

**Titre :** Transformateurs idéals et réels

**Présentée par :** Léa Chibani

**Rapport écrit par :** Alfred Hammond

**Correcteur :** Jérémy Neveu

**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			
<a href="https://sitelec.org/animations2.htm">https://sitelec.org/animations2.htm</a>			

### 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 une tension sinusoïdale en une autre, ils sont présents tout autour de nous. Sur slide, l'acheminement de l'énergie électrique 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

**I] Transformateur idéal :**

**A) Principe de fonctionnement**

C'est un quadripôle électrique qui permet de convertir une tension sinusoïdale (primaire) en une tension sinusoïdale (secondaire) d'amplitude différente mais de même fréquence

Expérience à faire : gbf sur primaire et secondaire sur voltmètre. Utiliser un transfo de rapport  $\frac{1}{2}$

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 fem s'établit dans le secondaire

Hypothèses du transformateur idéal :

Pas de pertes par effet joule → les deux bobines du primaire et secondaire n'ont pas de résistance électrique

Les lignes de champ sont canalisées par le noyau en fer de perméabilité supposée infinie

### B) Lois de transformation des tensions et des courants

Schéma avec les deux inductances propres et l'inductance mutuelle

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

$$U_2 = N_2 \cdot S \cdot dB/dt$$

$$U_1 = N_1 \cdot S \cdot dB/dt$$

$$U_2/U_1 = N_2/N_1$$

*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.

$$\text{Integrale de circulation de } H = N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2$$

De plus si  $\mu \rightarrow +\infty$  et B reste fini, c'est que  $H \rightarrow 0$ .

$$\text{Donc } i_2/i_1 = -N_1/N_2$$

### 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

**Transition : on peut facilement voir expérimentalement qu'en réalité on a des pertes énergétiques dans le transformateur**

### II) De l'idéal au réel :

#### A) Sources de pertes énergétiques

- 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)
- 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
- effet Joule dans les bobines : pertes cuivre par effet Joule

## B) Energie 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

$$E = \int \text{volumique de } B^2 / (2\mu) dV$$

Courbes : cycles d'hystérésis expérimentaux pour du fer

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

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

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

$$E_{\text{perdue\_cycle}} = V \cdot \int_{\text{un cycle}} H dB \text{ avec } V = l \cdot S$$

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.

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

## C) Comment limiter les pertes ?

Utiliser des matériaux ferromagnétiques doux sous forme d'alliages, ceci réduit les pertes fer sur un cycle

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

Pour les pertes par courant de Foucault, on feuillettera le noyau ferromagnétique pour empêcher ces courants volumiques

## 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 à 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

indispobiles pour le circuit secondaire mais peut être récupérée (en coupant le courant au primaire par exemple).

Dans un transformateur réel  $\mu$  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 ?

$\mu$  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 montrer 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