

# ÉLECTROMAGNÉTISME



**Nicolas BERNARD**

Maître de Conférences

Enseignant & Chercheur en Génie Électrique (Conception des Machines Electriques)

nicolas.bernard@univ-nantes.fr

**1820: OERSTED** découvre l'effet du courant sur une boussole

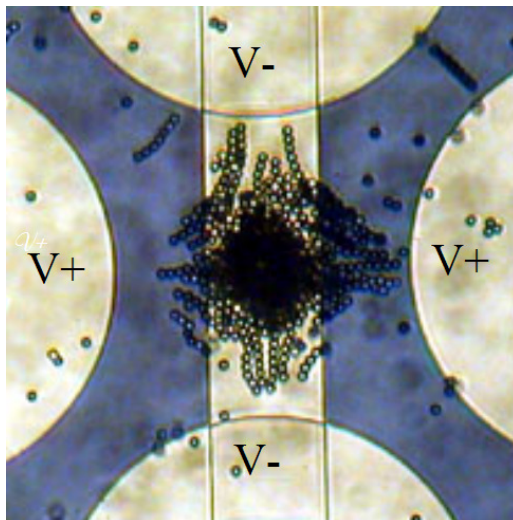
**1864: MAXWELL** unifie les lois de l'électricité

Tension  $\rightarrow$  Champ électrique  
Courant  $\rightarrow$  Champ magnétique



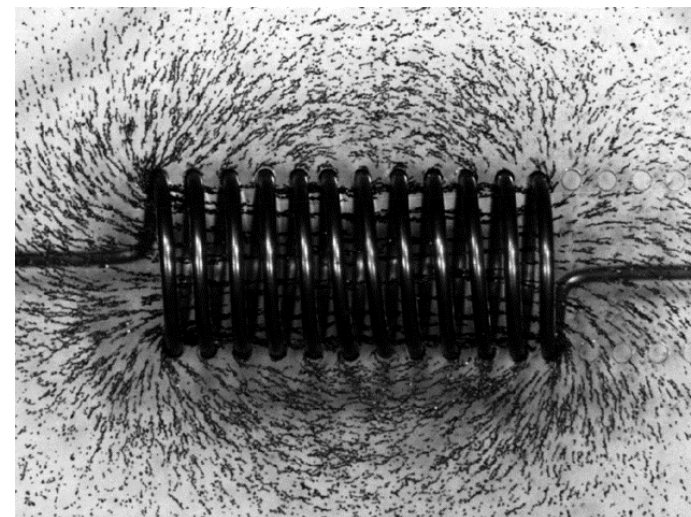
4 équations  
pour toute l'électricité

Champ électrique (noté E)



Effet d'une tension sur des billes plastics

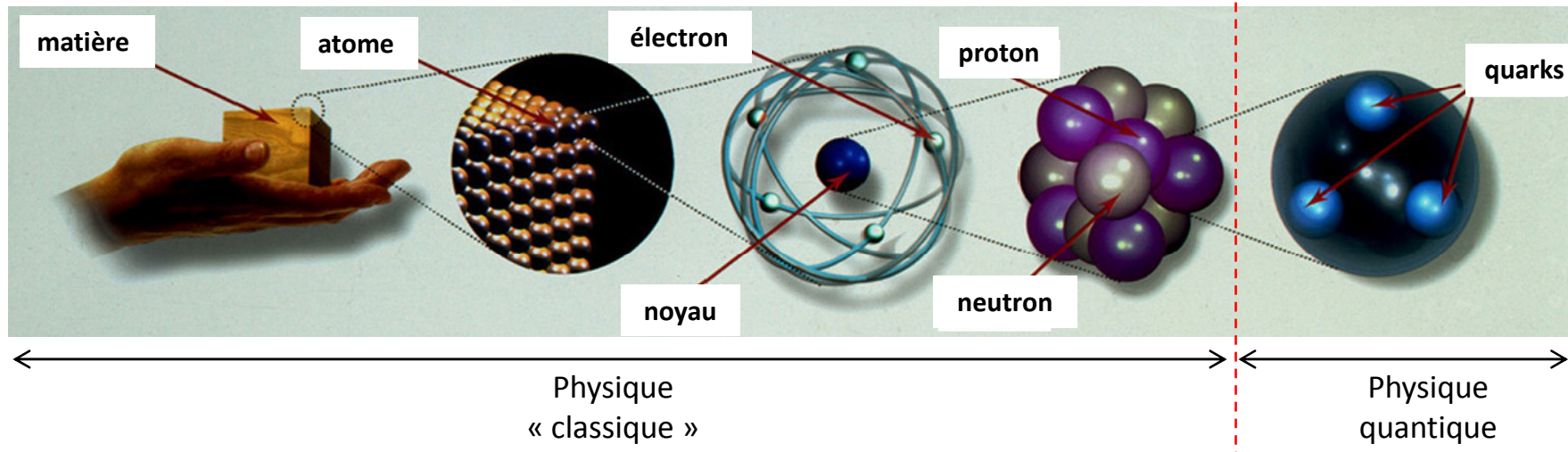
Champ magnétique (noté H)



Effet d'un courant sur de la limaille de fer

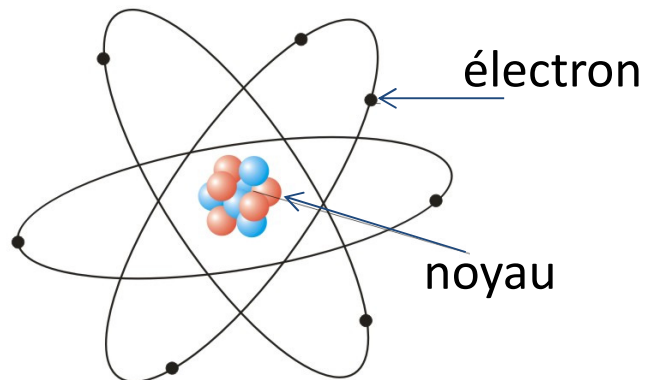
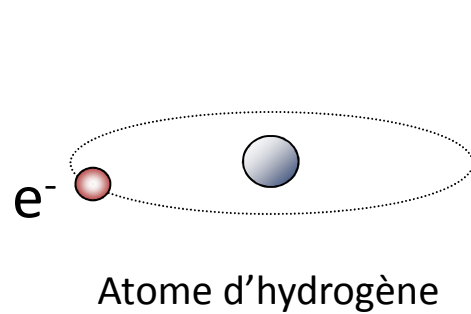
# I. La Matière et ses Propriétés

## La Matière



## Représentations de l'atome

→ Représentation classique : modèle planétaire

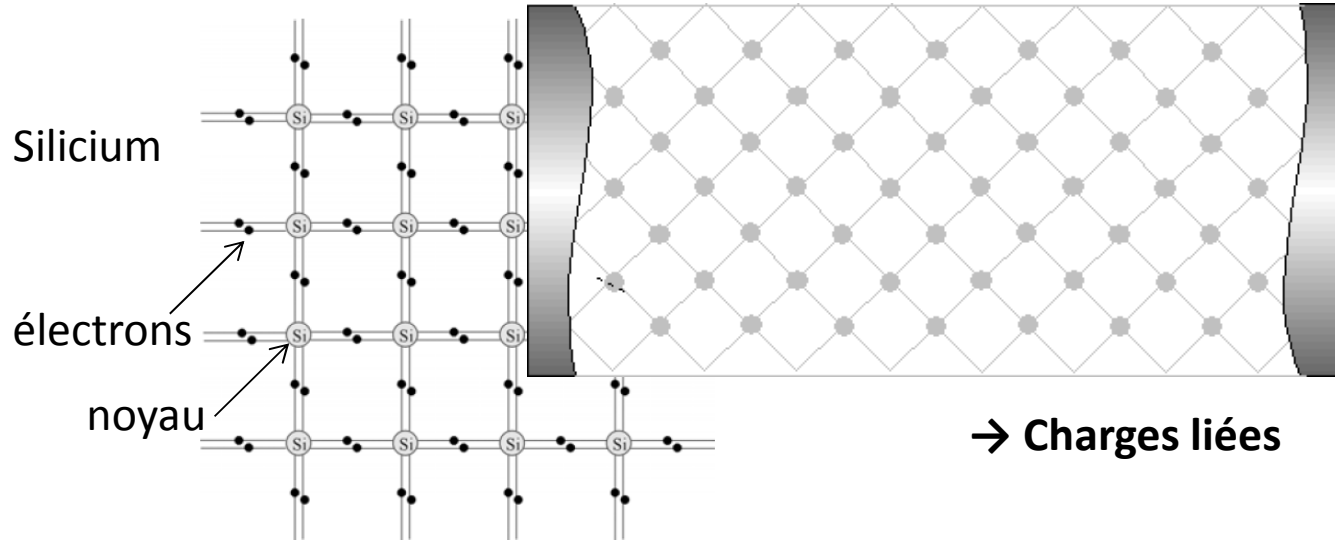


Représentation très simpliste

## Représentations d'un matériau (structure atomique)

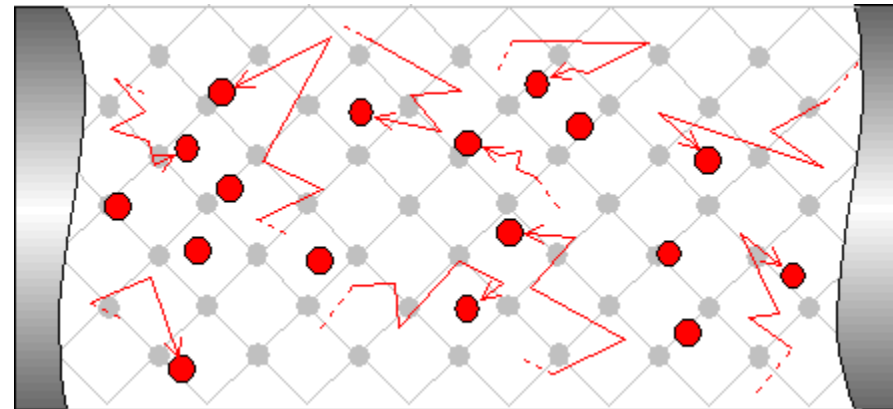
➡ Isolant électrique

Ex :  
cristal de Silicium



➡ Conducteur électrique

Ex :  
cuivre

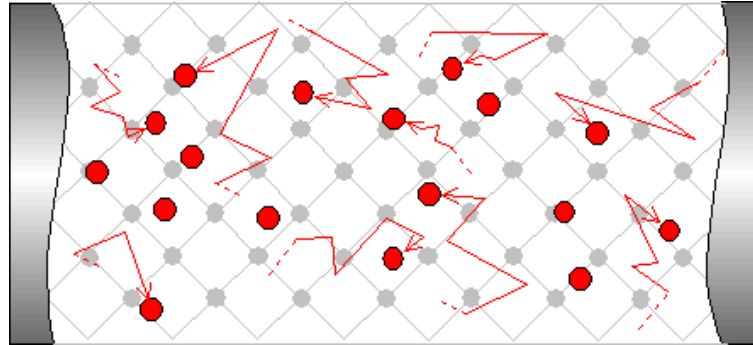


→ Charges liées + **charges libres**

## Les 3 types de matériaux de l'électricité

### CONDUCTEURS

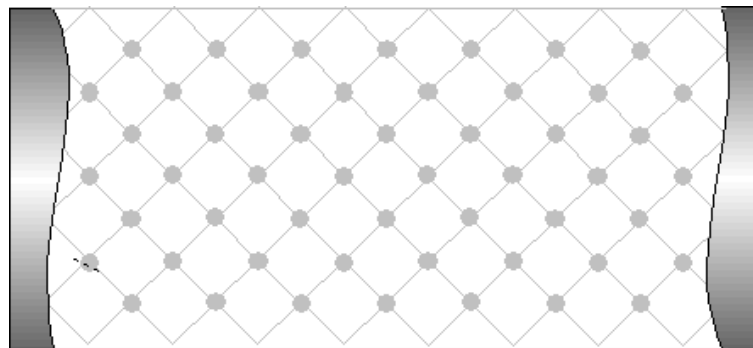
→ Charges libres en excès ( $e^-$ )



Cuivre  
Fer  
Argent  
...

### ISOLANTS

→ Charges liées uniquement



Air  
Verre  
Plastique  
...

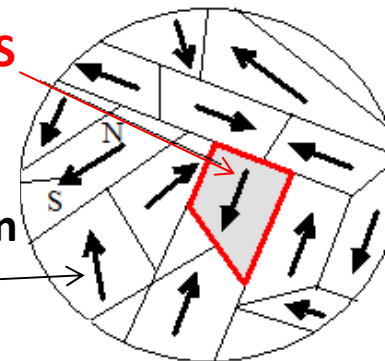
### MAGNETIQUES

→ Aimantations locales



Domaine de WEISS

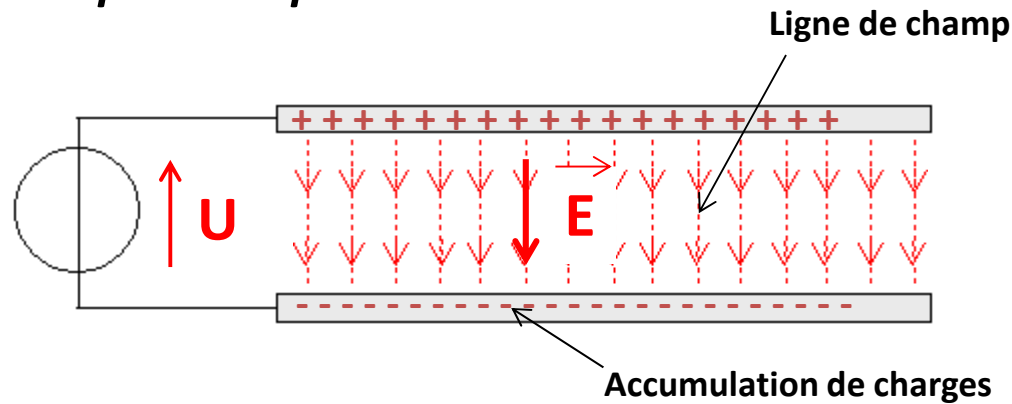
Aimantation locale



Fer  
...

## Représentation des Champs électrique et magnétique

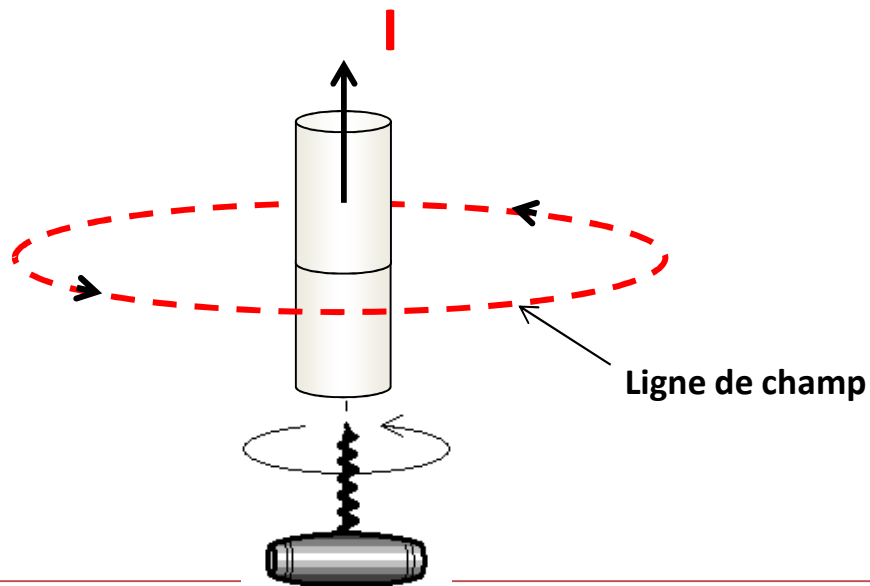
### Champ électrique



E circule  
des charges + vers les charges -

Unité de E : le Volt/mètre [V/m]

### Champ magnétique



H circule  
dans le sens donné par le tire bouchon

Unité de H : l'Ampère/mètre [A/m]

**Effets du champ électrique sur la matière**

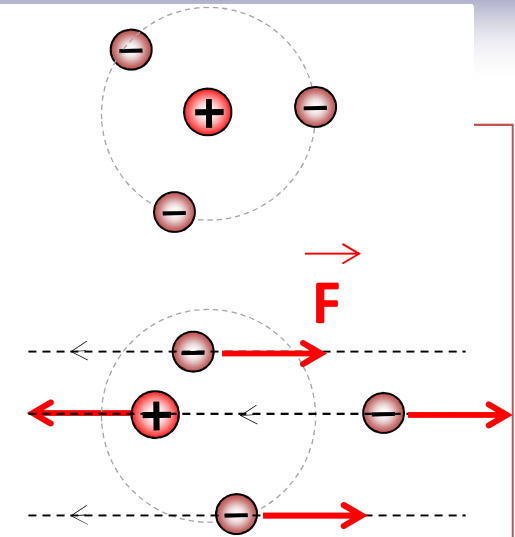
**Force Electrique (Force de COULOMB)**

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

$q = +/- 1.602 \cdot 10^{-19}$  C (Coulomb)

$E = 0$

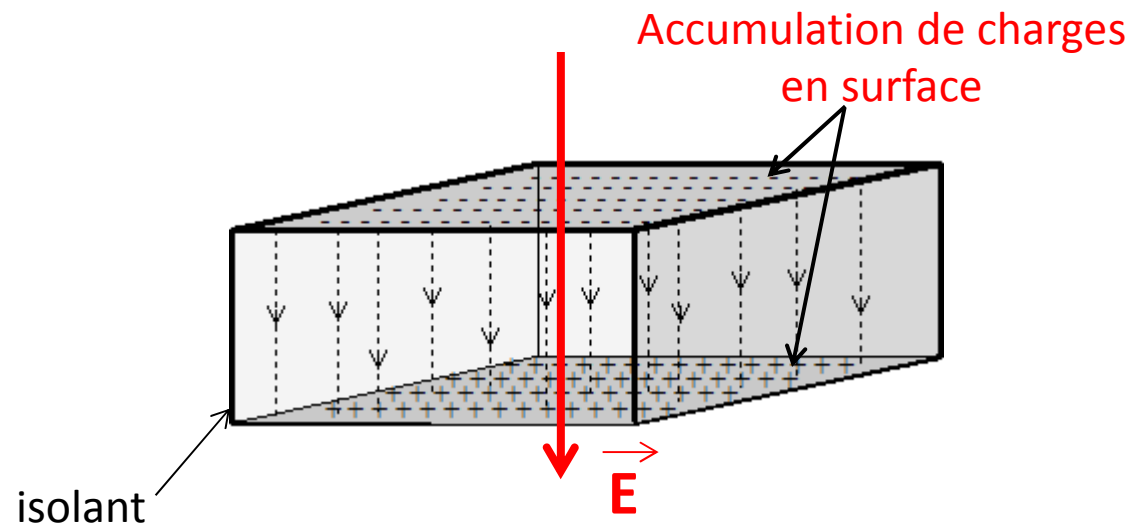
$E \neq 0$



**Effet 1 : circulation de courant dans les matériaux conducteurs**

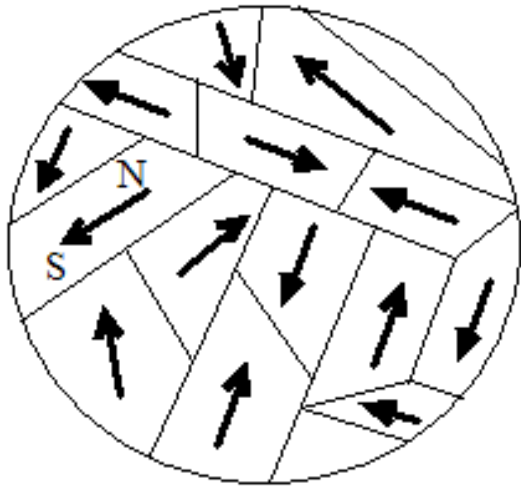
 Cours d'électricité

**Effet 2 : Polarisation électrique des matériaux isolants**

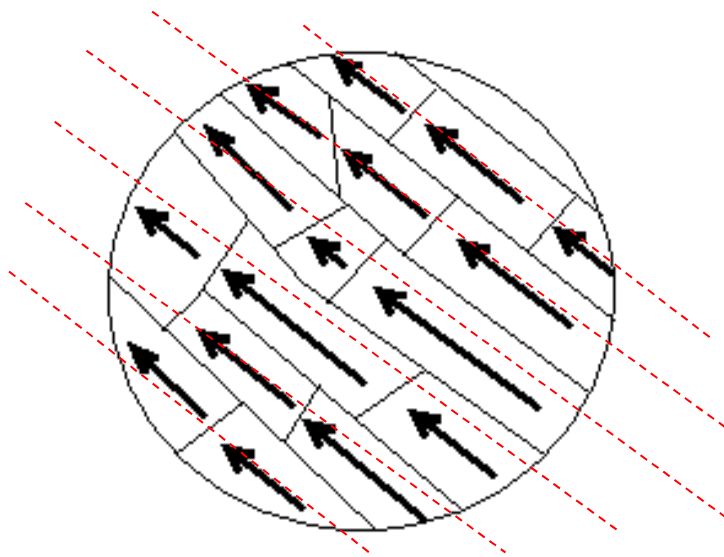


**Effets du champ magnétique sur la matière (AIMANTATION)**

Champ nul  $\rightarrow$  aimantation globale nulle



Champ  $H$   $\rightarrow$  aimantation

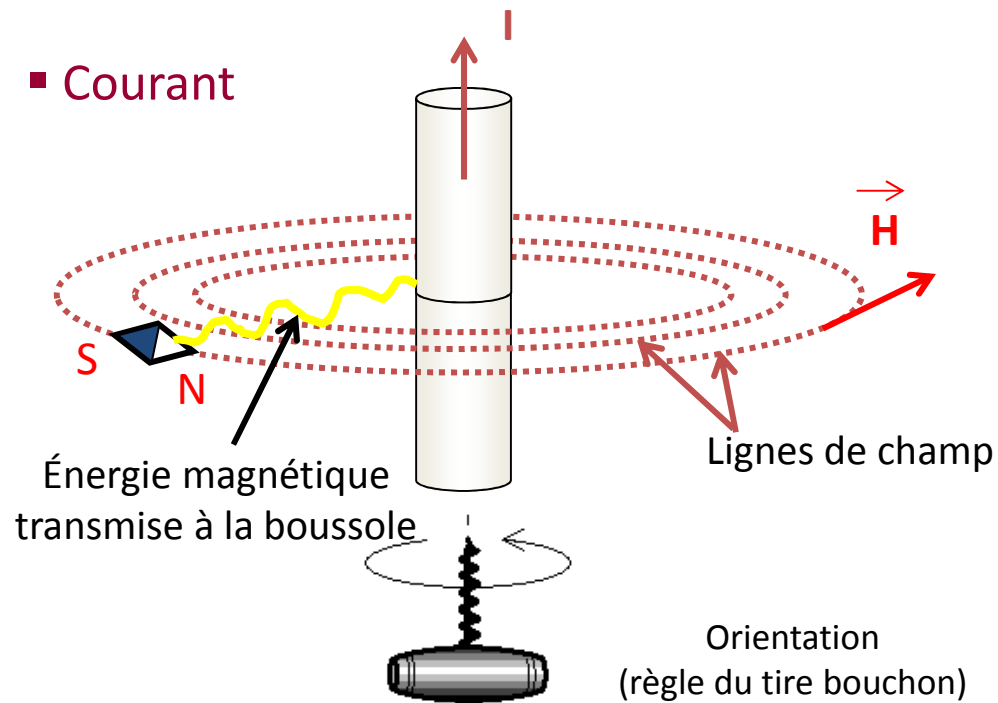


*Échantillon de Fer vu au microscope*

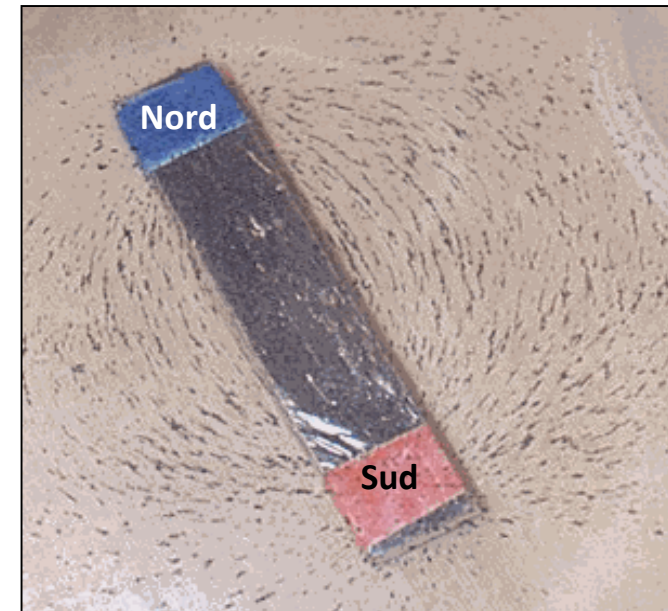
## 2. Le Champ Magnétique

### Champ magnétique

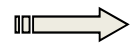
#### ■ Courant



#### ■ Aimant

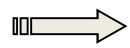


Intensité du champ mg



Proportionnelle à  $I$

Orientation du champ



Règle du tire bouchon



## L'aimantation (induction magnétique)

➔ Effet produit par le champ magnétique sur la matière

Notation : B

Unité : le Tesla [T]

### ▪ Les matériaux non magnétiques (aimantation faible)

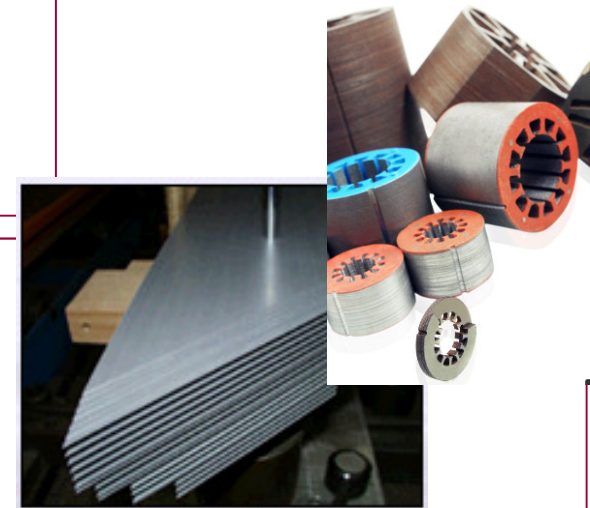
- air
- plastic
- cuivre
- ...



### ▪ Les matériaux magnétiques doux (aimantation facile)

- les aciers (à base de fer)

Matériaux ferromagnétiques  
Utilisés en Génie Électrique



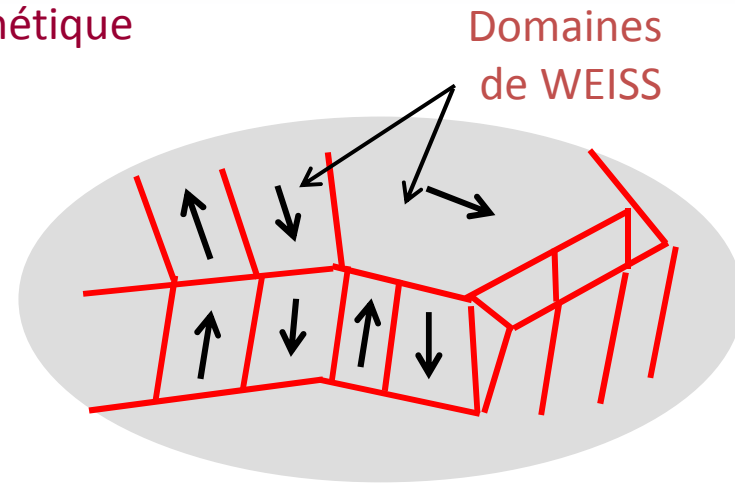
### ▪ Les matériaux magnétiques durs (aimantations permanents)



▪ Effet du champ magnétique sur un matériau magnétique

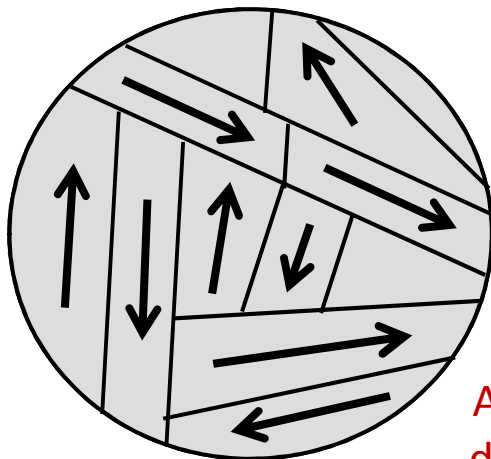


Échantillon de Fer vu au microscope



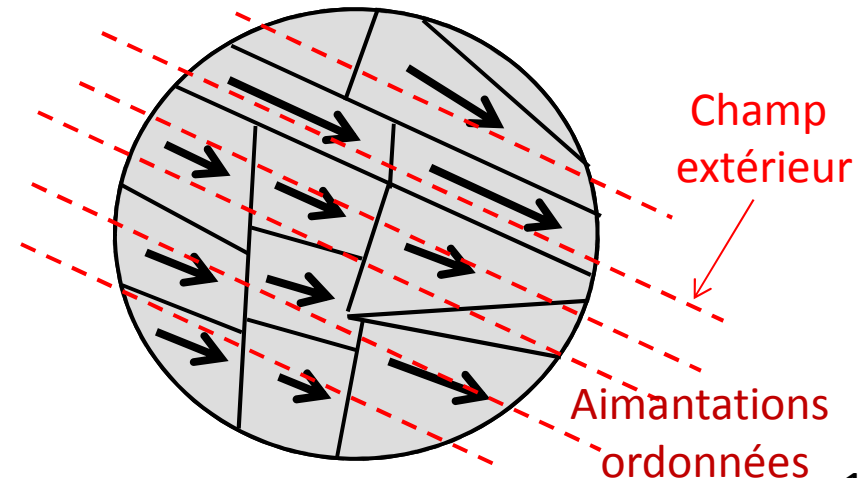
Aimantations locales

Champ nul → aimantation globale nulle



Aimantations désordonnées

Sous champ mg → aimantation



▪ Milieux non magnétiques (l'air, le vide ou le cuivre)

$$B = \mu_0 H$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad (\text{Perméabilité du vide})$$

▪ Milieux ferromagnétiques (fer)

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

$\mu_r$  variable

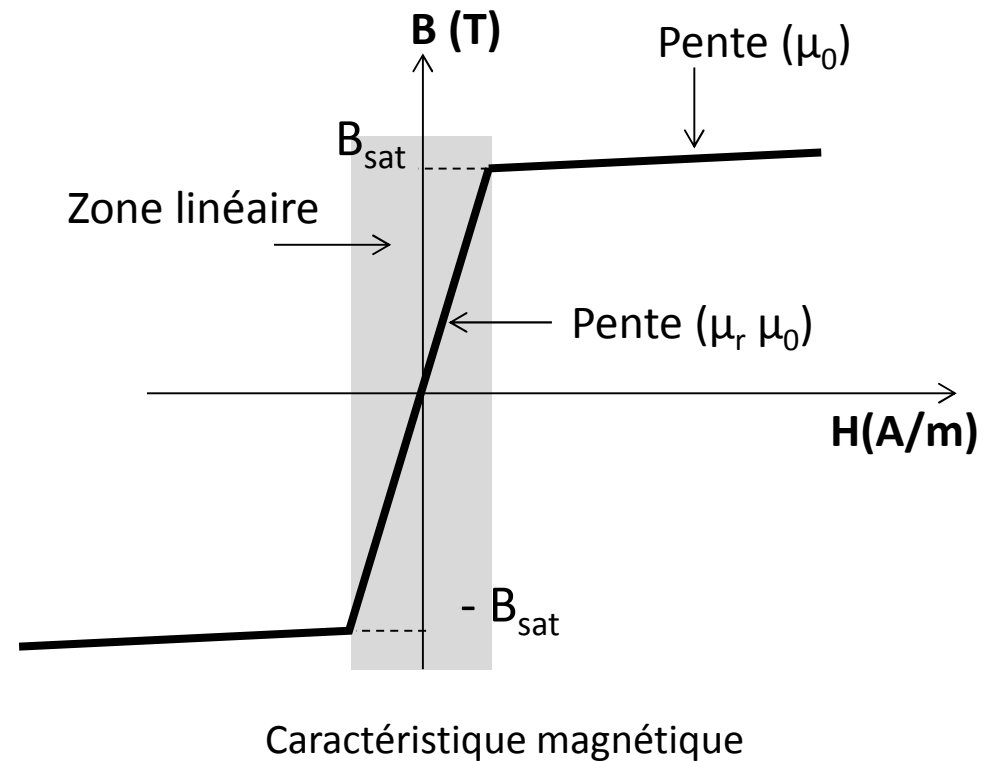
**Zone linéaire :**

$$\mu_r = 3\,000 \text{ à } 10\,000$$

$$\mu_r = \infty \text{ si matériau parfait}$$

**Zone saturée :**

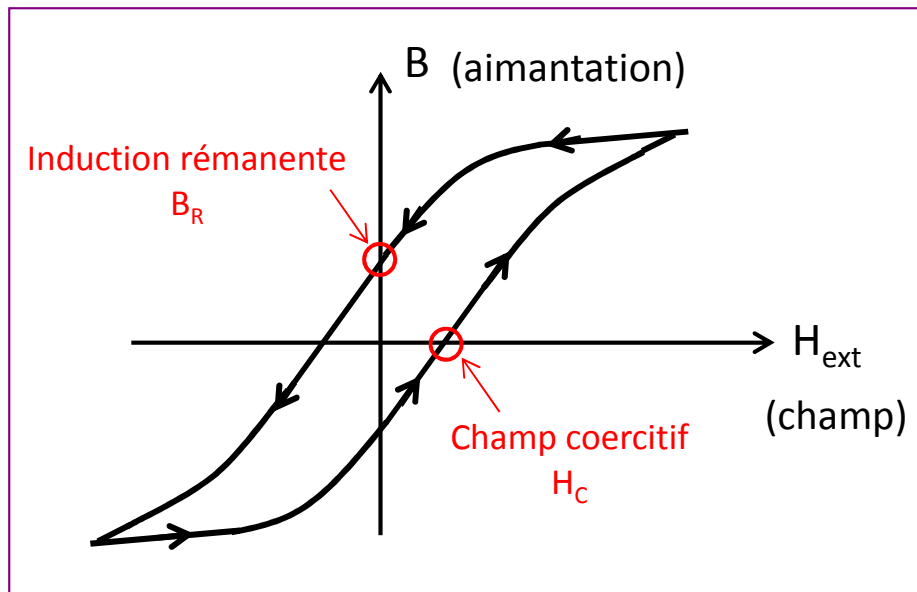
$\mu_r$  tend vers 1



**Les pertes magnétiques**  
**en régime variable**

Champ magnétique sinusoïdal par exemple

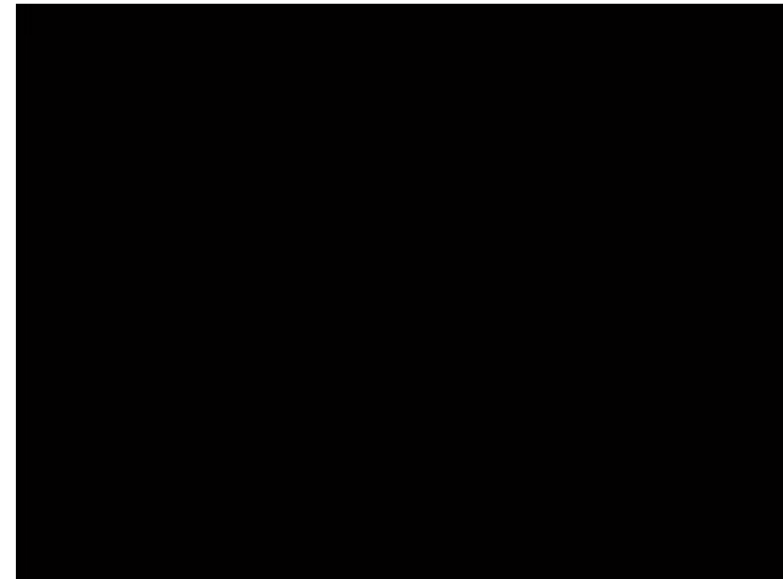
▪ Cycle d'Hystérésis



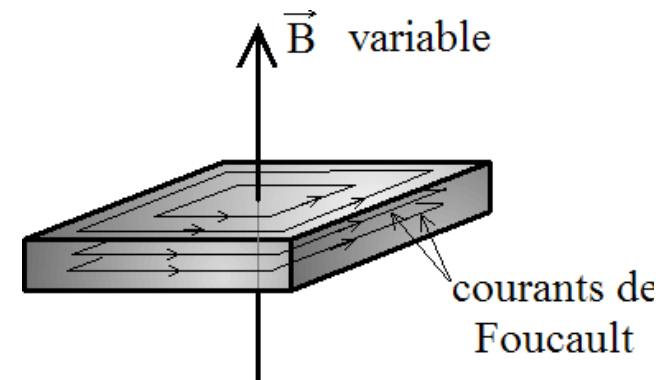
✓ Surface du cycle = pertes en W/m<sup>3</sup>

▪ Pertes par Hystérésis

Déplacement des parois

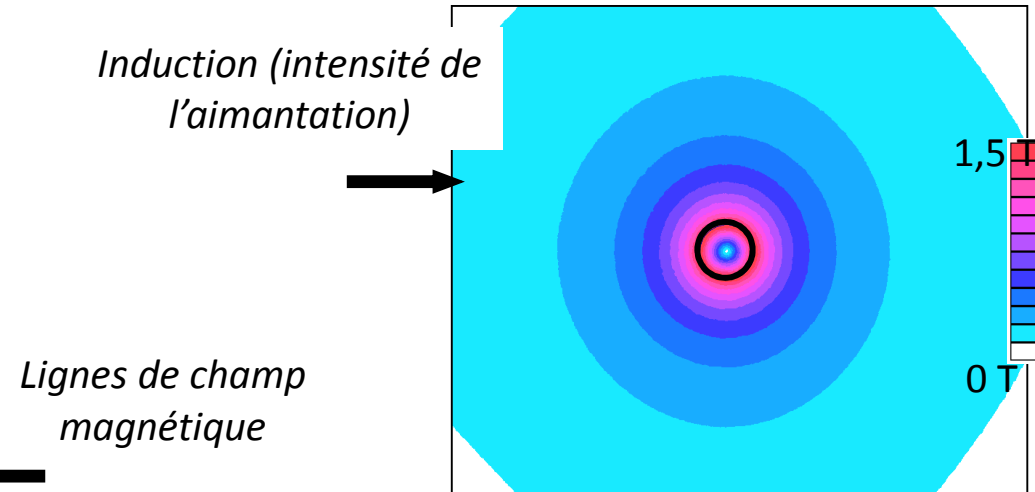
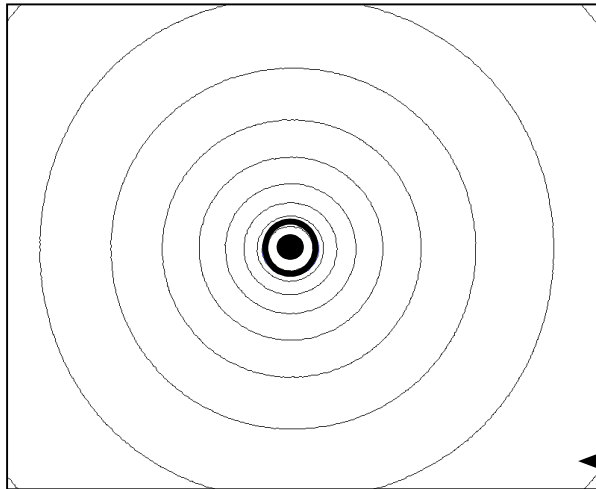


▪ Pertes par Courants de Foucault

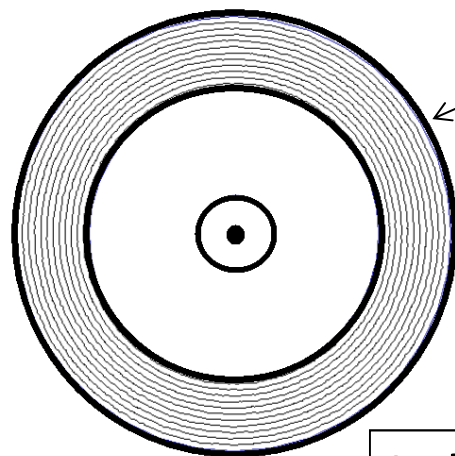


**Exemples illustrant le champ magnétique et l'aimantation produite**

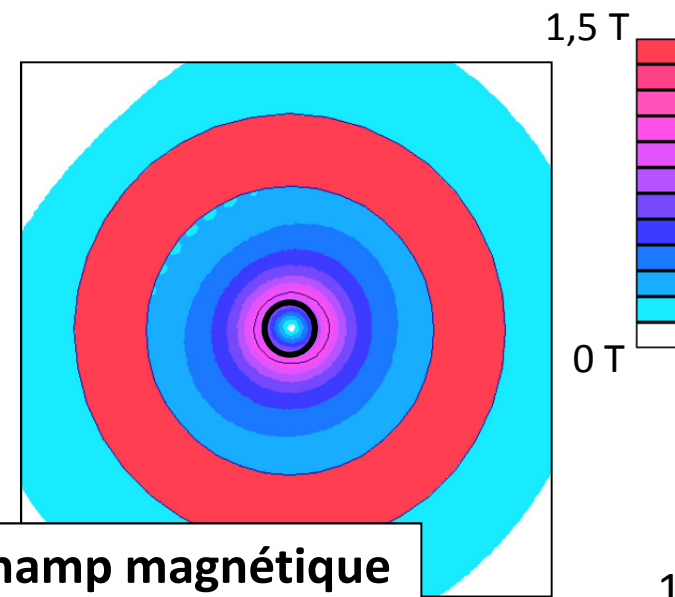
▪ **Conducteur seul dans l'air**



▪ **Conducteur + circuit magnétique 1**

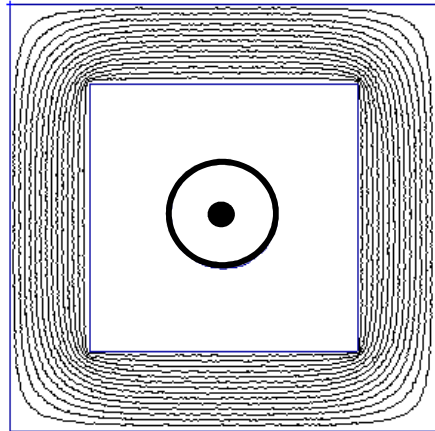


Matériau ferromagnétique  
 $\mu_r \sim 3000$   
(3000 fois plus perméable que l'air)



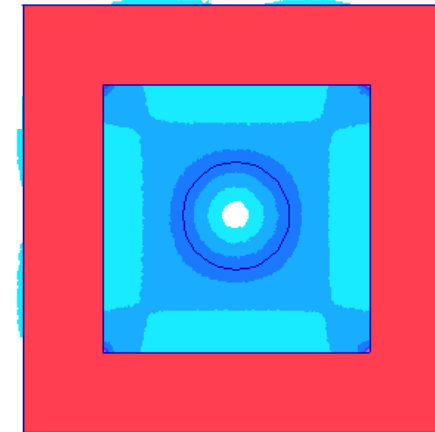
**Induction = densité de lignes de champ magnétique**

▪ **Conducteur + circuit magnétique 2**



Lignes de champ magnétique

Induction (intensité de l'aimantation)

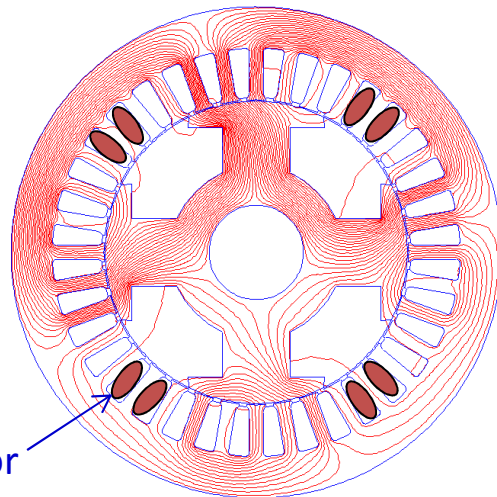


1,5 T

0 T

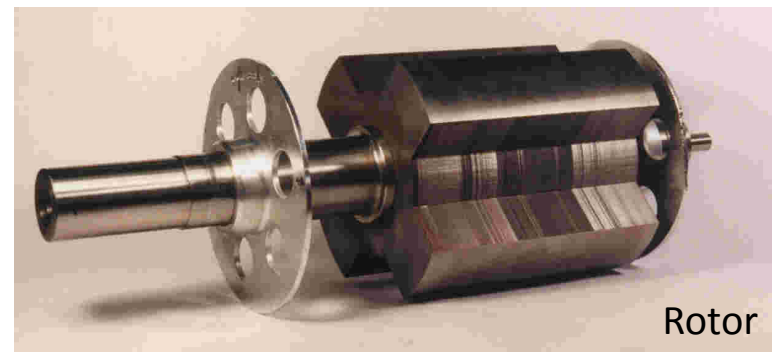
Un matériau magnétique canalise les lignes de champ magnétique

▪ **Moteur**



Courants au stator

MRV (Moteur à Réluctance variable)



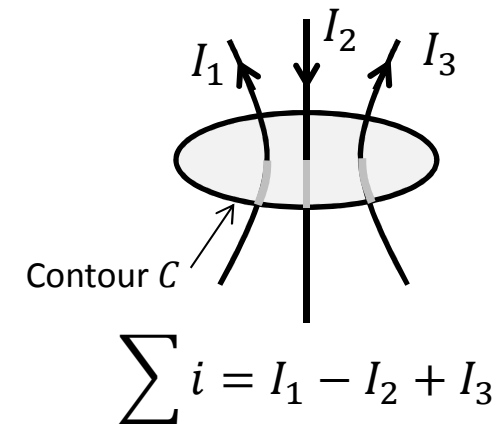
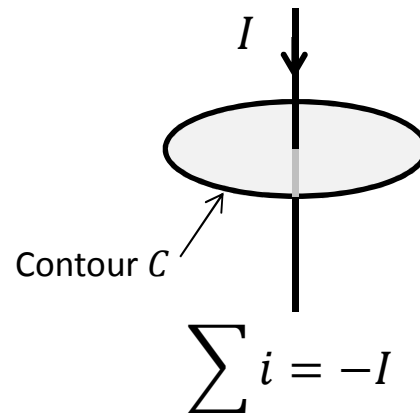
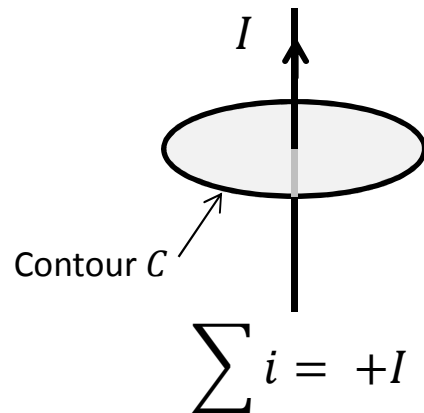
Rotor

**Théorème d'AMPERE**

➔ Relation entre champ magnétique et courant

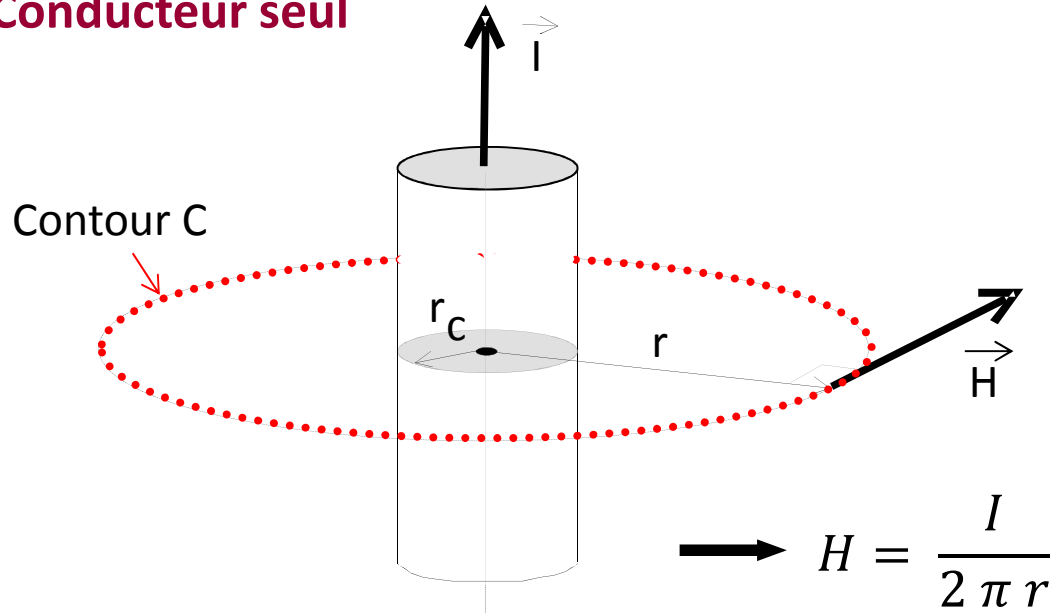
$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum \text{courants entrant dans le contour } C$$

Circulation du champ sur un contour fermé  
= Somme des courants à l'intérieur de ce contour



Choisir un contour s'appuyant sur une ligne de champ magnétique

▪ **Conducteur seul**



$I = 10 \text{ A}$

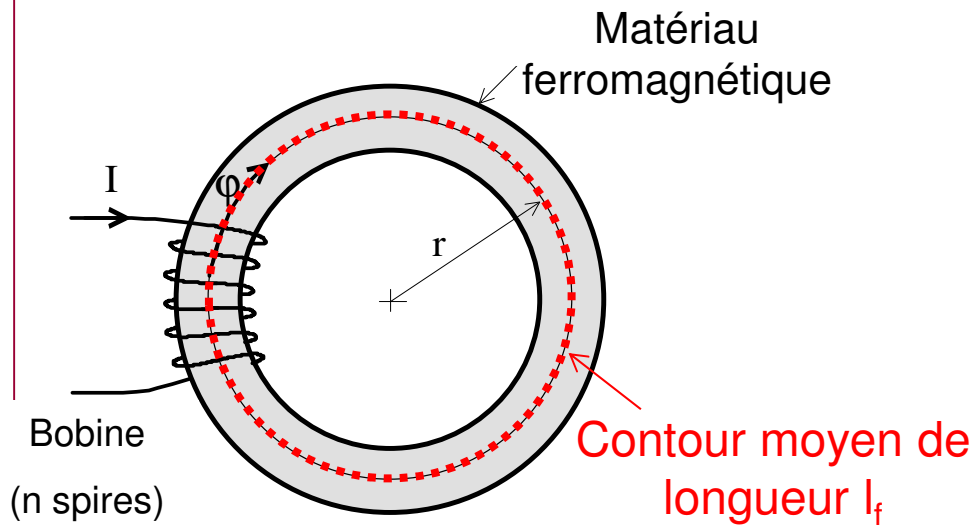
$1 \text{ m}$

$H = 1,6 \text{ A/m}$

$B = 2 \mu\text{T}$

Aimants permanents puissants :  $B \sim 1\text{T}$

▪ **Circuit torique (bobine)**



Théorème d'AMPERE  $\longrightarrow H = \frac{nI}{l_f}$

Force magnétomotrice (f.m.m.) en Ampères-tours  $\longrightarrow \text{FMM} = nI$



## Énergie magnétique

Définition  $\rightarrow$  
$$\left\{ \begin{array}{l} W_{mg} = \frac{1}{2} B.H.Vol \\ \text{ou} \\ W_{mg} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} .Vol \end{array} \right.$$

**Repère énergétique :**

$$1 \text{ kJ} = 1000\text{N} \times 1\text{m}$$

( $\approx 100 \text{ kg}$  soulevé sur 1m)

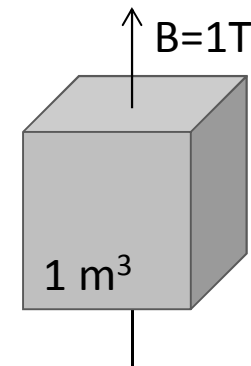
Dans  $1 \text{ m}^3$  soumis à une induction de 1T, on stocke :

**Dans l'air ( $\mu = \mu_0$ )**

$$W_{mg \text{ air}} = \frac{1}{2\mu_0} = 398 \text{ kJ}$$

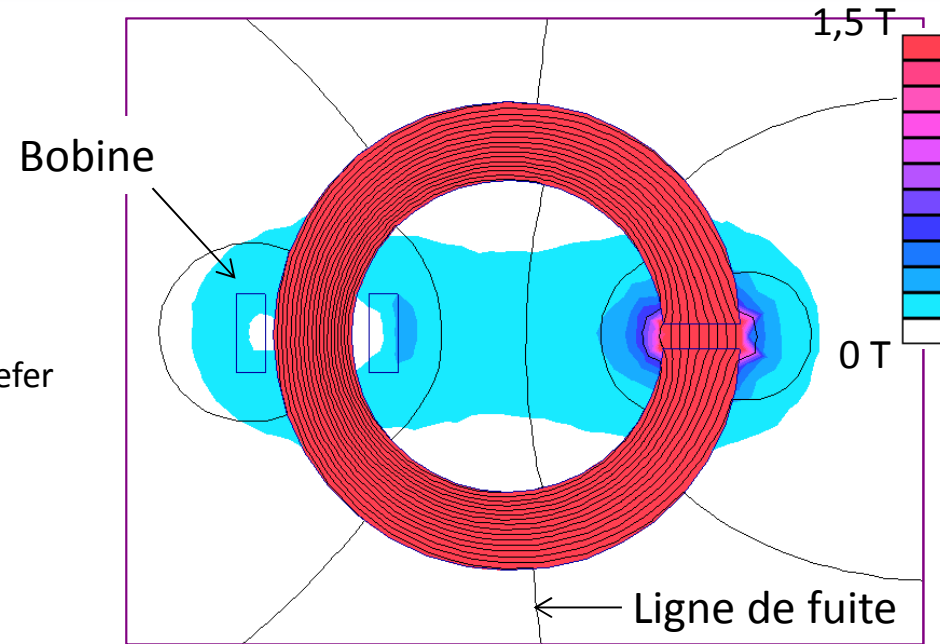
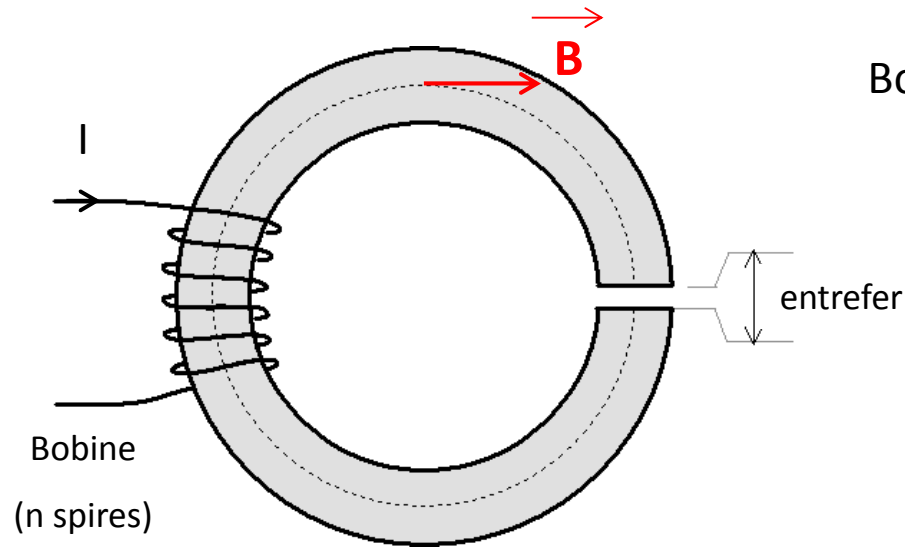
**Dans le fer ( $\mu = \mu_r \mu_0$ )**

$$W_{mg \text{ air}} = \frac{1}{2 \mu_0 \mu_r} = 0,039 \text{ kJ} \quad (\mu_r = 10\,000)$$



**Le fer canalise le champ magnétique  
L'air stocke l'énergie**

▪ Circuit torique avec entrefer



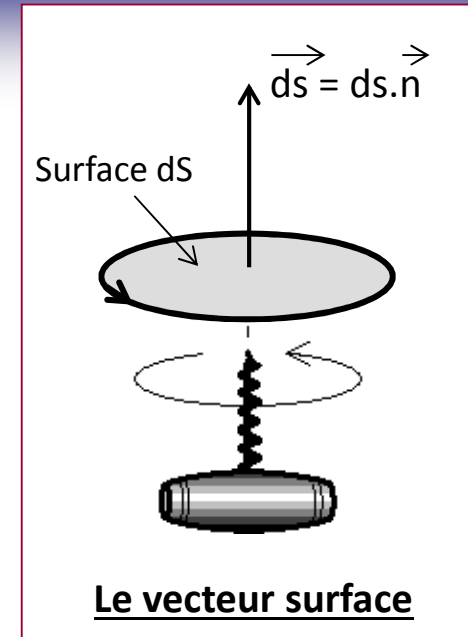
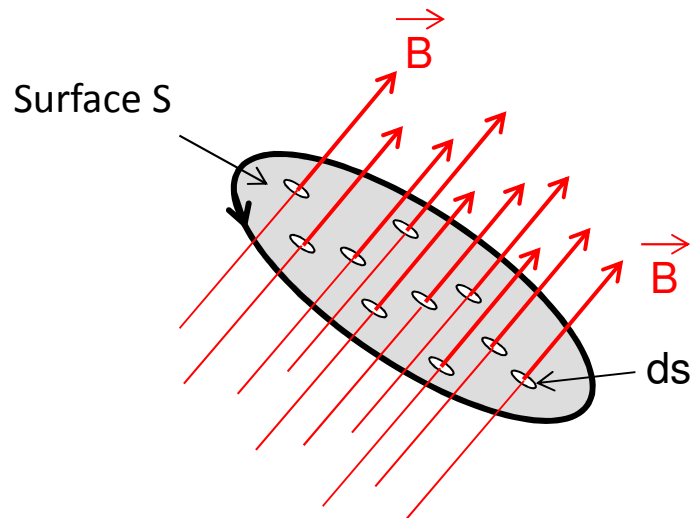
Si matériau magnétique parfait  $\rightarrow \mu_r = \infty$  et fuites nulles

$$W_{mg} = \underbrace{\left( \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r} Vol_{fer} \right)}_{W_{fer} = 0} + \underbrace{\left( \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} Vol_{entrefer} \right)}_{W_{entrefer} = W_{bobine}}$$

Dans une inductance, l'énergie est stockée dans l'entrefer

Le flux magnétique

Flux magnétique ( $\phi$ ) = Somme des inductions sur une surface



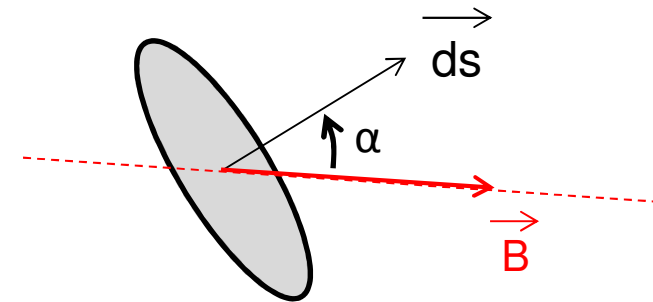
Si B et ds sont colinéaires

→  $\phi = B \cdot S$

▪ Formulation générale

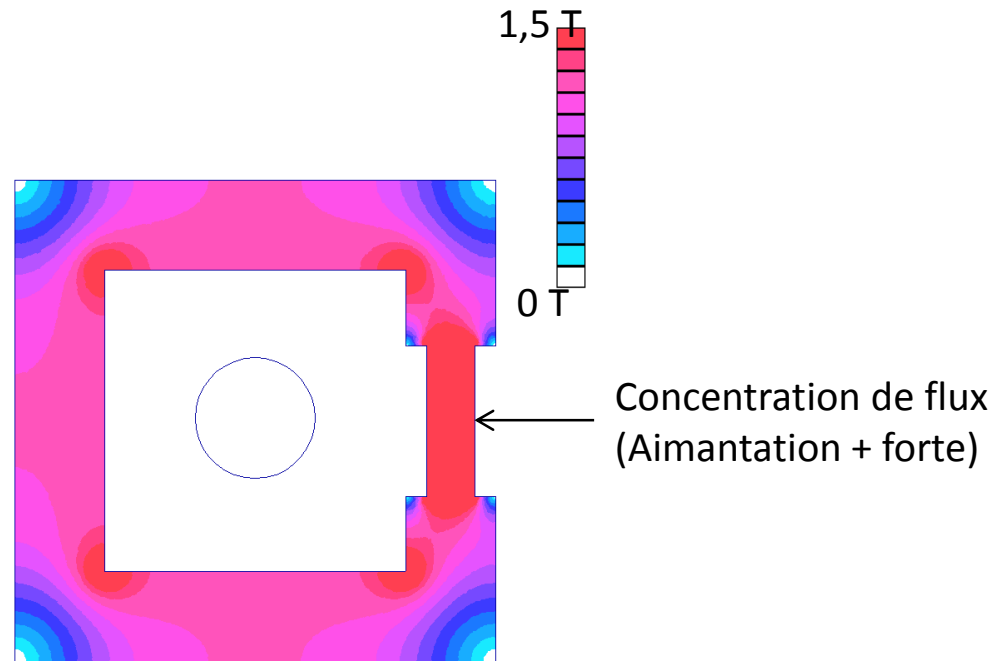
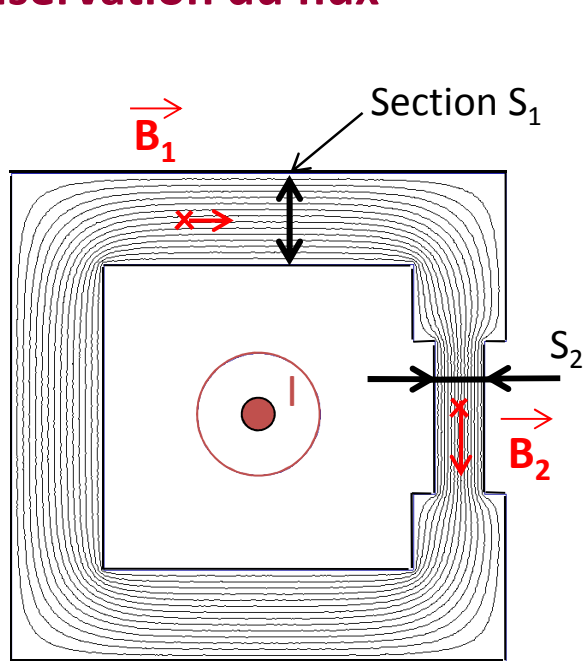
$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

Unité : le Weber [Wb]



$$d\phi = \vec{B} \cdot \vec{ds} = B ds \cos(\alpha)$$

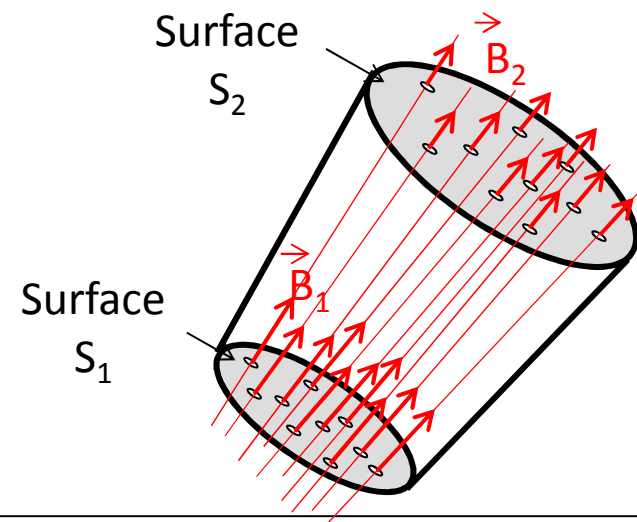
▪ Conservation du flux



Flux à travers  $S_1 = \text{Flux à travers } S_2$

$$\longrightarrow B_1 S_1 = B_2 S_2$$

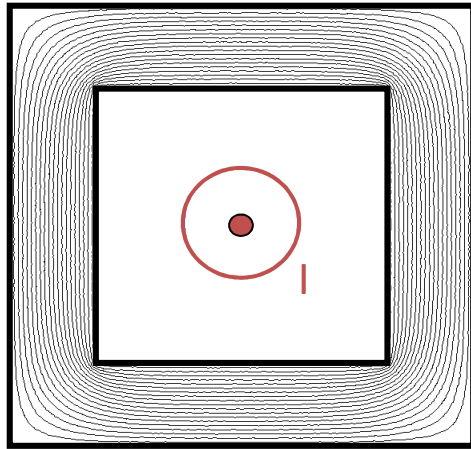
$$B_2 = \frac{S_1}{S_2} B_1$$



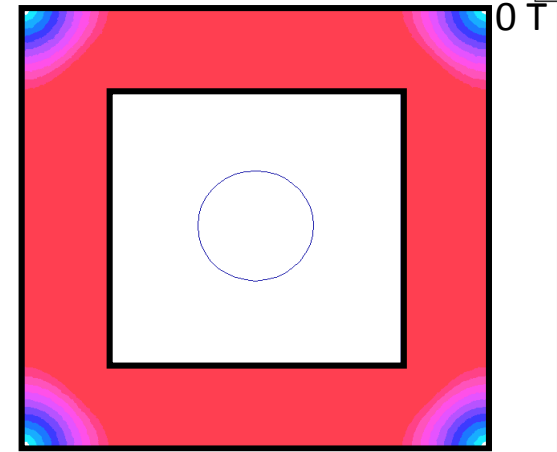


## Perméabilité et réluctance des circuits magnétiques

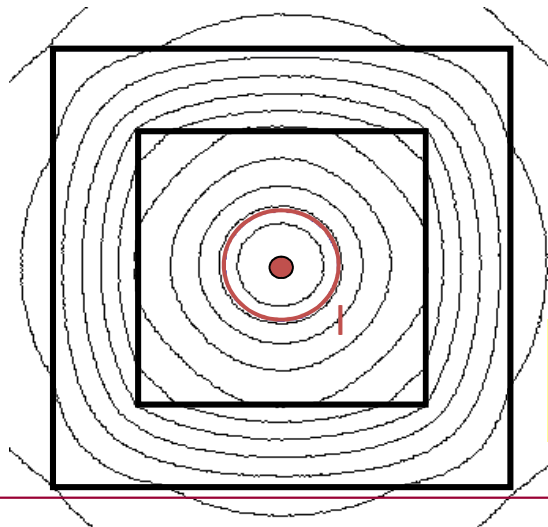
- Matériau magnétique parfait :  $\mu_r = \infty$



Pas de lignes de champ hors du circuit magnétique



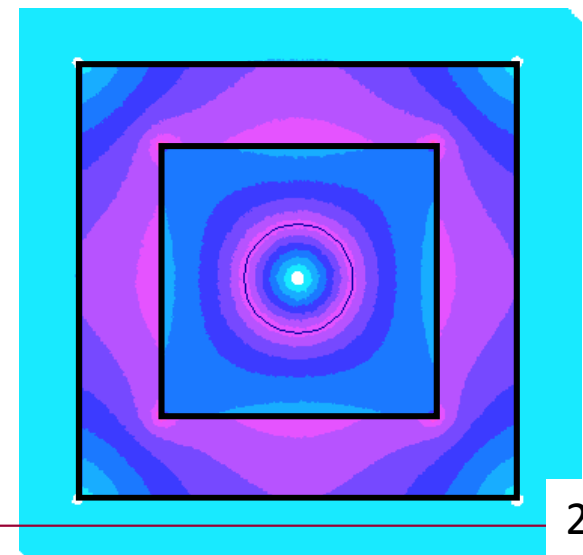
- Matériau magnétique mauvais :  $\mu_r = 3$



Fuites magnétiques  
(lignes hors du circuit magnétique)



Énergie magnétique  
dans l'air autour du circuit

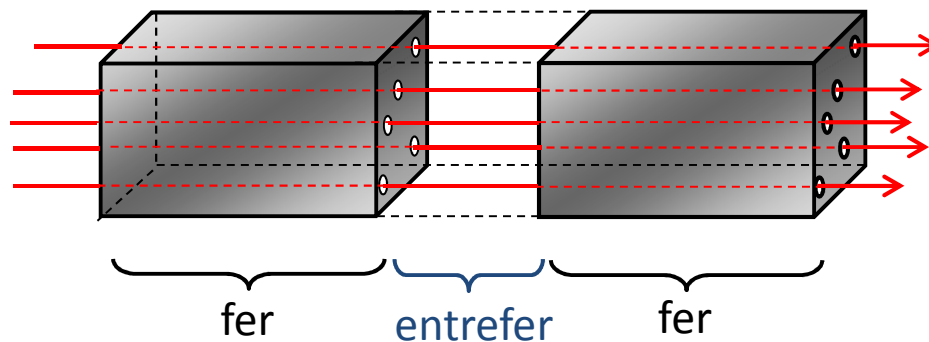
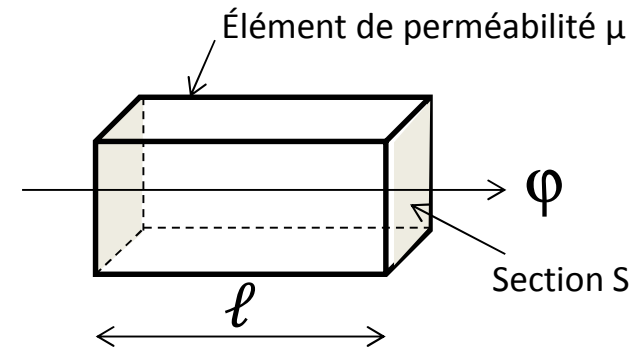


▪ **Réductance d'un circuit magnétique**

Réductance = résistance au passage du flux magnétique

$$\mathcal{R} = \frac{1}{\mu} \frac{\ell}{S}$$

Unité de  $\mathcal{R}$  : le Henry<sup>-1</sup> [H<sup>-1</sup>]

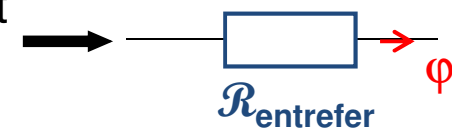


Flux  $\phi$



Si fer parfait

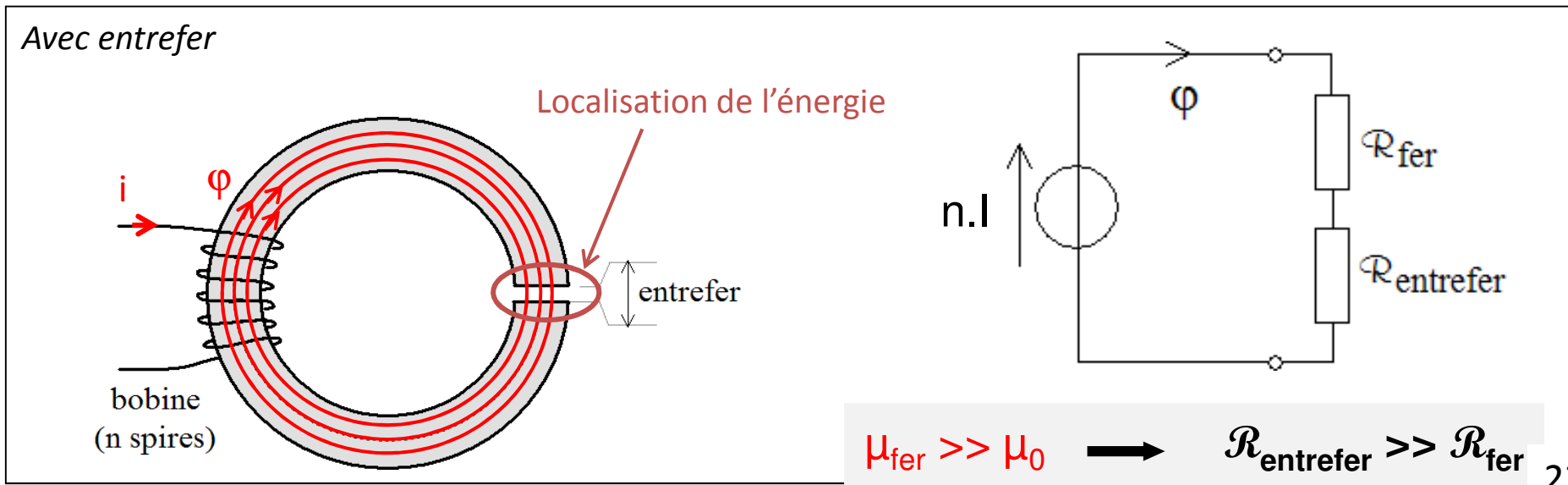
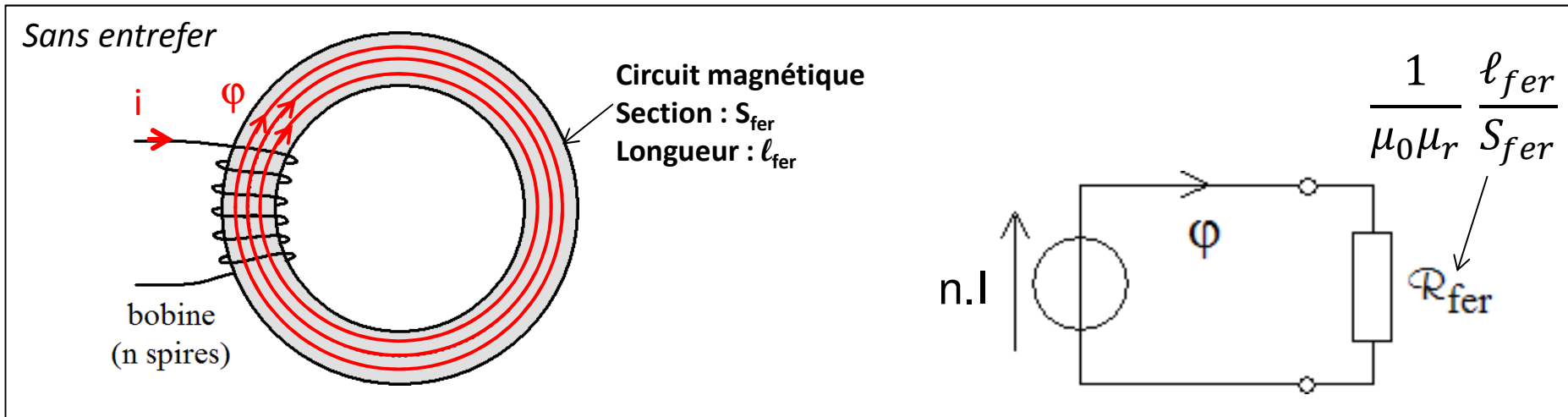
$$\mu_r = \infty$$



**Analogie électrique/magnétique (Schéma aux ré reluctances)**

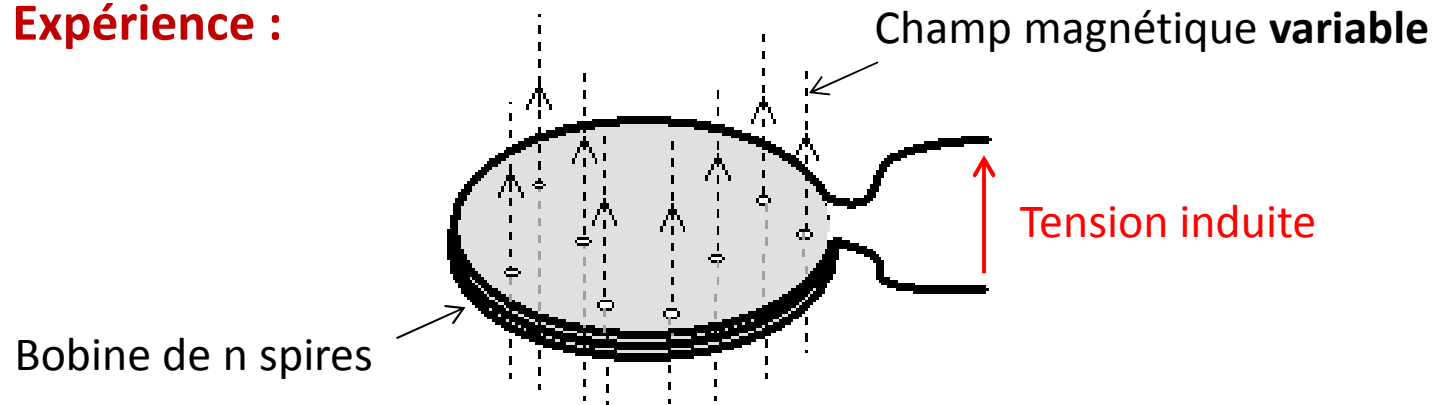
Relation flux/courant  $\longrightarrow n \cdot I = \mathcal{R} \cdot \phi$

bobinage  $\longrightarrow$  générateur de flux



**Loi de LENZ**

▪ **Expérience :**



Variation de flux magnétique dans une bobine  
=  
**force électromotrice induite (f.e.m. = tension)**

▪ **Formulation générale (loi de LENZ) :**

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

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

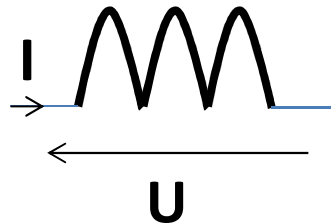
Principe utilisé dans :

- les transformateurs
- les moteurs électriques



### 3. L'Inductance

**Symbole électrique**



Courant



Energie magnétique  
Flux magnétique



$$W_{mg} = \frac{1}{2} L I^2$$

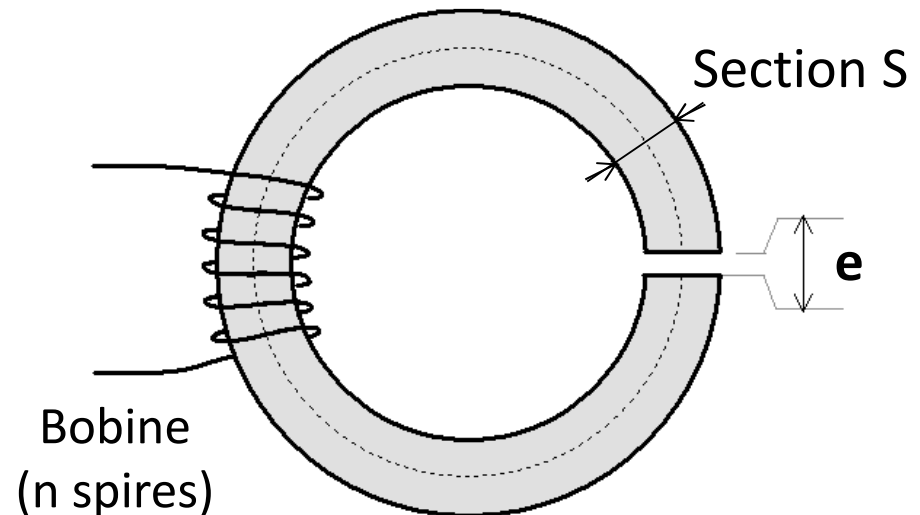
$$\varphi = L \cdot I$$

**Calcul de l'inductance**

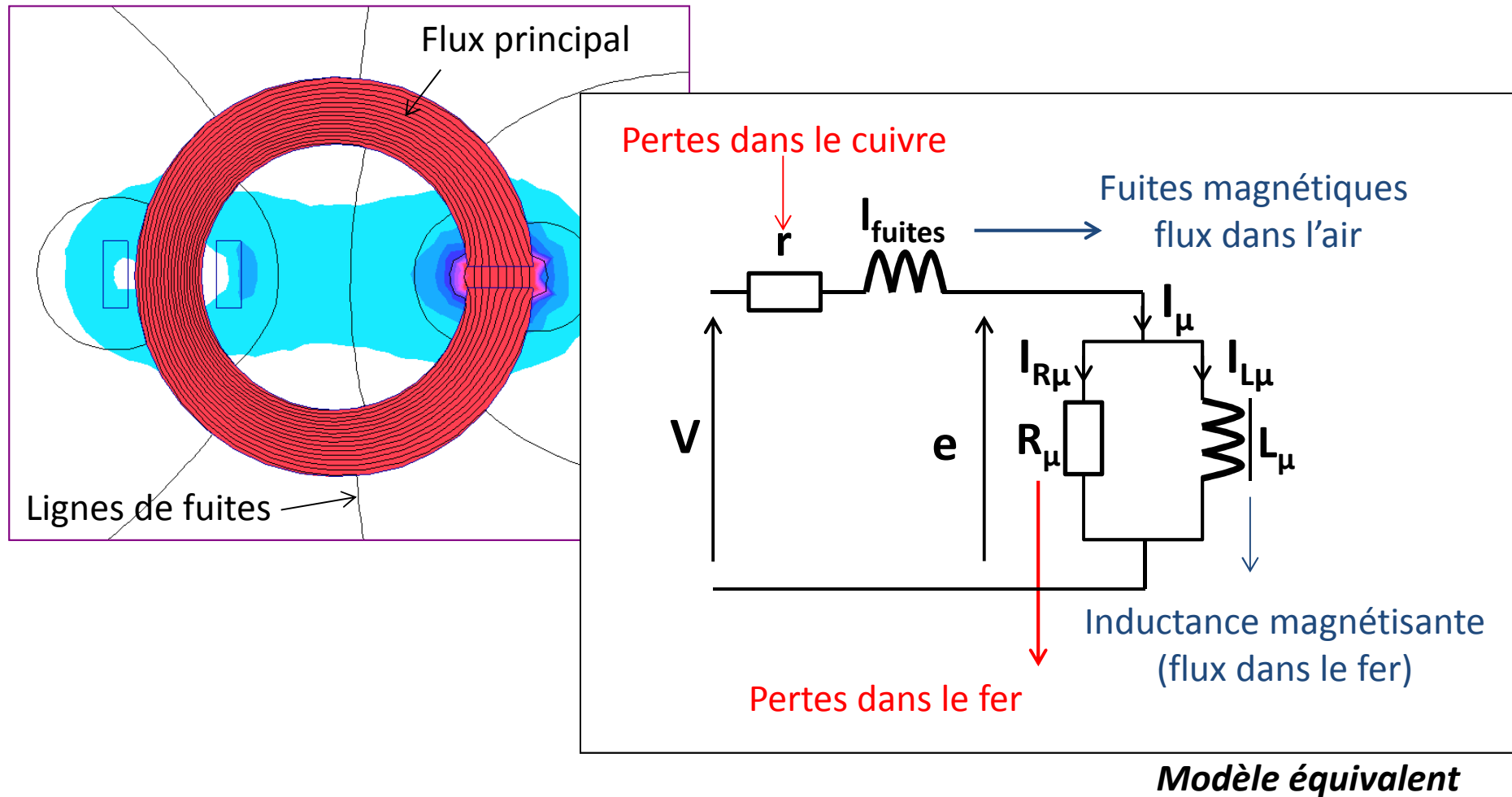
On montre que :

$$L = \frac{n^2}{\mathcal{R}}$$

$$\mathcal{R} \sim \frac{1}{\mu_0} \frac{e}{S} \quad \text{si } \mu_{\text{fer}} = \infty$$



### Inductance réelle et Modèle électrique équivalent

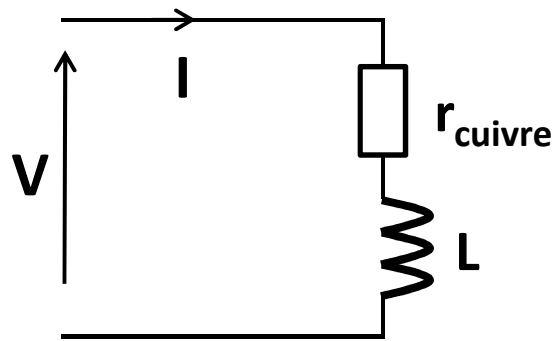


Circuit de base pour



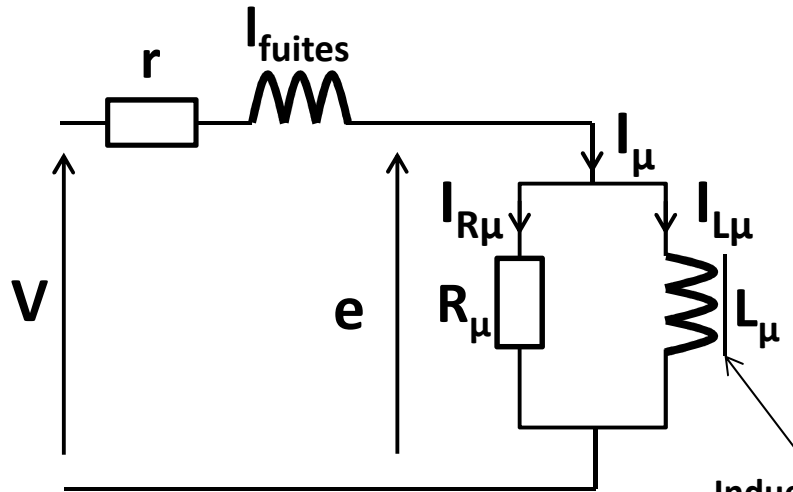
Les moteurs électriques  
Les transformateurs

→ **Modèle d'une bobine sans fer**



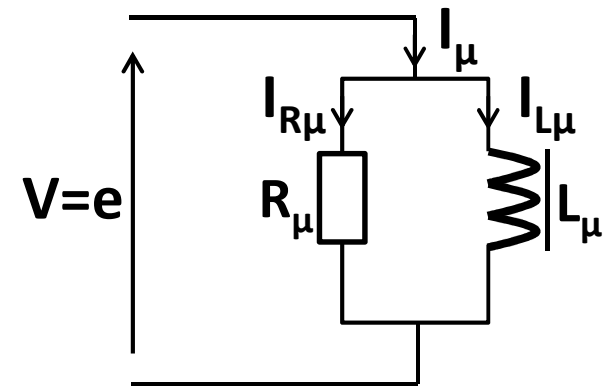
Circuit RL série

→ **Modèle d'une bobine avec fer**



Hypothèse de Kapp  
 $\Delta v \ll e$

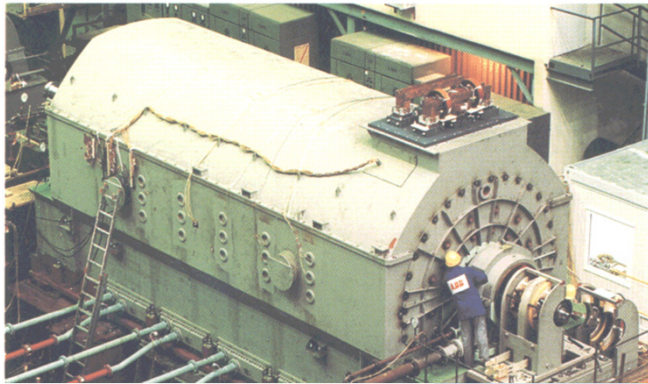
Inductance saturable  
(non constante)



Circuit RL parallèle

## 4. LE TRANSFORMATEUR MONOPHASE

**Rôle : adapter le niveau de tension aux différentes applications**



**Production  $\approx 20$  kV**

Réseau très haute tension  
230 / 400 kV

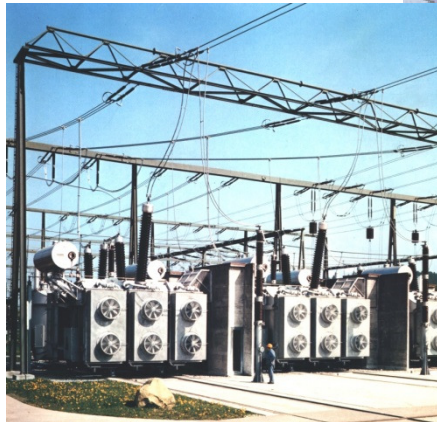
Réseau rég  
50 / 150

Centrale



Photo  
ALSACE.com

**Transport HT : 400 kV**



Poste de couplage

Réseau local  
6 / 24 kV

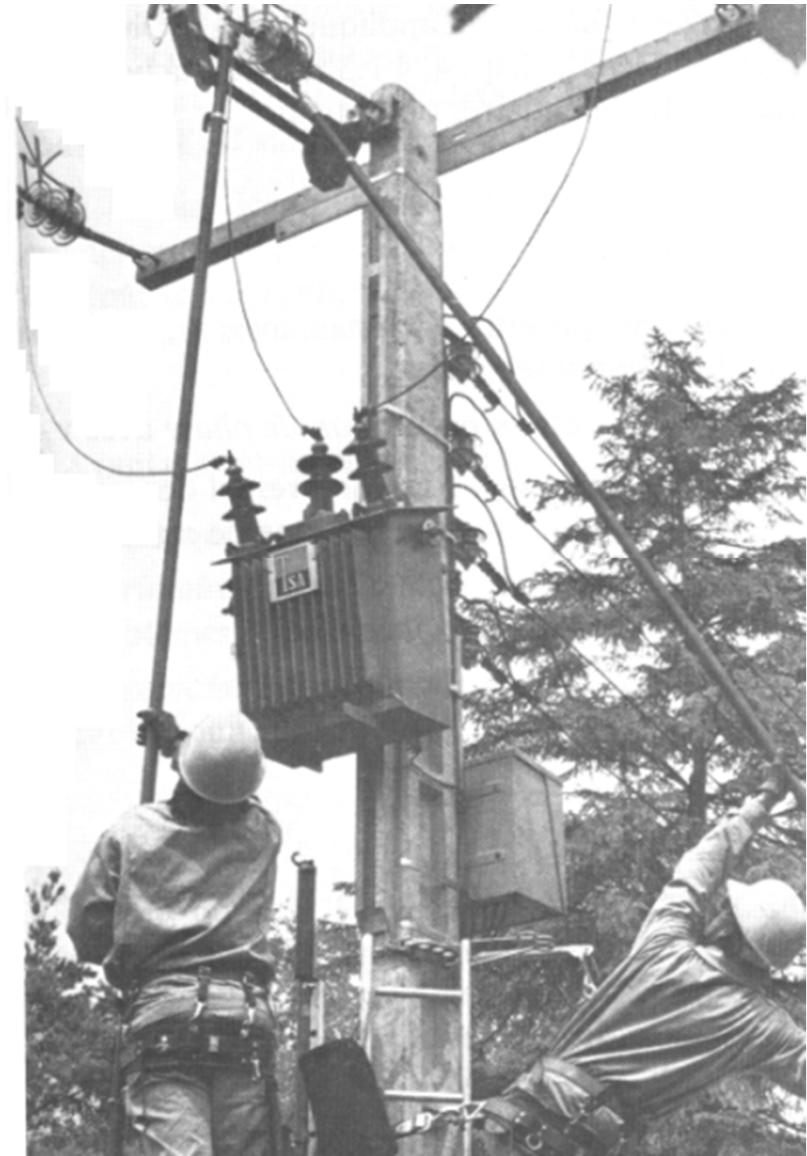
Réseau  
basse tension  
230 / 400V



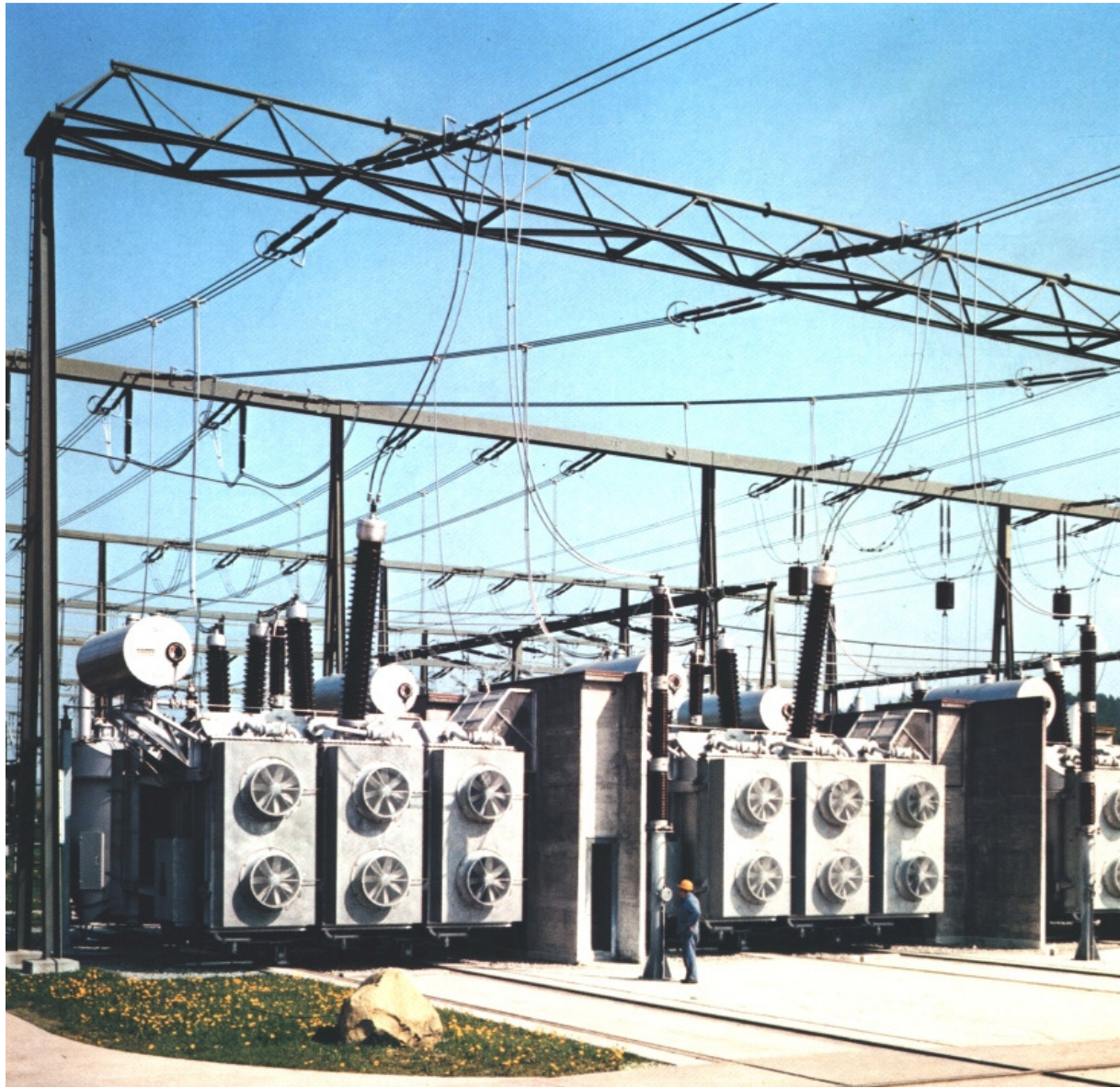
**Application domestiques  
230V**



***Transformateur monophasé :  
50 Hz, 230V/24 V - 100VA***



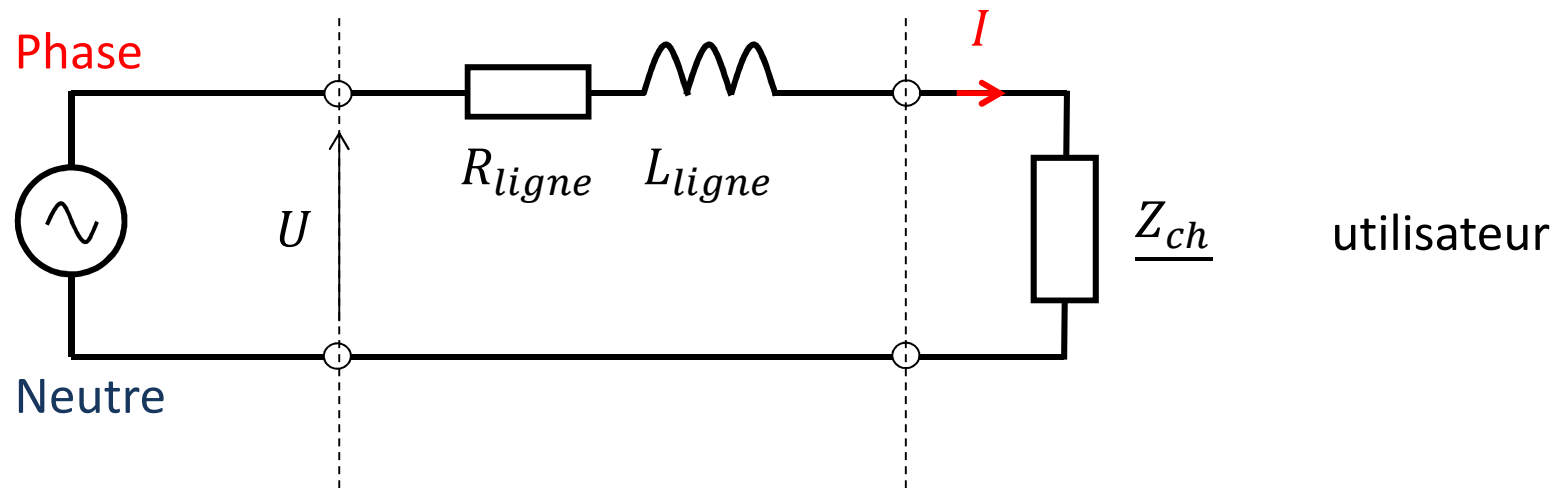
***Transformateur de poteau 20 kV / 380 V***



***Transformateurs réseau  
400 kV***

**Intérêt de la Haute Tension pour le transport**

→ Réduire les pertes en ligne



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Puissance apparente :} \quad S = U \cdot I \\ \text{Pertes Joule en ligne :} \quad P_J = R_{\text{ligne}} \cdot I^2 \end{array} \right.$$

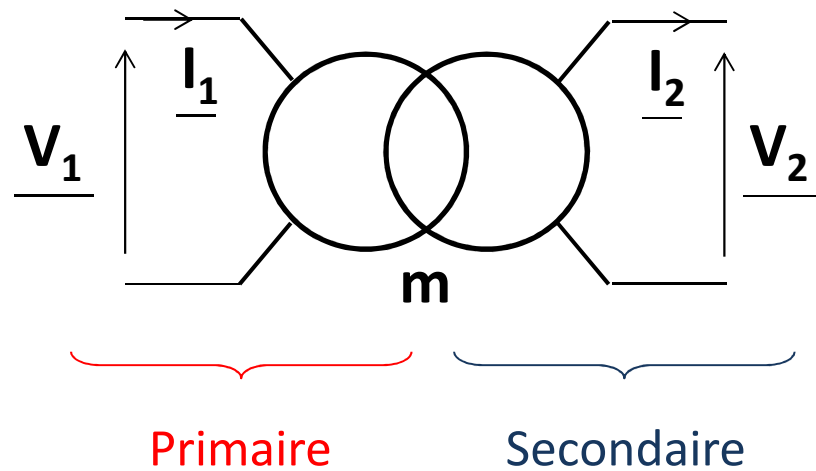
À puissance apparente donnée



$$P_J = \frac{R_{\text{ligne}} \cdot S^2}{U^2}$$

## Principe et constitution du transformateur

### ■ Symbole :



### ■ Rapport de transformation :

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

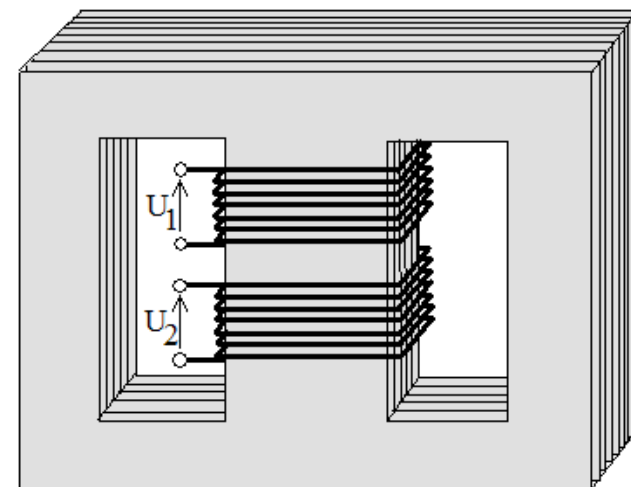
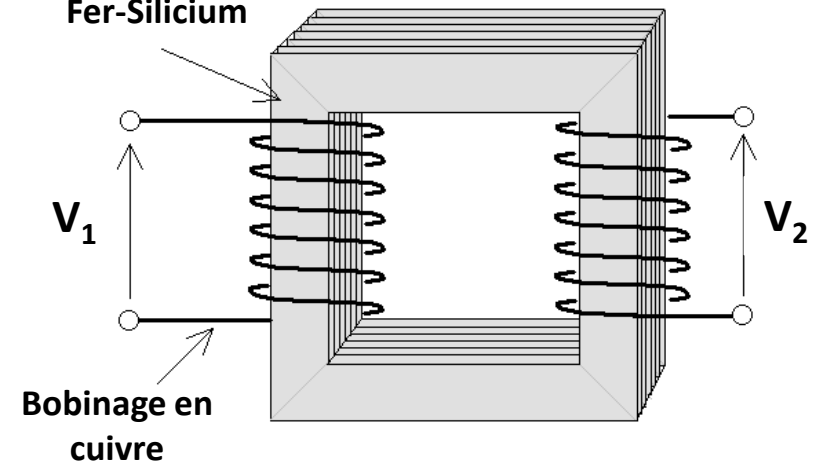
$V_{20}$  : tension secondaire mesurée à vide

$n_1$  : nombre de spires au primaire

$n_2$  : nombre de spires au secondaire

Empilement de tôles

Fer-Silicium





## Transformateur parfait

### ▪ Hypothèses :

#### Fuites magnétiques nulles

→ pas de lignes de champ hors du circuit magnétique

#### Pas de pertes par effet Joule

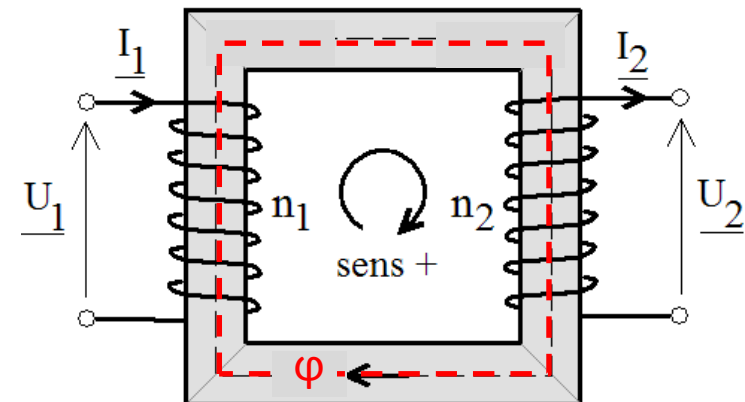
→ Résistances des bobinages nulles ( $R_1 = R_2 = 0$ )

→ pertes dans le fer nulles (Hystérésis et courants de Foucault)

### ▪ Expression du flux dans le circuit magnétique :

$$\begin{cases} v_1(t) = V_1 \sqrt{2} \cos \omega t \\ v_1(t) = n_1 \frac{d\varphi(t)}{dt} \end{cases}$$

$$\rightarrow \varphi(t) = \frac{V_1 \sqrt{2}}{n_1 \omega} \sin \omega t$$



▪ Rapport de transformation en tension :

$$\begin{cases} v_1(t) = n_1 \frac{d\varphi(t)}{dt} \\ v_2(t) = n_2 \frac{d\varphi(t)}{dt} \end{cases}$$



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

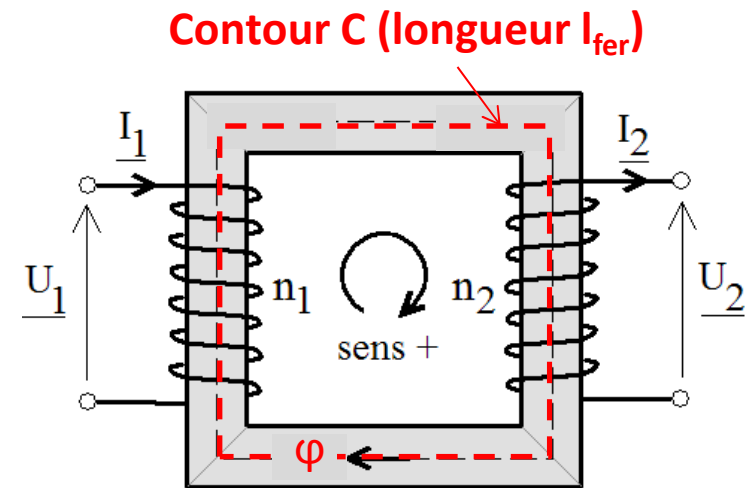
m peut être positif ou négatif selon les conventions et fléchages

▪ Rapport de transformation en courant :

→ Théorème d'Ampère

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum \text{courants entrants dans } C$$

$$H_{fer} l_{fer} \qquad n_1 I_1 - n_2 I_2$$



→ Transformateur parfait :  $H_{fer} = \frac{B_{fer}}{\mu_0 \mu_r} = 0$



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

## Transformateur réel (avec pertes)

### ▪ Modèle de STEINMETZ:

2 flux (flux principal + flux de fuites)

→ 2 inductances

Pertes cuivre (bobinages 1 et 2) + pertes fer

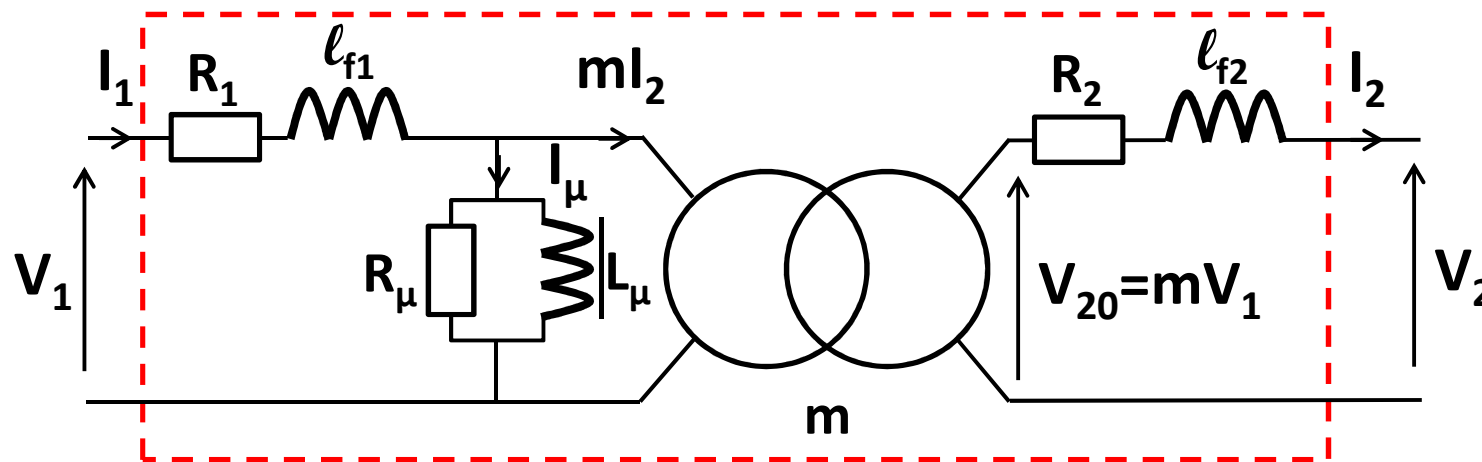
→ 3 résistances

$R_1, R_2$  : résistances des bobinages primaire et secondaire

$R_\mu$  : résistance de pertes fer

$l_{f1}, l_{f2}$  : inductances de fuites primaires et secondaires

$L_\mu$  : Inductance magnétisante



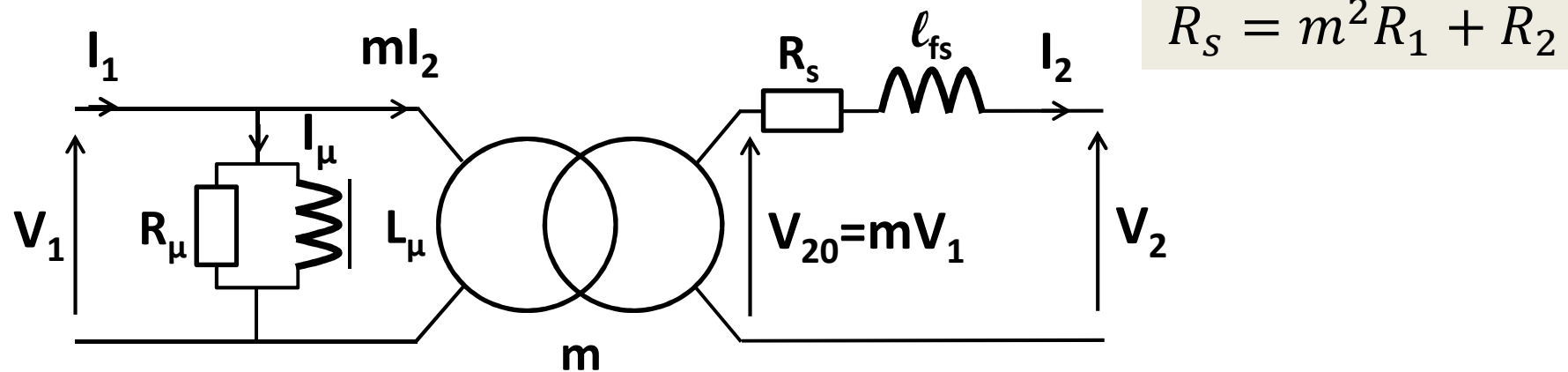
Courant absorbé à vide ( $I_{10}$ ) = courant magnétisant ( $I_\mu$ )

▪ **Hypothèse de Kapp et modèle simplifié:**

→ **Hypothèse de Kapp**

Chute de tension dans  $R_1$  et  $\ell_{f1}$  négligeable devant  $V_1$

→ **Modèle simplifié**



→ **Pertes**

$$P_{fer} = \frac{V_1^2}{R_\mu}$$

$$P_{cuivre} = R_s I_2^2$$

→ **Puissances**

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \varphi_1$$

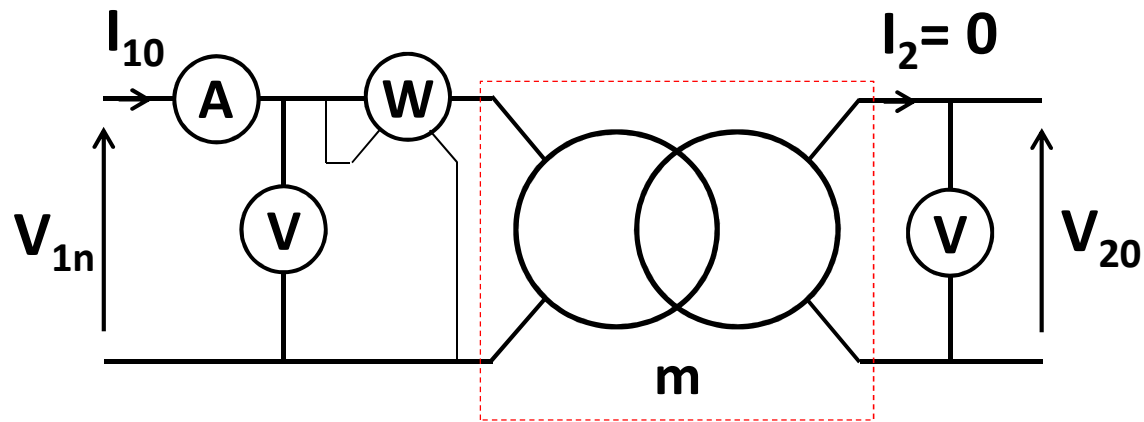
$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

**Essais**

▪ **Essai à vide:**

Essai sous tension nominale  $\rightarrow V_1 = V_{1n}$   
 Pas de charge au secondaire  $\rightarrow I_2 = 0$

- Détermination de  $R_\mu$
- Détermination de  $L_\mu$
- Détermination de  $m$
- Mesure des pertes fer



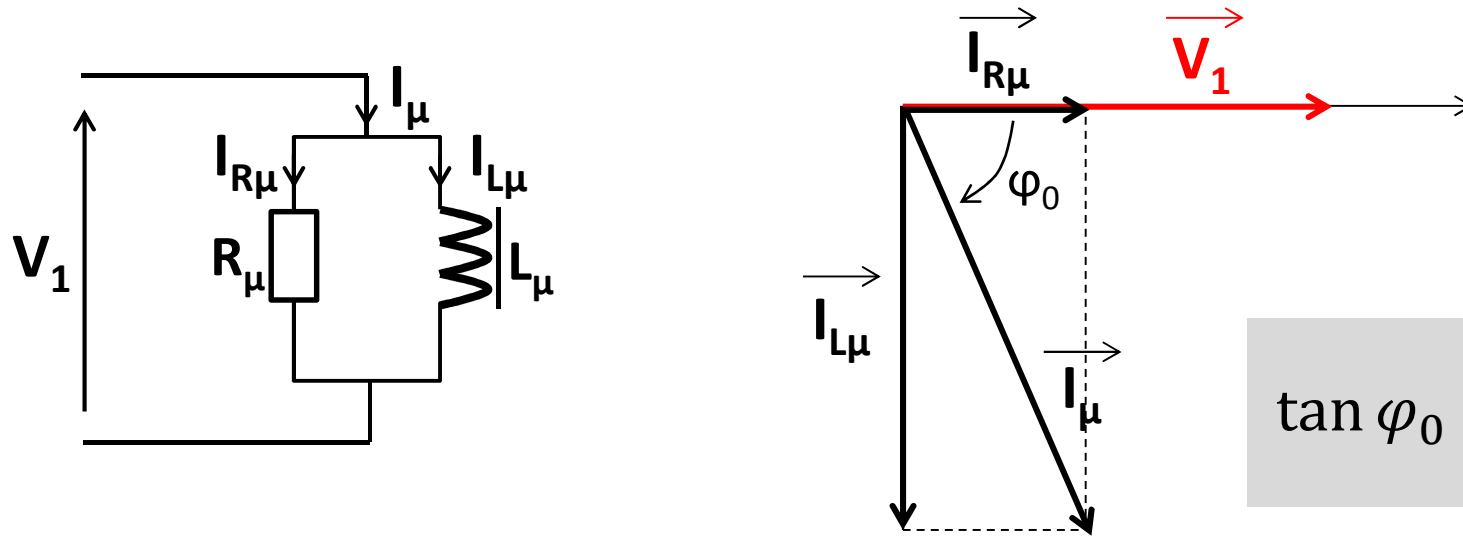
**4 mesures**

Tension primaire	: $V_1 = V_{1n}$
Tension secondaire	: $V_2 = V_{20}$
Courant primaire	: $I_1 = I_{10} = I_\mu$
Puissance absorbée	: $P_{10} = V_1 \cdot I_1 \cos(\varphi_0)$

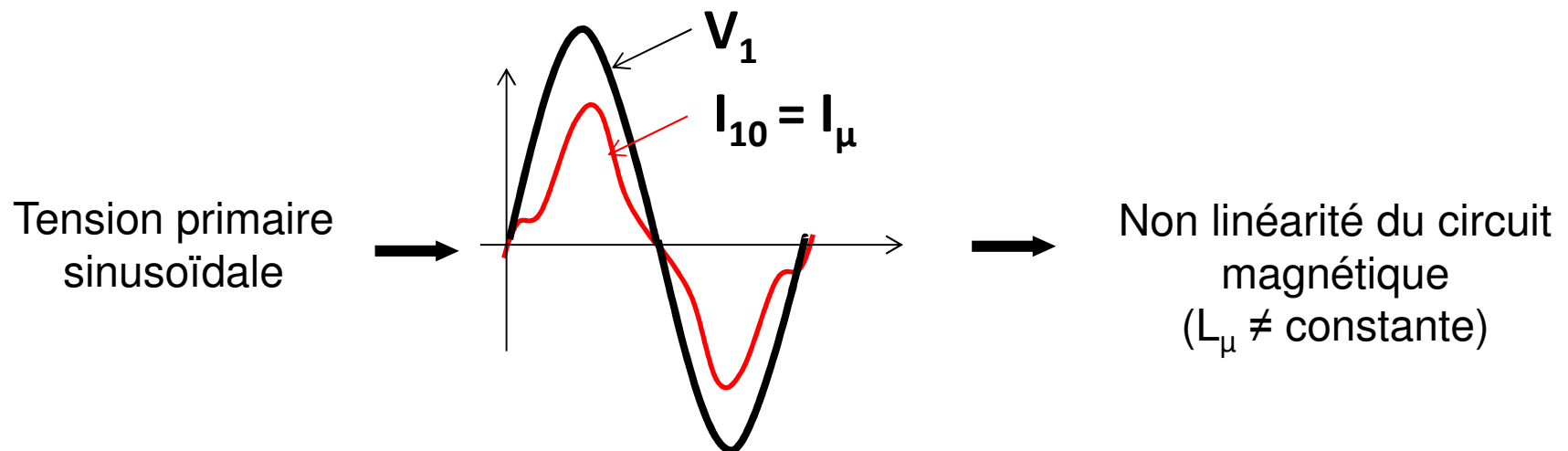
$$m = \frac{V_{20}}{V_1}$$

$$R_\mu = \frac{V_1^2}{P_{10}}$$

### Diagramme de FRESNEL (essai à vide)



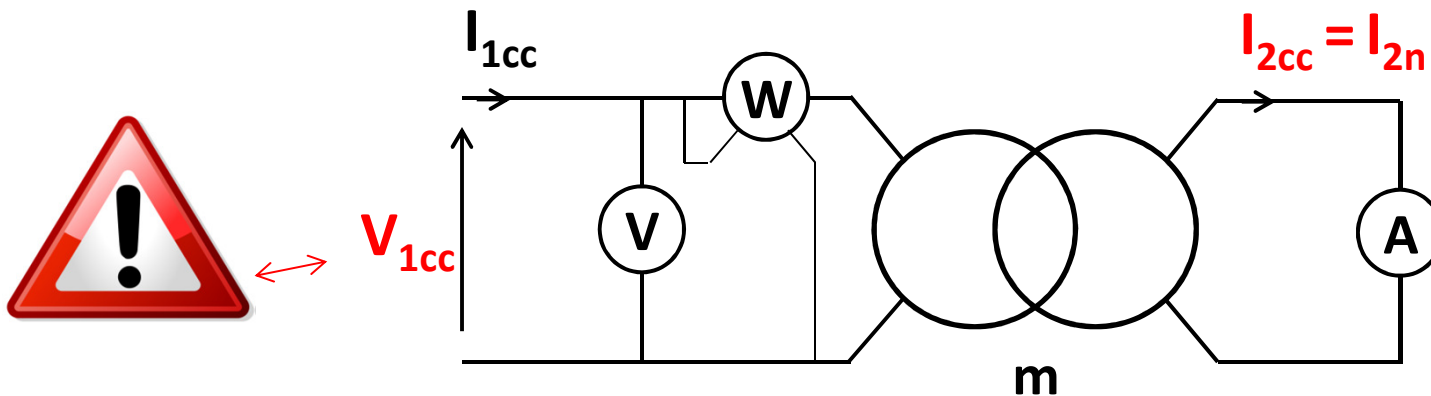
### Allure du courant absorbé à vide



▪ **Essai en Court-Circuit :**

Essai sous tension réduite  $\rightarrow V_{1cc}$   
 Réglage de  $V_{1cc}$  pour obtenir  $I_{2cc} = I_{2n}$

- Détermination de  $R_s$
- Détermination  $\ell_s$
- Mesure des pertes cuivre



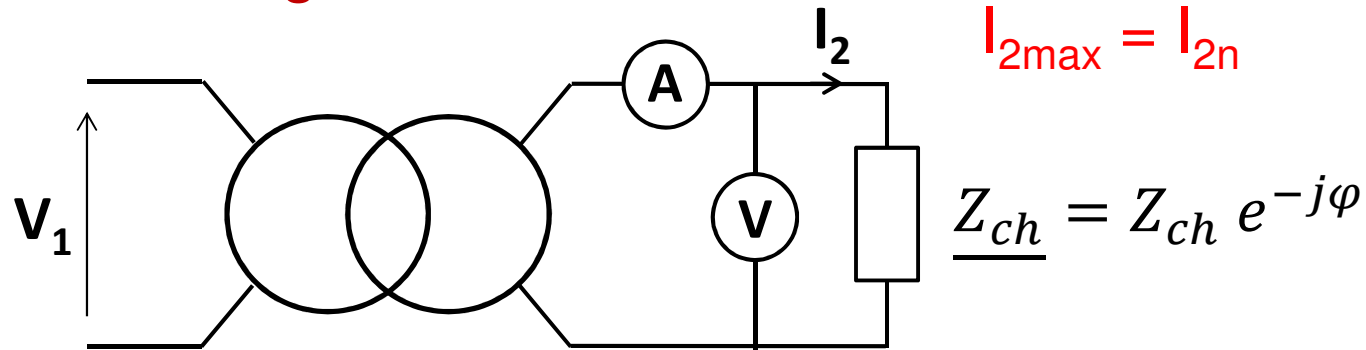
**3 mesures**

Tension primaire :  $V_1 = V_{1cc}$   
 Courant secondaire :  $I_{2cc} = I_{2n}$   
 Puissance absorbée :  $P_{cc} = V_2 \cdot I_2 \cos(\varphi_{2cc})$

$$P_{cc} = R_s I_{2cc}^2$$

$$\sqrt{R_s^2 + (\ell_s \omega)^2} = \frac{m V_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

▪ **Essai en Charge:**



**Grandeurs nominales** → Indications de la plaque signalétique

**Chute de tension en charge**

$$\Delta V = V_{20} - V_2 = R_s I_2 \cos \varphi + \ell_s \omega I_2 \sin \varphi$$

