

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

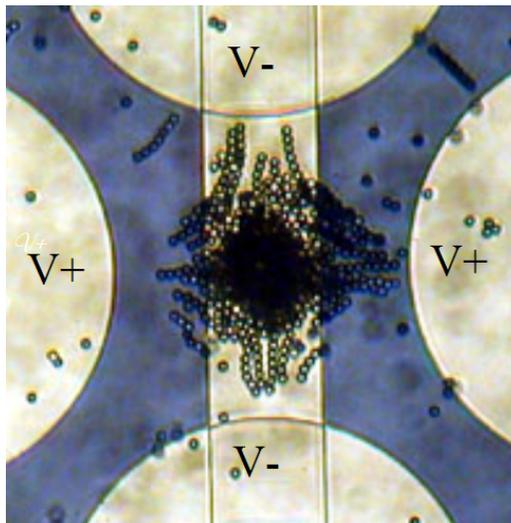
1864: MAXWELL unifie les lois de l'électricité

Tension \rightarrow Champ électrique
Courant \rightarrow Champ magnétique



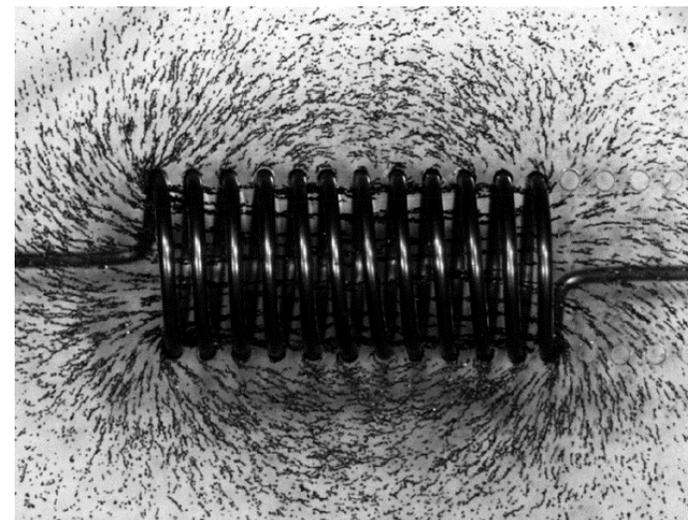
4 équations
pour toute l'électricité

Champ électrique (noté E)



Effet d'une tension sur des billes plastics

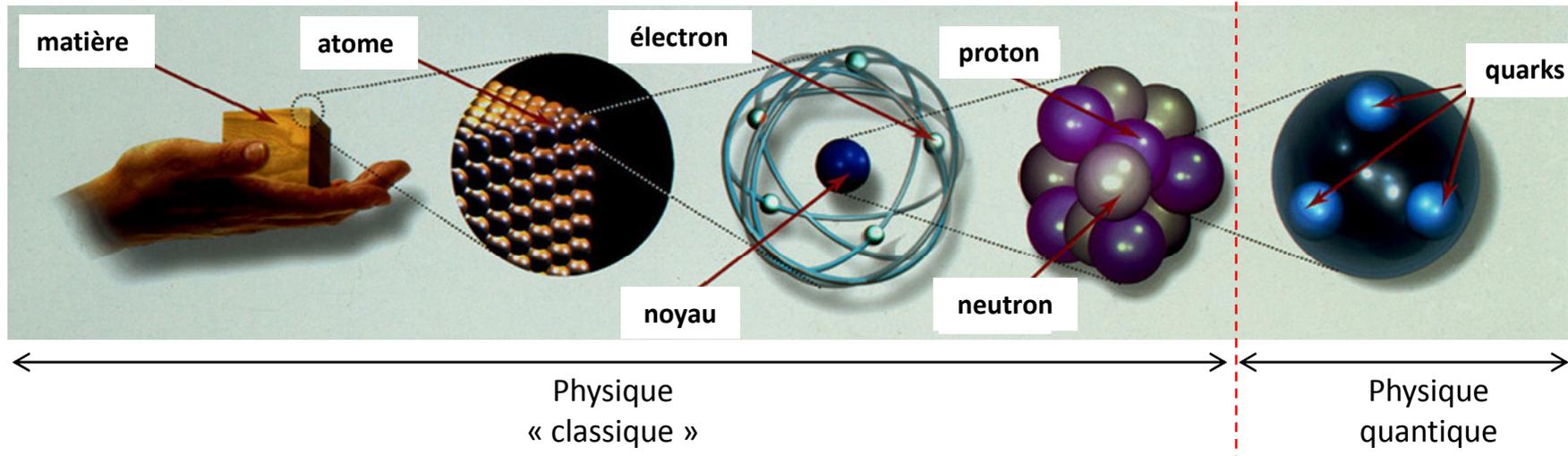
Champ magnétique (noté H)



Effet d'un courant sur de la limaille de fer

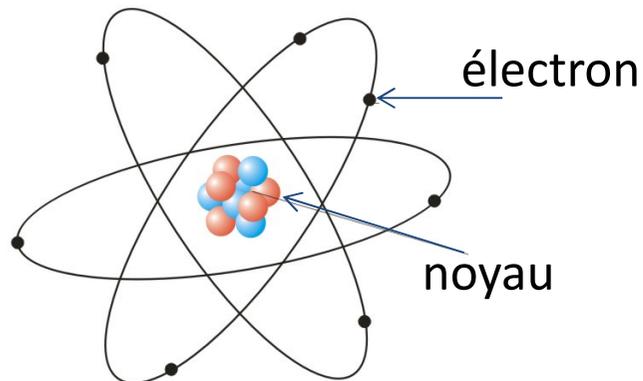
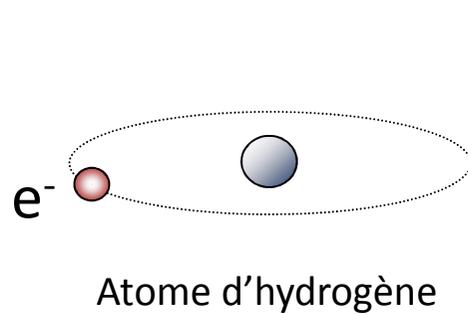
I. La Matière et ses Propriétés

La Matière



Représentations de l'atome

→ Représentation classique : modèle planétaire

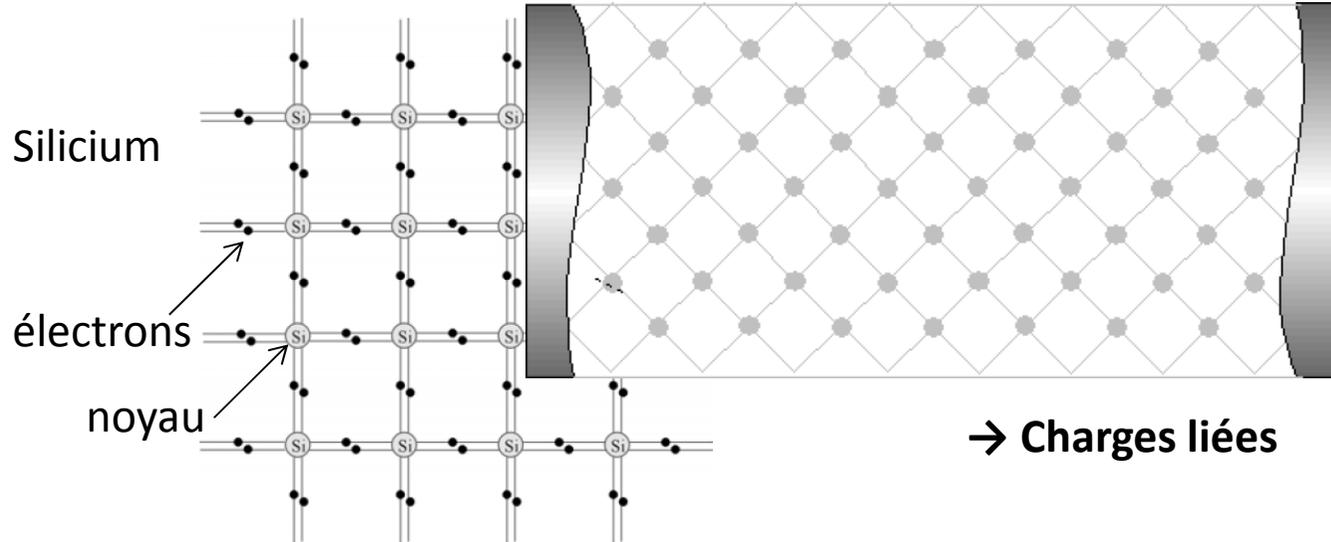


Représentation très simpliste

Représentations d'un matériau (structure atomique)

➡ Isolant électrique

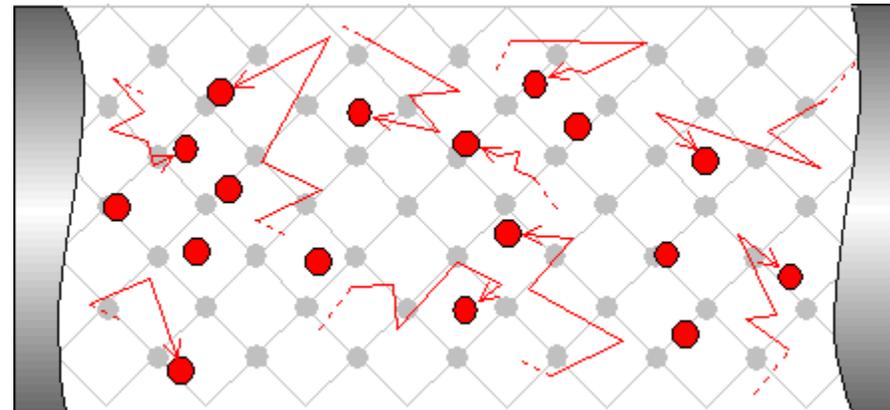
Ex :
cristal de Silicium



→ Charges liées

➡ Conducteur électrique

Ex :
cuivre

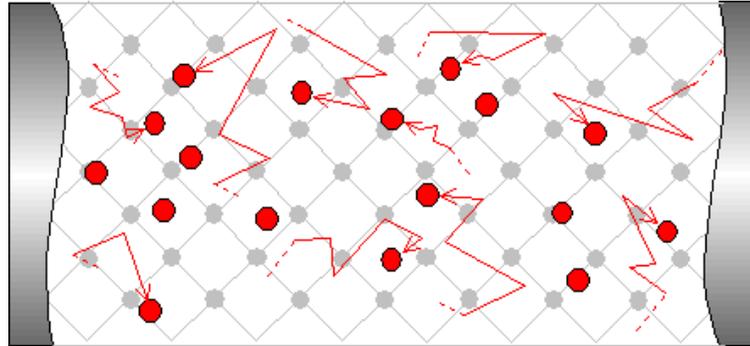


→ Charges liées + charges libres

Les 3 types de matériaux de l'électricité

CONDUCTEURS

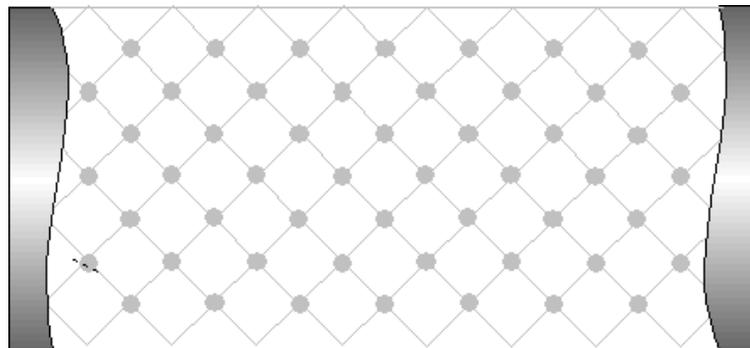
→ Charges libres en excès (e^-)



Cuivre
Fer
Argent
...

ISOLANTS

→ Charges liées uniquement



Air
Verre
Plastique
...

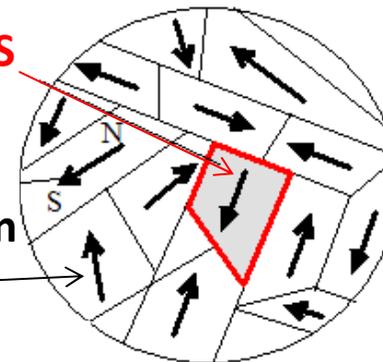
MAGNETIQUES

→ Aimantations locales



Domaine de WEISS

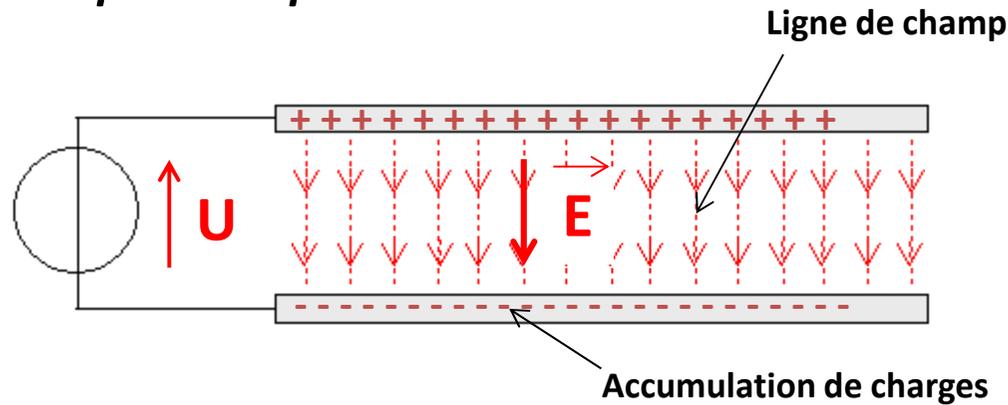
Aimantation locale



Fer
...

Représentation des Champs électrique et magnétique

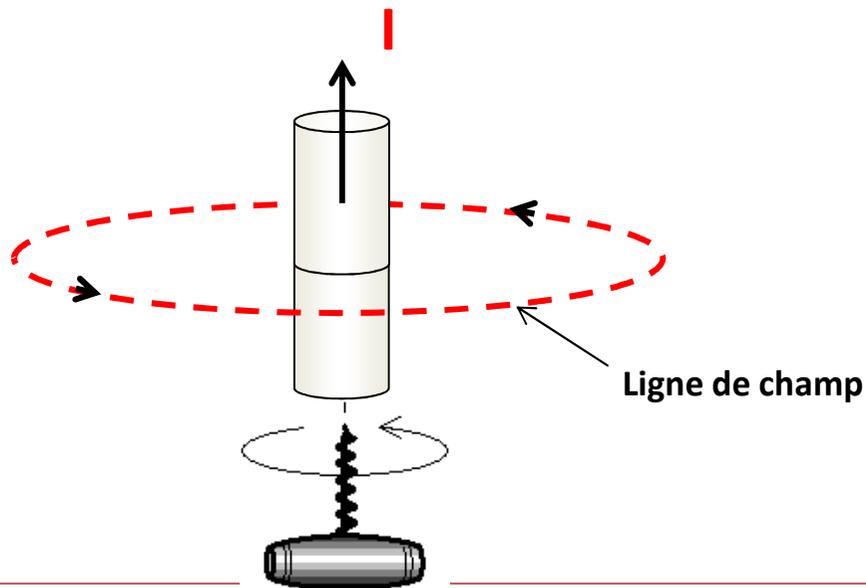
Champ électrique



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]

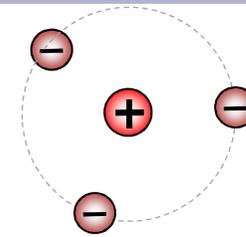
Effets du champ électrique sur la matière

Force Electrique (Force de COULOMB)

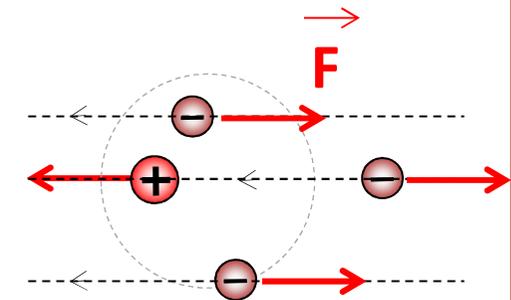
$$\vec{F} = q \vec{E}$$

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

$E = 0$



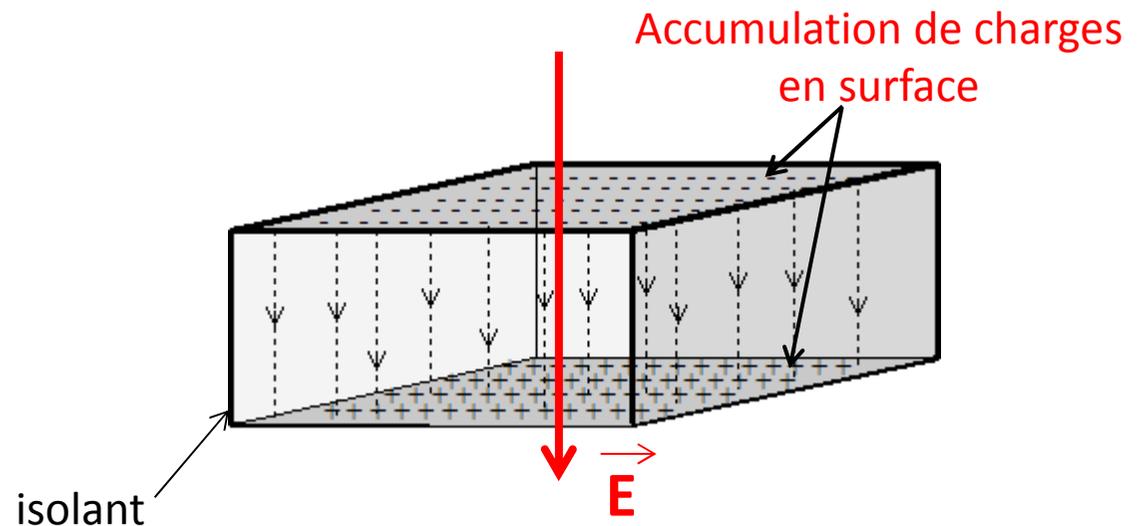
$E \neq 0$



Effet 1 : circulation de courant dans les matériaux conducteurs

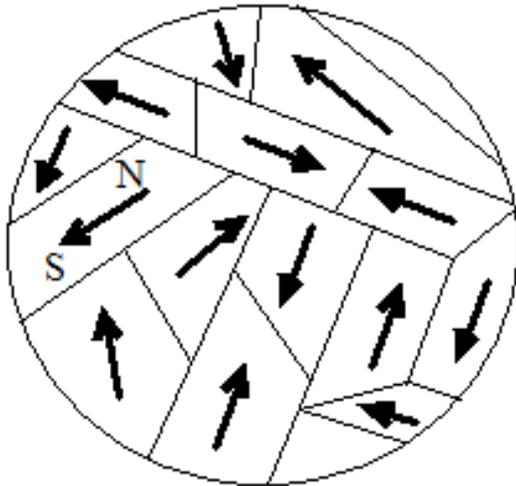
 Cours d'électricité

Effet 2 : Polarisation électrique des matériaux isolants

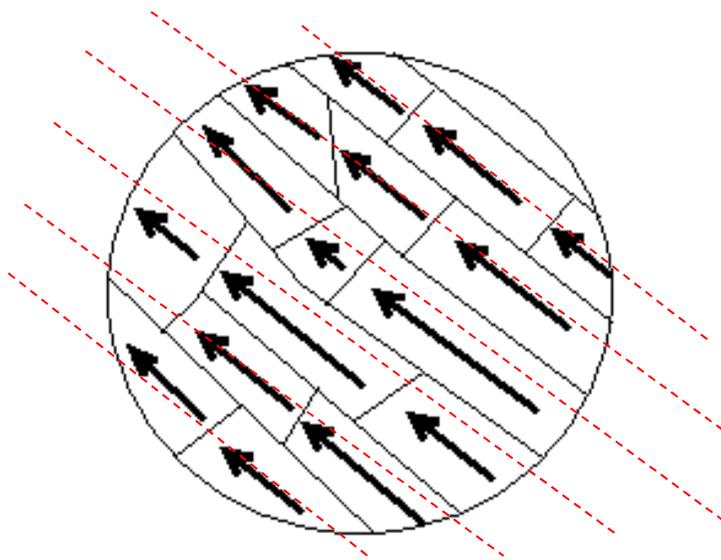


Effets du champ magnétique sur la matière (AIMANTATION)

Champ nul \rightarrow aimantation globale nulle



Champ H \rightarrow aimantation

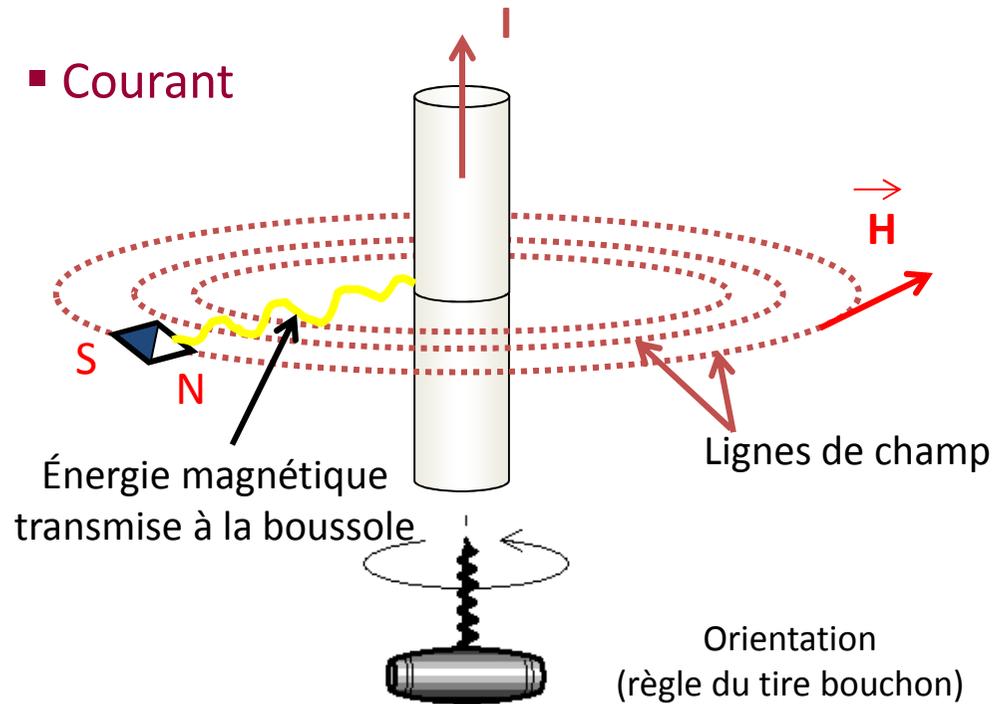


Échantillon de Fer vu au microscope

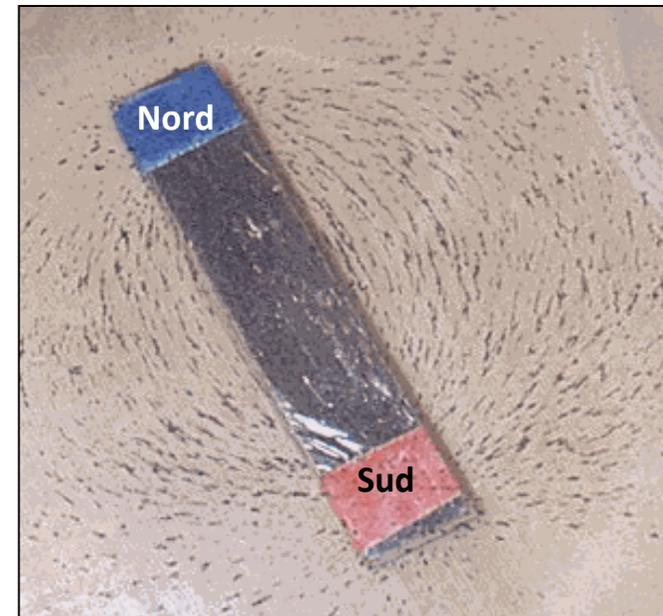
2. Le Champ Magnétique

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)

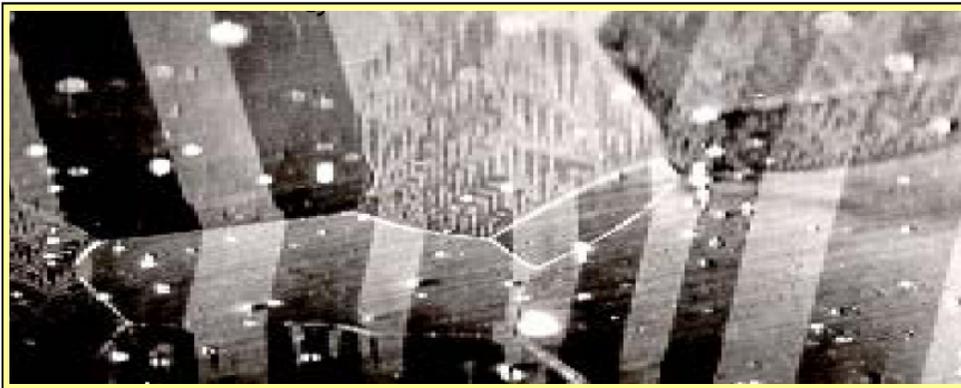
Matériaux ferromagnétiques
Utilisés en Génie Électrique



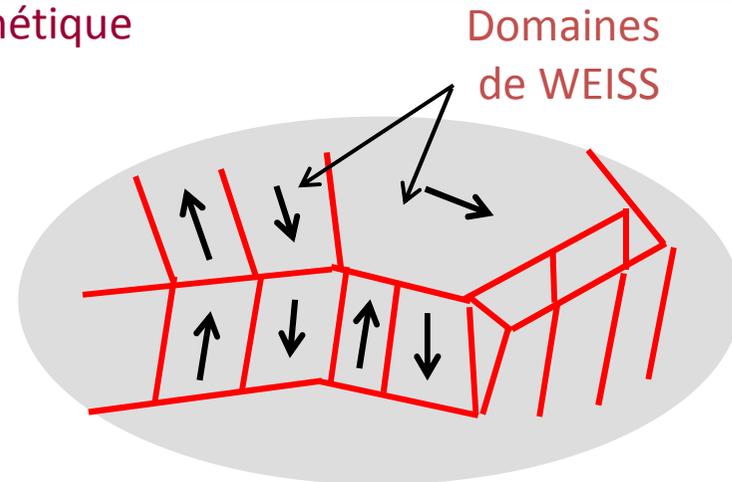
▪ Les matériaux magnétiques durs (aimantations permanents)



▪ Effet du champ magnétique sur un matériau magnétique



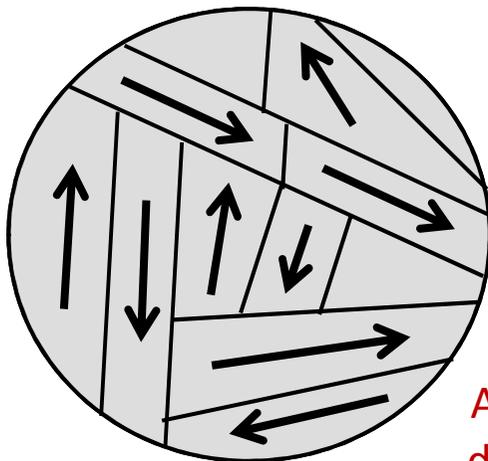
Échantillon de Fer vu au microscope



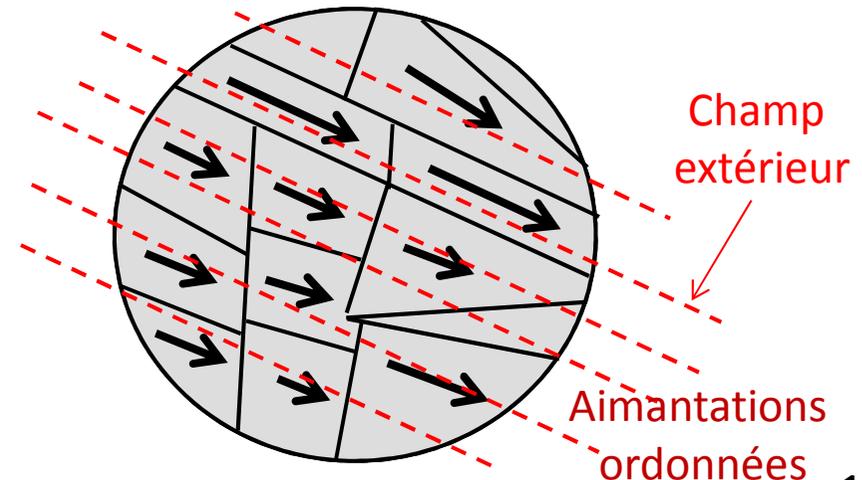
Aimantations locales

Champ nul → aimantation globale nulle

Sous champ mg → aimantation



Aimantations désordonnées



▪ 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)

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

μ_r variable

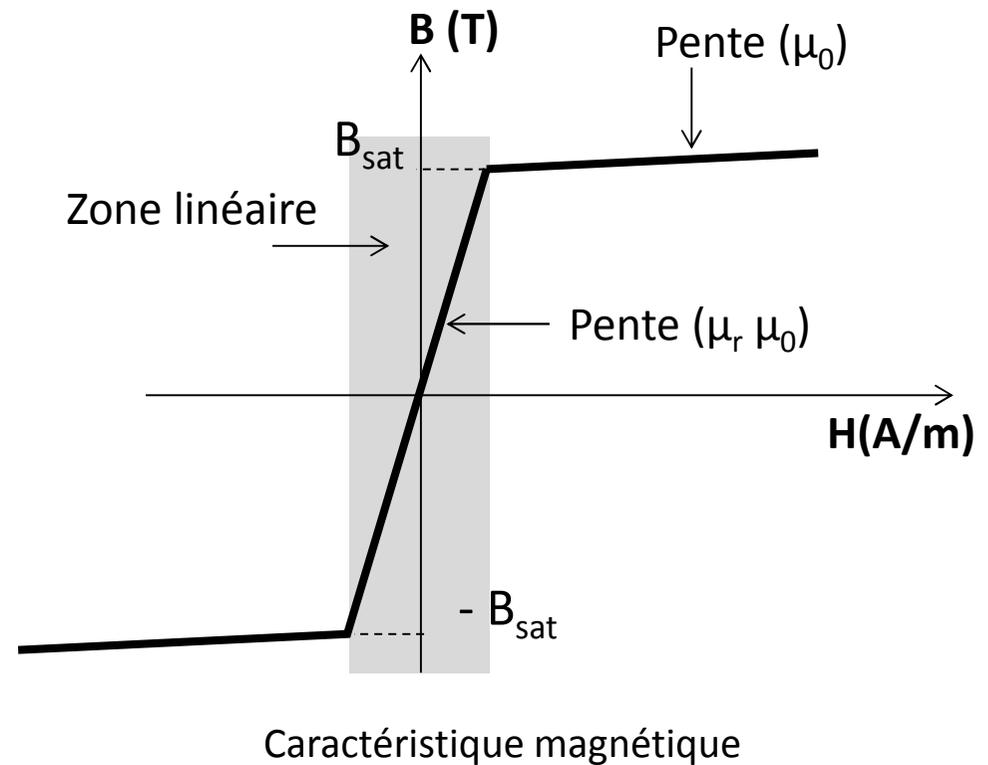
Zone linéaire :

$$\mu_r = 3\,000 \text{ à } 10\,000$$

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

Zone saturée :

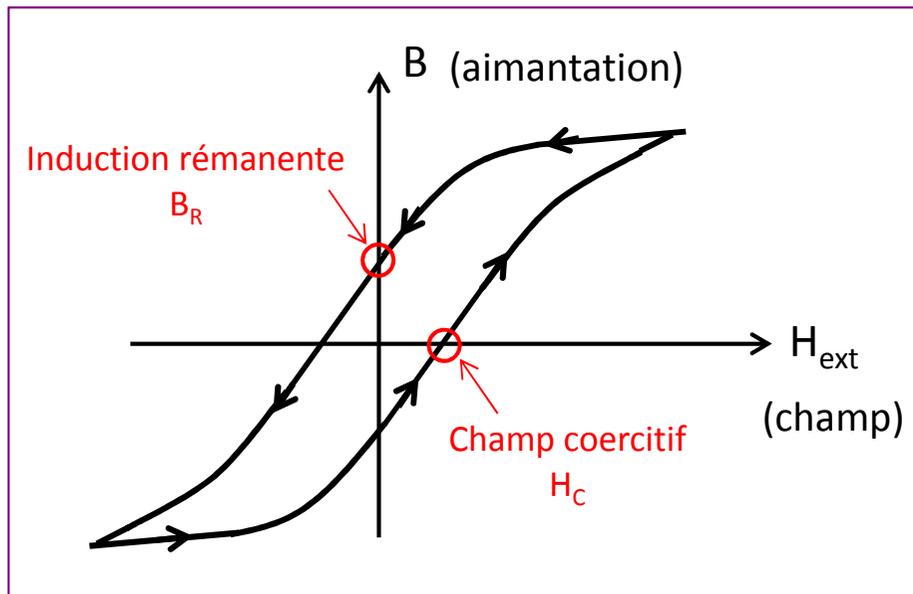
μ_r tend vers 1



Les pertes magnétiques
en régime variable

Champ magnétique sinusoïdal par exemple

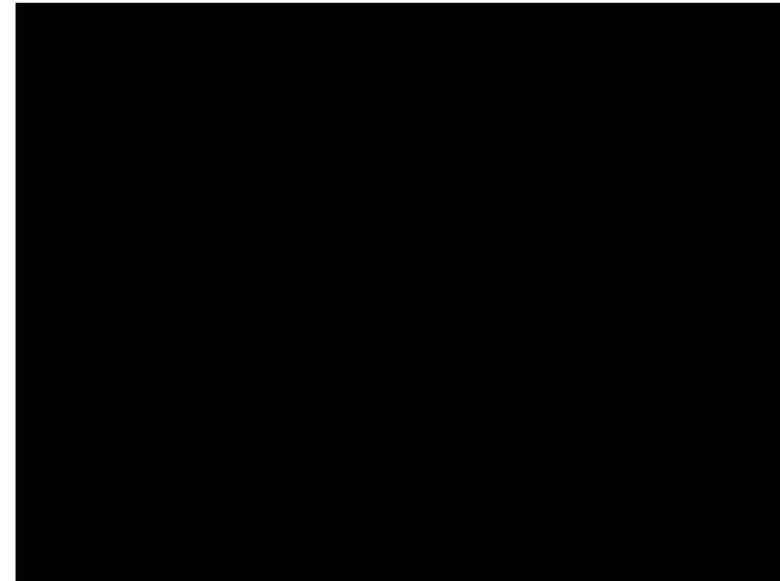
▪ Cycle d'Hystérésis



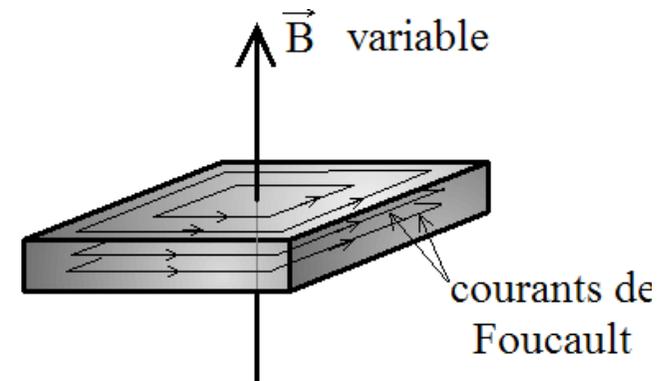
✓ Surface du cycle = pertes en W/m^3

▪ Pertes par Hystérésis

Déplacement des parois

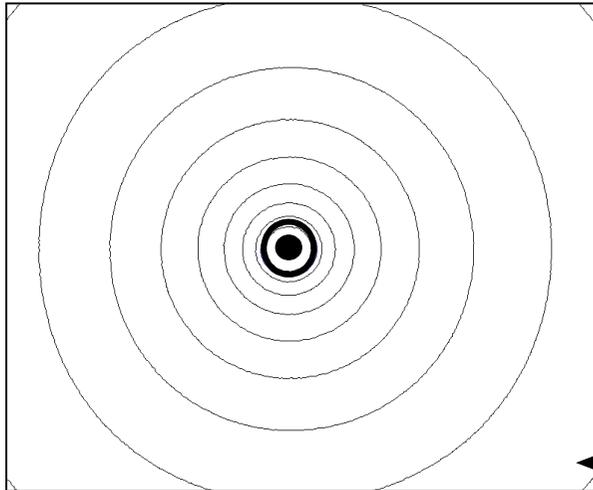


▪ Pertes par Courants de Foucault



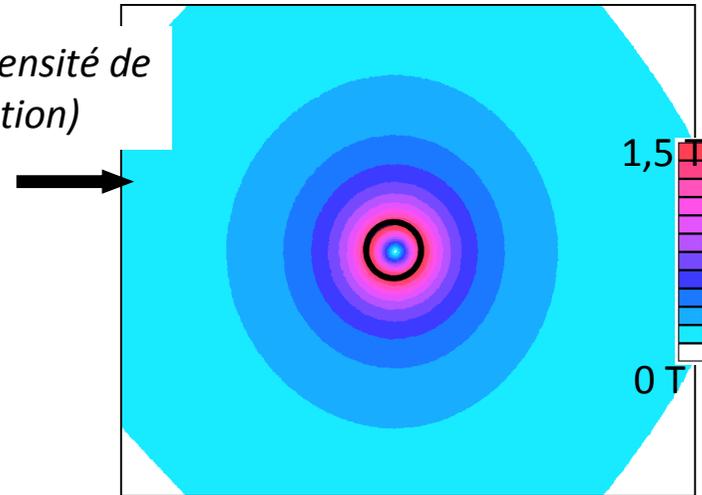
Exemples illustrant le champ magnétique et l'aimantation produite

▪ **Conducteur seul dans l'air**

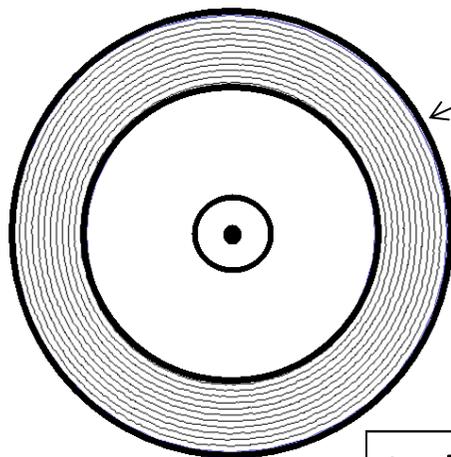


Lignes de champ magnétique

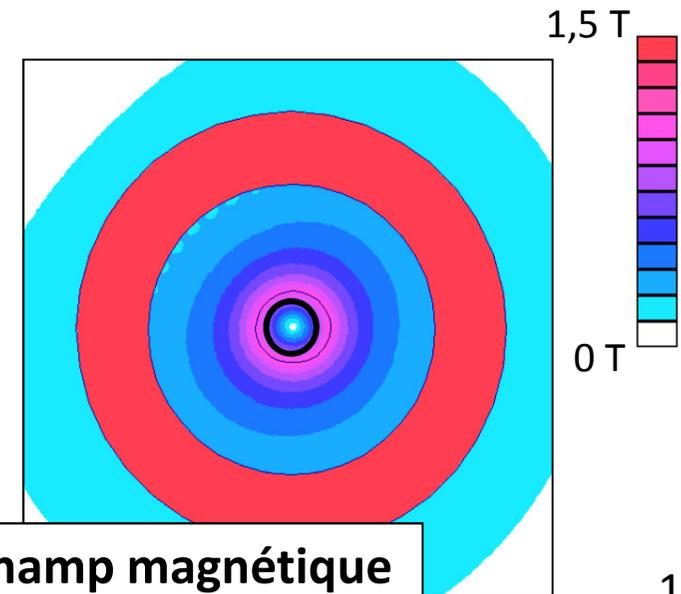
Induction (intensité de l'aimantation)



▪ **Conducteur + circuit magnétique 1**

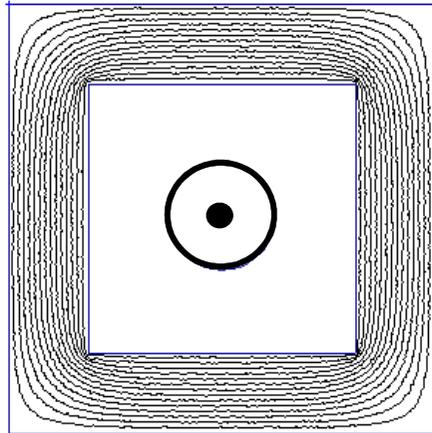


Matériau ferromagnétique
 $\mu_r \sim 3000$
(3000 fois plus perméable que l'air)



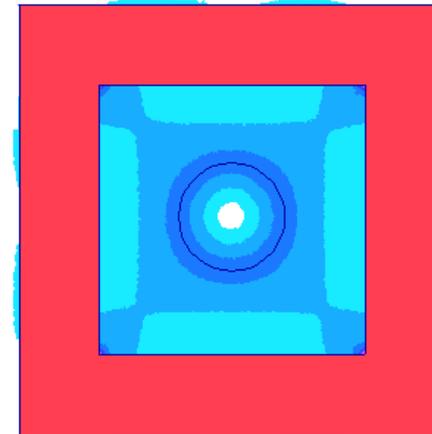
Induction = densité de lignes de champ magnétique

▪ **Conducteur + circuit magnétique 2**



Lignes de champ magnétique

Induction (intensité de l'aimantation)

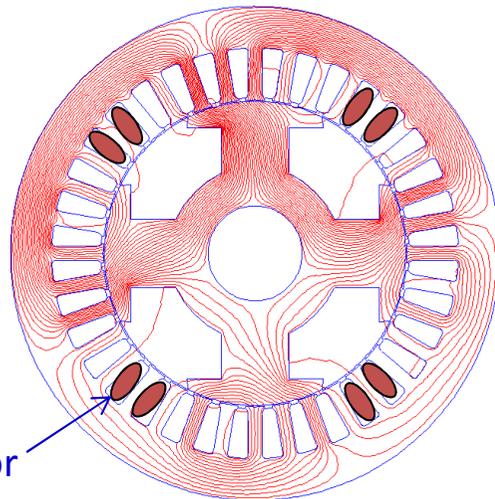


1,5 T

0 T

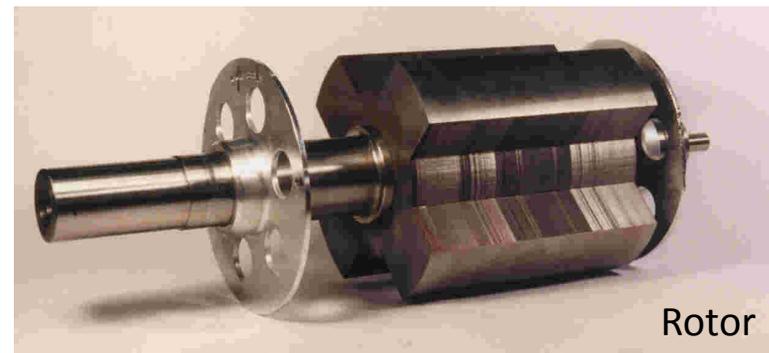
Un matériau magnétique canalise les lignes de champ magnétique

▪ **Moteur**



Courants au stator

MRV (Moteur à Réluctance variable)



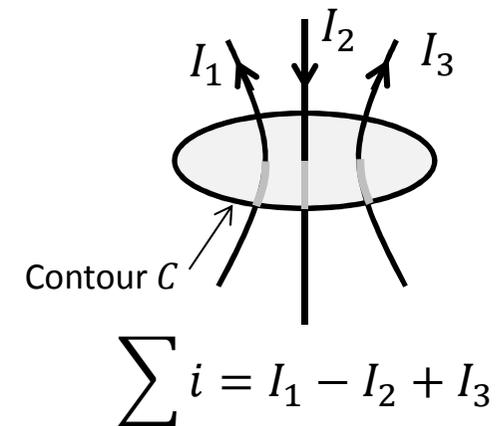
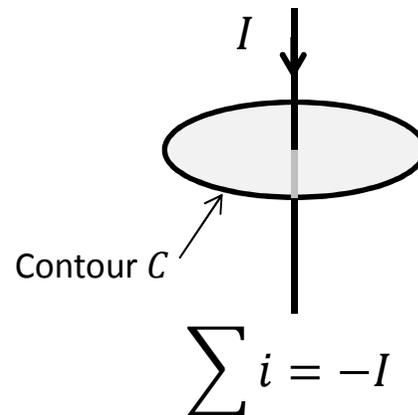
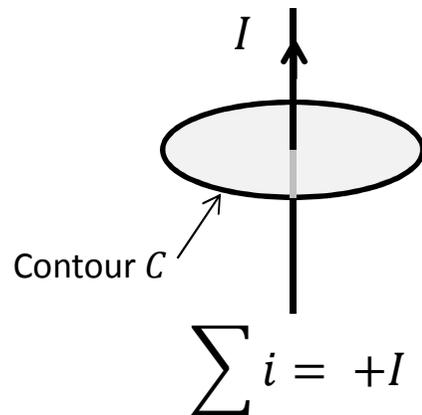
Rotor

Théorème d'AMPERE

➔ Relation entre champ magnétique et courant

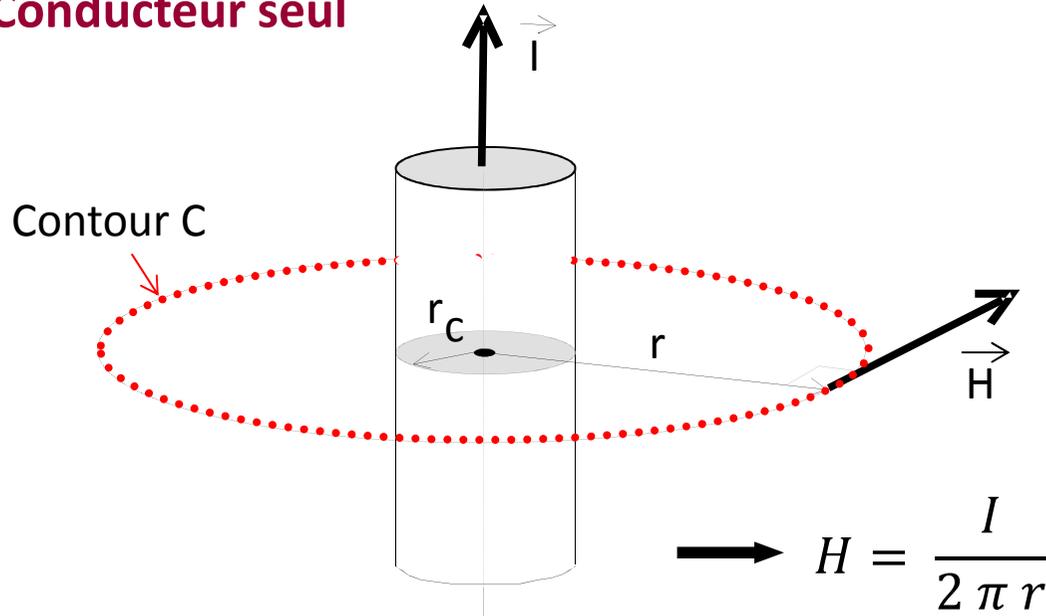
$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum \text{courants entrant dans le contour } C$$

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**



$I = 10 \text{ A}$

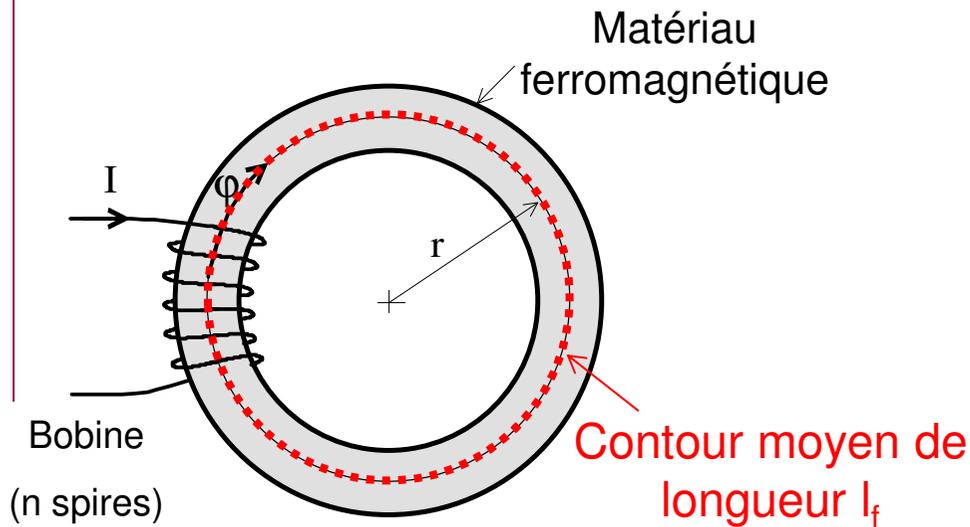
1 m

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

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

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

Repère énergétique :

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

(\approx 100 kg soulevé sur 1m)

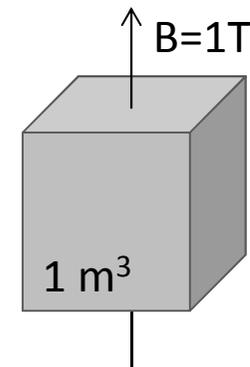
Dans 1 m³ soumis à une induction de 1T, on stocke :

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

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

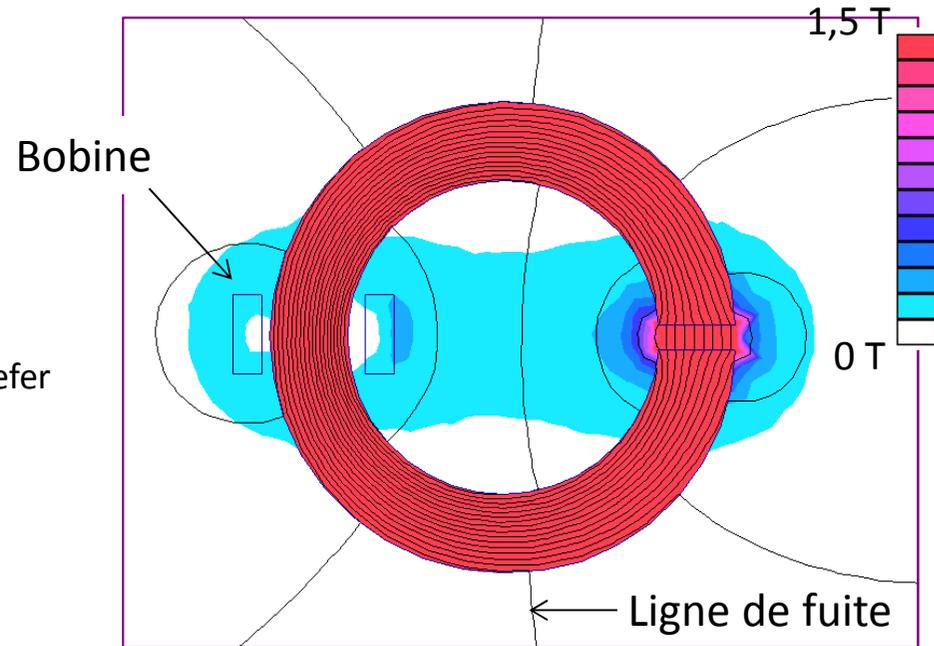
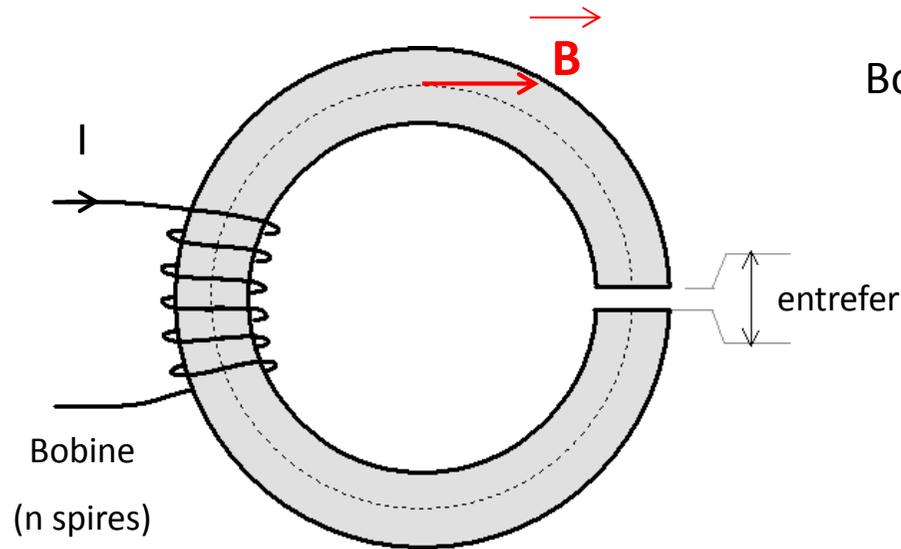
Dans le fer ($\mu = \mu_r \mu_0$)

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



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

▪ Circuit torique avec entrefer



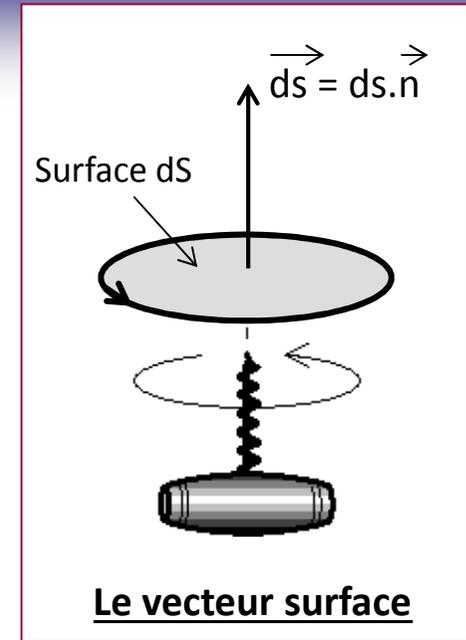
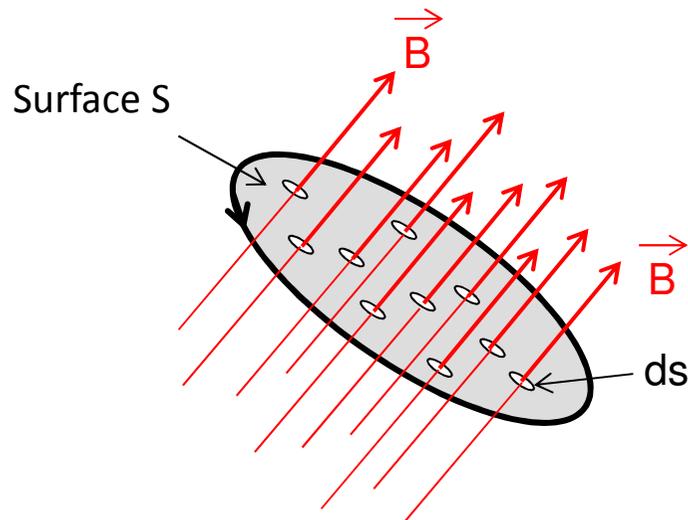
Si matériau magnétique parfait $\rightarrow \mu_r = \infty$ et fuites nulles

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

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

Le flux magnétique

Flux magnétique (ϕ) = Somme des inductions sur une surface



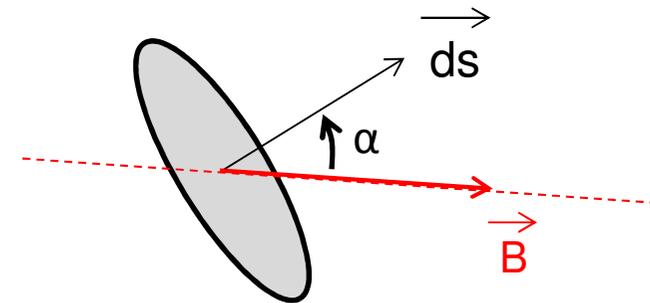
Si B et ds sont colinéaires

→ $\phi = B \cdot S$

▪ Formulation générale

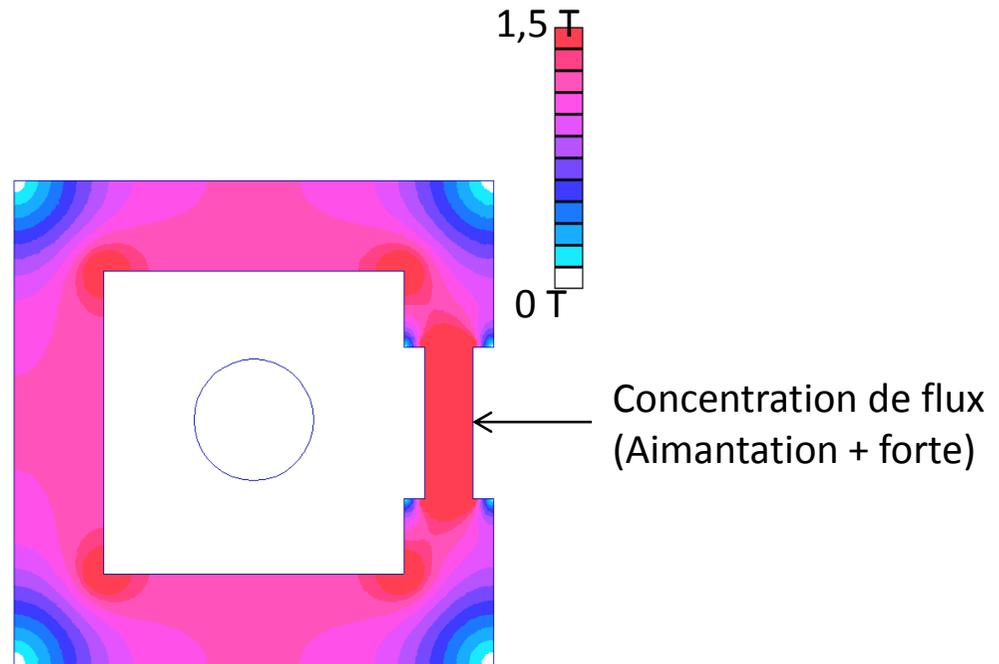
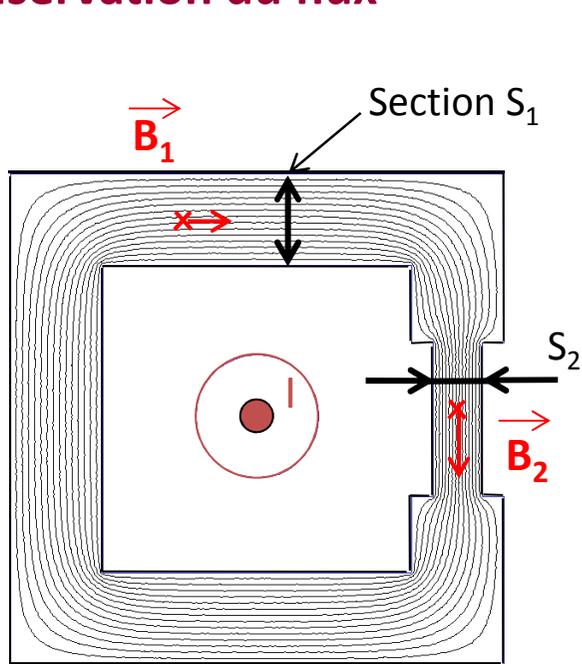
$$\phi = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{ds}$$

Unité : le Weber [Wb]



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

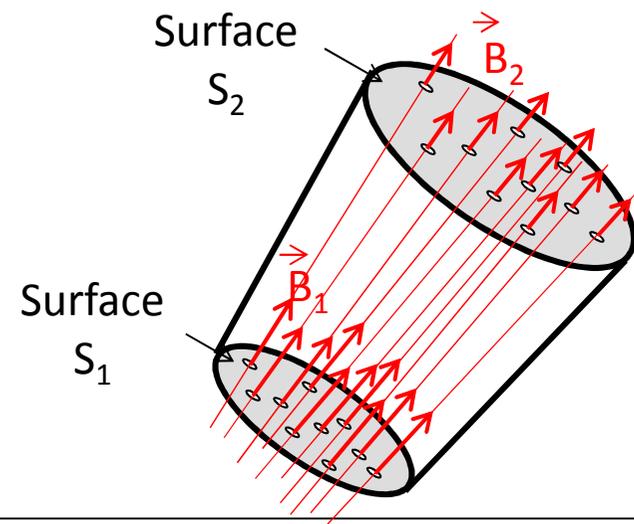
Conservation du flux



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

$$\longrightarrow B_1 S_1 = B_2 S_2$$

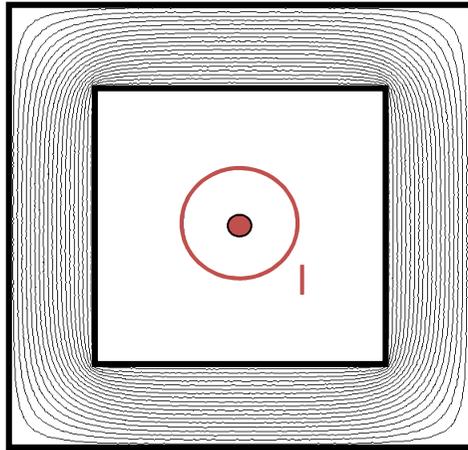
$$B_2 = \frac{S_1}{S_2} B_1$$



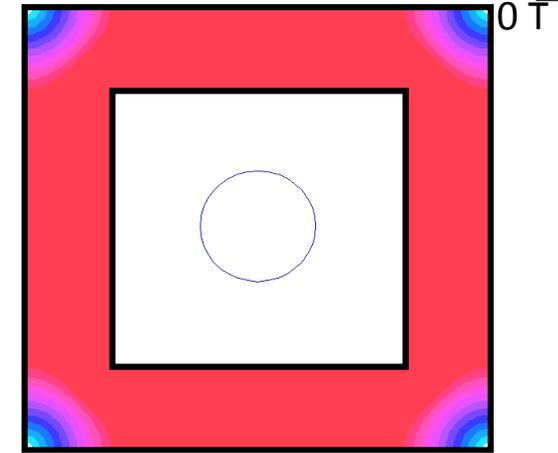


Perméabilité et réluctance des circuits magnétiques

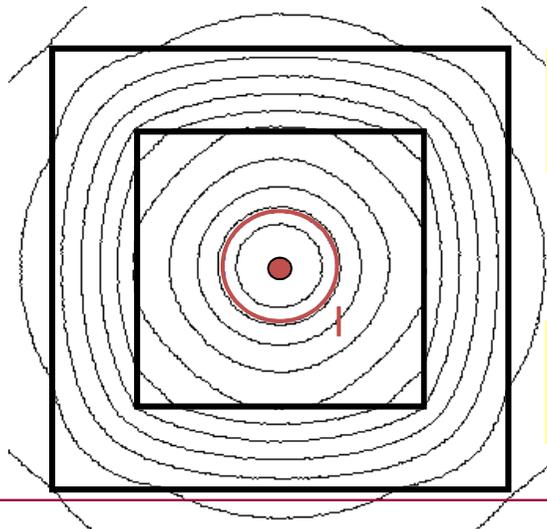
- Matériau magnétique parfait : $\mu_r = \infty$



Pas de lignes de champ hors du circuit magnétique



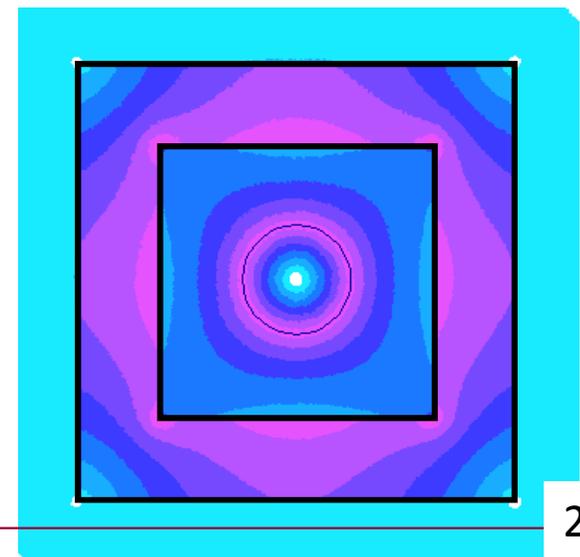
- Matériau magnétique mauvais : $\mu_r = 3$



Fuites magnétiques
(lignes hors du circuit magnétique)



Énergie magnétique
dans l'air autour du circuit

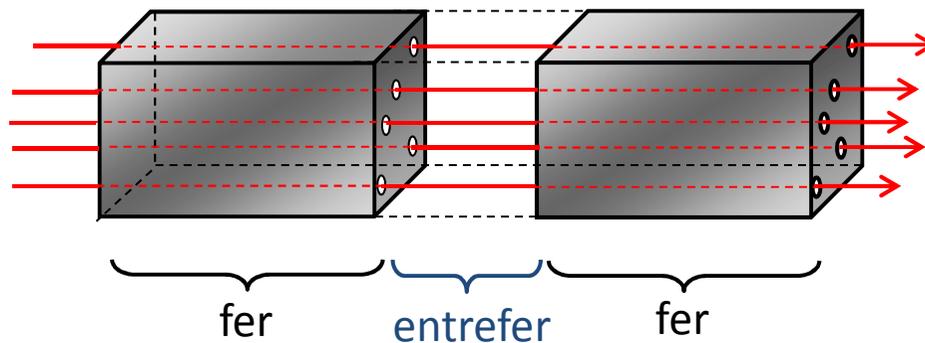
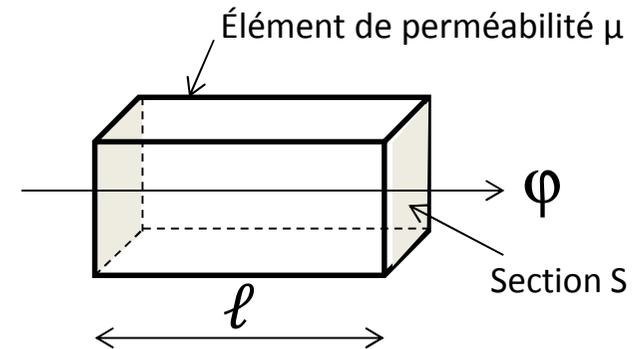


▪ Réluctance d'un circuit magnétique

Réluctance = résistance au passage du flux magnétique

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

Unité de \mathcal{R} : le Henry⁻¹ [H⁻¹]

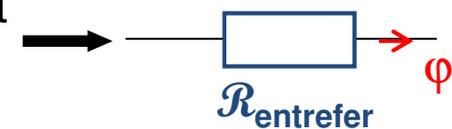


Flux φ



Si fer parfait

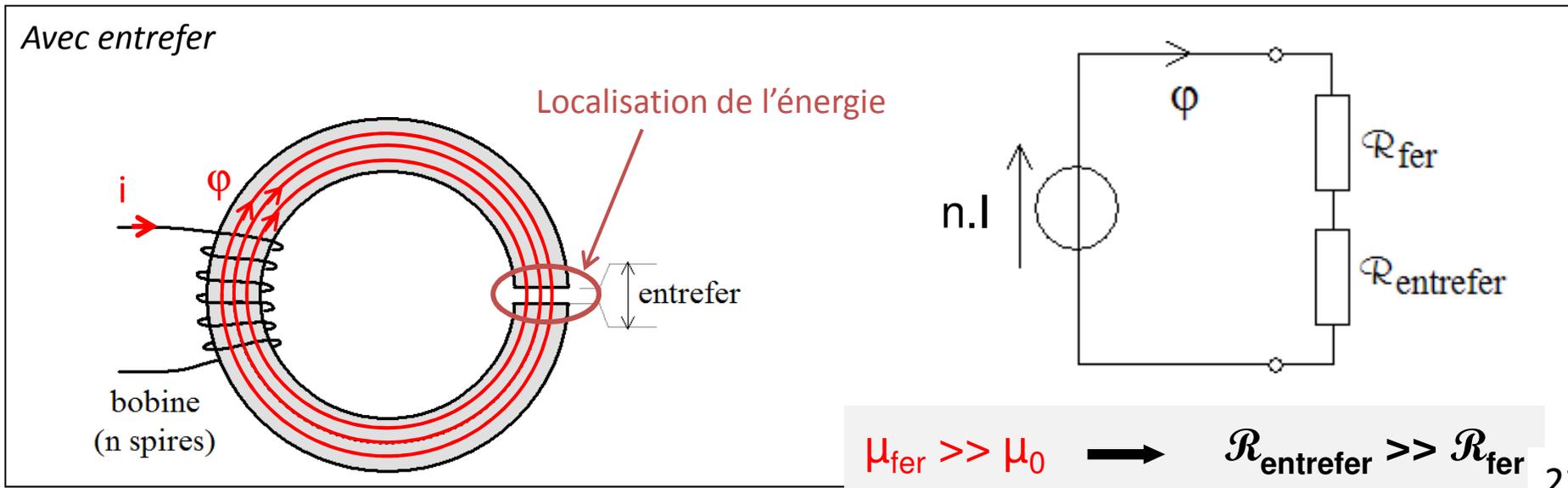
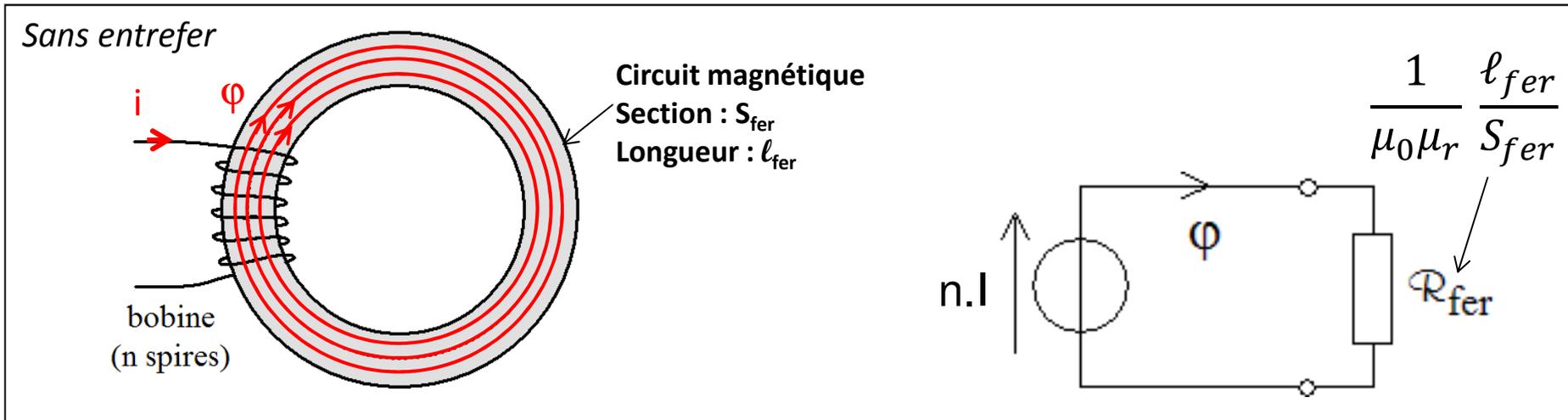
$$\mu_r = \infty$$



Analogie électrique/magnétique (Schéma aux ré reluctances)

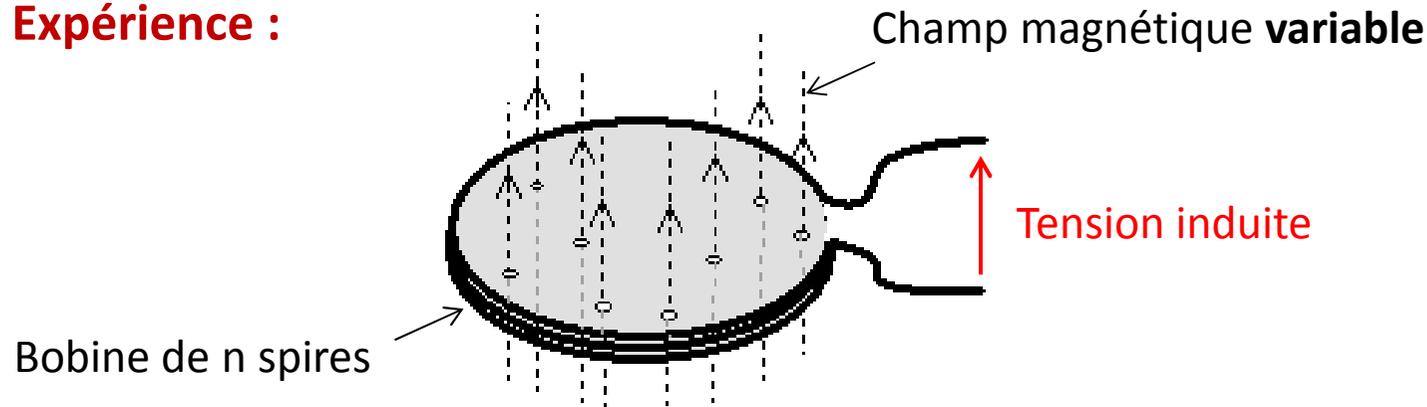
Relation flux/courant $\longrightarrow n \cdot I = \mathcal{R} \cdot \phi$

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

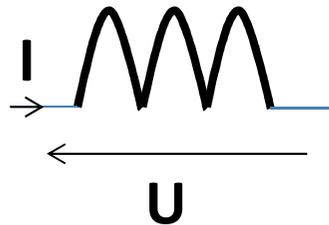
$$e(t) = n \frac{d\varphi(t)}{dt}$$
 convention récepteur

Principe utilisé dans :

- les transformateurs
- les moteurs électriques

3. L'Inductance

Symbole électrique



Courant



Energie magnétique
Flux magnétique



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

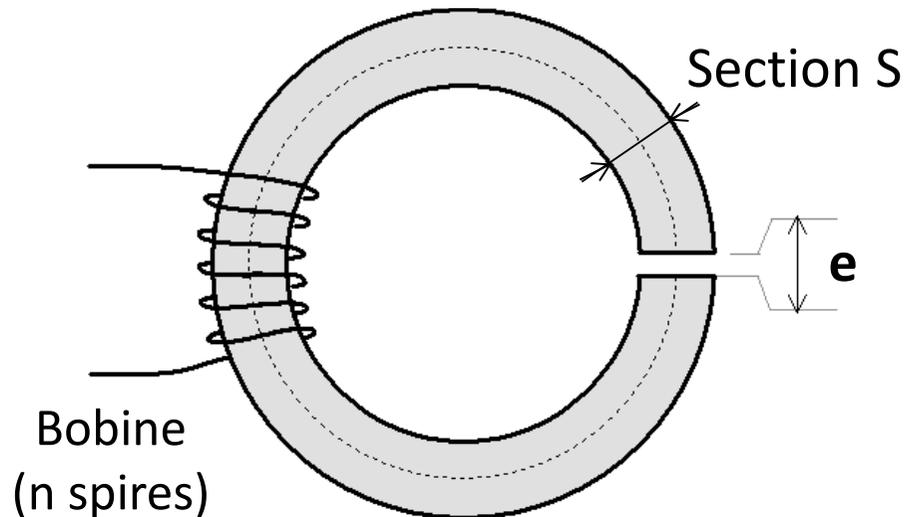
$$\varphi = L \cdot I$$

Calcul de l'inductance

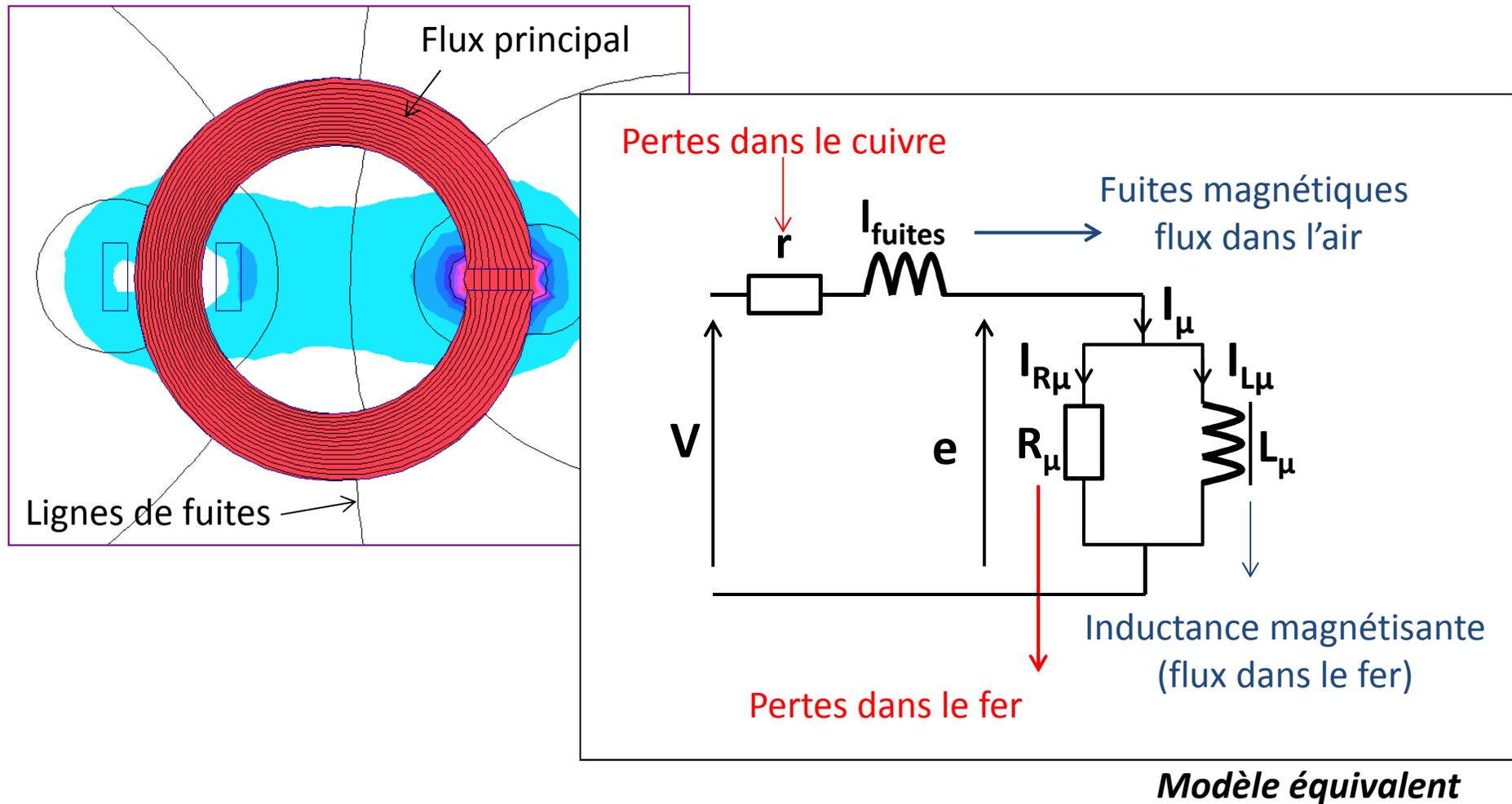
On montre que :

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

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



Inductance réelle et Modèle électrique équivalent

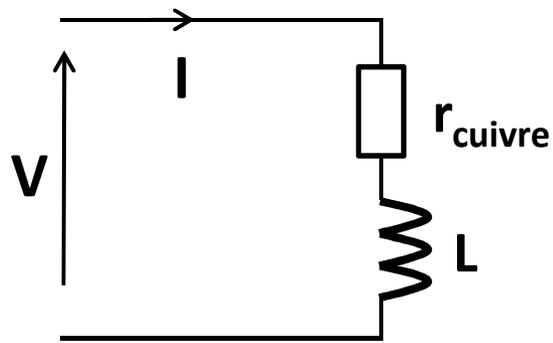


Circuit de base pour



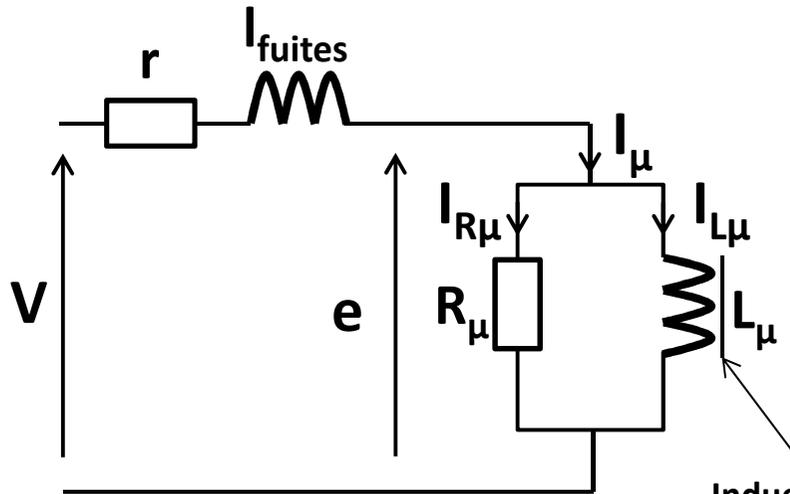
Les moteurs électriques
Les transformateurs

→ **Modèle d'une bobine sans fer**



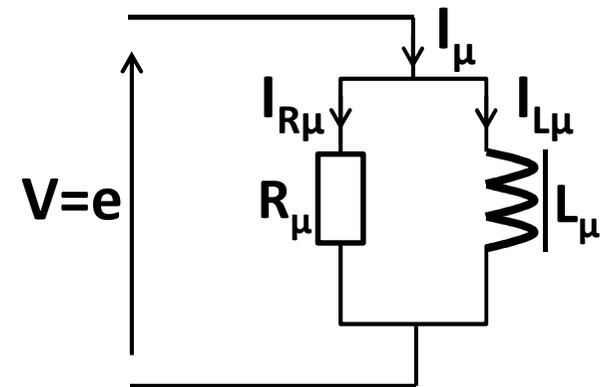
Circuit RL série

→ **Modèle d'une bobine avec fer**



Hypothèse de Kapp
 $\Delta v \ll e$

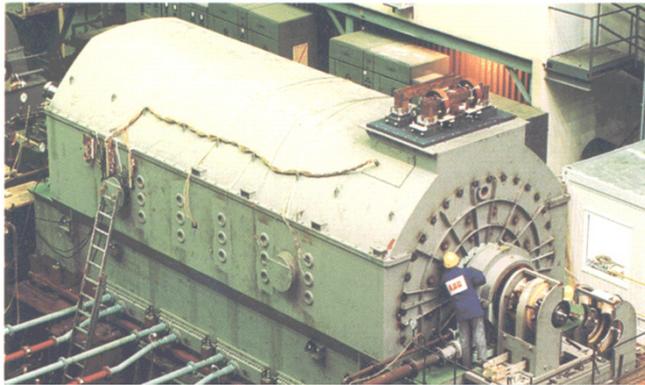
Inductance saturable
(non constante)



Circuit RL parallèle

4. LE TRANSFORMATEUR MONOPHASE

Rôle : adapter le niveau de tension aux différentes applications



Production ≈ 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

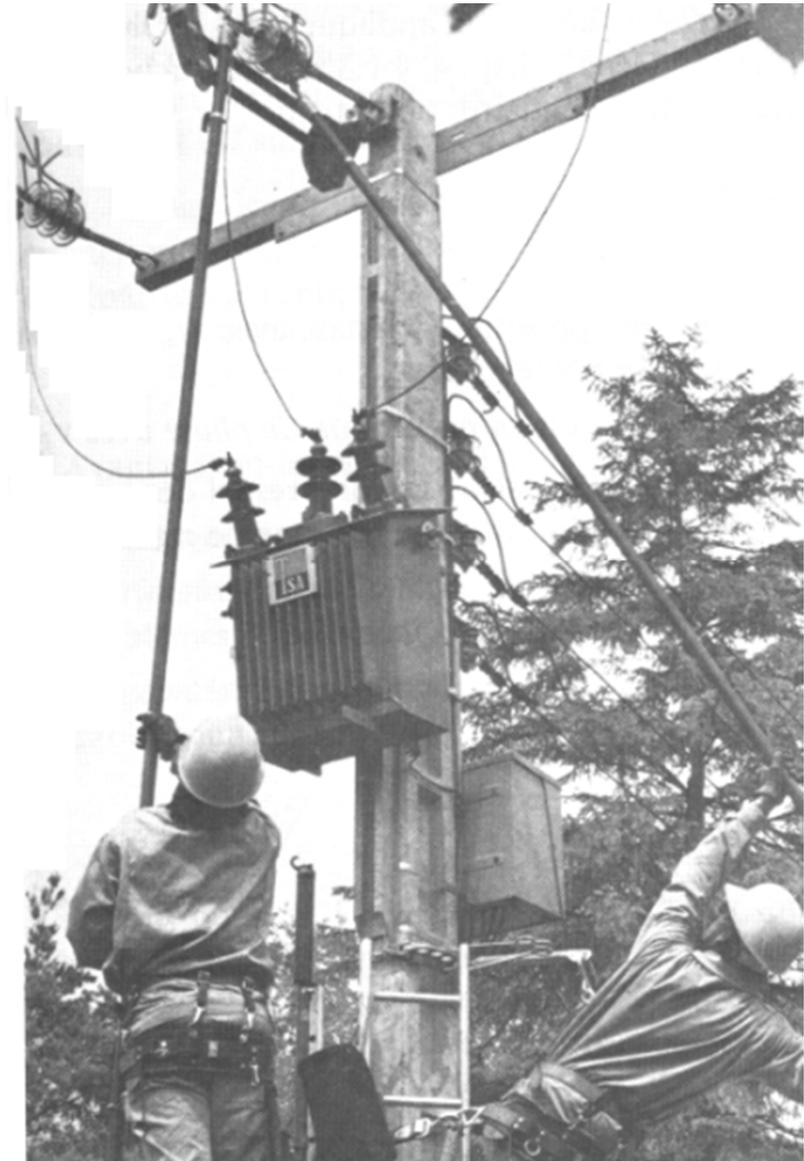
Réseau
basse tension
230 / 400V



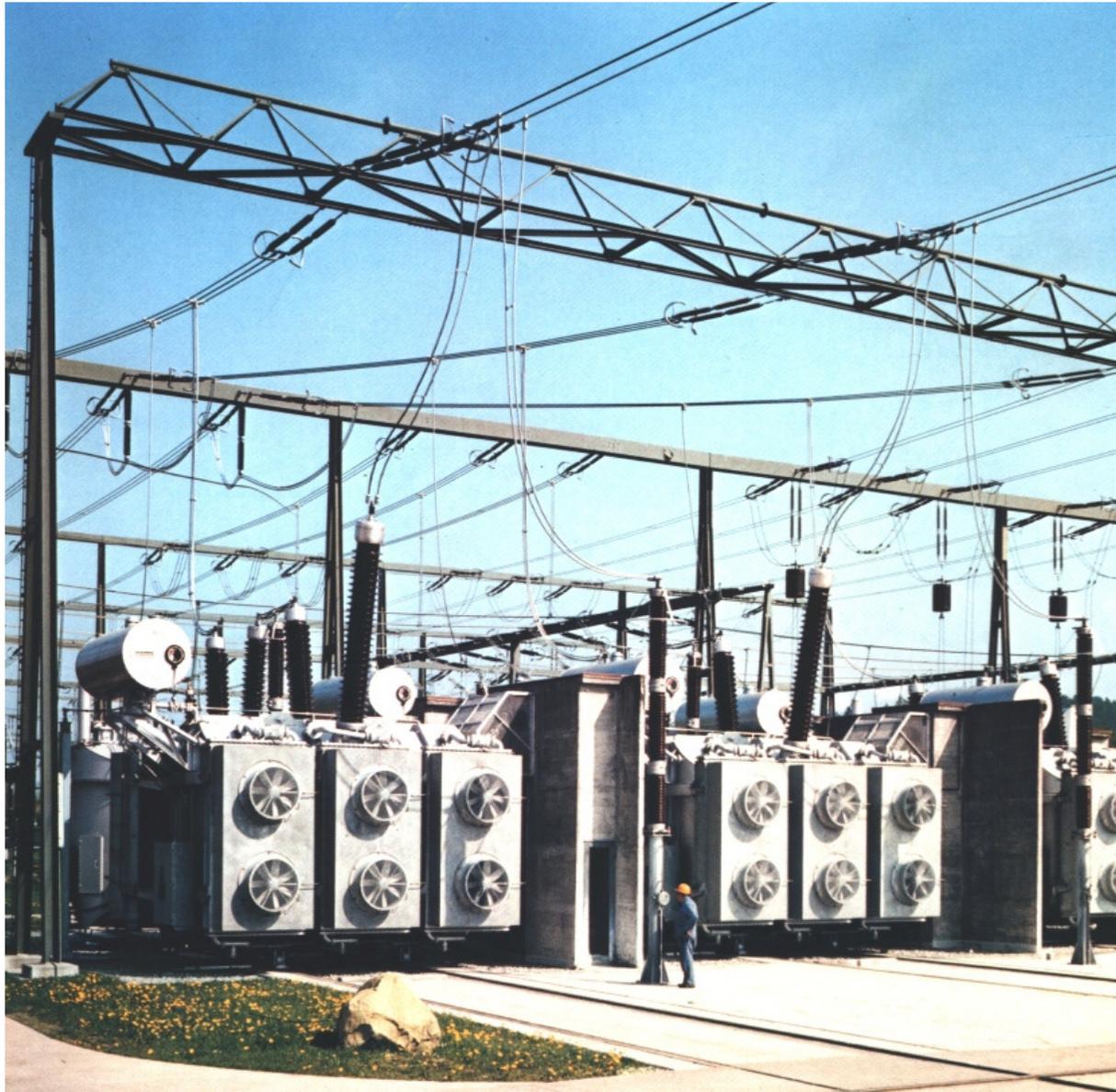
**Application domestiques
230V**



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



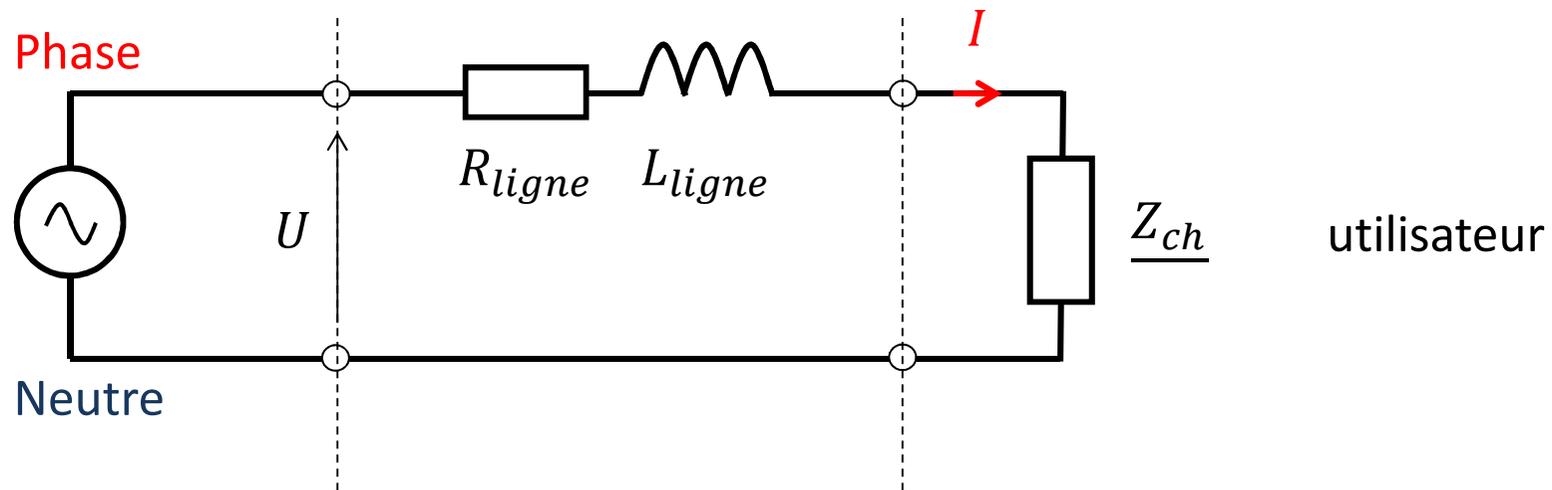
Transformateur de poteau 20 kV / 380 V



***Transformateurs réseau
400 kV***

Intérêt de la Haute Tension pour le transport

→ Réduire les pertes en ligne



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

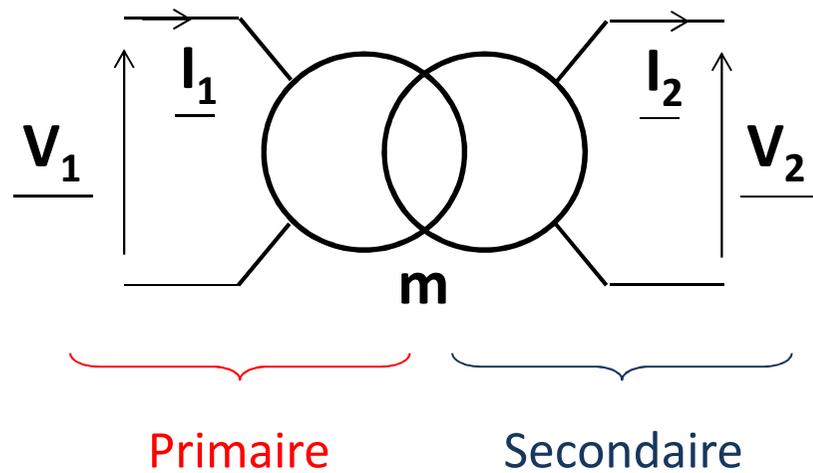
À puissance apparente donnée



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

Principe et constitution du transformateur

■ Symbole :



■ Rapport de transformation :

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

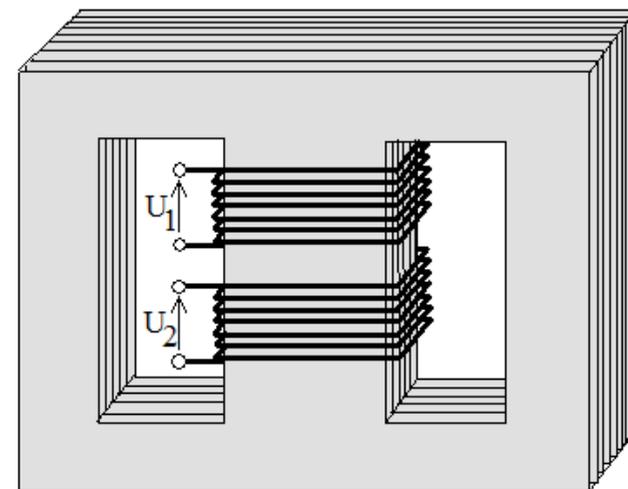
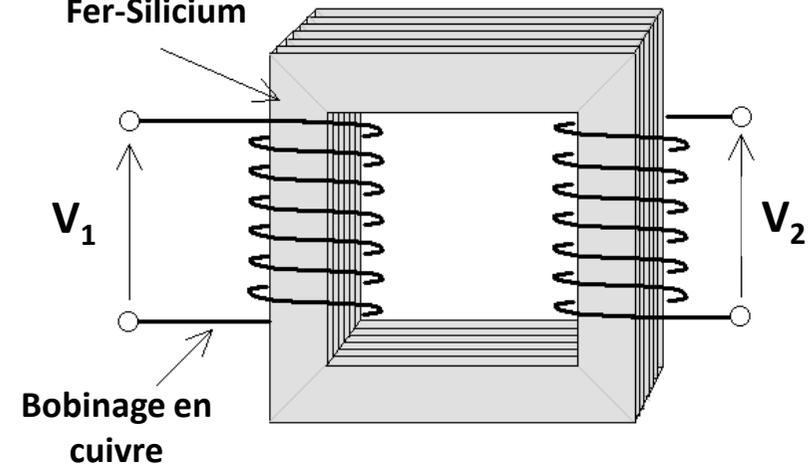
V_{20} : tension secondaire mesurée à vide

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

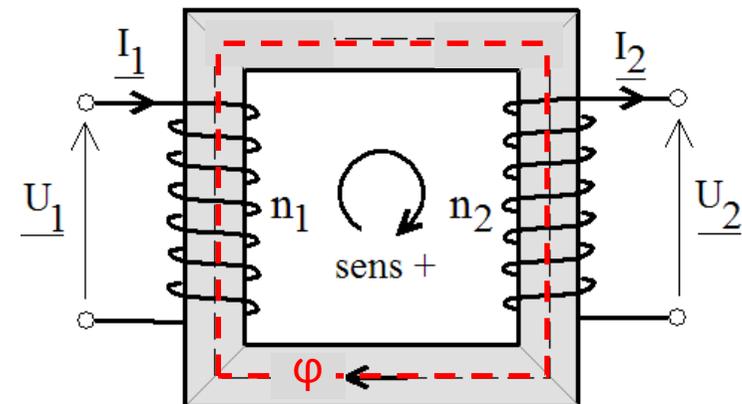
→ Résistances des bobinages nulles ($R_1 = R_2 = 0$)

→ 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 :

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



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

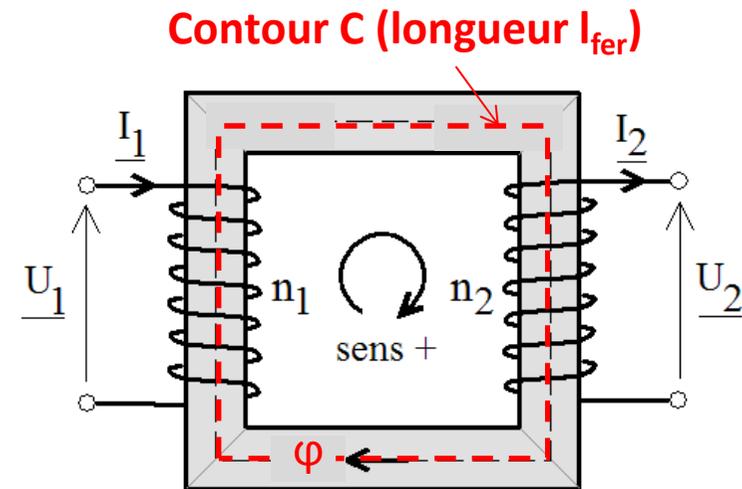
m peut être positif ou négatif selon les conventions et fléchages

▪ 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

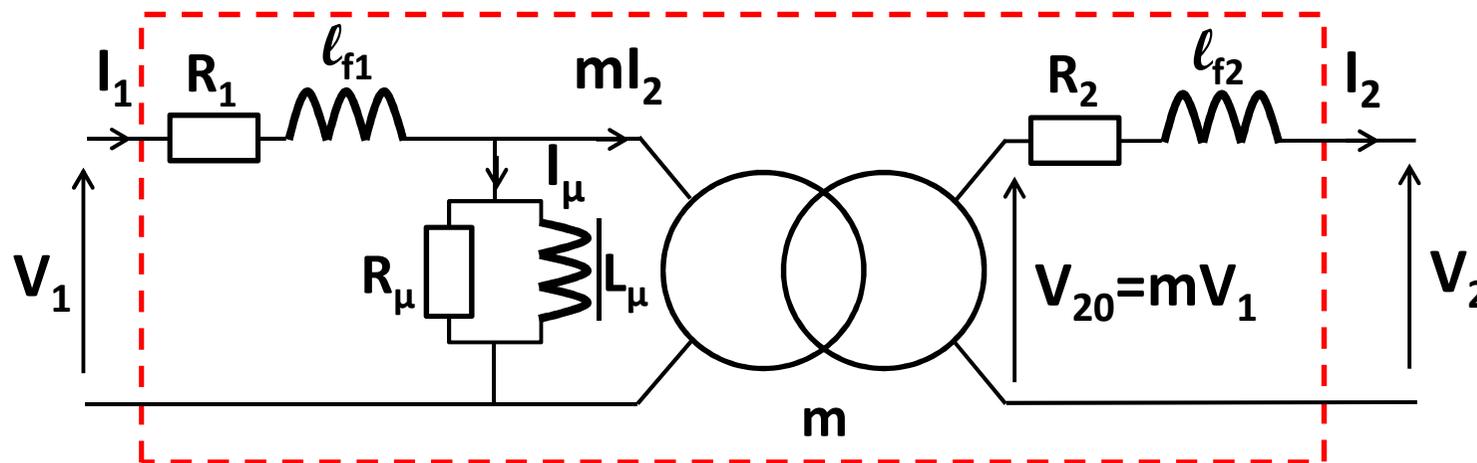
→ 3 résistances

R_1, R_2 : résistances des bobinages primaire et secondaire

R_μ : résistance de pertes fer

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

L_μ : Inductance magnétisante



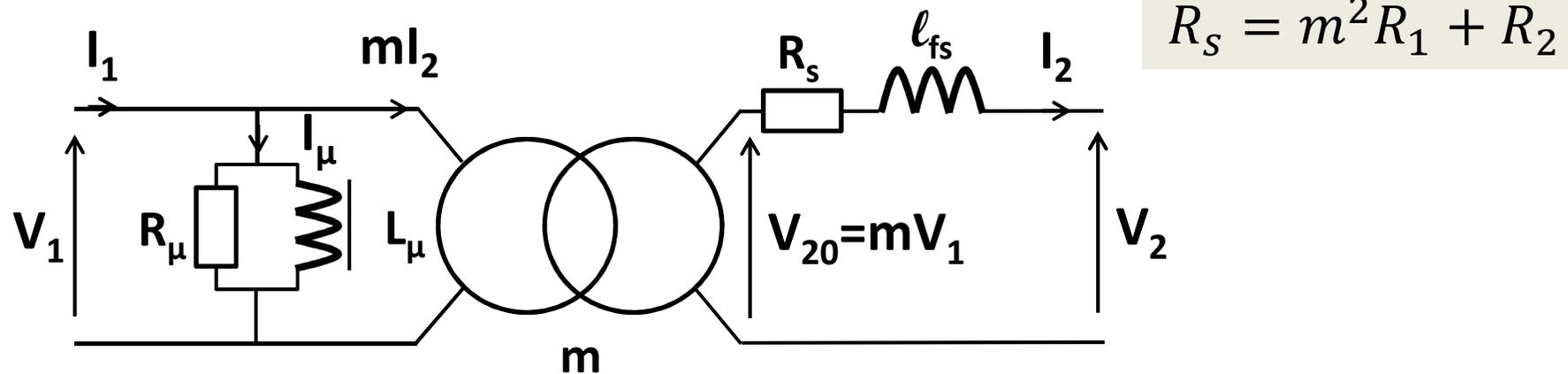
Courant absorbé à vide (I_{10}) = courant magnétisant (I_μ)

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

→ **Hypothèse de Kapp**

Chute de tension dans R_1 et ℓ_{f1} négligeable devant V_1

→ **Modèle simplifié**



→ **Pertes**

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

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

→ **Puissances**

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

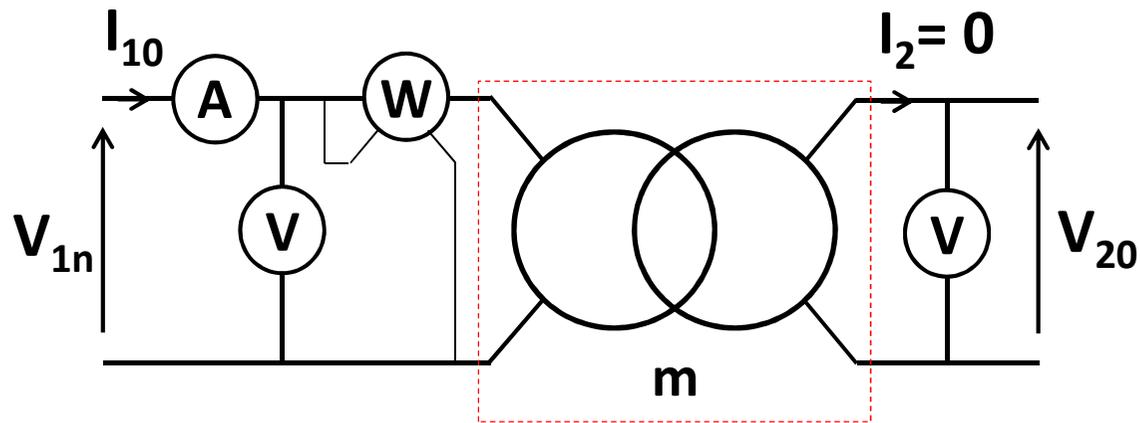
$$P_2 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

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_μ
- Détermination de L_μ
- Détermination de m
- Mesure des pertes fer



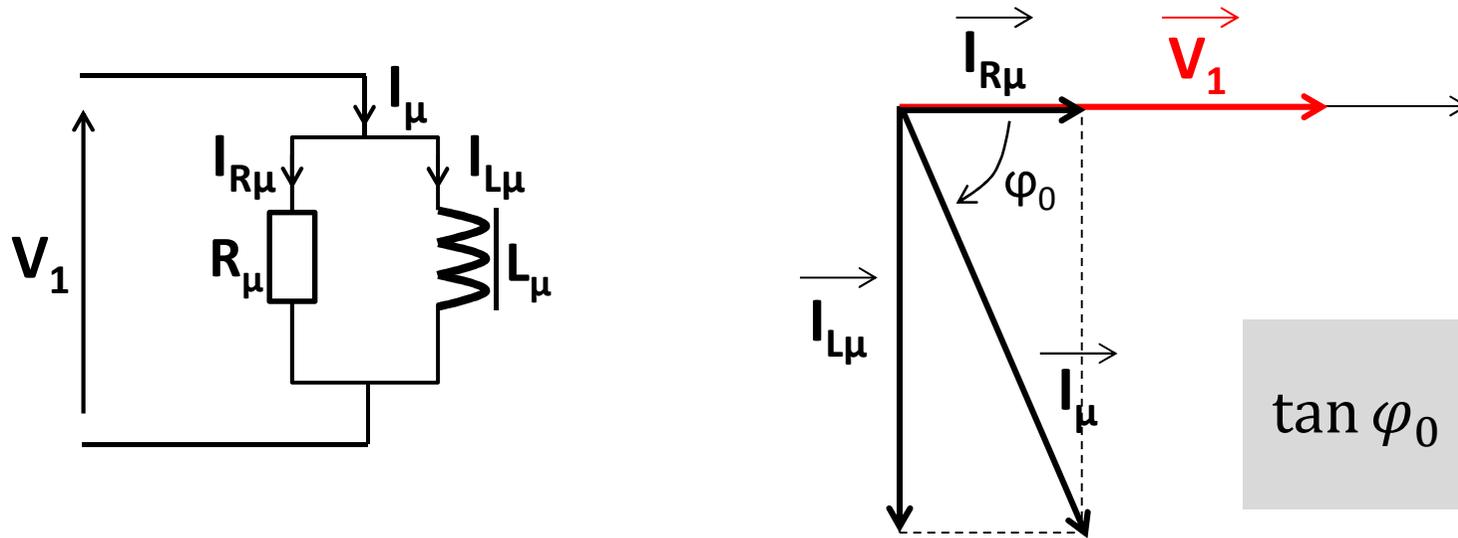
4 mesures

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

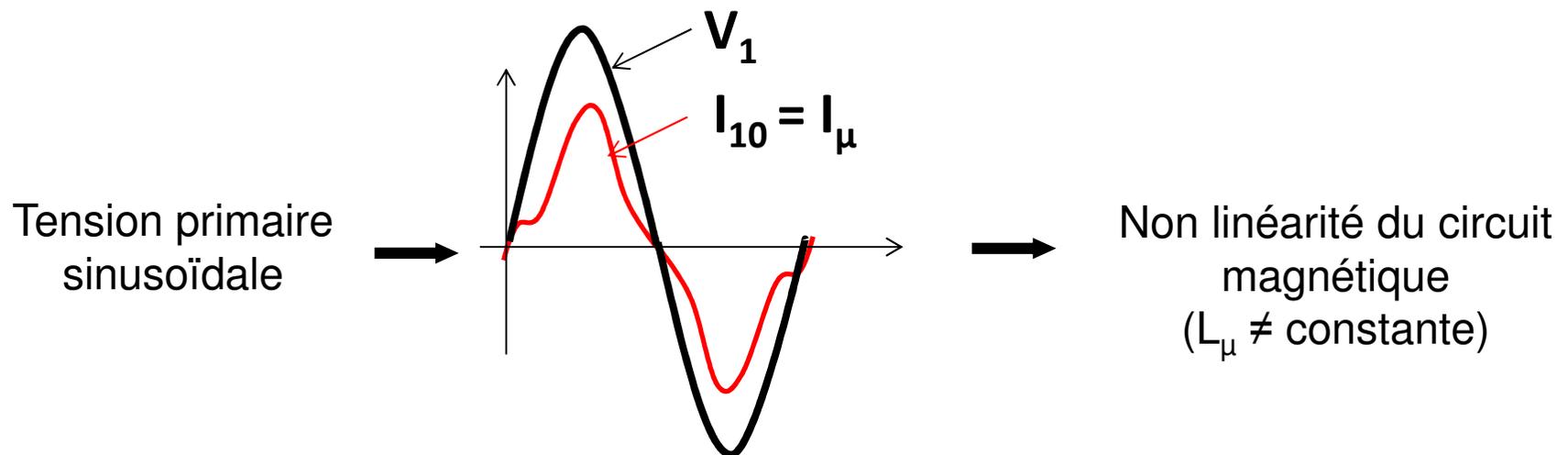
$$m = \frac{V_{20}}{V_1}$$

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

Diagramme de FRESNEL (essai à vide)



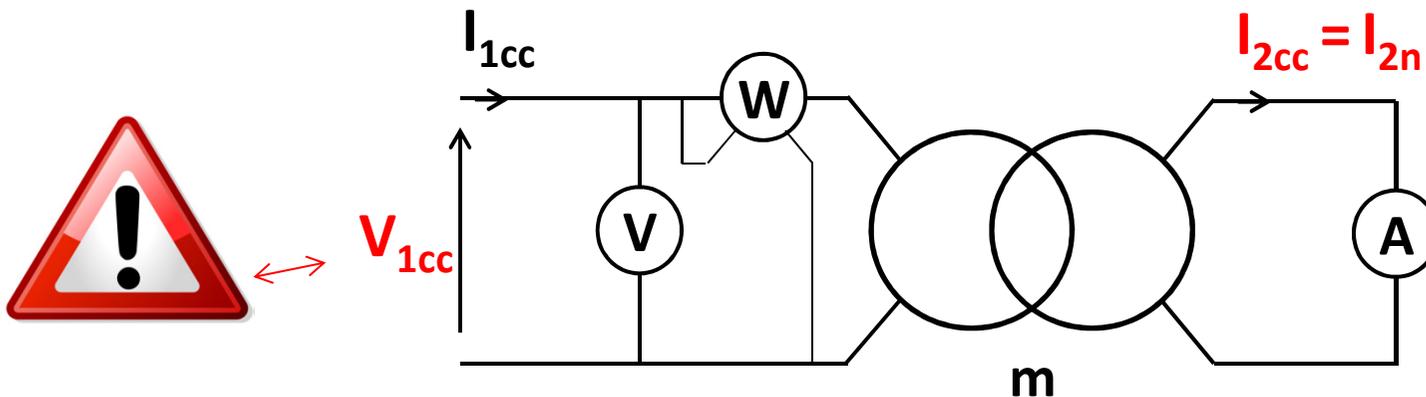
Allure du courant absorbé à vide



▪ **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 ℓ_s
- Mesure des pertes cuivre



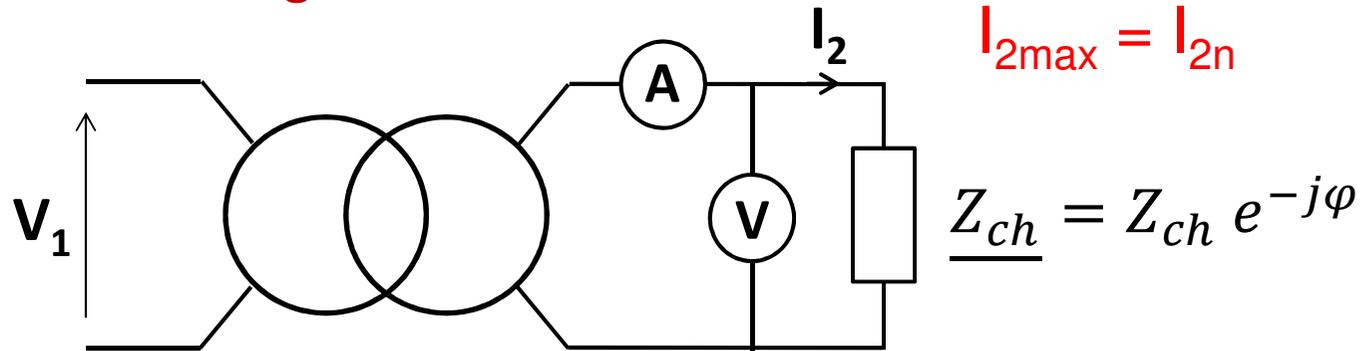
3 mesures

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

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

