

ELECTROMAGNÉTISME

Cours Mesures Physiques S2

G. WASSELYNCK

Organisation du module

- Répartition horaire :
 - CM : 1 séances d'une heure et demi ;
 - TD : 7 séances de deux heures ;
 - TP : 5 séances de trois heures.
- Notation :
 - Moyenne TP (30% CR + 70% partiel) ;
 - DS semaine 11.

Plan du cours

- Physique :
 - Introduction :
 - Historique
 - Les phénomènes physiques
 - Focus sur le magnétisme ;
- Applications :
 - Les inductances ;
 - Le transformateur monophasé

Frise Chronologique (1)

- Antiquités :
 - Morceau d'ambre frottés attire les petits objets ;
 - Une pierre spécifique (magnétite) attire des objets ferreux ;
- 1600 : William Gilbert (1540-1603)
 - Etudie la force magnétique ;
- 1700 : Stephen Gray (1666-1736) :
 - Etudie la force électrique
- 1745 : Ewald Georg Von Kleist (1700-1748) :
 - Bouteille de Leyde (premier condensateur) ;
- 1777 : Charles Augustin Coulomb (1736-1806) :
 - La force « électrique » entre deux sphères est inversement proportionnel au carré de la distance ;

Frise Chronologique (2)

- 1820 : Hans Christian Oersted (1777-1851) :
 - Un courant électrique circulant dans un fil fait bouger une boussole ;
- André-Marie Ampère (1775-1836) :
 - Apporte une explication à l'expérience d'Oersted ;
- 1820 : Jean-Baptiste Biot (1774-1862) et Felix Savart (1791-1841)
 - Calcul du champ en fonction du courant ;
- 1831 : Michael Faraday (1791-1867) :
 - Phénomène réversible (un aimant mouvant peut créer de l'électricité) ;
- 1864 - 1873 : James Clerk Maxwell (1831-1879) :
 - Mise en place des équations de Maxwell (réduite à 4 par Heaviside) ;

LES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES SUR LA MATIÈRE

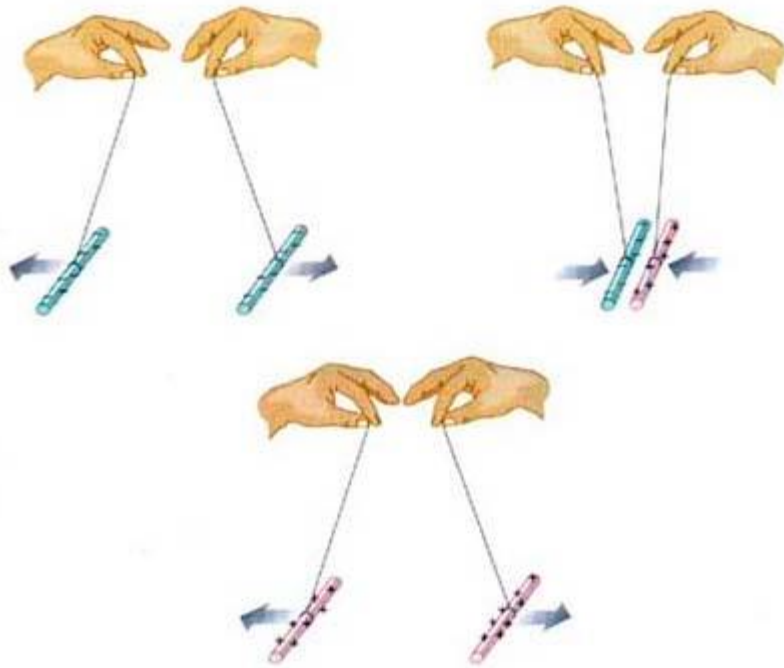
La force « électrique »



Ambre frottée attirant des bouts de papier

- Stephen Gray (1666-1736) :
 - Teste différents matériaux ;
 - Les corps « qui s'électrisent » ;
 - Les corps « qui ne s'électrisent pas ».
- Intuition d'un charge ;
- Certain corps gardent la charge électrique (isolant) et d'autres qui laisse les charges s'écouler (conducteur).

La force « électrique »



- Des objets chargés de la même manière se repoussent ;
- Existence de type de charges :
 - Charge + ;
 - Charge – (électron) ;
- Lorsque on frotte deux objets entre eux on déplace des charges – d'un corps à l'autre.

Les corps qui « ne s'électrisent pas »

- 1745 : Ewald Georg Von Kleist (1700-1748) :
- Invention du premier condensateur :
 - La bouteille de Leyde ;
 - « Conserve » les charges (polarise diélectrique).
- Kleist touche les deux armatures :
 - Electrification ;
 - Une circulation de charge à eu lieu dans son corps ;
 - Courant électrique (cours S1).

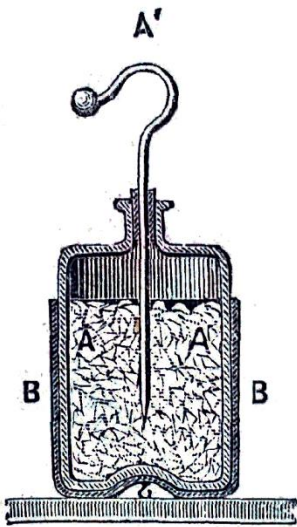


FIG. 142. — Bouteille de Leyde. — A, armature intérieure ; B, armature extérieure.

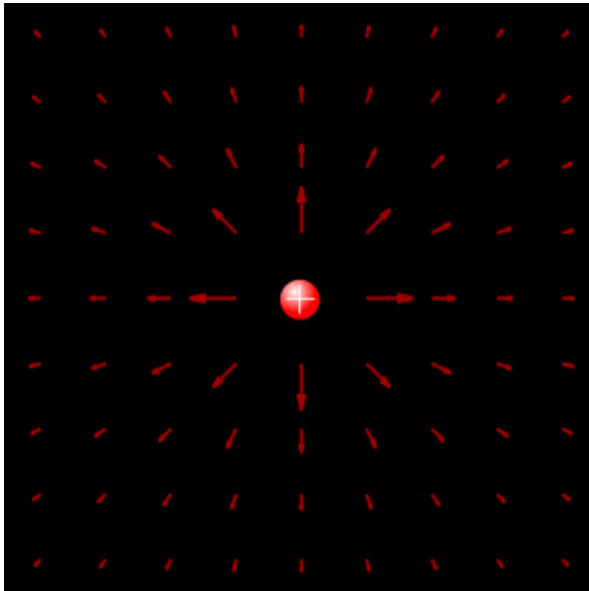
Charles Augustin Coulomb (1736-1806)

- Loi d'attraction entre deux charges q_1 et q_2 :

$$\vec{F} = q_2 \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^2} \vec{e}_r \right]$$

$$\vec{F} = q_2 \vec{E}$$

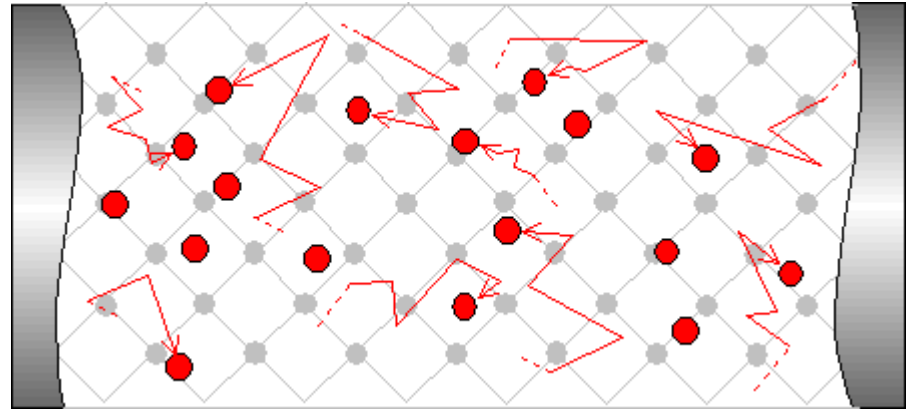
Champ électrique créé par q_1 positive



- La charge q_1 crée un champ électrique E (V/m) ;
- Ce champ attirera ou repoussera la charge q_2 en fonction de son signe ;
- Analogie avec la gravitation.

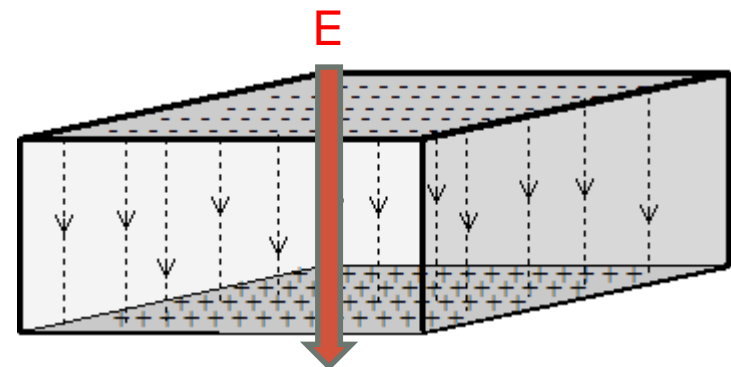
Effet de la force de Coulomb

- Première effet :
 - Dans un conducteur ;
 - Circulation des électrons ;
 - Création d'un courant.



Conducteur : charge libre (électron) en excès

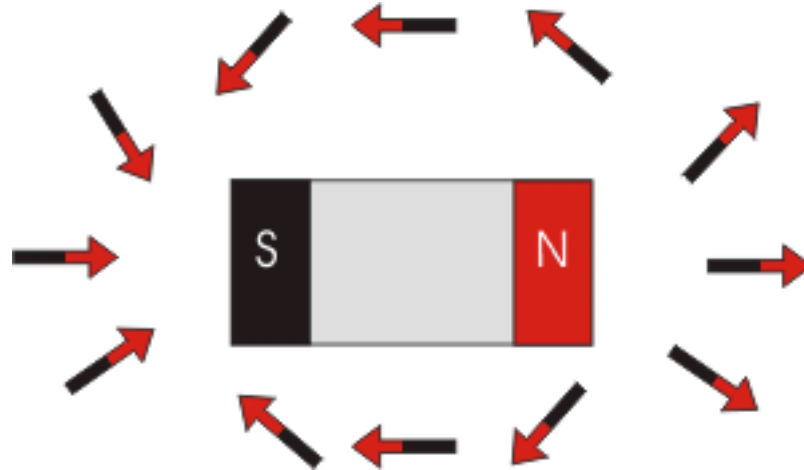
- Deuxième effet :
 - Polarisation électrique des isolants ;
 - Accumulation de charge sur les armatures



Isolant : pas de charge libre

La force magnétique

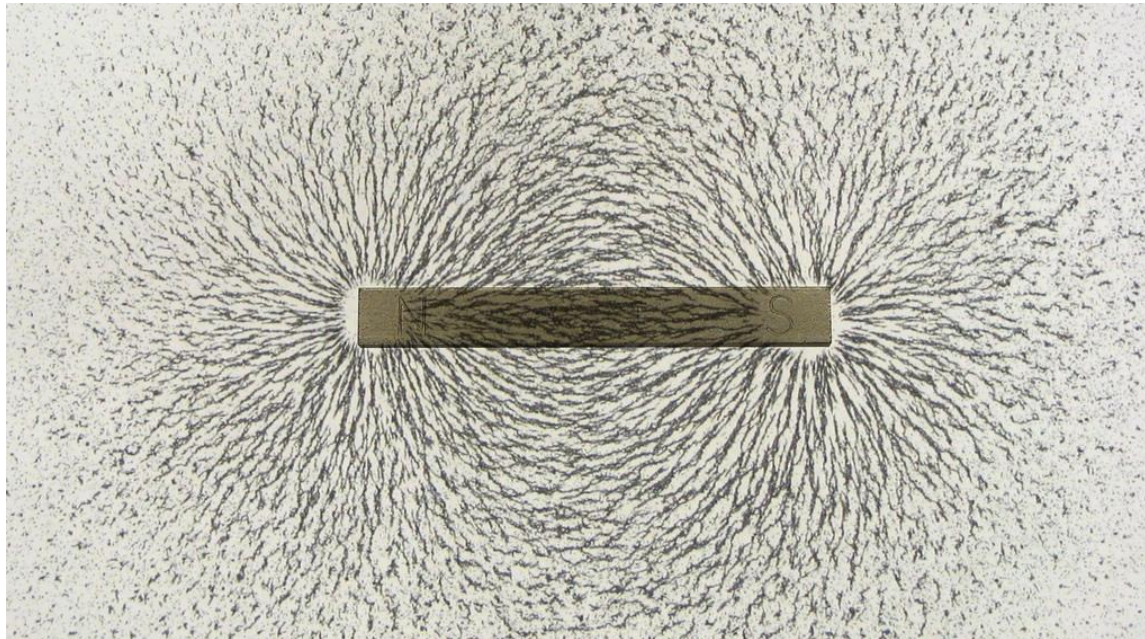
- Orientation de plusieurs boussoles autour d'un aimant :



- Les pôles nord des boussoles attirés par le pôle sud de l'aimant et inversement ;
- L'aimant central créé un champ magnétique H (A/m) qui attire les boussoles.

La force magnétique

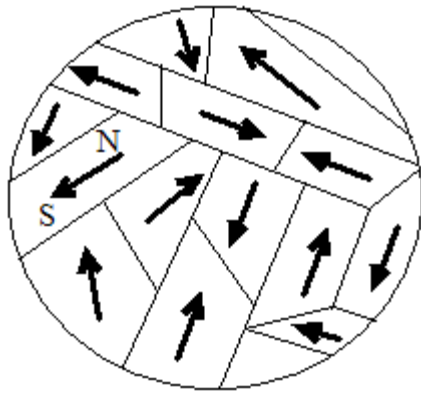
- Aimant avec de la limaille de fer :



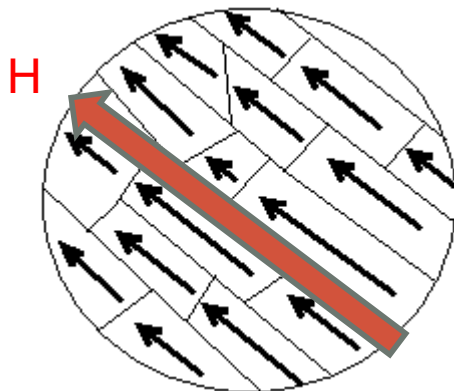
- Même phénomène qu'avec les boussoles
- L'aimant central à transformer la limaille de fer en boussole

L'aimantation

- Champ nul \rightarrow Aimantation globale nulle :



- Champ non nul \rightarrow Aimantation



Fer au microscope : domaines de Weiss

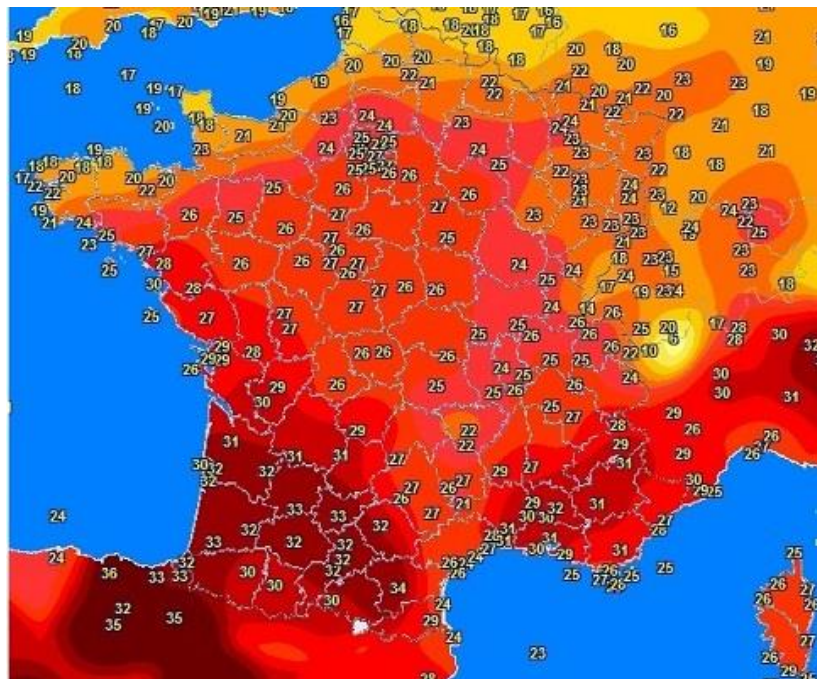
Conclusion

- Des charges électriques (électrons ou protons) interagissent entre elles via un champ électrique E .
- Les aimants font la même chose :
 - Existe-t-il une ou des charges magnétiques ?
 - Si elles existent, ont-elles un signe ?
 - C'est quoi un champ magnétique ?

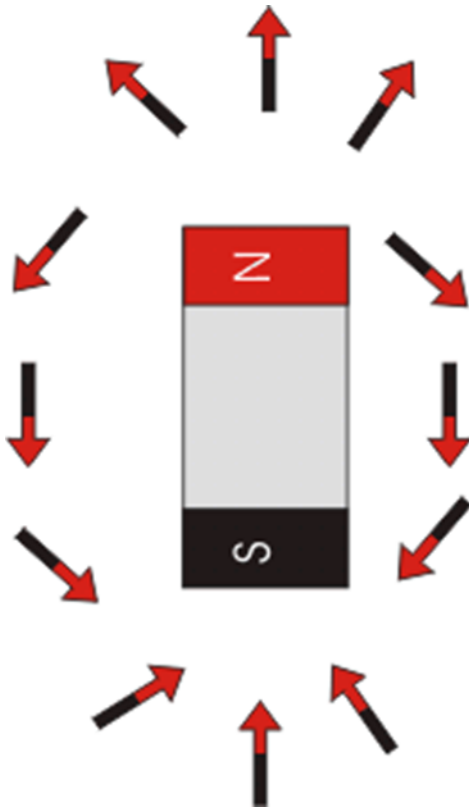
LE MAGNÉTISME

Qu'est ce qu'un champ ?

- En physique, un champ est :
 - Une grandeur physique où on peut lui attribuer une valeur à chaque point d'une région de l'espace.
- Exemple champ de température (météo) :



Et le champ magnétique ?



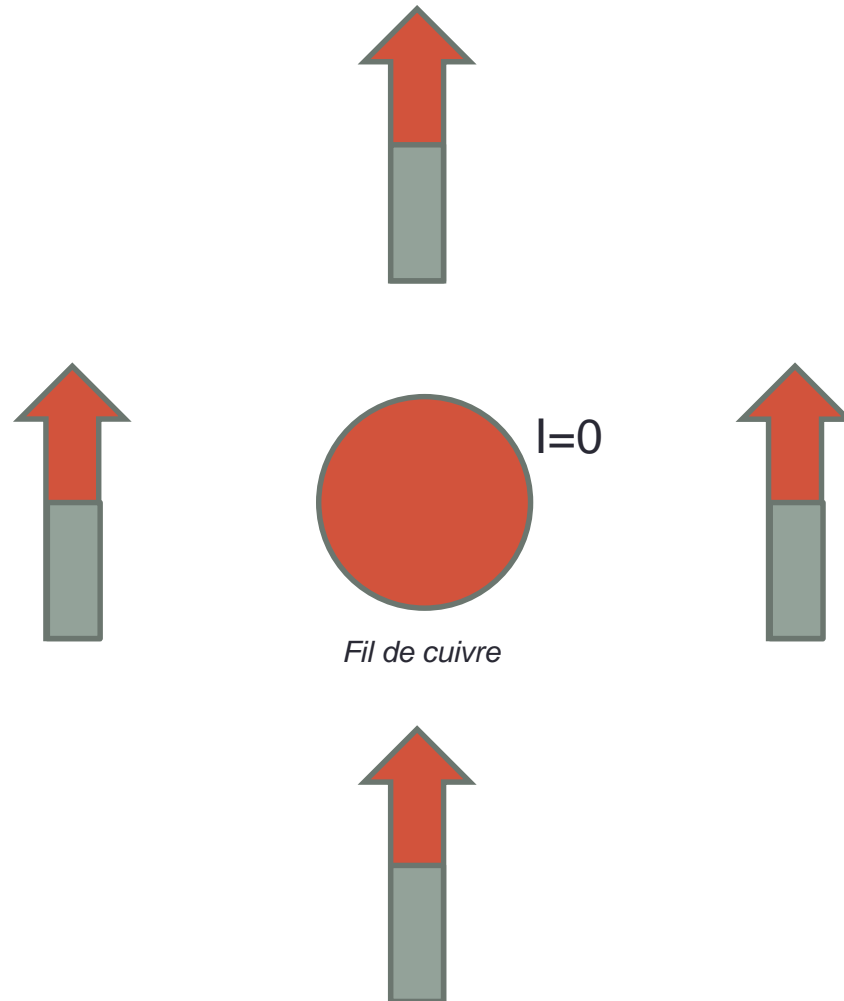
- Les boussoles réagissent au champ magnétique H (A/m) ;
- L'orientation des boussoles donne une idée de l'orientation du champ ;
- Champ magnétique est un champ vectoriel :
 - A chaque point de l'espace, on peut définir une direction, un sens et même une intensité.

Existe-t-il une charge magnétique ?

- Il n'existe pas de charge magnétique :
 - Si un aimant est cassé en deux, nous obtenons deux aimants et pas un morceau avec un pôle nord et un autre morceau avec un pôle sud.
- Quelle est la source d'un champ magnétique ?
 - Revenir à l'expérience de Hans Christian Oersted.

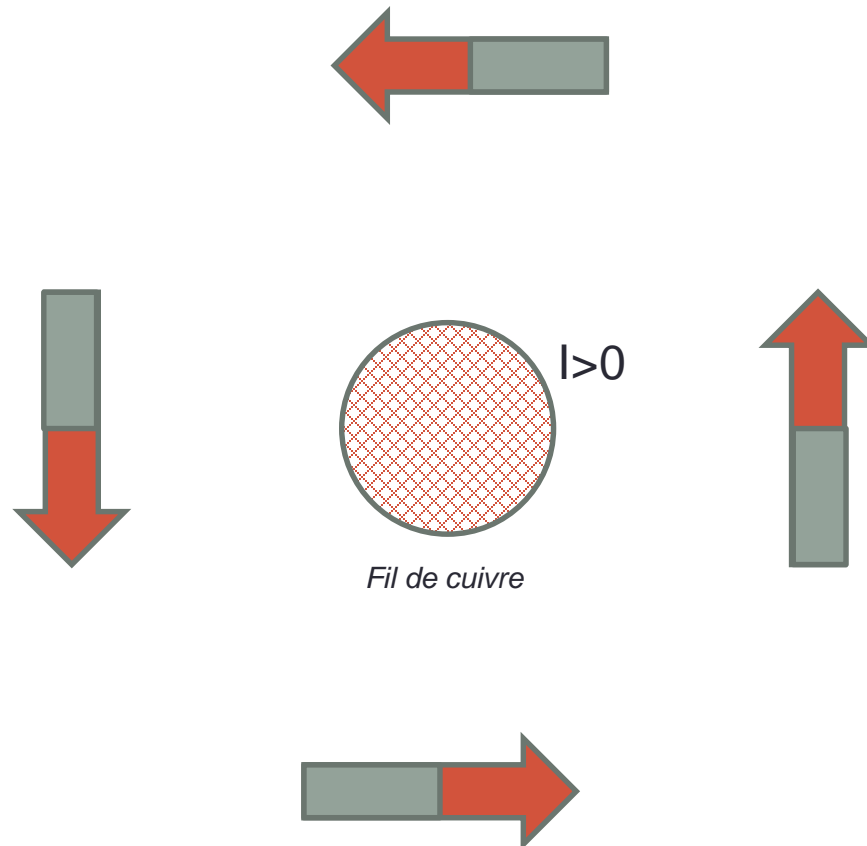
Expérience de Hans Christian Oersted

Courant dans le fil nul



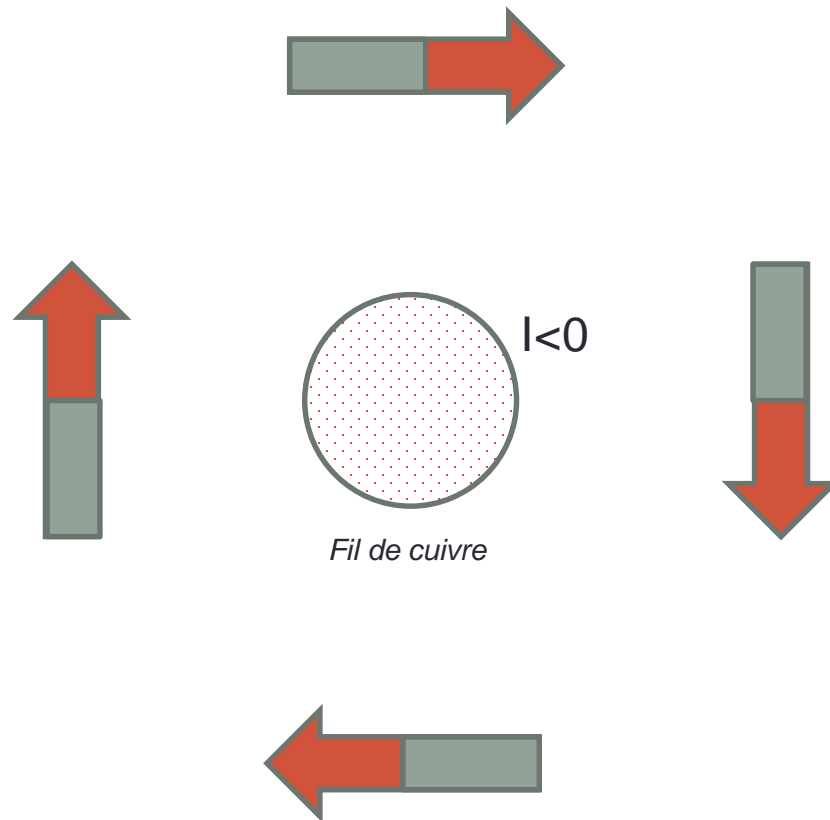
Expérience de Hans Christian Oersted

*Courant dans le fil non-nul
Circulant de bas en haut*



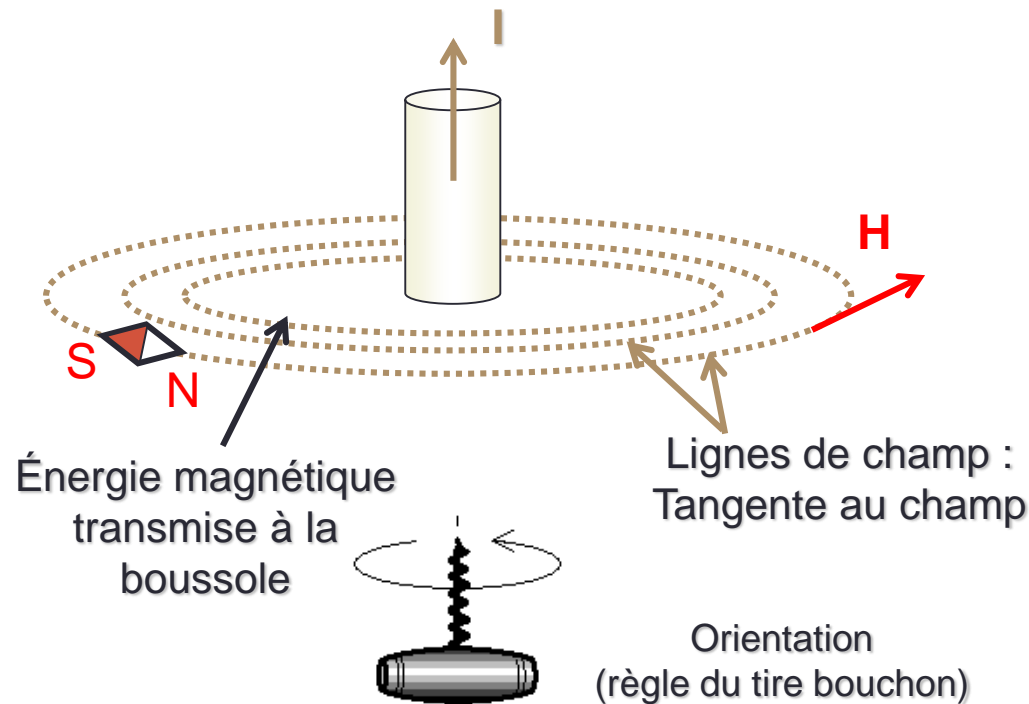
Expérience de Hans Christian Oersted

*Courant dans le fil non-nul
Circulant de haut en bas*



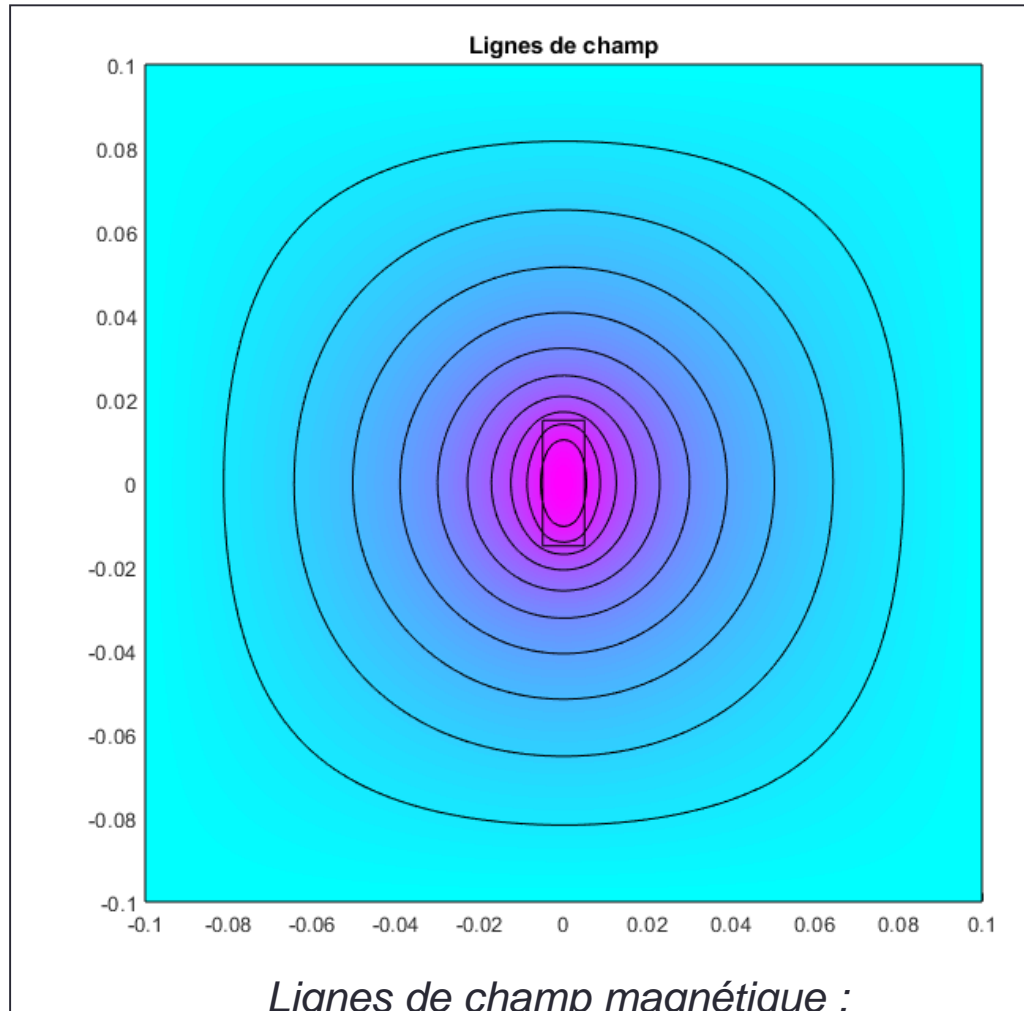
Le champ magnétique

- Le champ magnétique est créé par un courant électrique :



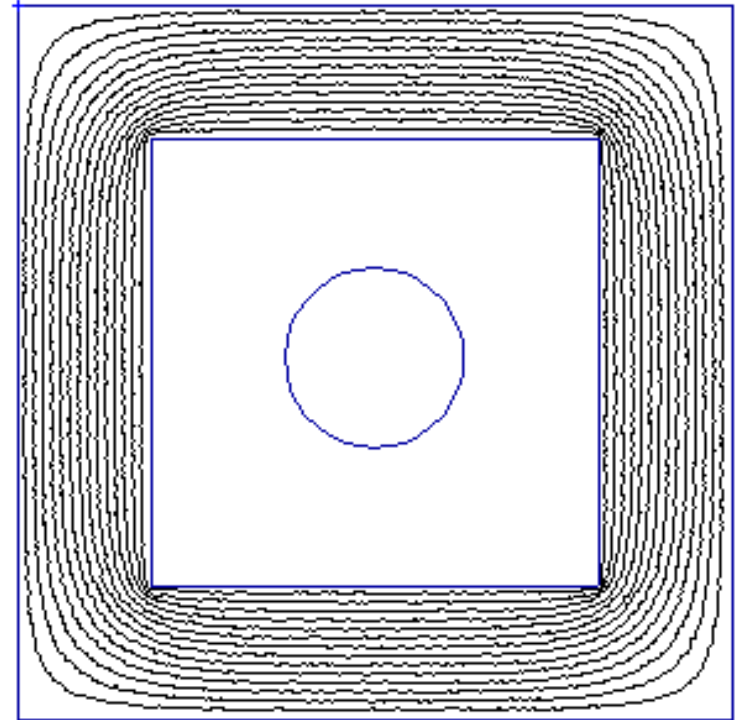
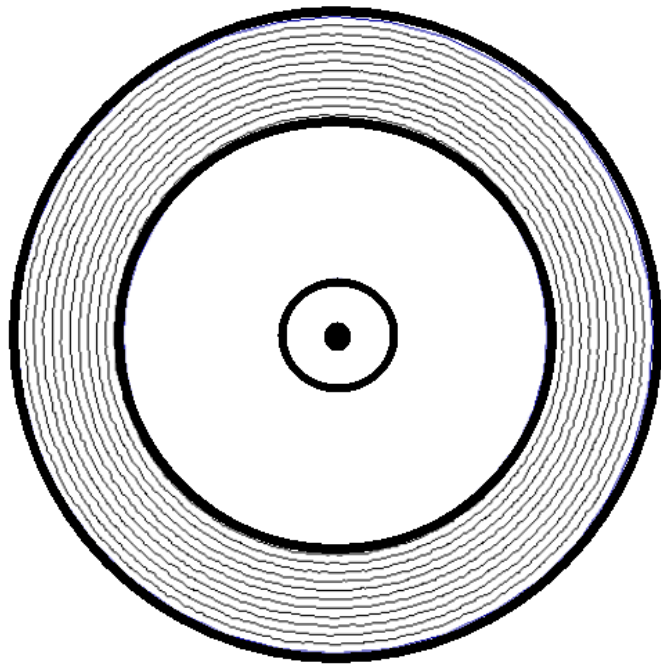
- L'intensité du champ dépend de l'intensité du courant ;
- L'orientation du champ dépend du sens du courant,

Champ magnétique dans l'air



*Lignes de champ magnétique :
Ligne tangentielle au vecteur à
chaque point*

Champ magnétique dans un circuit ferromagnétique



Matériau ferromagnétique
 $\mu_r \sim 3000$
(3000 fois plus perméable que l'air)

Relation entre H et I

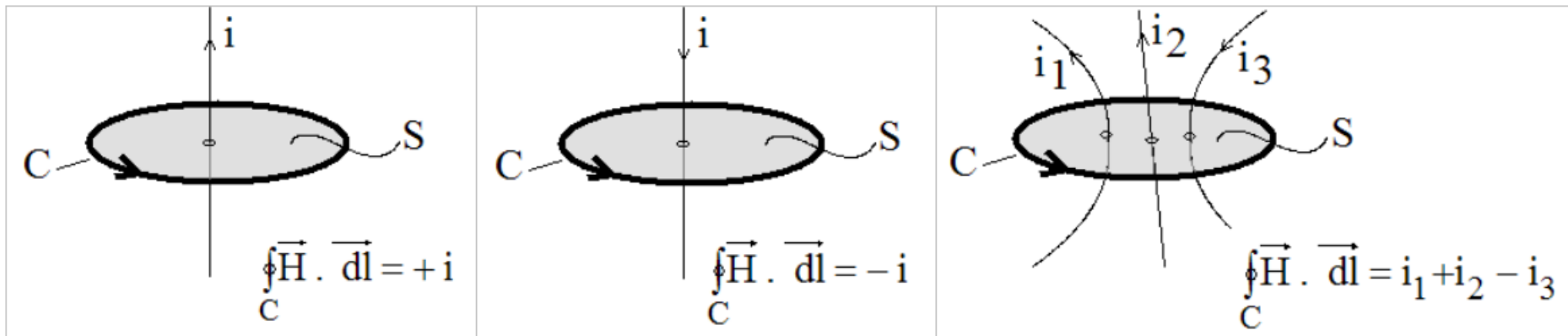
- Le théorème d'Ampère (André-Marie) :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

- La circulation du champ magnétique sur un contour fermé est égale à la somme algébrique des courants traversant la surface créée par ce contour fermé.

Application du théorème d'Ampère

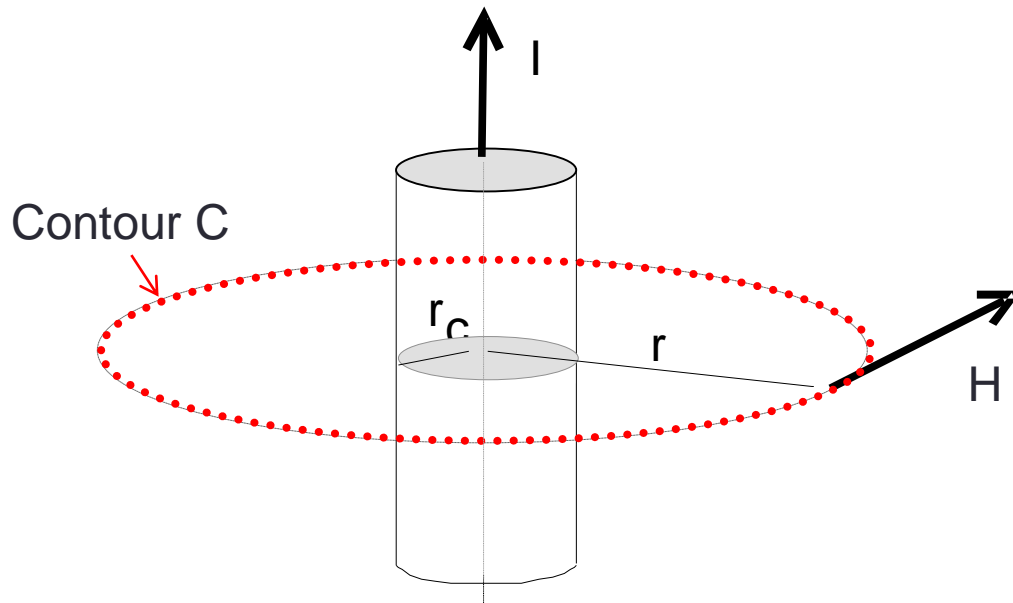
- Choisir un contour sur une ligne de champ :



- Attention de bien faire la somme algébrique !

Application du théorème d'Ampère

- Conducteur seul :



$$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = \sum I$$

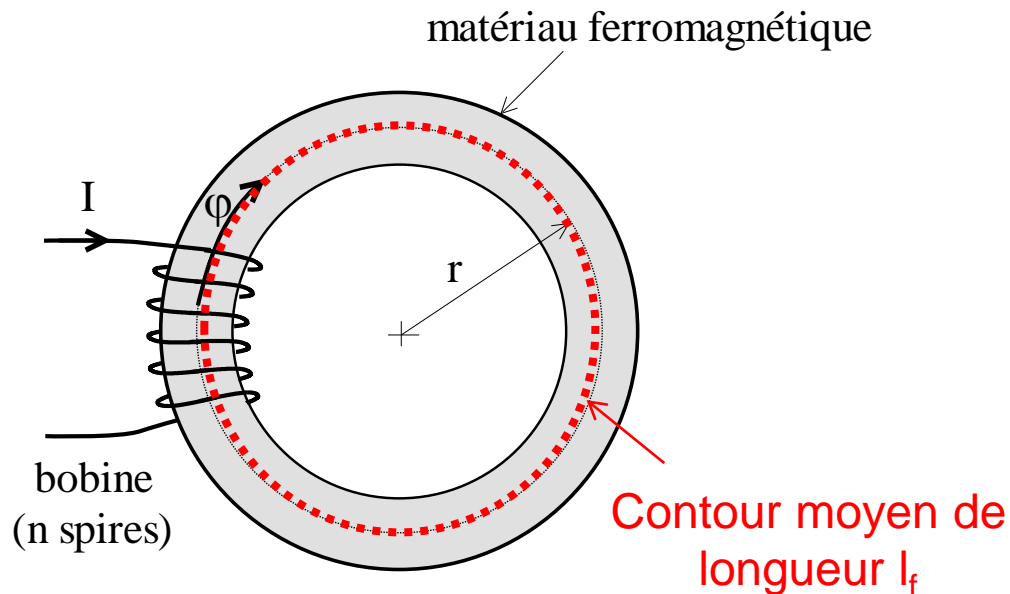
$$Hl = I$$

$$H2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

Application du théorème d'ampère

- Circuit magnétique :



$$H = \frac{nI}{l_f}$$

nI : Force magnétomotrice (A.tr)

De l'effet du champ sur la matière

- Induction magnétique B (T) :
 - Aimantation de la matière
- Dépend de la nature du matériau :
 - Matériau non magnétique : aimantation faible ;
 - Matériau magnétique doux : aimantation forte ;
 - Matériau magnétique dur : aimantation permanente.

Aimantation des matériaux

- Dans les matériaux non magnétiques (air, plastique, cuivre,...) :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$$

Avec μ_0 perméabilité du vide (T.m/A)

- $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$: aimantation faible

Aimantation des matériaux

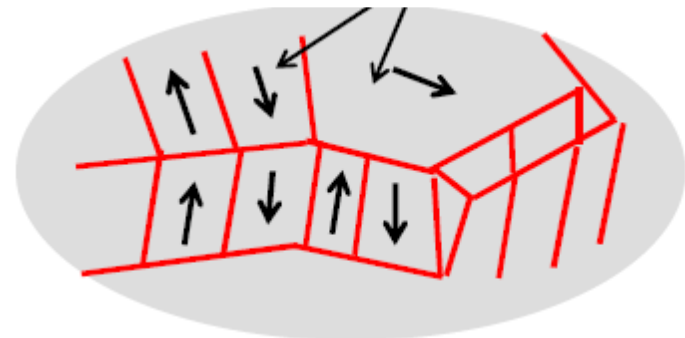
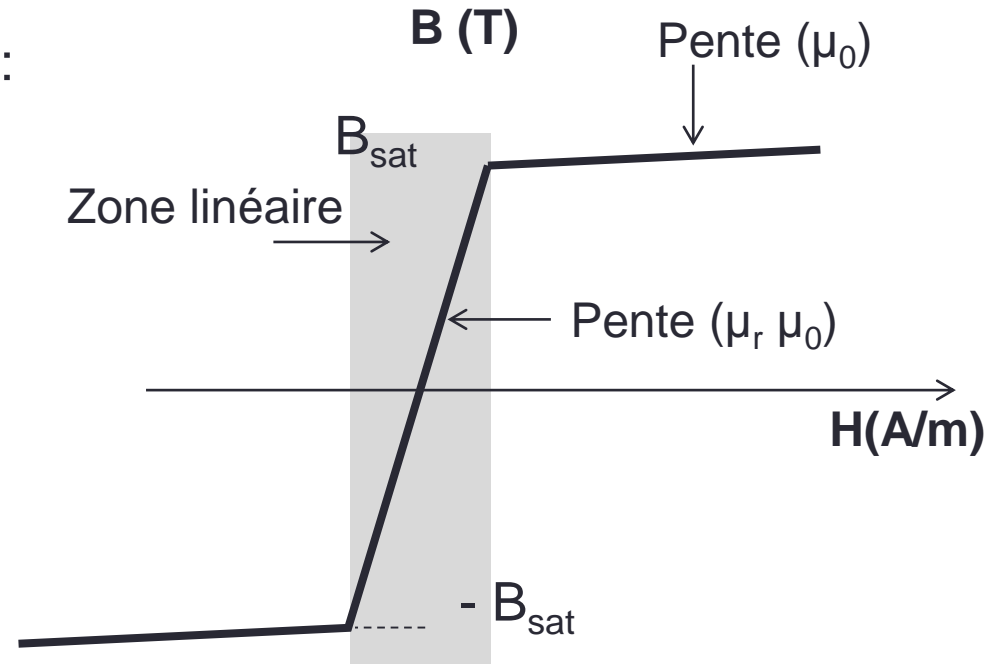
- Dans les matériaux magnétiques :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

Avec μ_r perméabilité relative du matériau :

- Tend vers l'infini pour un matériau parfait ;
- Matériau réel quelques milliers ;
- Zone de saturation où μ_r redevient égale à 1

Aimant : Induction rémanente non nulle.



Domaine de Weiss

Energie Magnétique

- Intérêt de calculer l'énergie : Force d'un aimant

$$W = \int \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

- Définition de l'énergie :

$$W = \frac{1}{2} BHV_{ol} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} V_{ol}$$

- Dépendance de l'énergie à la perméabilité

Energie Magnétique

Dans l'air

$$\mu_r = 1$$

Dans 1 m³ sous 1T :

$$W = \frac{1}{2\mu_0} = 398 \text{ kJ}$$

L'air stocke l'énergie

Dans le fer

$$\mu_r = 10\,000$$

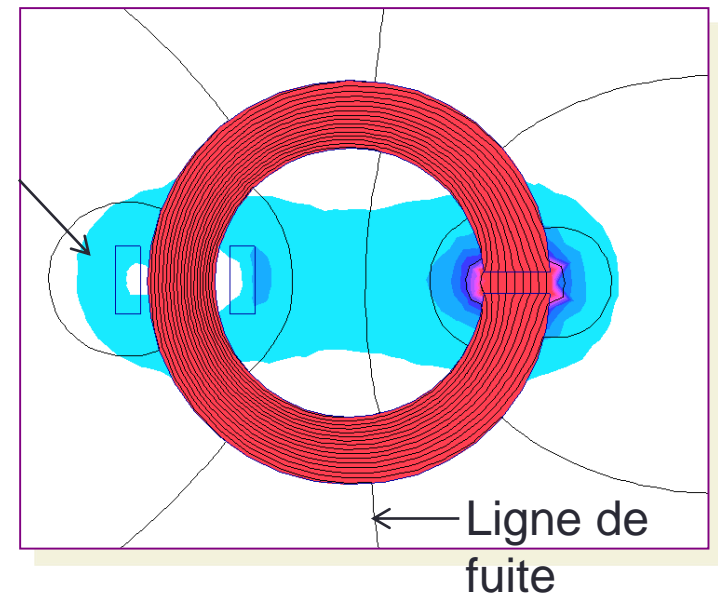
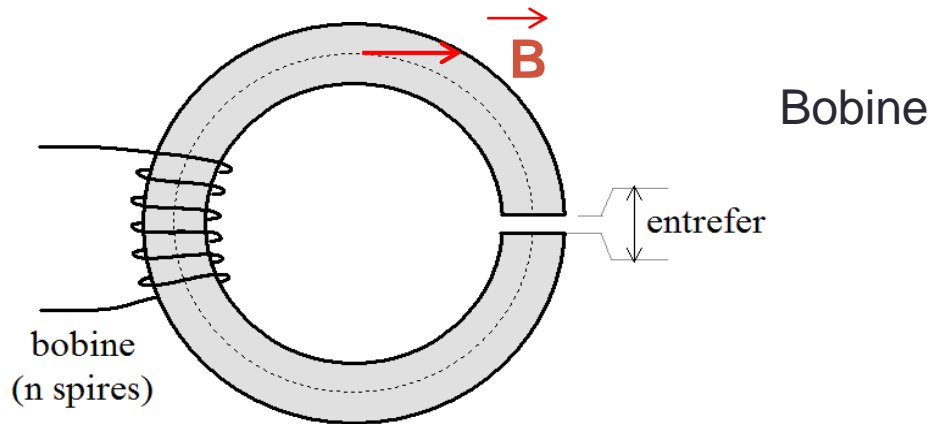
Dans 1 m³ sous 1T :

$$W = \frac{1}{2\mu_0\mu_r} = 39,8 \text{ J}$$

Le fer canalise le champ

Energie Magnétique

- Exemple circuit torique :



- B identique dans air et fer ;
- Matériau parfait : $\mu_r \rightarrow \infty$

$$W_{bobine} = \underbrace{\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} Vol_{fer}}_0 + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Vol_{air}}_{W_{entrefer} = W_{bobine}}$$

Energie Magnétique

1. B identique dans air et fer ;
2. $\mu_r = 10\ 000$

$$W_{bobine} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} Vol_{fer} + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Vol_{air}$$

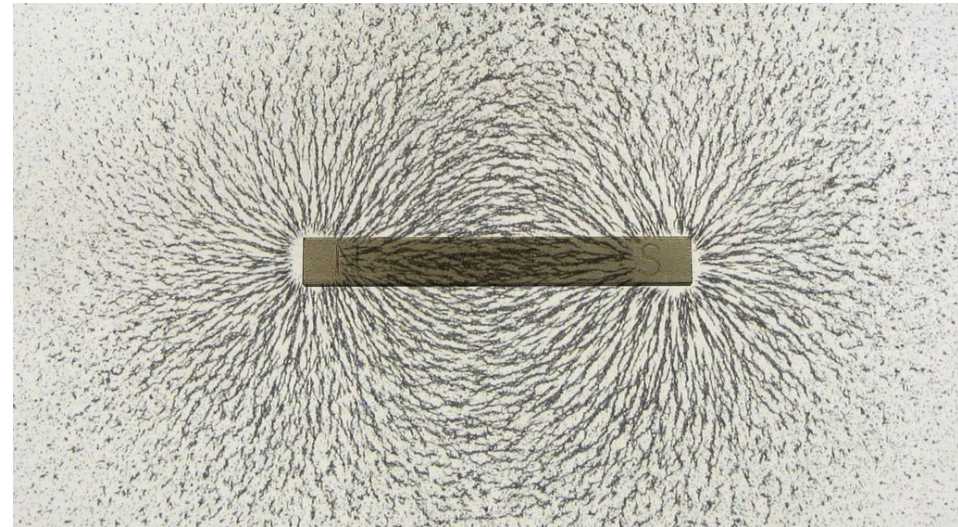
$$W_{bobine} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} l_{fer} S_{fer} + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} l_{entrefer} S_{entrefer}$$

$$W_{entrefer} = W_{fer} \text{ si } \frac{l_{fer}}{l_{entrefer}} = \mu_r = 10\ 000$$

Flux d'induction

- Hypothèse précédente :
Induction identique dans le fer et l'entrefer.
- Origine (Gauss? , Biot et Savart ?) (Conservation du flux):
Un aimant cassé en deux donne deux aimants ;
Les lignes de champ magnétique se referment.

=> Notion de flux magnétique



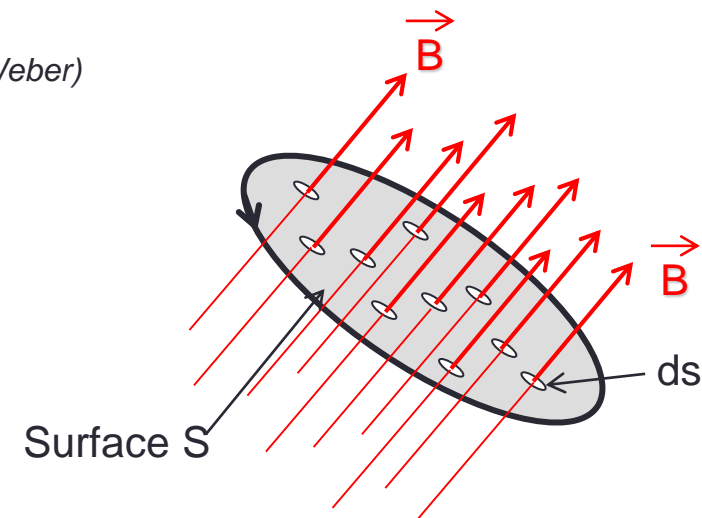
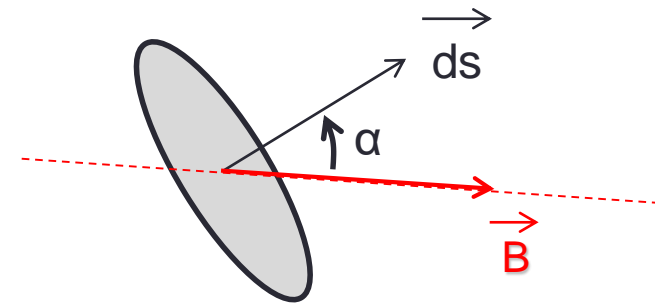
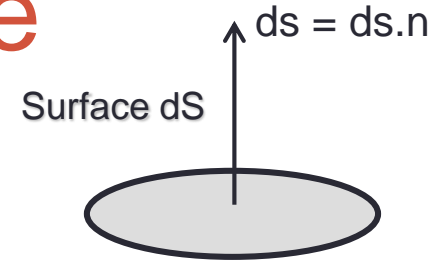
Définition du flux magnétique

- Flux (scalaire) : quantité à travers une surface

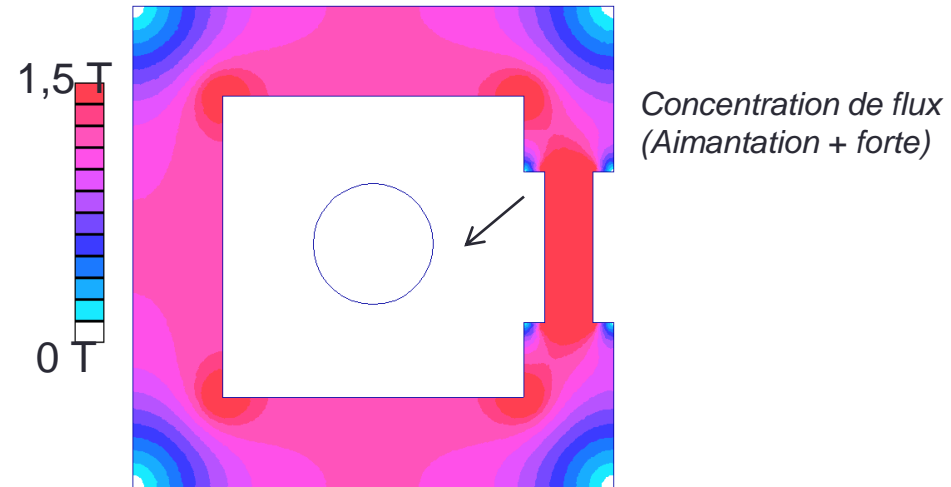
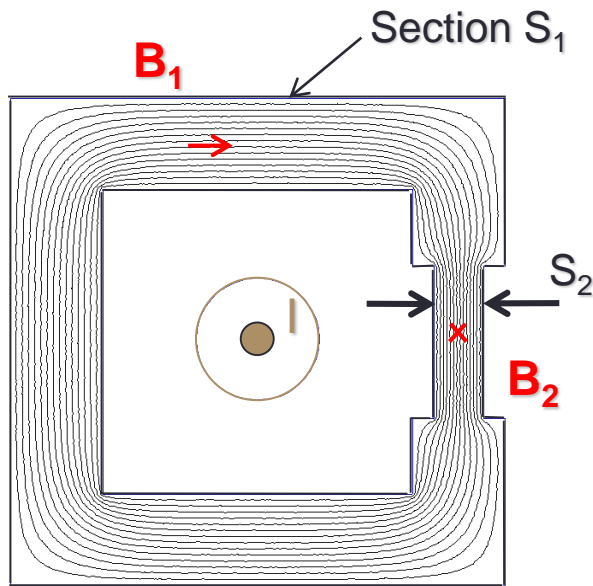
- $d\varphi = \vec{B} \cdot \vec{dS} = B dS \cos\alpha$

- $\varphi = \iint \vec{B} \cdot \vec{dS}$ (Wb : Weber) *(Wilhelm Eduard Weber)*

- Si B et S colinéaire : $\varphi = BS$

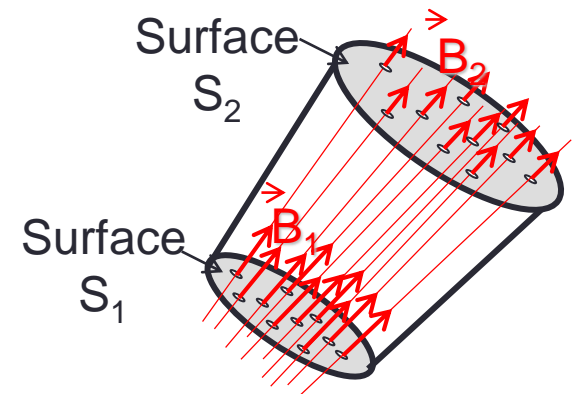


Conservation du flux



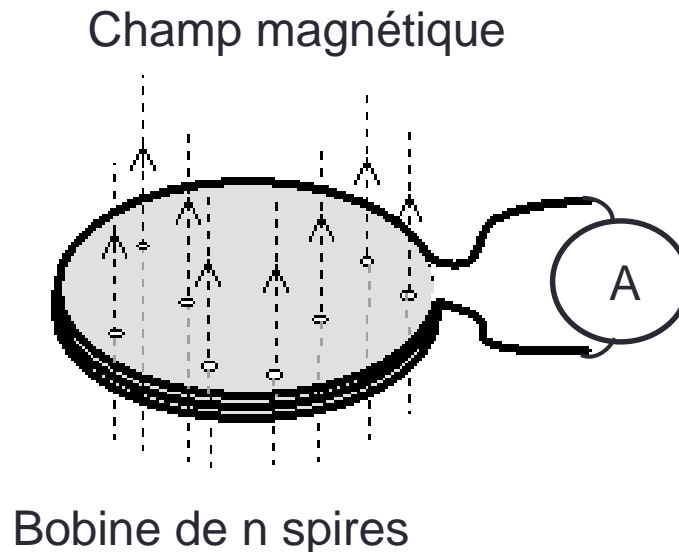
- Principe de conservation du flux :

$$B_1 S_1 = B_2 S_2$$



Induction Electromagnétique

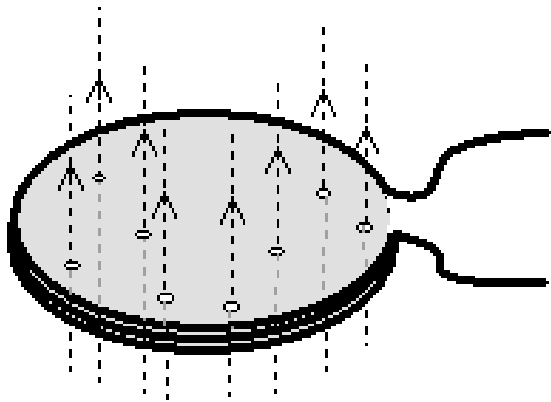
- Découverte en 1831 par Faraday ;
- Idée : Puisque un courant crée l'effet d'un aimant, un aimant peut-il créer un courant ?



Loi de Lenz-Faraday

Expérience

Champ magnétique



Variation du flux magnétique
=
Force Electro Motrice Induite

Formule

- Convention générateur :

$$e(t) = -n \frac{d\varphi}{dt}$$

- Convention récepteur :

$$e(t) = +n \frac{d\varphi}{dt}$$