

---

## ***TP4 : TRANSFORMATEUR MONOPHASE EN RÉGIME SINUSOÏDAL***

---

### **INTRODUCTION**

Les transformateurs sont des « machines » électriques statiques permettant de transférer de l'énergie électrique en adaptant les niveaux de tension sans en modifier la fréquence. De plus, de part leur structure, ils permettent une isolation galvanique entre l'entrée (primaire) et la sortie (secondaire). Ils jouent un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique. En effet, les tensions de fonctionnement des alternateurs de centrales (thermiques, hydrauliques ou nucléaires) n'excèdent pas une vingtaine de kilovolts (pour une puissance d'environ 1000 MW pour une centrale nucléaire). Or le transport de grandes puissances sur des distances notables ne peut être réalisé de façon économique que s'il est effectué à très haute tension, soit plusieurs centaines de kilovolts.

En effet, pour une puissance donnée les pertes joules dans les lignes de distribution,  $p_{\text{joules}} = r \times I^2 = r \times \frac{P^2}{V^2}$ , sont inversement proportionnelles au carré de la tension. Il est donc nécessaire d'installer, à proximité immédiate des groupes générateurs, des transformateurs «élevateurs» de tension. On trouvera des appareils «abaisseurs» aux points de fourniture de l'énergie électrique, les tensions normales d'utilisation étant comprises entre quelques centaines et quelques milliers de volts.

Il existe d'autres types de transformateurs employés principalement pour l'isolation électrique, dans les alimentations à découpage, les transformateurs d'intensité... Leur principe de fonctionnement est tout à fait identique à celui des transformateurs de puissance, mais leurs caractéristiques peuvent avoir des ordres de grandeur tout à fait différents.



Exemples de petits transformateurs monophasés (50VA à 500VA)

## OBJECTIFS

Le but principal de cette manipulation est de valider expérimentalement un modèle pour un transformateur de tension en régime sinusoïdal établi, en vue de prévoir son comportement électrique externe autour du point de fonctionnement nominal.

Le modèle étudié est précis pour décrire les transformateurs employés sur les réseaux alternatifs de distribution de l'énergie électrique travaillant à basses fréquences. Dans ce cas, leur fonctionnement reste proche de celui d'un transformateur idéal. Néanmoins, ce modèle peut aussi être utilisé, en première approximation, pour des transformateurs de petites puissances utilisés dans les alimentations de dispositifs électroniques, qu'il s'agisse d'alimentations linéaires pour lesquelles le transformateur est directement couplé au réseau, ou d'alimentations à découpage pour lesquelles le transformateur travaille en régime périodique non sinusoïdal à plus hautes fréquences.

**À l'issue de la manipulation (et après consultation du cours !), l'étudiant doit :**

- connaître la signification des différents paramètres du modèle d'un transformateur (schéma électrique équivalent) et les ordres de grandeurs comparés,
- identifier ces paramètres au moyen de mesures à puissance réduite (essais à vide et en court circuit en régime harmonique),
- utiliser ce modèle pour prévoir le comportement en charge et comparer aux mesures,
- établir un bilan de puissance.

## PRECAUTIONS ET RECOMMANDATIONS

Il est impératif :

- **de faire vérifier le montage à chaque modification de câblage,**
- de prendre soin de ne pas dépasser les valeurs nominales de courant et de tension, aussi bien au primaire qu'au secondaire.

## MATERIELS MIS A DISPOSITION

La liste du matériel nécessaire pour effectuer cette manipulation est la suivante :

- Une source de tension monophasée,  $V = 230 \text{ V}$  [S1].
- Un transformateur monophasé démontable, à point milieu au secondaire : 220/110V 440VA 50 Hz  $I_{\text{moy}} = 56 \text{ cm}$   $S = 4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$   $\mu_r = 2020$  [T1]
- Un autotransformateur,  $V_{\text{prim}} = 230 \text{ V}$   $V_{\text{sec}} \in [0 ; 230 \text{ V}]$   $I_{\text{max}} = 5 \text{ A}$  [S4].
- Un rhéostat (résistance variable) :  $R_{\text{max}} = 50 \Omega$   $I_{\text{max}} = 5 \text{ A}$   $U = 230 \text{ V}$  [R2].
- Le wattmètre numérique (NANOVIP) pour la mesure de V, I, P, Q, S et FP [M1].
- Un boîtier comportant deux commutateurs, qui permet d'utiliser les mêmes appareils de mesure au primaire et au secondaire du transformateur [B2].

# RAPPELS

On se reportera au cours et aux Travaux Dirigés. Seuls les compléments nécessaires sont rappelés ici.

## 1. NOTION DE TRANSFORMATEUR IDEAL

Un transformateur, constitué de deux enroulements électriquement séparés mais couplés magnétiquement sur un noyau, est un quadripôle. Il permet de transmettre de la puissance électrique d'une source reliée à son entrée (appelée primaire) à une charge reliée à sa sortie (appelée secondaire). C'est un dispositif passif et statique. Le paramètre essentiel qui le caractérise est le rapport de transformation  $m$  (positif), égal au rapport du nombre de spires du bobinage secondaire ( $n_2$ ) au nombre de spires du bobinage primaire ( $n_1$ ) :  $m = \frac{n_2}{n_1}$ .

La fonction principale souhaitée dans tout transformateur réel peut être appréhendée à travers la notion de transformateur idéal (ou parfait) représenté sur la Figure 1. Ce quadripôle constitue un symbole élémentaire de circuit, au même titre que la bobine ou le condensateur idéal. Les conventions choisies aux bornes de ce quadripôle sont naturelles vis-à-vis du transfert de puissance : récepteur au primaire et générateur au secondaire.

Le transformateur idéal est alors caractérisé par les relations suivantes, valables en régime de fonctionnement quelconque :

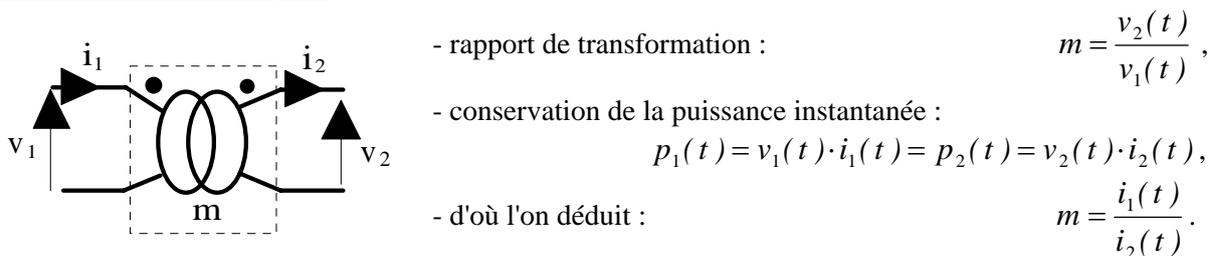


Figure 1 : Transformateur idéal

Le transformateur permet ainsi, outre de procurer un isolement galvanique, d'adapter les niveaux de tension et de courant entre la source et la charge lors du transfert de puissance (pour  $m \neq 1$  !).

### Remarque : Convention des points.

Le symbole représentant le transformateur idéal comporte 2 points qui s'utilisent de la manière suivante : "Si une tension positive dirigée vers le point est appliquée au primaire, une tension positive dirigée vers le point apparaît au secondaire". Cette convention permet de prendre en compte le pas d'enroulement des bobinages l'un par rapport à l'autre autour du circuit magnétique du transformateur réel.

La convention des points a été utilisée précédemment pour écrire les équations caractéristiques du transformateur idéal. Si par exemple le sens conventionnel de  $v_2$  est changé (le secondaire est alors en convention récepteur, moins naturelle), on doit écrire :

$$\frac{v_2(t)}{v_1(t)} = -m, \quad p_1(t) = v_1(t) \cdot i_1(t) = -p_2(t) = -v_2(t) \cdot i_2(t), \quad \text{d'où } \frac{i_1(t)}{i_2(t)} = m.$$

Dans la suite, le transformateur réel sera étudié en régime sinusoïdal établi à 50 Hz. Lorsque qu'il sera demandé de mesurer des courants ou des tensions, il s'agira donc de leurs valeurs efficaces.

## 2. LE TRANSFORMATEUR REEL

### 2.1 Modèle à vide

Le transformateur idéal n'a pas de courant primaire à vide, ce qui conduit donc à compléter son schéma pour faire apparaître ce courant mesurable sur le transformateur réel. Le transformateur à vide se comporte vu du primaire comme une self à noyau de fer : le schéma équivalent classique correspond à celui de la Figure 2:  $r_1$  représente la résistance du bobinage primaire,  $l_1$  l'inductance de fuite hors du noyau et le défaut de couplage avec le secondaire,  $L_\mu$  l'inductance magnétisante (liée au flux magnétique dans le noyau) et  $R_f$  permet de représenter les pertes dans le noyau (pertes fer). Ce schéma peut cependant être simplifié dans la mesure où, pour un bon transformateur :

- les chutes de tension dues aux résistances des bobinages sont faibles,
- le circuit magnétique est très perméable (peu de fuites hors du noyau),
- le couplage entre les deux bobinages est soigné, surtout pour réduire les fuites de flux du primaire par rapport au secondaire (pratiquement tout le flux magnétique généré au primaire passe dans le secondaire).

On peut alors négliger les chutes de tension aux bornes de  $r_1$  et  $l_1$  et le schéma équivalent devient celui de la Figure 3.  $L_0$  correspond à peu de chose près à l'inductance magnétisante  $L_\mu$ ,  $R_0$  est une résistance permettant de représenter les pertes à vide que l'on explicitera plus tard.

#### Remarque :

On admettra cette hypothèse pour les fuites au primaire (représentées par  $l_1$ ) mais on peut vérifier que les tensions  $r_1 \cdot I_{10}$  et  $l_1 \cdot I_{10}$  sont faibles devant  $V_{1n}$ .

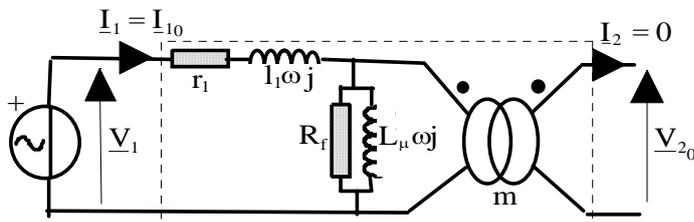


Figure 2 : Modèle complet à vide

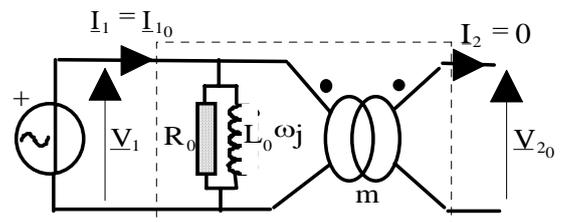


Figure 3 : Modèle simplifié à vide

### 2.2 Modèle en court-circuit (CC)

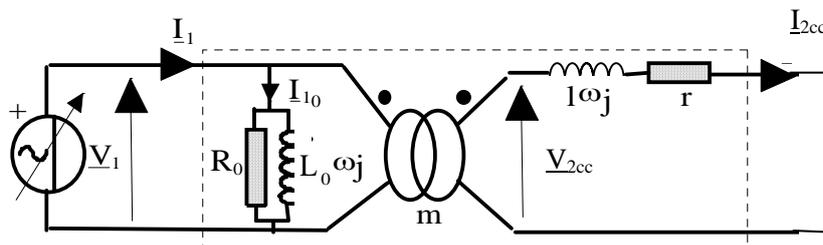


Figure 4 : Modèle complet du transfo en CC

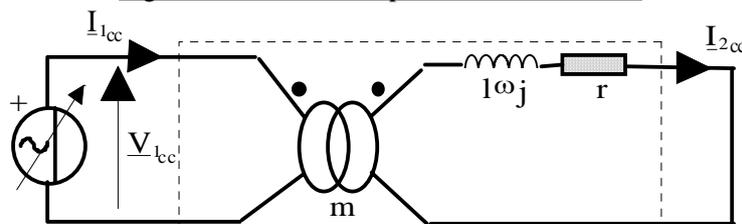


Figure 5 : Modèle simplifié retenu en CC

### 2.3 Le modèle du transformateur réel

Le schéma équivalent du transformateur étudié correspond à la Figure 6. Tous les paramètres du modèle ont été définis dans vos cours et travaux dirigés.

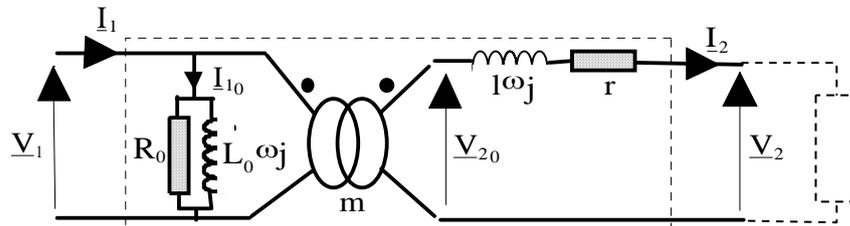


Figure 6 : Schéma équivalent du transformateur réel

# MANIPULATION

## 1. PRELIMINAIRES

Au moyen de la plaque signalétique du transformateur (voir "Matériel mis à disposition"), relevez ou déterminez les valeurs nominales pour la puissance apparente mise en jeu au secondaire  $S_{2n}$ , la tension secondaire à vide  $V_{20n}$  et le courant secondaire  $I_{2n}$ , la tension primaire nominale  $V_{1n}$  et le courant primaire nominal  $I_{1n}$ .

## 2. MONTAGE DE BASE

Le schéma de principe du transformateur en charge est donné par la Figure 7. La charge est constituée d'un rhéostat réglable.

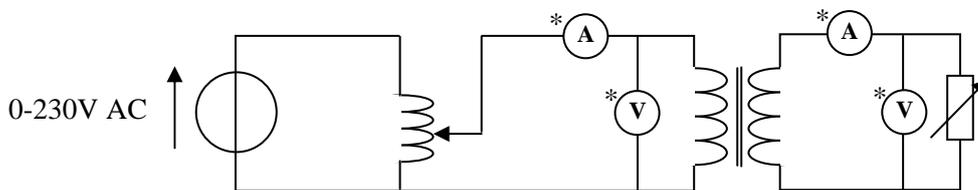


Figure 7 : Schéma de principe

Réalisez le montage de la Figure 8, qui sera conservé jusqu'à la fin de la manipulation. Seule la charge sera modifiée.

L'emploi d'une platine à inverseurs permet de commuter simplement les appareils de mesure du primaire au secondaire et réciproquement.

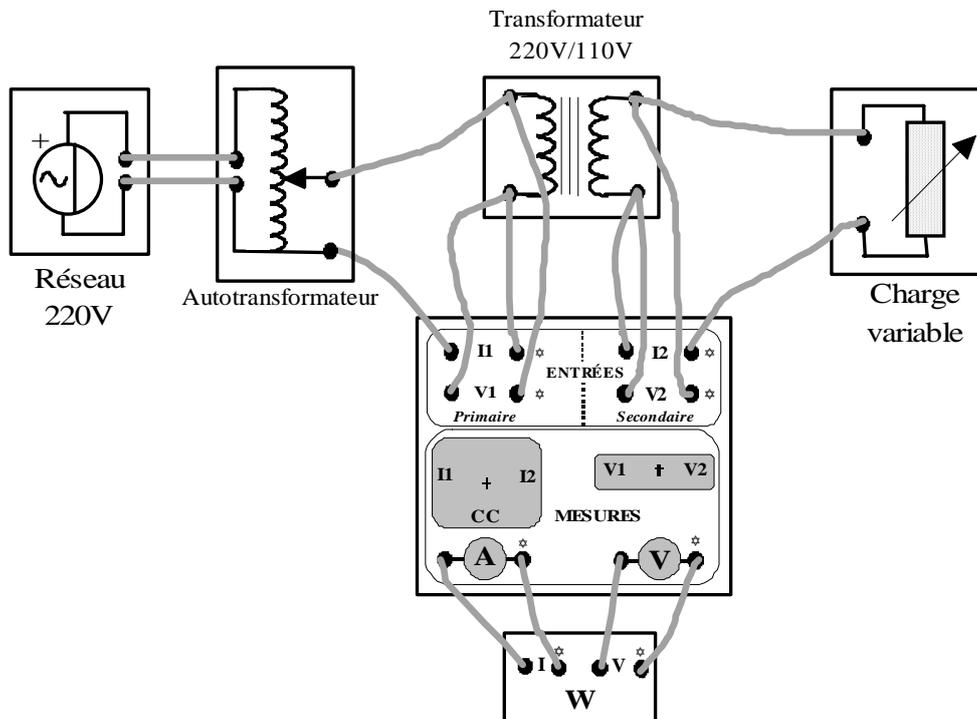


Figure 8 : Plan de Câblage

### 3. DÉTERMINATION DU SCHÉMA ÉQUIVALENT À PUISSANCES RÉDUITES

L'objet de cette partie de la manipulation est de montrer comment déterminer les paramètres du schéma équivalent sans devoir travailler à puissance nominale, à partir d'essais à puissance réduite. Le bon dimensionnement du transformateur peut ainsi être vérifié sans risque, avant sa mise en service. Cette démarche est absolument nécessaire sur les transformateurs de moyennes et fortes puissances. Le caractère prédictif du modèle est ainsi utilisé. Il est bien sûr intéressant que ces essais soient les plus simples possibles.

#### 3.1 Essais à vide

Lorsque le transformateur fonctionne à vide, le schéma équivalent proposé correspond à celui de la Figure 3.

Le transformateur étant alimenté au primaire sous tension nominale et le secondaire étant non chargé (à vide) :

- Mesurez la tension secondaire  $V_{20n}$ , le courant primaire  $I_{10}$  et les puissances active  $P_{10}$ , réactive  $Q_{10}$  et apparente  $S_{10}$ . mises en jeu au primaire ainsi que le facteur de puissance au primaire  $FP_{10}$ .
- Observez à l'aide de l'oscilloscope le courant primaire  $i_{10}(t)$ . Interprétez.
- Comparez  $I_{10}$  à  $I_{1n}$ . Conclure.
- À partir de ces mesures, déterminez le rapport de transformation  $m$ , la résistance  $R_0$  permettant de représenter les pertes à vide et l'inductance magnétisante  $L_0$ .
- Alimentez le primaire à tension  $V_1 = V_{10} = V_{1n}/4$  et mesurez  $I_{10}$ ,  $P_{10}$ ,  $Q_{10}$ ,  $S_{10}$ ,  $FP_{10}$  et  $V_{20n}$ .
- Observez à l'aide de l'oscilloscope le courant  $i_{10}(t)$ . Interprétez.
- Déterminez  $R_0$ ,  $L_0$  et  $m$  du schéma équivalent. Commentez ces nouveaux résultats.
- Quel type de pertes représente la résistance  $R_0$  ?

#### 3.2 Essai en court-circuit

Dans cet essai, le secondaire est en court circuit et la tension primaire est réglée de façon à obtenir le courant nominal au secondaire  $I_{2n}$ . Le schéma équivalent se réduit alors à celui de la Figure 5. On justifiera dans la suite pourquoi les influences de  $R_0$  et  $L_0$  sont négligées.

- **Réglez la tension primaire à 0 volt** et placez le secondaire en court circuit. En augmentant **progressivement** la tension primaire, réglez le courant secondaire au courant nominal  $I_{2n}$ .
- Relevez alors  $V_{1cc}$ ,  $I_{1cc}$  et  $P_{1cc}$ ,  $Q_{1cc}$ ,  $S_{1cc}$ ,  $FP_{1cc}$  et  $I_{2cc}$ .

Afin de vérifier que les influences de  $R_0$  et  $L_0$  sont effectivement négligeables dans cet essai, évaluez par le calcul les puissances active et réactive absorbées par ces éléments et les comparez à  $P_{1cc}$  et  $Q_{1cc}$ .

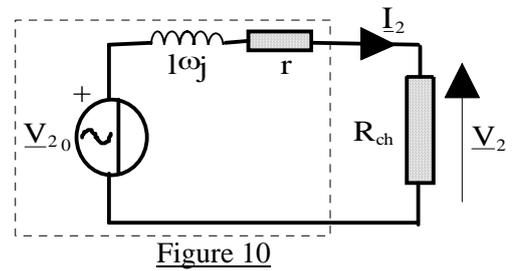
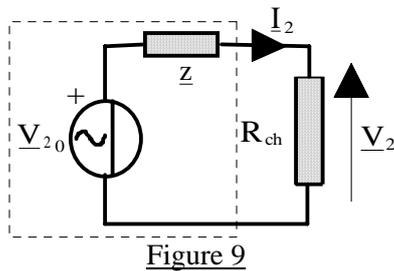
- Déterminez la résistance  $r$  et l'inductance de fuite  $l$  à partir de l'essai en court circuit.
- Proposez une méthode expérimentale permettant de déterminer la résistance des bobinages.

### 4. DETERMINATION DE POINTS DE FONCTIONNEMENT SUR CHARGE RESISTIVE

#### 4.1 Caractéristique de sortie sur charge résistive

Dans une approche de Thévenin, le transformateur (vu du secondaire) peut être considéré comme un générateur de tension réel de force électromotrice à vide  $V_{20}$  et d'impédance interne  $z$  (c.f. Figure 9). Cette impédance interne trouve son origine dans les résistances des bobinages et les inductances de

fuites au primaire et au secondaire. On obtient alors le schéma équivalent de la Figure 10 sur lequel  $r$  correspond à la résistance des bobinages et  $l$  à l'inductance de fuites, toutes deux totalisées au secondaire.



Le schéma équivalent complet qui sera par la suite utilisé correspond à celui de la Figure 6.

La charge est constituée uniquement du rhéostat. On se propose de déterminer théoriquement au moyen du schéma équivalent, la caractéristique de sortie  $V_2(I_2)$  à tension primaire nominale. On comparera ensuite à la mesure.

Le diagramme de Fresnel correspondant à la maille secondaire de la Figure 6, appelé diagramme de Kapp, est représenté sur la Figure 11. En considérant le triangle OAB, rectangle en A, on peut exprimer (démontrer le) la tension secondaire :

$$V_2 = \sqrt{V_{20}^2 - (l\omega I_2)^2} - rI_2$$

et calculer alors la chute de tension

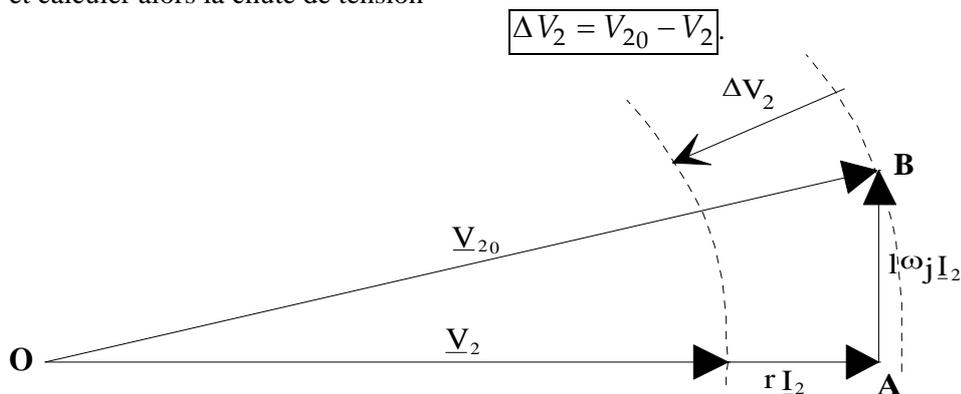


Figure 11 : Diagramme de Kapp sur charge résistive

- Placez la charge résistive variable, réglée à sa valeur maximale (**voir l'enseignant**).
- Pour  $V_1=V_{1n}$  et  $I_2=I_{2n}$ , observez à l'aide de l'oscilloscope le courant  $i_2(t)$  et la tension  $v_2(t)$ . Interprétez.
- Pour  $V_1=V_{1n}$  et  $I_2=I_{2n}$ , observez à l'aide de l'oscilloscope le courant  $i_1(t)$  et la tension  $v_1(t)$ . Interprétez.
- Alimentez le primaire à sa tension nominale (cette valeur doit rester fixe) et relever  $V_1, I_1, P_1, Q_1, S_1, FP_1$  et  $V_2, I_2, P_2, Q_2, S_2$ , et  $FP_2$  pour différentes valeurs de  $I_2$ .
- Tracez  $V_2(I_2)$  pour  $I_2 = (0 \text{ A}, 1 \text{ A}, 2 \text{ A}, 3 \text{ A}, 4 \text{ A})$ . Tracez, sur le même graphique, la courbe théorique de  $V_2(I_2)$  déduite du modèle. Conclure.
- Tracez la chute de tension au secondaire  $\Delta V_2(I_2)$  pour  $I_2 = (0 \text{ A}, 1 \text{ A}, 2 \text{ A}, 3 \text{ A}, 4 \text{ A})$ . Comparez  $\Delta V_2$  à  $V_2$ . Tracez, sur le même graphique, la courbe théorique (approchée) de  $\Delta V_2(I_2)$  déduite du modèle. Conclure.
- Faire un bilan de puissance entrée-sortie du transformateur.

**Exercice 1** : Détermination du courant primaire  $I_1$  et du déphasage  $\varphi_1$  de ce courant sur la tension primaire pour un point de fonctionnement nominal

On se propose, connaissant :

$V_1 = V_{1n}$        $I_2 = I_{2n}$        $P_2$  (mesurée)       $Q_2$  (mesurée), et les paramètres du schéma équivalent (figure 6), de prévoir  $I_1$  et  $\varphi_1$ .

On vérifiera ensuite avec les valeurs mesurées. (Méthode de Boucherot : bilan de puissances).

#### 4.2 Prédétermination d'un point de fonctionnement sur charge résistive

On souhaite prédéterminer les valeurs de  $V_2$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $S_1$ ,  $FP_1$  connaissant  $V_1$ ,  $I_2$ , et  $FP_2$ . On prendra  $V_1 = V_{1n}$ ,  $I_2 = 2.5A$  et  $FP_2 = 1$  (charge résistive).

- A partir de votre modèle et des valeurs de  $V_1$ ,  $I_2$  et  $FP_2$ , prédéterminez  $V_2$ ,  $\Delta V_2$ ,  $I_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $S_1$  et  $FP_1$ .
- **Faites valider vos calculs par l'enseignant.**
- Effectuez les mesures et conclure.