



**Université Mohammed V-Rabat  
Faculté des Sciences  
Département de physique**



**TRAVAUX PRATIQUES  
ÉLECTROMAGNÉTISME**

**SMP, SMA & SMI  
Semestres 3 et 4**

**Responsable : Pr. M. OUAHMAN.**

**Réalisé par : Pr. M. OUAHMAN, Pr. N. TAHIRI Et l'équipe du  
laboratoire.**

# SOMMAIRE

<b>Généralités et notions de base.....</b>	<b>1</b>
<b>I - Etude de la force électromotrice : Rails de Laplace.....</b>	<b>15</b>
<b>II - Etude du transformateur .....</b>	<b>18</b>
<b>III - Loi d'ohm en courant alternatif : Etude de l'auto-induction magnétique.....</b>	<b>25</b>
<b>IV - Loi d'ohm en courant alternatif : Etude de la résonance et l'antirésonance dans un circuit RLC.....</b>	<b>29</b>

# GENERALITES

## OBJECTIF DES TRAVAUX PRATIQUES

La physique est la science qui étudie les propriétés générales de la matière et permet d'établir de nombreuses lois qui servent très souvent de fondement aux autres sciences.

Ces lois physiques doivent être vérifiées par des expériences reproductibles en vue d'illustrer certains phénomènes physiques traités dans le cours et déterminer les grandeurs physiques avec une bonne précision. **C'est le but essentiel des travaux pratiques.** Ces travaux permettent aussi d'apprendre à manipuler, tracer des courbes, interpréter les résultats obtenus et en tirer des conclusions.

L'étude expérimentale d'un phénomène physique nécessite l'acquisition d'un ensemble d'appareils pour réaliser des montages, faire des mesures en tenant compte de toutes les erreurs commises et comparer ensuite les résultats obtenus aux valeurs théoriques.

## 1 - MESURES ET INCERTITUDES

Lors d'une mesure, il est impossible de trouver la valeur exacte d'une grandeur physique  $x$ . Mesurer cette grandeur, revient non seulement à chercher sa valeur mais à lui attribuer aussi une autre valeur appelée incertitude absolue pour pouvoir qualifier la qualité de la mesure. Cette incertitude est associée aux erreurs de mesures dues à l'instrument de mesure, à l'opérateur et à la variabilité de la grandeur mesurée.

### ❖ **Notions d'erreur et d'incertitude**

- **L'erreur** sur une mesure est la différence entre la valeur obtenue (Valeur mesurée) et la valeur réelle (valeur exacte).

Erreur = valeur mesurée – valeur exacte.

L'erreur est une grandeur algébrique, positive si la mesure est par excès, négative si la mesure est par défaut.

- **L'incertitude** de mesure est l'intervalle au sein duquel se trouve probablement la valeur vraie. Elle caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être attribuées à la grandeur mesurée. Elle est positive, de même nature que  $x$  et notée  $\Delta x$ .

Le résultat de la mesure de  $x$  est notée donc :  $x = (x_0 \pm \Delta x)$ .

### ❖ Types d'erreurs de mesures

On distingue deux types d'erreurs :

#### ➤ **L'erreur systématique**

Lors d'une mesure unique, la précision de l'appareil de mesure, la façon dont il est utilisé et la qualité de la mesure, sont à prendre en compte : l'erreur correspondante est dite systématique ou de biais. Par exemple, un appareil peut être mal étalonné : le zéro peut être mal réglé, l'échelle peut être mal graduée, etc. L'erreur systématique est donc une erreur de méthode (due au matériel, ou à l'expérimentateur). Elle est la plus difficile à détecter et nécessite une vigilance constante.

L'évaluation de celle-ci consiste à considérer alors toutes les erreurs commises.

#### ➤ **L'erreur de mesure accidentelle**

Lorsqu'un même opérateur répète plusieurs fois, dans les mêmes conditions, la mesure d'une même grandeur, les résultats peuvent être différents. On parle alors d'erreur de mesure accidentelle. Elle est due essentiellement aux réflexes de l'opérateur.

### ❖ Types d'incertitudes

#### ➤ **Incertitude systématique**

L'incertitude systématique est associée aux erreurs systématiques.

Incetitude systématique = la plus petite grandeur mesurée avec un instrument.

#### ➤ **Incetitude accidentelle**

Cette incertitude est due à l'opérateur, lorsqu'il fait  $n$  mesures ( $g_1, g_2, \dots, g_n$ ) d'une même grandeur physique  $G$  dans les mêmes conditions. Pour la calculer, on prend la valeur moyenne:  $g_m =$  valeur moyenne de  $g = g_1 + g_2 + g_3 + \dots / n = \sum g_i / n$  avec  $i=1, 2, \dots, n$ . Plus le nombre de mesures «  $n$  » est grand, plus  $g_m$  est proche de  $g_0$ .

L'incertitude accidentelle est la valeur la plus grande entre les écarts  $|g_m - g_i|$ .

$$\Delta g = \sup |g_m - g_i| \quad \text{avec } i=1, 2, \dots, n.$$

Cas où 2 mesures  $g_1$  et  $g_2$  sont effectuées:

$$\Delta g = \left| \frac{g_1 - g_2}{2} \right|$$

## Exemple

- Erreurs de parallaxe (l'œil de l'opérateur n'est pas perpendiculaire au plan de la lecture dans un cadran (exemple voltmètre, ampèremètre ...)).
- Mauvais choix du calibre de l'appareil (voltmètre, ampèremètre, ...), ....

### ➤ Incertitude absolue

L'incertitude absolue  $\Delta x$  est l'erreur maximale que l'on peut commettre dans l'évaluation de  $x$ .

L'incertitude absolue est la somme des deux incertitudes précédentes :

$$\Delta g = \Delta g_{\text{systématique}} + \Delta g_{\text{accidentelle}}.$$

C'est une quantité toujours positive et de même unité que  $g$ . La valeur exacte de  $g$  est telle que :

$$g_{\text{moyen}} - \Delta g \leq g \leq g_{\text{moyen}} + \Delta g.$$

Avec :  $\Delta g \ll g$ ,  $\Delta g \geq 0$

$\Delta g = (\Delta g)_{\text{systématique}}$  si une seule mesure est effectuée.

Si la grandeur  $G$  est affectée de plusieurs incertitudes  $(\Delta g)_1, (\Delta g)_2, \dots$  l'incertitude absolue totale est:  $(\Delta g)_{\text{Totale}} = (\Delta g)_1 + (\Delta g)_2 + \dots$

- Si dans une série de mesures, une valeur est trop écartée de la moyenne, elle doit être refaite.
- Le résultat d'une mesure  $g$  doit être toujours accompagné de son incertitude absolue  $\Delta g$  et de son unité exprimée, en général, dans le système international [S.I].

$$g = (g_m \pm \Delta g) \text{Unité}.$$

- Il faut donner la valeur de **l'incertitude absolue avec un seul chiffre significatif.**

### **\*Présentation de résultats:**

Lors de la présentation finale d'un résultat il est important d'accorder le nombre de chiffres significatif à la précision déterminée.

Si une incertitude n'est pas donnée, le niveau du dernier chiffre significatif est admis comme ordre de grandeur de l'incertitude.

#### **Exemple :**

- Le calcul de l'intensité  $I$  donne le résultat suivant :  $I = 13,354 \text{ mA}$  et  $\Delta I = 0,06 \text{ mA}$ . On regroupe et on arrondit ; on a alors :  $I = (13,4 \pm 0,06) \text{ mA}$ .
- Le calcul de l'impédance  $Z$  de la bobine donne  $Z = 310,45 \Omega$  et  $\Delta Z = 14,60 \Omega$ . On arrondie d'où  $Z = (310 \pm 15) \Omega$ .

- Le calcul de l'auto-induction L donne  $L = 0,095 \text{ H}$  et  $\Delta L = 0,0095 \text{ H}$ .

Résultat arrondi, on obtient :  $L = (0,10 \pm 0,01) \text{ H}$ .

### **\*Comparaison de deux résultats**

Comparer deux résultats  $(g_1 \pm \Delta g_1)$ ,  $(g_2 \pm \Delta g_2)$  revient à vérifier l'inégalité :

**Théorème de comparaison :**  $|g_1 - g_2| \leq (\Delta g)_1 + (\Delta g)_2$

Qui traduit le chevauchement des intervalles  $[g_1 - \Delta g_1, g_1 + \Delta g_1]$  et  $[g_2 - \Delta g_2, g_2 + \Delta g_2]$ .

**Conclusion :** Si l'inégalité est vérifiée, on peut dire que la différence entre  $g_1$  et  $g_2$  n'a pas de signification physique.

### **➤ Incertitude relative**

On appelle incertitude relative (ou précision) sur G, la quantité  $\Delta g / g$ . Elle est positive, sans unité et souvent exprimée en pourcentage (%). Elle renseigne mieux que l'incertitude absolue sur le degré d'exactitude d'une mesure. Une mesure est d'autant plus précise que son incertitude relative est faible.

### **Exemple:**

Un fréquence-mètre donne les valeurs mesurées de f avec une précision de 2% cela signifie que :  $\Delta f / f = 2\%$ . Si  $f = 560 \text{ Hz}$   $\rightarrow \Delta f = f \times 2\% = 11,20 \text{ Hz}$ .

D'où :  $f = (560 \pm 11) \text{ Hz}$ .

### **Comparaison de deux méthodes**

La grandeur G est mesurée par deux méthodes différentes qui donnent les résultats  $(g_1 \pm \Delta g_1)$  et  $(g_2 \pm \Delta g_2)$ . La mesure la plus précise correspond à celle dont l'incertitude relative est la plus

faible. Si :  $\frac{\Delta g_1}{g_1} < \frac{\Delta g_2}{g_2}$  : la première méthode est la plus précise.

### **Calcul d'incertitude**

En général, la détermination d'une grandeur G s'effectue par la mesure d'autres grandeurs physiques intermédiaires X, Y, Z, ... La grandeur G est alors définie par sa valeur g telle que :  $g = f(x, y, z, \dots)$ .

Connaissant les incertitudes  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , ... des mesures  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , ..., on détermine alors l'incertitude absolue  $\Delta g$  en fonction de  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , ... en faisant un calcul d'incertitudes.

**1<sup>ère</sup> étape** : Calcul des différentielles partielles.

**2<sup>ème</sup> étape** : Regroupement des coefficients de  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ..

**3<sup>ème</sup> étape** : Majoration physique.

➤ **Cas simples d'une seule variable :  $G = f(x)$**

On calcule la différentielle de  $g$  soit :  $dg = f'(x) dx$ .

Par majoration physique, on obtient:  $\Delta g = |f'(x)| \cdot \Delta x$ .

**Cas de plusieurs variables indépendantes:  $g = f(x, y, z, \dots)$** .

Pour faire ce calcul, on suit les étapes suivantes :

- On calcule séparément les dérivées partielles puis  $dg$  totale.
- On fait la majoration physique pour calculer  $\Delta g$  ( $d$  est remplacé par  $\Delta$  et les coefficients de  $dx$ ,  $dy$ , ... sont pris en valeur absolue).

$$\Delta g = |f'(x)| \cdot \Delta x + |f'(y)| \cdot \Delta y + |f'(z)| \cdot \Delta z + \dots$$

➤ **Cas de plusieurs variables liées**

- ✓ **Premier cas** : la fonction est donnée sous forme de sommes, différences, produits ou quotients.

**Exemple:**

$$g(x, y, z) = 2xy + 1/y - yz^3$$

**Calcul de  $dg$  :**

$$dg = 2y dx + 2x dy - 1/y^2 dy - 3yz^2 dz - z^3 dy.$$

**Regroupement des coefficients**

$$dg = 2y dx + (2x - 1/y^2 - z^3) dy - 3yz^2 dz.$$

**Majoration physique**

$$\Delta g = |2y| \Delta x + \left| \left( 2x - \frac{1}{y^2} - z^3 \right) \right| \Delta y + |-3yz^2| \Delta z$$

✓ **Deuxième cas**

Lorsque l'expression de g comporte seulement des produits et des quotients, on peut simplifier les calculs en utilisant la "méthode des logarithmes", comme dans l'exemple suivant :

**Exemple** :

$$g(x,y,z) = 2x^2y / x-y .$$

**On passe par le Log :**

$$\text{Log}(g) = \text{Log } 2 + 2\text{Log}(x) + \text{Log}(y) - \text{Log}(x-y).$$

**On différencie le Log :**

$$\frac{dg}{g} = 2 \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y} - \frac{d(x-y)}{x-y} = 2 \frac{dx}{x} + \frac{dy}{y} - \frac{dx}{x-y} + \frac{dy}{x-y}$$

**On regroupe :**

$$\frac{dg}{g} = \left( \frac{2}{x} - \frac{1}{x-y} \right) dx + \left( \frac{2}{x} + \frac{1}{x-y} \right) dy$$

**On majore :**

$$\frac{\Delta g}{g} = \left[ \left( \frac{2}{x} - \frac{1}{x-y} \right) \Delta x + \left( \frac{2}{x} + \frac{1}{x-y} \right) \Delta y \right]$$

$$\Delta g = g \left[ \left[ \left( \frac{2}{x} - \frac{1}{x-y} \right) \Delta x + \left( \frac{2}{x} + \frac{1}{x-y} \right) \Delta y \right] \right]$$

## 2- REPRESENTATION GRAPHIQUE

En physique, il est courant de passer par une représentation graphique pour essayer de vérifier une loi.

La droite étant la représentation la plus simple, on cherche à exprimer la loi à tester sous la forme  $y = ax + b$ .

Les rectangles d'incertitudes (ou barres d'erreurs) sont portés sur le graphe pour juger de la validité de l'interprétation. La représentation graphique de la fonction  $y = f(x) = ax + b$  est une droite.



Considérons deux points  $A_1(x_1, y_1)$  et  $A_2(x_2, y_2)$  de la droite D (figure ci-dessous). On appelle

penne de cette droite, le rapport  $p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$  ;

On montre que  $p = a = \text{tg}(\alpha)$

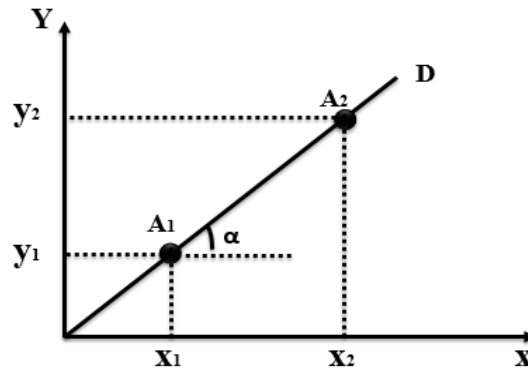


Figure 1. Représentation graphique d'une fonction linéaire

**En mathématique**, quand le repère  $xOy$  est orthonormé, la penne  $p = \text{tg}(\alpha)$  est un nombre sans unité.

**En physique**, les grandeurs  $X$  et  $Y$  ont des unités. Par conséquent **la penne**  $p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ , a une

unité:  $p = \frac{[Y]}{[X]}$  et donc  $p \neq \text{tg}(\alpha)$ .

### Tracé de courbe

Chaque grandeur  $X$  (ou  $Y$ ) est mesurée avec une certaine incertitude. Les résultats de mesure ( $x \pm \Delta x$ ) et ( $y \pm \Delta y$ ) sont en général regroupés dans un tableau :

Pour tracer la courbe  $Y = f(X)$ , on procède de la manière suivante :

- On commence par tracer les axes des abscisses  $X$  et des ordonnées  $Y$  sur les bords d'un papier millimétré; les unités de  $X$  et de  $Y$  doivent être indiquées.
- On choisit les échelles des axes de façon que la courbe occupe le maximum de surface du papier millimétré (la penne d'une droite obtenue à partir de ce graphe sera alors la plus précise).
- On place sur la courbe les points expérimentaux  $A_i(x_i, y_i)$ . Lorsque la courbe n'est pas une droite, on joint ces points par des traits sans tenir compte des incertitudes.

## Comment traduire graphiquement les incertitudes expérimentales ?

Lorsque la courbe est une droite, on tient compte des incertitudes.

La mesure exacte alors de chaque point  $A_i (x_i, y_i)$  se trouve dans l'intervalle  $[x_i - \Delta x_i, x_i + \Delta x_i]$  pour l'axe des abscisses, et  $[y_i - \Delta y_i, y_i + \Delta y_i]$  pour l'axe des ordonnées (Voir figure 2).

Ceci permet de tracer un rectangle d'incertitude de côtés  $2 \Delta x_i$  et  $2 \Delta y_i$ , centré en  $A_i (x_i, y_i)$ . Autour de chaque point expérimental on trace un rectangle d'incertitude.

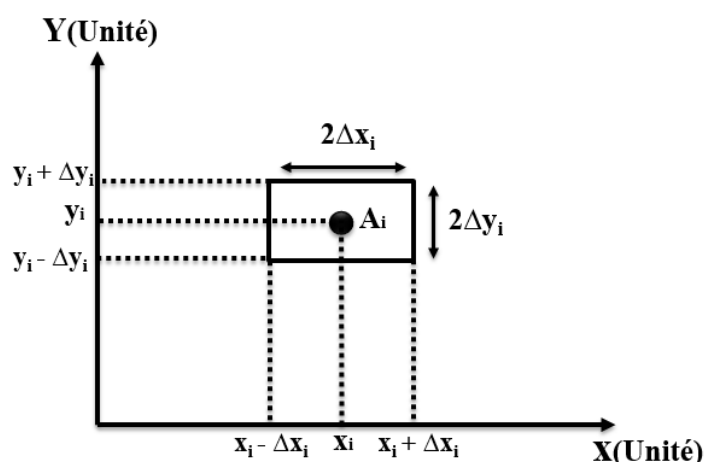


Figure 2: Représentation graphique des incertitudes expérimentales

**Remarque :** Il se peut que ce rectangle se réduise à un segment ou un point si l'une ou les deux incertitudes sont négligeables ou l'échelle choisie n'est pas bonne.

On trace ensuite deux droites limites  $D_1$  et  $D_2$  ayant respectivement la pente minimale  $P_1$  et la pente maximale  $P_2$ .

$D_1$  et  $D_2$  doivent passer par le maximum de rectangles d'incertitudes (exemple ci-dessous). Ceci permet de calculer la pente moyenne  $P_{moyenne}$  et son incertitude  $\Delta P_{moyenne}$  comme suit :

$$P_{moyenne} = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad \text{Et} \quad \Delta P_{moyenne} = \frac{|P_1 - P_2|}{2}$$

L'échelle ainsi que le titre de la courbe doivent être mentionnés sur le papier millimétré. Les unités indiquées sur les deux axes sont les unités réelles des grandeurs X et Y.

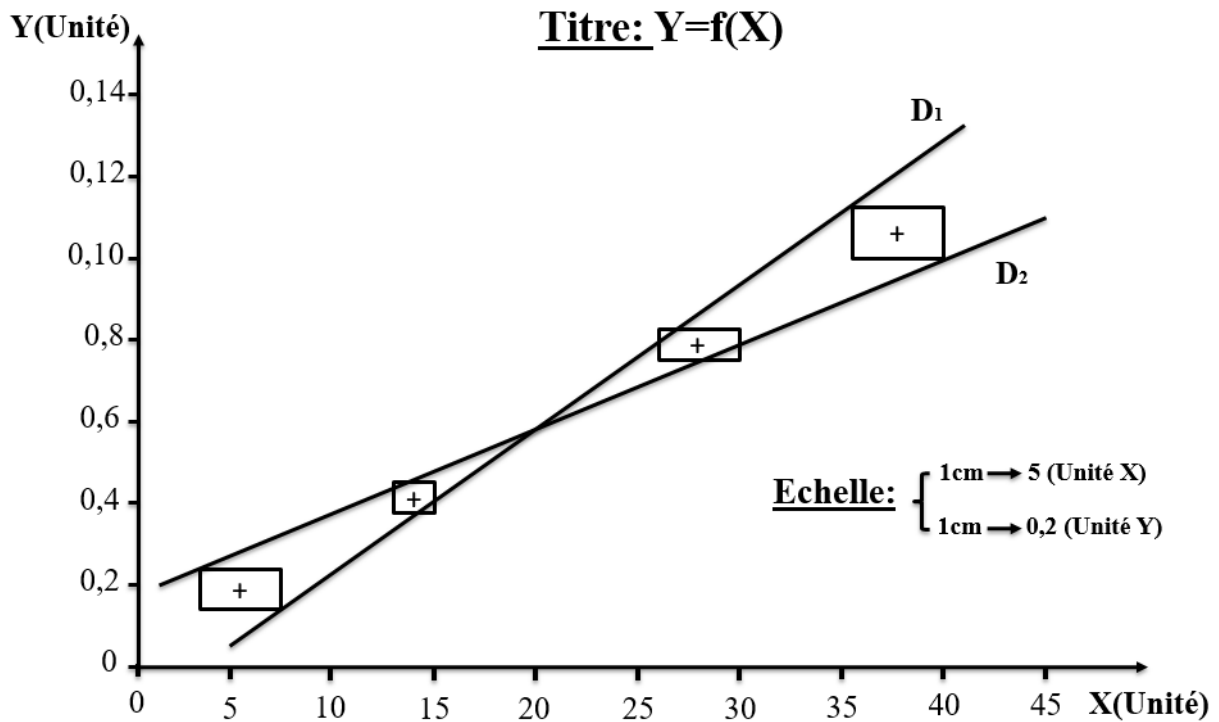


Figure 3: Représentation graphique de la fonction  $Y = f(X)$  avec rectangles d'incertitude.

### 3 - UTILISATION DE L'AMPÈREMÈTRE ET DU VOLTMÈTRE

L'ampèremètre et le voltmètre sont des appareils qui permettent la mesure respectivement d'un courant et d'une tension. Ce sont des appareils qui sont soit analogiques à cadre mobile où se déplace une aiguille sur un cadran gradué, soit numériques (ou digitaux).

#### a- Ampèremètre (Voltmètre) analogique.

Les différentes parties d'un ampèremètre (Voltmètre) sont présentées ci-dessous :



Figure 4: Ampèremètre analogique

**1 :** Cadran comportant l'**échelle** et l'**aiguille** pour le courant continu en noir et courant alternatif en rouge. (N est le nombre de divisions lu sur l'échelle choisie).

**2 :** **Sélecteur** pour choisir la nature du courant à mesurer (continu ou alternatif).

**3:** Différents **Calibres** à choisir pour le courant continu (en noir), alternatif (en rouge). Le calibre C : est la valeur maximale que peut mesurer un appareil. Son unité est celle de la grandeur mesurée. Volt pour voltmètre et mA ou A pour l'ampèremètre.

**4 :** Bornes de connexion. La borne **COM** est commune ; elle doit être toujours connectée.

**5:** Borne "**10 A**", utilisée si le courant à mesurer est supérieur à 3A.

Borne "**A**" utilisée si le courant à mesurer est de l'ordre du mA.

**6:** **Classe** de l'appareil : a pour valeur 1,5 en continu et 2 en alternatif. (Sans unité et spécifique à chaque appareil).

L'Ampèremètre se branche en série aux bornes du circuit étudié alors que le voltmètre se branche en parallèle.

### **Mesure d'une grandeur électrique (U ou I)**

Pour mesurer une tension ou une intensité de courant, on commence par choisir le calibre le plus grand afin d'éviter la détérioration de l'appareil.

La valeur de la tension U ou l'intensité I ainsi que leurs incertitudes sont données par les relations suivantes :

$$U = I = \frac{N \times \text{Calibre}}{\text{Echelle}} \quad \text{Et} \quad \Delta U \text{ ou } \Delta I = \frac{\text{Classe} \times \text{Calibre}}{100}$$

Pour minimiser l'incertitude  $\Delta U$  (ou  $\Delta I$ ), on cherche toujours le calibre qui donne la plus grande déviation de l'aiguille sur le voltmètre (ou l'ampèremètre), sans que l'aiguille sorte de l'échelle.

#### **Exemple :**

Pour mesurer la tension U, on utilise un voltmètre de classe 2 (~) avec N = 2,8 divisions lu sur l'échelle 3,2 ~ et calibre = 10 V, on trouve :

$$U = \frac{2,8 \cdot 10}{3,2} = 8,75V \quad \text{Et} \quad \Delta U = \frac{2 \cdot 10}{100} = 0,2V$$

D'où  $U = (8,8 \pm 0,2) V$ .

#### **b- Multimètre numérique.**

Un multimètre est un appareil capable de réaliser plusieurs types de mesures avec un seul appareil (Plusieurs appareils en un seul boîtier).

On peut l'utiliser pour mesurer plusieurs grandeurs: **tension, intensité, fréquence..**

Il comprend généralement plusieurs composants selon les modèles.

- Ecran d'affichage
- Bouton pour sélectionner les différentes fonctions.
- Bornes de branchement où les fils sont insérés.

Le choix du mode de mesure et du calibre se fait généralement à l'aide d'un bouton rotatif. Les multimètres les plus récents choisissent automatiquement le bon mode et le bon calibre.

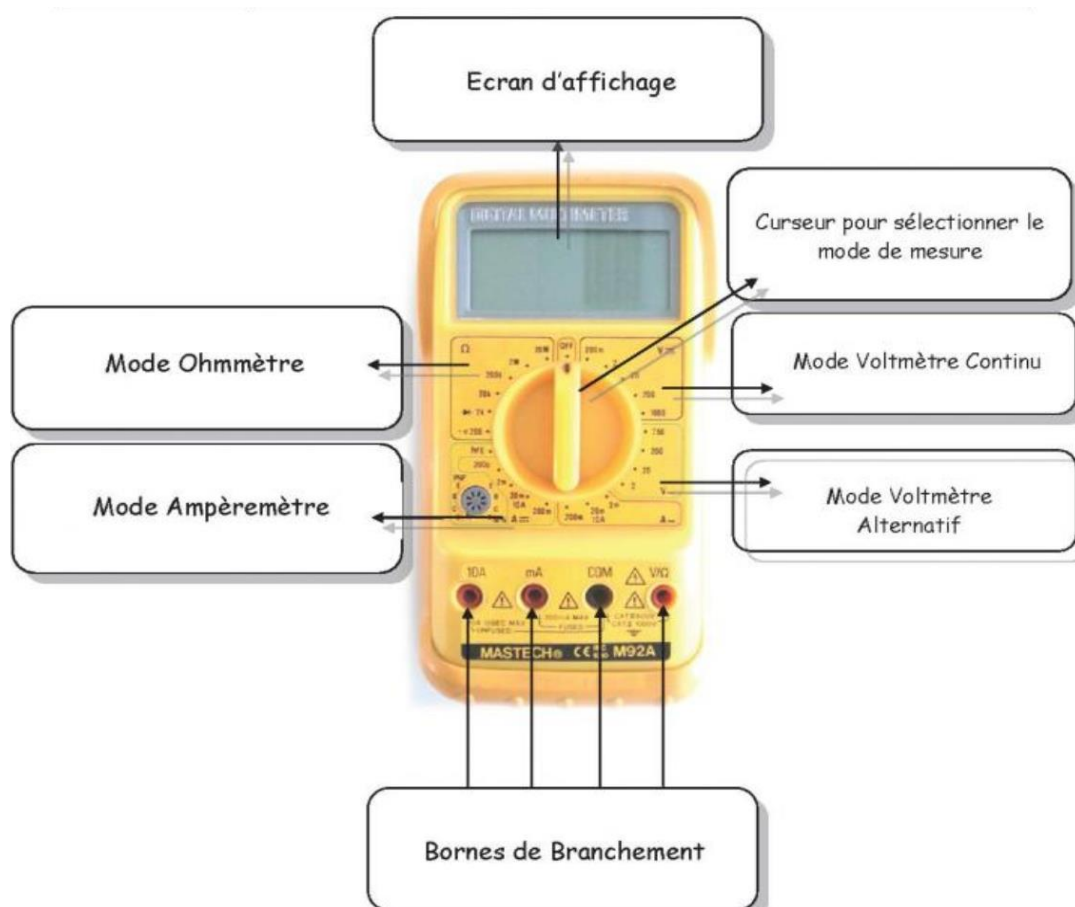


Figure 5. Multimètre numérique.

### Mode de fonctionnement

#### ➤ Multimètre en mode ampèremètre

En mode ampèremètre, le multimètre permet de mesurer des intensités. Ce mode est choisi en plaçant le sélecteur dans la zone comportant des calibres exprimés en ampère.

➤ **Multimètre en mode voltmètre**

En mode voltmètre le multimètre permet de mesurer des tensions. Ce mode est choisi en plaçant le sélecteur dans la zone comportant des calibres exprimés en volt.

➤ **Multimètre en mode fréquence-mètre**

En mode fréquencemètre, le multimètre permet de mesurer une fréquence. Ce mode est choisi en plaçant le sélecteur dans la zone des calibres exprimés en Hz.

➤ **Multimètre en mode continu ou alternatif.**

Le multimètre est utilisé pour mesurer des tensions ou des intensités, en continu ou en alternatif. Il existe, en général, sur le multimètre des zones de calibre correspondant à ces deux types de mesures repérées grâce à leur symbole:  $\sim$  ou  $\bullet$  = .

**Exemples**

**Mesure d'une fréquence**

Pour mesurer la fréquence délivrée par un GBF (générateur à basses fréquences), on branche le multimètre et on choisit le mode fréquence-mètre en tournant le sélecteur.

La valeur affichée sur l'écran est  $f = 540$  Hz. Pour déterminer l'incertitude sur cette mesure, on considère la précision du multimètre donnée en pourcentage soit  $\Delta f / f = 2\%$ .

D'abord on calcule  $\Delta f = 2\% \times 540 = 10,8$  Hz .et on donne le résultat final :

$$f = (540 \pm 11) \text{ Hz.}$$

**Mesure d'une intensité**

On sélectionne la fonction ampèremètre alternatif ( $I_{\sim}$ ) en tournant le commutateur rotatif. Ensuite on règle le calibre à sa plus grande valeur pour plus de sécurité. On branche le multimètre puis on choisit le bon calibre.

La valeur affichée sur l'écran est  $I = 1,23$  A Pour déterminer l'incertitude sur cette mesure, on considère la précision, soit  $\Delta I / I = 2\%$

On calcule  $\Delta I = 2\% \times 1,23 = 0.024$  A et on donne le résultat final :

$$I = (1,23 \pm 0.02) \text{ A.}$$

## **4 - ORGANISATION DES TP ET INSTRUCTIONS**

- Tout étudiant ayant fait un changement de filière ou nouveau inscrit (et dont le nom ne figure pas sur les listes affichées au Laboratoire de TP de physique), doivent contacter immédiatement le responsable de TP et apporter une photocopie de l'attestation d'inscription.

- Les étudiants redoublants ayant une note de TP supérieure ou égale à 10/20 sont dispensés. Seuls les étudiants ayant déposé une demande auprès du responsable peuvent passer les TP.
- La présence aux travaux pratiques est obligatoire et contrôlée.
- Toute absence non justifiée ou un compte rendu non remis entraînent la note 0/20.
- L'absence non justifiée au 2/3 de TP ne permet pas la validation du module.
- Les notes du contrôle de TP de physique sont affichées au Laboratoire. L'étudiant peut consulter sa copie sur demande déposée au Laboratoire.
- Dans la salle de T. P, ne jamais alimenter un montage (branchement au secteur) : appeler avant l'enseignant pour la vérification du montage.
- Il est strictement interdit de déplacer le matériel (fils de connexion, voltmètre..), en cas de panne appeler l'enseignant.
- Avant de partir : ranger le matériel, démonter les montages et éteindre les appareils électriques.
- Chaque manipulation doit être préparée auparavant. Le travail dans la salle de T.P doit être entièrement consacré à la réalisation des montages, aux mesures, au traçage des courbes et aux interprétations.
- Le compte rendu comprend :
  - But : c'est l'objectif qu'il faut atteindre avec les mesures effectués.
  - Partie pratique (manipulation) : concerne les mesures réalisées dans la salle (regroupés dans des tableaux), les calculs, les interprétations et les conclusions. Les questions théoriques (calcul d'incertitudes, ...) doivent être traitées avant de venir en salle de T. P.
  - Sur la table de TP, sont indiquées les données nécessaires pour les applications numériques demandées
- A la fin de chaque séance, un compte-rendu regroupant tous les résultats de la manipulation réalisée, est remis.

## Annexe UNITES DU SYSTEME INTERNATIONAL (SI)

### Unités de base du système SI.

Grandeur	Unité	Symbole	Dimension
Longueur	mètre	<b>m</b>	L
Masse	kilogramme	<b>kg</b>	M
Temps	seconde	<b>s</b>	T
Intensité de courant	ampère	<b>A</b>	I

### Unités dérivées.

Grandeur	Unité	Symbole	Dimension	« Correspondance »
Charge électrique	Coulomb	<b>C</b>	$Q = IT$	$A \cdot s = C$
Energie, travail	Joule	<b>J</b>	$ML^2/T^2$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} = J$
Fréquence	Hertz	<b>Hz</b>	$1/T$	$s^{-1} = Hz$
Puissance	Watt	<b>W</b>	$P = ML^2/T^3$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} = W$
Résistance électrique	Ohm	<b><math>\Omega</math></b>	$P/I^2 = U/I$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2} = \Omega$
Inductance	Henry	<b>H</b>	$M \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot I^{-2}$	$\Omega / Hz$
Capacité	Farad	<b>F</b>	$M^{-1} \cdot L^{-2} \cdot T^4 \cdot I^2$	$kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^4 \cdot A^2$
Tension électrique	Volt	<b>V</b>	$M \cdot L^2 \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1} = V$

Grandeur	Unité	Symbole
Angle	radian	<b>rad</b>
Angle solide	stéradian	<b>sr</b>
Accélération	mètre par seconde carrée	<b><math>m \cdot s^{-2}</math></b>
Accélération angulaire	radian par seconde carrée	<b><math>rad \cdot s^{-2}</math></b>
Vitesse	mètre par seconde	<b><math>m \cdot s^{-1}</math></b>
Vitesse angulaire	radian par seconde	<b><math>rad \cdot s^{-1}</math></b>



# TP1: ETUDE DE LA FORCE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

## \*RAILS DE LAPLACE\*

### I- BUT

- Etudier la force électromotrice induite dans une boucle conductrice déplacée à travers un champ magnétique uniforme  $\vec{B}$ .
- Déterminer l'intensité B de ce champ.

### II- PARTIE THÉORIQUE

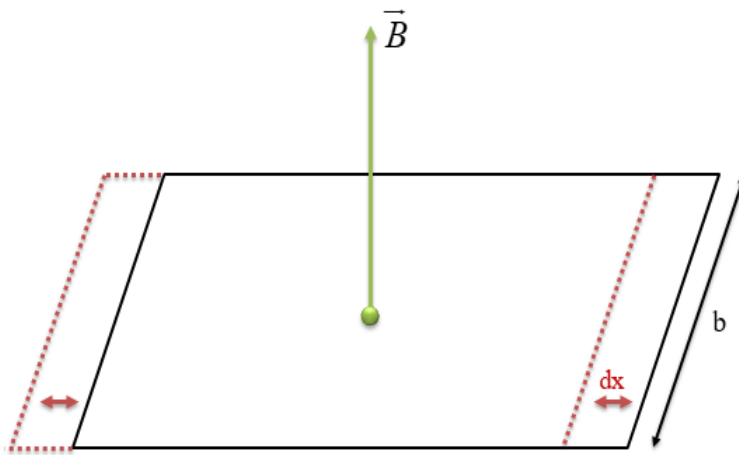


Figure 6: La force électromotrice induite dans une boucle conductrice rectangulaire

On considère une boucle conductrice rectangulaire de largeur  $b$  délimitée par une surface  $A$ . Un champ magnétique  $\vec{B}$  uniforme est perpendiculaire à la surface  $A$  (Figure 6).

Le flux magnétique à travers la surface  $A$  s'écrit alors :  $\Phi = B.A$

Si on retire la boucle  $A$  du champs  $\vec{B}$ , d'une distance  $dx$ , la surface placée dans ce champ diminue de  $b.dx$ :  $dA = -b.dx$ .

La variation du flux s'écrit :  $d\Phi = -B.dA = -B.b.dx$

La variation du flux en fonction du temps :

$$\frac{d\Phi}{dt} = -Bb \frac{dx}{dt} = -B.b.v$$

$v$  étant la vitesse de déplacement de la boucle.

Dans ce cas une tension induite  $U$  est créée au sein de la boucle :

$$U = -\frac{d\Phi}{dt} = B.b.v$$

$U$  : Force électromotrice induite en volt.

$B$  : Intensité du champ magnétique en tesla T.

$b$  : Largeur de la boucle en mètre.

$v$  : Vitesse de la boucle en m/s.

### III- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le matériel utilisé dans ce TP est composé d'une boucle conductrice rectangulaire de largeur  $b$  est portée par un chariot (C). Un cavalier (G) permet de sélectionner plusieurs valeurs de  $b$ . Un moteur (M) de vitesse réglable  $v$ , permet de déplacer le chariot (C) à travers les plaques (P).

La force électromotrice induite  $U$ , ainsi générée, est mesurée à l'aide d'un microvoltmètre (V). Un poste de commande (T) permet de faire fonctionner le dispositif expérimental

Le champ magnétique  $\vec{B}$  est généré par des aimants cylindriques permanents disposés par paires entre deux plaques parallèles (P) en fer. Pour garantir l'homogénéité du champ  $\vec{B}$ , les aimants doivent être répartis régulièrement sur toute la longueur des plaques. Fig 7.



Figure 7 : Dispositif expérimental.

### IV- MANIPULATION

En partant la formule (1)

$$U=B.b.v \text{ (1)}$$

Nous allons procéder en 3 étapes :

### 1- Proportionnalité de U en fonction de la largeur b de la boucle conductrice :

A une vitesse v constante du moteur, on effectue les mesures suivantes : (U est en microvolt:  $\mu\text{V}$ )

b(cm)	2	3	4
U( $\mu\text{V}$ )			

Tracer la courbe représentative de U en fonction de b sur un papier millimétré.

Quelle est la nature de la courbe ? Conclusion ?

### 2- Proportionnalité de U en fonction de la vitesse v du moteur :

En utilisant la boucle la plus large : b=4cm, effectuer les mesures suivantes :

v( $10^{-2}\text{m/s}$ )	9	7	5
U( $\mu\text{V}$ )			

Tracer U en fonction de v. Nature de la courbe et conclusion ?

### 3- Calcul de l'intensité B du champ magnétique :

A partir des mesures du tableau précédent et pour  $v=9.10^{-2}\text{m/s}$ , calculer B en utilisant l'équation (1).

Démontrer que :

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta U}{U}$$

Sachant que :  $\Delta b = 0,1\text{cm}$ ,  $\Delta v = 0,02.10^{-2}\text{m/s}$  et  $\frac{\Delta U}{U} = 1\%$ , calculer  $\Delta B$ .

# TP2 : ETUDE DU TRANSFORMATEUR

## I- BUT

On se propose d'étudier les principales propriétés des transformateurs, en utilisant un transformateur à bobines interchangeable.

## II- PARTIE THEORIQUE

Un noyau en tôle feuilletée porte un enroulement primaire de  $N_1$  tours et un secondaire de  $N_2$  tours.

Pour les tensions et les intensités, les petites lettres représentent les valeurs instantanées.

La loi d'Ohm appliquée aux deux enroulements traversés par les flux instantanés  $\Phi_1$  et  $\Phi_2$  est :

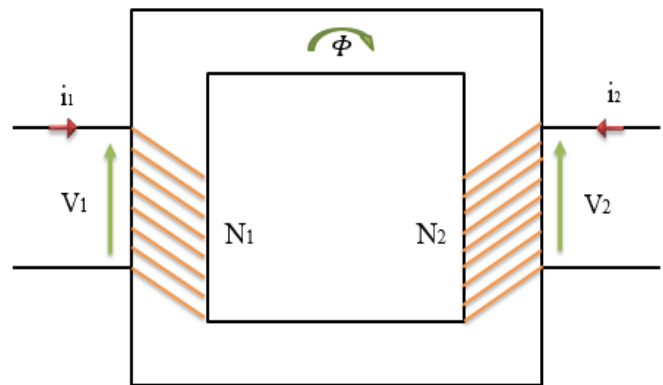


Figure 8. Schéma représentatif d'un transformateur monophasé.

$$v_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Phi_1}{dt} \quad \text{et} \quad v_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Phi_2}{dt} \quad (1)$$

Considérons le noyau comme un circuit magnétique canalisant un flux  $\Phi$ .

S'il y a des flux de fuites,  $L_1 i_1$  traversant le primaire seul, et  $L_2 i_2$  traversant le secondaire seul, on a :

$$\Phi_1 = L_1 i_1 + N_1 \Phi$$

$$\Phi_2 = L_2 i_2 + N_2 \Phi$$

Portons dans les équations (1) :

$$v_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

La théorie des circuits magnétiques exprime la proportionnalité du flux aux ampères-tours.

$$\Phi = \frac{N_1 i_1 + N_2 i_2}{R} \quad (3)$$

Ou le coefficient R est appelé : réluctance du circuit.

**Remarque :**

Si on porte (3) dans (2) on obtient les équations de 2 circuits couplés, ou apparaissent des coefficients  $L_1$ ,  $L_2$  et  $M$  de self inductance et d'inductance mutuelle.

Si R était constant, ces coefficients le seraient aussi. En fait, la perméabilité du fer, et donc R, ne sont pas constants. De plus le cycle d'hystérésis et les courants de Foucault se traduisent par un retard de phase de  $\Phi$  sur la force magnétomotrice  $N_1 i_1 + N_2 i_2$ .

Ainsi dans l'équation (3),  $1/R$  est en réalité complexe. Dans l'équation (2),  $\frac{d\Phi}{dt}$  aura donc une composante en phase avec l'intensité, d'où une résistance apparente correspondant à une énergie consommé dans le fer.

On se servira des équations (2) et (3) pour prévoir et interpréter les faits expérimentaux observés dans la manipulation.

## 1. Fonctionnement à vide

Le secondaire est en circuit ouvert, le voltmètre  $V_2$ , de résistance interne très importante, ne consomme pratiquement pas de courant ( $i_2=0$ ). L'intensité primaire est notée  $i_0$ .

### \*Rapport de transformateur

Si les premiers termes de  $V_1$  sont négligeables, les équations (2) donnent :

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$v_1$  et  $v_2$  étant en phase, le rapport des tensions efficaces (en majuscule) est aussi :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

## 2. Fonctionnement en charge ( $i_2 \neq 0$ )

Le but de cette partie est d'étudier le rendement  $\rho$  du transformateur en fonction du courant  $i_2$ .

$$\rho = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance utile} + \text{Puissance perdue}}$$

La puissance perdue dans le transformateur à deux origines :

\*Puissance perdue dans le fer  $P_f$

On peut montrer, en utilisant l'équation (2), que cette puissance est indépendante du courant secondaire.

\*Puissance perdue par effet Joule dans le cuivre des bobines  $P_j$

$$P_j = R_1 I_1^2 + \frac{1}{2} R_2 I_2^2 \quad (R_1 \text{ et } R_2 \text{ résistance des bobines primaires et secondaires}).$$

Le rendement  $\rho$  peut donc s'écrire :

$$\rho = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_j} \quad \text{Où } P_2 = V_2 I_2$$

L'étude du rendement s'effectue en calculant  $P_f$  grâce à une première manipulation. Comme cette puissance est indépendante du courant secondaire, on choisira pour la simplicité  $I_2 = 0$

## III - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le matériel utilisé dans ce TP est composé de : (Fig. 9)

- ✓ Un transformateur monophasé.
- ✓ Deux voltmètres analogiques pour mesurer les tension aux bornes du primaire  $V_1$  et secondaire  $V_2$ .
- ✓ Deux multimètres pour mesurer les intensités  $I_1$  et  $I_2$ .
- ✓ Un rhéostat (Une résistance électrique réglable) pour faire varier  $I_2$ .



Figure 9. Dispositif expérimental.

## IV- MANIPULATION

N.B : Seul l'enseignant peut brancher le secteur 110V.

Dans toute la manipulation, la tension appliquée au primaire est celle du secteur 110V alternatif, mesuré par un voltmètre  $V_1$  Ferromagnétique. La mise sur le secteur se fera impérativement par l'enseignant après vérification du montage.

Réaliser le montage de la figure 10.

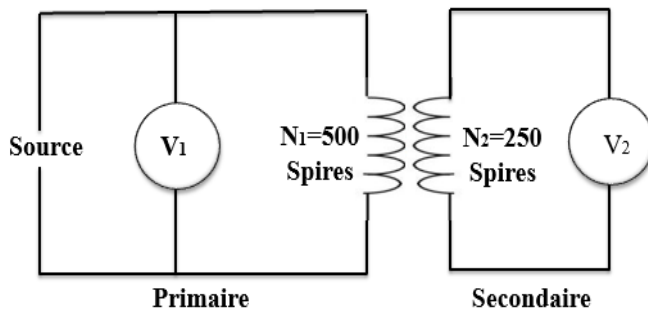


Figure.10 Schéma du montage d'un transformateur à deux bobines.

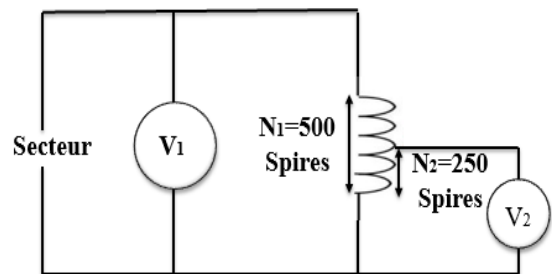


Figure.11 Schéma du montage d'un autotransformateur.

a) Montage abaisseur de tension (Fig10).

Mesurer  $\frac{V_2}{V_1}$  pour  $N_1=500$  spires et  $N_2=250$  spires.

b) Montage élévateur de tension (Fig.10)

Mesurer  $\frac{V_2}{V_1}$  pour  $N_1=250$  et  $N_2=500$  spires.

c) Autotransformateur. Ce cas est obtenu en utilisant une seule bobine. Fig.11.

i) Prendre pour le secondaire  $\frac{1}{2}$  de la bobine primaire et mesurer  $\frac{V_2}{V_1}$ .

ii) Prendre pour le primaire  $\frac{1}{2}$  de la bobine secondaire et mesurer  $\frac{V_2}{V_1}$ .

Donner les résultats de a, b et c sous forme de tableau. Conclure compte tenu de la précision des instruments de mesure.

### 1) Calcul de $P_f$

$$\rho = \frac{P_2}{P_2 + P_f + P_j} \text{ Avec } \begin{cases} P_2 = \text{Puissance utile} = V_2 \cdot I_2 \\ P_f = \text{Puissance perdue dans le fer} \\ P_j = \text{Puissance perdue par effet Joule} = R_b I_1^2 + \frac{1}{2} R_b \cdot I_2^2 \\ R_b = \text{Résistance de la bobine} = 5\Omega \end{cases}$$

- Réaliser le montage de la figure 12 en utilisant un primaire  $N_1=500$  spires.
- Lire  $I'$ ,  $I_0$  et  $V_1$ .
- Calculer  $I''$ , connaissant la résistance du voltmètre. Dans ce montage, la puissance fournie au primaire est perdue dans le fer et dans la résistance interne de la bobine.

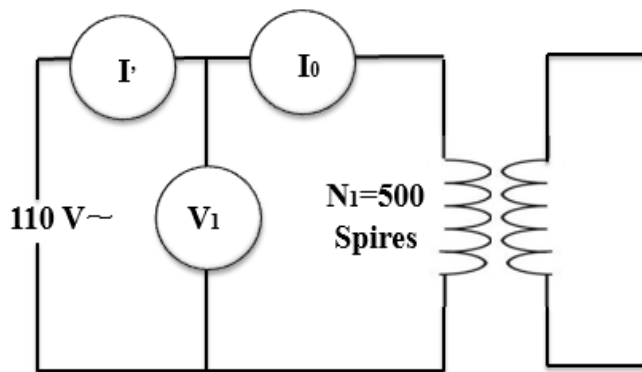


Figure 12. Schéma du montage utilisé pour les mesures de  $I'$ ,  $I_0$  et  $V_1$

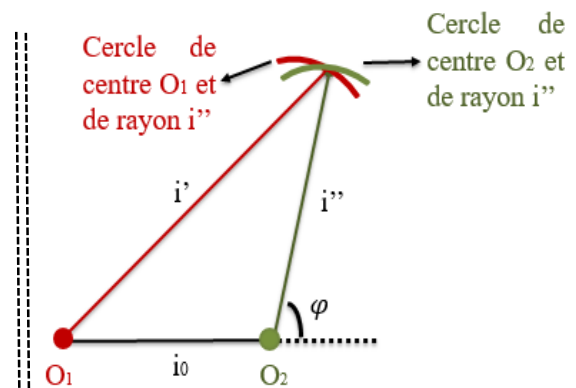


Figure 13. Le triangle des trois intensités diagramme de Fresnel.

$P = V_1 I_0 \cos \varphi = P_f + P_j$ . Où  $\varphi$  est l'angle de phase entre  $i_0$  et  $i''$ .

$$i_0 = I_0 \sin \omega t$$

$$i'' = I'' \sin(\omega t + \varphi)$$

Le  $\cos \varphi$  est connu en traçant le triangle des trois intensités du diagramme de Fresnel (Figure 13).

$$\vec{i}' = \vec{i}_0 + \vec{i}''$$

- Tracer ce diagramme soigneusement sur papier millimétré, à une échelle convenable. On doit se munir obligatoirement d'un compas pour ce tracé.
- Calculer  $P$ ,  $P_j$  puis  $P_f$ . Comparer  $P_j$  et  $P_f$  conclure.



## 2) Etude du rendement

- a) Réaliser le montage de la figure 14 avec  $N_1=500$  spires et  $N_2=250$  spires.

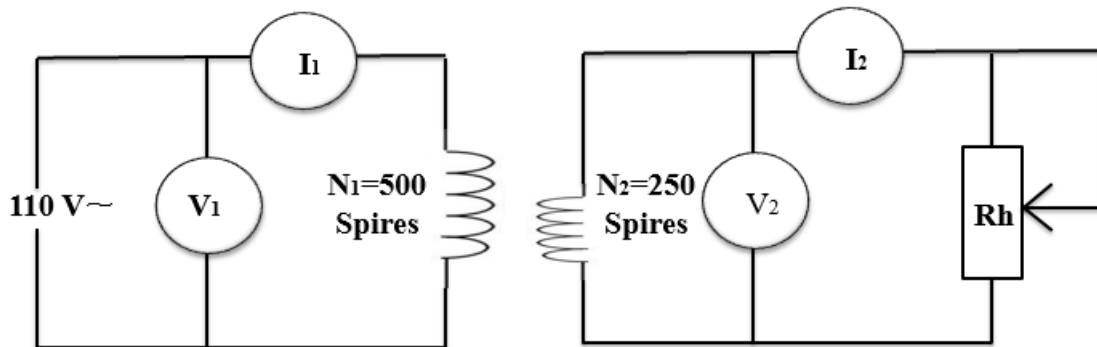


Figure 14. Schéma simplifié du montage utilisé pour le calcul du rendement d'un transformateur à 2 bobines.

La charge ohmique est constituée par un rhéostat.

- b) Effectuer les mesures de  $I_1$ ,  $V_1$  et  $V_2$  pour les valeurs suivantes de  $I_2$ :

$I_2$ (A)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$I_1$ (A)								
$V_2$ (V)								
$V_1$ (V)								
$P_j$ (W)								
$P_2$ (W)								
$P$								

- c) Représenter sur un même graphe, les variations de  $V_2/V_1$ ,  $I_2/I_1$  et  $\rho$  en fonction de  $I_2$ . Expliquer en particulier l'évolution du rendement en fonction de  $I_2$  ?
- d) Dans quelle condition avons-nous le meilleur rendement ?
- e) Comparer au transformateur parfait pour lequel  $\rho=1$

## 3) Rapport de transformation :

Montage : Abaisseur et élévateur.

- a) Enlever le Rhéostat du montage. Mesurer  $V_1$  et  $V_2$ .
- b) Calculer  $\frac{V_2}{V_1}$  conclure. Que devient le rapport si  $N_1=250$  spires et  $N_2=500$  spires et conclure (par Calcul seulement).

• **Fonctionnement à vide : Transformateur à deux bobines :**

a) Réaliser le montage et effectuer les mesures du tableau ci-dessous :

Abaisseur			
$N_1=500$ Spires, $N_2=250$ spires			
$V_1(V)$	$V_2(V)$	$\frac{V_2}{V_1}$	

b) Comparer  $\frac{V_2}{V_1}$  et  $\frac{N_2}{N_1}$ , en tenant compte des incertitudes.

N.B :  $\Delta\left(\frac{V_2}{V_1}\right) = \frac{V_2}{V_1}\left(\frac{\Delta V_2}{V_2} + \frac{\Delta V_1}{V_1}\right)$  et  $\Delta\left(\frac{N_2}{N_1}\right) = 2\%$

c) Conclusion ?

• **Autotransformateur (avec une seule bobine) :**

a) Réaliser le montage : figure 15.

b) Faire le même travail que pour « Transformateur à deux bobines ».

c) Comparer les résultats obtenus et préciser lequel des deux transformateurs, est le meilleur.

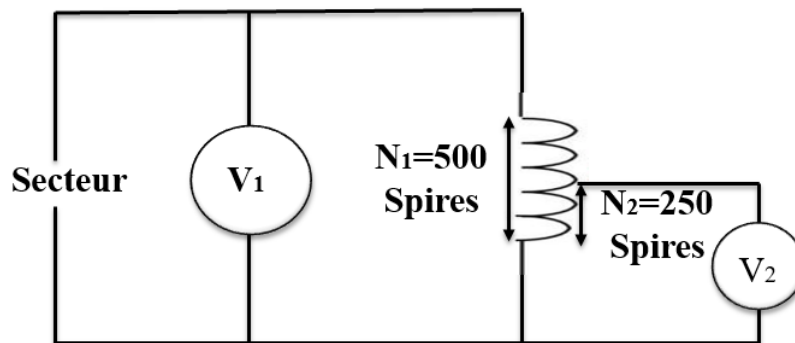


Figure 15. Schéma d'un Autotransformateur.

# TP3 : LOI D'OHM EN COURANT ALTERNATIF

## ETUDE DE L'AUTO-INDUCTION MAGNETIQUE.

### I- BUT

- Le but de la manipulation est d'étudier le phénomène d'auto-induction électromagnétique dans une bobine à air.
- Vérifier la formule théorique qui exprime l'inductance  $L$  de cette bobine, en fonction de ses caractéristiques.

### II- PARTIE THEORIQUE.

- **Inductance propre et Résistance interne de la bobine.**

Un circuit filiforme parcouru par un courant d'intensité  $i$  crée un champ propre  $\vec{B}$ , par opposition à un champ extérieur dont lequel il peut être plongé. Le flux  $\Phi$  de ce champ à travers le circuit qui l'a créé est appelé flux propre.

$L = \Phi/i$  ne dépend pas du courant qui traverse le circuit et constitue ainsi une caractéristique intrinsèque de celui-ci, que l'on appelle inductance  $L$ .

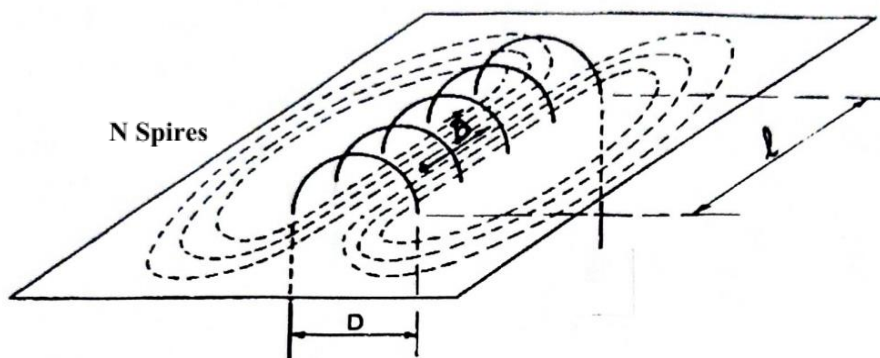


Figure 16. Schéma simplifié de la bobine.

Soit une bobine simple (Fig. 16), qu'on forme en enroulant du fil de cuivre sur un cylindre de diamètre  $D$  et de longueur  $l$ . Le fil de cuivre a une épaisseur  $d$  et est enroulé pour former  $N$  spires jointives.

On cherche à exprimer la self-inductance  $L$  et sa résistance interne  $r$  en fonction de  $N$ ,  $D$ ,  $d$ ,  $l$  et de la conductivité du cuivre  $\gamma$  (Siemens / m). Le fil de cuivre ayant une conductivité finie, la bobine résiste au passage du courant. Sa résistance interne  $r$  s'obtient à l'aide de la loi d'Ohm. Si la densité de courant est uniforme dans le fil conducteur, on a la tension aux bornes du fil conducteur est  $U=ri$ . A l'intérieur d'une bobine de  $N$  spires, de longueur  $l$ , parcourue par un courant  $I$ , le champ magnétique est uniforme et a pour valeur :  $B = \mu \frac{Ni}{l}$

Avec :  $i = \iint \vec{j} \cdot d\vec{S}$ ,  $U = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$ ,  $\Phi = BS$ ,  $j = \gamma E$ ,  $i = j S$

On obtient :

$U = E l_c$  Où  $l_c$  est la longueur du fil de cuivre ( $l_c=N\pi D$ ).

Dans le cas d'une bobine à air, on obtient :

$L = \frac{\Phi}{i} = \mu_0 \frac{N^2 S}{l}$  (Unité Henry : H) et  $r = \frac{N\pi D}{\gamma d^2}$

Avec :

- $\mu_0$  : constante magnétique =  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ .
- $N$  : Nombre de spires.
- $S$  : Section de la bobine (en  $\text{m}^2$ ).
- $l$  : Longueur de la bobine (en m).

### III- DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le matériel utilisé dans ce TP est composé de (Fig 17) :

- ✓ Un GBF : générateur de basse fréquence qui délivre des signaux à fréquences et amplitudes variables.
- ✓ Un voltmètre pour mesurer la tension aux bornes de la bobine.
- ✓ Un ampèremètre pour mesurer l'intensité du courant dans le circuit.
- ✓ Un Générateur de Basses Fréquences (GBF).
- ✓ Une bobine à air d'inductance  $L$  inconnue.



Figure 17. Dispositif expérimental

## IV- MANIPULATION

### IV-1 Détermination expérimentale de L :

L=self inconnue.

V= Voltmètre alternatif.

A= ampèremètre alternatif.

GBF=générateur de basse fréquence.

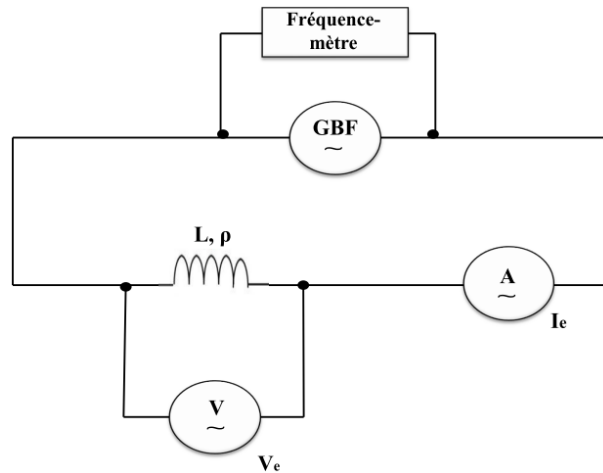


Figure 18. Schéma du montage utilisé pour la détermination de L

La valeur de  $f$ , lue sur le GBF utilisé, n'est pas tout à fait exacte. Le fréquencemètre sert à mesurer la fréquence  $f$  avec une meilleure précision.

- Pour les appareils à cadre mobile,  $\Delta V_e$  et  $\Delta I_e = \frac{\text{classe} \times \text{calibre}}{100}$  ; on utilise les plus petits calibres.
- Pour un appareil digital, on prend une incertitude:  $2\% \Rightarrow \Delta f = f \times 0,02$ .
- Pour calculer  $Z$ ,  $I_e$  en ampère ( $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ) et  $V_e$  en volt :  $z = \frac{V_e}{I_e} (\Omega)$
- Pour chaque mesure, calculer  $Z / f$ . Vérifier que ce rapport est constant.

f(Hz)	$\Delta f$ (Hz)	$V_e$ (V)	$\Delta V_e$ (V)	$I_e$ (mA)	$\Delta I_e$ (mA)	Z ( $\Omega$ )	$\Delta Z$ ( $\Omega$ )	$\frac{Z}{f}$ ( $\Omega / \text{Hz}$ )
500								
700								
1100								

- a) Pour le calcul de  $\Delta f$ , on suppose que la précision du fréquencemètre est de 2%.
- b) Représenter  $Z$  en fonction de  $f$  sur papier millimétré en notant les rectangles d'incertitudes.

Nature de la courbe et conclusion.

- c) Tracer les droites limites et en déduire la pente  $P$  et  $\Delta P$ .
- d) Sachant que  $Z=L \omega$  ( $\omega$ =pulsation= $2\pi f$ ). Exprimer  $L_{\text{exp}}$  et  $\Delta L_{\text{exp}}$  en fonction de  $P$  et de  $\Delta P$ .

#### **IV-2 détermination théorique de L :**

- a) D'après les caractéristiques de la bobine et l'équation (1) calculer  $L_{\text{th}}$ .
- b) Donner l'expression de  $\Delta L_{\text{th}}$ . Application numérique.
- c) Comparer  $L_{\text{th}}$  à  $L_{\text{exp}}$ . Conclusion ?

# TP4 : LOI D'OHM EN COURANT ALTERNATIF : ETUDE DE LA RESONANCE ET L'ANTIRESONANCE DANS UN CIRCUIT RLC.

## I. But

- Mettre en évidence le phénomène de résonance dans le circuit (R, L, C).
- Mettre en évidence le phénomène d'antirésonance dans un circuit bouchon : C en parallèle sur l'ensemble (R,L).

## II. PARTIE THEORIEQUE :

### Cas de la résonance

R=Résistance

L=Self

C=capacité

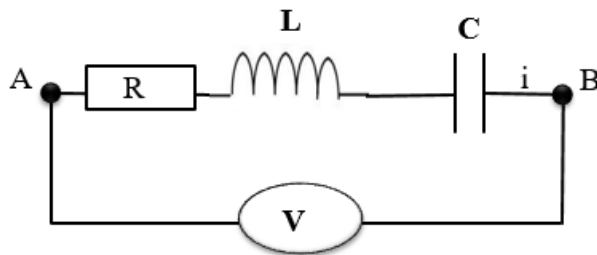


Figure 19. Circuit RLC en série.

On applique entre A et B une tension sinusoïdale  $v = V_m \cos \omega t$ , le courant s'écrit :

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$\omega$  : Pulsation =  $2\pi f = 2\pi / T$  (f=fréquence et T= période).

$\varphi$  : Déphasage de i par rapport à v.

On appelle tension et intensité efficaces les quantités :

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Les voltmètres et ampèremètres utilisés en courant alternatif, donnent les valeurs efficaces  $V_e$  et  $I_e$ . Elles sont liées par la relation :

$V_e = ZI_e$ ,  $Z =$  Impédance du circuit.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \quad \text{Et} \quad \text{tg}\varphi = \frac{L\omega - 1/C\omega}{R}$$

Pour :  $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ,  $Z$  est minimale, purement résistive ( $\varphi = 0$ ) et égale à  $R$ .  $\omega_0$  est la pulsation propre du circuit ou pulsation de résonance.

Si on alimente le circuit sous une amplitude constante et une pulsation  $\omega$  variable, la quantité  $Y=1/Z$  (appelée admittance) passe par un maximum pour  $\omega = \omega_0$ . On dit alors qu'il y a résonance série. La courbe tracée ci-contre est la courbe de résonance.

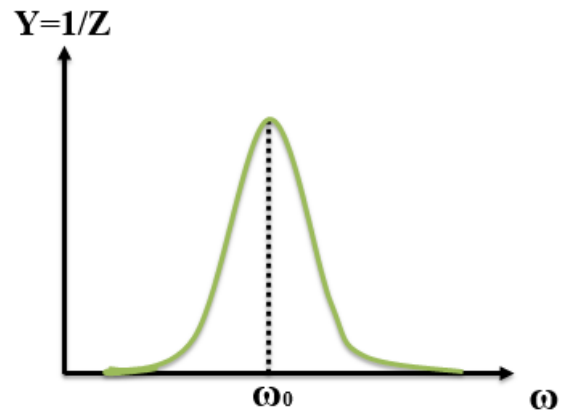


Figure 20. La courbe de résonance

Dans ce cas :

- L'amplitude du courant  $I_m$  est maximale.
- La tension aux bornes de l'ensemble (L,C) est nulle.
- Les tensions aux bornes de L et de C sont en opposition de phase, leurs valeurs efficaces  $V_{Le}$  et  $V_{Ce}$  sont égales et supérieures à la tension  $V_e$  appliquée au circuit (R,L,C). On les appelle surtensions.

On définit alors les facteurs de surtension :

$$q_c = \frac{V_{Ce}}{V_e} \quad \text{Et} \quad q_L = \frac{V_{Le}}{V_e}$$

A la résonance ( $LC\omega_0^2=1$ ), on démontre que  $q_c$  et  $q_L$  sont identiques et égaux à la valeur théorique :

$$q_{th} = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{L\omega_0}{R}$$

$q$  caractérise l'acuité de la résonance. Elle est d'autant plus aiguë que  $q$  est plus élevé.



## Cas de l'antirésonance

R=Résistance

L=self

C=capacité

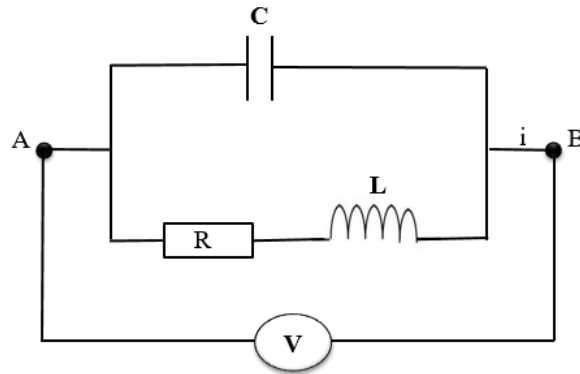


Figure 21. Circuit RLC en parallèle

Les voltmètres et ampèremètres pouvant être utilisés en courant alternatif donnent les valeurs efficaces  $V_e$  et  $I_e$ . Elles sont liées par la relation :

$$V_e = Z I_e, Z = \text{Impédance du circuit.}$$

$$Z = \left[ \frac{R^2}{(L^2 \omega^2)^2} + \left( C\omega - \frac{1}{L\omega} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad \text{Et } \text{tg} \varphi = \frac{L\omega - 1/C\omega}{R}$$

Pour :  $\omega = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , Z est minimale, purement résistive ( $\varphi = 0$ ) et égale à  $L/RC$ .

On remarque que  $\omega_0$  est identique à la pulsation de résonance du circuit série formé par les mêmes éléments (voir TP Précédent).

Si on alimente le circuit sous une amplitude constante et une pulsation  $\omega$  variable, la quantité  $Y=1/Z$  (appelée admittance) passe par un maximum pour  $\omega = \omega_0$ . C'est le phénomène de résonance parallèle ou antirésonance.

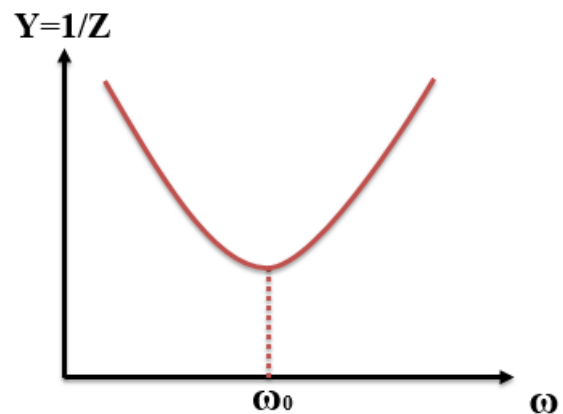


Figure 22. La courbe de l'antirésonance.

Dans ce cas (la condition  $R \ll L\omega$  étant remplie) :

- L'amplitude  $I_m$  du courant est minimale.

- Les courants qui traversent la capacité et la self sont sensiblement en opposition de phase et leurs valeurs efficaces  $I_{C_e}$  et  $I_{L_e}$  sont sensiblement égales.

$I_{C_e}$  et  $I_{L_e}$  sont appelés des surintensités et sont supérieurs au courant total  $I_e$  débité par le générateur.

On définit alors les facteurs de surintensité correspondants.

$$q_C = \frac{I_{C_e}}{I_e} \quad \text{Et} \quad q_L = \frac{I_{L_e}}{I_e}$$

On démontre qu'à l'antirésonance et pour  $R \ll L \omega$ , les valeurs de  $q_C$  et  $q_L$  sont sensiblement identiques et égales à la valeur théorique :

$$q_{th} = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{L\omega_0}{R}$$

On remarque que le facteur de surintensité est égal au facteur de surtension du circuit série formé par les mêmes éléments (voir la manipulation précédente).

### III. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif expérimental de la figure 23 est utilisé pour déterminer la résonance et l'antirésonance. Il est composé de :

- ✓ Un GBF délivrant des signaux à fréquences et amplitudes variables.
- ✓ Un Ampèremètre analogique.
- ✓ Un voltmètre analogique.
- ✓ Une bobine d'inductance L.
- ✓ Une résistance électrique R.
- ✓ Un condensateur : boîte de capacités.



Figure 23. Dispositif expérimental.

## IV. MANIPULATION

### Cas de la résonance

a) Réaliser le montage suivant :

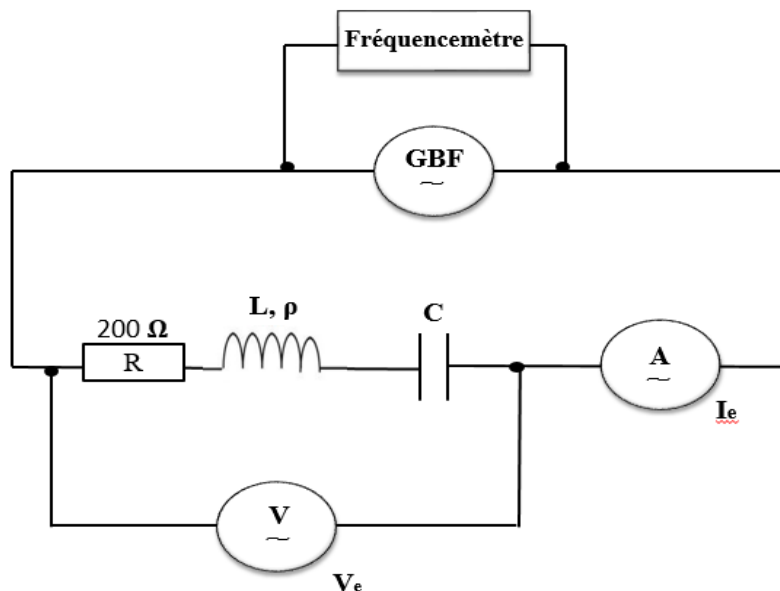


Figure 24. Schéma du montage utilisé pour la mesure de la résonance.

La valeur exacte de la fréquence  $f$  est déterminée à partir du Fréquence mètre.

b) Faire varier  $f$  lentement jusqu'à trouver la valeur  $f_0$  de la résonance ( $I_e$  maximale) et remplir le tableau :

$f_0(\text{Hz})$	$V_e(\text{V})$	$\Delta V_e(\text{V})$	$I_e(\text{mA})$	$\Delta I_e(\text{mA})$

c) A partir de  $f_0$ , calculer  $L$  et  $\Delta L$  avec :

$$LC\omega_0^2 = 1 \text{ et } \omega_0 = 2\pi f_0 \Rightarrow L = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C}$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{2\Delta f_0}{f_0} + \frac{\Delta C}{C} \text{ à démontrer.}$$

d) Régler la fréquence du GBF à la valeur  $f=f_0$  et effectuer successivement les 3 mesures en déplaçant le voltmètre : le brancher en parallèle // sur  $L$ ,  $C$  et l'ensemble  $(LC)$  figure 25.

(Avec  $f = f_0$ ) :

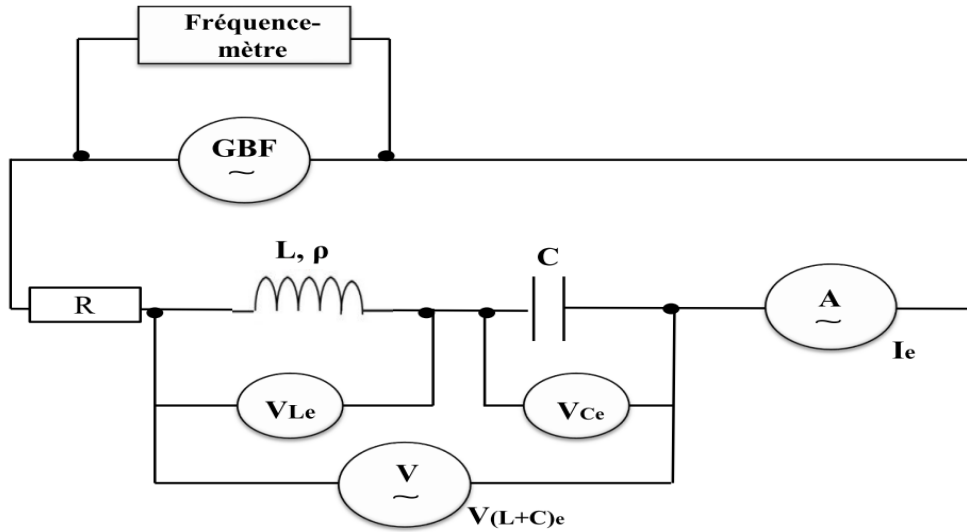


Figure 25. Schéma du montage utilisé pour les mesures de  $V_{LE}$ ,  $V_{Ce}$  et  $V_{(L+C)e}$ .

e) Avec le voltmètre, mesurer  $V_{Le}$ ,  $V_{Ce}$  et  $V_{(L+C)e}$  et remplir le tableau de mesures .

$f_0(\text{Hz})$	$V_{LE}(\text{V})$	$V_{Ce}(\text{V})$	$V_{(L+C)e}(\text{V})$

$$\Delta V_{LE} = \Delta V_{CE} = \Delta V_{(L+C)e} = \frac{\text{Classe} \times \text{Calibre}}{100}$$

Comparer les valeurs  $V_{(L+C)e}$  et  $(V_{LE} + V_{Ce})$ . Y a-t-il addition des tensions efficaces ? Expliquer.

f) Calculer les coefficients de surintensité  $q_c$  et  $q_L$  et les comparer à la valeur théorique.

Essayer de justifier l'écart entre les valeurs expérimentales et théoriques. Conclusion.

$$q_c = \frac{V_{Ce}}{V_e}, \quad q_L = \frac{V_{Le}}{V_e}, \quad q_{th} = \frac{L\omega_0}{R}, \quad \frac{\Delta q_{th}}{q_{th}} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta f_0}{f_0} \quad \text{à démontrer, avec } q_{ex}=q_L=q_c.$$

Vérifier que :  $|q_{th} - q_{ex}| \leq \Delta q_{th} + \Delta q_{ex}$ .

**Données :**  $R = 200\Omega$  et  $C = 1 \mu\text{F}$

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = 2\% \quad , \quad \frac{\Delta C}{C} = 2\% \quad \text{et} \quad \frac{\Delta R}{R} = 2\%$$

## Cas de l'Antirésonance :

a) Réaliser le montage suivant :

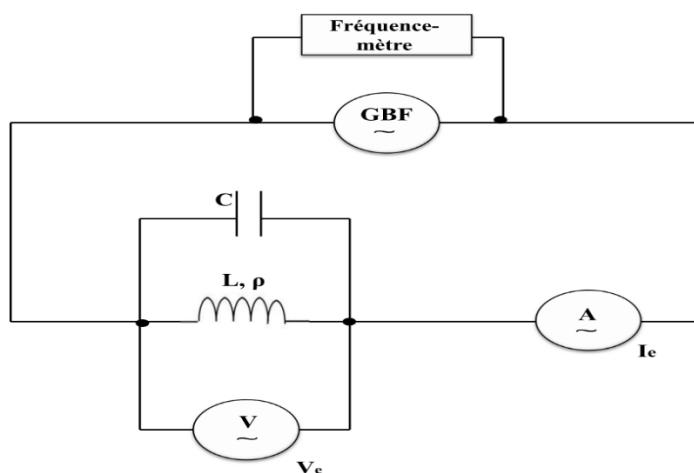


Figure 26. Schéma du montage utilisé pour la détermination de  $f_0$ .

Pour satisfaire la condition  $R \ll L\omega$  (voir partie théorique), la seule résistance en série avec L est sa résistance interne  $\rho$ .

b) Faire varier  $f$  lentement jusqu'à trouver la valeur  $f_0$  de l'antirésonance ( $I_e$  minimale). Montrer que, dans ce cas, la condition  $R \ll L\omega_0$  est satisfaite.

La valeur exacte de  $f_0$  est déterminée à partir du fréquencemètre. Remplir le tableau :

$f_0(\text{Hz})$	$V_e(\text{V})$	$\Delta V_e(\text{V})$	$I_e(\text{mA})$	$\Delta I_e(\text{mA})$

c) A partir de  $f_0$ , calculer C et  $\Delta C$

$$(LC\omega_0^2 = 1) \quad \Delta C = C \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{2\Delta f_0}{f_0} \right) \text{ à démontrer.}$$

d) Régler la fréquence du GBF à la valeur  $f=f_0$ . Réaliser successivement les montages des figures 27 et 28.

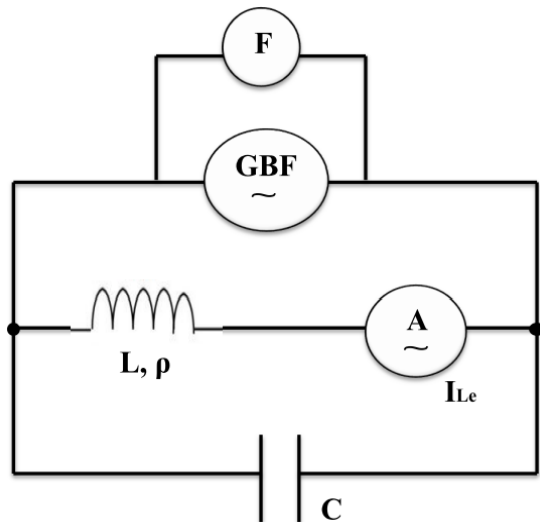


Figure 27. Schéma du montage utilisé pour la mesure de  $I_{Le}$  ( $f=f_0$ ).

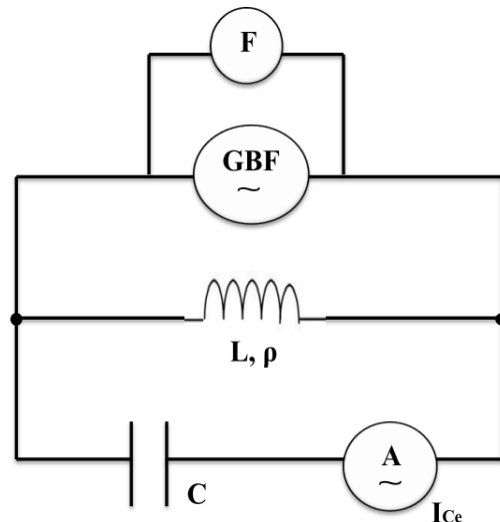


Figure 28. Schéma du montage utilisé pour la mesure de  $I_{Ce}$  ( $f=f_0$ ).

g) Avec l'ampèremètre, mesurer  $I_{Le}$  et  $I_{Ce}$  et remplir le tableau suivant :

$f_0(\text{Hz})$	$I_{Le}(\text{mA})$	$I_{Ce}(\text{mA})$	$\Delta I_{LE} = \Delta I_{CE}(\text{mA})$

$$\Delta I_{LE} = \Delta I_{CE} = \frac{\text{Classe} \times \text{Calibre}}{100}$$

Comparer  $I_{Le}$  et  $I_{Ce}$  à  $I_e$ . Pourquoi n'y a-t-il pas addition des valeurs efficaces?

h) Calculer les coefficients de surintensité  $q_C$  et  $q_L$  et les comparer à la valeur théorique. Essayer de justifier l'écart entre les valeurs expérimentales et théoriques. Conclusion.

$$q_C = \frac{I_{ce}}{I_e}, \quad q_L = \frac{I_{Le}}{I_e}, \quad q_{\text{exp}} = q_C = q_L \text{ et } q_{\text{th}} = \frac{L\omega_0}{\rho}$$

Vérifier que :  $|q_{\text{exp}} - q_{\text{th}}| \leq \Delta q_{\text{exp}} + \Delta q_{\text{th}}$ .

Données :  $\rho = (35 \pm 1)\Omega$ ,  $L = 0,1\text{H}$ ,  $\frac{\Delta L}{L} = 2\%$  et  $\frac{\Delta f_0}{f_0} = 2\%$ .