

# 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

---

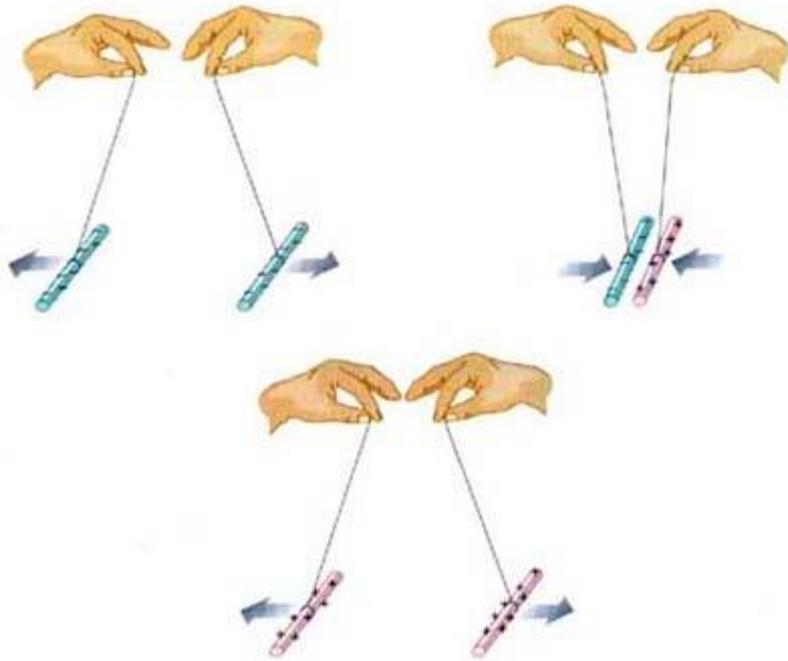
# La force « électrique »



*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).

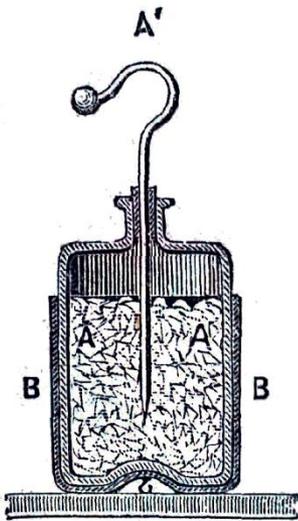


FIG. 142. — Bouteille de Leyde. — A, armature intérieure ; B, armature extérieure.

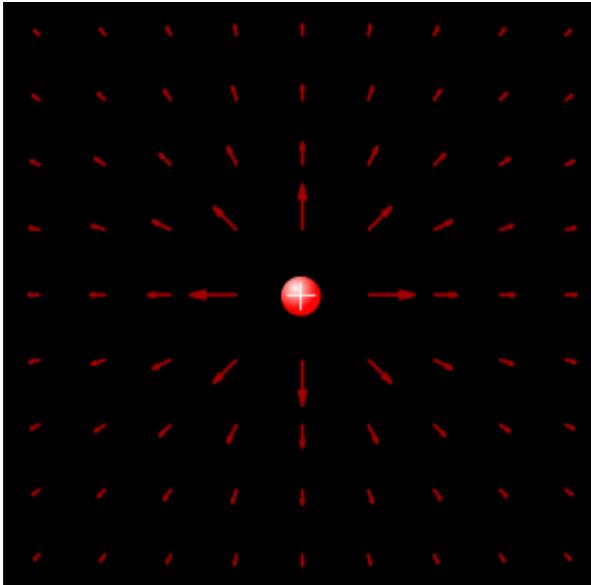
# Charles Augustin Coulomb (1736-1806)

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

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

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

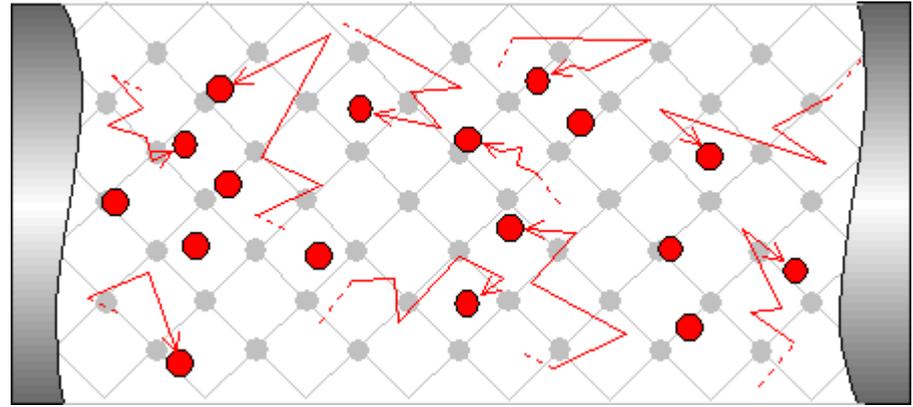
*Champ électrique créé par  $q_1$  positive*



- 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.

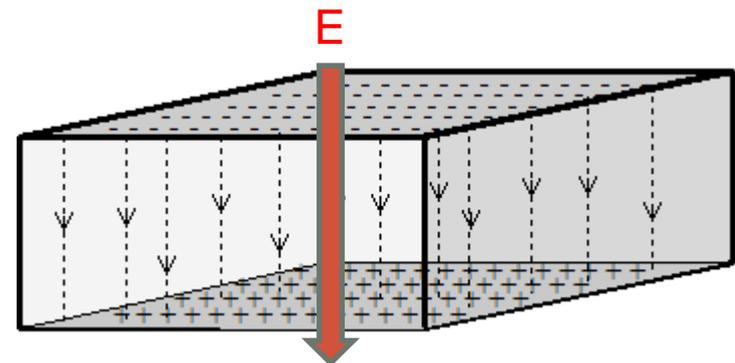
# Effet de la force de Coulomb

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



Conducteur : charge libre (électron) en excès

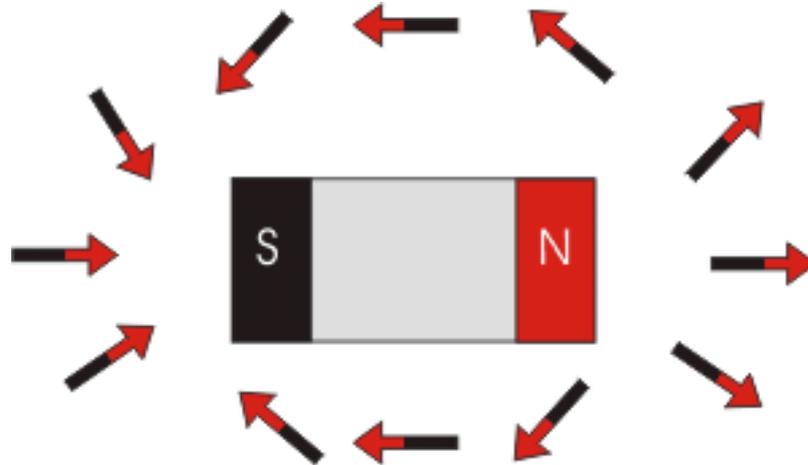
- Deuxième effet :
  - Polarisation électrique des isolants ;
  - Accumulation de charge sur les armatures



Isolant : pas de charge libre

# La force magnétique

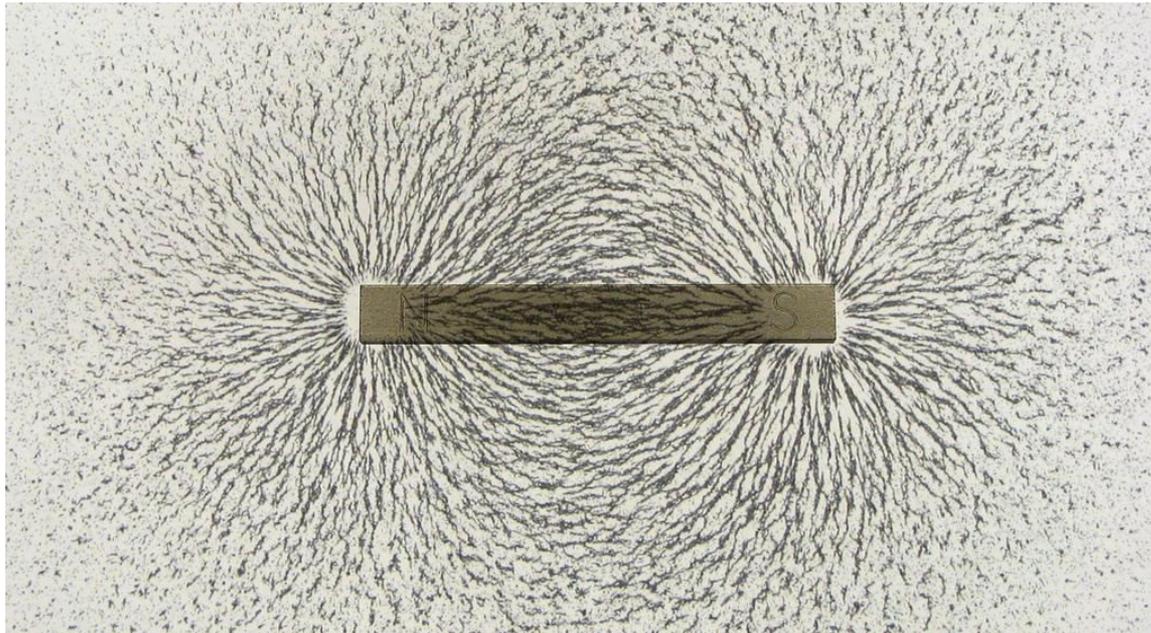
- Orientation de plusieurs boussoles autour d'un aimant :



- 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

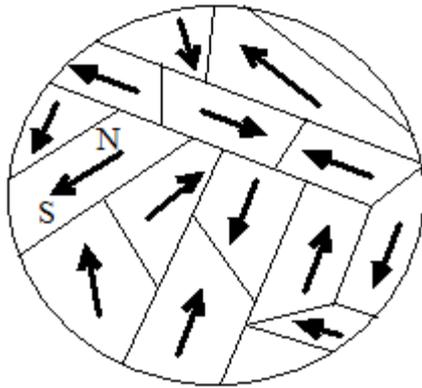
- Aimant avec de la limaille de fer :



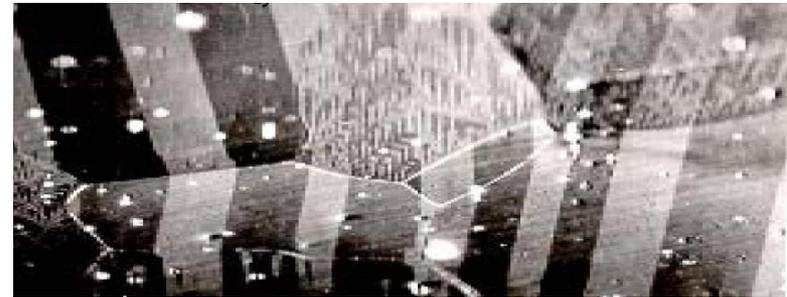
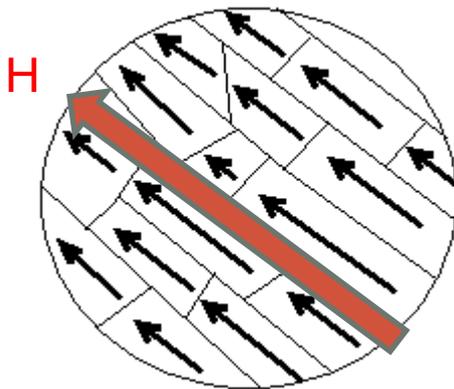
- Même phénomène qu'avec les boussoles
- L'aimant central à transformer la limaille de fer en boussole

# L'aimantation

- Champ nul  $\rightarrow$  Aimantation globale nulle :



- Champ non nul  $\rightarrow$  Aimantation



*Fer au microscope : domaines de Weiss*

# Conclusion

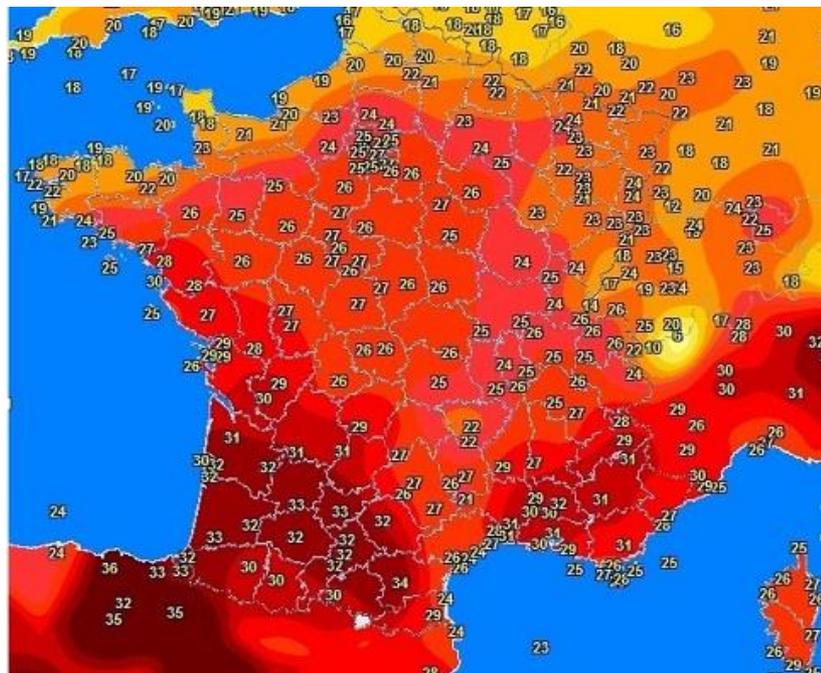
- Des charges électriques (électrons ou protons) interagissent entre elles via un champ électrique  $E$ .
- Les aimants font la même chose :
  - Existe-t-il une ou des charges magnétiques ?
  - Si elles existent, ont-elles un signe ?
  - C'est quoi un champ magnétique ?

# LE MAGNÉTISME

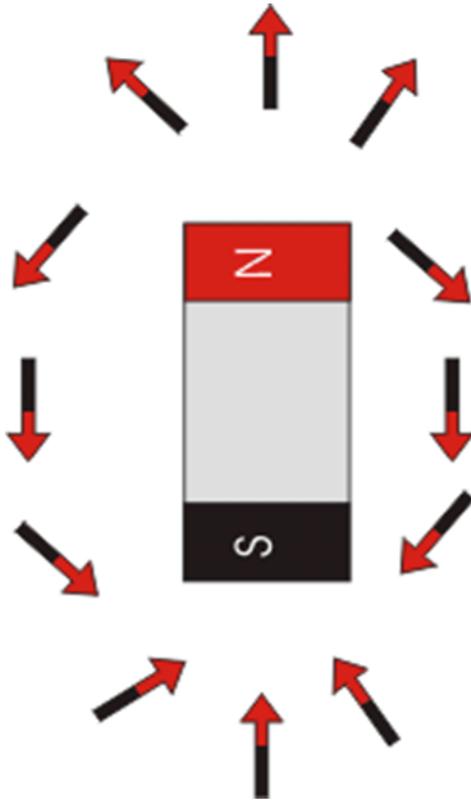
---

# 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 ?



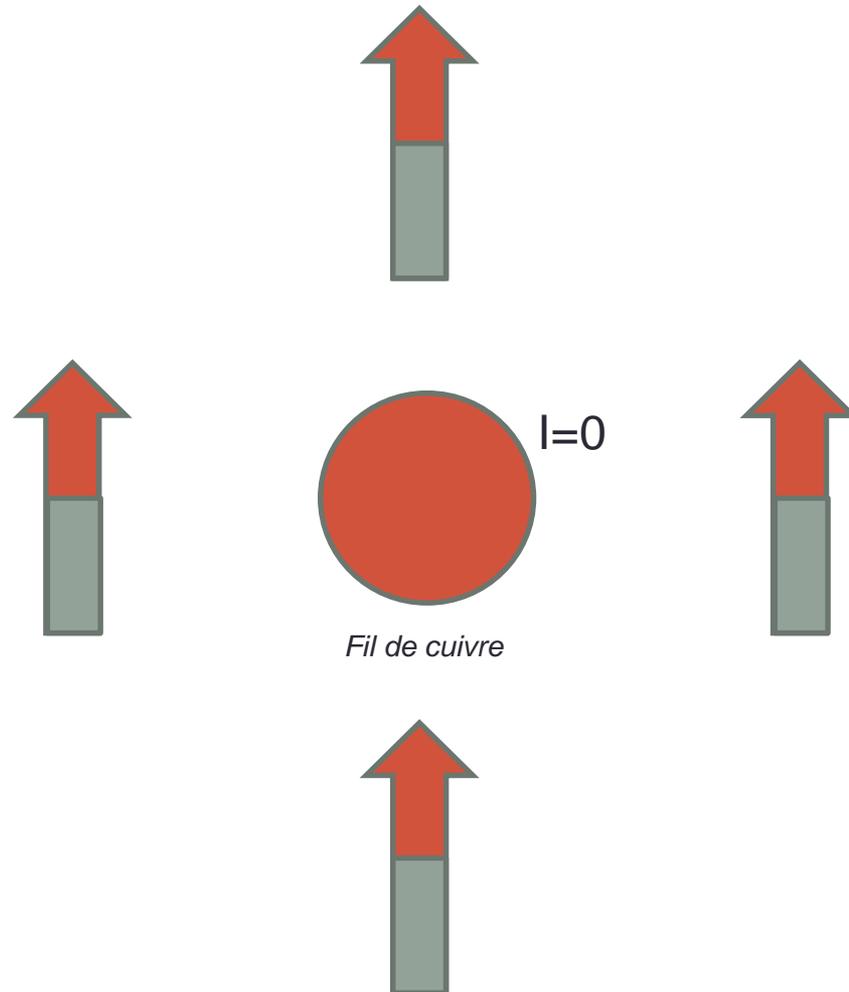
- Les boussoles réagissent au champ magnétique  $H$  (A/m) ;
- L'orientation des boussoles donne une idée de l'orientation du champ ;
- Champ magnétique est un champ vectoriel :
  - A chaque point de l'espace, on peut définir une direction, un sens et même une intensité.

# 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.

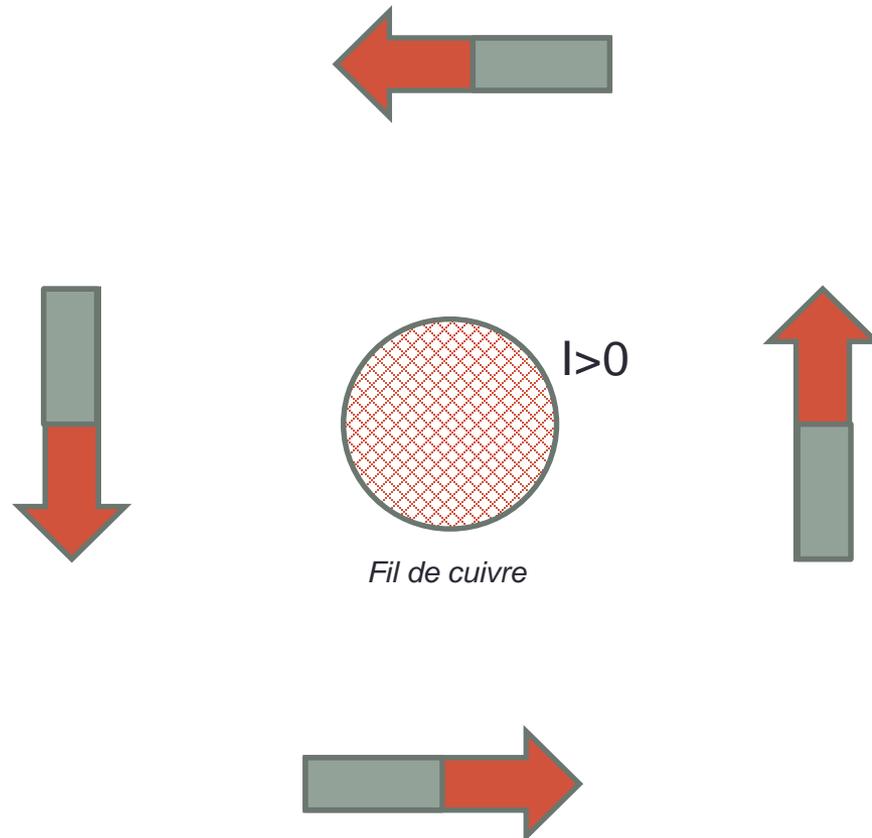
# Expérience de Hans Christian Oersted

*Courant dans le fil nul*



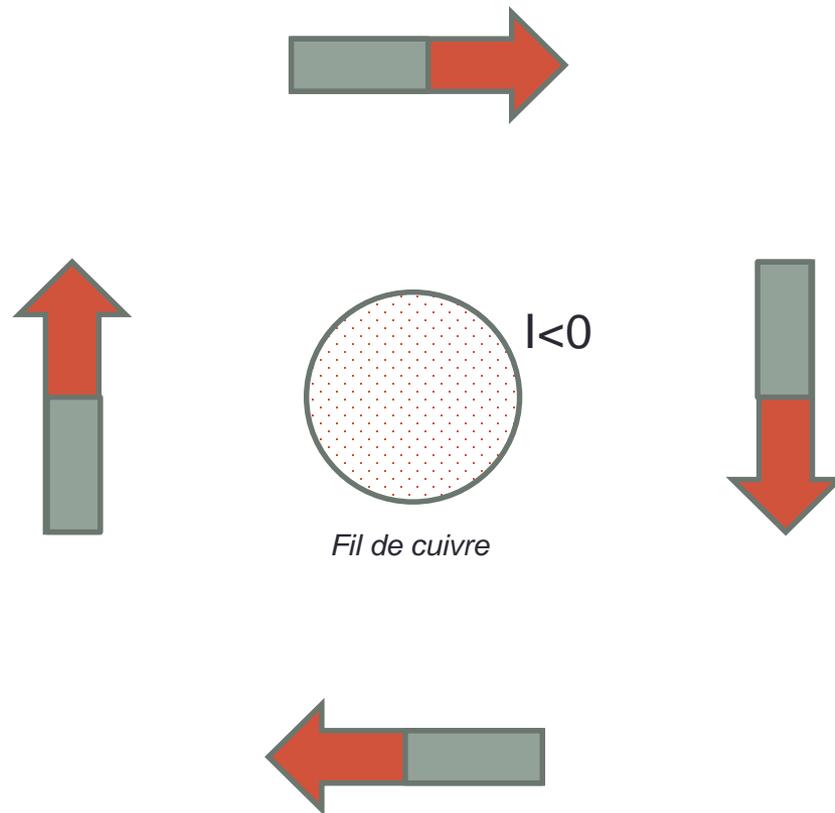
# Expérience de Hans Christian Oersted

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



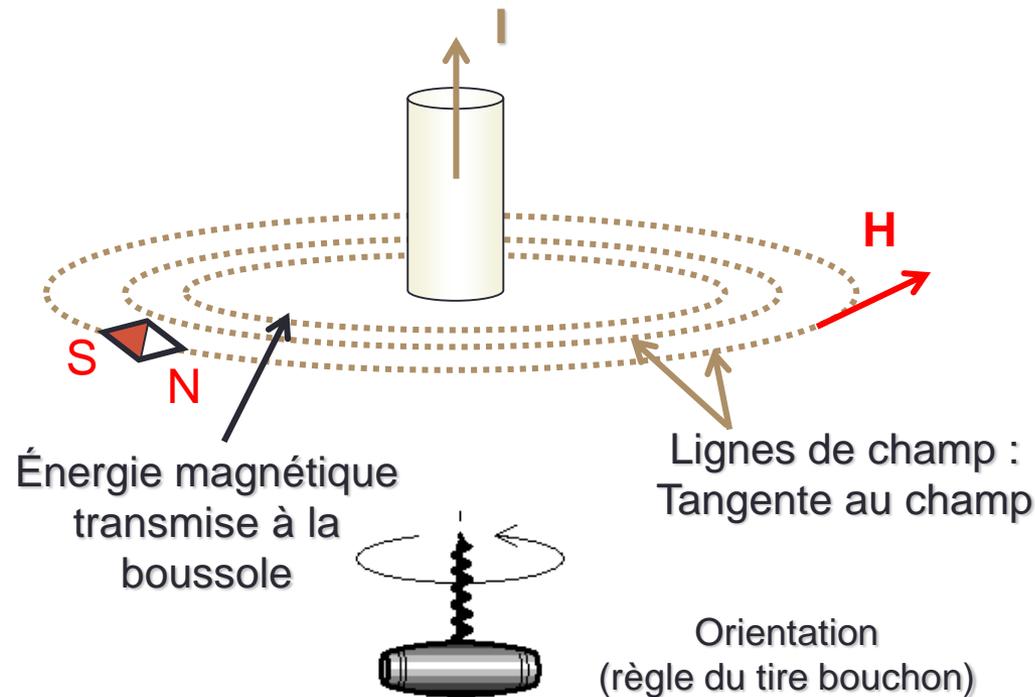
# Expérience de Hans Christian Oersted

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



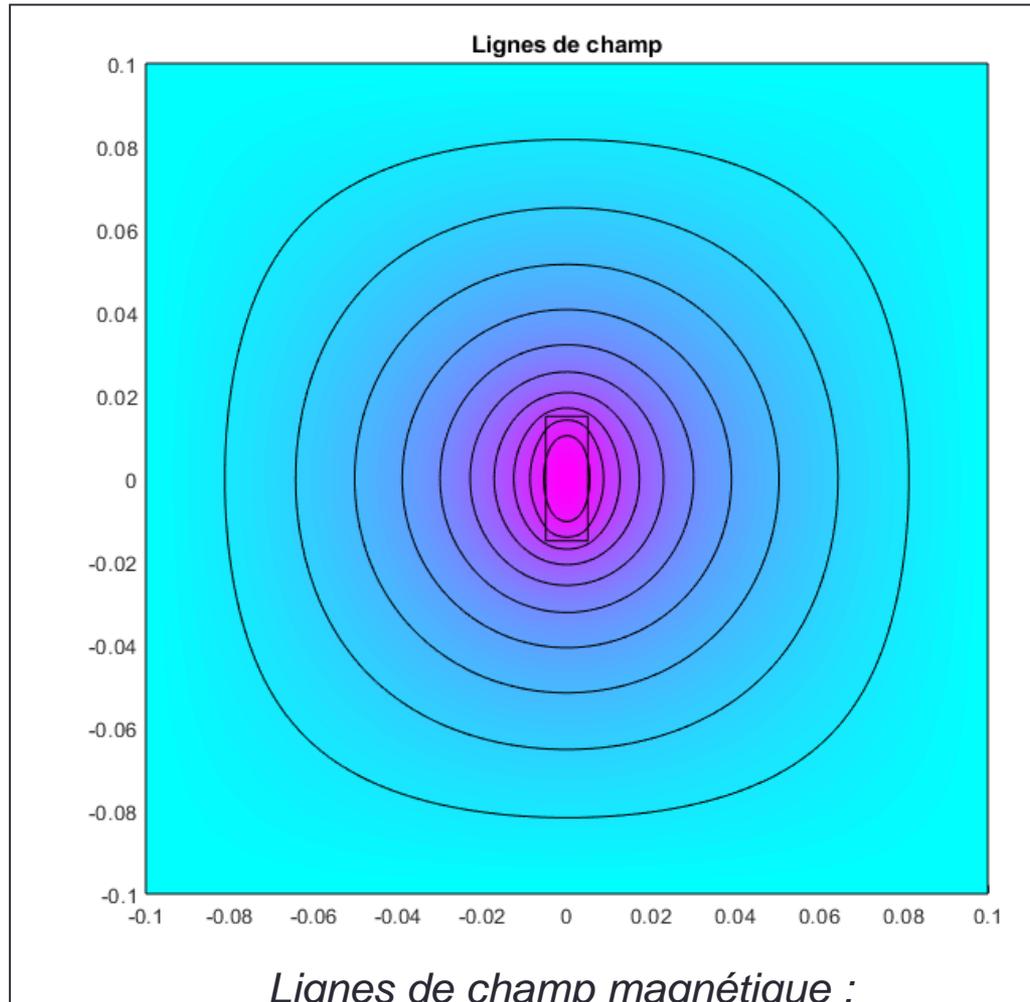
# Le champ magnétique

- Le champ magnétique est créé par un courant électrique :



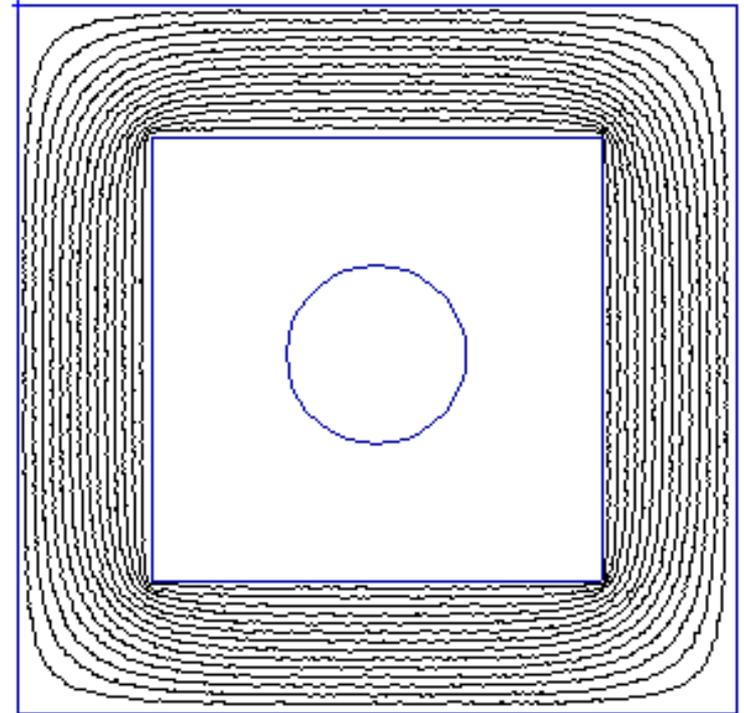
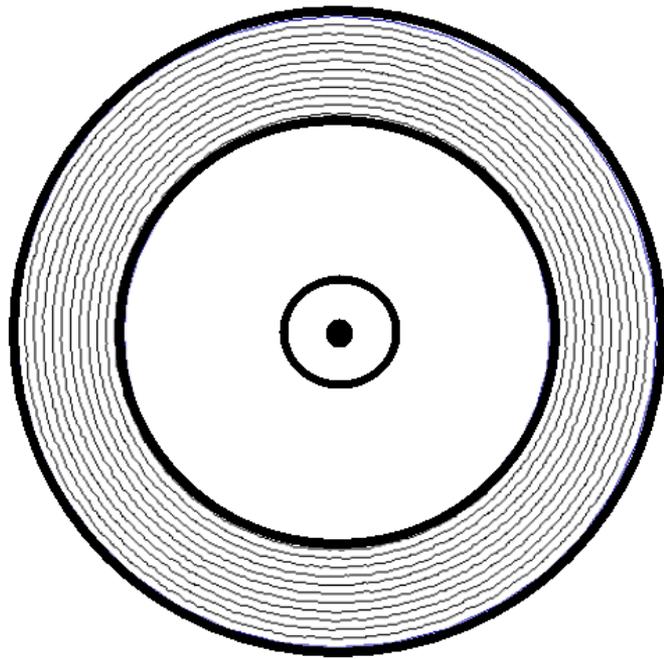
- L'intensité du champ dépend de l'intensité du courant ;
- L'orientation du champ dépend du sens du courant,

# 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

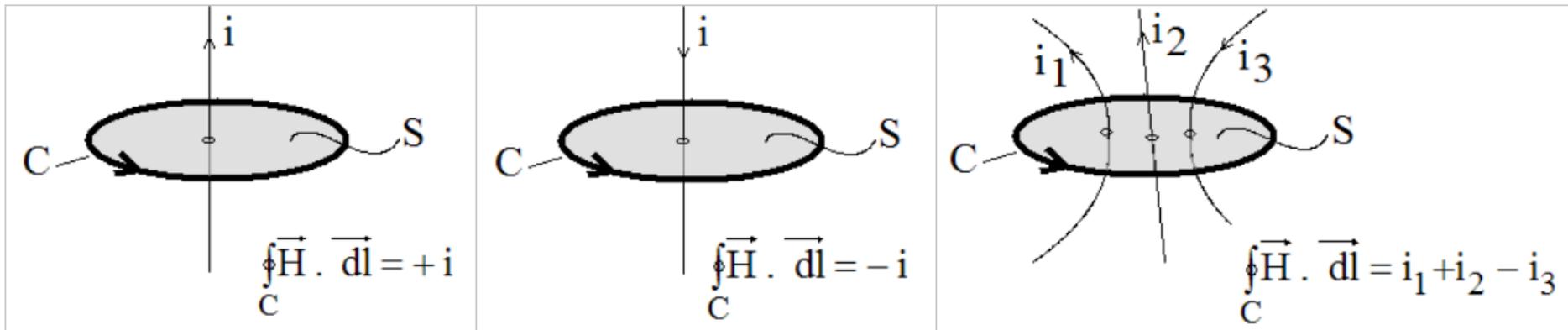
- Le théorème d'Ampère (André-Marie) :

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

- 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

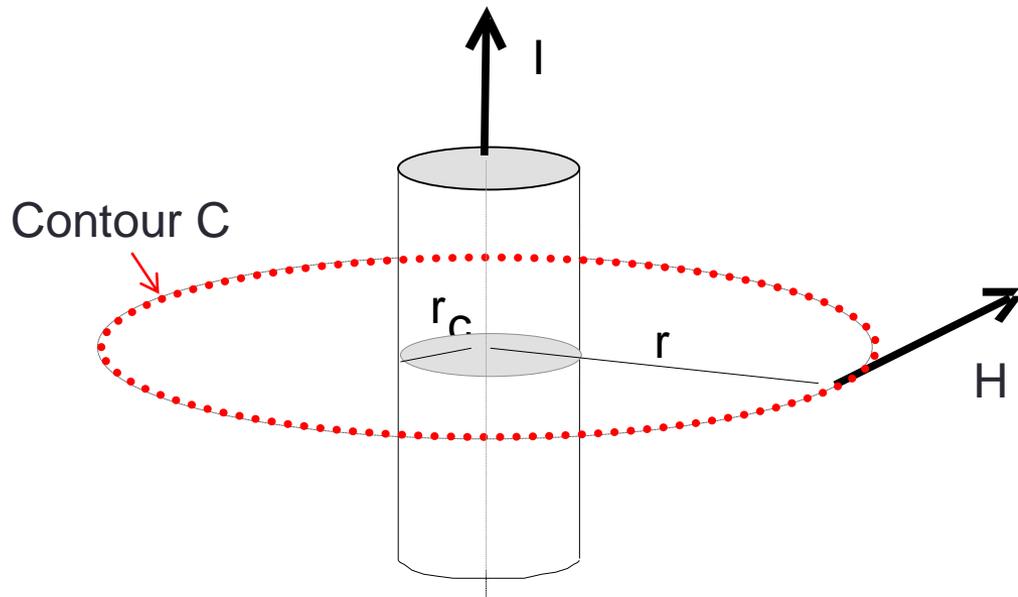
- Choisir un contour sur une ligne de champ :



- Attention de bien faire la somme algébrique !

# Application du théorème d'Ampère

- Conducteur seul :



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

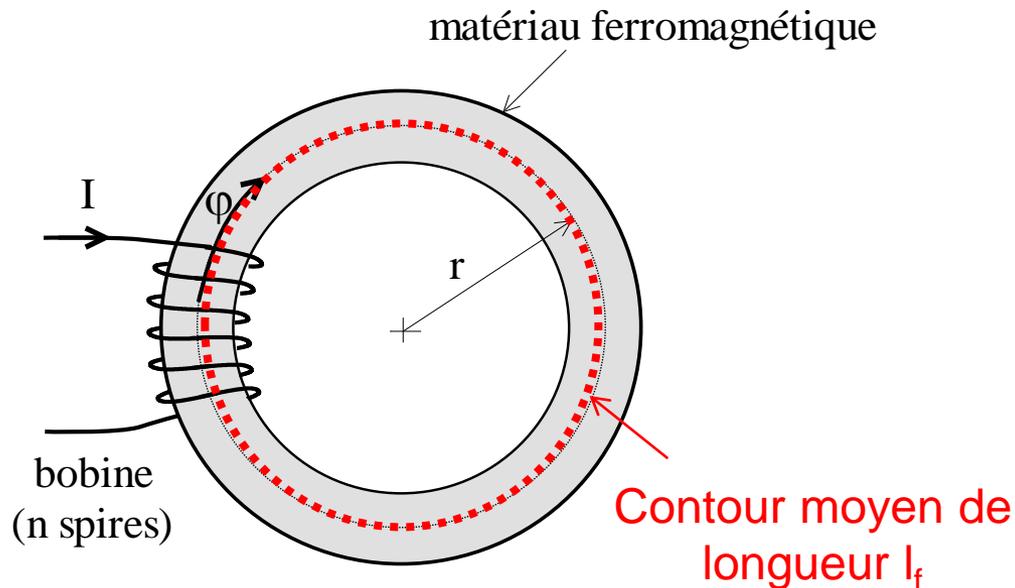
$$Hl = I$$

$$H2\pi r = I$$

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

# 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  $\mu_0$  perméabilité du vide (T.m/A)

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

# Aimantation des matériaux

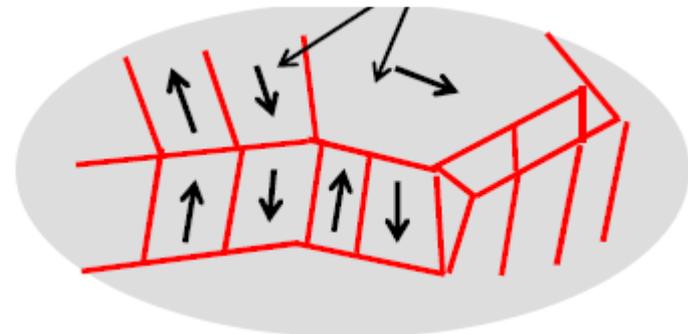
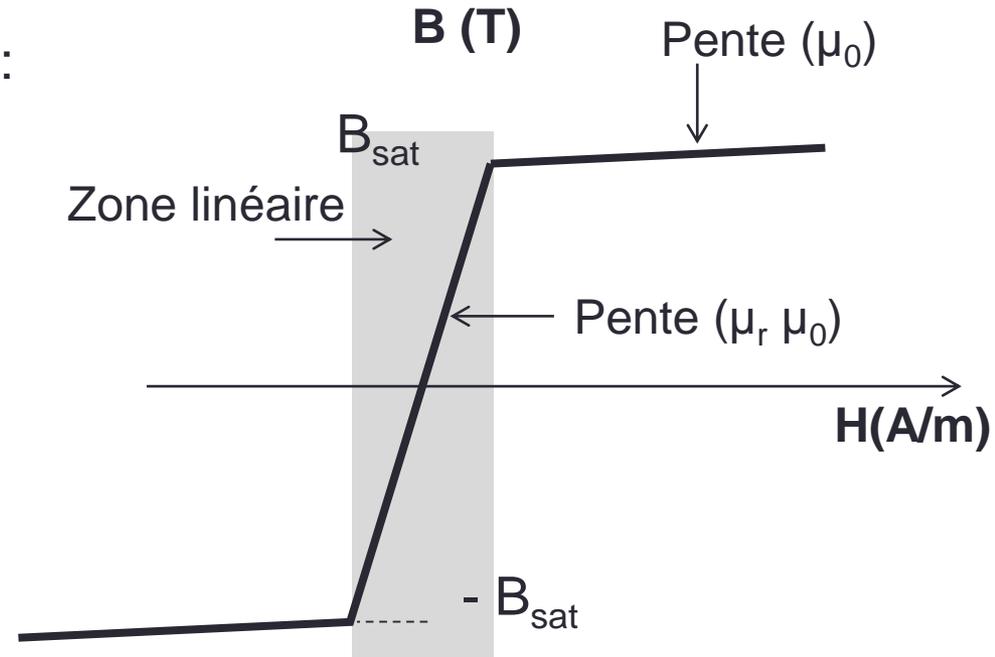
- Dans les matériaux magnétiques :

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

Avec  $\mu_r$  perméabilité relative du matériau :

- Tend vers l'infini pour un matériau parfait ;
- Matériau réel quelques milliers ;
- Zone de saturation où  $\mu_r$  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 m<sup>3</sup> sous 1T :

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

L'air stocke l'énergie

Dans le fer

$$\mu_r = 10\,000$$

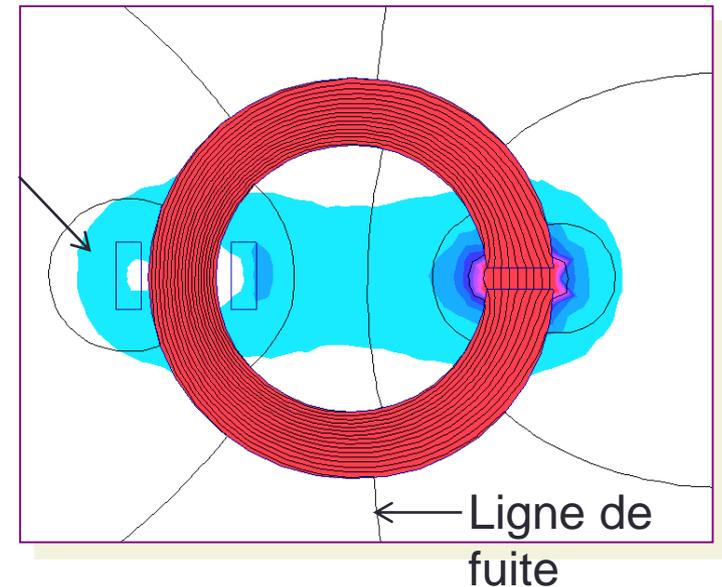
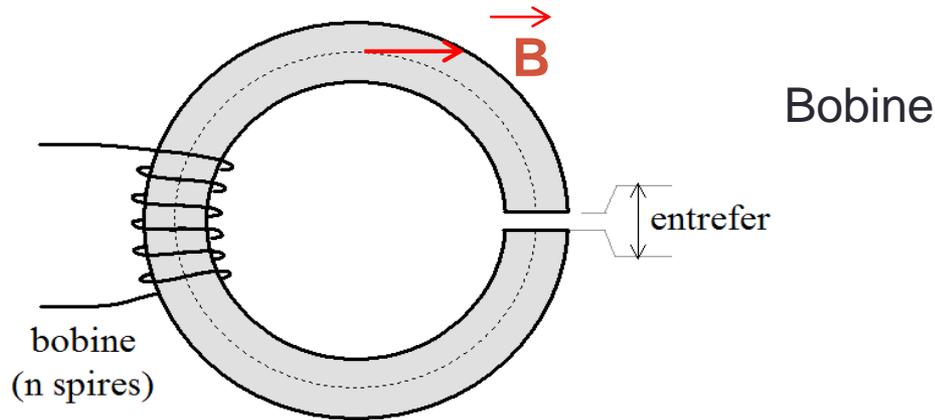
Dans 1 m<sup>3</sup> sous 1T :

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

Le fer canalise le champ

# Energie Magnétique

- Exemple circuit torique :



1.  $B$  identique dans air et fer ;

2. 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.  $\mu_r = 10\ 000$

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

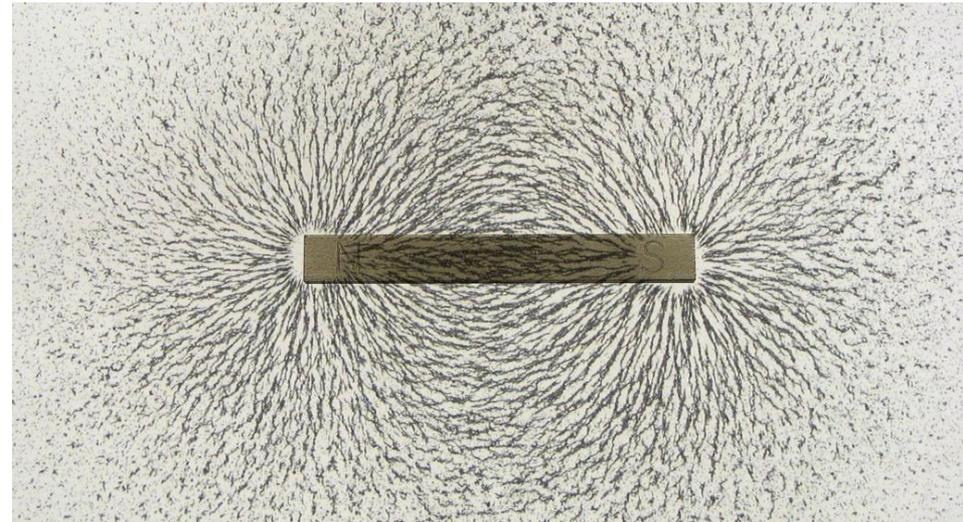
$$W_{bobine} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} l_{fer} S_{fer} + \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} l_{entrefer} S_{entrefer}$$

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

# 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



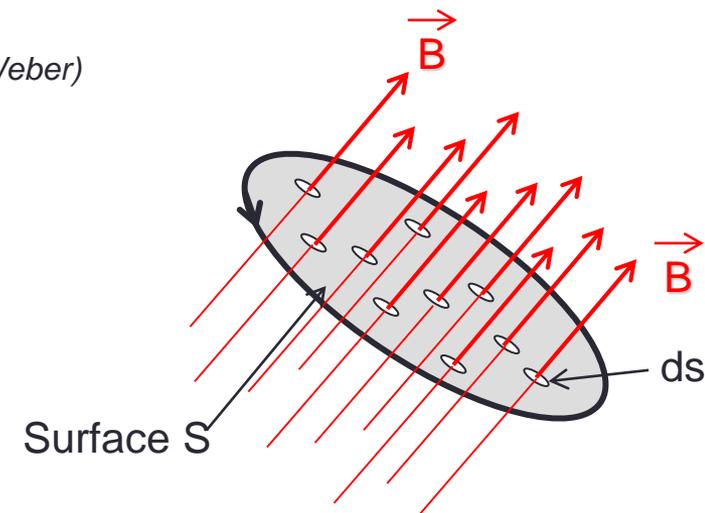
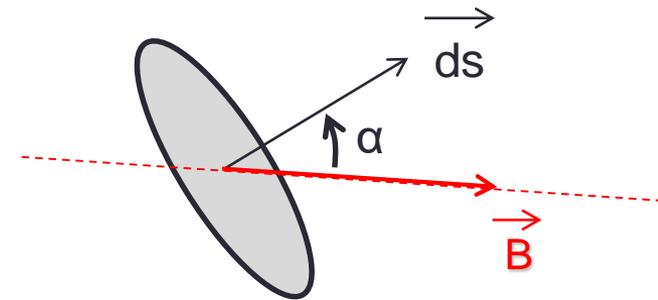
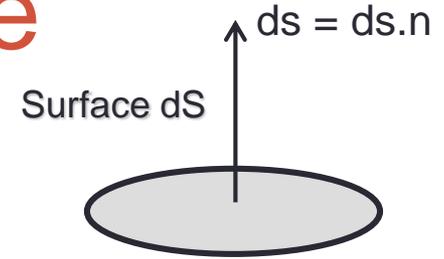
# Définition du flux magnétique

- Flux (scalaire) : quantité à travers une surface

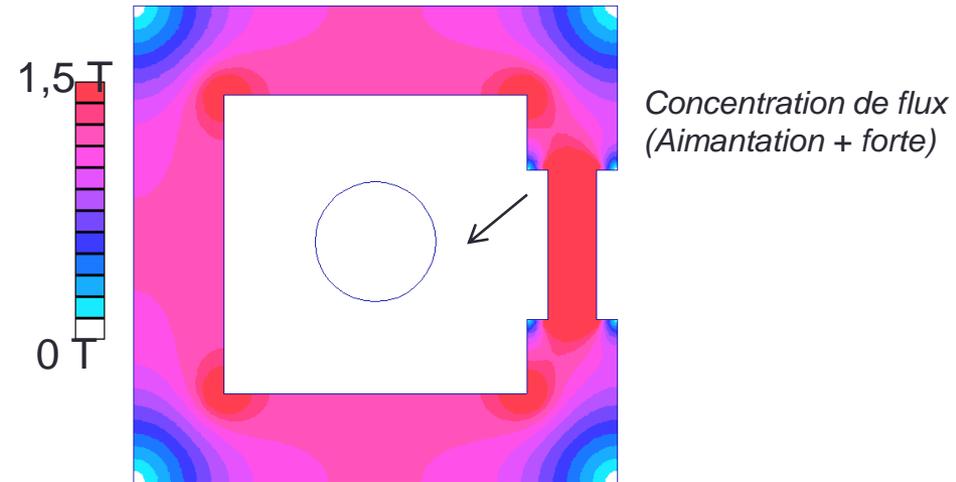
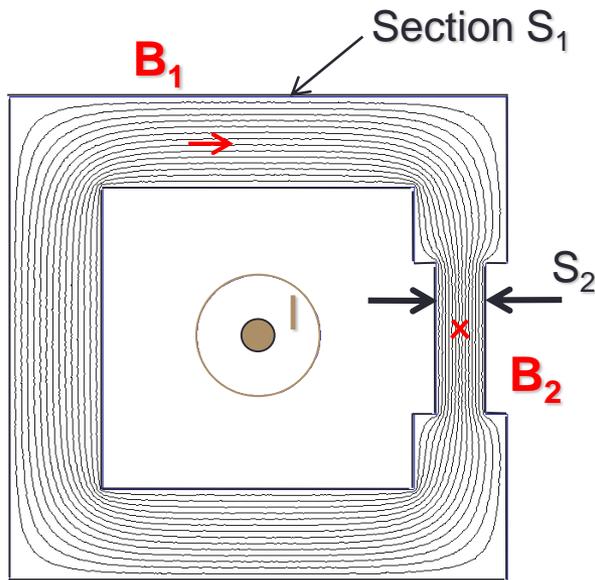
- $d\varphi = \vec{B} \cdot \vec{dS} = B dS \cos \alpha$

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

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

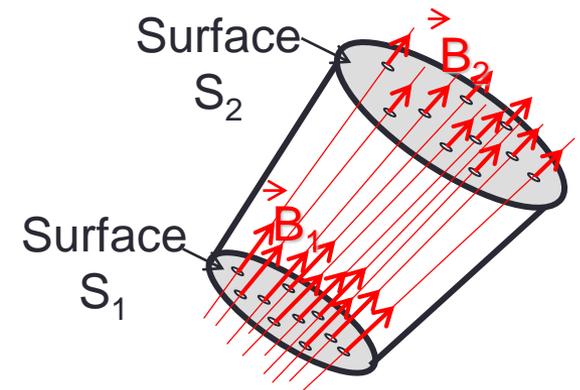


# Conservation du flux



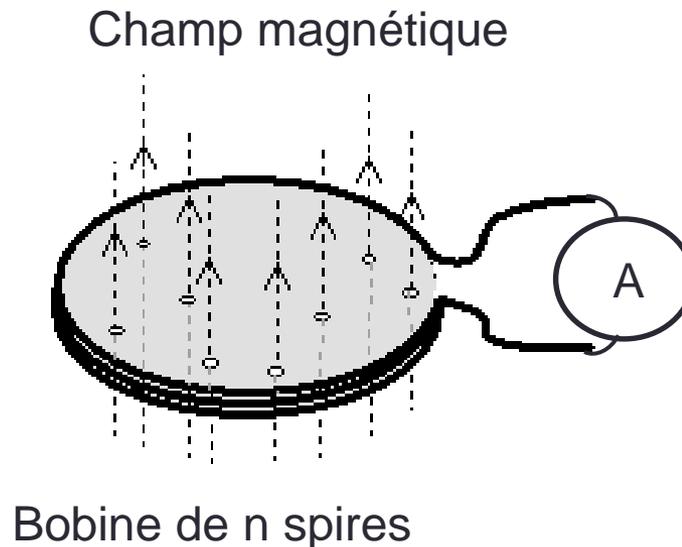
- Principe de conservation du flux :

$$B_1 S_1 = B_2 S_2$$



# Induction Electromagnétique

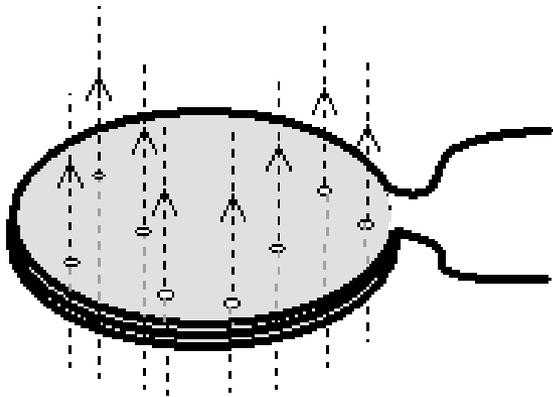
- Découverte en 1831 par Faraday ;
- Idée : Puisque un courant crée l'effet d'un aimant, un aimant peut-il créer un courant ?



# 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 :

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