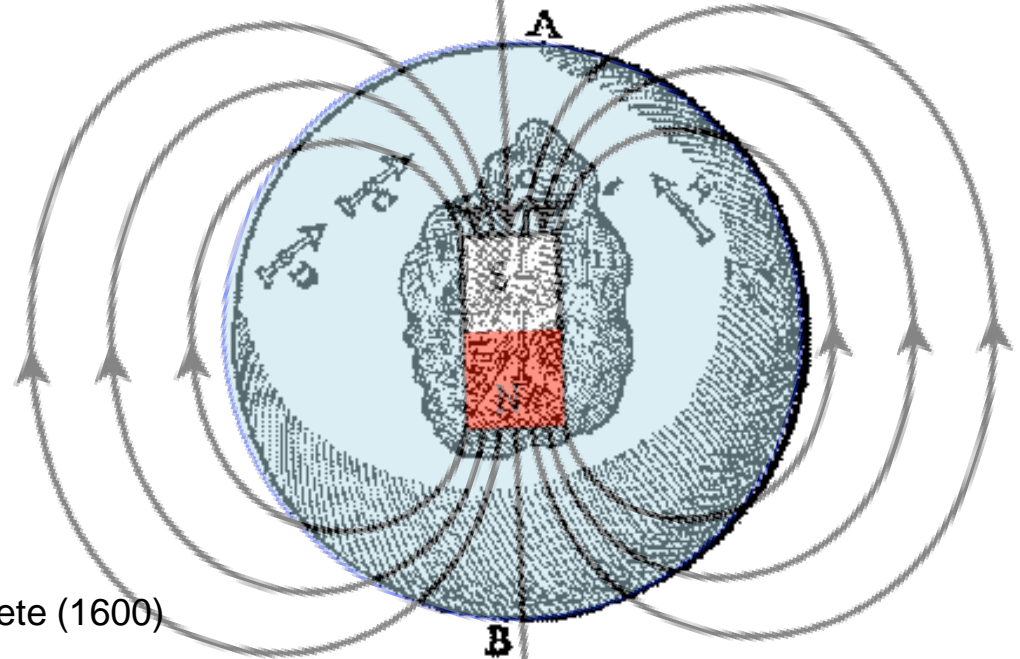
Le champ magnétique terrestre

Magnétisme connu depuis l'âge du fer

Navigation à l'aide d'une « aiguille du sud »
depuis au moins II^es. av. JC



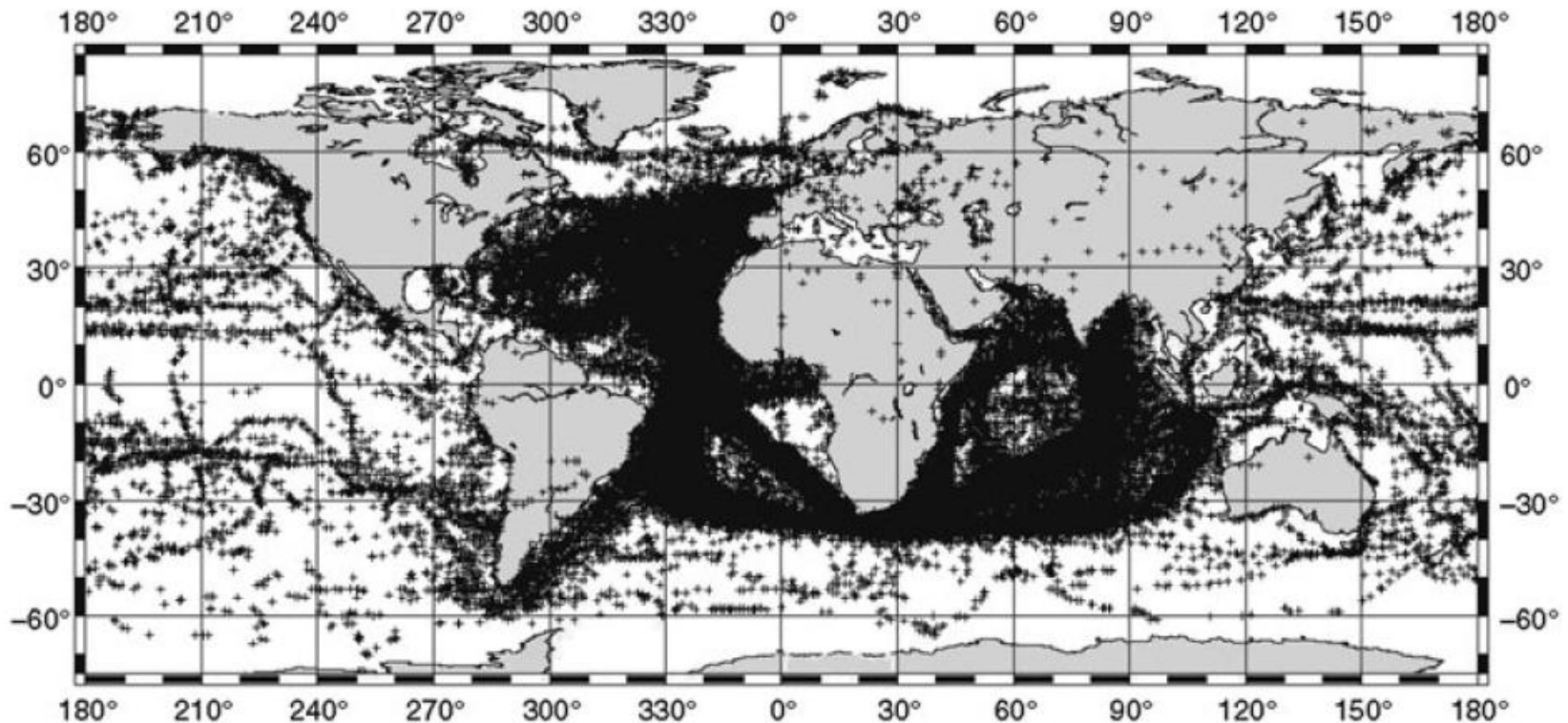
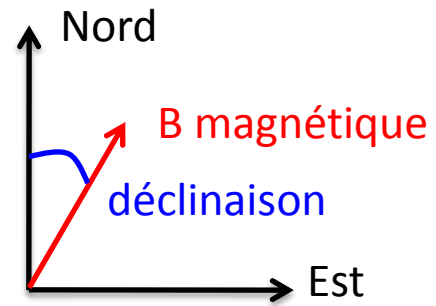
Modèle de la Terre par Gilbert
(Londres, 1600)



Gilbert, De Magnete (1600)

Le champ magnétique terrestre

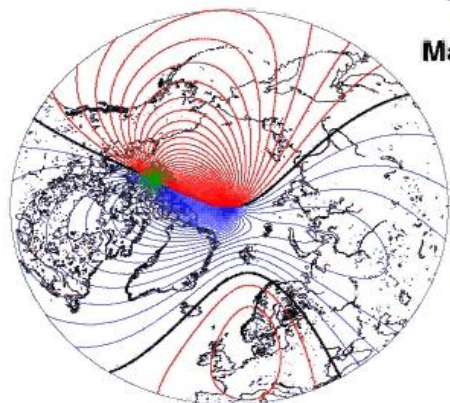
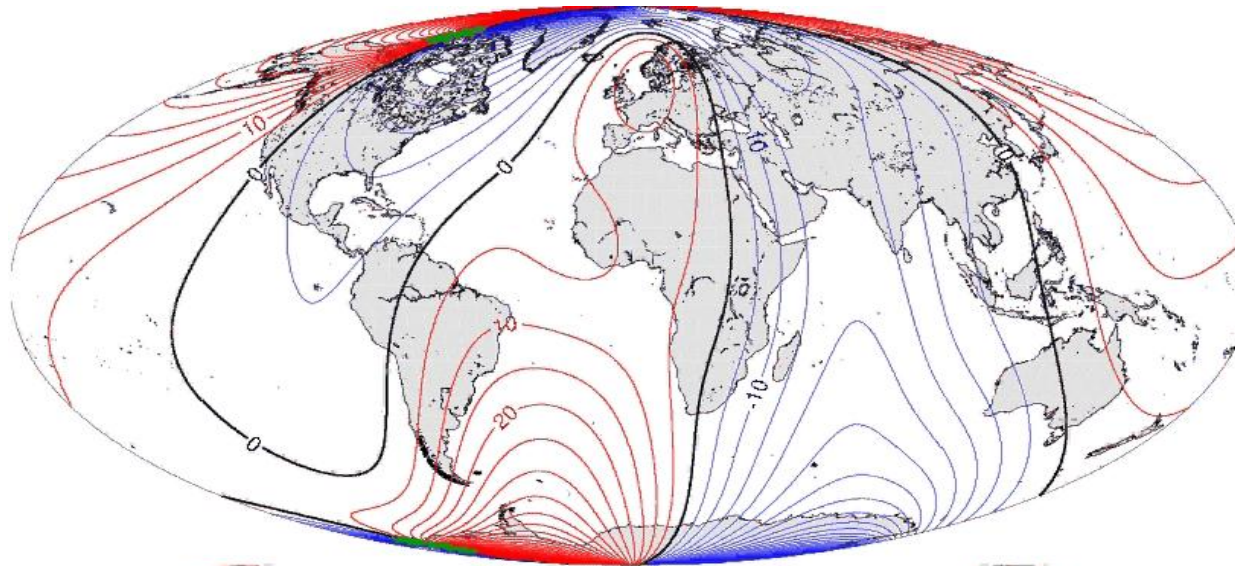
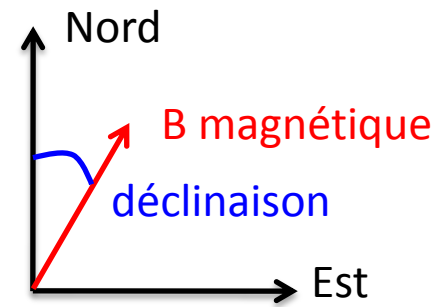
Une structure dipolaire et des variations spatiales



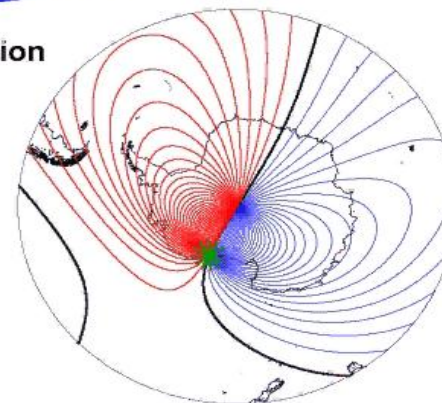
Localisation des mesures de déclinaison magnétique 1700-1799

Le champ magnétique terrestre

Une structure dipolaire et des variations spatiales
soumises à des variations séculaires ...



Magnetic Field Declination
1590

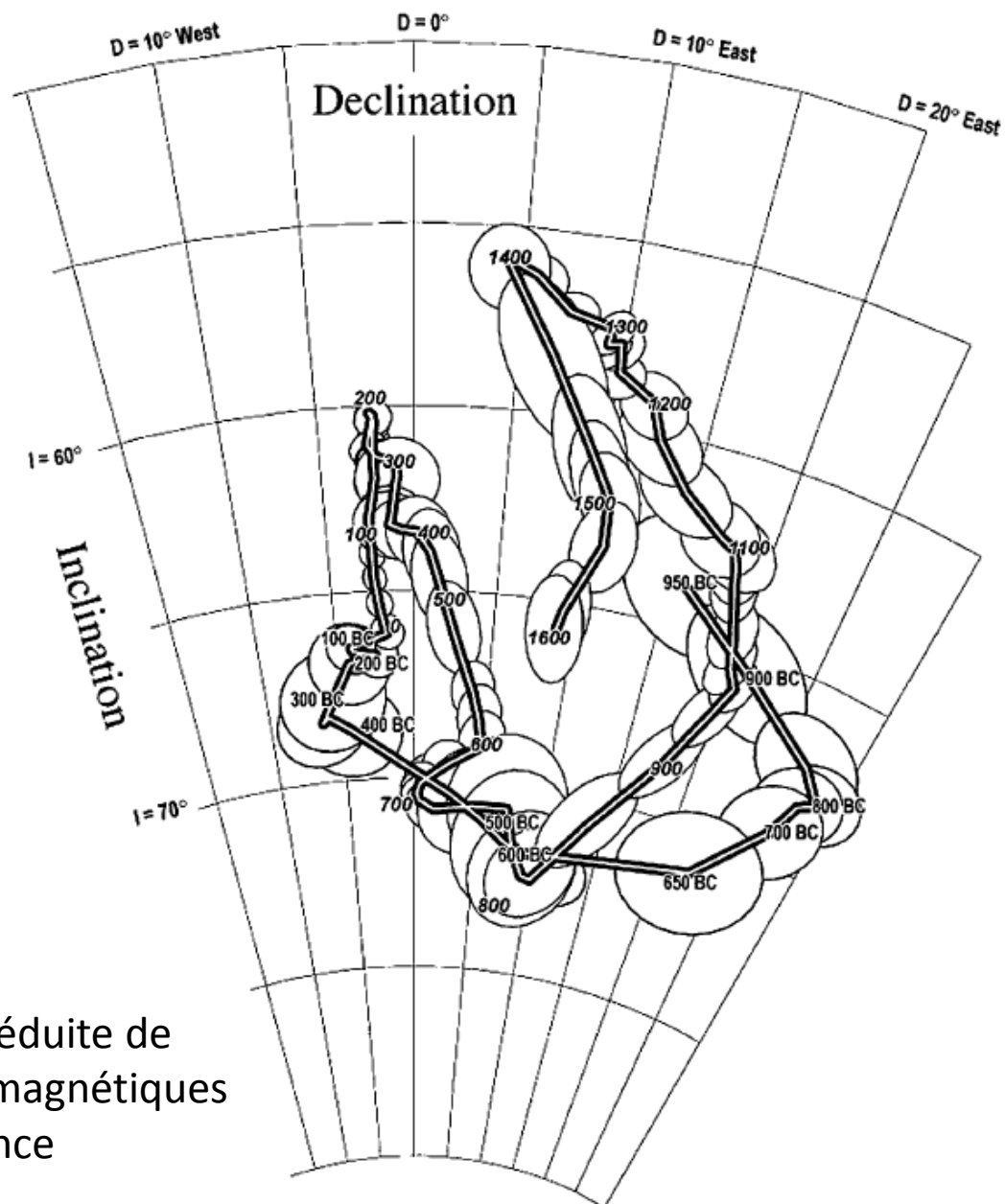


<http://geomag.org>, 2008

Evolution de la déclinaison magnétique 1600-2010

Le champ magnétique terrestre

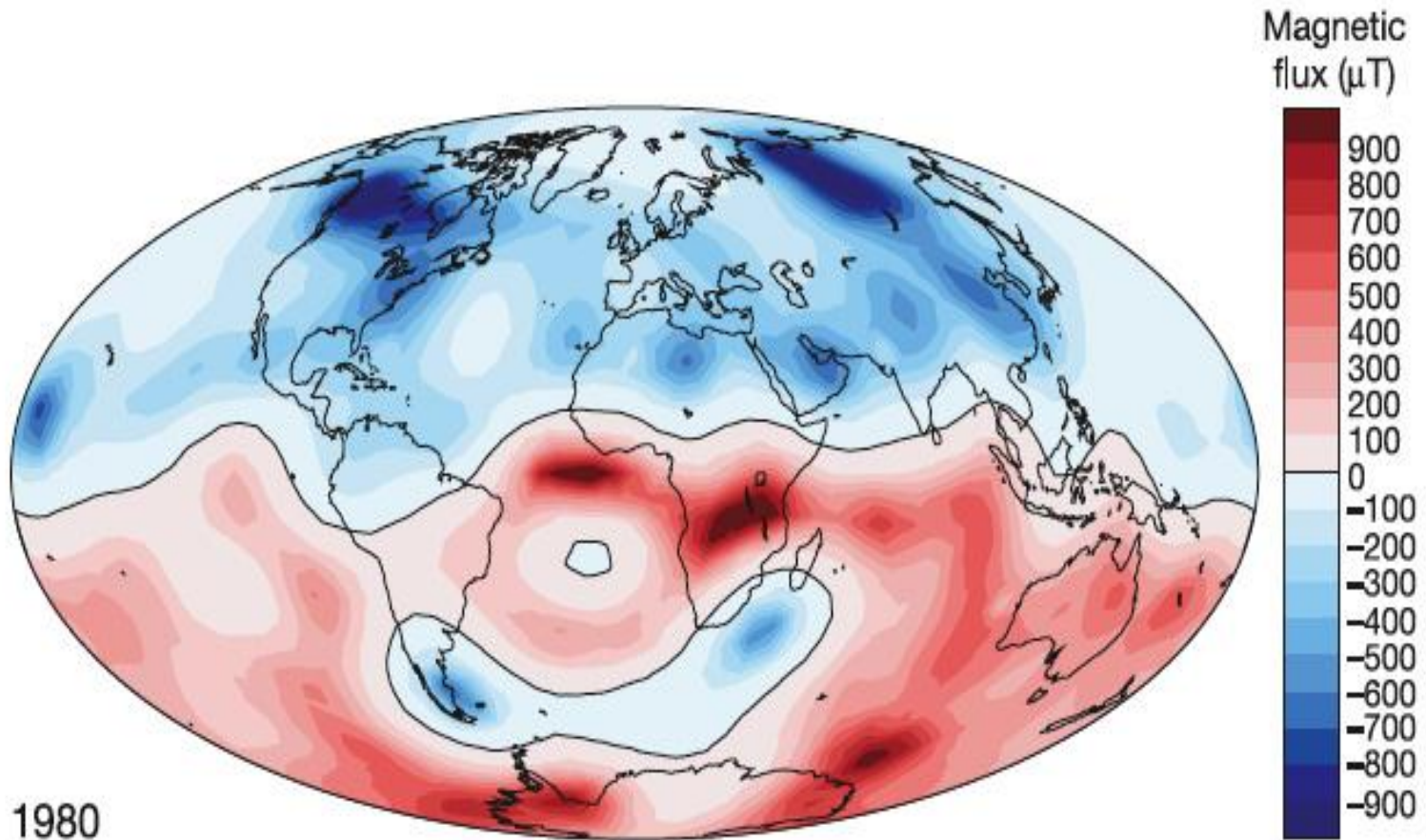
Une structure dipolaire et
des variations spatiales
soumises à des variations séculaires



Declinaison déduite de
mesures archéomagnétiques
en France

Le champ magnétique terrestre

Une structure dipolaire et des variations spatiales
soumises à des variations séculaires ...



Mesures Satellite Magsat

Unités de champ magnétique

Unité SI : le Tesla

0,1 - 1 T champ d'un petit aimant

32 T champ le plus intense créé en laboratoire

0,05 T champ magnétique terrestre (à Lyon)

Unité CGS: le Gauss

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

Force d'un aimant de surface S

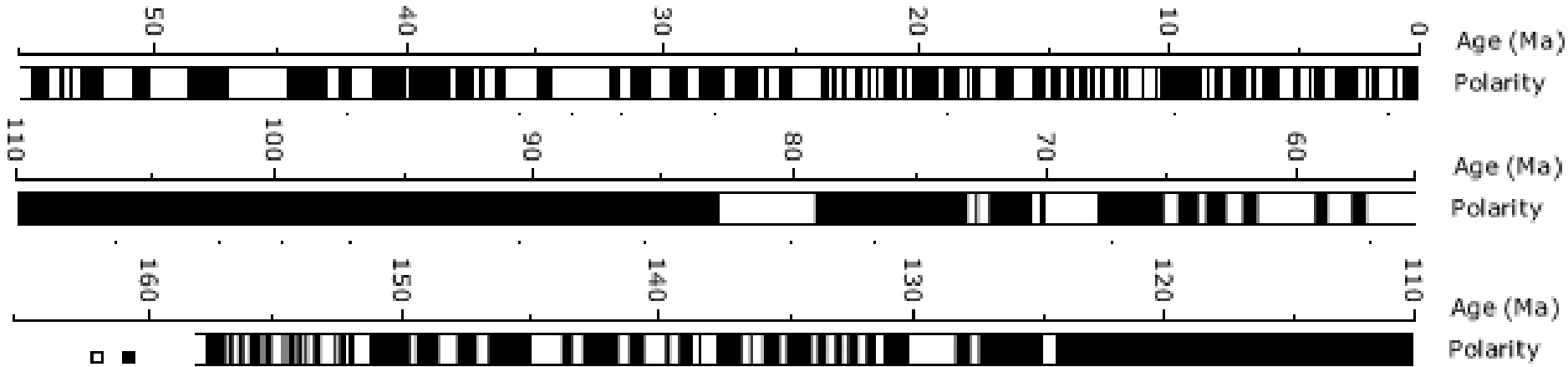
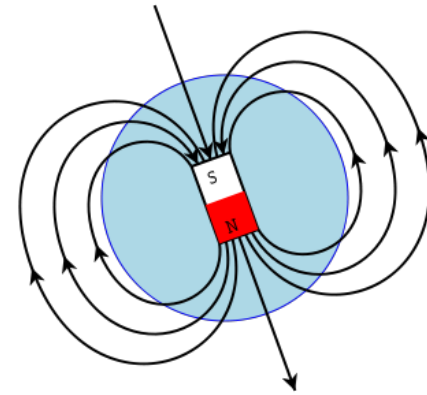
$$F = B^2 S / 2\mu_0$$

$$100 \text{ N pour } B = 1 \text{ T, } S = 1 \text{ cm}^2$$

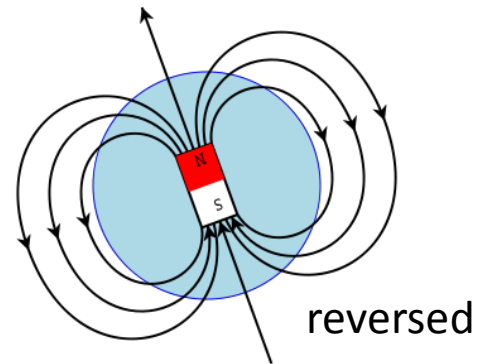
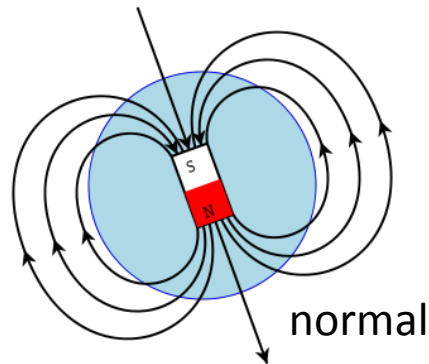
$$\mu \approx 4\pi 10^{-7} \text{ SI (Hm}^{-1}\text{)}$$

Le champ magnétique terrestre

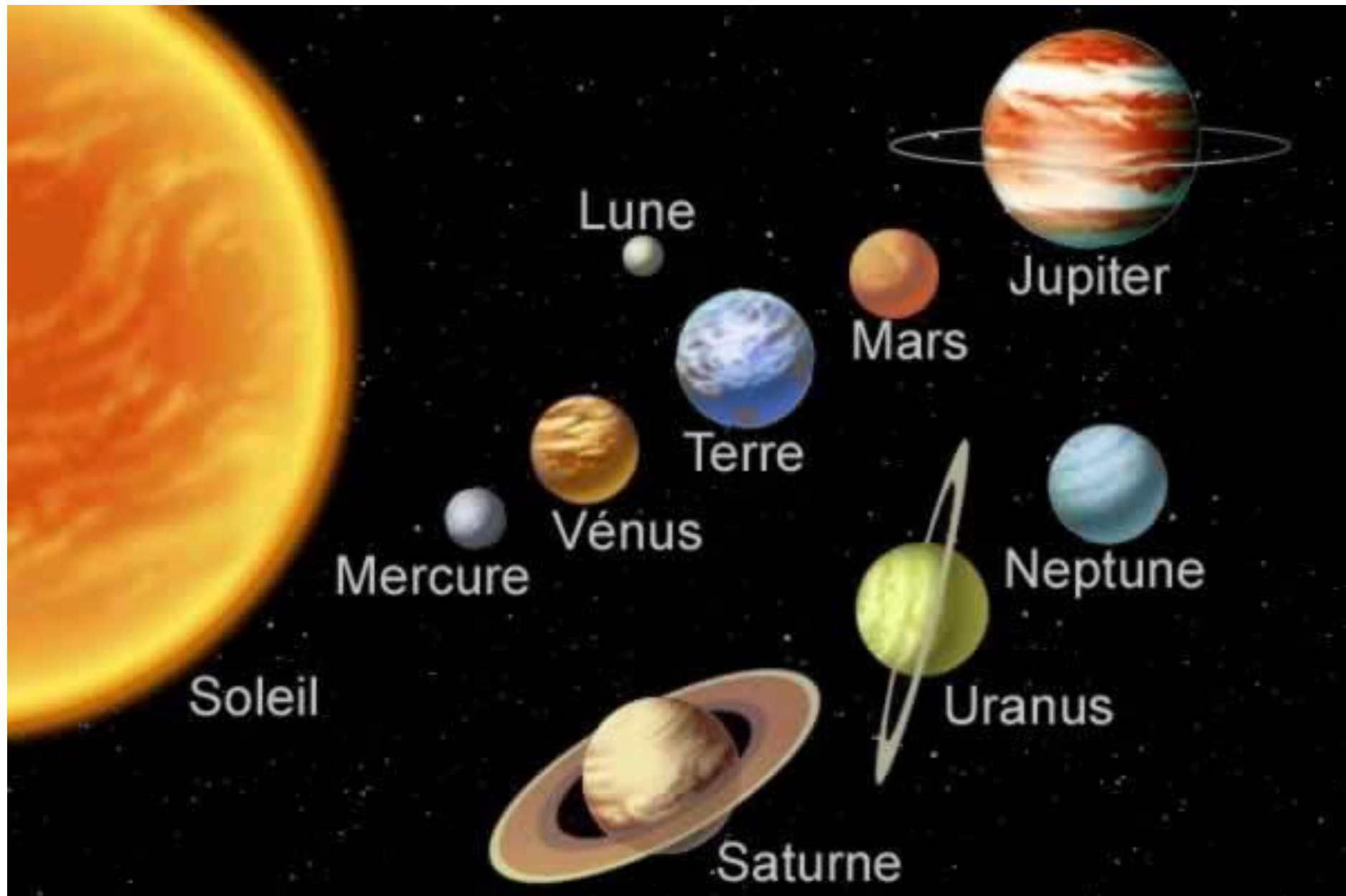
... et à des renversements chaotiques



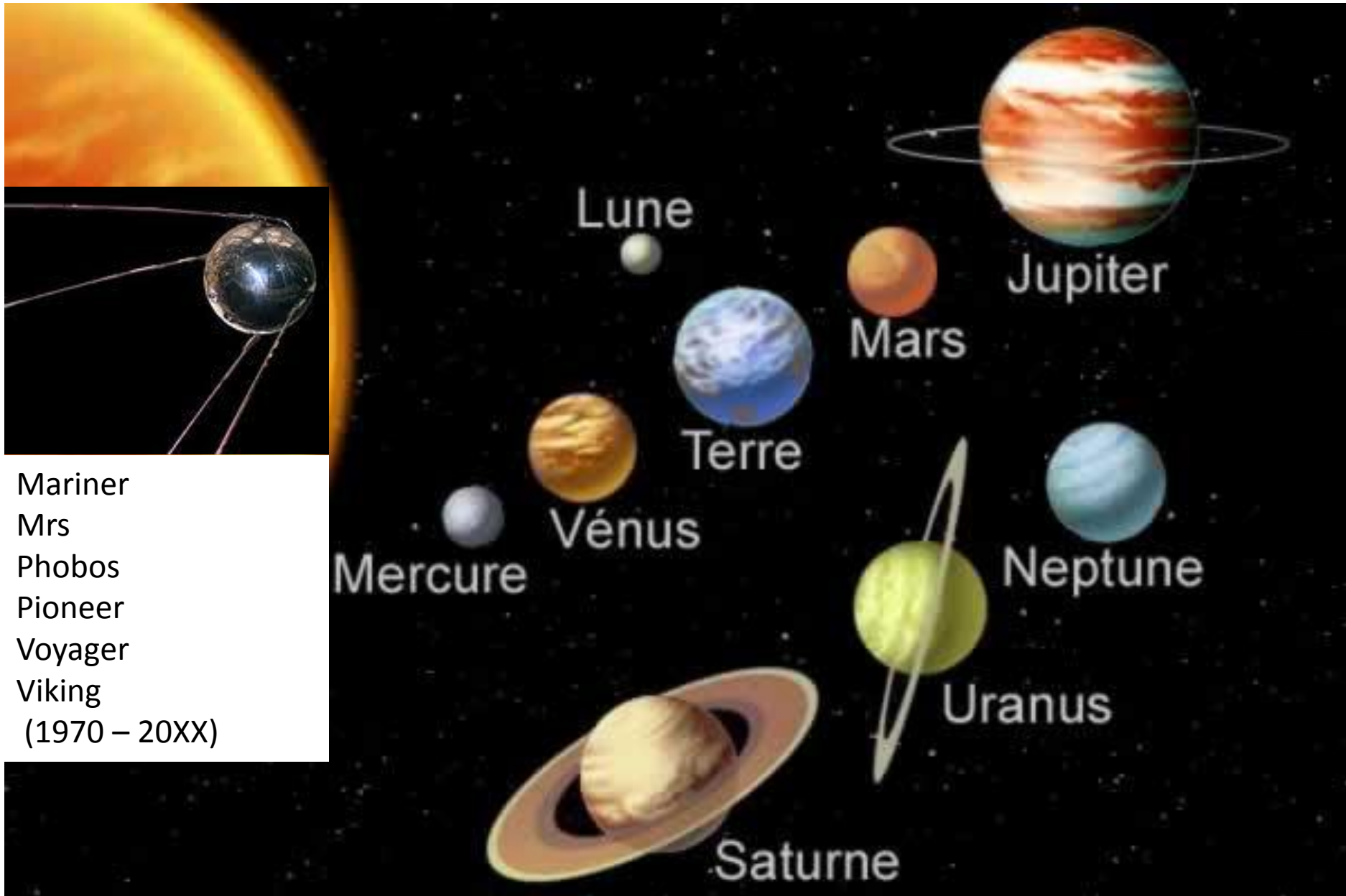
50 – 30000 yrs



Et nos voisines ?



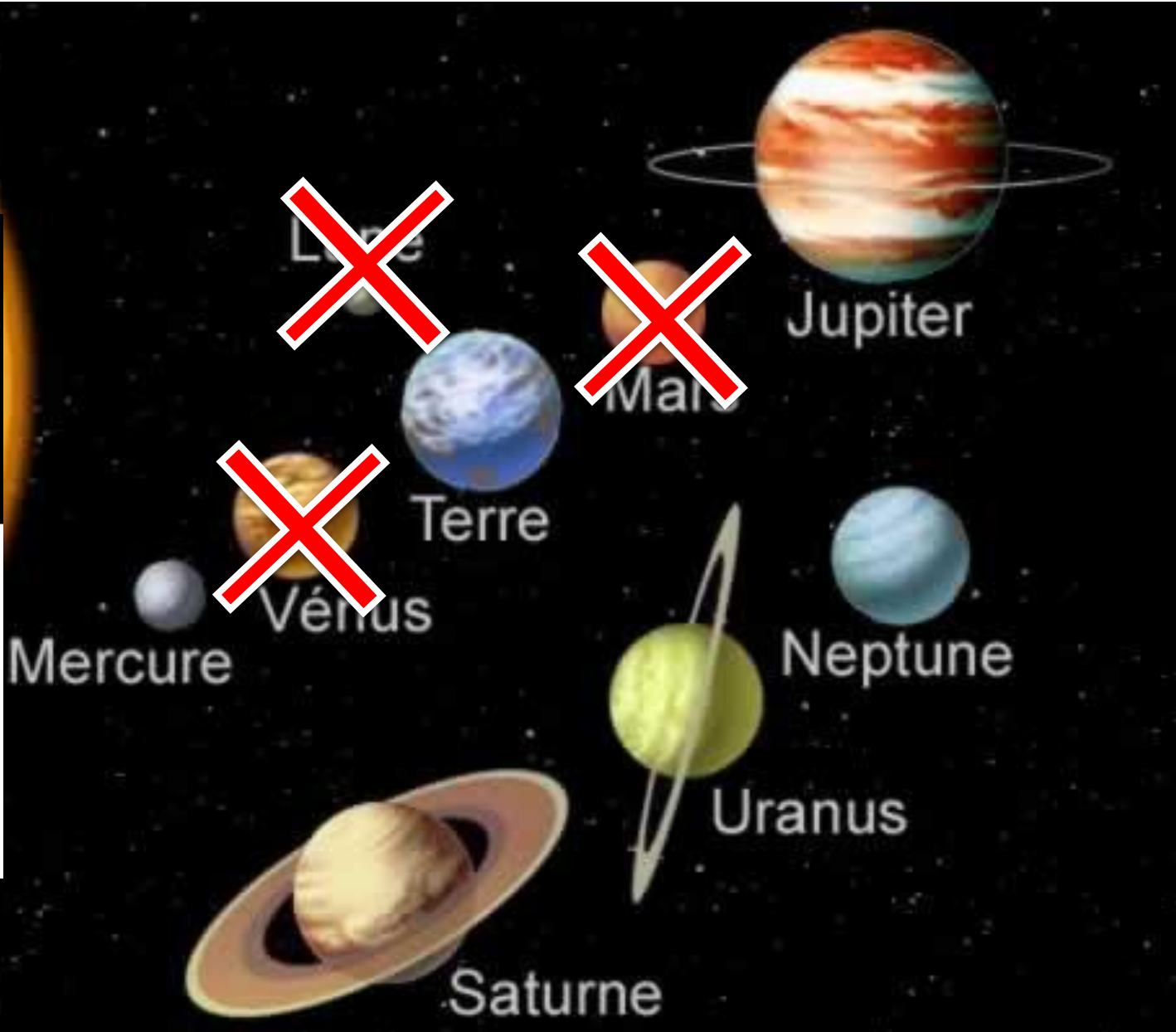
Et nos voisines ?



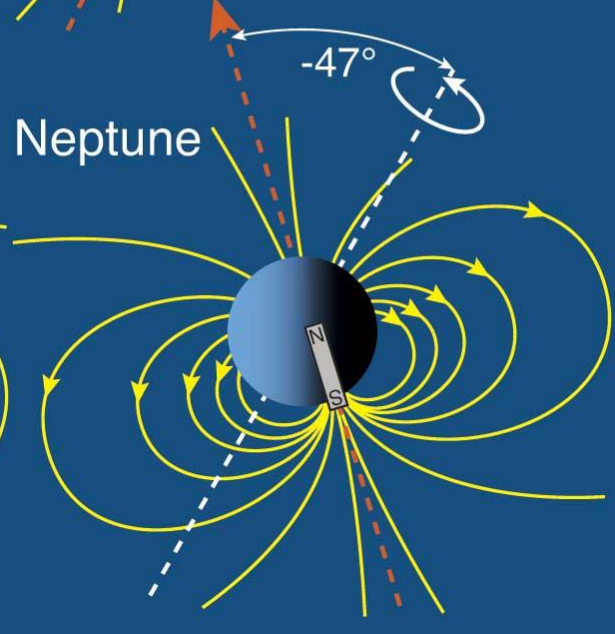
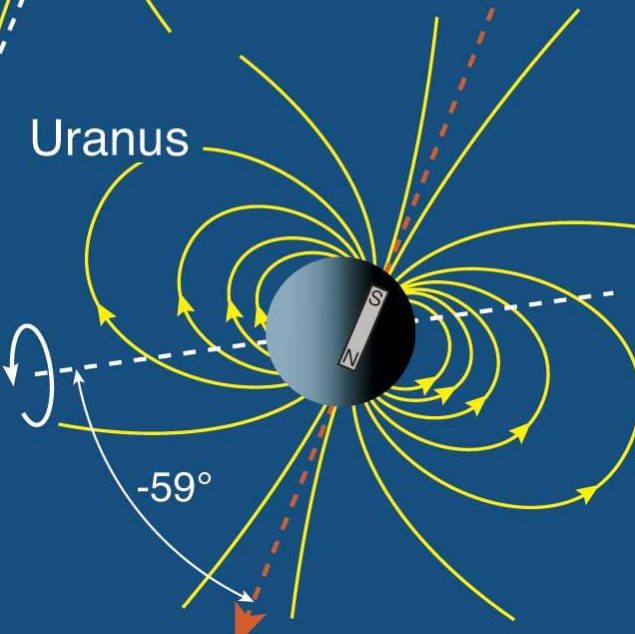
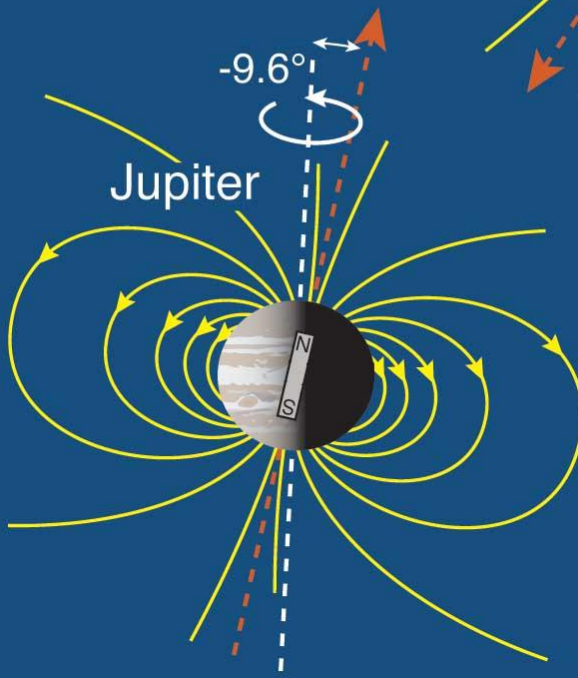
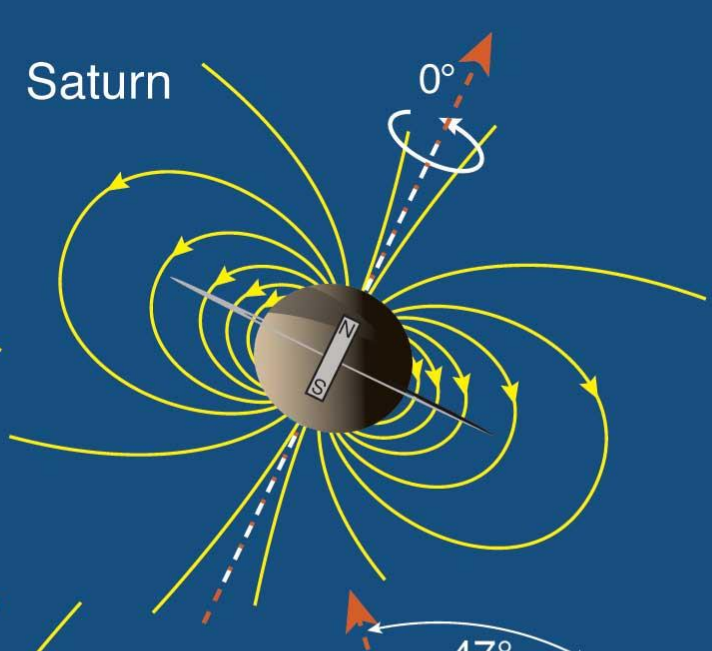
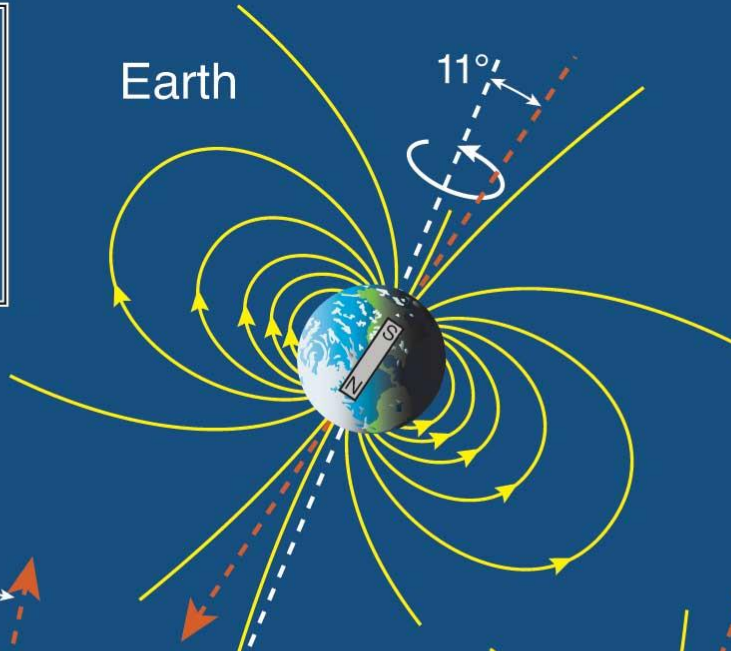
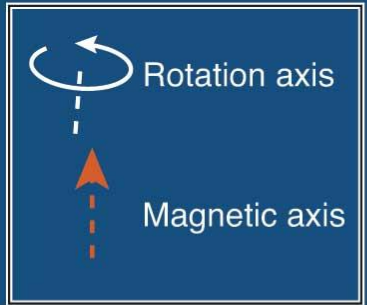
Et nos voisines ?



Mariner
Mrs
Phobos
Pioneer
Voyager
Viking
(1970 – 20XX)

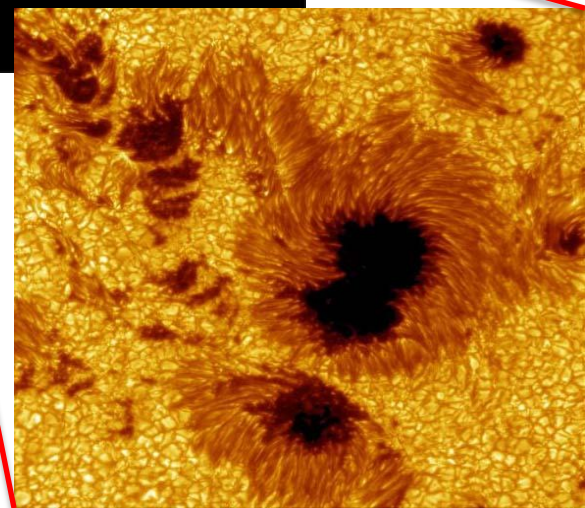
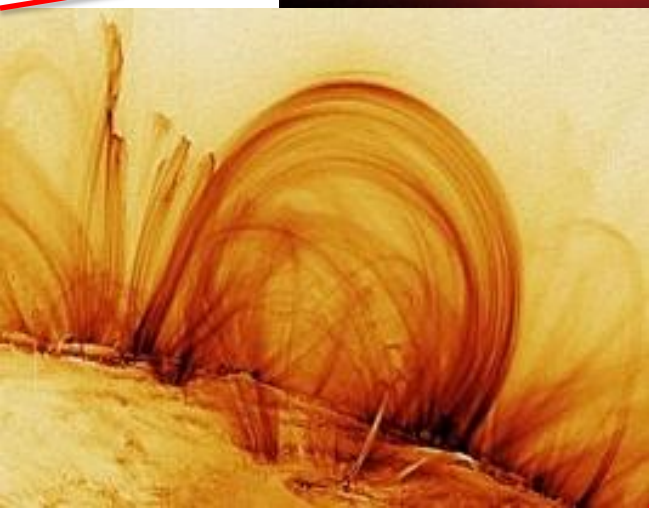
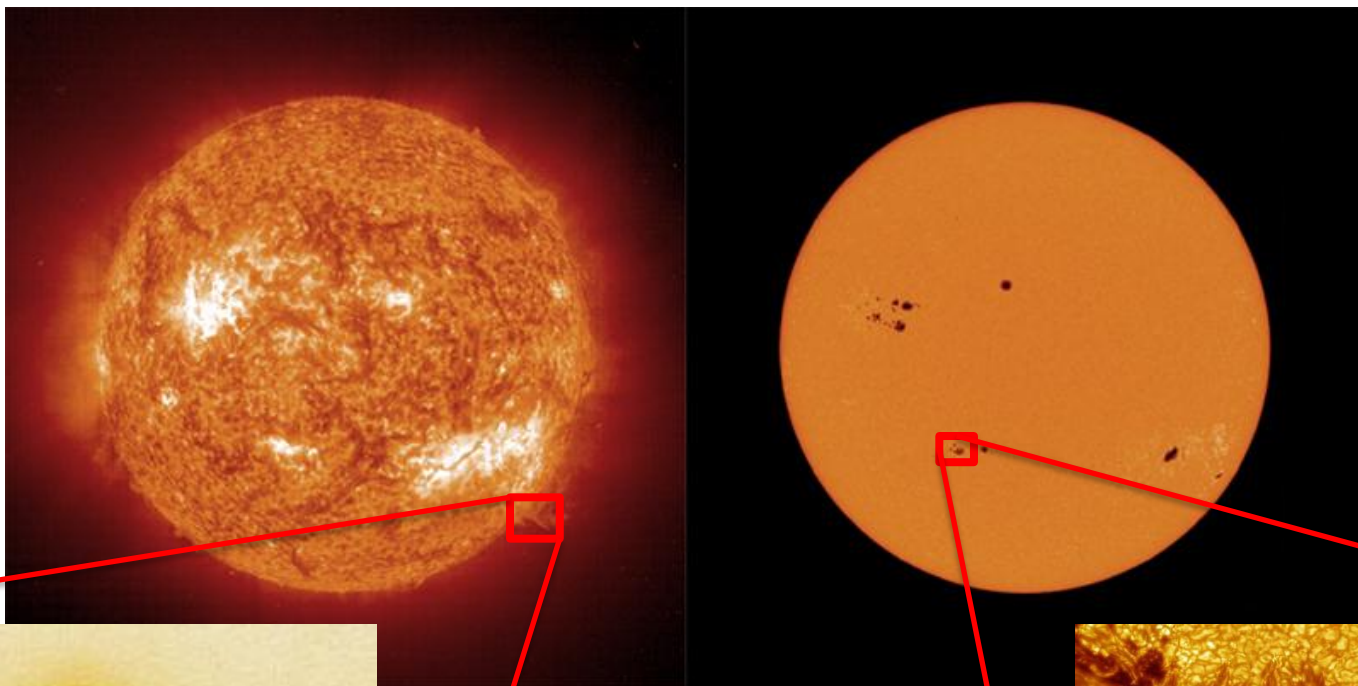


Et nos voisines ?



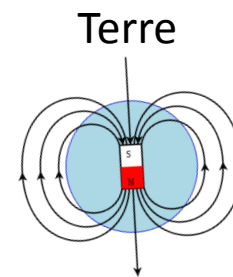
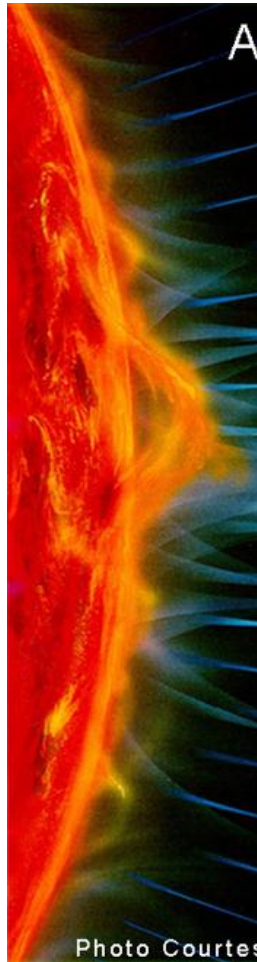
Et le soleil ?

Les tâches solaires et les boucles coronales sont des signatures du champ magnétique solaire



Omniprésence du champ magnétique dans le système solaire (... et l'univers)

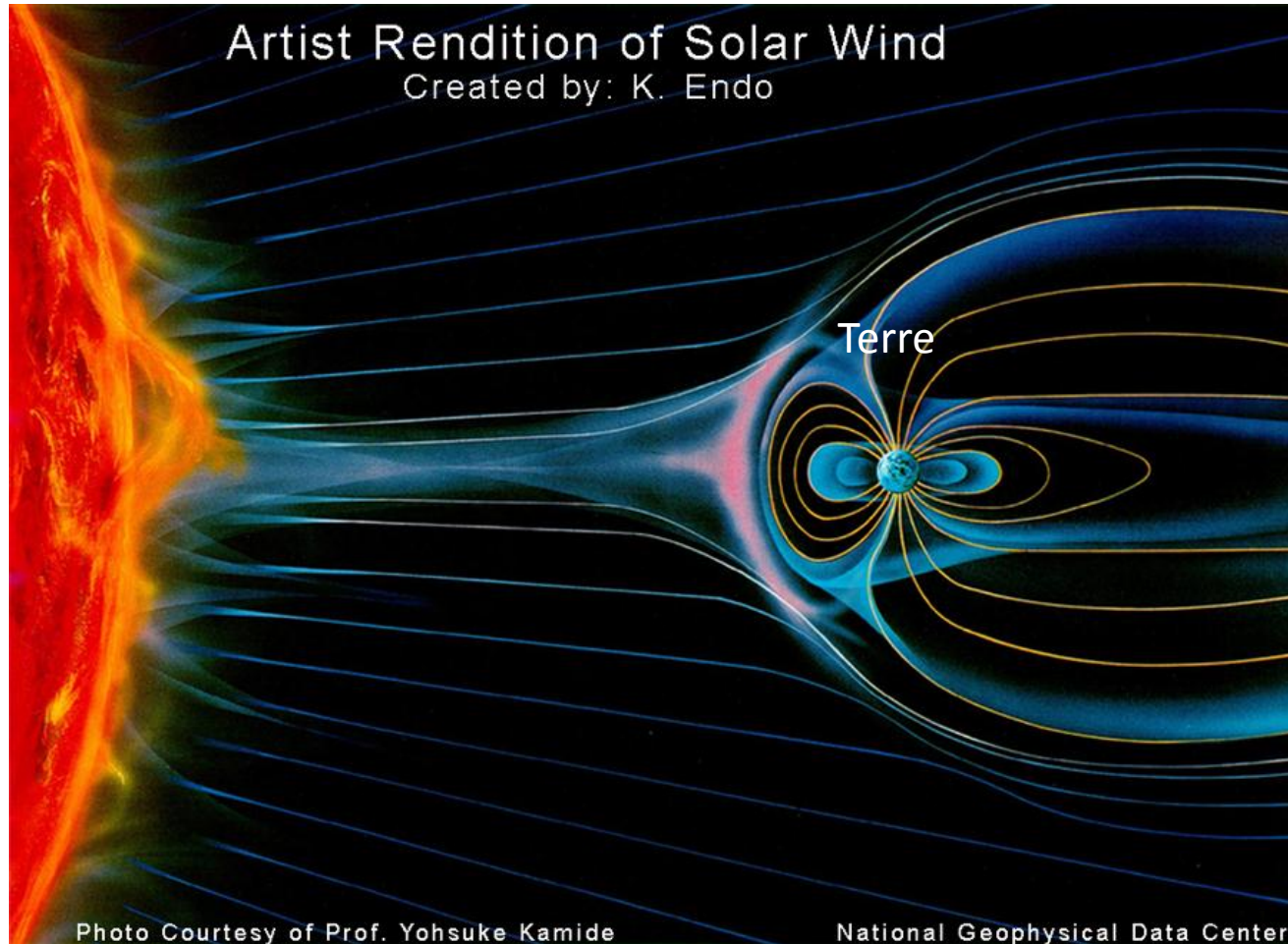
Soleil



Omniprésence du champ magnétique dans le système solaire (... et l'univers)

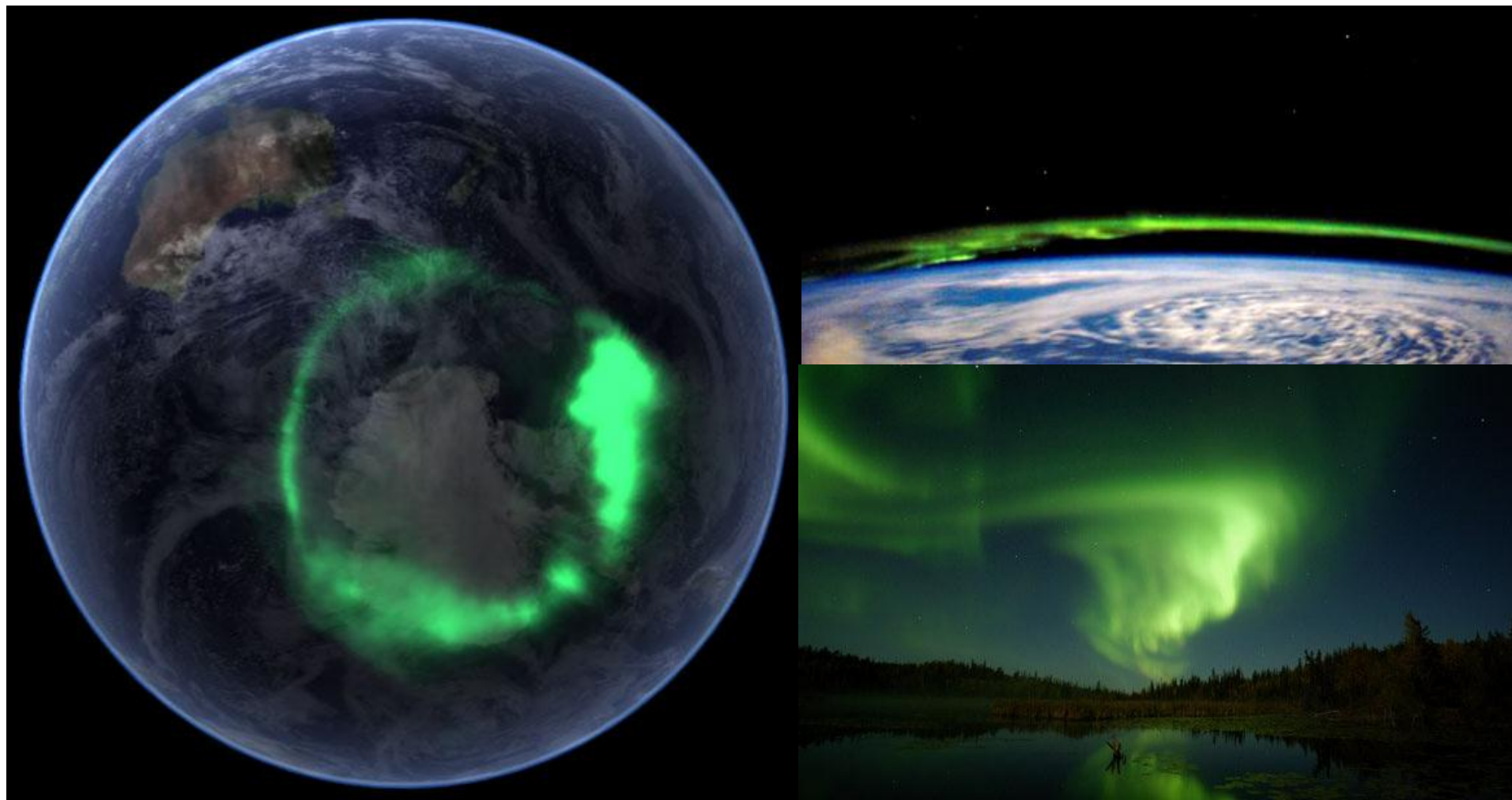
L'activité magnétique du Soleil modifie la structure du champ magnétique terrestre dans l'espace

Soleil

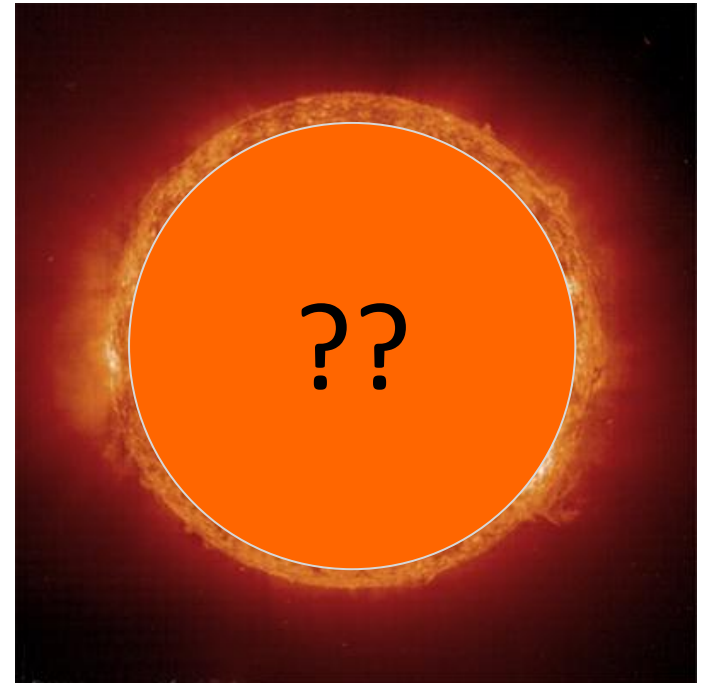
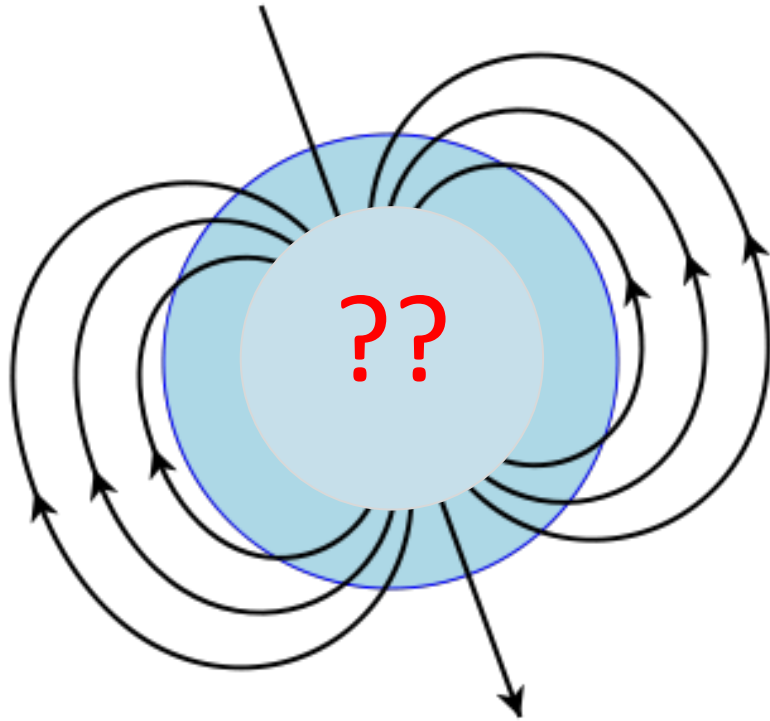


Omniprésence du champ magnétique dans le système solaire (... et l'univers)

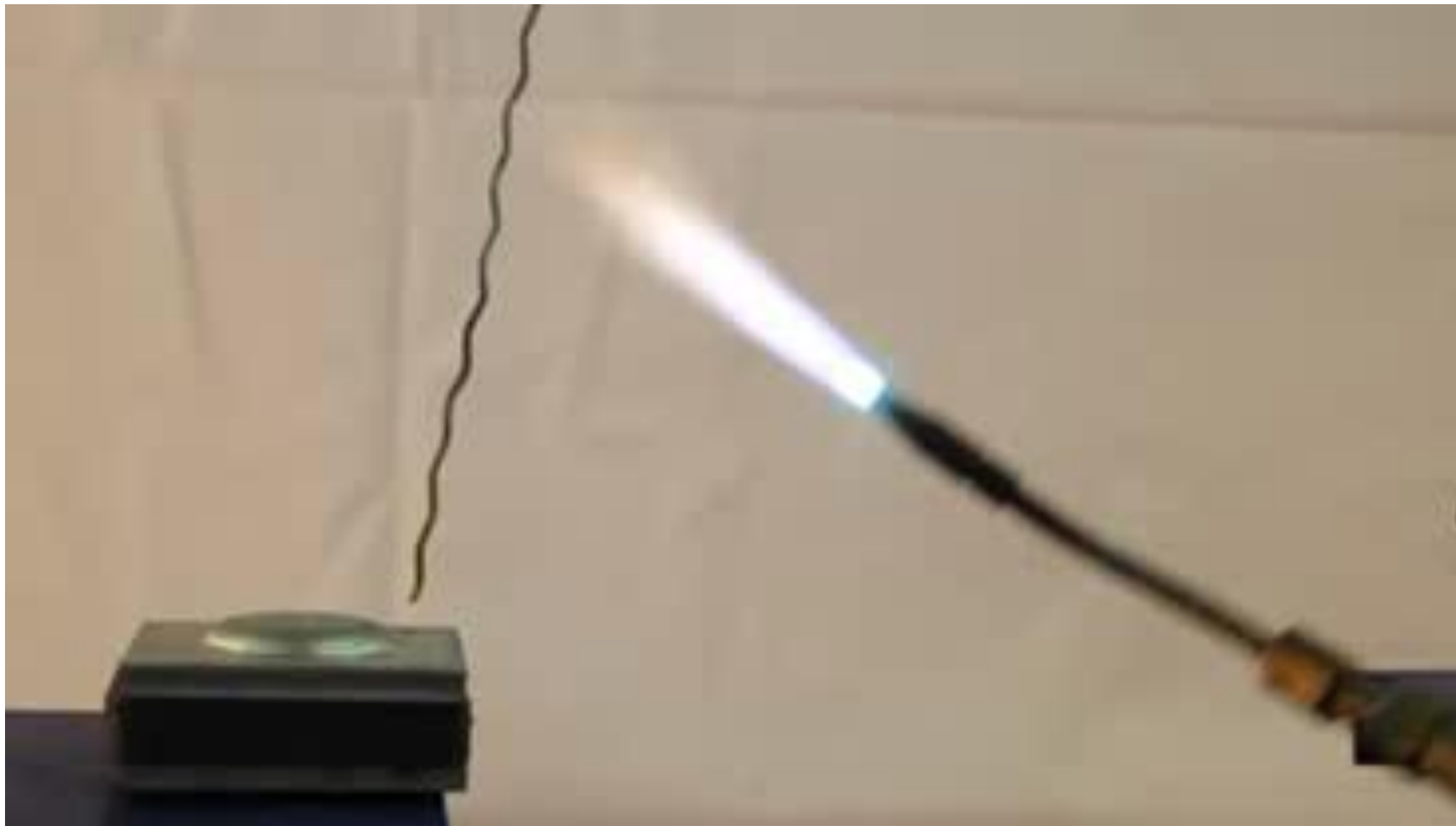
L'activité magnétique du Soleil modifie la structure du champ magnétique terrestre dans l'espace



Quelle origine pour le champ magnétique?



Température de Curie et Expérience d'Oersted



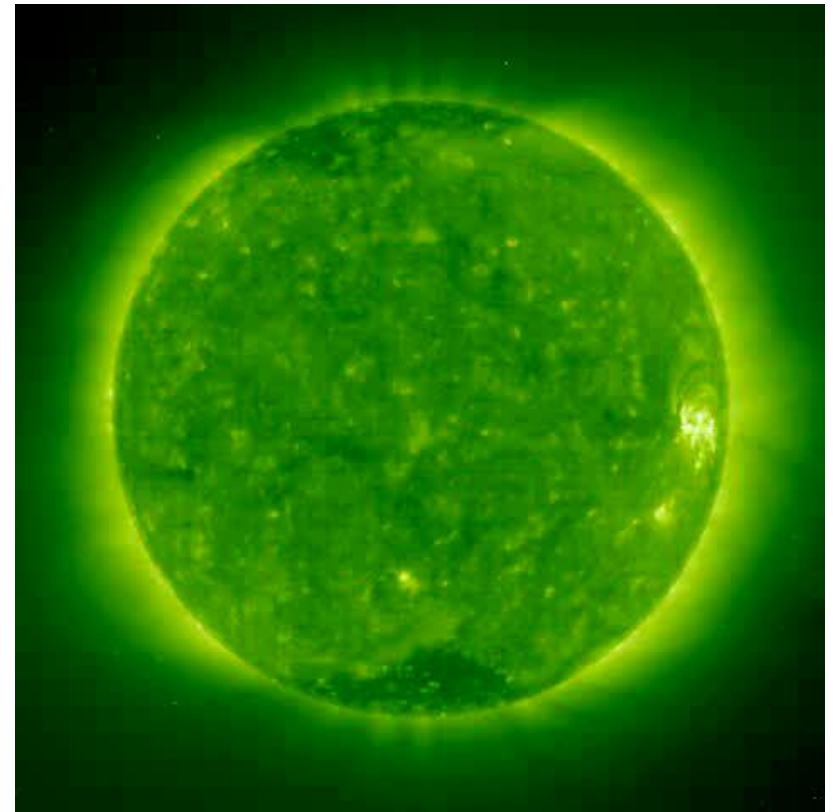
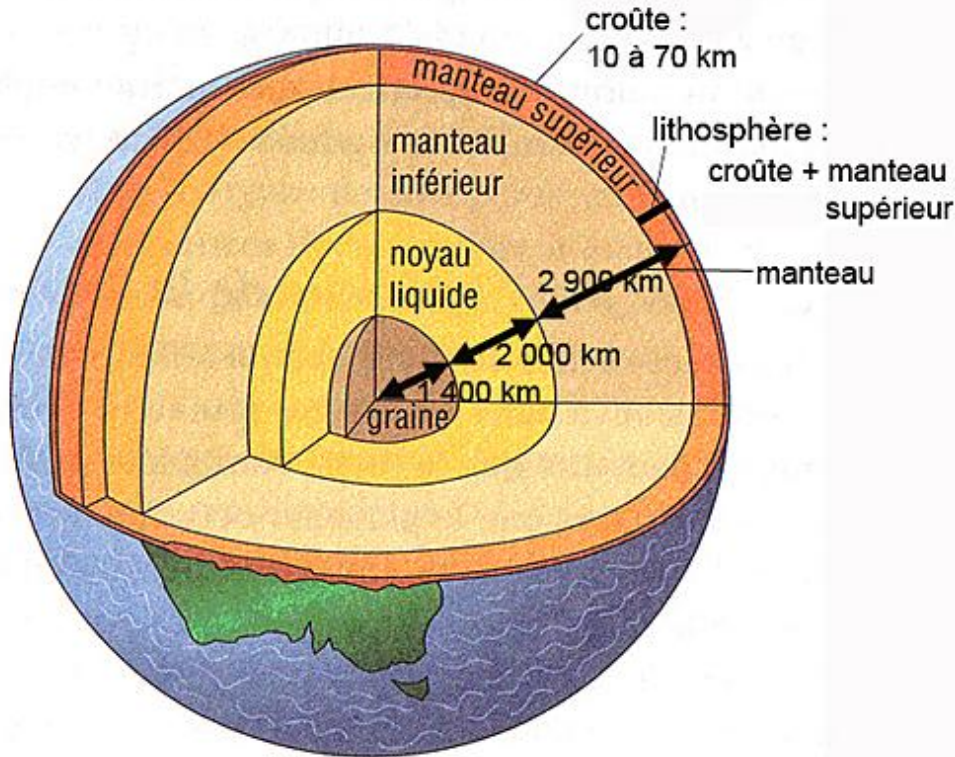
Environ 700°C pour le fer, 100-300°C pour les aimants intenses

Quelle origine pour le champ magnétique?

Une origine dans le mouvement du

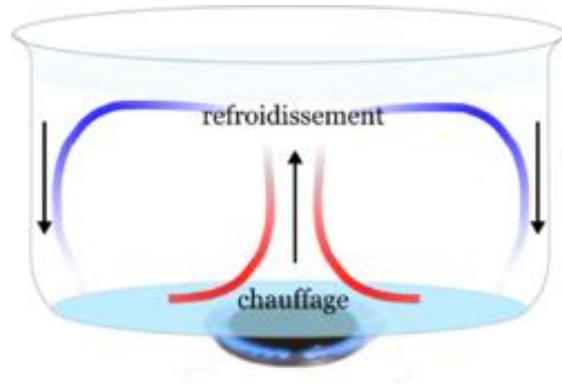
- métal (Fe) liquide dans le noyau liquide
pour les planètes telluriques

- plasma (gaz ionisé conducteur)
pour le soleil

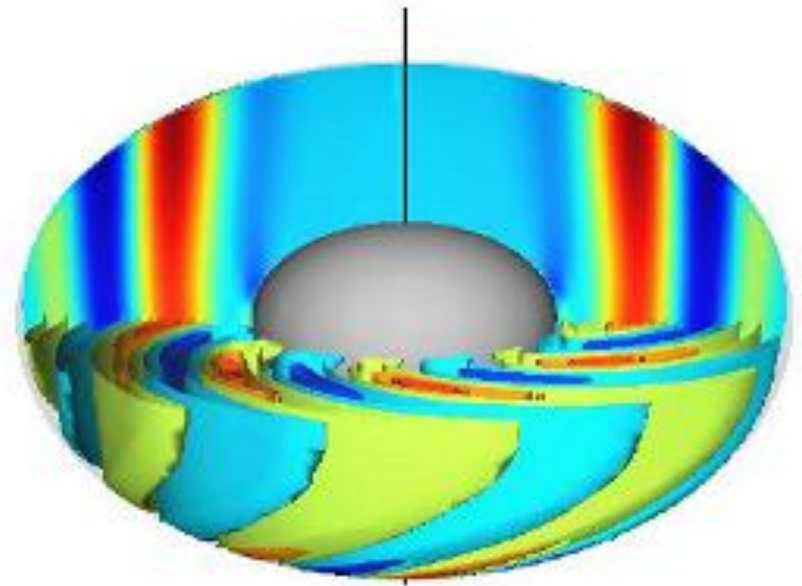


Quelle origine pour le champ magnétique terrestre?

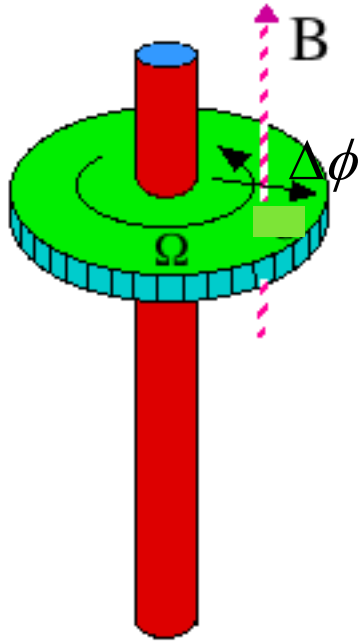
Mouvements de convection thermique (et solutale) dans le noyau liquide de la Terre



La rotation de la Terre structure les mouvements de convection en colonnes

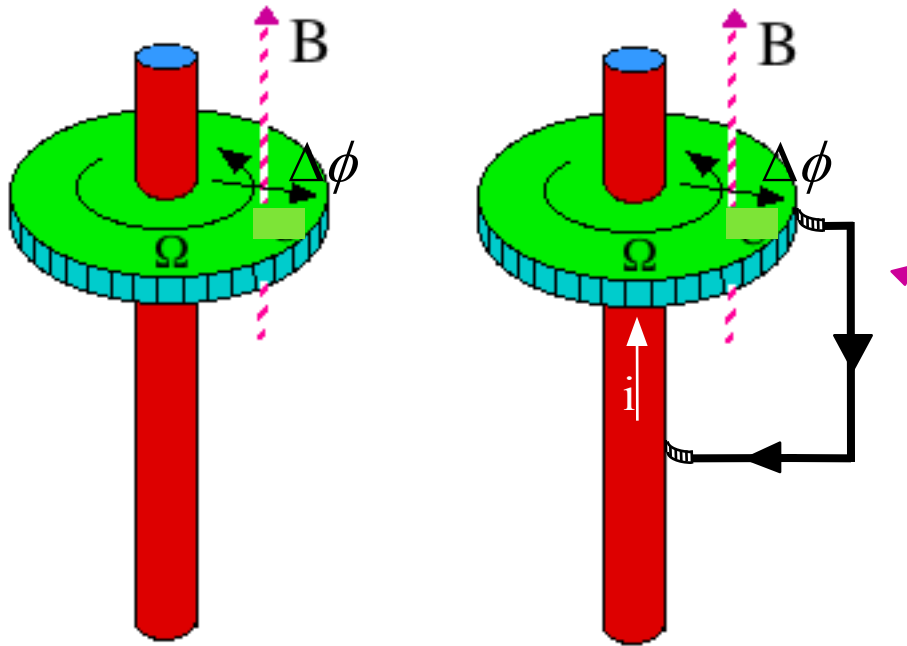


La dynamo de Bullard



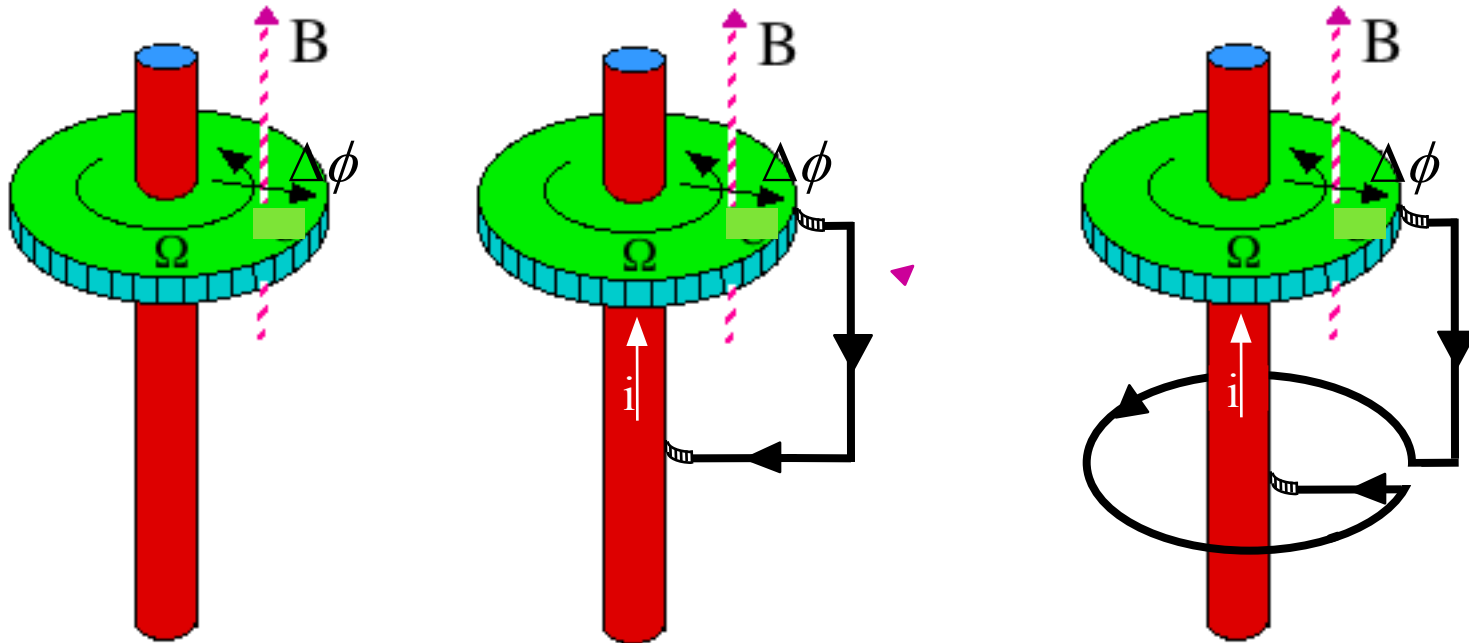
Disque en rotation
solide dans un
champ magnétique
axial induit une
différence de
potentiel

La dynamo de Bullard



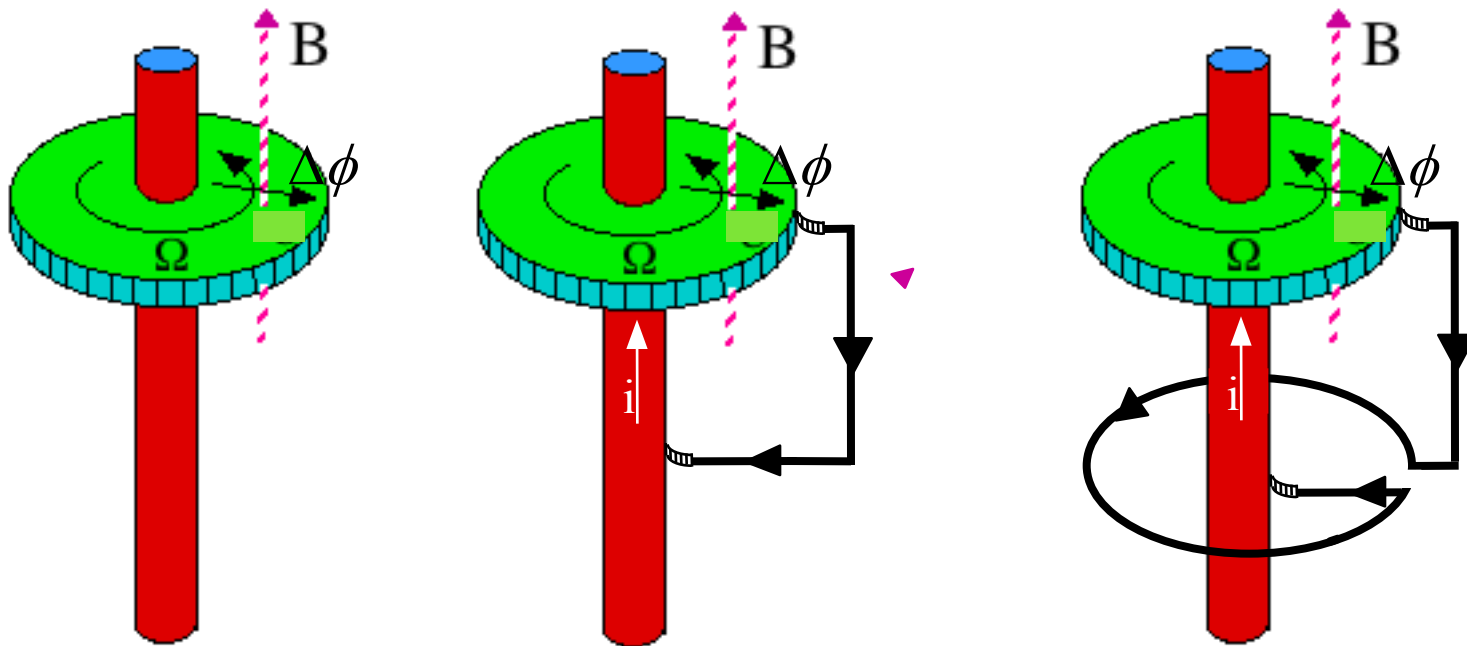
La fermeture du circuit permet la circulation d'un courant.

La dynamo de Bullard



La création d'une bobine permet de renforcer le champ magnétique

La dynamo de Bullard

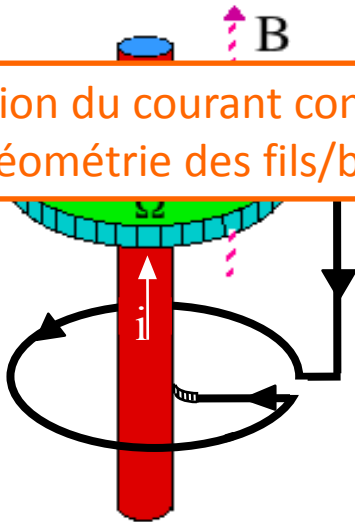


Croissance du courant si INDUCTION > EFFET JOULE

De la dynamo solide à la dynamo fluide

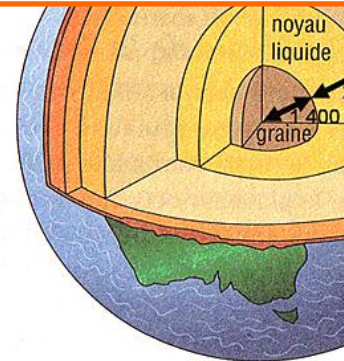
Dynamo solide (Bullard)

Circulation du courant contrainte par la géométrie des fils/bobines



Dynamo fluide (Terre)

Circulation du courant libre, auto-organisation



Equations de Maxwell

Equation du mouvement

Mouvement solide

Equation de Navier Stokes

De la loi d'Ohm à l'équation d'induction

Loi d'Ohm généralisée

$$j = \sigma(E + u \times B)$$

$$\nabla \times [j = \sigma(E + u \times B)]$$



$$\nabla \times [\nabla \times] = \nabla(\nabla \cdot) - \Delta \quad + \quad \text{Maxwell}$$

Equation d'induction

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta B \quad \nabla \cdot B = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times B = \mu_0 j + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla \cdot E = \frac{\rho_e}{\varepsilon_0} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \end{array} \right.$$

De la loi d'Ohm à l'équation d'induction

Loi d'Ohm généralisée

$$j = \sigma(E + u \times B)$$

$$\nabla \times [j = \sigma(E + u \times B)]$$



$$\nabla \times [\nabla \times] = \nabla(\nabla \cdot) - \Delta \quad + \quad \text{Maxwell}$$

Equation d'induction

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta B \quad \nabla \cdot B = 0$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = (B \cdot \nabla)u - (u \cdot \nabla)B + \frac{1}{\mu_0 \sigma} \Delta B$$

Induction

Effet Joule (inversement prop. à la conductivité σ)

Variation du champ dans un circuit fixe

Déformation d'un circuit dans un champ fixe

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \times B = \mu_0 j + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \\ \nabla \cdot E = \frac{\rho_e}{\epsilon_0} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \end{array} \right.$$



L'équation de Navier Stokes

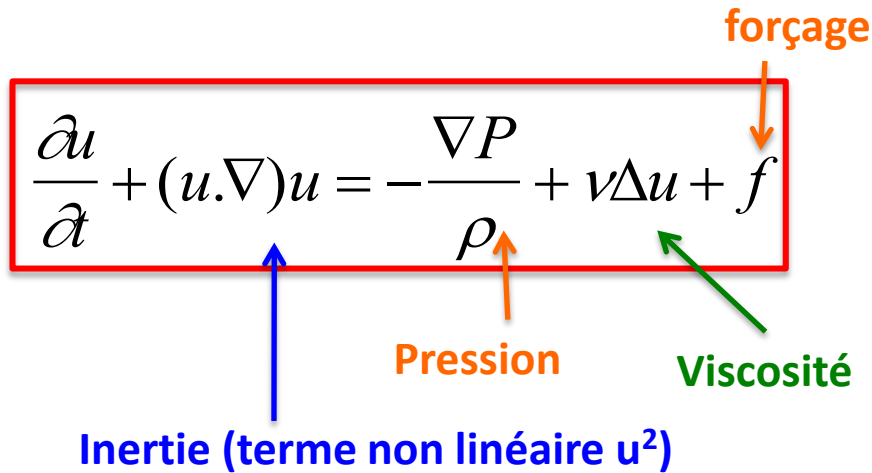
$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \Delta u + f$$

forçage

Inertie (terme non linéaire u^2)

Pression

Viscosité



Re \ll 1 : La viscosité domine
Ecoulement laminaire

Re \gg 1 : Les effets non-linéaires dominant
Ecoulement turbulent

$$\text{Re} = \frac{\|(u \cdot \nabla)u\|}{\|\nu \Delta u\|} \approx \frac{\left(U \cdot \frac{1}{L}\right)U}{\nu \frac{U}{L^2}} \approx \frac{UL}{\nu}$$

Les équations de la MagnétoHydroDynamique (MHD)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \underbrace{(u \cdot \nabla)u}_{\text{Inertie}} = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{j \times B}{\rho} - \underbrace{\nu \Delta u}_{\text{Dissipation (Viscosité)}} + f$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (u \times B)}_{\text{induction}} + \underbrace{\frac{1}{\mu\sigma} \Delta B}_{\text{Dissipation (Effet Joule)}}$$

Paramètres sans dimension

$$Re = \frac{\text{inertie}}{\text{viscosité}} = \frac{\|(u \cdot \nabla)u\|}{\|\nu \Delta u\|} = \frac{LU}{\nu}$$

$$Rm = \frac{\text{induction}}{\text{effet Joule}} = \frac{\|\nabla \times (u \times B)\|}{\|1/\mu\sigma \Delta B\|} = \mu\sigma LU$$

L'instabilité dynamo

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (u \times B)}_{\text{induction}} + \underbrace{\frac{1}{\mu\sigma} \Delta B}_{\text{Dissipation (Effet Joule)}}$$

Si induction \gg dissipation, les conditions sont t.q. $\frac{\partial B}{\partial t} > 0$

Il y a alors croissance du champ magnétique : c'est l'instabilité dynamo

$$Rm = \frac{\|\nabla \times (u \times B)\|}{\|1/\mu\sigma \Delta B\|} = \mu\sigma LU \gg 1$$

L'instabilité dynamo

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (u \times B)}_{\text{induction}} + \underbrace{\frac{1}{\mu\sigma} \Delta B}_{\text{Dissipation (Effet Joule)}}$$

Si induction \gg dissipation, les conditions sont t.q. $\frac{\partial B}{\partial t} > 0$ c'est l'instabilité dynamo

$$Rm = \frac{\|\nabla \times (u \times B)\|}{\|1/\mu\sigma\Delta B\|} = \mu\sigma LU \gg 1$$

Dynamo si

NaCl saturé dans l'eau	$\sigma \approx 10^{-1} \text{Sm}^{-1}$	$UL \gg 10^8 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$L \gg 10^7 \text{m}$
Electrolyte	$\sigma \approx 10^4 \text{Sm}^{-1}$	$UL \gg 10^2 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$L \gg 1 \text{m}$
Métal liquide	$\sigma \approx 10^6 \text{Sm}^{-1}$	$UL \gg 1 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$L \gg 0,1 \text{m}$

$U = 10 \text{ms}^{-1}$ est un écoulement intense

L'instabilité dynamo

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times (u \times B)}_{\text{induction}} + \underbrace{\frac{1}{\mu\sigma} \Delta B}_{\text{Dissipation (Effet Joule)}}$$

Si induction \gg dissipation, les conditions sont t.q. $\frac{\partial B}{\partial t} > 0$ c'est l'instabilité dynamo

$$Rm = \frac{\|\nabla \times (u \times B)\|}{\|1/\mu\sigma\Delta B\|} = \underbrace{\mu\sigma}_{\text{fluide}} \underbrace{LU}_{\text{ingénierie}} \gg 1$$

ingénierie : 10 pour un écoulement 100's kW

fluide

1 pour les métaux liquide

Mercure	-39°C	Cuivre	1080°C
Gallium	30°C	Or	1064°C
Sodium	98°C		

Dynamo et Turbulence

Instabilité dynamo $Rm = \frac{\|\nabla \times (u \times B)\|}{\|1/\mu\sigma\Delta B\|} = \mu\sigma LU \gg 1$

$$\frac{Rm}{Re} = \mu\sigma\nu \approx 10^{-6}$$

Constante du milieu
 10^{-6} pour tous les métaux liquides

$$Re = \frac{UL}{\nu} \gg 10^6$$

Ecoulements Turbulents !

$$Rm = \mu\sigma \left(\frac{\text{Puissance}L}{\rho} \right)^{1/3}$$

Mercure	-39°C	$\rho=13,5$	$\sigma=1 \cdot 10^6\text{S/m}$
Gallium	30°C	$\rho=6$	$\sigma=3 \cdot 10^6\text{S/m}$
Sodium	98°C	$\rho=1$	$\sigma=9 \cdot 10^6\text{S/m}$
Cuivre	1080°C	$\rho=8,9$	$\sigma=60 \cdot 10^6\text{S/m}$
Or	1064°C	$\rho=19$	$\sigma=80 \cdot 10^6\text{S/m}$

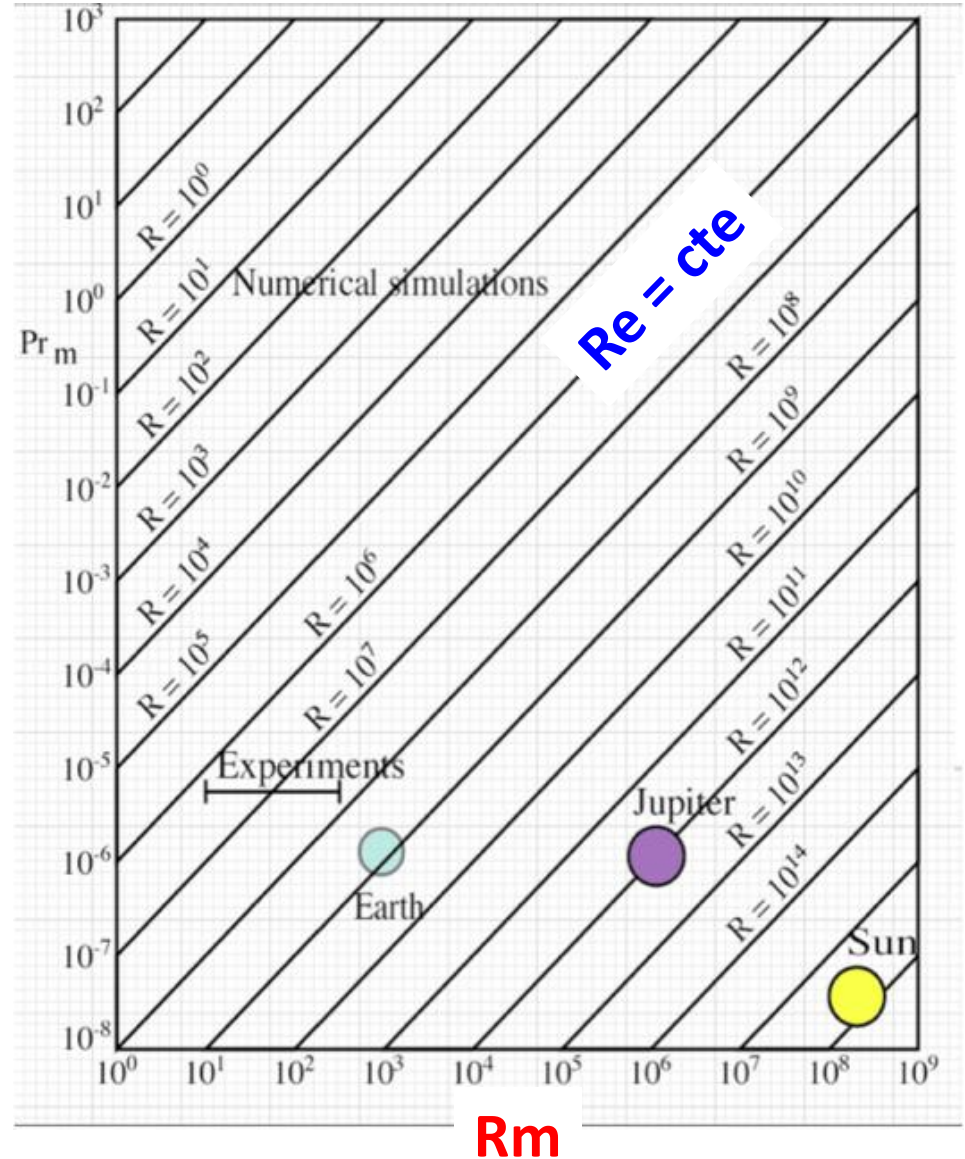
Des expériences représentatives de la Terre? Du Soleil?

$$Rm = \frac{\text{induction}}{\text{effet Joule}} = \mu\sigma LU$$

Terre: 100-1000
Expérience: 100

$$Re = \frac{\text{inertie}}{\text{viscosité}} = \frac{LU}{\nu}$$

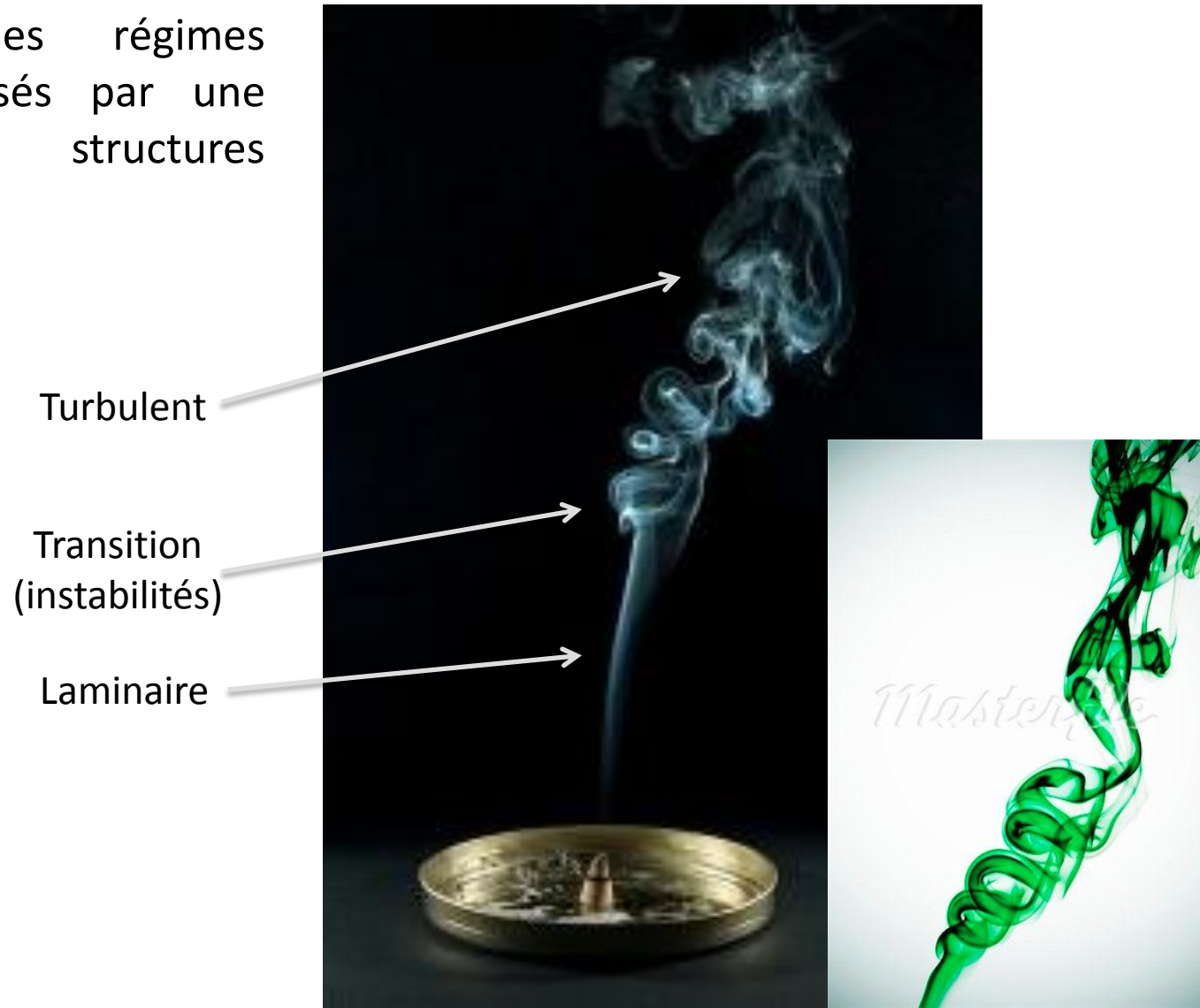
Terre: 10^{10}
Expérience: 10^7



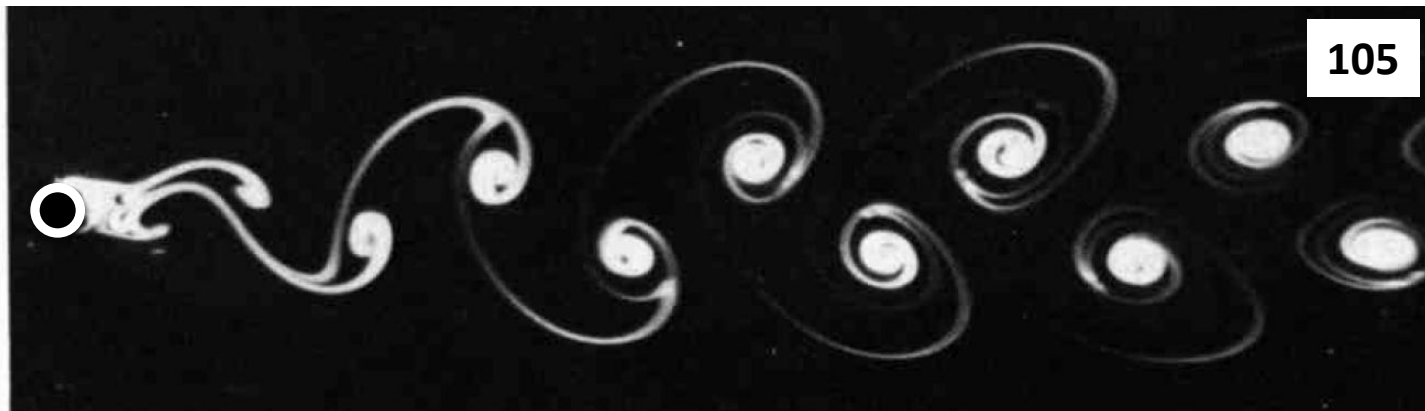
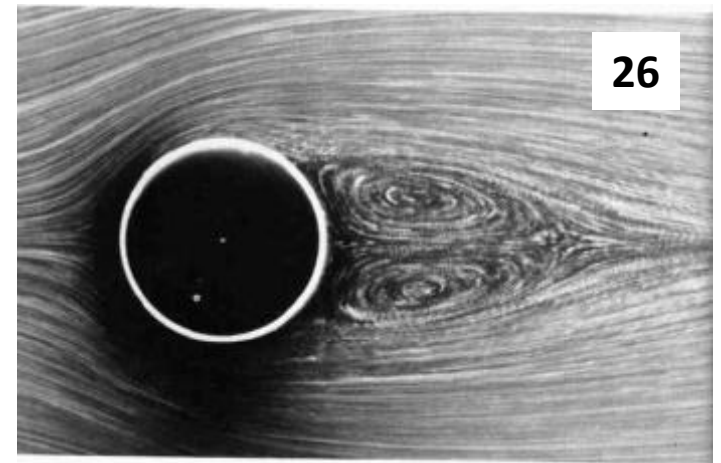
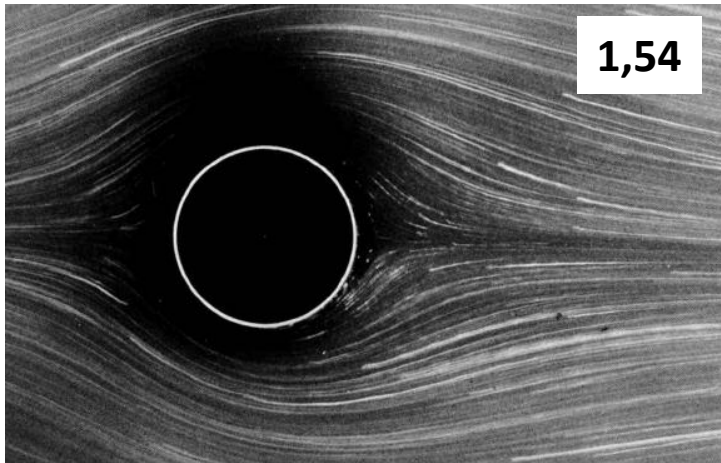
Écoulements turbulents

$$\text{Re} = \frac{\|(u \cdot \nabla)u\|}{\|\nu \Delta u\|} \approx \frac{UL}{\nu}$$

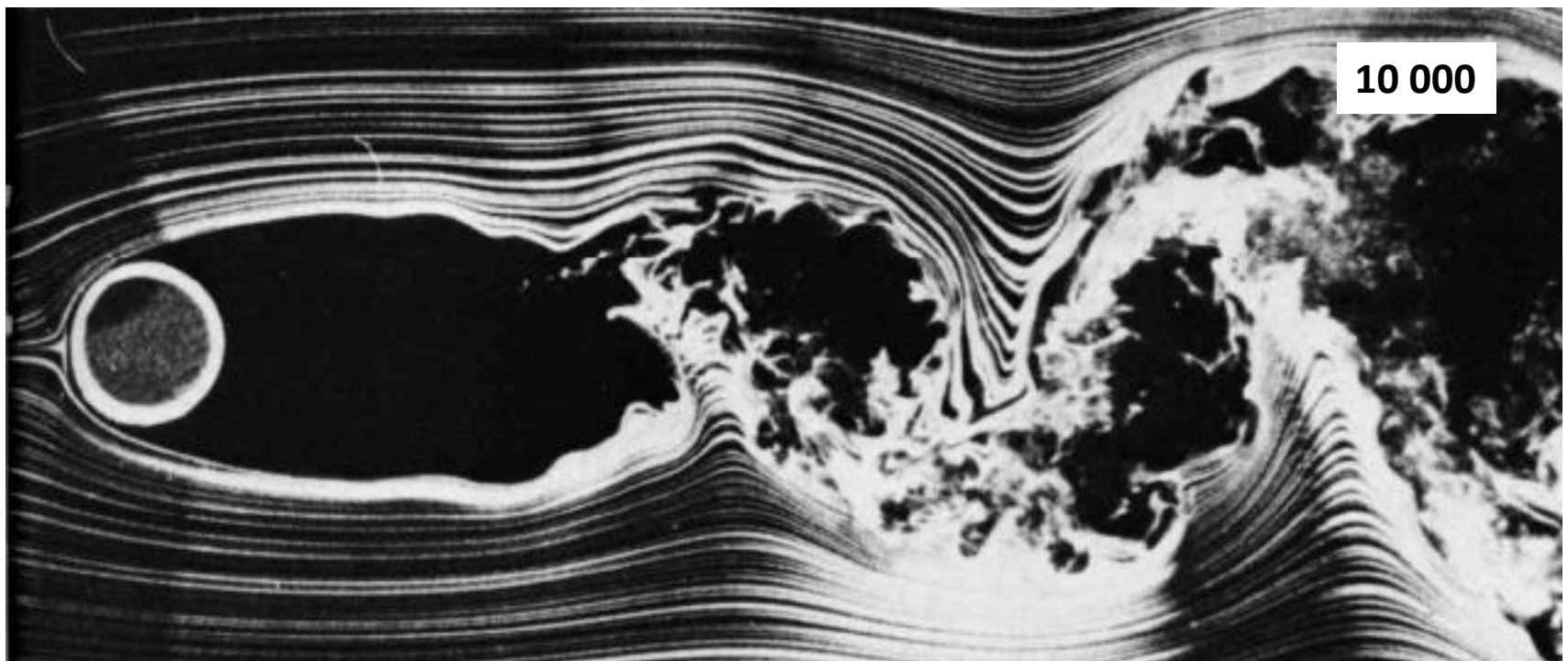
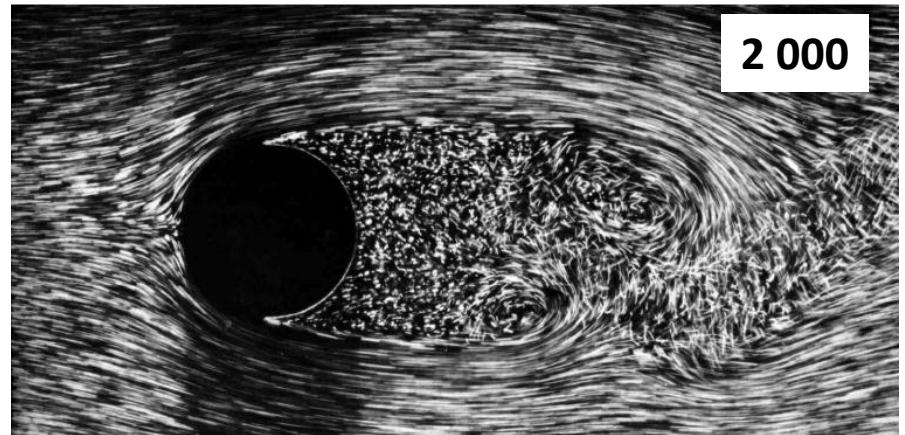
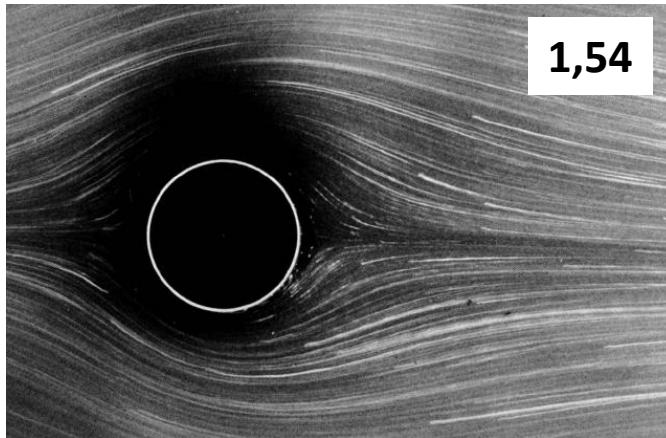
A $\text{Re} \gg 1$, les écoulements transitent vers des régimes turbulents, caractérisés par une complexité des structures spatiales/temporelles.



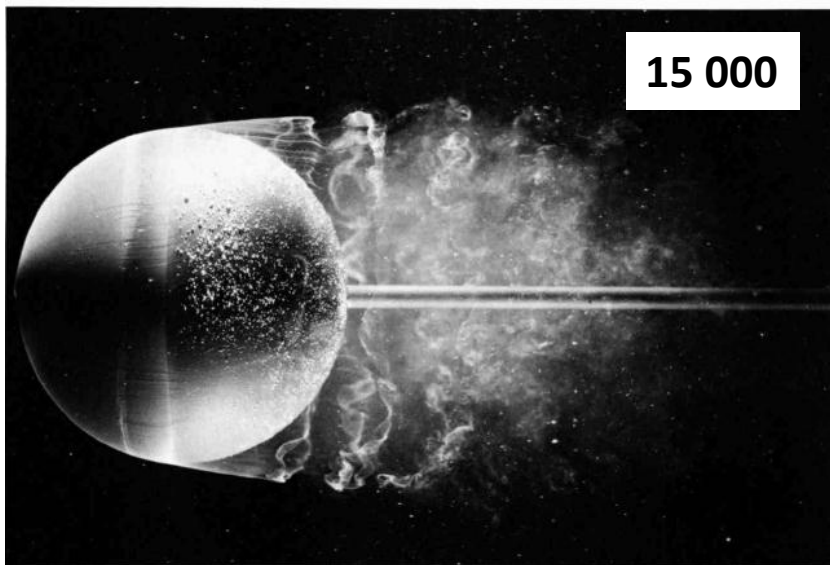
La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère



La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère



La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère



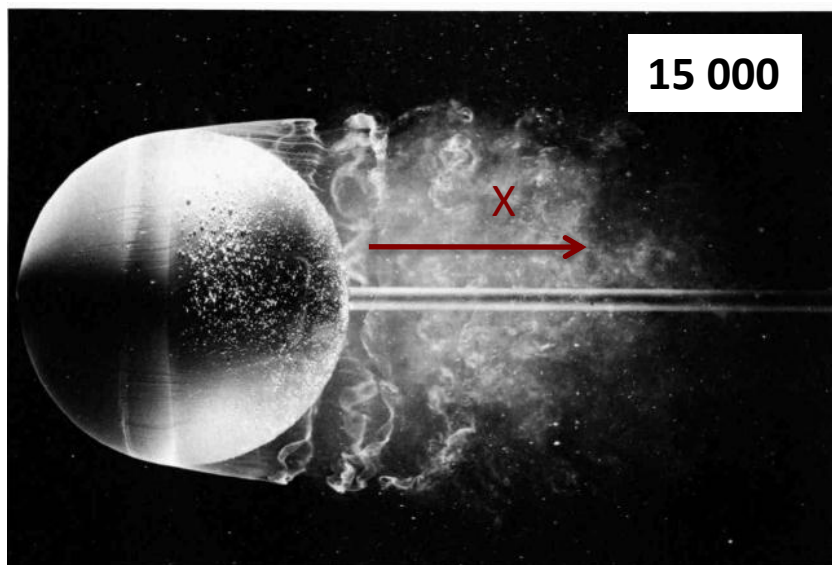
Écoulement instantané



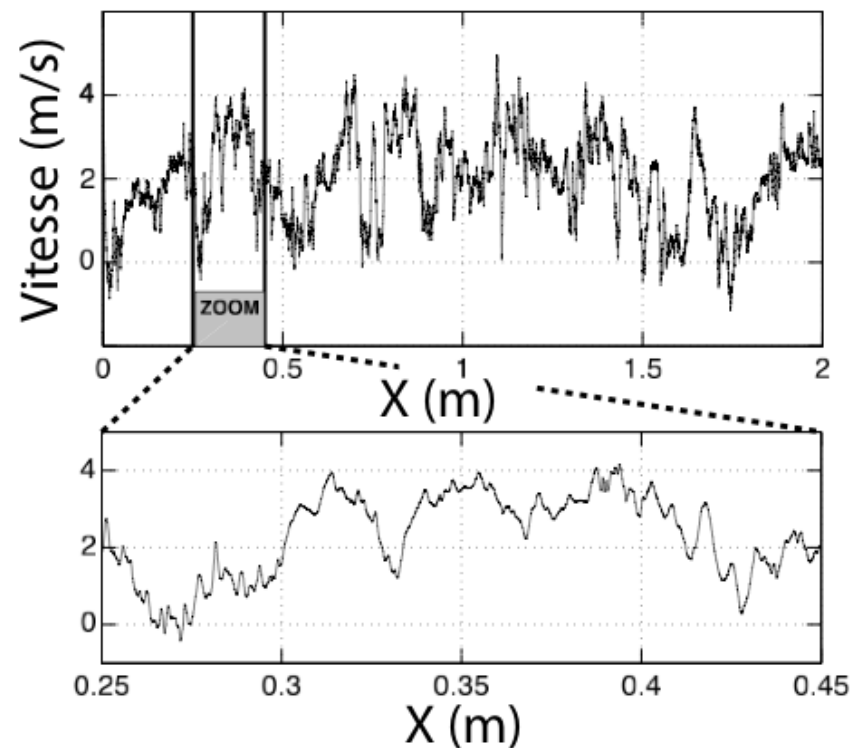
Écoulement « moyen »

La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère

Complexité spatiale des écoulements turbulents

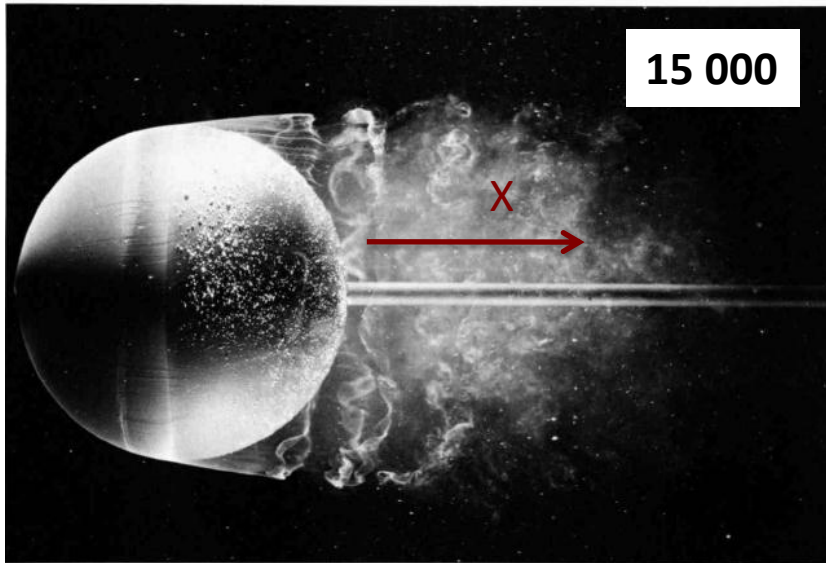


Écoulement instantané

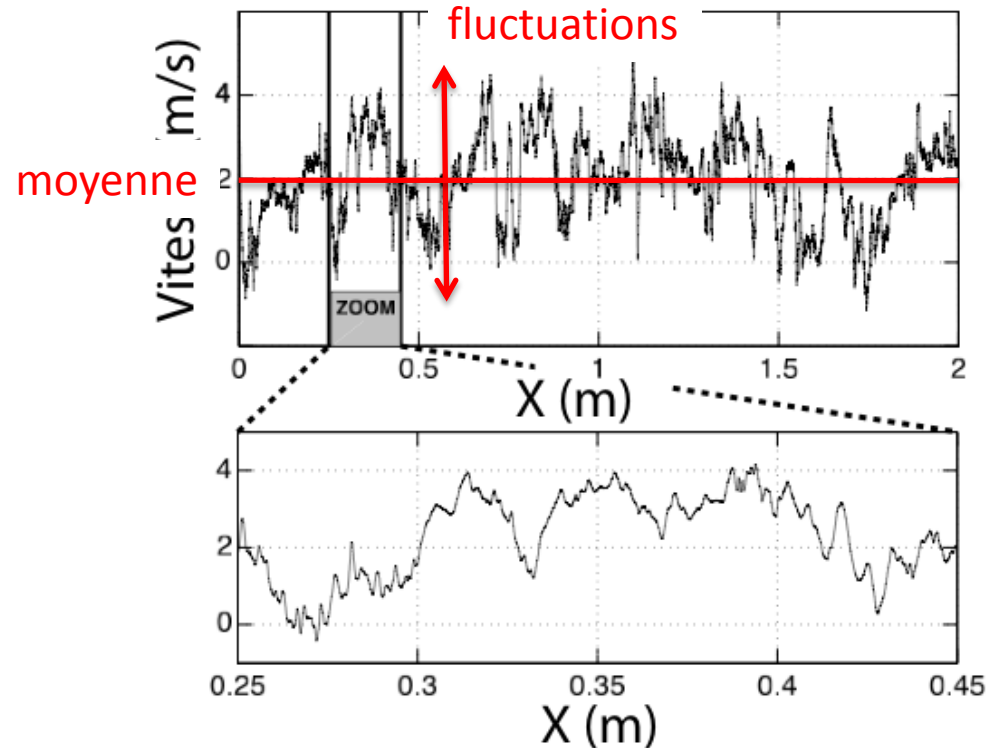


La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère

Complexité spatiale des écoulements turbulents



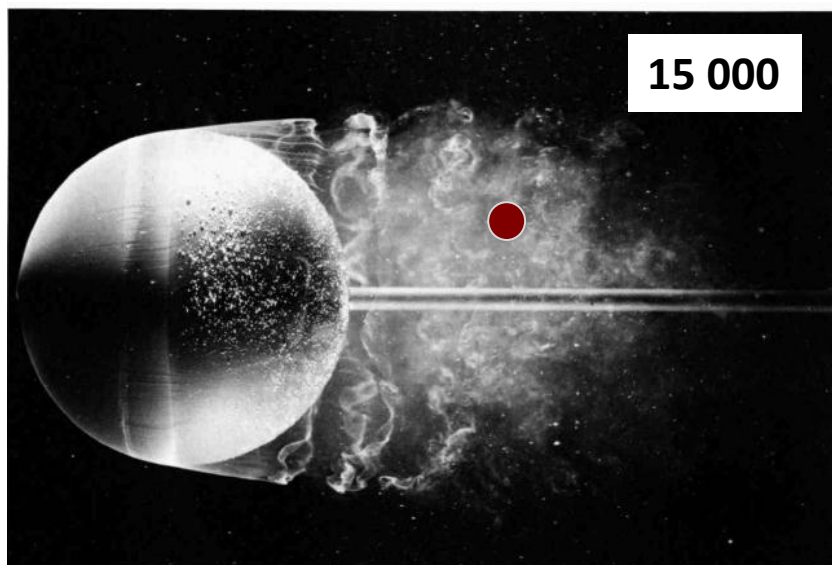
Écoulement instantané



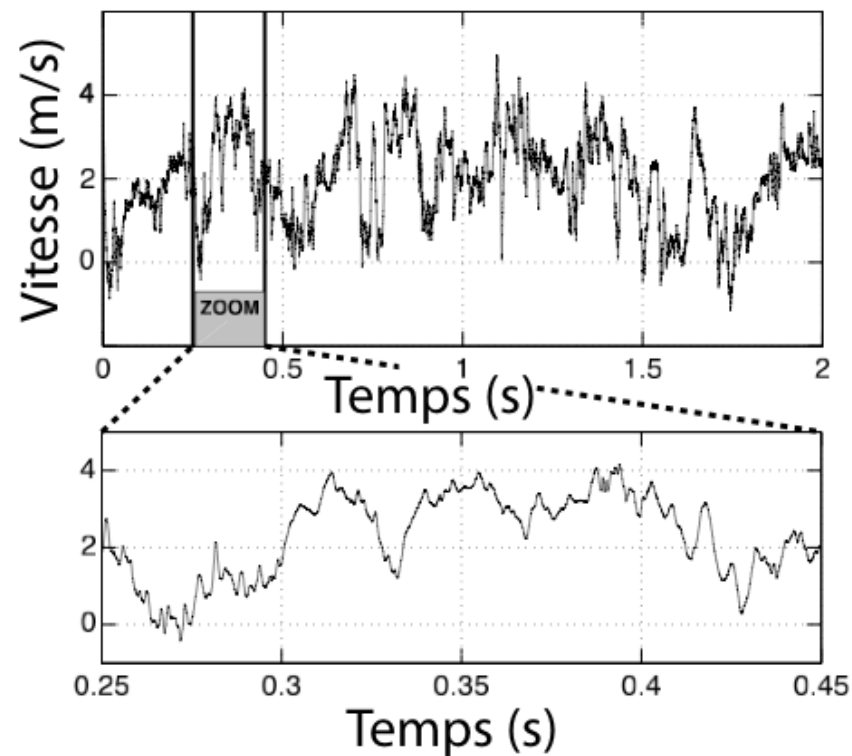
Forts taux de fluctuations possibles (dépend des détails de l'écoulement)
Fluctuations à toutes les échelles

La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère

Complexité temporelle des écoulements turbulents



Écoulement instantané



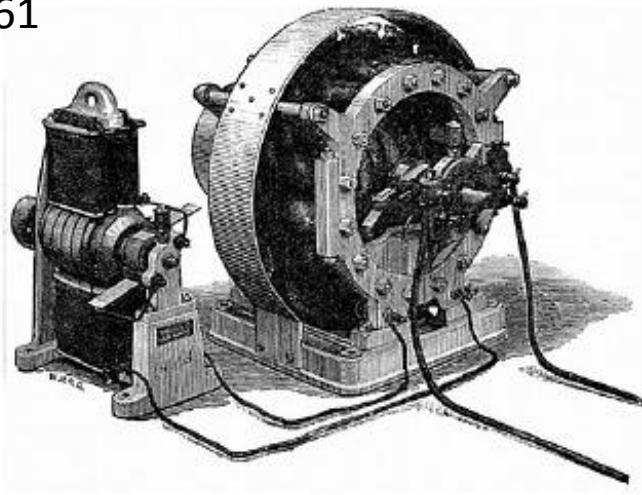
Reproduire
le champ magnétique de la Terre
en laboratoire

1861-2012

Les dynamos solides

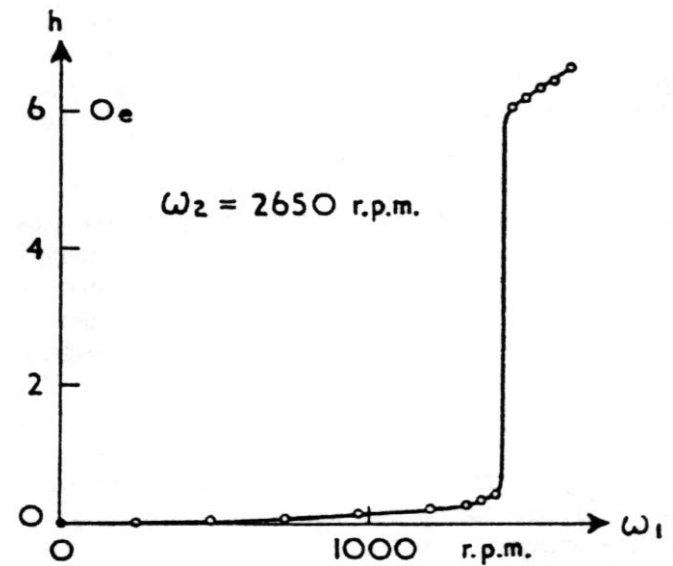
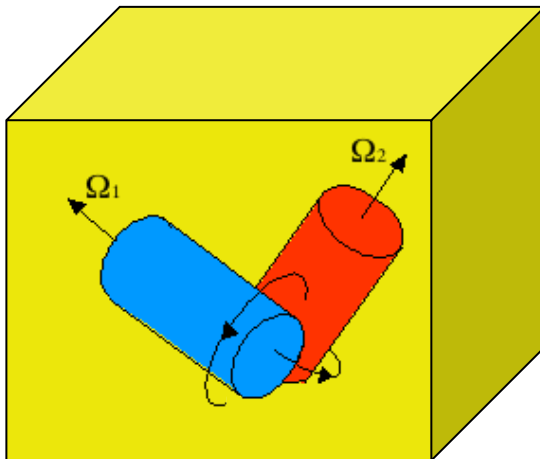
Bullard (1955)

Siemens 1861



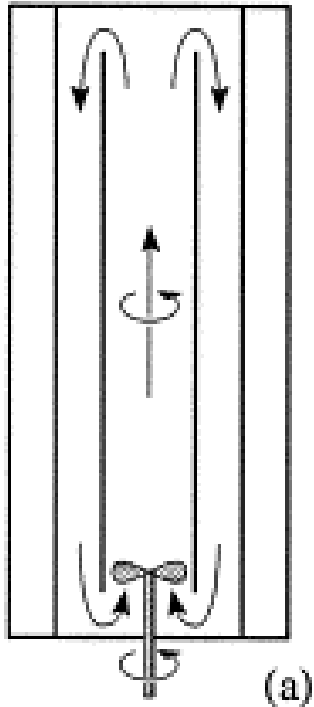
Circulation du courant contrainte dans des bobinages

Lowes & Wilkinson 1960's



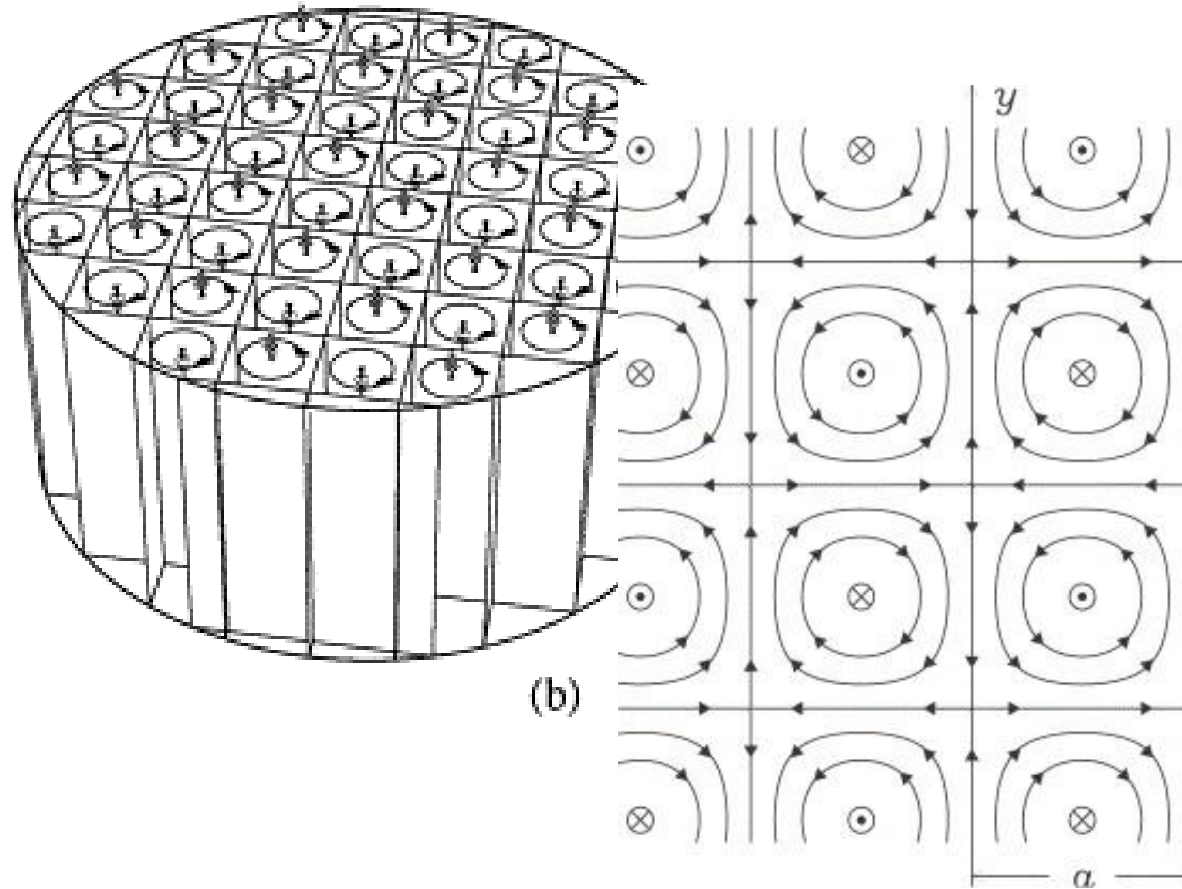
Les dynamos fluides

Écoulement de Ponomarenko
– la dynamo de Riga



Gailitis & Freiberg, *MHD*, 16 (1980)
Gailitis et al, *PRL*, 84, (2000)

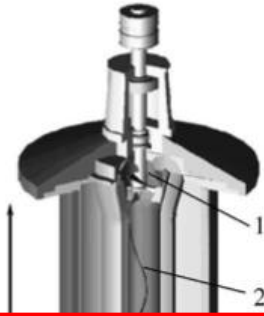
Écoulement de G.O. Roberts
– la dynamo de Karlsruhe



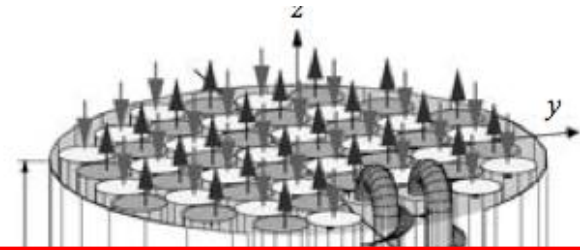
Stieglitz & Müller, *PoF*, 13 (2001)
Müller et al., *JFM*, 498 (2004)

Les dynamos fluides

Écoulement de Ponomarenko
– la dynamo de Riga



Écoulement de G.O. Roberts flow
– la dynamo de Karlsruhe



Solutions analytiques dynamos
pour un écoulement laminaire – sans fluctuations

Quelle analogie avec la situation géophysique?

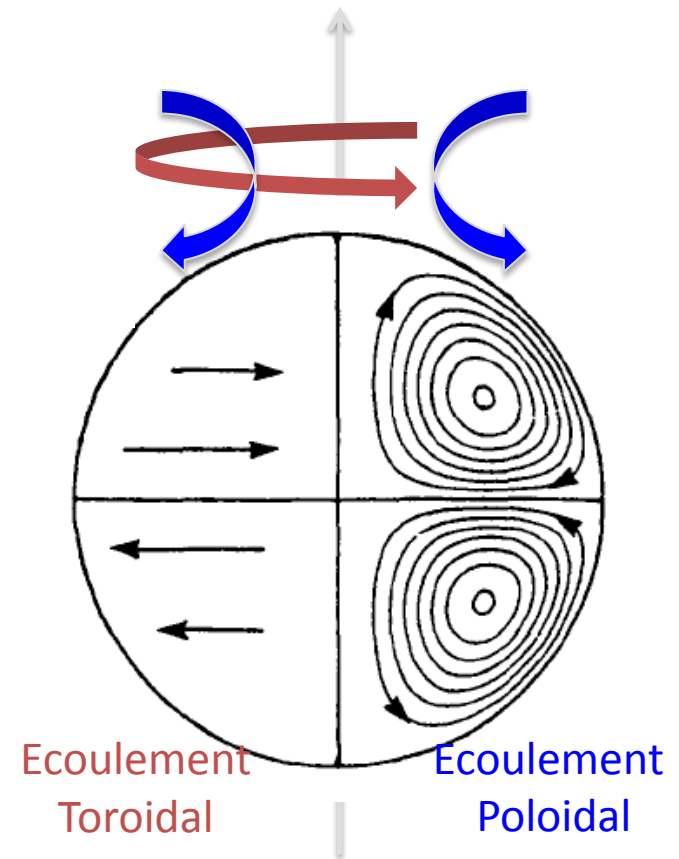
Gailitis & Freiberg, *MHD*, 16 (1980)
Gailitis et al, *PRL*, 84, (2000)

Stieglitz & Müller, *PoF*, 13 (2001)
Müller et al., *JFM*, 498 (2004)

A la recherche de dynamos dans des écoulement axisymétriques

Résolution numérique (en fixant u)

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

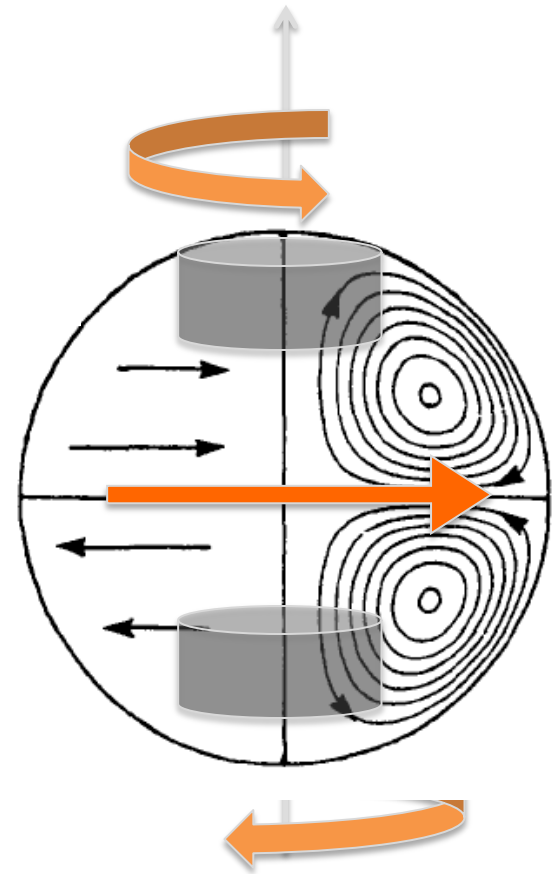


A la recherche de dynamos dans des écoulement axisymétriques

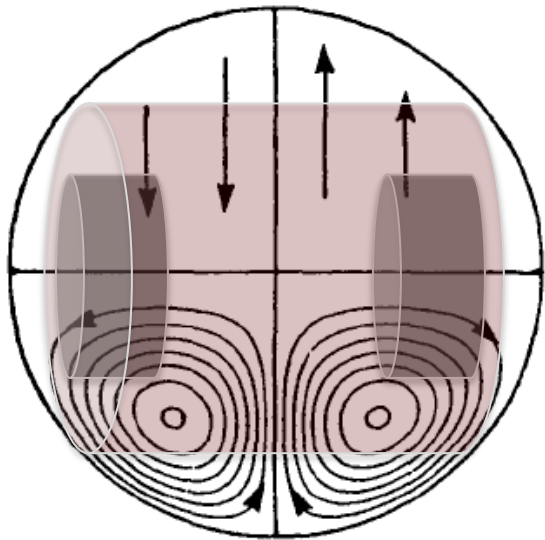
Résolution numérique (en fixant u)

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

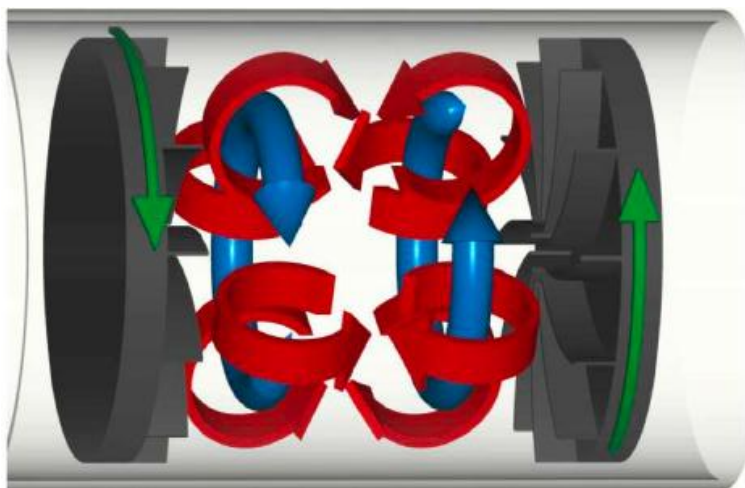
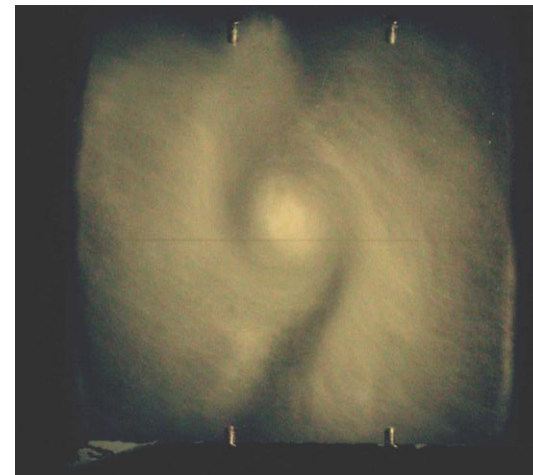
Mode propre
le plus instable



L'écoulement von-Karman



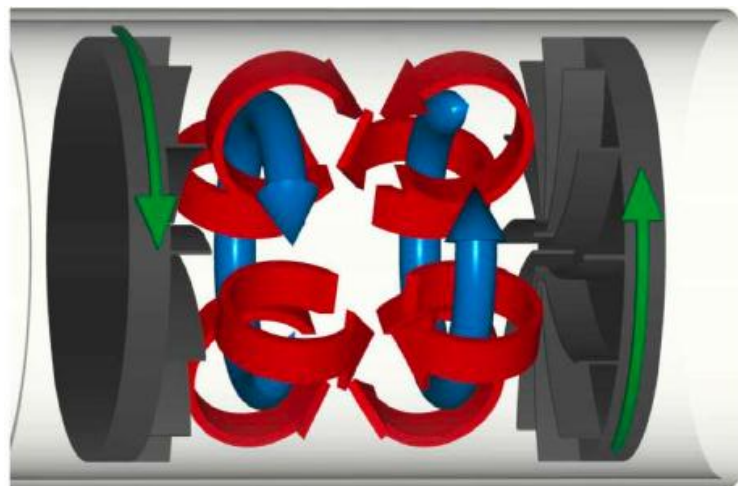
$$\langle u \rangle_{1/F}$$



$$\langle u \rangle_{1/25F}$$



L'écoulement von-Karman



160 L de Sodium Liquide ($L = 0.6 \text{ m}$)

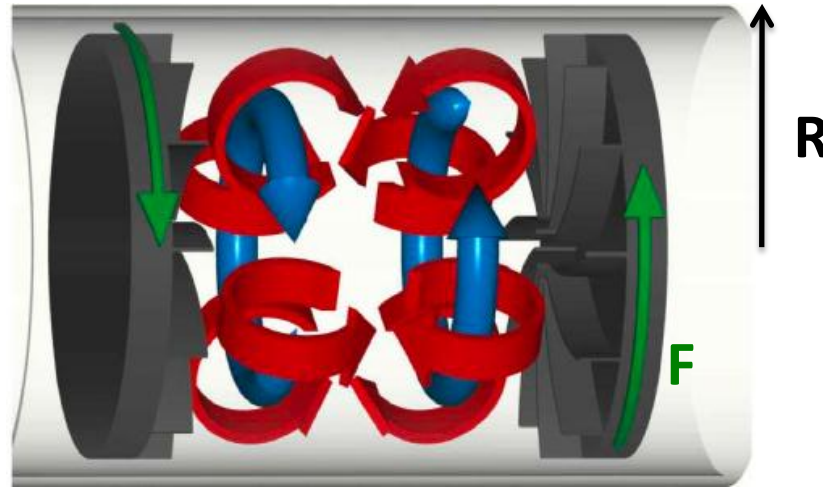
$F = [0; 30 \text{ Hz}] - V_{\text{pale}}^{\text{max}} = 28 \text{ ms}^{-1}$

$Re^{\text{max}} = 10^6 ; Rm^{\text{max}} = 80$

Température = 120°C

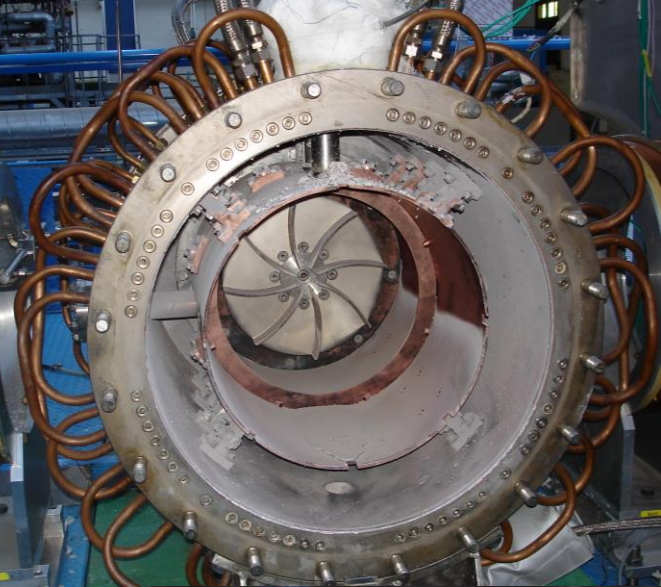
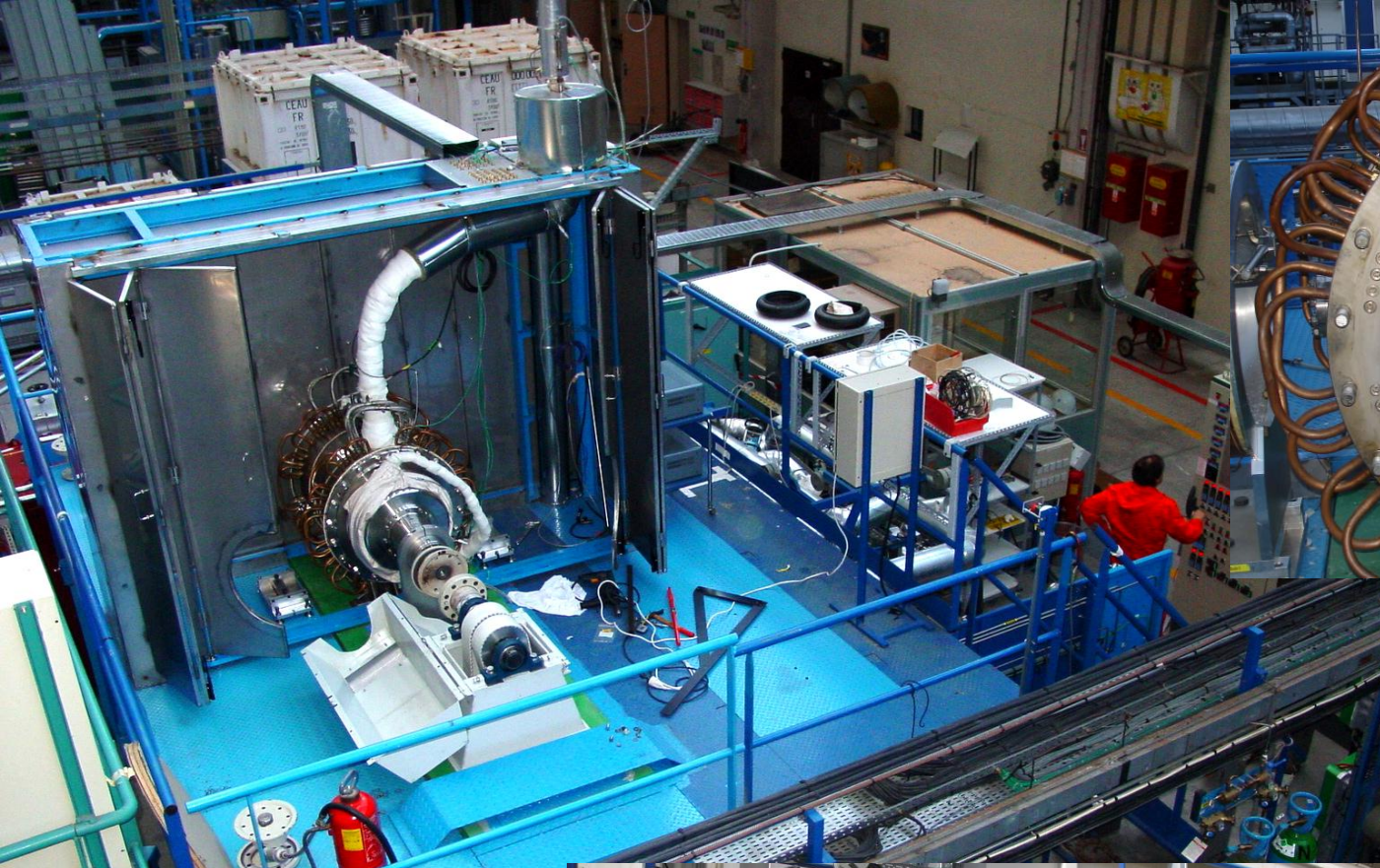
$P = 300 \text{ kW}$ – refroidissement ($300 \text{ kW} = +30^\circ\text{C}$ en 15s)

L'écoulement von-Karman

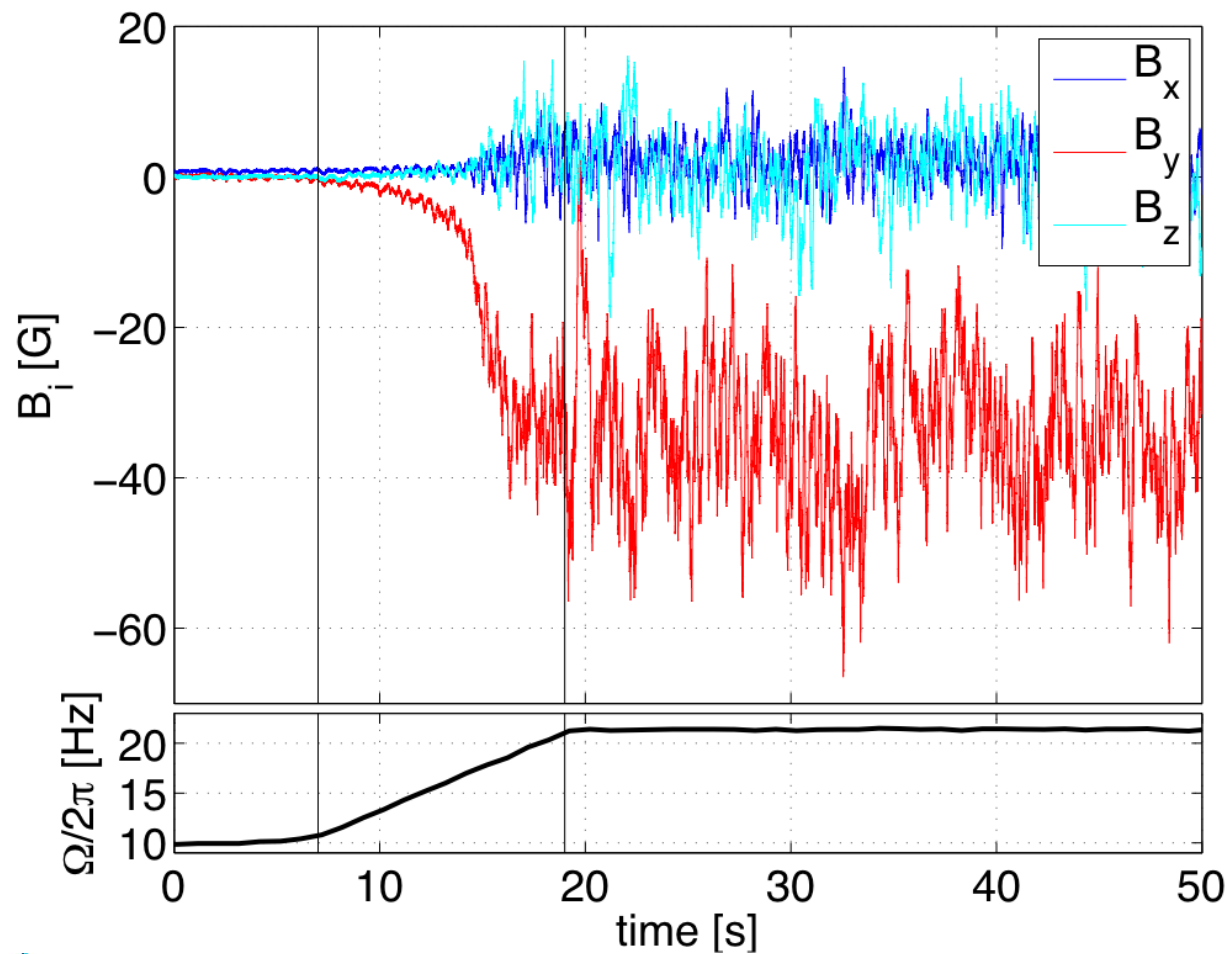
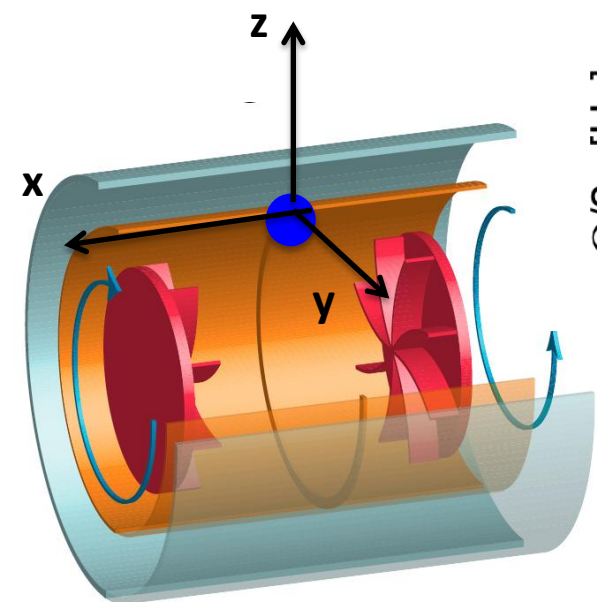


$$Rm = \frac{\|\nabla \times (u \times B)\|}{\|1/\mu\sigma\Delta B\|} = \mu\sigma LU = \mu\sigma 2\pi F R^2$$

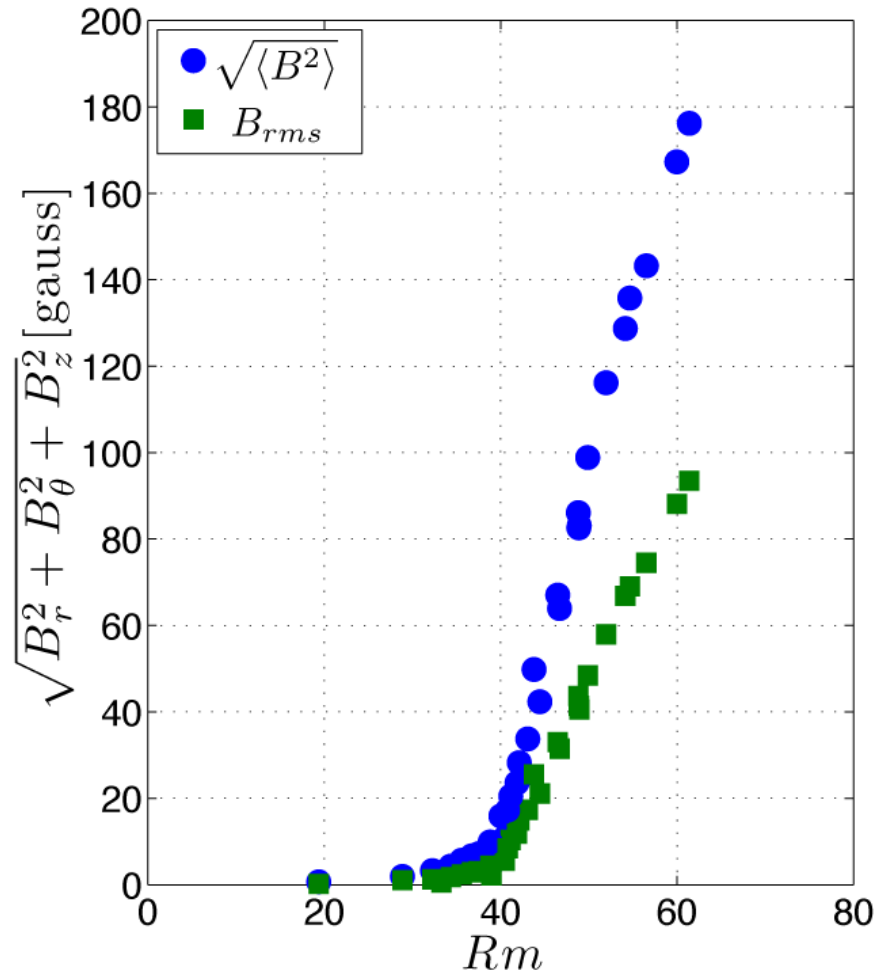
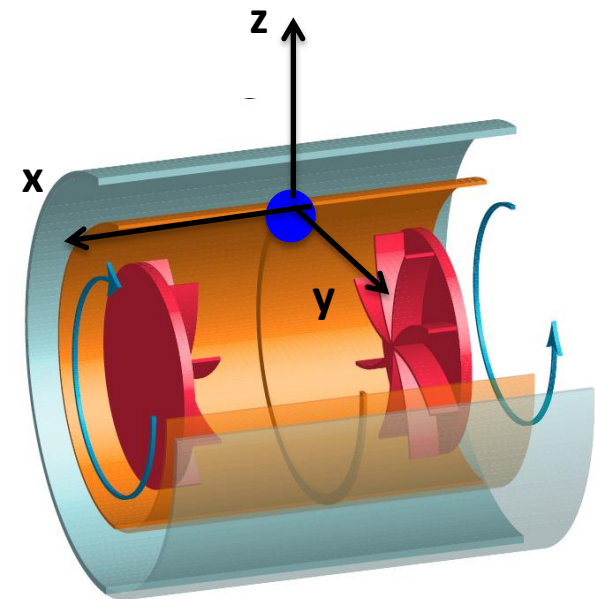
Le paramètre de contrôle Rm est proportionnel à la fréquence de rotation des disques



La dynamo VKS

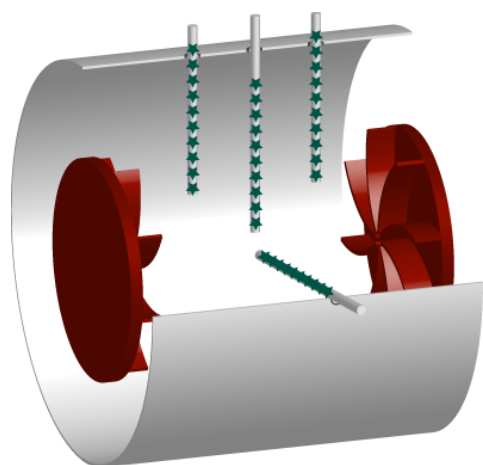


La dynamo VKS

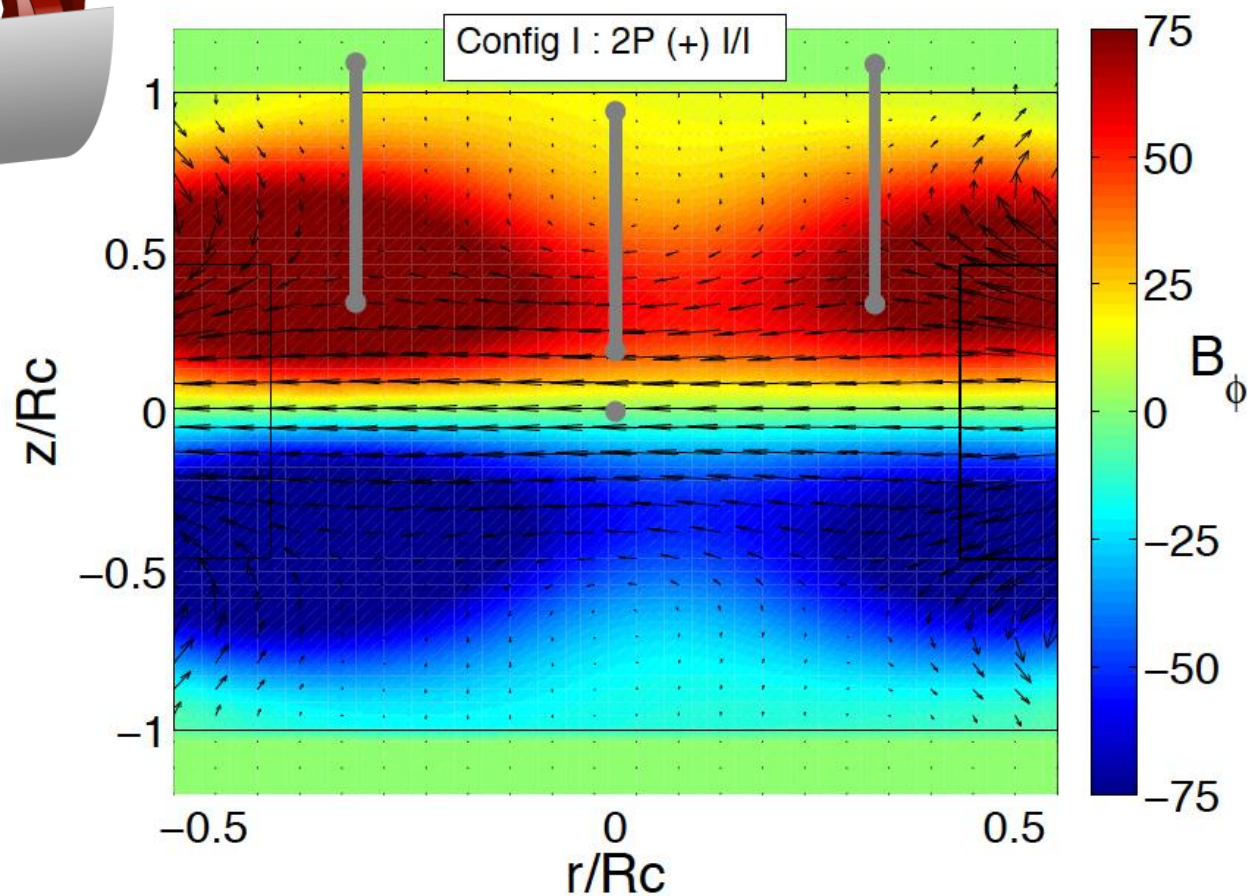


Monchaux et al., PRL, **98** (2007)

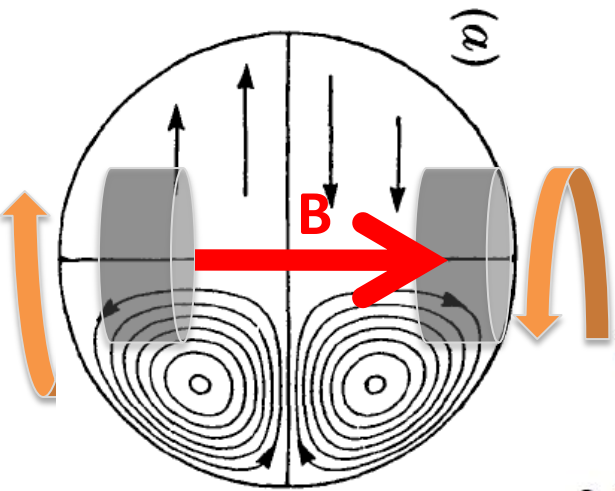
Reconstruction du champ magnétique



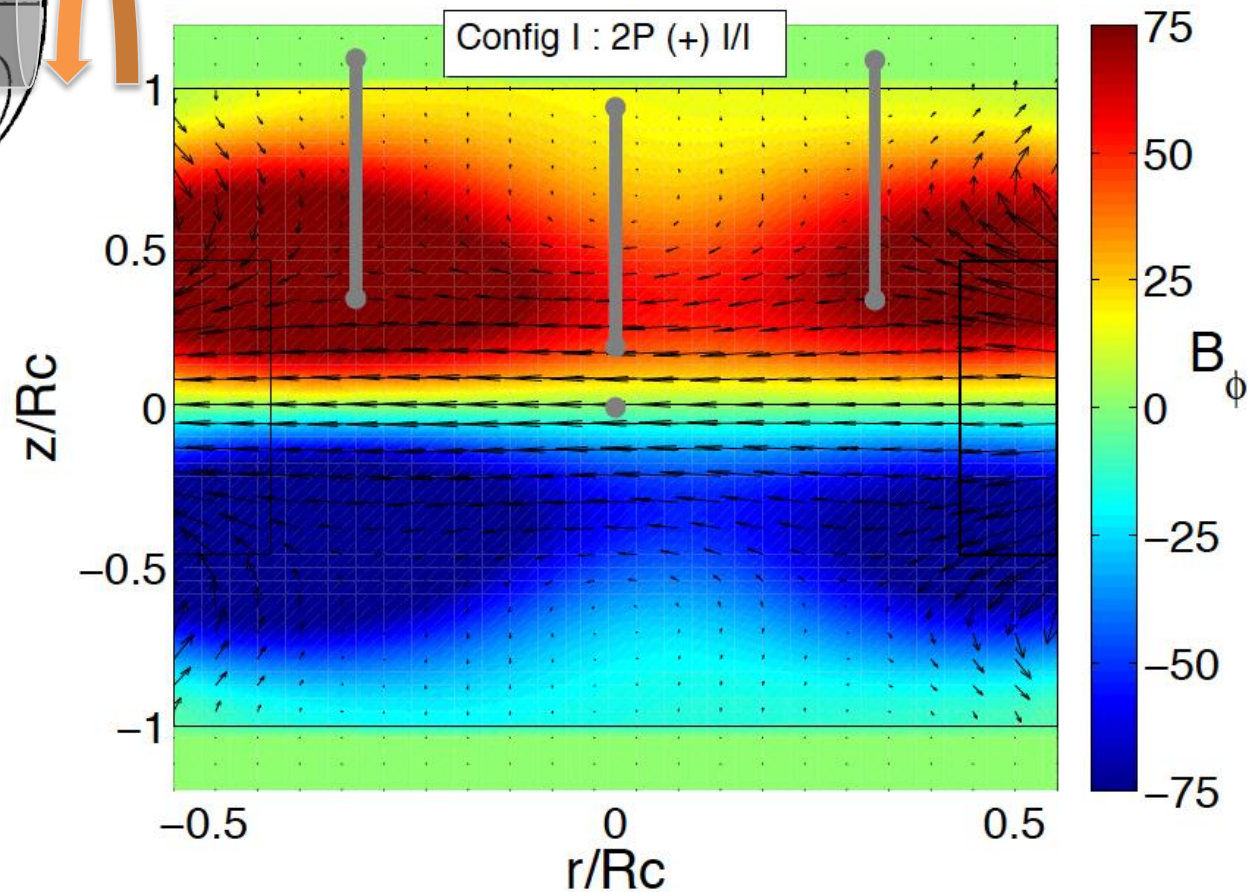
Reconstruction à partir de 4 réseaux de 10 sondes magnétiques



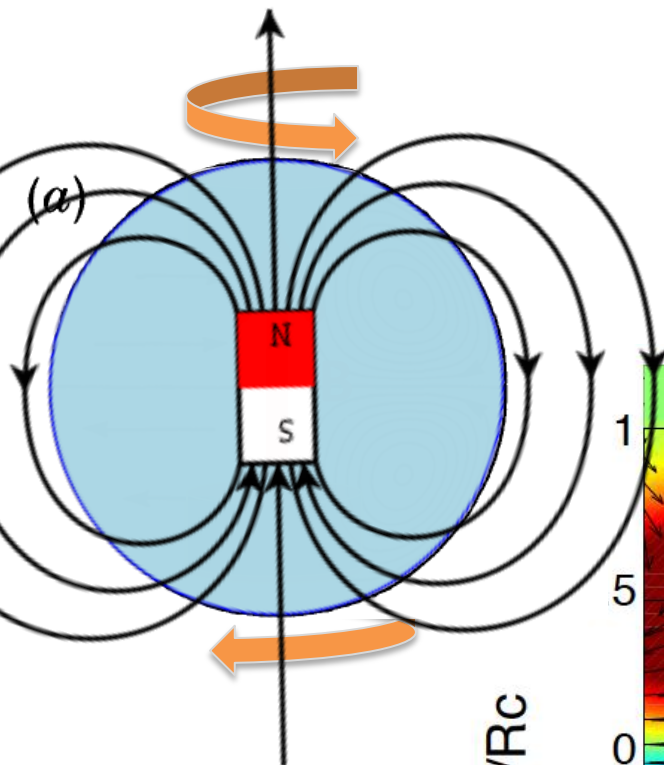
Reconstruction du champ magnétique



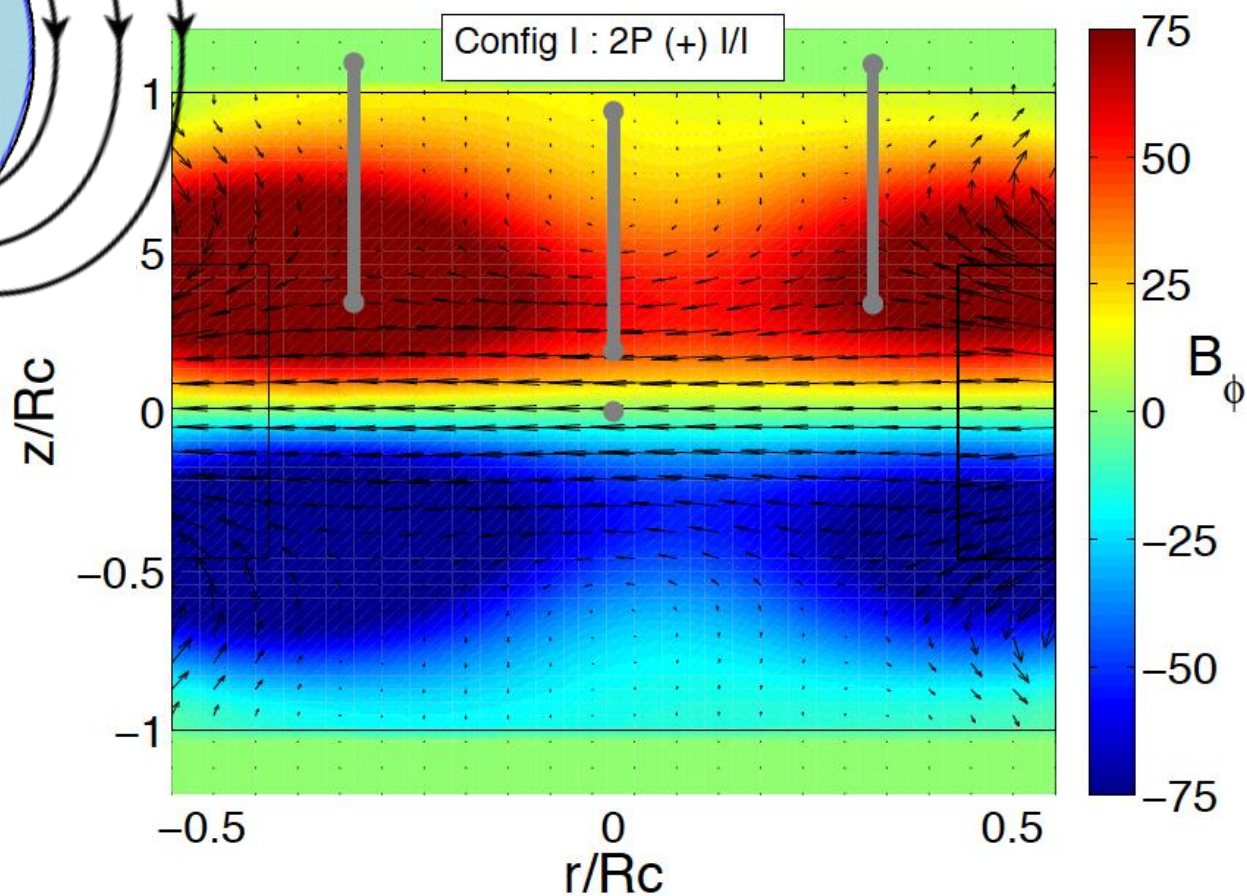
Le champ magnétique a la géométrie
d'un dipôle axial



Reconstruction du champ magnétique



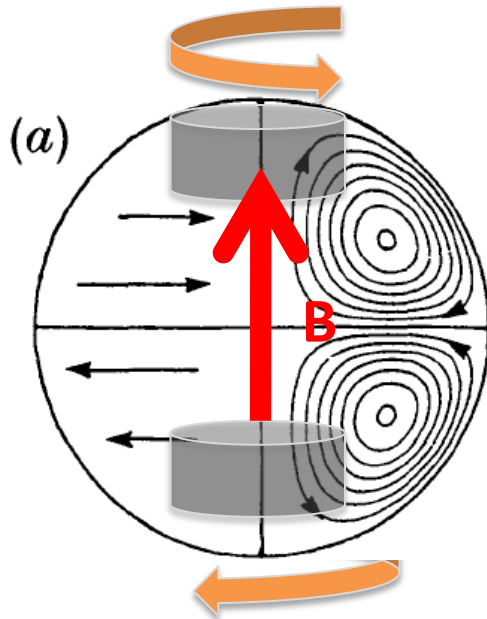
Le champ magnétique a la géométrie d'un dipôle axial



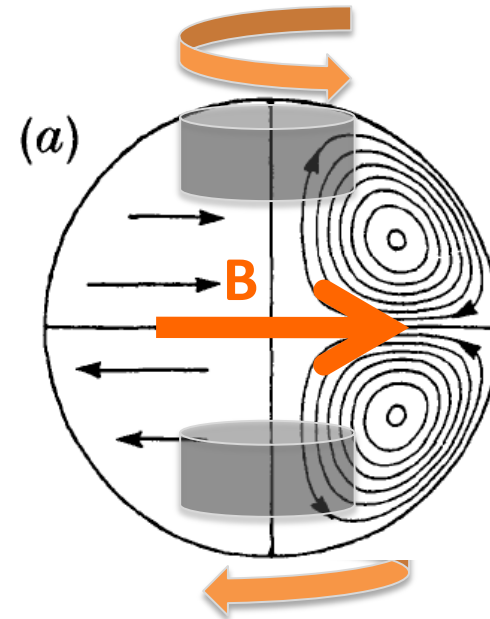
Reconstruction du champ magnétique

Le champ magnétique a la géométrie
d'un dipôle axial

Généré par un écoulement turbulent
(moyenne + fluctuations)

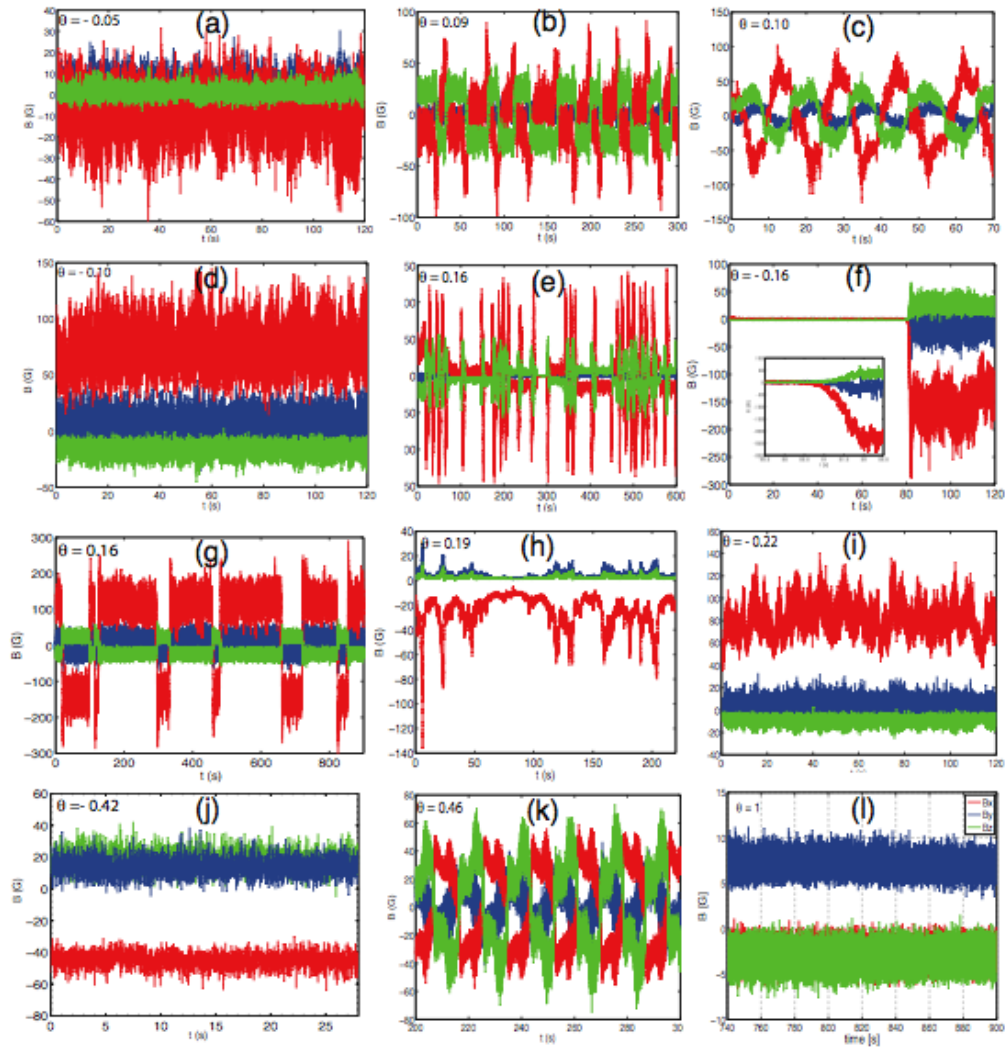


L'écoulement moyen génère
un dipôle transverse

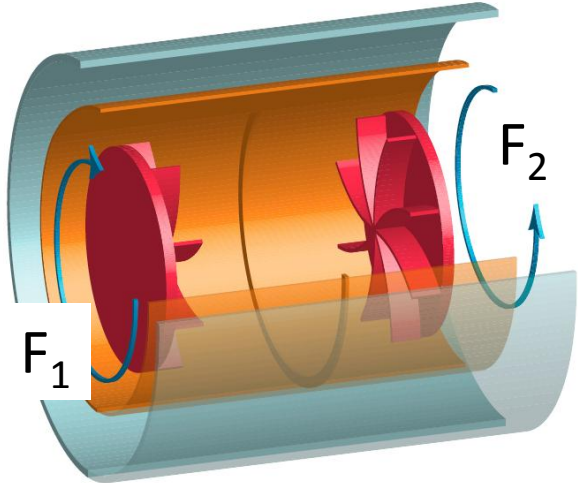
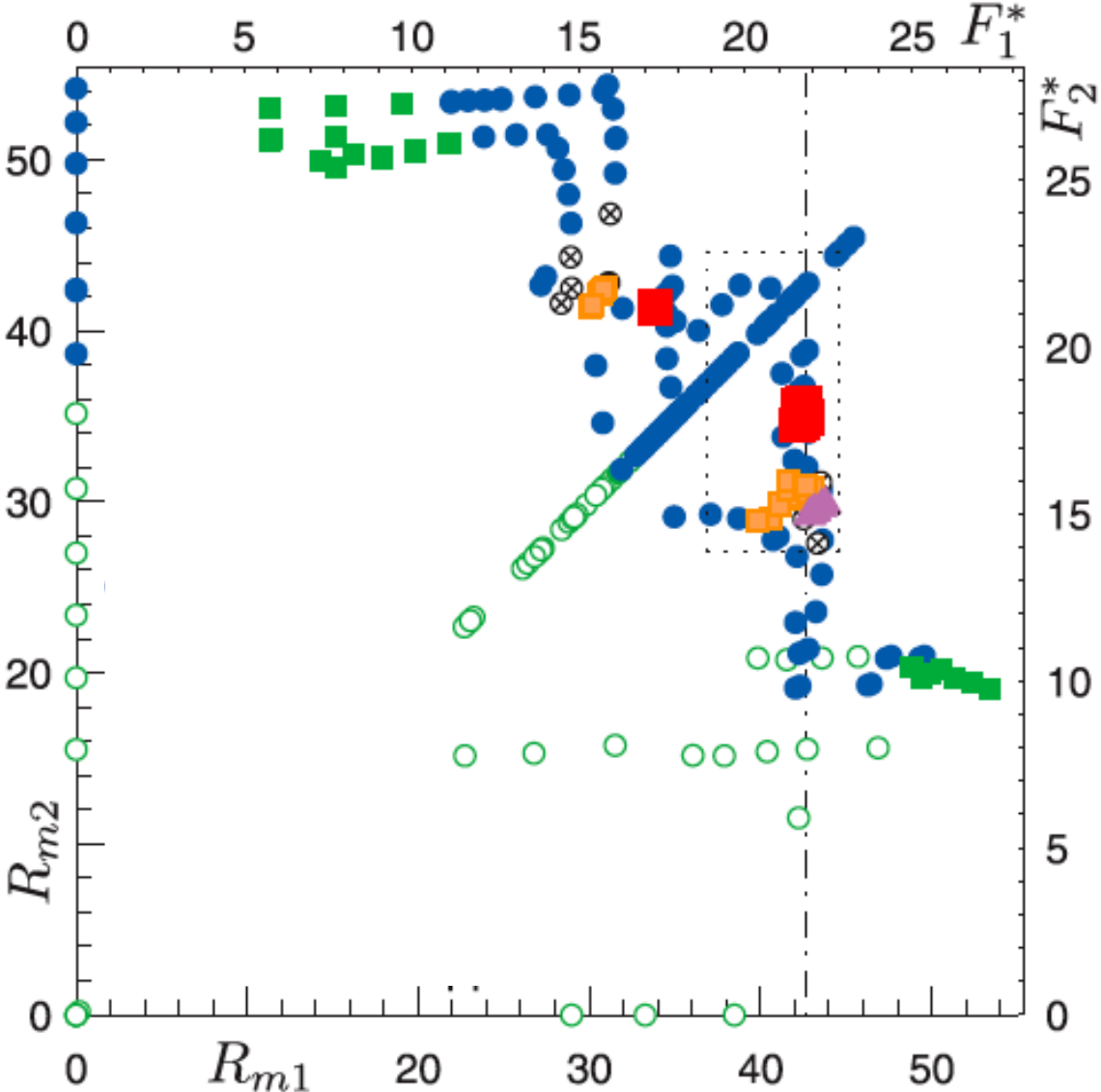


Importance de la turbulence
et des fluctuations

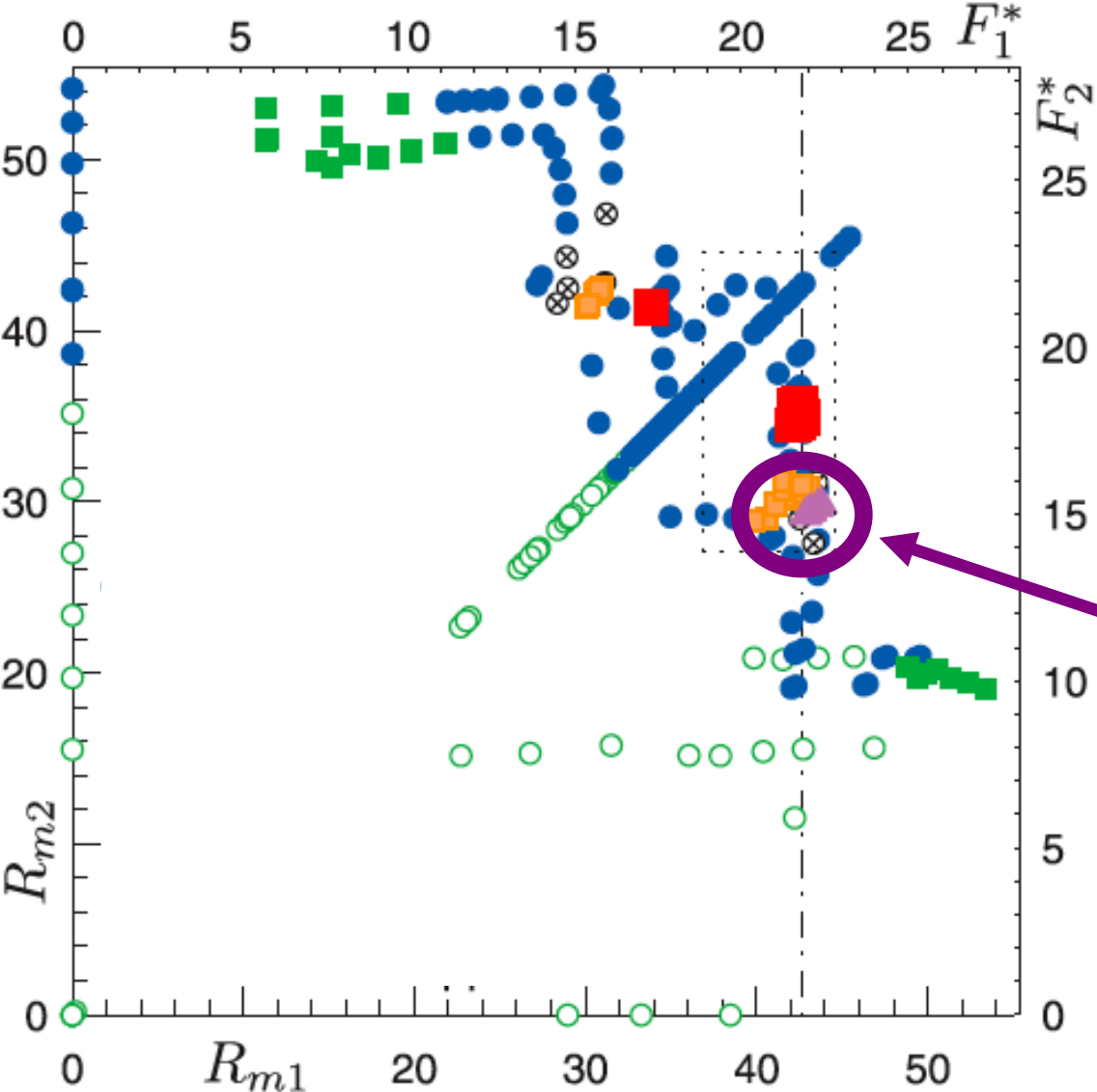
Au delà de la dynamo stationnaire



Espace des paramètres

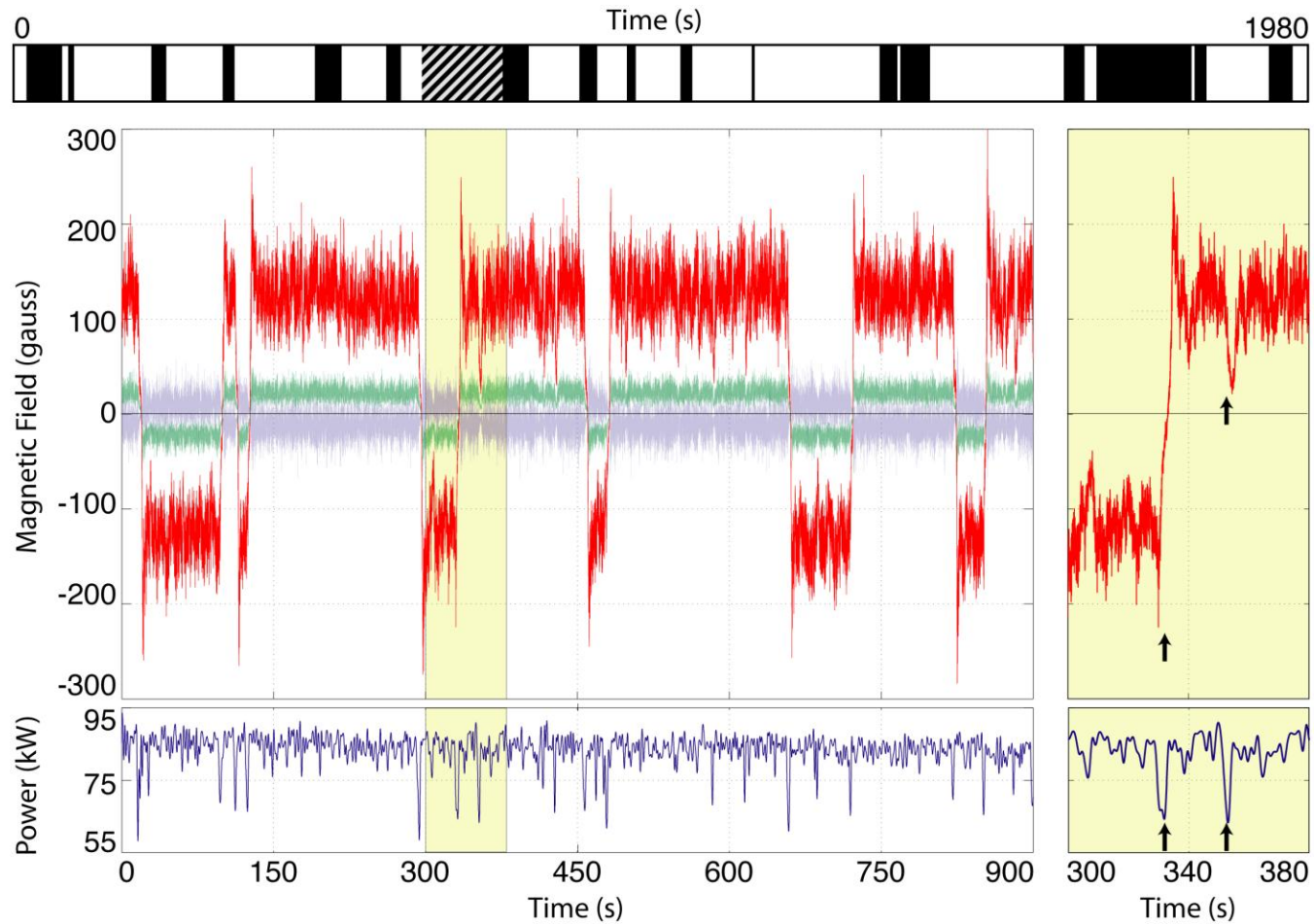


Espace des paramètres



Renversements,
Bursts...

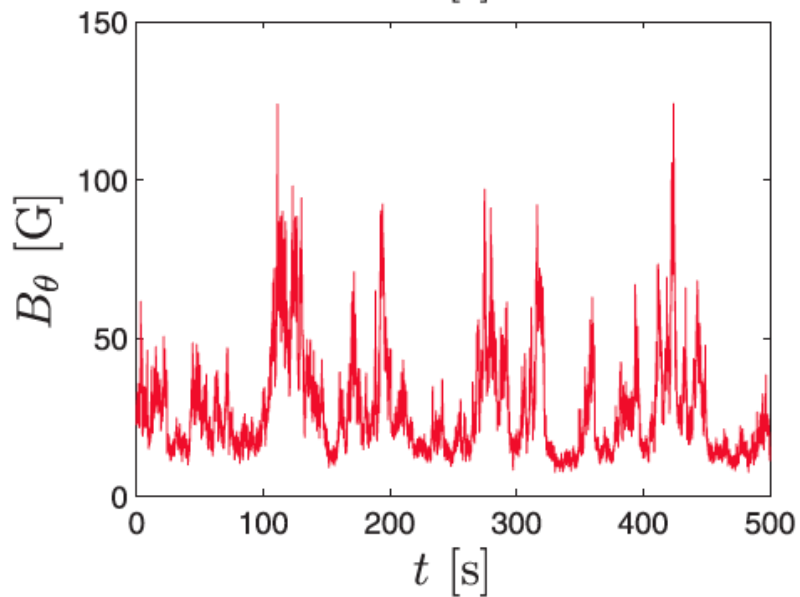
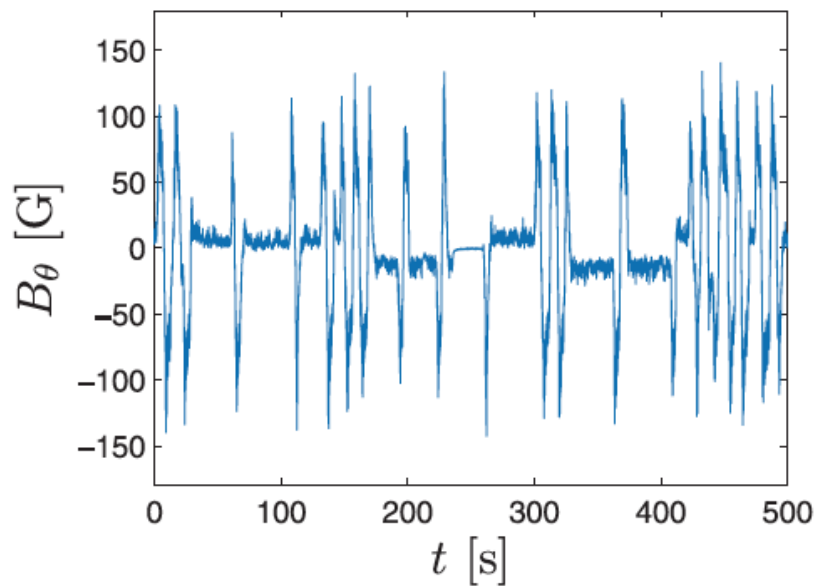
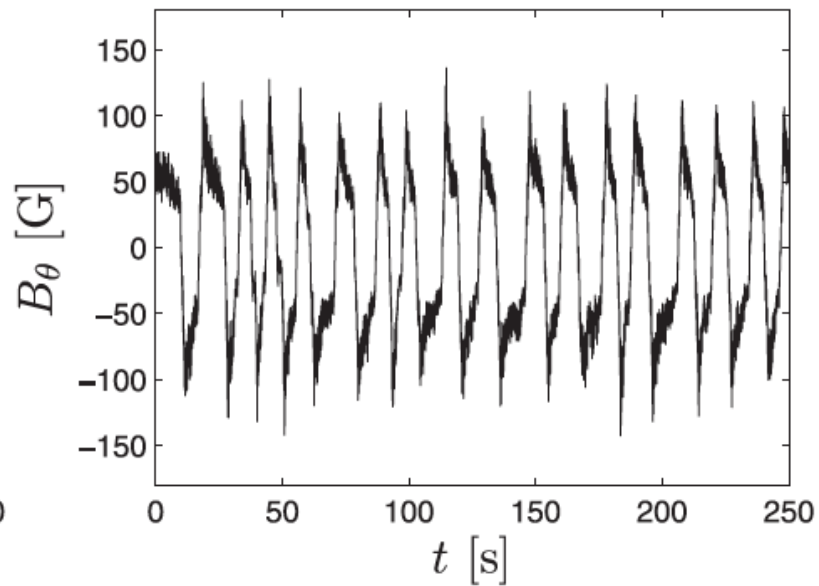
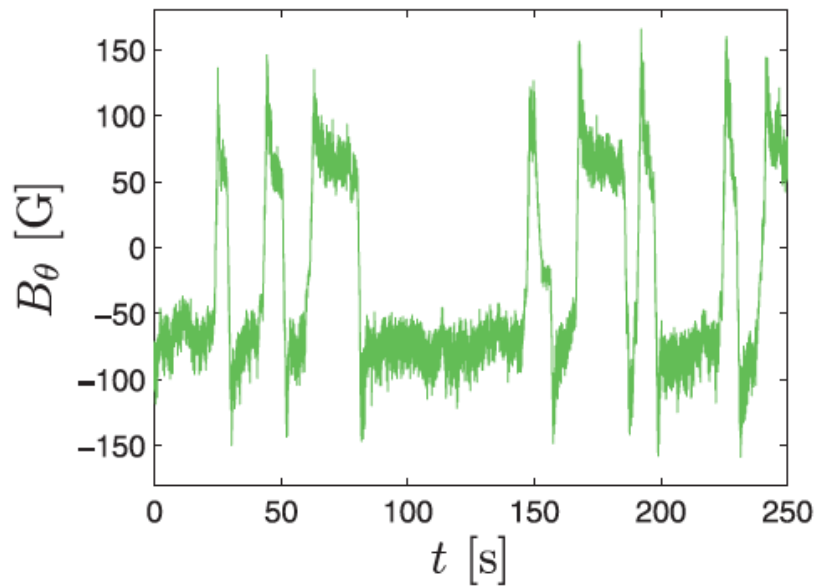
Renversements du dipôle axial



$$T_l = 1/F \approx 0.05 \text{ s}$$

$$T_d = \mu\sigma L^2 \approx 1 \text{ s}$$

Renversements, oscillations, bursts...



Conclusions

Omniprésence du champ magnétique dans les corps astrophysiques (Terre, planètes, Soleil)

L'origine de ces champs magnétiques n'est pas totalement comprise

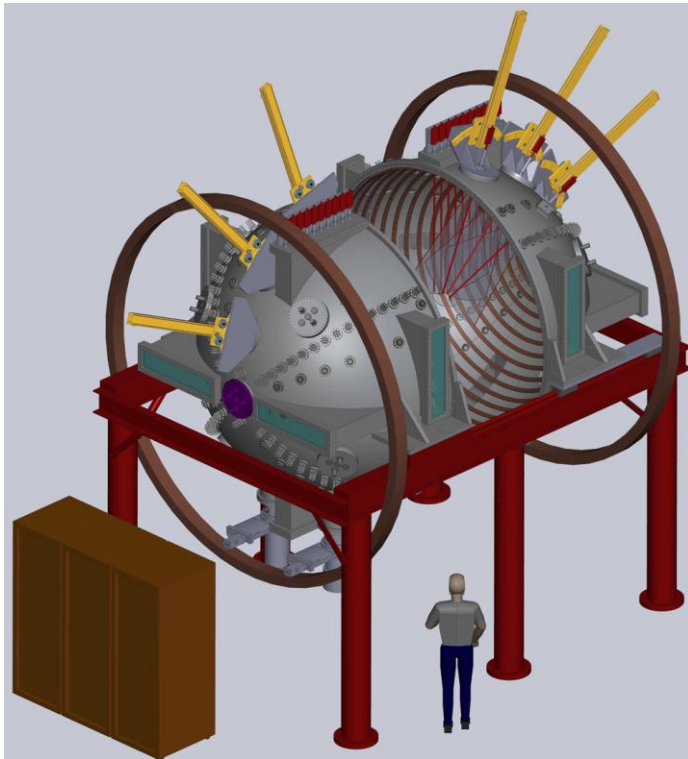
Observation de l'instabilité dynamo dans des expériences en sodium liquide

Observation d'une dynamo turbulente axisymétrique (géométrie similaire au champ terrestre)

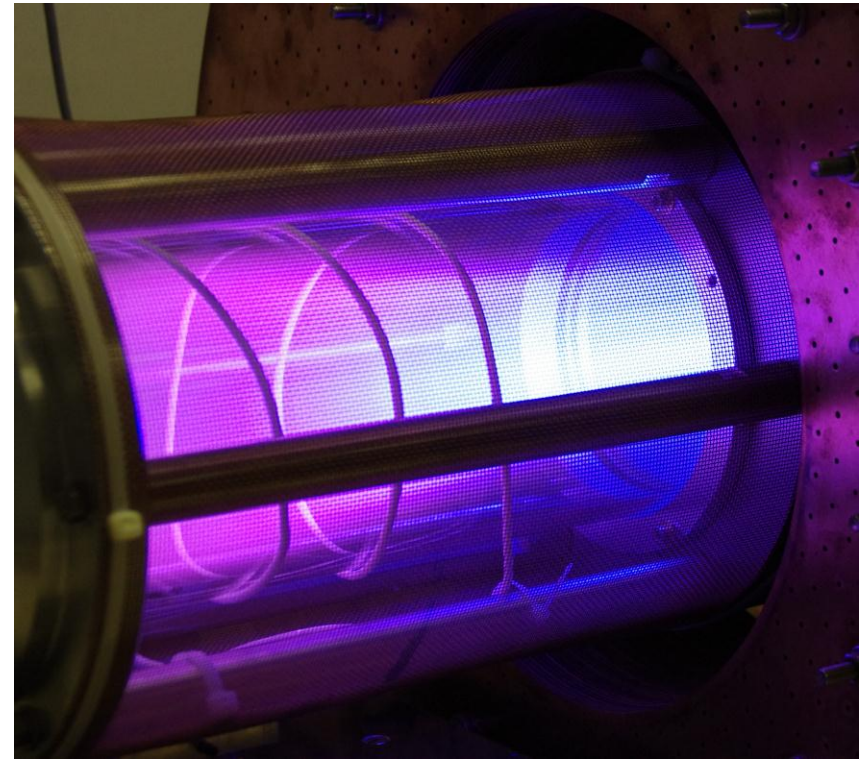
Existence de renversements similaires à ceux de la Terre
Diversité des régimes dynamiques observés

Et le futur?

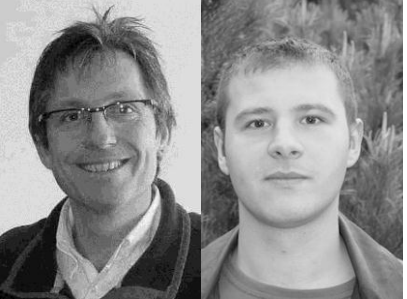
Expériences dynamos en gaz ionisé (plasma)



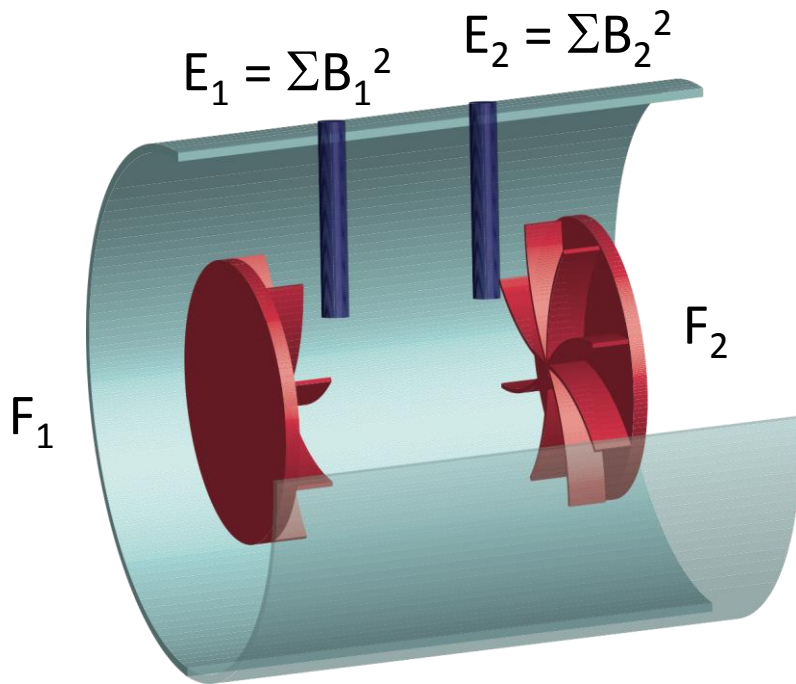
Expérience Dynamo Plasma
(C. Forest, UW Madison)



Plasma d'Argon
(N. Plihon, ENS Lyon)

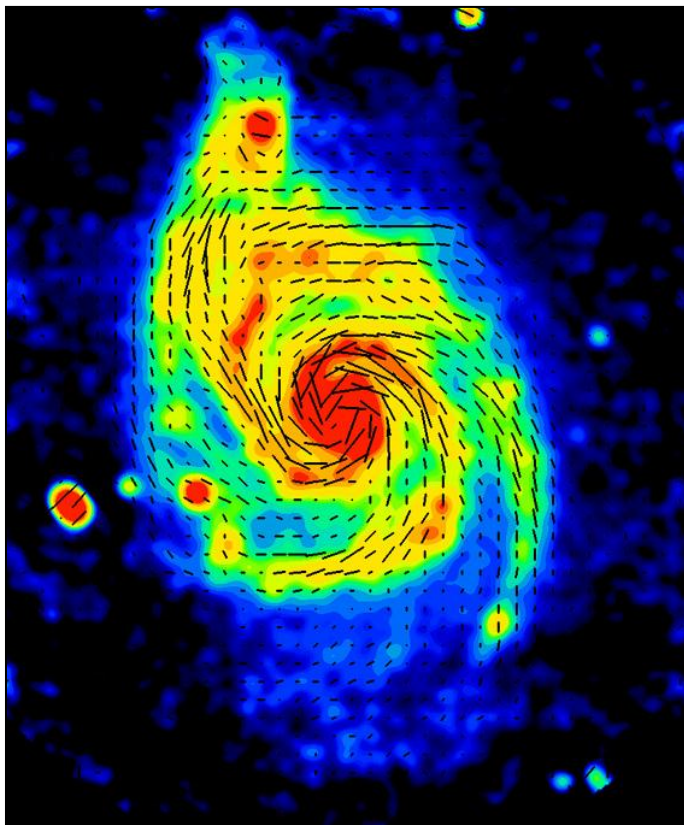


Von-Karman Sodium stationary dynamos as
Two interacting modes
Energy localization and symmetry breaking

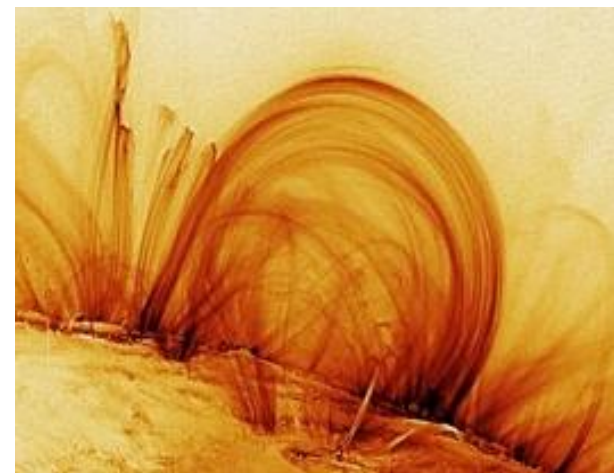


$E_1/(E_1+E_2)$ as a function of
 $\Theta = (F_1-F_2)/(F_1+F_2)$

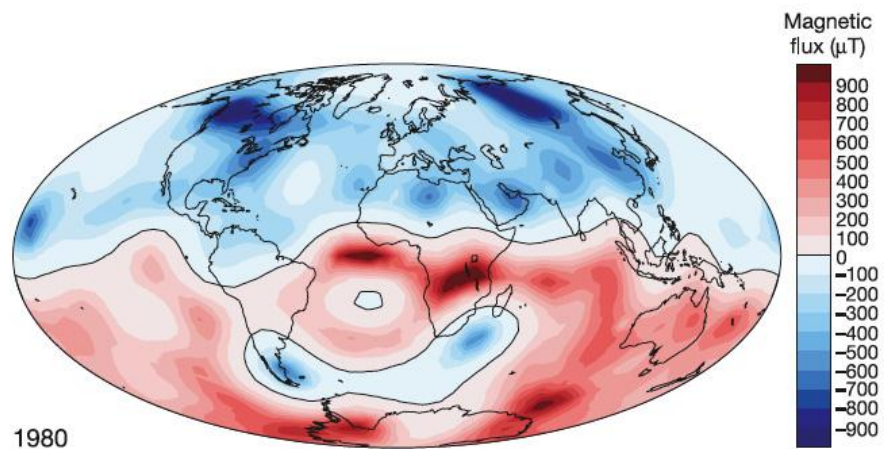
Champs magnétiques dans l'univers



M 51 – émission radio & champ B



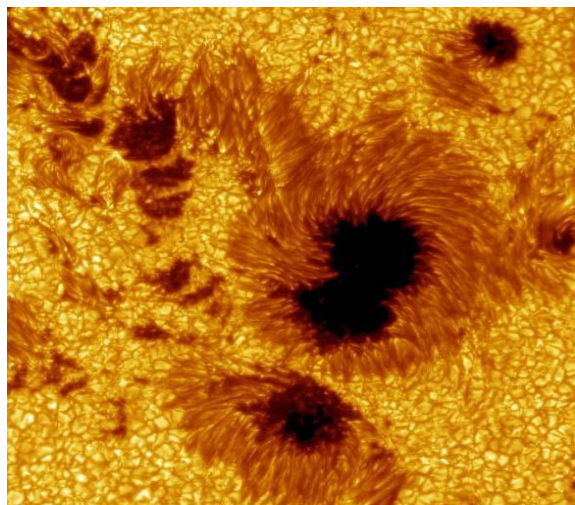
Boucle coronale solaire



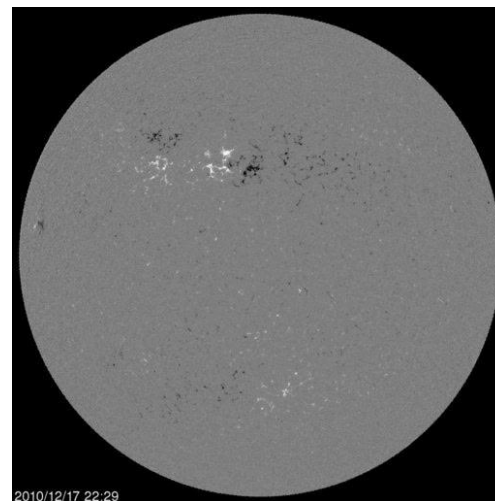
La Terre (1980)

L'activité magnétique du Soleil

Taches solaires

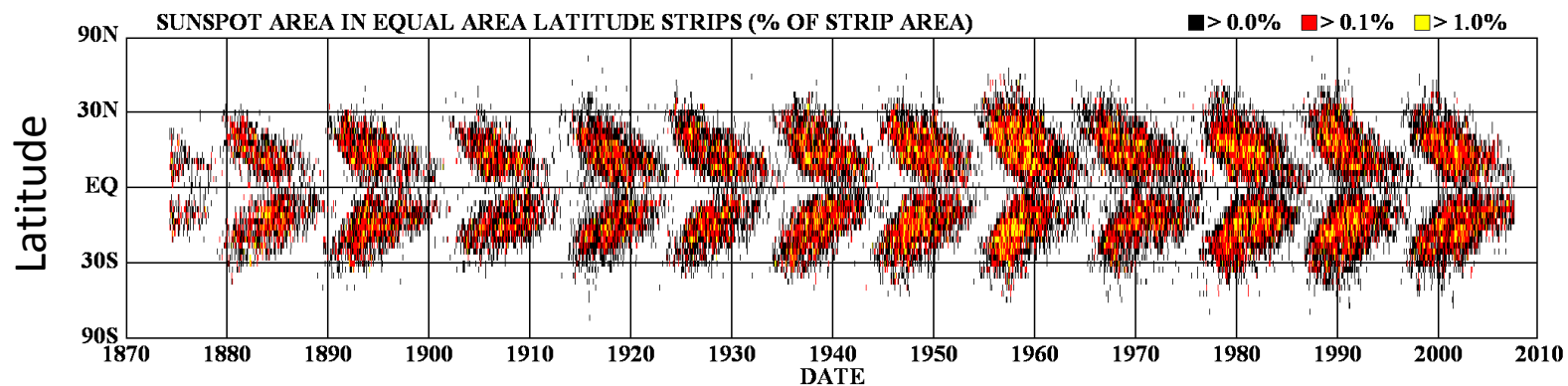


de la dynamique journalière...

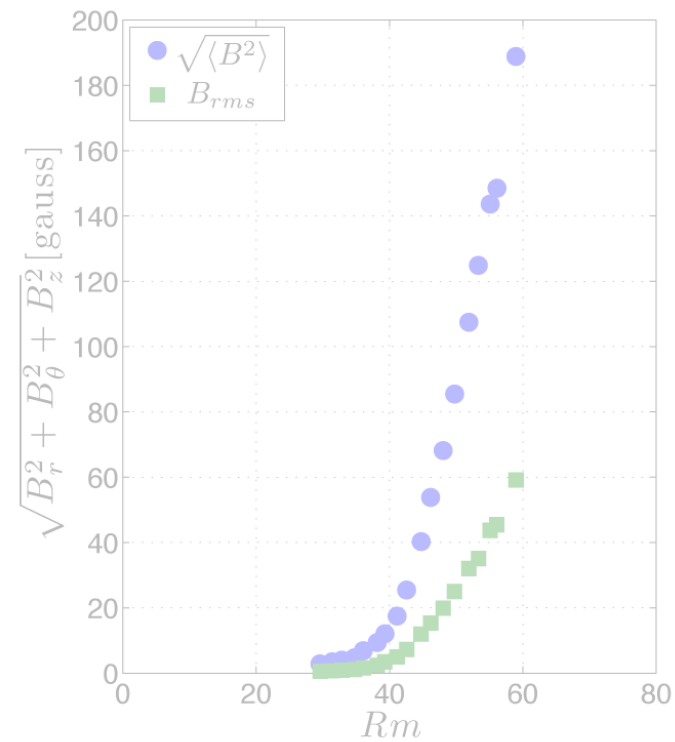
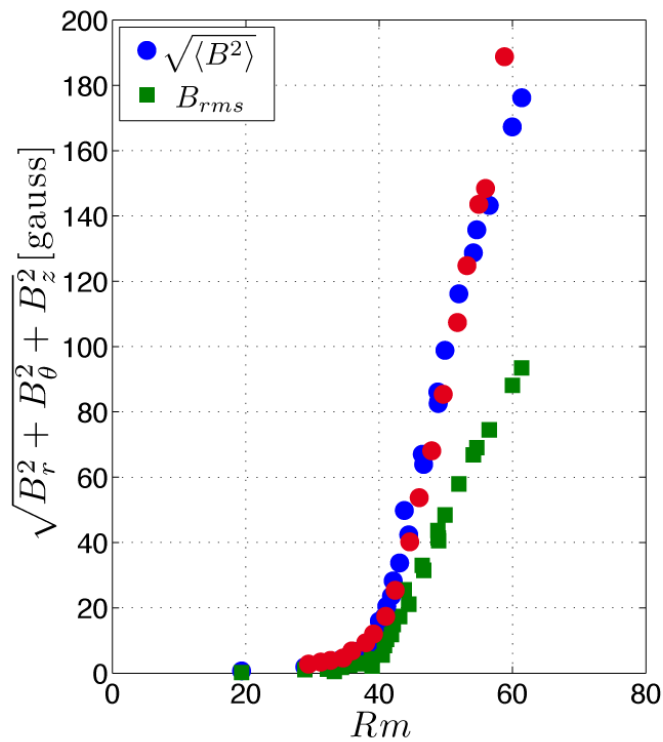
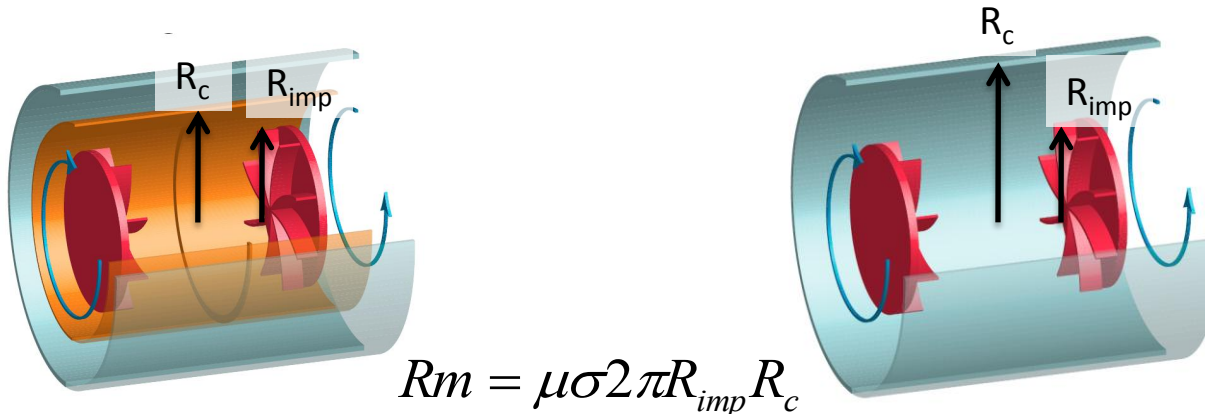


... aux oscillations de période 22 ans

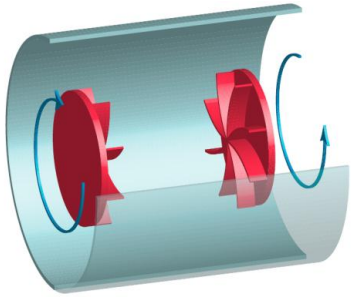
DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



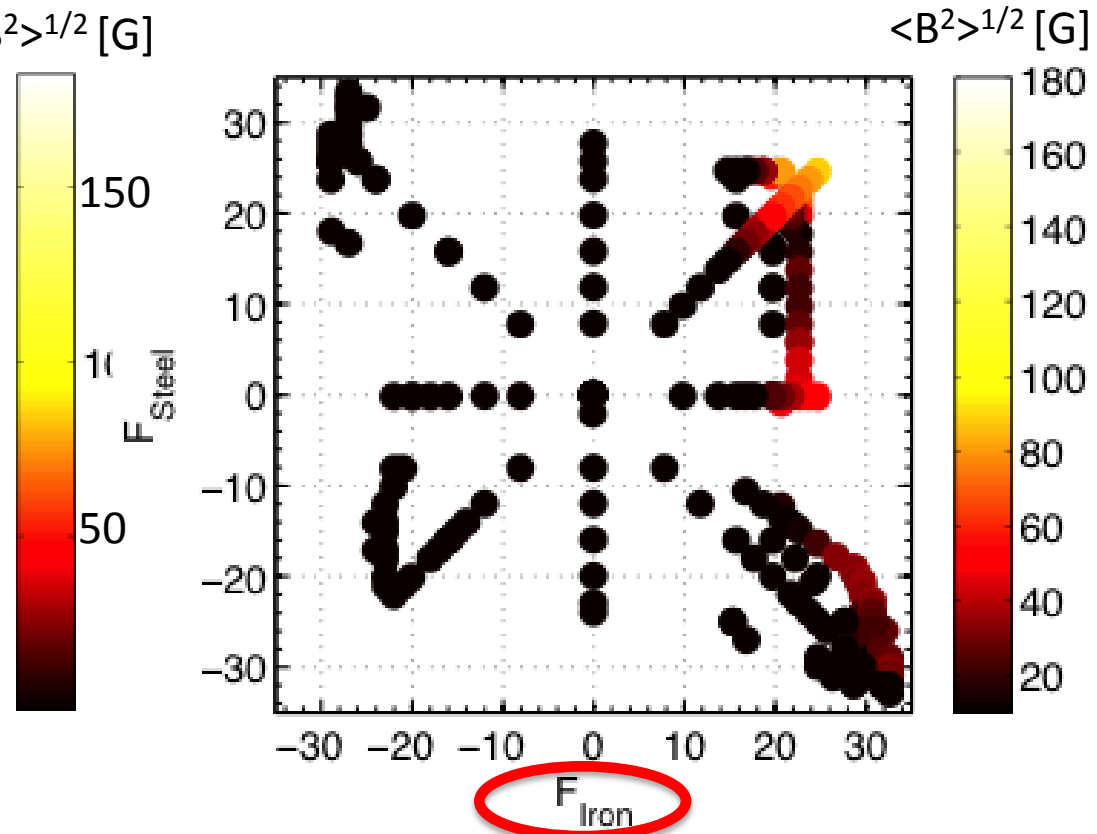
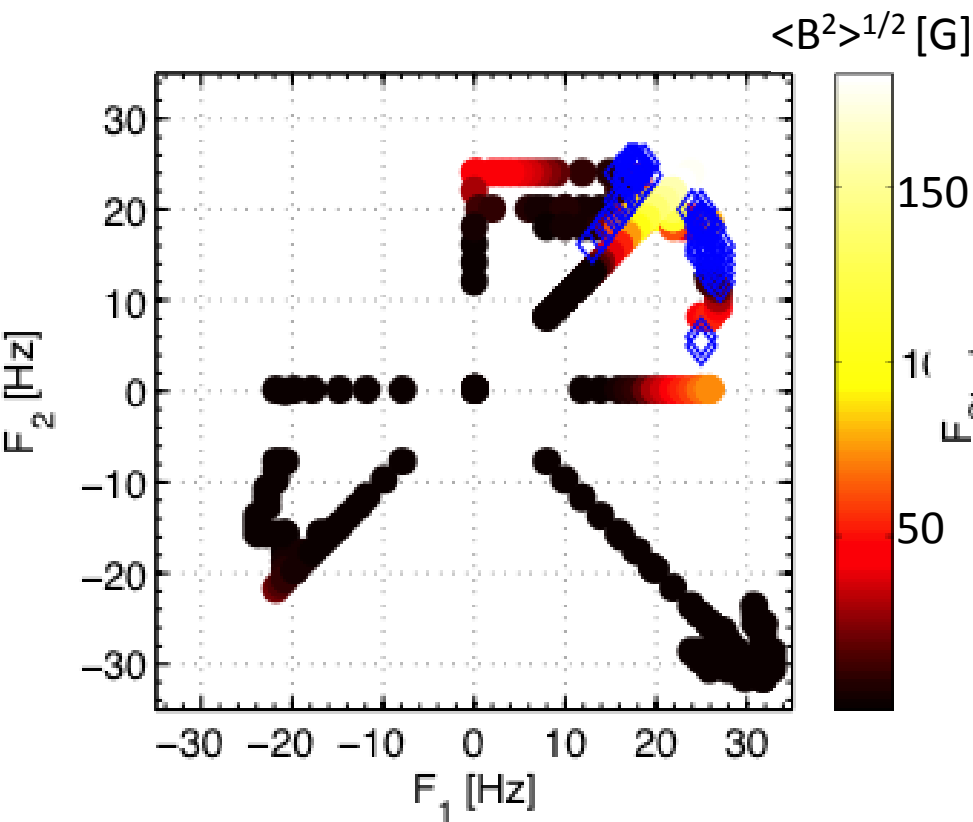
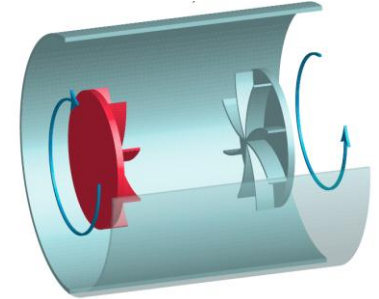
Influence of the side layer



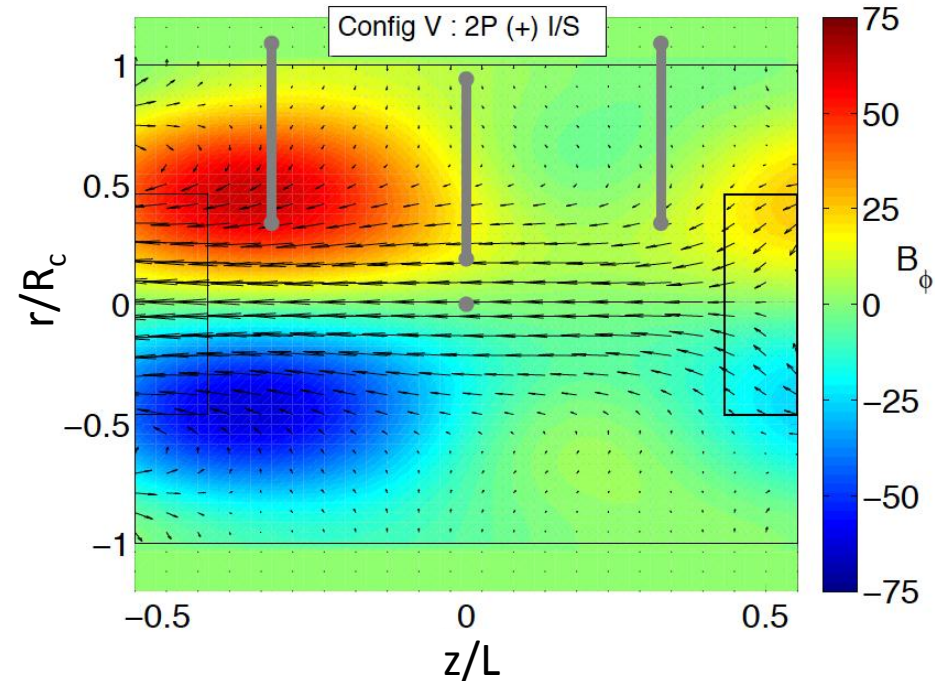
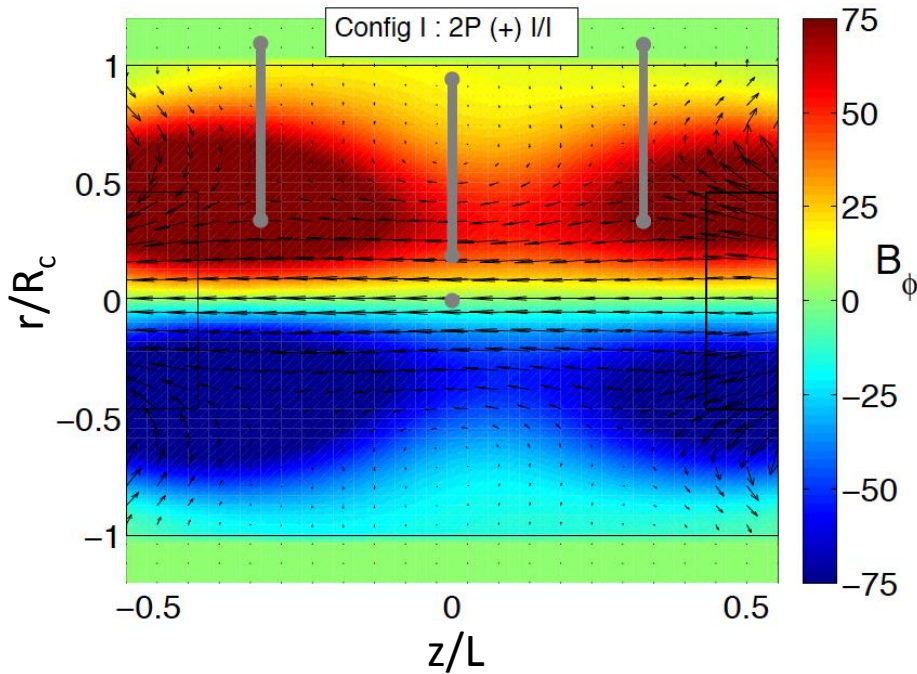
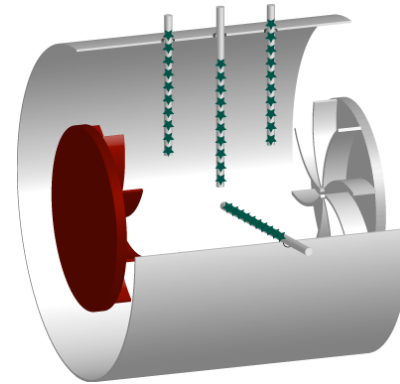
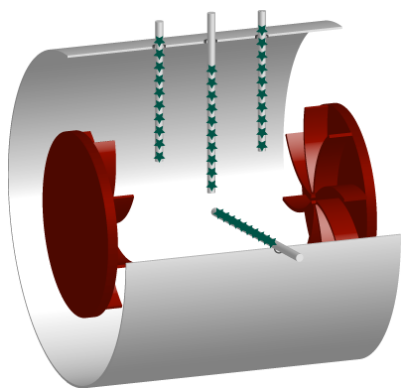
Influence of boundary conditions on dynamical regimes



- No dynamo
- Stationary dynamo
- ◇ Dynamical regimes



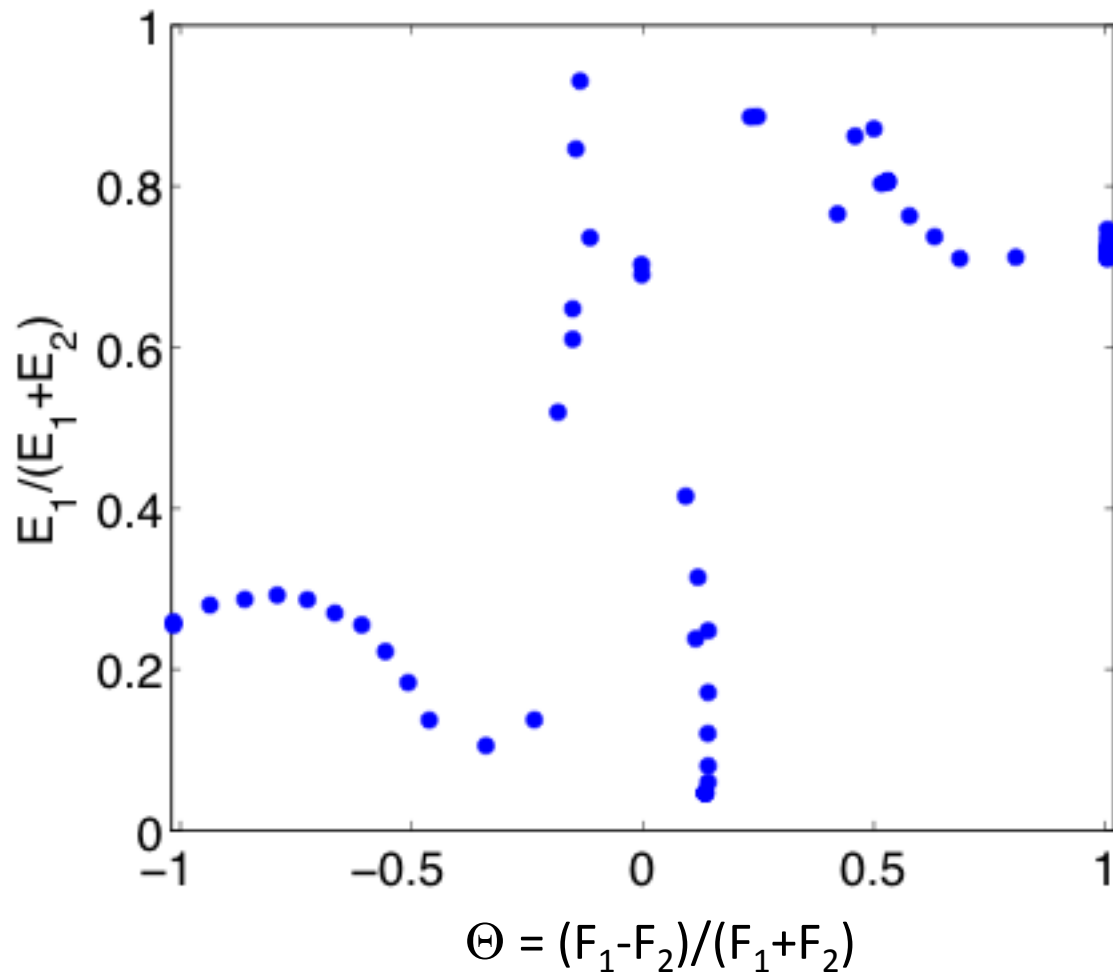
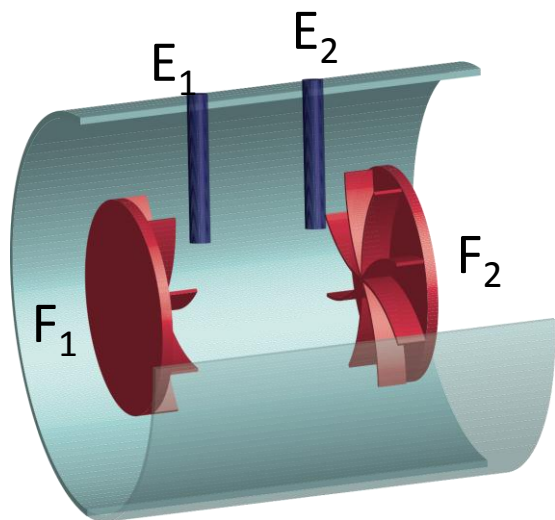
Magnetic field reconstruction – Dynamo decomposition

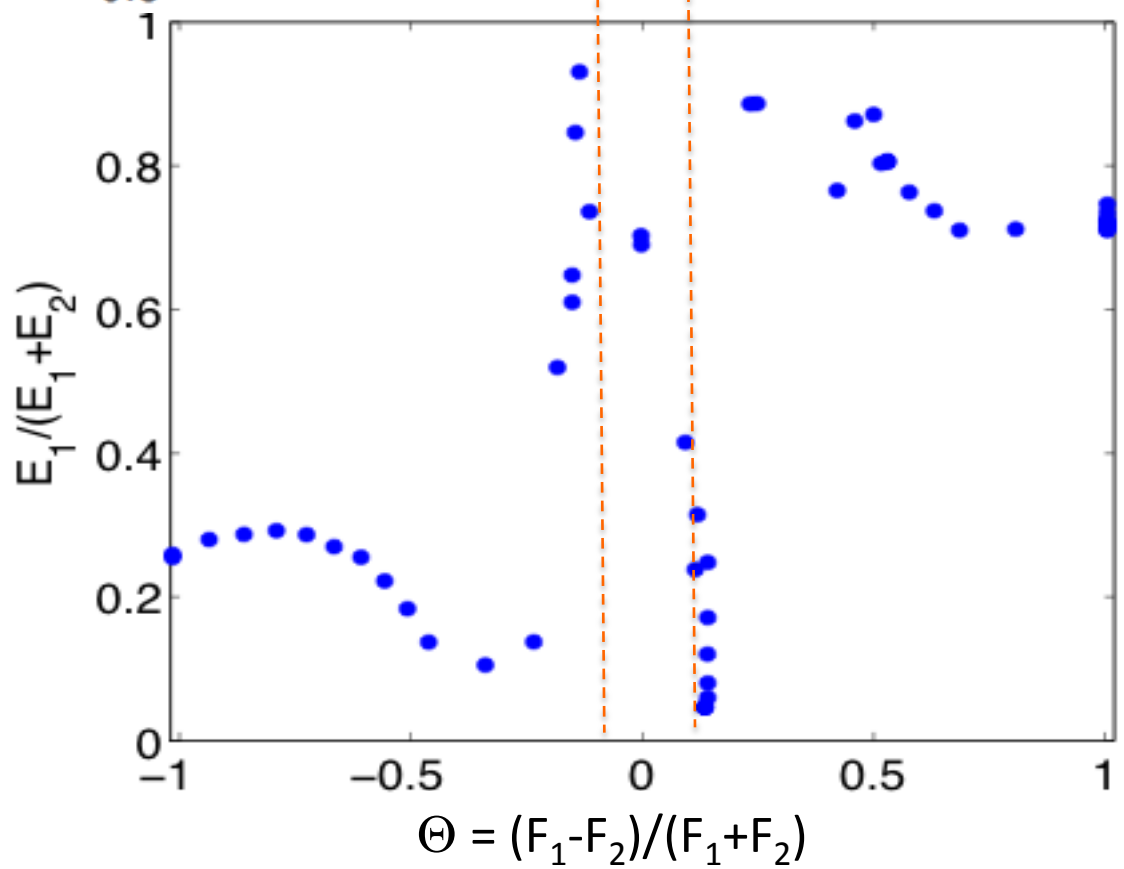
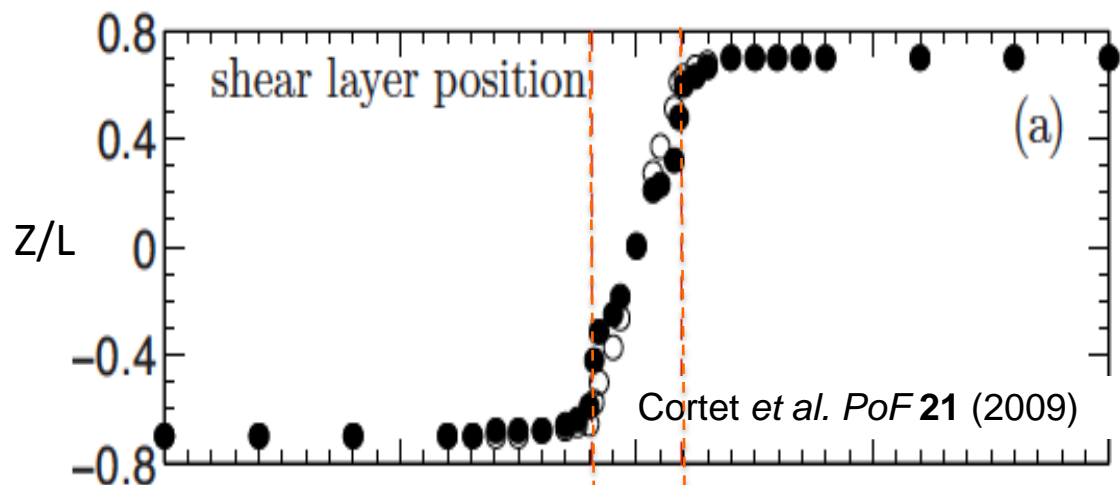
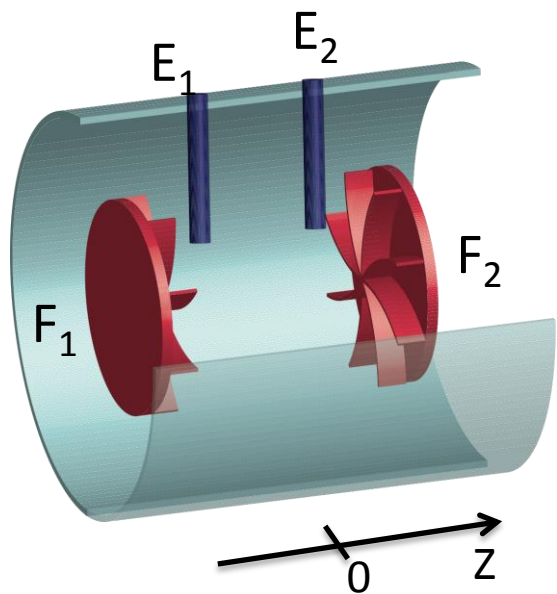


$$B_{II} = \alpha B_{Iss} + \beta r_{\pi} (B_{Iss}) + B_c$$

$$\alpha \approx 1 ; \beta \approx -1$$

Energy localization and symmetry breaking





Un problème couplé fortement non-linéaire

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta B \quad Rm \gg 1 \quad \begin{array}{l} \text{Instabilité dynamo} \\ \text{Croissance de B} \end{array}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{j \times B}{\rho} + \nu \Delta u + f$$

Retroaction

La saturation de la dynamo est une rétroaction du champ magnétique sur le champ de vitesse

Paramètre d'interaction

$$N = \frac{j \times B / \rho}{(u \cdot \nabla)u} \quad \begin{array}{l} \approx 0 \text{ (ou petit) dans la phase de croissance} \\ \approx 1 \text{ dans la phase de saturation} \end{array}$$

Un problème couplé fortement non-linéaire

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta B \quad Rm \gg 1 \quad \begin{array}{l} \text{Instabilité dynamo} \\ \text{Croissance de B} \end{array}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{j \times B}{\rho} + \nu \Delta u + f$$

Retroaction

La saturation de la dynamo est une rétroaction du champ magnétique sur le champ de vitesse

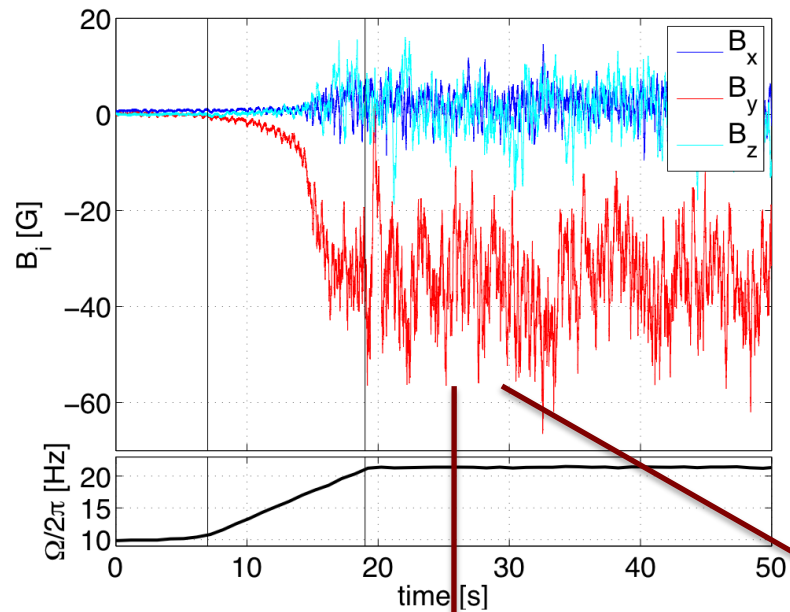
Paramètre d'interaction

$$N = \frac{j \times B / \rho}{(u \cdot \nabla)u} \quad \begin{array}{l} \approx 0 \text{ (ou petit) dans la phase de croissance} \\ \approx 1 \text{ dans la phase de saturation} \end{array}$$

Pour la phase initiale, le problème est découplé (dynamo cinématique)

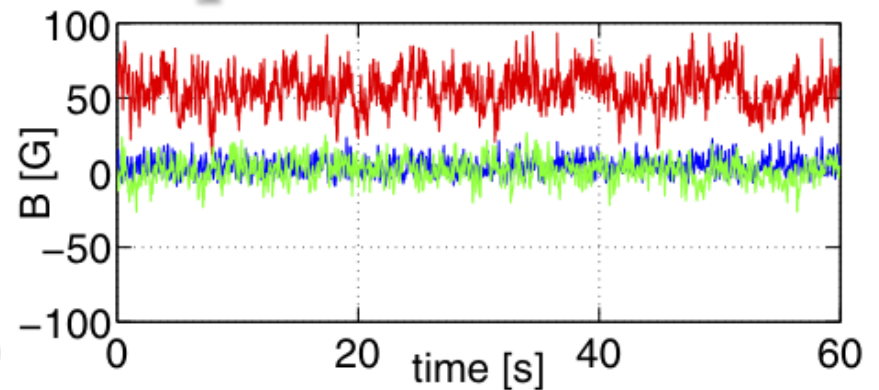
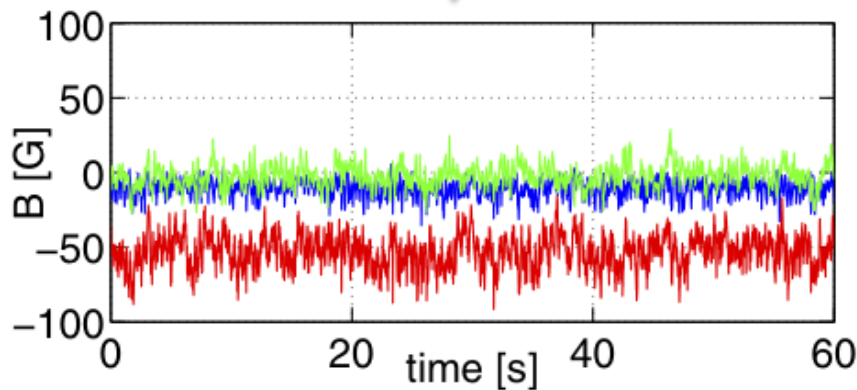
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u_H \times B) + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta B \quad \frac{\partial u_H}{\partial t} + (u_H \cdot \nabla)u_H = -\frac{\nabla P}{\rho} + \nu \Delta u_H + f$$

La dynamo VKS

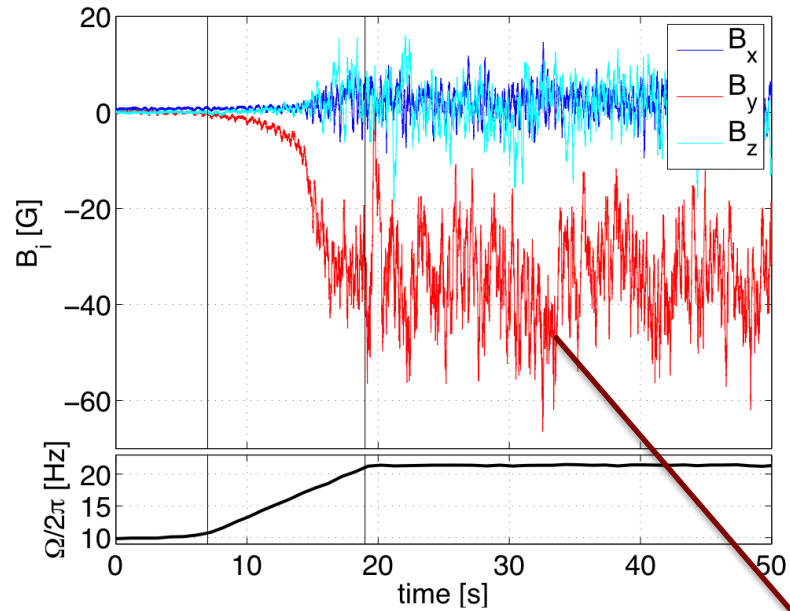


+/- symétrie de l'équation d'induction

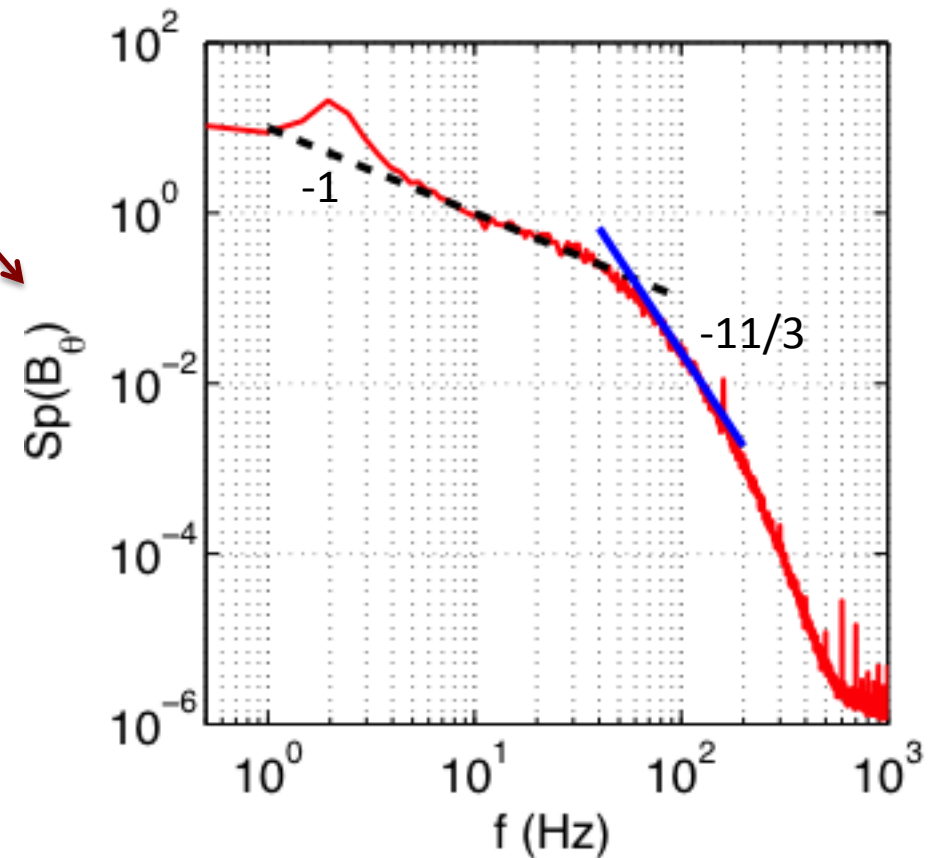
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \mu\sigma\Delta B$$



La dynamo VKS

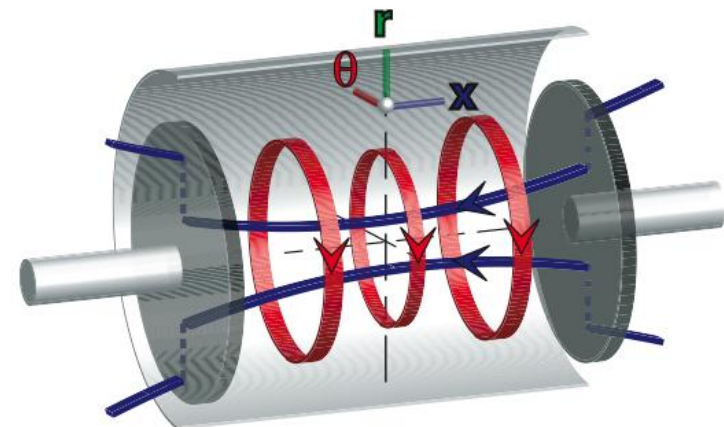
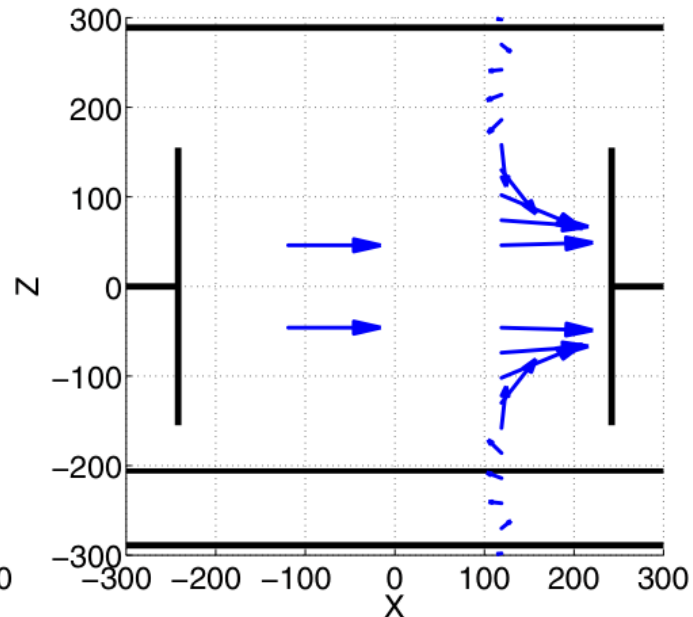
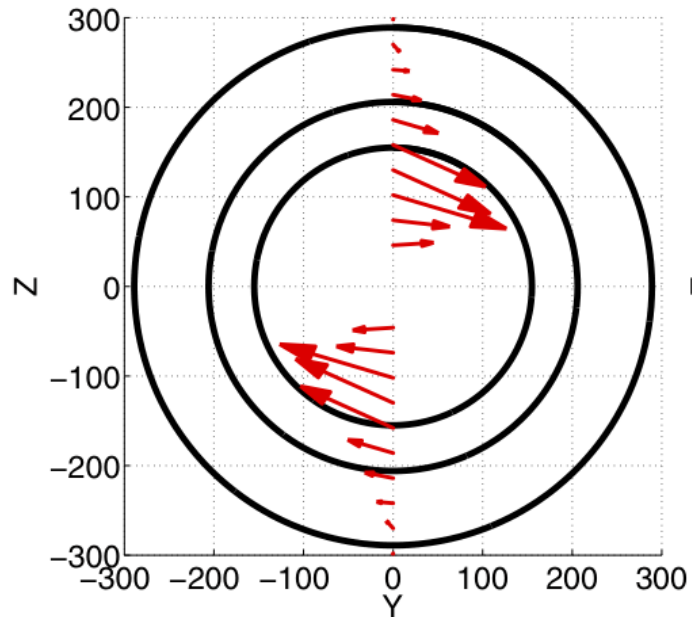


Fluctuations magnétiques turbulentes

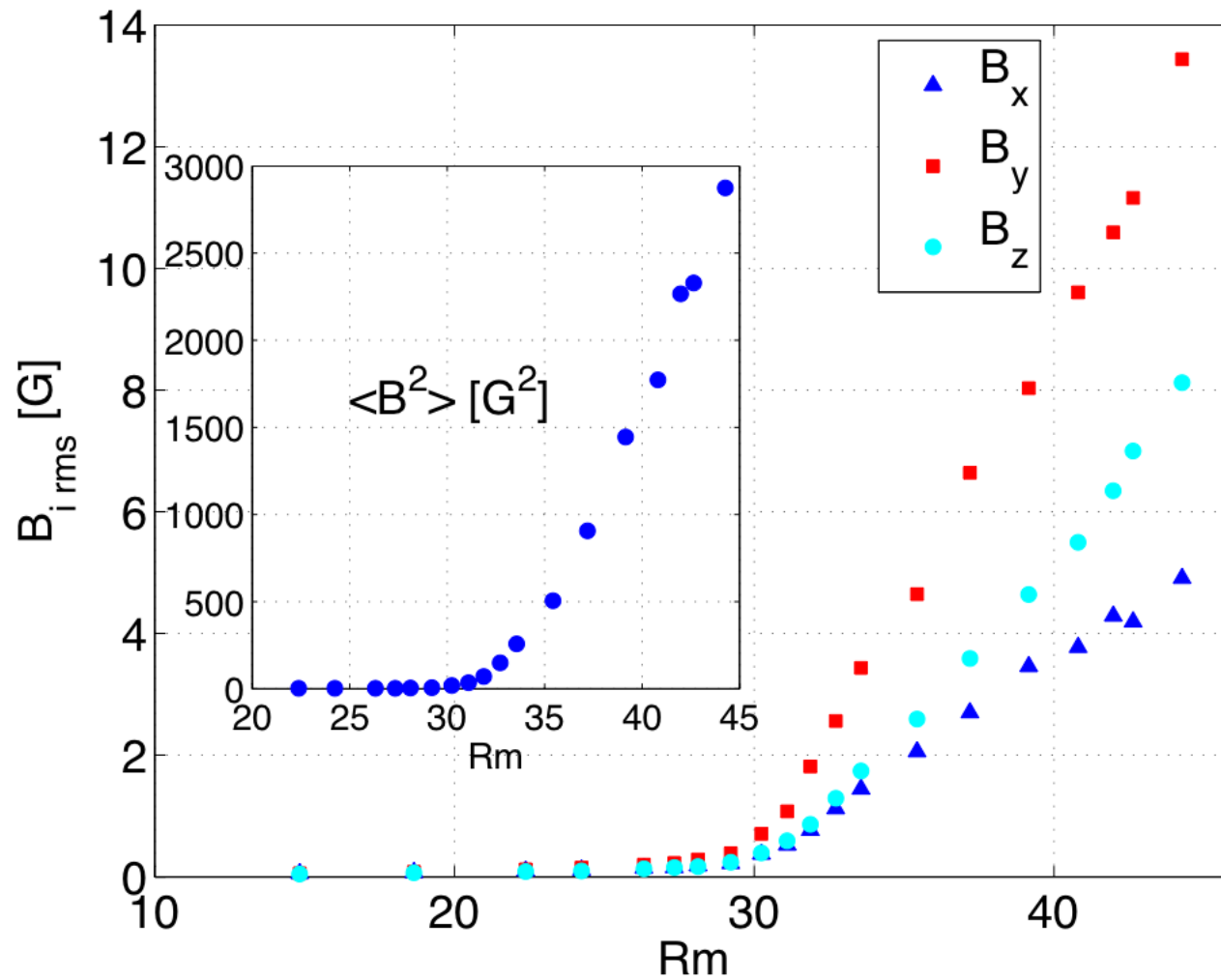


Une dynamo turbulente?

Une structure magnétique dipolaire **et axisymétrique !**

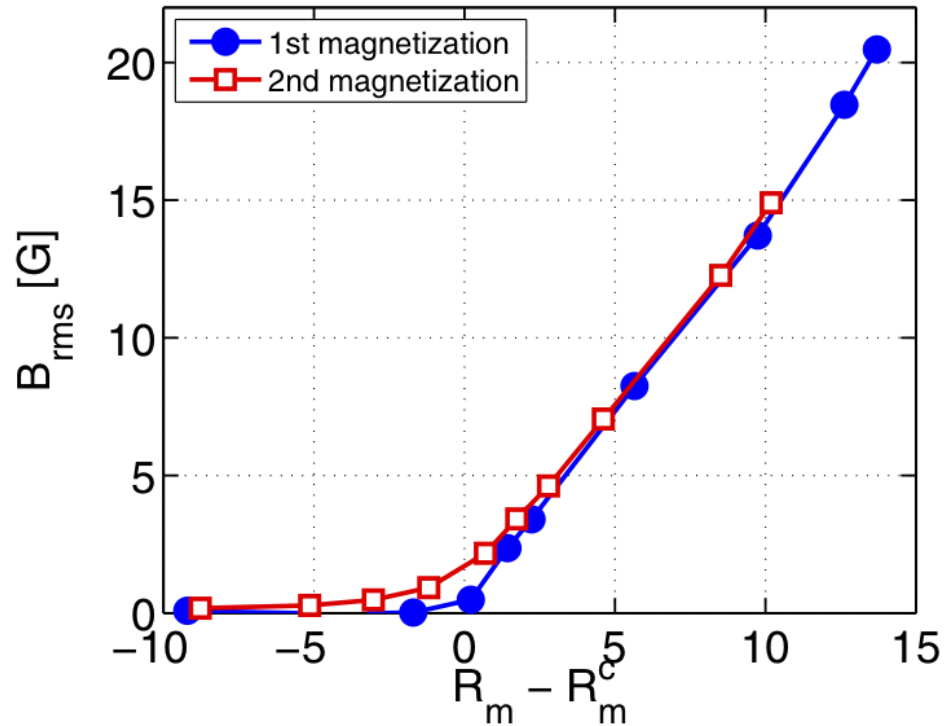
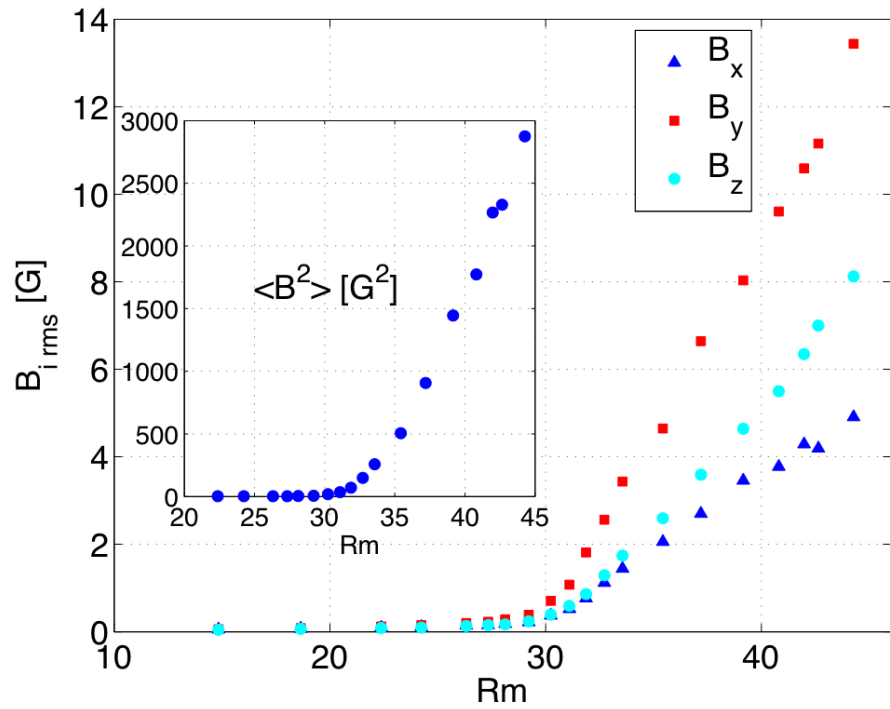


Bifurcation stationnaire



Scaling $B^2 \approx (R_M - R_M^c)^\alpha$?

Bifurcation stationnaire



Scaling $B^2 \approx (R_M - R_M^c)^\alpha$?

Plan

Introduction: Champs magnétiques géo/astrophysiques
Instabilité dynamo

Cadre de la MagnétoHydroDynamique

Rappel sur les écoulements turbulents

Dynamos expérimentales

La dynamo von-Kàrmàn Sodium

Régimes dynamiques de la dynamo VKS

Mécanismes dynamo dans VKS

Introduction:

Champs magnétiques géo/astrophysiques

Instabilité dynamo

A la recherche de dynamos dans des écoulement axisymétriques

Simulation dynamo cinématique Dudley-James

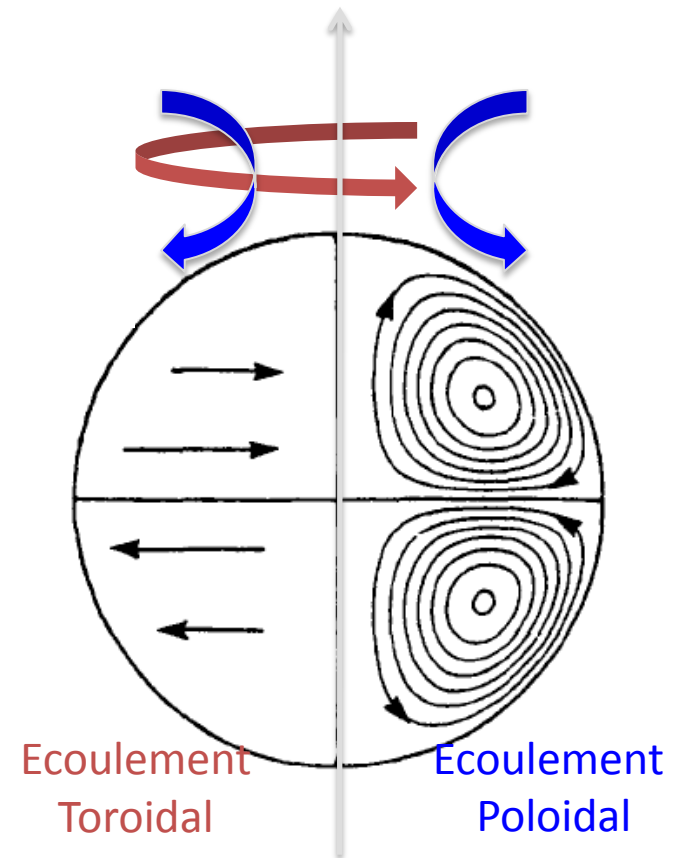
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (u \times B) + \mu\sigma\Delta B$$

Résolution d'un problème aux valeurs propres

$$B = \sum B_i e^{\lambda_i t}$$

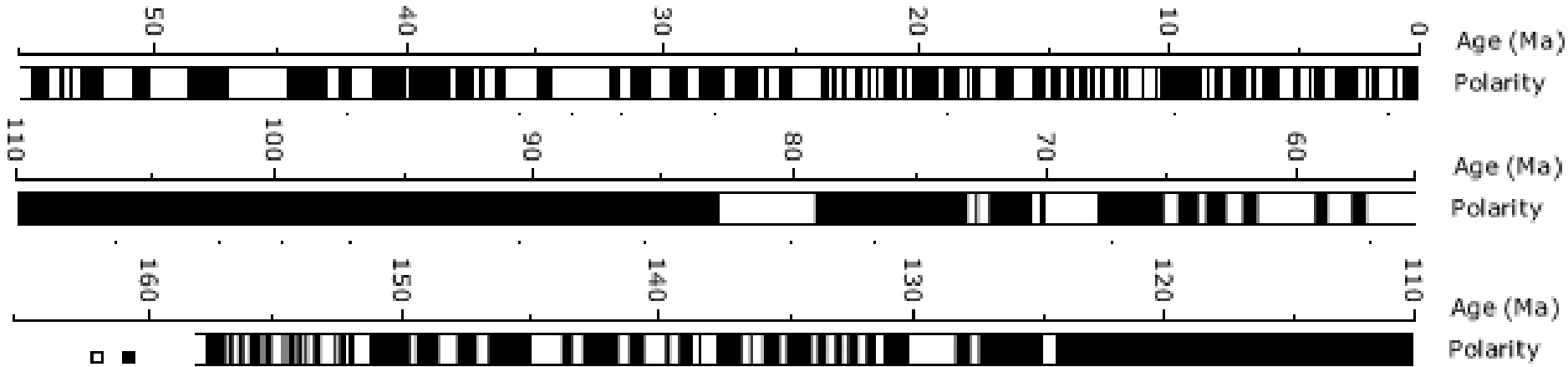
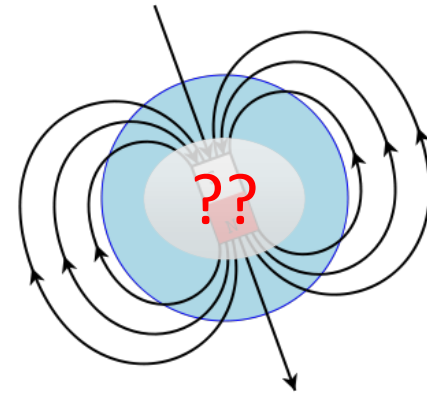
$$\lambda_i B_i = \nabla \times (u \times B_i) + \mu\sigma\Delta B_i$$

Connaissant u , on cherche le mode B_i instable
(i.e. qui possède une valeur propre λ_i positive)

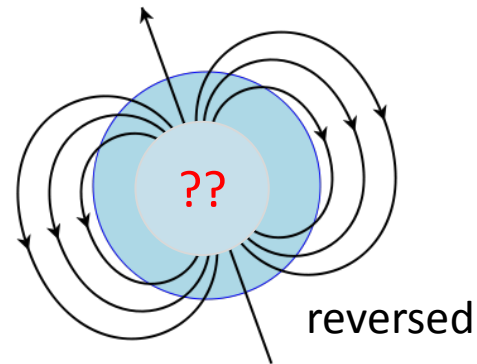
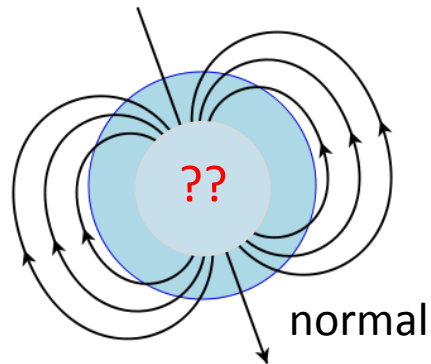


Le champ magnétique terrestre

... et à des renversements chaotiques



50 – 30000 kyrs



La transition à la turbulence: l'exemple de la sphère

