

Partie 5 – Le magnétisme

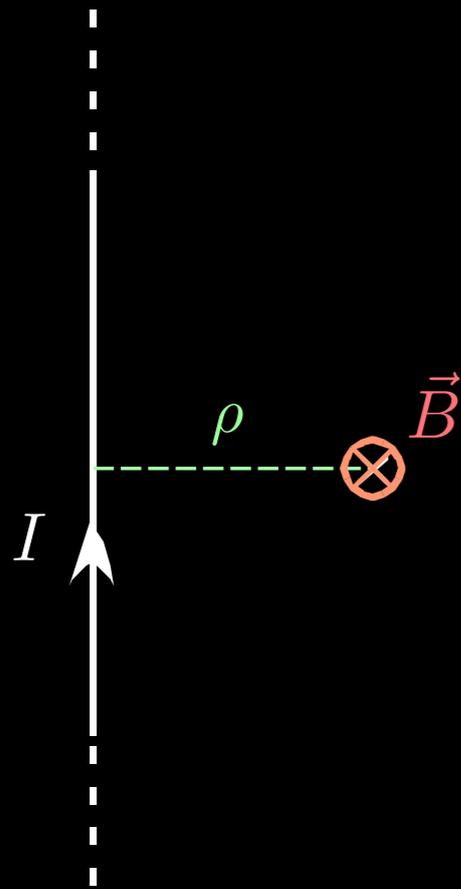
D. Mouvement des particules chargées dans un champ magnétique et un champ électrique - Force de Lorentz

5) Application : effet Hall

Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

1) Fil conducteur — Loi de Biot et Savart



Observation : un fil conducteur, parcouru par un courant électrique I crée, à la distance ρ , un champ magnétique d'intensité :

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi \rho} \quad (\text{fil très long ou infini})$$

Note 1 : le champ magnétique s'exprime en Tesla (T)

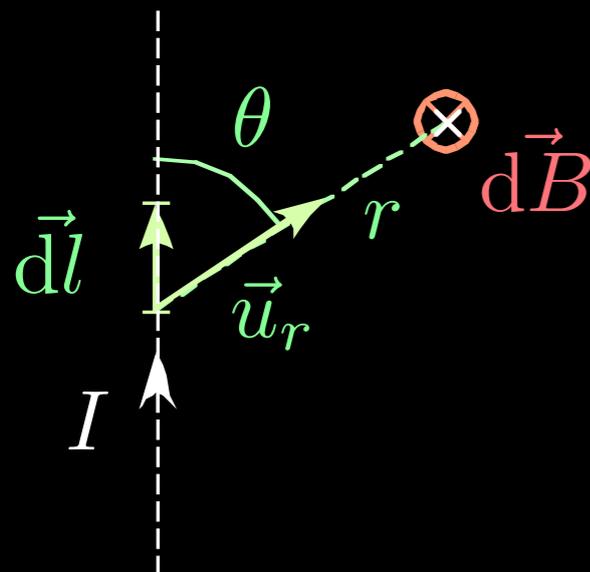
Note 2 : la constante magnétique μ s'appelle la perméabilité. La perméabilité du vide vaut :

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ (SI)}$$

avec $\epsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$

$$c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ (SI)}$$



La loi de Biot et Savart exprime l'induction magnétique créée par un élément de fil conducteur dl (orienté dans le sens du courant) :

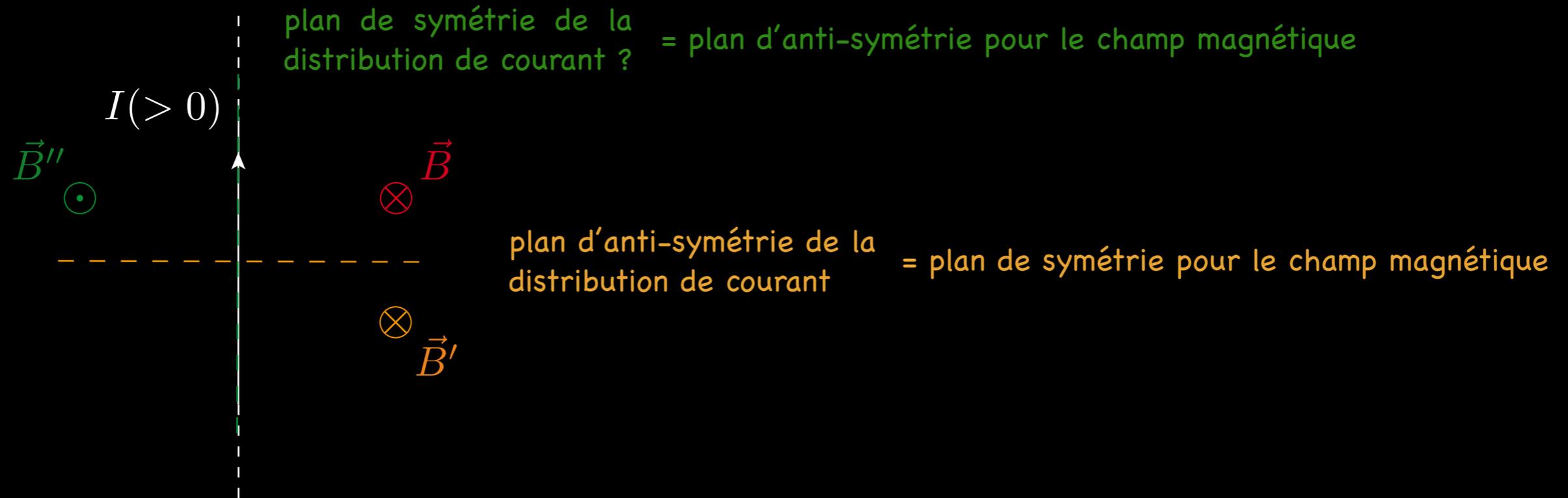
$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} \cdot \vec{dl} \times \vec{u}_r$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot dl \cdot \sin \theta}{r^2}$$

Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

2) règles de symétrie



En tout point d'un plan de symétrie de la distribution de courant, le champ magnétique généré par celle-ci est orthogonal au plan de symétrie.

En tout point d'un plan d'anti-symétrie de la distribution de courant, le champ magnétique généré par celle-ci appartient au plan d'anti-symétrie.

Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

3) théorème d'ampère

Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

4) dipôle magnétique

- dipôle magnétique et définition du moment magnétique
- approximation dipolaire
- champ magnétique créé par un dipôle (comparaison avec le dipôle électrique)
- action subie par un dipôle magnétique placé dans un champ magnétique : force de Laplace, moment
- énergie potentielle du dipôle magnétique
- exemple : calcul du moment magnétique d'un disque uniformément chargé et animé d'un mouvement de rotation

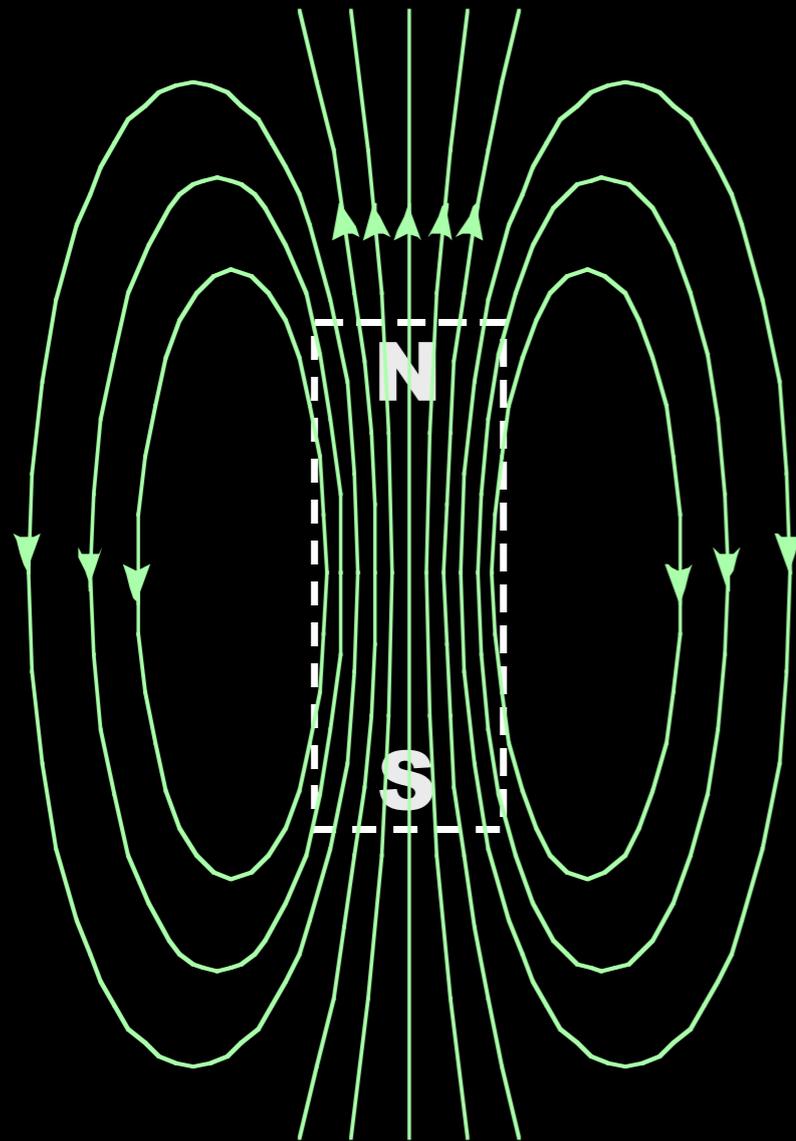
Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

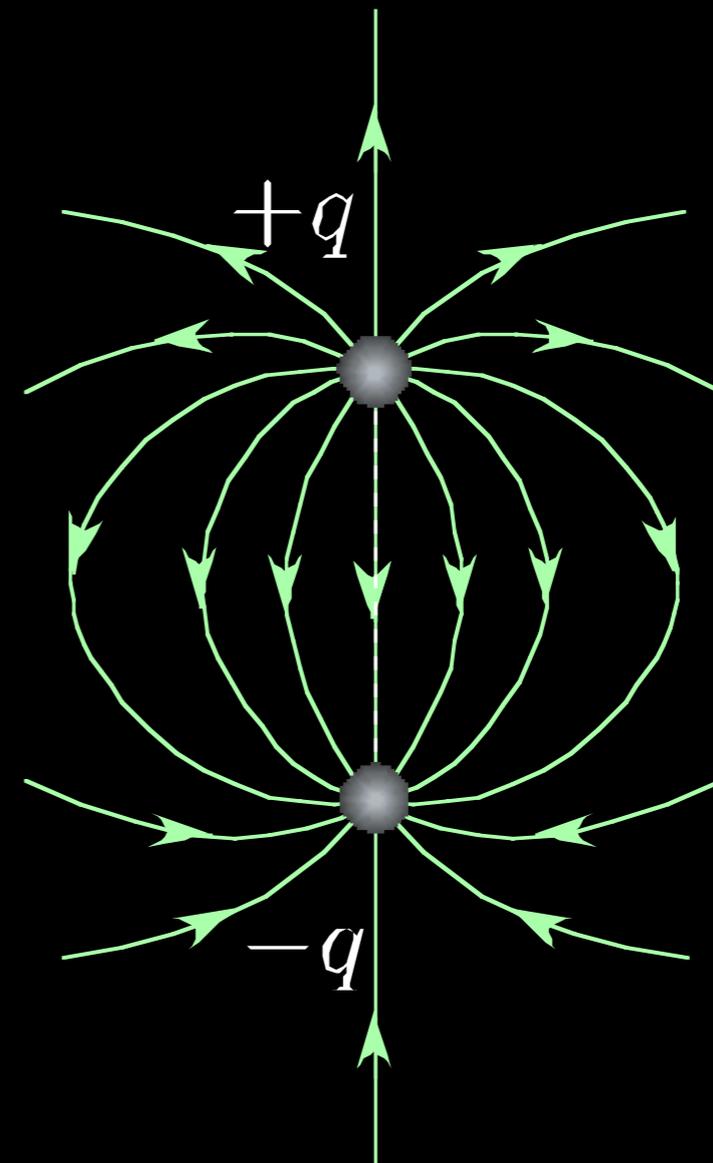
5) Aimantation, ferro- dia- et para-magnétisme

Comparaison des dipôles électriques et magnétique (aimant)

Lignes de champ magnétique : dipôle magnétique



Lignes de champ électrique : dipôle électrique



Partie 5 – Le magnétisme

A. Le champ magnétique

Comparaison des dipôles électriques et magnétique (aimant)

dipôle
électrique



deux pôles
électriques

dipôle
magnétique



deux dipôles
magnétiques

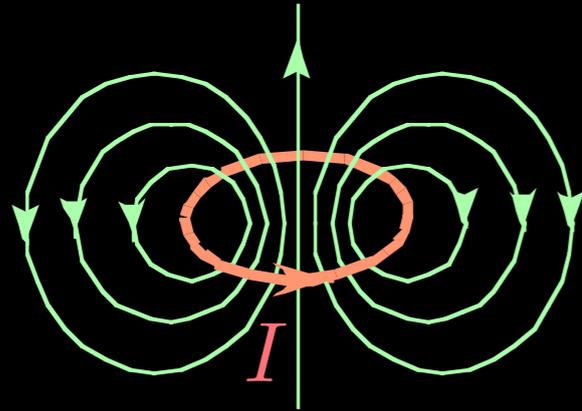


Partie 5 – Le magnétisme

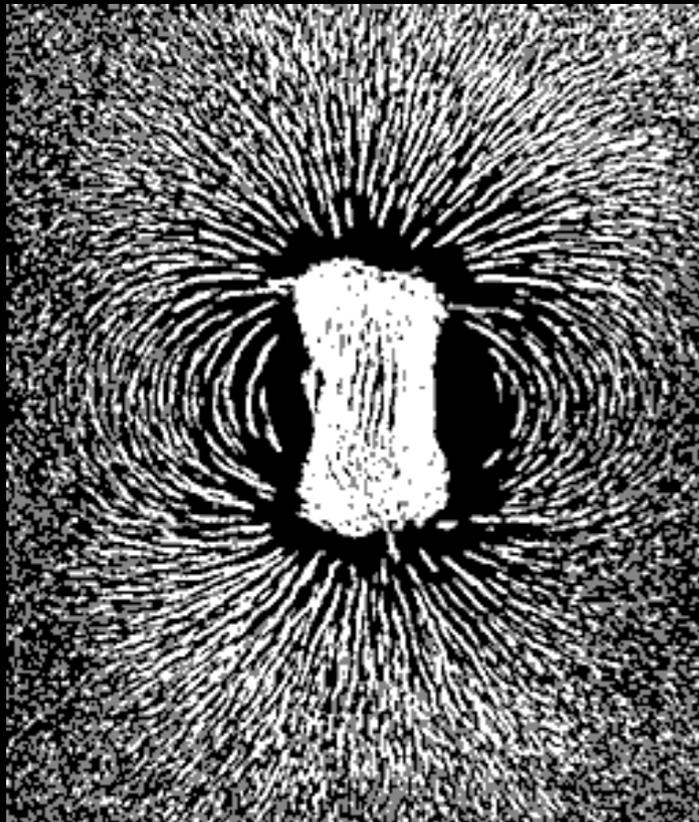
E. Sources de champ magnétique

4) dipôle magnétique

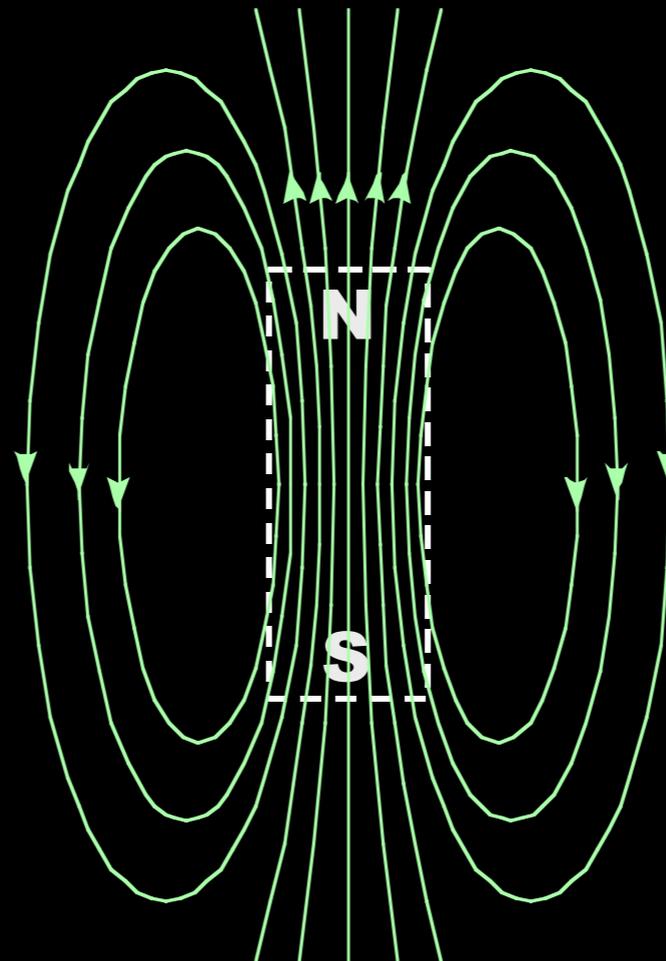
Boucle de courant



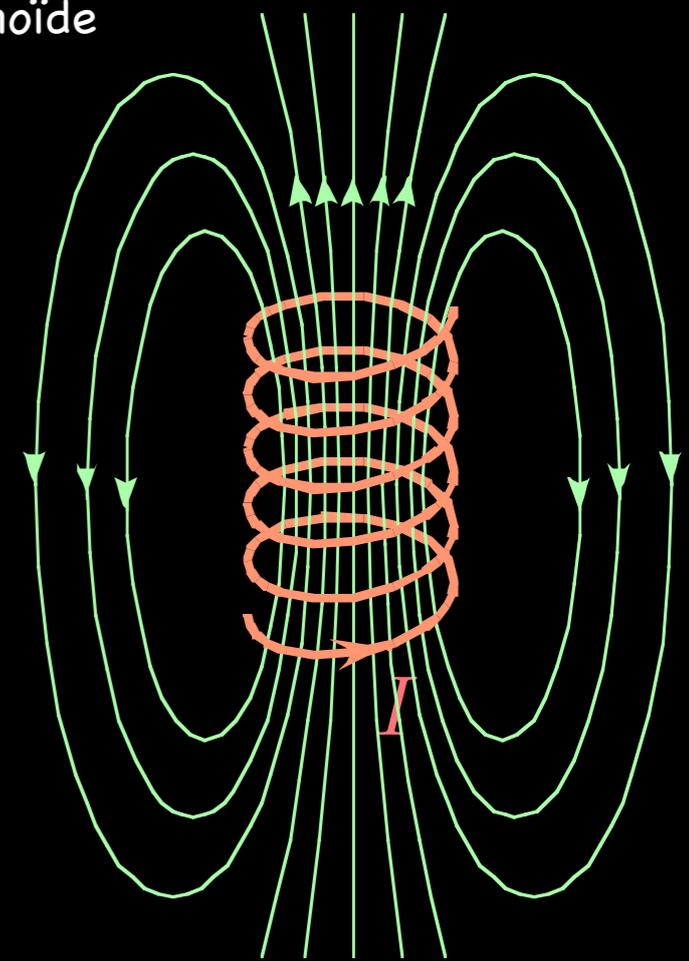
Les lignes de champ d'une boucle de courant sont celles d'un dipôle magnétique.



Aimant



Solénoïde



Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

5) Aimantation, ferro- dia- et para-magnétisme

Quelle est l'origine du champ magnétique d'un morceau de fer aimanté ?

De manière simple, on peut imaginer que les électrons composant la matière sont en orbite autour des noyaux. Ils constituent donc des mini-boucles de courant, possédant les propriétés d'un dipôle magnétique.

Les propriétés magnétiques d'un atome dépendent en effet du moment cinétique orbital des électrons, de leur spin (propriété quantique), ainsi que du spin nucléaire.

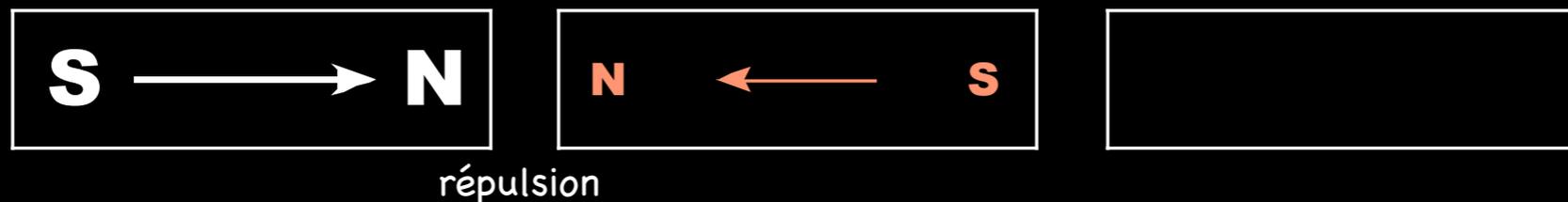
Les propriétés magnétiques d'un matériau dépendent de la manière dont sont arrangés et interagissent entre-eux les mini-dipôles magnétiques qui le constituent.

Les matériaux affectés par un champ magnétique peuvent être classés en trois catégories selon leur comportement.

a. matériaux diamagnétiques : ils sont repoussés vers les régions où le champ est le plus faible (Cu, Bi, C, Ag, Au, Pb, Zn, ...)

Les matériaux diamagnétiques possèdent des électrons liés par paire de spin opposé : le champ magnétique résultant est nul, les atomes ne possèdent pas de moment magnétique permanent.

En présence d'un champ extérieur, les orbites s'adaptent de manière à créer un dipôle magnétique induit qui s'oppose au champ extérieur.



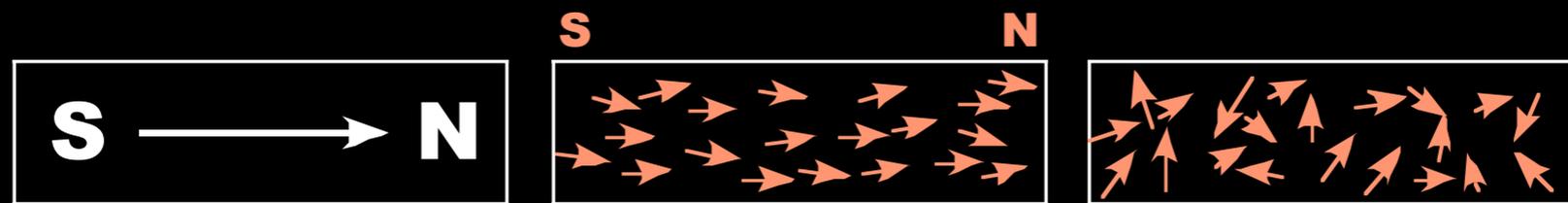
Partie 5 – Le magnétisme

E. Sources de champ magnétique

5) Aimantation, ferro- dia- et para-magnétisme

b. matériaux paramagnétiques : ils sont attirés faiblement vers les régions où le champ est le plus intense (Al, Cr, K, Mg, Mn, Na, ...)

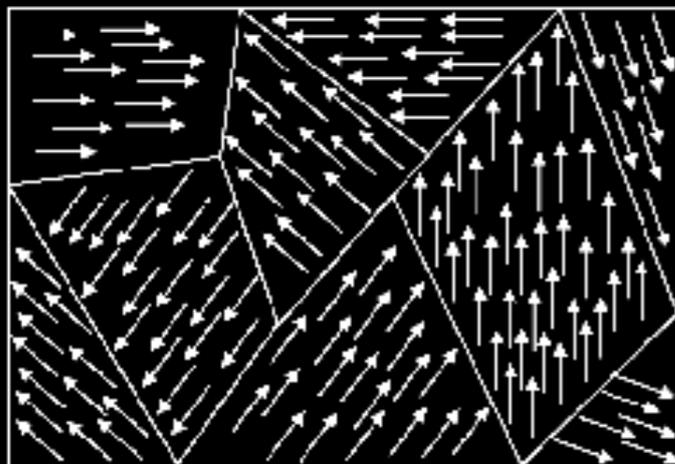
Les matériaux paramagnétiques possèdent des dipôles magnétiques permanents mais dont la distribution est désordonnée. En présence d'un champ magnétique extérieur, ces dipôles ont tendance à s'orienter.



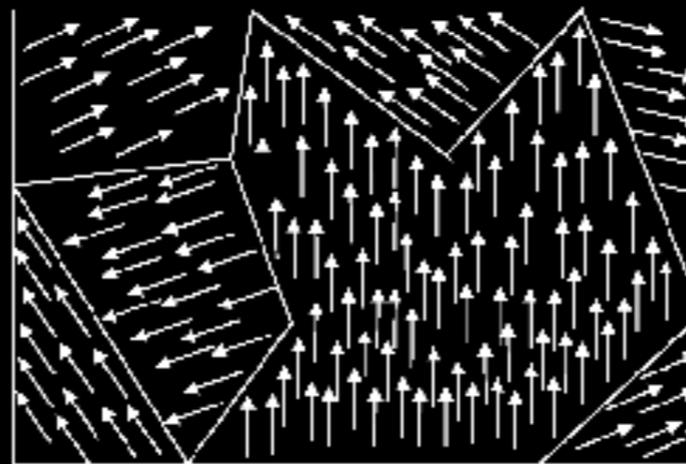
c. matériaux ferromagnétiques : ils sont attirés vers les régions où le champ est le plus intense (Fe, Ni, Co, CrO_2 , magnétite Fe_3O_4 , ...)

Les matériaux ferromagnétiques possèdent des dipôles magnétiques permanents parallèles entre-eux. Leurs contributions s'ajoutent pour donner un champ magnétique global (aimantation).

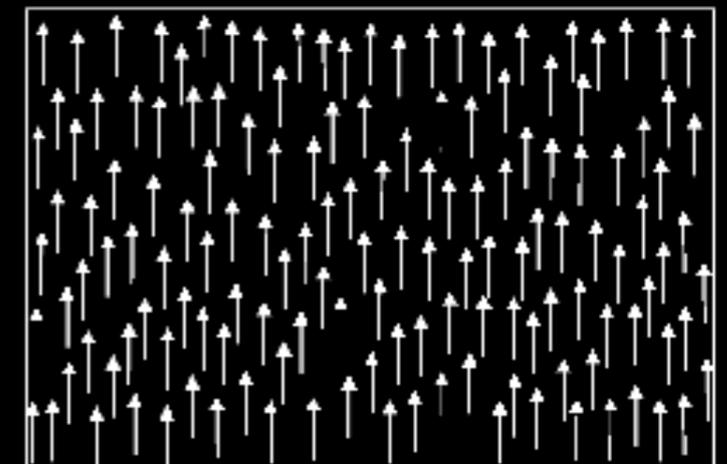
échantillon non aimanté
(grains de 1 mm environ)



échantillon en cours
d'aimantation sous l'effet
d'un champ extérieur



échantillon aimanté



Partie 5 – Le magnétisme

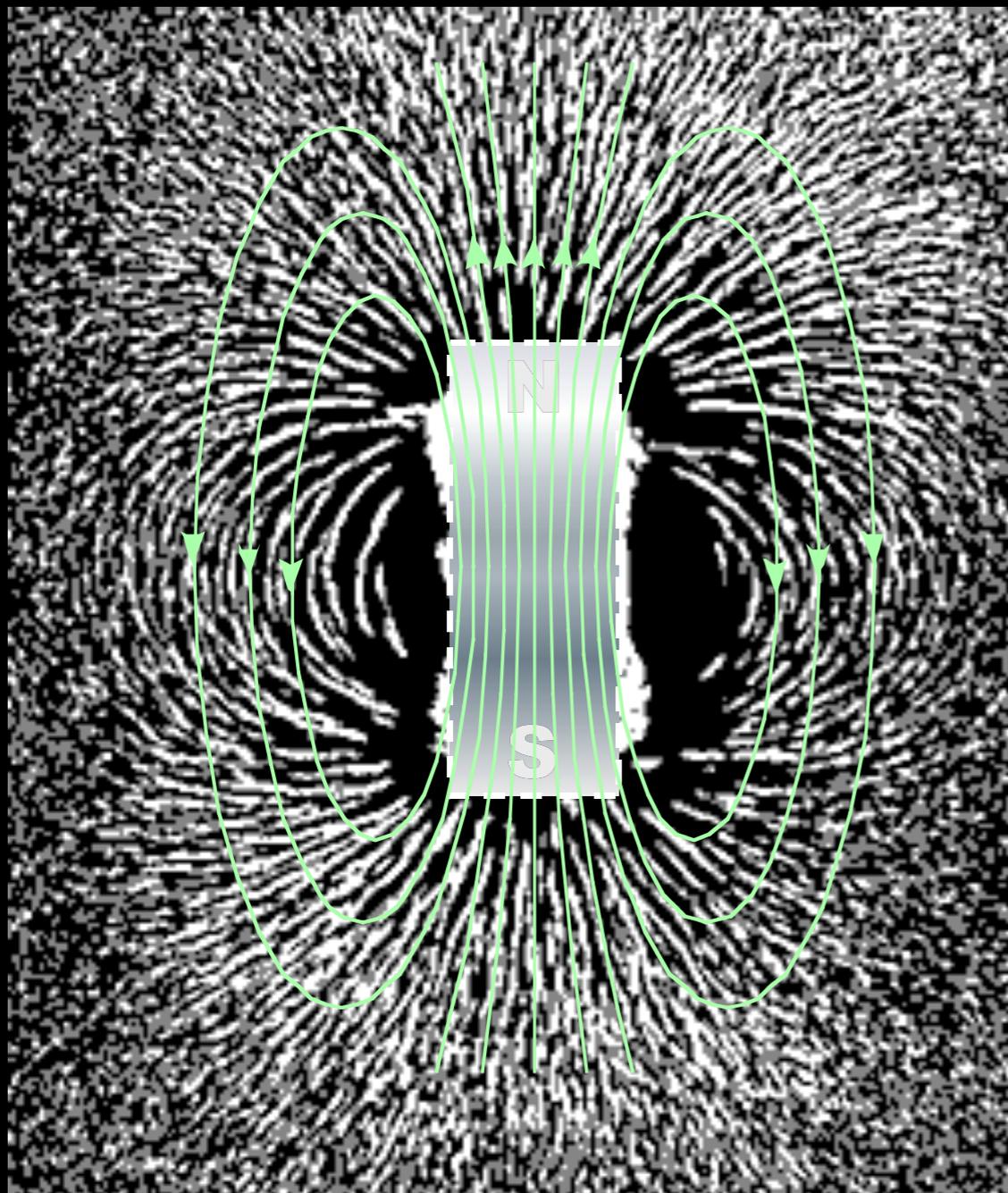
E. Sources de champ magnétique

5) Aimantation, ferro- dia- et para-magnétisme

Les aimants

Commençons par le plus simple et le plus familier, un aimant.

Un aimant est capable d'agir à distance sur un autre aimant, un morceau de fer. On met ainsi en évidence une force magnétique responsable de l'attraction ou de la répulsion. Il existe donc tout autour de l'aimant un champ magnétique.



Comment visualiser ce champ magnétique ?

=> expérience de la limaille de fer qui mime les lignes de champ.

Partie 5 – Le magnétisme

F. Propriétés magnétiques de la matière

5) Champ magnétique terrestre

Quelle est l'origine du champ magnétique terrestre ?

Aimantation permanente du noyau interne ?

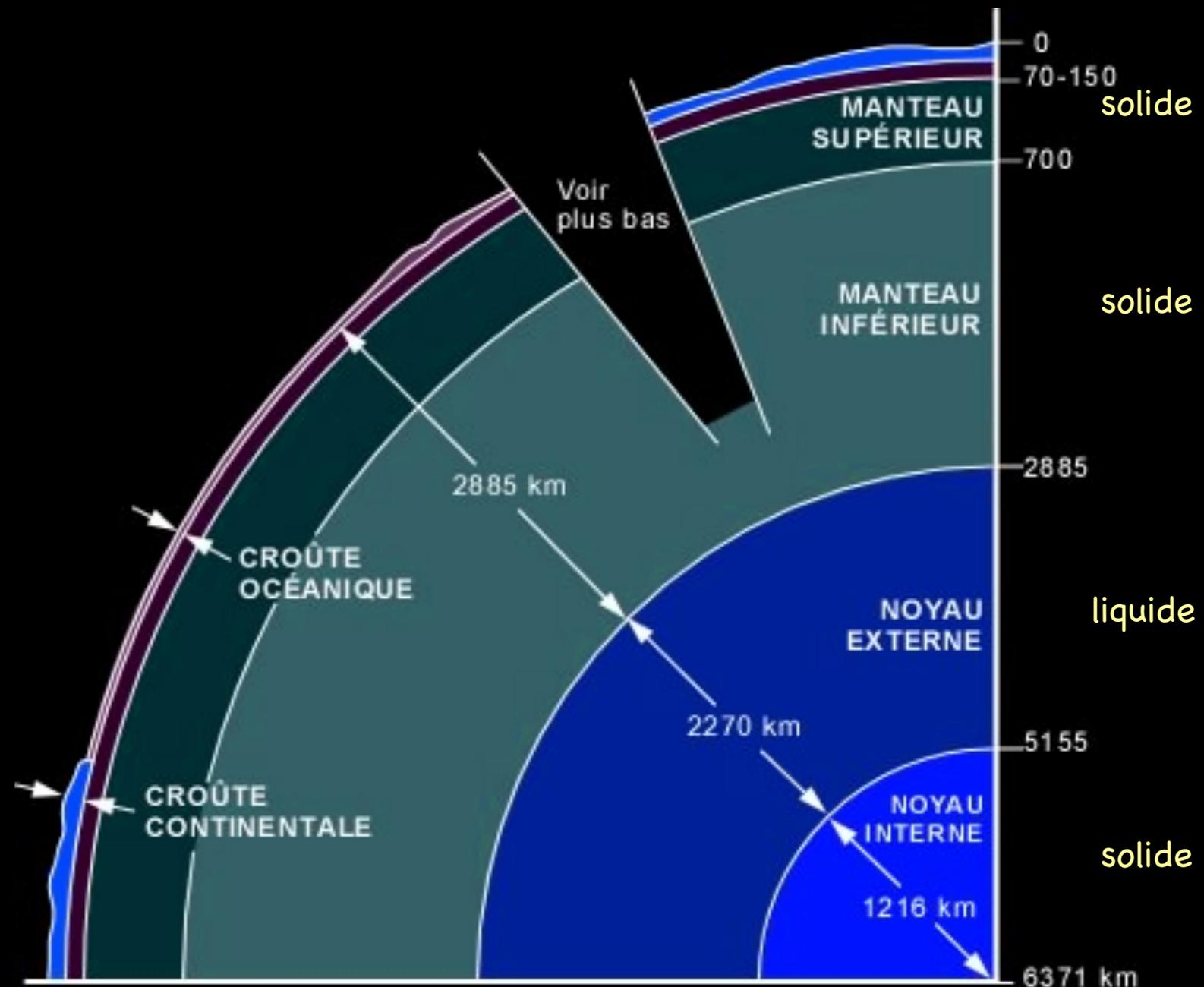
Impossible, car sa température très élevée désordonne les dipôles magnétiques du fer.

L'origine est liée à la rotation de la terre qui induit des courants de convection dans le noyau externe, constitué de métal en fusion.

Le champ magnétique terrestre varie dans l'espace et dans le temps.

La compréhension du mécanisme qui le génère est importante (tentative de reconstitution au labo géodynamo du CNRS, modèle de sodium en fusion) car le champ magnétique terrestre protège des radiations cosmiques nocives pour les organismes vivants.

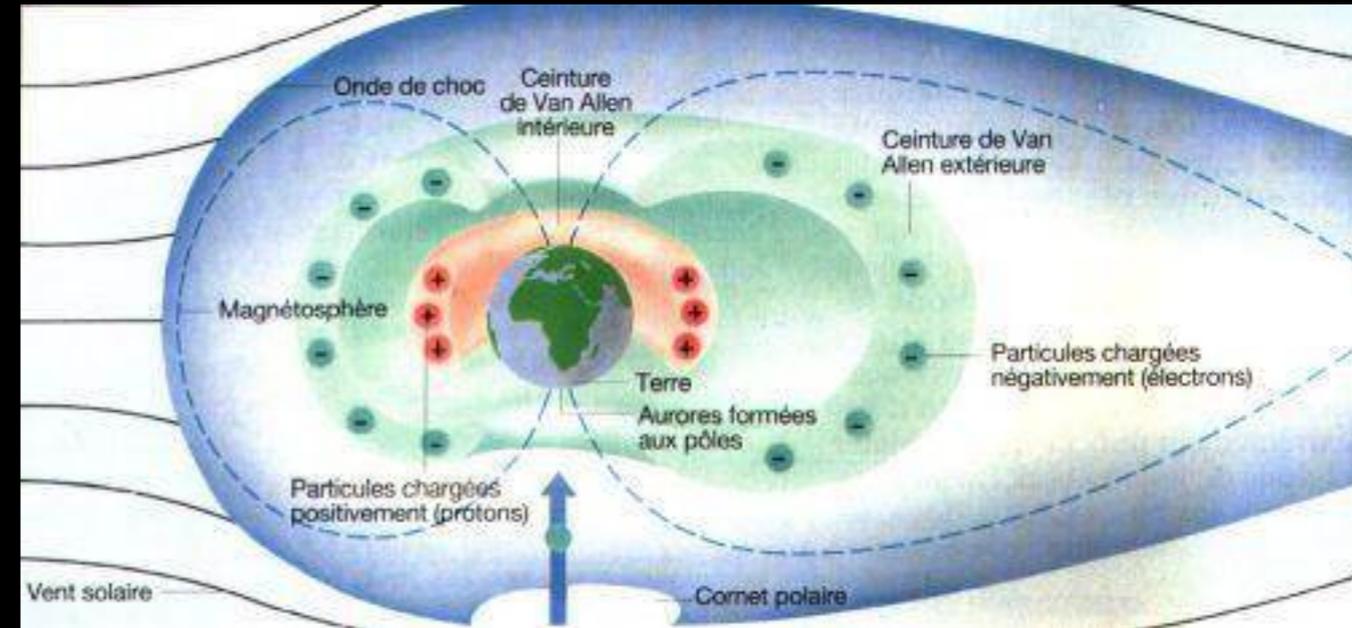
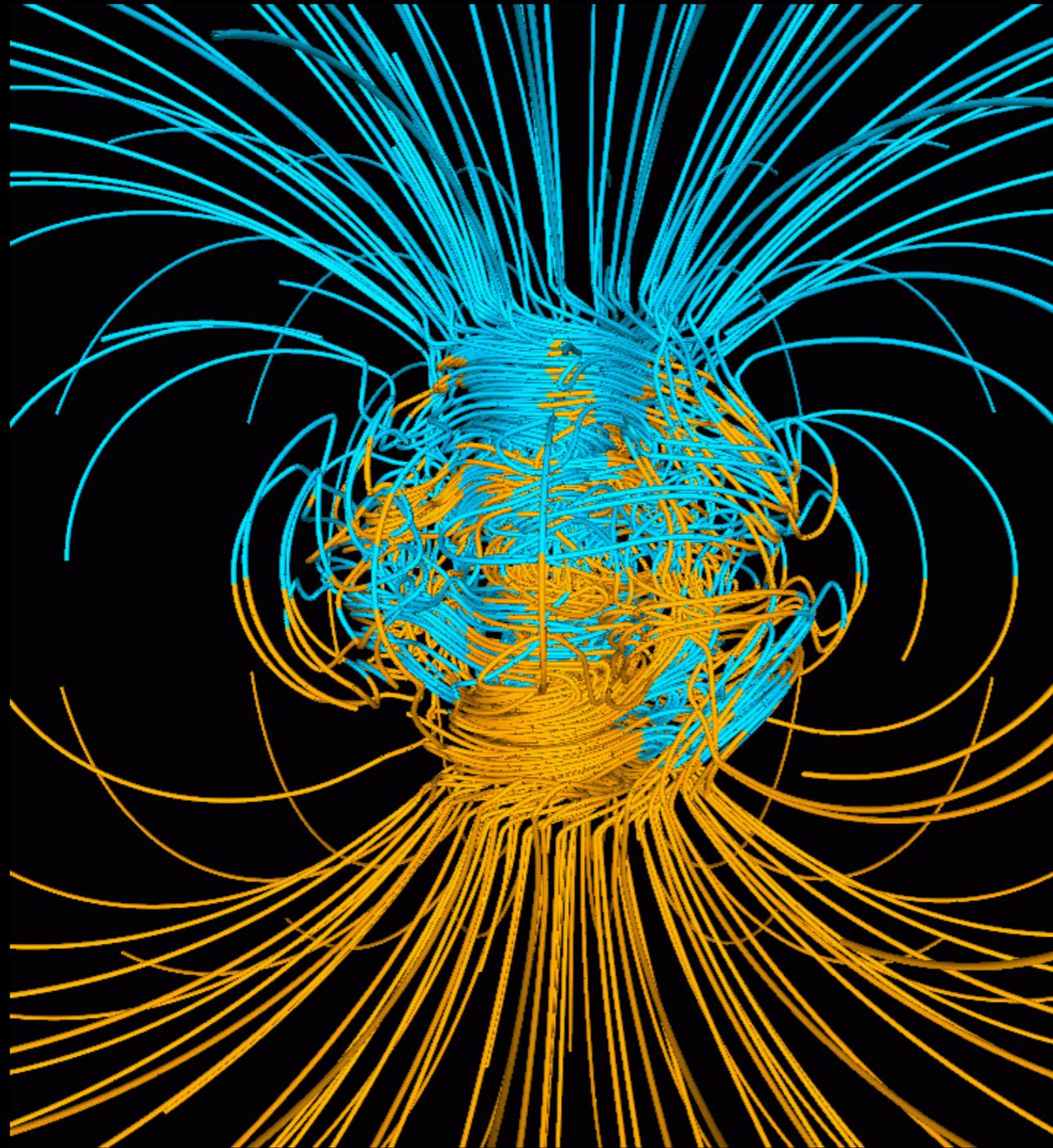
Le paléomagnétisme étudie l'orientation du champ magnétique dans le passé, grâce aux laves solidifiées qui conservent ainsi une orientation magnétique figée.



Partie 5 – Le magnétisme

F. Propriétés magnétiques de la matière

2) Champ magnétique terrestre



Partie 5 – Le magnétisme

F. Propriétés magnétiques de la matière

Application : IRM

IRM : imagerie par résonance magnétique

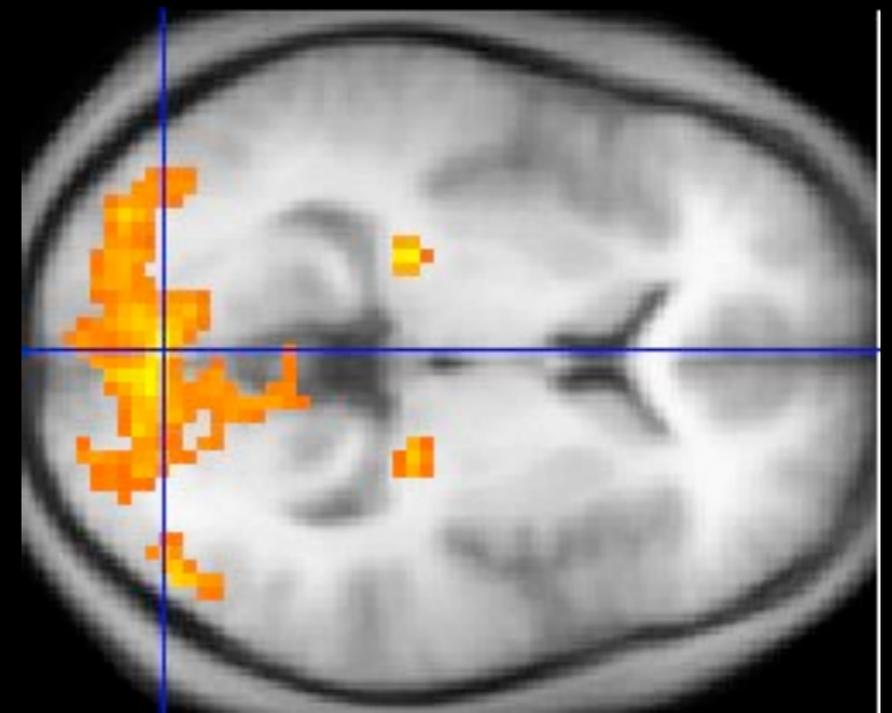
L'IRM utilise les propriétés magnétiques des atomes d'hydrogène, présents dans la molécule d'eau et donc présents dans les organismes vivants.

Le principe physique consiste à appliquer de manière très brève un champ magnétique intense (de 1 à plusieurs tesla) qui permet d'orienter le dipôle magnétique permanent des protons. L'IRM examine alors comment se déroule la relaxation (retour à l'orientation naturelle) après disparition du champ externe.

Selon les tissus, cette relaxation s'opère différemment, ce qui permet de cartographier leur répartition spatiale et donc d'obtenir une "image" de ces tissus.

Certains tissus sont pauvres en protons et ne sont pas observés en IRM (os, tendons).

L'IRM fonctionnelle consiste à observer l'activité du cerveau en fonction de l'utilisation de l'oxygène du sang : la molécule d'oxyhémoglobine est diamagnétique, donc non active en IRM, alors que la désoxyhémoglobine possède un moment magnétique. Il est ainsi possible d'observer l'activité cérébrale en temps réel, selon les tâches cognitives.



Partie 5 – Le magnétisme

F. pour aller plus loin... les équations de Maxwell

Les équations de Maxwell décrivent les phénomènes électriques et magnétiques, qui sont indépendants en statique, mais liés dès lors qu'ils dépendent du temps.

Equation de Maxwell-Gauss $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ avec $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\partial E}{\partial z}$

... en français : la divergence du champ électrique est proportionnelle à la distribution de charges électriques.

Equation de Maxwell-Thomson $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$

... en anglais : the divergence of the magnetic field vector is... zero !

Equation de Maxwell-Thomson $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

... en français : le rotationnel du champ électrique est (inversement) proportionnel à la variation du champ magnétique au cours du temps.

Equation de Maxwell-Thomson $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

... en chinois : 旋转磁场是其依赖于电场随时间变化和固定电流的总和

... en thaï : สนามแม่เหล็กหมุนเป็นผลรวมของการพึ่งพาการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเมื่อเวลาผ่านไปและกระแสไฟฟ้าคงที่

... en français : le rotationnel du champ magnétique est la somme de (i) sa dépendance à la variation du champ électrique au cours du temps et (ii) d'un courant électrique fixe.