

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

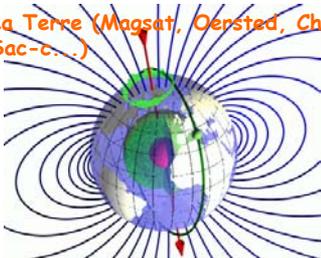
*Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Nantes.
27 Novembre 2003.*

Daniel BRITO, Équipe Géodynamo, LGIT.



L'observation du champ magnétique de la Terre et des planètes.

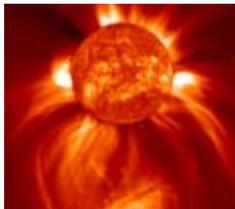
La Terre (Magsat, Oersted, Champ, Sac-c...)



Mars (Mars Global Surveyor)



Soleil (Soho)

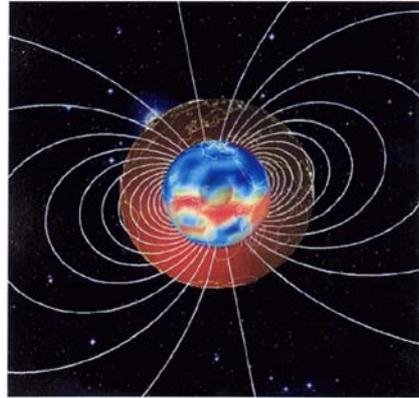
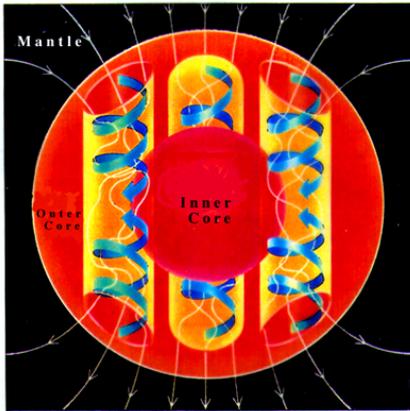


Jupiter et ses satellites (Galileo)



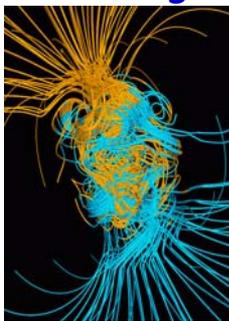
Les observations sont de plus en plus riches pour les modélisateurs.

Vision actuelle de la génération du champ magnétique auto-entretenu par effet dynamo dans le noyau liquide terrestre.

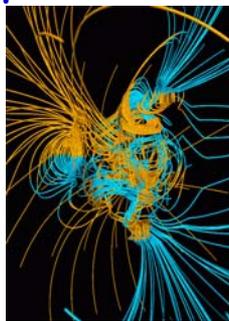


Pour la Terre: champ magnétique principalement dipolaire avec de la variation séculaire, et une inversion 4 à 5 fois par millions d'année. Dynamo à l'œuvre depuis au moins 3 milliard d'années.

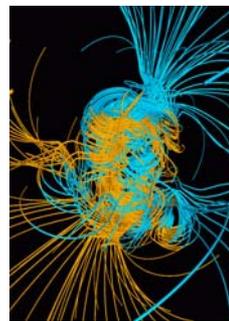
Où en est la modélisation numérique du champ magnétique de la Terre?



t-500 years



t



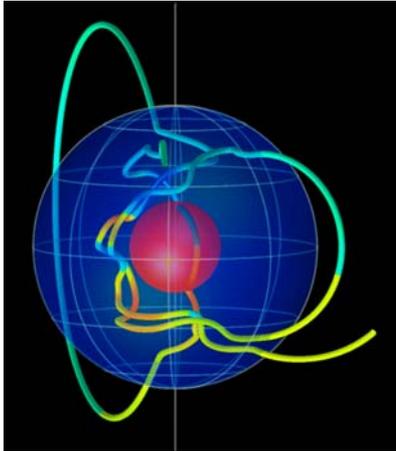
t+500 years



(Glatzmaier and Roberts, 1995).

Première DYNAMO NUMERIQUE en présence d'un fluide en convection thermique... avec en prime un champ magnétique qui s'inverse.

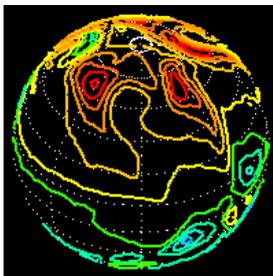
Où en est la modélisation numérique du champ magnétique de la Terre?



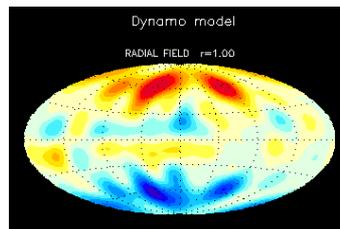
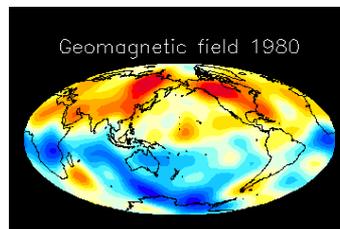
(Kuang and Bloxham, 1997).

Aujourd'hui nombreuses dynamos magnétiques avec un champ magnétique DIPOLAIRE tel celui de la Terre... parfois calculées sur des PC.

Où en est la modélisation numérique du champ magnétique de la Terre?



(Christensen, Olson and Glatzmaier, 2000).



DIPOLAIRES... mais avec aussi beaucoup de caractéristiques physiques communes avec le champ terrestre.

Où en est la modélisation numérique du champ magnétique de la Terre?

Paradoxe: Très proche avec des résultats reproduisant l'ESSENTIEL des caractéristiques du champ terrestre... très loin car les paramètres physiques des codes numériques ne sont pas les bons. ??

La **difficulté** dans la modélisation numérique des noyaux planétaires:

Nombre de Prandtl $P=v/\kappa \sim 10^{-3}$.

Nombre de Prandtl magnétique: $P_m = v/\lambda \sim 10^{-6} \rightarrow v \sim 10^{-3} \kappa \sim 10^{-6} \lambda$

Des échelles de temps et d'espace très différentes pour le champ de température, le champ de vitesse et le champ magnétique!

En général, dans les modélisations $P=P_m \sim 1$

Des conséquences:

- Eau salée.
- Métal vitreux.
- 1 révolution = 10 Millions d'années.
- Pas de mouvement < 100 Km.

Quand on baisse P_m , plus de dynamo...

La modélisation expérimentale

Pourquoi faut-il une modélisation expérimentale?

• Les expériences ont toujours été des guides pour la théorie et la compréhension physique...

• Les expériences couvrent (bien souvent) une gamme de **paramètres inaccessibles** à la modélisation numérique (en particulier dans les expériences Pm et P ont le bon ordre de grandeur).

Elles représentent:

1. *Une vérification des calculs numériques.*
2. *Un moyen d'améliorer la modélisation numérique et théorique (modèle de viscosité turbulente par exemple).*
3. *Un moyen d'identifier des phénomènes physiques jamais « entrevues » théoriquement ou numériquement.*

PLAN

1. Des paramètres physiques importants pour la modélisation expérimentale de la dynamo.
2. Les deux succès récents en dynamo fluide.
3. Les expériences dynamo de seconde génération.
4. Le projet dynamo grenoblois.

Conclusion

1. Des paramètres physiques importants pour la modélisation expérimentale de la dynamo.

Les Equations du problème:

• Équation du mouvement pour le champ de vitesse U :
Navier Stokes + Forces de Lorentz.

• Équation de la chaleur pour T .

• Équation d'induction pour le champ magnétique B .

Equation d'induction

Evolution temporelle du champ magnétique	$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Induction : source du champ magnétique	$R \vec{\text{rot}}(\vec{u} \wedge \vec{B})$	Effet joule : Destruction du champ magnétique	$+$ $\frac{1}{Rm} \Delta \vec{B}$
------------------------------------------	---------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------	-----------------------------------------------------	-----------------------------------

$$Rm = \mu_0 \sigma UL = \frac{UL}{\lambda}$$

λ Diffusivité magnétique Nombre de Reynolds magnétique

Effet dynamo si $Rm \gg 50$

1. Des paramètres physiques importants pour la modélisation expérimentale de la dynamo.

• **Le nombre de Reynolds magnétique: compare l'induction du champ magnétique au temps de diffusion.**

$$Re_m = \frac{\text{induction}}{\text{diffusion}} = \frac{UL}{\lambda} = \mu \sigma UL$$

Dynamo: condition nécessaire $Re_m \gg 50$

• μ : difficile de le varier. (Martin et al., 2000; Frick et al., 2002)

• σ : $\sigma_{\text{sodium}} = 3 \sigma_{\text{gallium}} = 10 \sigma_{\text{mercure}}$.

• U et L les plus grands « possibles ».

1. Des paramètres physiques importants pour la modélisation expérimentale de la dynamo.

- Le nombre de Reynolds magnétique: compare l'induction du champ magnétique au temps de diffusion.

$$Re_m = \frac{\text{induction}}{\text{diffusion}} = \frac{UL}{\lambda} = \mu \sigma UL$$

Dynamo: condition nécessaire $Re_m \gg 50$

Dynamo en laboratoire, condition « nécessaire »: utiliser du SODIUM

$$Re_m = \frac{\nu UL}{\lambda \nu} = P_m Re \Rightarrow Re > 10^6 \quad P_m \sim 10^{-6}$$

Dynamo turbulente !!

1. Des paramètres physiques importants pour la modélisation expérimentale de la dynamo.

- Le nombre de Reynolds magnétique.
- Puissance à injecter pour réaliser une expérience Dynamo turbulente

$$P \approx \rho \lambda^3 \frac{R_m^3}{L}$$

• $\rho \lambda^3 \sim 1$ pour le sodium.

• Prenons $R_m = 50$, $(R_m)^3 \sim 10^5$

• Si $L = 1\text{m} \rightarrow P \sim 100\text{ kW}$, si $L = 0.3\text{m} \rightarrow P > 300\text{ kW}$
(TGV $\sim 1000\text{ kW}$)

CCL: L peut être petit en théorie... mais en pratique cela amène à devoir évacuer une énorme puissance à travers un petit volume: difficile!!

Difficile de faire une manip dynamo sur un coin de table avec du sodium et une telle puissance à injecter!
Sodium + Puissance = infrastructure lourde en laboratoire.

1. Des paramètres physiques importants pour la modélisation expérimentale de la dynamo.

• Conditions **NECESSAIRES**:

$$Re_m = \frac{UR}{\lambda} \geq 50$$

$$P \approx \rho \lambda^3 \frac{R_m^3}{L} \approx 100 \text{ kW pour } L=1 \text{ m}$$

MAIS PAS SUFFISANT!

• Il faut ensuite un champ de vitesse U adéquat pour générer un champ magnétique auto-entretenu!!! (ég. d'induction).

2. Les deux succès récents en dynamo fluide.

2. Les deux succès récents en dynamo fluide.

Première démonstration en 1999

de l'auto-entretien d'un champ par des mouvements de fluide.

Les dynamos de Riga et Karlsruhe reposent sur des prédictions théoriques de dynamo: (Ponomarenko, 1973) pour Riga et (G.O. Roberts, 1972) pour Karlsruhe.

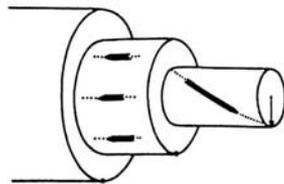
Ces deux expériences voulaient atteindre le nombre de Reynolds magnétique critique pour l'effet dynamo prédit par la théorie. Ils ont été atteints et ont donné les deux premières dynamos expérimentales fluide en 1999.

2. Les deux succès récents en dynamo fluide.

RIGA, Lettonie.

Principe:

Dynamo de (Ponomarenko, 1973): Un écoulement hélicoïdal infiniment long en contact électrique parfait avec le fluide environnant à l'arrêt.



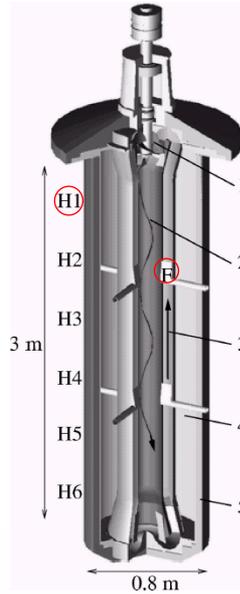
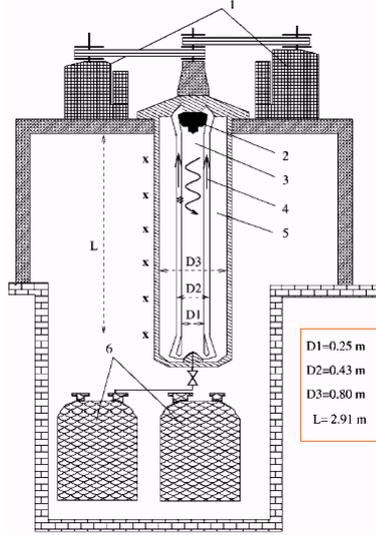
Pour $R_m > R_{m \text{ crit}}$, dynamo!

Figure 2. Theoretical model: two coaxial cylinders moving as solid bodies inside a motionless shell.

(Gailitis, 1992)

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. RIGA.

(120 kW, 1500 litres de sodium, 2200 tpm)



27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

21

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. RIGA.

1999: la dynamo... et la fuite

Avec un champ magnétique imposé, 10-11 Novembre 1999.

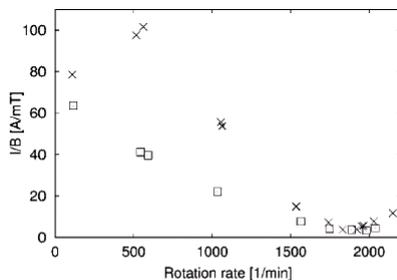
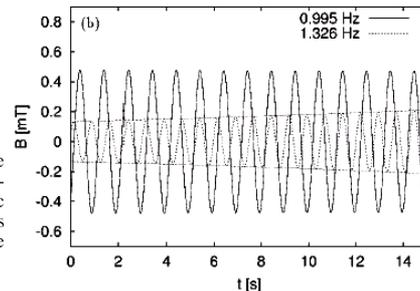
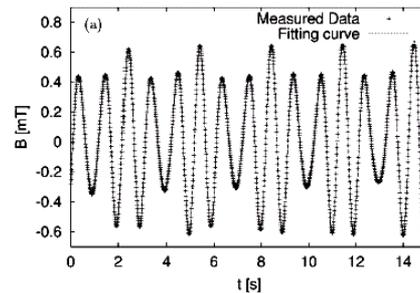


FIG. 2. Dependence of the magnetic field amplification on the propeller rotation rate for $T = 205^\circ\text{C}$ and $f = 1\text{ Hz}$. The ordinate axis shows the inverse relation of the measured magnetic field to the current in the seed-field coils. Squares and crosses correspond to two different settings of the 3-phase current in the seed-field coils with respect to the propeller rotation.

(Gailitis et al., 2000)



27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

22

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. RIGA.

Deuxième essai, Juillet 2000.

(Gailitis et al., 2001)

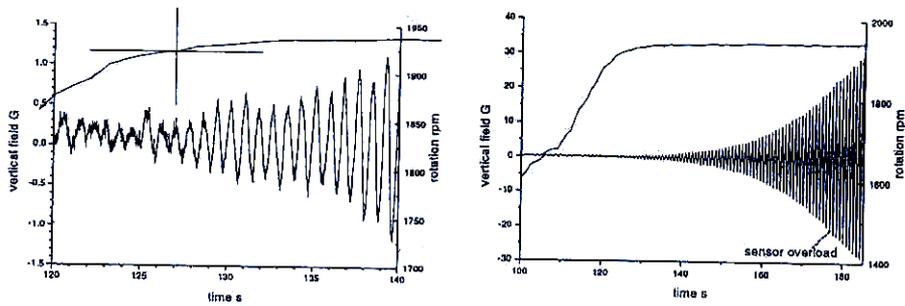
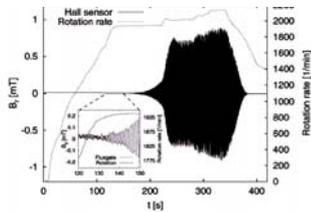


Figure 3. Field starts (left) and rises almost exponentially (right)



DYNAMO !!

27 FIG. 9. One experimental run in July 2000. Rotation rate of **délistation expérimentale des dynamos planétaires.**

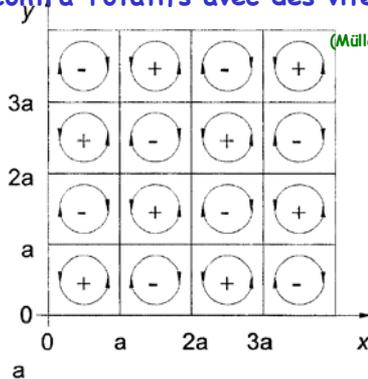
23

2. Les deux succès récents en dynamo fluide.

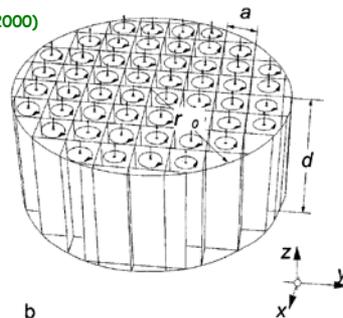
Karlsruhe, Allemagne.

Principe:

Dynamo de (G.O.Roberts, 1972): Écoulement infini de vortex juxtaposés contra-rotatifs avec des vitesses axiales de signe opposés..



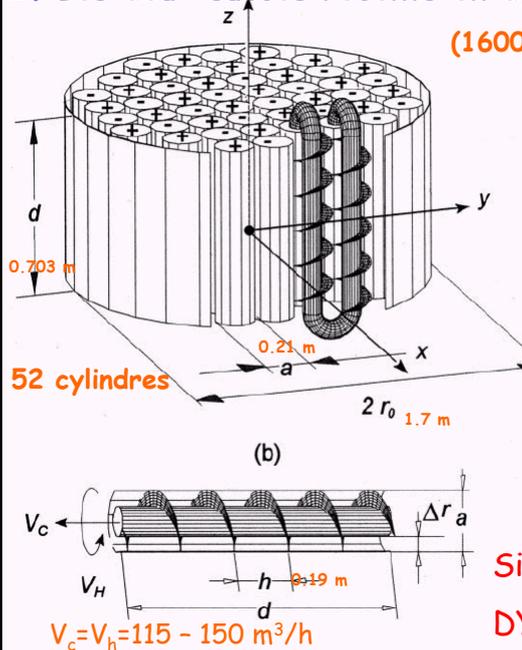
(Müller and Stieglitz, 2000)



(Busse, 1992): $r_0, d, a/r_0 \ll 1$

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. KARLSRUHE.

(1600 litres Sodium, 630 kW)



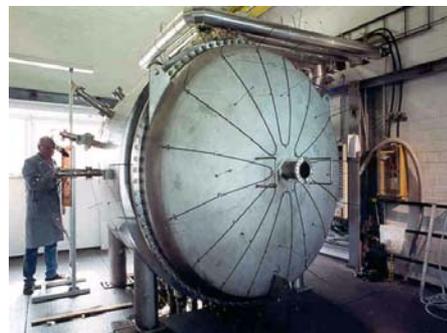
Si V_c et $V_H >$ valeurs critiques,
DYNAMO

27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

25

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. KARLSRUHE.

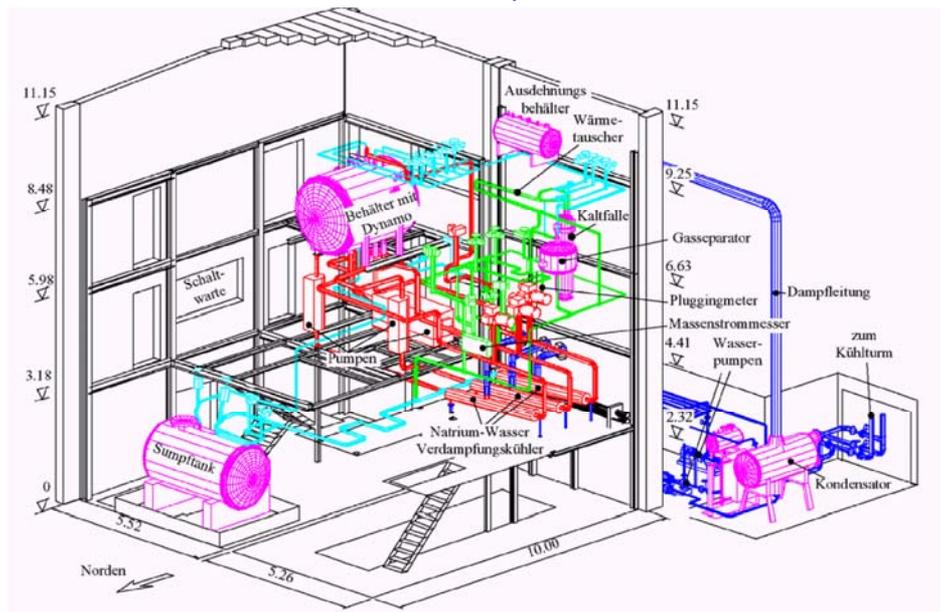


27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

26

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. KARLSRUHE.

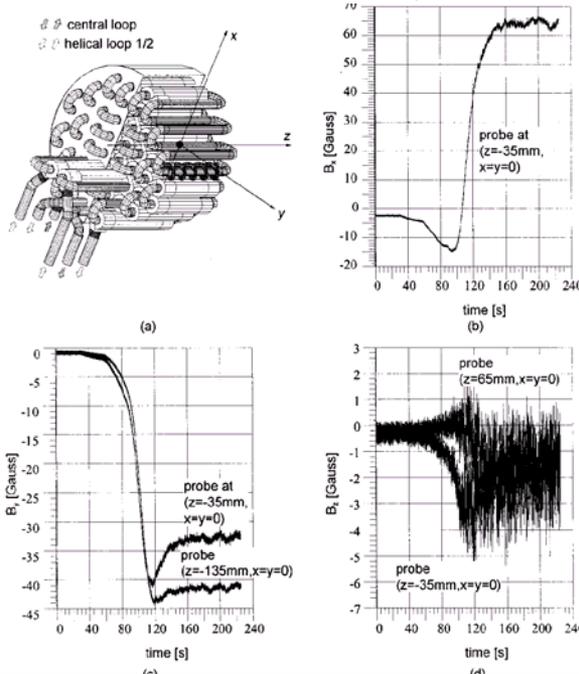


27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

27

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. KARLSRUHE.



(Müller and Stieglitz, 2000)

(Stieglitz and Müller, 2001)

27/11

étaires.

28

2. Les deux succès récents en dynamo fluide. KARLSRUHE.

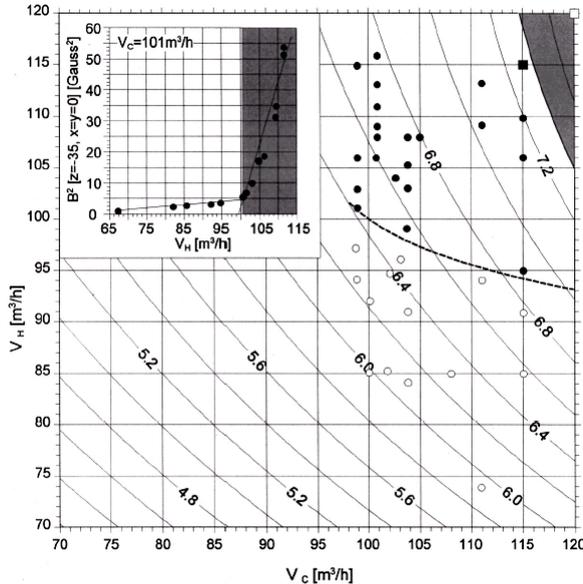


FIG. 3. Stability diagram for the onset of dynamo action as a function of the central flow rate V_c and the helical flow rates V_H . The filled dots denote experimentally measured dynamo action, open dots denote nondynamo. The dashed line indicates the experimentally obtained marginal stability curve, defined by a regression of the steep increase of the magnetic energy ($\sim B^2$) with V_H (see subgraph in the upper left). The gray-marked domain specifies the calculated flow rate domain for the existence of a dynamo by Rädler *et al.*^{11,12} The isolines show the values of a combined modified magnetic Reynolds number according to the mean-field model of Rädler *et al.*¹¹ The symbols \square and \blacksquare indicate Tigner's⁹ calculations for onset of dynamo action.

(Stieglitz and Müller, 2001)

2. Conclusions.

2 dynamos avec des écoulements fortement contraints.

. Pas d'évidence de rétroaction des forces de Lorentz (dynamo cinématiques).

. Théorie avec écoulement laminaire prédit le bon seuil.

3. Les expériences dynamo de seconde génération.

3. Les expériences dynamo de seconde génération.

Des expériences avec des écoulements « libres » et homogènes toujours avec du sodium.

Une dynamo forcée mécaniquement.

Une dynamo de type Dudley et James 's2t2'?

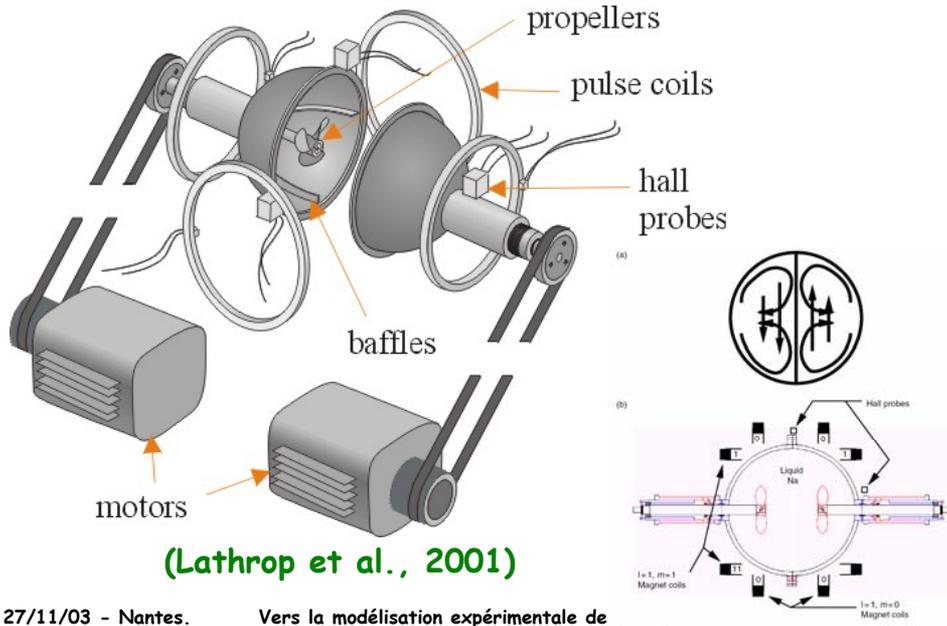
Principe: écoulement contra-rotatif dans l'hémisphère Nord et Sud avec du pompage vers l'équateur dans chaque hémisphère.

Dudeley et James: $Re_m \text{ critique} = 55$.

(a)



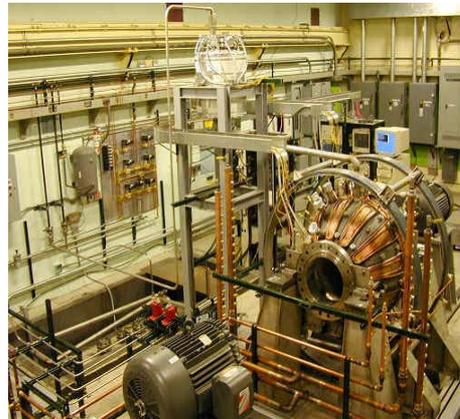
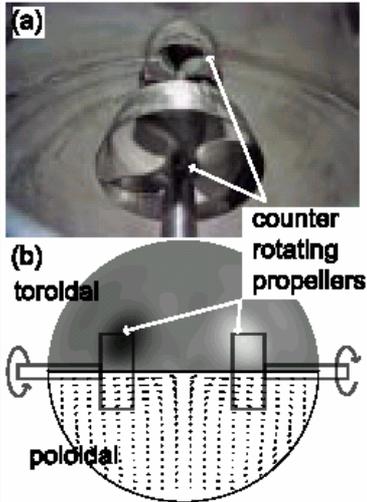
3. Les expériences dynamo de seconde génération. College Park, Maryland, États-Unis.



3. Les expériences dynamo de seconde génération.

Madison, États-Unis.

(Forest et al., 2002)



Diamètre=1m,150 kW

$V \sim 20 \text{ m/s}$

$R_m \sim 250 > 100$

3. Conclusions.

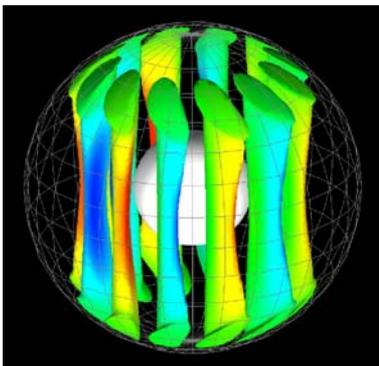
Malgré la vigueur des mouvements atteints dans ces expériences ($Re \sim 50$), pour l'instant pas d'amplification du champ imposé, pas de dynamo... alors qu'on est très proche de l'écoulement dynamo théorique de Dudley et James!
Pourquoi? Manque-t-il un ingrédient?

4. Le projet dynamo grenoblois en présence de rotation d'ensemble.

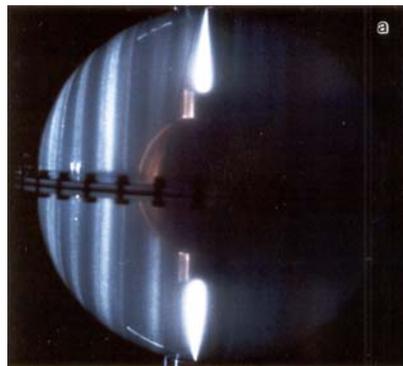
4. Le projet dynamo grenoblois

Qu'apporte la rotation d'ensemble?

La rigidification selon l'axe de rotation de l'ensemble
en vertu du théorème de Proudman → écoulements
géostrophiques.



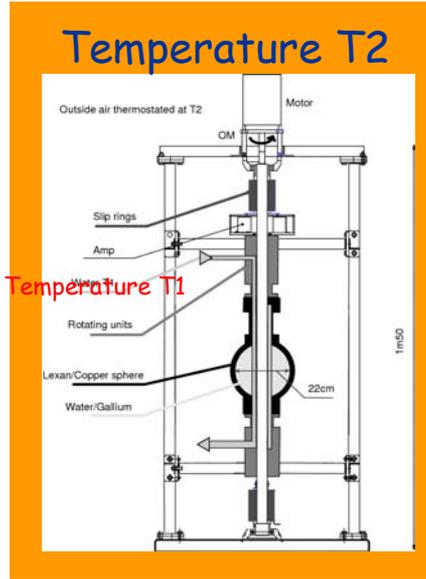
Dormy, 1998.



Cardin, 1992.

4. Le projet dynamo grenoblois

Convection et magneto-convection en gallium.



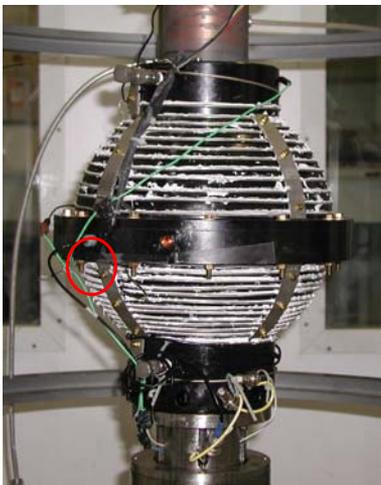
27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

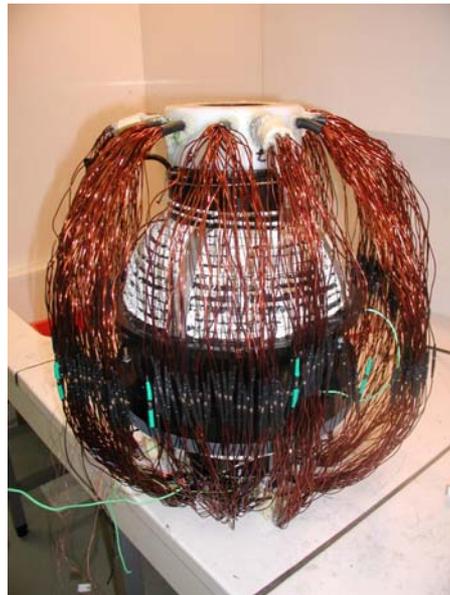
39

4. Le projet dynamo grenoblois

5 litre de gallium, 800 tpm.



Aubert et al., 2001



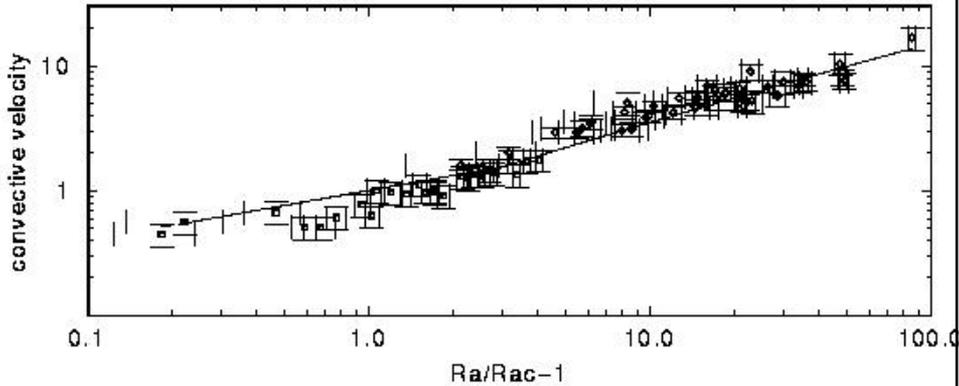
Thèse N. Gillet

27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

40

4. Le projet dynamo grenoblois

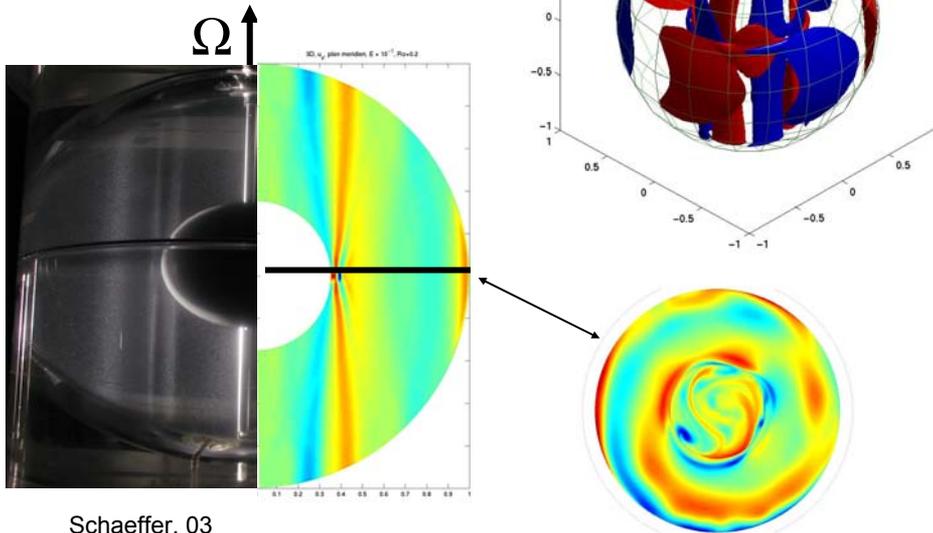


Lois d'échelle pour les vitesses, tailles, en fonction de E, Ra, P

(Aubert et al, 2001; Aubert et al., 2003)

A diagram illustrating a planetary dynamo experiment. It shows a large grey circle representing the outer shell and a smaller red circle representing the inner core. The radius of the shell is labeled 'a'. An upward-pointing arrow is labeled Ω , and a red upward-pointing arrow is labeled $\Omega + \Delta\Omega$. The text 'Sodium liquide' is written in yellow at the bottom of the shell. To the right, the text 'Une dynamo planétaire ?' is written in orange. Below this, the following parameters are listed: $a = 1 \text{ m ?}$, $\Omega = 450 \text{ tr/min ?}$, $\Delta\Omega = 150 \text{ tr/min ?}$, $P = 600 \text{ KW ?}$, 'Dynamo ?', and $B = 0.3 \text{ T}$. At the bottom right, the text '(Cardin et al., 2002)' is written in green.

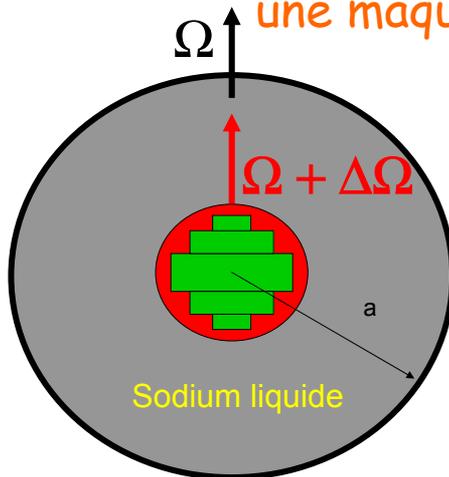
Instabilités de cisaillement



Schaeffer, 03

4. Le projet dynamo grenoblois

Derviche Tourneur Sodium : une maquette 1/5



$a = 0.21 \text{ m}$
 $\Omega = 2000 \text{ tr/min}$
 $\Delta\Omega = \pm 2000 \text{ tr/min}$
 $P = 22 \text{ KW}$

$B = 0.1 \text{ T}$

Laboratoire Géodynamo.

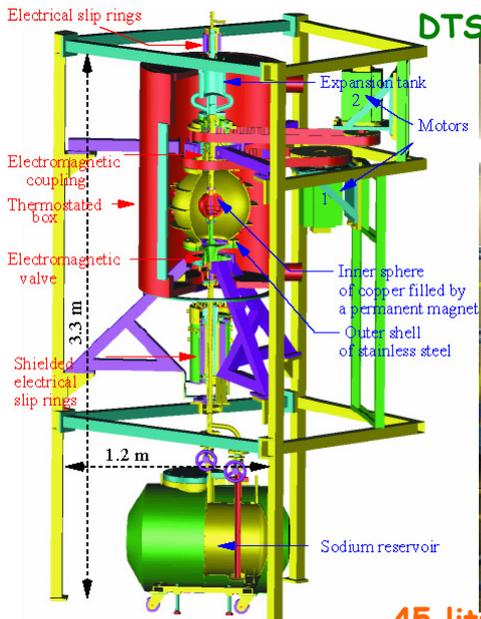


27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

45

4. Les « prétendants » à la dynamo en laboratoire. Grenoble



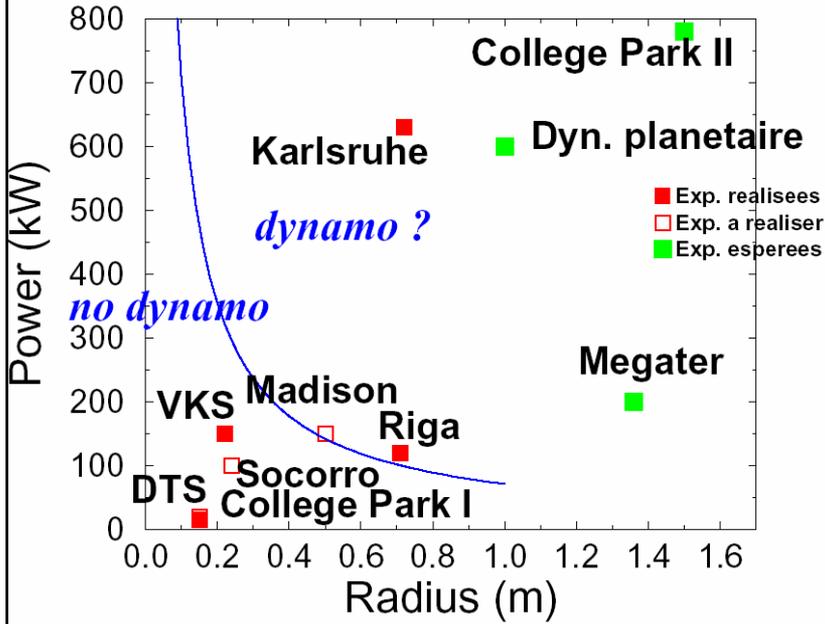
45 litres Na, 2*10 kW

27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

46

CONCLUSION

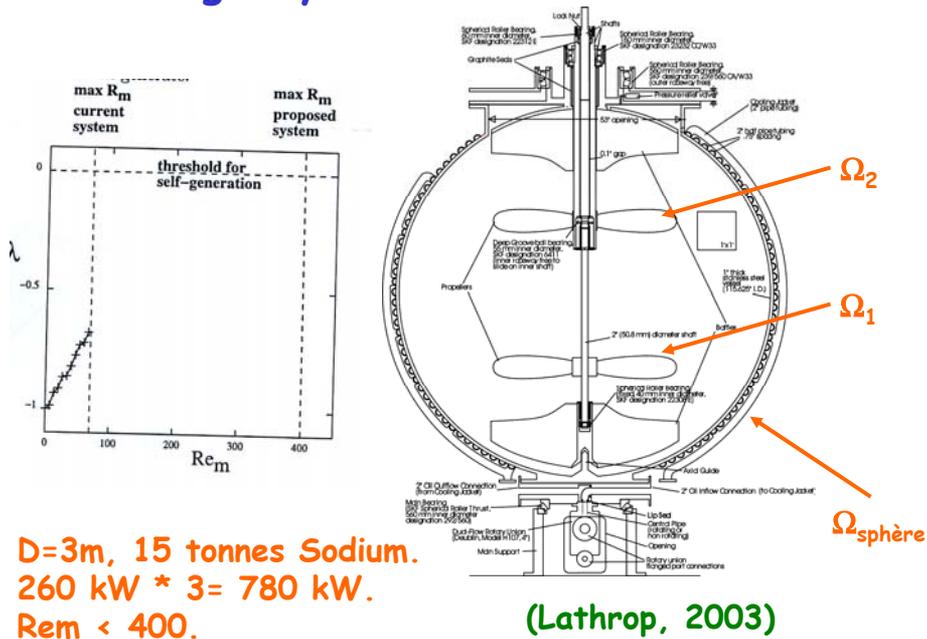


27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

47

La future géodynamo en laboratoire?



27/11/03 - Nantes.

Vers la modélisation expérimentale des dynamos planétaires.

48