



مكتبة الطلبة

3^{ème} ST

Electromécanique

Machine électrique

Chapitre 01

Le circuit magnétique

Pr: zine bachir

90DA

2019/2018

$$\vec{U}_{AB} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot \cos(\omega t)$$

$$\vec{U}_{BC} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot \cos(\omega t + \frac{\pi}{3})$$

$$\vec{U}_{CA} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot \cos(\omega t - \frac{\pi}{3})$$

I - Matériaux et circuits magnétiques

I-1 - classification des matériaux de point de vue magnétique :

toutes les matériaux (milieux) ont des propriétés magnétiques mis en présence d'un champ magnétique \vec{H} , ils sont le siège d'une induction \vec{B}

Remarque : _____

\vec{B} , \vec{H} sont parallèles dans le vide.

on sait que d'après le cours de physique que "le vide" a une perméabilité magnétique non nulle [$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.] et on a écrit dans ce

cours sa loi constitutive sous forme $\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H}$

pour les autres milieux de l'espace, on suppose qu'on pourrait aussi écrire leur loi constitutive sous une forme similaire $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$ en introduisant leur perméabilité magnétique μ .

En fait compte tenu que les vecteurs \vec{B} et \vec{H} ne

sont pas toujours parallèles, il est plus précise de caractériser un milieu de point de vue magnétique par son "vecteur d'aimantation \vec{J} " réglé au champ \vec{H} par la relation $\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}$

χ = "Kapp : susceptibilité magnétique du milieu"

. Leur les matériaux magnétiques dites "parfaits"

en considérant alors qu'un milieu se "superpose" au vide, on écrit sa loi constitutive sous la

forme : $\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J})$

$$= \mu_0 (1 + \chi) \cdot \vec{H}$$

soit en posant $\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \Rightarrow \vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$

on voit que "la perméabilité relative d'un matériau"

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi$$

en fonction de leur (χ = susceptibilité magnétique)

en distingue :

1) les matériaux dits : "paramagnétique" caractérisé par une χ constante positivement, et très faibles et positive [le même sens que le champ extérieur] (3)

Exp:

- L'air ($\chi = +3,5 \cdot 10^{-5}$).

- oxygène O_2 ($\chi = +2 \cdot 10^{-5}$).

- Al - le platine (pt).

b) Les matériaux dits "diamagnétiques"

qu'ils ont une χ négative pratiquement constante et très faible. [sens inverse de champ extérieur]

Exp:

- L'eau ($\chi = -9 \cdot 10^{-6}$)

- le Bismuth Bi, ($\chi = -1,5 \times 10^{-4}$).

- le Cuivre Cu.

c) Les matériaux dits "ferromagnétiques"

qu'ils ont une χ extrêmement grande et variable,

ces matériaux sont assez rares mais très importants en électrotechnique, ce sont :

- le fer Fe et la magnétite (Fe_3O_4)

- le cobalt Co.

- le nickel Ni.

- certains de leurs alliages (aciers feronickel, ferrites).

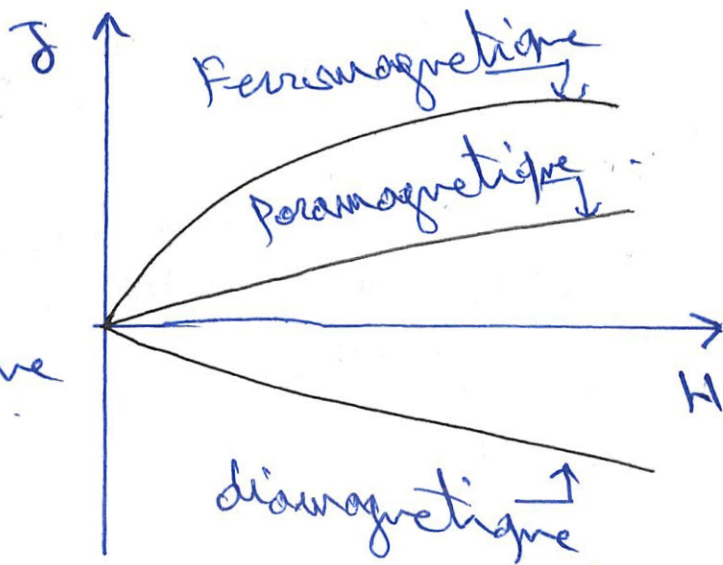
- la courbe ci-contre représente la courbe d'aimantation ($\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}$).

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{J} + \vec{H})$$

$$= \mu_0 (1 + \chi) \cdot \vec{H}$$

μ : perméabilité magnétique absolue.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$



- pour les électrotechniciens la classification donne deux groupes :

- les matériaux amagnétiques (qui non ferromagnétique) qui ne s'aimantent pas et qui ont une

$$1 + \chi \approx 1$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} =$$

les matériaux ferromagnétiques (qui s'aimantent d'une façon importante).

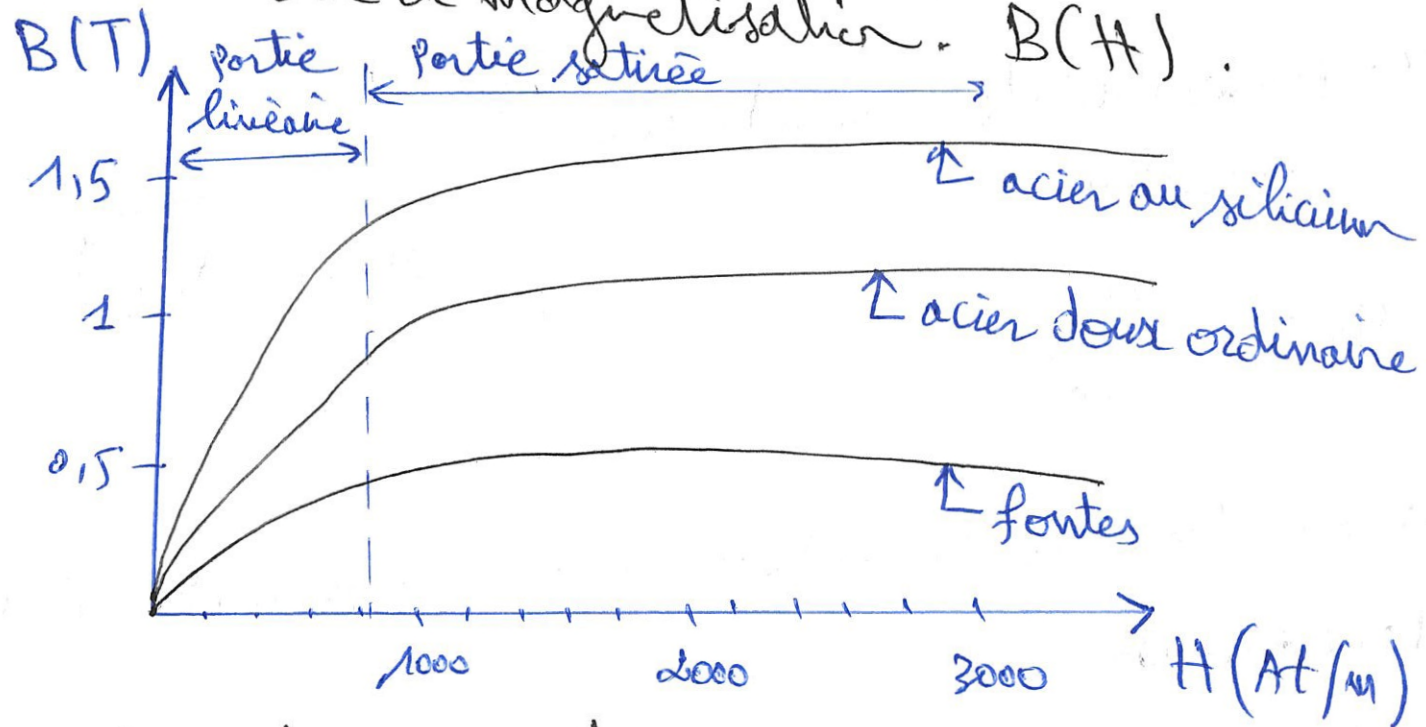
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi = \chi$$

μ_r - des matériaux ferromagnétiques atteignent couramment des valeurs de l'ordre de 5000

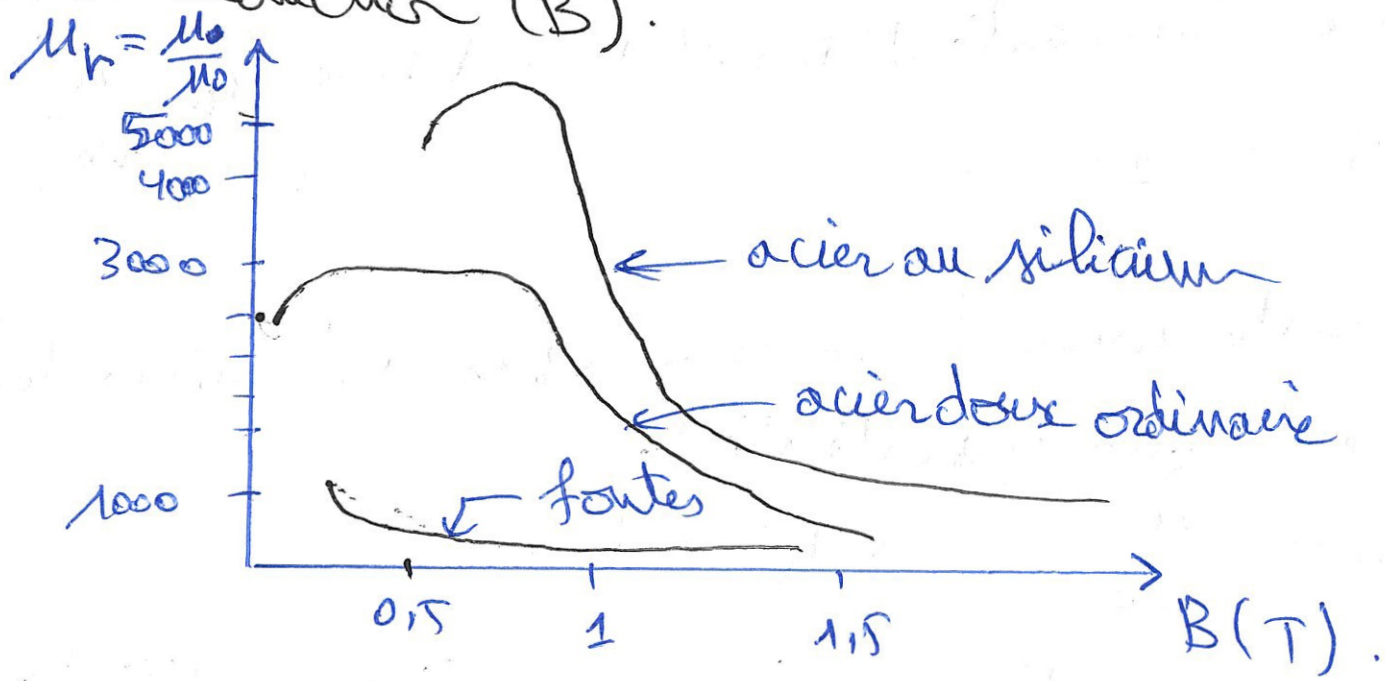
I-2 - Données numériques.

Les propriétés d'un matériau ferromagnétique sont généralement représentées par sa "courbe de magnétisation", $B(H)$, (ou $\phi(Mi)$)

Exp : Courbe de magnétisation. $B(H)$.



• Perméabilité magnétique relative en fonction de l'induction (B).



- Par exemple l'acier doux, $\mu_{r_{max}} = 2200$, $B = 0,13T$

$$H \approx \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = 110 A/m.$$

- pour l'acier au silicium :

$$\mu_{r_{max}} = 5200, B = 0,4T, H \approx 60 A/m.$$

- Rq :

certain matériaux ont des perméabilités relatives maximales extrêmement élevées, par exemple :

- Fer électrolytique - $\mu_{r_{max}} = 15000$

- Ferronickels - $\mu_{r_{max}} = 80000$.

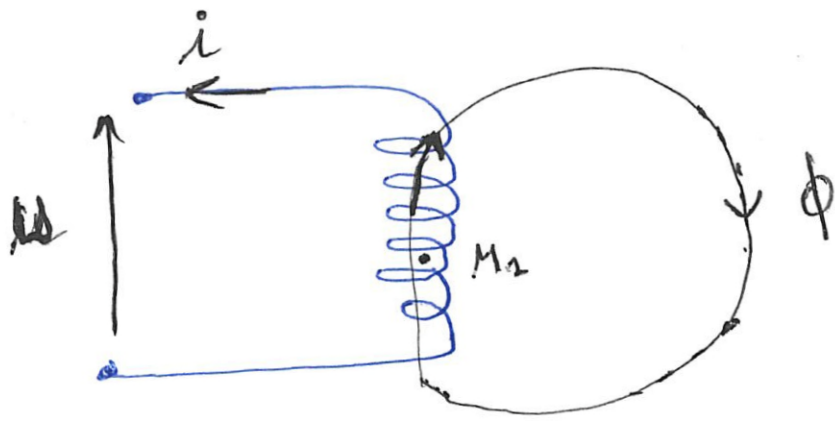
E-3) L'importance des matériaux ferromagnétiques en électrotechnique.

Proviens du fait qu'ils sont capables de, grâce à leur perméabilité μ , très élevée : de canaliser et de capter en leur sein (à l'intérieur) le flux magnétique de toute induction due à des courants situés dans leur voisinage et en particulier en rôles autour d'eux.

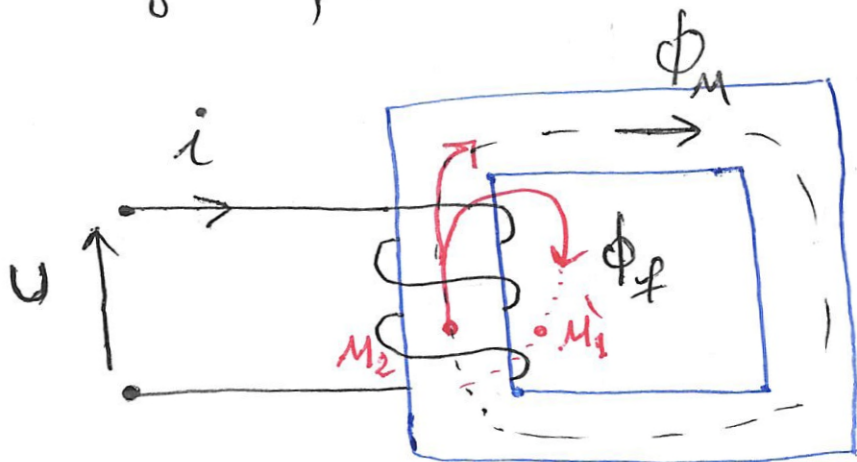
* Deux situations possibles :

1) circuit électrique bobiné dans l'air

(7)



b) circuit électrique bobiné autour d'un noyau de Fer Ferromagnétique.



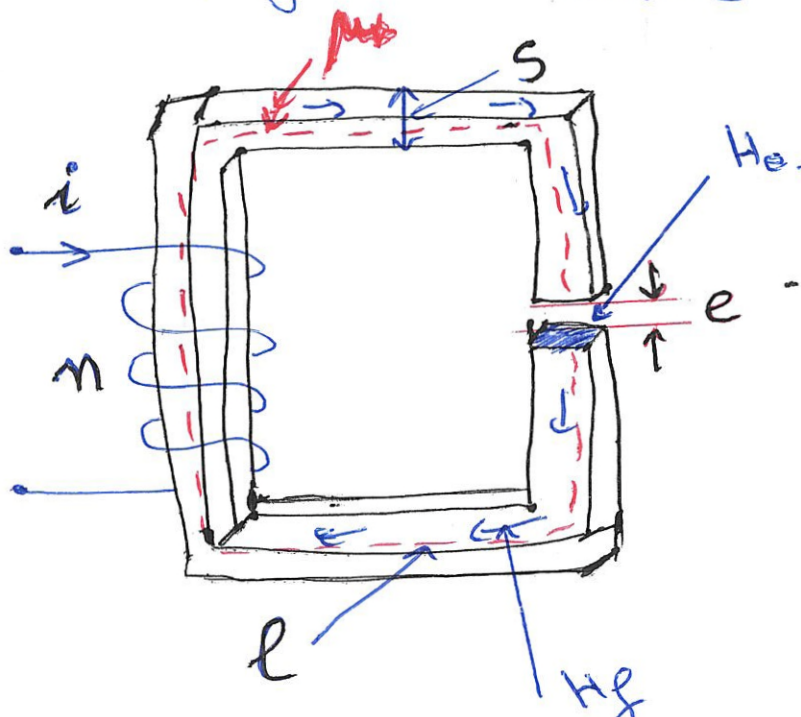
- Dans les deux cas le champs H aux point M_1 et M_2 sont du même ordre ($H \cdot l = n \cdot I$) de grandeur.
- Mais considérons l'induction =
 - En un point tels que M_2 ou M_1 dans l'air elle vaut = $B = \mu_0 \cdot H$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$
 - En un point M_2 à l'intérieur du noyau elle vaut: $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

c.à.d, qu'elle est μ_r fois plus grande compte tenu que μ_r atteint facilement des valeurs de 1000

en sorte que le flux d'induction dans l'air est environ 1000 fois plus faible que le flux de l'induction dans le matériau. pratiquement on pourra donc considérer que la plus grande partie du flux est canalisée dans le noyau.

I-4) **Création de champ magnétique dans des entrefer** [l'air, matériau non magnétique]
 Une autre application des matériaux Ferromagnétique due à leur aptitude à capter le flux, est la possibilité de créer des champs magnétique important dans des "entrefer".

- Considérons un noyau ferromagnétique, comme l'indique sur la figure ci-contre :



S : la section constante.

l : longueur moyenne dans le fer.

e : épaisseur de l'entrefer.

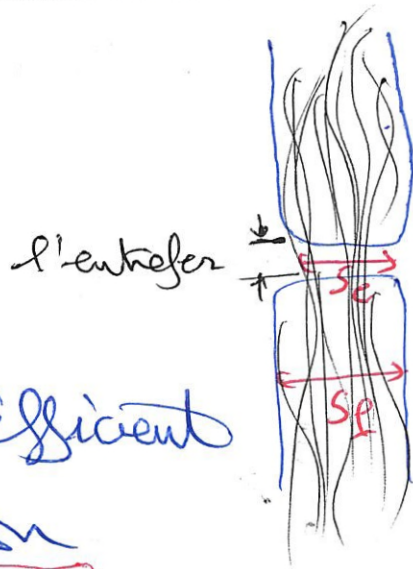
μ_r : la perméabilité magnétique relative des matériaux.

on suppose que μ_r du matériau est constante.

Le long de la ligne d'induction " μ ", le champ magnétique prend deux valeurs différents tels que [d'après le

Théorème d'Ampère $\int \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = \sum i$

$$\Rightarrow H_f \cdot l_f + H_e \cdot e = n \cdot i \quad \dots (1)$$

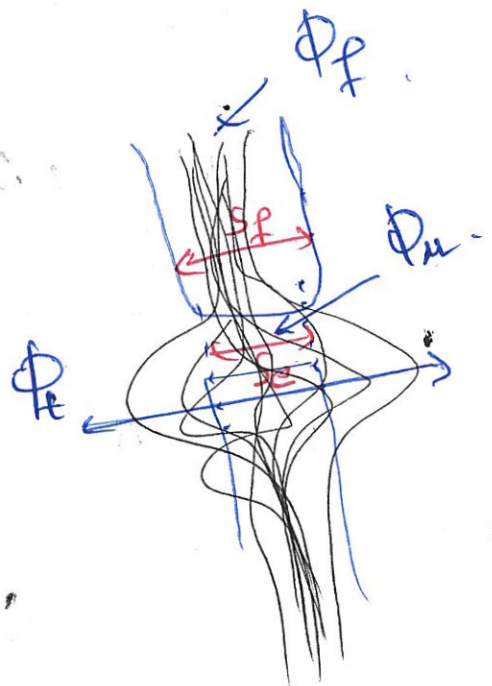


$$S_f = S_e$$

$$\Phi_f = \Phi_e$$

ona le coefficient d'Hopkinson

$$\sigma = \frac{\Phi_t}{\Phi_u}$$



Par ailleurs, si on suppose que le flux se conserve dans l'espace du noyau [y compris d'entrefer [$\mu = 1$]] l'induction $B = \frac{\phi}{S}$ est la même dans le fer et dans l'entrefer $B_f = B_e$, d'où :

$$\mu_0 \mu_r \cdot H_f = \mu_0 \cdot H_e \quad \dots \quad (2)$$

- les relations (1) et (2) permettent de calculer les champs :

$$H_f = \frac{n \cdot i}{l + \mu_r \cdot e}$$

$$H_e = \mu_r \cdot \frac{n \cdot i}{l + \mu_r \cdot e}$$

I-5) calcul des circuits magnétiques :

Le calcul d'un circuit magnétique signifie la détermination de la f.m.m. nécessaire pour produire un flux donné dans une partie de la carcasse.

ou encore, la détermination du flux qui y est produit par une f.m.m. donnée.

En général les dimensions géométriques des circuits sont données, ainsi que la nature du matériau, c.à.d sa courbe de magnétisation soit sous la forme

$$B = f(H), \quad \mu_r = f(B), \quad \phi = f(Mi)$$

I. 5.1) 1^{re} catégorie de calcul (problème direct).

- Connaissant ϕ , calculer $Mi = f.m.m.$?
(Ampères-tours).

- pour calculer les $f.m.m$ à partir du flux, le principe de calcul est de déduire successivement :

a) les inductions dans les diverses parties du circuit.

$$B_1 = \frac{\phi}{S_1}, \quad B_2 = \frac{\phi}{S_2} \dots$$

B) le champ à partir des inductions soit par la relation connue $B = f(H)$ (dans le matériau)

soit par $H = \frac{B}{\mu_0}$ (dans l'entrefer)

c) les ampères-tours partiels :

$$H_1 \cdot l_1, H_2 \cdot l_2, H_3 \cdot l_3 \dots$$

(- 2) si le circuit ne comporte qu'une maille :

la $f.m.m$ total sera égale à la somme des Ampères-tours partiels. $Mi = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 \dots$

Exp :

c-2) si le circuit étudié comporte plusieurs mailles :

La f.m.m totale sera en core calculée à partir des ampères - tours partiels, en faisant le calcul de branche en branche à partir du flux qui est donné.

Il est alors intéressant d'introduire le "potentiel magnétique" \mathcal{M} qui est comme à plusieurs branches.

Exp :

I.S. 2) 2^{ème} catégorie de calcul (problème inverse)
- Connaissant \mathcal{M}_i , calculer $\phi = ?$

Cette 2^{ème} catégorie de problème est plus délicate
En effet, il semble impossible de déterminer un flux à partir d'une relation du type $\mathcal{M}_i = (R_1 + R_2 + \dots) \phi$

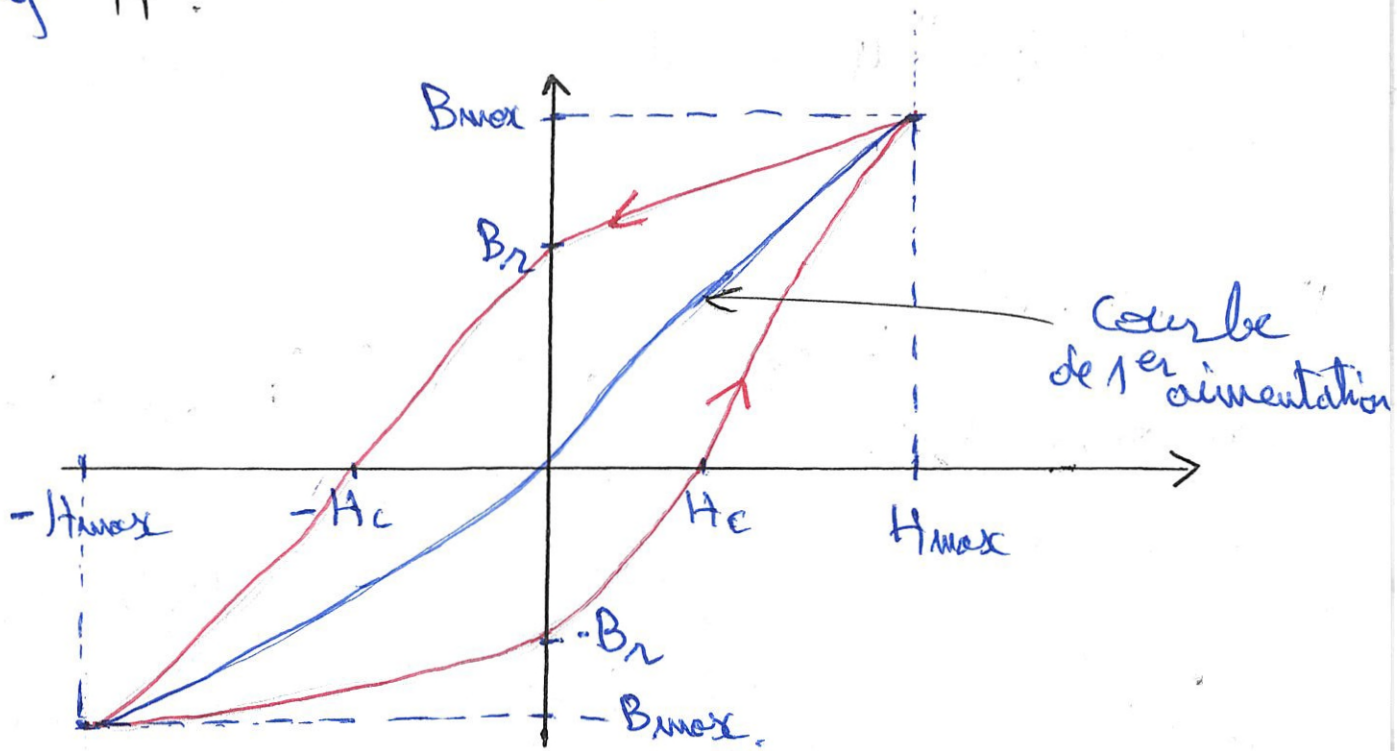
$R = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}$: la réluctance magnétique.

il faut alors résoudre le problème par approximation successives (ou par itération)

Exp :

I-6) phénomène d'hystérésis :

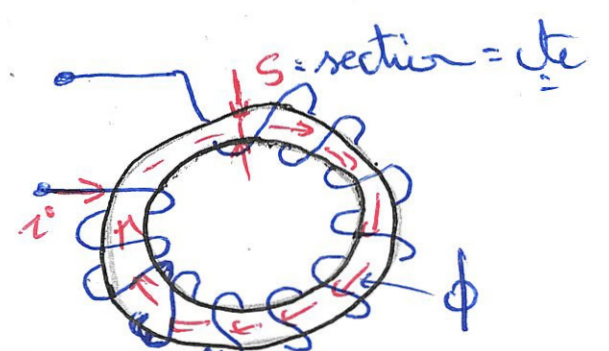
Lorsqu'on soumet un matériau ferromagnétique à un champ alternatif (variant entre deux valeurs opposées, avec une certaine fréquence) il se produit un "phénomène dit hystérésis" qui se manifeste sous forme d'un retard de variation de B (induction) par rapport aux variations du champ H .



B_r = induction rémanente

H_c = Force (champ magnétique) coercitive

I-7) Formule de Boucherot :



* la force électromotrice induite (F.é.m) pour un flux sinusoïdal:

$$\text{Soit } \phi(t) = \phi_{\text{max}} \cdot \sin(\omega t)$$

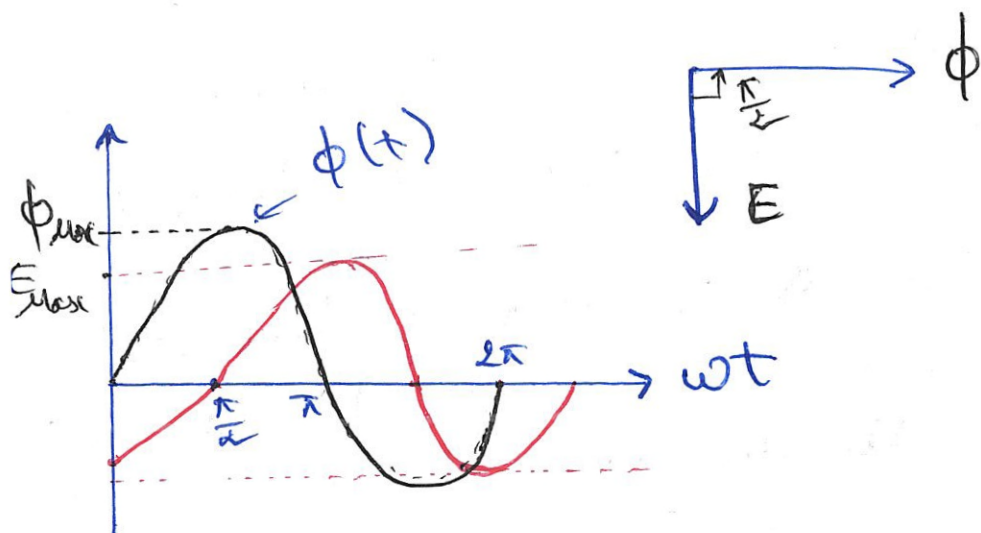
aux bornes d'une spire $e_1 = \frac{-d\phi}{dt}$ (loi de Lenz)
pour l'ensemble de la bobine:

$$e = N \cdot e_1 = -N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$

$$e = -N \cdot \frac{d\phi}{dt} = -N \phi_{\text{max}} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)$$

$$e = N \cdot \phi_{\text{max}} \cdot \omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \left[\sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) = \cos(\alpha) \right]$$

- Représentation vectorielle:



- l'inductance $B = ?$

$$B = \frac{\phi}{S} = \frac{\phi_{\text{max}} \cdot \cos(\omega t)}{S}$$

$$B = B_{\text{max}} \cdot \cos(\omega t)$$

- valeur efficace de la f. é. m. induite :

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{N \cdot \Phi_{\max} \cdot \omega}{\sqrt{2}} = \frac{N \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_{\max}}{\sqrt{2}}$$

$$\Rightarrow E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot \Phi_{\max}$$

$$\left[\begin{array}{l} f = [\text{Hz}] \\ \Phi = [\text{wb}] \end{array} \right]$$

$$E = 4,44 \cdot N \cdot f \cdot S \cdot B_{\max}$$

$$\left[\begin{array}{l} S = [\text{m}^2] \\ B = [\text{T}] \\ f = [\text{Hz}] \end{array} \right]$$

I-8) les pertes dans le fer (P_{fer}).

Les pertes dans le fer d'un circuit magnétique à courant alternatif sont de deux types =

I-8-1 -) pertes par hystérésis (P_H):

lorsqu'un matériau magnétique est soumis à une induction variable, il décrit des cycles d'hystérésis.

Les pertes qui en résultent sont proportionnelles à l'aire du cycle ou nombre de cycle d'écrans et au volume du matériau, dans le cas où le phénomène est périodique les pertes peuvent être calculer par la formule de "Steinmetz"

$$P_H = k_1 \cdot V \cdot f \cdot B_{\max}^n$$

$V = [m^3]$: volume de matériau

$f = [Hz]$: fréquence.

$B_{max} = [T]$.

$P_H = [watt]$.

k_2 = le coefficient est déterminé expérimentalement sur un échantillon

$n = 2$: pour les tôles.

$n = 1,6$: pour un matériau massif.

I.8.2) pertes par courant de Foucault : (P_F):

Les courants de Foucault sont les courants induits dans les masses métalliques qui subissent l'action d'un champ variable. Pour une induction ~~variable~~ périodique la perte créée peut être traduite par la formule suivante :

$$P_F = k_2 \cdot V \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 \Rightarrow \left[\begin{array}{l} \text{pour le matériau} \\ \text{massif} \end{array} \right]$$

$$P_F = k_2 \cdot V \cdot f^2 \cdot e^2 \cdot B_{max}^2 \left[\begin{array}{l} \text{pour les matériaux} \\ \text{feuilletés (tôles)} \end{array} \right]$$

[e : épaisseur des tôles [m]]