

Faculté des Sciences et Techniques de Mohammédia  
Université Hassan II de Casablanca  
Département de Physique



---

# Manuel de Travaux Pratiques

## Module Electricité

---

P121/P221 Semestre S2 + S1  
Tronc Commun

**Intervenants :**

Prof : JANANE ALLAH Mohamed

Prof : SOFIANI Zouhaire

Prof : TBATOU Toufique

Année universitaire : 2025 – 2026



# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>3</b>
<b>1 Consignes de sécurité et calcul des incertitudes</b>	<b>4</b>
1.1 Consignes de sécurité en salle de TP . . . . .	4
1.2 Calcul des incertitudes . . . . .	4
<b>2 TP1 : ÉTUDE D'UN TRANSFORMATEUR</b>	<b>7</b>
2.1 BUT . . . . .	7
2.2 THÉORIE . . . . .	7
2.2.1 Définition . . . . .	7
2.2.2 Loi des tensions : le rapport de transformation . . . . .	7
2.2.3 Loi des intensités . . . . .	9
2.2.4 Rendement du transformateur . . . . .	9
2.3 MANIPULATION . . . . .	10
2.3.1 Loi des tensions . . . . .	10
2.3.2 Loi des intensités . . . . .	11
2.3.3 Puissance consommée et calcul des pertes à vide . . . . .	11
2.3.4 4. Le rendement du transformateur et calcul des pertes en charge .	12
<b>3 TP2 : VÉRIFICATION DE LA LOI DE FARADAY</b>	<b>14</b>
3.1 Buts . . . . .	14
3.2 Induction électromagnétique . . . . .	14
3.2.1 Circuit fixe dans un champ magnétique variable . . . . .	14
3.2.2 Circuit mobile dans un champ magnétique permanent . . . . .	14
3.2.3 Loi de Faraday . . . . .	15
3.3 Rappel : Principe de la résonance . . . . .	15
3.4 Procédure expérimentale . . . . .	16
3.4.1 Détermination de l'inductance propre et de la résistance d'une bobine	16
3.4.2 Vérification de la loi de Faraday . . . . .	16
<b>4 TP3 : Capacité des sphères métalliques et d'un condensateur sphérique</b>	<b>18</b>
4.1 Buts . . . . .	18
4.2 Théorie . . . . .	18
4.2.1 Définition . . . . .	18
4.2.2 Capacité . . . . .	20
4.2.3 Détermination de la capacité de trois sphères métalliques de dia- mètres différents . . . . .	21
4.2.4 Détermination de la capacité d'un condensateur sphérique . . . . .	23

# Avant-propos

Le présent fascicule de travaux pratiques est destiné aux étudiants de première année de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Mohammedia, inscrits dans les parcours suivants :

- Génie Informatique (GI)
- Génie Électronique et Systèmes Embarqués (GESE)
- Génie des Procédés (GP)
- Mathématiques et Science des Données (MSD)

Il accompagne les modules P121 et P221 intitulés « Électricité » et vise à renforcer la compréhension des concepts fondamentaux de l'électrocinétique et de l'électromagnétisme à travers des expérimentations pratiques en laboratoire.

L'objectif principal de ce document est de permettre aux étudiants d'acquérir des compétences pratiques en électricité en appliquant les notions théoriques développées en cours. Les travaux proposés dans ce fascicule couvrent trois expériences fondamentales :

1. **Étude d'un transformateur** : Cette manipulation permet d'examiner le fonctionnement d'un transformateur électrique en régime sinusoïdal. Les étudiants seront amenés à vérifier les lois régissant les rapports de tensions et d'intensités, ainsi qu'à calculer le rendement et les différentes pertes énergétiques de ce dispositif.
2. **Vérification de la loi de Faraday** : L'objectif de cette séance est double : d'une part, déterminer expérimentalement l'inductance propre et la résistance interne d'un circuit électrique ; d'autre part, valider la loi de Faraday relative à l'induction électromagnétique.
3. **Capacité des sphères métalliques et d'un condensateur sphérique** : Cette expérience vise à mesurer la capacité électrique de trois sphères métalliques de diamètres différents et à analyser les caractéristiques d'un condensateur de géométrie sphérique.

## Compétences développées

À l'issue de ces travaux pratiques, vous saurez manipuler les instruments de mesure (multimètres, oscilloscopes, générateurs), interpréter les phénomènes physiques observés, calculer les incertitudes et analyser les données expérimentales, et rédiger des comptes rendus scientifiques structurés.

## Recommandations aux étudiants

Pour réussir vos travaux pratiques, nous insistons sur trois points essentiels :

- **Sécurité** : Respectez impérativement les consignes de manipulation des appareils sous tension.
- **Rigueur** : Appliquez scrupuleusement les protocoles expérimentaux.
- **Ponctualité** : Remettez vos comptes rendus dans les délais fixés.

Ce fascicule est votre guide pratique. Il vous permettra d'acquérir les compétences fondamentales en électricité, indispensables pour votre réussite académique et votre future carrière d'ingénieur.

*L'équipe pédagogique*

# 1 Consignes de sécurité et calcul des incertitudes

## 1.1 Consignes de sécurité en salle de TP

La sécurité est primordiale lors des travaux pratiques d'électricité. Ces consignes visent à protéger les étudiants et le matériel.

### Avant la manipulation

- **Vérification du matériel** : Contrôler l'état des câbles et des connexions. Ne pas utiliser de matériel endommagé.
- **Environnement de travail** : La paillasse doit être propre, sèche et dégagée.
- **Équipements de protection** : Porter des lunettes de sécurité et des gants isolants si nécessaire. Utiliser des outils à isolation électrique.

### Pendant la manipulation

- **Coupure d'alimentation** : Ne jamais modifier un montage sous tension. Couper l'alimentation avant toute intervention.
- **Respect du protocole** : Suivre scrupuleusement les instructions. Ne pas réaliser d'expériences non prévues.
- **Surveillance** : Vérifier le bon fonctionnement des dispositifs de protection (disjoncteurs, fusibles).

### En cas d'incident

- Couper immédiatement l'alimentation générale.
- Prévenir l'enseignant responsable.
- Connaître l'emplacement des extincteurs et du matériel de premiers secours.

## 1.2 Calcul des incertitudes

L'évaluation des incertitudes permet de juger de la fiabilité des résultats expérimentaux.

### Types d'erreurs

- **Erreurs systématiques** : Liées à l'appareil de mesure (précision du constructeur). Elles affectent toutes les mesures dans le même sens.
- **Erreurs aléatoires** : Liées aux variations imprévues lors des mesures. Elles sont réduites par la répétition des mesures.

### Traitement statistique des mesures

Pour  $n$  mesures d'une grandeur  $x$  :  $x_1, x_2, \dots, x_n$

La valeur moyenne est donnée par :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

L'incertitude de type A (évaluation statistique) s'exprime par l'écart-type expérimental :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

L'incertitude-type sur la moyenne est :

$$u(\bar{x}) = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$$

### Incertitude de type B

Elle est généralement fournie par le constructeur de l'appareil. Pour un appareil de classe  $p$  et de calibre  $C$  :

$$u_B = \frac{p \times C}{100\sqrt{3}}$$

### Propagation des incertitudes

Pour une grandeur  $f$  dépendant de plusieurs variables mesurées  $x, y, z$  :

$$f = f(x, y, z)$$

L'incertitude-type composée s'écrit :

$$u_c(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 u^2(x) + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 u^2(y) + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 u^2(z)}$$

### Cas particuliers fréquents :

— **Addition ou soustraction** :  $f = x + y$  ou  $f = x - y$

$$u_c(f) = \sqrt{u^2(x) + u^2(y)}$$

— **Multiplication ou division** :  $f = x \times y$  ou  $f = x/y$

$$\frac{u_c(f)}{f} = \sqrt{\left(\frac{u(x)}{x}\right)^2 + \left(\frac{u(y)}{y}\right)^2}$$

— **Puissance** :  $f = x^n$

$$\frac{u_c(f)}{f} = |n| \frac{u(x)}{x}$$

### Présentation des résultats

Un résultat expérimental s'écrit sous la forme :

$$Q = (\text{valeur mesurée} \pm \text{incertitude}) \times \text{unité}$$

Exemple :  $R = (150 \pm 2) \Omega$  avec un niveau de confiance de 95%.

## Application aux TP d'électricité

Pour la vérification de la loi de Faraday, la force électromotrice induite est donnée par :

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

L'incertitude sur  $\mathcal{E}$  dépend des incertitudes sur la mesure du flux  $\Phi$  et du temps  $t$ .  
Pour l'étude du transformateur, le rapport de transformation est :

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

L'incertitude relative sur  $m$  s'écrit :

$$\frac{\Delta m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta U_1}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_2}{U_2}\right)^2}$$

## Recommandations

- Effectuer au moins 3 mesures pour chaque grandeur.
- Noter systématiquement les incertitudes des appareils utilisés.
- Détailler les calculs d'incertitudes dans le compte rendu.
- Comparer les résultats expérimentaux aux valeurs théoriques en tenant compte des incertitudes.

## 2 TP1 : ÉTUDE D'UN TRANSFORMATEUR

### 2.1 BUT

Nous nous proposons de vérifier les lois des tensions et des intensités et de calculer le rendement et les pertes d'un transformateur.

### 2.2 THÉORIE

#### 2.2.1 Définition

Un transformateur est formé d'un noyau ferromagnétique sur lequel sont bobinés deux enroulements distincts, le primaire et le secondaire, comportant respectivement  $N_1$  et  $N_2$  spires.

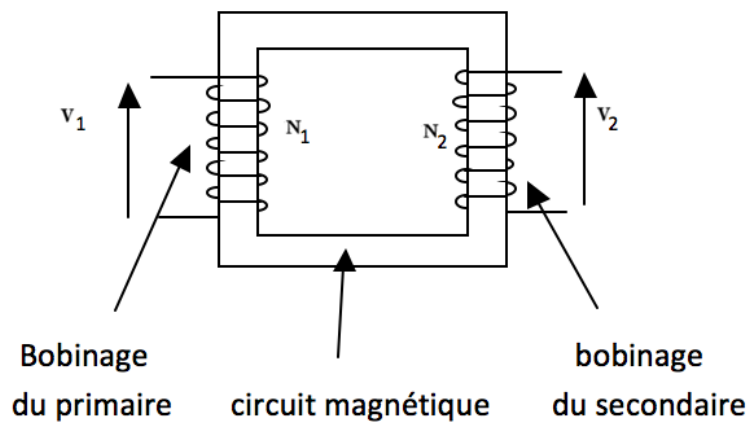


FIGURE 1 – Symbole d'un transformateur

Les principaux phénomènes physiques mis en jeu dans un transformateur sont des phénomènes d'induction électromagnétique : une auto-induction dans chaque enroulement d'une part et une induction mutuelle entre les deux enroulements d'autre part.

#### 2.2.2 Loi des tensions : le rapport de transformation

On considère le schéma simplifié suivant.

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale  $v_1$ . Il est parcouru par un courant alternatif  $i_1$ . Le flux magnétique  $\Phi$  produit par l'enroulement primaire traverse l'enroulement secondaire qui est le siège d'une f.é.m induite sinusoïdale. Une tension sinusoïdale  $v_2$  apparaît alors à ses bornes. L'enroulement secondaire est parcouru par un courant  $i_2$  s'il est fermé sur une charge.

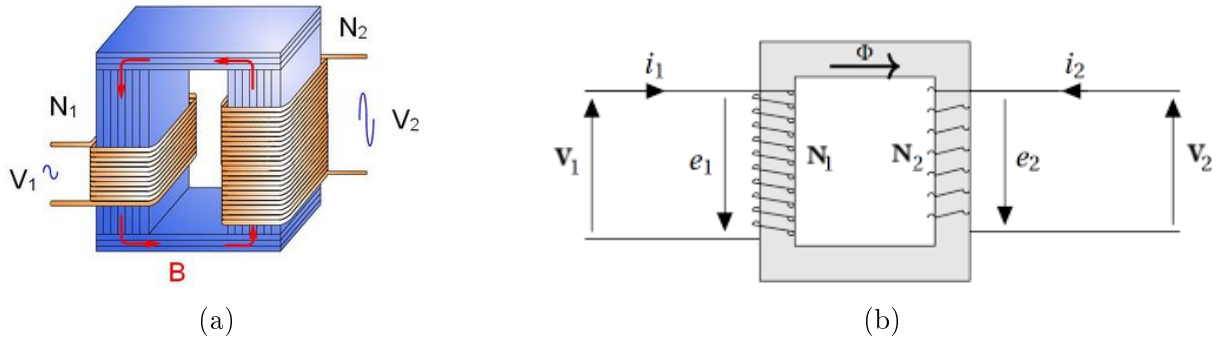


FIGURE 2 – Schéma d'un transformateur monophasé : circuit magnétique et modèle équivalent

Chaque spire des circuits primaire et secondaire est traversée par le flux  $\Phi$  variable et est le siège d'une f.e.m d'induction  $-\frac{d\Phi}{dt}$ . Les f.e.m totales sont respectivement :

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Désignons par  $r_1$  et  $r_2$  les résistances respectives du circuit primaire et secondaire. La loi d'Ohm appliquée aux deux circuits s'écrit

$$v_1 = r_1 i_1 - e_1 \quad \text{soit} \quad v_1 = r_1 i_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$v_2 = r_2 i_2 - e_2 \quad \text{soit} \quad v_2 = r_2 i_2 + N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Les résistances  $r_1$  et  $r_2$  sont toujours très faibles ( $0.6 \Omega$  par exemple pour des bobines de 250 spires). Les chutes de tensions  $r_1 i_1$  et  $r_2 i_2$  sont donc négligeables devant  $v_1$  et  $v_2$  on a alors

$$v_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{et} \quad v_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Le rapport des tensions instantanées :  $\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$  est constant

$$m = \frac{N_1}{N_2} \text{ est le rapport de transformation}$$

Comme la tension  $v$  est sinusoïdale,  $v_1 = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t)$  la tension secondaire vaut :

$$v_2 = \frac{N_2}{N_1} v_1 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

*Remarque 1* : La tension secondaire  $v_2$  est sinusoïdale, de même pulsation que la tension  $v_1$  et elle est en phase avec la tension primaire.

*Remarque 2* : Le rapport des tensions efficaces est égal au rapport des tensions instantanées

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

### 2.2.3 Loi des intensités

Nous allons rechercher une relation approximative entre les intensités des courants primaire et secondaire.

Écrivons le théorème d'Ampère en supposant que l'excitation magnétique  $H$  est constante le long du circuit magnétique :

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum i = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

Dans l'hypothèse d'une perméabilité infinie,  $H = 0$

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 = N_1 i_1 + N_2 i_2$$

Le rapport des intensités peut s'écrire :

$$\frac{i_2}{i_1} = -\frac{N_1}{N_2} = -\frac{1}{m}$$

*Remarque 1* : L'intensité  $i_2$  est sinusoïdale, de même pulsation que l'intensité  $i_1$  et les deux intensités sont en opposition de phase.

*Remarque 2* : Le rapport des intensités efficaces s'écrit :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

### 2.2.4 Rendement du transformateur

Les pertes dans un transformateur sont dues principalement à :

- Effet Joule :  $r_1 I_1^2$  et  $r_2 I_2^2$  qui sont les pertes calorifiques dues à l'échauffement des enroulements.
- Courants de Foucault : sont des courants induits dans les masses métalliques du noyau ferromagnétique et qui provoquent leur échauffement.
- L'hystérésis : un phénomène magnétique lié à l'aimantation du noyau ferromagnétique qui absorbe de l'énergie et qui n'est pas totalement restituée lors de sa désaimantation. Cette énergie perdue est dissipée sous forme de chaleur dans le noyau.

Désignons par  $P_J$  les pertes en puissance par effet Joule et par  $P_f$  les pertes dans le noyau de fer.

La puissance  $P_1$  absorbée par le primaire est donnée par :

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi$$

La puissance  $P_2$  fournie par le secondaire est donnée par :

$$P_2 = V_2 I_2$$

On peut écrire

$$\boxed{P_1 = P_2 + P_J + P_f} \quad \text{ou encore} \quad P_2 = P_1 - P_J - P_f$$

La puissance  $P_2$  fournie au circuit secondaire est inférieure à la puissance  $P_1$  absorbée par le primaire. Les pertes sont égales à  $P_1 - P_2$ .

Le rendement  $\rho$  du transformateur est défini par le rapport :

$$\rho = \frac{P_2}{P_1}$$

Pour un transformateur réel,  $\rho$  est toujours inférieur à 1.

## 2.3 MANIPULATION

**Attention :** vous avez à utiliser au cours de cette manipulation des multimètres pouvant servir d'ampèremètres (pour la mesure des intensités continues ou alternatives) ou de voltmètres (pour la mesure des tensions continues ou alternatives). Ces appareils sont les principales victimes de toute maladresse, il est donc utile de rappeler les conseils suivants avant tout branchement :

### 2.3.1 Loi des tensions

**Transformateur à vide** Réaliser le montage représenté sur la figure 3. L'enroulement primaire est relié à un générateur de tension sinusoïdale variable :  $0 \dots 13 \text{ V}$ .

Les enroulements du transformateur sont caractérisés par :

$$N_1 = 500 \text{ spires}, \quad N_2 = 1000 \text{ spires}.$$

Donner à  $V_1$  les valeurs figurant dans le tableau ci-dessous. Relever les valeurs correspondantes de  $V_2$  puis calculer le rapport  $V_2/V_1$ .

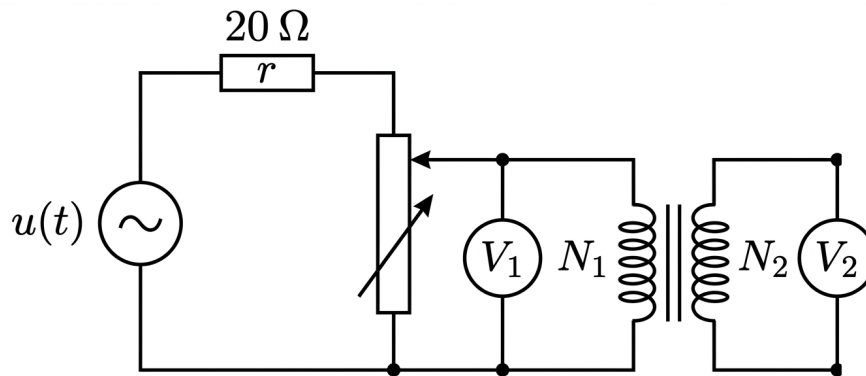


FIGURE 3 – Schéma électrique d'un transformateur monophasé à vide

Mesure n°	1	2	3	4	5
$V_1$ (volts)	2	4	6	8	10
$V_2$ (volts)					
$V_2/V_1$					

#### Conclusion :

Pour le transformateur à vide, le rapport  $V_2/V_1$  est-il égal au rapport de transformation  $N_2/N_1$  ? Justifier.

**Transformateur en charge** Compléter le montage précédent en ajoutant une résistance de charge

$$R = 100 \Omega$$

comme le montre la figure 4.

Tracer un tableau identique au précédent.

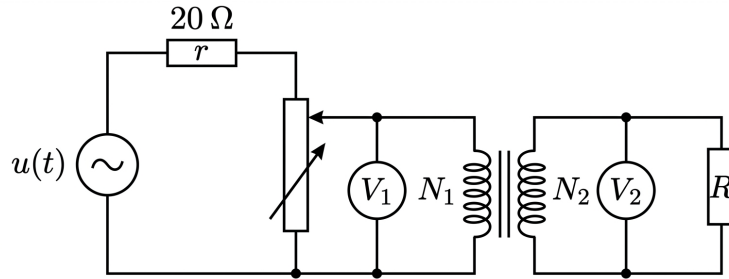


FIGURE 4 – Schéma électrique d'un transformateur monophasé en charge

Donner à  $V_1$  les mêmes valeurs, relever les valeurs correspondantes de  $V_2$ , puis calculer le rapport  $V_2/V_1$ .

**Conclusion :**

Comparer les résultats obtenus à vide et en charge. Conclure.

### 2.3.2 Loi des intensités

Effectuer le montage de la figure 5. La résistance de charge est encore  $R = 100 \Omega$ .

Donner à  $I_1$  les valeurs figurant dans le tableau ci-dessous, relever les valeurs correspondantes de  $I_2$  et calculer les rapports  $I_2/I_1$ .

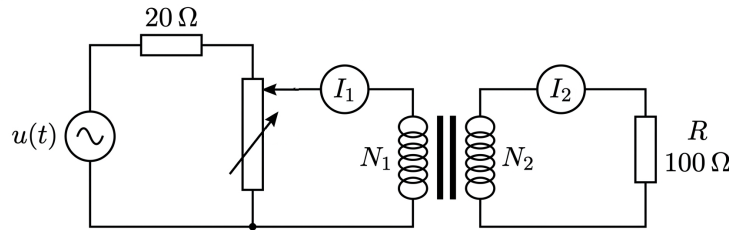


FIGURE 5 – Schéma électrique d'un transformateur monophasé en charge

Mesure n°	1	2	3	4	5
$I_1$ (mA)	20	40	60	80	100
$I_2$ (mA)					
$I_2/I_1$					

**Conclusion :** La loi des intensités est-elle vérifiée de façon satisfaisante ?

On pourra utilement comparer l'intensité efficace à vide  $I_{10}$  (ouvrir le circuit secondaire) à l'intensité primaire en charge  $I_1$ .  $I_{10}$  est-elle négligeable devant  $I_1$  ?

### 2.3.3 Puissance consommée et calcul des pertes à vide

Réaliser le montage de la figure ci-dessous.

Soit  $I_{10}$  l'intensité efficace à vide du primaire (lorsque le secondaire est ouvert). La puissance absorbée par le primaire à vide est :

$$P_{10} = \frac{V^2 - V_{30}^2 - V_{10}^2}{2r}$$

Cette puissance à vide est absorbée sous deux formes par le primaire :

$$P_J = r_1 I_{10}^2$$

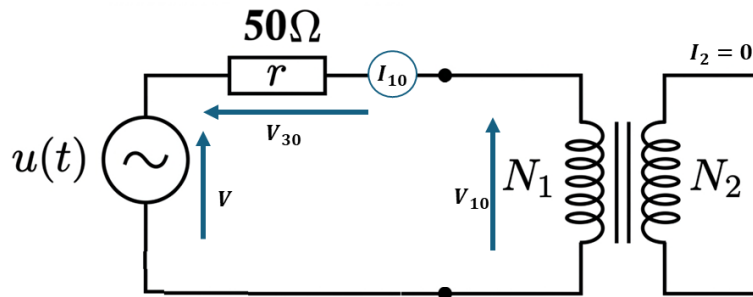


FIGURE 6 – Schéma électrique d'un transformateur monophasé à vide

1. Par effet Joule dans l'enroulement.
2. Dans le noyau de fer :  $P_f$  (pertes dans le noyau de fer)

$$P_1 = r_1 I_1^2 + P_f$$

Calculer les pertes par effet Joule  $P_J$  et en déduire les pertes dans le noyau de fer  $P_f$ . Présenter l'ensemble de ces résultats sous forme d'un tableau.

La résistance de l'enroulement primaire ( $N_1 = 500$  spires) est  $r_1 = 2,3 \Omega$ .

$V$	$V_3$	$V_1$	$I_1$	$P_1$	$P_J$	$P_f$

#### 2.3.4 4. Le rendement du transformateur et calcul des pertes en charge

Réaliser le montage suivant :

La puissance  $P_1$  absorbée par le primaire du transformateur en charge est donnée par :

$$P_1 = \frac{V^2 - V_1^2 - V_1^2}{2r} \quad (\text{formule à vérifier})$$

La puissance  $P_2$  fournie par le secondaire est donnée par :  $P_2 = V_2 I_2$ .

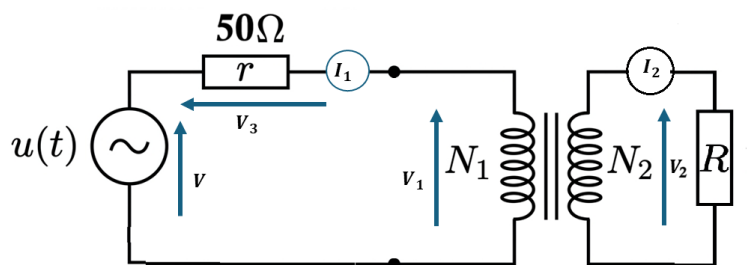


FIGURE 7 – Schéma électrique d'un transformateur monophasé en charge

1. Mesurer les quantités  $V$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $I_1$ , et  $I_2$ , calculer les puissances  $P_1$  et  $P_2$  et le rendement  $\rho$  du transformateur. Présenter l'ensemble des résultats sous forme d'un tableau.

$V$	$V_3$	$V_1$	$I_1$	$I_1$	$P_1$	$P_2$	$\rho$

La différence  $\Delta P = P_1 - P_2$  représente les pertes dues à l'effet Joule dans les deux enroulements, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le noyau de fer.

2. Calculer  $\Delta P$ , les pertes dues à l'effet Joule  $P_J$  et en déduire les pertes dans le noyau de fer  $P_f$ .

La résistance de l'enroulement secondaire ( $N_2 = 1000$  spires) est  $r_2 = 9,5 \Omega$ .

## 3 TP2 : VÉRIFICATION DE LA LOI DE FARADAY

### 3.1 Buts

- Déterminer l'inductance propre et la résistance
- Vérifier la loi de Faraday

### 3.2 Induction électromagnétique

#### 3.2.1 Circuit fixe dans un champ magnétique variable

Considérons un circuit (C) fixe placé dans le champ magnétique d'un aimant.

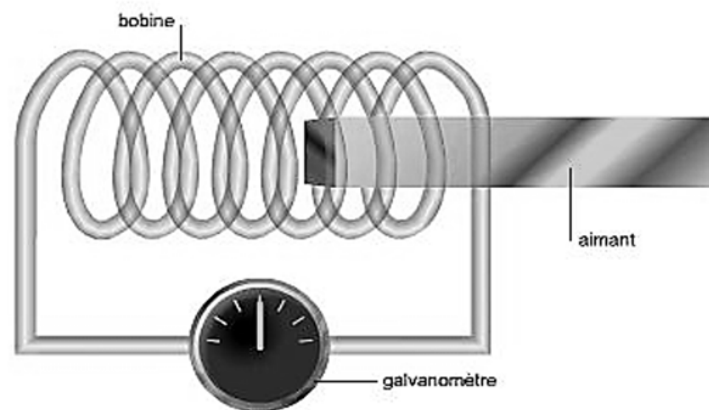


FIGURE 8 – Mise en évidence du phénomène d'induction électromagnétique

Lorsque l'aimant est déplacé, le champ magnétique traversant le circuit varie. On observe alors l'apparition d'une différence de potentiel  $u$  non nulle aux bornes du circuit. Ce phénomène constitue une illustration de l'induction électromagnétique.

#### 3.2.2 Circuit mobile dans un champ magnétique permanent

Même observation : une tension non nulle apparaît si on laisse l'aimant immobile mais que l'on déplace le circuit.

Apparition d'une force électromotrice (f.é.m) induite  $e$  (due au champ  $\vec{B}$ ), cette dernière étant due à la variation du champ magnétique ou au mouvement du circuit dans un champ magnétique.

Ces deux expériences permettent de déduire que la variable importante pour expliquer la création d'une f.é.m induite  $e$  dans chacune de ces expériences est le flux du champ magnétique. Toute variation de celui-ci à travers la surface d'un circuit conducteur génère une force électromotrice induite dans ce circuit.

### 3.2.3 Loi de Faraday

Exprimons  $e$  en fonction des variations du champ magnétique ou du mouvement du circuit électrique. L'expérience montre que l'on peut écrire cette relation de façon très simple en utilisant le flux  $\Phi$  encerclé par le circuit.

Le flux  $\Phi$  encerclé par le circuit est défini comme l'intégrale prise sur la surface encerclée par le circuit (que l'on assimile à un contour fermé).

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

La loi de Faraday, telle qu'énoncée par celui-ci, s'exprime ainsi :

« La force électromotrice induite dans un circuit fermé est proportionnelle au taux de variation du flux du champ magnétique traversant la surface délimitée par le circuit par rapport au temps. »

On démontre que l'expression de la f.é.m (qui s'exprime en volts) est  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ .

Le signe négatif qui apparaît dans cette expression s'exprime avec la loi de Lenz : « L'effet de la f.é.m induite est tel qu'il s'oppose à la variation de flux qui le produit. »

Une bobine caractérisée par une inductance  $L$  et une résistance interne  $r$ , est parcourue par un courant d'intensité  $i$ . Lorsque cette intensité varie dans le temps, il apparaît dans la bobine un phénomène d'auto-induction qui tend à s'opposer aux variations de  $i$  et du flux propre. Tout se passe comme s'il existait dans la bobine un générateur de force électromotrice donnée par l'expression :

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

Dans ces conditions, la tension  $U_L$  aux bornes de la bobine ( $L, r$ ) est égale à :

$$U_L = ri + L \frac{di}{dt}$$

C'est l'expression de la loi de Faraday que nous nous proposons de vérifier.

### 3.3 Rappel : Principe de la résonance

Rappelons qu'un circuit RLC en série peut être inductif ou capacitif selon le rapport de grandeur entre la réactance inductive et la réactance capacitive.

Toutefois, lorsque les effets des réactances s'annulent, c'est-à-dire  $X_L = X_C$ , le circuit n'est ni inductif ni capacitif. Il s'agit là d'un phénomène tout particulier appelé résonance. L'impédance du circuit est alors à son minimum et est simplement égale à la résistance du circuit. Elle est purement résistive :

$$Z = r + r_g$$

Puisque l'impédance d'un circuit RLC en résonance est à son minimum, le courant du circuit est à son maximum.

La tension aux bornes du condensateur et celle aux bornes de la bobine sont également à leur maximum. C'est pourquoi lors de la prise des mesures d'un circuit RLC en résonance, il est nécessaire de prendre toutes les précautions qui s'imposent.

### 3.4 Procédure expérimentale

#### 3.4.1 Détermination de l'inductance propre et de la résistance d'une bobine

On considère le montage représenté sur la figure (a), où une bobine (caractérisée par son inductance  $L$  et sa résistance interne  $r$ ) est associée à un condensateur  $C$  et alimentée par un générateur sinusoïdal  $G$ .

Connaissant  $C$  et la pulsation de résonance  $\omega_0$ , on peut déterminer  $L$ . De même, on peut déduire  $r$  en exploitant la condition de résonance (en négligeant la résistance interne du générateur).

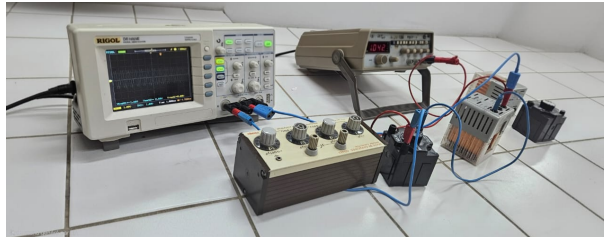


FIGURE 9 – Montage expérimental

1. Montrer qu'à la résonance on a :  $LC\omega_0^2 = 1$ .
2. Fixer  $C$  à une valeur donnée et faire varier la fréquence  $f$  jusqu'à la résonance. En déduire la valeur de l'inductance  $L$  et de la résistance  $r$  de la bobine (on néglige la résistance interne du générateur).

#### 3.4.2 Vérification de la loi de Faraday

On considère maintenant les montages des figures (b) et (c). Le circuit comporte un générateur de signaux triangulaires de fréquence  $f$ , une résistance  $R = 10^4 \Omega$  et une bobine d'inductance  $L$  et de résistance interne  $r$ .

Les conditions expérimentales sont telles que :  $r \ll R$  et la tension induite  $L \frac{di}{dt}$  est prédominante.

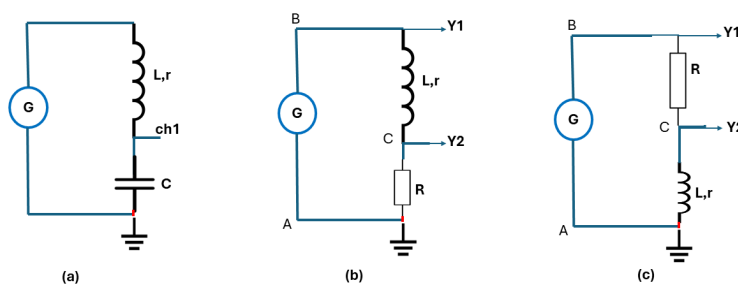


FIGURE 10 – Montages expérimentaux pour l'étude d'un circuit RL/LC et la vérification de la loi de Faraday

1. On considère le montage de la figure (b). Comparer, pour différentes fréquences, les tensions  $U_{AB}$  (aux bornes du générateur  $G$ ) et  $U_{AC}$  (aux bornes de la résistance  $R$ ). Conclure.
2. On considère ensuite le montage de la figure (c).
  - a. Trouver une relation entre  $U_{AC}$ ,  $L$ ,  $R$  et  $\frac{dU_{AB}}{dt}$ .

- b. Visualiser les tensions respectives aux bornes de la résistance  $R$  et de la bobine ( $L, r$ ). Interpréter leurs variations en utilisant la relation déterminée en 2.a).
- c. Calculer l'inductance  $L$  de la bobine.
- d. Faire varier la fréquence du générateur sans modifier l'amplitude du signal. Interpréter les variations de  $U_{AB}$  et  $U_{AC}$ .

## 4 TP3 : Capacité des sphères métalliques et d'un condensateur sphérique

### 4.1 Buts

- Détermination de la capacité de deux sphères métalliques de diamètres différents.
- Détermination de la capacité d'un condensateur sphérique.

### 4.2 Théorie

#### 4.2.1 Définition

L'élément élémentaire de circuit destiné au stockage de charge électrique est appelé **condensateur**. La propriété d'un système à stocker une charge électrique est appelée **capacité**. Tout objet susceptible d'être chargé électriquement possède une capacité.

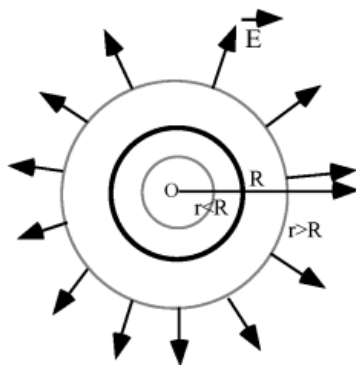
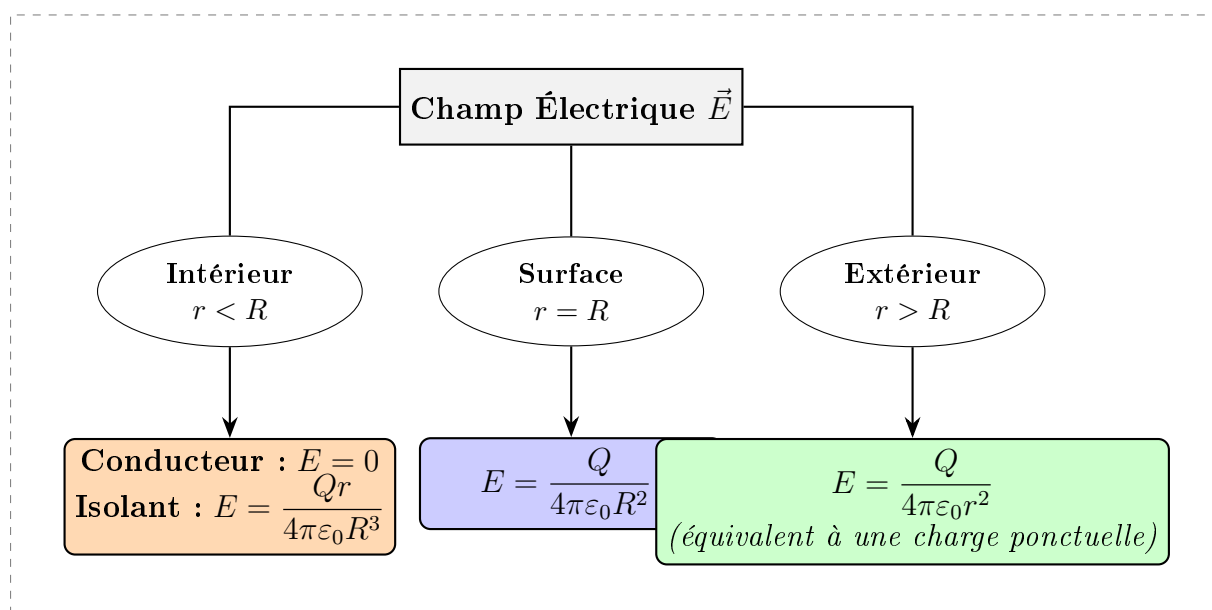


FIGURE 11 – Sphère conductrice et surfaces gaussiennes

Représentation structurée du champ électrique  $\vec{E}$  en fonction de la position par rapport au rayon  $R$  d'une sphère chargée :



- **Zone intérieure** : Dans un conducteur à l'équilibre électrostatique, le champ électrique est nul car les charges se répartissent uniquement à la surface.
- **Surface** : Le champ atteint sa valeur maximale à la surface.
- **Zone extérieure** : Le champ décroît en  $1/r^2$ , comme celui d'une charge ponctuelle.

Considérons maintenant deux conducteurs portant des charges de même valeur absolue et de signes opposés. Un tel système constitue un **condensateur**.

Une différence de potentiel  $\Delta V$  apparaît entre les conducteurs en raison de la présence des charges. L'expérience montre que la charge  $Q$  emmagasinée est proportionnelle à la différence de potentiel appliquée :

$$Q \propto \Delta V$$

On peut écrire :

$$Q = C \Delta V$$

où  $C$  est la **capacité** du condensateur.

**Définition :**

$$C = \frac{Q}{\Delta V}$$

La capacité représente donc l'aptitude d'un condensateur à stocker de la charge par unité de différence de potentiel.

**Unité :**

L'unité SI de la capacité est le **farad (F)** :

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{C}}{\text{V}}$$

En pratique, le farad est une unité très grande. On utilise plus fréquemment :

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$$

$$1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$$

$$1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$$

Dans les circuits électriques, le terme *capacité* désigne généralement la **capacité mutuelle** entre deux conducteurs (par exemple les deux plaques d'un condensateur plan, ou les deux sphères concentriques d'un condensateur sphérique).

Cependant, un conducteur isolé possède également une propriété appelée **auto-capacité**. Elle correspond à la charge nécessaire pour élever son potentiel d'une unité.

**Exemple : sphère conductrice isolée**

Considérons une sphère conductrice de rayon  $R$  portant une charge  $Q$  uniformément répartie sur sa surface.

- À l'intérieur du conducteur ( $r < R$ ), le champ électrique est nul.
- À l'extérieur ( $r > R$ ), le champ est identique à celui d'une charge ponctuelle  $Q$  placée au centre :

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

Le potentiel à la surface vaut :

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

La capacité de la sphère isolée est donc :

$$C = \frac{Q}{V} = 4\pi\epsilon_0 R$$

#### 4.2.2 Capacité

Le champ électrique est constant et perpendiculaire à la surface de la sphère en chaque point, ainsi le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  et le vecteur surface  $d\vec{S}$  sont parallèles l'un à l'autre. En prenant l'intégrale sur toute la surface, on peut écrire le flux électrique sous la forme :  $\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} = ES$  sur la surface. Si nous appliquons la loi de Gauss pour la surface gaussienne sphérique pour le rayon  $r < a$ , qui est concentrique avec la coque sphérique conductrice comme le montre la figure 1.2(c), nous pouvons voir à partir de l'équation (1.1) que le champ électrique est égal à zéro pour  $r < a$ , puisqu'il n'y a pas de charge dans la sphère conductrice.

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} = ES = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

Par contre, du fait de la symétrie sphérique de la répartition des charges, le champ extérieur est le même que  $\vec{E}$ , dû à une charge ponctuelle  $Q$  située au centre de la coque. Par conséquent, en dehors de la sphère conductrice,  $r > a$ , le flux de champ électrique est :

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint E dS = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1.2)$$

Le champ électrique est constant et perpendiculaire à la surface de la sphère en chaque point, ainsi le vecteur champ électrique  $\vec{E}$  et le vecteur surface  $d\vec{S}$  sont parallèles l'un à l'autre. En prenant l'intégrale sur toute la surface, on peut écrire le flux électrique sous la forme :

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \oint dS = E(4\pi r^2) \Rightarrow E = \frac{Q}{4\pi r^2 \epsilon_0} \quad (1.3)$$

La valeur de tension  $\Delta V$ , qui est mesurée au moyen de l'amplificateur, permet de déterminer la valeur de charge correspondante sur la sphère conductrice isolée :

$$Q = (C_i + C_A)\Delta V \quad (1.8)$$

La capacité du conducteur sphérique est trop petite par rapport à la capacité du condensateur,  $C_i \ll C_A$ . Sous cette hypothèse, si l'équation (1.8) est réarrangée, la charge sur la sphère conductrice peut donc être négligée.

$$Q = Q_k = C_A \Delta V \quad (1.9)$$

Lorsque le potentiel  $U$  est appliqué, la charge accumulée sur la sphère du conducteur peut être calculée avec l'équation (1.10).

$$Q = Q_i = C_i U \quad (1.10)$$

La charge sur la sphère conductrice doit être la même pour les équations (1.9) et (1.10).

$$Q = Q_k = C_A \Delta V = C_i U \Rightarrow \frac{\Delta V}{U} = \frac{C_i}{C_A} \quad (1.11)$$

Si l'équation (1.11) est réarrangée pour la valeur connue de  $C_A$  et le ratio  $\frac{\Delta V}{U}$ , la capacité des sphères conductrices isolées et du condensateur sphérique peut être calculée avec :

$$C_i = C_A \frac{\Delta V}{U} \quad (1.12)$$

L'expérience se compose de deux parties : (i) Détermination de la capacité de deux sphères métalliques de diamètres différents et (ii) Détermination de la capacité d'un condensateur sphérique.

#### 4.2.3 Détermination de la capacité de trois sphères métalliques de diamètres différents



FIGURE 12 – montage expérimental utilisé pour déterminer la capacité des sphères conductrices

1. Placer une sphère conductrice à mesurer sur les pieds en verre isolant.
2. Connectez la sphère conductrice maintenue sur les pieds isolés à la borne positive de la sortie 10 kV de l'alimentation haute tension au moyen d'un câble haute tension avec une résistance de protection de 10 MΩ. Le pôle négatif est mis à la terre.
3. Pour charger les sphères de différents rayons, réglez la tension de charge sur la valeur  $U$  souhaitée via l'alimentation électrique puis mettre en contact la sphère (liée à la haute tension) et la sphère isolée.
4. Attendez 10 à 15 secondes. À la fin, éloigner les deux sphères et mesurer  $\Delta V$  en touchant l'adaptateur connecté au câble de test BNC sur l'amplificateur. **Ne touchez pas les sphères métalliques pendant les mesures !**
5. Enregistrez les valeurs mesurées au voltmètre dans les tableaux correspondants.

**Avertissement 1 :** Il y aura une variation de tension sur le condensateur de 10 nF à cause des décharges électriques. Par conséquent, la première valeur vue sur le voltmètre doit être prise à chaque mesure.

**Avertissement 2 :** Il est important de noter qu'avant chaque mesure, la sphère de test doit être déchargée par contact avec le câble de liaison à la terre libre, et s'assurer que l'amplificateur est réinitialisé en appuyant sur le bouton le plus à gauche de l'amplificateur. **N'appliquez jamais de haute tension à l'entrée de l'amplificateur.**

Prenez vos mesures pour les deux sphères conductrices ( $2R_1 = 2 \text{ cm}/4 \text{ cm}/12 \text{ cm}$ ) et remplissez les valeurs de  $\Delta V$  dans des tableaux comme le suivant.

$2R_1 = 2 \text{ cm}/4 \text{ cm}/12 \text{ cm}$	
$U$ (kV)	$\Delta V$ (V)
1.0	
2.0	
3.0	
4.0	

1. Pour chaque sphère métallique, tracez les graphiques  $\Delta V - U$  sur l'espace millimétrique sur la fiche réservé, en tant que tension appliquée sur l'axe x :  $U$  et tension de lecture sur l'axe y :  $\Delta V$ . Représentez les données sous forme de points sur votre graphique. D'après l'équation (1.12), nous attendons une ligne sous la forme  $y = mx$  passant par ces points et l'origine, où  $m$  est la pente de la ligne. Dans l'étape suivante, la pente de la ligne doit être calculée en utilisant la « méthode des moindres carrés », ses formules sont données ci-dessous. Tracez la droite  $y = mx$  dont vous avez déterminé la pente sur le graphique.
2. Calculez les pentes des lignes qui correspondent aux points de données sur vos graphiques  $\Delta V - U$  qui sont tracés à l'étape précédente. Dans les formules suivantes, les  $x_i$  représentent les valeurs  $U$  sur l'axe des  $x$ , tandis que les  $y_i$  représentent les valeurs  $\Delta V$  sur l'axe y de vos graphiques.  $k$  est le nombre de données utilisées dans les calculs. (Montrez vos calculs dans les sections vides ci-dessous.)

$$m_1 = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i}{\sum_{i=1}^k x_i^2} \quad \left( m_1 = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i}{\sum_{i=1}^k x_i^2} \right)$$

3. Remplacez la pente  $m = \frac{\Delta V}{U}$  (valeurs obtenues à partir des calculs d'ajustement linéaire) avec  $C_k = 10 \text{ nF}$  dans l'équation  $C_i = C_k \frac{\Delta V}{U} = C_k m$  et calculez la capacité

expérimentale (valeurs) des sphères conductrices.

$$C_1 = \dots \text{ As/V} = \dots \text{ pF}$$

$$C_2 = \dots \text{ As/V} = \dots \text{ pF}$$

4. Calculez la capacité théorique des sphères conductrices à l'aide de la formule  $C = \frac{Q}{\Delta V} = 4\pi\epsilon_0 R$  [ $\epsilon_0 = 8,86 \times 10^{-12} \text{ As/Vm}$ ]

$$C_1 = \dots \text{ As/V} = \dots \text{ pF}$$

$$C_2 = \dots \text{ As/V} = \dots \text{ pF}$$

5. Comparez les valeurs expérimentales et théoriques des capacités entre elles et calculez le pourcentage d'erreur relatif.

$$1) \% \text{ erreur relative} = \frac{|C_{\text{expérimentale}} - C_{\text{théorique}}|}{C_{\text{théorique}}}$$

$$2) \% \text{ erreur relative} = \frac{|C_{\text{expérimentale}} - C_{\text{théorique}}|}{C_{\text{théorique}}}$$

#### 4.2.4 Détermination de la capacité d'un condensateur sphérique



FIGURE 13 – dispositif expérimental utilisé pour déterminer la capacité d'un condensateur sphérique

Pour déterminer la capacité du condensateur sphérique, le montage expérimental est modifié comme le montre la figure 1.4. Les hémisphères Cavendish sont assemblés de manière à former une sphère complète avec un petit orifice circulaire au sommet. La sphère avec surface conductrice est suspendue à un fil de cuivre au centre de la sphère. Le fil de cuivre est conduit à travers un tube capillaire en verre qui est enveloppé dans une feuille d'aluminium mise à la terre pour neutraliser les capacités parasites (Fig. 1.4).

La feuille d'aluminium ne touche pas les hémisphères. Avant de connecter la résistance de protection de  $10 \text{ M}\Omega$ , la sphère intérieure doit être connectée à la prise centrale de l'alimentation haute tension en utilisant la pince crocodile attachée au cordon haute tension. La prise inférieure est à nouveau mise à la terre.

Les mesures des hémisphères doivent être prises pendant que les hémisphères sont connectés à l'alimentation électrique, contrairement à la première partie de l'expérience. Après chaque mesure, les demi-sphères doivent être déchargées avec le cordon de mise à la terre libre. Ce faisant, il faut s'assurer qu'aucune haute tension n'est induite.

Pour le condensateur sphérique, remplissez le tableau suivant. Écrivez les unités de vos valeurs mesurées.

$R_1 = 2 \text{ cm}, R_2 = 6 \text{ cm}$				
$U \text{ (V)}$	$\Delta V_1 \text{ (V)}$	$\Delta V_2 \text{ (V)}$	$\Delta V_3 \text{ (V)}$	$\Delta V_{\text{moyen}} \text{ (V)}$
1	100			
2	200			
3	300			
4	400			

- Tracez le graphique  $\Delta V - U$  sur l'espace millimétrique réservé, en tant que tension appliquée  $U$  sur l'axe des  $x$  et tension de lecture  $\Delta V$  sur l'axe des  $y$ . Représentez ces données sous forme de points sur votre graphique. Selon l'équation (1.12), nous nous attendons à ce qu'une droite sous la forme  $y = mx$  passe par ces points et l'origine, où  $m$  est la pente de la droite. La pente de la ligne doit être calculée par la « méthode des moindres carrés », ses formules sont données ci-dessous. Tracez la droite  $y = mx$ , dont vous avez déterminé la pente sur le graphique.
- Calculez la pente de la ligne qui correspond aux points de données sur votre graphique  $\Delta V - U$ , qui est tracé à l'étape précédente. Dans les formules suivantes, les  $x_i$  représentent les valeurs  $U$  sur l'axe des  $x$ , tandis que les  $y_i$  représentent les valeurs  $\Delta V$  sur l'axe des  $y$  de vos graphiques.  $k$  est le nombre de données utilisées dans les calculs. (Montrez vos calculs dans les sections vides ci-dessous.)

$$m = \frac{\sum_{i=1}^k x_i y_i}{\sum_{i=1}^k x_i^2} =$$

- Remplacez la valeur de pente  $m = \frac{\Delta V}{U}$  obtenue à partir du calcul d'ajustement linéaire par  $C_k = 10 \text{ nF}$  connu dans l'équation  $C_i = C_k \frac{\Delta V}{U} = C_k m$ , puis calculez la valeur de capacité expérimentale du condensateur sphérique. (Montrez vos calculs dans les sections vides ci-dessous.)

$$C = \dots \text{ As/V} = \dots \text{ pF}$$

- Calculer la capacité théorique du condensateur sphérique en utilisant la formule  $C = \frac{Q}{\Delta V} = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$  (attention au signe).

$$C = \dots \text{ As/V} = \dots \text{ pF}$$

- Comparez les valeurs expérimentales et théoriques des capacités entre elles et calculez le pourcentage d'erreur relatif. Discutez des causes de l'erreur.

$$\% \text{ erreur relative} = \frac{|C_{\text{expérimentale}} - C_{\text{théorique}}|}{C_{\text{théorique}}}$$