

Titre : Transformateurs idéals et réels

Présentée par :

Rapport écrit par :

Correcteur :

Date : 08/04/2020

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Dunod tout en un PSI			
BFR 4 milieux diélectriques et aimantés			
Cours de J. Neveu sur l'électronique			
Images sur internet			
https://sitelec.org/animations2.htm			

Plan détaillé

Niveau : CPGE PSI

Prérequis : Induction (PCSI), matériaux ferromagnétiques : canalisation des lignes de champs, aimantation, perméabilité magnétique, cycle d'hystérésis et pertes énergétiques

Intro : transformateurs sont très utiles au quotidien, convertissent un signal électrique avec une certaine tension en un autre signal électrique avec une autre tension, ils sont présents tout autour de nous. Sur slide, l'acheminement de l'énergie électrique (300kV lignes haute tension pour transport (diminuer effet joule), puis 230-380V utilisation en milieu urbain) depuis les centrales jusqu'aux particuliers, il y a plusieurs transformateurs qui servent à abaisser/augmenter les tensions dans les câbles/fils. Photo de transformateurs électriques industriels. [3] p. 47

On peut montrer des photos de transformateurs, montrer les 3 bobines ! Ensuite se placer dans le cas idéal pour présenter les transformateurs.

3 min

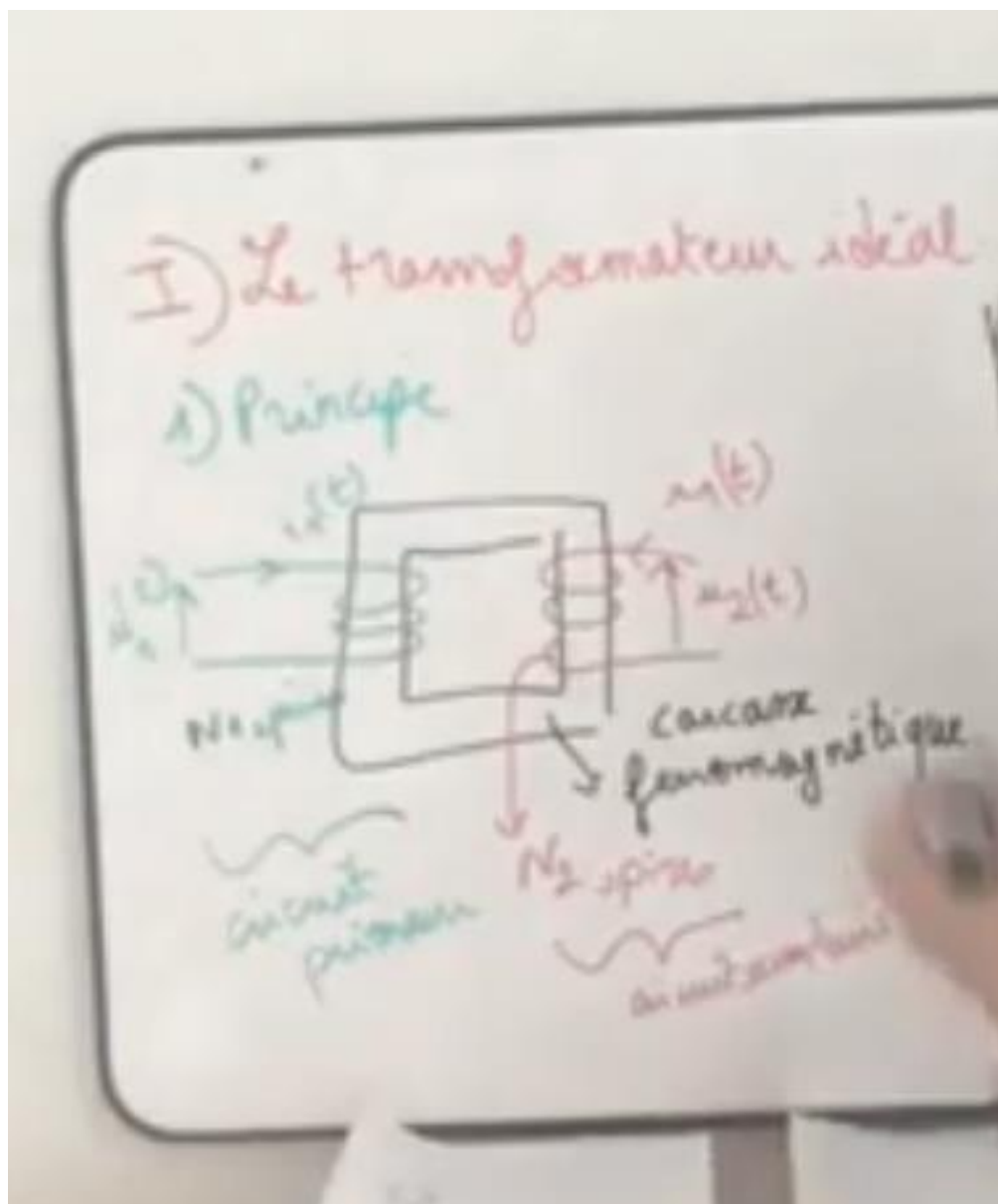
I] Transformateur idéal :

A) Principe de fonctionnement

C'est un quadripôle électrique qui permet de modifier l'amplitude de tensions et de courants alternatifs dans un circuit appelé « primaire », sans changer leur fréquence. [1] p. 682.

(écrire au tableau signal électrique avec amplitude $u(t)$ $f(t)$ flèche signal e' $u'(t)$ $f(t)$, avec le premier signal le primaire, le dictionnaire de physique a aussi une définition plus complète).

- faire le schéma du [1] p. 682, compléter le schéma avec les spires, courants, primaires. Etc.. Et le decire selon 5.1 du [1] p. 682.



Expérience à faire : gbf sur primaire et secondaire sur voltmètre. Utiliser un transfo de rapport $\frac{1}{2}$. C.A.D 2 bobines avec un rapport de spires de $\frac{1}{2}$.

Comment cela fonctionne-t'il ? Par le phénomène d'induction. Dans le primaire, un courant alternatif circule, cela crée un champ magnétique variable. Enfin, Par induction, une $-d\Phi/dt$ s'établit dans le secondaire. (faire la suite logique au tableau).

7 :30

Hypothèses du transformateur idéal :

- Pas de pertes par effet joule \rightarrow les deux bobines du primaire et secondaire n'ont pas de résistance électrique ($R_1 = R_2 = 0$)

- Les lignes de champ sont canalisées par le matériau ferromagnétique supposé infinie. C..A.D pas de fuites du champ magnétique [1] p. 684.

9 :00

B) Lois de transformation des tensions et des courants

Cette aptrie suit [1] p. 682-683

On utilise loi de Maxwell faraday pour relier les tensions aux champs.

Schéma des circuits électriques équivalents avec les deux inductances propres et l'inductance mutuelle.

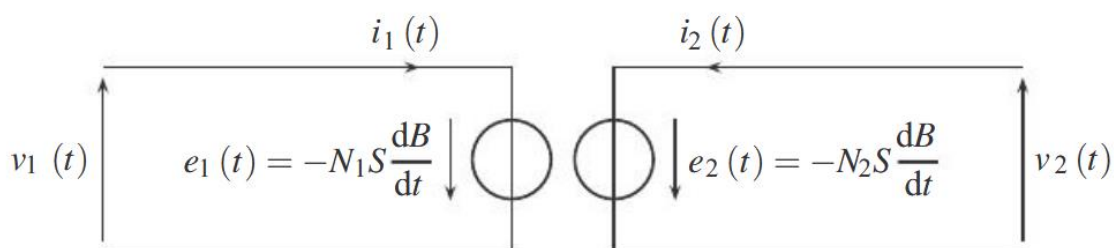


Figure 24.19 – Circuit électrique équivalent du transformateur.

Expliqué dans [1] p. 682-683, e_1 résulte de l'auto-induction par i_1 qui est alternatif. e_2 est la fem induite par le premier circuit.

La loi de Lenz dicte le sens de la fem générée dans le circuit secondaire (opposée au circuit primaire), on choisit un sens d'orientation judicieux de manière à avoir

$$V_2 = e_2 = -N_2 \cdot S \cdot dB/dt$$

$$V_1 = e_1 = -N_1 \cdot S \cdot dB/dt$$

$$V_2/V_1 = N_2/N_1$$

Note : pourquoi B est uniforme ?

Pour trouver la loi de transformation des courants on utilise le théorème d'ampere sur un contour fermé à l'intérieur du fer doux. [1] p. 683-684

Faire le schéma suivant ou le projeter sur slide (mieux). O utilise contour gris.

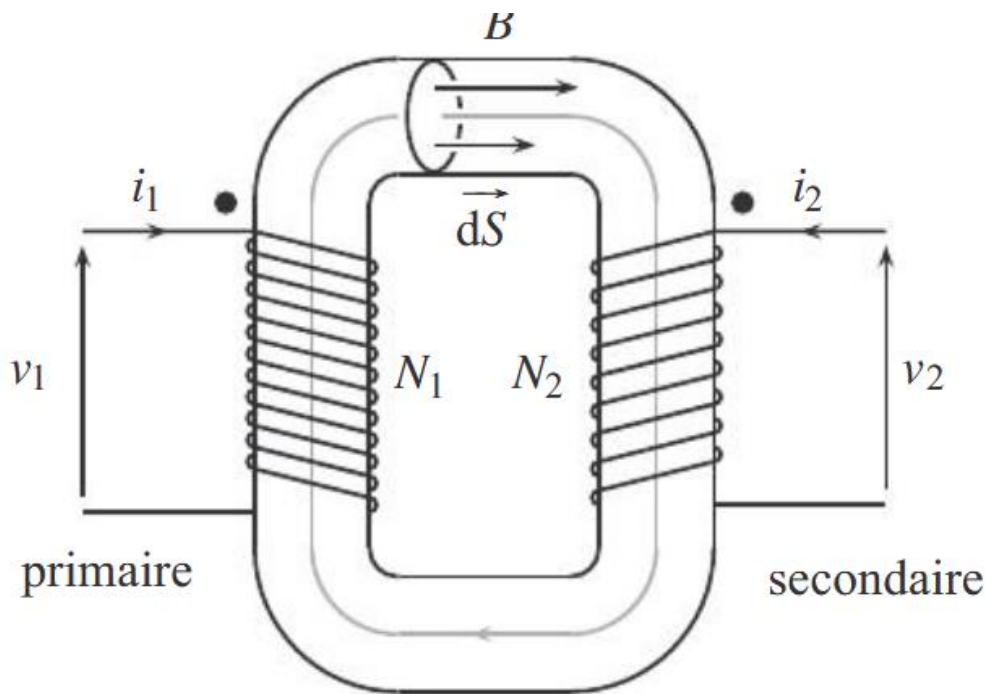


Figure 24.18 – Transformateur.

Faie calcul :

ial

onlo:

x théorème d'Ampère.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \underbrace{\mu_0 \mu_r}_{\mu} i_{\text{int}}$$

$$\rightarrow \vec{B} = \mu \vec{H}$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = i_{\text{int}}$$

Or $i_{\text{interieur}}$ est relié au nombre de spires et à i_1 et i_2 , d'où :

Intégrale de circulation de $H = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2$

Or $B = \mu \cdot H$, donc, si B reste fini et $\mu \rightarrow +\infty$, c'est que $H \rightarrow 0$.

Donc $i_2/i_1 = -N_1/N_2$

17 :30

Parler ici du fait que on peut avec le transformateur en jouant sur les rapports N_2/N_1 modifier le courant et la tension dans le secondaire. Qu'en est il de la puissance d'un tel système ?

C) Transfert parfait de puissance

$$P_1 = u_1 i_1$$

$$P_2 = u_2 i_2$$

La puissance totale consommée par le transformateur est $P_{\text{tot}} = P_1 + P_2 = 0$ d'après les lois de transformation des courants et tensions.

Il y a donc transfert parfait de puissance du circuit primaire vers le circuit secondaire, pas de pertes ! La puissance du primaire est entièrement restituée au secondaire.

Transition : on peut facilement voir expérimentalement qu'en réalité on a des pertes énergétiques dans le transformateur (il y a des résistances !)

II) De l'idéal au réel :

A) Sources de pertes énergétiques

Un transformateur on a dit qu'il avait une carcasse ferromagnétique, une bobine avec des fils de cuivre et des courants créés par induction.

- Carcasse ferromagnétique : lors d'un cycle, une partie de l'énergie est prélevée pour aimanter cette carcasse et n'est pas restituée ensuite (échauffement) **pertes fer** (hystérésis) **(voir aussi [3] p. 49, [2] p. 187)**

- Courants de Foucault : ils sont créés par induction dans le noyau/carcasse ferromagnétique, ils sont parasites et provoquent un échauffement en plus de s'opposer au sens voulu d'induction. **(voir aussi [3] p. 50)**

- effet Joule dans les bobines : pertes cuivre par effet Joule [1] p. 686.

On s'intéresse sur les pertes fer, énergie emmagasinée par le ferromagnétique.

28 :15

B) Énergie magnétique emmagasinée par le matériau ferromagnétique

Le matériau ferromagnétique s'aimante et se désaimante, on a vu dans un précédent cours que l'énergie magnétique dans un ferro est :

$E = \text{intégrale volumique de } B^2/(2\mu) dV$ [1] p. 689

Phénomène d'aimantation du au champ magnétique crée. (lire [1] p. 670-673 ou [3] p. 181-189 plus complexe mais plus complet, aussi [2] p. 49-50 pour un résumé des pertes).

Ce qui est à savoir est que lors de l'aimantation d'un ferromagnétique :

- *il y a création de domaines ayant des aimantations parallèles au sein d'un même domaine (domaines de Weiss) ;*
- *quand on change le camp extérieur les parois se déplacent mais restent accrchés aux défauts et impuretés du cristal ;*
- *en diminuant encore plus le champ il y a un claquage qui crée un courant de foucalt local du a la forte variation du champ on perd alors de l'énergie. Plus ce phénomène arrive, plus on per de l'énergie et l'aimantation reste importante en l'absence de champ.*

Ceci est mieux expliqué dans [2], le lire mais ne pas le dire. On admet que les étudiants on déjà vu les ferro durs et doux.

Courbes : cycles d'hystérésis expérimentaux pour du fer, **les montrer sur slide** ferro dou et ferro dur.

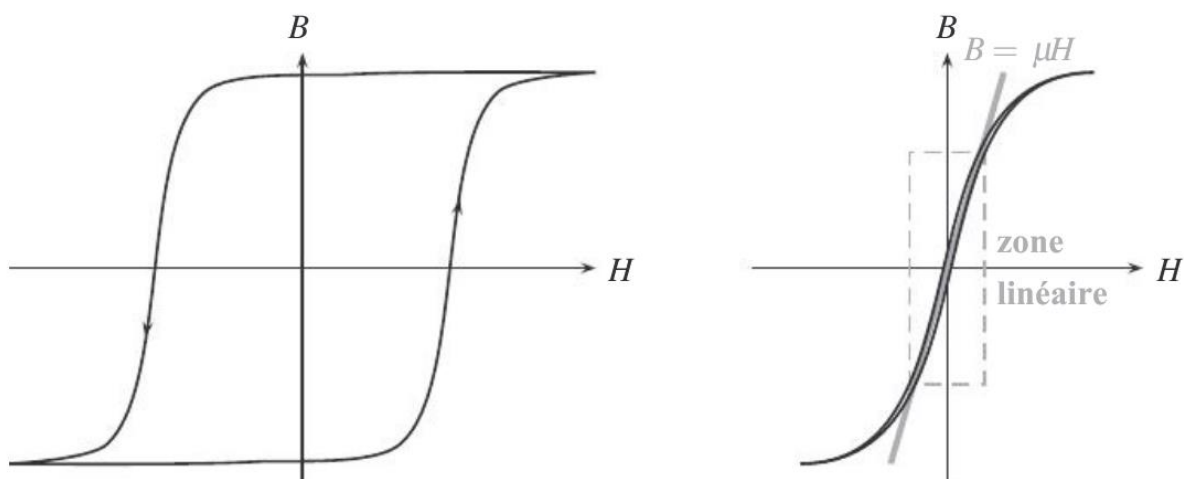


Figure 24.8 – Cycle d'hystérésis d'un matériau dur, à gauche ; d'un matériau doux, à droite.

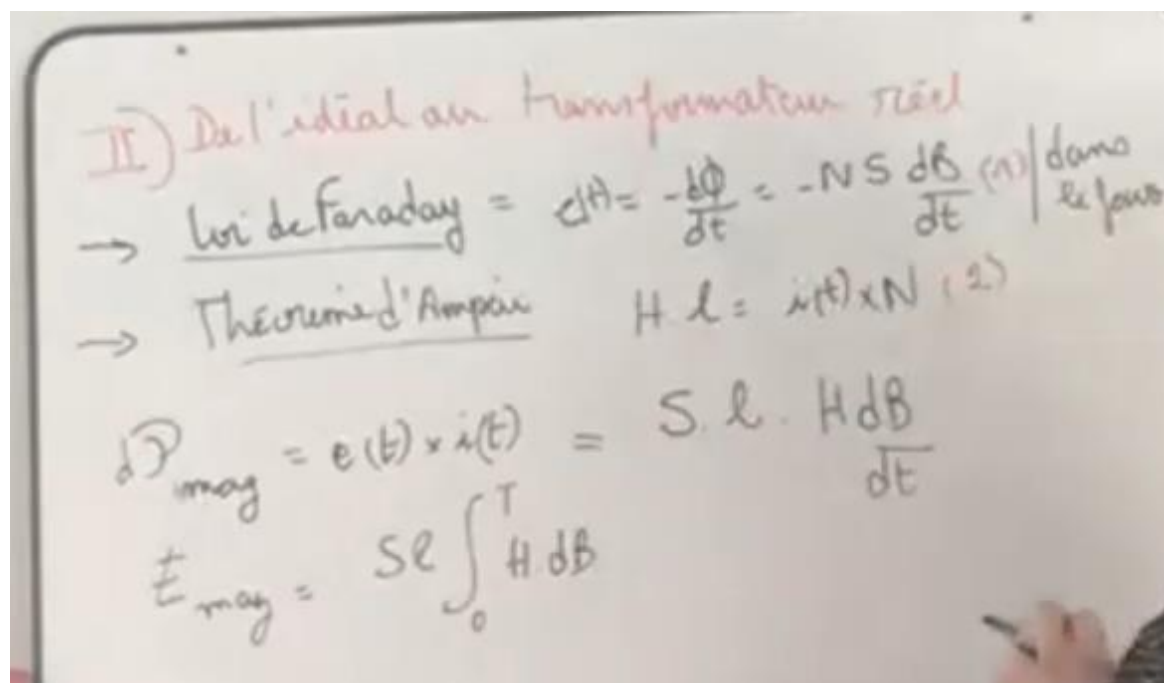
L'énergie est perdue car modifier l'aimantation dans le ferromagnétique nécessite l'apport d'énergie (champ coercitif non nul).

Comment évaluer les pertes sur un cycle grâce à l'outil graphique ?

Loi de Fraday et théorème d'Ampère appliqués dans le matériau ferromagnétique

$$P_{\text{mag}} = S \cdot I \cdot H \cdot dB/dt$$

$$E_{\text{perdue_cycle}} = V \cdot \text{intégrale sur un cycle } H \, dB \text{ avec } V = I \cdot S$$



Cette intégrale est en fait l'aire de la surface à l'intérieur du cycle

Expérience : obtenir expérimentalement B et H avec un circuit intégrateur et un ampèremètre et voltmètre. On récupère en mode x,y la courbe d'hystérésis à des constantes multiplicatives près. (mouais, à voir, Montag sur slide on l'a fait avec raph, Vy donne la fem dans le circuit secondaire après intégration (donc champ B) et Vx relie théorème d'ampère pour avoir H).

Note : de l'ordre de cb de % de puissance perdue pour une utilisation nominale ?

37 :00

C) Comment limiter les pertes ?

Utiliser des matériaux ferromagnétiques doux sous forme d'alliages, ceci réduit les pertes fer sur un cycle avec faible champ coercitif.

Tableau de différents matériaux ferromagnétiques avec leur perméabilité et leur pertes par cycle en J/kg sur slide.

Pour les pertes par courant de Foucault, on feuillètera le noyau ferromagnétique pour empêcher ces courants volumiques. [3] p. 56 4.4.3

Pour alliages utilisées voir [2] p. 189.

Conclusion : modèle idéal est utile pour comprendre le fonctionnement du transformateur et son intérêt. L'étude du transformateur réel montre les difficultés technologiques auxquelles on doit faire face dont le développement continue de nos jours. L'utilisation des ferromagnétiques doux et durs a aussi un intérêt pour la confection de moteurs avec des bobinages qui nécessitent des champs magnétiques importants.

Questions posées par l'enseignant

Tu as dit que le transfo est un élément important des infrastructures électriques, en quoi est ce utile de baisser et d'augmenter les tensions ?

Pour limiter les pertes par effet joule dans les lignes haute tension

Quelles caractéristiques des transformateurs ont été un élément important lors de la guerre industriel entre courant continu et courant alternatif ?

Le transformateur ne fonctionne qu'avec des tensions alternatives, uniquement avec des courants alternatifs on peut limiter

Pour un signal continu, comment abaisser une tension ? version 19 -ème siècle

Pont diviseur de tension par exemple (hacheur dévolteur pour la version moderne)

Quel est le désavantage de diviser par deux avec un pont diviseur par rapport a un transformateur ?

On perd la moitié de la puissance dans la résistance du pont diviseur à même courant avec le pont diviseur mais pas avec le transformateur ?

Le rendement est de 50% dans le cas du pont diviseur, alors qu'un transfo a un rendement typiquement au-dessus de 90%

Quelle part de la production électrique d'un pays est perdu dans les lignes hautes tensions et les transformateurs ?

Environ 10%

La première photo est elle un transformateur du quotidien ?

Non c'est un très vieux transfo, on le voit en coupe dans un musée

Pourquoi présente-t-il trois bobines ?

Il y a trois bobines car c'est un transfo pour le triphasé

Quelles sont vos conventions d'orientation dans vos schémas par rapport à l'induction ?

Le sens d'enroulement des fils a-t-il une importance ?

Oui énormément, il faut dès le début définir un contour orienté le long du tore ferro, qui définit le signe + ou – des i enlacés tu théorème d'Ampère. Le sens d'enroulement définit aussi le signe du flux magnétique dans une boucle de courant, flux que l'on retrouve dans la loi de Faraday. Donc dès le premier schéma il faut faire très attention à bien représenter le bobinage : **les fils des circuits primaires et secondaires s'enroulent-il par-dessus ou par-dessous le tore ?**

Dans le schéma utilisé pour les lois de transformations, précisez le sens des tensions

Peux-tu refaire la démonstration des tensions avec le schéma fléché ?

Démo refaite ok

Pourquoi dites-vous que c'est le même champ magnétique qui crée des fem dans les deux bobines ?

Parce que le flux de B est supposé parfaitement canalisé, section identique, par contre B reste un vecteur donc attention à son orientation vis à vis des spires.

Dans le secondaire, le champ magnétique pointe dans l'autre sens (tore) non ?

Cf ci-dessus

Quelle est la définition générale du flux magnétique ?

Que signifie le vecteur dS sur l'intégrale ?

Dans le transformateur, qu'est ce qui délimite la surface ?

La surface est délimitée par les boucles de courant, le sens d'orientation de cette boucle donne le sens du vecteur dS de l'intégrale du flux $\phi = \int \int \vec{B} \cdot \vec{dS}$. Donc encore une fois, les conventions d'orientation sont primordiales pour avoir in fine les bons signes.

Le mot carcasse est il approprié ?

On préférera dire tore ou noyau torique

Transfert parfait de puissance. Qu'est-ce que tu as appelée puissance "reçue" et puissance "perdue" ?

Est-ce la bonne terminologie ? Ne serait-il pas mieux d'étudier la puissance avec le transformateur en convention récepteur ?

Les termes « perdu » et « reçu » était bien employé dans le cas où le système considéré est le circuit secondaire ou le circuit primaire, mais il est plus judicieux de parler du système transformateur comme un tout, et définir le « fourni » « reçu » pour le système entier.

Quelle est la perte de stockage ferromagnétique dont vous avez parlé en premier dans les pertes ? Cette énergie magnétique est-elle vraiment jamais restituée ?

Est-ce ça que vous avez appelé pertes fer ?

L'énergie stockée sous forme de $B^2/2\mu$ n'est pas perdue mais stockée. Elle est certes indisponible pour le circuit secondaire mais peut être récupérée (en coupant le courant au primaire par exemple).

Dans un transformateur réel μ n'est plus infini, quelles en sont les conséquences ? par rapport au champ magnétique et à sa canalisation ? y a-t-il alors des pertes par induction & courants de Foucault dans l'environnement entourant le transformateur ?

μ non infini engendre le stockage d'énergie sous forme magnétique dans le tore, des défauts de canalisation du champ B et l'ouverture du cycle d'hystérésis et des pertes associées

La section 2B est-elle mal nommée ? l'énergie stockée est-elle perdue ?

Cf ci dessus

Est-ce au programme cette description ? (Pertes/cycle d'hystérésis) et le traitement mathématique ?

Faut-il modéliser l'origine du cycle d'hystérésis selon les programmes ?

La modélisation des pertes dans le transfo n'est pas au programme, mais le cycle est au programme dans le chapitre sur B dans les milieux ferro, donc pas de soucis pour faire le lien ici.

Dans la manip pour obtenir le cycle d'hystérésis, quelles sont les grandeurs mesurées et à quoi permettent elle de remonter ?

A quoi sert le circuit intégrateur ? Pourquoi mesure-t-on la tension aux bornes de la résistance ?

Sur voie X on mesure tension aux bornes de résistance donc une image de i primaire donc de H , Sur voie Y on mesure l'intégrale de la tension au secondaire donc le flux magnétique donc une image de B .

Dans le tableau, qu'est-ce que B_m ? c'est l'asymptote sur le cycle d'hystérésis

En quoi est-ce une quantité (B_m) importante pour un transformateur ?

Comment as-tu construit ton plan ? Quel choix as-tu fait ?

Est-ce que tu as fait des choix de choses à ne pas dire, à cacher à certains moments ?

Avec plus de temps, qu'aurais-tu montré d'autres ?

Dans le programme, il y a les termes d'"isolement", "adaptation d'impédances"

Pourquoi ne pas en avoir parler ?

Pas le temps mais ça peut être un prolongement de la leçon

Commentaires donnés par l'enseignant

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Plan classique, leçon bien menée et bonne réponse aux questions mais attention aux histoires de convention d'orientation. C'est le seul point délicat de la leçon et donc il ne faut pas passer à côté.

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Le transformateur idéal appelle une bonne modélisation avec des conventions d'orientation bien précisées, afin que les signes des calculs soient bons. Cette étape passée, la leçon passe rapidement en « leçon de choses » où on raffine éventuellement le modèle. Le formalisme laisse la place à de belles discussions de physique.

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Cycle d'hystérésis dans le tore ferromagnétique, mesure de rendement, rapports de conversion

Bibliographie conseillée

Livres de PSI, illustrations web de vrais transformateurs