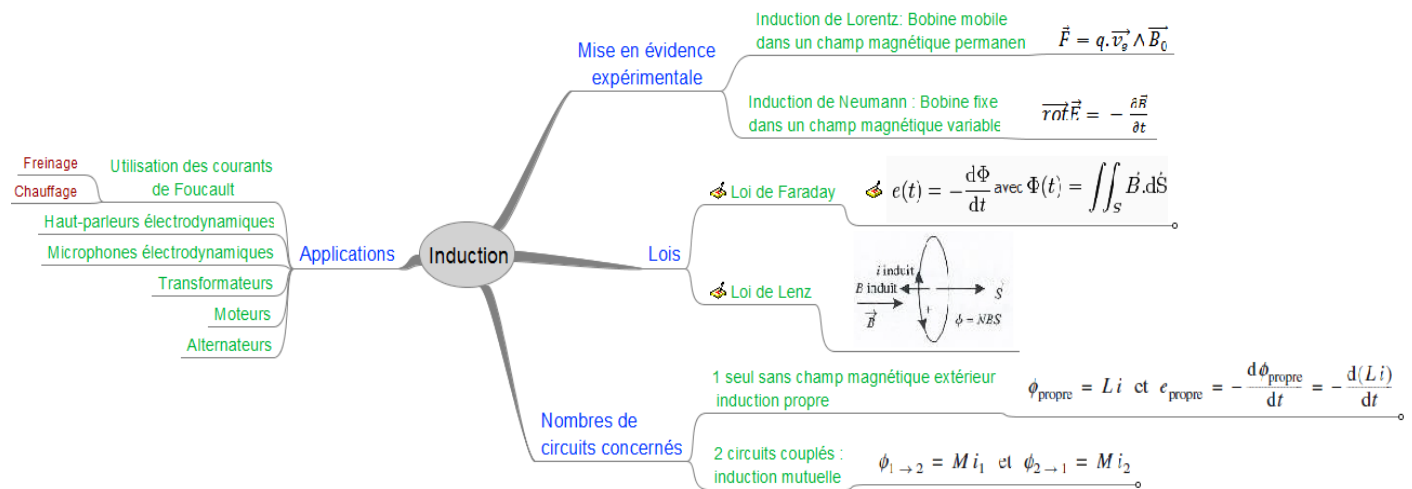


17-L- Induction

Intro : Carte Mentale



Post Bac : Courant induit dans un aimant tournant.

Biblio : HPrépa MP-PSI

Principe de l'alternateur (1000 et 1 question PCSI Q 28 chap 13)

2nde via Proposition d'aménagement du programme de la classe de seconde Physique-Chimie du conseil supérieur des programmes (version corrigée du 31 janvier 2017).

NOTIONS ET CONTENUS	COMPÉTENCES ATTENDUES
Le diagnostic médical : l'analyse de signaux périodiques, l'utilisation de l'imagerie et des analyses médicales permettent d'établir un diagnostic. Des exemples seront pris dans le domaine de la santé (électrocardiogrammes, électroencéphalogrammes, radiographie, échographie, fibroscopie, ...). L'observation de résultats d'analyses médicales permet d'introduire les notions de concentration et d'espèces chimiques ainsi que des considérations sur la constitution et la structure de la matière.	
Signaux périodiques : période, fréquence. tension minimale, tension maximale. Signaux électriques : tension alternative, valeur maximale, valeur minimale, mesure de tensions.	Connaître et utiliser les définitions de la période et de la fréquence d'un phénomène périodique. <i>Identifier le caractère périodique d'un signal sur une durée donnée.</i> <i>Déterminer les caractéristiques d'un signal périodique.</i> Produire une tension variable dans le temps à l'aide d'un alternateur. ⇒ étude qualitative d'une fonction

Alternateur (maquette Jeulin) – visualisation de tension à l'oscilloscope pour introduire les tensions variables, alternatives...

Application 4

Courant induit par un aimant tournant

Un aimant, assimilé à un dipôle magnétique de moment $\vec{M}$, tourne avec une vitesse angulaire constante ω autour de son axe (Oz) (doc. 20a).

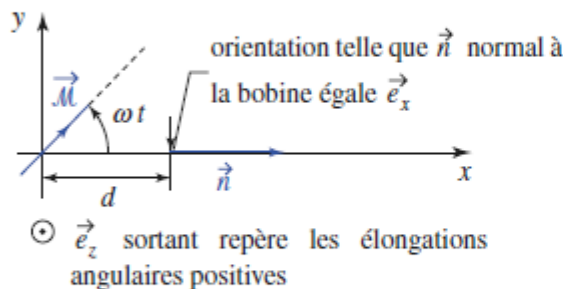
Une bobine plate de N spires d'aire S et de résistance électrique R , normales à l'axe (Ox), est placée sur l'axe (Ox) à une distance d , très grande devant ses dimensions et devant celles de l'aimant.

1) Calculer le courant $i(t)$ dans la spire en négligeant l'influence du champ magnétique propre de la bobine.

2) Calculer l'ordre de grandeur du champ magnétique propre au voisinage du centre de la bobine, puis discuter la validité de l'hypothèse précédente.

Commençons par préciser les orientations choisies (doc. 20b).

1) Si d est suffisamment grand, nous pouvons supposer que le champ de l'aimant est uniforme sur toute la bobine.



Doc. 20b. Choix des orientations.

La composante B_x du champ créé par l'aimant est en fait la composante radiale du champ du dipôle, soit :

$$B_x = \frac{\mu_0 M \cos \omega t}{2 \pi d^3}.$$

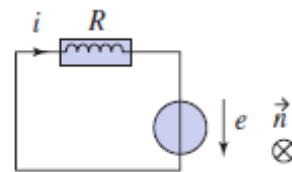
La bobine étant orientée de façon que $\vec{e}_x$ soit son vecteur normal $\vec{n}$, le flux du champ $\vec{B}$ créé par l'aimant à travers celle-ci est $\Phi = NSB_x$.

Le courant i se détermine en introduisant un générateur de f.e.m. :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 M N S \omega}{2 \pi d^3} \sin \omega t.$$

orienté selon le sens du circuit.

Le circuit de la bobine plate est donc équivalent à :



donc pour l'orientation choisie :

$$i = \frac{\mu_0 M N S \omega}{2 \pi d^3 R} \sin \omega t.$$

2) Le champ créé en son centre, par une spire de rayon a parcourue par un courant i , est :

$$B_{\text{propre}} = \frac{\mu_0 i}{2 a}.$$

En généralisant l'ordre de grandeur, pour une bobine de forme différente le champ induit au centre est de l'ordre de :

$$B_{\text{propre}} \approx \frac{\mu_0 N i}{\sqrt{S}} = -\frac{\mu_0 N^2 \sqrt{S}}{R} \frac{dB_x}{dt}.$$

Ainsi, B_{propre} est négligeable si son amplitude est faible devant celle de B_x , soit si :

$$\frac{\mu_0 N^2 \sqrt{S} \omega}{R} \ll 1.$$

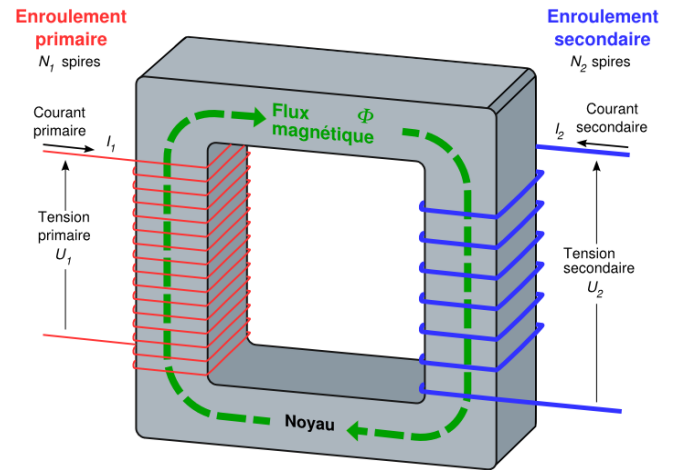
Par exemple, si $N = 100$ spires, $S = 1 \text{ cm}^2$ et $R = 1 \Omega$, cette condition devient :

$$\omega \ll 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Bibliographie : J'intègre PC et H-prépa électromagnétisme PSI (Mais pas super bien rédigé)

Un transformateur est constitué d'un **noyau torique de matériau ferromagnétique** sur lequel sont bobinés deux enroulements électriquement indépendants : le **primaire** (relié à la source) et le **secondaire** (relié à la charge).

Un transformateur comporte donc deux bobines. Pour réaliser l'étude du transformateur, nous devons d'abord étudier les phénomènes qui se produisent au niveau d'une bobine seule, c'est-à-dire le phénomène d'auto-induction, puis le phénomène de couplage magnétique qui se produit lorsque deux bobines parcourues par un courant sont mises en présence.



Auto-induction :

Considérons une bobine qui n'est pas soumise à un champ magnétique extérieur. Si cette bobine est traversée par un courant variable $i(t)$, elle crée son propre champ magnétique, noté $\vec{B}_{propre}$, qui est variable lui-aussi. Et le flux propre $\Phi_{propre} = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$ à travers la bobine est également variable. Le flux à travers la bobine est appelé flux propre puisque c'est le courant qui la parcourt qui est à l'origine du champ magnétique.

$\vec{B}_{propre} = \mu \frac{N_1}{l} i_1 \vec{u}_z$ (pour solénoïde ∞) est proportionnel à l'intensité i dans la bobine, donc Φ_{propre} est proportionnel à i , et le coefficient de proportionnalité, noté L , est appelé inductance de la bobine.

$$\Phi_{propre} = L \cdot i$$

L'inductance de la bobine est un coefficient purement géométrique qui ne dépend que de la forme de la bobine. Le coefficient L est toujours positif. Nous traiterons uniquement le cas de bobines rigides, ainsi l'inductance L sera constante.

Donc : Flux propre à travers le primaire : $\phi_{p1} = N_1 \cdot B_1 \cdot S = \frac{\mu N_1^2 S}{l} i_1 = L_1 \cdot i_1$

Remarque : (dont-il n'est pas forcément nécessaire de parler)

Comme tout circuit est plongé dans son propre champ, une variation du courant qui le parcourt entraîne une variation de son flux propre et donc, d'après la loi de Faraday, l'apparition d'une force électromotrice d'induction qui fait circuler un courant induit si le circuit est fermé. Puisque c'est le courant passant dans la bobine elle-même qui crée, à travers celle-ci, un flux magnétique variable, on donne à ce phénomène le nom d'auto-induction (le circuit inducteur s'identifie au circuit induit).

Appliquons la loi de Faraday (elle se note en convention générateur (voir CM)):

$$e_{propre} = - \frac{d\Phi_{propre}}{dt} \quad \text{avec} \quad \Phi_{propre} = L \cdot i \quad \text{et} \quad L = \text{constante} \quad \text{d'où} : e_{propre} = -L \frac{di}{dt}$$

Si, par exemple, le courant $i(t)$ augmente $\left(\frac{di}{dt} > 0\right)$, le flux propre $\Phi = L \cdot i$ augmente également et la f.e.m. correspondante $e = - \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}$, si le circuit est rigide, est négative. Cette f.e.m. négative tend donc à faire circuler un courant dans le sens négatif et ainsi s'oppose à l'augmentation du courant $i(t)$: c'est la loi de Lenz.

**UNE BOBINE S'OPPOSE À L'INSTALLATION OU À L'ANNULATION DU COURANT DANS UN CIRCUIT.
LE COURANT D'AUTO-INDUCTION EST DANS LE SENS INVERSE DE CELUI QUI LUI DONNE NAISSANCE.**

Donc, la f.e.m. d'auto-induction s'oppose toujours à la variation de courant i ; elle interdit toute discontinuité au courant dans l'intensité et impose donc au courant une certaine inertie. Dans un circuit inductif, le courant ne peut donc pas varier brutalement.

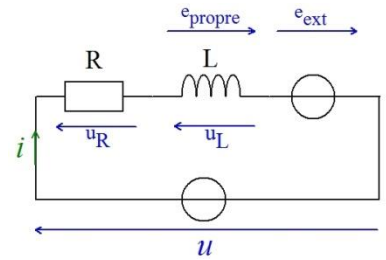
La loi d'Ohm généralisée s'écrit en présence d'un champ extérieur :

$$u = Ri - e_{\text{propre}} - e_{\text{ext}}$$

Dans le schéma électrocinétique, la fem d'auto-induction est prise en compte au moyen d'une inductance pure : $e_{\text{propre}} = -L \frac{di}{dt}$

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} - e_{\text{ext}} \text{ ici, pas de champ } \vec{B}_{\text{ext}} \Rightarrow e_{\text{ext}} = 0$$

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



Phénomène de couplage magnétique dans les circuits. Notion d'induction mutuelle :

❖ Induction mutuelle :

Le $\vec{B}_{\text{propre}}$ dans le primaire (qui engendre un Flux propre à travers le primaire : $\phi_{p1} = N_1 \cdot B_1 \cdot S = \frac{\mu N_1^2 S}{l} i_1 = L_1 \cdot i_1$) va être canalisé par le noyau ferromagnétique pour aller induire un champ magnétique dans le circuit secondaire (voir remarque pour plus d'explication) on parle de phénomène **d'induction mutuelle**.
« Mutuelle » car on va voir que ça va dans les 2 sens, B_2 va induire un champ magnétique dans le primaire.

$$\text{Flux induit à travers le secondaire : } \phi_{1 \rightarrow 2} = N_2 \cdot B_1 \cdot S = \frac{\mu N_2 N_1 S}{l} i_1 = M_{1 \rightarrow 2} \cdot i_1$$

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 mutuelle induction.

Conclusion : Un couplage par induction mutuelle existe entre deux circuits électriques lorsque la variation du champ magnétique crée par l'un est sensible dans l'autre.

Remarque : On vient de voir le couplage par induction mutuelle. Mais ce couplage peut être partiel ou total. (voir annexe : les pertes par fuites magnétiques)

Les flux totaux dans les 2 bobines sont donc :

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{p1} + \phi_{2 \rightarrow 1} = L_1 \cdot i_1 + M_{2 \rightarrow 1} \cdot i_2 \\ \phi_2 &= \phi_{p2} + \phi_{1 \rightarrow 2} = L_2 \cdot i_2 + M_{1 \rightarrow 2} \cdot i_1 \end{aligned}$$

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

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

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

Remarque : On comprend bien avec ces équations la nécessité de se trouver en régime variable

❖ 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.

Remarque : On peut amplifier un courant ou une tension, mais pas les deux à la fois.

Le rapport $m = \frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1}$ est appelé rapport de transformation. Ainsi, dans un transformateur idéal, le rapport des tensions aux bornes des deux circuits, primaire et secondaire, est égal au rapport du nombre de spires de ces enroulements. Ce rapport de transformation est indépendant de la charge branchée au secondaire du transformateur.

Les transformateurs sont des appareils très utilisés dans la pratique car on souhaite souvent modifier l'amplitude de la tension variable délivrée par un générateur. Un exemple important est celui de la distribution du courant électrique où l'utilisation de très hautes tensions est nécessaire pour transporter l'énergie électrique avec peu de pertes. Des transformateurs élèvent, par exemple jusqu'à 400 kV, la tension alternative de 25 kV que délivre un alternateur à la sortie d'une centrale électrique. En revanche, à proximité d'une installation domestique, plusieurs échelons de transformation ramènent cette tension à 230 V.

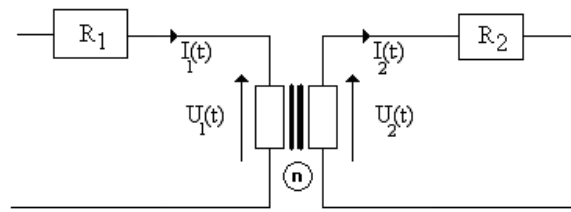
Attention : en question on va forcément se prendre, qu'est ce qu'un transfo non idéal et comment le modéliser ?

Partie Péda.

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

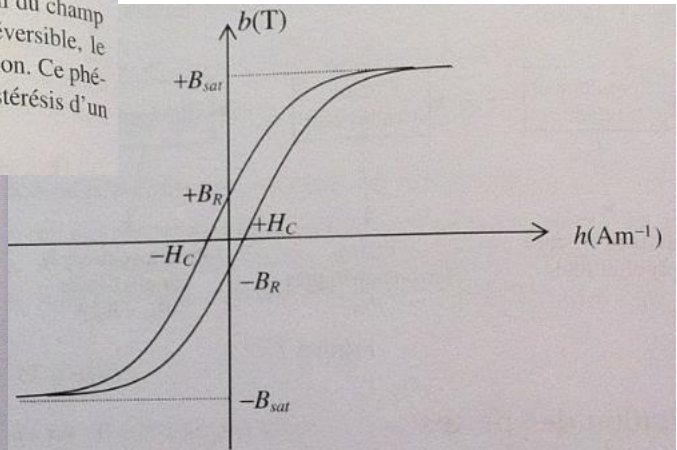
Remarque 2 : quand I_2 et I_1 sont presque nuls, les pertes cuivre sont négligeables (par exemple, les pertes cuivre sont négligeables dans un essai à circuit ouvert).

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

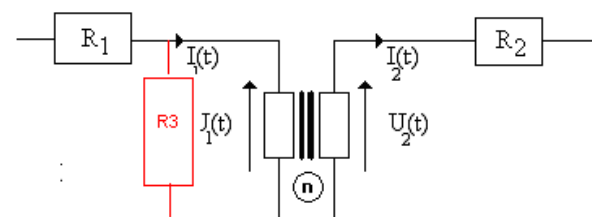
• **Les pertes par hystérésis** : l'aimantation du circuit magnétique absorbe de l'énergie. Il faut en effet aligner tous les domaines de Weiss dans la direction du champ excitateur et déplacer les parois de Bloch. Ce phénomène est non réversible, le matériau ne restituant pas toute l'énergie reçue pendant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

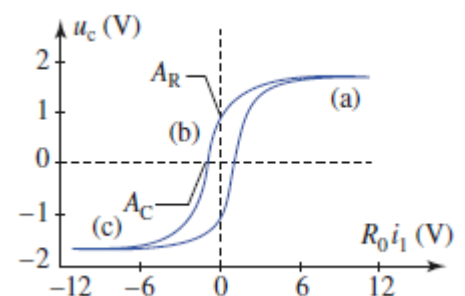


Afin de diminuer ces pertes on doit augmenter R_3 . Les solutions possibles sont :

- Choisir un matériau à cycle étroit (fer doux),
- Diminuer la fréquence d'utilisation.

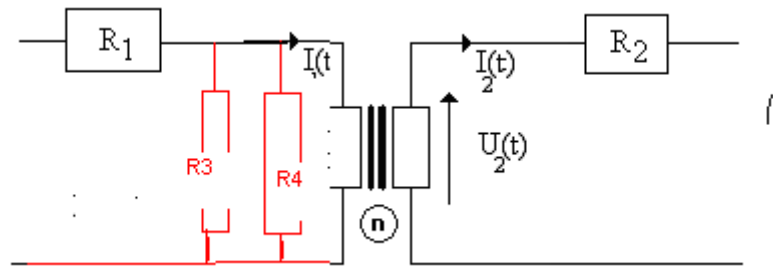
Remarque : les pertes par hystérésis sont négligeables si $U_1 \sim 0$ (par exemple, les pertes par hystérésis sont négligeables pour un essai avec le secondaire en court-circuit).

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

- ❖ 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 ?

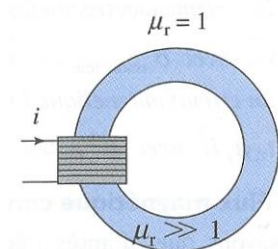


Afin de minimiser ces pertes on doit augmenter R_4 . Les solutions possibles sont :

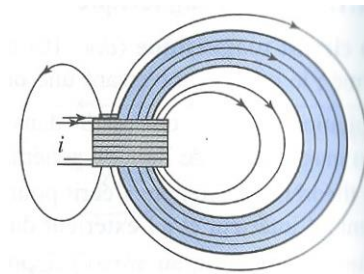
- Choisir un matériau fortement résistif pour diminuer les pertes par effet Joule proportionnelles au carré du courant induit,
- Feuilletter le matériau,
- Diminuer la fréquence d'utilisation.

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.