

Chap 18 : Moléculs Ferromagnétiques et Transformateur

A° / Milieux ferromagnétiques

I. Eq de Maxwell ds un milieu magnétique ds PARQS

1° Une nulle source du chp $\vec{B}$: chp d'aimantat° et courant d'aimantat°.

∃ des dipôles mag ds la matière avec des boucles de courant microscopiques.

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dV} \rightarrow \text{densité vol de moments mag}$$

C'est le vecteur aimantat°.

$$[\vec{M}] = \frac{A \cdot m^1}{m^3} = A \cdot m^{-1}$$

On distingue 2 sources de $\vec{B}$:

° $\vec{J}_{Pibres}$: courant de conduct° élec des porteurs de charges Pibres (e^- ds les conducteurs)

° $\vec{J}_{P.e}$: courant d'aimantat° associé aux porteurs P.e.s (ou maillon des atomes $\rightarrow$ au matériau)

On admet $\vec{J}_{P.e} = \nabla \times \vec{M}$

$$MA \Rightarrow \nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_{Pibres} + \vec{J}_{P.e})$$

Rq° En réalité, les moments magnétiques résultent de moments mag de spin et de moments cinétiques des e^- ds les orbitales quantiques.

2° Eq de MA et introduct° de l'excitat° magnétique $\vec{H}$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 (\vec{J}_{Pibres} + \nabla \times \vec{H})$$

$$\Leftrightarrow \nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} \right) = \vec{J}_{Pibres}$$

$$MA : \nabla \times \vec{H} = \vec{J}_{Pibres} \quad \heartsuit \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \text{ou} \quad \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

source de $\vec{H}$ c'est les courants Pibres

Unité° : $[\vec{H}] = [\vec{M}] = A \cdot m^{-1}$

3° Théorème d'Ampère ds les milieux mag : forme intégrale

$$\iint_S \nabla \times \vec{H} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{J}_{Pibres} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{P} = I_{enlacee} \quad \heartsuit$$

$\vec{H}$ est un vecteur axial (ou pseudo-vect) avec les m ptes de symétrie que notre $\vec{B}$ magnétostatique.

4° Conservat° du flux magnétique et loi de Faraday

° $\text{div } \vec{B} = 0 \rightarrow$ le flux de $\vec{B}$ est conservatif

° $\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ indongée, $e = - \frac{d\phi}{dt}$ loi de Faraday

Rq° $\text{div } \vec{E} = \rho = 0$ car ds un milieu mag neutre
 $\hookrightarrow$ "eq inutile"

II. Milieux magnétiques

Nécessité d'une relat^o constitutive de milieu reliant $\vec{M}$ à $\vec{H}$
(comme on a relat^o $\vec{j}$ et $\vec{E}$: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ pour les conducteurs)

$$\vec{M} = \chi \vec{H} + \text{termes non-linéaires en } H^2, H^3 \dots$$

En bc de χ la susceptibilité magnétique, 3 types de milieu

1° - Milieux diamagnétique et paramagnétique

IP n'existe pas de $\vec{M}$ résultant sans excitat^o magnétique
si $\vec{H} = \vec{0}$

(Agitat^o thermique distribue aléatoirement les directions $\vec{m}_i$
et $\sum \vec{m}_i \Rightarrow \vec{M} = \vec{0}$)

Leur rep magnétique est faible $|\chi| \ll 1$.

- Milieu diamagnétique : $\vec{M} = \chi \vec{H}$ avec $\chi < 0$

signe $\ominus \rightarrow$ l'aimantat^o induite par $\vec{H}$ appliqué s'oppose à la source (Loi de Lenz)

- Milieu paramagnétique : $\vec{M} = \chi \vec{H}$ avec $\chi > 0$

$\hookrightarrow$ alignement des moments mag $\vec{m}_i$ individuels selon le chp appliqué, $\exists$ une aimantat^o $\vec{M}$ globale dans la direction du chp $\rightarrow \chi > 0$.

En ces 2 milieux $|\chi| \ll 1 \Rightarrow \vec{M} \ll \vec{H}$

$\hookrightarrow \vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \Rightarrow \boxed{\vec{B} = \mu_0 \vec{H}}$ ^{comportement d'un milieu non-magnétique}

2° - Milieu ferromagnétique

a) Description : 1^{ère} caractéristique et cycle d'hystérésis

$\rightarrow$ aimantation rémanente

IP peut exister $\vec{M} \neq \vec{0}$ avec $\vec{H} = \vec{0}$.

La rep mag du ferre est forte.

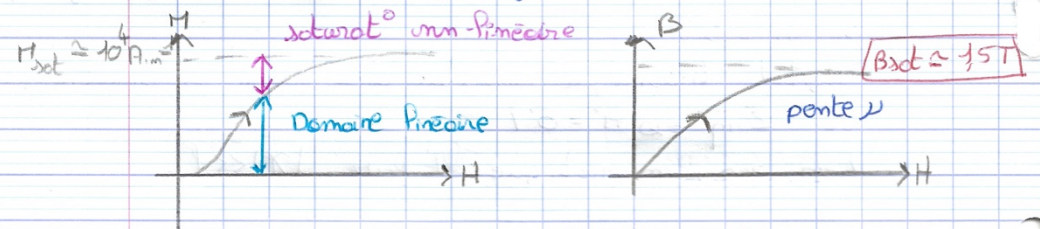
Exple : Aimants, bobine avec noyau de fer

D'un pt de vue quantique, $\exists$ des fortes interactions entre les moments $\vec{m}_i$ individuels.

⚠ $\vec{M} = \chi \vec{H}$ n'est plus forcément linéaire et apparaît d'hystérésis

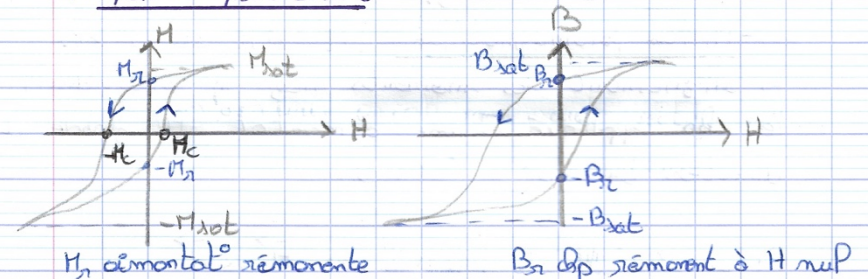
Les milieux ferre sont facilement aimantables (faible H nécessaire).

Initialement milieu démagnétisé : $\vec{M} = \vec{0}$ avec $\vec{H} = \vec{0}$.



Avec $\chi = \frac{M}{H} \gg 1$, $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \approx \mu_0 \vec{M}$ car $H \gg H$

$\rightarrow$ Cycle d'hystérésis :



H_s aimantat^o rémanente

B_r chp rémanent à H nul

H_c aimantat^o coercitive qui permet d'annuler l'aimantat^o

$\rightarrow$ Rémanence qd $H = 0$: $B_r = \mu_0 H_s$

$\rightarrow$ Désaimantat^o (voir doc)

b) Milieux doux et durs

- Ferro dur : cycle large avec $H_c \approx 10^5$ difficile à désaimanter

- Fer doux : cycle étroit, H_c faible $\rightarrow$ transformable

c) Approx linéaire du ferro doux non-saturé : milieu linéaire, homogène et isotrope

♥ $\vec{B} = \mu \vec{H}$, $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$, $\mu = \mu_0 \mu_r$

μ_r : perméabilité relative.

- Air : milieu non-magnétique $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ avec $\mu_r = 1$

- Ferro : $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ avec $\mu_r \approx 10^3 \text{ à } 10^5$

Rq : $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$ milieu linéaire
 $= \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} \Rightarrow \mu_r = 1 + \chi$
 $[\mu] = \text{H} \cdot \text{m}^{-1} = [\mu_0]$

III. 1^{er} exple de circuit mag : circuit torique sans entrefer

Circuit mag eqv du circuit élec qui consistait les lignes de chp de $\vec{j}$ et $\vec{E}$.

Circuit mag : ensemble de pièces ferro reliées, avec ou sans parties non-mag appelées entrefer, qui consistent les lignes de chp $\vec{B}$ (et de $\vec{H}$)

1^{er} Déterminat^o de $\vec{H}$ et de $\vec{B}$

a) Modélisat^o et Hypothèses

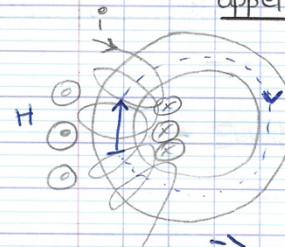
Enroulem^t de N spires parcourues par i autour d'une portion du corps ferro.

$\rightarrow$ Consist^o des lignes de chp : matériau idéal, pas de pertes de flux magnétique.

Section

$\rightarrow$ Géométrie : épaisseur du tore $e \approx \sqrt{S} \ll P$ "périimètre du tore"
 Ainsi B et H st abs sur la section

b) Relat^o entre H et P intensité du courant
 appelé (alim)



Ds cette zone, $\vec{H} = H_0 \vec{e}_\theta$
 consist^o $\Rightarrow \vec{H} = H_0 \vec{e}_\theta$ partout

$\nearrow$ car canaliser
 De $\vec{m}$, $\vec{H}$ indep de θ , $\vec{H}$ ne dep pas de θ et r car uniforme sur une section.

$\oint \vec{H} \cdot d\vec{P} = N i \Leftrightarrow H \times 2\pi R = N i$

$\Leftrightarrow \boxed{\vec{H} = \frac{N i}{P} \vec{e}_\theta} \rightarrow$ excitat^o mag fixée par i , valable en ARQS mag

Rq : Flux magnétique est

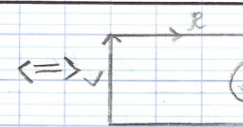
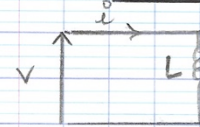


$B_1 S_1 = B_2 S_2$ i.e. $S_1 = S_2 = S$
 dc $B_1(\theta_1) = B_2(\theta_2)$

La sect^o étant cste, B est aussi et indep de θ .

Rq : Ds le cas d'un milieu homogène isotrope, $\vec{B} = \mu \vec{H}$
 dc $\vec{H}$ indep de θ et abs.

c) Relat^o entre B et la tension appliquée

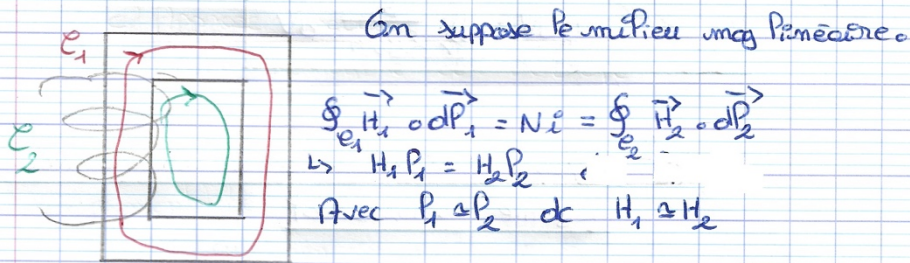


$e = - \frac{d\phi}{dt}$

$V = -e = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d(NBS)}{dt} \Rightarrow \boxed{V = NS \frac{dB}{dt}}$

Rq: On a négligé la résistance de l'enroulement $\approx \Omega$

2° Modélisation des lignes de champ



$$\frac{B_{\text{ferro}}}{\mu_{\text{ferro}}} = \frac{B_{\text{air}}}{\mu_0} = \frac{\mu_0}{\mu_0 \mu_r} = \frac{1}{\mu_r}, \quad \mu_r \approx 10^5$$

$B_{\text{air}} \ll B_{\text{ferro}}, \quad B_{\text{air}} \rightarrow 0$ Les lignes de champ sont confinées car $\mu_r \gg 1$

3° Hypothèse d'un MLHI

a) Inductance propre du circuit

$\Phi_p = L_i I$ dc $L_i = NBS = N_p HS = \frac{N_p N_p S}{P} \Rightarrow L = \mu_r \frac{N^2 S}{P}$
 Et la bobine "à air" vide,
 $L_{\text{air}} = \frac{\mu_0 N^2 S}{P}$

Ici l'inductance est multipliée par μ_r !

b) Énergie emmagasinée

$U_m = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \frac{N^2 S}{P} I^2$ *volume = PS*
 $= \frac{1}{2} \frac{L}{SP} I^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_r N^2 S}{SP^2} \left(\frac{HP}{N} \right)^2$
densité d'énergie

$\hookrightarrow U_m = \frac{1}{2} \mu H^2$ dep de B car $H = \frac{B}{\mu}$

$$U_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r}$$

On le voit $\frac{B^2}{\mu_0} \xrightarrow[\text{mag}]{\text{milieu}} \frac{B^2}{2\mu_0 \mu_r}$

$$U_m = \iiint_V u_m dV = \iiint_V \frac{B^2}{2\mu_0 \mu_r} dV$$

4° Effets dissipatifs du circuit mag en régime sinusoïdal

a) Les pertes Fer

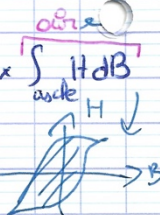
→ Pertes par hystérésis: En régime @, la tension V appliquée est sinusoïdale dc $B(t)$ est sinusoïdale. Par contre, le cycle d'hystérésis impose des non-linéarités $\Rightarrow$ Il sera non-linéaire, et le courant appelé.

Évaluons la puissance absorbée par l'enroulement:

$P(t) = V i = NS \frac{dB}{dt} \times \frac{HP}{N} = NH \frac{dB}{dt}$

$P_v = H \frac{dB}{dt}, \quad \langle P_v \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = B \int_0^T H \frac{dB}{dt} dt = B \times \int_{\text{cycle}} H dB$

$\langle P_v \rangle = B \times \text{aire}_{\text{cycle}}$



L'aire du cycle représente la densité d'énergie perdue en une période ss forme de dissipat° thermique. En limitant ces pertes, on choisira un fer doux (cas du transformateur).

Rq: $P_{\text{hystérésis}} \propto B_{\text{max}}^2$ pour fer doux, sinon B_{max}^3

→ Pertes par courant de Foucault :

$$e = - \frac{dd}{dt} \rightarrow \text{induct}^{\circ} \text{ Neumann}$$

↳ courants induits ds le milieu conducteur (exple : fer)

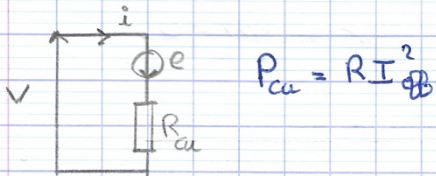
$$P_{\text{courants Foucault}} \propto B^2 B_{\text{max}}'$$

On limite P_{Foucault} :

- Laminage
- ARte freq, utilisat^o d'oxyde fer ferrite (isolant mais magnétique)
- Travailler à basse freq

b) Les pertes cuivre

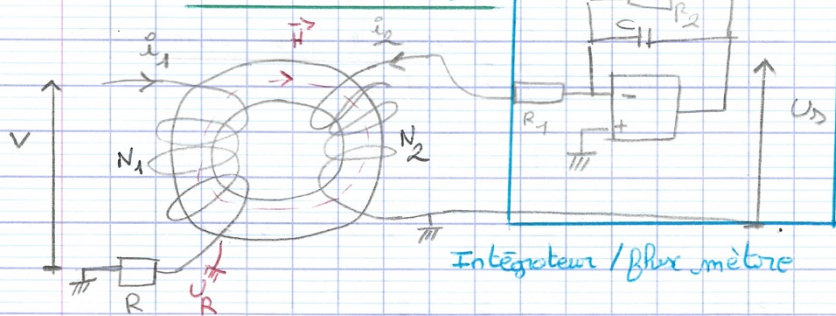
↳ effet Joule car résistance des bobines $\approx 10 \Omega$



$$P_{cu} = RI^2$$

5° - Relevé expérimental de la caractéristique

$B(H)$ du matériau



↳ Mesure de l'excitat^o H :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{P} = HP = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

Règles : R_1 élevé $\Rightarrow i_2$ faible, $N_2 \ll N_1$ ainsi $N_2 i_2 \ll N_1 i_1$

$$HP \approx N_1 i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{HP}{N_1}$$

$$U_R = R i_1 \Rightarrow U_R = \frac{RPH}{N_1} \quad \text{courant = image de H}$$

→ Mesure de B :

$$U_2 = -e_2 = \frac{dd}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}$$

Montage pseudo-intégrateur

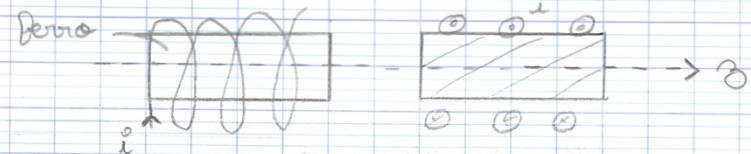
$$\text{avec } U_3(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int U_2 dt \quad \text{à freq } \omega \gg RC$$

$$dc \quad U_3(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int N_2 S \frac{dB}{dt} dt$$

$$\Rightarrow U_3(t) = -\frac{N_2 S}{R_1 C} B(t)$$

Rq : $i_{\text{cte}} = 0$ car $\langle U_3 \rangle$ et $\langle B \rangle = 0$.

6° - Bobine à noyau de fer doux



On considère le solénoïde as

$$\rightarrow \text{sym / inv} : \vec{H} = H_3(r) \vec{e}_3$$

$$\rightarrow \oint \vec{H} \cdot d\vec{P} = H_3(r_1) \times P - H_3(r_2) \times P = 0$$

$$\Leftrightarrow H_3(r_1) = H_3(r_2)$$

↳ $\vec{H} = H_3 \vec{e}_3$ est à Pint

À l'ext ps de dip $\Rightarrow$ Les lignes de dip st confuses

$\Rightarrow$ Avec calcul classique : $\oint \vec{H} \cdot d\vec{P} = Ni$

$$\Leftrightarrow \vec{H} = \frac{N}{P} i \vec{e}_3 \Rightarrow \vec{H} = m i \vec{e}_3$$

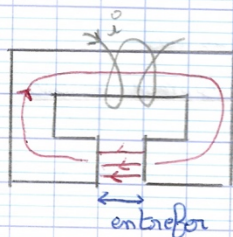
et $\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_0 n i \vec{e}_z \Rightarrow \boxed{\vec{B} = \mu_0 n i \mu_r \vec{e}_z}$

On retrouvera que L est multiplié par μ_r .

II. Circuit mag à entrefer : l'électromagnétique

Objectif : produire le chp mag le + intense et le contrôler ds une faible zone.

1. Modélisat° et principe de concentrat° des lignes de chp



Les lignes entrent et sortent perpendiculairement à l'interface air/fer.

voir doc
↳ réfracte lignes de chp

Pn un entrefer $e \ll \sqrt{S}$ avec S la sect°, les lignes demeurent // ds l'entrefer.

2. Conservat° du flux de $\vec{B}$ et TB d'Ampère

→ Conservat° de ϕ m Sate :

$$\phi_0 S = \phi S \Rightarrow \underline{\phi_0 = \phi}$$

B uniforme le μ_0 d'une ligne de chp

→ Théorème d'Ampère :

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{P} = N i$$

$$H_e e + H(P-e) = N i \quad \text{avec } P \gg e, \text{ avec } \frac{P}{e} \approx 100$$

entrefer milieu mag

$$\boxed{H_e e + H P \approx N i}$$

3. Milieu linéaire à perméabilité très gde → $\mu_r \rightarrow +\infty$

$$B = B_e = \mu_0 H_e \rightarrow \text{ds l'entrefer mm-mag}$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \rightarrow \text{ds le milieu mag}$$

$$\frac{B}{\mu_0} e + \frac{B}{\mu_0 \mu_r} P = N i \Leftrightarrow \frac{B}{\mu_0} \left(e + \frac{P}{\mu_r} \right) = N i \Leftrightarrow \boxed{B = \frac{\mu_0 N i}{\frac{P}{\mu_r} + e}}$$

Conditi° perméabilité très gde :

$$B = \frac{\mu_0 N i}{e \left(1 + \frac{P}{\mu_r e} \right)} \quad \text{avec } \frac{P}{\mu_r e} = \frac{10^2}{10^5} = 10^{-3} \ll 1 \text{ avec } \mu_r = 10^5$$

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 N i}{e}} \rightarrow \text{Modèle } \mu_r \rightarrow +\infty$$

→ e faible → B élevée = Tesla

Rq : Excitat° mag

$$I_{te} = \frac{B e}{\mu_0} \rightarrow \frac{B}{\mu_0} \rightarrow \text{air}$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \rightarrow \text{milieu mag}$$

$$\text{ds } \frac{H}{I_{te}} = \frac{1}{\mu_r} \ll 1 \Rightarrow \boxed{H \ll I_{te}}$$

H l'excitat° mag concentrée ds l'entrefer

La circulat° est eqv à une circulat° uniquement sur e.

4. Milieu mag réel mm-linéaire

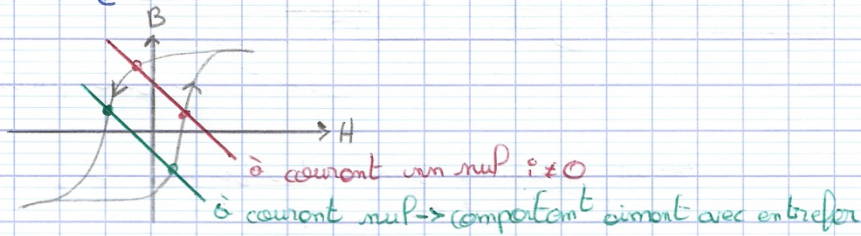
On utilisera une résolut° graphique pn déterminer H et B en exploitant le cycle d'hystérésis qui est caractéristique du matériau. Pt de fonctionnement → intersect cycle et droite
ds l'entrefer → milieu mm-mag → résolut° linéaire $H_e = \frac{B e}{\mu_0} = \frac{B}{\mu_0}$

$$\frac{B e}{\mu_0} + H P = N i \Leftrightarrow B = \frac{\mu_0 N i}{e} - \frac{\mu_0 P}{e} H$$

$$\frac{B}{\text{unité de pente}} = a(i) - bH$$

$$\begin{cases} a(p) = \frac{10 N_i}{e} \\ b = \frac{10 p}{e} \end{cases}$$

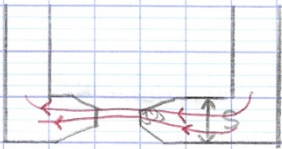
Le pt de Bct de l'entrefer est à l'intersection de cette droite et du cycle d'hystérésis.



→ le pt de Bct dep de l'état intérieur

→ dérivée de B de la courbe non-linéaire % à $B = \frac{10 m_i}{e} = B_{max}$
 car linéaire → $B = B_{max} \left(\frac{10 p}{e} + 1 \right)$

5° - Électroaimant de sect° variable



Le dip $\vec{B}$ est intense de l'entrefer avec hypothèse MLH ±

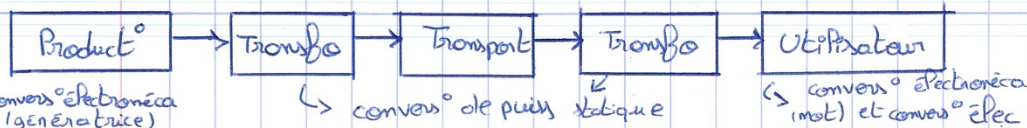
$$B_e = \frac{10 m_i}{\frac{1}{\mu_0 \mu_r} + e}$$

Avec R important on se rapproche facilement de la val max de $B_e \Rightarrow B_{e,max} = \frac{10 m_i}{e}$

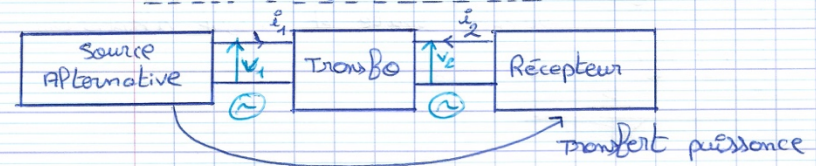
B° Le transformateur monophasé

1° Présentation : conversion de puissance et réalisation pratique

→ Nécessité de la conversion puissance :

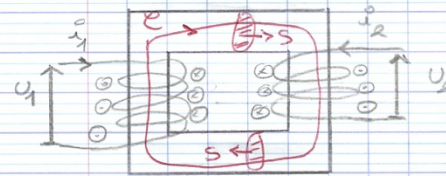


Transformateur → régime sinusoïdal → conversion AC-AC



⚠ On utilise sans un transformateur avec des grandeurs élec continues (< > nulle)

→ Réalisation pratique :



Primaires N_1 Secondaire N_2
 → constitué : 2 enroulements (isolés), la primaire et la secondaire, autour d'un noyau de matériau ferreux.

Rapport de transformateur

$$m = \frac{N_2}{N_1}$$

Le noyau ferreux concentre efficacement les lignes de champ entre primaire et secondaire.

→ Principe de Bct :

un courant $\odot$ circule au primaire et crée un champ $\vec{B}(t)$ variable qui est capté par le ferreux du secondaire. Au secondaire, le flux mag variable crée une fem et des courants $\odot$.

2° - Modèle du transformateur parfait

- > Couplage parfait : couplage sans pertes de flux mag
- > Perméabilité ∞ : Absence d'énergie mag stockée

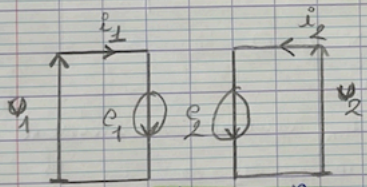
$$U_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu_0} \rightarrow 0$$

- > Absence de pertes Fer :

- Utilisat° d'un fer doux -> cycle hystérésis étroit -> néglige
- Courants de Foucault
 - > présence du feuilletage
 - > freq de W faible -> Soltz

- > Absence de pertes cu : on néglige les résistances des enroulements

3° - Loi de transformat° des tensions



$$\Phi_1 = N_1 B_1 S$$

$$\Phi_2 = N_2 B_2 S$$

$$U_1 = -e_1 = \frac{d\Phi_1}{dt} = N_1 S \frac{dB_1}{dt}, \quad U_2 = -e_2 = N_2 S \frac{dB_2}{dt}$$

Couplage parfait $\Rightarrow \Phi_1 = \Phi_2 \Rightarrow B_1 S = B_2 S \Rightarrow B_1 = B_2$
(Φ = cte ds le milieu ferreux)

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

Le rapport des tensions = rapport de transfo

avec $m \leq 1$ -> élévati° ou abaissat° des tensions

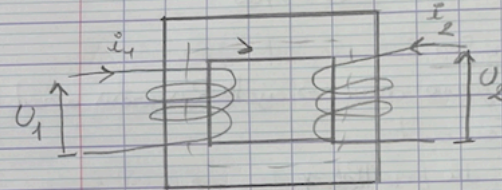
Rq : Δ Si tension alé en entrée, pas de var tension
 $e_1 = e_2 = 0$

Pas de courant en sortie et l'cte la puiss reçue au primaire sera dissipée par effet Joule ds R_{cu}

-> chauffage et dégradation

4° - Loi de transfo des courants en charge

Rq : $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$ avec $\mu_r \rightarrow +\infty$ "ampér. magnétique"
Pr avoir $\vec{B}$ fini, il faut $H \rightarrow 0$. Une faible excitat° $H \approx 0$ produira un Φ $\vec{B}$ élevé.



TR d'Ampère : $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_1 i_1 + N_2 i_2$
avec $H = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = \frac{B}{S \mu_r} \rightarrow 0$

$$0 \approx N_1 i_1 + N_2 i_2 \Rightarrow \frac{i_2}{i_1} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{m}$$

Δ Relat° valide que si $i_2 \neq 0$
-> transfo en charge

En Bt, $N_1 i_1 + N_2 i_2 \approx I_m$ courant magnétisant
-> courant au primaire qd $i_2 = 0$ $I_m = \frac{HP}{U_1}$

5° - Loi de transfo des puissances

Pr un transfo en charge avec Φ_m au primaire

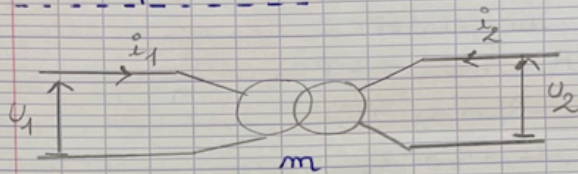
$$\frac{U_2}{U_1} = m = -\frac{i_1}{i_2} \text{ en appliquant les lois précédentes}$$

$$U_1 i_1 = -U_2 i_2$$

puiss reçue au primaire puiss fournie au secondaire

Ds la modélisat° du transfo idéal : rendement = 1
transfo réel ds bct nominal : rendem^t = 95-99 %

1^{ère} représentat° :



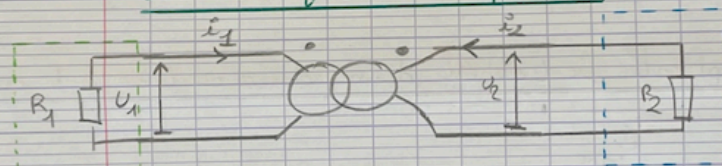
II. Application

1° - Isolation galvanique

↳ sécurité

↳ montage à masse flottante

2° - Transfert d'impédance

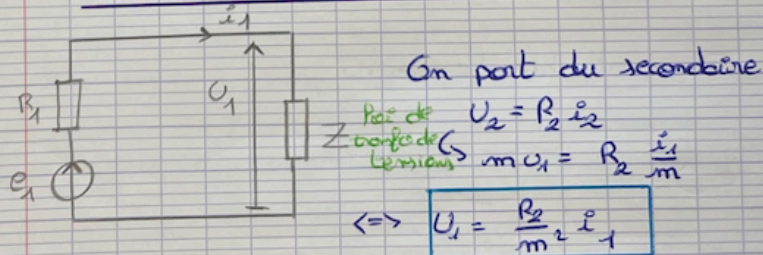


Source @

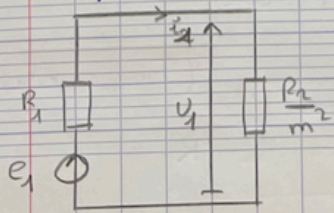
Charge

Utilisons les lois de transfert pour modifier ce schéma.

→ Transfert : secondaire au primaire



Du pt de vue du primaire :



→ Transfert : primaire au secondaire

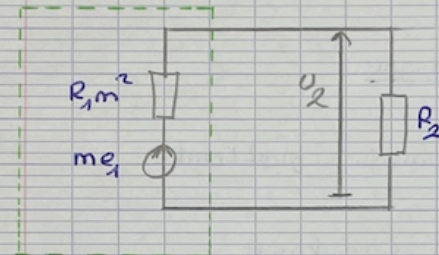
On part du primaire :

$$e_1 = R_1 i_1 + U_1 = -R_1 m i_2 + \frac{U_2}{m}$$

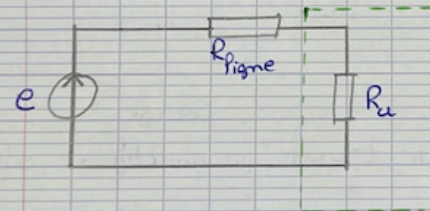
$$\Leftrightarrow e_1 m = -R_1 m^2 i_2 + U_2$$

$$\Leftrightarrow U_2 = m e_1 + R_1 m^2 i_2$$

Du pt de vue du secondaire, le primaire est équivalent à :

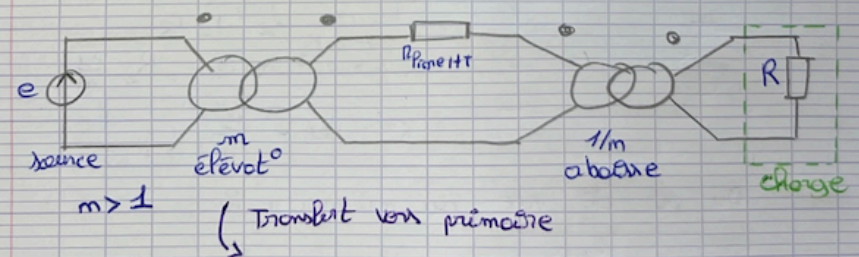


→ Applicat° du transfert d'impédance ou transfert d'élec

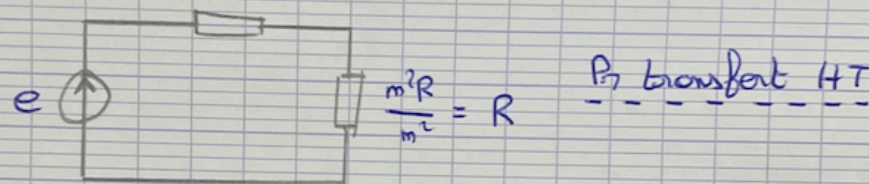


Transfert basse-tension BT (sans élever et abaisser)

Transfert Hte-tension HT



↳ 2^e transfert vers le primaire



On divise la résistance apparente de la ligne par m^2 .
↳ $\odot$ de pertes par le transfert.