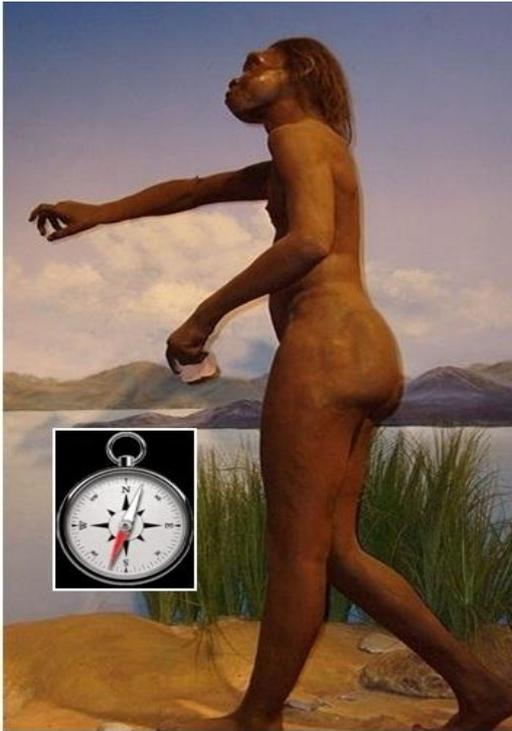


Le champ magnétique terrestre ?



Homo Ergaster
il y a 1.5 million d'années



Homme aujourd'hui

Même lieu : LE CHAMP EST INVERSE

Equipe GEODYNAMO

- Comprendre le champ magnétique

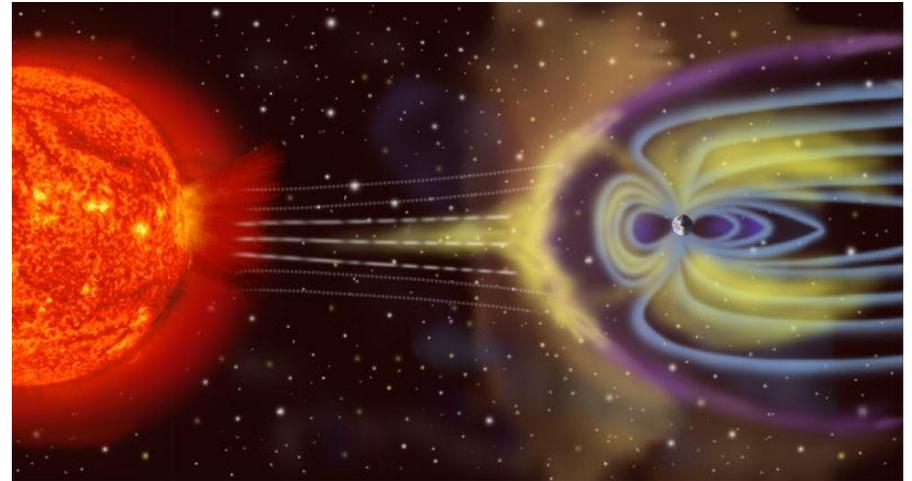
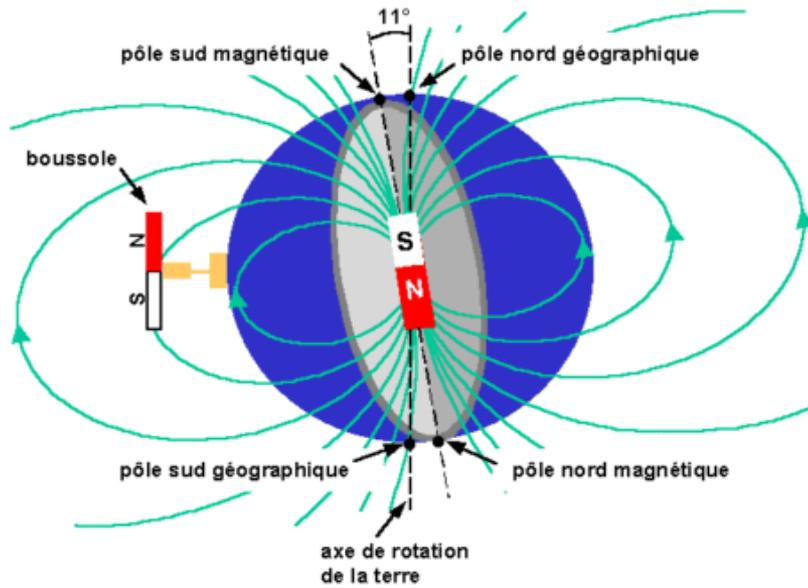
Maquette d'une cuillère en magnétite indiquant le sud du temps des [Han](#) (206 avant J.-C. à 220 après J.-C.)



Boussoles d'aujourd'hui



CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE



Source : NASA

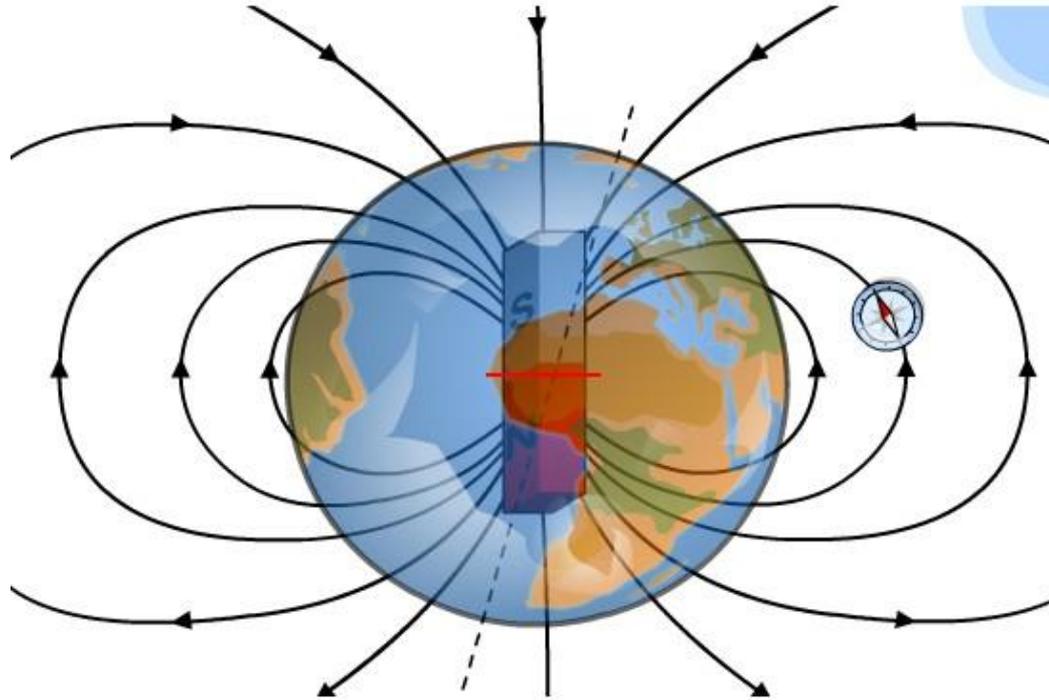
**Le champ magnétique nous protège
des rayons cosmiques**

Le champ magnétique terrestre

(Université Paul Sabatier, 2000)

Il y a un décalage entre le pôle géographique et magnétique

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

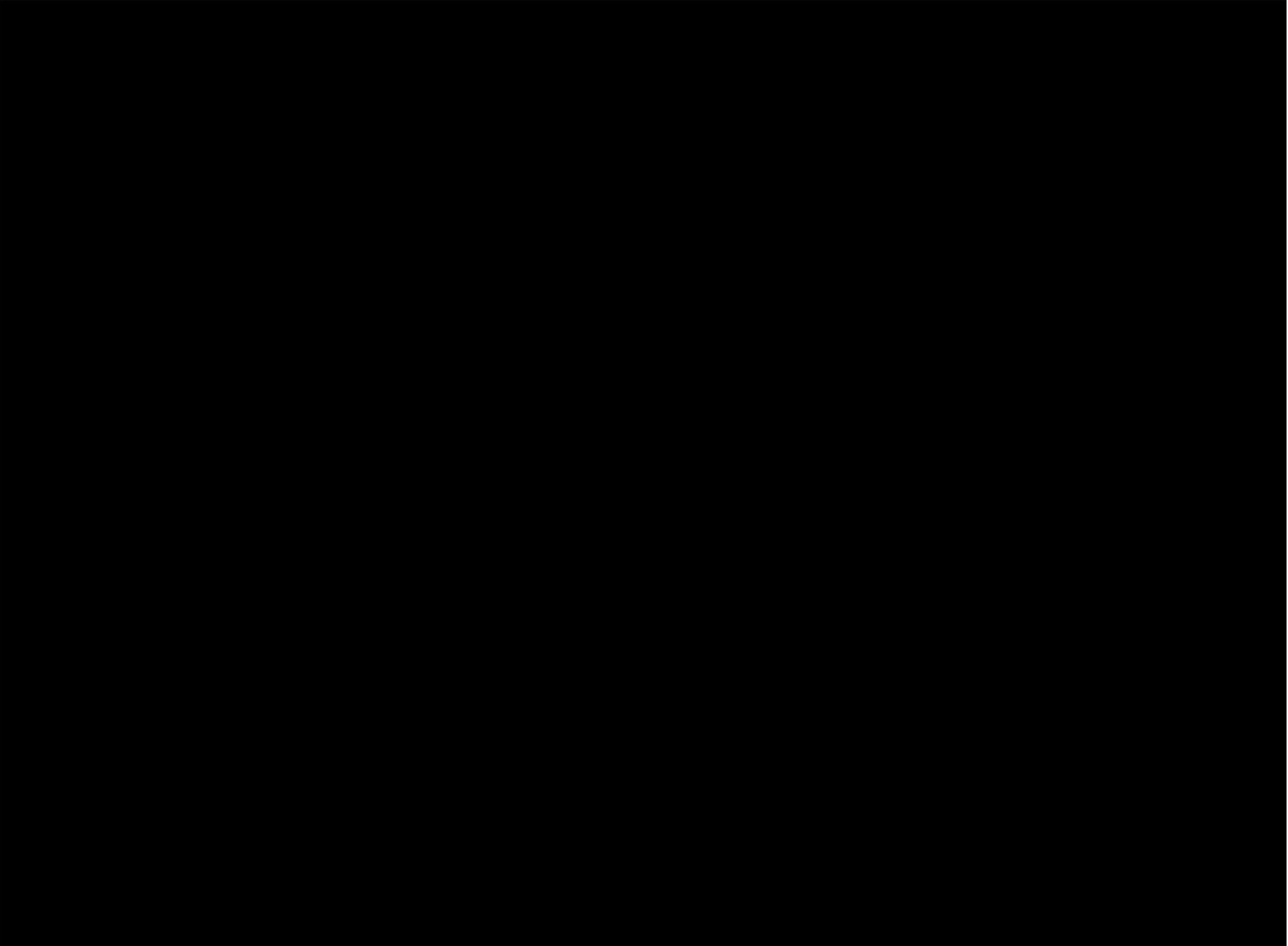


**L'augmentation de la température est d'environ
3 ° C par 100 m dans la croûte terrestre superficielle.
au delà de 800 ° C, l'aimantation du fer disparaît.**

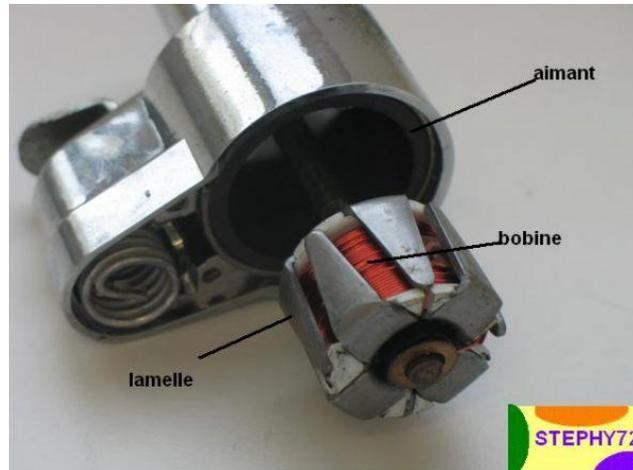
Lorsqu'on s'enfonce, la température dépasse rapidement 800 ° C

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

Point de Curie



DYNAMO TERRESTRE



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

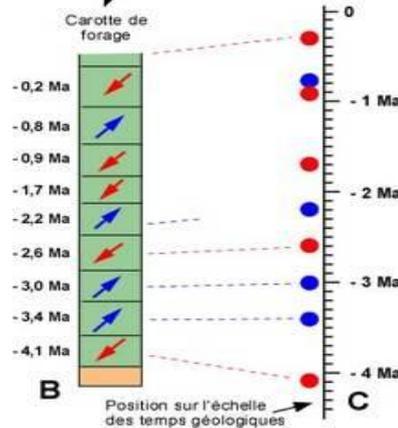
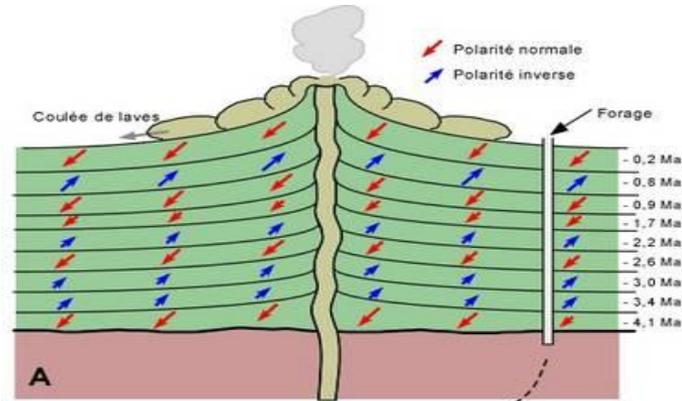
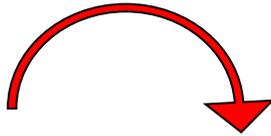
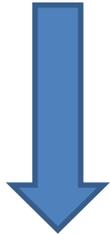
Dans le cas de la Terre, il n'y a pas de guidage du courant.

1-Tout corps conducteur d'électricité en mouvement dans un champ magnétique engendre des courants électriques.

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



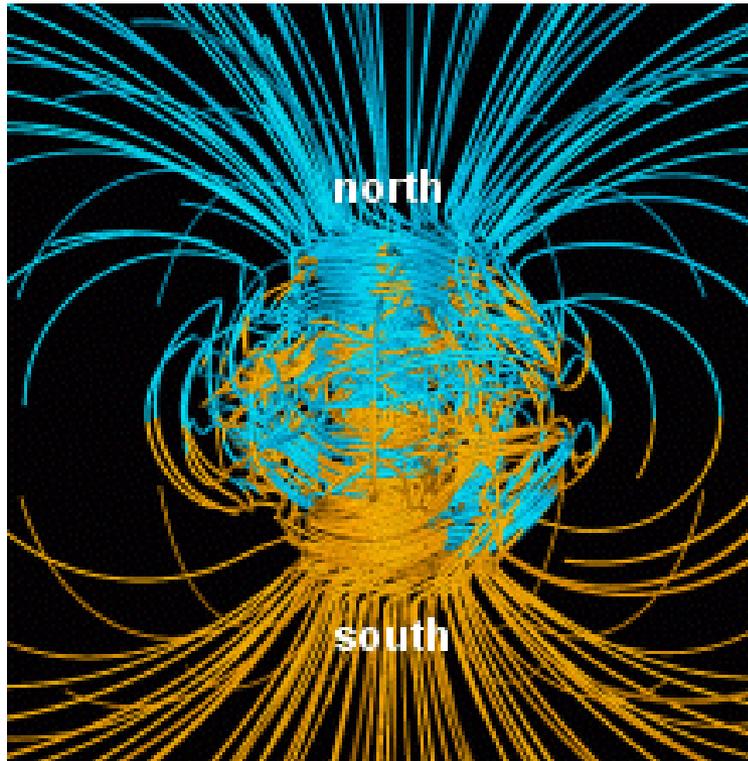
Événements	ÉPOQUES	
Laschamp	BRUNHES (normal)	0
		- 0,69
Jaramillo	MATUYAMA (inverse)	- 1 Ma
Gilsa		- 2 Ma
Olduvai	GAUSS (normal)	- 2,43
Kaena		- 3 Ma
Mammoth	GILBERT (inverse)	- 3,32
Cochiti		- 4 Ma
Nunivak		

D

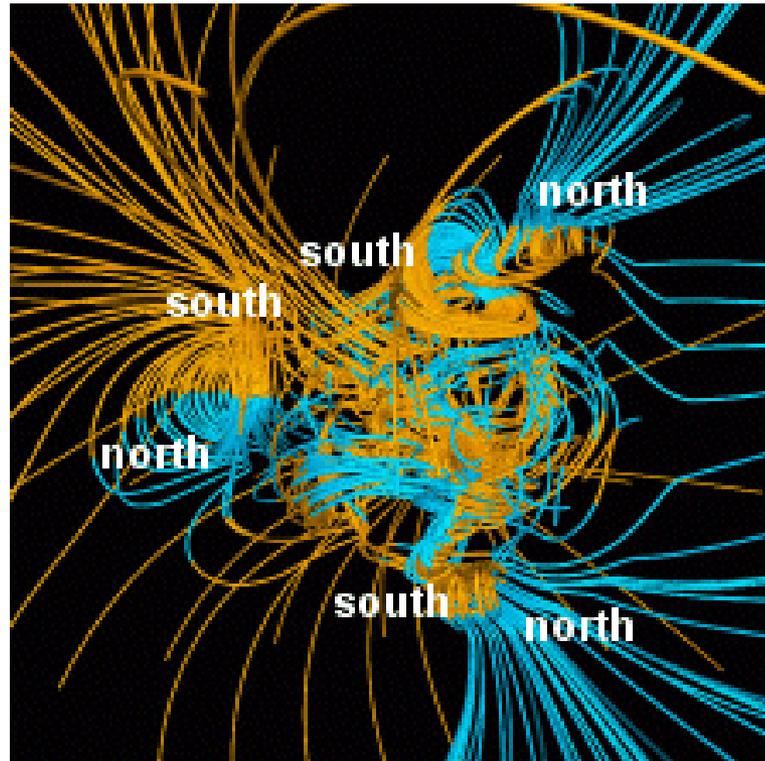
Crédit université de Laval : Pierre-André Bourque et Pauline Dansereau.

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 (mise en évidence en 1906).

STRUCTURE D'UNE INVERSION



between reversals



during a reversal

L'inversion du champ est progressive

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e5/NASA_54559main_comparison1_strip.gif

STRUCTURE DE LA TERRE ?

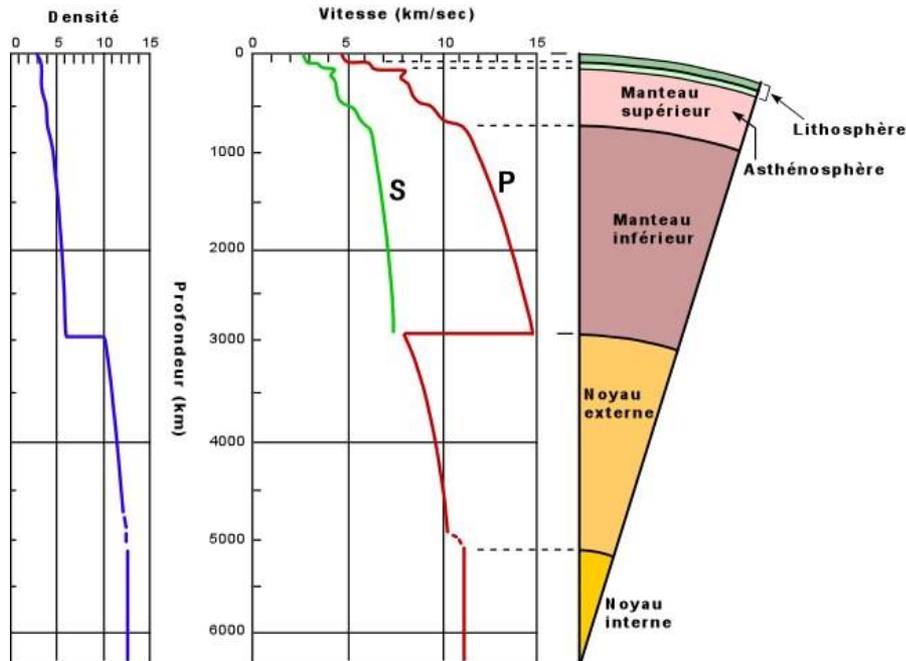
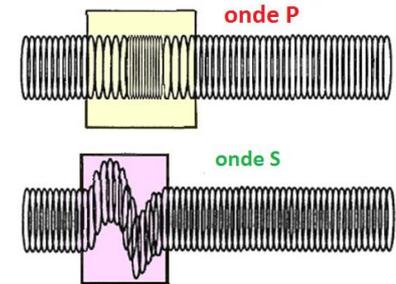
Apport de la sismologie : structure interne de la terre

Ondes de compression

P : rouge

Ondes de cisaillement

S : vert

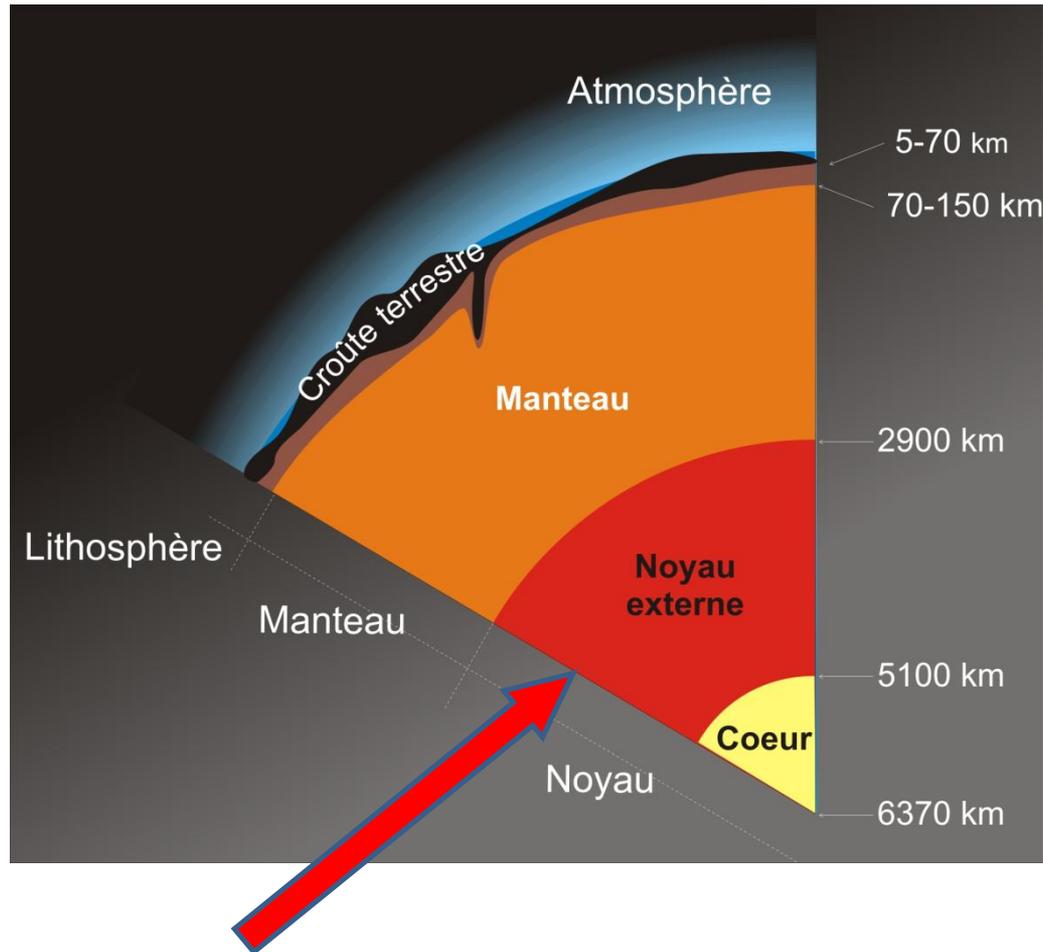


<http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/img.communes.pt/str.interne.terre.html>

Conclusion : **Le noyau externe est liquide.**

Les ondes de cisaillement ne se propagent pas dans les milieux liquides.

STRUCTURE DE LA TERRE

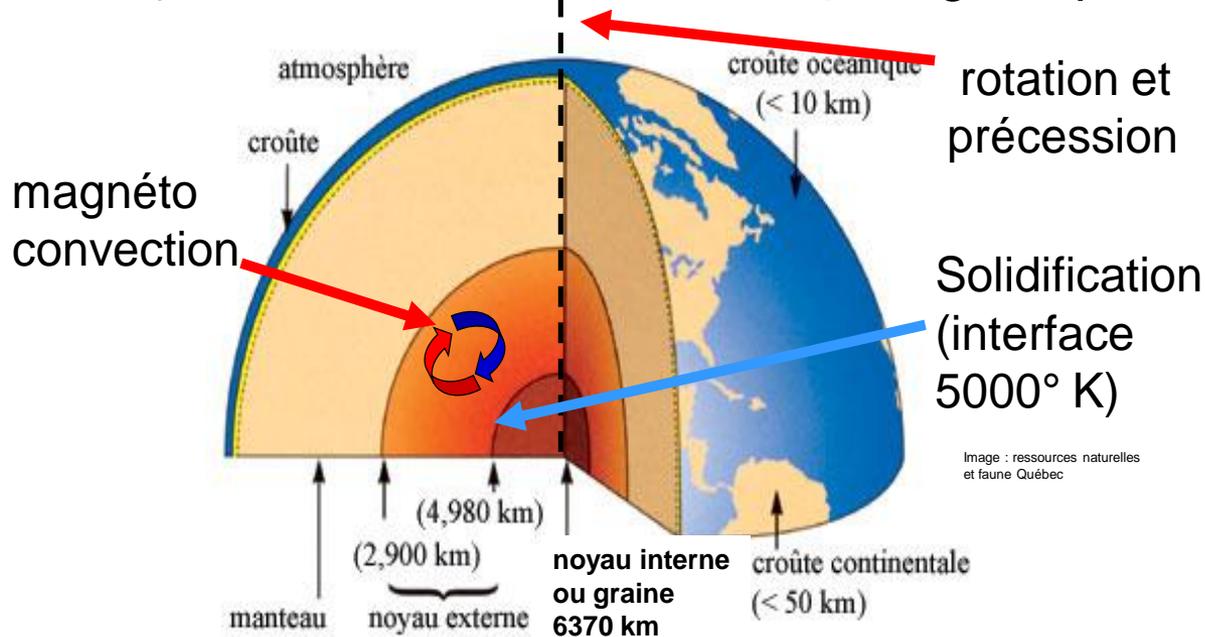


Les mouvements du fer liquide (+ nickel + divers) dans le noyau externe sont à l'origine du champ magnétique terrestre.

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

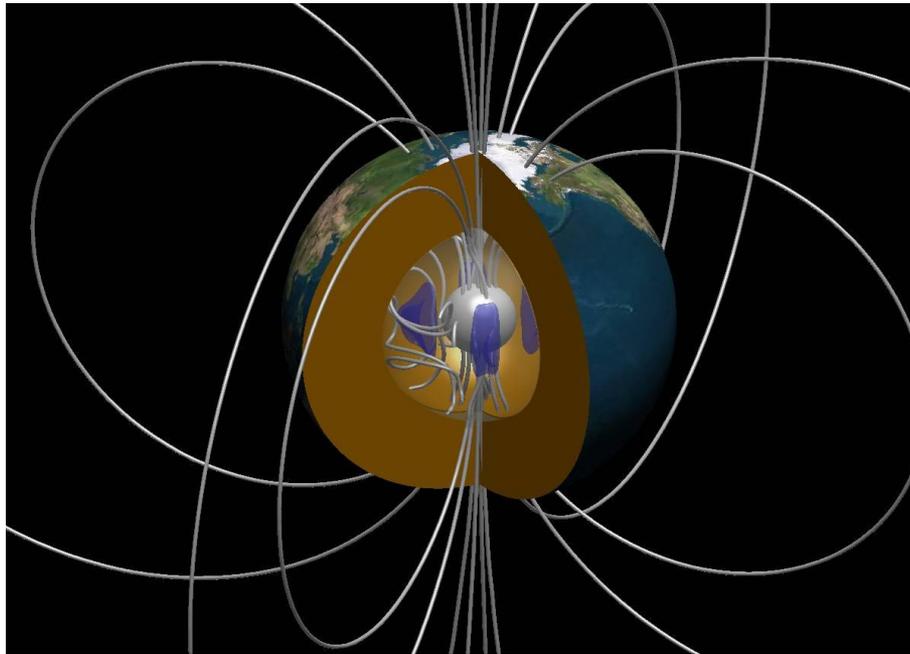
La présence du champ magnétique influe sur les mouvements.

C) Solidification de la graine : Convection thermosolutale

RESOLUTION IMPOSSIBLE

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

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

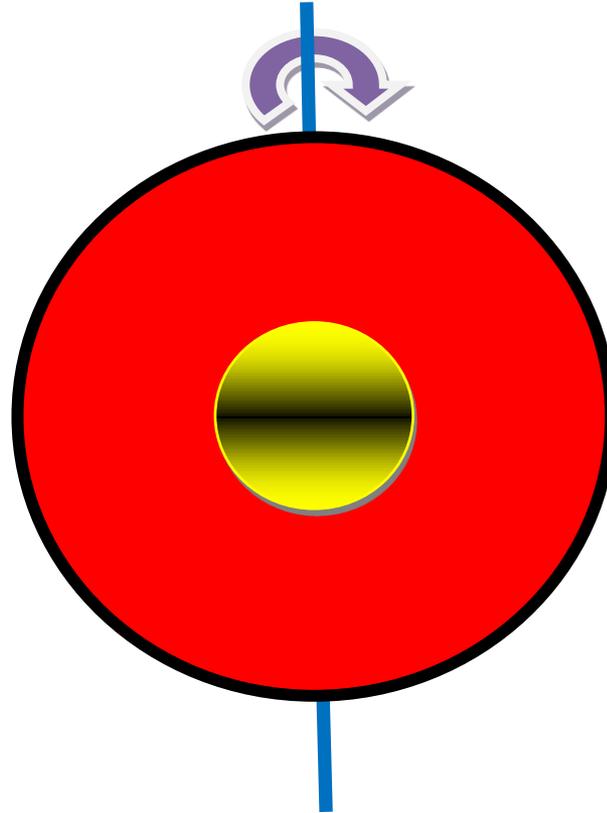


Les mouvements de fluide conducteur (structures tourbillonnaires en bleu) étirent les lignes du champ magnétique, leur donnant de l'énergie.

Crédit : IPGP-Julien Aubert

SIMULATION ANALOGIQUE : maquettes

Similitude géométrique : 2 sphères emboîtées qui tournent.

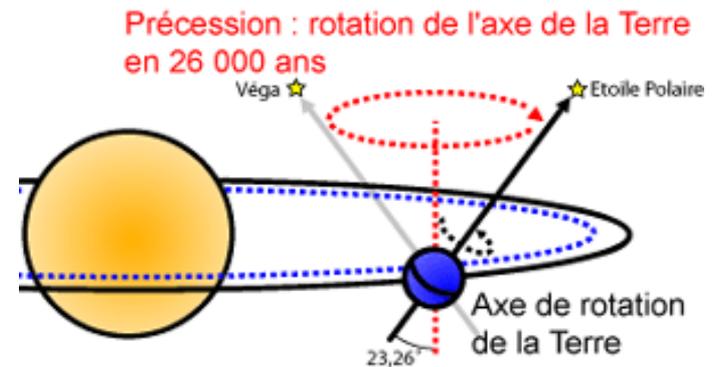
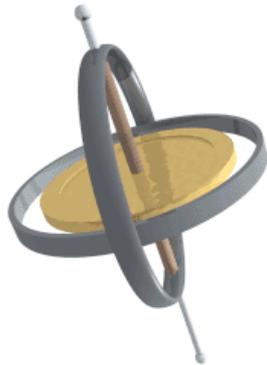
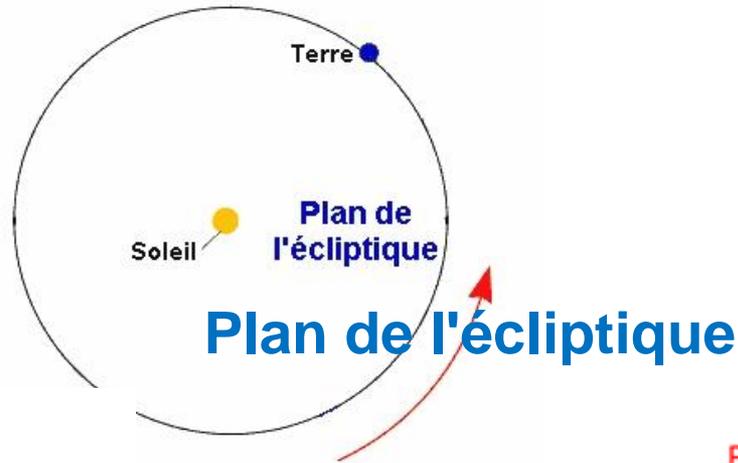


D'autres similitudes liées à la physique sont exploitées :
Paramètres adimensionnels

Mon travail : Réalisation des expériences

A) MOUVEMENTS LIES A LA MECANIQUE

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



Précession de la Terre

A) AU LABORATOIRE : EXPERIENCE SIMULANT LA PRECESSION

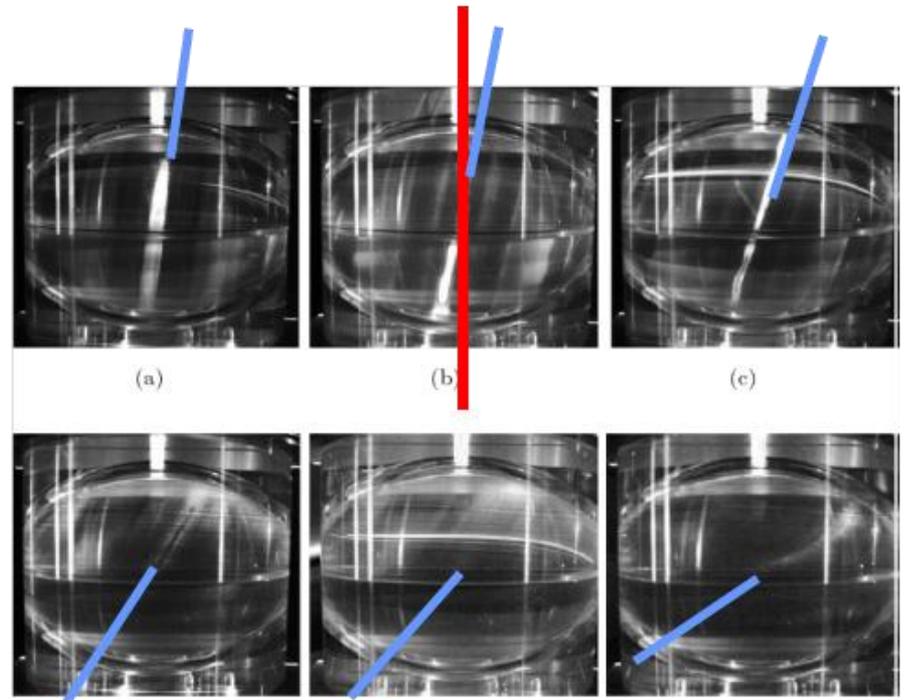
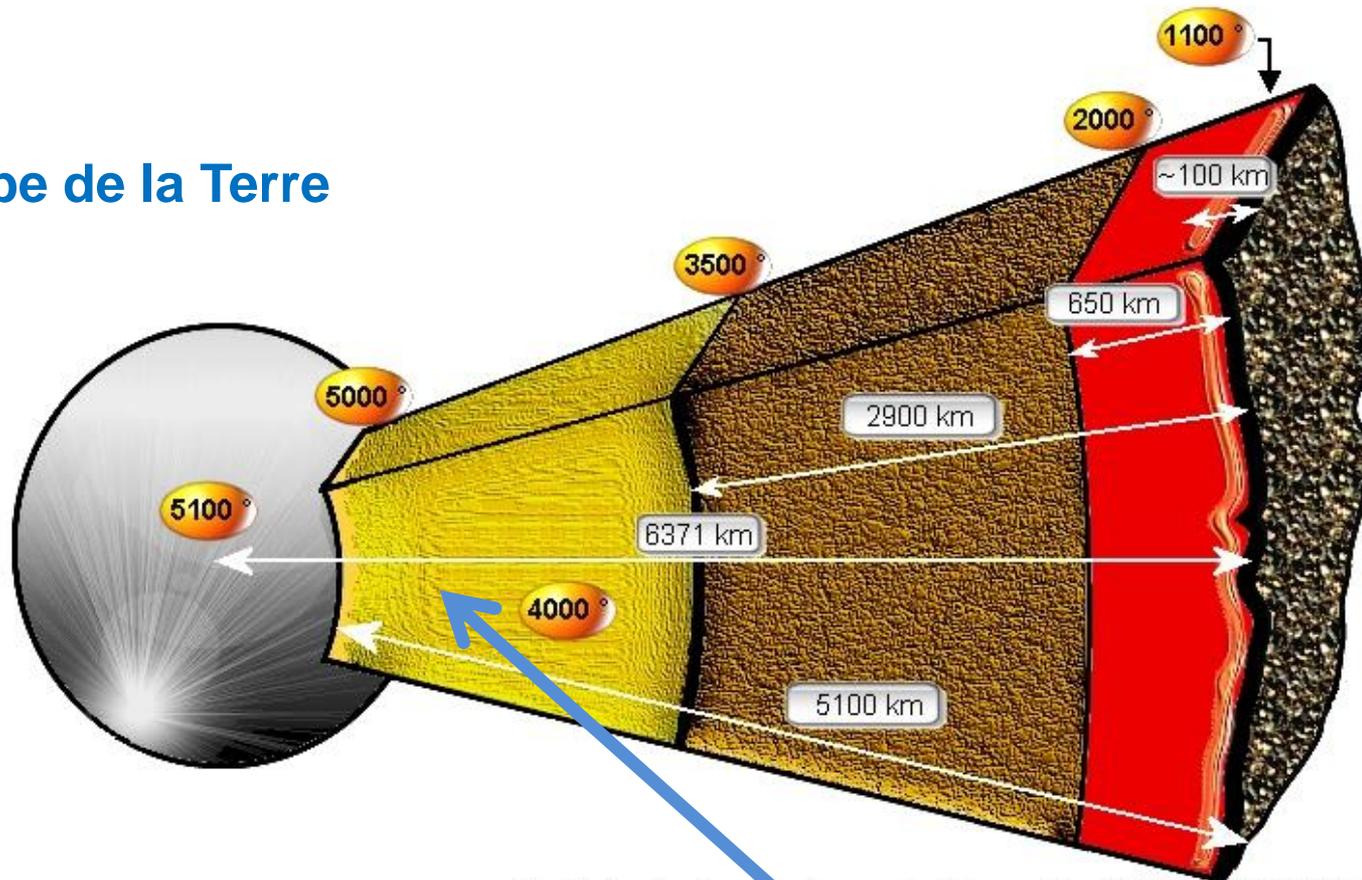


FIG. 3.2 – Vue d'ensemble du dispositif expérimental CICERON.

Résultats expérimentaux : décalage des axes de rotation en fonction de la vitesse de rotation et de l'angle d'inclinaison

B) MOUVEMENTS D'ORIGINE THERMIQUE

Coupe de la Terre

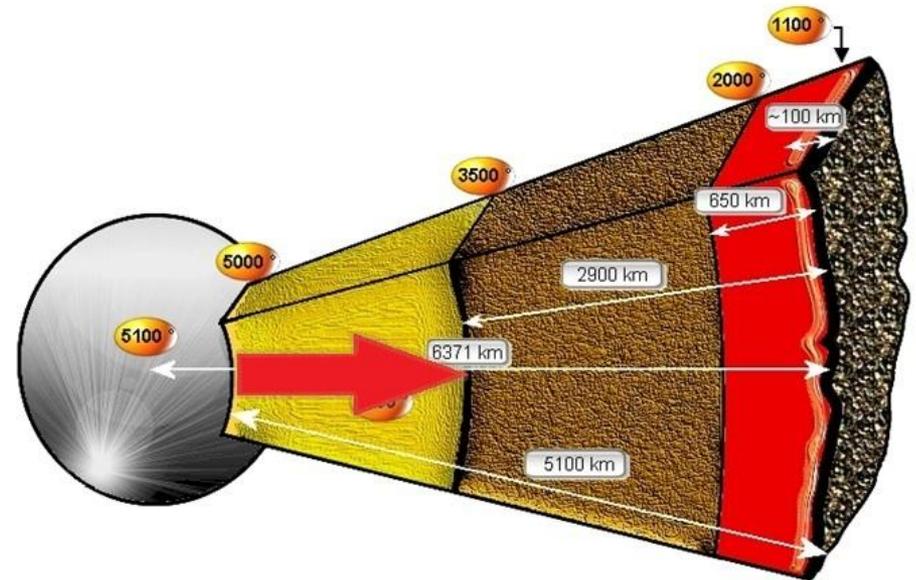
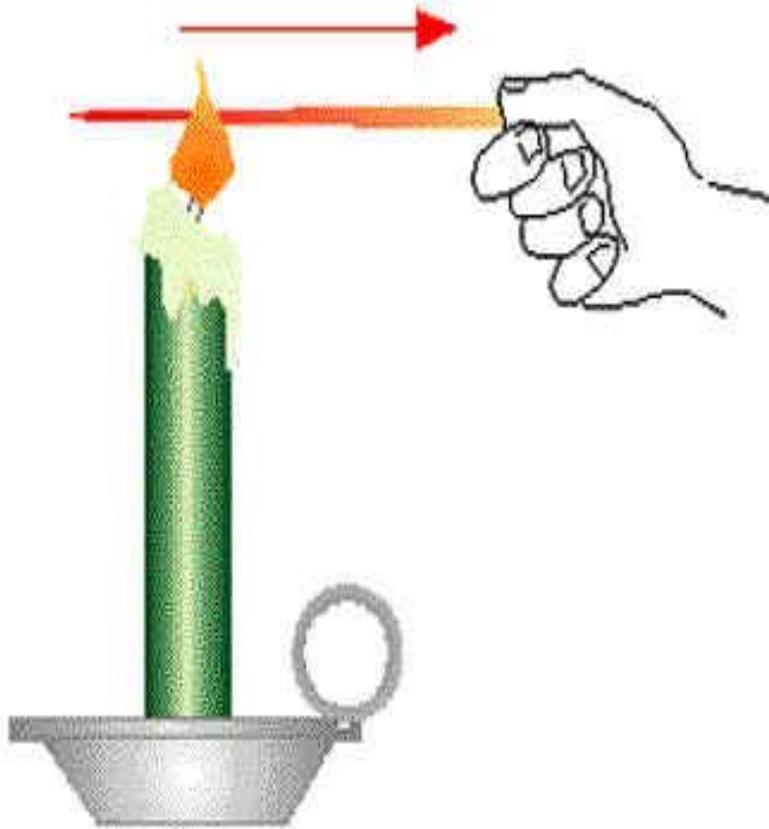


Doc Carbur d'après « La naissance de la Terre » Pour la Science N° 329, 2005

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.

B) CONDUCTION

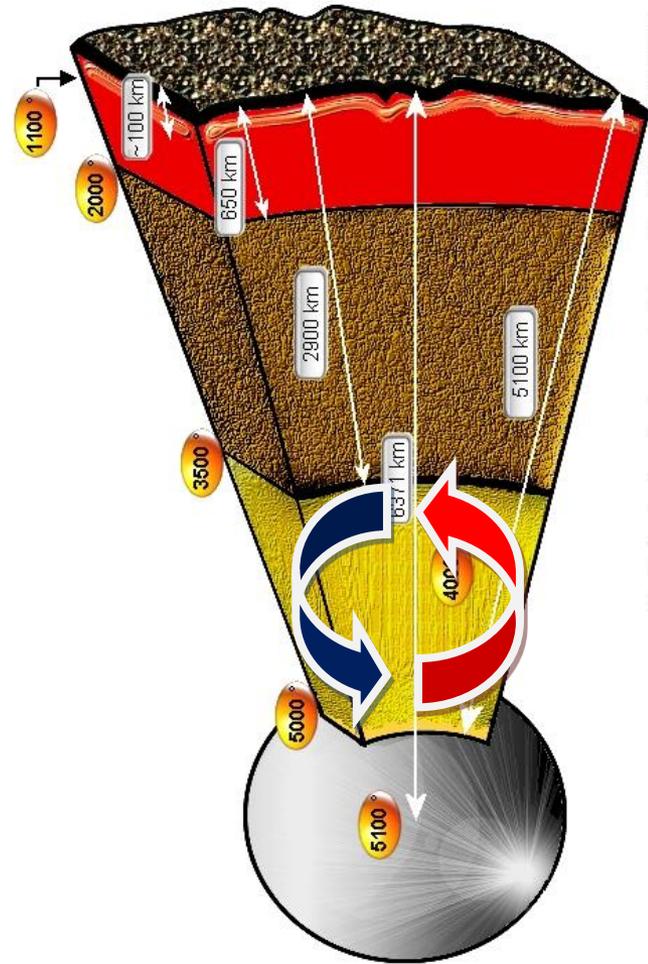
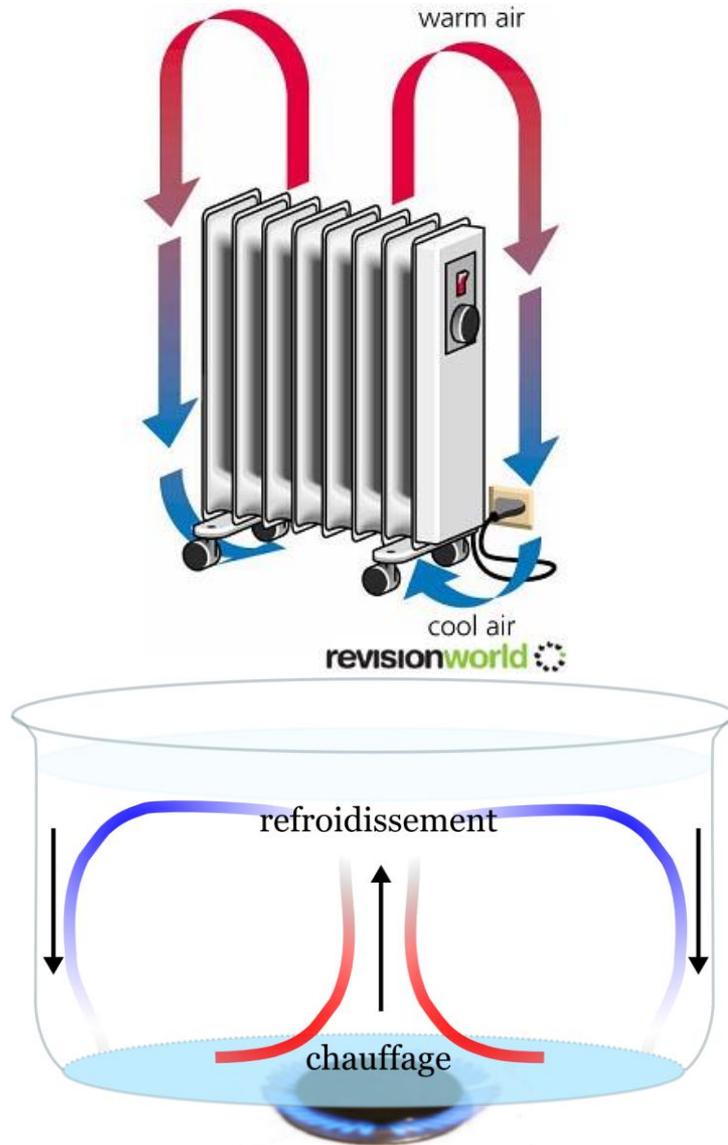
Conduction



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

© 1998 Wadsworth Publishing Company/ITP

B) CONVECTION



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

Convection à l'intérieur d'une casserole

B) SIMULATION NUMERIQUE DE ROTATION + CONVECTION



Modélisation numérique des colonnes de convection dans le noyau liquide avec la rotation.

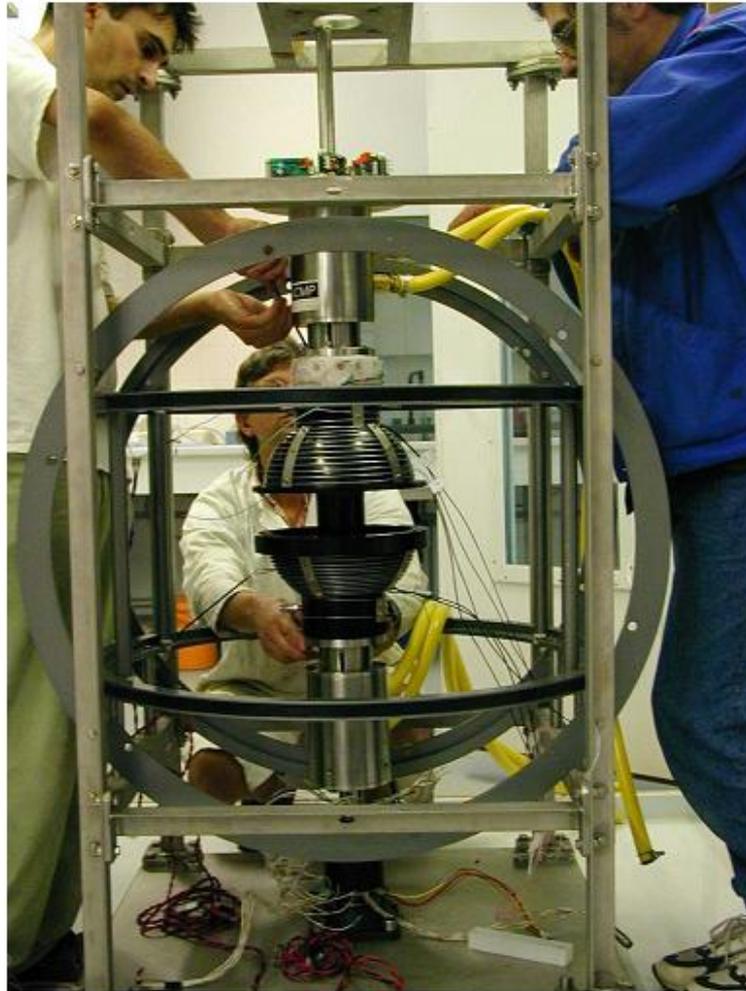
Les colonnes de convection sont parallèles à l'axe de rotation

B) EXPERIENCE DE CONVECTION EN EAU



**Expérience de convection en eau.
Inversion de la différence de température et de la gravité.**

B) EXPERIENCE DE CONVECTION EN GALLIUM (métal liquide)



Montage de l'expérience :

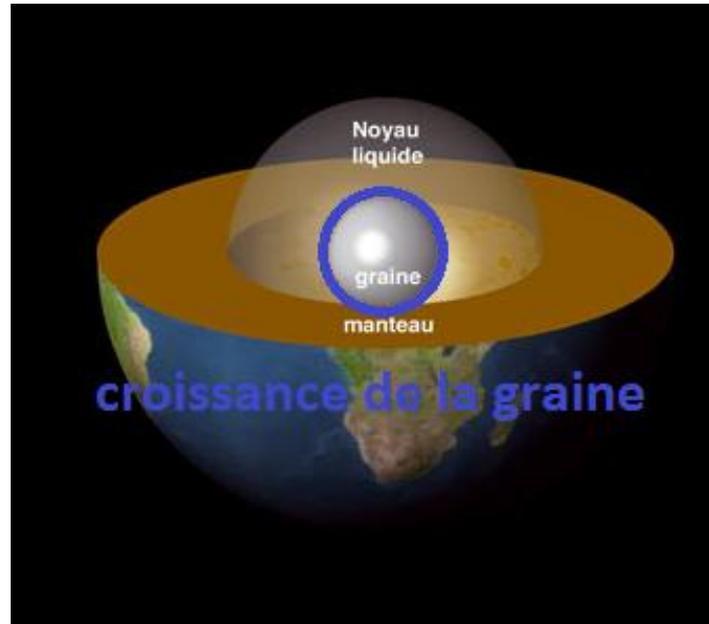
On voit les 2 demi-coquilles en cuivre recouvertes d'isolant

B) EXPERIENCE DE MAGNETO CONVECTION



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

C) CRISTALLISATION DE LA GRAINE



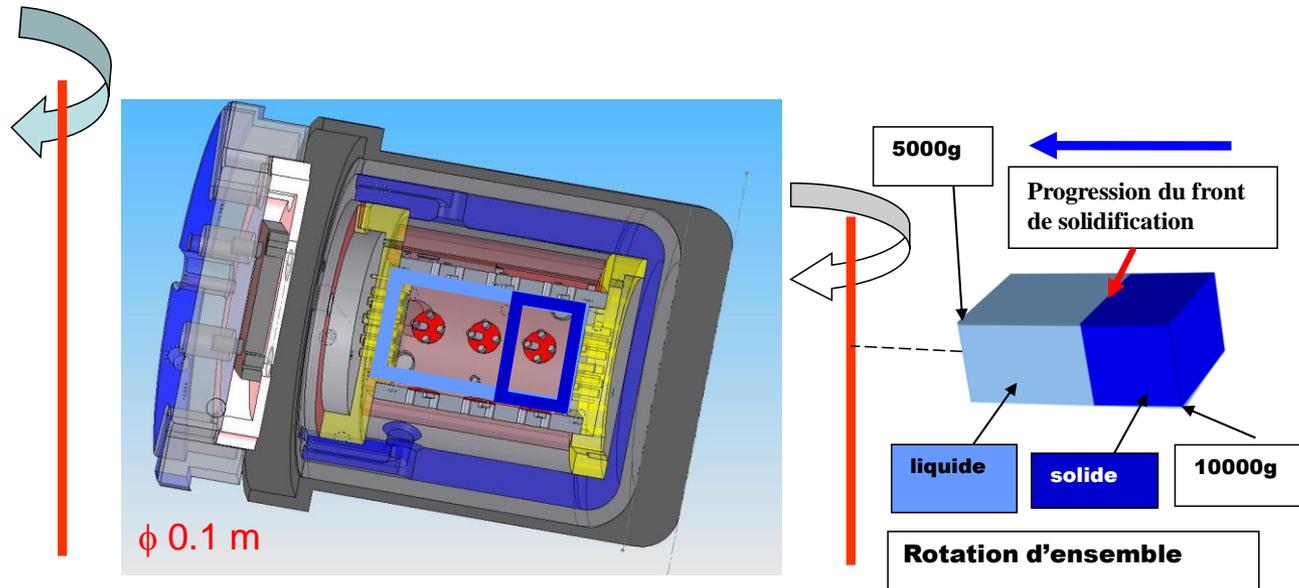
**LA GRAINE AUGMENTE DE DIAMETRE
LES ELEMENTS LEGERS RELACHES PAR LA SOLIDIFICATION
GENERENT DU MOUVEMENT DANS LE LIQUIDE.**

**Ordre de grandeur 100 tonnes par seconde
soit radialement n mètre par seconde ?**

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

C) EXPERIENCE DE CRISTALLISATION DE LA GRAINE

SOLIDIFICATION à 50° C sous gradient de pression



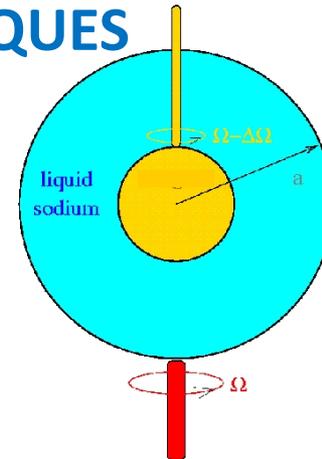
Expérience embarquée dans une centrifugeuse

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

SIMULATION PLUS GLOBALE

IMPOSSIBILITE DE BIEN SIMULER LA CONVECTION

- ROTATION et FORCES MAGNETIQUES
- AIMANT AU CENTRE : FORCES MAGNETIQUES
-
- Reynolds magnétique grand :
$$Rm = * \mu_0 \cdot \sigma \cdot L \cdot v$$
- Rapport entre induction et diffusion
- SODIUM : danger avec l'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

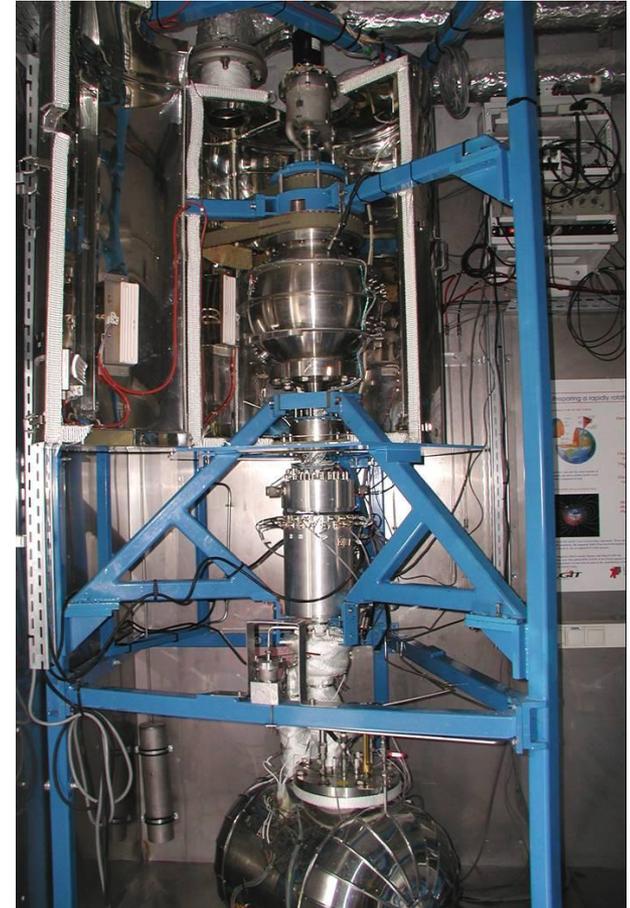
* μ_0 perméabilité du vide = $4\pi \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$; conductivité électrique = $21 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ (cuivre [Conductivité électrique](#) $59,6 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$)

EXPERIENCE DTS : Derviche Tourneur Sodium

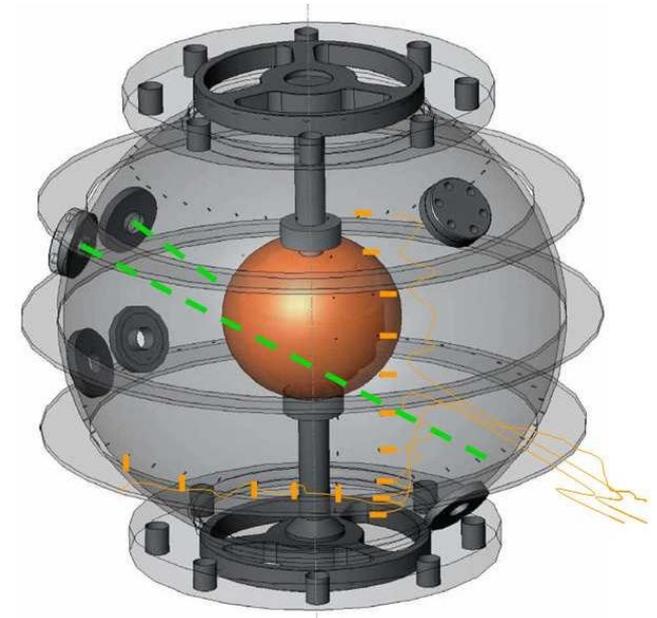


Verrous technologiques :

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



DETAILS DE L'EXPERIENCE DTS

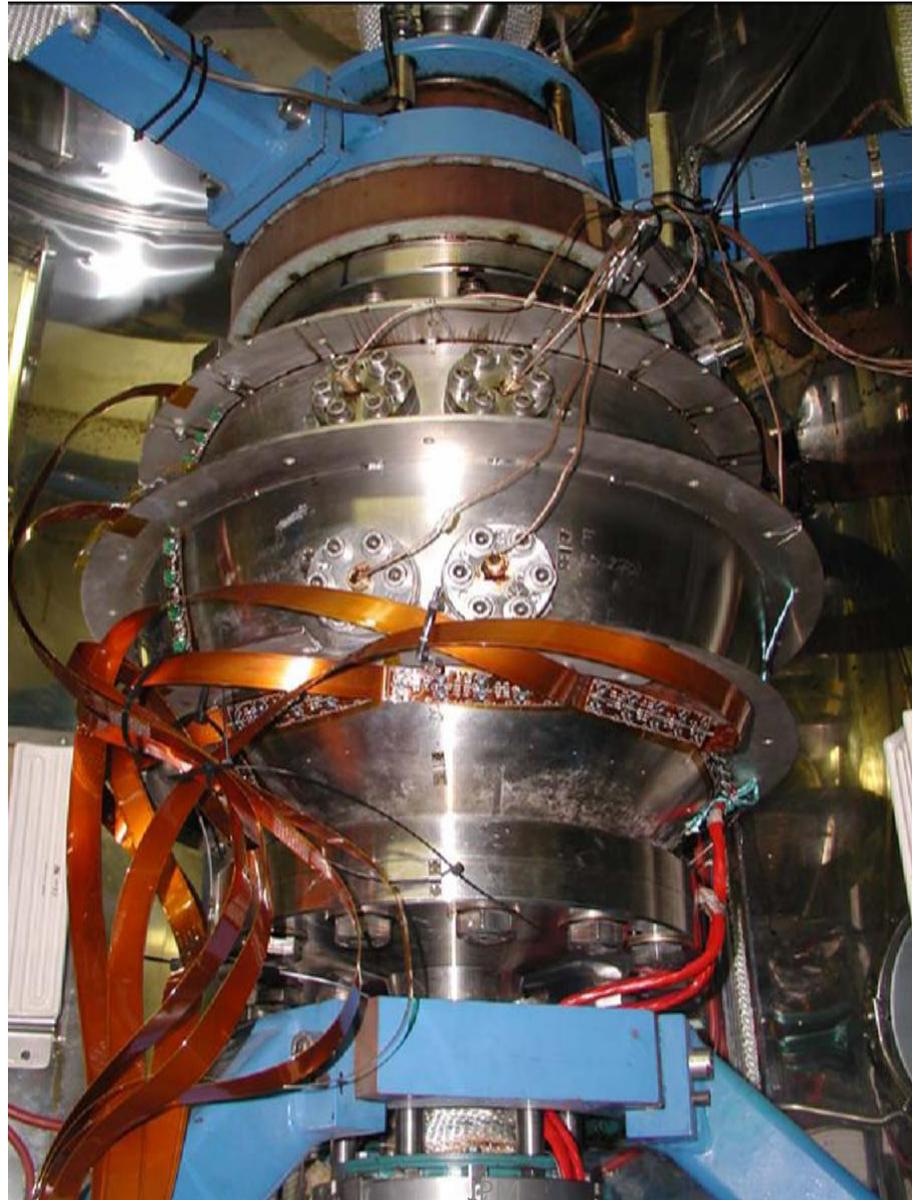


MESURES :
Sondes doppler
Sondes de potentiel
Magnétomètres :Patrick Larizza

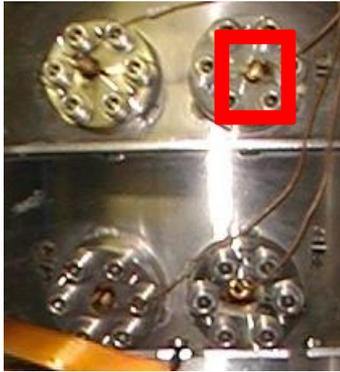
EXPERIENCE DTS



DETAIL DE L'INSTRUMENTATION DTS



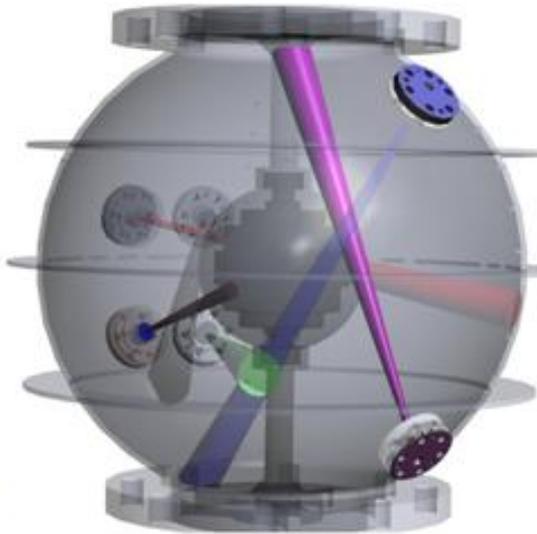
DETAIL DE L'INSTRUMENTATION



Sondes Doppler



Magnétomètre vectoriel 150°C



Trajet des faisceaux ultrasonores

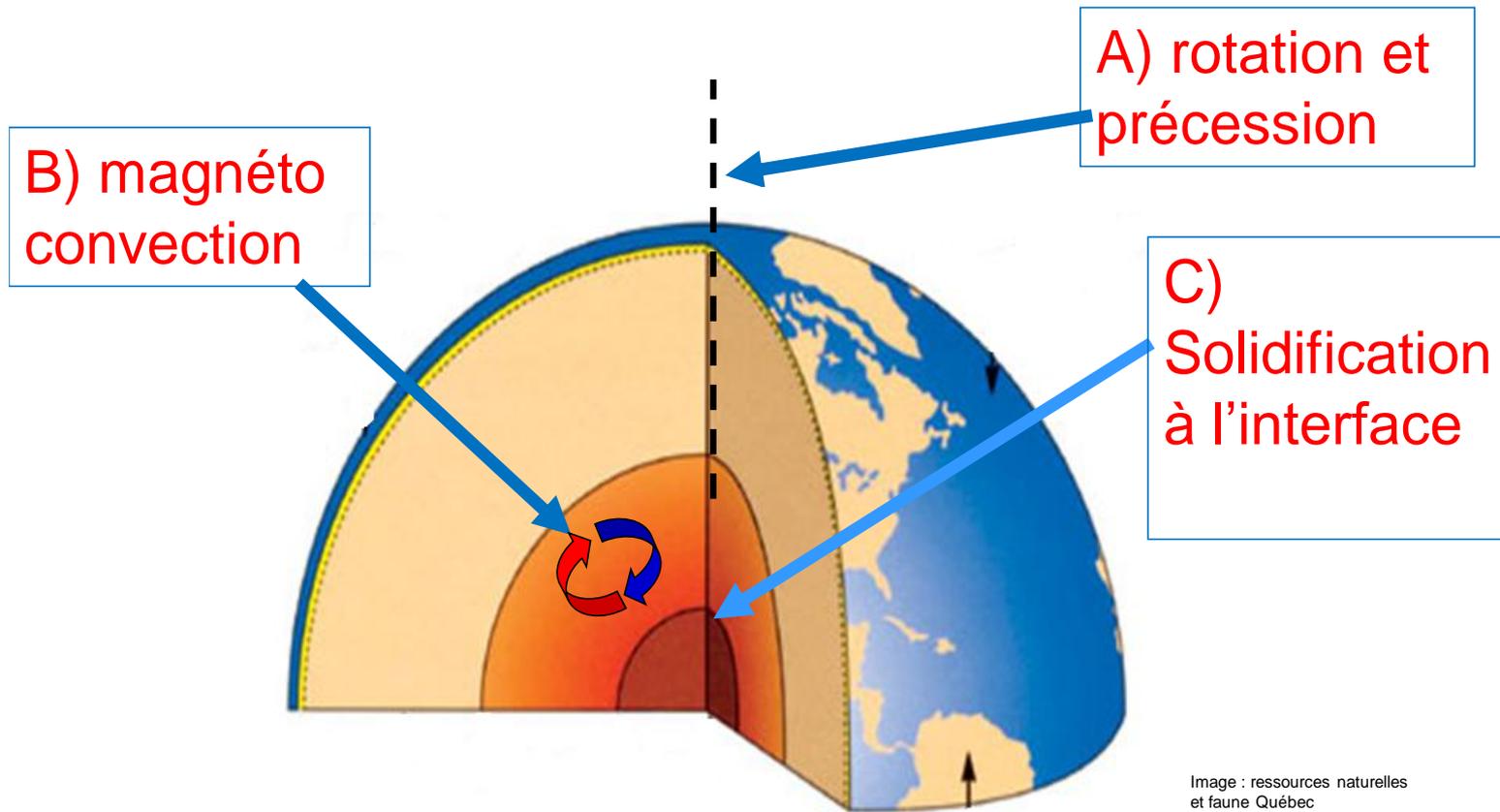
SPHERE DTS EN 3D sous PDF

EXEMPLE DE RESULTATS :

- - Reconstruction du champ de vitesse.
-
- - Survitesse
-
- - Différents types d'ondes identifiées :
Alfven
- Plus de détails,
voir « <http://users.isterre.fr/pcardin/WEBDTS/> »

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

EFFET DYNAMAMO



Les caprices du champ magnétique

- **Les caprices du champ magnétique**
- Pronostiquer le champ magnétique terrestre du futur ? Les chercheurs en rêvent. Mais la tâche est ardue. « *Nous ne pouvons pas faire de mesure dans le noyau de la Terre* », regrette Gauthier Hulot, de l'équipe Géomagnétisme de l'IPGP. Car ce magnétisme, qui repousse dans l'espace le flux de particules solaires, naît dans les entrailles de notre planète. Sans lui, la Terre serait sans doute restée déserte, tant les radiations sont dangereuses pour les molécules de la vie.
- © J. Aubert/CNRS-IPGP
- Les mouvements du centre de la Terre ont donné naissance à un grand champ magnétique. Celui-ci fait office de parapluie contre le flux de particules chargées éjectées par le Soleil.
-

- « *Le noyau liquide est animé de mouvements de convection qui évacuent la chaleur vers le manteau en déplaçant la matière* », raconte Henri-Claude Nataf, du Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (LGIT) du CNRS, et directeur de l'Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble¹. De plus, ce noyau liquide de fer et de nickel est un excellent conducteur électrique. Deux conditions suffisantes pour que l'apparition d'un infime champ magnétique, il y a au moins 3,5 milliards d'années, initie un effet dynamo : des courants électriques ont été créés dans la matière conductrice suffisamment agitée. Ils ont à leur tour fabriqué un champ magnétique, lequel a intensifié les courants. Le phénomène s'est autoalimenté jusqu'à produire le champ qu'on connaît aujourd'hui, et cessera quand, le centre de la Terre refroidi, la convection aura disparu.
Si Homo erectus avait pu inventer la boussole, il y a 800 000 ans, il aurait observé le pôle Nord à la place de notre actuel pôle Sud. Car le magnétisme terrestre varie sans cesse en intensité et en direction, au point de s'inverser parfois. Par chance pour les chercheurs, la roche a de la mémoire. « *Quand les constituants magnétiques de roches volcaniques sont chauds, au-delà d'une certaine température dite de Curie, ils ne présentent plus aucune aimantation, explique Henri-Claude Nataf. Mais en refroidissant, ces cristaux s'aimantent suivant le champ magnétique terrestre, et se figent.* » On remonte ainsi jusque trois milliards et demi d'années en arrière. Pour gagner en précision dans les époques plus proches, les géophysiciens se tournent vers les archéologues. « *La terre cuite possède aussi une mémoire magnétique, explique Gauthier Hulot. Quand une brique a été réchauffée, lors d'un incendie par exemple, sa mémoire est réinitialisée. On peut ainsi dater précisément le champ magnétique gravé dans le matériau ce jour-là.* » L'observation en continu du champ magnétique terrestre s'est sans cesse affinée, avec des données d'orientation notées depuis le début du xvii^e siècle.

Inversions

- Grâce à toutes ces données, on sait désormais que les boussoles ont basculé plus de trois cents fois depuis 200 millions d'années. À chaque épisode, le champ terrestre faiblit avant de s'inverser, entraînant une diminution de l'intensité du bouclier magnétique. « *Les cycles sont très irréguliers, explique Gauthier Hulot. On a constaté des périodes de stabilité de 30 millions d'années, tandis que des inversions se sont produites à quelques centaines de siècles d'intervalle. Si une loi existe, elle est probabiliste et très subtile !* » La dernière inversion remonte à 780 000 ans. Nos ancêtres – Homo erectus – y ont survécu, puisque nous sommes là pour en parler ! En revanche, satellites et réseaux électriques connaîtraient aujourd'hui de nombreuses perturbations en cas d'inversion, puisque la Terre ne serait plus alors protégée des tempêtes magnétiques – des afflux brutaux de particules chargées issues d'éruptions à la surface du Soleil

