

17-M- Induction

Intro : Manip qualitative

Faire l'expérience historique de Oersted qui a permis de faire la "connexion" entre l'électricité et le magnétisme.

I. Le phénomène d'induction.

1. **Mise en évidence** : (bio : HP prépa électromagnétisme 2ème année) **Manip 2 qualitative.**
 - Circuit fixe dans B variable (induction de Neumann)
 - Circuit mobile dans $\sim B$ stationnaire (induction de Lorentz)
2. **Vérification de la loi de Lenz-Faraday** : (bio Duffait expérience au capes de sciences physiques et par cœur) **manip 3 quantitative.**

II. Le phénomène d'auto-induction :

1. **Mise en évidence** : **manip 4 qualitative.**
 - Retard à l'établissement d'un courant : (exp 3 p 40 du quaranta)
 - Surtension à l'ouverture
2. **Etude du régime transitoire : Mesure de L (circuit RL)** (bio TS ancien prg ou quaranta p 404 et 42) **Manip 5 quantitative.**

III. Applications : Le transformateur : (bio par cœur) **Manip 6 quantitative.**

Montrer l'intérêt du transformateur : le transformateur modifie Ueff et conserve la puissance.
Ce que l'on perd en tension on le gagne en intensité et inversement

Conclusion : De nombreuses autres applications : Freinage par courant de Foucault, alternateur, chauffage par induction (**manip si on a le temps**) machine etc ...

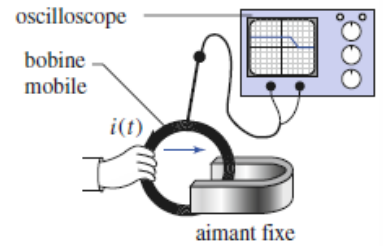
I. Le phénomène d'induction.

1. Mise en évidence : (bio : HP prépa électromagnétisme 2ème année) **Manip 2 qualitative.**

- Circuit fixe dans B variable (induction de Neumann)

Un circuit se déplaçant dans un champ magnétique permanent peut se comporter comme un générateur électrocinétique : il est le siège d'un phénomène d'induction. Nous parlerons, dans ce cas, d'*induction de Lorentz*.

Dans la première expérience, le déplacement du circuit à vitesse $\vec{v}_c$ dans le champ permanent $\vec{B}_0$ de l'aimant entraîne l'apparition d'une force magnétique de la forme $q \vec{v}_c \wedge \vec{B}_0$ susceptible de faire circuler les charges de conduction du circuit.



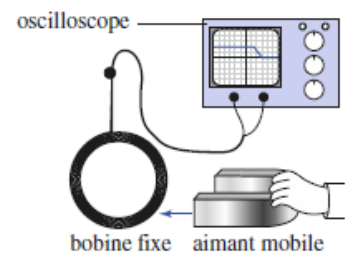
Doc. 1. La bobine mobile (déplacée par l'observateur) se comporte comme un générateur.

- Circuit mobile dans B stationnaire (induction de Lorentz)

Lorsqu'un circuit fixe est soumis à un champ magnétique variable, il est encore le siège d'un phénomène d'induction. Nous parlerons alors d'*induction de Neumann*.

Interprétation : Le circuit fixe voit apparaître un champ magnétique variable créé par l'aimant : Ces variations entraînent l'apparition d'un champ électrique induit, ce que traduit l'équation de Maxwell-Faraday

$$\vec{\text{rot}} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

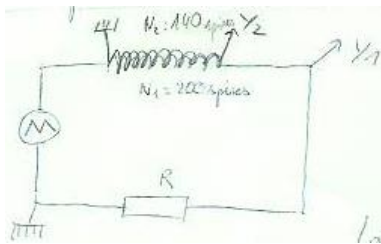


Doc. 2. La bobine fixe se comporte comme un générateur si l'aimant se déplace.

Transition : L'induction électromagnétique est un phénomène unique : l'induction de Lorentz et l'induction de Neumann en sont deux facettes, qui dépendent du point de vue de l'observateur.

2. Vérification de la loi de Lenz-Faraday : (bio Duffait p97 expérience au capes de sciences physiques et par cœur) **manip 3 quantitative.**

On envoie un signal triangulaire à un double solénoïde (mais 1 seul est relié au circuit l'autre à l'oscilloscope et ne fait pas parti du circuit c'est pourquoi on peut avoir 2 masses).



Soit un courant i_1 circulant dans le circuit et donc dans le solénoïde 1 il va y avoir un champ magnétique B

$$B_1 = \mu_0 \frac{N_1}{l_1} i_1 \quad (\text{on considère solénoïde } \infty)$$

$$\text{D'après la loi de Faraday : } e_2 = - \frac{d\phi_2}{dt} = U_2$$

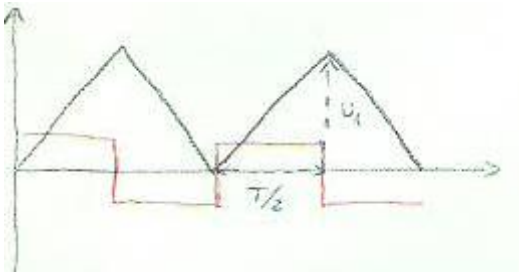
$$\text{Or } \phi_2 = N_2 B_1 S_2 = \mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1} i_1 \Rightarrow e_2 = \mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1} \frac{di_1}{dt}$$

$$\text{Or } U_{\text{géné}} = R i_1 + L \frac{di_1}{dt}$$

On veut que le circuit soit résistif et surtout avoir $L \frac{di_1}{dt} \ll R i_1$ afin d'avoir U_1 triangulaire

$$\Rightarrow M\omega \ll R i_1 \text{ pour pouvoir négliger } L \frac{di_1}{dt} \text{ et avoir } U_1 = R i_1 \text{ soit } i_1 = \frac{U_1}{R}$$

$$\Rightarrow e_2 = \mu_0 \frac{N_1 N_2 S}{l_1 R} \frac{dU_1}{dt} \text{ on observe donc en voie 2 une tension carrée}$$



$$\frac{dU_1}{dt} = \frac{U_1}{T/2} = \frac{U_1}{T} = 2 U_1 f \quad (\text{avec } f \text{ la fréquence})$$

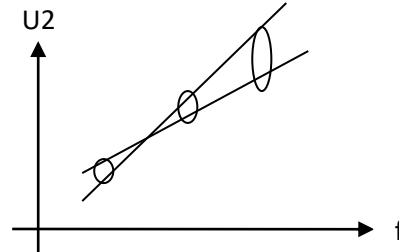
$$\text{Soit } U_2 = \frac{2\mu_0 N_1 N_2 S U_1}{l_1 R} f$$

Si on est résistif U_1 ne varie pas et on peut donc tracer $U_2=f(f)$

La pente de la courbe nous donne :

$$\frac{2\mu_0 N_1 N_2 S U_1}{l_1 R}$$

Et on compare avec la valeur théorique



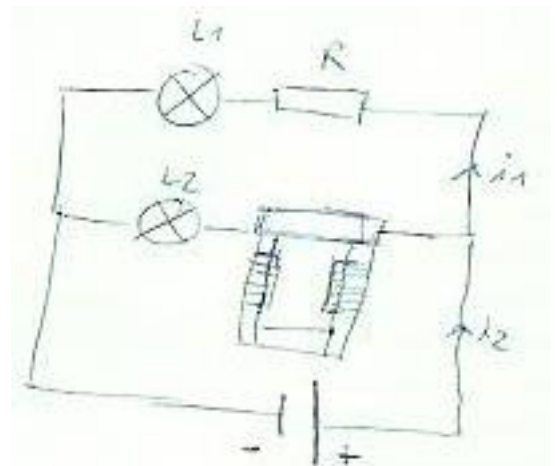
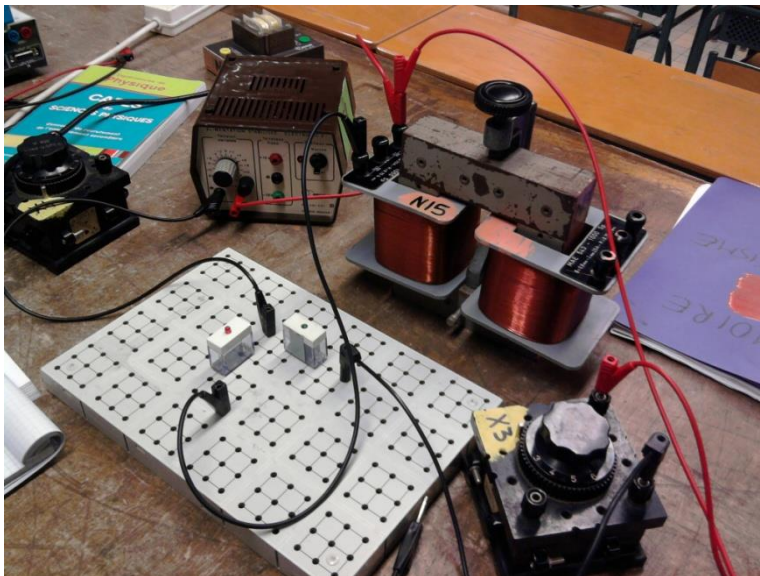
$$= \frac{2 M U_1}{R} \quad \text{d'où } M = \frac{\text{pente } R}{2 U_1} \quad (\text{je ne comprend pas pourquoi } M)$$

II. Le phénomène d'auto-induction :

1. Mise en évidence : **manip 4 qualitative.**

- Retard à l'établissement d'un courant : (exp 3 p 40 du quaranta)

Attention dans le Bellier ils disent de prendre une bobine de 500H mais il n'y 'en aura surement pas le jour des oraux donc en fait comme c'est une manip qualitative ce n'est pas grave .On prend les bobines d'un transformateur que l'on fait passer dans une carcasse en fer afin d'augmenter l'inductance (car les lignes de B vont être canalisées par la carcasse en fer et ça va augmenter l'inductance)



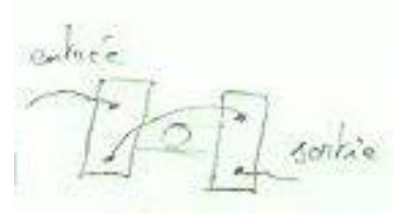
Retard à l'allumage de la lampe L2 de $\tau = \frac{L}{R}$ à

cause du passage du courant dans la bobine qui va créer un champ magnétique B qui va lui même créer une F.e.m $e = -\frac{d\phi}{dt}$ qui s'oppose au courant i_2 .

Le courant de seuil pour allumer L2 et L1 n'est pas atteint au même instant $i_2 = A \exp(-\frac{R}{L} t)$ alors que $i_1 = \frac{E}{R}$ instantanément

Remarque :

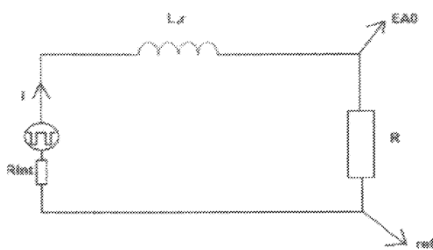
- Pour augmenter le retard il faut augmenter L et donc brancher des bobines en série
- Prendre R proche de Rbobine (RL) pour avoir l'éclairement des 2 lampes similaire. Faire la manip en régime permanent (tout allumé) pour le réglage de la résistance et utiliser un potentiostat.



Remarque 2 : Manip qui est rigolote à faire c'est avec le potentiostat régler la luminosité de la 2^{ème} lampe à son minimum (donc $R > RL$) et on observe cette fois-ci que c'est L2 qui a un retard à l'allumage sur L1, ceci est dû au fait que le courant est tellement faible (à cause de la résistance) que le filament met beaucoup de temps à chauffer. Et on montre ainsi l'importance de se mettre avec une luminosité identique lors de la précédente expérience.

- Surtension à l'ouverture (peut-être non visible)

2. Etude du régime transitoire : Circuit RL : Mesure d'inductance (bio TS ancien prg ou quaranta p 404 et 42) Manip 5 quantitative.



On réalise le montage suivant mais cette fois on met le GBF en créneau et on relit la tension de la résistance (soit l'intensité à un facteur $1/R$ près) à EAD1 de ORPHY.

Loi des mailles : $E = L \frac{di}{dt} + (R + r + r_{int})i$ (avec r_{int} la résistance interne du générateur)

La résolution de l'équation différentielle du 1^{ère} ordre avec 2nd membre nous donne $i(t) = i_{ss2ndmembre}(t) + i_{part}(t)$

$$i_{ss2ndmembre}(t) = A e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{avec } \tau = \frac{L}{(R + r + r_{int})} \quad \text{et } i_{part}(t) = \frac{E}{(R + r + r_{int})} = \frac{E\tau}{L}$$

$$i(t) = \frac{E\tau}{L} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

On se place à haute fréquence afin de pouvoir négliger r et avoir la bobine à l'ordre 0, puis on lance l'acquisition sur GTS2 (voir TP 20 pour les réglages) et on envoie les données sur REGRESSI.

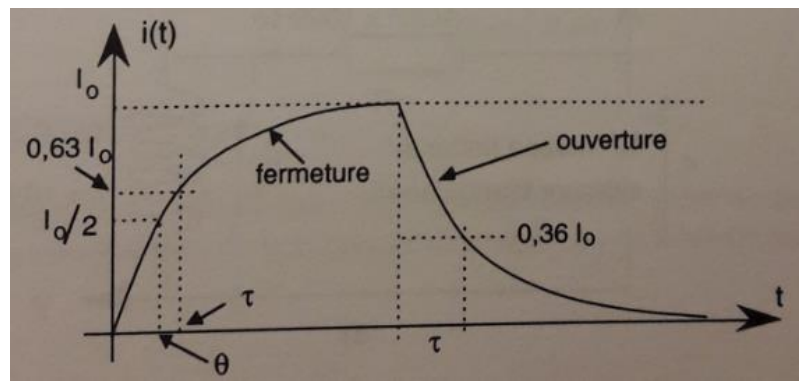
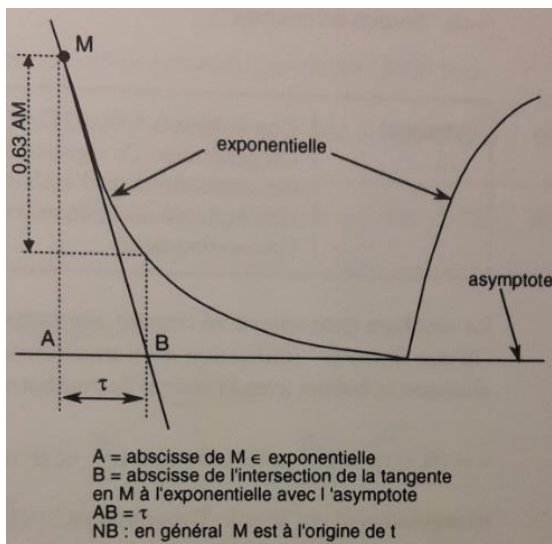
Remarque : Pour les incertitudes $\Delta t = 10^{-5} s$ et $\Delta V = \frac{20}{2^8}$ ceci s'explique par le fait que Orphy est utilisé en 8 bit et que notre plage de mesure s'est faite de -10 à +10 sur GTS2

On modélise par $i(t) = a(1 - \exp(-(t-h)/b))$ avec $\frac{1}{b} = \frac{1}{\tau} = \frac{R+r_{int}}{L}$

On en déduit $a = \dots$ A puis on crée une nouvelle grandeur $\ln\left(1 - \frac{i}{a}\right) = -\left(\frac{t-h}{\tau}\right)$ et on trace $\ln\left(1 - \frac{i}{a}\right) = f(t)$ et la pente de la courbe $= -\frac{1}{\tau}$ soit $L = \frac{R+r_{int}}{\text{pente}}$

Version simple : On estime τ d'après la pente à l'origine ou avec $0.63 i_0$.

Et on calcule L avec $\tau = \frac{L}{(R+r+r_{int})}$

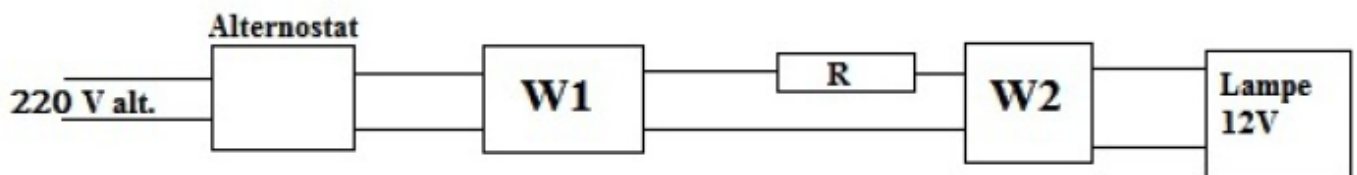


III. Applications : Le transformateur :(bio par coeur) **Manip 6 quantitative.**

Montrer l'intérêt du transformateur : le transformateur modifie U_{eff} et conserve la puissance.

Ce que l'on perd en tension on le gagne en intensité et inversement

Dans cette manip, on montre l'intérêt du transformateur. on réalise le premier montage suivant :



On calcule le rhéostat R pour faire un diviseur de tension et alimenter correctement la lampe. On fait un bilan de puissance :

$$\eta_1 = \frac{P_2 \times 100}{P_1} = 5\%$$

Ensuite on remplace R pour un transformateur 220V / 12V :

$$\eta_2 = \frac{P_2 \times 100}{P_1} = 100\%$$

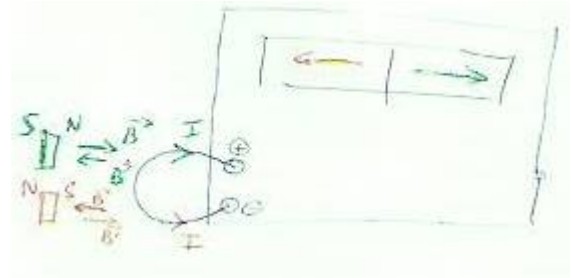
Conclusion : le transformateur modifie U_{eff} et conserve la puissance.

❖ Induction (Loi de Lenz)

D'après la loi de Lenz : Le sens du courant induit est tel que le champ magnétique qu'il crée tend à s'opposer à la variation du flux qui lui a donné naissance.

Or les lignes de champs magnétique B vont du nord vers le sud

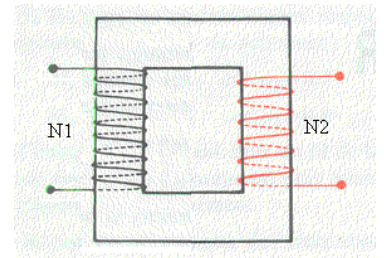
L'aimant apporte un champ magnétique B ce qui va créer un courant i (dépendant des sens de la variation de B) qui crée à son tour un champ magnétique B' qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance (c-a-d à B).



I. Le transformateur monophasé :

Un transformateur monophasé se compose d'une carcasse en fer feuilleté sur laquelle sont placés deux bobinages (généralement distinct) : le primaire (nombre de spire N_1) et le secondaire (N_2). Le rapport $\frac{N_2}{N_1} = m$ est le rapport de transformation.

L'application d'une tension alternative au primaire y crée un courant donc un flux magnétique variable. Cela va créer dans le secondaire une fem d'induction pouvant faire passer un courant dans un circuit d'utilisation.



Remarque :

- Le transformateur ne fonctionne qu'en régime variable.
- On minimise les pertes due aux courants de Foucault en utilisant des matériaux feuilletés (d'où la carcasse en fer feuilleté).

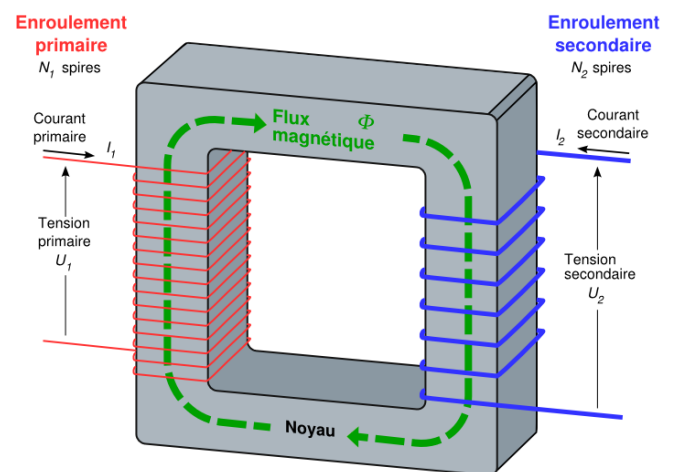
I - Transformateur idéal.

Nous employons les conventions récepteurs pour les enroulements primaire et secondaire.

Le courant $i_1(t)$ circulant dans le primaire crée un champ magnétique : $B_1(t) = \mu \frac{N_1}{l} i_1(t)$ (cas du solénoïde ∞ avec l la longueur du solénoïde, μ la perméabilité magnétique du noyau de fer).

Ce champ magnétique $B_1(t)$ va engendrer 2 flux : (S : la section du noyau de fer)

- Flux propre à travers le primaire : $\phi_{p1} = N_1 \cdot B_1 \cdot S = \frac{\mu N_1^2 S}{l} i_1 = L_1 \cdot i_1$
- Flux induit à travers le secondaire : $\phi_{1 \rightarrow 2} = N_2 \cdot B_1 \cdot S = \frac{\mu N_2 N_1 S}{l} i_1 = M_{1 \rightarrow 2} \cdot i_1$



Apparition d'un courant $i_2(t)$ à travers le secondaire qui va créer à son tour un champ magnétique $B_2(t) = \mu \frac{N_2}{l} i_2(t)$ (on se place toujours dans le cas du solénoïde infini).

Ce champ $B_2(t)$ va lui aussi engendrer 2 flux :

- Flux propre à travers le secondaire : $\phi_{p2} = N_2 \cdot B_2 \cdot S = \frac{\mu N_2^2 S}{l} i_2 = L_2 \cdot i_2$

- Flux induit à travers le primaire : $\phi_{2 \rightarrow 1} = N_1 \cdot B_2 \cdot S = \frac{\mu N_1 N_2 S}{l} i_2 = M_{2 \rightarrow 1} \cdot i_2$

On retrouve $M_{1 \rightarrow 2} = M_{2 \rightarrow 1} = M$ le coefficient de mutuel induction.

Les flux totaux dans les 2 bobines sont donc :

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_{p1} + \phi_{2 \rightarrow 1} = L_1 \cdot i_1 + M_{2 \rightarrow 1} \cdot i_2 \\ \phi_p &= \phi_{p2} + \phi_{1 \rightarrow 2} = L_2 \cdot i_2 + M_{1 \rightarrow 2} \cdot i_1\end{aligned}$$

En convention récepteur (Faraday : $e = \frac{d\phi}{dt}$) d'où :

$$U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$U_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

❖ Loi des tensions :

Circuit ouvert au secondaire $\Rightarrow i_2 = 0$ et on obtient donc $U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt}$ et $U_2 = +M \frac{di_1}{dt}$

En faisant le rapport il vient :

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{L_1}{M} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow U_2 = m U_1 \text{ avec } m = \frac{N_2}{N_1}$$

Si $N_2 > N_1 \Rightarrow$ on élève la tension du secondaire par rapport au primaire.

Si $N_2 < N_1 \Rightarrow$ on abaisse la tension du secondaire par rapport au primaire.

❖ Loi des courants :

Court circuit au secondaire $\Rightarrow U_2 = 0$ et on obtient donc $L_2 \frac{di_2}{dt} = -M \frac{di_1}{dt} \Leftrightarrow \frac{di_2}{dt} = -\frac{M}{L_2} \frac{di_1}{dt}$

Si les courants sont de forme sinusoïdale alors on peut écrire avec les grandeurs efficaces

$$I_2 = \frac{M}{L_2} I_1 = \frac{N_1}{N_2} I_1 \rightarrow I_2 = \frac{1}{m} I_1$$

Si $N_2 > N_1 \Rightarrow$ on abaisse le courant du secondaire par rapport au courant du primaire.

Si $N_2 < N_1 \Rightarrow$ on élève le courant au secondaire par rapport au courant du primaire.

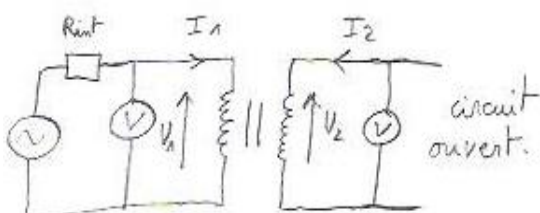
(C'est toute la démonstration ; mais il n'est pas nécessaire de la mettre au tableau juste de savoir la refaire)

Attention pour les manip si on a un trop faible courant i_1 il faut se placer en élévateur $\left(m = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} > 1\right)$ pour augmenter le plus possible I_1 en ayant la bobine dans le primaire de plus faible inductance

II- Vérification de la loi des tensions.

Attention il faut utiliser un transfo sans résistance interne (sinon ça limite trop le courant) et prendre une résistance de protection (pour éviter de dépasser la puissance du générateur) qui résiste à un fort courant.

Pour réaliser les montages il faut connaître la valeur des composants afin de ne pas griller le transformateur, en effet celui-ci supporte une puissance maximal c'est pourquoi il faut faire attention à ce qu'on lui envoie au primaire, pour cela on utilise une résistance de protection (R_{int}) afin de limiter l'intensité I_1 pour une tension au borne du GBF donnée (voir Complément théorique).

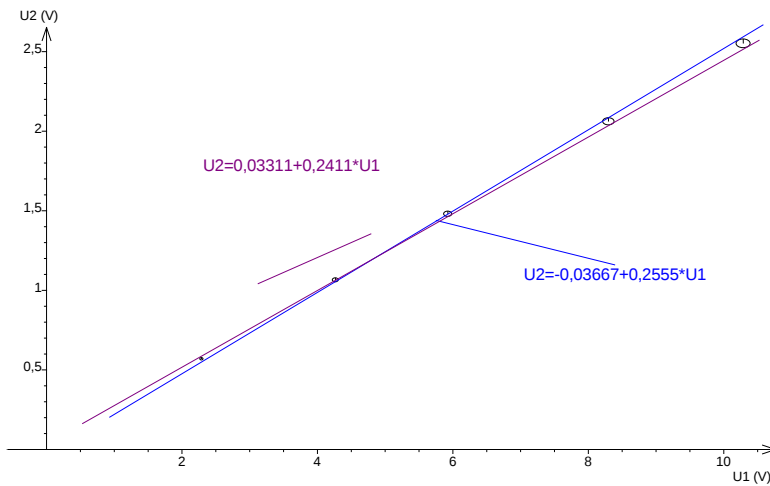


On réalise le circuit suivant et on relève la valeur des tensions U_1 et U_2 .

On trace $U_2 = f(U_1)$ et on compare avec la théorie : $U_2 = m U_1$ la valeur de la pente doit être égale à m

Remarque : pour le tracer de la courbe il faut partir de l'origine

On trace $U_2=f(U_1)$ en faisant varier R



Théoriquement : $U_2 = mU_1$ donc la pente doit être égale à $m=0,25$ directement.

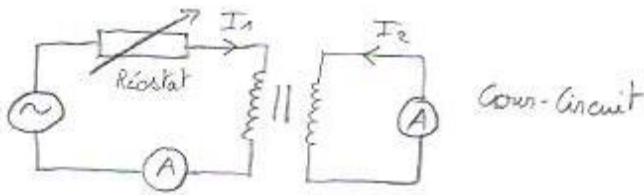
Expérimentalement : $m = 0,248 \pm 0,007$

→ Aux incertitudes près, on retrouve la bonne valeur du rapport de transformation.

Rq : Incertitudes : Pour le calibre 60V et 6V

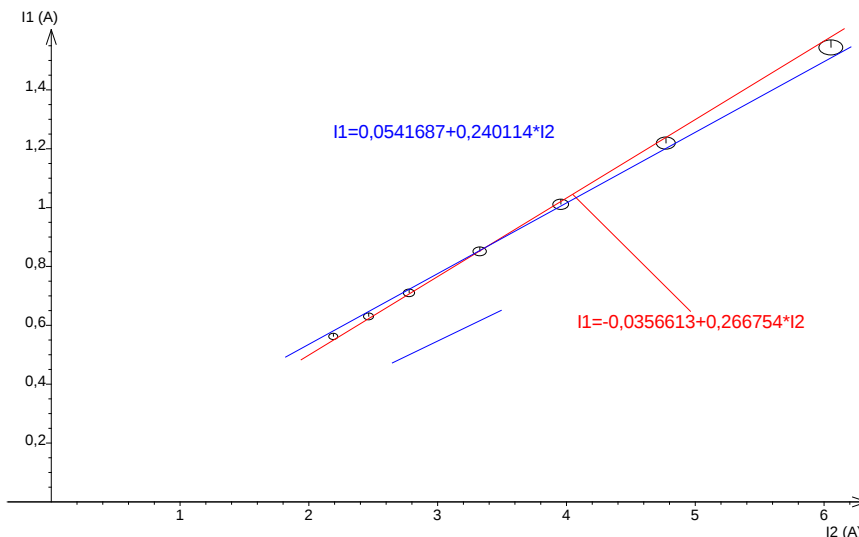
$$\frac{\Delta U}{U} = 1,0\% + 3\text{digits}$$

III – Vérification de la loi des Intensités.



On relève la valeur des intensités en jouant sur le rhéostat pour faire varier I_1 .

On trace $I_1 = f(I_2)$ et on compare avec la théorie $I_1 = mI_2$.



Expérimentalement : $m = 0,253 \pm 0,013$

→ Aux incertitudes près, on retrouve la bonne valeur du rapport de transformation et les deux valeurs expérimentales se recoupent.

$$Rq : \frac{\Delta I}{I} = 1,5\% + 3\text{digits}$$

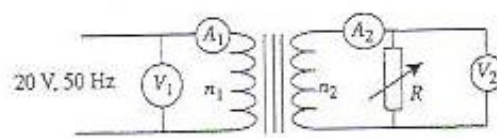
IV – Mise en évidence de la limite du modèle idéal.

Pour ce faire il ya 2 méthode :

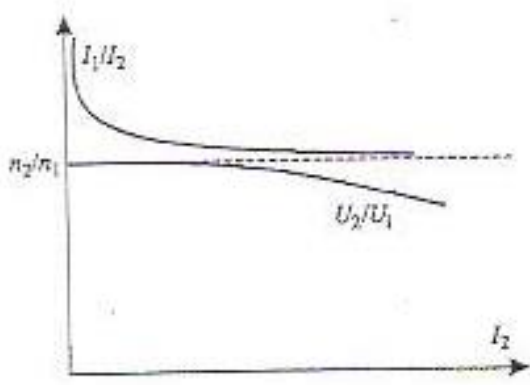
- ❖ Transformateur en charge : loi des tensions et des intensités. (Bellier 2^{ème} édition: p 74 ou Bellier 3^{ème} édition p 189)

On trace sur un même graphe :

$$U_2/U_1 = f(I_2)$$



$$I_1/I_2 = f(I_2)$$



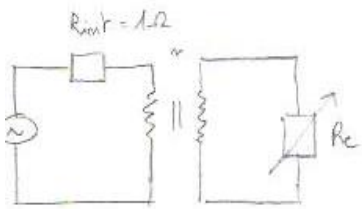
Lorsque R diminue $\Rightarrow I_2$ augmente, on se rapproche du cas où on travaille en court-circuit (R remplacé par un fil) $\Rightarrow$ on vérifie la loi des intensités.

En effet comme le courant augmente les pertes de flux augmentent aussi et la loi des tensions est de moins en moins vérifiée.

Inversement lorsque R augmente $\Rightarrow I_2$ diminue, on se rapproche du cas où on travaille en circuit ouvert et donc cette fois-ci on vérifie la loi des tensions. Les pertes de flux ayant diminué la loi des tensions est de plus en plus vérifiée.

Remarque : On ne peut pas vérifier dans le cas d'un transformateur idéal la loi des tensions et la loi des intensités simultanément.

❖ Travail avec les puissances.



On réalise le montage suivant en utilisant 4 multimètres comme précédemment (du coup on ne pourrait pas faire les 2 manip en même temps ?) et en travaillant avec une tension comprise entre 6 et 10 V, on relève les valeurs de afin de tracer $P_{th} = f(R_c)$

$$\text{En effet d'après la théorie } P_{th} = \frac{R_c e^2 m^2}{(R_c + m^2 R_{int})^2}$$

Démonstration : d'après le modèle du transformateur idéal on a la relation $\frac{U_2}{U_1} = m = \frac{I_1}{I_2}$

La loi des mailles nous donne : $U_2 = R_c \cdot I_2$ et $U_1 = e - R_{int} \cdot I_1$

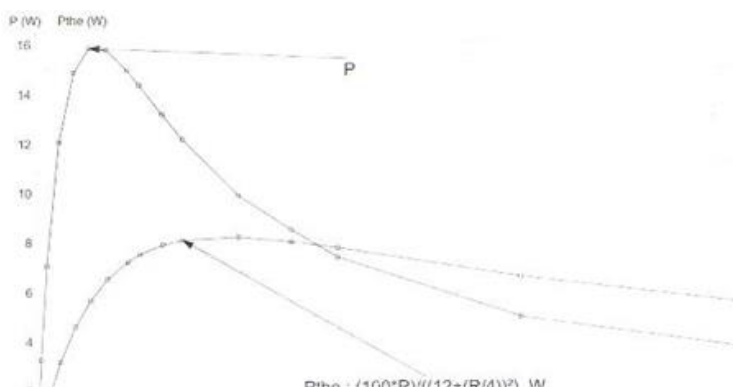
$$\text{Soit : } U_1 = \frac{U_2}{m} = e - R_{int} \cdot I_1$$

$$\Leftrightarrow \frac{R_c \cdot I_2}{m} = e - R_{int} \cdot m I_2 \Leftrightarrow \frac{R_c \cdot I_2}{m} + R_{int} \cdot m I_2 = e \Leftrightarrow I_2 \left(\frac{R_c}{m} + R_{int} \cdot m \right) = e$$

$$I_2 = \frac{e}{\left(\frac{R_c}{m} + m R_{int} \right)}$$

$$P_{th} = U_2 \cdot I_2 = R_c \cdot I_2^2 = \frac{R_c e^2}{\left(\frac{R_c}{m} + m R_{int} \right)^2} = \frac{R_c e^2 m^2}{(R_c + m^2 R_{int})^2}$$

Pour nous $P = \frac{U_2^2}{R_c}$ que l'on va tracer et modéliser par $P = \frac{a R_c}{(b + R_c)^2}$



Sur la courbe on voit que qualitativement sa marche car avec le modèle on passe par les incertitudes (ici non visible pour plus de visibilité). Cependant ce modèle est limité puisque :

$$a \neq m^2 e^2 \text{ et } b \neq m^2 R_{int}$$

On constate que la modélisation comprend toutes les ellipses d'incertitude. On trouve comme paramètres de

$$\text{modélisation : } \begin{cases} a_{\text{exp}} = 402V^2 \\ b_{\text{exp}} = 27,9\Omega^2 \end{cases}$$

$$\text{Théoriquement : } \begin{cases} a_{\text{th}} = m^2 E^2 = 576V^2 \\ b_{\text{th}} = m^2 R = 32\Omega^2 \end{cases}$$

Avec ces paramètres, la modélisation ne passe pas par les points expérimentaux.

→ Bonne modélisation qualitative, mais pas quantitative à cause des pertes.

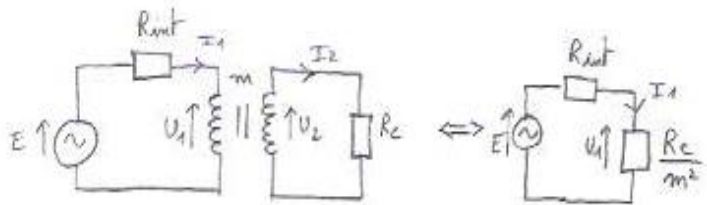
Cela est dû au fait que le transformateur n'est pas parfait en réalité. Il faudrait tester un autre modèle en prenant en compte les principales pertes ; perte fer, cuivre, et celle due au courant de Foucault. (voir annexe pour plus de détail)

Conclusion

Afin de comprendre le fonctionnement d'un transformateur monophasé nous élaborons des modèles que nous avons testés, cependant nous avons vu que ces derniers ont des limites, certains d'entre eux ne sont utilisables que dans certaines configurations.

Complément Théorique :

Afin de choisir la valeur des composants il faut étudier le schéma équivalent au niveau du primaire.



❖ Schéma équivalent

On se place dans le cas du transformateur idéal donc $U_2 = mU_1$ et $I_1 = mI_2$

$$R_c = \frac{U_2}{I_2} = \frac{m^2 U_1}{I_1} \Leftrightarrow \frac{U_1}{I_1} = \frac{R_c}{m^2}$$

$$\text{Loi des mailles : } E = \left(\frac{R_c}{m^2} + R_{\text{int}} \right) I_1$$

❖ Puissance utilisée par R_c (dans la démo de travail avec les puissances c'est différent mais même résultat)

$$P_{\text{th}} = U_2 \cdot I_2 = R_c \cdot I_2^2 = \frac{R_c \cdot I_1^2}{m^2} = \frac{R_c \cdot E^2}{m^2 \left(\frac{R_c}{m^2} + R_{\text{int}} \right)^2} = \frac{R_c E^2}{\left(\frac{R_c}{m} + m R_{\text{int}} \right)^2} = \frac{R_c E^2 m^2}{(R_c + m^2 R_{\text{int}})^2}$$

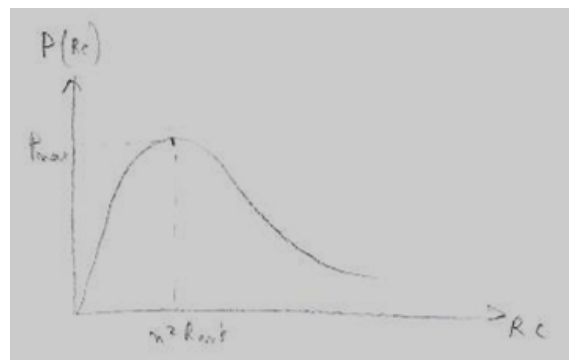
❖ Valeur de la résistance de protection R_{int}

On suppose ici qu'on travaille avec un GBF parfait (pas de résistance interne) avec un transformateur en élévateur ($m=4$) et qui peut supporter une puissance max de 30 W.

$$\text{Or d'après la formule des puissances : } P_{\text{th}} = \frac{R_c E^2 m^2}{(R_c + m^2 R_{\text{int}})^2}$$

$$\frac{dP(R_c)}{dR_c} = \frac{E^2 m^2 (R_c + m^2 R_{\text{int}}) - (2 R_c E^2 m^2)}{(R_c + m^2 R_{\text{int}})^3} = 0$$

$$-R_c E^2 m^2 + E^2 m^4 R_{\text{int}} = 0 \quad \text{donc} \quad R_c = m^2 R_{\text{int}}$$



Conséquence : Si on travaille en abaisseur ($m < 1$), la puissance maximale est pour une valeur de R_c très petite et on ne pourra pas prendre assez de points pour tracer la courbe avant le maximum.

→ On travaille donc en élévateur.

On a donc $P_{max} = \frac{E^2}{4R_{int}}$ pour $R_c = m^2 R_{int}$, on peut à présent pour un E donné trouver la valeur de R_{int} .

Exemple : pour $E=10V$ et $P_{max}=30W$; il faut $\frac{E^2}{4R_{int}} < 30$ soit $R_{int} > \frac{100}{120} = 0.8 \Omega$

Pour s'assurer de pas griller le transfo on major cette valeur et on prend $R_{int}=1\Omega$ (ou plus) on aura donc :

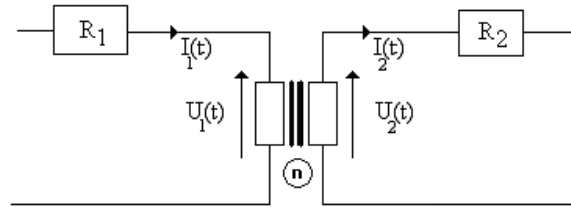
$$I_{1max} = \frac{E}{\left(\frac{R_c}{m^2} + R_{int}\right)} = \frac{E}{R_{int}} \cong 10 A \text{ et donc } I_{2max} = m I_{1max} \cong 2.5 A$$

On comprend bien qu'il faudra donc choisir des résistors pouvant supporter de tel valeur d'intensité afin d'éviter de les griller eux aussi.

Conclusion :

Annexe : les 3 principales pertes du transformateur

- ❖ Les pertes cuivre occasionnées par effet Joule dans les bobinages primaire et secondaire lorsqu'ils sont parcourus par des courants non nuls. Ces pertes sont modélisables par des résistances branchées en série sur l'entrée et la sortie du transformateur :



Afin de les diminuer on peut augmenter la section des conducteurs. Ou encore, on peut choisir un bon conducteur (cuivre), ou diminuer le nombre de spires en conservant naturellement le rapport de transformation, ce qui revient à diminuer la longueur des enroulements primaire et secondaire,

Remarque 1 : Les pertes sont égales à $I_{01}^2(R_1 + R_2/n^2)$, on agira de préférence sur le primaire ou sur le secondaire selon les valeurs de R_1 et R_2/n^2

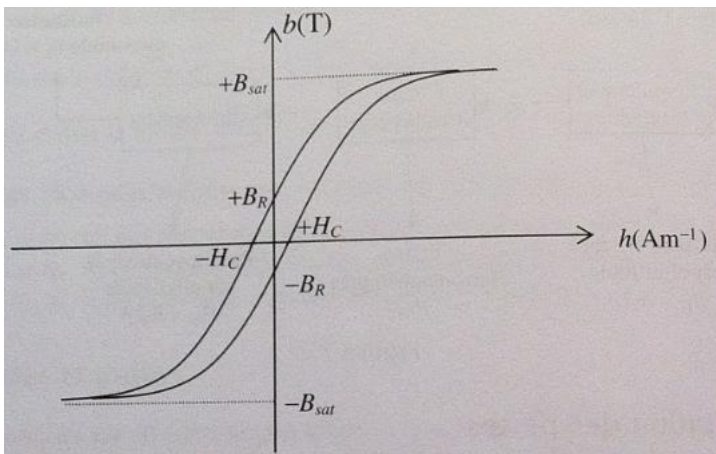
Remarque 2 : quand I_2 et I_1 sont presque nuls, les pertes cuivre sont négligeables (par exemple, les pertes cuivre sont négligeables dans un essai à circuit ouvert).

- ❖ Les pertes par hystérésis occasionnées par l'aimantation du noyau de fer qui assure le couplage magnétique.

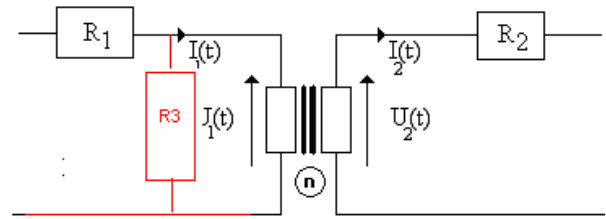
• **Les pertes par hystérésis** : l'aimantation du circuit magnétique absorbe de l'énergie. Il faut en effet aligner tous les domaines de Weiss dans la direction du champ exciteur et déplacer les parois de Bloch. Ce phénomène est non réversible, le matériau ne restituant pas toute l'énergie reçue pendant la désaimantation. Ce phénomène est schématisé par la figure suivante représentant le cycle d'hystérésis d'un matériau ferromagnétique.

h représente excitation magnétique extérieure et b le champ magnétique à l'intérieur du matériau. B_{sat} représente le champ magnétique maximal qui puisse être engendré dans le matériau. B_R représente le champ magnétique rémanent qui subsiste dans le matériau lorsque l'excitation magnétique extérieure est nulle. H_C représente l'excitation coercitive, c'est-à-dire l'excitation extérieure qu'il faut appliquer pour annuler le champ magnétique à l'intérieur du matériau.

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles à l'aire du cycle d'hystérésis, on les limite en utilisant des matériaux à cycle étroit (fer doux). Elles dépendent aussi de l'intensité et de la fréquence du champ magnétique appliqué.



Ces pertes sont modélisables par une résistance R_3 placée en dérivation au primaire.



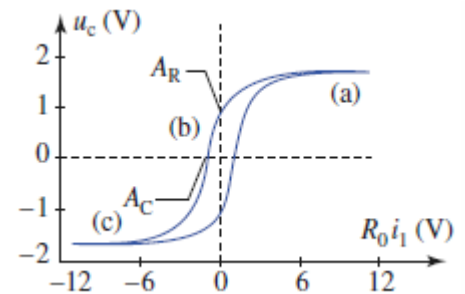
Afin de diminuer ces pertes on doit augmenter R_3 . Les solutions possibles sont :

- Choisir un matériau à cycle étroit (fer doux), (Pour le mettre en évidence on montre qu'il est impossible de lever le fer du haut de la carcasse quand le circuit est fermé (à cause du B induit), par contre une fois ouvert il n'y a plus de B induit et on peut retirer cette partie métallique très facilement car il n'y a pas de champ rémanent (ou alors très faible, ce qui est caractéristique d'un ferromagnétique doux à l'opposé d'un ferromagnétique...)

- Diminuer la fréquence d'utilisation.

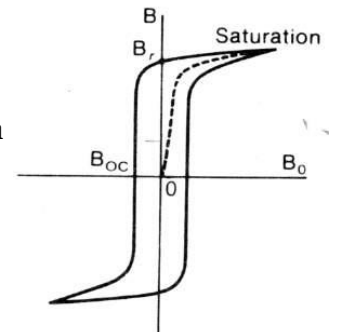
Remarque : les pertes par hystérésis sont négligeables si $U_1 \sim 0$ (par exemple, les pertes par hystérésis sont négligeables pour un essai avec le secondaire en court-circuit).

La valeur élevée de μ_r a une conséquence cruciale : l'induction "passe" μ_r fois plus facilement dans le fer que dans l'air. Dès que l'on place un morceau de fer dans un lieu où existe un champ magnétique, les lignes d'induction s'y engouffrent et sont canalisées par le circuit magnétique (tant que le fer n'est pas saturé). On voit que le fer est saturé si dans la boucle on est en position a ou c



➡ Cycle d'hystérésis

L'induction dans le fer B croît très vite par rapport à l'induction dans l'air B_0 jusqu'à la saturation. Lorsque B_0 diminue, on note un retard à la désaimantation. Lorsque $B_0 = 0$, il reste une induction rémanente B_r dans le fer. Pour l'annuler, il faut appliquer un champ inverse B_{oc} ; le champ correspondant est le champ coercitif ou démagnétisant. En inversant B_0 et en continuant le cycle, on obtient la courbe classique d'hystérésis.

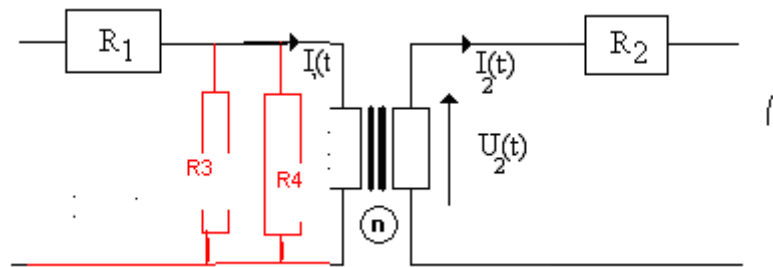


➡ Pertes par hystérésis

Correspondent à l'énergie absorbée par un cycle complet de magnétisation (surface de la courbe) $W/kg = 8,2 \cdot \eta \cdot f \cdot B^{1,6} \cdot 10^7$

$W = \text{Watt}$, $\eta = 0,0012$ pour la tôle dynamo, $f = \text{fréquence Hz}$, $B = \text{tesla}$

- ❖ Les pertes par courant de Foucault occasionnées par effet Joule dans le noyau de fer. En effet, un champ magnétique variable donne naissance à des courants de Foucault dans la masse du noyau de fer. Ces pertes sont modélisables par une résistance R_4 . Comment doit-on placer cette résistance dans le schéma électrique équivalent ?

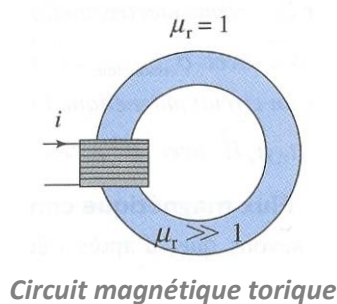


Afin de minimiser ces pertes on doit augmenter R4. Les solutions possibles sont :

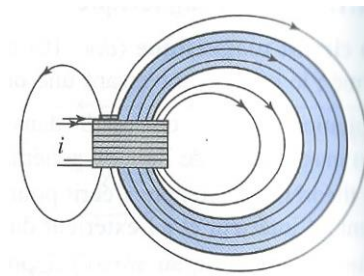
- Choisir un matériau fortement résistif pour diminuer les pertes par effet Joule proportionnelles au carré du courant induit,
- Feuilletter le matériau,
- Diminuer la fréquence d'utilisation.

Remarque : les pertes par courant de Foucault sont négligeables si $U_1 \sim 0$ (par exemple, les pertes par hystérésis sont négligeables pour un essai avec le secondaire en court-circuit).

- ❖ Perte par fuite magnétique : Malgré le soin apporté à la réalisation de matériaux magnétique, il existe toujours des lignes de champs magnétiques qui se renferment dans l'air et ne participe donc pas au fonctionnement du transformateur.



Circuit magnétique torique



*Circuit magnétique
et lignes de champ $\vec{B}$*

Compte-tenu de la géométrie retenue pour le transformateur, sous forme torique, les lignes de champ sont des cercles qui traversent les spires. En fait, même avec une géométrie non torique, le noyau magnétique canalise les lignes de champ magnétique du fait de sa perméabilité relative élevée. On peut donc considérer que, dans un transformateur, les circuits primaire et secondaire sont fortement couplés par induction mutuelle. Si on considère un couplage total, toute ligne de champ magnétique traversant une des spires d'un bobinage enlace l'intégralité des spires des deux enroulements.

Dans le cas du couplage total, c'est donc une description d'un transformateur parfait qui est faite. Ainsi, on considère qu'il n'y a pas de fuite magnétique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de lignes de champ qui se referment en dehors du noyau puisque la perméabilité relative μ_r du circuit magnétique est considérée comme infinie.

Les flux totaux dans les 2 bobines sont donc :

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_{p1} + \Phi_{2 \rightarrow 1} = L_1 \cdot i_1 + M_{2 \rightarrow 1} \cdot i_2 \\ \Phi_2 &= \Phi_{p2} + \Phi_{1 \rightarrow 2} = L_2 \cdot i_2 + M_{1 \rightarrow 2} \cdot i_1\end{aligned}$$

Remarque : ils peuvent s'écrire simplement sous formes matricielle :

$$\begin{pmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_1 & M_{21} \\ M_{12} & L_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

Les 2 relations $\Phi_1 = L_1 i_1 + M_{21} i_2$ et $\Phi_2 = L_2 i_2 + M_{12} i_1$ sont liées, on en déduit la nullité du déterminant : $\Delta = L_1 L_2 - M^2$, d'où :

$$M^2 = L_1 L_2$$

Cette relation $M^2 = L_1 L_2$ traduit le couplage total. Dans le cas général, il existe des lignes de champ qui traversent certaines spires et pas les autres. On parle alors de fuites magnétiques.

Il est alors naturel d'introduire le facteur de couplage magnétique k entre C_1 et C_2 :

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \text{ avec } 0 \leq k \leq 1$$

Le couplage est serré si $k \approx 1$ et lâche si $k \approx 0$.

$k = 1$ signifie que toutes les lignes du champ créé par C_1 traversent C_2 et réciproquement. C'est cette condition que l'on s'efforce de réaliser dans la construction d'un transformateur.

Annexe 2 : Les principales applications du transformateur :

Transformateur d'isolement :

Un transformateur d'isolement est un transformateur de rapport de transformation 1. Il permet d'avoir une tension de sortie sans que le circuit alimenté ne soit relié à la masse (donc à la terre). Un contact accidentel avec un des points du secondaire ne risque pas de mener à une électrisation phase neutre. Le circuit passant par l'homme est ouvert.

Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut qui y apparaîtrait n'engendre des dysfonctionnements dans une autre salle.

Autotransformateur

Transformateur élévateur ou abaisseur de tension. Il est utilisé pour la distribution du courant.

Transformateur d'impédance : Les électroniciens donnent ce nom aux transformateurs qui ne sont pas utilisés dans des circuits d'alimentation. Le transformateur d'impédance est principalement destiné à adapter l'impédance de sortie d'un amplificateur à sa charge.

Ce genre de transformateur était en particulier employé dans la restitution sonore, pour adapter la sortie d'un amplificateur audio à lampes (haute impédance), avec les haut-parleurs destinés à la restitution du son et caractérisés par une impédance basse.

A lire : <http://prof.guedon.org/spip.php?article138>

http://physique-eea.ujf-grenoble.fr/intra/Organisation/CESIRE/EEE/Thematiques/Docs/Transfo_mono.pdf

Explication de :

- pourquoi du fer pour la carcasse.
- de quels paramètres les pertes par courants de Foucault et d'hystérésis dépendent.