

Les circuits magnétiques en régime sinusoïdal : bobine à noyau de fer

«Le génie n'est qu'une plus grande aptitude à la patience.»
Paroles attribuées à Buffon par Hérault de Séchelles.

Résumé

Les applications industrielles mettent en œuvre l'énergie électrique sous forme sinusoïdale. Vus les niveaux de puissance, les tensions et courants sont importants. Les études générales sur les matériaux ferromagnétiques ont montré des comportements non linéaires alors qu'ils sont exploités jusqu'à la saturation : il faut décrire les comportements issus de ce phénomène.

Après une brève définition de la bobine à noyau de fer (BNF), les circuits magnétiques sont étudiés dans un comportement linéaire. On tient compte cette fois-ci de la résistance de l'enroulement, de l'inductance propre et de l'inductance matérialisant les fuites magnétiques. Ces paramètres sont rassemblés dans un modèle linéaire de la BNF.

Lorsque la BNF est alimentée sous tension sinusoïdale, on observe que les chutes de tension dues à la résistance et à l'inductance de fuite sont faibles vis à vis de la tension émanant du flux. L'hypothèse de Kapp traduit cette approximation pour permettre une expression sinusoïdale du flux et du courant. C'est un moyen pratique de relier l'induction et la tension comme le traduit la relation de Boucherot.

Même si elle apporte des résultats intéressants, l'approche linéaire demeure satisfaisante pour représenter le comportement de la bobine à noyau de fer dans le domaine saturé. L'observation du courant dans la BNF saturée montre qu'il n'est pas sinusoïdal. Pour affiner le modèle, on effectue une analyse énergétique passant par la description des puissances dans les matériaux magnétiques. Aux imperfections déjà envisagées viennent donc s'ajouter les pertes dues aux courants induits (de Foucault) et par hystérésis. Cette analyse globale intégrant les pertes conduit à un nouveau modèle de la BNF plus proche de la réalité.

Le document s'achève sur quelques descriptions technologiques de la bobine à noyau de fer.

Sommaire

I. Introduction.....	2
I.1. Le comportement en régime sinusoïdal.....	2
I.2. La bobine à noyau de fer.....	2
II. Comportement de la bobine en approximation linéaire.....	2
II.1. Résistance de l'enroulement.....	2
II.2. Coefficient d'auto-induction (inductance).....	2
II.3. Inductance de fuite.....	2
II.4. Mise en équation complète et modèle.....	3
III. Comportement de la bobine linéaire en régime sinusoïdal	3
III.1. Mise en place.....	3
III.2. Mise en équation	3
III.3. Comportement simplifié : modèle de Kapp	4
III.3.1. Relation entre le flux (ou l'induction) et la tension.....	4
III.3.2. Relation entre le flux et le courant	4
IV. Comportement non linéaire	4
IV.1. Influence de la saturation	4
IV.2. Illustration du comportement temporel des différentes grandeurs	4
V. Considérations énergétiques dans la bobine à noyau de fer	5
V.1. Densité d'énergie.....	5
V.2. Illustration : expression de l'énergie dans le cas du modèle linéaire	6
V.3. Les pertes dans les bobines à noyaux de fer	6
V.3.1. Pertes par courants de Foucault	6
V.3.2. Pertes par hystérésis.....	7
V.3.3. Globalisation des pertes : pertes fer	7
VI. Détermination du modèle électrique équivalent de la bobine saturée	8
VI.1. Comportement du courant.....	8
VI.2. Etablissement du schéma équivalent.....	8
VI.3. Représentation de Fresnel.....	9
VI.4. Schéma équivalent complet.....	9
VII. Technologie et applications des bobines à noyau de fer	10
VII.1. Eléments de technologie de réalisation	10
VII.2. Applications	10
VIII. Bibliographie.....	10

I. Introduction


I.1. Le comportement en régime sinusoïdal

Les circuits magnétiques ont été jusqu'à maintenant étudiés dans le cadre de l'approximation linéaire d'Hopkinson : les circuits magnétiques sont parfaits, c'est à dire linéaires (μ_r constant) et exempts de fuites magnétiques (tout le flux créé par les enroulements apparaît dans le circuit magnétique).

Dans les applications industrielles, l'approximation linéaire n'est plus de mise car l'exploitation des matériaux ne se cantonne pas aux inductions faibles, là où la linéarité est garantie. L'exploration des zones saturées permet de décrire plus justement les phénomènes observés.

I.2. La bobine à noyau de fer

Un bobinage associé à un circuit magnétique (matériau ferromagnétique) constitue une bobine à noyau de fer (BNF). Cet élément est essentiellement alimenté en régime sinusoïdal et la réponse des grandeurs électriques et magnétiques est fortement liée au comportement saturé ou non du matériau.

Symbole de la bobine à noyau de fer :  (la barre représente le noyau du circuit magnétique).

II. Comportement de la bobine en approximation linéaire

Dans cette partie, on analyse chaque phénomène linéaire indépendamment des autres, puis le tout est regroupé pour établir le modèle linéaire de la bobine en approximation linéaire.

II.1. Résistance de l'enroulement

La résistance propre du conducteur de l'enroulement de longueur l , de section s et constitué d'un matériau de résistivité ρ est : $r = \rho \frac{l}{s}$

II.2. Coefficient d'auto-induction (inductance)

Dans la partie linéaire du matériau, la perméabilité relative μ_r est constante, donc $B = \mu_0 \mu_r H$. [1]

Dans ces conditions, on peut définir la réluctance du circuit magnétique : $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{l}{S}$. [2]

La relation d'Hopkins relie le flux dans le circuit magnétique ϕ au courant i : $Ni = \mathcal{R}\phi$. [3]

Le flux total à travers toutes les spires est alors : $\phi_T = N\phi = NSB$. [4]

En combinant les relations [3] et [4], on obtient : $\phi_T = \frac{N^2}{\mathcal{R}} i$.

Ce coefficient de proportionnalité entre flux et courant est le coefficient d'auto-induction : $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$.

II.3. Inductance de fuite

Toutes les lignes de champ créées par l'enroulement n'apparaissent pas dans le circuit magnétique. Pour des raisons essentiellement de fabrication, certaines d'entre-elles se rebouclent dans l'air proche des spires.

On distingue le flux dans le matériau $\phi(t)$ du flux de fuite s' en échappant $\phi_f(t)$ (**Figure 1**).

Le flux embrassé par l'enroulement s'écrit :

$$\phi_e(t) = \phi(t) + \phi_f(t)$$

Par la loi de Faraday, la tension est :

$$u(t) = N \frac{d\phi_e(t)}{dt} = N \frac{d\phi(t)}{dt} + N \frac{d\phi_f(t)}{dt}$$

Le premier terme correspond à l'inductance propre de l'enroulement. Le second correspond à une inductance équivalente attachée au milieu de propagation du flux (l'air) parcourue par le courant i : c'est l'inductance de fuite l_f .

La tension peut donc s'écrire : $u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + l_f \frac{di(t)}{dt}$.

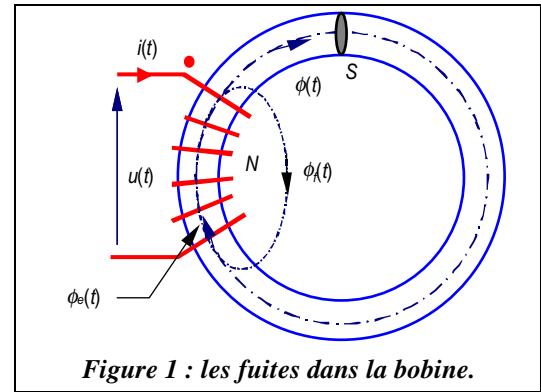


Figure 1 : les fuites dans la bobine.

II.4. Mise en équation complète et modèle

La bobine laisse apparaître la résistance de l'enroulement, son inductance propre et l'inductance qui traduit les fuites magnétiques.

La mise en équation complète s'effectue en écrivant la tension aux bornes de l'enroulement :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Contribution de la résistance } r : ri(t) \\ \text{Contribution de l'inductance propre } L : L \frac{di(t)}{dt} \\ \text{Contribution de l'inductance de fuite } l_f : l_f \frac{di(t)}{dt} \end{array} \right\} \text{ donc } u(t) = ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + l_f \frac{di(t)}{dt}$$

De cette relation, on déduit le modèle électrique équivalent de la bobine à noyau de fer en régime linéaire présenté à la Figure 2.

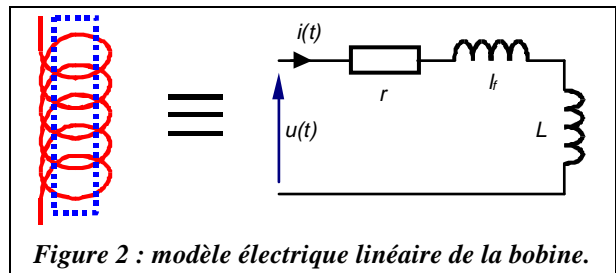


Figure 2 : modèle électrique linéaire de la bobine.

III. Comportement de la bobine linéaire en régime sinusoïdal

III.1. Mise en place

Dans les applications technologiques (industrielles ou domestiques), les bobinages sont souvent alimentés par une tension sinusoïdale. La liaison entre le flux et la tension est déterminée par la loi de Faraday. La relation d'Hopkinson permet d'exprimer le lien entre le flux et le courant. L'élimination du flux fournit la relation entre la tension et le courant en régime sinusoïdal.

III.2. Mise en équation

Expression la plus générale de la tension : $u(t) = ri(t) + N \frac{d\phi_e(t)}{dt}$.

En isolant l'inductance de fuite : $u(t) = ri(t) + l_f \frac{di(t)}{dt} + N \frac{d\phi(t)}{dt}$.

En conclusion : la tension et le courant ne sont pas reliés directement. Pour pouvoir exprimer directement le flux, on réalise l'**hypothèse de Kapp**¹.

¹ Kapp ()

III.3. Comportement simplifié : modèle de Kapp

Si l'effet des fuites magnétiques $l_f \frac{di(t)}{dt}$ et de la résistance de l'enroulement $ri(t)$ influencent peu la tension $u(t)$ vis à vis du terme prépondérant $N \frac{d\phi(t)}{dt}$, on réalise l'hypothèse de Kapp :

$$l_f \frac{di(t)}{dt} \ll N \frac{d\phi(t)}{dt} \text{ et } ri(t) \ll N \frac{d\phi(t)}{dt}, \text{ alors } u(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt}$$

III.3.1. Relation entre le flux (ou l'induction) et la tension

L'enroulement est alimenté par la tension sinusoïdale : $u(t) = U\sqrt{2} \cos \omega t$.

Après l'hypothèse de Kapp, $u(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt}$, donc $d\phi(t) = \frac{u(t)}{N} dt$: $\phi(t) - \phi(0) = \frac{1}{N} \int_0^t u(t) dt$.

D'où l'expression du flux : $\phi(t) - \phi(0) = \frac{U\sqrt{2}}{N\omega} \sin \omega t$.

En considérant la démagnétisation initiale : $B(t) = \frac{\phi(t)}{S} = \frac{U\sqrt{2}}{NS\omega} \sin \omega t$.

L'identification des amplitudes fournit la **relation de Boucherot** :

$$U = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} B_{\max} NSf = 4,44 B_{\max} NSf$$

Dans l'hypothèse de Kapp, la tension et le flux sont des grandeurs sinusoïdales.

Cette hypothèse est d'autant plus intéressante que la tension u est imposée à la bobine, si bien que le flux découle directement de la tension : on travaille à **flux forcé**.

III.3.2. Relation entre le flux et le courant

Avec la relation d'Hopkinson et $\phi_f(t) \ll \phi(t)$: $Ni(t) = \mathcal{R}\phi(t)$.

Le circuit est initialement démagnétisé ($\phi(0) = 0$) donc $\phi(t) = \frac{U\sqrt{2}}{N\omega} \sin \omega t$.

Par conséquent : $i(t) = \frac{\mathcal{R}}{N^2} \frac{U\sqrt{2}}{\omega} \sin \omega t$ soit en introduisant l'inductance ($\frac{\mathcal{R}}{N^2}$), $i(t) = \frac{U\sqrt{2}}{L\omega} \sin \omega t$

On retrouve la définition de l'impédance de l'inductance en régime sinusoïdal : $Z = L\omega$.

IV. Comportement non linéaire

IV.1. Influence de la saturation

Dans les applications industrielles, les grandeurs sinusoïdales tensions et courants ont des amplitudes élevées. Par conséquent, la saturation est vite atteinte. On ne peut plus tenir compte de la linéarité du matériau (μ , n'est pas constant). La réductance et l'inductance ne peuvent plus être définies.

De plus, le parcours répétitif du cycle d'hystérésis nécessite de tenir compte des influences énergétiques.

Cette *nouvelle donne* incite à reconsidérer l'étude des circuits magnétiques en régime saturé.

IV.2. Illustration du comportement temporel des différentes grandeurs

Comment passer de la tension au courant si les comportements ne sont pas linéaires ?

Le schéma de la **Figure 3** montre le cheminement qui permet de tracer l'allure du courant (**Figure 4**).

$$\boxed{u(t) = U\sqrt{2} \cos \omega t} \rightarrow \boxed{\phi(t) = \Phi_M \sin \omega t} \rightarrow \boxed{B(t) = B_M \sin \omega t} \rightarrow \boxed{H(t)} \rightarrow \boxed{i(t)}$$

Figure 3 : les étapes menant de la tension sinusoïdale au courant.

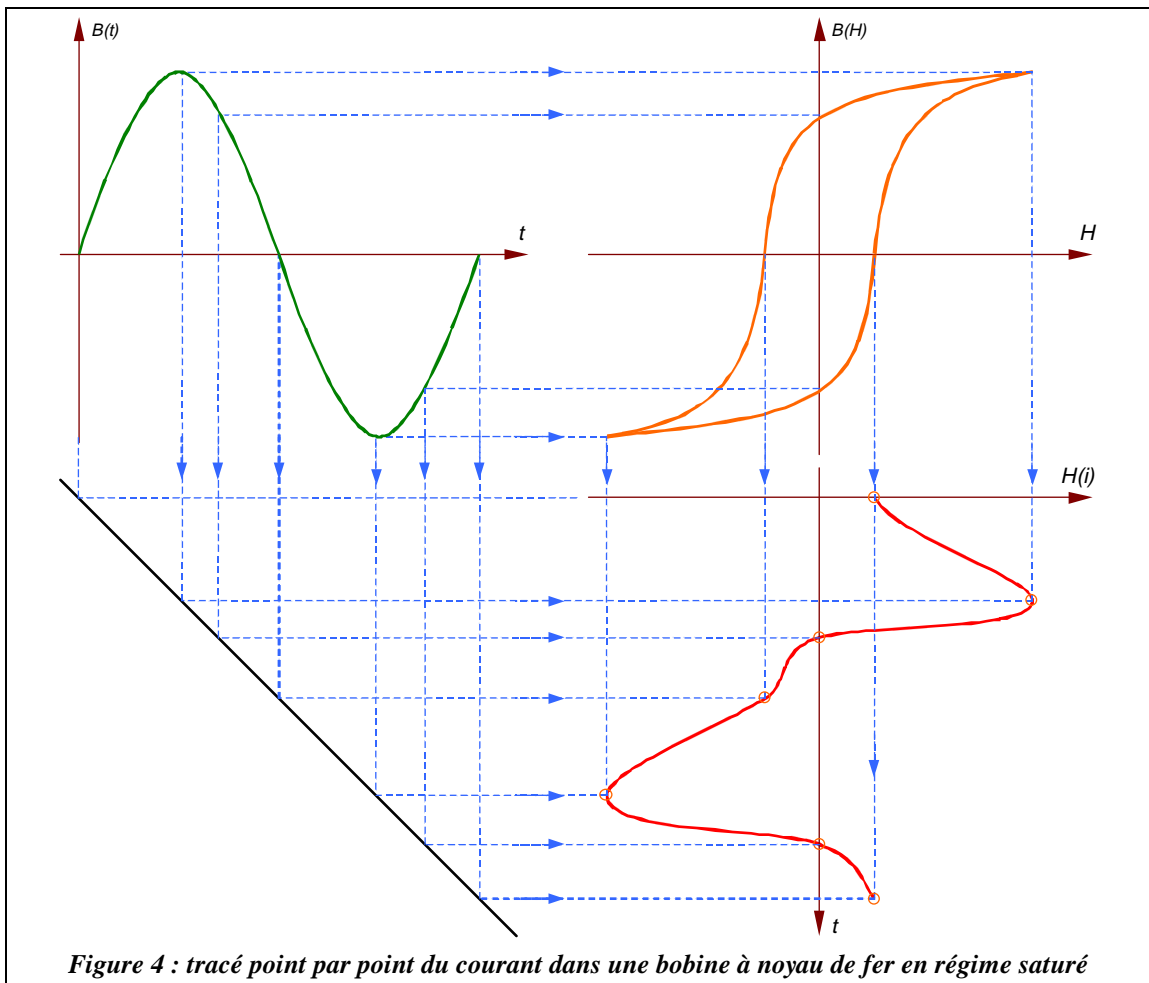


Figure 4 : tracé point par point du courant dans une bobine à noyau de fer en régime saturé

Le courant dans la bobine est **périodique** mais **non sinusoïdal**. Il est d'autant plus « déformé » que le circuit magnétique est saturé.

La distorsion du signal est marquée par le taux d'harmoniques. Si la déformation est faible, une **approximation au premier harmonique** est envisageable. On ne travaille alors qu'avec le courant fondamental.

Dans le cas général, il faut envisager l'influence de toutes les harmoniques. Dans ces conditions, on recherche une représentation sinusoïdale du courant qui transporte la même puissance que le courant réel. Cette équivalence est obtenue en travaillant avec la puissance.

V. Considérations énergétiques dans la bobine à noyau de fer

V.1. Densité d'énergie

Un élément de volume $d\tau$ est soumis à un champ d'excitation. Il est alors le siège d'une induction (Figure 5).

$$\text{On définit la densité d'énergie } \rho_w = \frac{dW}{d\tau} = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} .$$

L'énergie magnétique présente dans un volume de matériau V_{mat} : $W = \rho_w V_{mat} = \frac{1}{2} \vec{B} \cdot \vec{H} V_{mat} .$

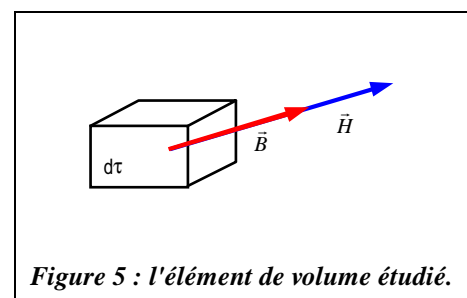


Figure 5 : l'élément de volume étudié.

Puisque \vec{B} et \vec{H} sont colinéaires :

$$d\rho_w = d\left(\frac{dW}{d\tau}\right) = \frac{1}{2}(BdH + HdB)$$

Pour H constant, $dH = 0$, donc :

$$d\rho_w|_{H=cte} = \frac{1}{2}HdB.$$

De même, pour B constant :

$$d\rho_w|_{B=cte} = \frac{1}{2}BdH.$$

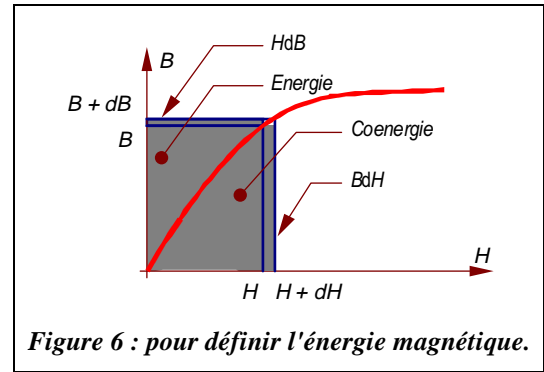


Figure 6 : pour définir l'énergie magnétique.

Puisque B et H sont quelconques, les deux quantités précédentes sont différentes.

On définit alors :

- l'énergie $W = \int_B d\rho_w|_{H=cte} = \frac{1}{2} \int_B HdB$
- la coénergie $W' = \int_H d\rho_w|_{B=cte} = \frac{1}{2} \int_H BdH$

Graphiquement, l'énergie est la portion de surface entre la courbe et l'axe de l'induction. La coénergie est portion de surface entre la courbe et l'axe du champ d'excitation. La somme de l'énergie et de la coénergie est le produit $B.H$ (Figure 6).

V.2. Illustration : expression de l'énergie dans le cas du modèle linéaire

Pour les matériaux linéaires, on définit la réluctance, $\mathcal{R} = \frac{1}{\mu_0\mu_r} \frac{l}{S}$ et l'inductance, $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$.

$$W = \rho_w V = \frac{1}{2} BHS l = \frac{1}{2} \frac{1}{\mu_0\mu_r} B^2 S l = \frac{1}{2} \frac{l}{\mu_0\mu_r} \phi^2, \text{ donc } W = \frac{1}{2} \mathcal{R} \phi^2.$$

$$\text{Mais aussi } \phi_T = N\phi = \frac{N^2 i}{\mathcal{R}} = Li, \text{ donc } W = \frac{1}{2} \mathcal{R} \left(\frac{L}{N}\right)^2 i^2, \text{ donc } W = \frac{1}{2} Li^2.$$

V.3. Les pertes dans les bobines à noyau de fer

Avant d'entamer une analyse énergétique plus fine, il est important de préciser l'origine des différentes pertes qui apparaissent dans le circuit magnétique d'une bobine.

V.3.1. Pertes par courants de Foucault²

Les matériaux ferromagnétiques ont souvent des propriétés conductrices pour le courant électrique : en présence d'un flux variable, la fem induite crée les courants de Foucault qui circulent dans le matériau. L'effet Joule dissipe l'énergie sous forme de chaleur, ce sont les **pertes par courants de Foucault**.

Evaluation des pertes par courants de Foucault

Les pertes par courants de Foucault sont de la forme (résultat non démontré) :

$$P_F = k \frac{B_M^2 \cdot f^2}{\rho}$$

Moyens de réduction des pertes

- Utiliser un matériau plus résistif : fer avec addition de silicium, ferrite.
- Augmenter la résistance au passage des courants (Figure 7 et Figure 8) : circuit magnétique composé de tôles (feuilletage) isolées entre elles par oxydation surfacique.

Remarque : le chauffage par induction favorise ce phénomène en augmentant la fréquence.

² Foucault (Léon), physicien français (1819-1868).

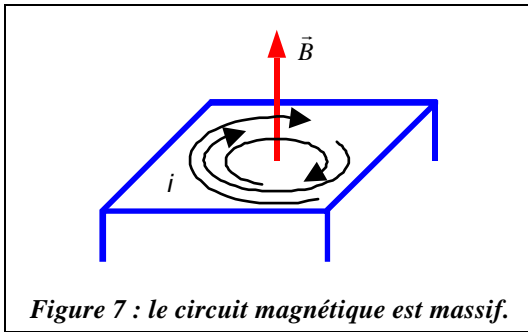


Figure 7 : le circuit magnétique est massif.

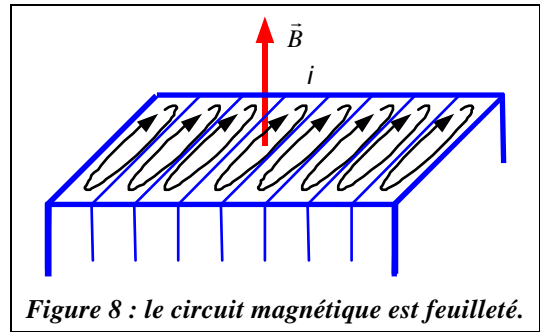


Figure 8 : le circuit magnétique est feuilleté.

V.3.2. Pertes par hystérésis

Sous l'effet des champs d'induction et d'excitation, les forces de Laplace créent des contraintes internes au matériau qui mettent en mouvement les domaines de Weiss. Leur frottement les uns contre les autres favorise l'échauffement du matériau : ce sont les **pertes par hystérésis**.

Evaluation des pertes par hystérésis

Les pertes proviennent de la différence entre l'énergie emmagasinée durant la croissance de H et celle restituée lors de la décroissance. Pour un parcours complet du cycle, l'énergie est proportionnelle à son aire (\mathcal{A}_H) et au volume du matériau (V). Ces pertes sont d'autant plus importantes que le nombre de cycles par seconde est élevé. Une tension évoluant à la fréquence f , crée des grandeurs magnétiques évoluant à cette fréquence. Les pertes s'expriment par :

$$P_H = \mathcal{A}_H \cdot V \cdot f$$

W/m^3 W Hz m^3

Estimation expérimentale des pertes par hystérésis

Dans la pratique, seule une évaluation approchée est possible. On dispose de deux modèles :

- Modèle exponentiel de Steinmetz³ :

$$\mathcal{A}_H = \eta B_M^\gamma \text{ avec } \eta = \text{cte et } 1,6 \leq \gamma \leq 2.$$

- Modèle quadratique de Richter⁴ :

$$\mathcal{A}_H = a B_M + b B_M^2 \text{ avec } a \text{ et } b \text{ constants. Pour } B_M > 1\text{T, } \mathcal{A}_H \approx b B_M^2.$$

En règle générale, ces pertes sont globalisées : $P_H = k_H \cdot f \cdot B_M^2$ où k_H est la **constante d'hystérésis**.

Moyens de réduction des pertes

Puisque les pertes sont directement conditionnées par l'aire du cycle d'hystérésis, il faut les réduire en utilisant, par exemple, des matériaux ferromagnétiques doux.

V.3.3. Globalisation des pertes : pertes fer

Les pertes fer constituent l'ensemble des pertes dans le matériau :

$$P_{fer} = P_F + P_H \approx k_F \cdot f^2 \cdot B_M^2 + k_H \cdot f \cdot B_M^2$$

On remarquera que les deux types de pertes sont proportionnelles au carré de l'induction maximale. Pour la fréquence, les pertes par hystérésis sont proportionnelles et celles par courants de Foucault dépendent du carré. Cette distinction permet d'effectuer des méthodes de séparation des pertes.

³ Steinmetz (Charles Proteus), ingénieur allemand, travaux sur les pertes dans les matériaux magnétiques, (1865-1923).

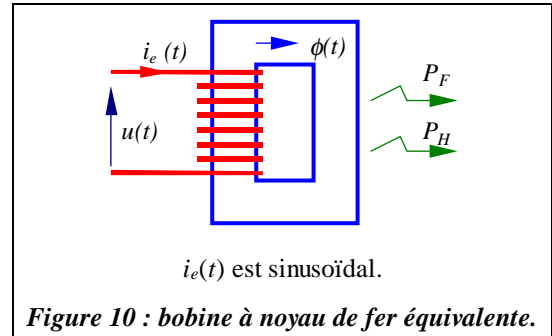
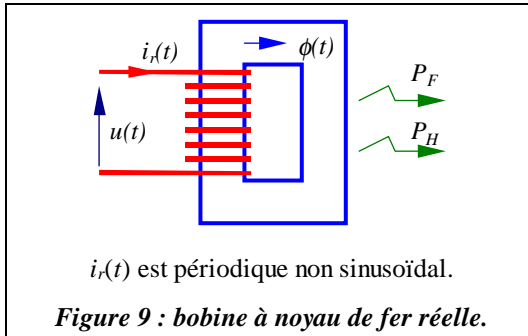
⁴ Richter (),

VI. Détermination du modèle électrique équivalent de la bobine saturée

La mise en place du modèle équivalent de la bobine à noyau de fer saturée tend à considérer la tension, le flux et le courant sinusoïdaux, effectuer l'approximation de Kapp et compte du comportement énergétique par les puissances mises en jeu.

VI.1. Comportement du courant

Le courant réel dans la bobine i_r (r pour réel) n'est pas sinusoïdal (**Figure 9**). Il est déformé et répond à une décomposition harmonique dont on conserve le fondamental. Le courant dans la bobine équivalente est sinusoïdal (**Figure 10**). Pour le distinguer, il est noté i_e (e pour équivalent).



Mise en place du courant équivalent

Bobine réelle	Bobine équivalente
$u(t) = U\sqrt{2} \cos \omega t \xrightarrow{\text{hyp. de Kapp}} \phi(t) = \frac{U\sqrt{2}}{N\omega} \sin \omega t$	$u(t) = U\sqrt{2} \cos \omega t$
Csq : le flux et l'induction sont sinusoïdaux	Le flux et l'induction sont sinusoïdaux.
Le courant $i_r(t)$ est non sinusoïdal (Cf §IV.2). Sa valeur efficace peut être déterminé par une mesure avec un appareil ferromagnétique ou efficace vrai 5 (TRMS, <i>True Root Mean Square</i>).	Le courant $i_e(t)$ est sinusoïdal par hypothèse. Sa valeur efficace est identique à celle du courant réel $i_r(t)$ pour s'assurer de la conservation du comportement énergétique.
La mesure de la puissance active avec un wattmètre fournit globalement la somme des pertes fer et des pertes par hystérésis : P_f (f pour fer).	La puissance P_f est globalement celle consommée par une résistance que l'on notera R_f sous la tension $u(t)$.

A terme, le modèle correspond à un courant sinusoïdal de même valeur efficace que le courant réel et la consommation d'une puissance active identique aux pertes fer.

VI.2. Etablissement du schéma équivalent

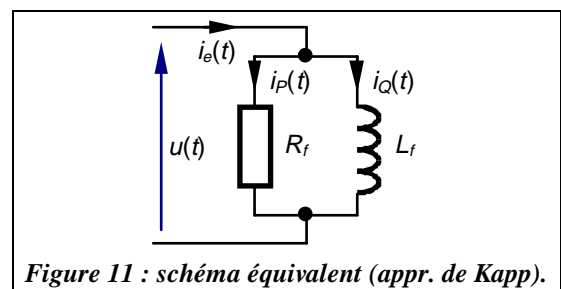
Détermination de la puissance apparente : $S = U.I_r$ (produit des valeurs efficaces).

Puisque les valeurs efficaces des courants sont identiques : $S = U.I_e$

La mesure de la puissance active fournit les pertes fer : $P = P_{fer}$.

La puissance active P_{fer} est consommée par une résistance R_f soumise à la tension $u(t)$ et parcourue par le courant actif i_p :

$$R_f = \frac{U^2}{P_{fer}} = \frac{P_{fer}}{I_p^2} = \frac{U}{I_p}$$



La puissance réactive consommée traduit le déphasage entre le courant i_e et la tension : elle est matérialisée par une inductance L_f soumise à la tension $u(t)$ parcourue par le courant réactif i_Q :

$$X_f = L_f \omega = \frac{U^2}{Q_{fer}} = \frac{Q_{fer}}{I_Q^2} = \frac{U}{I_Q}$$

On remarquera cependant que ce modèle est limité par différents facteurs :

- R et L ne sont pas constantes :
 - R_f et L_f dépendent de la fréquence (effet de peau),
 - L dépend de la saturation du matériau.
- Le modèle ne traduit pas toute la réalité physique : c'est une approximation.

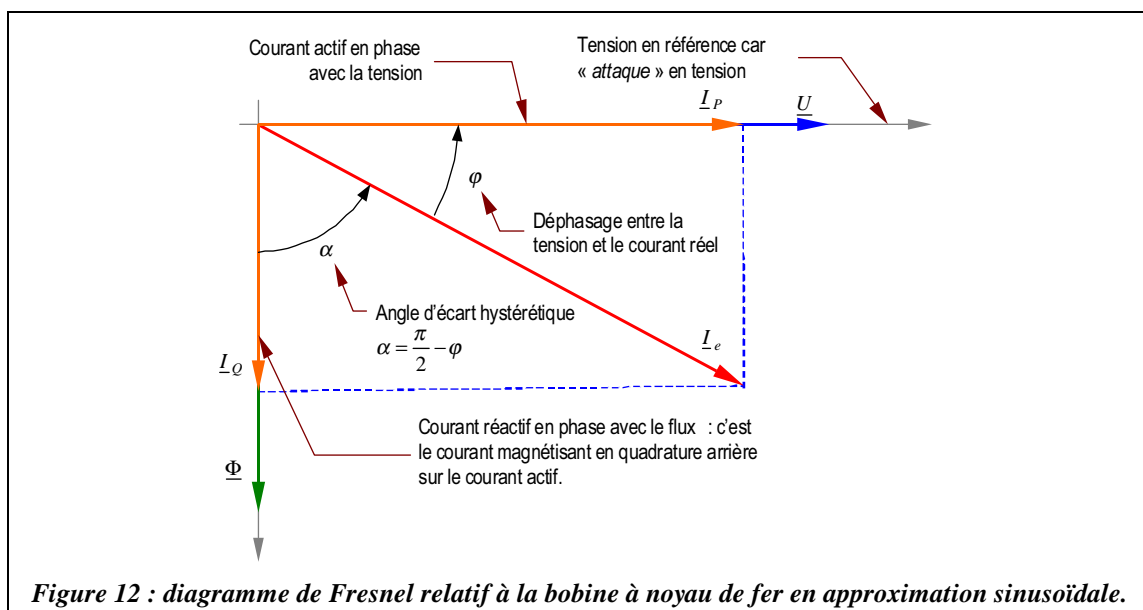
VI.3. Représentation de Fresnel

La représentation n'est possible que pour des grandeurs sinusoïdales, donc pour la bobine équivalente.

Puisque les grandeurs tension, courant, flux, induction et champ d'excitation sont sinusoïdales, toutes les écritures peuvent utiliser la représentation complexe :

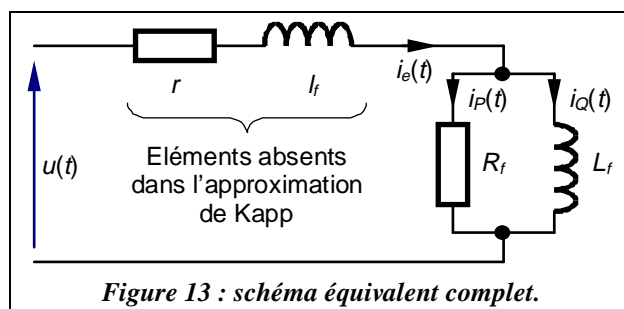
- $u(t) = U\sqrt{2}\cos\omega t$ donc $\underline{U} = U\sqrt{2}e^{j\omega t}$: la tension est prise comme référence des phases.
- $u(t) = N\frac{d\phi(t)}{dt}$ donc $\underline{U} = j\omega N\Phi$: le flux est en quadrature arrière sur la tension.
- $\phi(t) = B(t)S$ donc $\underline{\Phi} = S\underline{B}$

Ces différentes informations permettent de tracer le diagramme de Fresnel de la bobine équivalente dans l'approximation de Kapp (**Figure 12**).



VI.4. Schéma équivalent complet

La touche finale consiste à adjoindre au modèle issu de l'approximation de Kapp et l'assimilation du courant à un équivalent sinusoïdal, la résistance r de l'enroulement et l'inductance l_f de fuite (**Figure 13**).



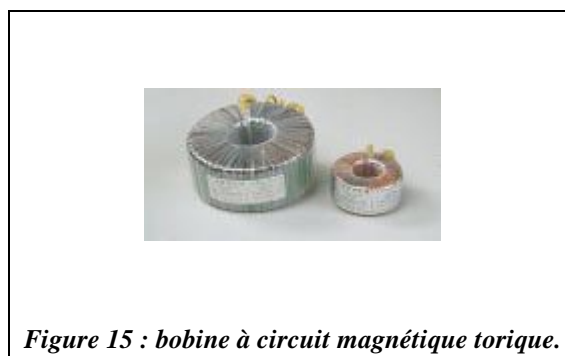
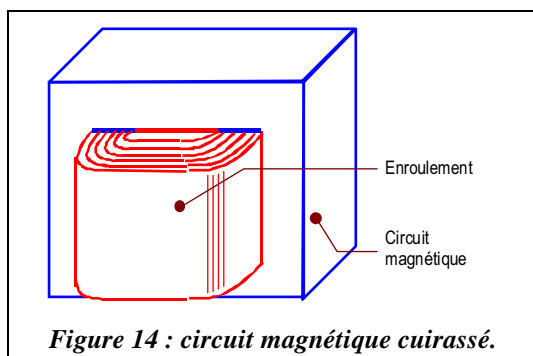
VII. Technologie et applications des bobines à noyau de fer

VII.1. Eléments de technologie de réalisation

L'apparence d'une bobine à noyau de fer est différente suivant l'utilisation.

En règle générale, il faut s'approcher des circuits magnétiques parfaits. Pour diminuer les fuites magnétiques, les enroulements sont placés au plus près du circuit magnétique. La disposition pratique consiste à utiliser un circuit magnétique cuirassé (*Figure 14*) ou torique (*Figure 15*).

Pour limiter les pertes par courants de Foucault (§ V.3.1), le circuit magnétique est feuilleté en basse fréquence. Pour les utilisations à des fréquences plus élevées, on a recours à la ferrite dont la résistance électrique est importante.



VII.2. Applications

En Electrotechnique, on rencontre les bobines à noyau de fer dans les électro-aimants (relais, contacteurs, levage), les bobines de lissage du courant, les bobines d'usage courant, les plateaux magnétiques de machine-outil ou les paliers magnétiques.

En électronique, on les trouve dans les inductances de filtrage, les selfs HF ajustables ou non. Dans ces cas les noyaux en ferrite sont de mise.

VIII. Bibliographie

- [1] **Saint-Jean B.** Electrotechnique et machines électriques. Eyrolles/Lidec Inc. 1976.
- [2] **Séguier Guy et Nottelet Francis.** Electrotechnique industrielle. Tec et doc (Lavoisier). 1982.