

## LES METHODES DE MESURE

Les méthodes de mesures peuvent être rangées en trois grandes familles :

- méthodes de déviation directe et indirecte,
- méthodes des ponts,
- méthodes de résonances.

### I- METHODES DE DEVIATION :

#### I-1- méthode de déviation directe :

La grandeur inconnue est déterminée par lecture directe de la déviation de l'appareil de mesure considéré.

**Exemples :**

- pour mesurer une puissance, on utilise un wattmètre,
- pour mesurer une résistance on utilise un ohm-mètre.

La précision de cette méthode dépend de la précision de l'appareil de mesure (  $\text{incertitude} = \frac{\text{classe.calibre}}{100}$  ).

#### I-2- méthode de déviation indirecte :

Cette méthode consiste à utiliser deux ou plusieurs appareils de mesure. La déviation conjuguées des appareils de mesure utilisées, permettent la détermination de la grandeur inconnue par l'intermédiaire d'une expression mathématique qui fait intervenir les grandeurs mesurées.

**Exemple :** pour mesurer une puissance, on mesure la tension  $U$  par un voltmètre et le courant  $I$  par un ampèremètre puis on calcule  $P = U.I$ .

Dans le cas où les appareils de mesure sont ampèremètre et voltmètre, la méthode est dite **volt-ampèremétrique**.

La précision de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et de leur mode de branchement.

#### I-3- Méthode de déviation et substitution ( méthode d'opposition) :

La grandeur inconnue est remplacée par une grandeur étalon. L'égalité des indications d'un appareil de mesure ( généralement un micro-ampèremètre ) dans les deux cas permet de déterminer la valeur inconnue.

**Exemple :** mesure d'une f.e.m

**E** : f.e.m à mesurée  
**R** : résistance totale du potentiomètre.  
**G** : générateur de tension continue.

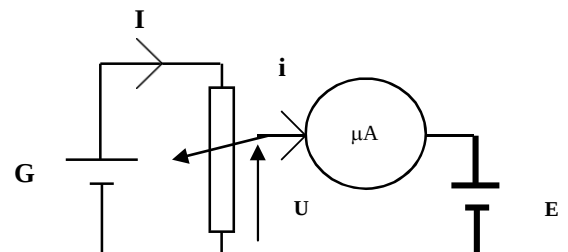


schéma de principe de la méthode de mesure d'une f.e.m

On place la f.e.m à mesurée  $E$ , et on agit sur le potentiomètre jusqu'à obtenir l'équilibre ( c'est à dire  $i = 0$  ) et on établie la relation suivante :  $E=U=R'.I$

On remplace la f.e.m à mesurée  $E$  par une f.e.m étalon  $E_0$ , et on agit de nouveau sur le potentiomètre jusqu'à obtenir  $i = 0$ . On a donc  $E_0=U=R''.I$

La valeur de  $E$  est obtenu par  $E=\frac{R'}{R''}.E_0$

## II- METHODES DES PONTS :

Les ponts ont été très utilisés pour la mesure des résistances, inductances et capacités, voire des fréquences jusque dans les années 1975. Les progrès de l'électronique les ont rendus peu à peu obsolètes pour les applications de métrologie. Toute fois la structure en pont reste utilisée dans de nombreux montages et son étendue présente également un intérêt pédagogique.

### II-1- Pont de wheatstone :

On associe quatre résistances  $R_1$  à  $R_4$  selon le schéma de la figure 28. Le pont est alimenté par une f.e.m  $E$

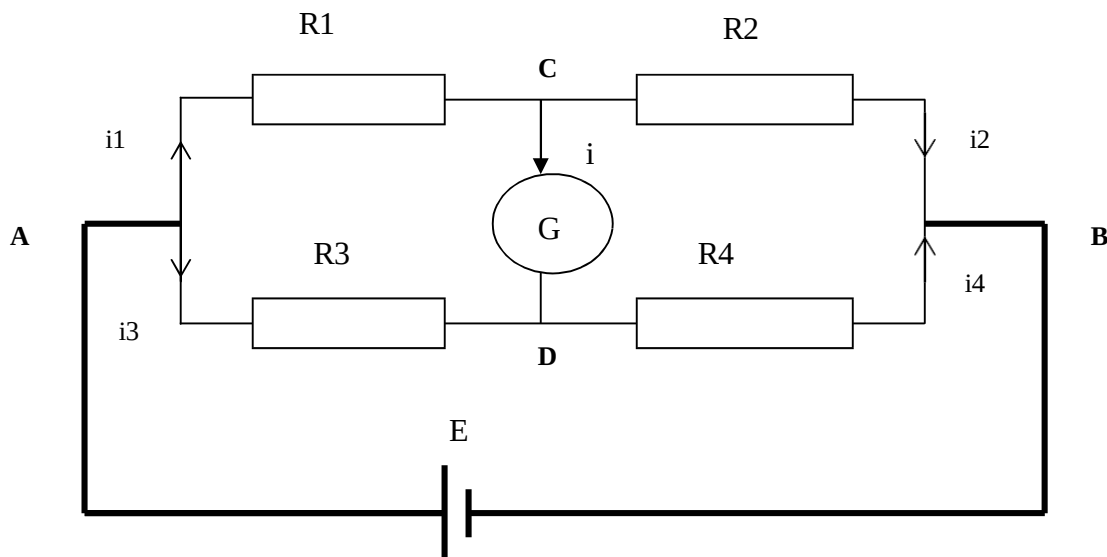


Schéma de principe d'un pont de wheatstone.

Le pont est dit à l'équilibre lorsque  $i = 0$  , c'est à dire  $U_{CD} = 0V$ . Dans ces conditions on peut écrire :

$$\begin{cases} i_1=i_2 & \text{et} & U_{AC}=U_{AD} \\ i_3=i_4 & \text{et} & U_{CB}=U_{DB} \end{cases}, \text{ ce qui donne } R_1.R_4=R_2.R_3$$

« L'équilibre du pont est réalisé quand les produits en croix des résistances sont égaux »

En pratique, on place la résistance inconnue en  $R_1$ ,  $R_2$  est une résistance connue ajustable et  $R_3$  et  $R_4$  sont des résistances fixes dont on connaît le rapport ( $K = \frac{R_3}{R_4}$ ).

A l'équilibre du pont on peut écrire  $R_1 = \frac{R_3}{R_4} R_2$ .

Dans beaucoup d'asservissement utilisant des capteurs résistifs, on utilise cette structure en pont. Le capteur est placé dans une branche, les trois autres branches sont réalisées avec des résistances fixes. Le signal d'erreur est la tension de déséquilibre du pont.

## II-2- Ponts en courant alternatif :

A la place du générateur continu, on utilise un générateur basse fréquence et on remplace les résistances par des impédances. Les calculs restent valides, à condition de remplacer les résistances par des impédances complexes.

« L'équilibre du pont est réalisé quand les produits en croix des impédances sont égaux (égalité entre parties réelles et parties imaginaires ) »

En général , deux dipôles seront des résistances pures de précision. L troisième sera l'impédance inconnue et le quatrième sera constitué de condensateurs de précision associés à des résistances de précision.

On évite de travailler avec des inductances, car leur valeur varie avec la fréquence. Les possibilités d'associations sont assez nombreuses et nous allons examiner les plus utilisés :

**$R_3, R_4$**  : résistances pures fixes  
 $Z_1 = R_x + \frac{1}{jC_x \omega}$  : impédance inconnue  
 $Z_2 = R + \frac{1}{jC \omega}$  : impédance variable et connue

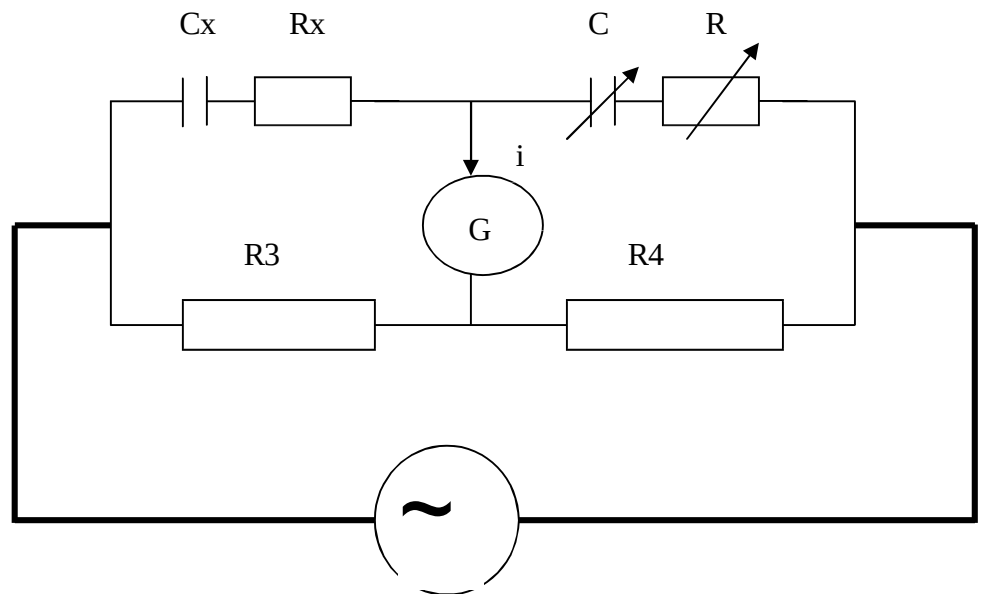


Schéma de principe du pont de sautty.

A l'équilibre du pont on peut écrire que  $R_x = R \cdot \frac{R_3}{R_4}$  et  $C_x = C \cdot \frac{R_4}{R_3}$

**R3**:résistance pure fixe

$Z_4 = \frac{1}{jC\omega}$  : condensateur idéal connu

$Z_1 = R_x + jL_x\omega$  :impédance inconnue

$Z_1 = R + \frac{1}{jC\omega}$  : impédance variable et connue

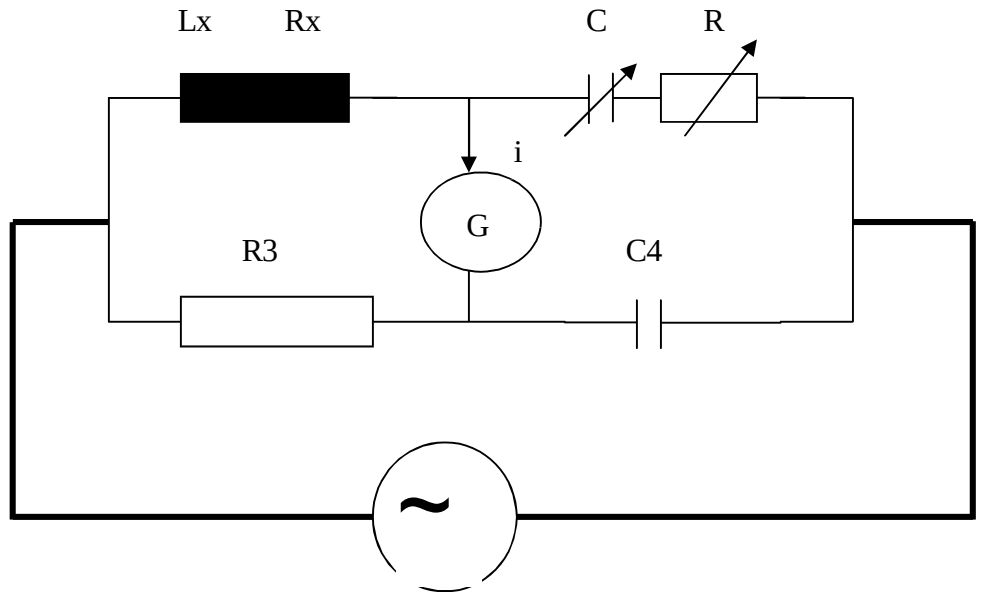


Schéma de principe du pont de Owen.

A l'équilibre du pont on peut écrire que  $R_x = R_3 \cdot \frac{C_4}{C}$  et  $L_x = R_3 \cdot R \cdot C_4$

**R2, R3** : résistances pures fixes

$Z_1 = R_x + jL_x\omega$  :impédance inconnue

$\frac{1}{Z_4} = \frac{1}{R_4} + jC_4\omega$  :impédance variable de précision

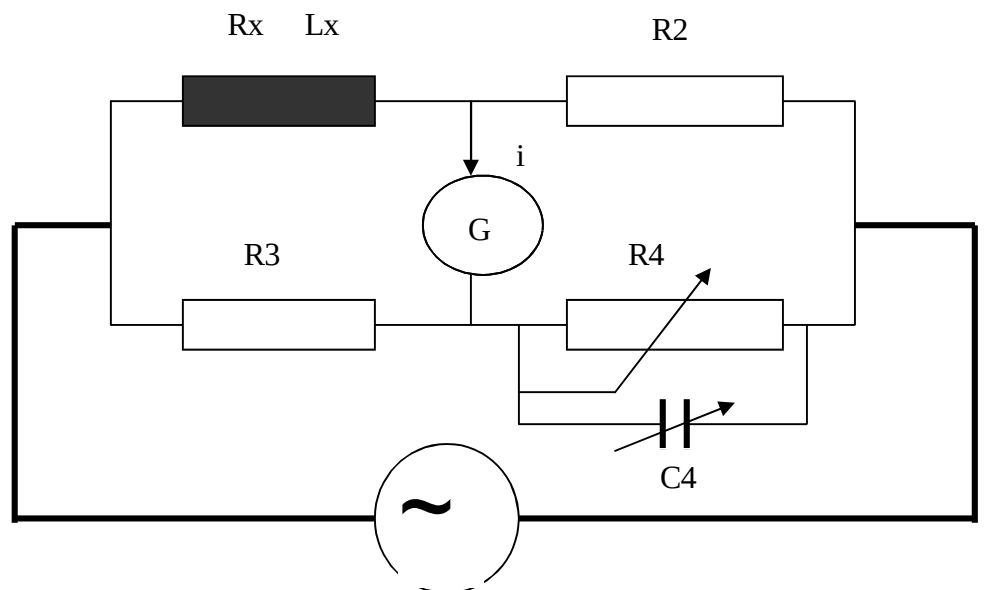


Schéma de principe du pont de Maxwell.

A l'équilibre du pont on peut écrire que  $R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$  et  $L_x = R_3 \cdot R_2 \cdot C_4$

### III- METHODE DE RESONANCE :

La méthode de résonance est utilisée pour mesurer des capacités et des inductances. Elle consiste à placer la grandeur à mesurée dans un circuit résonant série ou parallèle et d'en déduire la grandeur inconnue à la résonance. En effet, si on considère un circuit résonant série par exemple, à la résonance on peut écrire  $LC\omega^2 = 1$  et on déduit la grandeur inconnue ( L ou C ).

## 2. Méthodes de mesures

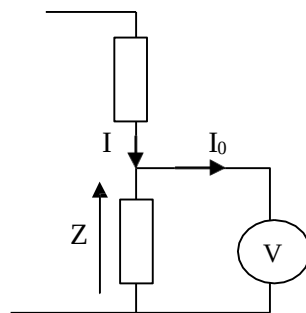
### Introduction

L'évolution de la conception des appareils de mesure a été guidée dans le but d'améliorer la précision de la mesure.

En électronique, la mesure des tensions, courants et puissances est très courante, et cela se fait directement en branchant l'appareil de mesure sur le circuit à mesurer, soit par d'autres méthodes indirectes pour augmenter la précision de la mesure.

### 2.1. Mesures des tensions

#### 2.1.1. Méthodes directes de mesures de tensions



La chute de tension aux bornes de Z:

- Théoriquement:

$$U_Z = Z \cdot I \quad (2.1)$$

- Pratiquement:

$$U'_Z = (I - I_0) \cdot R_V \quad (2.2)$$

$$I_0 = \frac{U'_Z}{R_V}$$

$$U'_Z = Z \cdot I - Z \cdot I_0 = U_Z - Z \cdot \frac{U'_Z}{R_V}$$

$$U'_Z = U_Z \cdot \frac{R_V}{R_V + Z} \quad (2.3)$$

Erreur relative systématique:  $\frac{\Delta U_Z}{U_Z} = ?$

$$\frac{\Delta U_Z}{U_Z} = \left| \frac{U'_Z - U_Z}{U_Z} \right|$$

$$\frac{\Delta U_Z}{U_Z} = \frac{Z}{R_V + Z} \quad (2.4)$$

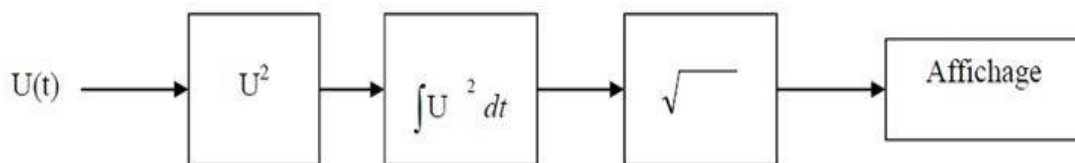
L'erreur systématique est d'autant plus faible que la résistance interne  $R_V$  du voltmètre est grande devant  $Z$ .

### 2.1.2. Mesures de tensions alternatives

En courant alternatif, on a besoin souvent de la valeur efficace, dite aussi valeur RMS (de l'anglais Root Mean Square), du signal mesuré. Pour cela, on peut utiliser un voltmètre de type ferromagnétique ou magnétoélectrique avec redresseur lorsque le signal mesuré est de type sinusoïdal ou un voltmètre numérique.

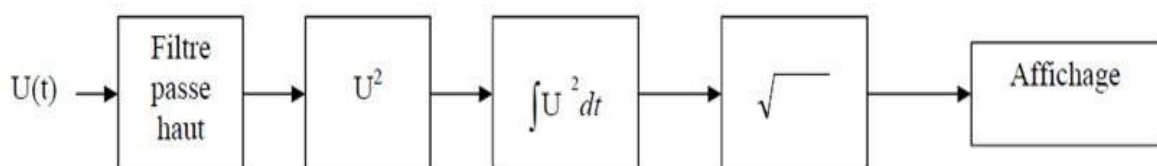
Pour les voltmètres numériques de type TRMS (TRMS : True Root Mean Square), on distingue deux modes de couplage :

- **mode DC** : Le voltmètre indique la valeur efficace du signal mesuré selon l'algorithme suivant:



**Figure 2.1.** Schéma de principe d'un voltmètre TRMS en mode DC.

- **mode AC** : Le voltmètre indique la valeur efficace de la composante alternative du signal à mesuré, c'est à dire il élimine en premier lieu la composante continu du signal, puis affiche la valeur efficace de la composante alternative selon l'algorithme suivant:

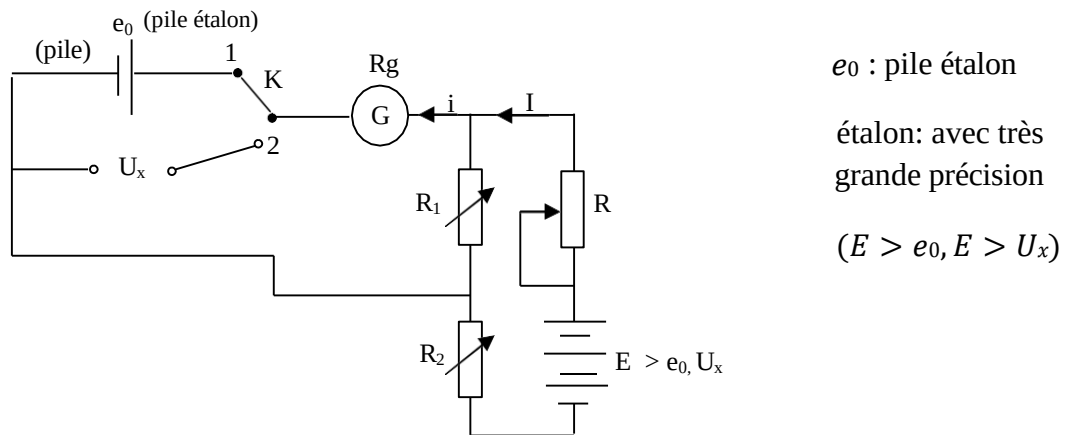


**Figure 2.2.** Schéma de principe d'un voltmètre TRMS en mode AC.

### 2.1.3. Méthode indirecte de mesures de tension par la méthode d'opposition

Elle consiste en la comparaison de deux tensions, et elle se fait principalement en courant continu puisque en alternatif elle est très complexe, car il est nécessaire que les deux tensions à comparer ont la même fréquence et la même phase.

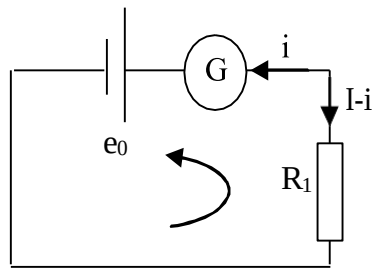
Le schéma de principe est donné par la figure suivante:



**Figure 2.3.** Schéma de principe de la méthode d'opposition.

Dans cette méthode, deux tensions sont opposées:

**a. En position K1:** la tension étalon  $e_0$  est opposée à la tension aux bornes de  $R_1$ ,  $R_1$  et  $R_2$  sont ajustées de telle façon que la tension aux bornes de  $R_1$  serait égale à la tension produite par  $e_0$ , et cela est vérifié par le galvanomètre qui ne détecte aucun courant ( $I$  dans  $(G) = 0$ ).



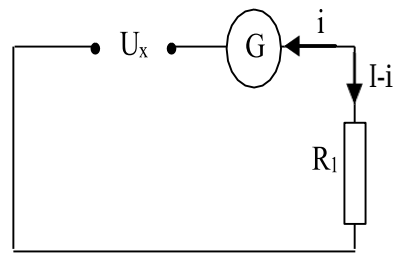
$$e_0 - R_g \cdot i = R_1 \cdot (I - i) \quad (2.5)$$

A l'équilibre du galvanomètre:  $i = 0$

$$e_0 = R_1 \cdot I \quad (2.6)$$

avec  $I = \frac{e_0}{R_1}$

**b. En position K2:** ( $i$  dans  $(G) = 0$ )



On règle  $R_1$  à  $R_1$  et  $R_2$  à  $R_2$  dans la position (1)

On règle  $R_1$  à  $R'_1$  et  $R_2$  à  $R'_2$  dans la position (2)

A condition que  $R_1 + R_2 = R'_1 + R'_2$  de telle façon que le courant  $I$  qui le traverse reste le même.

$$U_x - R_g \cdot i = R'_1 \cdot (I - i) \quad (2.7)$$

$$\Rightarrow U_x = R'_1 \cdot I$$

$$U_x = \frac{R'_1}{R_1} e_0 \quad (2.8)$$

**Exemple:**

Si  $R_1 = 1k\Omega$ ,  $R_2 = 3k\Omega$

$R_1 + R_2 = 4k\Omega$

$R'_1 = 2k\Omega$ ,  $R'_2 = 2k\Omega$

La résistance  $R_h$  (Rhéostat) sert à limiter le débit du courant  $i$  de la pile  $E$  et le courant  $I$  est choisi de telle façon qu'il est une valeur simple en puissance de 10.

$$10^{-5}A \ll i \ll 10^{-3}A$$

La précision de la mesure est améliorée puisqu'elle ne dépend que de la précision de deux résistances  $R_1$  et  $R'_1$ , de la pile étalon " $e$ " ( $\frac{\Delta e_0}{e_0} = 0.001\%$ ), et de deux erreurs de sensibilité

dues aux équilibres effectués.

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{\Delta e_0}{e_0} + \frac{2\Delta R_1}{R_1} \left( \frac{1}{R_1 + a} \right) + 2e_s \quad (2.9)$$

$e_s$ : erreur de sensibilité

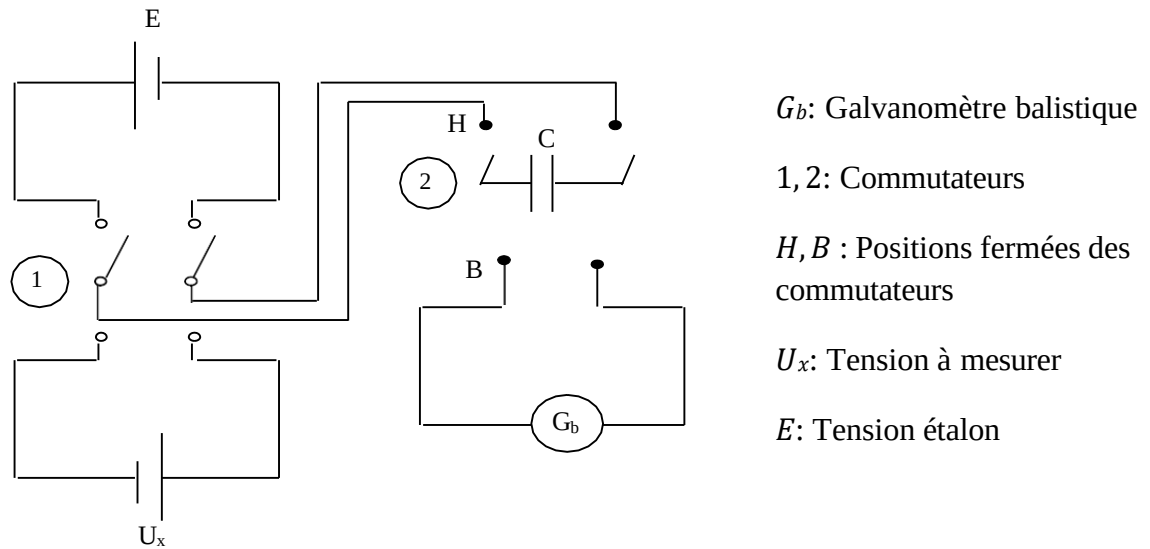


Avec:

$$R_1 = R'_1 \pm a$$

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R'_1}{R'_1} = \frac{\Delta a}{a}$$

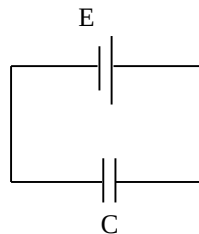
#### 2.1.4. Méthode indirecte de mesures de tension par la méthode de comparaison



**Figure 2.4.** Schéma de principe de la méthode de comparaison.

La méthode de comparaison consiste en la comparaison de la tension étalon  $E$  à la tension à mesure  $U_x$ . Le montage comporte un galvanomètre balistique dont la masse de son cadre mobile est importante. Le principe de cette méthode est basé sur la charge du condensateur  $C$ , alternativement par  $E$  et  $U_x$ , et lire à chaque fois la déviation produite par la charge dans  $C$  en basculant le commutateur à la fin de chaque charge aux bornes du  $G_b$  et comme sa masse est grande, l'aiguille ne revient à 0 qu'à la fin de la décharge.

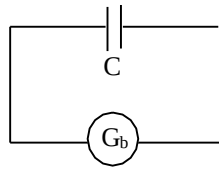
1. Mettre les interrupteurs 1 et 2 sur la position  $H$ :



$C$  se charge par:  $E \rightarrow Q_E = C \cdot E$

(2.10)

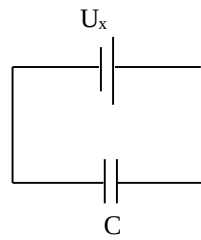
2. On met l'interrupteur 2 sur la position  $B$ :



$C$  se décharge aux bornes du galvanomètre.

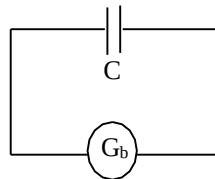
La déviation de  $G_b$  :  $\alpha_E = C \cdot E$  (2.11)

3. Mettre l'interrupteur 1 sur la position  $B$  et l'interrupteur 2 sur  $H$ : charge du condensateur.



$Q_x = C \cdot U_x$  (2.12)

4. On met l'interrupteur 2 sur  $B$ :



$\alpha_x = C \cdot U_x$  (2.13)

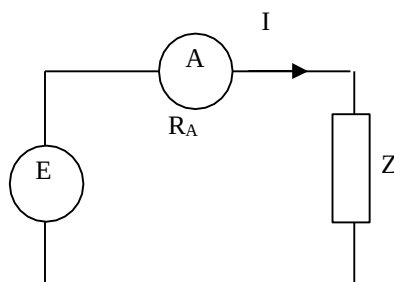
$$\frac{\alpha_E}{\alpha_x} = \frac{C \cdot E}{C \cdot U_x} \Rightarrow U_x = \frac{\alpha_x \cdot E}{\alpha_E} \quad (2.14)$$

Nous remarquons que la tension à mesurer ne dépend que de  $E$  et de  $\alpha_E$  et  $\alpha_x$ , donc:

$$\frac{\Delta U_x}{U_x} = \frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta \alpha_x}{\alpha_x} + \frac{\Delta \alpha_E}{\alpha_E} \quad (2.15)$$

## 2.2. Mesures des courants

### 2.2.1. Méthode directe de mesure des courants



-  $I_{\text{Théoriquement}}$  :

$$I = \frac{E}{Z} \quad (2.16)$$

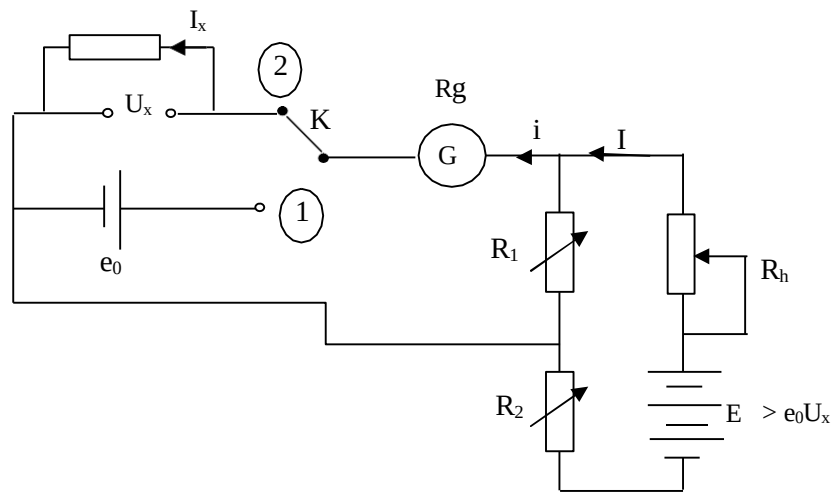
-  $I_{\text{Pratique}}$  :

$$I' = \frac{E}{Z + R_A} \quad (2.17)$$

$$\frac{\Delta I}{I} = \left| \frac{I' - I}{I} \right| \Rightarrow \frac{\Delta I}{I} = \frac{R_A}{R_A + Z} \quad (2.18)$$

Cette erreur est d'autant plus faible que la résistance interne  $R_A$  est faible devant  $Z$ .

## 2.2.2. Méthode indirecte de mesures de courant par la méthode d'opposition



**Figure 2.5.** Mesure de courant par la méthode d'opposition.

Position 1: 
$$e_0 = R_1 I \Rightarrow I = \frac{e_0}{R_1} \quad (2.19)$$

Position 2: 
$$U_x = R'_1 I \quad (2.20)$$

$$U_x = \frac{R'_1}{R_1} e_0 \quad \text{avec} \quad U_x = R I_x$$

$$R I_x = \frac{R'_1}{R_1} e_0$$

$$I_x = \frac{e_0 R'_1}{R_1 R} \quad (2.21)$$

$$\frac{\Delta I_x}{I_x} = \frac{\Delta e_0}{e_0} + 2 \frac{\Delta R_1}{R_1} \frac{a}{R_1 + a} + \frac{\Delta R}{R} + 2e_s \quad (2.22)$$