

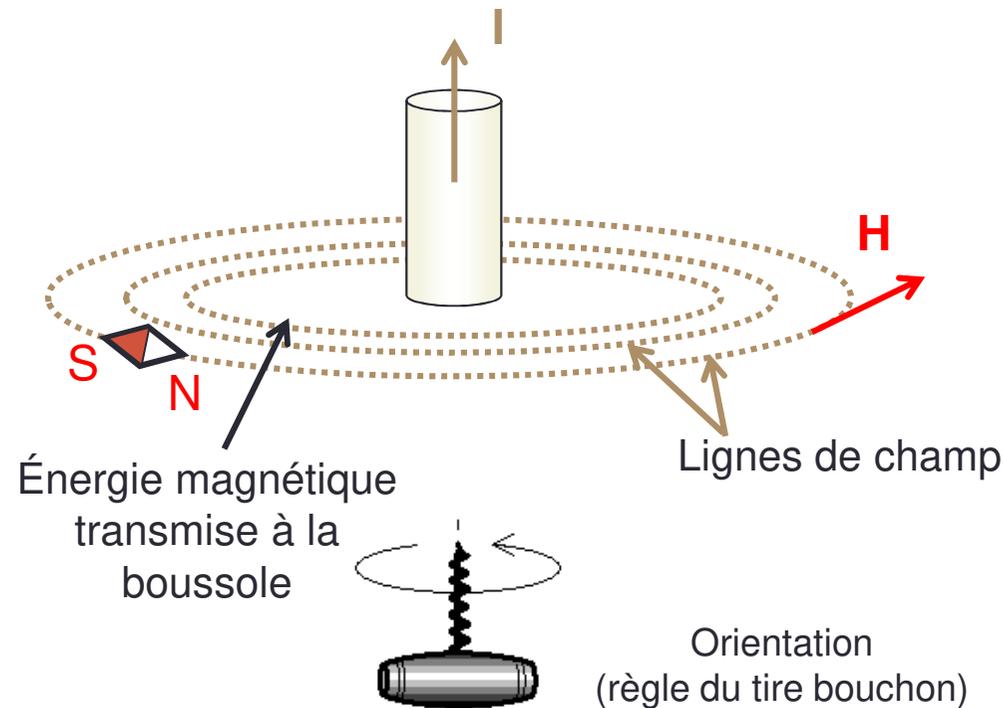


COMPLÉMENT COURS ELECTROMAGNÉTISME

Exercice 1

Le champ magnétique

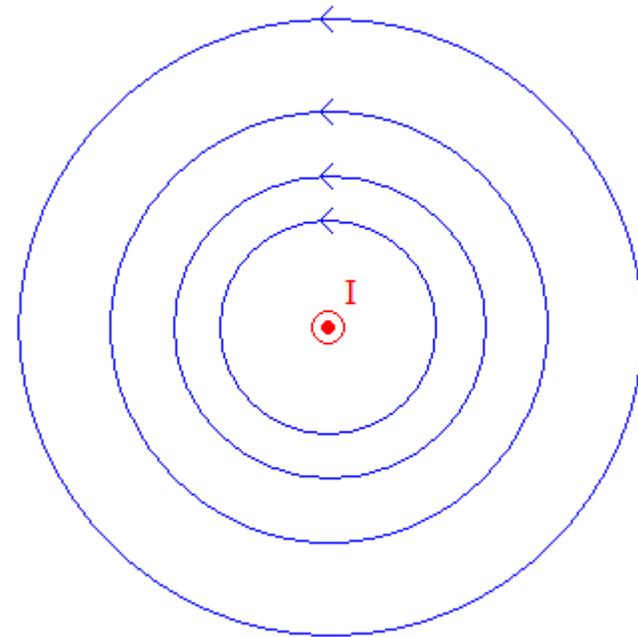
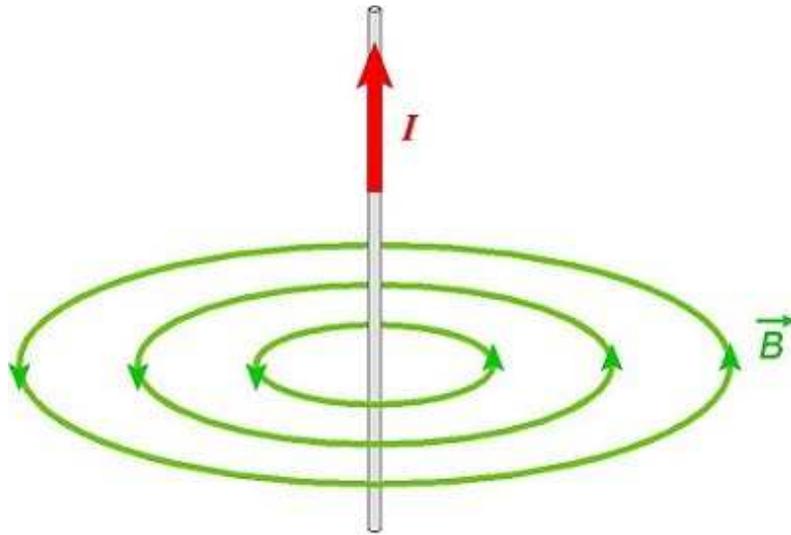
- Le champ magnétique est créé par un courant électrique :



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

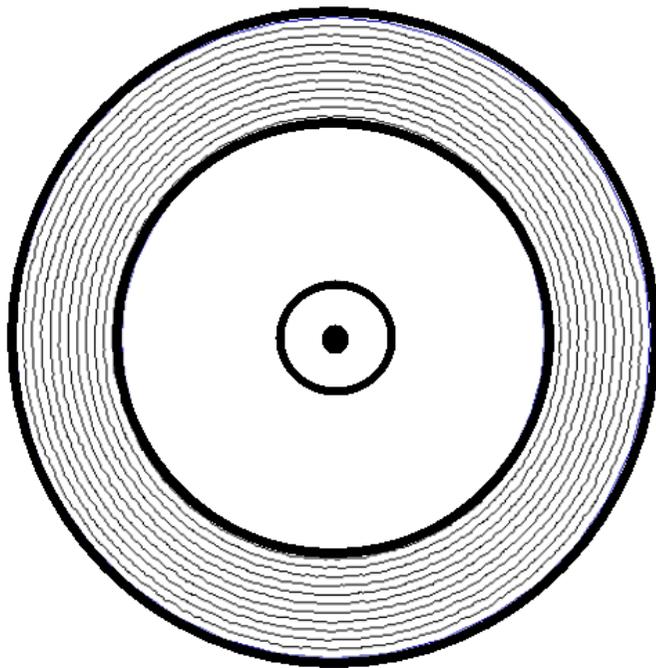
Champ magnétique dans l'air

Lignes de champ magnétique

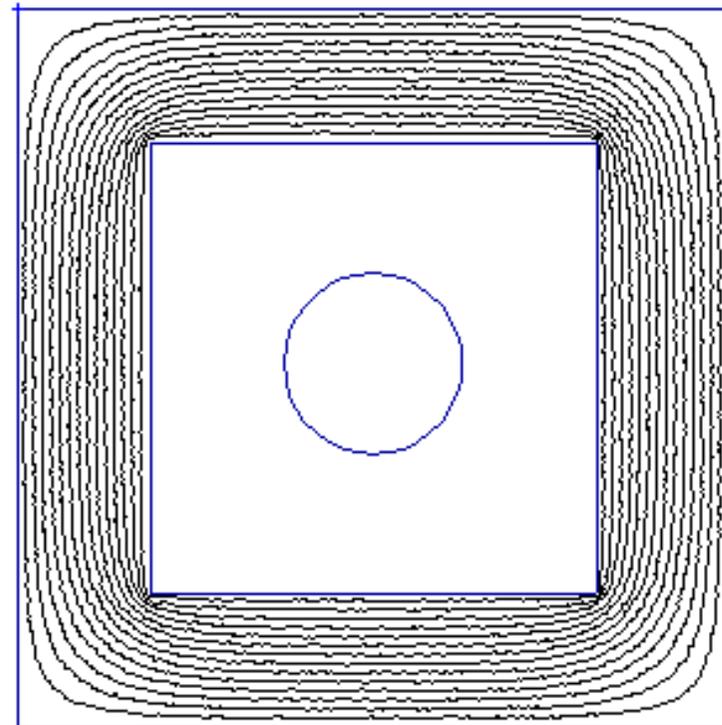


Champ magnétique dans un circuit ferromagnétique

- Matériau ferromagnétique = matériau perméable au champ



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



Lignes de champ magnétique



COMPLÉMENT COURS ELECTROMAGNÉTISME

Exercice 2

Relation entre H et I

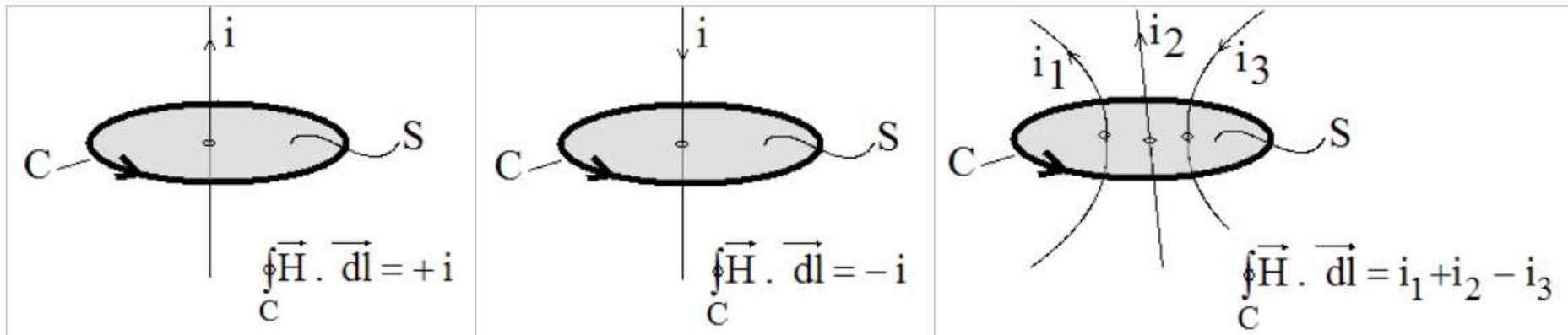
- Le théorème d'Ampère (André-Marie) :

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

- 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

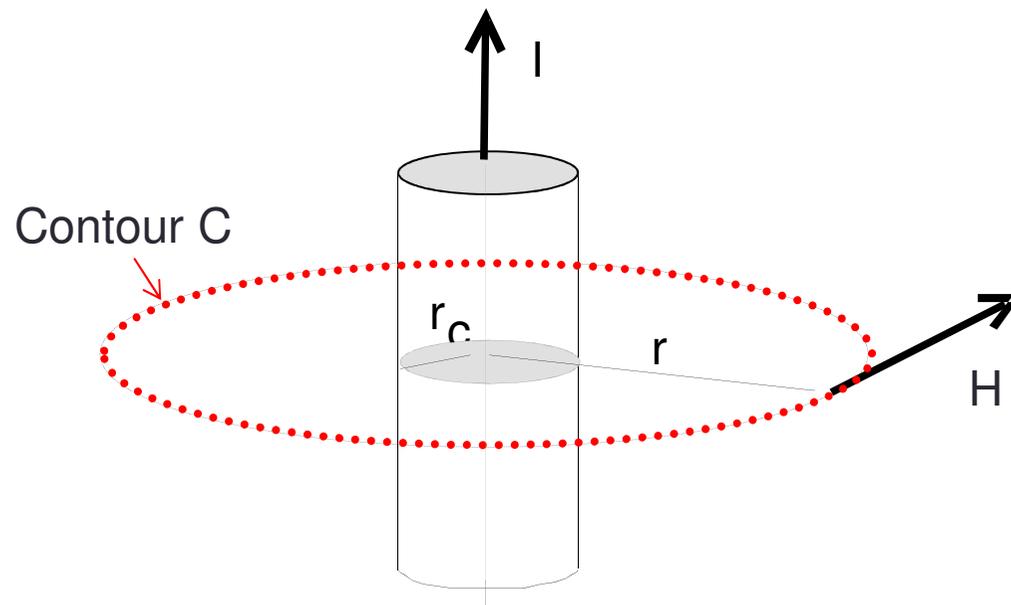
- Choisir un contour sur une ligne de champ :



- Attention de bien faire la somme algébrique !

Application du théorème d'Ampère

- Conducteur seul :



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

$$Hl = I$$

$$H2\pi r = I$$

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



COMPLÉMENT COURS ELECTROMAGNÉTISME

Exercice 3

Effet du champ sur la matière

- Défini par l'induction magnétique B en Tesla (T) (*Nikola Tesla*) ;
- Effet d'aimantation dépendant de la nature du matériau :
 - Matériau non magnétique : aimantation faible ;
 - Matériau magnétique doux : aimantation forte ;
 - Matériau magnétique dur : aimantation permanente.
- Attention :
 - Champ magnétique H (A/m), son intensité dépend de la source ;
 - Induction magnétique B (T), dépend de la nature matériau.

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)

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ -> Faible aimantation

Aimantation des matériaux

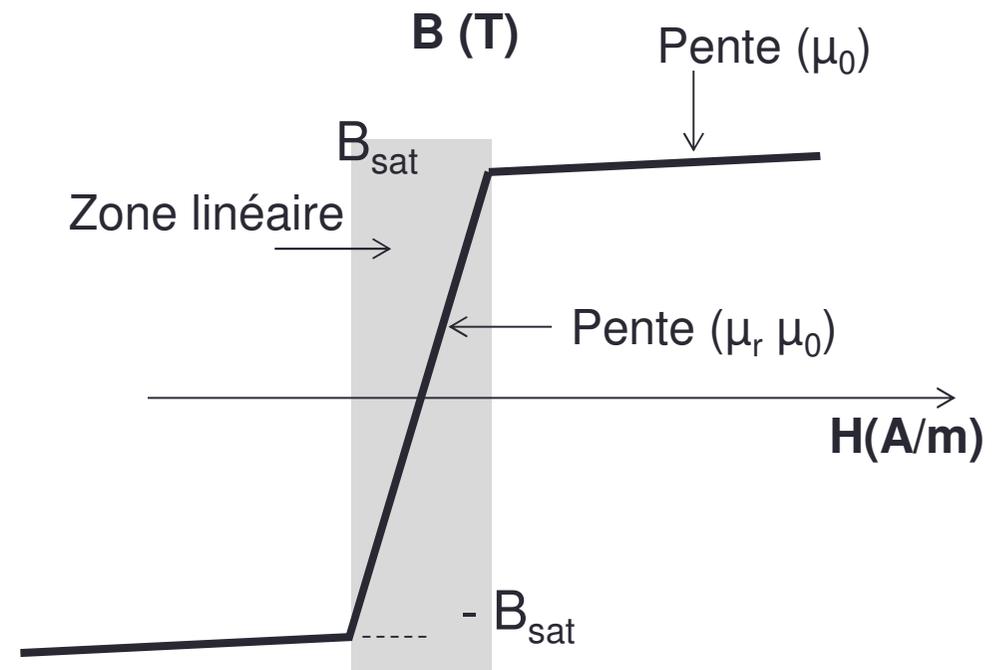
- Dans les matériaux magnétiques :

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

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.



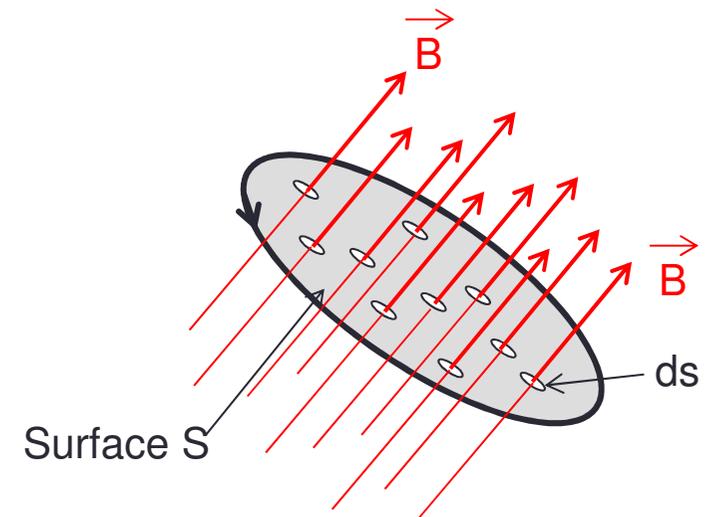
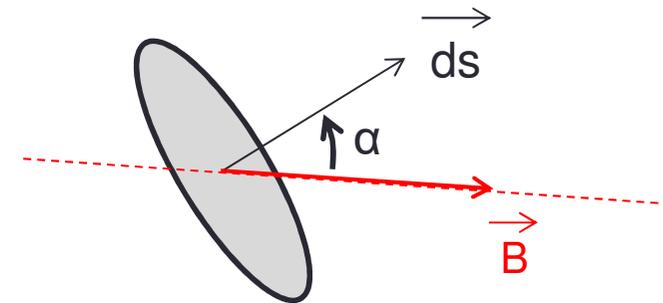
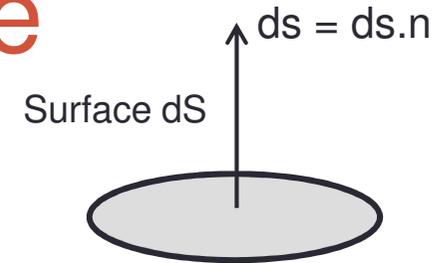
Définition du flux magnétique

- Flux (scalaire) : quantité traversant une surface

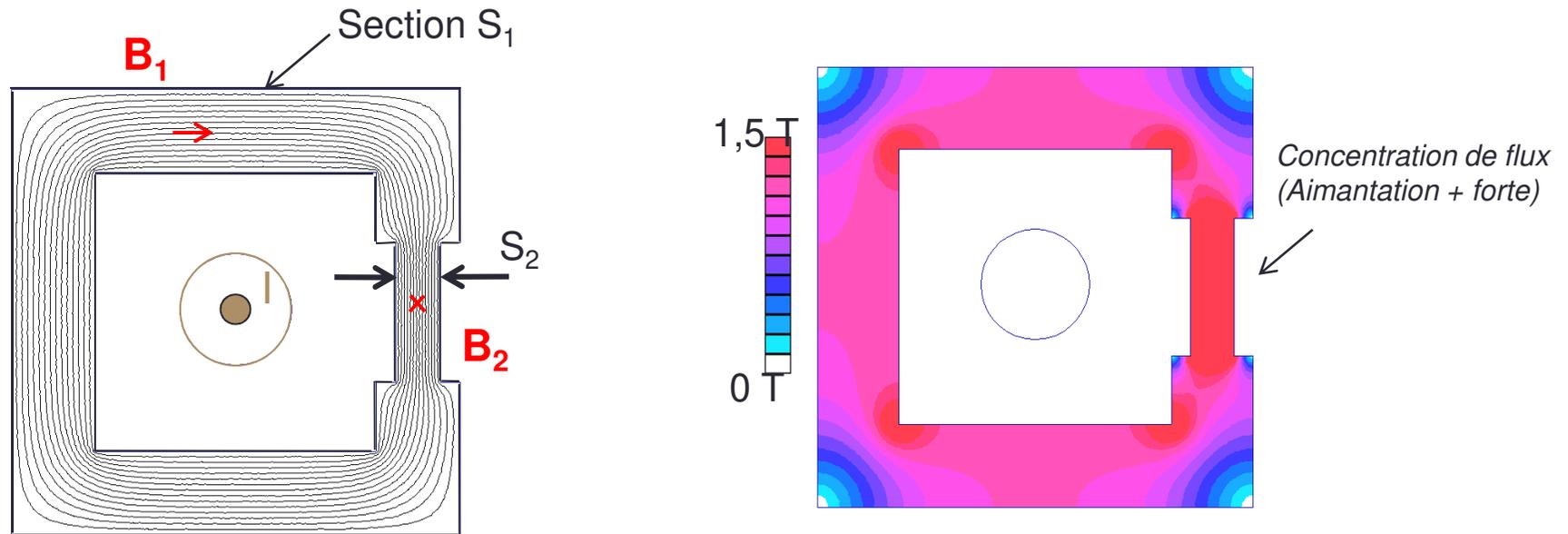
- $d\varphi = \vec{B} \cdot \vec{dS} = B dS \cos\alpha$

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

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



Conservation du flux



- Lignes de champ se referment : Conservation du Flux

$$B_1 S_1 = B_2 S_2$$



COMPLÉMENT COURS ELECTROMAGNÉTISME

Exercice 4

Energie Magnétique

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

$$W_{mg} = \int \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

$$W_{mg} = \frac{1}{2} LI^2$$

- 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

$$\mu_r = 10\,000$$

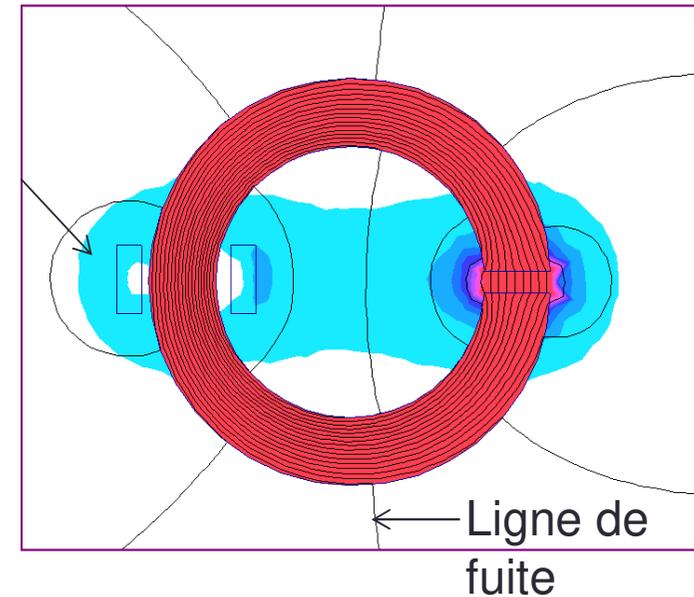
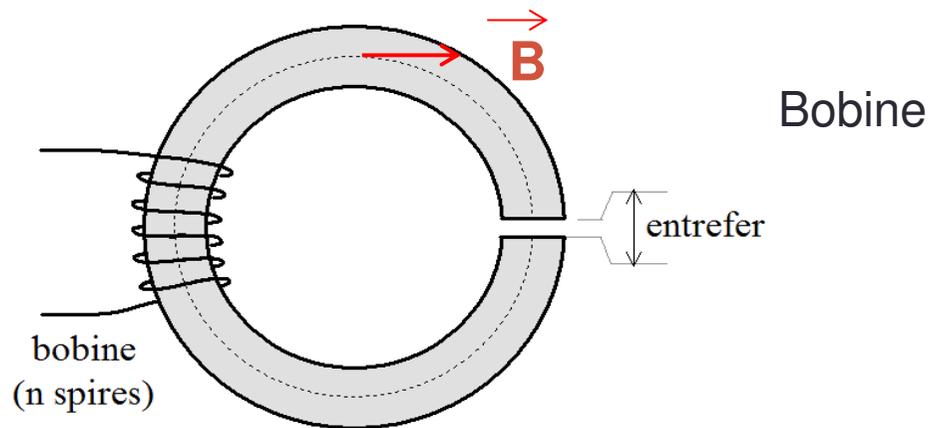
Dans 1 m³ sous 1T :

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

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. $\mu_r = 10\ 000$

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

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

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

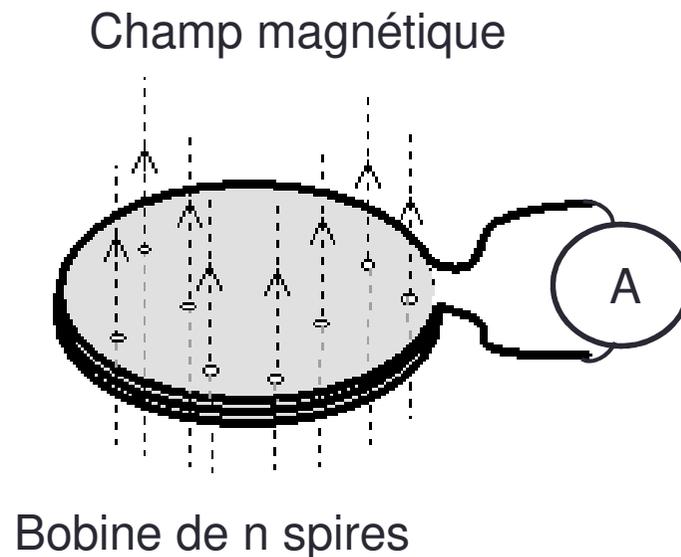


COMPLÉMENT COURS ELECTROMAGNÉTISME

Exercice 5

Induction Electromagnétique

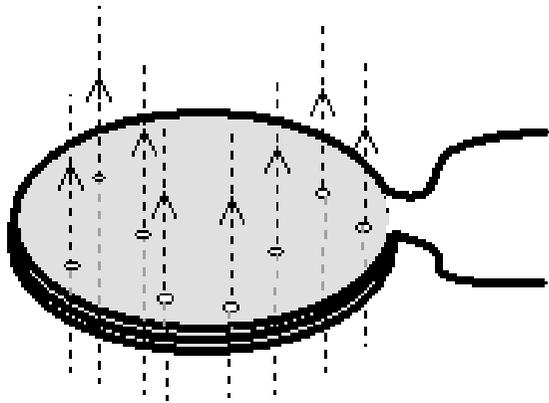
- Découverte en 1831 par Faraday ;
- Idée : Puisque un courant crée l'effet d'un aimant, un aimant peut-il créer un courant ?



Loi de Lenz-Faraday

Expérience

Champ magnétique



Variation du flux magnétique
=
Force Electro Motrice Induite

Formule

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

Phénomène d'auto-induction

1. Une tension **variable** u dans un conducteur en forme de spire génère un courant électrique **variable** i circule dans une spire ;
2. Un champ magnétique variable est créé par ce courant ;
3. Ce champ magnétique variable induit une tension **opposée** selon la loi de Lenz : $e = -\frac{d\varphi}{dt}$;
4. Cette tension génère des courants opposés dans le circuit qui retardent le courant i

$$u = L \frac{di}{dt}$$

Avec L le coefficient d'auto-induction ou inductance propre L (*pour Heirich Lenz*) en Henry (*Joseph Henry*)

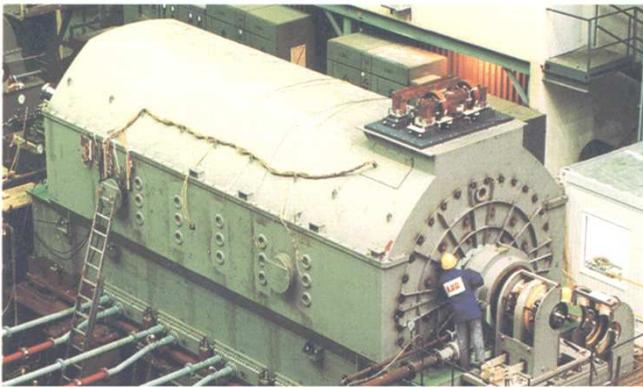


COMPLÉMENT COURS ELECTROMAGNÉTISME

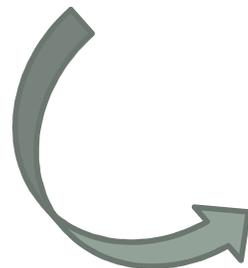
Le transformateur

Le Transformateur

- Rôle du transformateur :
 - Adapter l'amplitude de tension aux applications ;



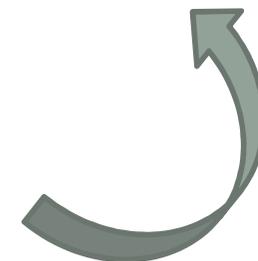
20 kV



400 kV

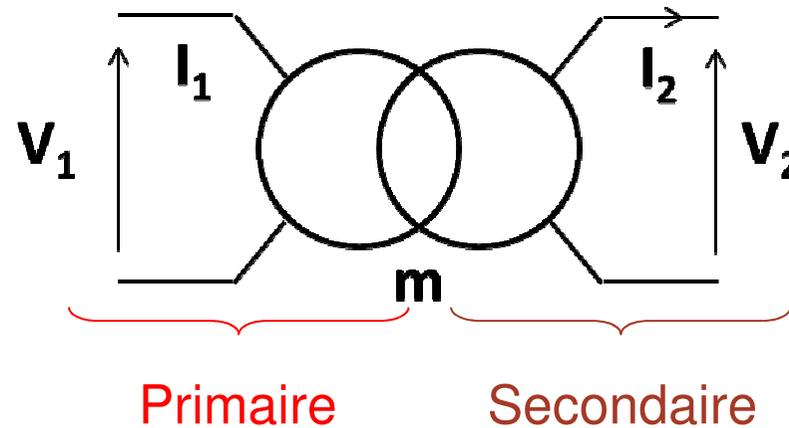


230 V



Le transformateur

- Symbole :



- Rapport de transformation :

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

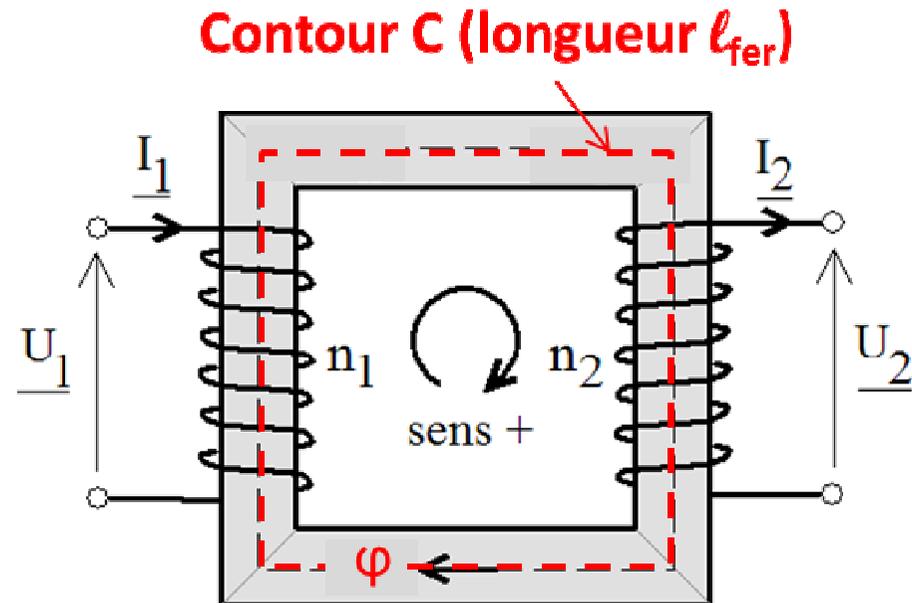
Principe de fonctionnement

- Hypothèse : Fer parfait, tension sinusoïdale ;
- Approche en tension:

- $U_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt}$;

- $U_2 = n_2 \frac{d\phi}{dt}$;

- $\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1}$

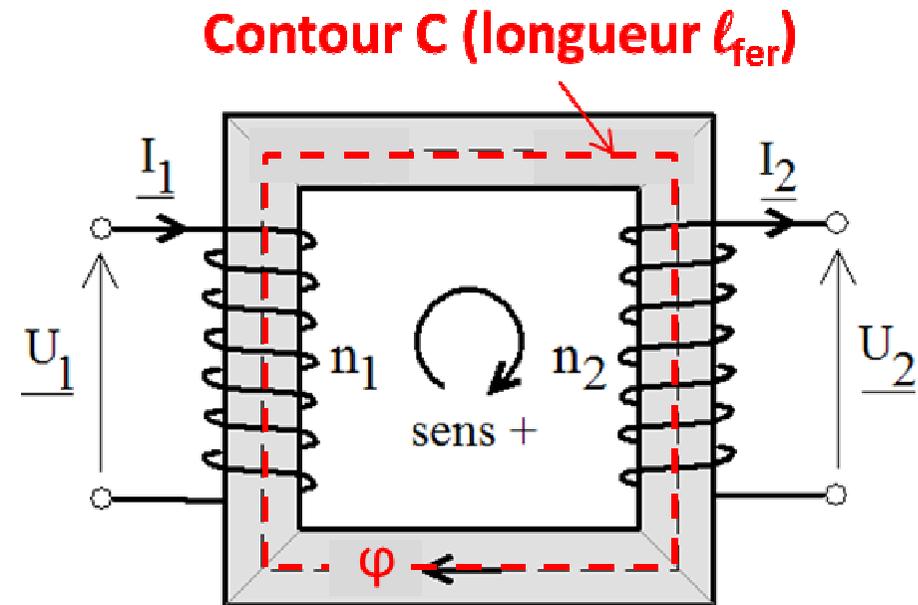


Principe de fonctionnement

- Hypothèse : Fer parfait, courant sinusoïdal ;
- Approche en courant :

- $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$
- $H l_{fer} = n_1 I_1 - n_2 I_2$
- $\mu_r \rightarrow \infty \quad H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \rightarrow 0$
- $n_1 I_1 - n_2 I_2 = 0$

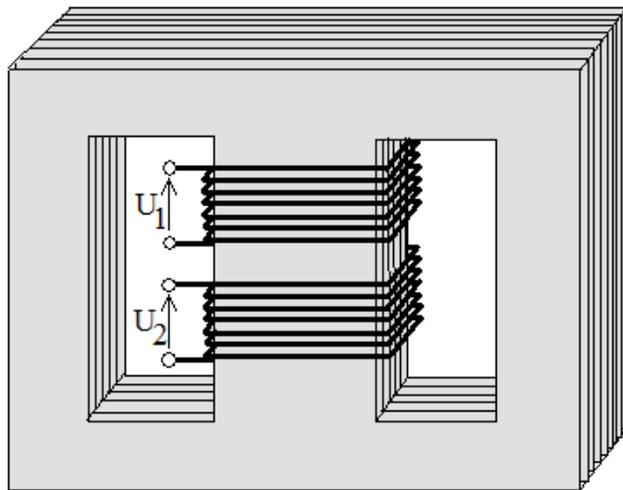
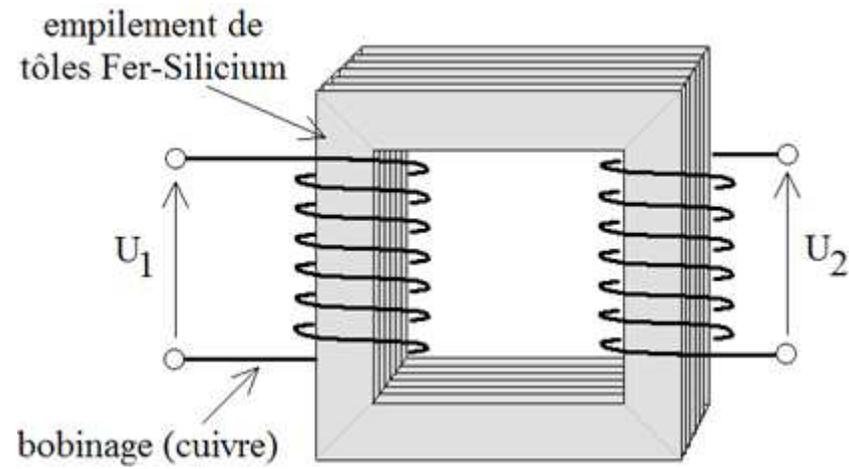
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Imperfection du transformateur

- Même source d'imperfection que la bobine :
- Pertes Joule (ou joules) :
 - Bobinage en cuivre du primaire et du secondaire ;
- Pertes Fer :
 - Variation de champ dans le fer : Hystérésis, Courant induit ;
- Fuites magnétiques :
 - Toutes les lignes de champ ne sont pas canalisées dans le fer.

Constitution

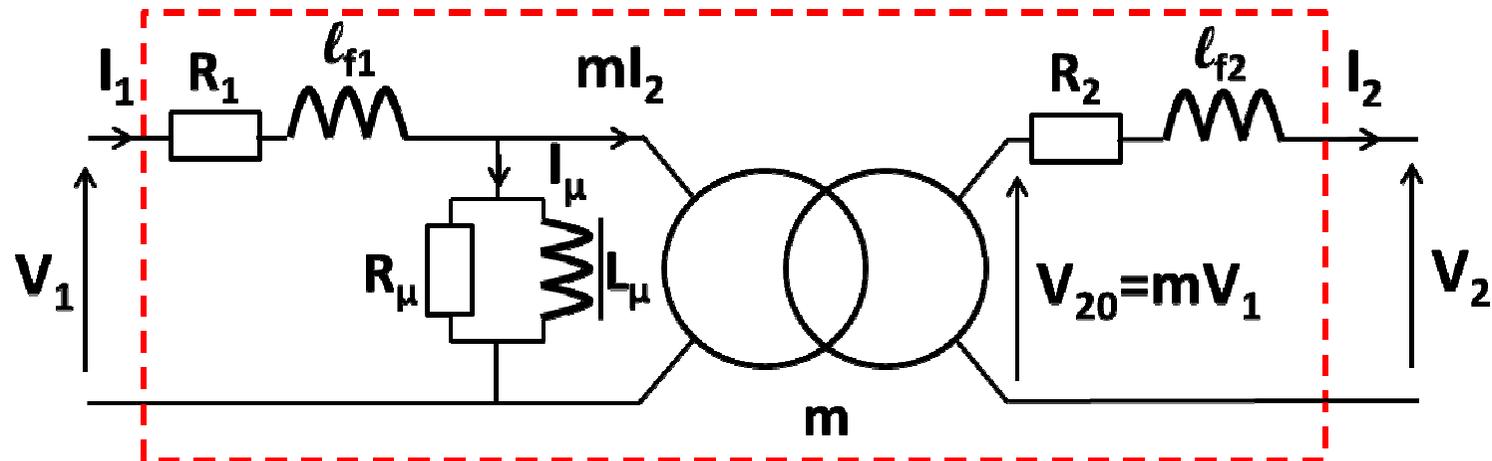


Modèle d'un Transformateur

- Qu'est un modèle ?
 - Circuit électrique qui permet de simuler le comportement réel d'un objet ;
- Intérêt de trouver les paramètres d'un modèle ?
 - Possibilité d'obtenir ces paramètres à puissance réduite (10% de la puissance nominale) ;
 - Tester un transformateur de centrale 883 kVA sans avoir une telle puissance à disposition.
- Identification du modèle par deux essais :
 - Essai à vide ;
 - Essai en court-circuit.

Modèle d'un Transformateur

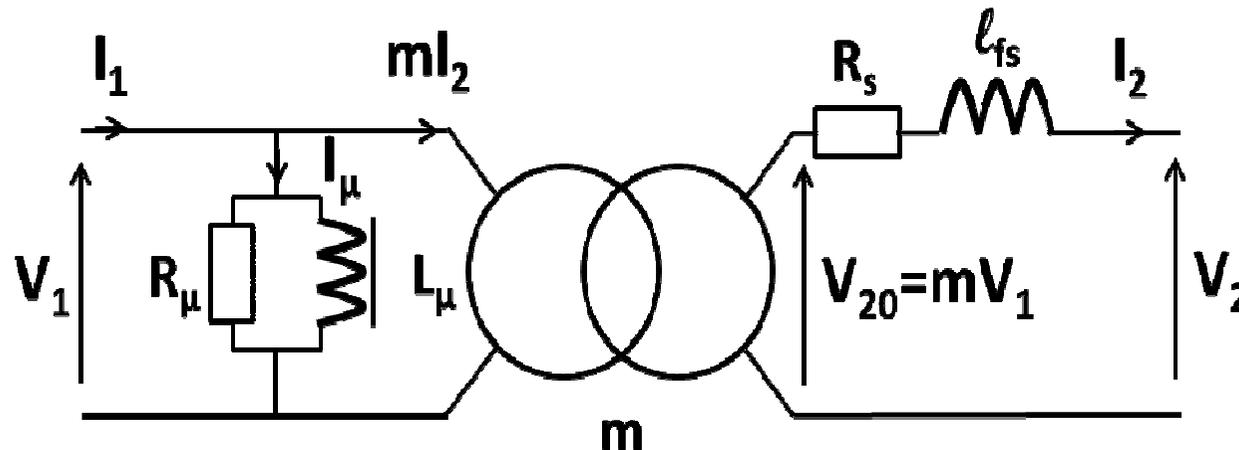
- Modèle de Steinmetz



- R_1 et R_2 : Résistance du bobinage primaire et secondaire ;
- L_{f1} et L_{f2} : Inductance de fuite au primaire et au secondaire ;
- R_μ : Résistance représentant les pertes fers ;
- L_μ : Inductance représentant l'énergie de magnétisation du circuit magnétique.

Modèle du transformateur

- Hypothèse de Kapp :
 - La tension aux bornes de r_{s1} et l_{f1} négligeable devant V_1 .
- Modèle simplifié



- Avec $R_s = R_2 + m^2 R_1$ et $l_{fs} = l_{f2} + m^2 l_{f1}$

Notation

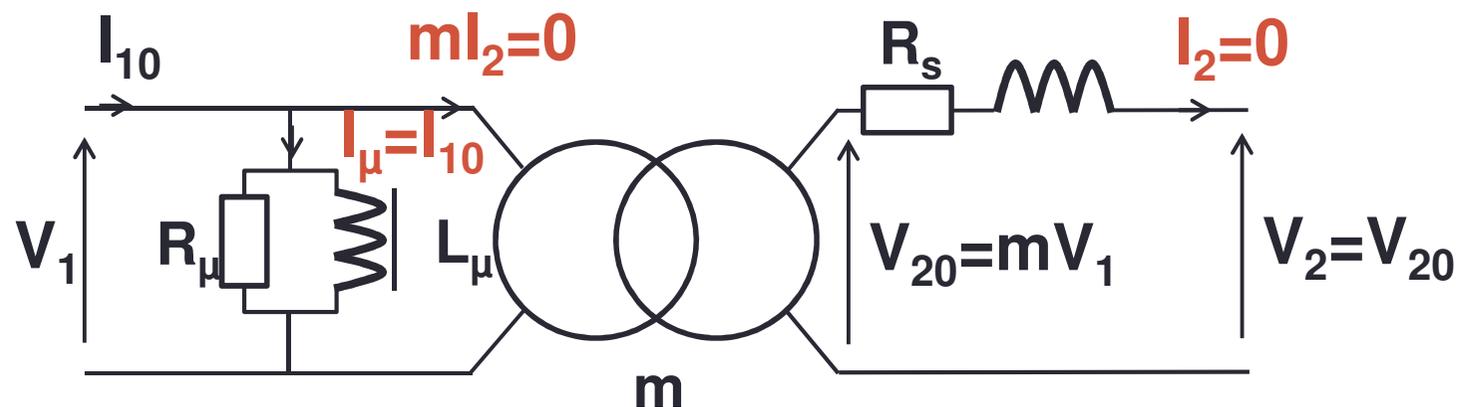
- U_{xy} :
 - $x = 1$ grandeur au primaire ;
 - $x = 2$ grandeur au secondaire ;

 - $y = n$ grandeur nominale ;
 - $y = 0$ grandeur à vide ;
 - $y = cc$ grandeur en court-circuit.

- Exemple I_{1CC} : Courant au primaire en court-circuit

Essai à vide

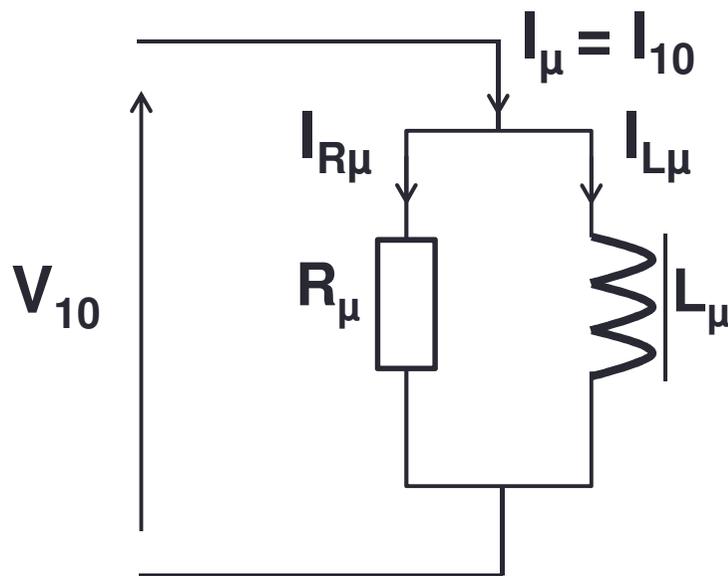
- Essai à vide : pas de charge en sortie.



- Paramètres déductibles :
 - R_μ : Résistance représentant les pertes fers ;
 - L_μ : Inductance représentant l'aimantation du circuit magnétique ;
 - m : Rapport de transformation.

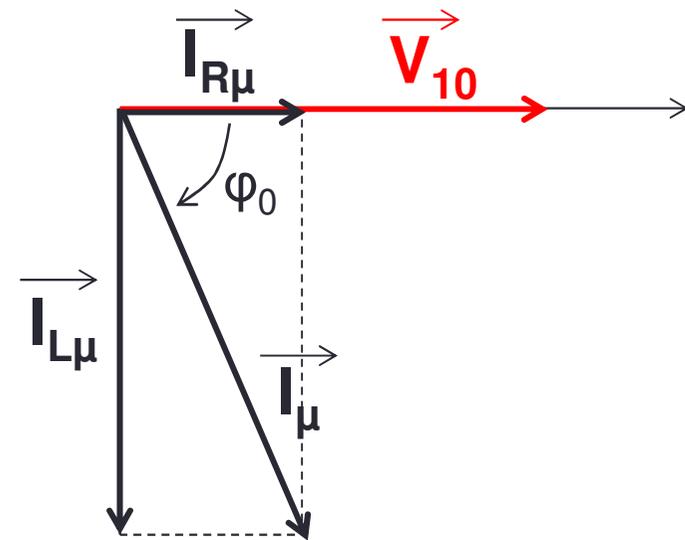
Essai à vide

Schéma équivalent



- $R_{\mu} = \frac{V_{10}}{I_{R\mu}}$ et $L_{\mu} = \frac{V_{10}}{I_{L\mu}\omega}$

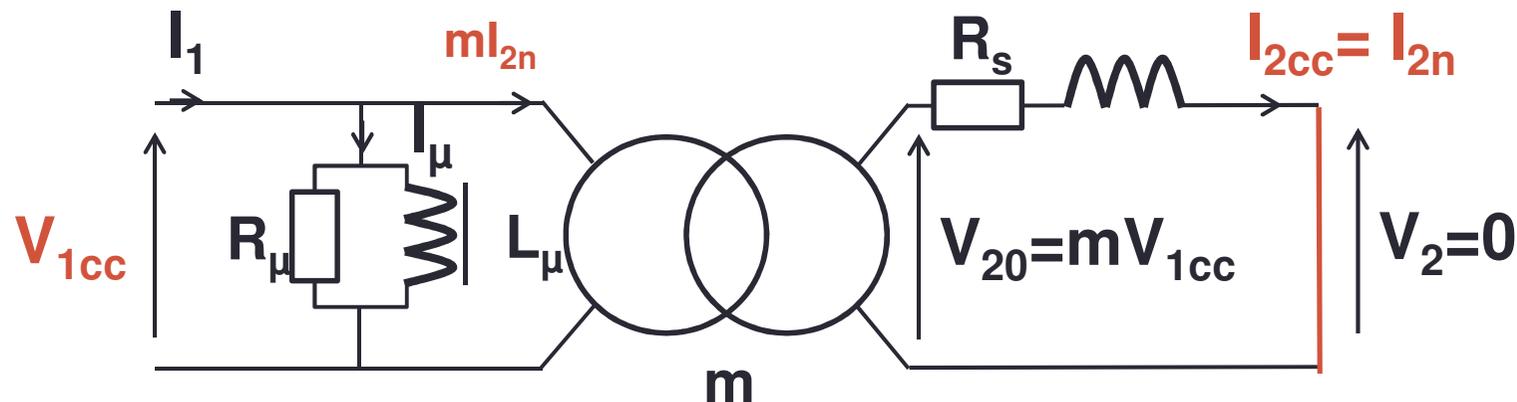
Diagramme de Fresnel



- $I_{R\mu} = I_{\mu} \sin \varphi_0$
- $I_{L\mu} = I_{\mu} \cos \varphi_0$

Essai en court-circuit

- Réalisé sous **tension réduite** $V_{1cc} \cong 5 \text{ à } 10 \% \text{ de } V_{1n}$;
- Régler V_{1cc} pour $I_{2cc} = I_{2n}$;

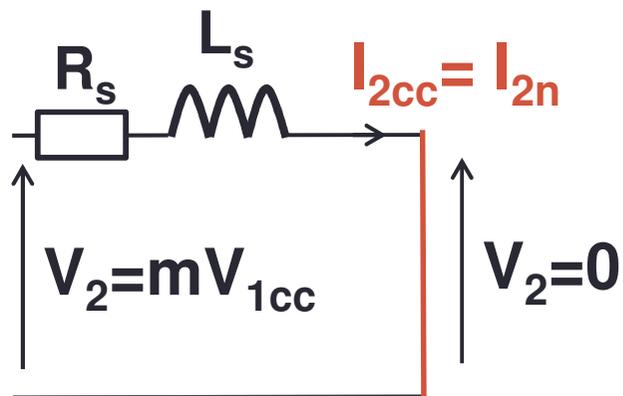


- Comme $V_{1cc} \ll V_{1n}$ alors $I_\mu \ll ml_{2n}$
- Paramètres déductibles :
 - R_s ;
 - L_s .

Essai en court-circuit

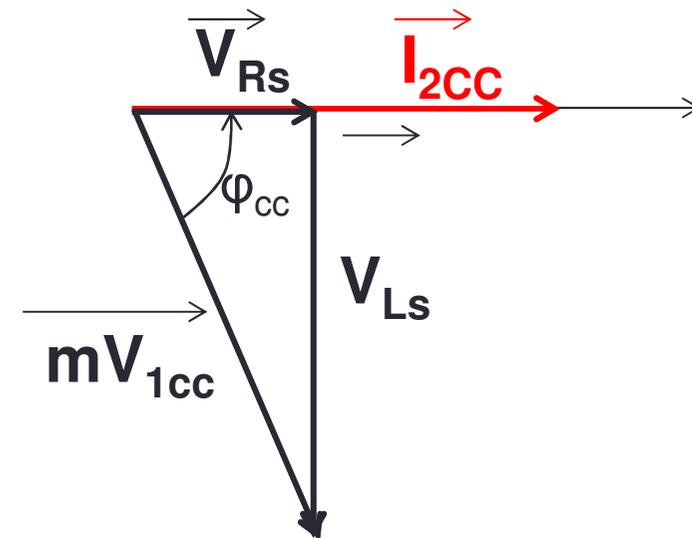
Schéma équivalent

- Circuit R et L série



- $\tan \varphi_{cc} = \frac{L_s \omega}{R_s}$

Diagramme de Fresnel



- $\sqrt{R_s^2 + (L_s \omega)^2} = \frac{mV_{1cc}}{I_{2cc}}$

Autre méthode de calcul des paramètres du modèle

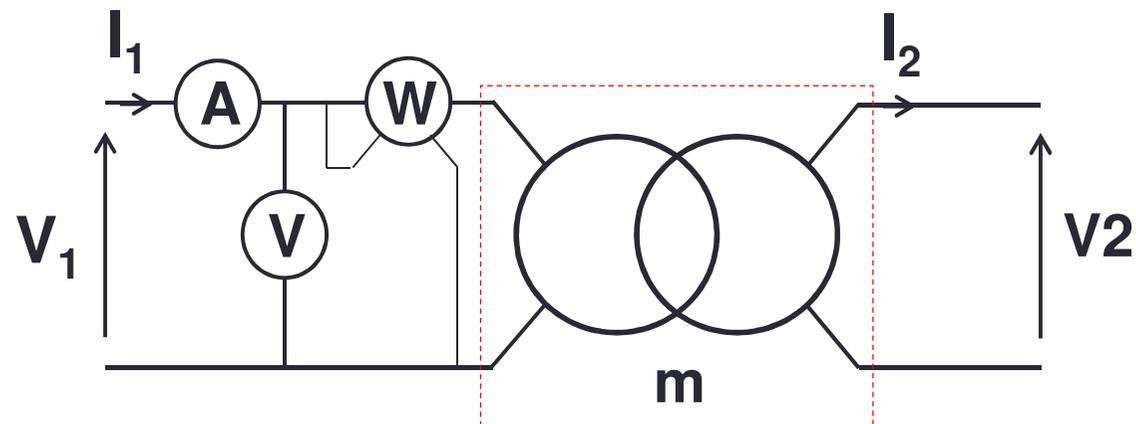
- Utilisation des puissances.
- Rappel :
 - Puissance active (W) : $P = UI \cos \varphi$;
 - Puissance réactive (Var) : $Q = UI \sin \varphi$;
 - Puissance apparente (VA) : $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$

	P (W)	Q (Var)
Résistance	>0	0
Inductance	0	>0
Condensateur	0	<0

- Résistance consomme puissance active ;
- Inductance consomme puissance réactive.

Essai avec mesure de Puissance

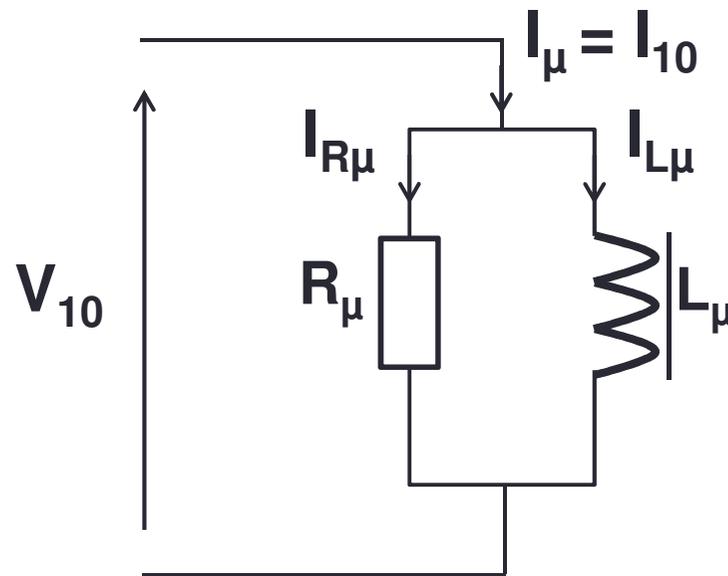
- Schéma de câblage avec Wattmètre:



- Même type d'essai :
 - Essai à vide ;
 - Essai en court-circuit ;

Essai avec mesure de puissance

Essai à vide



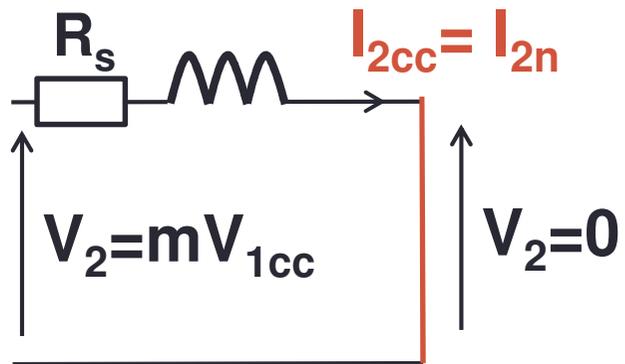
Mesures du Wattmètre

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

- $Q_{10} = \frac{V_{10}^2}{L_{\mu}\omega}$

Essai avec mesure de puissance

Essai en court-circuit



Mesures du Wattmètre

- $P_{cc} = R_s I_{2cc}^2$
- $Q_{cc} = L_s \omega I_{2cc}^2$

Utilisation du modèle

- Connaissant :
 - La tension primaire (amplitude et fréquence) ;
 - Impédance de la charge.
- Grâce au modèle il est possible d'obtenir :
 - Tension et courant au secondaire ;
 - Courant du primaire ;
 - Pertes fers ;
 - Pertes Joule ;
 - Rendement.