

# Magnétohydrodynamique.

Daniel BRITO, Équipe Géodynamo, LGIT.



Expérimentation  
en sciences  
de la Terre



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# Approche expérimentale de la dynamique du noyau terrestre.

Daniel BRITO, Équipe Géodynamo, LGIT.



Expérimentation  
en sciences  
de la Terre



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# PLAN

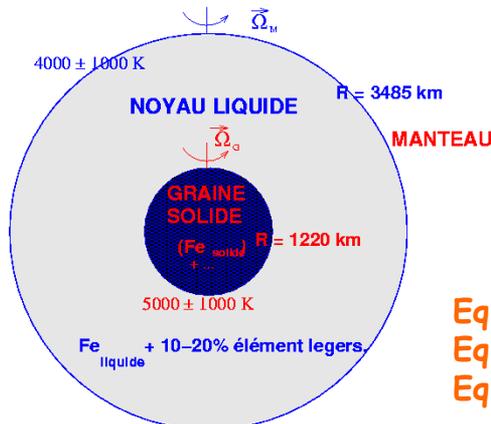
- 1) La magnétohydrodynamique du noyau terrestre.
- 2) Observation et modélisation numérique.
- 3) Modélisation expérimentale et expériences dynamo.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## 1) La magnétohydrodynamique du noyau terrestre.

Dynamique des fluides en rotation, en présence d'un **fluide conducteur d'électricité** et d'un **champ magnétique**.

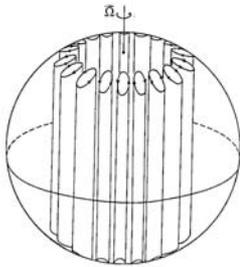


Eq. mouvement,  
Eq. d'induction,  
Eq. d'énergie.

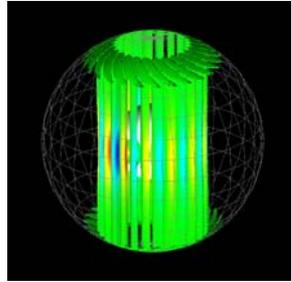
24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

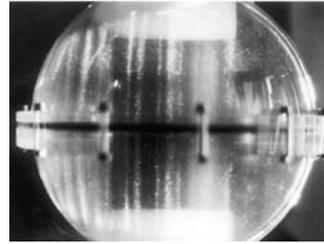
# 1) Convection dans une sphère en rotation rapide ( $\vec{B} = \vec{0}$ )



Busse, 1970



Dormy et al., 1997



Aubert et al., 2001



Cardin et al., 1992.

Forces de Coriolis dominant.  
(géostrophie)

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# 1) La magnétohydrodynamique du noyau terrestre ( $\vec{B} \neq \vec{0}$ )

Coriolis dominant toujours les autres forces mais les force de Lorentz sont prépondérantes aussi.

$$\Lambda = \text{Lorentz/Coriolis} \sim 0.1-1$$

Comment un tel système auto entretient-il un champ magnétique (dynamo) au cours des temps géologiques?

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# Équation d'induction

Evolution temporelle du champ magnétique

Induction : source du champ magnétique

Effet joule : Diffusion du champ magnétique

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \text{Rot}(\vec{u} \wedge \vec{B}) + \frac{1}{\text{Re}_m} \Delta \vec{B}$$

$$\text{Re}_m = \mu_0 \sigma U L = \frac{U L}{\lambda}$$

Nombre de Reynolds magnétique

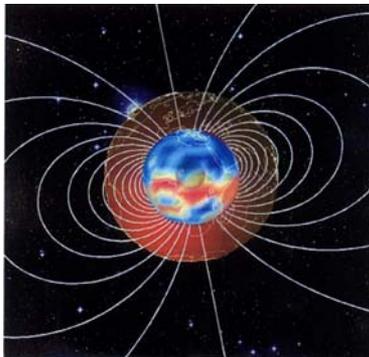
$\lambda$  diffusivité magnétique

Effet dynamo si  $\text{Re}_m \gg 50$

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## 1) La magnétohydrodynamique du noyau terrestre.



Noyau composé de fer liquide en mouvement, soumis à des forces de Coriolis et de Lorentz importantes et  $\text{Re}_m \geq 50$ .

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

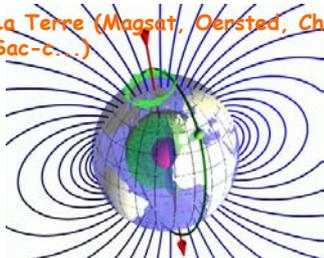
## 2) Observation et modélisation numérique.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## 2) Observation et modélisation numérique.

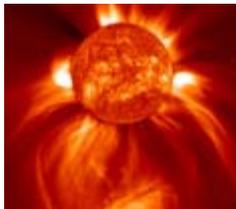
La Terre (Magsat, Oersted, Champ, Sac-c...)



Mars (Mars Global Surveyor)



Soleil (Soho)



Jupiter et ses satellites (Galileo)

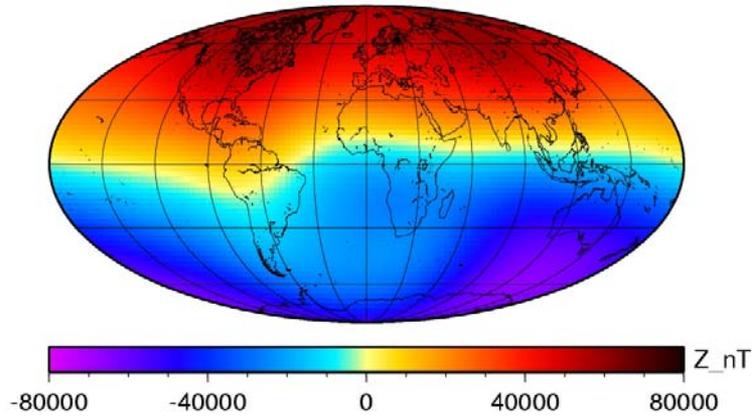


Les observations sont de plus en plus riches pour les modélisateurs.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## Champ magnétique à la surface terrestre.

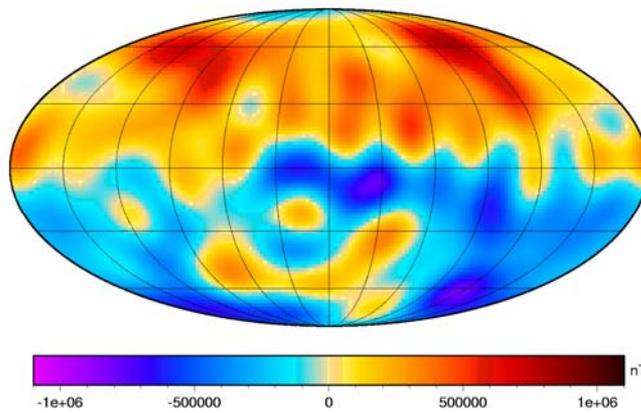


Données satellitaires  
Ørsted, 2000

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## Champ magnétique à l'interface Noyau-Manteau



Données satellitaires  
Ørsted, 2000

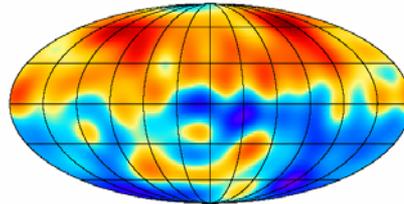
24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

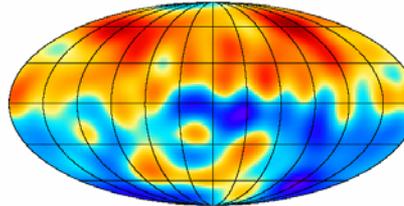
## Observation du champ magnétique terrestre contemporain

Composante radiale du champ magnétique  
à la surface du NOYAU

(Langlais, 2001).



1980, données du satellite MAGSAT



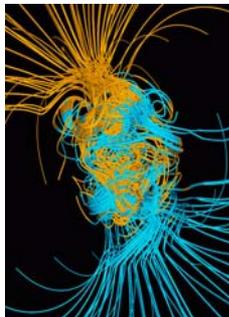
2000, données du satellite OERSTED



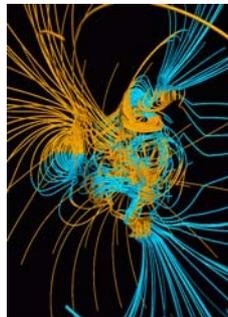
24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

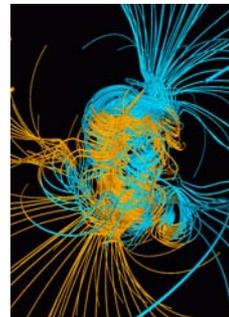
## 2) Modélisation numérique.



t-500 years



t



t+500 years

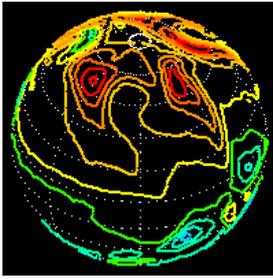
(Glatzmaier and Roberts, 1995).

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

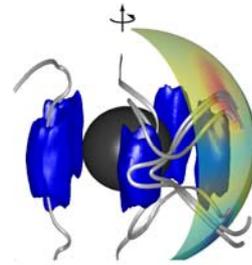
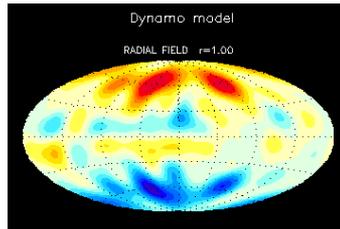
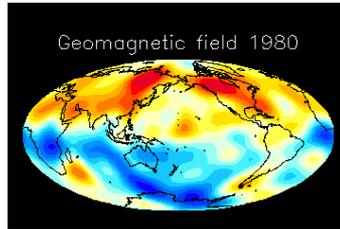
24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## 2) Modélisation numérique.



(Christensen, Olson and Glatzmaier, 2000).



(Aubert and Wicht, 2004)

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

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## 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 modèles numériques sont loin d'être réalistes.

La difficulté dans la modélisation numérique des noyaux planétaires:

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

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

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.

• 1 révolution = 10 Millions d'années.

• Pas de mouvement < 100 Km.

• ...

Quand on baisse  $P_m$ , plus de dynamo...

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

### 3) Modélisation expérimentale et expériences dynamo.

Paramètres **NECESSAIRES** pour une dynamo en laboratoire.

- Le nombre de Reynolds magnétique (compare induction et diffusion du champ magnétique):

$$\text{Re}_m = \frac{UL}{\lambda} = \mu_0 \sigma UL \geq 50$$

- $\sigma$ :  $\sigma_{\text{sodium}} = 3 \sigma_{\text{gallium}} = 10 \sigma_{\text{mercure}}$ .

- U et L les plus grands « possibles ».

Paramètres **NECESSAIRES** pour une dynamo en laboratoire.

$$Re_m = \frac{UL}{\lambda} = \mu_0 \sigma UL \geq 50$$

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

$$P_m \sim 10^6$$

**Dynamo turbulente !!**

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Paramètres **NECESSAIRES** pour une dynamo en laboratoire.

$$Re_m = \frac{UL}{\lambda} = \mu_0 \sigma UL \geq 50$$

• Puissance à injecter pour réaliser une expérience **Dynamo turbulente**

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

$$(\rho \lambda^3)_{\text{mercure}} = 10 (\rho \lambda^3)_{\text{gallium}} = 1000 (\rho \lambda^3)_{\text{sodium}}$$

**Sodium meilleur candidat pour une dynamo en laboratoire.**

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Paramètres **NECESSAIRES** pour une dynamo en laboratoire.

$$Re_m = \frac{UL}{\lambda} = \mu_0 \sigma UL \geq 50 \quad + \quad P \approx \rho \lambda^3 \frac{Re_m^3}{L}$$

### Expérience en sodium.

• Si  $L=1\text{m} \rightarrow P \sim 100 \text{ kW}$ ,

• si  $L=0.3\text{m} \rightarrow P > 300 \text{ kW}$

(TGV~1000kW)

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.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

### Quelques caractéristiques du **sodium**.

• **Densité**  $\sim 932 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  (~eau)

• **Viscosité cinématique**  $\sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  (~eau)

• **Température de fusion**  $97.8^\circ\text{C}$

• **Peut s'auto enflammer** au contact de l'oxygène vers  $200^\circ\text{C}$ .

• **Explosif** au contact de l'eau (rejet de  $\text{H}_2$ )

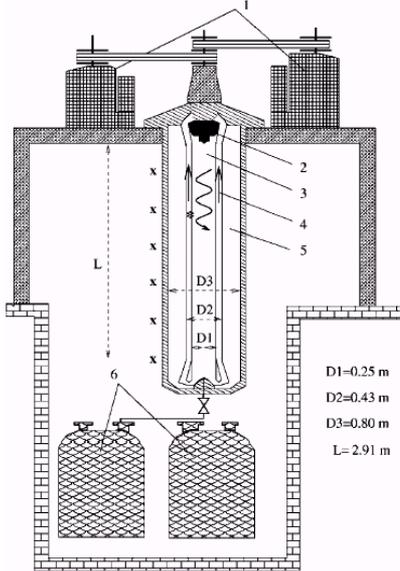
(« Ecole du Sodium » pour se former)

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# La dynamo de Riga.

Gailitis et al., 2000, 2001, 2002



Dynamo de type  
*Ponomarenko*.

3 m haut, 2 m<sup>3</sup> sodium  
liquide

200 kW

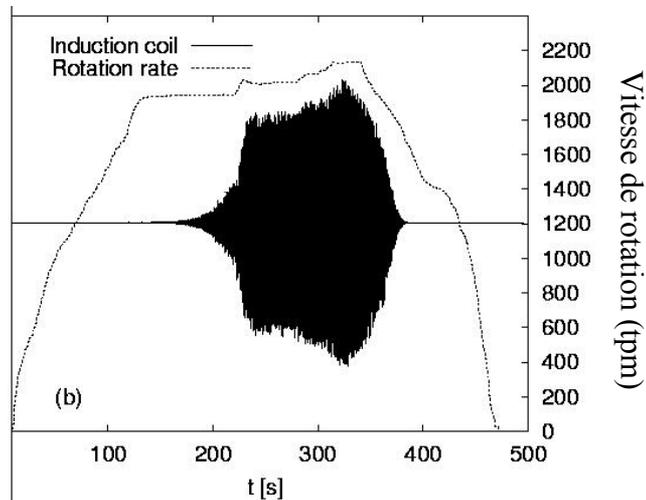
2600 tpm

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# La dynamo de Riga

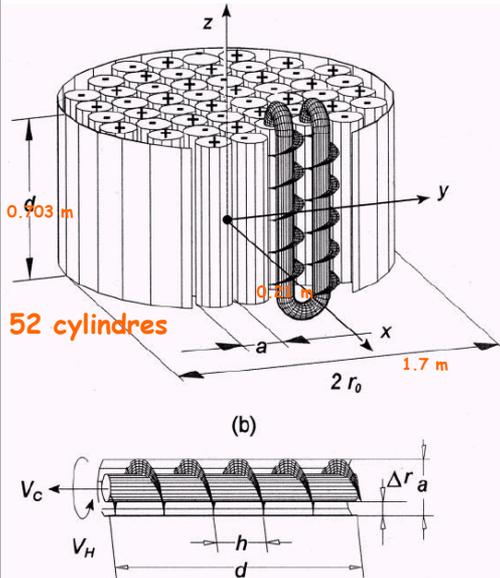
Juillet 2000 : apparition d'un champ magnétique



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# La dynamo de Karlsruhe.



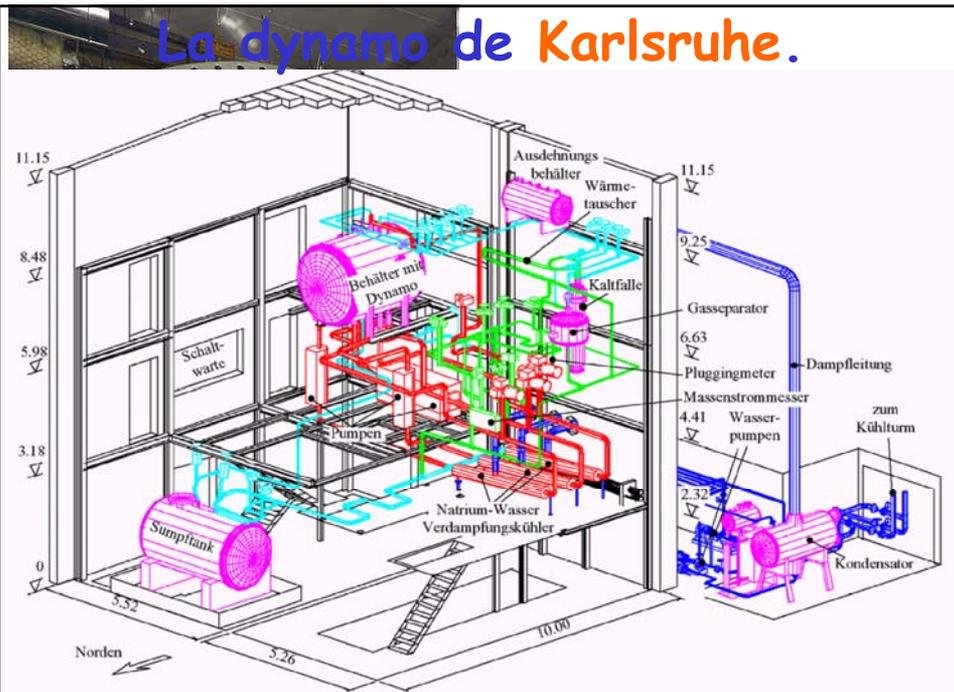
Dynamo de type *G.O. Roberts*.

(1600 litres Sodium, 630 kW)

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

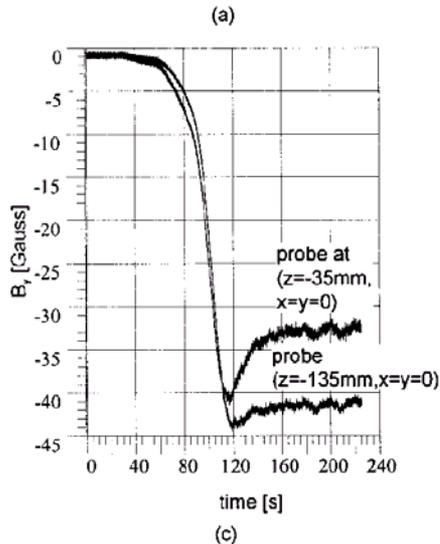
# La dynamo de Karlsruhe.



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# La dynamo de Karlsruhe.



(Müller and Stieglitz, 2000)

(Stieglitz and Müller, 2001)

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## Conclusions de Riga et Karlsruhe.

.L'effet dynamo est maintenant observé en laboratoire dans un métal liquide !!!

.2 dynamos avec des écoulements fortement contraints basés sur des modèles théoriques. Dynamo dite cinématique.

Peut-on observer une dynamo en laboratoire au sein d'un écoulement « homogène »... qui ressemblerait à un écoulement de type noyau planétaire?

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# Une dynamo planétaire ?

$\Omega$

$\Omega + \Delta\Omega$

$a$

Sodium liquide

$a = 1 \text{ m .}$   
 $\Omega = 450 \text{ tr/min.}$   
 $\Delta\Omega = 150 \text{ tr/min.}$   
 $P = 600 \text{ KW.}$

Dynamo ?  
 $(Re_m = 100)$   
 $B = 0.3 \text{ T}$

Cardin, Brito, Jault, Nataf and Masson, 2002

24 Novembre 2004      Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# Instabilités de cisaillement

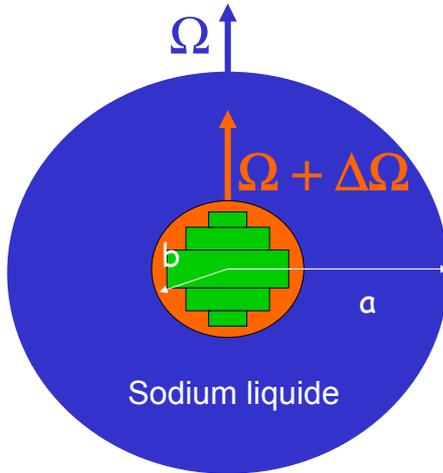
$\Omega$

Schaeffer, 04

24 Novembre 2004      Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# DTS : une maquette 1/5

Derviche Tourneur Sodium



$$a = 0.21 \text{ m}$$

$$b = 0.07 \text{ m}$$

$$\Omega = 2000 \text{ tr/min}$$

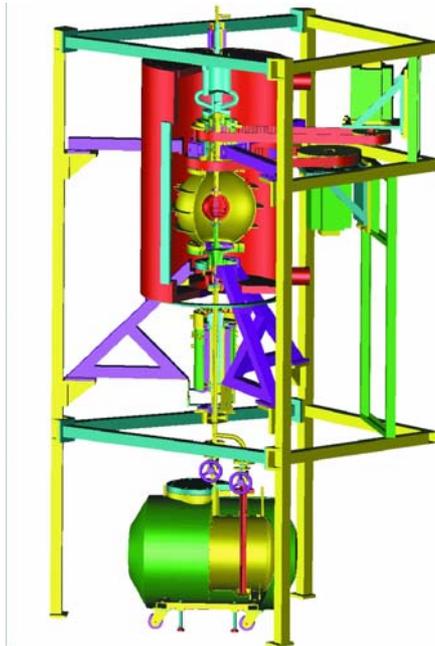
$$\Delta\Omega = \pm 2000 \text{ tr/min}$$

$$P = 22 \text{ KW}$$

$$B = 0.1 \text{ T}$$

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito



## Étude de DTS

Coopération scientifique:

Antoine Alémany (LEGI)  
Christian Chillet (LEG)

Bureau d'étude

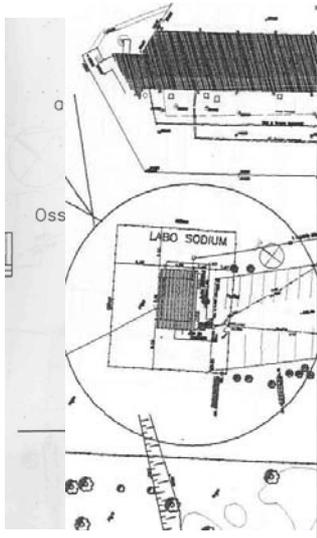


Dominique Grand

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

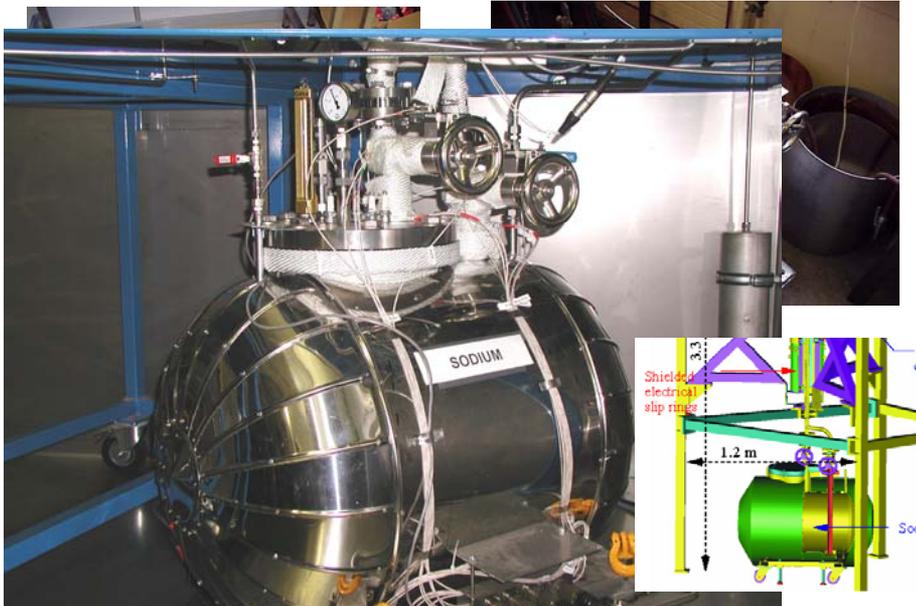
# Laboratoire Géodynamo



24 Novembre 2004

Expérimenta

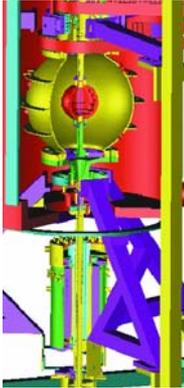
## Le réservoir du stockage



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

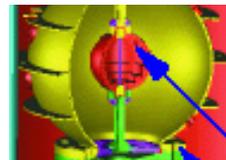
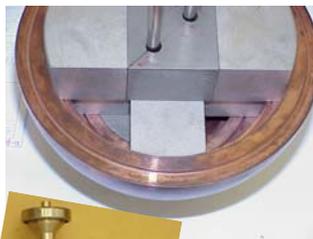
## La sphère externe et le collecteur électrique



24 Novembre 2004

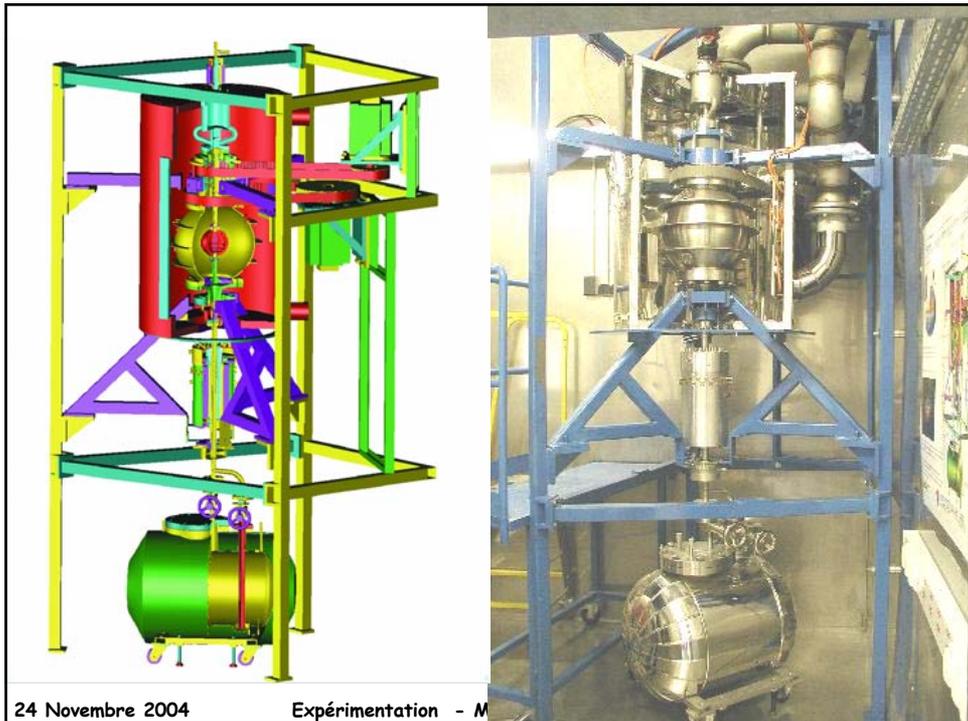
Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## La sphère interne (graine)



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito



24 Novembre 2004

Expérimentation - M

## Première expérience avec le sodium

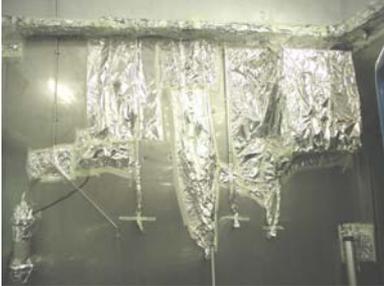
Une expérience « Sécurité »:  
Un incendie provoqué de sodium  
16 Juin 2004

*Objectif:* tester nos procédures de sécurité en cas d'incident majeur et mise au point avec les pompier de Gières.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Une première expérience « Sécurité »:



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Une première expérience « Sécurité »:



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Une première expérience « Sécurité »:



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Une première expérience « Sécurité »:



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## Une première expérience « Sécurité »:

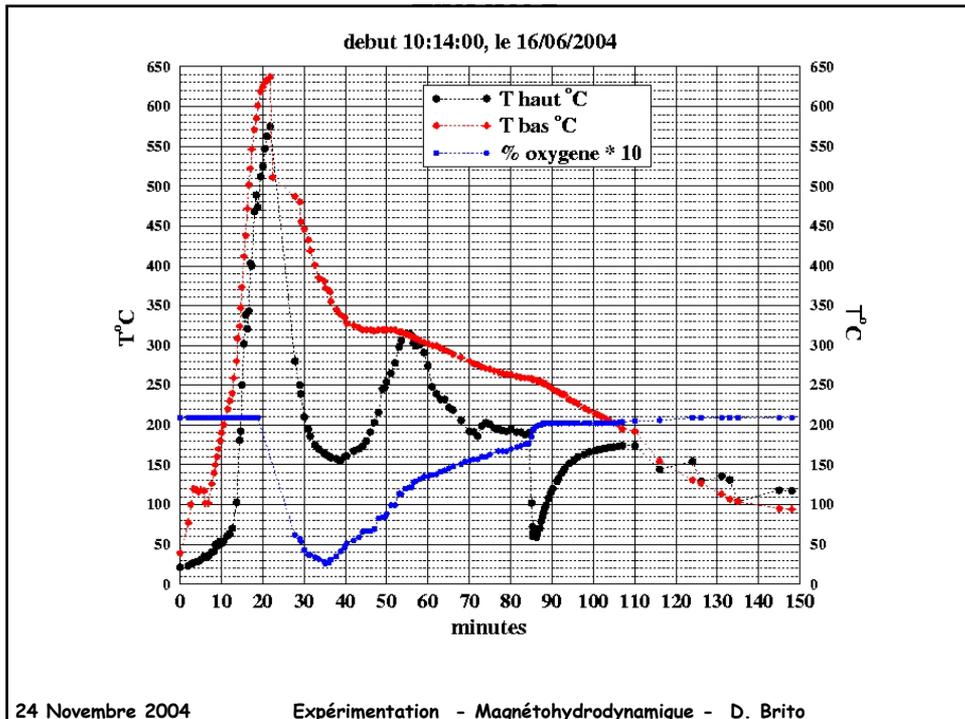


Inertage argon de la  
salle  
d'expérimentation



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Une première expérience « Sécurité »:



*Bilan:* OK.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Seconde expérience avec le sodium

Une expérience « Technologique »:  
Remplissage, rotation et vidange.  
15 Novembre 2004

*Objectif:* tester nos programmes de contrôle,  
nos choix technologiques et la rotation avec du  
sodium.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# Une seconde expérience « Technologique »:

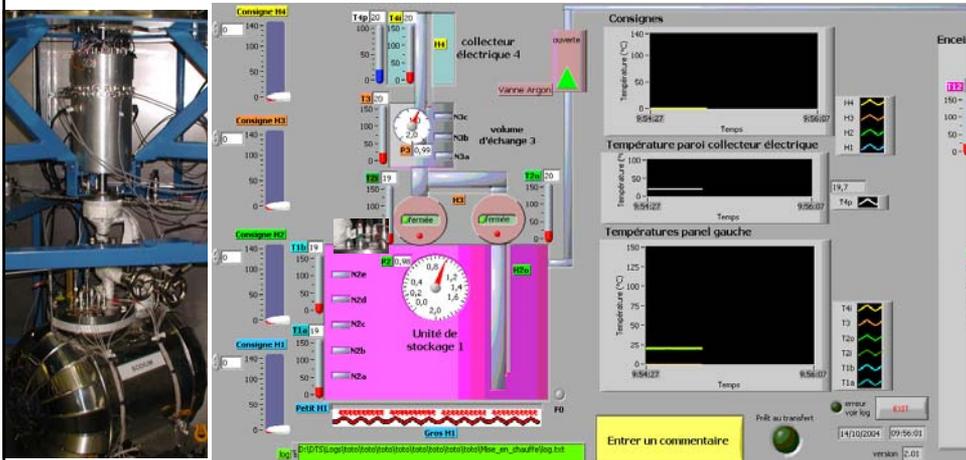
## Réception sodium.



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

# Une seconde expérience « Technologique »: le programme de contrôle



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito



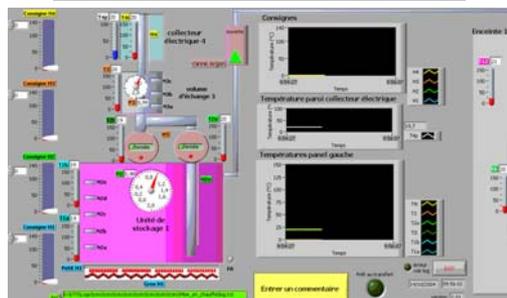
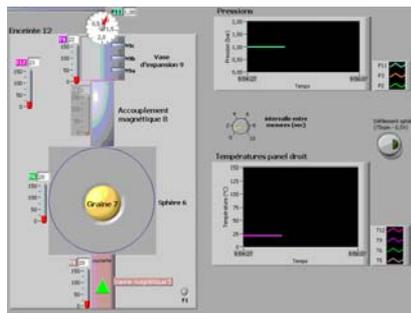
## Une seconde expérience « Technologique »:



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## Une seconde expérience « Technologique »:



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Une seconde expérience « **Technologique** »:

**Bilan:**

Puissance de Chauffage sous-estimée.

Bonne tenue en rotation.

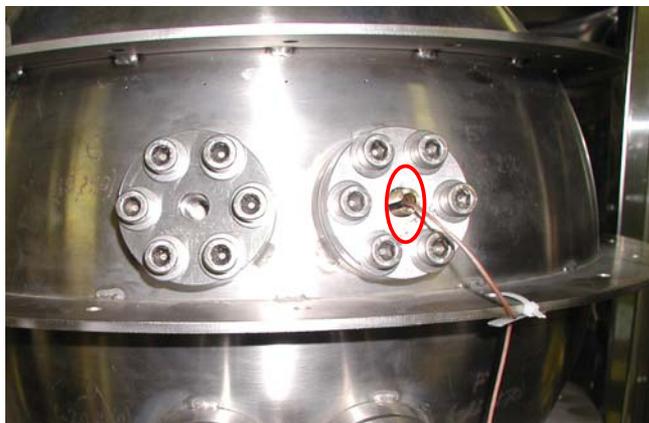
Mode opératoire de remplissage et vidange OK.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Les mesures « **scientifiques** » ( $\neq$ Contrôle)

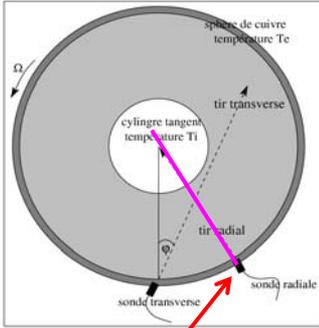
Mesures du champ de vitesse par effet Doppler.



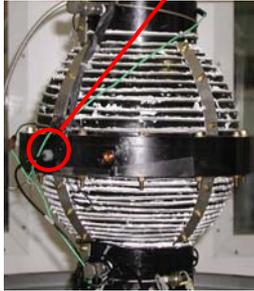
24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

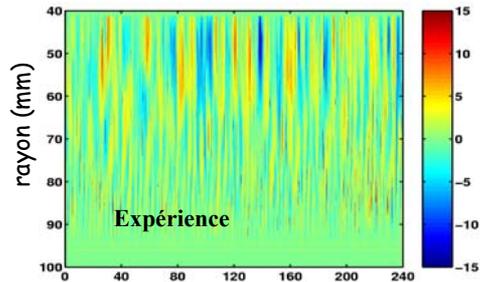
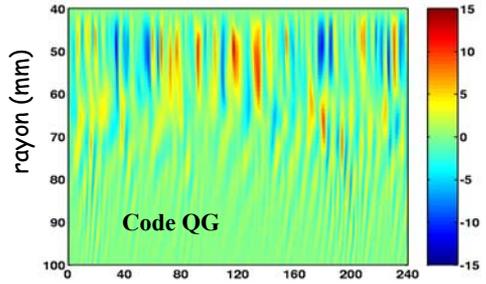
## Plan de l'équateur



## Vélocimétrie Doppler



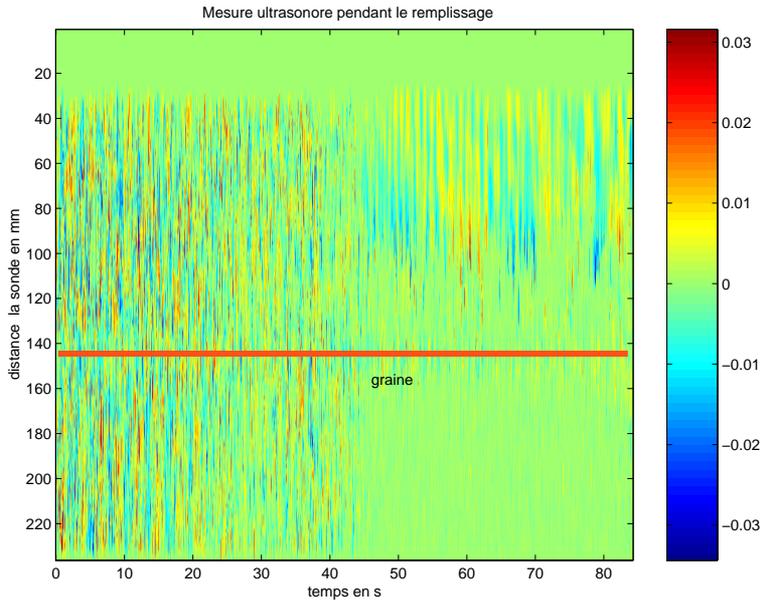
Gillet,04



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

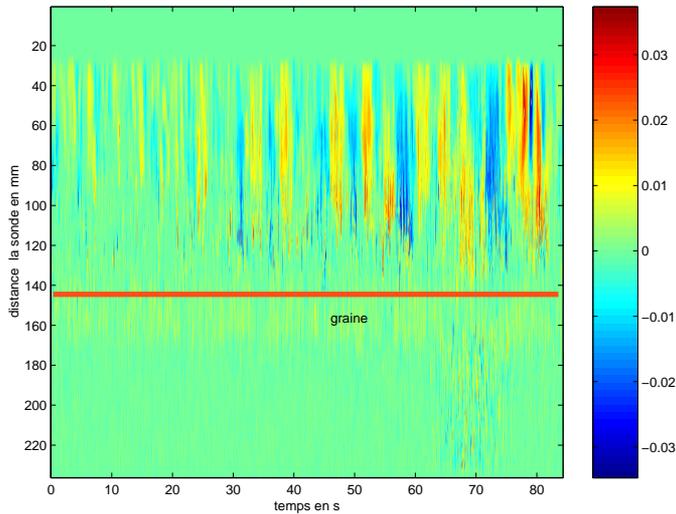
## Vélocimétrie Doppler en sodium pendant le remplissage



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

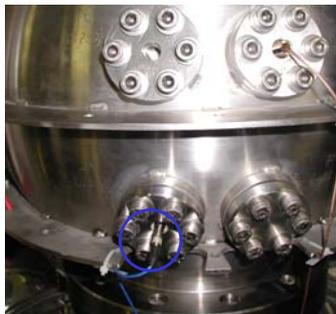
## Vélocimétrie Doppler en sodium pendant le remplissage



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

### Mesures du champ de pression dynamique.



Mesures de différences de potentiel électrique.

Mesures du champ magnétique induit.

Mesures des couples délivrés par les moteurs en rotation.

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

## Enjeux scientifiques de DTS

Défi **technologique** (Mécanique + sodium).

Se rapprocher des mécanisme du noyau terrestre en présence de champ magnétique fort + rotation,  
Caractériser la **turbulence magnétohydrodynamique** en rotation. Approche numérique et expérimentale.

En déduire les caractéristiques de la future expérience **dynamo planétaire** ?

24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito

Le travail de l'équipe du moment + les docteurs...



24 Novembre 2004

Expérimentation - Magnétohydrodynamique - D. Brito