

Université de Ferhat Abbas sétifl
Institut d'architectur et des sciences de la terre
Département des sciencenes de la terre.



COURS DE MAGNETISME

Présenté par : Dr. HAMLAOUI MAHMOUD

Introduction

1 - Aimants

2 - Notion de champ magnétique - Electromagnétisme

-3- Rappel théorique

4- Magnétisme terrestre

5- Propriétés magnétiques de la matière

A - Le Diamagnétisme

B - Le Paramagnétisme

C - Le Ferromagnétisme

D - Les Supraconducteurs

6-Origine atomique des propriétés magnétiques de la matière

Introduction

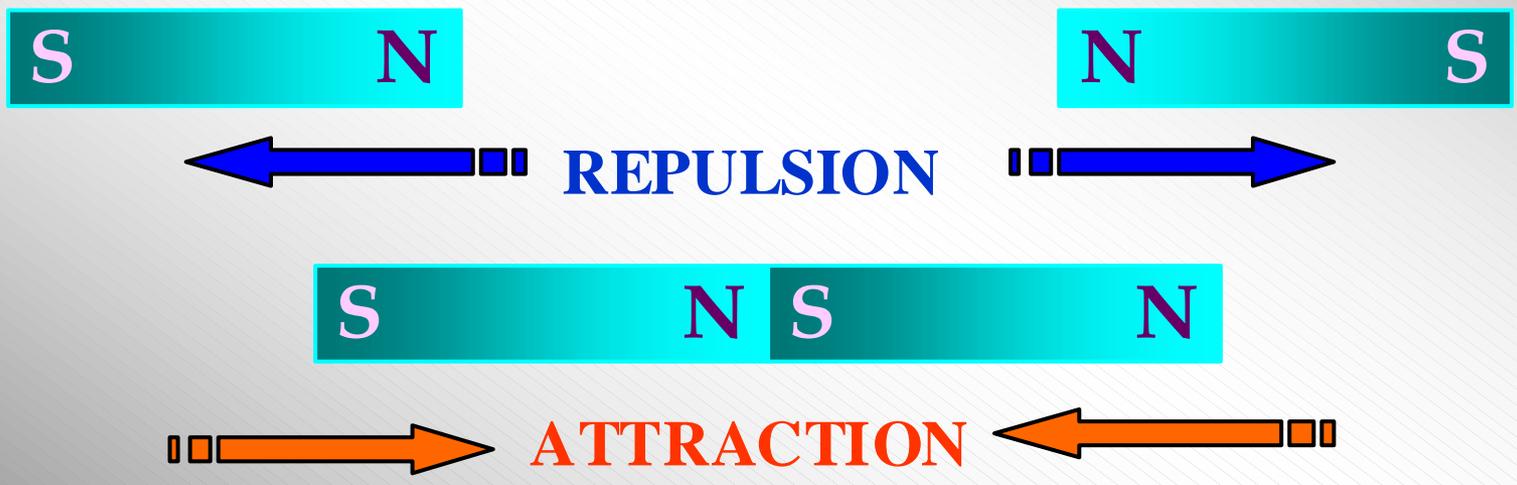
Le **magnétisme** est un des plus anciens phénomènes connus d'**interaction à distance**. Il est connu depuis l'antiquité. Les Grecs, les Romains et les Chinois avaient remarqué que **l'oxyde de fer (Fe) magnétique, la magnétite***, avait la **faculté d'attirer les objets contenant du fer**. Ils avaient également constaté **qu'un morceau de Fe mis en contact avec la magnétite acquérait la même propriété**. Au **XIème siècle**, les Arabes utilisaient le magnétisme pour la **navigation en mer avec la boussole** (aiguille magnétique flottant sur l'eau), une invention des Chinois, **seize siècles auparavant**.

***La magnétite: oxyde de Fer de formule Fe_3O_4**

1 - Aimants -

2 barreaux interagissent  attraction ou répulsion

ce qui permet de distinguer 2 pôles: **NORD** et **SUD**



Une aiguille aimantée montée sur un pivot s'oriente vers le pôle nord géographique d'où son nom.



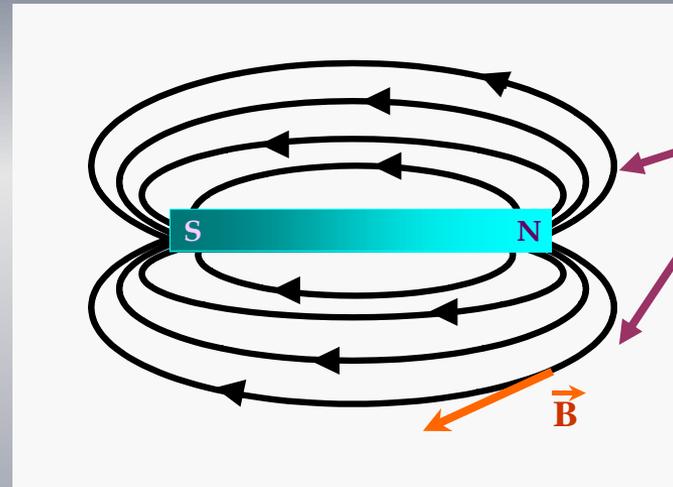
2 - Notion de champ magnétique - - Electromagnétisme -

Champ magnétique

Les physiciens ont introduit la notion de champ magnétique pour décrire l'interaction entre 2 aimants.

Le premier aimant crée un champ magnétique B dans son environnement

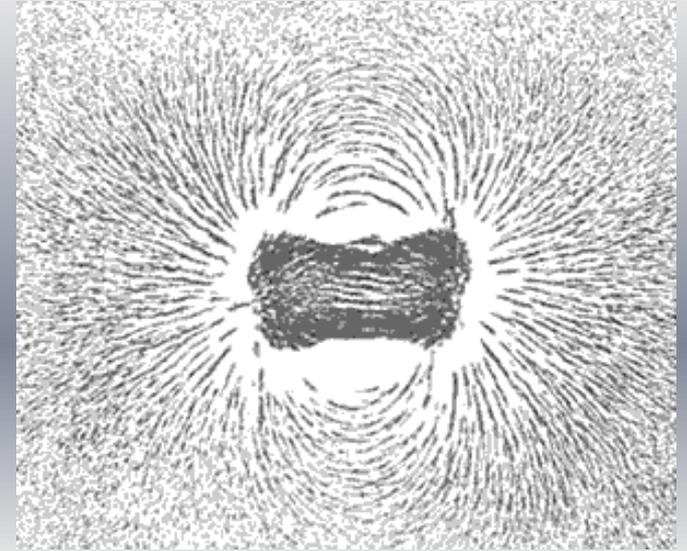
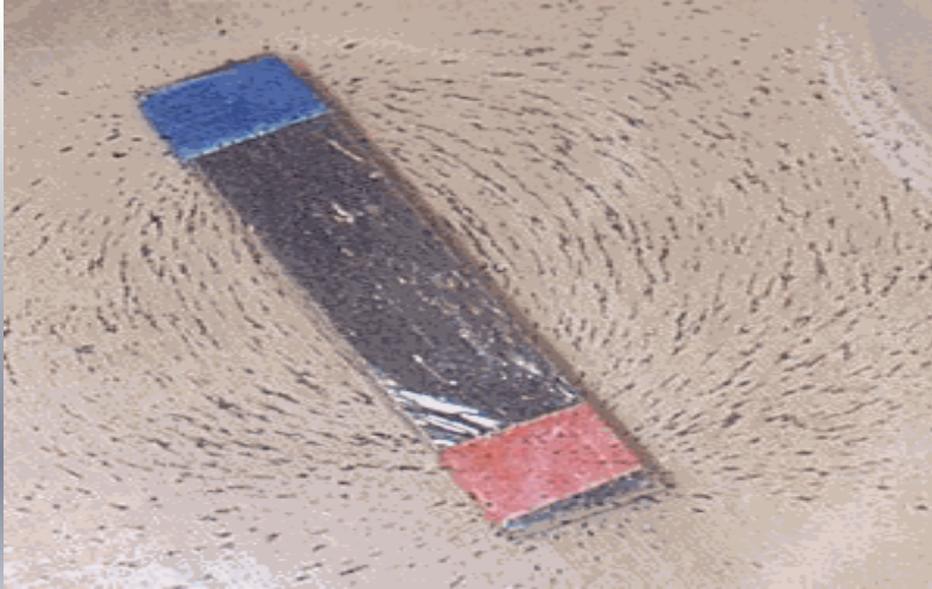
Ce champ magnétique agit sur un autre aimant. La force magnétique tend à aligner l'aimant dans la direction du champ magnétique B .



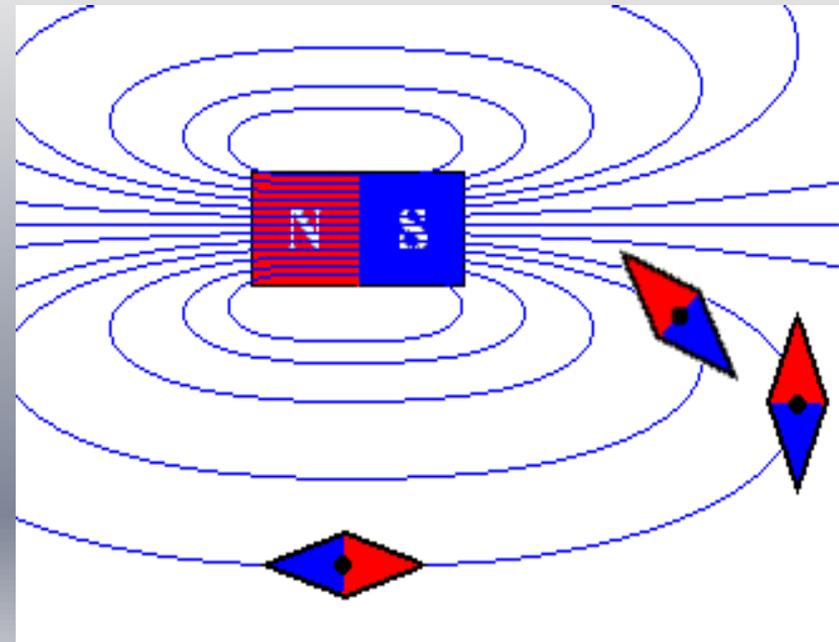
lignes de
champ magnétique

Ainsi l'aiguille d'une boussole s'oriente dans la direction du champ magnétique terrestre.

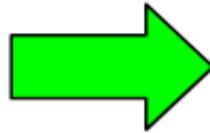




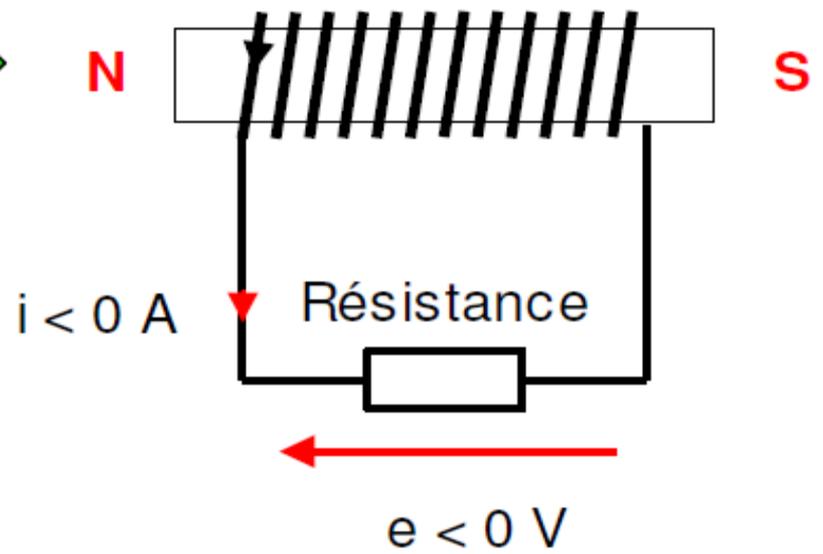
Une des expériences qui permet de caractériser ce champ est celui de la **limaille de fer** : on pose un aimant au milieu de limailles de fer éparpillées et il se dessine alors ce qu'on appelle les **lignes de champ ou lignes de force**. En fait, le champ magnétique créé par l'aimant transforme **chaque grain** de limaille de fer en de **petits aimants qui s'alignent** naturellement selon le champ magnétique.



Aimant



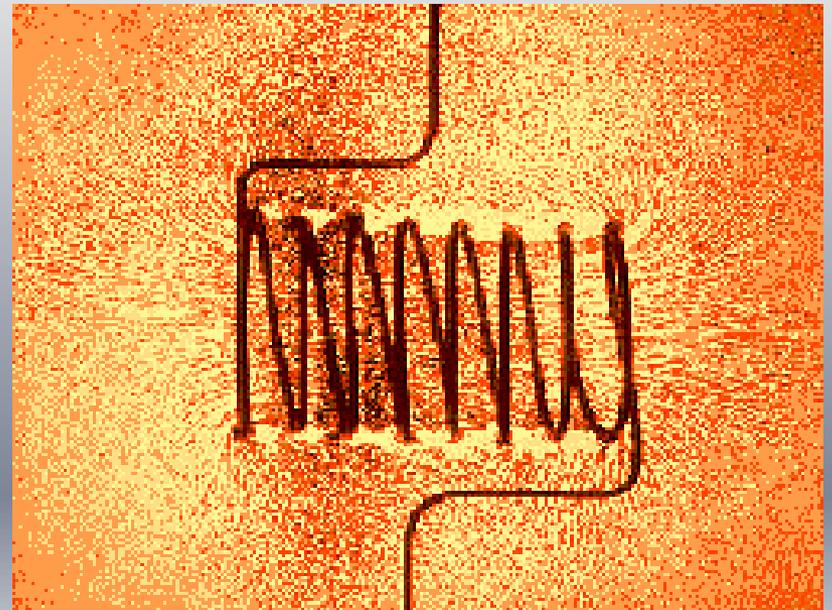
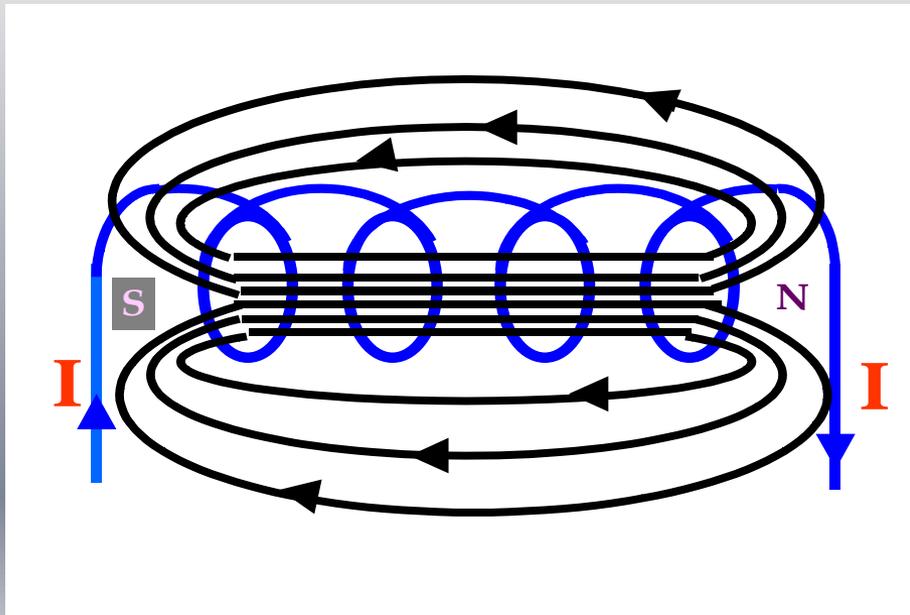
Bobine



Champ magnétique créé par les courants électriques

Oersted a observé que le passage d'un **courant électrique à proximité d'une aiguille aimantée faisait dévier cette aiguille**, donc créait un **champ magnétique**. Les lois de l'électromagnétisme permettant de calculer le champ magnétique crée par un courant ont été données par Ampère, Biot et Savart

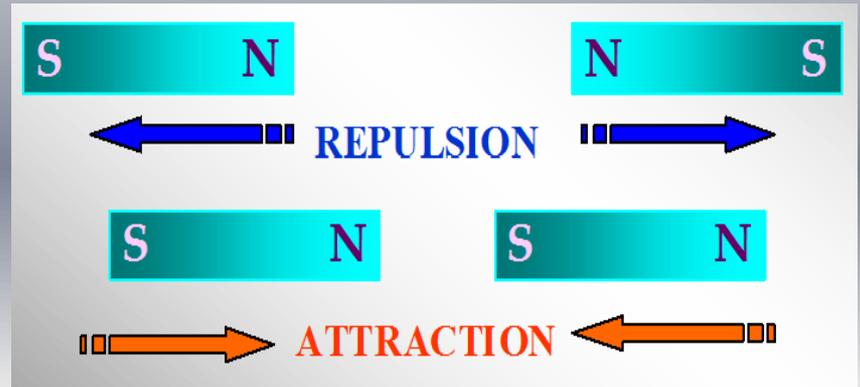
Exemple: champ magnétique d'un solénoïde, analogue à un aimant



Force magnétique

Loi de coulomb pour un pôle magnétique.

$$\vec{F} = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \vec{r}$$



où

F = force en dynes ($\text{cm} \cdot \text{g} / \text{s}^2 = 10^{-5} \text{ N}$)

m_1, m_2 = masses magnétiques ou pôles (emu)

r = distance entre les deux pôles

\vec{r} = vecteur unitaire selon la droite joignant m_1, m_2

μ = perméabilité du milieu autour des pôles = 1 dans le vide et l'air

La notion de pôle est artificielle parce qu'elle ne peut exister par elle-même : elle a besoin d'une paire.

Si deux pôles de 1 emu sont placés dans le vide à 1 cm l'un de l'autre, la force entre eux sera de 1 dyne.

La force est attractive si les deux pôles sont de signes opposés et répulsive s'ils sont de même signe.

Par convention, un pôle est positif s'il est attiré par le nord magnétique de la terre et négatif s'il est attiré par le pôle sud.

Champ magnétique

Une masse magnétique m_1 apportée au point M de l'espace est soumise à l'attraction émanant d'une autre masse magnétique m située à une distance r du point M. L'intensité du champ magnétique H est définie comme la force exercée sur un pôle unitaire :

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m_1} = \frac{m}{\mu r^2} \vec{r}$$

On suppose que m_1 n'est pas assez grand pour affecter le champ H au point de mesure, c'est à dire $m_1 \ll m$.

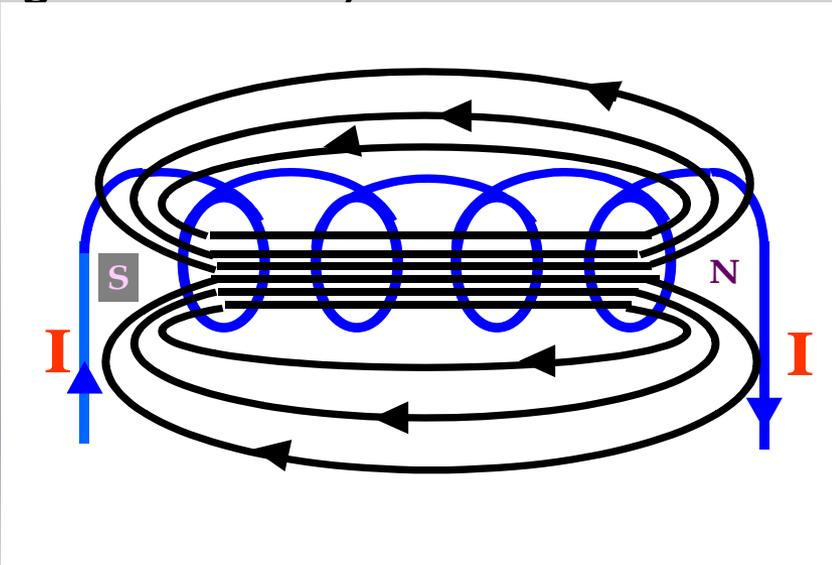
En unités CGS, l'unité du champ est l'oersted.

En géophysique, on mesure des variations de l'ordre de 10^{-4} fois l'amplitude du champ magnétique terrestre, qui est environ 0.5 Oe.

Moment magnétique

Il n'y a pas de masse magnétique libre. Seul le dipôle, association de deux pôles $-m$ et $+m$ séparés d'une distance l , a une signification physique.

Le moment magnétique M du dipôle est un vecteur dirigé suivant la droite joignant $-m$ à $+m$, orienté de $-m$ à $+m$ et d'intensité :



$$\vec{M} = ml\vec{r}$$

Intensité de la magnétisation

Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe sera magnétisé par induction.

L'intensité de la magnétisation est proportionnelle à la force du champ et sa direction est dans celle du champ. Elle est définie comme le moment magnétique par unité de volume :

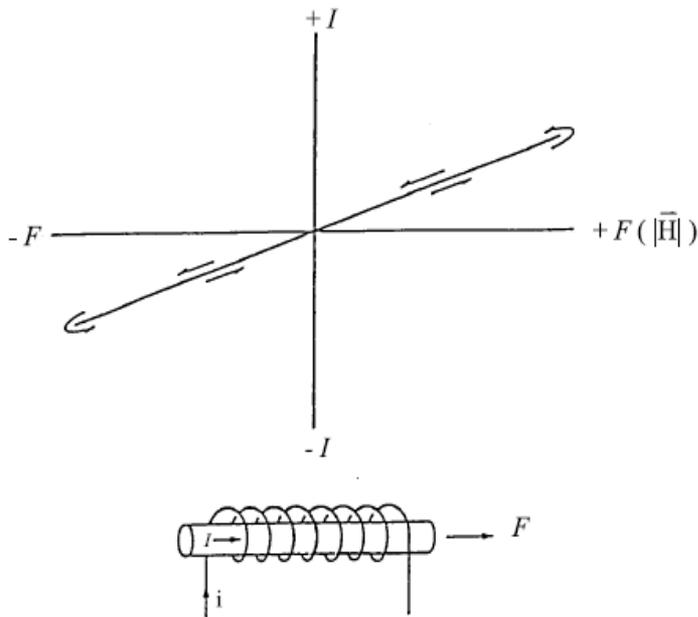
$$\vec{I} = \frac{\vec{M}}{v}$$

Il porte souvent le nom de polarisation magnétique parce que l'induction tend à aligner les dipôles du corps magnétique.

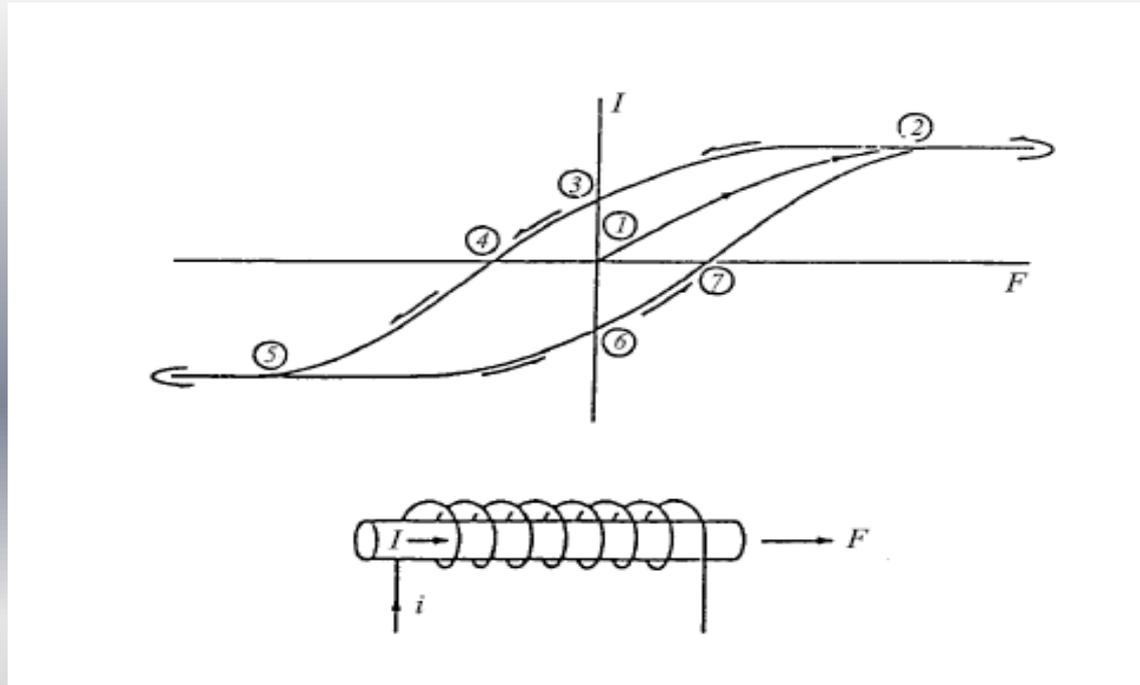
Susceptibilité magnétique

Le degré de magnétisation d'un corps sera déterminé par sa susceptibilité magnétique k .

$$k = \frac{\vec{I}}{\vec{H}} \quad \vec{I} = k\vec{H}$$



Moment magnétique induit par unité de volume I dans une barre, qui varie proportionnellement avec la direction de l'intensité de magnétisation et de champ F produit par le courant électrique dans la bobine. **La pente de la droite est la susceptibilité magnétique k de la barre.**



Courbe d'hystérésis

La séquence de nombres indiquent le cycle de magnétisation.

En prospection magnétique, la susceptibilité magnétique est un paramètre fondamental, puisque la réponse magnétique des roches est fonction du contenu en matériel magnétique, qui lui aura une susceptibilité beaucoup plus grande que celle de la roche elle-même.

Induction magnétique

Un corps magnétique placé dans un champ magnétique externe H , aura ses pôles magnétiques plus ou moins alignés sous l'effet de H , produisant un champ H_0 relié à l'intensité de la magnétisation I . L'induction magnétique sera alors le champ total à l'intérieur du corps :

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \vec{H} + \vec{H}' \\ \text{En unités CGS} &= \vec{H} + 4\pi\vec{I} \\ &= (1 + 4\pi k) \vec{H}\end{aligned}$$

Par définition, le rapport de l'induction sur le champ magnétique principal est la perméabilité μ

Dans le système CGS,
 B : gauss, H : Oersted

$$\begin{aligned}\vec{B} &= (1 + 4\pi k) \vec{H} \\ &= \mu \vec{H}\end{aligned}$$

On a donc que la perméabilité magnétique $\mu = (1 + 4k)$. En général on peut écrire : $\mu = \mu_0(1 + 4k)$ avec $\mu = 1$ pour le vide (unité CGS).

En unités SI, $B = \mu_0 \cdot H$ dans le vide (ou dans l'air) si le matériel est polarisable.

$$\begin{aligned}\vec{B} &= \mu_o(\vec{H} + \vec{H}') \quad \text{où } \vec{H}' = \vec{I} \\ &= \mu_o\vec{H} + \mu_o k\vec{H}' \\ &= \mu_o(1 + k)\vec{H}\end{aligned}$$

où

μ = perméabilité du matériau

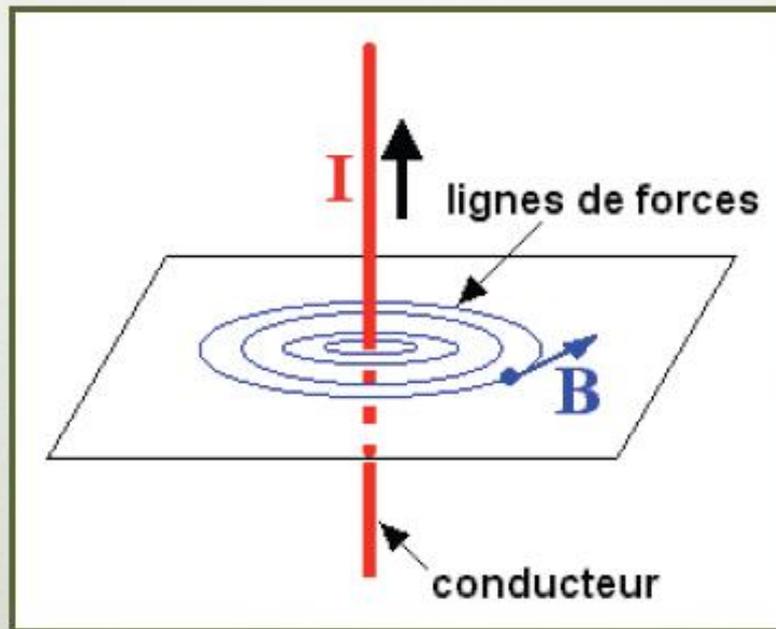
μ_o = perméabilité du vide (de l'air) = $4\pi \times 10^{-7}$ (SI)

B = en tesla ou Weber/m²

H = en A/m

Champ créé par un courant

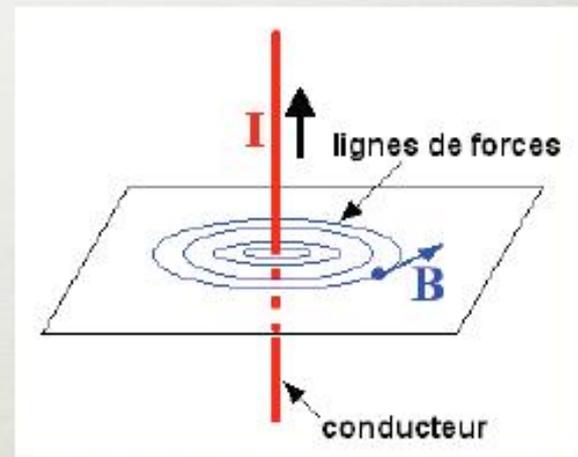
passant dans un fil rectiligne très long



Valeurs du champ magnétique \vec{B}

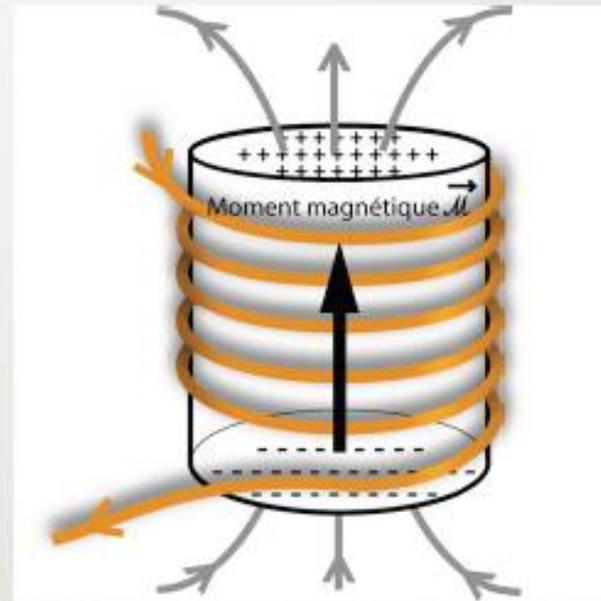
Champ magnétique créé par un fil très long,
à 1 cm du fil parcouru par un courant
 $I = 5,0$ ampères : **$B = 0,000 I$ tesla**
(un dix-millième de tesla) à 1 cm du fil

Le champ magnétique terrestre
est à peine plus petit



Comment créer des champs magnétiques plus forts ?

Champ magnétique créé en son centre par une bobine plate de diamètre 5 cm, comportant **1 000** spires, parcourue par un courant $I = 5,0$ ampères : environ **0,1 tesla**



Et des champs magnétiques \vec{B} encore plus forts ?

- bobine supraconductrice : 20 T
- bobine à très fort refroidissement (à dissipation de puissance, LCMI) : 25 T



Et des champs magnétiques \vec{B} vraiment très forts ?

- champ transitoire (pulsé) : 100 T
- champ dans étoile à neutrons : 10^8 T
(cent millions de tesla)

Potentiel magnétostatique

Comme en gravimétrie, le champ magnétique H est un champ conservatif. Il peut donc s'exprimer comme le gradient d'un potentiel scalaire. Le potentiel étant le travail nécessaire pour déplacer un pôle unitaire entre deux points dans le champ magnétique.

le potentiel A ,

$$H(\vec{r}) = -\nabla A(\vec{r})$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

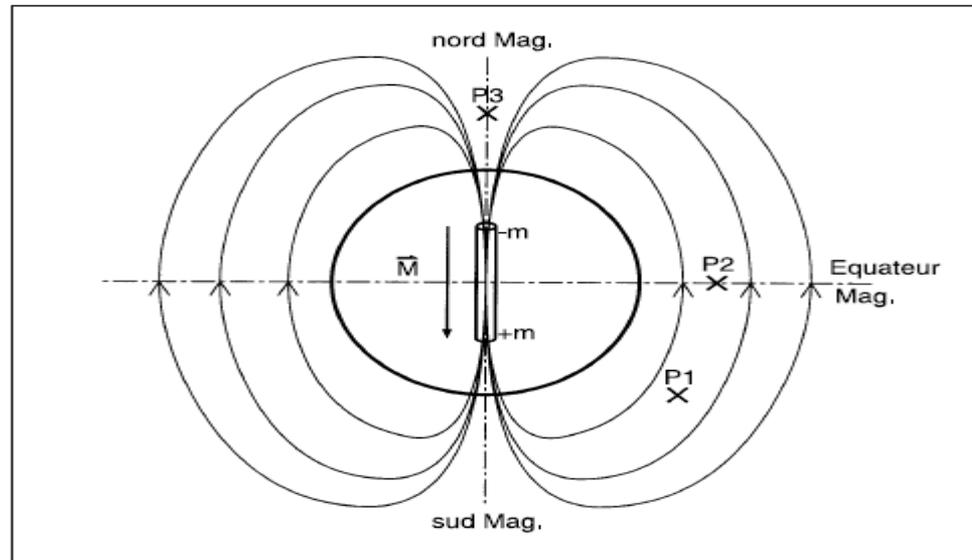
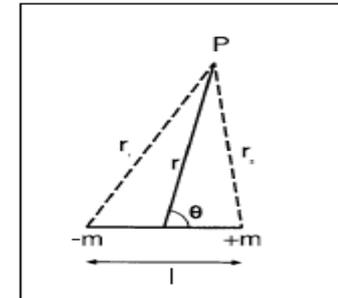
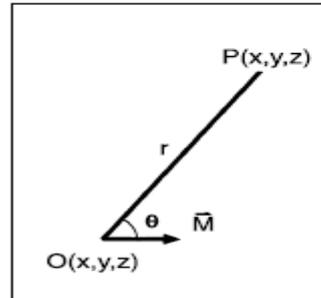
$$A(\vec{r}) = - \int_{\infty}^r H(\vec{r}) dr = \frac{m}{\mu r}$$

Puisqu'un dipôle magnétique seul est une notion fictive, le potentiel magnétique scalaire est une notion plutôt nébuleuse. Une entité plus palpable est le dipôle magnétique.

Potentiel du dipôle

Soit un dipôle placé en un point O de l'espace. On peut calculer son potentiel A en un point P situé à une distance r de O.

$$A = -\frac{m}{r_1} + \frac{m}{r_2}$$
$$= \frac{(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} \text{ avec } \mu = 1$$



À la limite, si $r \gg l$, alors $r_1 - r_2 = l \cos \theta$ et $r_1 \simeq r_2 \simeq r$

$$\begin{aligned} A &= \frac{lm \cos \theta}{r^2} \\ &= \frac{M \cos \theta}{r^2} \end{aligned}$$

Le champ \vec{H} est obtenu en prenant $\vec{H} = -\nabla A$. On obtient deux composantes H_r radiale et H_θ tangentielle où :

$$\begin{aligned} H_r &= \frac{2M}{r^3} \cos \theta \\ H_\theta &= \frac{M}{r^3} \sin \theta \end{aligned}$$

Le champ du dipôle est inversement proportionnel au cube de la distance.
Quand $\theta = 0$ ou π , appelées les premières positions de Gauss.

$$H_r = \frac{2M}{r^3} \quad H_\theta = 0$$

Quand $\theta = \pi/2$ ou $3\pi/2$, appelées les deuxièmes positions de Gauss.

$$H_r = 0 \quad H_\theta = \frac{M}{r^3}$$

$$\vec{r} = \vec{OP}$$
$$A = \frac{\vec{M} \cdot \vec{r}}{r^3}$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2$$

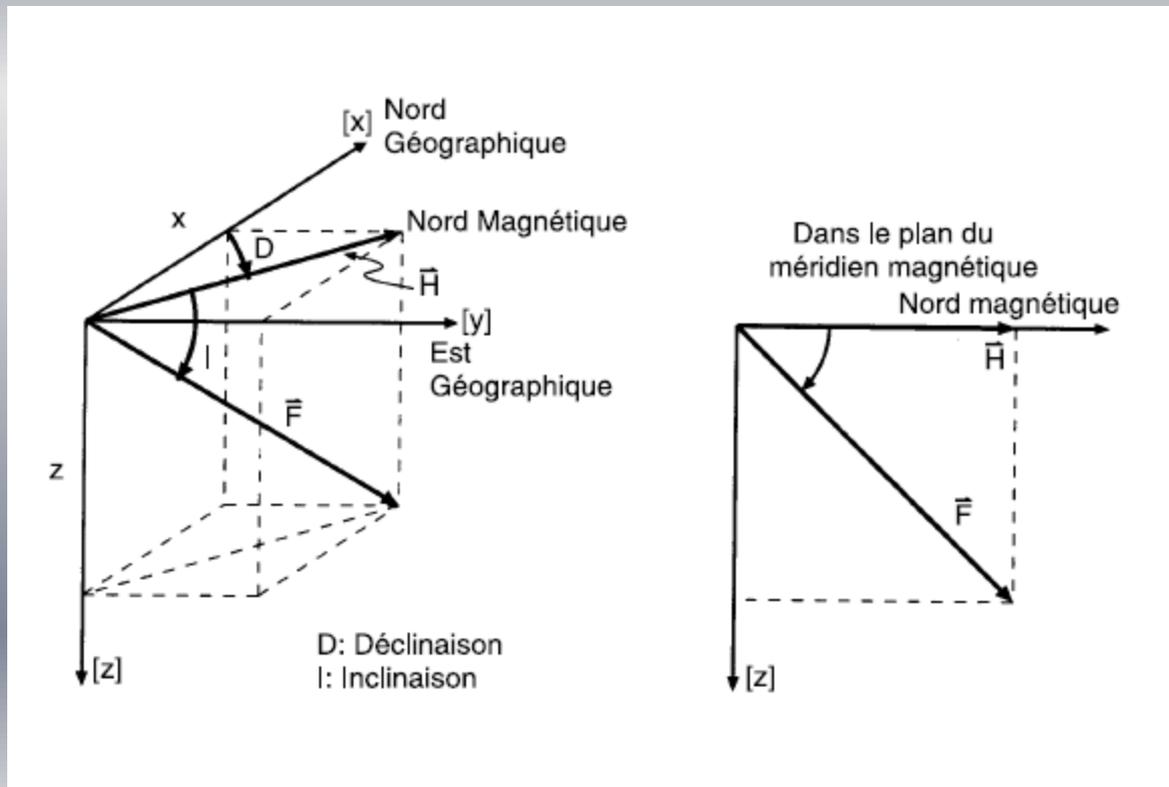
$$A = \frac{M_x(x - x_0)}{r^3} + \frac{M_y(y - y_0)}{r^3} + \frac{M_z(z - z_0)}{r^3} = - \left[M_x \frac{\partial 1/r}{\partial x} + M_y \frac{\partial 1/r}{\partial y} + M_z \frac{\partial 1/r}{\partial z} \right]$$
$$= -\vec{M} \cdot \nabla(1/r)$$

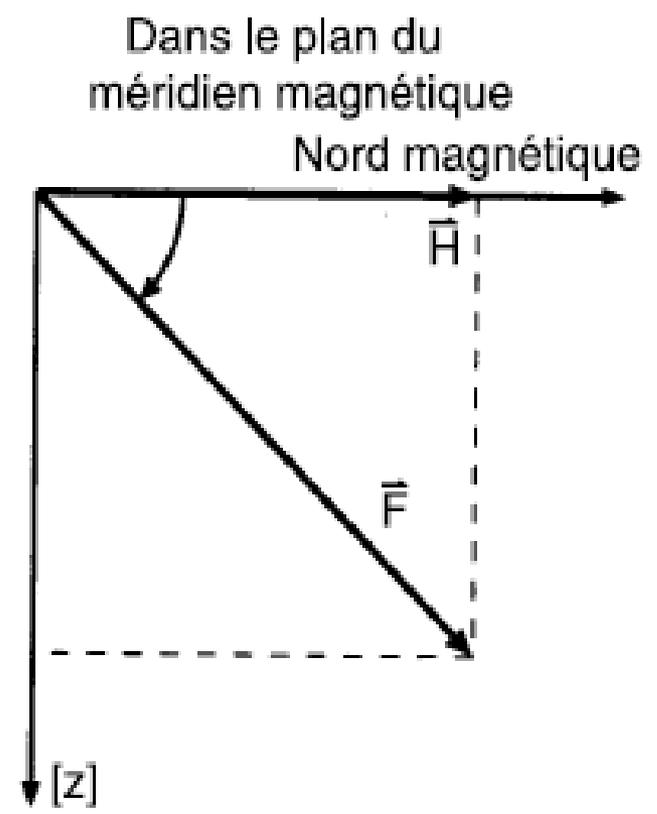
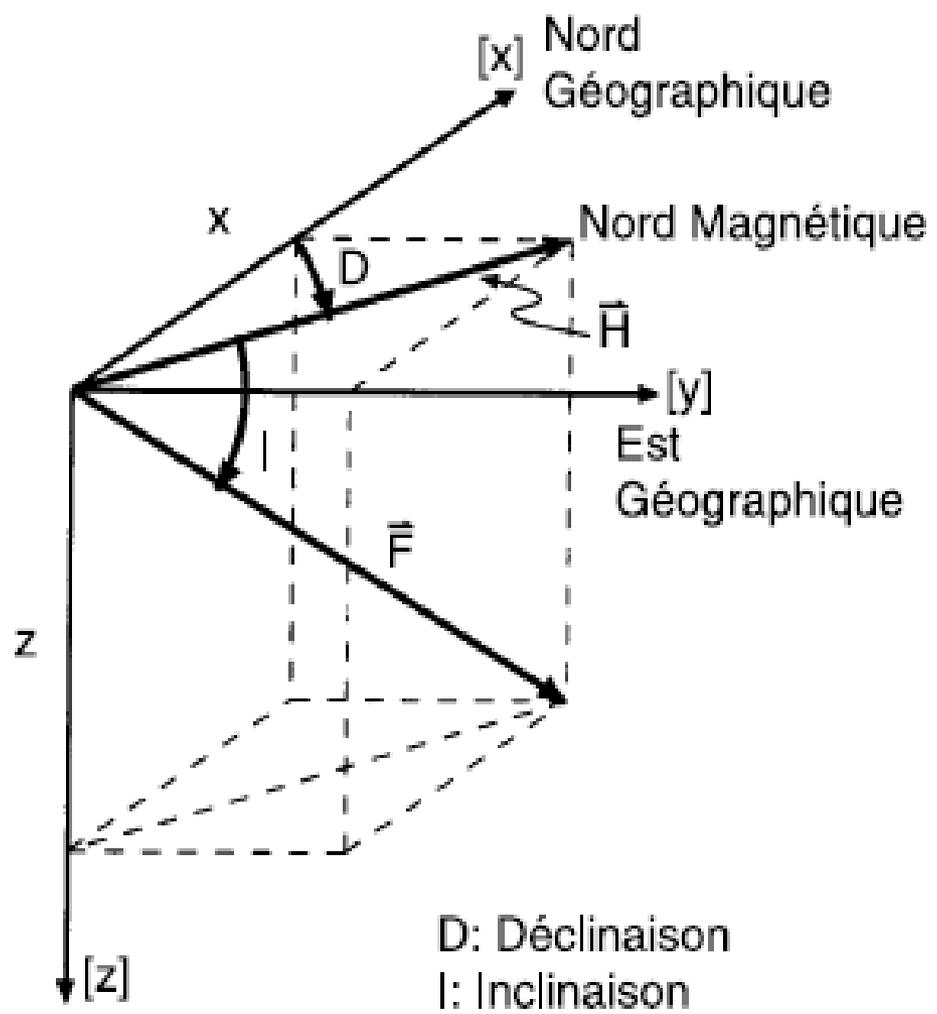
Magnétisme de la terre

Champ magnétique terrestre peut être défini par 3 composantes en tout point donné :

- nord, sud, verticale (x,y,z)

Très souvent, on donne une valeur exprimée par la grandeur du champ total F et sa Déclinaison D ainsi que son inclinaison I ; ou D est l'angle entre la composante horizontale du champ et le nord géographique et I , l'angle entre F et l'horizontale





$$F^2 = H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

$$H = F \cos I$$

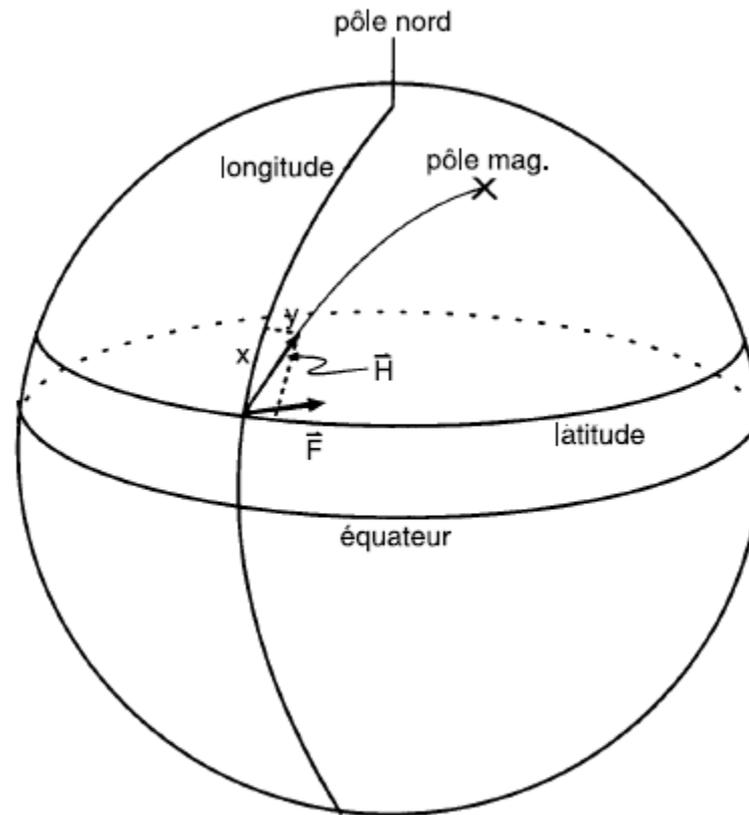
$$Z = F \sin I$$

$$\tan I = Z/H$$

$$X = H \cos D$$

$$Y = H \sin D$$

$$\tan D = Y/X$$



Le champ magnétique de la terre peut être approxime par un champ dipolaire. Il est trop complexe pour être exprime par une fonction mathématique simple, mais il peut être considéré, sur quelques centaines de km, comme uniforme et le bruit de fond géologique est facilement observable.

\vec{F} a un intensité de 0.6 Oe aux pôles magnétiques ($I = \pm 90^\circ$) et minimale de 0.3 Oe à l'équateur magnétique ($I = 0^\circ$)

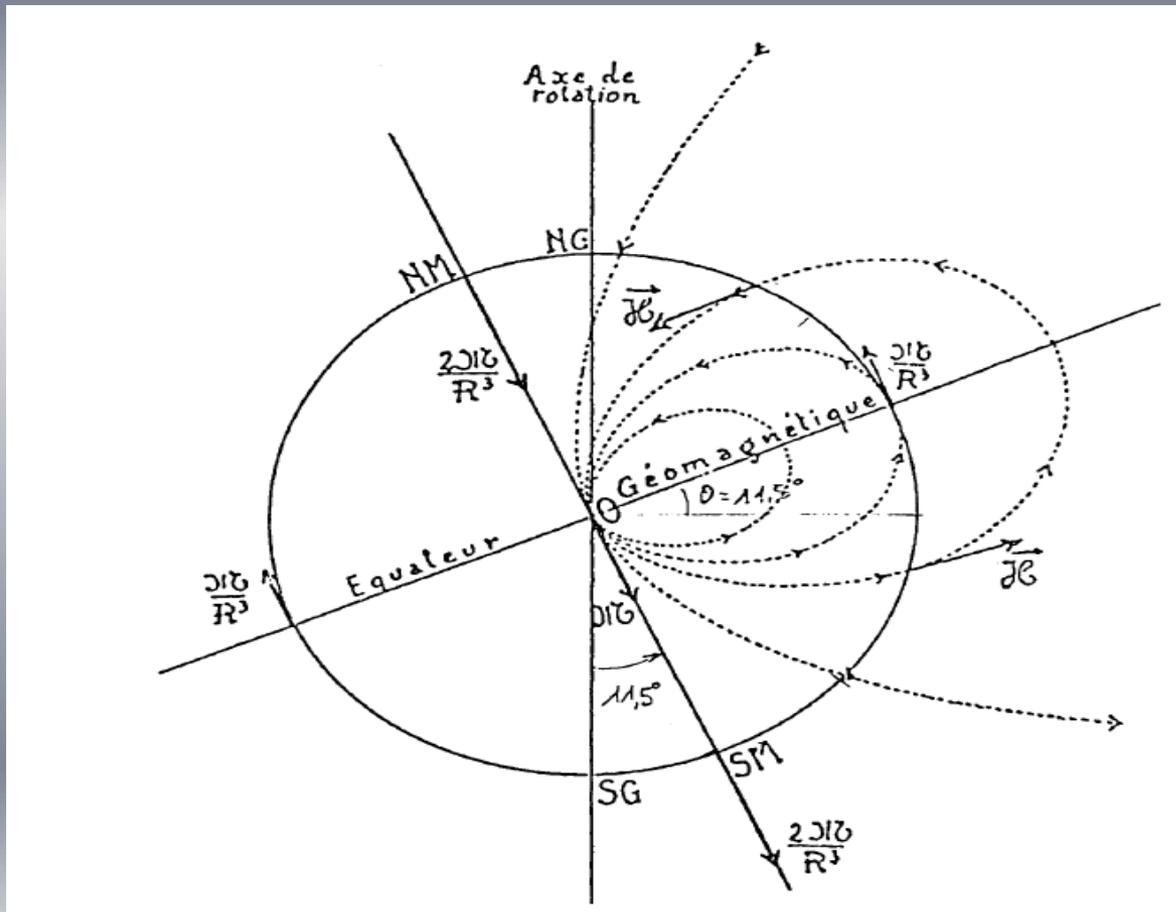
A l'heure actuelle, l'unité utilisée en prospection magnétique est le nanotesla (nT), qui par un jeu de transformation est exactement égal à l'ancienne unité, le γ .

$$1\text{nT} = 10^{-9}\text{T} = 1\gamma$$

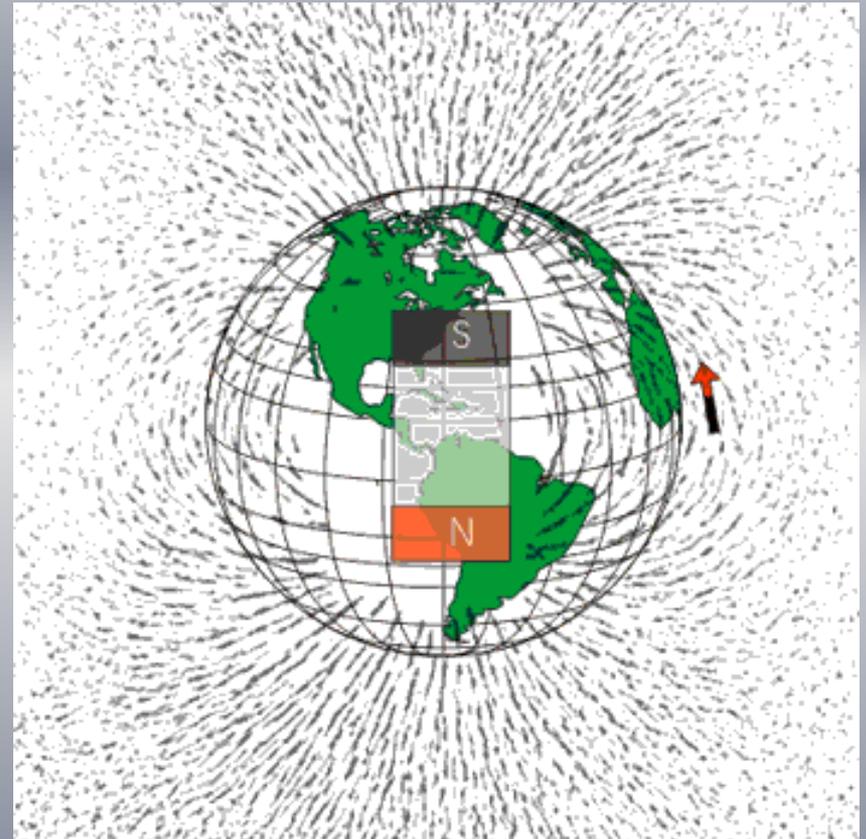
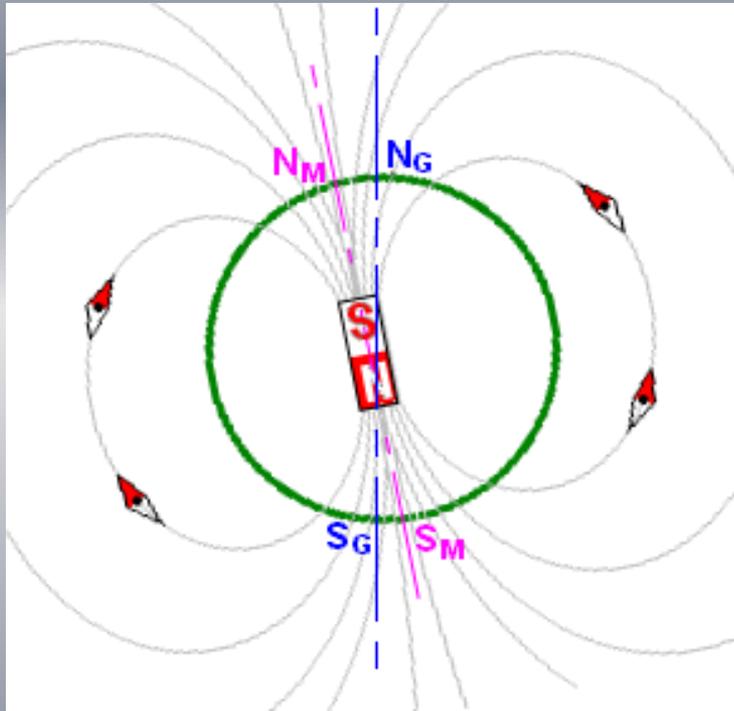
- En CGS, puisque $\mu = 1$ dans l'air (ou le vide), $\vec{B} = \vec{H}$ et 1 Oersted est équivalent à 1 gauss. Comme le gauss est une unité d'induction très grande on a eu recours au gamma (γ) dans le passé pour exprimer dans les champs $1 \gamma = 10^{-5}$ gauss.

Schématisation du champ terrestre

En première approximation, le champ terrestre est celui d'un dipôle placé suivant une droite faisant avec l'axe de rotation un angle de 11.5° et orienté vers l'hémisphère sud. Cette structure schématique du champ magnétique terrestre est appelée champ de Gauss.



Champ magnétique terrestre



Le champ moyen vrai diffère du champ de Gauss qui n'a d'autre intérêt que de fournir un modèle facile à retenir.

Le champ réel est irrégulier et les pôles magnétiques vrais ne coïncident pas avec les pôles géomagnétiques et ne sont pas diamétralement opposés.

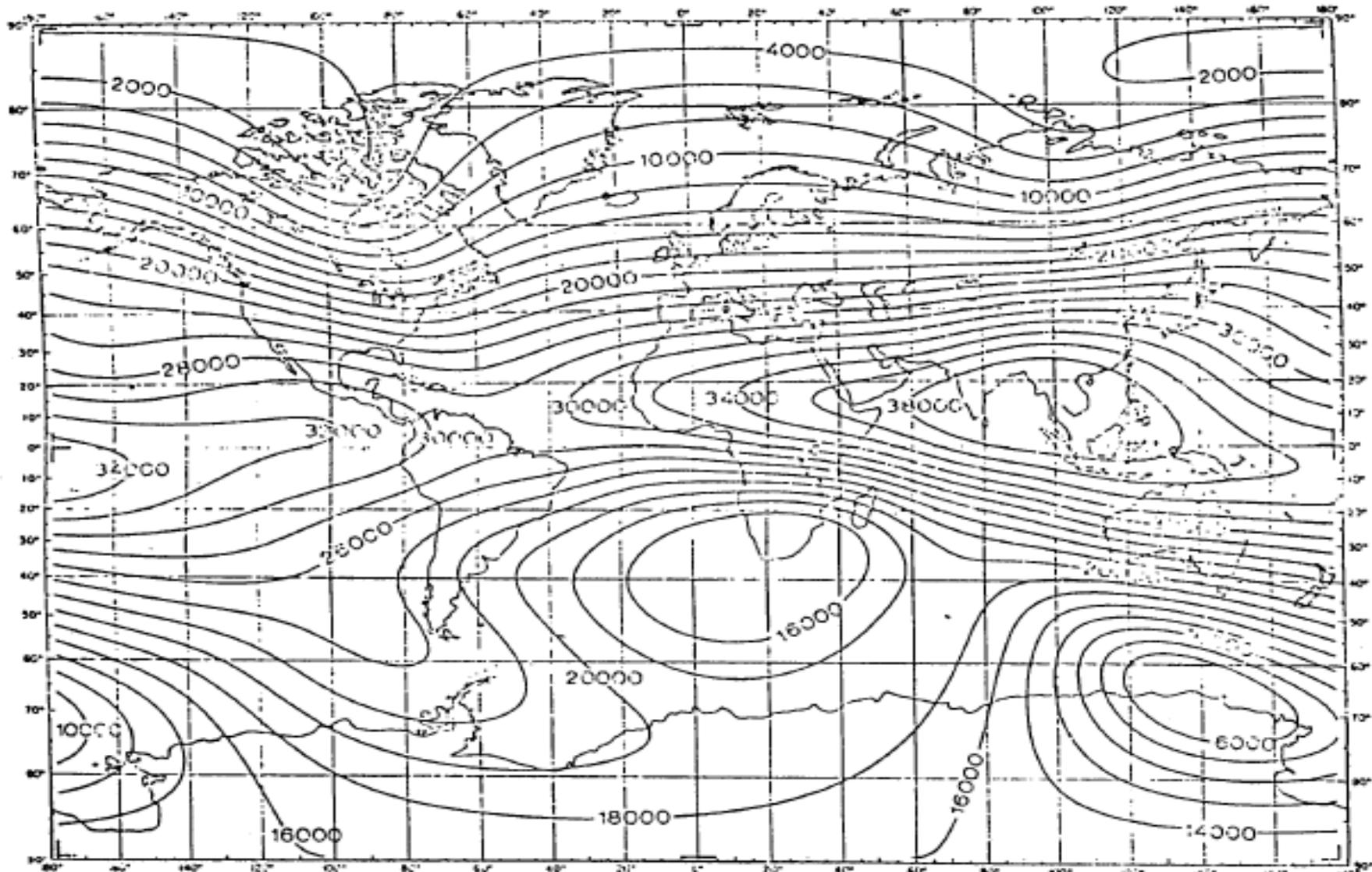
L'intensité du champ aux pôles nord et sud magnétique est de 0.6 et 0.7 Oe respectivement et sa valeur minimum, 0.25 Oe, se trouve au nord du Chili.

La ligne où l'inclinaison $I = 0$ n'est jamais à plus de 15° de l'équateur.

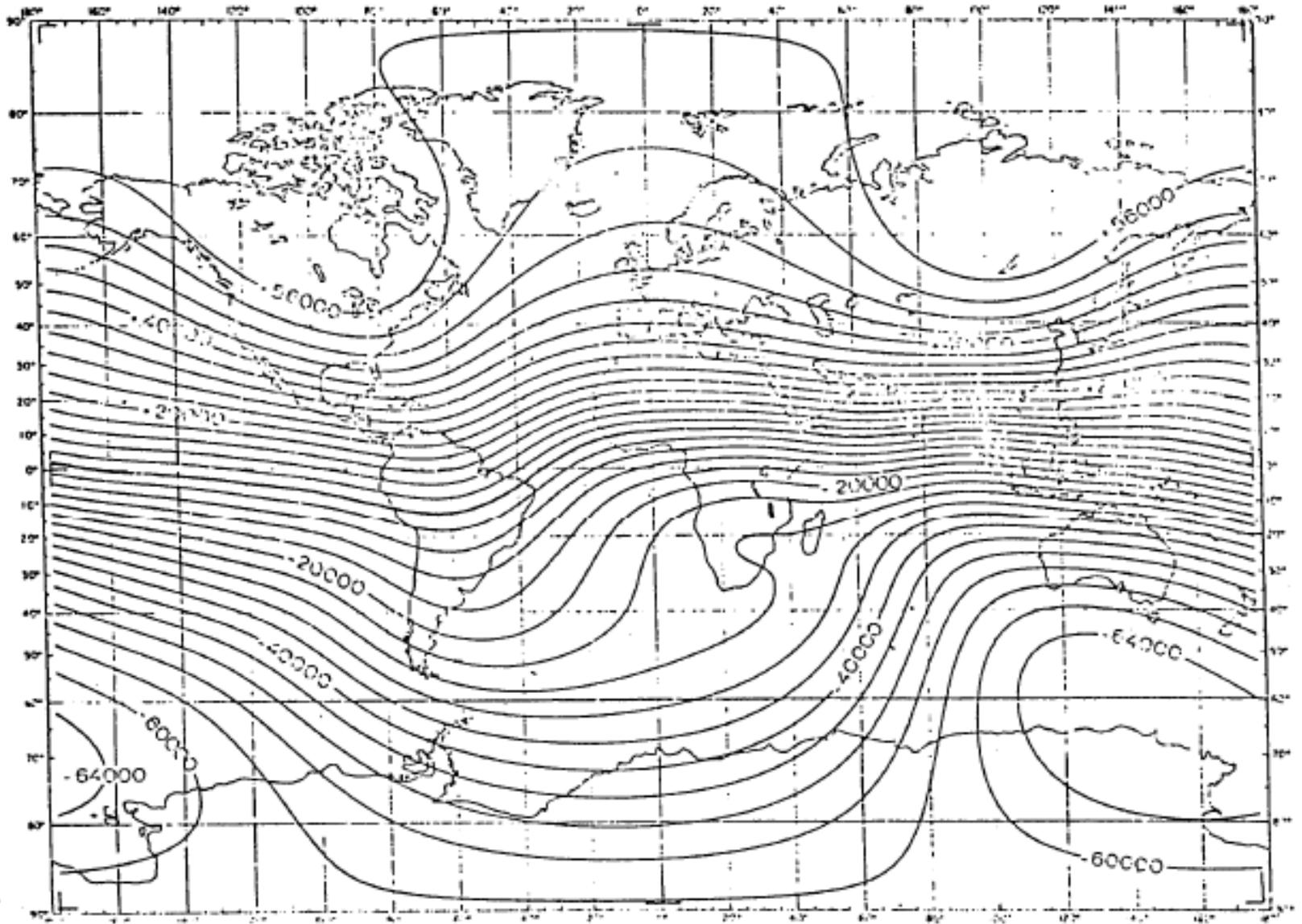
La mise en plan des endroits d'égal inclinaison, déclinaison ou d'intensité magnétique donne des cartes iso magnétiques.

Elles montrent les variations du champ géomagnétique à la surface de la terre.

Notons que le champ magnétique reflète peu la variation de géologie en surface ou de géographie telle que les montagnes, les crêtes sous-marines ou les ceintures de tremblements de terre. La source des champs est probablement plus profonde.



La composante Horizontale (H) du champ magnétique terrestre (gamma)



La composante Verticale (Z) du champ magnétique terrestre (gamma)

Origine du champ principal

Le champ magnétique principal peut théoriquement être causé par une source interne ou externe dont le magnétisme peut être rémanent ou engendré par un flux de courant.

Des analyses mathématiques du champ observé à la surface du globe démontrent qu'au moins 99% est causé par des sources internes et 1% par des sources extérieures à la terre.

Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer les mécanismes des sources internes :

1ère théorie : Blackett (1947)

Il avait évalué le rapport des moments cinétiques et magnétiques des 3 astres (terre, soleil et étoile) et avait constaté que les rapports étaient voisins.

Il avait conclu qu'il s'agissait d'une propriété fondamentale des corps en rotation.

Théorie périmée : Il est parti d'une fausse valeur pour le champ H du soleil

2eme théorie : Cagniard (1961)

Des charges électriques fantastiques internes sont entraînées dans la rotation terrestre et créent l'équivalent d'un dipôle.

Abandonné parce que la magnétisation engendrée par le mouvement des corps est trop faible et le gradient du potentiel devrait être immense.

Théorie actuelle : La dynamo

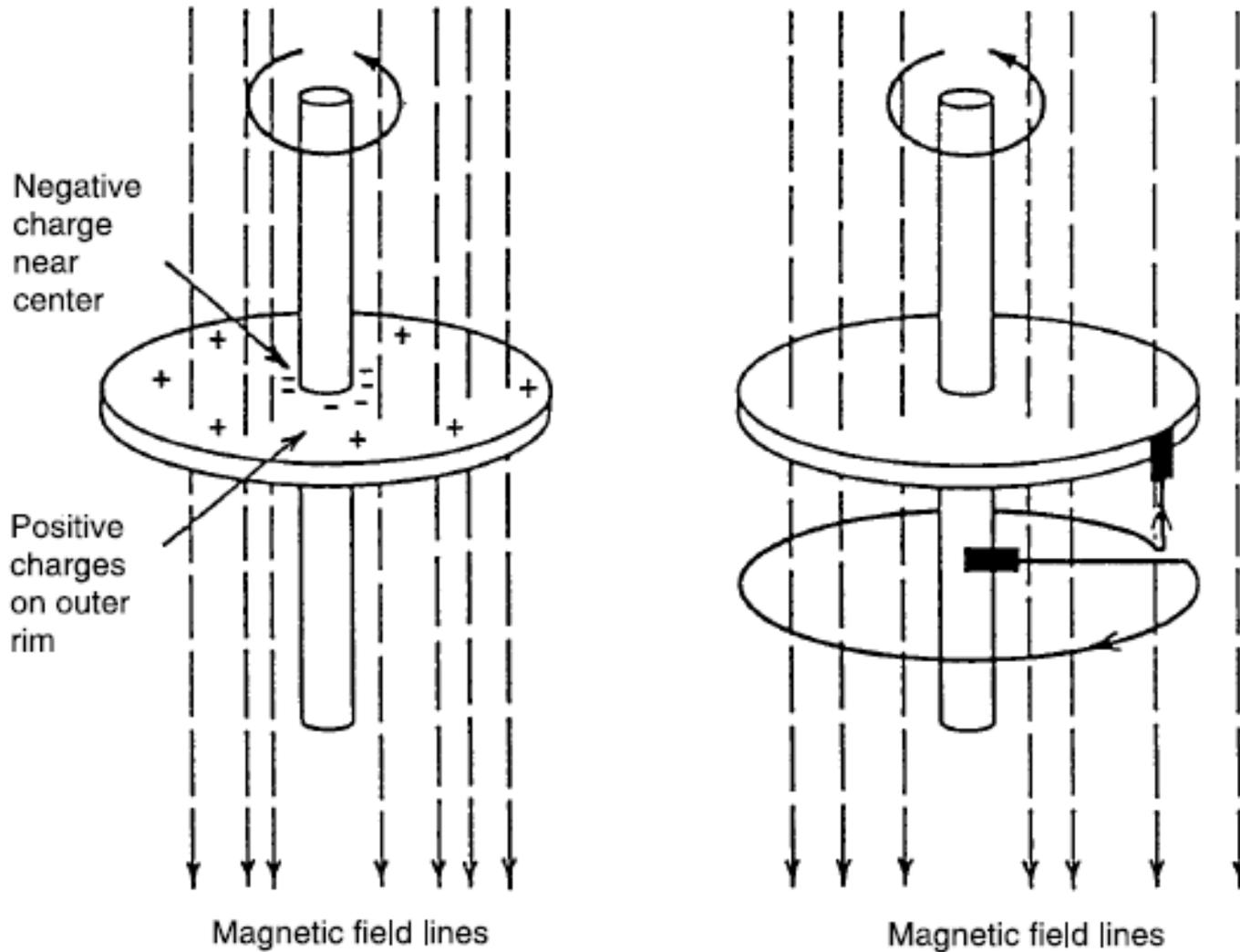
Suggère que le champ magnétique terrestre est créé et entretenu par un processus d'induction.

Des courants électriques intenses circuleraient dans le noyau extérieur possédant une conductibilité électrique très forte (noyau extérieur : la partie liquide du noyau située entre $r = 1300$ et 3500 km).

On assume aujourd'hui que le noyau est une combinaison de fer (Fe) et de nickel (Ni), tous deux de bon conducteurs électriques. Même si le noyau était formé d'éléments moins conducteurs, l'énorme pression retrouvée pourrait presser les électrons de façon à former des gaz à électrons libres de conductivité satisfaisante.

La source magnétique est illustrée par le modèle auto-excité. C'est à dire, un fluide de grande conductivité bouge dans un mouvement complexe et des courants électriques sont causés par des variations chimiques produisant un champ magnétique.

Rotating disc dynamo.



Variations internes séculaires

De longues séries d'observations démontrent que le champ magnétique terrestre est loin d'être constant. Des données obtenues aux observatoires de Londres et de Paris depuis 1540 montrent que l'inclinaison a varié de 10 (de 75 à 65) et la déclinaison de 35 (10E à 25W puis retour à 10W) depuis cette période.

Même si ces données ont l'air cycliques, des renseignements ailleurs dans le monde n'engendrent pas les mêmes conclusions. Les variations séculaires ont donc un caractère régional.

Leurs sources sont mal expliquées, mais on pense qu'elles sont liées aux changements de courants de convection dans le noyau, au couplage à la limite noyau-manteau et à la vitesse de rotation de la terre.

Champ magnétique externe

La majeure partie du 1% du champ magnétique provenant de l'extérieur de la terre apparaît être associée aux courants électriques dans les couches ionisées de la haute atmosphère. Les variations dans le temps sont beaucoup plus rapide que celle du champ « permanent ».

La variation diurne régulière

Les couches de la haute atmosphère (40 km et +) sont fortement ionisées donc électriquement conductrices. Le maximum d'ionisation se situe vers 300 km d'altitude.

Le phénomène d'ionisation est dû essentiellement au rayonnement lumineux. L'ionisation augmente donc le jour et diminue la nuit. La variation diurne suit le rythme solaire. De plus l'amplitude de la variation est influencée par l'activité du soleil qui passe par un maximum à tous les 11 ans.

L'ionosphère se déplace par rapport au globe solide.

1. Circulation générale atmosphérique qui tend à rétablir l'équilibre thermique entre l'hémisphère insolaire et celui privé de soleil.

2. La marée atmosphérique due aux forces d'attraction luni-solaires.

Le mouvement de l'ionosphère conductrice dans le champ de l'aimant permanent que constitue la terre induit des courants dans l'ionosphère qui produisent un champ magnétique supplémentaire, champ qui constitue la variation diurne.

{ suit le rythme solaire (cycle de 24 hrs, 11 ans) { ordre de 30 nT { varie avec les latitudes et saisons plus faible en hiver plus fort en été { suit les mares luni-solaires (périodes de 25 heures, amplitude de 2 nT)

Activité magnétique

Les tempêtes magnétiques sont des perturbations dont les amplitudes peuvent atteindre 2000 nT. Elles se retrouvent sous toutes les latitudes et sont plus importantes dans les régions polaires ou elles sont associées aux aurores boréales.

Ces perturbations sont dues aux émissions sporadiques et capricieuses de particules électriques issues du soleil. L'arrivée de ces particules dans l'atmosphère provoque à la fois une luminescence donnant lieu aux aurores ainsi une variation intense de l'ionisation qui est à l'origine des perturbations magnétiques.

Ces tempêtes peuvent durer plusieurs jours, troublant les communications radio à grande échelle et empêchant de poursuivre les campagnes de prospections magnétiques.

les aurores boréales !



Propriétés magnétiques

Tous les matériaux peuvent être classés à l'intérieur de 3 groupes définissant leurs propriétés magnétiques :

- **diamagnétisme**
- **paramagnétisme**
- **Ferro et ferrimagnétisme**

Si $k < 0$, on parle de diamagnétisme. L'intensité de la magnétisation induite est dans la direction opposée au champ inducteur. Phénomène faible, réversible, affecte tous les corps et souvent cache par un autre phénomène.

Ex. : quartz, feldspath, sel.

Si $k > 0$, la substance est alors paramagnétique. Comme le diamagnétisme, c'est un phénomène faible et réversible, mais tend à renforcer l'action du champ inducteur. Le champ induit décroît cependant avec la température.

Ex. : les métaux, gneiss, pegmatite, dolomie, syénite.

Dans le cas de substances ferromagnétiques, les moments magnétiques de chaque atome s'alignent spontanément dans des régions appelées domaines et cela même en l'absence de champ magnétique externe. En général, le moment magnétique total est nul parce que les différents domaines ont des orientations différentes et leurs effets s'annulent. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse un certaine température, appelée point de Curie.

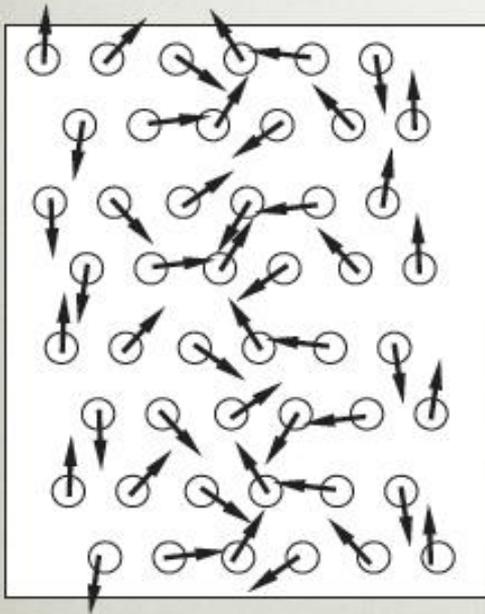
Si les moments magnétiques d'une substance sont anti- parallèles dans les domaines et de grandeurs différentes, le moment magnétique total est différent de zéro. La substance est alors appelée ferrimagnétique. Ex. : magnétite, ilménite.

Dans le cas d'une substance ferrimagnétique dont la somme de moments parallèles et antiparallèle est nulle, on parle d'anti- ferromagnétisme. Ex. : hématite.

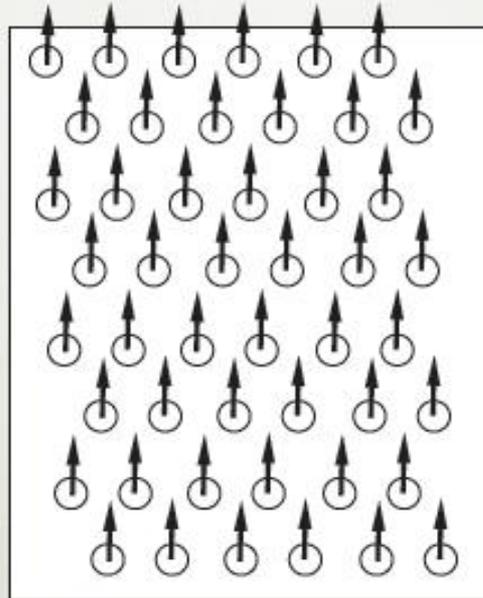
La susceptibilité d'une roche est entièrement dépendante de la quantité de minéraux ferromagnétiques qu'elle contient, de la dimension des grains et de leur distribution. C'est donc une propriété très variable et il est pratiquement impossible de prédire la teneur en minéraux a partir de la susceptibilité.

La sensibilité minimale requise pour mesurer les anomalies avec suffisamment de détail est de 5 nT. Il est alors possible de détecter des anomalies provenant de sources situées a plus de 10 000 mètres de profondeur.

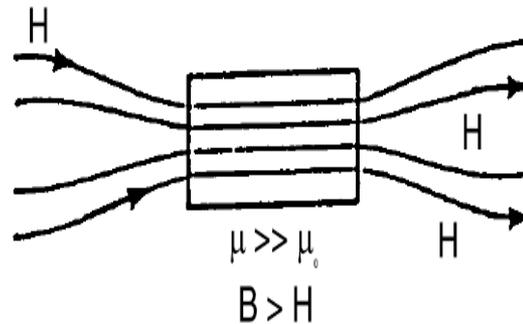
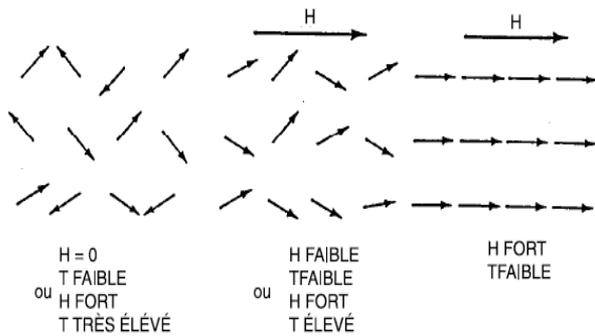
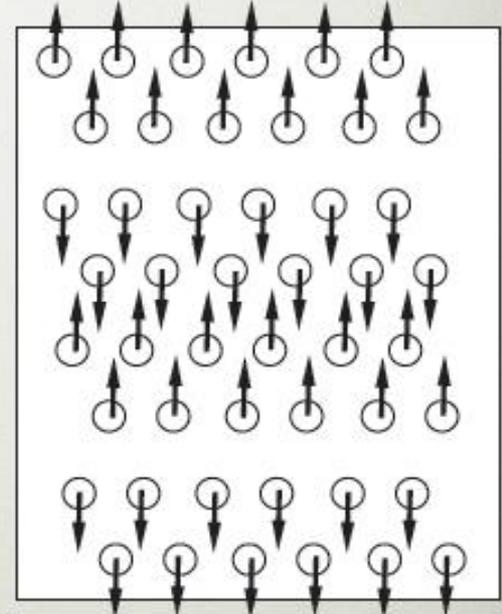
para



ferro



antiferro



Diamagnétisme



pas de moment magnétique
(χ négative et très faible)

Paramagnétisme

T ↑

paramagnétisme
(χ positive et faible)

ferro, →

χ positive et très fort

antiferro, →

χ positive et fort

ferri, →

χ positive et très fort

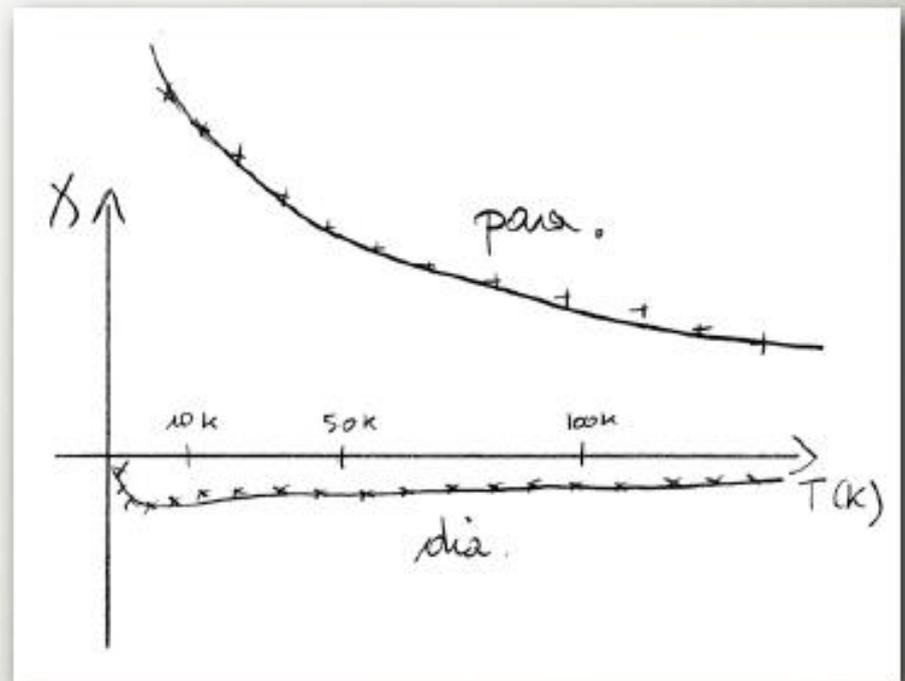
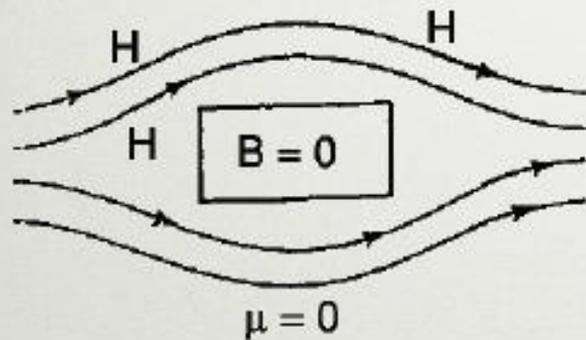
complexe,
etc. →

spécifique

Diamagnétisme



pas de moment magnétique
(χ négative et très faible)



merci