

Equipe GEODYNAMO

Comprendre le champ magnétique terrestre



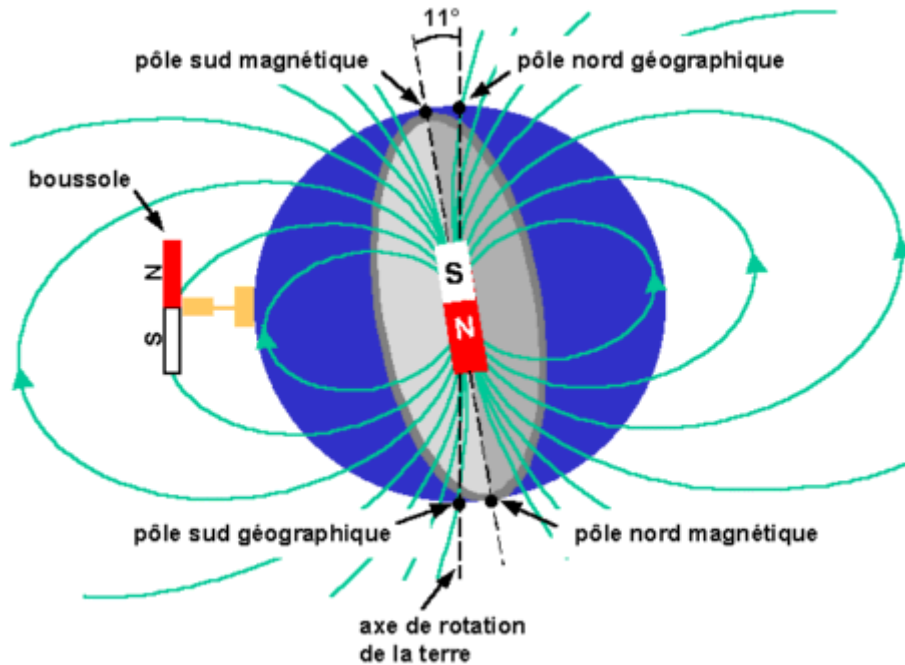
Maquette d'une cuillère indiquant le sud
(appelée *sinan*) du temps des [Han](#) (206 avant J.-C. - 220 après J.-C.)



Boussole

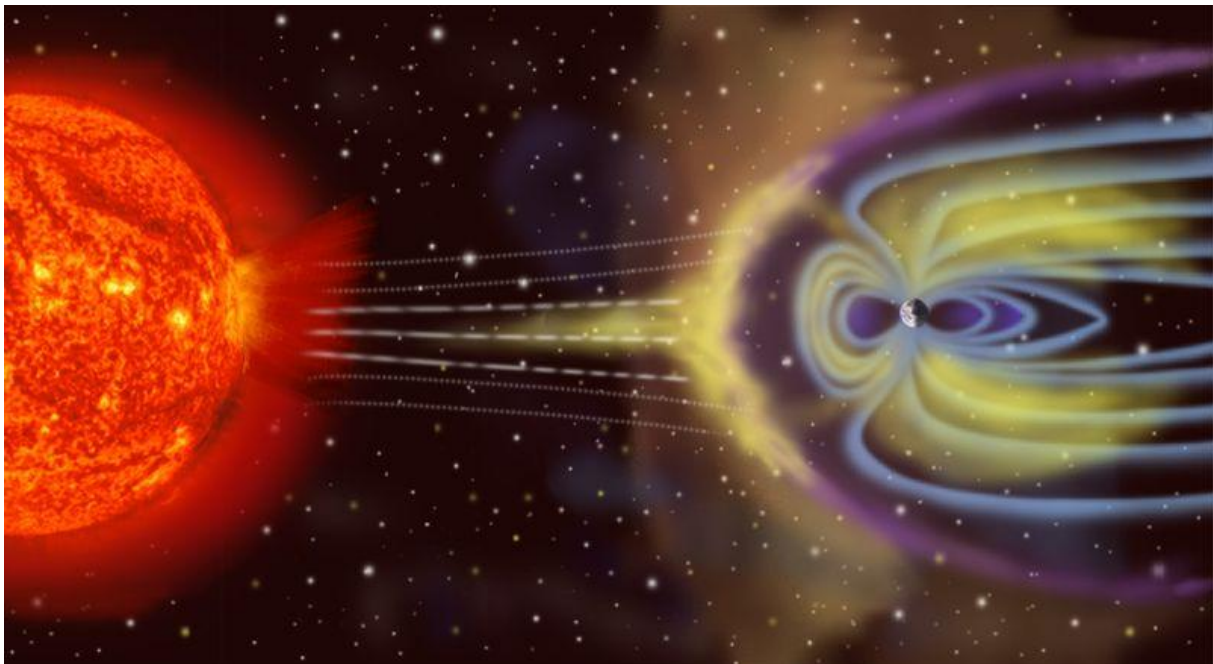
CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

Il y a un décalage entre le pôle géographique et magnétique



Le champ magnétique terrestre

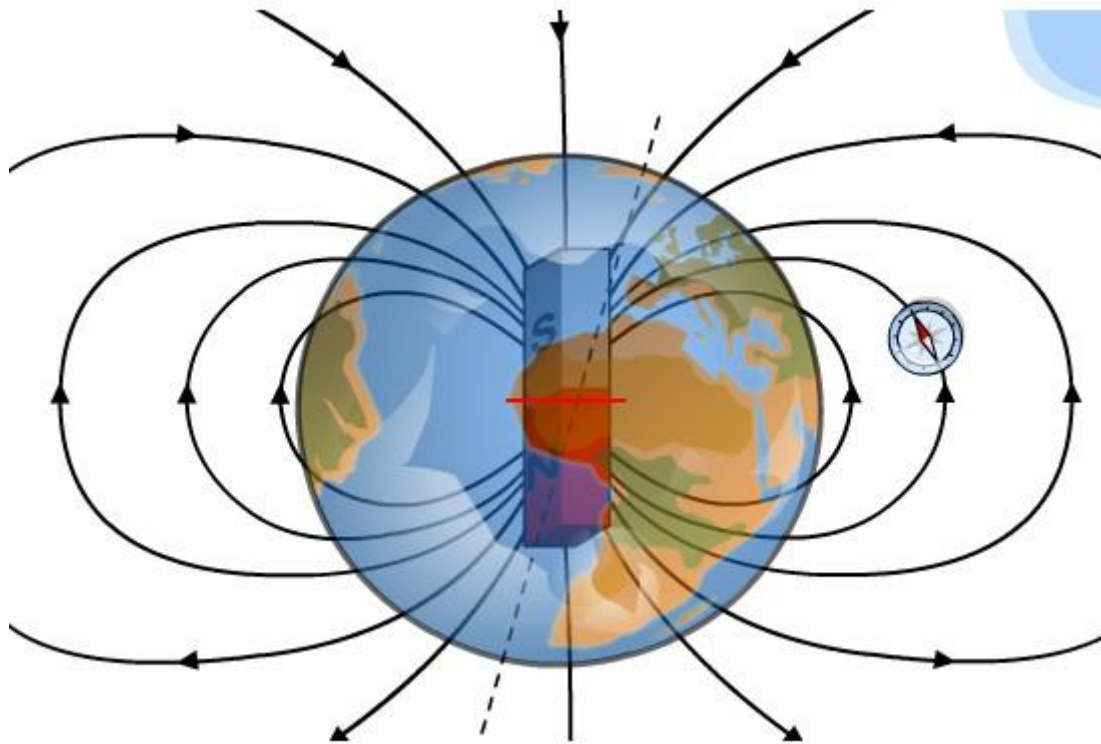
(Université Paul Sabatier, 2000)



Source : NASA

Le champ magnétique nous protège des rayons cosmiques

Pourquoi il n'y a pas un gros aimant au centre de la terre ?



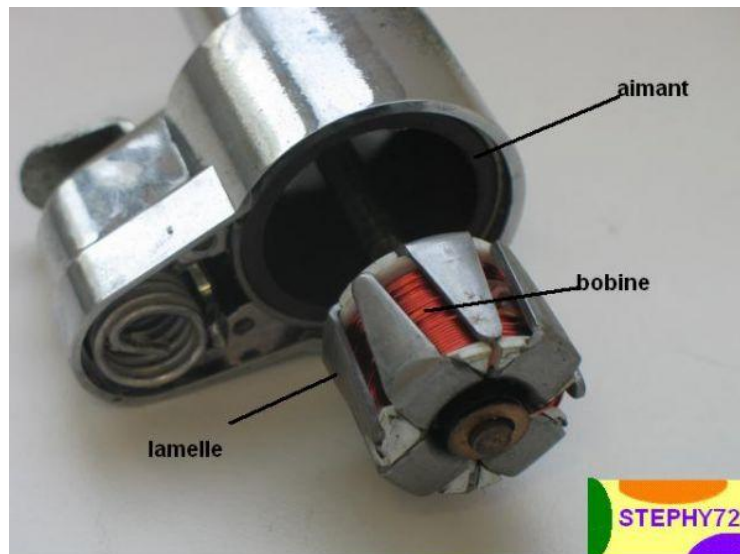
**L'augmentation de la température est d'environ
3 ° C par 100 m dans la croûte terrestre superficielle.**

**Point de Curie : au delà de 800 ° C, l'aimantation du fer
disparaît.**

**Lorsqu'on s'enfonce,
la température dépasse rapidement 800 ° C**

**Ordre de grandeur : la température est approximativement
la profondeur en kilomètres**

DYNAMO TERRESTRE



**On fait tourner un aimant devant un fil conducteur,
du courant circule dans le fil.**

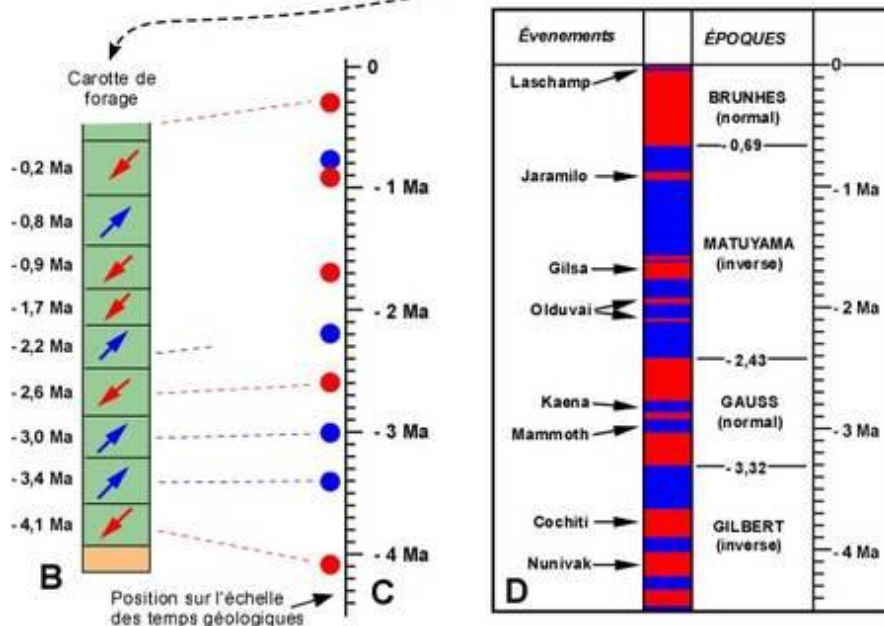
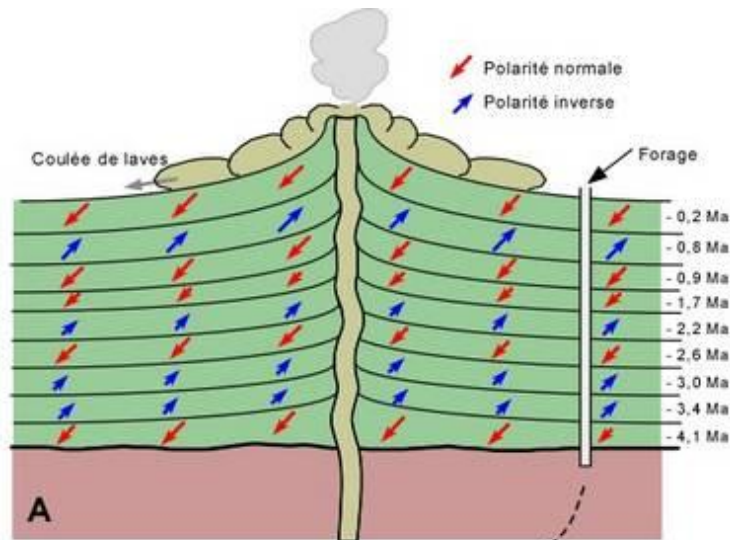
Dans le cas de la Terre, il n'y a pas de guidage du courant.

**1-Tout corps conducteur d'électricité en mouvement dans un
champ magnétique engendre des courants électriques.
(courants de Foucault)**

2- Tout courant électrique engendre un champ magnétique.

**L'effet dynamo est un effet autoentretenu du champ
magnétique et des courants électriques s'engendrant l'un
l'autre à cause du mouvement.**

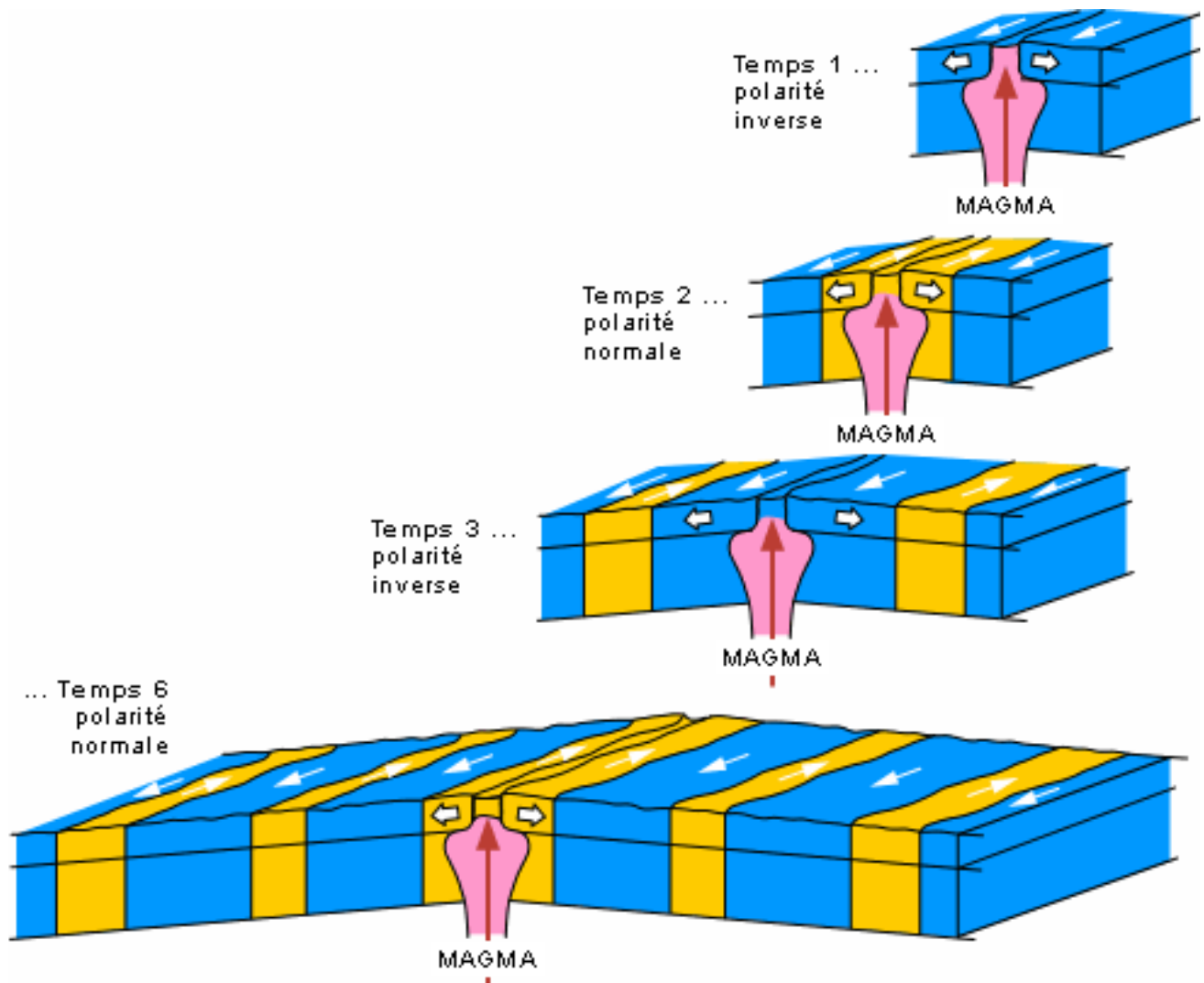
Les inversions du champ magnétique



Crédit université de Laval : Pierre-André Bourque et Pauline Dansereau.

**En se refroidissant, les coulées de lave enregistrent le champ magnétique de la Terre à une époque.
Ces enregistrements donnent lieu à une chronologie dont l'une porte le nom de Bernard Brunhes.**

Les inversions du champ magnétique: suite



Crédit université de Laval : Pierre-André Bourque et Pauline Dansereau.

Autre validation : Etalement des fonds océaniques : dorsales

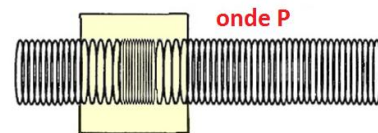
La formation de lithosphère océanique à la dorsale enregistre la polarité du champ magnétique terrestre au moment où cristallise le basalte

STRUCTURE DE LA TERRE ?

Apport de la sismologie : structure interne de la terre

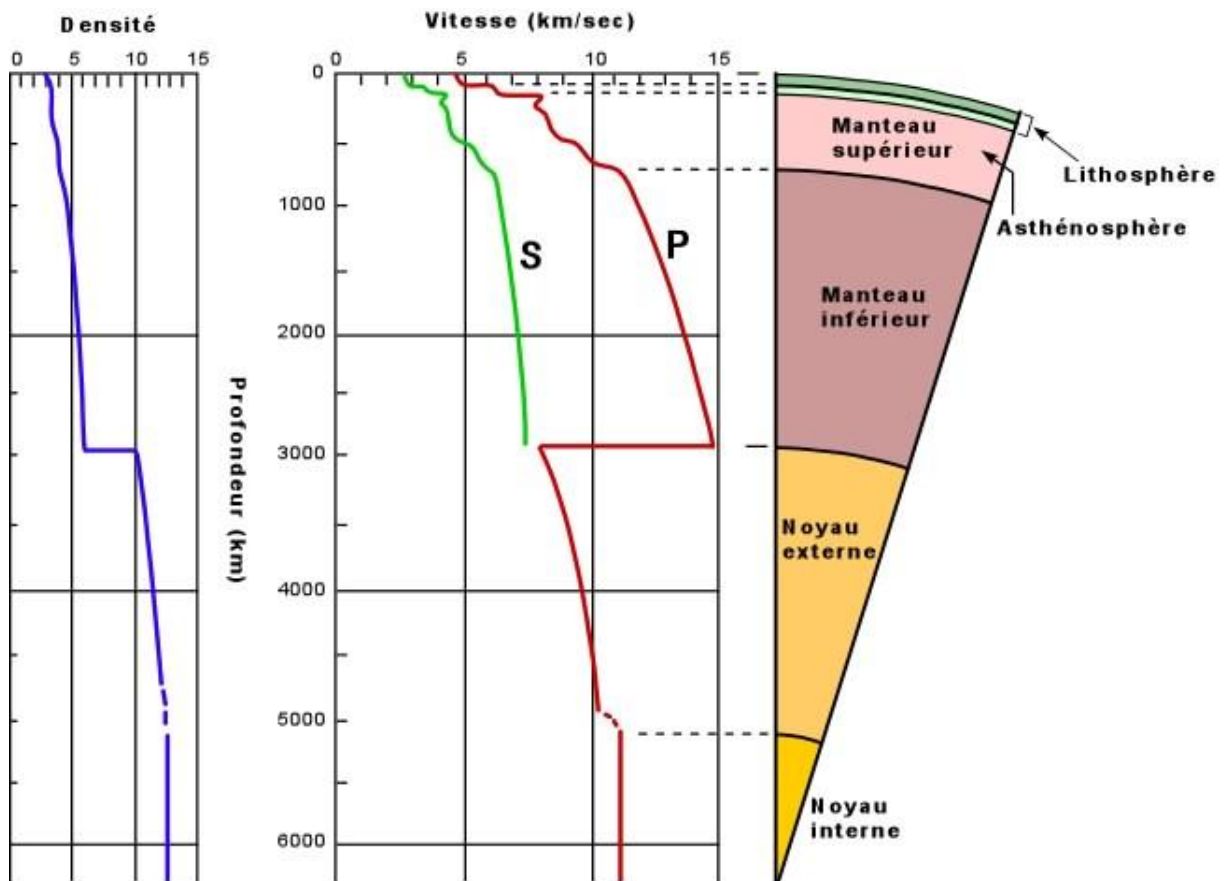
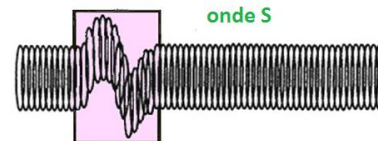
Ondes de compression

P : rouge



Ondes de cisaillement

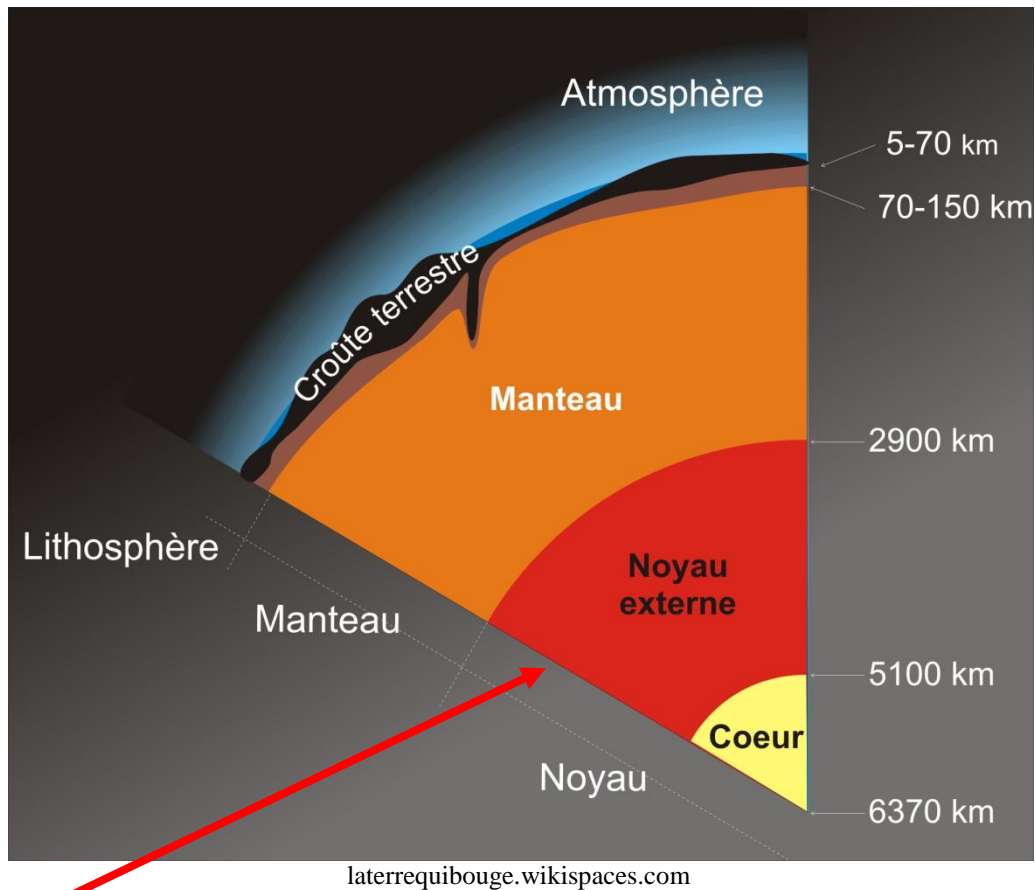
S : vert



<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/img.communes.pt/str.interne.terre.html>

Conclusion : Le noyau externe est liquide,
les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans les milieux liquides.

STRUCTURE DE LA TERRE



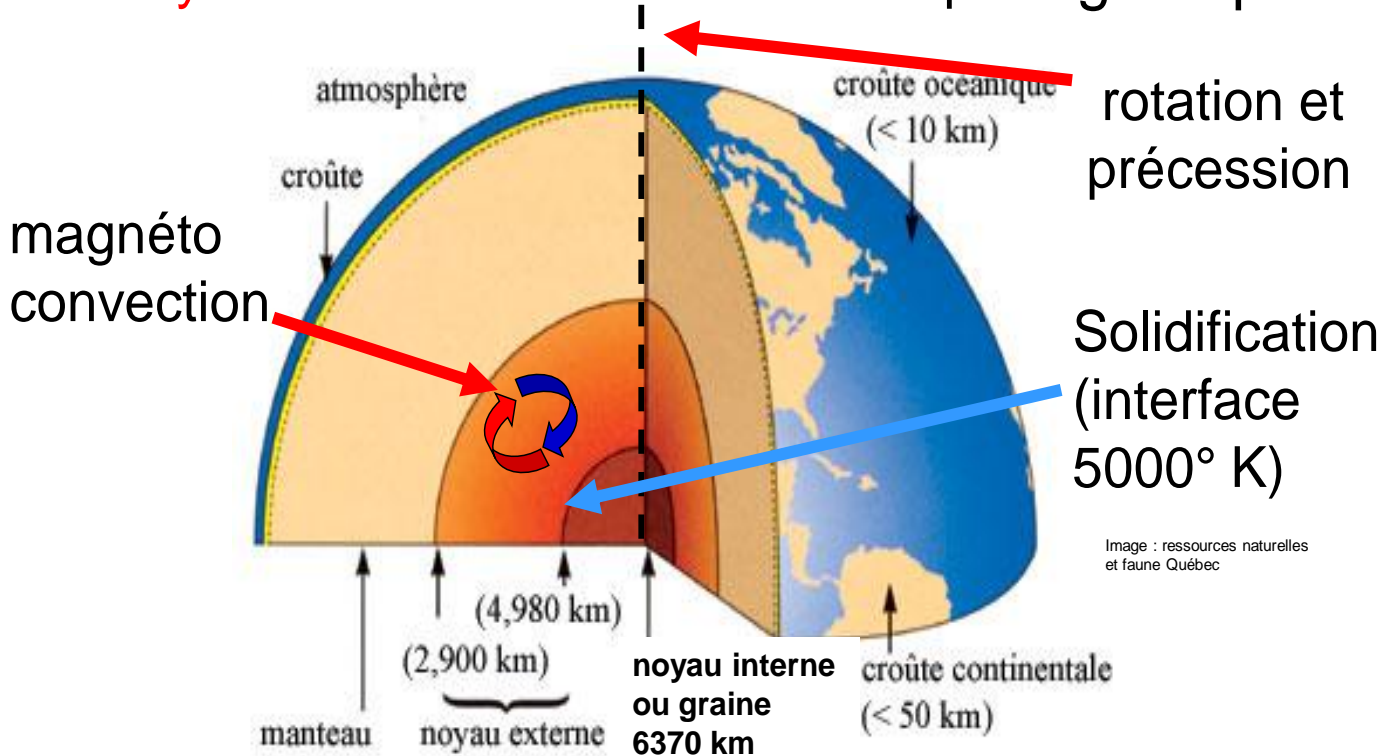
Les mouvements du fer liquide (+ nickel + divers) dans le noyau externe sont à l'origine du champ magnétique terrestre.

⇒ **DYNAMO**

SOURCES DES MOUVEMENTS

Les mouvements du fer liquide dans le noyau externe sont à l'origine du champ magnétique terrestre.

effet dynamo : auto entretien du champ magnétique



Source des mouvements

A) Mécanique : rotation et précession

B) Convection thermique

La présence du champ magnétique influe sur les mouvements.

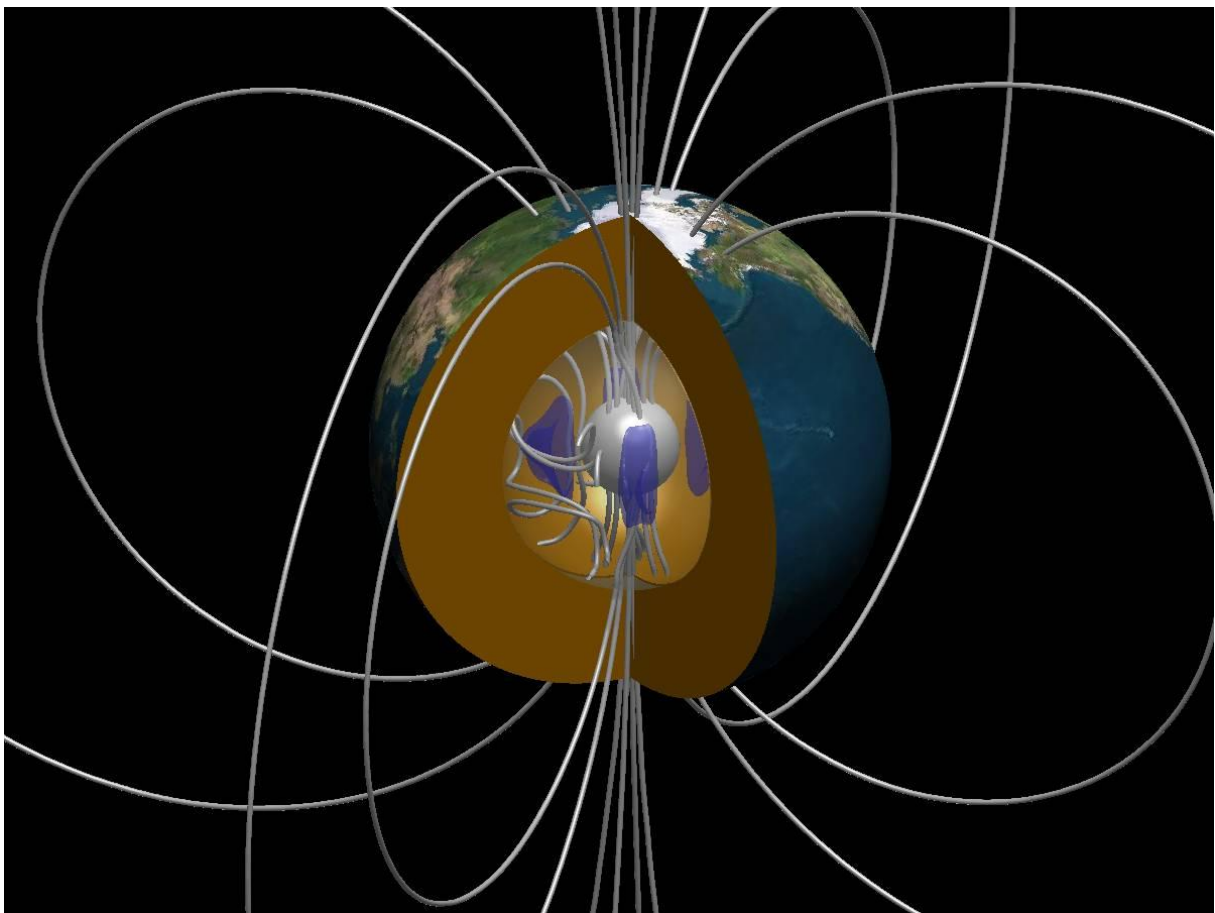
C) Solidification de la graine : Convection thermosolutale

Résolution impossible

Le problème est trop compliqué pour que l'on puisse résoudre toutes les équations simultanément.

Pour étudier du phénomène, on réalise des **simulations numériques** sur ordinateur et des **expériences analogiques** en laboratoire.

SIMULATIONS NUMERIQUES

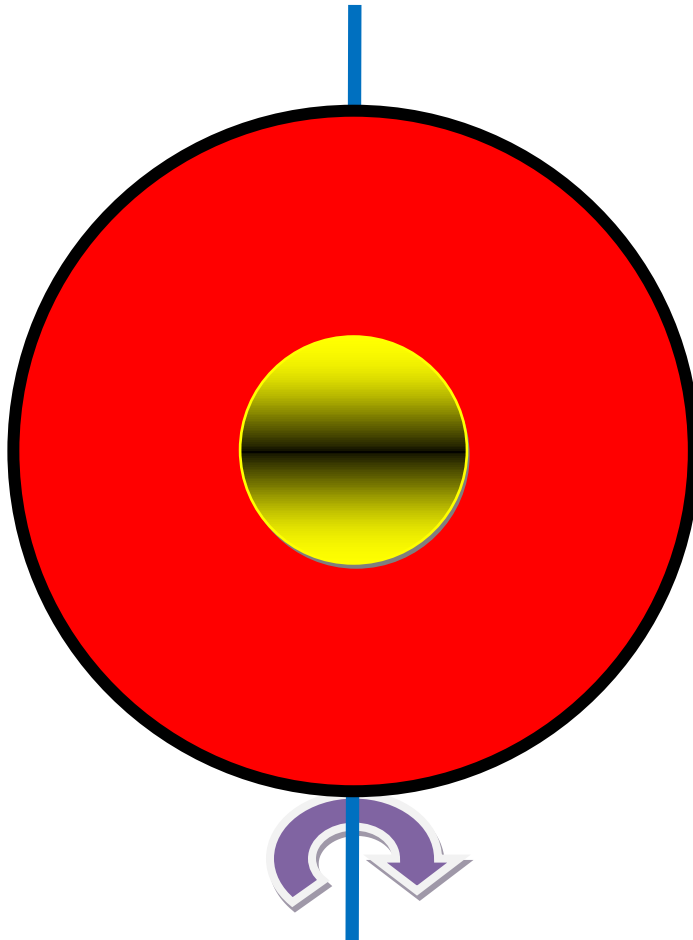


Les mouvements de fluide conducteur (structures tourbillonnaires en bleu) étirent les lignes du champ magnétique, leur donnant de l'énergie.

Crédit : IPGP-Julien Aubert

SIMULATION ANALOGIQUE : maquettes

Similitude géométrique : 2 sphères emboîtées qui tournent.



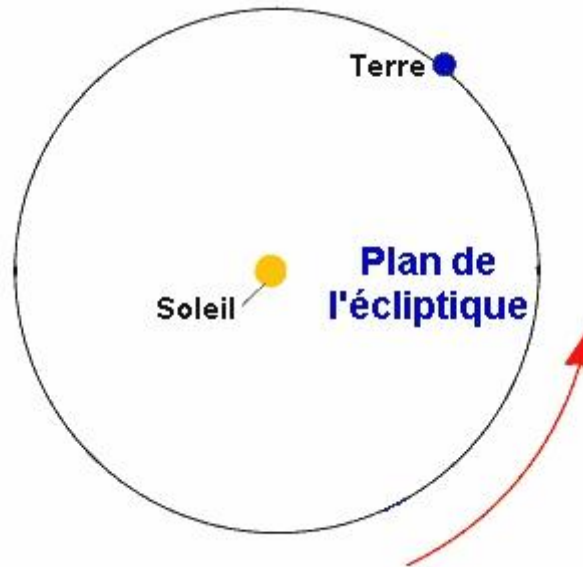
D'autres similitudes liées à la physique sont exploitées :

Paramètres adimensionnels

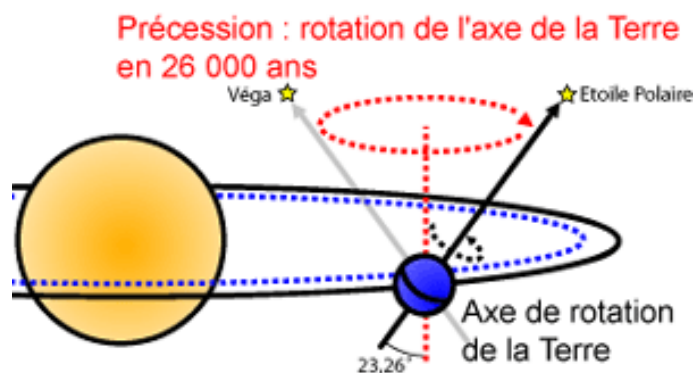
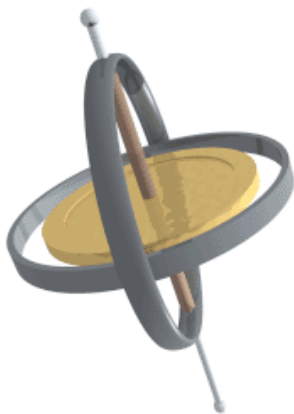
Mon travail : Réalisation des expériences

A) MOUVEMENTS LIES A LA MECANIQUE

Période de rotation = 1 jour
Période de précession = 25800 ans



Plan de l'écliptique



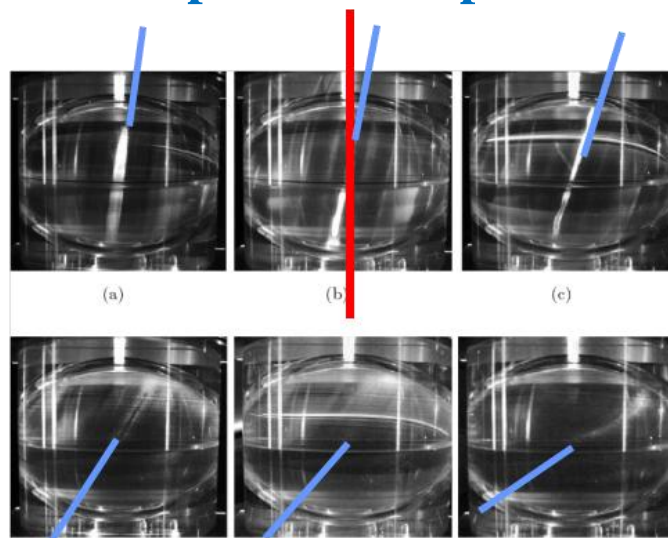
Précession de la Terre

EXPERIENCE DE PRECESSION DE LA TERRE



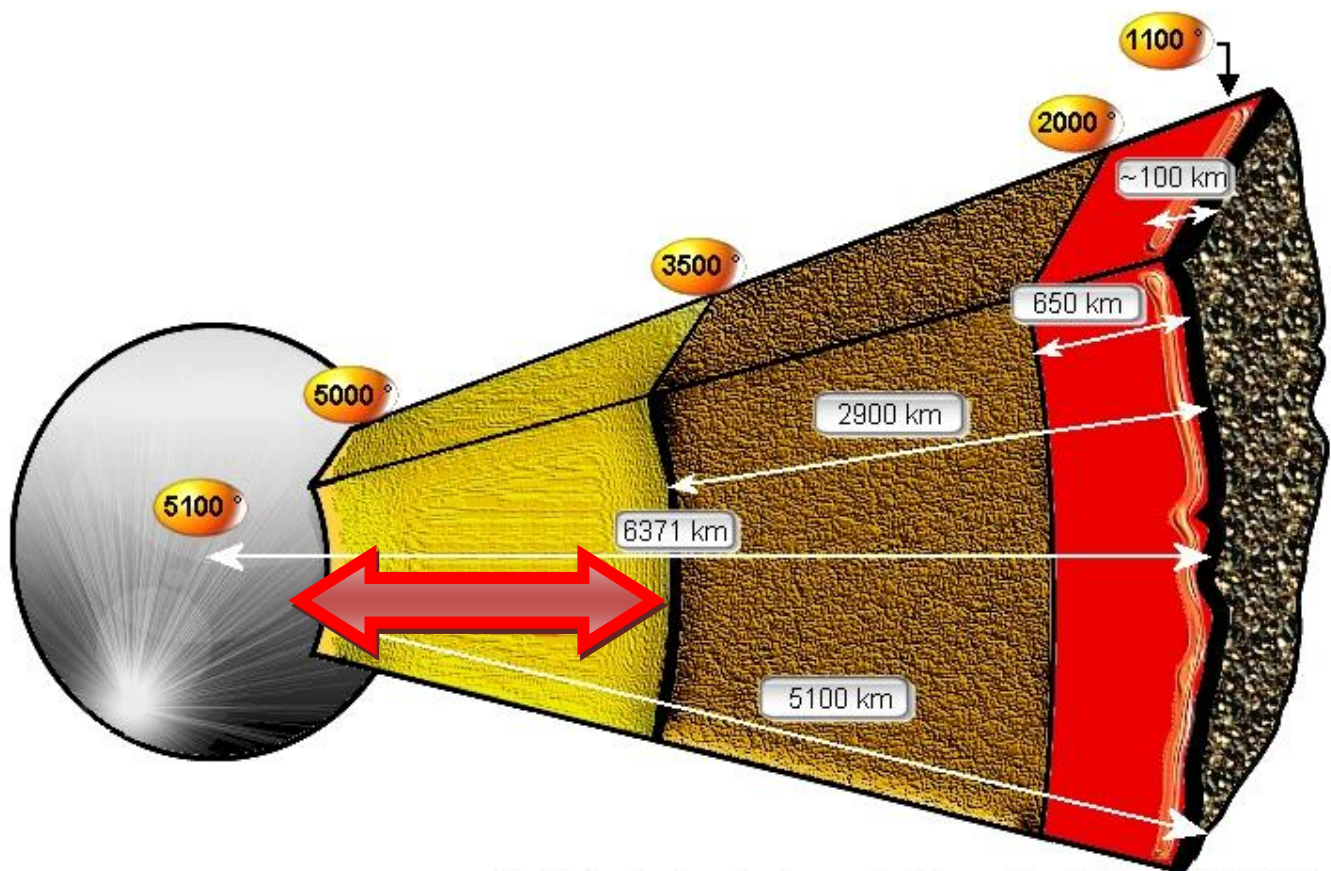
FIG. 3.2 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental CICERON.

Laboratoire : expérience de précession de la Terre



Résultats expérimentaux : décalage des axes de rotation en fonction du forçage.

B) MOUVEMENTS D'ORIGINE THERMIQUE

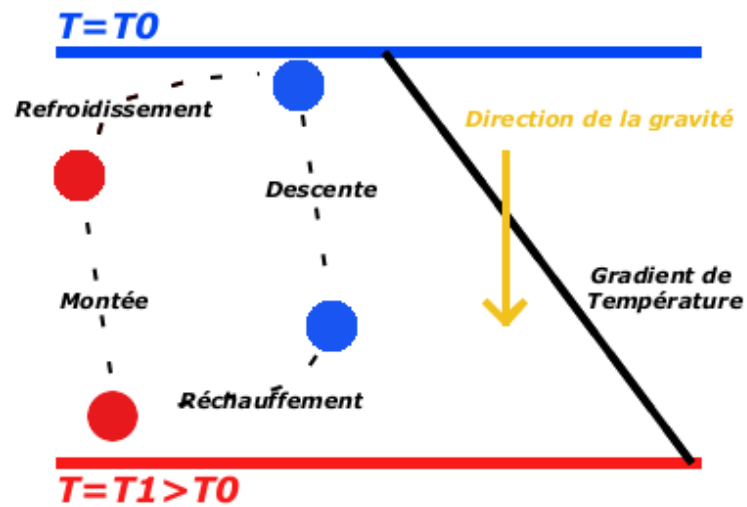


Doc Carbur d'après « La naissance de la Terre » Pour la Science N° 329, 2005

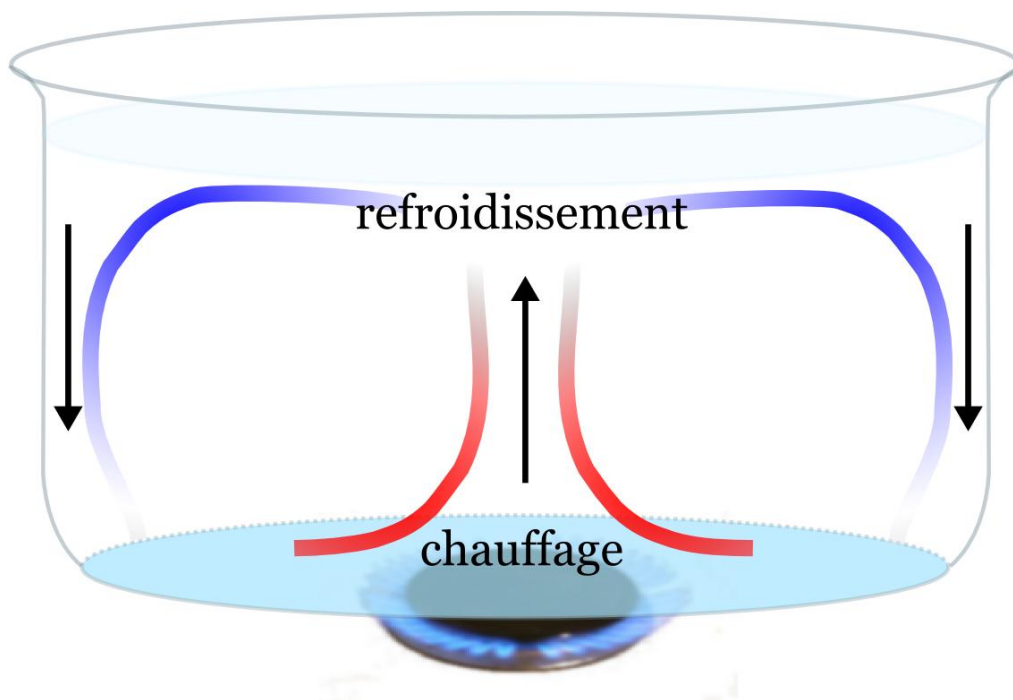
Coupe de la Terre

La différence de température de 1500°C génère des mouvements de **convection** dans le noyau externe **représenté en jaune**, entre la graine et le manteau.

LA CONVECTION

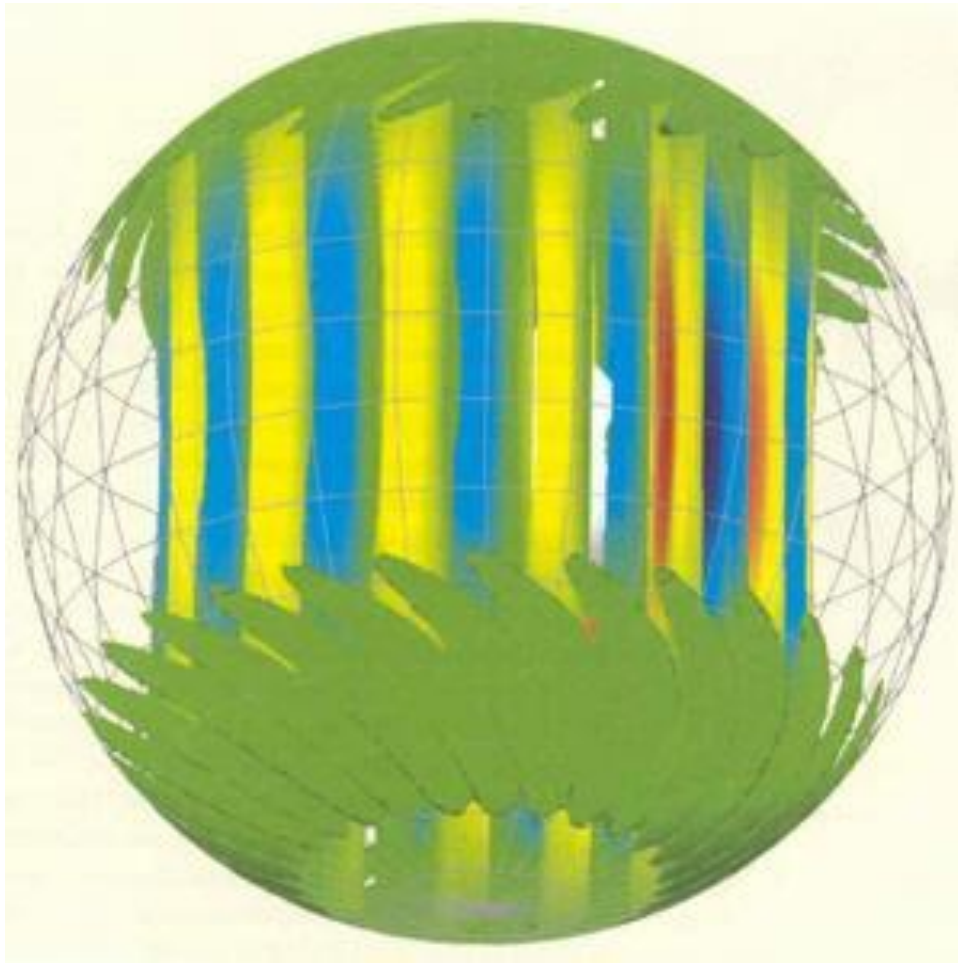


Principe de la convection



Convection à l'intérieur d'une casserole

SIMULATION NUMERIQUE DE CONVECTION



Modélisation numérique des colonnes de convection dans le noyau liquide.

Convection + rotation

Les colonnes de convection sont parallèles à l'axe de rotation.

EXPERIENCE DE CONVECTION EN EAU



Expérience de convection en eau.

Inversion du gradient de température et de la gravité.

EXPERIENCE DE CONVECTION EN GALLIUM



Montage de l'expérience :
On voit les 2 demi-coquilles en cuivre recouvertes
d'isolant.

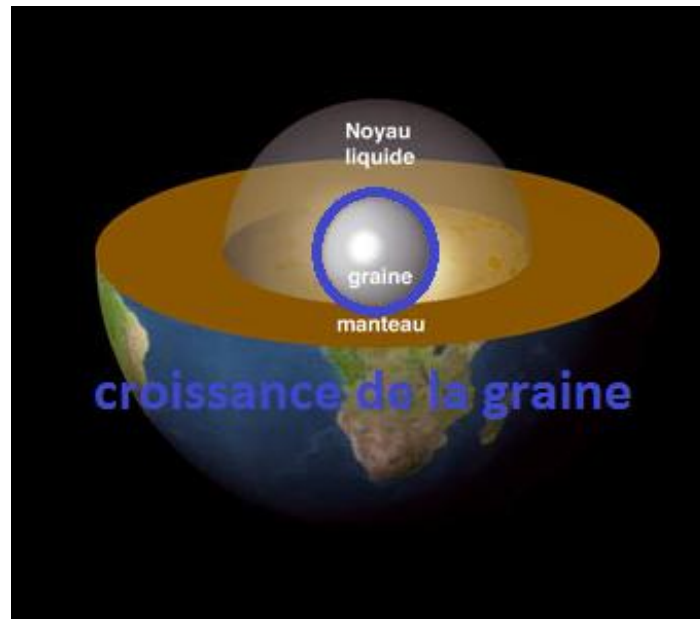
EXPERIENCE DE MAGNETO CONVECTION



Expérience de MAGNETO CONVECTION En gallium liquide

**Addition du champ magnétique toroïdal généré par
les 400 tours de fil.**

C) CRISTALLISATION DE LA GRAINE



**LA GRAINE AUGMENTE DE DIAMETRE
LES ELEMENTS LEGERS RELACHES
GENERENT DU MOUVEMENT DANS LE LIQUIDE**

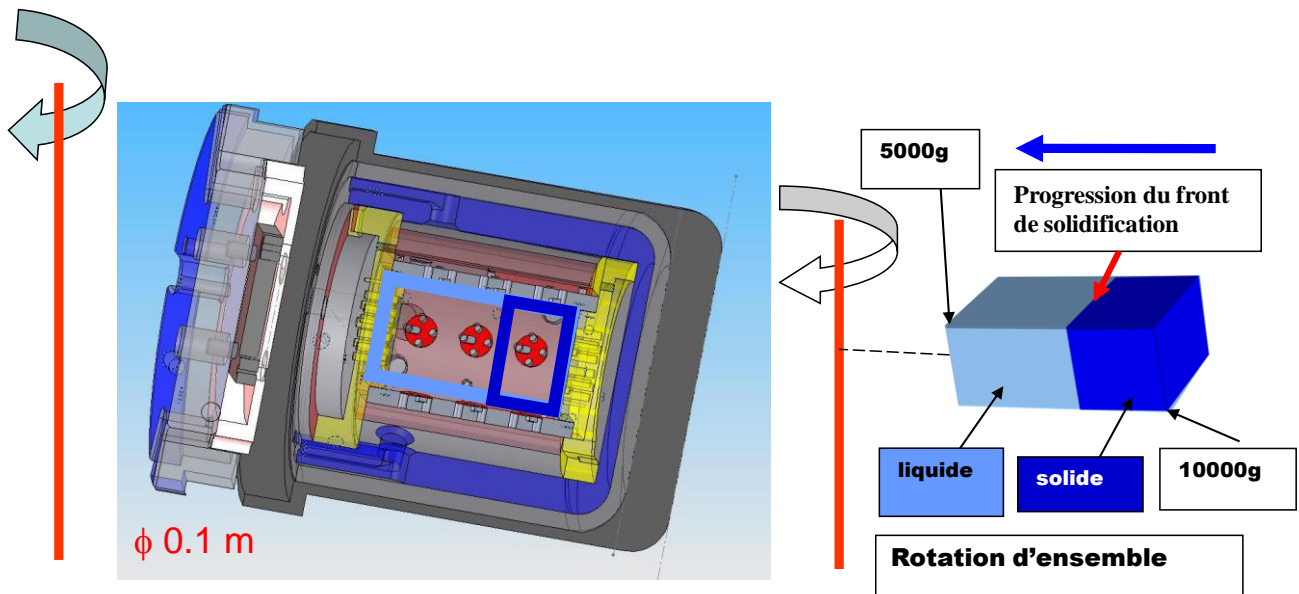
**Ordre de grandeur 100 tonnes par seconde
soit radialement ~ 1 micron par seconde .**

**Phénomène de "convection thermosolutale" due à la
cristallisation de la graine.**

**Les éléments légers relâchés se déplacent radialement du
centre vers l'extérieur.**

EXPERIENCE DE CRISTALLISATION DE LA GRAINE

SOLIDIFICATION à 50° C sous **gradient de pression**



5

Expérience embarquée dans une centrifugeuse

Observation de l'avancée et de la structure du front de solidification par une méthode ultrasonore.

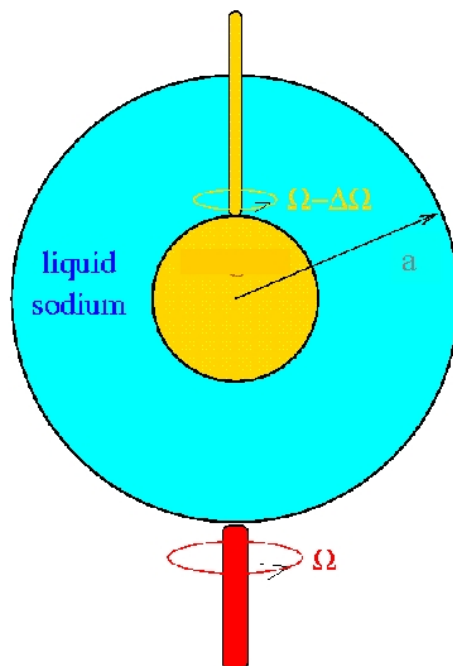
SIMULATION PLUS GLOBALE

IMPOSSIBILITE DE SIMULER LA CONVECTION

ROTATION et FORCES MAGNETIQUES AIMANT AU CENTRE : FORCES MAGNETIQUES

Reynolds magnétique "grand" : $R_m = \mu_0 \cdot \sigma \cdot L \cdot v$
 \Rightarrow SODIUM

Danger : eau



Une dynamo
planétaire en
laboratoire?

Écoulement de sodium
liquide entre deux
sphères en rotation
différentielles



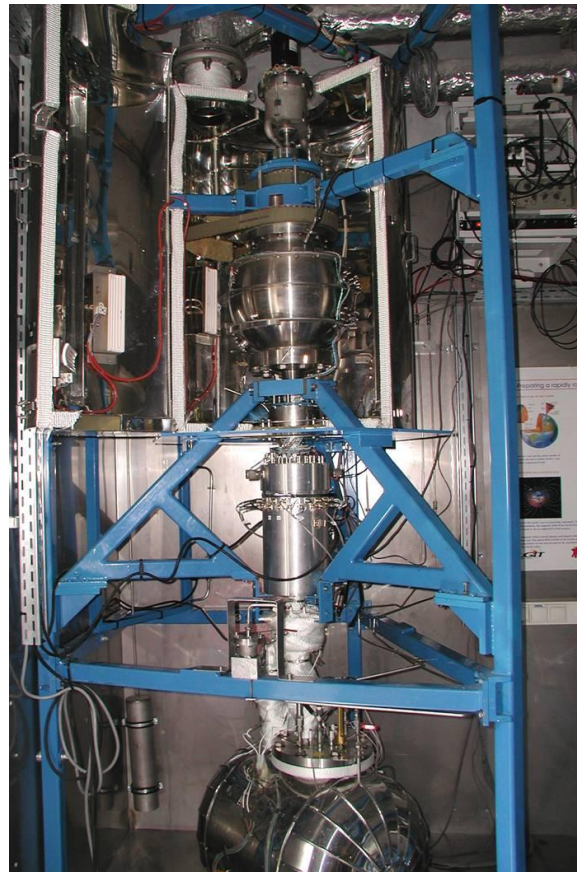
Equipe Géodynamo 2003

Attendre une dynamo : **NON**

CONNAITRE LE CHAMP DE VITESSES DANS LE SODIUM LIQUIDE ET AFFINER LES MODELES NUMERIQUES

* μ_0 perméabilité du vide = $4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$; conductivité électrique = $21 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ (cuivre [Conductivité électrique](#) $59,6 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$)

EXPERIENCE DTS



- Techno : - Joint sodium : accouplement magnétique de puissance**
- Inertage par argon
 - Vanne magnétique
 - Magnetomètres miniatures haute température
 - Sphère taillée dans la masse

DETAILS DE L'EXPERIENCE DTS



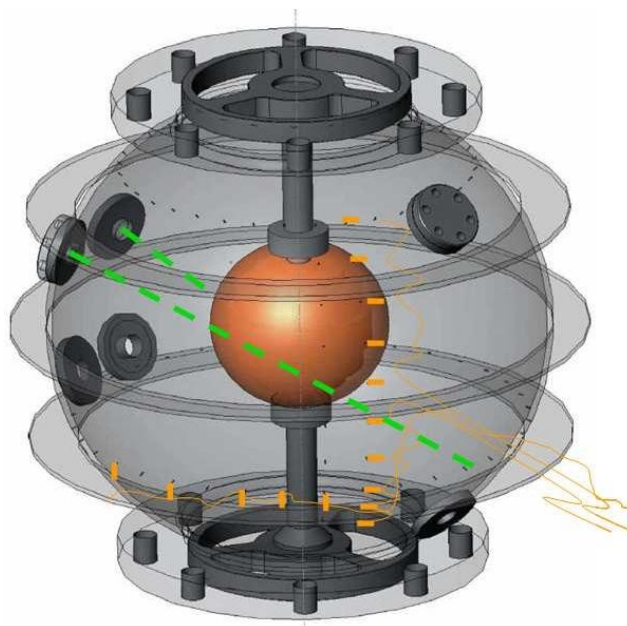
© H. Raguét/CNRS Photothèque

MESURES :

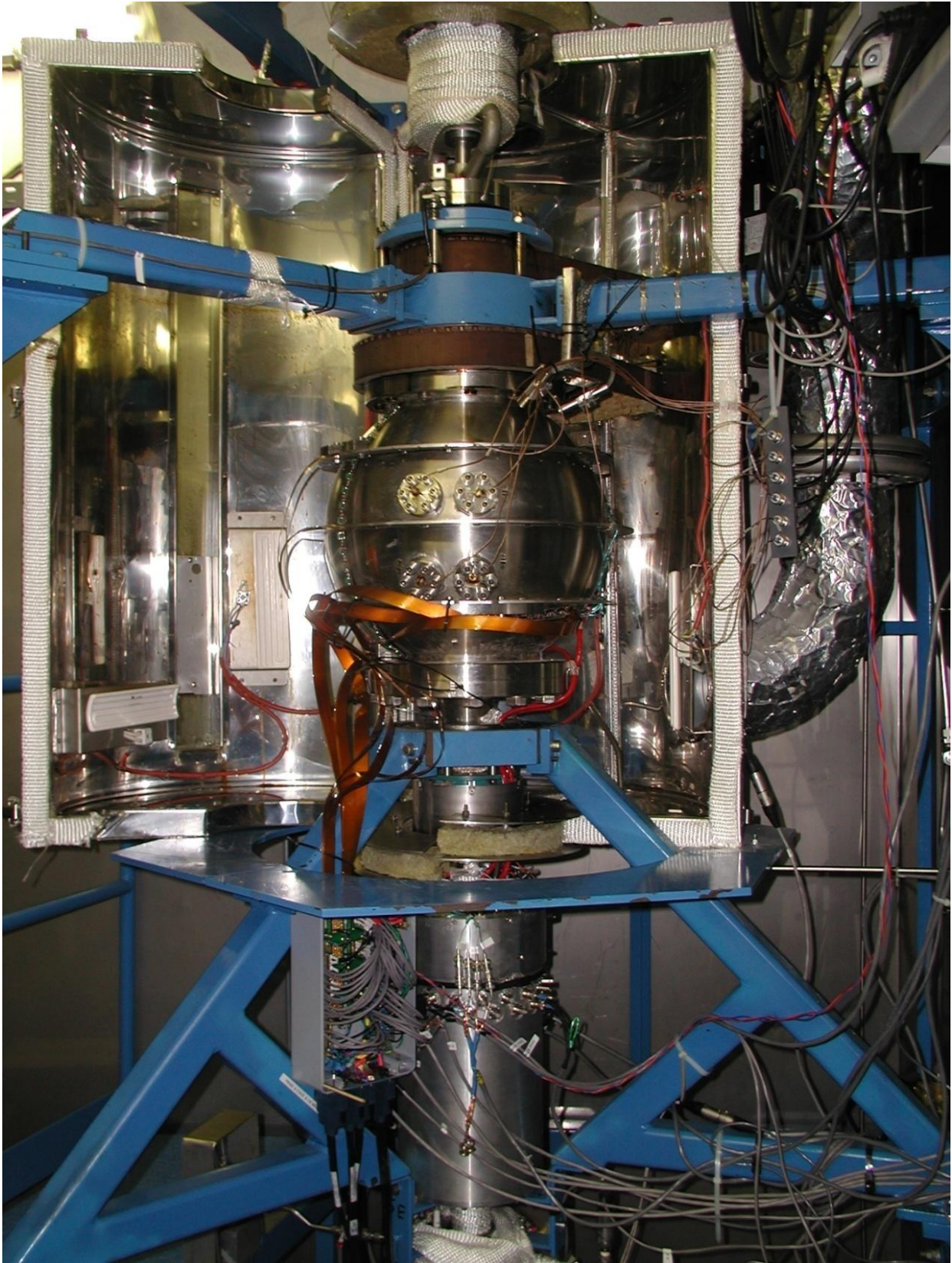
Sondes doppler

Sondes de
Potentiel

Magnétomètres :
Patrick La Rizza



INSTRUMENTATION DTS

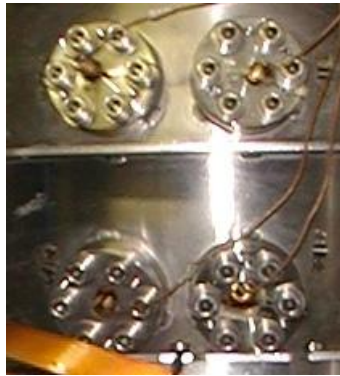


INSTRUMENTATION DTS

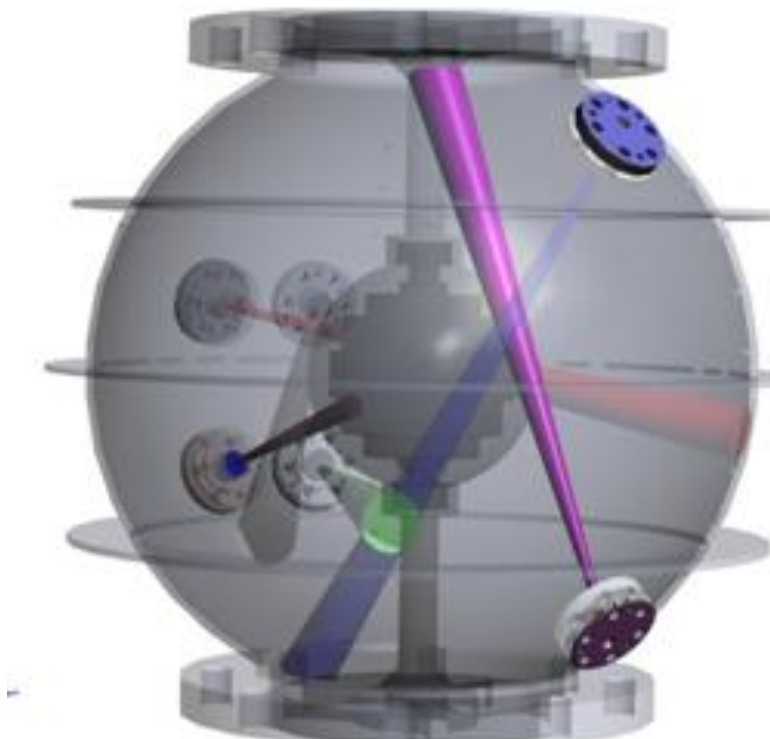


DETAIL DE L'INSTRUMENTATION

Sondes Doppler



Magnétomètres 150°C



Trajet des faisceaux ultrasonores

En pdf 3 D : [20110201_article_sphere_DTS.PDF](#)

EXEMPLE DE RESULTATS :

- **Reconstruction du champ de vitesse**
- **Zone de survitesse "découverte"**
- **Différents types d'ondes identifiées : Alfven**

Pour plus de détails :

<http://isterre.fr/recherche/equipes/geodynamo/Experience-DTS>