

TP :1 MESURE DES RESISTANCES

(Méthodes Directes)

I. Complément théorique :

I.1) mesures directes

1- Mesure de la résistance par le code des couleurs

La valeur des résistances de faibles puissances (moins de 5W) est généralement inscrite sous forme de code formé de 4, 5 ou 6 anneaux de couleur. Figure.1, 2 et 3 illustrent le code des couleurs formé de 4 et 5 anneaux.

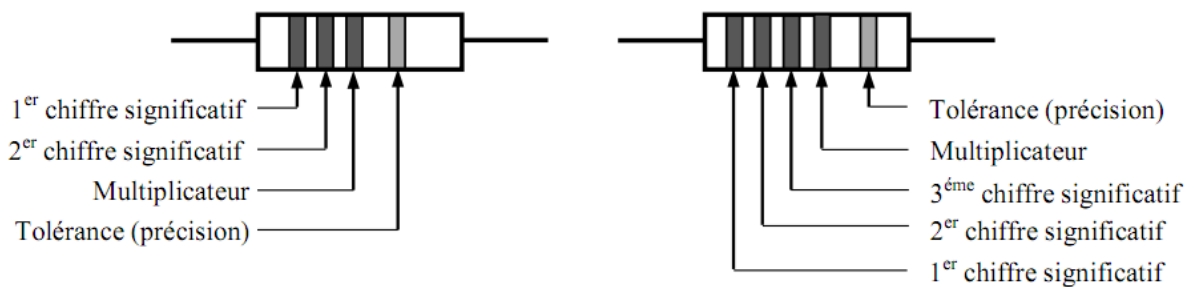


Figure 1. Identification des résistances avec le code des couleurs

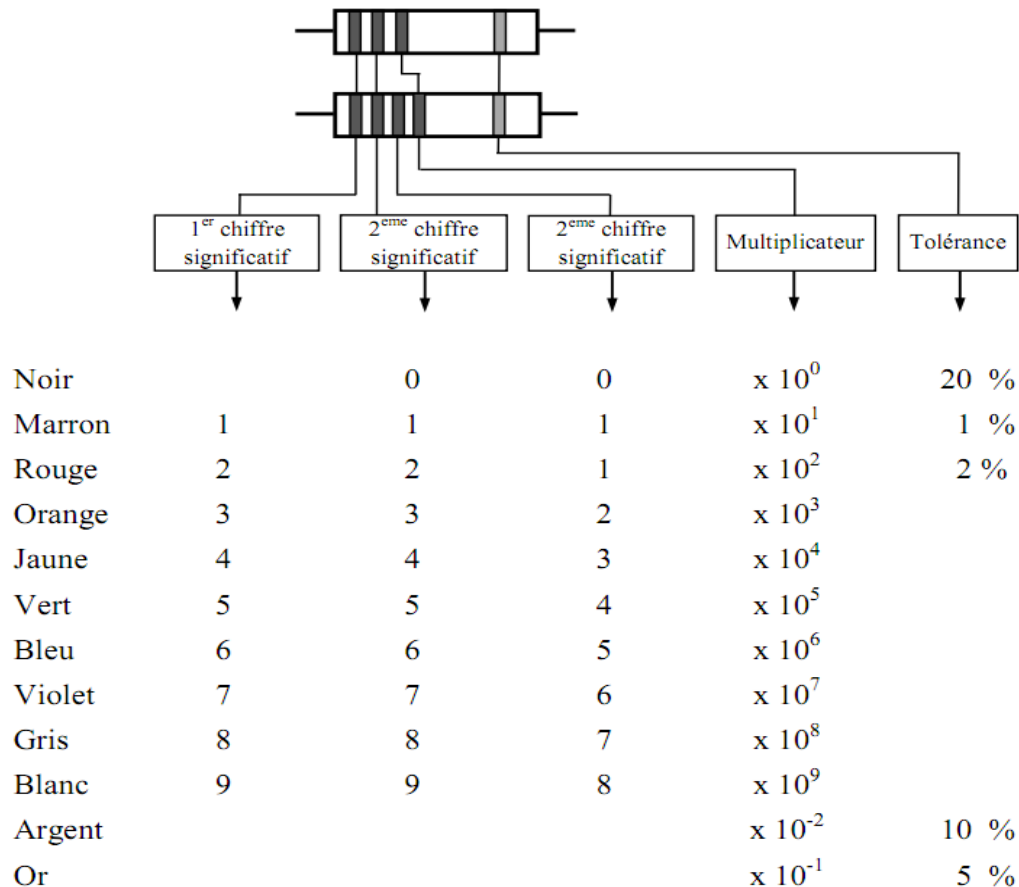


Figure 2 Marquage des résistances avec le code des couleurs

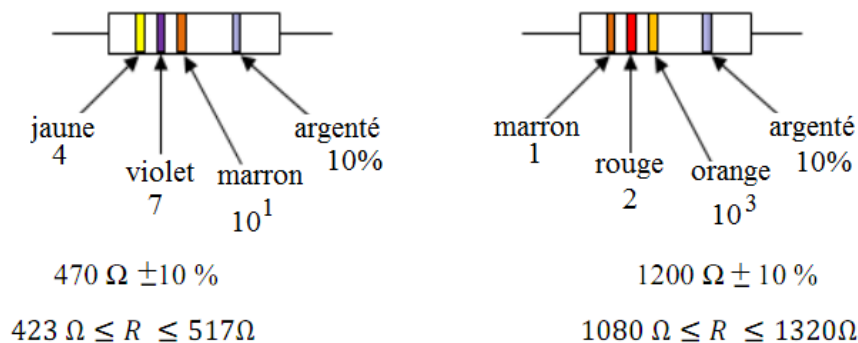


Figure 3. Exemple d'identification de la valeur d'une résistance avec le code des couleurs

2- Mesures à l'ohmmètre.

➤ Principe de l'ohmmètre.

L'appareil fait circuler un courant de faible intensité I (de l'ordre du mA, μ A ou du nA) dans la résistance à mesurer et affiche le résultat $R=U/I$, U étant la tension aux bornes de la résistance.

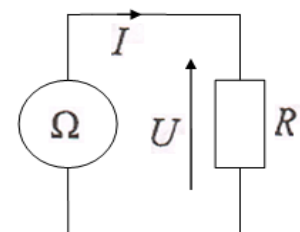


Figure 4. Principe de l'ohmmètre

1.1) Ohmmètre analogique (à déviation ou à aiguille)

➤ Incertitudes due à l'instrument de mesure

R_x : résistance à mesurer.

L'incertitude absolue instrumentale $\Delta R_{x_{inst}}$ due à l'appareil de mesure.

$$\Delta R_{x_{inst}} = \frac{\text{Classe.Calibre}}{100}$$

L'incertitude relative instrumentale peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\Delta R_{x_{inst}}}{R_x}$$

➤ Incertitudes due à la lecture (opérateur)

Incrtitude absolue due la lecture $\Delta R_{x_{opérat}}$ peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta R_{x_{opérat}} = \frac{1}{4} \cdot \text{Division}$$

L'incrtitude relative due la lecture peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\Delta R_{x_{opérat}}}{R_x}$$

2.2) Ohmmètre numérique

La précision des appareils numériques se présente généralement sous la forme suivante :

$\Delta R_x = \text{..?.. \% de la lecture} + \text{..?..digit}(\text{digit : résolution de l'appareil}).$

Incrtitude absolue totale

- pour les appareils à déviation :

$$\Delta R_{x_{totale}} = \Delta R_{x_{inst}} + \Delta R_{x_{opérat}}$$

- pour les appareils à affichage numérique:

$$\Delta R_{x_{totale}} = \Delta R_{x_{inst}}$$

TP :2 MESURE DES RESISTANCES

(Méthodes Indirectes)

I. Complément théorique :

I.1) Méthodes indirectes

1- Mesure des résistances par la méthode Volt-Ampèremétrique

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux mesures des résistances moyennes ($10\Omega < R_x < 1M\Omega$)

Cette méthode consiste à :

- ✓ Mesurer à l'aide d'un Ampèremètre le courant parcourant la résistance inconnue.
 - ✓ Mesurer à l'aide d'un Voltmètre la tension appliquée à la résistance inconnue.
- La résistance mesurée est alors le rapport de la tension mesurée par l'intensité mesurée du courant, soit:

$$R_m = \frac{U_m}{I_m}$$

➤ **Montages utilisés**

Selon l'emplacement du voltmètre par rapport à l'Ampèremètre, on distingue deux types de montages : montage Amont (ou Longue Dérivation) et le montage Aval (ou Courte Dérivation).

1.1) montage Amont (ou Longue Dérivation)

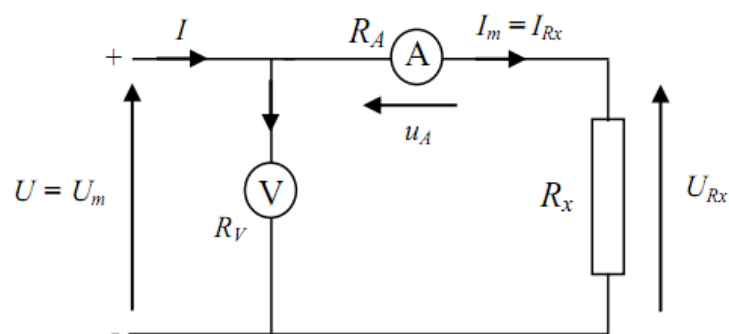


Figure 5. Montage amont

➤ Incertitudes due à la méthode de mesure

La résistance mesurée R_m est donc :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{Rx} + u_A}{I_{Rx}} = \frac{R_x \cdot I_{Rx} + R_A \cdot I_{Rx}}{I_{Rx}} = R_x + R_A \quad \text{soit :} \quad R_m > R_x$$

L'expression de l'incertitude absolue due à la méthode est :

$$\Delta R_{x-meth} = R_m - R_x = R_A$$

Et donc l'incertitude relative due à la méthode a pour expression :

$$\delta R_{x-meth} = \frac{\Delta R_{x-meth}}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} = \frac{R_A}{R_m - R_A}$$

Cette expression montre que l'erreur relative de méthode est d'autant plus faible que la résistance de l'ampèremètre est plus petite devant celle de la résistance à mesurer.

1.2) montage Aval (ou Courte Dérivation)

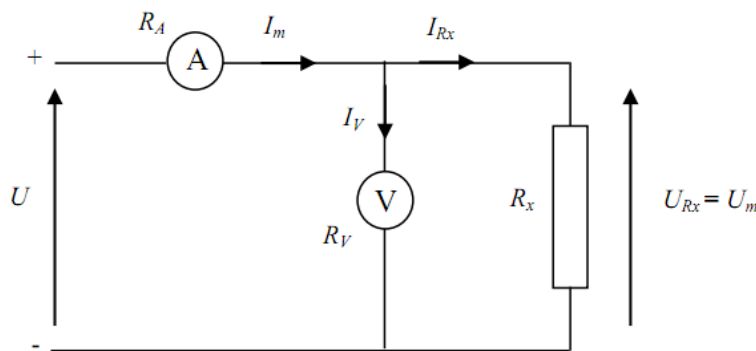


Figure 6. Montage aval

➤ Incertitudes due à la méthode de mesure

La résistance mesurée R_m est donnée par la relation :

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_{Rx}}{I_m} = \frac{R_V \cdot R_x}{R_V + R_x} \quad \text{soit :} \quad R_m < R_x$$

La valeur exacte de la résistance R_x en fonction de la valeur mesurée R_m est donnée par :

$$R_m \cdot (R_V + R_x) = R_V \cdot R_x \quad \Rightarrow \quad R_m \cdot R_V = R_x \cdot (R_V - R_m)$$

$$R_x = \frac{R_m \cdot R_V}{R_V - R_m}$$

L'expression de l'incertitude absolue due à la méthode est alors :

$$\Delta R_{x-meth} = R_m - R_x = R_m - \frac{R_m \cdot R_V}{R_V - R_m} = -\frac{R_m^2}{R_V - R_m}$$

et donc l'incertitude relative due à la méthode a pour expression :

$$\delta R_{x-meth} = \frac{\Delta R_{x-meth}}{R_x} = -\frac{R_m^2 / (R_V - R_m)}{R_m \cdot R_V / (R_V - R_m)} = -\frac{R_m}{R_V}$$

En conclusion, l'erreur relative de méthode est d'autant plus faible que la résistance du voltmètre est plus grande devant celle de la résistance à mesurer.

• Incertitude totale sur le résultat de la mesure

La précision de la mesure, quel que soit le montage utilisé, est donnée par l'incertitude relative en tenant compte des erreurs instrumentales et dues à l'opérateur :

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \left(\frac{\Delta U_{mesurée}}{U_{mesurée}} \right)_{totale} + \left(\frac{\Delta I_{mesurée}}{I_{mesurée}} \right)_{totale} + \left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)_{méthode}$$

les incertitudes sur les mesures de tension et de courant étant donnée par les relations suivantes :

$$\left(\frac{\Delta U_{mesurée}}{U_{mesurée}} \right)_{totale} = \left(\frac{\Delta U_{mesurée}}{U_{mesurée}} \right)_{instr} + \left(\frac{\Delta U_{mesurée}}{U_{mesurée}} \right)_{opérat}$$

$$\left(\frac{\Delta I_{mesurée}}{I_{mesurée}} \right)_{totale} = \left(\frac{\Delta I_{mesurée}}{I_{mesurée}} \right)_{instr} + \left(\frac{\Delta I_{mesurée}}{I_{mesurée}} \right)_{opérat}$$

➤ Choix du montage

Le choix du montage sera fait selon la règle suivante :

- si $R_{x \text{ approchée}} \leq \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (résistances de faibles valeurs) on privilégie le montage aval ;
- si $R_{x \text{ approchée}} \geq \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (résistances de fortes valeurs) on privilégie le montage amont.

2- Mesure des résistances par la méthode de comparaison

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux mesures des résistances faibles ($R_x < 10\Omega$)

• Principe de la méthode

La méthode étudiée consiste à comparer la résistance inconnue R_x à une résistance étalon R_e faible et parfaitement connue, en mesurant au voltmètre les tensions entre leurs bornes.

Les deux résistances sont placées en série dans un même circuit, alimenté par une source de tension continu, et donc parcourut par un même courant I (figure 7).

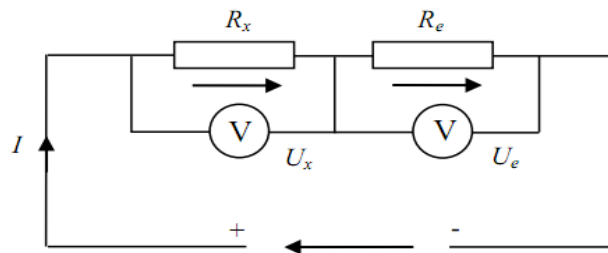


Figure 7 . Schéma de principe pour la méthode de comparaison

Les tensions mesurées par les voltmètres ont alors pour expression :

$$\begin{cases} U_e = R_e \cdot I \\ U_x = R_x \cdot I \end{cases}$$

d'où :

$$R_x = R_e \cdot \frac{U_x}{U_e}$$

➤ Calcul de l'Incertitude totale sur le résultat de mesure

$$\delta R_x = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \left(\frac{\Delta U_{x \text{ mesurée}}}{U_{x \text{ mesurée}}} \right)_{\text{totale}} + \left(\frac{\Delta U_{e \text{ mesurée}}}{U_{e \text{ mesurée}}} \right)_{\text{totale}}$$

$$\left(\frac{\Delta U_{x \text{ mesurée}}}{U_{x \text{ mesurée}}} \right)_{\text{totale}} = \left(\frac{\Delta U_{x \text{ mesurée}}}{U_{x \text{ mesurée}}} \right)_{\text{instr}} + \left(\frac{\Delta U_{x \text{ mesurée}}}{U_{x \text{ mesurée}}} \right)_{\text{opérat}}$$

$$\left(\frac{\Delta U_{e \text{ mesurée}}}{U_{e \text{ mesurée}}} \right)_{\text{totale}} = \left(\frac{\Delta U_{e \text{ mesurée}}}{U_{e \text{ mesurée}}} \right)_{\text{instr}} + \left(\frac{\Delta U_{e \text{ mesurée}}}{U_{e \text{ mesurée}}} \right)_{\text{opérat}}$$

TP :3 MESURE DE CAPACITE

I. Complément théorique :

I.1) Modélisation d'un condensateur réel

Le Condensateur est un composant électronique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices (appelées « électrodes ») séparées par un isolant polarisable (ou « diélectrique »). Sa propriété principale est de pouvoir stocker des charges électriques opposées sur ses armatures. Le condensateur est caractérisé par le coefficient de proportionnalité entre charge et tension appelé capacité électrique et est exprimée en Farads.

Un condensateur se modélise de façon plus ou moins réaliste. En première approximation, on décrit les caractéristiques essentielles du composant : la valeur de la capacité; la résistance série ;la résistance parallèle. En faisant une modélisation plus sophistiquée, on accède à des caractéristiques plus fines.

➤ *Modèle parallèle d'un condensateur*

On observe, en pratique, qu'un condensateur chargé se décharge lentement (baisse de la tension à ses bornes). Ce phénomène de décharge est dû au faible courant de fuite qui traverse le diélectrique placé entre les deux armatures conductrices du condensateur.

Ce fait ne peut être expliqué en utilisant le modèle d'un condensateur parfait caractérisé par sa seule capacité. On modélise donc un condensateur réel par la mise en parallèle d'une capacité C et d'une résistance de grande valeur R_f . Le courant qui circule dans la résistance modélise le phénomène de décharge du condensateur (figure 1).

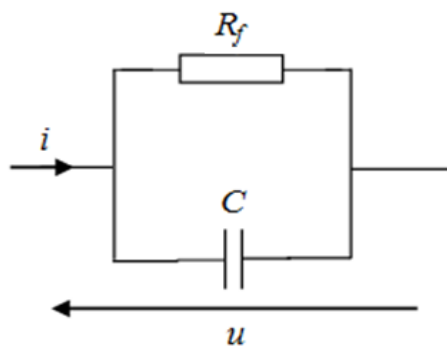


Figure 1 . *Modèle parallèle*

➤ *Modèle série d'un condensateur*

Il est constitué de l'association en série de la capacité C du condensateur en série avec une résistance R_s matérialisant les pertes par effet joule produites par le passage du courant dans le diélectrique placé entre les armatures (figure 2).

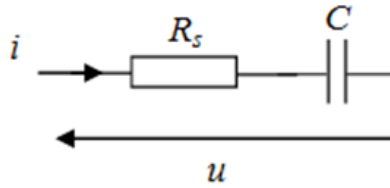


Figure 2. Modèle série

- Représentation vectorielle

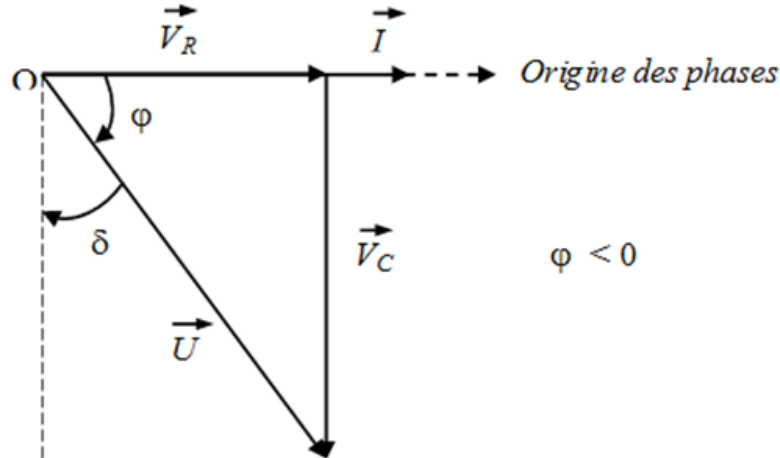


Figure 3. Diagramme de Fresnel pour le modèle série d'un dipôle capacitif

L'angle δ , tel que : $\varphi = (90^\circ - \delta)$, est appelée angle de pertes, il informe sur la qualité du diélectrique.

- Impédance complexe :

$$\underline{Z} = R_s + \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega} = Z \cdot e^{j \cdot \varphi}$$

- Module et argument (déphasage) :

$$Z = \sqrt{R_s^2 + \left(\frac{1}{C \cdot \omega}\right)^2} \quad \varphi = -\arctan\left(\frac{1}{R_s \cdot C \cdot \omega}\right)$$

Le courant est en avance sur la tension d'où un angle de déphasage négatif. La résistance R_s étant très faible, et donc l'angle de fuite également, le condensateur est fortement capacitif, l'angle de déphasage est très proche de -90° (quadrature avant). Les modèles présentés ci-dessus ne sont que des exemples parmi les plus courants, ils permettent d'expliquer les principaux phénomènes. Des situations particulières nécessitant une plus grande précision des résultats, peuvent supposer l'utilisation de modèles plus élaborés.

I.2) Mesure directe

1- Mesures de la capacité par capacimètre

➤ Principe du capacimètre

L'appareil fait circuler un courant de faible intensité I (de l'ordre du mA, μA ou du nA) dans le condensateur à travers une résistance de charge. La tension du condensateur augmente avec le temps t . Le temps nécessaire pour atteindre une certaine tension, est lié aux valeurs de la résistance et la capacité C .

1.1) capacimètre numérique

L'incertitude absolue (la précision) des appareils numériques est généralement sous la forme suivante : $\Delta C_x = \dots\% \text{ de la lecture} + \dots \text{digit (digit : résolution de l'appareil)}$.

I.3) Méthode indirecte

1- Mesure de la capacité par la méthode Volt-Ampèremétrique

Cette méthode ne permet que de déterminer l'impédance d'un condensateur en basses fréquences et la valeur de sa capacité. L'angle de perte, très faible aux fréquences industrielles, ne peut être mesuré, par conséquent elle ne nécessite qu'une seule mesure en alternatif. Aussi la résistance parallèle très grande est négligée. Cette méthode n'est pas applicable aux condensateurs polarisés.

➤ Montage utilisé

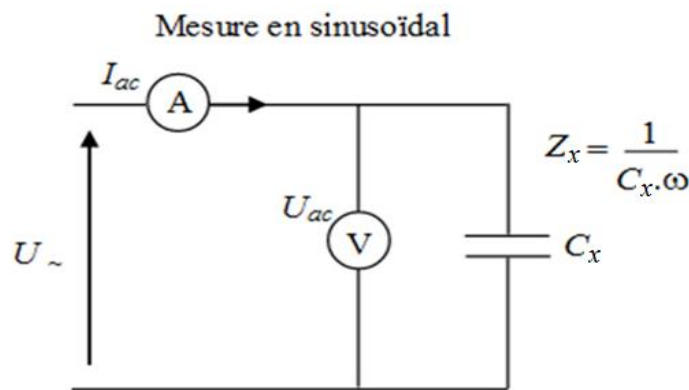


Figure 4. Mesure de l'impédance d'un condensateur en BF

Les différents paramètres sont déterminés par les relations suivantes:

- Impédance réelle
$$Z_x = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = \frac{1}{C_x \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$
- Capacité
$$C_x = \frac{I_{ac}}{U_{ac} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f}$$

Les valeurs mesurées U_{ac} et I_{ac} sont des valeurs efficaces. f est la fréquence de l'alimentation U .

• ***Incertitude relative totale sur le résultat de la mesure***

Puisque on va utiliser que les appareils numériques, donc on va avoir seulement des incertitudes dues à l'instrument de mesure.

$$\delta C_x = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta U_{ac}}{U_{ac}} + \frac{\Delta I_{ac}}{I_{ac}} + \frac{\Delta f}{f}$$

2- mesure de la capacité par la méthode Volt-métrique (méthode des trois voltmètres)

Cette méthode consiste à comparer l'impédance du condensateur, dont on désire déterminer la capacité, à une résistance étalon R_e parfaitement connue, en faisant trois mesures de tension. Le condensateur et la

résistance sont mises en série puis alimentés sous tension sinusoïdale, les valeurs efficaces des tensions U , U_{Re} , U_C sont mesurées à l'aide de trois voltmètres (figure 5).

➤ **Montage utilisé**

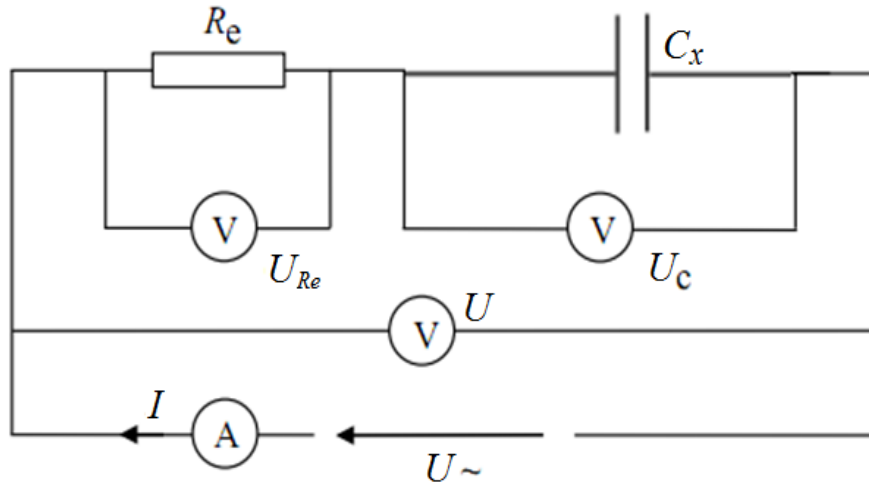


Figure 5. Schéma de principe pour la méthode des trois voltmètres

➤ **Détermination de la capacité du condensateur**

Nous savons que : $U_C = \frac{I}{C_x \omega}$ et que $I = \frac{U_{Re}}{R_e}$. En remplaçant I par sa valeur, on obtient

$$U_C = \frac{\frac{U_{Re}}{R_e}}{C_x \omega} \Rightarrow C_x = \frac{1}{R_e \omega} \frac{U_{Re}}{U_C} \Rightarrow C_x = \frac{1}{2\pi f R_e} \frac{U_{Re}}{U_C}$$

• **Incertitude relative totale sur le résultat de la mesure**

Puisqu'on utilise que les appareils numériques, donc on a seulement des incertitudes dues à l'instrument de mesure.

$$\delta C_x = \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta U_{Re}}{U_{Re}} + \frac{\Delta U_C}{U_C} + \frac{\Delta R_e}{R_e} + \frac{\Delta f}{f}$$

TP :4 Mesure de Puissance en Monophasé

I. Complément théorique :

Les expressions des puissances en courant alternatif sont données par les relations suivantes :

Puissance apparente: $S = VI$ [VA]; $S^2 = P^2 + Q^2$

Puissance active: $P = VI \cos(\varphi)$ [W]

Puissance réactive: $Q = VI \sin(\varphi)$ [VAR]

Avec V et I : valeurs efficaces de la tension simple (entre phase et neutre) et du courant absorbés par le récepteur, φ étant le déphasage entre le courant et la tension.

I.1 Mesure de la puissance apparente S : Méthode indirecte Voltampèremétrique

Pour mesurer la puissance apparente S , il faut utiliser un ampèremètre et un voltmètre pour mesurer les valeurs efficaces du courant et de la tension selon le schéma de montage suivant:

$$S_{mes} = I_{mes} \cdot V_{mes}$$

Si le récepteur est purement résistif, la puissance apparente est la même que la puissance active et $\varphi=0$.

La précision de mesure de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure. L'incertitude relative δS est :

$$\delta S = \frac{\Delta S}{S_{mes}} = \frac{\Delta I}{I_{mes}} + \frac{\Delta V}{V_{mes}}$$

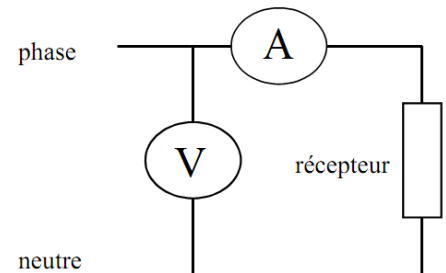


Figure 1: schéma de principe de mesure de la puissance apparente S .

I.2 Mesure de la puissance active P :

1- méthode directe :

Pour mesurer P , il suffit de brancher un wattmètre selon le montage suivant (figure 2) :

La précision de cette méthode dépend de la précision du wattmètre utilisé.

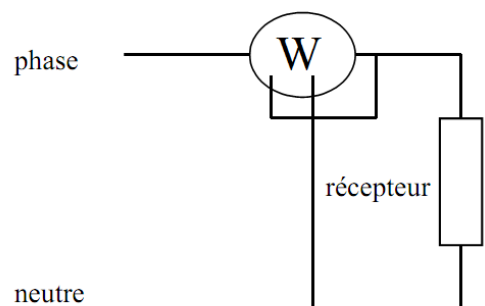


Figure 2: schéma de principe de mesure de la puissance active P par la méthode directe

2- méthodes indirectes :

Pour mesurer la puissance active P , sans utilisation d'un wattmètre, on peut faire recours à l'une des deux méthodes suivantes :

- Méthode de trois ampèremètres ;
- Méthode de trois voltmètres.

2.1- méthode de trois ampèremètres :

Le principe de cette méthode consiste à brancher trois ampèremètres suivant la configuration de la figure 3 où R_e représente une résistance étalon de grande précision.

Si i_1, i_2, i_3 désignent les valeurs instantanées des courants circulant dans les trois ampèremètres ; v et p la tension et la puissance instantanées du récepteur, on peut écrire :

$$\begin{cases} p = v \cdot i_2 \\ i_1 = i_2 + i_3 \\ i_3 = \frac{v}{R_e} \end{cases}$$

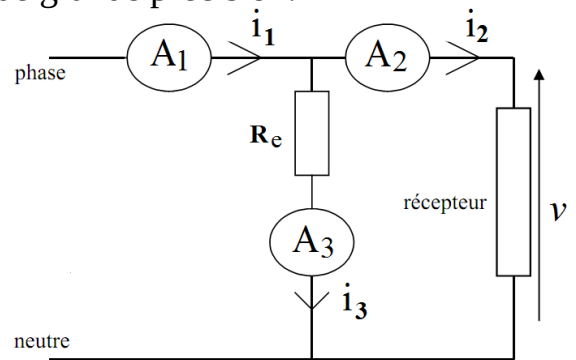


Figure 3: schéma de principe de la méthode de trois ampèremètres

$$i_1^2 = (i_2 + i_3)^2 = i_2^2 + i_3^2 + 2 \cdot i_2 \cdot i_3 = i_2^2 + i_3^2 + 2 \cdot i_2 \cdot \frac{v}{R_e} = i_2^2 + i_3^2 + 2 \cdot \frac{p}{R_e} \Rightarrow$$

$$p = \frac{R_e}{2} (i_1^2 - i_2^2 - i_3^2)$$

Or la puissance active P d'un récepteur est donnée par

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{R_e}{2T} \int_0^T (i_1^2 - i_2^2 - i_3^2) dt \Rightarrow \boxed{P = \frac{R_e}{2} (I_1^2 - I_2^2 - I_3^2)}$$

Avec I_1, I_2 et I_3 les valeurs efficaces des courants mesurés par les trois ampèremètres

La précision de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et de la résistance étalon R_e , ce qui rend cette méthode peu précise. En effet, l'incertitude relative δP est :

$$\delta P = \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \frac{2I_1^2}{|I_1^2 - I_2^2 - I_3^2|} \frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{2I_2^2}{|I_1^2 - I_2^2 - I_3^2|} \frac{\Delta I_2}{I_2} + \frac{2I_3^2}{|I_1^2 - I_2^2 - I_3^2|} \frac{\Delta I_3}{I_3}$$

2.2- méthode de trois voltmètres :

Cette méthode est analogue à la précédente. Les voltmètres sont branchés selon la figure 4 où R_e représente une résistance étalon de grande précision.

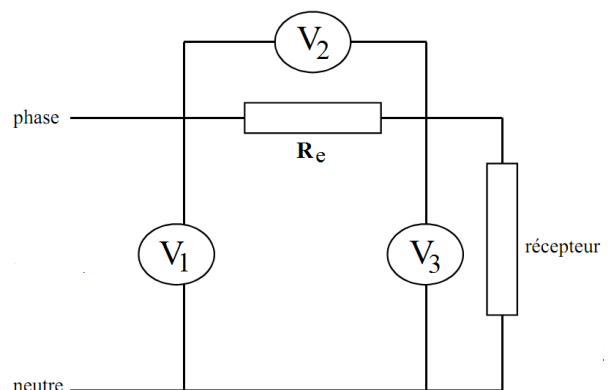


Figure 4: schéma de principe de la méthode de trois voltmètres

Si v_1, v_2, v_3 désignent les valeurs instantanées des tensions aux bornes des trois voltmètres et p la puissance instantanée du récepteur, on peut écrire :

$$\begin{cases} p = v_3 \frac{v_2}{R_e} \\ v_1 = v_2 + v_3 \end{cases}$$

$$v_1^2 = (v_2 + v_3)^2 = v_2^2 + v_3^2 + 2 \cdot v_2 \cdot v_3 = v_2^2 + v_3^2 + 2 \cdot p \cdot R_e \Rightarrow p = \frac{1}{2R_e} (v_1^2 - v_2^2 - v_3^2)$$

Or la puissance active P d'un récepteur est donnée par

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{2R_e T} \int_0^T (v_1^2 - v_2^2 - v_3^2) dt \Rightarrow \boxed{P = \frac{1}{2R_e} (V_1^2 - V_2^2 - V_3^2)}$$

Avec V_1, V_2 et V_3 les valeurs efficaces des tensions mesurées par les trois voltmètres.

La précision de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et de la résistance étalon R_e , ce qui rend cette méthode peu précise. L'incertitude relative δP est :

$$\delta P = \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta R_e}{R_e} + \frac{2V_1^2}{|V_1^2 - V_2^2 - V_3^2|} \frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{2V_2^2}{|V_1^2 - V_2^2 - V_3^2|} \frac{\Delta V_2}{V_2} + \frac{2V_3^2}{|V_1^2 - V_2^2 - V_3^2|} \frac{\Delta V_3}{V_3}$$