

# **Session S3**

## **Génie électrique**

# **Électrotechnique**

## **Unité APP 3**

### **Éléments de circuit en courant alternatif et Transformateurs de puissance**

Département de génie électrique et de génie informatique  
Faculté de génie  
Université de Sherbrooke

**Été 2023**

## **Guide de l'étudiant**

**Note :** En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes.

Document Guide de l'étudiant APP3-2023

Document S3e\_APP3.doc

Version 8, 27/05/2023 – (première version : automne 2011)

Rédigé par Serge A. Kodjo et Maxime Dubois

Révisé en 2018 par Serge A. Kodjo

Révisé (pour nouvelle version 2023) par Minh C. Ta

Copyright © 2018

# Table des matières

	Pages
1- Éléments de compétence de la session S3 visés par l'unité.....	4
<b>2- Énoncé de la problématique.....</b>	<b>4</b>
3- Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique .....	14
4- Références obligatoires à consulter .....	16
5- Activités liées à la problématique.....	36
<b>6- Laboratoires.....</b>	<b>36</b>
<b>7- Livrables .....</b>	<b>37</b>
8- Formation à la pratique procédurale - 1 .....	45
9- Formation à la pratique procédurale - 2 .....	49
<b>10 - Évaluation.....</b>	<b>53</b>
10.1- Rapport de la problématique.....	54
10.2- Laboratoire.....	55
10.3- Validation .....	55
10.4- Examens.....	55
11- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs .....	56

# 1- Éléments de compétence de la session S3 visés par l'unité

## GEL342 : Éléments de circuit en courant alternatif et Transformateurs de puissance

- Appliquer la technique des « phaseurs » pour la résolution des circuits à courant alternatif.
- Effectuer les calculs requis dans la conception et l'application des transformateurs de puissance.

## GEL362 : Phénomènes d'échange de chaleur

Appliquer les notions d'échange de chaleur au refroidissement des transformateurs.

## 2- Énoncé de la problématique

*Vous devez former des équipes de 2 personnes. Chacune des équipes aura le mandat de résoudre la problématique suivante.*

Le gouvernement du Québec à travers Hydro-Québec, prend la décision d'installer, dans la plupart des immeubles commerciaux du Québec, des bornes de recharge pour véhicules électriques, pour un total de **1 250 000 bornes de recharge** sur le territoire de la province du Québec. Le rôle de la borne de recharge est de mesurer la puissance électrique utilisée pour la recharge des véhicules, d'effectuer la gestion de la recharge selon l'heure de la journée, de faciliter la facturation pour la compagnie d'électricité et d'effectuer l'interfaçage avec le chargeur du véhicule électrique.

Noter que le chargeur de batterie est localisé à l'intérieur des véhicules et non dans la borne de recharge et que celui-ci **tire une puissance constante de 780 W**, avec un **facteur de puissance de 0,9 en retard**.

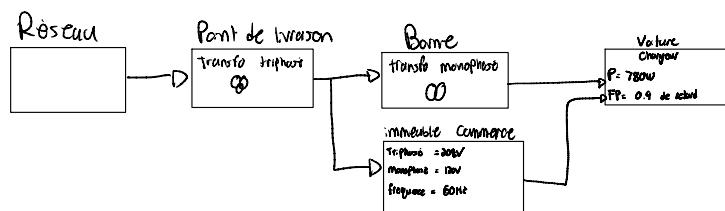
Il est prévu que dans chacune de ces bornes de recharge, on installe un **transformateur monophasé d'isolation 60 Hz**. Ce transformateur se situera à l'intérieur de la borne, entre le réseau électrique 120 V des installations du commerce et le véhicule.

Les bornes de recharge et les installations électriques des commerces sont alimentées par un réseau de distribution via des transformateurs triphasés. Les installations électriques des commerces nécessitent des alimentations triphasées 208V et monophasées 120 V.

**Votre attention, dans cette problématique, devra se porter uniquement sur le transformateur monophasé et le transformateur triphasé.**

Le transformateur monophasé qui sera utilisé à l'intérieur de la borne de recharge sera de même modèle que le transformateur que vous retrouvez au laboratoire d'électrotechnique. Ce transformateur à un rapport de transformation  **$a=1$** .

*Lors du tutorat 1 : dessiner ici le schéma bloc illustrant cette problématique*

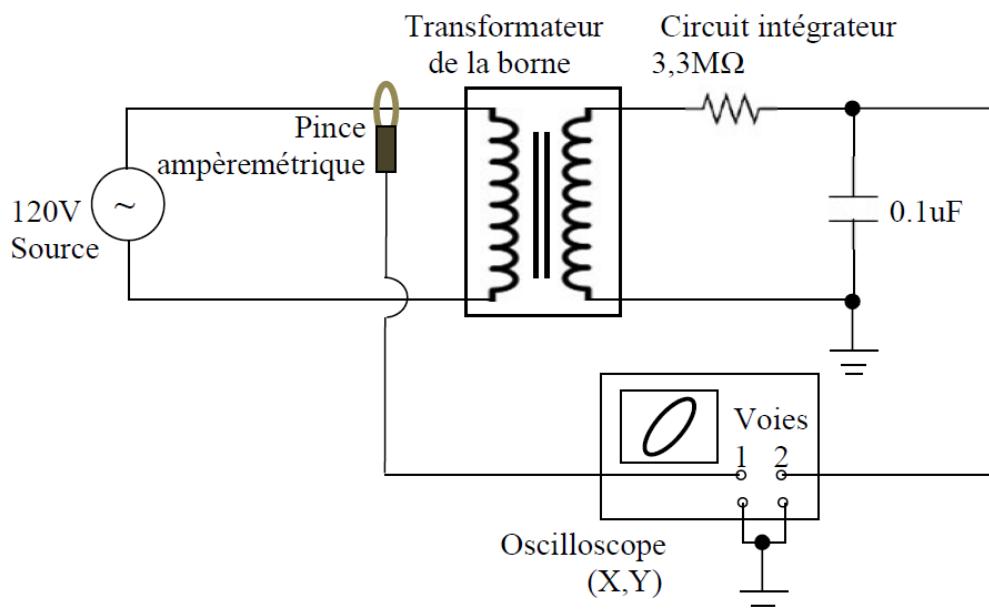


Question 1 : observation des phénomènes magnétiques.

- a) Déterminez, à partir de mesures expérimentales, l'**amplitude et la forme d'onde du flux magnétique**, ainsi que l'**amplitude de l'induction magnétique** circulant dans le noyau du transformateur lorsque celui-ci est alimenté par une tension de valeur efficace 120 V de **fréquence 60Hz**. Pour ce faire, vous devrez utiliser une bobine exploratrice enroulée autour du noyau.

Note : afin de bien vous préparer à l'exécution de la question 1, la lecture des documents identifiés à la section II– Magnétisme loi de l'induction électromagnétisme est requise (voir notes de cours dans ce guide).

- b) Déterminez, à partir de mesures expérimentales, la courbe d'hystérésis de la caractéristique B(H) du matériau magnétique du transformateur. Pour ce faire, vous devrez utiliser le montage suivant :



**Figure 1 : Montage pour courbe d'hystérésis**

Note : Pendant les mesures en laboratoire, il est recommandé de passer au **moins 5 fois** le fil dans la pince ampèremétrique, pour une meilleure précision des données.

Dans votre rapport d'APP, vous devrez expliquer le rôle du circuit intégrateur dans ce montage.

À partir de la courbe des tensions que vous obtiendrez à l'oscilloscope, déterminez la courbe B(H) du matériau magnétique. Évaluer les pertes par hystérésis dans le transformateur en vous servant de l'annexe I.

Question 2 : circuit équivalent et puissance dissipée.

Identifier expérimentalement par deux essais le circuit équivalent du transformateur. Ces essais sont l'essai à vide et l'essai en court-circuit. **Pour les procédures, on se référera à la section 30.25 du livre Électrotechnique de Théodore Wildi.**

Localiser, pour chacun de ces deux essais, la région du transformateur qui dissipe le plus de chaleur et fournir dans le rapport une explication à cet effet.

À partir du circuit équivalent, déterminer théoriquement la puissance qui sera dissipée dans le transformateur pendant la recharge du véhicule lorsque le primaire du transformateur est alimenté par une tension efficace **120 V / 60 Hz**. Déterminer le rendement du transformateur et sa régulation de tension pendant la recharge d'un véhicule. On rappelle que pendant la recharge du véhicule, le secondaire du transformateur débite une puissance de **780 watts** avec un facteur de puissance **F.P.=0,9**.

Si chaque borne installée sur le territoire possède un tel transformateur, et qu'on y branche son véhicule électrique pendant **12 heures par jour pour la recharge**, déterminer l'énergie totale dissipée dans ces transformateurs pendant une année. Exprimer votre réponse en Joules et en **kWh**. À **0,08 \$/kWh**, à quel montant se chiffrent les pertes dans ces transformateurs au niveau du Québec?

Question 3 : le transformateur monophasé utilisé en auto-transformateur et borne de recharge à 240 V

Dans son évaluation, Hydro-Québec voudrait aussi trouver une manière de recharger certains véhicules électriques dont les chargeurs s'alimentent sur une tension 240 V<sub>eff</sub>. En utilisant le même transformateur de la borne de recharge dans une configuration électrique différente, soit en auto-transformateur, proposez une connexion électrique permettant de satisfaire ce requis. Tester cette connexion en laboratoire. Mesurer les tensions au primaire et au secondaire à l'aide d'un voltmètre.

*Dans votre rapport:*

- a) *Proposer un schéma électrique qui permettrait de passer d'une alimentation de sortie 120 V<sub>eff</sub> à une alimentation de sortie 240 V<sub>eff</sub> à volonté avec le transformateur de la borne de recharge.*
- b) *Qu'en est-il de l'isolation galvanique dans la configuration 240 V<sub>eff</sub>, par rapport à la configuration 120 V<sub>eff</sub>?*

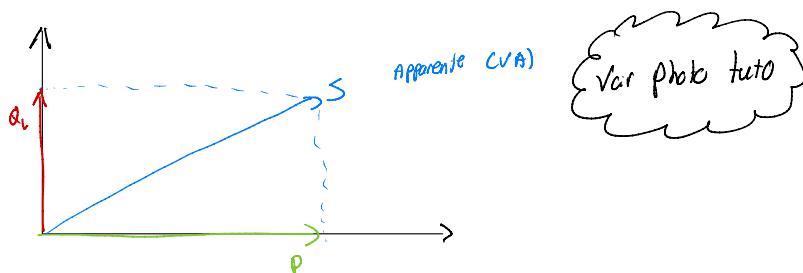
#### Question 4 : correction du facteur de puissance.

En plaçant un condensateur en parallèle avec le primaire du transformateur, il sera possible de corriger le facteur de puissance. Déterminer théoriquement la valeur de la capacité du condensateur C pour que le réseau 120 V de chaque borne voit un facteur de puissance unitaire.

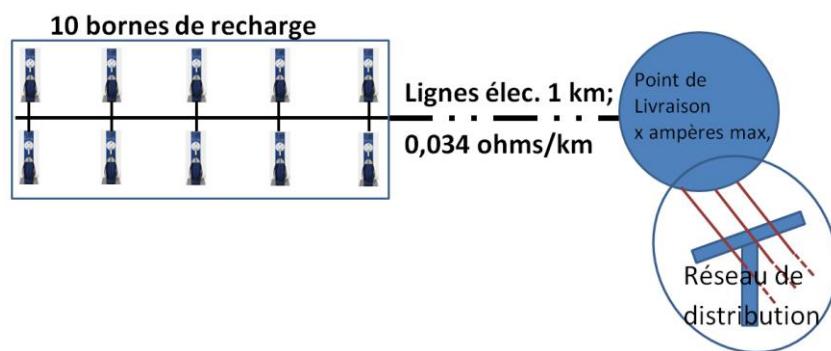
Pour valider vos calculs, en laboratoire vous reproduirez le comportement électrique du chargeur du véhicule en plaçant une charge passive ( $R-L$ ) à la sortie du transformateur, de telle sorte que le secondaire du transformateur débite une puissance de 780 W avec un facteur de puissance de 0.9. En utilisant un wattmètre, mesurer le courant efficace  $I_{eff}$ , la puissance apparente S et la puissance active P absorbée par le primaire du transformateur. Déterminer expérimentalement la valeur du courant ainsi que son déphasage par rapport à la tension d'alimentation avec et sans condensateur de correction du facteur de puissance.

On se préparera à cette expérience en laboratoire, en ayant au préalable déterminé les valeurs de R et L à utiliser ainsi que la valeur théorique de la capacité du condensateur qui permet de corriger le facteur de puissance, en utilisant le schéma équivalent du transformateur déterminé à la question 2.

*Lors du tutorat 1 : dessiner ici le schéma électrique illustrant la charge équivalent  $R-L$ , le condensateur C et le transformateur.*



10 bornes de recharge sont alimentées par un point de livraison du réseau de distribution dont la capacité vous est fournie en Ampère. Si lorsque vous ne corrigez pas le facteur de puissance vous constatez que vous êtes à la limite de la capacité du point de livraison, pensez-vous qu'avec l'ajout de condensateur pour la correction du facteur de puissance, vous risquez de dépasser la limite de la capacité du point de livraison. Justifiez votre réponse.



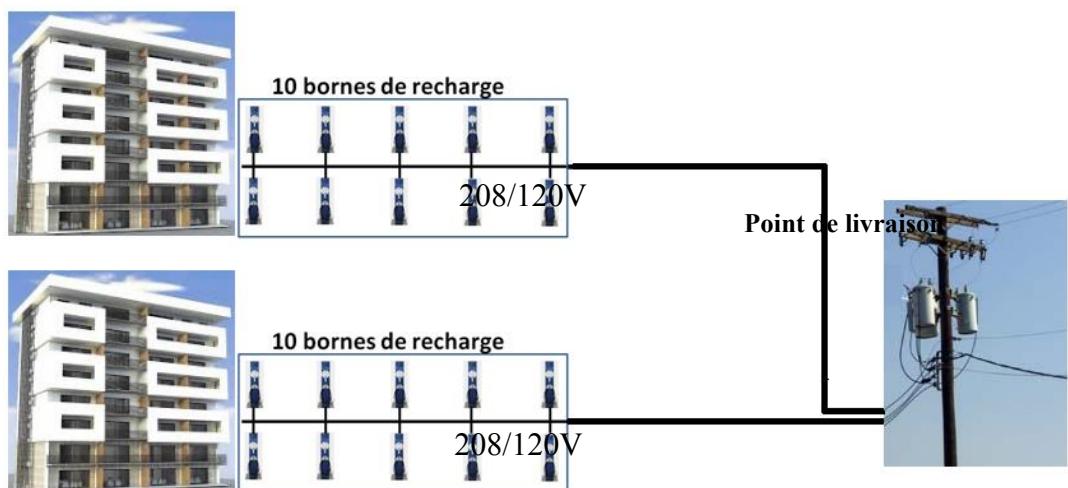
**Figure 2 : Configuration du réseau de distribution avec 10 bornes de recharge**

Comme illustré à la figure 2, si les 10 bornes de recharge sont alimentées par une ligne de distribution électrique basse tension dont la résistance linéaire équivalente est de 0,034 ohms/km, de combien réduit-on les pertes (en %) dans 1 km de ligne lorsqu'on place les condensateurs de compensation au primaire du transformateur de chaque borne de recharge.

### Question 5 : Connexions du transformateur triphasé du point de livraison

Le point de livraison évoqué précédemment est constitué de 3 transformateurs monophasés 14.4 kV/120V connectés pour former un transformateur triphasé. Ces transformateurs monophasés présentent chacun une réactance de fuite de 0.22 pu (per-unit) et ont une puissance nominale de 500 kVA chacun. Les connexions primaires et secondaires des transformateurs sont réalisées de façon bien précise afin d'abaisser la tension du réseau de distribution à 208/120 V (réseau quatre fils) avec neutre disponible. Les 120 V ligne-neutre serviront à alimenter 20 bornes de recharge ainsi que l'éclairage et les prises 120V de deux immeubles de commerce. Les 208 V ligne-ligne serviront à alimenter des moteurs triphasés qui se situent dans les deux immeubles. Proposer une connexion des transformateurs triphasés au point de livraison qui permet d'alimenter les bornes de recharge et les immeubles tout en ayant un meilleur comportement en régime déséquilibré et qui permet de réduire les harmoniques de courant sur les lignes côté haute tension.

Dans le cas où les bornes sont équipées de condensateurs de compensation, calculer (en pu et en volt) la tension ligne-ligne du réseau de distribution (au primaire du transformateur triphasé) lorsque toutes les bornes fonctionnent simultanément et que les deux immeubles consomment une puissance totale de 1 MVA avec un facteur de puissance corrigé à 1. On considère que les charges sont bien réparties et que les courants consommés sur les lignes du transformateur triphasé sont équilibrés. On négligera également les pertes et les courants de magnétisation dans le transformateur triphasé.



**Figure 3 : Alimentation des commerces avec leurs bornes de recharge**

Pour étudier le comportement du transformateur triphasé en vue d'un meilleur choix de connexion, on réalisera quelques essais en laboratoire sur une banque de transformateurs monophasés qui servira à réaliser un transformateur triphasé. À partir des essais à vide sur ces transformateurs connectés en étoile-étoile puis en triangle-étoile, on mesurera le déphasage entre les tensions ligne-ligne du primaire et les tensions ligne-ligne du secondaire. *On déterminera également pour les deux types de connexion le rapport de transformation (a) des transformateurs monophasés ainsi que le rapport de transformation (a') du transformateur triphasé avec :*

$$a' = \frac{V_{\text{ligne-ligne primaire}}}{V_{\text{ligne-ligne secondaire}}}.$$

## Annexes de la problématique

### Annexe I : Courbe B(H)

Mise en pratique et exploitation de la courbe B(H) pour l'estimation des pertes par hystérésis.

#### A1

On sait que

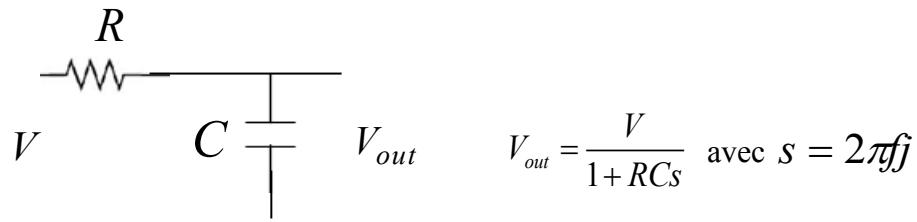
$$\left. \begin{aligned} e &= N \frac{d\phi}{dt} \\ \phi &= BA \end{aligned} \right\} \rightarrow B = \frac{1}{NA} \int e dt$$

$$Hl = ni \quad \Rightarrow H = \frac{ni}{l}$$

Donc la courbe B(H) est proportionnelle à la courbe  $i \times \int e dt$

#### A2

Afin d'obtenir l'intégrale de la tension, on utilise un circuit RC intégrateur. En effet :



$$\text{Si } RC \gg 1 \Rightarrow V_{out} = \frac{V}{RCs} \Rightarrow V_{out} = \frac{1}{RC} \int V dt.$$

#### A3

Afin d'obtenir la valeur du courant au primaire à partir des mesures faites avec la pince ampèremétrique, vous devez tenir compte du calibre choisi sur la pince (50 mV/A ou 5 mV/A) ainsi que le nombre de fois que vous avez passé le fil dans la pince.

#### A4

La courbe de Lissajou obtenue à l'oscilloscope, évalue indirectement la surface sous la courbe B(H). Cette surface est reliée aux pertes par hystérésis de la façon suivante :

$$\text{Pertes hyst} = \frac{\text{energie}}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T e i dt.$$

On sait que  $e = N \frac{d\phi}{dt}$  et  $i = \frac{Hl}{N}$ .

$$\text{Alors, pertes hyst.} = \frac{1}{T} \int_0^T N \frac{d\phi}{dt} \frac{Hl}{N} dt = \frac{1}{T} \int_0^T H l d\phi.$$

Puisque  $\phi = BA$  et  $A l = \text{Volume du fer} = V_f$ .

$$\text{Alors, pertes hyst.} = \frac{1}{T} \int_0^T H V_f dB = \frac{V_f}{T} \int_0^T H dB = \frac{V_f}{T} S_{BH}.$$

$S_{BH}$  = Surface sous la courbe B(H)

Finalement vu que  $T = \frac{1}{f}$  :

$$\text{Pertes hyst.} = f V_f S_{BH}$$

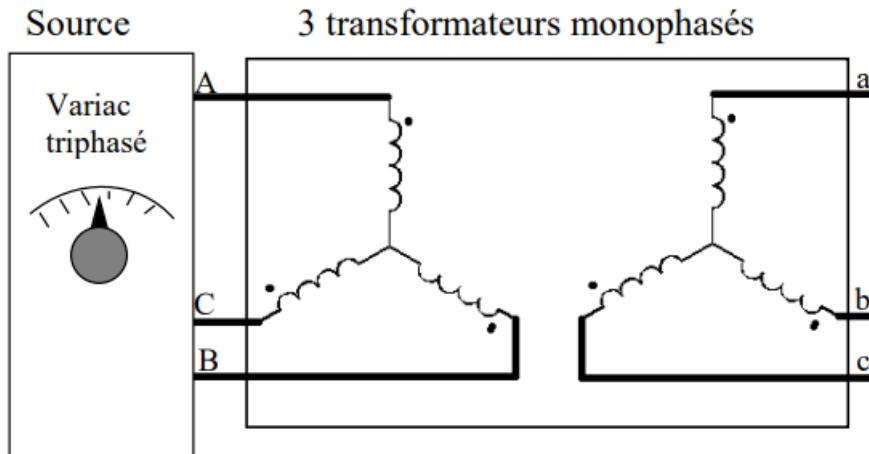
#### A5

Avec le montage de la figure 1, l'oscilloscope mesure des tensions. Par conséquent la surface de la courbe de Lissajou tracée à l'oscilloscope est la surface  $S_{V1V2}$  sous la courbe  $V_2$  en fonction de  $V_1$  ( $V_1$  tension mesurée à la voie 1 et  $V_2$  tension mesurée à la voie 2 de l'oscilloscope). L'exploitation des démarches de calculs aux points précédents (A1, A2, A3 et A4) permet de calculer les pertes par hystérésis. Une façon de faire est de trouver l'expression de H et l'expression de B en fonction de la tension  $V_1$  ou  $V_2$  mesurée en exploitant les démarches de calculs aux points (A1, A2, A3 et A4). Par la suite, vous pouvez fournir au programme Matlab, les valeurs de H et de B calculées à partir de  $V_1$  ou  $V_2$  pour obtenir  $S_{BH}$  l'aire sous la courbe B(H). Ainsi vous pouvez calculer les pertes par hystérésis à partir de l'expression obtenue au point A4.

## Annexe II : Essais sur transformateur triphasé

Avant de commencer les essais sur les transformateurs triphasés, vous devez bien identifier la polarité des trois transformateurs monophasés ainsi que leur courant nominal au primaire et au secondaire. [Lire la section 3.4 de la référence 2 et la section 32.2 et 32.4 de la référence 1.](#)

### A- Connexion étoile-étoile (sans charge) [À faire au laboratoire de la 2e semaine](#)



#### II-A1. Connexion étoile-étoile

On applique une tension triphasée 208 V ligne-ligne au primaire et on mesure la tension ligne-ligne au secondaire. On ajustera la tension à 208 V en utilisant un Variac (autotransformateur) triphasé. On déterminera le rapport de transformation (a) des transformateurs monophasés, le rapport de transformation (a') du transformateur triphasé pour cette connexion. On utilisera un oscilloscope pour identifier le déphasage entre la tension ligne-ligne primaire et la tension ligne-ligne secondaire du transformateur triphasé. Pour faire cette observation vous devez réduire la tension ligne-ligne du primaire à 20 V environ. **Pour observer la tension du primaire à l'oscilloscope, vous devez absolument utiliser une sonde différentielle.**

$$\text{On rappelle que : } a' = \frac{V_{\text{ligne-ligne primaire}}}{V_{\text{ligne-ligne secondaire}}}.$$



**En aucun cas vous ne devez brancher les voies de l'oscilloscope directement sur la source (au primaire).**

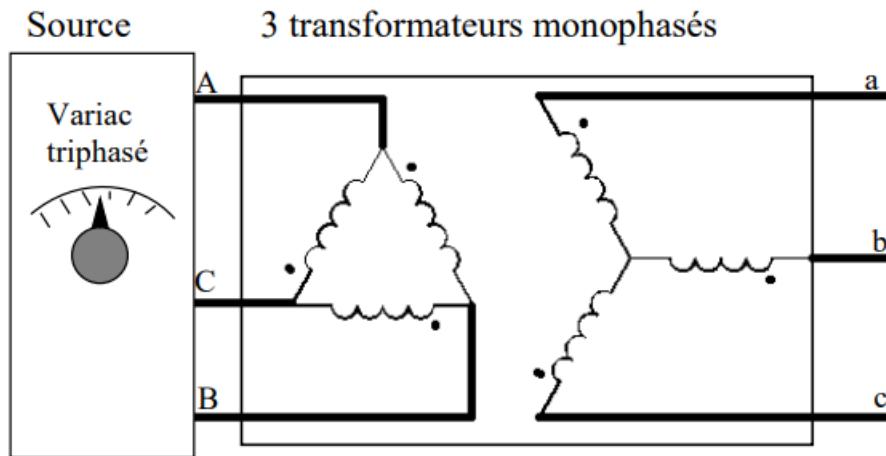
Tableau 1 : Résultats expérimentaux 1

Primaire	$V_{AB}$	
Secondaire	$V_{ab}$	

Rapport de transformation a	
Rapport de transformation a'	
Déphasage entre $V_{AB}$ et $V_{ab}$	
$V_{ab}$ en avance ou en retard sur $V_{AB}$	

## B- Connexion triangle-étoile (sans charge) À faire au laboratoire de la 2e semaine

### II-B1. Connexion triangle-étoile (Dy11)



On applique une tension 208 V ligne-ligne au primaire et on mesure les tensions ligne-ligne au secondaire. On déterminera le rapport de transformation ( $a$ ) des transformateurs monophasés, et le rapport de transformation ( $a'$ ) du transformateur triphasé pour cette connexion. On utilisera un oscilloscope pour identifier le déphasage entre la tension ligne-ligne primaire et la tension ligne-ligne secondaire du transformateur triphasé. Pour faire cette observation on réduira la tension ligne-ligne du primaire à 20 V environ. **Pour observer la tension du primaire à l'oscilloscope, vous devez absolument utiliser une sonde différentielle.**

$$\text{On rappelle que : } a' = \frac{V_{\text{ligne-ligne primaire}}}{V_{\text{ligne-ligne secondaire}}}.$$



**En aucun cas vous ne devez brancher les voies de l'oscilloscope directement sur la source (au primaire).**

Tableau 2 : Résultats expérimentaux 2

Primaire	$V_{AB}$	Rapport de transformation $a$
Secondaire	$V_{ab}$	Rapport de transformation $a'$
		Déphasage entre $V_{AB}$ et $V_{ab}$
		$V_{AB}$ en avance ou en retard sur $V_{ab}$

II-B2. Essai à vide - Connexion triangle-étoile (Dy1) ([Branchemet à réaliser sur papier pour préparer le laboratoire de la 2<sup>e</sup> semaine](#)).

En s'appuyant sur des observations faites au II-B1 et sur la théorie, proposez une connexion triangle-étoile de type Dy1 et complétez le schéma ci-dessous pour avoir la connexion Dy1. Les points de polarité sur les enroulements sont identifiés par les points noirs . ● = X, et H.

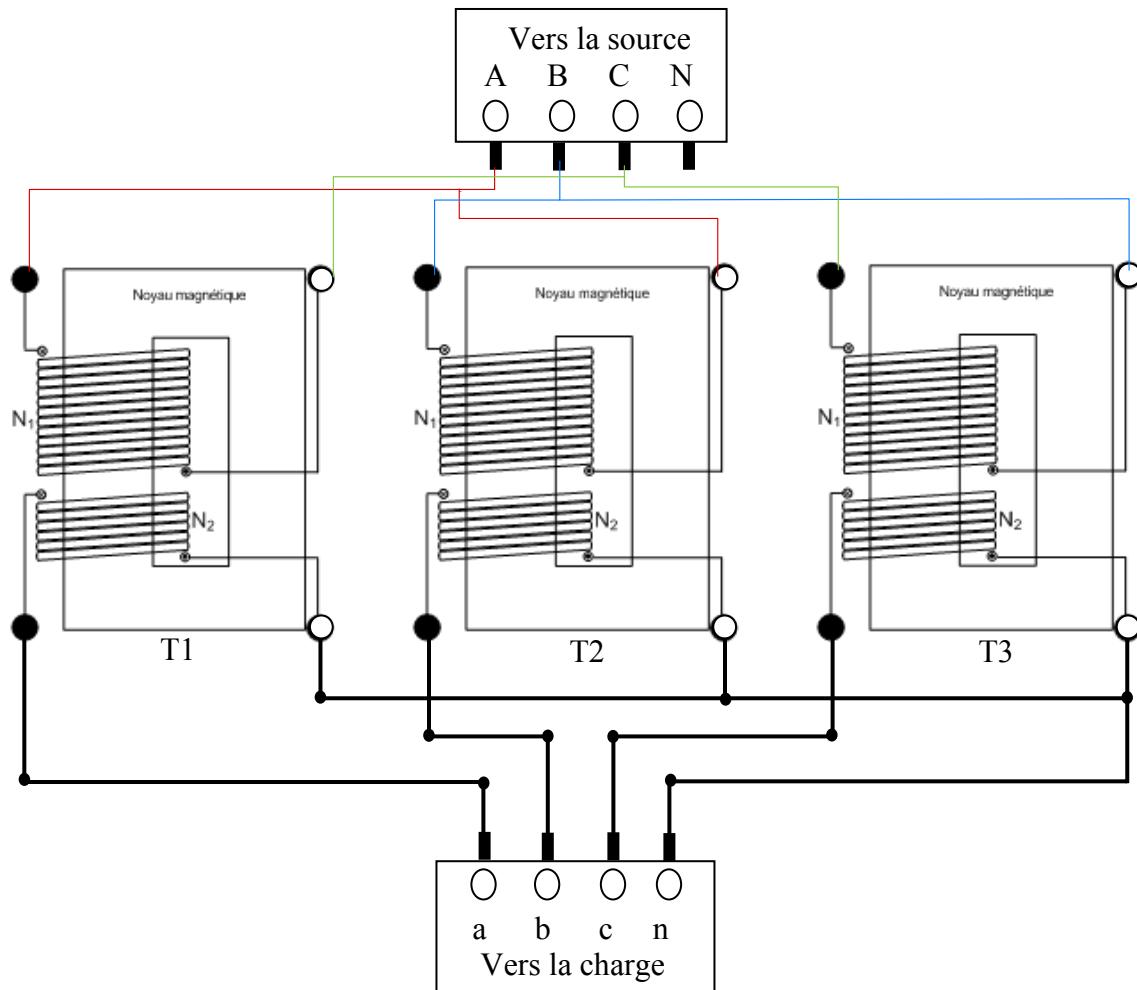


Figure 4 : Connexion triangle-étoile (Dy1) : Schéma de la connexion

Tableau 3 : Résultats expérimentaux 3

Primaire	V <sub>AB</sub>	Rapport de transformation a
Secondaire	V <sub>ab</sub>	Rapport de transformation a'
Transfo triphasé alimenté en séquence inverse ou directe ?		Déphasage entre V <sub>AB</sub> et V <sub>ab</sub> V <sub>AB</sub> en avance ou en retard sur V <sub>ab</sub>

Notes : Les résultats et calculs effectués à l'annexe II doivent être fournis comme annexe à votre rapport d'APP. Les schémas, les diagrammes et les grandes lignes des démarches de calculs ou démonstrations dans cette annexe peuvent se faire à la main et scanner ou photographier pour être joint au rapport d'APP.

### **3- Connaissances nouvelles à acquérir par la résolution de cette problématique**

#### **Électrotechnique**

- Connaissances déclaratives : Quoi
  - Lois des circuits magnétiques (champ magnétique, induction magnétique, flux magnétique, réductance, perméabilité, tension induite, force magnétomotrice).
  - Flux de fuite dans les circuits magnétiques.
  - Courbes B(H) des matériaux ferromagnétiques.
  - Pertes dans les matériaux ferromagnétiques.
  - Circuit équivalent des transformateurs et circuit magnétique.
  - Déformation du courant de magnétisation des circuits ferromagnétiques.
  - Courant, tension et impédance de charge vus de la source (vu du primaire du transformateur).
  - Puissance active, puissance réactive, puissance apparente.
  - Système unitaire ou système réduit (per-unit)
  - Systèmes per-unit et changement de base
  - Facteur de puissance vu de la source.
  - Bilan de puissance active et rendement.
  - Diagramme vectoriel (diagramme des phaseurs), phaseurs.
  - Circuits triphasés équilibrés.
  - Transformateurs triphasés
  - Transformateurs triphasés - Connexions étoile-étoile, étoile triangle, triangle étoile
  - Modèle équivalent monophasé d'un transformateur triphasé
- Connaissances procédurales : Comment
  - Procédure pour obtenir par la technique des phaseurs le comportement à vide et en charge des transformateurs.
  - Procédure pour obtenir le circuit équivalent des transformateurs (Essais en circuit ouvert et en court-circuit).
  - Procédure pour obtenir les pertes fer.
  - Procédure pour obtenir le comportement en charge des transformateurs (régulation de tension).
  - Procédure pour corriger le facteur de puissance vu du primaire du transformateur.
  - Comment connecter les transformateurs triphasés.

- Connaissance conditionnelle : Quand
  - Choix du type de connexion des transformateurs triphasés.
  - Choix du mode de refroidissement.
  - Correction du facteur de puissance.

## **4- Références obligatoires à consulter**

Première semaine : I à XI (notes mathématiques du guide de l'étudiant)

Deuxième semaine : XII à XIII (notes mathématiques du guide de l'étudiant)

Réf. 1 : Volume « Électrotechnique », 4<sup>e</sup> édition, Théodore Wildi. Les Presses de l'Université Laval et notes mathématiques obligatoires de ce guide de l'étudiant.

Réf. 2 : Volume « Power System Analysis and Design », 6e Edition, SI Edition, J. Duncan Glover, Thomas Overbye, Mulukutla Sarma

**Note : Il est important de résoudre tous les problèmes identifiés à la fin de chacune des sections I, II, III, etc.**

### **PREMIÈRE SEMAINE (avant procédurale 1)**

#### **I – Magnétisme : Flux magnétique $\phi$ et Induction magnétique B**

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 12.1 : Aimants naturels, aimants artificiels. pp. 149-150
- Section 12.2 : Orientation des aimants. pp. 150
- Section 12.3 : Attraction et Répulsion. pp. 150
- Section 12.4 : Lignes de force. pp. 150
- Section 12.5 : Sens des lignes de force. pp. 151
- Section 12.6 : Détermination du spectre magnétique à l'aide de limaille de fer. pp. 151
- Section 12.8 : Flux magnétique  $\phi$ . pp. 152
- Section 12.9 : Densité de flux magnétique B (ou induction magnétique) . pp. 152

*Notes mathématiques obligatoires :*

*On définit la relation mathématique entre  $B$  et  $\phi$  tel que :*

$$\phi = \iint_{A_{\text{surface}}} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

*Où  $B$  est le vecteur induction magnétique orienté dans la même direction que la ligne de force en un point donné.  $dA$  est un élément de section infinitésimale d'une surface  $A_{\text{surface}}$ , laquelle est traversée par les lignes de force magnétique. L'élément  $dA$  est un vecteur orienté perpendiculairement (vecteur normal) à surface  $A_{\text{surface}}$  en tout point.*

#### LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 12.11 : Effet du fer doux sur un champ magnétique. pp. 153- 154
- Section 12.12 : Nature du ferromagnétisme. pp. 154

*Résoudre les problèmes suivants :*

12.A - En vous référant à la figure 12-10, page 152, déterminer le flux  $\phi$  qui traverse le disque ombragé de gauche, si le champ d'induction  $B$  est uniforme de valeur 0,5 tesla et si le rayon du disque est de 10 cm.

12.B - En vous référant à la figure 12-10, page 152, donner l'expression du flux en fonction de l'angle  $\theta$  quelconque que fait le champs d'induction  $B$  et la normal au disque traversé par les lignes de force magnétique. Déduire la valeur du flux  $\phi$  qui traverse le disque ombragé de droite, si ce dernier fait un angle de 25 degrés avec les lignes de force magnétiques. Utiliser les mêmes dimensions et valeurs de  $B$  qu'au problème 12.A.

12.C - En vous référant à la figure 12-12, page 153, déterminer la valeur de l'induction magnétique  $B_1$ , sachant qu'un flux de 500  $\mu\text{Wb}$  traverse la surface a) dont l'aire est  $A_{\text{surface}} = 20 \text{ cm}^2$ .

## II – Magnétisme : Loi de l'induction électromagnétique ou Loi de Faraday

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 18.1 : Loi de l'induction électromagnétique. pp. 220-221

*Notes mathématiques obligatoires :*

*En utilisant la notation du calcul différentiel, la loi de Faraday peut s'écrire :*

$$e = + \frac{d\phi}{dt}$$

*Où  $e$  est la tension induite dans une spire dont l'aire est  $A_{surface}$ . Noter que dans le livre de référence, Électrotechnique, on utilise  $E$  majuscule pour la tension induite.*

*On appelle  $e$  : la « force électromotrice » (fem), car elle fait circuler des électrons dans un conducteurs. Les unités de  $e$  sont le [Volt]. Une bobine est constituée de  $N$  spires. Si toutes les  $N$  spires sont identiques et traversées par le même flux magnétique, la force électromotrice  $e$  devient :*

$$e = +N \frac{d\phi}{dt}$$

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 18.2 : Application 1 – Induction dans une bobine. pp. 221
- Section 18.6 : Champ magnétique et champ électrique. pp. 223
- Section 18.8 : Méthode de mesure du flux. pp. 226-227
- Section 30.1 : Tension induite dans une bobine. pp. 440-441

*Notes mathématiques obligatoires :*

*Démonstration de la formule (30-1) du livre :*

*Si le flux est de forme sinusoïdale d'amplitude  $\phi_{\max}$ , tel que :*

$$\phi(t) = \phi_{\max} \sin(\omega t) = \phi_{\max} \sin(2\pi f t)$$

*Alors la fem que ce flux engendrera aux bornes de cette bobine sera :*

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt}$$

$$e(t) = N \frac{d[\phi_{\max} \sin(2\pi f t)]}{dt}$$

$$e(t) = N\phi_{\max} \frac{d[\sin(2\pi f t)]}{dt}$$

$$e(t) = 2\pi f N\phi_{\max} \cos(2\pi f t)$$

*Et la valeur efficace  $E$  de la f.é.m. se calculera aisément :*

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N\phi_{\max} = 4,44 f N\phi_{\max}$$

*Résoudre les problèmes suivants :*

18.A - Refaire la démonstration de la formule (30-1) du livre en vous aidant de la note mathématique de la page précédente.

18.B - Résoudre l'exemple 18-3, page 227.

18.C - Résoudre l'exemple 18-4, page 228.

### III – Magnétisme : Force magnéto-motrice (FMM)

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 13.2 : Champ magnétique créé par un courant. Découverte de Oersted. pp. 158-159
- Section 13.3 : Forme et sens du champ. p. 159
- Section 13.5 : Champ créé par plusieurs conducteurs. pp. 160-161
- Section 13.6 : Champ produit par un courant dans une spire. pp. 161-162
- Section 13.7 : Force magnéto-motrice (FMM). p. 162

*Résoudre les problèmes suivants :*

*Notes mathématiques obligatoires :*

*La FMM d'une bobine s'écrit :*

$$Fmm = NI$$

*Où N est le nombre de tours de la bobine et I le courant qui circule dans la bobine.*

13.A - Résoudre l'exemple 13-2, page 167.

13.B - Résoudre le problème 13-5, page 168.

## IV – Magnétisme : loi d’Ampère, champ magnétique H et induction magnétique B

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 14.6 : Densité de flux (ou induction magnétique). P. 174
- Section 14.7 : Champ magnétique H. p. 175

*Notes mathématiques obligatoires :*

*Par souci de simplicité, le livre “Électrotechnique” ne présente pas formellement la Loi d’Ampère. La loi d’Ampère s’écrit :*

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI$$

*On a vu que NI est la force magnétomotrice Fmm. Donc, la loi d’Ampère peut s’écrire :*

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = Fmm$$

*Où l est un parcours fermé pris dans l’espace autour d’un ou plusieurs conducteurs. Si on utilise un parcours sur lequel H est uniforme et parallèle au parcours considéré, on pourra écrire :*

$$H = \frac{Fmm}{l}$$

*Résoudre les problèmes suivants :*

14.A - Résoudre l'exemple 14-2, page 175.

14.B - Un bobinage de 250 tours est enroulé autour d'un tore de plastique dont la circonference est de 25 cm. Déterminer le champ magnétique H à l'intérieur du tore si un courant de  $I = 5 \text{ A}$  parcourt le bobinage. Réponse = 5000 A/m.

14.C - Quelle sera la valeur du champ H de la question précédente pour un tore en Fer ? Réponse = 5000 A/m.

14.D - Prenez 15 minutes pour méditer la question suivante : « Quelle est la différence entre le champ magnétique H et l'induction B? »

## V – Magnétisme : Aimantation, matériaux magnétiques, perméabilité magnétique, réductance magnétique, circuits magnétiques

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 14.1 : Champ magnétique à l'intérieur d'un tore. pp. 170-172
- Section 14.8 : Courbe d'aimantation B-H du vide. pp. 175-176
- Section 14.9 : Courbe d'aimantation B-H d'un matériau magnétique. p. 176
- Section 14.10: Détermination de la perméabilité relative. pp. 177-178

Vous pouvez également consulter le chapitre 16 du volume « Les phénomènes électromagnétiques », de Paul Lorrain, Dale R. Corson, François Lorrain, Édition Dunod, 2002 (voir autres références optionnelles à la page 35 de ce guide).

*Notes mathématiques obligatoires :*

*Suivant le raisonnement proposé à la section 14.1 de Wildi, on écrit ici l'expression explicite de la réluctance d'un barreau magnétique de longueur  $l$  et de section  $A$ . On définit la « réluctance » d'un circuit magnétique comme le rapport entre la Force magnétomotrice (F.m.m.) aux bornes d'un corps magnétique et le flux magnétique traversant celui-ci :*

$$\mathfrak{R} = \frac{Fmm}{\varphi}$$

*Or, on a vu que, sur un parcours de longueur  $l$ , si  $H$  est uniforme sur le parcours,*

$$Fmm = Hl$$

*Si ce champ magnétique  $H$  traverse une section  $A$  et que ce champ est uniforme sur toute la section, on peut écrire le flux magnétique :*

$$\begin{aligned}\varphi &= BA \\ \varphi &= (\mu_0 \mu_r H) A\end{aligned}$$

*Donc, la réluctance :*

$$\mathfrak{R} = \frac{Hl}{\mu_0 \mu_r H A}$$

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A}$$

## LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 14.11: Analogie entre circuits électriques et circuits magnétiques. pp. 178

*Notes mathématiques obligatoires :*

*Expression de l'inductance d'un bobinage de conducteurs enroulés autour d'un barreau magnétique de longueur  $d$  et de section  $A$ :*

*Par définition l'inductance représente le rapport entre le flux magnétique généré par un enroulement de  $N$  conducteurs sur le courant requis pour créer ce flux:*

$$L = \frac{N\varphi}{I}$$

*Qu'on peut également exprimer en fonction de la réductance, selon les expressions développées précédemment.*

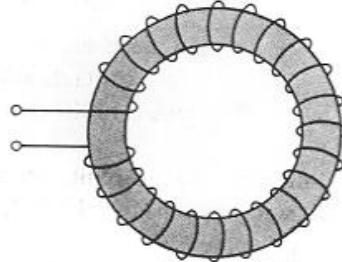
$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}}$$

*Résoudre les problèmes suivants :*

- 14.A - Résoudre l'exemple 14-5, page 179.
- 14.B - Résoudre l'exemple 14-6, page 179.
- 14.C - Résoudre l'exemple 14-7, page 179.
- 14.D - Résoudre le problème 14-16, page 184.
- 14.E - Résoudre le problème 14-20, page 184.
- 14.F - Résoudre le problème 14-25, page 184.
- 14.G - À partir de  $L = N\varphi/I$ , faites la démonstration que  $L = N^2/\mathfrak{R}$ .

Exemple : Une bobine de 100 spires est enroulée autour d'un tore en fer de longueur moyenne 20 cm et de section constante  $4 \text{ cm}^2$ . On suppose que la perméabilité du fer est constante et vaut  $\mu = 10^{-3} \text{ H/m}$ .

Quelle est l'inductance de la bobine?



Réponse :  $L=0.02 \text{ H}$

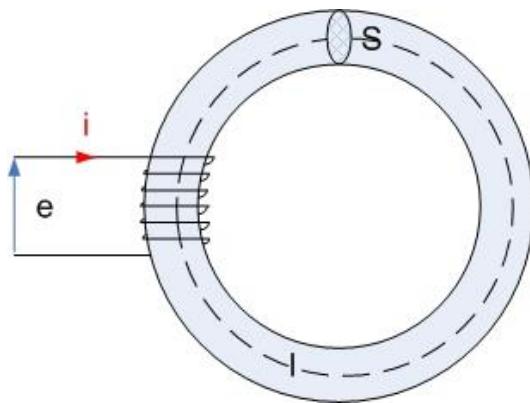
## VI – Pertes magnétiques : pertes par hystérésis et par courants de Foucault

*Notes mathématiques obligatoires :*

*Un noyau ferromagnétique soumis à une induction alternative sera le siège de pertes dites "magnétiques" ou "pertes fer". Ces pertes sont généralement décomposées en deux catégories : les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault.*

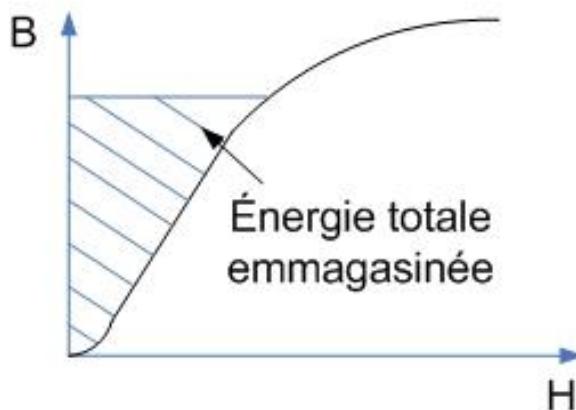
### *VI.1 Pertes par hystérésis*

*Nous pouvons caractériser en termes électriques l'énergie fournie à un circuit magnétique, un tore par exemple, de la manière suivante :*



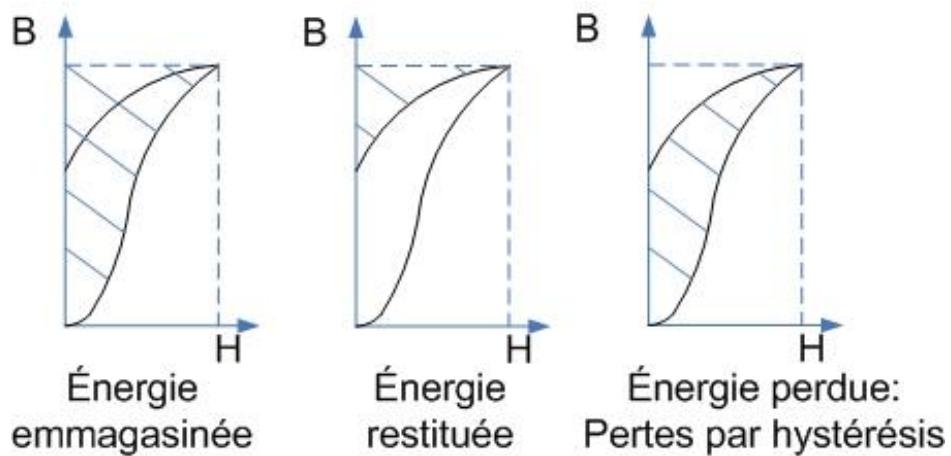
$$W_{magnétostatique} = \int_0^t eidt$$

Notes mathématiques obligatoires :



Or, nous avons vu dans les parties précédentes que les matériaux magnétiques étaient capables de retenir l'aimantation et présentaient un cycle d'hystérésis.

Par conséquent, en présence d'un champ magnétique alternatif, un matériau emmagasine de l'énergie magnétique provenant du champ mais ne restitue pas toute cette énergie lorsque l'on retire le champ, comme on peut le constater sur le schéma ci-dessous :



Du point de vue de la physique, on explique ces pertes par la présence d'impuretés dans le matériau ou de dislocations dans sa structure cristalline, empêchant alors la mobilité normale des parois de domaines.

*Notes mathématiques obligatoires :*

*Comme,*

$$e = N \frac{d\varphi}{dt}$$

*Alors,*

$$W_{magnétostatique} = \int_0^t N \frac{d\varphi}{dt} idt \Leftrightarrow W_{magnétostatique} = N \int_0^t id\varphi$$

*Puisque,*

$$\varphi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S} \text{ et } Ni = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

*Nous pouvons finalement écrire que,*

$$W_{magnétostatique} = \iiint \left( \int_0^B \vec{H} \cdot d\vec{B} \right) dv$$

*L'énergie fournie au circuit magnétique par unité de volume s'écrit alors :*

$$W_V = \frac{W}{l A} = \int_0^B H dB$$

*À partir de l'équation précédente, nous pouvons représenter l'énergie magnétique fournie au tore par unité de volume, directement sur une caractéristique B-H. La surface hachurée représente la quantité d'énergie totale emmagasinée sous forme de champ magnétique :*

*Notes mathématiques obligatoires :*

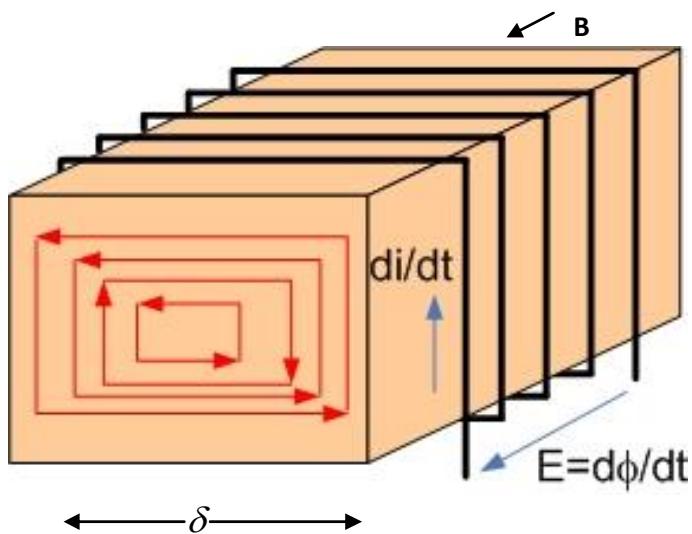
*Les pertes par hystérésis seront fonction de la fréquence. L'équation de Steinmetz permet de les estimer :*

$$P_H = K_H m f B^n$$

*avec  $K_H$ , une constante en [W/kg],  $m$  la masse du matériau et  $n$ , l'exposant de Steinmetz, propre au matériau, fourni le plus souvent dans la documentation des manufacturiers de matériaux magnétique ( $1,5 < n < 2$ ).*

## *VI.2 Pertes par courants de Foucault*

*Nous avons déjà vu plus haut qu'une variation de flux magnétique induit une tension. Par conséquent, lorsqu'on utilise un matériau magnétique conducteur dans une application c.a., la variation de flux produit des courants de circulation au sein du matériau, qui sont proportionnels à la tension induite. La circulation de ces courants induits non désirés provoque un échauffement et donc des pertes qu'on appelle alors pertes par courants de Foucault.*



*Notes mathématiques obligatoires :*

*Les courants de Foucault ne sont limités que par la résistivité du matériau dans lequel ils circulent.*

*Les pertes par courant de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence. On peut les estimer à partir de la formule suivante :*

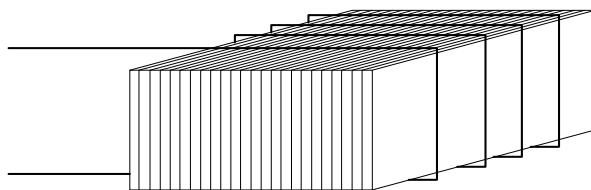
$$P_F = K_F m f^2 B^2$$

*avec  $K_F$ , une constante en [W/kg], laquelle peut être approximée par la formule :*

$$K_F \approx \frac{\pi^2 \delta^2}{6(m/V)\rho}$$

*où le rapport  $m/V$  représente la masse volumique du matériau. Dans le cas du fer, le rapport ( $m/V$ ) est de  $7870 \text{ kg/m}^3$ .*

*Le paramètre  $\delta$  représente l'épaisseur du barreau soumis à l'induction magnétique sinusoïdale d'amplitude  $B$ . Pour diminuer les pertes par courants de Foucault, on aura intérêt à réduire l'épaisseur du matériau magnétique. Dans les applications c.a., on favorisera donc l'utilisation de tôles minces au lieu de blocs épais, tel que l'illustre la figure suivante :*



*Notes mathématiques obligatoires :*

*Le paramètre  $\rho$  représente la résistivité électrique du matériau soumis à l'induction magnétique. Pour diminuer les pertes par courants de Foucault, on aura donc intérêt à utiliser un matériau possédant une résistivité la plus haute possible.*

*À noter que, dans leurs spécifications techniques, les manufacturiers de matériaux magnétiques décrivent habituellement les pertes magnétiques totales à une fréquence et à une induction donnée, lesquelles incluent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault.*

## VII – Transformateur : circuit inductif, réactance, puissance apparente, puissance réactive

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 22.8 : Circuit inductif. pp. 288-289.
- Section 22.9 : Réactance inductive. pp. 289-290.
- Section 22.10 : Puissance réactive dans une bobine : le var inductif. pp. 290-291
- Section 24.1 : Impédance d'un circuit. pp. 316-317
- Section 24.2 : Puissance apparente. p. 317
- Section 24.4 : Solution graphique d'un circuit série. p. 318
- Section 24.6 : Formules donnant l'impédance de deux éléments en série. pp. 319-321

*Résoudre les problèmes suivants :*

22.A - Résoudre l'exemple 22-5, page 291.

24.B - Résoudre l'exemple 24-2, page 318.

## VIII – Transformateur : Transformateur idéal, réactance de fuite, circuit équivalent, circuit équivalent en per-unit (pu).

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 30.2 : Tension appliquée et tension induite. pp. 441-442.
- Section 30.3 : Transformateur élémentaire. pp. 442-443.
- Section 30.4 : Marques de polarité d'un transformateur. pp. 443
- Section 30.5 : Propriétés des marques de polarité. pp. 443-444
- Section 30.6 : Le transformateur idéal à vide; rapport de transformation. pp. 444-445

- Section 30.7 : Transformateur idéal en charge; rapport des courants. p. 445
- Section 30.9 : Rapport d'impédance. pp. 448-449
- Section 30.10 : Déplacement des impédances du secondaire au primaire et vice versa. pp. 449 – 451
- Section 30.11 : Transformateur idéal comportant un noyau réel. pp. 451 – 453
- Section 30.12 : Transformateur idéal à couplage partiel. pp. 453 – 454
- Section 30.13 : Réactance de fuite au primaire et au secondaire. pp. 454 – 455
- Section 30.14 : Circuit équivalent d'un transformateur. pp. 455 – 456
- Section 30.15 : Simplification du circuit équivalent. pp. 456 – 457
  
- Section 3.3 : The per-unit system pp. 107-115 (réf. 2)
  
- Section 30.16 : Construction du transformateur. pp. 458 – 459
- Section 30.21 : Pertes, rendement et capacité d'un transformateur. pp. 462 – 465
- Section 30.22 : Refroidissement des transformateurs. pp. 465 - 467
- Section 30.23 : Application du système p.u. aux transformateurs. pp. 467 – 468
- Section 30.24 : Impédance d'un transformateur exprimé en p.u.. pp. 468 – 470
- Section 30.25 : Mesure des impédances d'un transformateur. pp. 470 – 472

*Résoudre les problèmes suivants :*

30.A - Résoudre le problème 30-21, page 476

30.B - Résoudre le problème 30-26, page 477.

30.C - Résoudre le problème 30-34, page 477.

## **PREMIÈRE SEMAINE (avant procédurale 2)**

### **IX – Onde de tension, expression avec déphasage, diagramme vectoriel**

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 22.14: Temps, fréquence et l'angle  $\theta$ . p. 294
- Section 22.15: Expression généralisée d'une tension sinusoïdale. pp. 294-295
- Section 22.6 : Expression avec angle et radian. p. 296
- Chapitre 23 au complet : Diagrammes vectoriels pp.299-312.

*Résoudre les problèmes suivants :*

23.A - Résoudre le problème 23-1, page 313

23.B - Résoudre le problème 23-10, page 313

23.C - Résoudre le problème 23-21, page 315

23.D - Résoudre le problème 23-22, page 315

23.E - Résoudre le problème 23-26, page 315

Section 2.1 Phaseurs p. 41 (réf.2)

## X – Puissance active, puissance apparente, puissance réactive, facteur de puissance

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Section 25.1 à 25.7, pp. 334-342

*Résoudre les problèmes suivants :*

25.A - Résoudre l'exemple 25-4, page 340

25.B - Résoudre le problème 25-18, page 354

Section 2.3 Complex power p. 47 (réf.2)

## XI – Circuits triphasés, transformateurs triphasés

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Introduction chapitre 26, p. 356
- Section 26.3 : Montage en étoile. pp. 358-359
- Section 26.4 : Propriétés du montage en étoile. pp. 359-361
- Section 26.5 : Charges raccordées en étoile et en triangle. pp. 361-363
- Section 2.5 : Balanced three-phase circuits pp. 55-62 (réf. 2)
- Section 26.6 : Puissance transportée par une ligne triphasée. pp. 363-364
- Section 2.6 : **Complex Power** in Balanced three-phase circuits pp. 64-68 (réf. 2)
- Section 2.7 : Advantages of balanced three-phase versus single-phase systems pp. 68-69 (réf. 2)
- Section 26.7 : Résolution des circuits triphasés. pp. 364-365
- Section 32.1 : Montage triangle-triangle. pp. 504-505
- Section 32.2 : Montage triangle-étoile. pp. 505-506
- Section 32.3 : Montage étoile-triangle. p. 507
- Section 32.4 : Montage étoile-étoile. p. 507

*Résoudre les problèmes suivants :*

25.A - Résoudre l'exemple 32-1, page 506

25.B - Résoudre le problème 32-6, page 522

25.C - Résoudre le problème 32-7, page 522

- Section 3.4 : Three-phase transformer connections and phase shift. 115-120 (réf. 2)
- Section 3.5 : The per-unit equivalent circuits of balanced three-phase two-winding transformers pp. 120-125 (réf. 2)

## DEUXIÈME SEMAINE

### **XII – Transformateurs spéciaux**

LIRE LES SECTIONS SUIVANTES:

- Introduction chapitre 31, p. 478
- Section 31.1 : Transformateur à secondaire double. pp. 478-479
- Section 31.2 : Autotransformateur. pp. 479-480
- Section 31.3 : Transformateur conventionnel monté en autotransformateur. pp. 480-482
- Section 31.8 : Autotransformateur variable. p. 486

### **XIII – Pertes, échauffements, transfert de chaleur**

A LIRE OBLIGATOIUREMENT

- Section 1.23 : Chaleur et température p.15
- Section 1.24 : Échelles de température p.16
- Section 1.25 : Chaleur requise pour chauffer un corps p.16
- Section 1.27 : Transport de la chaleur p.17
- Section 1.28 : Propagation de la chaleur par radiation p.17
- Section 1.30 : Transport par conduction p.18
- Section 1.31 : Calcul des pertes par conduction p.19
- Section 1.32 : Transport de la chaleur par convection p.20
- Section 1.33 : Calcul des pertes par convection p.20

*Résoudre les problèmes suivants :*

1.A - Solutionner le problème 1-24, page 25.

## **Autres références optionnelles :**

- **Volume « Électrotechnique », 2<sup>e</sup> édition, Réal-Paul Bouchard et Guy Olivier, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 1999.**

Chap. 2: Circuit magnétique, pages 65-82 (18 pages)

Chap. 1 : Éléments de circuit en courant alternatif, pages 1-64 (64 pages)

Chap. 3 : Les transformateurs, pages 93-105, 109-118, 120-130, (34 pages)

Chap. 3 : Les transformateurs : Prises et Comportement thermique, 140-148 (9 pages)

Chap. 4 : Circuit Triphasés équilibrés, pages 177-189, 222-223 (15 pages)

Chap. 7 : Transformateurs en triphasé, pages 301-316, (16 pages)

- **Volume « Les phénomènes électromagnétiques », Paul Lorrain, Dale R. Corson, François Lorrain, Édition Dunod, 2002.**

Chap. 16 : Champs magnétiques : matériaux magnétiques

16.1 : Les différents types de matériaux magnétiques

16.3 : Les champs magnétiques H. Le rotationnel de H. Le théorème de la circulation d'Ampère revu et corrigé.

16.4 : La susceptibilité magnétique  $\chi_m$  et la perméabilité relative  $\mu_r$

16.5 : Les conditions aux limites pour B et H

16.6 : B en fonction de H dans les matériaux ferromagnétiques

## 5- Activités liées à la problématique

- **Première semaine**

- Première rencontre de tutorat (**obligatoire**).
- Étude personnelle (**obligatoire**).
- Formation à la pratique procédurale 1 (très recommandée).
- Travaux pratiques en laboratoire 1 (**obligatoire**). Objectif à atteindre : questions 1, 2 et 3 de la problématique.
- Formation à la pratique procédurale 2 (recommandée).

- **Deuxième semaine**

- Travaux pratiques en laboratoire 2 (**obligatoire**). Objectif à atteindre : questions 4 et 5 de la problématique (voir annexe II pour la question 5).
- Deuxième rencontre de tutorat (**obligatoire**).
- Rédaction finale du rapport d'APP décrivant les étapes suivies pour résoudre la problématique (remise en format électronique, **jeudi le 8 juin avant 8h 00 a.m., obligatoire**).
- Étude personnelle.
- Évaluation formative.
- Rencontre de consultation.
- Évaluation sommative.

## 6- Laboratoires

- **Labo 1:** questions 1, 2 et 3 de la problématique, Annexe I.
- **Labo 2:** questions 4, 5 de la problématique, Annexe II.
- La présence aux laboratoires C1-2055 est obligatoire. Les présences seront prises rigoureusement;
- Le laboratoire d'électrotechnique comporte des éléments de sécurité importants. De ce fait, des consignes de sécurité seront données au début des laboratoires. Par conséquent, la ponctualité est requise. **L'accès au laboratoire sera bloqué après le début de la séance.**



## 7- Livrables

### À remettre : au format électronique

Quand : La deuxième (2<sup>e</sup>) semaine : **jeudi le 8 juin**

Heure limite: **avant 08h 00 a.m**

Lieu : Sur le site de S3elec.

Le rapport d'APP doit décrire les étapes suivies pour répondre aux questions 1 à 5 contenues dans la problématique et les questions contenues dans l'annexe II (avec toutes les démarches de calculs théoriques appuyant l'analyse des résultats obtenus en laboratoire). Le rapport doit avoir une dizaine de pages et ne doit dépasser 25 pages. Le rapport doit être bien présenté; pour cela, tout doit être écrit avec Word (ou Latex) ainsi que les grandes lignes des étapes de calculs qui permettent au correcteur de suivre clairement vos démarches de calculs afin de les évaluer. **Un rapport brouillon sera pénalisé.**

Le rapport d'APP doit inclure :

1. Une introduction incluant la mise en contexte. (3 points soit « 2% »)
2. Une description du cahier des charges et des contraintes (contenant une brève description de tous les essais et procédures à mettre en œuvre pour la résolution de la problématique). Le cahier des charges sert au correcteur d'évaluer si l'étudiant sait pour quelle raison chaque mesure prise au laboratoire a été réalisée. Dans la partie cahier des charges, l'étudiant doit faire apparaître de façon succincte, comment on procède en laboratoire pour répondre à chaque question de la problématique. (5 points soit « 4% »)
3. Les résultats des points exigés dans la problématique et dans l'annexe II avec tous les calculs menant aux résultats. (129 points soit « 92% ») + (35 points – GEL362)
4. Une conclusion (3 points soit « 2% »)

### Détails du point n° 3 du livrable:

**Contenu technique du rapport (129 points – GEL342) + (35 points – GEL362)**

**Note: L'ordre des questions est sans importance. Cette liste détaillée des questions permet à l'étudiant de s'assurer qu'il a fourni tout ce qu'il faut dans le rapport.**

**Pour faciliter la correction et permettre au correcteur d'être juste, identifiez dans votre rapport le numéro de question qui est traité.**

### Question 1 : observation des phénomènes magnétiques. (25 points soit « 18% »)

Le rapport doit contenir :

- 1- Le schéma bloc illustrant cette problématique
- 2- Les résultats expérimentaux de l'amplitude et la forme d'onde du flux magnétique,
- 3- Les résultats expérimentaux de l'amplitude de l'induction magnétique circulant dans le noyau du transformateur lorsque celui-ci est alimenté par une tension de valeur efficace 120 V de fréquence 60 Hz.

- 4- La courbe d'hystérésis de la caractéristique  $B(H)$  du matériau magnétique du transformateur. **Vous devez montrer dans votre rapport, comment  $B$  et  $H$  sont calculés à partir des données expérimentales que vous obtenez à l'oscilloscope.**
- 5- L'explication du rôle du circuit intégrateur dans le montage 1.
- 6- Évaluation des pertes par hystérésis dans le transformateur à partir des données expérimentales que vous obtenez à l'oscilloscope.

Question 2 : circuit équivalent et puissance dissipée. (38 points soit « 27% ») + (35 points GEL 362 \*)

Le rapport doit contenir :

- 7- Le circuit équivalent du transformateur, avec les détails de toutes les démarches de calculs nécessaire pour avoir les paramètres du circuit équivalent.
- 8- La région du transformateur qui dissipe le plus de chaleur pour chacun des essais (essai à vide et essai en court-circuit) avec des explications (les causes physiques) à cet effet (\* thermique).
- 9- Le calcul de la charge passive ( $R-L$ ) à la sortie du transformateur, de telle sorte que le secondaire du transformateur débite une puissance de 780 W avec un facteur de puissance de 0.9. Le calcul des valeurs de  $R_{\parallel}$  et  $L_{\parallel}$  à utiliser en laboratoire.
- 10- La valeur théorique de la puissance dissipée sous forme de chaleur dans le transformateur pendant la recharge du véhicule lorsque le primaire de ce dernier est alimenté par une tension efficace 120 V / 60 Hz (\* thermique).
- 11- Le rendement du transformateur pendant la recharge d'un véhicule.
- 12- La régulation de tension du transformateur pendant la recharge d'un véhicule.
- 13- L'énergie totale dissipée dans ces transformateurs pendant une année en Joules et en kWh.
- 14- L'estimation du montant total des pertes dans ces transformateurs à l'échelle du Québec (à \$0,08/kWh).

Question 4 : transformateur monophasé utilisé en auto-transformateur et borne de recharge à 240V (10 points soit « 7% »)

Votre rapport doit contenir la réponse aux questions suivantes :

- 15- Par quel mécanisme pourrait-on passer d'une alimentation 120  $V_{eff}$  à une sortie 240  $V_{eff}$  à volonté? Proposer un schéma électrique qui permettrait cette flexibilité.
- 16- Qu'en est-il de l'isolation galvanique dans la configuration 240  $V_{eff}$ , par rapport à la configuration 120  $V_{eff}$ ?

Question 4 : correction du facteur de puissance. (18 points soit « 13% »)

Le rapport doit contenir :

- 17- Le schéma électrique illustrant la charge équivalent R-L, le condensateur C et le transformateur.
- 18- Le calcul théorique de la valeur du facteur de puissance vu par la source 120 V de la borne de recharge.
- 19- Le calcul théorique de la valeur de la capacité du condensateur C pour la correction du facteur de puissance.
- 20- La valeur expérimentale du courant ainsi que son déphasage par rapport à la tension d'alimentation avec et sans condensateur de correction.
- 21- La réponse à ces questions :

21-a- Lorsque 10 bornes de recharge sont alimentées par un point de livraison du réseau de distribution dont la capacité vous est fournie en Ampère. Si lorsque vous ne corrigez pas le facteur de puissance vous constatez que vous êtes à la limite de la capacité du point de livraison, pensez-vous qu'avec l'ajout de condensateur pour la correction du facteur de puissance, vous risquez de dépasser la limite de la capacité du point de livraison. Justifiez votre réponse.

21-b- Comme illustré à la figure 2, si les 10 bornes de recharge sont alimentées par une ligne de distribution électrique dont la résistance équivalente est de 0,034 ohms/km, de combien réduit-on les pertes (en w et en %) dans 1 km de ligne lorsqu'on place les condensateurs de compensation au primaire du transformateur de chaque borne de recharge.

Question 5 : Connexions du transformateur triphasé du point de livraison (38 points soit « 27% »)

- 22- Quel type de connexion permet d'alimenter les bornes de recharge et les immeubles tout en ayant un meilleur comportement en régime déséquilibré.
- 23- Donner pour cette connexion le modèle équivalent monophasé en pu du transformateur triphasé.
- 24- Dans le cas où les bornes sont équipées de condensateurs de compensation, calculer (en pu et en V) la valeur efficace de la tension ligne-ligne du réseau de distribution (au primaire du transformateur triphasé) lorsque toutes les bornes fonctionnent simultanément et que les deux immeubles consomment une puissance totale de 1 MVA avec un facteur de puissance corrigé à 1.
- 25- Voir les résultats à fournir pour l'annexe II à la page suivante.

Pour faciliter la correction inscrire dans votre rapport le numéro de question qui est traité.

## Résultats à fournir pour l'annexe II (à mettre en annexe du rapport d'APP)

### Essais sur transformateur triphasé

**Notes :** Les résultats et calculs effectués à l'annexe II doivent être fournis comme annexe à votre rapport d'APP. Les schémas, les diagrammes et les grandes lignes des démarches de calculs dans cette annexe peuvent se faire à la main puis scannés ou photographiés pour être joint au rapport d'APP. Pour tous les modèles équivalents demandés dans cette annexe on négligera les pertes et la branche de magnétisation. On ne demande pas de fournir la valeur de la réactance du modèle.

#### II-A. Connexion étoile-étoile

##### II-A1. Essai à vide - Connexion étoile-étoile

Tableau 1 : Résultats expérimentaux 1

Primaire	V <sub>AB</sub> (RMS)	205.6 V	Rapport de transformation a	1.59
Secondaire	V <sub>ab</sub> (RMS)	128.8 V	Rapport de transformation a'	1.59
			Déphasage entre V <sub>AB</sub> et V <sub>ab</sub>	∅
			V <sub>ab</sub> en avance ou en retard sur V <sub>AB</sub>	∅

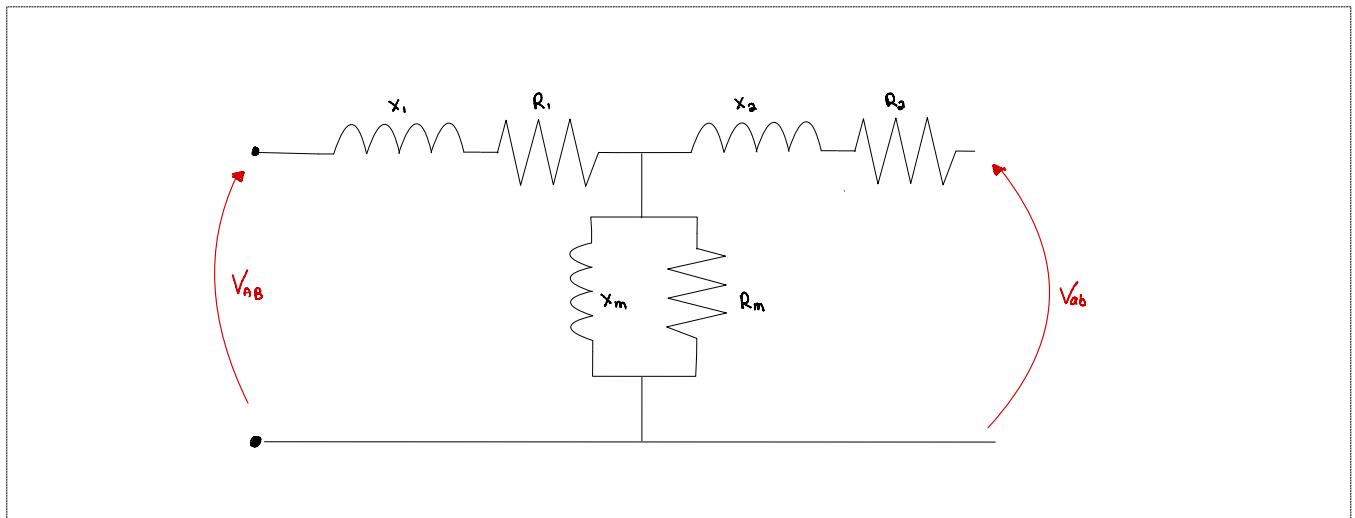


Figure A1. Connexion étoile-étoile : Modèle équivalent monophasé en pu

#### Connexion étoile-étoile : Démonstration théorique

À partir des phaseurs, démontrer théoriquement la relation entre les 2 phaseurs V<sub>AB</sub> et V<sub>ab</sub>  
(On rappelle que V<sub>AB</sub> et V<sub>ab</sub> sont des nombres complexes)

$\begin{aligned} V_{AN} &= \cos(\omega) + J\sin(\omega) = 1 + 0J \\ V_{BN} &= \cos(120) + J\sin(120) = -0.5 + \frac{\sqrt{3}}{2}J \\ V_{CN} &= \cos(-120) + J\sin(-120) = -0.5 - \frac{\sqrt{3}}{2}J \end{aligned}$	$\begin{aligned} V_{an} &= \cos(\omega) + J\sin(\omega) = 1 + 0J \\ V_{bn} &= \cos(120) + J\sin(120) = -0.5 + \frac{\sqrt{3}}{2}J \\ V_{cn} &= \cos(-120) + J\sin(-120) = -0.5 - \frac{\sqrt{3}}{2}J \end{aligned}$
$B$ $120^\circ$ $N$ $120^\circ$ $A$	$b$ $120^\circ$ $n$ $120^\circ$ $a$
$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = V_{AN} + V_{NB}$ $V_{AB} = (1 - -0.5) + (0 - \frac{\sqrt{3}}{2})J$ $V_{AB} = 1.5 - \frac{\sqrt{3}}{2}J$ $\angle V_{AB} = \arctan\left(\frac{-\frac{\sqrt{3}}{2}}{1.5}\right)$ $\angle V_{AB} = -30^\circ$	$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = V_{an} + V_{nb}$ $V_{ab} = (1 - -0.5) + (0 - \frac{\sqrt{3}}{2})J$ $V_{ab} = 1.5 - \frac{\sqrt{3}}{2}J$ $\angle V_{ab} = \arctan\left(\frac{-\frac{\sqrt{3}}{2}}{1.5}\right)$ $\angle V_{ab} = -30^\circ$

$$\angle_{\text{total}} = \angle V_{AB} - \angle V_{ab}$$

$$\angle_{\text{total}} = -30^\circ - 30^\circ$$

$$\angle_{\text{total}} = 0^\circ$$

Rapport  $a$  et  $a'$

$$a' = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} \quad a = \frac{\frac{V_{AB}}{\sqrt{3}}}{\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}} = \frac{V_{AB}\sqrt{3}}{V_{ab}\sqrt{3}}$$

$$\text{Rapport } \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3}V_{ab}}{\sqrt{3}V_{ab}} = 1$$

À partir du résultat de la démonstration théorique, remplissez le tableau 2.

Tableau 2: Résultats théoriques connexion étoile-étoile

Relation entre le rapport de transformation $a'$ et le rapport de transformation $a$	1
Déphasage entre $V_{AB}$ et $V_{ab}$	∅
$V_{ab}$ en avance ou en retard sur $V_{AB}$	∅

## II-B. Connexion triangle-étoile

### II-B1. Essai à vide - Connexion triangle-étoile (Dy11)

Tableau 3 : Résultats expérimentaux 2

Primaire	$V_{AB}$ (RMS)	197.5 V
Secondaire	$V_{ab}$ (RMS)	213.4 V

Rapport de transformation $a$	1.60
Rapport de transformation $a'$	0.925
Déphasage entre $V_{AB}$ et $V_{ab}$	33.264°
$V_{ab}$ en avance ou en retard sur $V_{AB}$	Avance

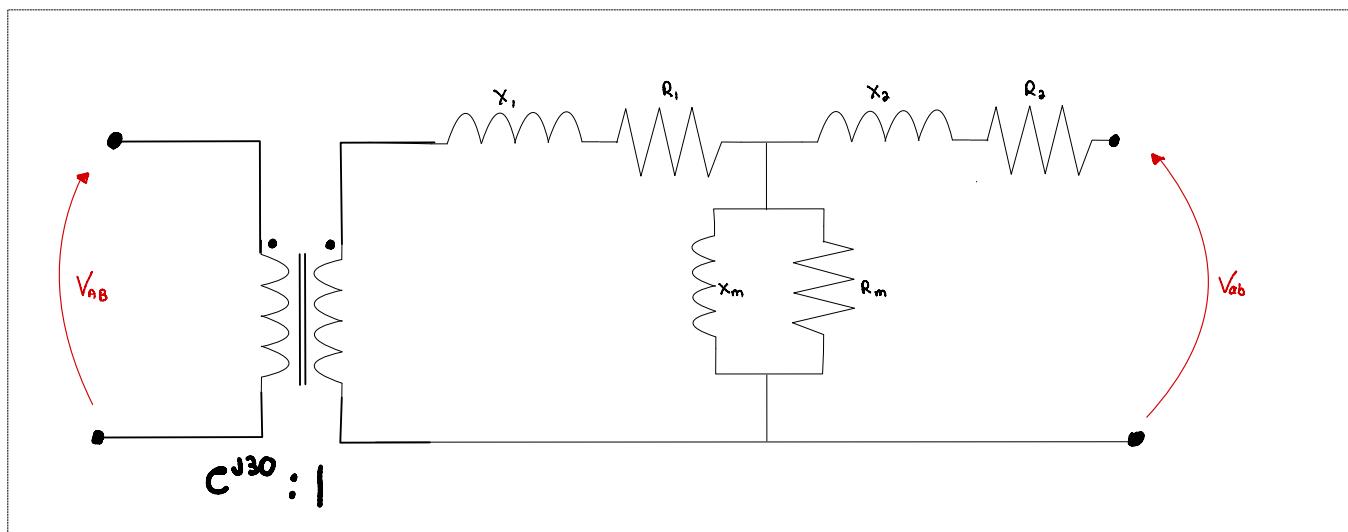


Figure A2 : Connexion triangle-étoile (Dy11) : Modèle équivalent monophasé en pu

### Connexion triangle-étoile (Dy11) : Démonstration théorique

À partir des phaseurs, démontrer théoriquement la relation entre les 2 phaseurs  $V_{AB}$  et  $V_{ab}$  (On rappelle que  $V_{AB}$  et  $V_{ab}$  sont des nombres complexes).

$$\begin{aligned}
 V_{an} &= \cos(\omega) + j\sin(\omega) = 1 + 0j \\
 V_{bn} &= \cos(120) + j\sin(120) = -0.5 + \frac{\sqrt{3}}{2}j \\
 V_{cn} &= \cos(-120) + j\sin(-120) = -0.5 - \frac{\sqrt{3}}{2}j \\
 V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} = V_{an} + V_{nb} \\
 V_{ab} &= (1 - -0.5) + (0 - \frac{\sqrt{3}}{2})j \\
 V_{ab} &= 1.5 - \frac{\sqrt{3}}{2}j \\
 \angle V_{ab} &= \arctan\left(\frac{-\frac{\sqrt{3}}{2}}{1.5}\right) \\
 \angle V_{ab} &= -30^\circ
 \end{aligned}$$

Rapport  $a'$  et  $a$

$$a' = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} \quad a = \frac{V_{AB}}{\frac{V_{ab}}{\sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{3}V_{AB}}{V_{ab}}$$

Rapport  $\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3}V_{AB}}{V_{ab}} = \sqrt{3}$

→ ABC       $V_{AB} = 1$

$$\begin{aligned}
 \angle_{total} &= \angle V_{ab} - \angle V_{ab} \\
 \angle_{total} &= 0 - -30 \\
 \angle_{total} &= 30^\circ
 \end{aligned}$$

À partir du résultat de la démonstration théorique remplissez le tableau 4

Tableau 4: Résultats théoriques connexion triangle-étoile (Dy11)

Relation entre le rapport de transformation $a'$ et le rapport de transformation $a$	$\sqrt{3}$
Déphasage entre $V_{AB}$ et $V_{ab}$	$30^\circ$
$V_{ab}$ en avance ou en retard sur $V_{AB}$	Avance

## II-B2. Essai à vide - Connexion triangle-étoile (Dy1)

En s'appuyant sur des observations faites au II-B1 et sur la théorie, proposez une connexion triangle-étoile de type Dy1 et complétez le schéma ci-dessous pour avoir la connexion Dy1. Les points de polarité sur les enroulements sont identifiés par les points noirs ●.

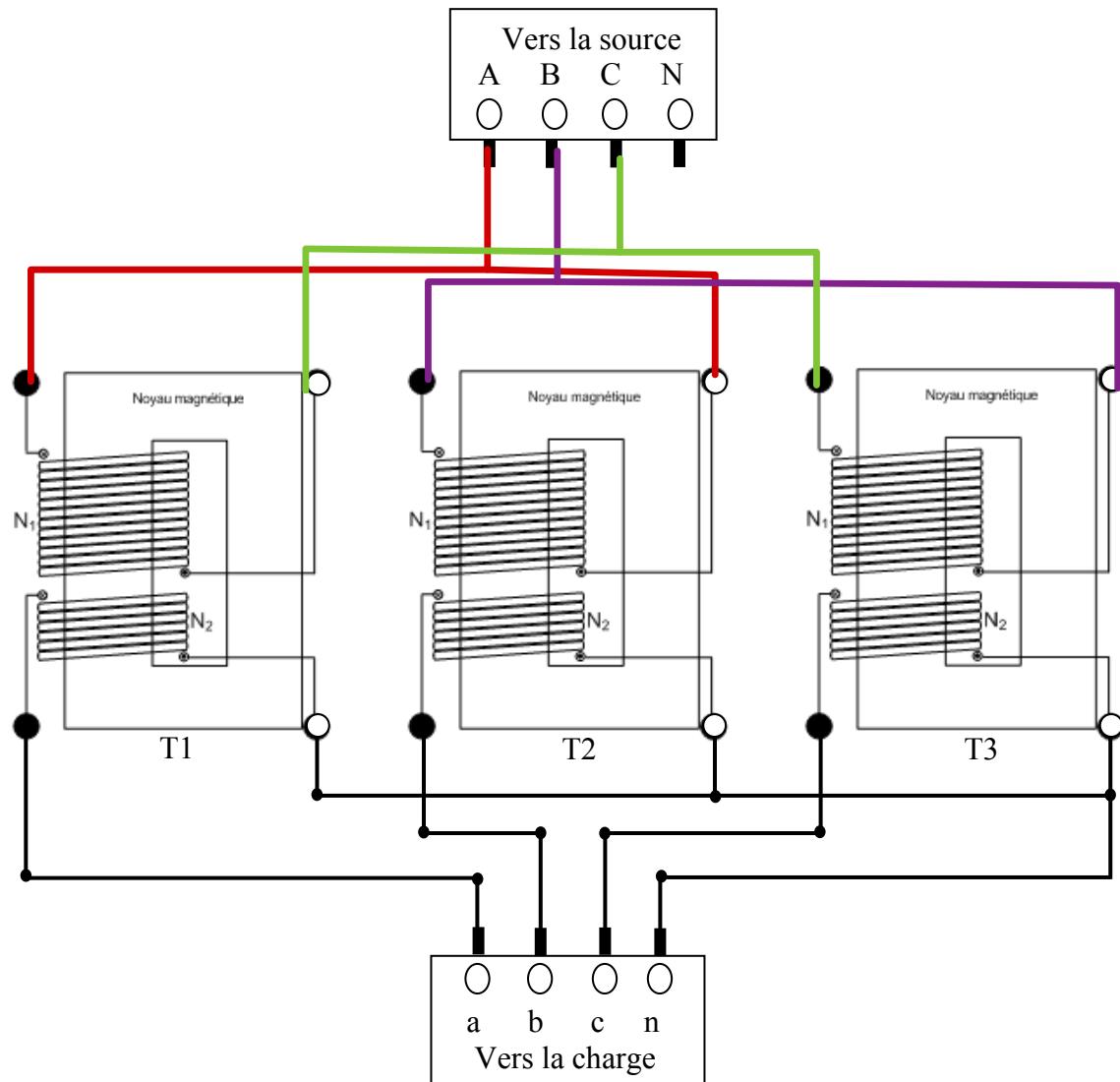


Figure A3. Connexion triangle-étoile (Dy1) : Schéma de la connexion

Tableau 5 : Résultats expérimentaux 3

Primaire	$V_{AB}$ (RMS)	190.5 V
Secondaire	$V_{ab}$ (RMS)	208.5 V
Transfo triphasé alimenté en séquence inverse ou directe ?	Inverse	

Rapport de transformation a	1.58
Rapport de transformation a'	0.914
Déphasage entre $V_{AB}$ et $V_{ab}$	38.88°
$V_{ab}$ en avance ou en retard sur $V_{AB}$	Retard

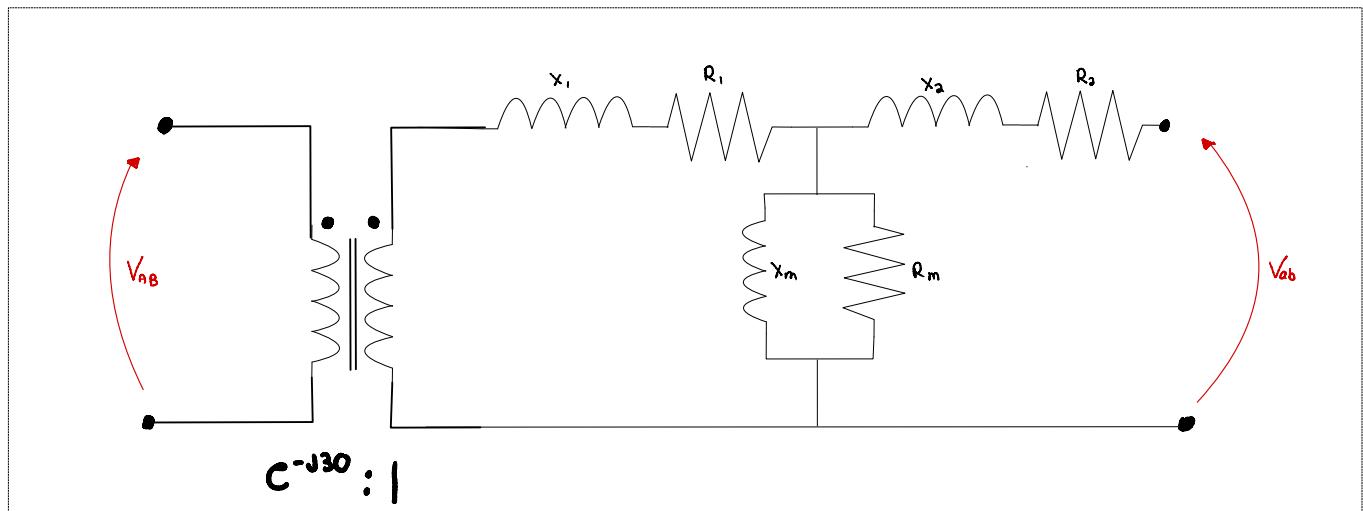


Figure A4. Connexion triangle-étoile (Dy1) : Modèle équivalent monophasé en pu

## 8- Formation à la pratique procédurale - 1

### Buts de l'activité

- Calcul du champ magnétique et du courant de magnétisation dans un circuit magnétique simple excité par une alimentation sinusoïdale
- Calcul de l'inductance d'une bobine avec noyau de fer.
- Forme d'onde du flux dans les circuits magnétiques.
- Calcul des pertes magnétiques dans les circuits magnétiques.
- Calcul des nombres de spires et du courant de magnétisation dans les transformateurs.

### Énoncés des problèmes à résoudre

#### Problème n° 1

Un noyau magnétique, dont la courbe de magnétisation  $B(H)$  est donnée ci-dessous sous forme de tableau, porte 3 bobines, conformément à la figure :

$$n_1 = 2000$$

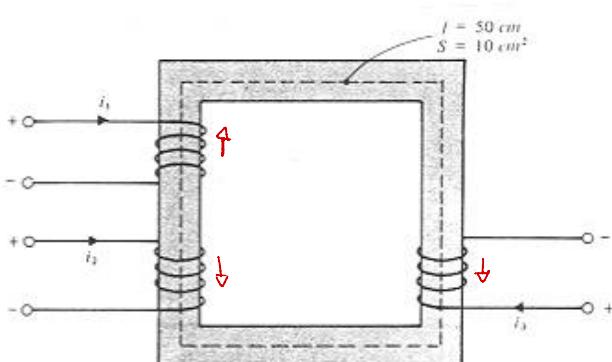
$$i_1 = 0.5A$$

$$n_2 = 400$$

$$i_2 = 1.0 A$$

$$n_3 = 1000$$

Quel courant  $i_3$  doit-on envoyer dans la 3<sup>e</sup> bobine pour avoir un flux de  $1.5 \times 10^{-3}$  Weber dans le noyau?



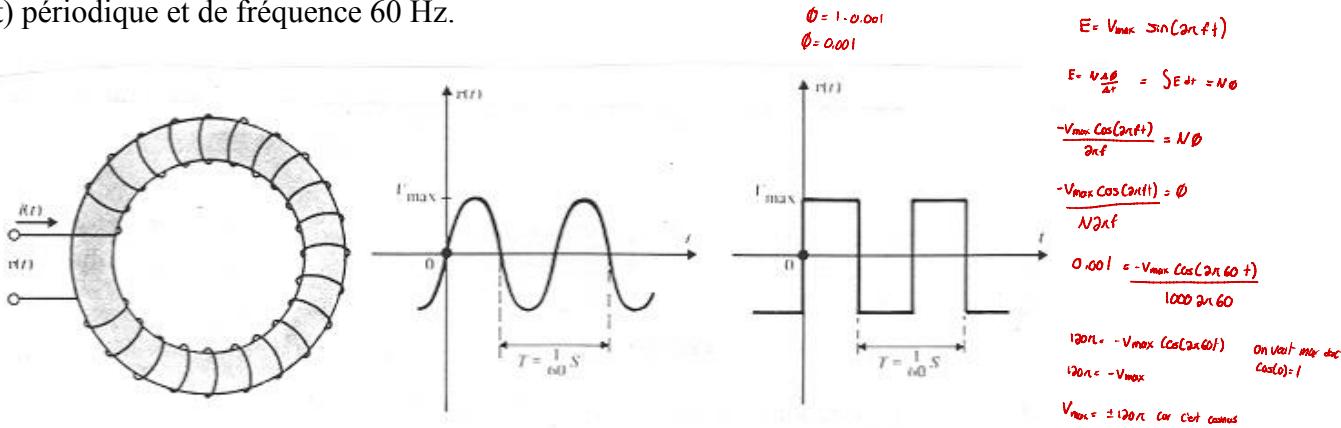
$$\begin{aligned} \Phi &= 1.5 \times 10^{-3} \\ 1.5 \cdot 10^{-3} &= B \cdot \frac{l}{100} \\ B &= 1.5 \\ H &= 3000 \\ 3000 &= \frac{NI}{l} + \frac{NI}{l} - \frac{NI}{l} \\ 1500 &= \frac{1000I}{l} + 2000 \cdot 0.5 - 400 \cdot 1 \\ I &= 0.9A \end{aligned}$$

B(T)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
H(At/m)	52	58	65	76	90	110	132	165	220	300	380	600	900	1200	2000	3000	4500	6000	10000	14000

## Problème n° 2

On considère un fil sans résistance bobiné avec 1000 spires sur un tore ferromagnétique de longueur moyenne 30 cm et de section  $10 \text{ cm}^2$ , auquel on applique une tension

$V(t)$  périodique et de fréquence 60 Hz.



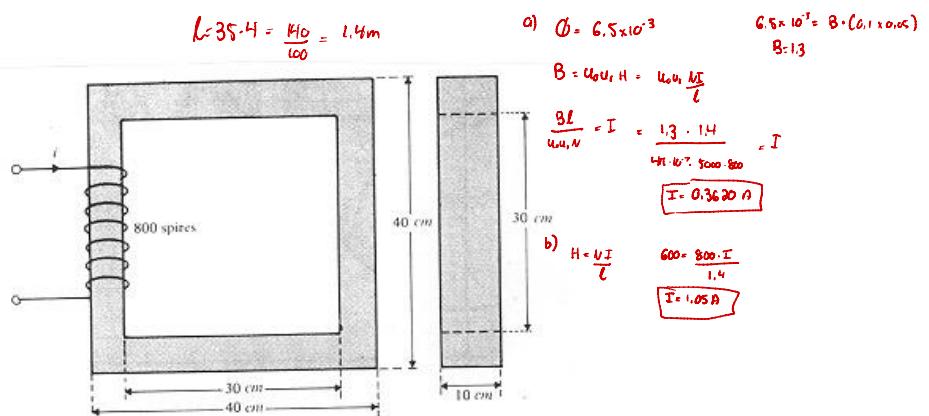
Dessiner les variations du flux dans le tore en fonction du temps et calculer la valeur de la tension maximale  $V_{\max}$  pour que l'induction maximale dans le tore soit de 1 T dans les 2 cas suivants :

- $v(t)$  est une onde sinusoïde d'amplitude  $V_{\max}$ .
- $v(t)$  est une onde rectangulaire symétrique d'amplitude  $V_{\max}$ .

## Problème n° 3

On considère le circuit ferromagnétique dessiné. Quel courant  $i$  doit-on envoyer dans la bobine pour que le flux produit dans le circuit soit de  $6,5 \times 10^{-3}$  Wb?

- Lorsque la **perméabilité relative** du matériau est supposée constante  $\mu_r = 5000$ .
- Lorsque la courbe de magnétisation du matériau est la suivante :



B(T)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
H(At/m)	52	58	65	76	90	110	132	165	220	300	380	600	900	1200	2000	3000	4500	6000	10000	14000

### Problème n° 4

Le noyau d'un transformateur est excité par une bobine alimentée par une tension sinusoïdale 110 V – 60 Hz.

Dans ces conditions, les pertes par hystérésis sont de 100 W, et les pertes par courants de FOUCAULT sont de 25 W. Quelles seraient ces pertes si on alimentait la bobine :

a) Sous une tension 110 V – 50 Hz?

b) Sous une tension 150 V – 60 Hz?

Note : Prendre l'exposant de Steinmetz  $n=2$

$$P_F = V^2 \quad P_H = \frac{V^2}{f}$$

a)  $P_F = P_{Helle}$

$$P_H = 100 \cdot \frac{110^2}{60} = 100 \cdot \frac{12100}{60} = 12100 \text{ W}$$

b)  $P_F = 25 \cdot \frac{110^2}{100} = 46,48 \text{ W}$

$$P_H = 100 \cdot \frac{150^2}{100} = 180,95 \text{ W}$$

### Problème n° 5

Le circuit magnétique avec entrefer dessiné ci-dessous est constitué d'un matériau dont la courbe de magnétisation  $\mu_r(B)$  est représentée par le tableau ici-bas, et l'isolant utilisé pour l'empilage des tôles occupe 10% de la surface de passage du flux. Ce circuit porte une bobine de 200 spires, de résistance négligeable, excitée par une source alternative 120V-60 Hz. Le coefficient de pertes hystériétiques vaut  $\eta_H = 30$ , et les pertes par courants de Foucault valent 20% des pertes par hystérésis.

On donne :  $P_H = K_H m f B^n$  (voir notes mathématiques pour les définitions et prendre  $n=2$ )

et  $\eta_H = K_H \times \text{masse volumique}$

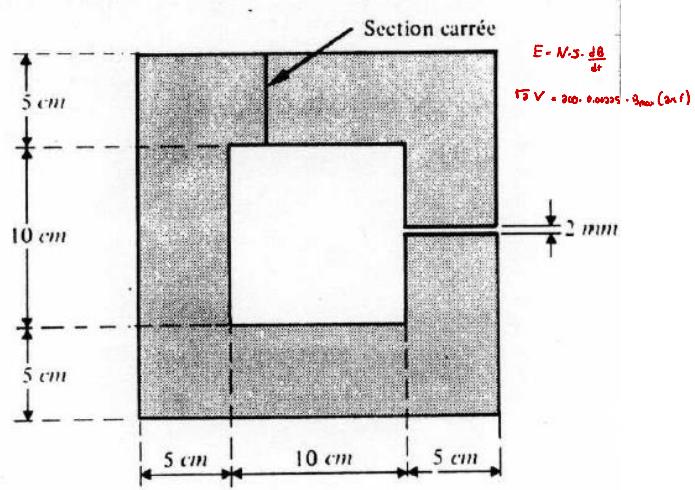
$$S = 5 \cdot 5 = 0,025 \text{ m}^2 \cdot 0,9 = 0,0225$$

a) Quel est le courant qui passe dans la bobine?

$$P_H = \frac{\eta_H m f B^n}{m} = \eta_H V f B^2$$

b) Quel est le facteur de puissance?

$$V = 0,005 + 0,004945 + 0,0005 = 0,010495$$

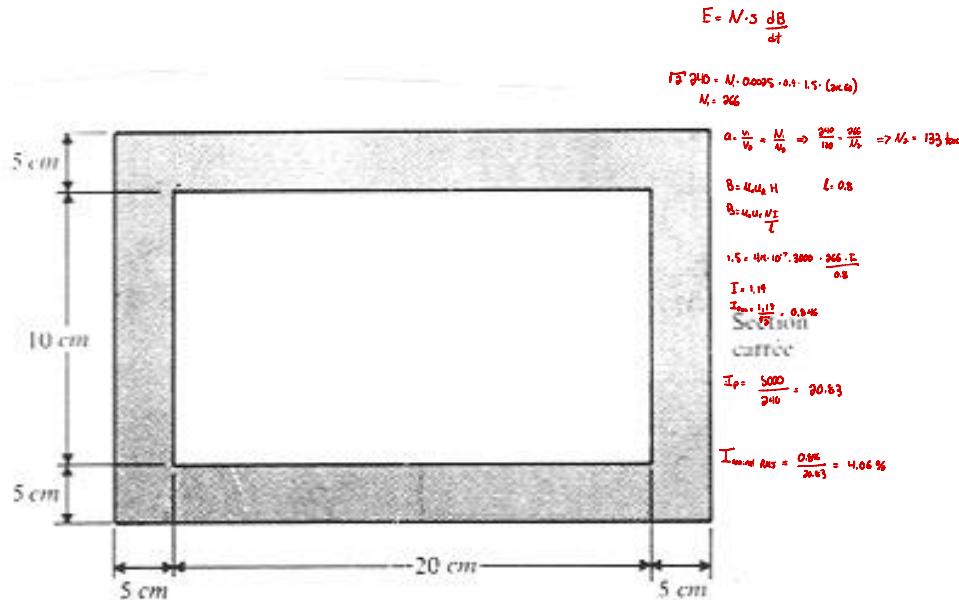


B(T)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2
$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$	1700	2000	2300	2500	2550	2400	2300	2100	2000	1500	1000

## Problème n° 6

Le circuit magnétique d'un transformateur « monophasé à 2 noyaux » 5 kVA – 240/120V – 60 Hz a les dimensions dessinées ci-contre : l'isolation entre les tôles occupe 10% du volume total, et le matériau a une perméabilité relative supposée constante  $\mu_r = 3000$ . L'induction maximale dans les tôles est de 1,5 T.

- Quel est approximativement le nombre de spires du primaire et du secondaire? (en négligeant leurs résistances et leurs inductances de fuite).
- Quel est le courant de magnétisation  $I_m$ , en valeur efficace? En % du courant nominal?



## Problème n°7

Un transformateur 2kVA – 200/100V – 60 Hz a des bobines dont les impédances valent respectivement  $0,3 + j 0,8 \Omega$  et  $0,1 + j 0,25 \Omega$ . Le courant de magnétisation est négligeable.

- Quels sont les courants dans les bobines lorsqu'on court-circuite l'enroulement 100V et qu'on applique la tension nominale de 200V à l'autre enroulement?
- Exprimer ces courants en pourcentage du courant nominal.

Diagram of a transformer with two windings. The primary winding has 0.3 ohms resistance and 0.8 ohms reactance. The secondary winding has 0.1 ohms resistance and 0.25 ohms reactance. The primary is connected to 200V and the secondary is short-circuited.

Handwritten notes:

- $I_p \rightarrow 0.3 \quad 0.8j \quad 0.4 \quad 1.0j$
- $R_p = 0.7$
- $X_p = 1.8j$
- $E = 200$
- $I_p = \frac{200}{0.7 + j1.8} = 103.5 A$
- $I_n = \frac{200}{200} = 10 A$
- $\% = \frac{103.5}{10} = 1035\% \text{ plus}$
- $I_p = \frac{I_n}{\alpha}$
- $I_p \approx I_s$
- $I_s = 207.11 A$

## 9- Formation à la pratique procédurale - 2

### Buts de l'activité

- Essais sur transformateur monophasé dans le but d'en déduire son circuit équivalent
- Calcul des courants de court-circuit dans les transformateurs.
- Calcul de la tension secondaire dans un transformateur monophasé en charge en utilisant la technique des phaseurs.
- Calcul du facteur de puissance à l'entrée du transformateur.
- Calcul de régulation dans les transformateurs.
- Calcul de tension et courant dans les circuits triphasé utilisant des transformateurs.
- Calcul de déphasage de tension dans un circuit triphasé.
- Calcul de déphasage de tensions dans un transformateur triphasé.
- Calcul de courant et tension dans les transformateurs triphasés à partir de leur schéma équivalent monophasé.

### Énoncés des problèmes à résoudre

#### Problème n° 1

Un transformateur 10 kVA – 500/100 V – 60 Hz a une résistance et une réactance internes, ramenées au primaire 500 V, de respectivement  $R_p = 0,3 \Omega$  et  $X_p = 5,2 \Omega$ . On branche au secondaire du transformateur une charge d'impédance.

$$Z_{\text{charge}} = R_{\text{charge}} + jX_{\text{charge}}$$

Lorsque le secondaire alimente cette charge  $Z_{\text{charge}}$ , des instruments disposés au primaire indiquent :

$$I_1 = 20 \text{ A}$$

$$V_1 = 500 \text{ V}$$

$$P_1 = 8 \text{ kW}$$

Note: On considère négligeable la branche de magnétisation dans ce problème.

- À partir des puissances active et réactive obtenues au primaire du transformateur, déterminer les valeurs de  $R_{\text{charge}}$  et  $X_{\text{charge}}$  ;
- Déterminer le facteur de puissance de la charge.

$$\rho = I^2 R$$

$$\frac{500}{20} \cdot R$$

## Problème n° 2

Soit le même transformateur qu'au problème précédent, alimentant à son secondaire la même charge d'impédance  $Z_{charge}$ .

Note: On considère négligeable la branche de magnétisation dans ce problème.

a) Déterminer la tension au secondaire :

- Algébriquement, en utilisant les formes complexes des courants, tensions, charge ainsi que des éléments du circuit équivalent du Transformateur. La charge étant exprimée comme variable complexe  $Z = R + jX$ .
- En utilisant la méthode de diagramme phaseurs (diagrammes vecteurs des tensions), où les courants, tensions mis en jeu dans le circuit sont représentés graphiquement dans le plan complexe.

b) Déterminer la régulation de tension au secondaire.

## Problème n° 3

On réalise les essais suivants sur un transformateur 50 kVA – 120/2400 V – 60 Hz :

H.T. en circuit ouvert, instruments du côté B.T.

$V = 120 \text{ V}$     $I = 15 \text{ A}$     $P = 360 \text{ W}$

Déterminer les valeurs des éléments  $X_m$  et  $R_m$  du circuit équivalent du transformateur ramenés au côté B.T. du transformateur.

- a) Exprimer votre réponse en ohms;
- b) Exprimer votre réponse en p.u. (per unit).

## Problème n° 4

Considérant le même transformateur 50 kVA – 120/2400 V – 60 Hz qu'au problème précédent, d'autres mesures sont prises :

B.T. en court-circuit, instruments du côté H.T.

$V = 80 \text{ V}$     $I = 20 \text{ A}$     $P = 800 \text{ W}$

Déterminer les valeurs  $R_1$ ,  $R_2$  et  $X_1$ ,  $X_2$  du circuit équivalent du transformateur.

- a) Exprimer votre réponse en ohms;
- b) Exprimer votre réponse en p.u. (per unit).

**Observation :** On pourra supposer que  $R_1 = a^2$     $R_2 = \frac{R_{B.T.}}{2}$    et  $X_1 = a^2$     $X_2 = \frac{X_{B.T.}}{2}$

### **Problème n° 5**

Considérant le même transformateur 50 kVA – 120/2400 V – 60 Hz qu'au problème précédent, en utilisant les valeurs calculées lors des problèmes 5 et 6, dessiner le circuit équivalent complet ramené au côté B.T. Sur ce schéma équivalent, indiquer les valeurs

- a) en Ohms;
- b) en p.u. (per-unit)

### **Problème n° 6**

L'essai à vide et l'essai en court-circuit ont été réalisés sur un transformateur 25 kVA; 2400—240 V.

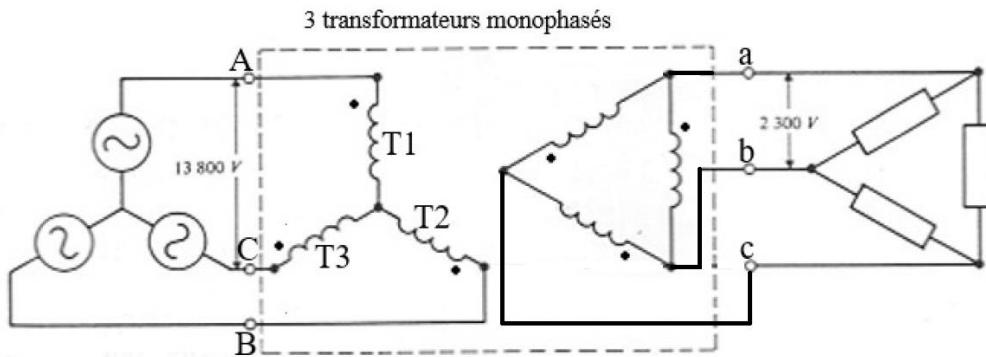
De ces essais, on a tiré le circuit équivalent vu du côté HT ( primaire ) contenant les valeurs suivantes :

- $R_1 = 1,67$  ohms,
- $R_2' = 1,67$  ohms,
- $X_1 = 2,06$  ohms,
- $X_2' = 2,06$  ohms,
- $R_m = 50,5$  kohms,
- $X_m = 15,7$  kohms.

- a) Calculer le rendement du transformateur lorsque son primaire tire la puissance apparente nominale. Le facteur de puissance de la charge est de  $FP = 0,8$  inductif.  
Le rendement se définit comme le rapport entre la puissance réelle de sortie et la puissance réelle d'entrée.
- b) Calculer le facteur de puissance vu de la source.
- c) Calculer la valeur du condensateur à placer au primaire du transformateur pour que le courant débité par la source et la tension de source soit en phase. Quel est dans ce cas le facteur de puissance vu de la source.

### **Problème n°7**

Trois transformateurs monophasés supposés parfaits sont montés en triphasé étoile-triangle. Les 3 bornes hautes tension sont reliées à une alimentation triphasée équilibrée de 13800 V entre lignes en séquence directe. Les 3 bornes basse tension sont reliées à une charge triphasée équilibrée également en séquence directe, sous 2300 V, entre lignes, qui consomme une puissance apparente totale de 1500 kVA.



- Quelles sont les tensions et courants primaires et secondaires aux bornes de chaque transformateur monophasé?
- Quelle est le déphasage entre les tensions ligne-ligne  $V_{AB}$  du primaire et  $V_{ab}$  du secondaire?
- Quelles sont les avantages et les inconvénients de ce mode de couplage?

Quel est, en fonction du rapport de transformation  $a$  des transformateurs monophasés, l'expression du rapport de transformation  $m$  du transformateur triphasé ainsi formé en connexion étoile-triangle? Que devient cette expression si la connexion est de type étoile-étoile.

### Problème n° 8

Trois transformateurs monophasés de tensions nominales 230kV/23kV et de puissance apparente nominale 100 MVA chacun, sont connectés en étoile-triangle pour former un transformateur triphasé. La réactance de fuite équivalente vue du secondaire de chacun des transformateurs monophasés est de **0,53 Ω**. La connexion étoile-triangle réalisée est du type Yd1, ce qui veut dire que lorsqu'on applique une tension **de séquence directe** au primaire, la tension côté haute tension  $V_{AB}$  est en avance de  $30^\circ$  par rapport à la tension côté basse tension  $V_{ab}$ . Le transformateur triphasé ainsi réalisé alimente une charge triphasée de 210 MVA de facteur de puissance 0,97 en retard sous une tension de 23 kV ligne-ligne.

- En négligeant le courant d'excitation et la résistance des enroulements des transformateurs, faire le schéma équivalent monophasé du transformateur triphasé en pu. Calculer en volt et sous sa forme polaire, la tension ligne-ligne de la source qui alimente le transformateur triphasé étoile-triangle. On prendra la tension ligne-neutre aux bornes de la charge comme référence.

### Problème n° 9

On dispose d'un transformateur monophasé abaisseur de tension (primaire 2400 V, secondaire 240 V) dont la puissance apparente nominale est 5 kVA. Si on court-circuite le primaire une tension de 24 V aux bornes du secondaire suffit pour faire circuler le courant nominal dans le primaire.

- Quelle est l'impédance interne (impédance série) en  $\Omega$  ramenée au primaire?
- Donner le pourcentage d'impédance

## 10 - Évaluation

Comme indiqué au début de ce guide, l'activité GEL342 comprend 2 éléments de compétences qui sont désignés par 1 et 2. Il y a 1 livrable, qui regroupe le rapport de la problématique, le rapport de laboratoire et la validation.

Les qualités et critères du BCAPG concernant cet APP :

- Qualité 1 (Q1) connaissances en génie.
  - Qualité 01 (Q1\_2) connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les circuits électriques à courant alternatif et les transformateurs de puissance;
  - Qualité 01 (Q1\_5) connaissance dans le champ de l'utilisation d'outils d'ingénierie en lien avec les circuits électriques à courant alternatif et les transformateurs de puissance;
- Qualité 2 (Q2) analyse de problèmes.
  - Qualité 02 (Q2\_1) Analyser un problème impliquant des éléments de circuits électriques à courant alternatif et des transformateurs de puissance;
  - Qualité 02 (Q2\_3) Énoncer les objectifs à atteindre pour résoudre le problème en lien avec les transformateurs de puissance;
  - Qualité 02 (Q2\_4) Proposer des solutions et les évaluer à partir des essais en laboratoire;
  - Qualité 02 (Q2\_5) mettre en œuvre la solution retenue pour atteindre les objectifs fixés dans la problématique;
  - Qualité 02 (Q2\_6) analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier le choix des solutions retenues;
- Qualité 5 (Q5) utilisation d'outils d'ingénierie.
  - Qualité 05 (Q5\_1) sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés pour réaliser une tâche dans l'étude des circuits à courant alternatif et des transformateurs de puissances ;
  - Qualité 05 (Q5\_2) utiliser les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis pour l'étude des transformateurs de puissances ;
  - Qualité 05 (Q5\_3) connaître les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés pour l'étude des transformateurs triphasés;

Les évaluations sommatives et finales porteront sur tous les objectifs d'apprentissage de l'unité.

**L'évaluation sommative se fera à livres fermés, avec comme seule documentation possible, une feuille de notes écrites à la main de 2 pages maximum (les photocopies sont interdites). La feuille de notes ne doit contenir aucun schéma électrique.**

La note attribuée aux activités pédagogiques de l'unité est une note individuelle. L'évaluation portera sur les compétences figurant dans la description des activités pédagogiques. Ces compétences, ainsi que la pondération de chacune d'entre elles dans l'évaluation de cette unité, sont :

<i>Activités et éléments de compétence</i>		<i>Qualités</i>	<i>Rapport Problématique</i>	<i>Contenu Laboratoire et validation</i>	<i>Examen sommatif</i>	<i>Examen final</i>	<i>Total par qualité</i>	<i>Total par compétence</i>	
<b>GEL-342 Éléments de circuit en courant alternatif et transformateurs de puissance</b>									
1	Appliquer la technique des « phaseurs » pour la résolution des circuits à courant alternatif.	Q01	10		41	34	<b>85</b>	<b>210</b>	
		Q02	19	10	48	38	<b>115</b>		
		Q05	5	5			<b>10</b>		
2	Effectuer les calculs requis dans la conception et l'application des transformateurs de puissance.	Q01	11		78	70	<b>159</b>	<b>390</b>	
		Q02	30	20	80	71	<b>201</b>		
		Q05	20	10			<b>30</b>		
<b>Total : GEL342</b>			<b>95</b>	<b>45</b>	<b>247</b>	<b>213</b>		<b>600</b>	
<b>GEL-362 Thermique</b>									
1	Appliquer les notions d'échange de chaleur au refroidissement des transformateurs de puissances	Q01		20	20	5	<b>45</b>	<b>90</b>	
		Q02		15	20	10	<b>45</b>		
<b>Total : GEL362</b>				<b>35</b>	<b>40</b>	<b>15</b>		<b>90</b>	

### 10.1- Rapport de la problématique

Q1 : Critère 5. Connaissance dans le champ de l'utilisation d'outils d'ingénierie en lien avec les circuits électriques à courant alternatif et les transformateurs de puissance.	
...utilise des connaissances dans le champ permettant une bonne utilisation des outils d'ingénierie.	100%
...utilise correctement ses connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie à des problèmes complexes, mais qui sont analogues à des problèmes déjà vu.	85%
... utilise correctement ses connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie à des problèmes simples, mais qui sont nouveaux pour lui.	60%
... n'utilise que les connaissances dans le champ pour adapter les outils d'ingénierie pour résoudre des problèmes simples.	25%
Q2 : Critère 6. Analyser et interpréter les résultats obtenus pour justifier le choix des solutions retenues.	
... analyse et interprète les résultats obtenus au regard des hypothèses et objectifs préalablement définis et d'autres références théoriques pertinentes.	100%
... analyse et interprète les résultats obtenus au regard des hypothèses et objectifs préalablement définis.	85%
... analyse et interprète partiellement les résultats obtenus.	60%
... n'est pas en mesure d'analyser et d'interpréter les résultats obtenus, mais est capable d'expliquer pourquoi.	25%

<b>Q5 : Critère 3. Connaître les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés pour l'étude des transformateurs triphasés.</b>	
... connaît les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés. Adapte ces techniques, ressources et outils, les combine à d'autres ou en crée pour pallier leurs limites.	100%
... connaît les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés. Adapte ces techniques, ressources et outils ou les combine à d'autres pour pallier leurs limites.	85%
... connaît partiellement les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés.	60%
... ne connaît pas les limites des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais sait qu'il en existe.	25%

## 10.2- Laboratoire

<b>Q2 : Critère 5. Mettre en œuvre la solution retenue pour atteindre les objectifs fixés dans la problématique.</b>	
... met en œuvre la solution retenue en se référant aux connaissances et aux principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire et en tenant compte de plusieurs autres principes pertinents	100%
... met en œuvre la solution retenue en se référant à la plupart des connaissances et des principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire et en tenant compte de quelques autres principes pertinents.	85%
... met en œuvre la solution retenue en se référant à quelques principes d'ingénierie nécessaires pour ce faire.	60%
... n'est pas en mesure de mettre en œuvre la solution retenue, mais est capable d'expliquer pourquoi.	25%

<b>Q5 : Critère 1. Sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés pour réaliser une tâche dans l'étude des circuits à courant alternatif et des transformateurs de puissances.</b>	
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés en pouvant justifier ses choix (en connaît la portée et les limites), de même qu'en pouvant inférer la nature du travail à accomplir ou les données à colliger.	100%
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés en pouvant justifier ses choix (en connaît la portée et les limites).	85%
... sélectionne les techniques, ressources et outils appropriés, sans toutefois pouvoir justifier ses choix.	60%
... n'est pas en mesure de sélectionner les techniques, ressources et outils appropriés, mais en connaît pouvant être utilisés.	20%

## 10.3- Validation

<b>Q5 : Critère 2. Utiliser les techniques, ressources et outils sélectionnés selon les protocoles établis pour l'étude des transformateurs de puissances.</b>	
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés et les respecte lors de leur utilisation. Démontre la capacité à optimiser cette utilisation dans le contexte de la tâche à accomplir.	100%
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés et les respecte lors de leur utilisation.	85%
... connaît les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais ne les respecte que partiellement lors de leur utilisation.	60%
... ne connaît pas les protocoles établis des techniques, ressources et outils sélectionnés, mais sait qu'il en existe.	20%

## 10.4- Examens

<b>Q1 : Critère 2. Connaissances dans le champ de l'analyse de problèmes en lien avec les circuits électriques à courant alternatif et les transformateurs de puissance.</b>	
... combine les connaissances de tous les sous-champs afin d'offrir une meilleure solution à la situation proposée.	100%
... utilise des connaissances de tous les sous-champs nécessaires à la résolution de la situation.	85%

... réfère à des connaissances de plusieurs sous-champs dans le champ, et ce, quelle que soit la situation.	60%
... n'utilise que les connaissances d'un sous-champ dans le champ précis, et ce, quelle que soit la situation.	25%
<b>Q2 : Critère 3. Énoncer les objectifs à atteindre pour résoudre le problème en lien avec les transformateurs de puissance.</b>	
... énonce des objectifs mesurables et réalisables en lien avec les hypothèses préalablement émises.	100%
... énonce des objectifs mesurables et réalisables.	85%
... énonce des objectifs partiellement mesurables et/ou réalisables	60%
... énonce des objectifs ni mesurables et/ou ni réalisables	10%

La présence aux laboratoires C1-2055 est obligatoire. Les présences seront prises rigoureusement. Une sanction de **25** points par absence sera appliquée sur la note individuelle du rapport d'APP.

## 11- Utilisation des téléphones cellulaires, iPod et ordinateurs

L'utilisation des téléphones cellulaires en mode vocal ou pour l'envoi de messages textes est interdite pendant les procéduraux, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de résolution de problématique.

L'utilisation des Ipod, Iphone et téléphones intelligents est interdite pendant les procéduraux, les tutorats, les séminaires, les examens, les séances de résolution de problématique. Le port de casques d'écoutes ou d'écouteurs est interdit pendant ces activités.

L'utilisation des ordinateurs est autorisée uniquement pour la lecture de la problématique.

L'utilisation des ordinateurs est autorisée uniquement pour la consultation du guide de l'étudiant lors des procéduraux.

L'utilisation des ordinateurs est interdite lors des examens et des séminaires, sans exception.

Le non-respect de ces consignes pourra entraîner des sanctions pouvant aller jusqu'à l'expulsion de l'activité d'apprentissage ou de l'activité d'évaluation.