

Règles pour le calcul d'incertitude (calcul d'erreur)

Introduction: En physique nous étudions fréquemment le comportement d'une fonction qui dépend d'une ou de plusieurs variables et de constantes ($F = m \cdot g$, $\Delta x = v \cdot \Delta t$, ...). Il nous faut donc estimer l'erreur maximale sur la fonction à partir des erreurs maximales sur les variables et sur les constantes. Jusqu'ici, les règles sur les chiffres significatifs nous donnaient un premier ordre de grandeur des incertitudes.

Définitions: **l'incertitude absolue** Δx représente l'erreur maximale que l'on risque d'avoir commise sur la grandeur x , lors de sa mesure. L'unité est celle de la grandeur mesurée.

l'incertitude relative $\Delta x/x$ représente l'importance de l'incertitude par rapport à la grandeur physique x . Il n'y a pas d'unité mais on l'exprime généralement en %.

Exemple: on mesure la largeur d'une feuille A4.

On mesure $\ell = 21,1$ [cm] et $\Delta \ell = 0,1$ [cm]. L'incertitude absolue vaut 0,1 [cm].

On écrit : $\ell = 21,1 \pm 0,1$ [cm].

L'incertitude relative vaut : $\Delta \ell / \ell = 0,1 / 21,1 = 0,00474 \approx 0,47 \%$

Référence: un calcul d'incertitude précis demande l'utilisation du calcul différentiel. Vous trouverez les règles pour le calcul d'incertitude (d'erreur), pour une fonction d'une ou de plusieurs variables, dans votre table CRM à la page 92.

Exemple: On mesure la surface d'une feuille A4 (fonction qui dépend de deux variables).

Formule: $S = a \cdot b$ (S = surface ; a = base; b = hauteur)

Vérification:

Mesures: $a = 29,7 \pm 0,1$ [cm]; $b = 21,1 \pm 0,1$ [cm]

Calculs: $S = 29,7$ [cm] $\cdot$ $21,1$ [cm] = $626,7$ [cm²]

Incrtitude relative: $\Delta S/S = \Delta a/a + \Delta b/b = 0,0034 + 0,0047 = 0,0081 = 0,81 \%$

Incrtitude absolue: $\Delta S = \Delta S/S \cdot S = 0,81 \cdot 626,67 = 5$ [cm²]

Réponse: $S = 627 \pm 5$ [cm²]

Les règles les plus utilisées: (les autres sont dans la table CRM p. 92)

Fonction	$x \pm y$	$x \cdot y$	x / y	x^n
Incrtitude absolue	$ \Delta x + \Delta y $			
Incrtitude relative		$ \Delta x/x + \Delta y/y $	$ \Delta x/x + \Delta y/y $	$n \cdot \Delta x/x $

Expérience: lorsqu'on mesure une grandeur physique, les sources d'incertitudes viennent de la précision de l'instrument de mesure ainsi que de la précision de la lecture et de la méthode utilisée.

Exemple: On mesure la période T d'un pendule, c'est à dire le temps qui s'écoule entre un aller-retour complet d'une masse qui est suspendue à un fil et qui oscille.

Sources d'incertitudes :

- 1) lecture du chronomètre: $\Delta_1 T = 0,1 \text{ [s]}$
- 2) précision du chronomètre: (en principe indiquée sur l'appareil)
- 3) précision du déclenchement/arrêt: $\Delta_2 T = 0,2 \text{ [s]}$ (réflexe)

Incrtitude absolue (en négligeant la précision du chronomètre):

$$\Delta T = \Delta_1 T + \Delta_2 T = 0,1 \text{ [s]} + 0,2 \text{ [s]} = 0,3 \text{ [s]}$$

Incrtitude relative : pour $T = 2,0 \text{ [s]}$ on aurait $\Delta T / T = 15 \text{ \%}$ (c'est beaucoup!)

Mais si on mesure 10 oscillations, l'incrtitude de lecture sera toujours de $0,1 \text{ [s]}$ et l'incrtitude sur l'enclenchement et l'arrêt de $0,2 \text{ [s]}$, donc l'incrtitude absolue totale de $0,3 \text{ [s]}$, tout ceci pour une mesure d'environ $20,0 \text{ [s]}$. L'incrtitude relative sera donc plus faible.

Incrtitude absolue sur $10 T$: $\Delta(10 T) = \Delta T = 0,3 \text{ [s]}$

Incrtitude relative sur $10 T$: $\Delta(10 T) / (10 T) = 1,5 \text{ \%}$ (nettement mieux)

Et on peut ensuite calculer l'incrtitude absolue sur T : $\Delta T = 0,03 \text{ [s]}$.

Chapitre 2

MESURE DES RESISTANCES

OBJECTIFS

Général

- Savoir mesurer une résistance en utilisant différentes méthodes.

Spécifiques

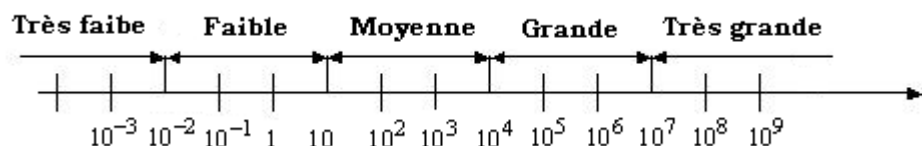
- Etudier la méthode de mesure directe.
- Etudier les différentes méthodes de mesure indirecte.
- Savoir calculer l'incertitude de mesure pour les différentes techniques de mesure.

1. INTRODUCTION

Le degré d'opposition au déplacement du courant électrique dans un circuit définit la résistance électrique de ce circuit.

Dans la pratique industrielle, il est indispensable, pour assurer la maintenance et le dépannage des appareils et équipements électriques et électroniques de contrôler la continuité d'un circuit, de connaître la valeur d'une résistance, de vérifier le niveau d'isolement d'une installation.

Pour permettre le choix des méthodes de mesure, on peut classer arbitrairement les résistances comme suit :



2. METHODE DE MESURE DIRECTE

C'est la méthode la plus simple et la plus utilisée dans la mesure de résistances. Cette méthode utilise, comme un appareil de mesure principal : l'ohmmètre (c'est un appareil à lecture directe gradué en ohm qui donne directement la valeur de résistance par une déviation α).

2.1. Principe

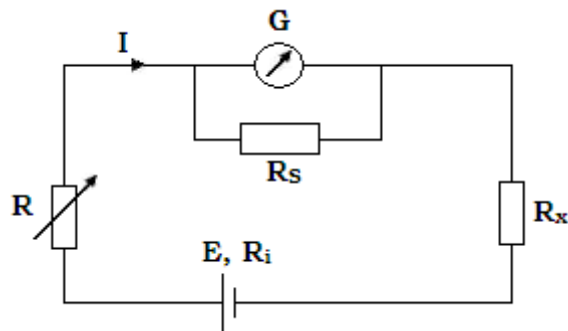


Figure 5.1 : Schéma de principe de la méthode mesure directe

Avec :

E : fém. d'une pile intérieure de résistance interne R_i , alimente le circuit.

R : résistance ajustable pour réglage de zéro.

G : un galvanomètre muni d'un shunt R_s .

K : constante en A/div.

α : déviation maximale.

D'après la loi des mailles, on a :

$$I = \frac{E}{R + R_i + R_s + R_x}$$

Et on a $I = K \cdot \alpha$

Donc :

$$K \cdot \alpha = \frac{E}{R + R_i + R_s + R_x}$$

2.2. Méthode de mesure

- On court-circuite les bornes de l'ohmmètre, un courant de court-circuit I_{cc} parcourt l'appareil.

$$I_{cc} = \frac{E}{R + R_i + R_s} = K \cdot \alpha_{cc}$$

- On coupe le court-circuit et on branche la résistance R_x à mesurer, un courant I parcourt l'appareil.

$$I = \frac{E}{R + R_i + R_s + R_x} = K \cdot \alpha$$

En faisant le rapport membre à membre, on obtient :

$$\frac{\alpha_{cc}}{\alpha} = \frac{E}{R + R_i + R_s} * \frac{R + R_i + R_s + R_x}{E} = 1 + \frac{R_x}{R + R_i + R_s}$$

$$\frac{\alpha_{cc}}{\alpha} = \frac{E + k\alpha_{cc} \cdot R_x}{E}$$

D'où :

$$R_x = \frac{E}{K} \frac{(\alpha_{cc} - \alpha)}{\alpha_{cc} \cdot \alpha}$$

La fonction $R_x = f(\alpha)$ a pour représentation une hyperbole dont le zéro de la graduation correspond à une résistance infinie et la déviation maximale correspond à une résistance nulle.

Remarque :

Un ohmmètre à déviation permet d'obtenir très rapidement une valeur approchée des résistances. Mais la précision est généralement médiocre (10%).

3. METHODES DE MESURE INDIRECTE

3.1. Méthode Voltampèremétrique

Cette méthode consiste à déterminer la valeur d'une résistance en appliquant la loi d'ohm. En effet, on mesure la tension U à ses bornes et le courant I qui la parcourt. La valeur de la résistance sera déduite par la relation suivante :

$$R_x = \frac{U}{I}$$

Pour la mesure de ces deux grandeurs, on doit utiliser un voltmètre et un ampèremètre et selon leur position on distingue deux montages :

3.1.1. Montage amont

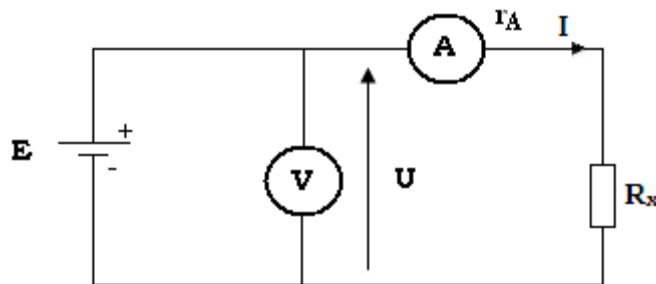


Figure 5.2 : Montage voltampèremétrique amont

En appliquant la loi de maille

On a : la résistance mesurée : $R = \frac{U}{I}$ où $R = r_A + R_x$;

Avec r_A : la résistance interne de l'ampèremètre ;

D'où :

$$R_x = R - r_A = \frac{U}{I} - r_A$$

- L'incertitude absolue de méthode est : $\Delta R_x)_{\text{mé}} = |R - R_x| = r_A$
- L'incertitude relative sera :

$$\left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)_{\text{mé}} = \frac{r_A}{R_x}$$

➤ Interprétation :

L'incertitude relative de la méthode amont est d'autant plus faible si la résistance à mesurer est plus grande devant la résistance interne de l'ampèremètre ($R_x \gg r_A$).

Ainsi, et comme la résistance interne de l'ampèremètre est de faible valeur, ce montage s'adapte pour la mesure des résistances de grande valeur.

3.1.2. Montage aval

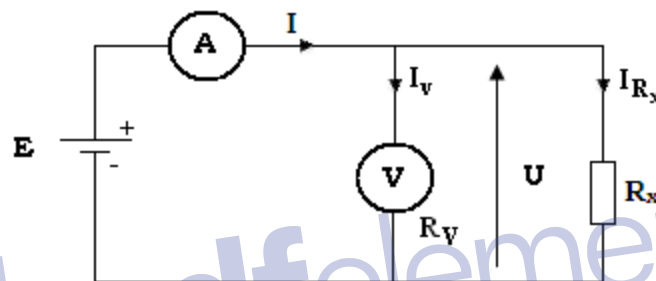


Figure 5.3 : Montage voltampère-métrique aval

On a :

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{avec} \quad I = I_{R_x} + I_V ;$$

D'où :

$$\frac{1}{R} = \frac{I_{R_x}}{U} + \frac{I_V}{U} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_V}$$

Avec R_V : la résistance interne du voltmètre;

On obtient donc :

$$R = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V}$$

L'erreur absolue sur cette mesure est : $\Delta R = \text{Valeur mesurée} - \text{Valeur exacte}$.

- L'incertitude absolue de méthode de cette mesure est :

$$\begin{aligned} \Delta R_x)_{\text{mé}} &= |R - R_x| \\ &= \left| \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} - R_x \right| = \left| \frac{R_x R_V - R_x^2 - R_x R_V}{R_x + R_V} \right| = \frac{R_x^2}{R_x + R_V} \end{aligned}$$

- L'incertitude relative sera :

$$\left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)_{\text{mé}} = \frac{R_x}{R_x + R_V} = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_x}}$$

➤ Interprétation :

L'incertitude relative de la méthode aval est d'autant plus faible si la résistance à mesurer est plus petite devant la résistance interne du voltmètre ($R_x = R_V$).

Ainsi, et comme la résistance interne du voltmètre est de grande valeur, ce montage s'adapte pour la mesure des résistances de faible valeur.

3.1.3. Choix entre montage amont ou aval

Si on représente la fonction $\frac{\Delta R_x}{R_x} = f(R_x)$ pour les deux montages (amont et aval), on obtient les courbes suivantes :

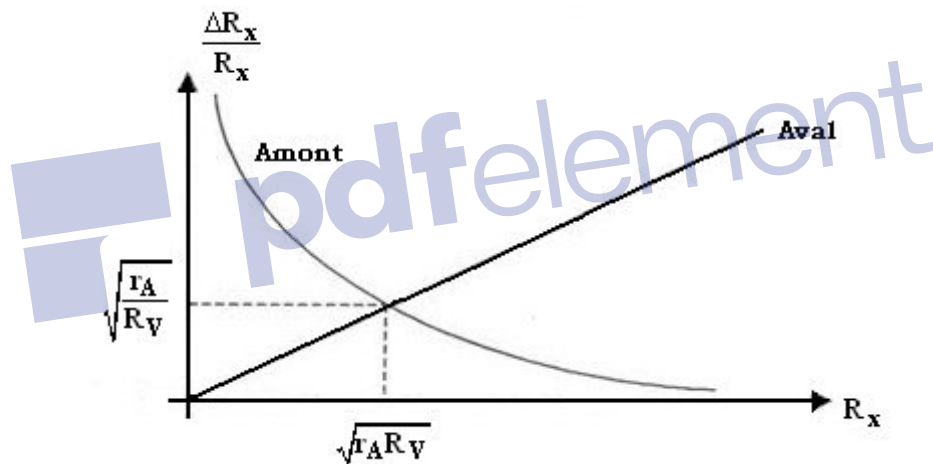


Figure 5.4 : Courbes $\frac{\Delta R_x}{R_x} = f(R_x)$

D'après les courbes on peut tirer les affirmations suivantes :

- Si $R_x < \sqrt{r_A R_V} \rightarrow$ on adopte le montage aval ;
- Si $R_x > \sqrt{r_A R_V} \rightarrow$ on adopte le montage amont.

3.2. Méthode du pont de Wheatstone

3.2.1. Schéma de principe

Un pont de Wheatstone permet la mesure des faibles et moyennes résistances. Il est constitué de :

- Quatre résistances dont trois sont étalonnées et connues (R_1 , R_2 , R) et une résistance inconnue R_x ;

- Un détecteur de courant généralement un galvanomètre à zéro central très sensible.
- Une alimentation continue délivrant un courant continu.

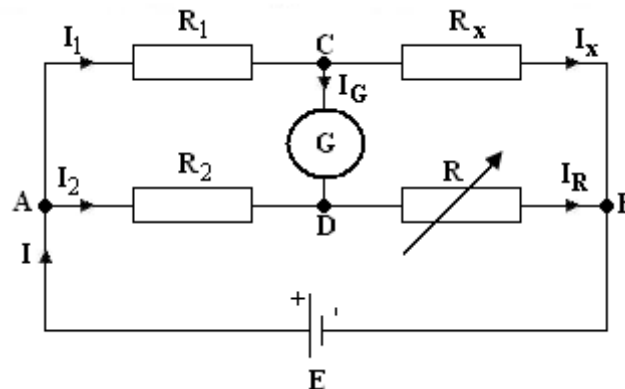


Figure 5.5 : Pont de Wheatstone

3.2.2. Condition d'équilibre

Le pont est équilibré lorsqu'aucun courant ne passe dans le détecteur **G** suite à un réglage des résistances étalonnées **R₁**, **R₂** et **R**.

Si $I_G = 0$, alors :

- $U_{CD} = 0$
- I_1 traverse **R₁** et **R_x** et I_2 traverse **R₂** et **R**.

Et, en appliquant le diviseur de tension, on obtient :

$$U_{AD} = \frac{R_2}{R_2 + R} E \quad \text{et} \quad U_{AC} = \frac{R_1}{R_1 + R_x} E$$

On a:

$$\begin{aligned} U_{CD} &= U_{CA} + U_{AD} \\ &= \frac{-R_1}{R_1 + R_x} E + \frac{R_2}{R_2 + R} E \end{aligned}$$

$$\text{Or, à l'équilibre: } U_{CD} = 0 \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_x} = \frac{R_2}{R_2 + R} \Leftrightarrow R_1 R_2 + R_1 R = R_1 R_2 + R_2 R_x$$

D'où :

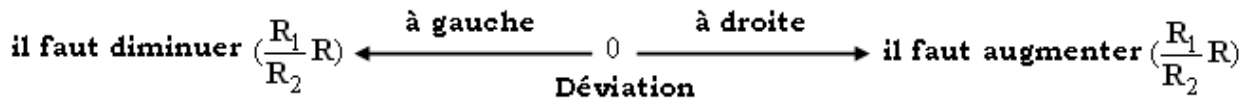
$$\boxed{R_x = \frac{R_1}{R_2} R}$$

- Le rapport $\frac{R_1}{R_2}$ est appelé rapport de proportion.
- Les résistances **R₁** et **R₂** seront constituées par des boîtes de type 10 n de façon que ce rapport appartienne à l'ensemble suivant {0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000}.

- La résistance **R** sera constituée par une association de boîtes à décades (*1, *10, *100, *1000).

3.2.3. Mode opératoire

On choisit une convention de définition du galvanomètre :



- Généralement, on règle le rapport de proportion $\frac{R_1}{R_2}$ à 1
- On choisit arbitrairement **R** et on définit la direction du spot, et selon sa direction on augmente ou on diminue sa valeur jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (un courant $I_G = 0$).
- Sinon on varie le rapport de proportion et on varie de nouveau **R** jusqu'à atteindre l'équilibre.
- On détermine **R_x** par la relation $R_x = \frac{R_1}{R_2} R$.

3.2.4. Calcul d'incertitude

On a $R_x = \frac{R_1}{R_2} R$, par conséquent :

- L'incertitude absolue s'exprime sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_1} \right|_{R_2, R=\text{cte}} \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_2} \right|_{R_1, R=\text{cte}} \cdot \Delta R_2 + \left| \frac{\partial R_x}{\partial R} \right|_{R_1, R_2=\text{cte}} \cdot \Delta R \\ &= \frac{R}{R_2} \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{-R_1 R}{R_2^2} \right| \cdot \Delta R_2 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \Delta R \end{aligned}$$

- L'incertitude relative sera :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R}{R}$$

Or $R = R_d + R_c + R_b + R_a = r_{1000} + r_{100} + r_{10} + r_1$ (décades)

Donc : $\Delta R = \Delta R_d + \Delta R_c + \Delta R_b + \Delta R_a$

3.3. Méthode du voltmètre en série

3.3.1. Schéma de principe

Cette méthode est utilisée spécialement pour la mesure des résistances de grande valeur. Son montage est constitué d'un voltmètre de résistance interne **R_v** et d'un générateur de tension continue.

Pour déterminer la valeur de la résistance, on procède comme suit :

- On mesure par le voltmètre la tension U aux bornes du générateur,
- puis on réalise le montage de la figure (5.6),
- enfin, sans changer le voltmètre et en conservant le même calibre, on mesure la tension U' aux bornes du voltmètre.

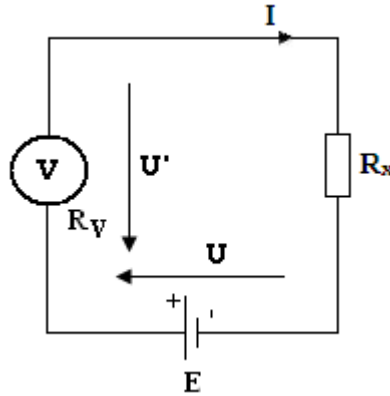


Figure 5.6 : Montage du voltmètre en série

En appliquant la loi de maille, on obtient :

$$U - U' - R_x I = 0 \Rightarrow R_x = \frac{U - U'}{I}$$

Or $U' = R_V I \Rightarrow I = \frac{U'}{R_V}$

D'où :

$$R_x = \frac{U - U'}{U'} \cdot R_V = \left(\frac{U}{U'} - 1 \right) \cdot R_V$$

Soient :

- n_1 : l'indication du voltmètre pour la tension U
- n_2 : l'indication du voltmètre pour la tension U'

Donc la valeur de résistance sera donnée par l'expression suivante :

$$R_x = (x - 1) \cdot R_V$$

Où $x = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U}{U'}$

3.3.2. Calcul d'incertitude

On a $R_x = (x - 1) \cdot R_V$, par conséquent :

- L'incertitude absolue s'exprime sous la forme suivante :

$$\Delta R_x = \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_V} \right|_{x=\text{cte}} \cdot \Delta R_V + \left| \frac{\partial R_x}{\partial x} \right|_{R_V=\text{cte}} \cdot \Delta x$$

D'où :

$$\Delta R_x = (x-1) \cdot \Delta R_V + R_V \cdot \Delta x$$

- L'incertitude relative sera :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_V}{R_V} + \frac{x}{(x-1)} \cdot \frac{\Delta x}{x}$$

Avec $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_2}{n_2}$

Comme les erreurs de lecture commises sur les deux mesures sont les mêmes, on a : $\Delta n_1 = \Delta n_2$, on obtient donc :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x}{x} &= \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_2}{n_2} \quad \text{or} \quad n_2 = \frac{n_1}{x} \\ &= \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_1}{n_1} \cdot x \\ &= (x+1) \frac{\Delta n_1}{n_1} \end{aligned}$$

D'où :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_V}{R_V} + \frac{x(x+1)}{(x-1)} \cdot \frac{\Delta n_1}{n_1}$$

Chapitre 3

LES APPAREILS DE MESURE

1. INTRODUCTION

Un appareil de mesure est un système qui traduit un phénomène physique non ou difficilement accessible à nos sens, en un autre phénomène pouvant être visualisé et estimé.

On distingue deux types d'appareils :

- Les appareils analogiques : par leur principe de fonctionnement, donne théoriquement une valeur de la grandeur à mesurer exactement proportionnelle à cette grandeur.
- Les appareils numériques : ils donnent une valeur représentant la grandeur à mesurer au pas de quantification près. Cette valeur est donnée sous une forme de nombre (affichage numérique).

2. LES APPAREILS DE MESURE ANALOGIQUES

2.1. Généralités

Un appareil de mesure analogique comporte généralement un ou plusieurs inducteurs fixes (aimant permanent, électroaimant, ...) agissant sur un équipage mobile autour d'un axe.

La technologie interne de ces appareils repose sur trois éléments :

- La suspension de l'équipage mobile ;
- Le dispositif de lecture qui peut être à aiguille ou à spot lumineux ;
- Le dispositif d'amortissement qui peut être magnétique ou par air.

Selon leur terminologie, il existe plusieurs types d'appareils analogiques, à savoir :

- Les quotientmètres (balance électrique) ;
- Appareils intégrateurs (compteur, fluxmètre) ;
- Appareils électroniques ;
- Appareils analogiques à affichage numérique ;
- Appareils à déviation.

On s'intéressera dans ce qui suit à l'étude des appareils analogiques à déviation.

2.2. Classification des appareils analogiques à déviation

On peut classer les appareils de mesure analogiques, de type à déviation, selon la nature du phénomène physique qui détermine leur fonctionnement :

- **Appareils magnétoélectriques** : ils reposent sur l'action du champ magnétique d'un aimant fixe sur une bobine traversée par un courant.
- **Appareils ferromagnétiques** : ils reposent sur l'action des forces électromagnétiques sur une partie métallique en fer doux.
- **Appareils électrodynamiques** : ils reposent sur l'action du champ produit par une bobine fixe sur celui produit par une bobine mobile.
- **Appareils ferro-dynamiques** : même principe que les appareils électrodynamiques, mais avec un noyau de fer doux à l'intérieur des bobines.
- **Appareil à induction** : ils reposent sur l'action de champs alternatifs sur un équipement mobile.
- **Appareils thermiques** : ils reposent sur l'action de la dilatation due à l'effet joule dans un conducteur traversé par un courant, ou déformation d'un dispositif bimétallique ou encore par phénomène de thermocouple.
- **Appareils électrostatiques** : ils reposent sur l'action d'attraction exercée par l'armature fixe d'un condensateur sur son armature mobile.

2.3. Qualité des appareils analogiques de mesure

Principe de fonctionnement et mode de construction sont les principaux facteurs de la qualité d'un appareil de mesure.

2.3.1. Indice de classe de précision

Elle exprime l'imperfection de fabrication des appareils de mesure.

Les matériaux utilisés, les techniques de fabrication et de mise au point font qu'un appareil n'indique jamais la vraie valeur. La norme C42-100 définit les valeurs suivantes de classe :

- Les appareils étalons : classe 0.5 ; 0.1 et 0.2 (utilisés en laboratoire).
- Les appareils de contrôle : classe 0.5 et 1 (utilisés pour contrôle et vérification)
- Les appareils industriels : classe 1.5 et 2.5.
- Les indicateurs : classe 5.

2.3.2. Sensibilité

C'est l'aptitude de l'appareil à détecter de petites variations de la longueur à mesurer.

2.3.3. Fidélité

C'est la qualité de l'appareil à donner toujours la même indication pour la même valeur de la même grandeur mesurée. La fidélité peut être perturbée par :

- Les chocs sur les parties mobiles ;
- Les champs magnétiques terrestres ou produits par un appareil voisin générateur de champ parasite ;
- Les phénomènes électrostatiques ;
- L'humidité qui fait diminuer la résistance d'isolement des circuits électriques de l'appareil ;
- Le vieillissement de l'appareil qui se manifeste par la diminution du champ magnétique des aimants permanents dans les appareils magnétoélectriques ;
- La température en dilatant les pièces mécaniques et la résistance des conducteurs.

2.3.4. Rapidité d'indication

C'est la qualité que possède un appareil à donner dans un temps minimal la valeur de la grandeur à mesurer ou ses variations.

2.3.5. Justesse

C'est la qualité d'un appareil à traduire la vraie valeur qu'il mesure.

2.4. Normalisation

D'après l'UTE (Union Techniques de l'Electricité), la publication homologuée concernant les appareils de mesure à déviation est la C42-100.

2.4.1. Indications données par le constructeur

Les indications indispensables à une utilisation rationnelle de l'appareil, portées sur le cadran sont :

- Marque et modèle ;
- Indication de la nature du courant à mesurer ;
- Tension d'épreuve diélectrique ;
- Position d'utilisation du cadran (verticale, horizontale, inclinée) ;
- Classe de précision ;
- Principe de fonctionnement ;
- Domaine d'utilisation en fréquence ;
- La chute de tension pour le choix d'un shunt extérieur.

3. LES APPAREILS DE MESURE NUMERIQUES

3.1. Généralités

Les appareils de mesure numériques sont de plus en plus utilisés grâce à leur fidélité, précision et facilité de lecture.

Il est nécessaire que les utilisateurs d'appareils numériques connaissent le langage adopté par les constructeurs de ces appareils.

Le principe est de convertir une grandeur analogique en une valeur numérique pouvant être affichée. Pour cela il faut utiliser des circuits électroniques dont les principaux sont : les convertisseurs analogiques numériques, l'oscillateur, le compteur, l'afficheur.

3.2. Constitutions

Un multimètre ou appareil numérique peut être décomposé en plusieurs blocs fonctionnels :

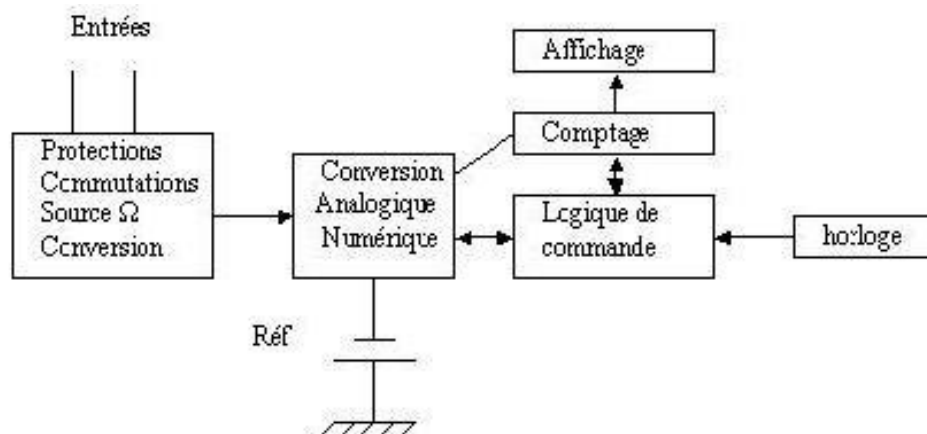


Figure 3.1 : Blocs fonctionnels d'un appareil numérique

Le circuit d'entrée reçoit le signal et a pour fonctions :

- La commutation de fonctions et de gammes, indication de la position du point décimal au circuit d'affichage ;
- Division de tension ou amplification ;
- Conversion des tensions et de courants alternatifs en valeur efficace ;
- Génération de courant ou de tensions permettant la mesure des résistances ;
- La protection de l'appareil contre les mauvaises utilisations.

Ce circuit transforme le signal reçu en une tension mesurable par le convertisseur analogique/numérique (CAN). Ce dernier compare la tension analogique à une tension de référence et fournit sa valeur numérique sous forme d'un nombre d'impulsions, à un compteur qui affichera le résultat. Le convertisseur fournit également la polarité du signal mesuré au circuit d'affichage. L'ensemble est piloté par un circuit de commande, une horloge assurant le déroulement successif des opérations de conversion et de comptage.

3.3. Caractéristiques d'un multimètre

Les multimètres sont caractérisés par :

3.3.1. Nombre de points

C'est la première caractéristique d'un multimètre ;

- Exemple : Affichage de 0000 à 9999 : 10000 valeurs possibles donc 10000 points de mesure.

3.3.2. Résolution

C'est la valeur du pas de quantification dans la gamme. Elle correspond à la petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme.

- Exemple : Appareil à 100000 points de mesure, dans la gamme 1V, la résolution est égale à $10\mu\text{V}$.

3.3.3. Fidélité

Elle est liée à la stabilité des caractéristiques des composants électroniques utilisés et la stabilité des références de tension et de temps.

- Exemple : Oscillateur ou horloge à quartz à 5MHz. à Stabilité : $5 \cdot 10^{-7}$ par mois.

La variation de fréquence en un mois : $5 \cdot 10^6 \times 5 \cdot 10^{-7} = 2.5\text{Hz}$.

3.3.4. Précision

Elle ne dépend que de la résolution et qui fait intervenir la qualité des composants, la précision des références de tension et de temps.

Egalement, elle permet de calculer l'erreur totale sur la mesure.

La précision est également donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme.



TP N°1 : MESURE DE RESISTANCES ELECTRIQUES

I-But

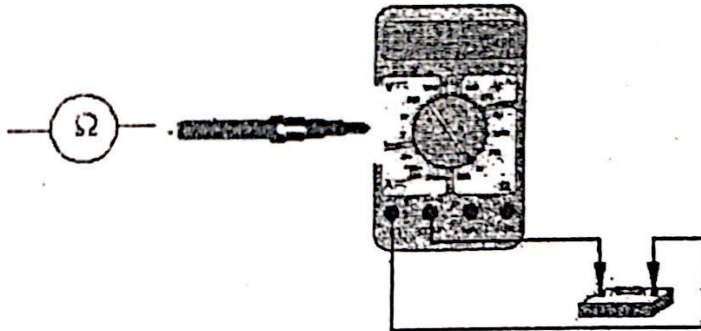
Effectuer la mesure des résistances électriques par les méthodes suivantes : L'ohmètre, voltampèremétrie, comparaison, substitution, le pont de Wheastone.

II-Rappels théoriques

a- Utilisation d'un ohmètre

Il s'agit d'une mesure directe de la valeur d'une résistance en utilisant un appareil de mesure appelé ohmètre. Il existe deux types d'ohmètres : à déviation ou à affichage numérique.

L'ohmmètre est une fonction du multimètre. On la sélectionne en mettant l'index en position Ω . Son symbole est le suivant:



Toute mesure de résistance doit être effectuée lorsque le conducteur est hors de tout circuit.

b-Méthodes indirectes

b-1-Méthode voltampèremétrie

La méthode voltampèremétrie est utilisée pour mesurer la résistance d'un dipôle. Elle consiste à mesurer l'intensité du courant qui parcourt un dipôle et la tension à ses bornes. On en déduit alors la valeur de la résistance en appliquant la loi d'Ohm.

L'ampèremètre étant branché en série sur le circuit, il existe deux façons de placer le voltmètre : soit avant l'ampèremètre, soit après l'ampèremètre.

Montage aval (ou courte dérivation) :

On appelle montage aval le montage pour lequel le voltmètre est placé après l'ampèremètre.

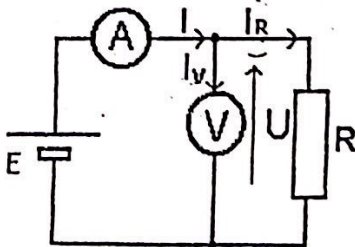


Figure 1 : Montage aval ou courte dérivation)

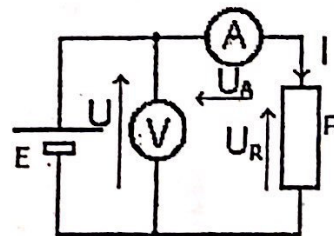


Figure 2 : Montage amont (ou longue dérivation)

TP Mesures électriques et électroniques

Dans la figure 1, on voit que le courant I lu sur l'ampèremètre n'est pas celui qui traverse la résistance. Celui qui traverse la résistance étant égale à $I - I_v$.

La tension (ou ddp) lue sur le voltmètre est celle aux bornes de la résistance, le voltmètre étant traversé par un courant d'intensité I_v .

L'application de la méthode donnera donc une valeur égale à : $R_m = \frac{U}{I}$.

Rapport de la tension lue sur l'intensité lue sur l'ampèremètre.

En fait, la valeur réelle de la résistance $R = \frac{U}{I - I_v}$, avec $I_v = \frac{U}{R_v}$, où R_v est la résistance interne du voltmètre.

$$\text{Il s'ensuit donc que : } R = \frac{U}{I - I_v} = \frac{\frac{U}{I}}{(1 - \frac{I_v}{I})} = \frac{\frac{U}{I}}{(1 - \frac{U}{R_v I})} = \frac{R_m}{(1 - \frac{R_m}{R_v})}$$

$$\text{D'où } R_m = R(1 - \frac{R_m}{R_v}) = R - \frac{R R_m}{R_v}$$

Avec la notation $R_m = R + \Delta R$, l'erreur systématique ΔR commise en mesurant R vaut :

$$\Delta R = -\frac{R R_m}{R_v} \quad \text{et} \quad \left| \frac{\Delta R}{R} \right| = \frac{R_m}{R_v}$$

Montage amont (ou longue dérivation) (Figure 2) :

On appelle montage amont le montage pour lequel le voltmètre est placé avant l'ampèremètre (en amont). Dans cette figure, on voit que le courant I lu sur l'ampèremètre, est celui qui traverse effectivement la résistance. Par contre, la tension U (ou ddp) lue sur le voltmètre est aux bornes de la résistance en série avec l'ampèremètre.

L' application de la méthode donnera donc comme précédemment une valeur égale à :

$$R_m = \frac{U}{I} \quad \text{Rapport de la tension lue sur le voltmètre sur l'intensité lue sur l'ampèremètre.}$$

Mais ici, en réalité, on a : $R_m = R + r_A = \frac{U}{I}$ avec r_A la résistance interne de l'ampèremètre.

Avec la notation $R_m = R + \Delta R$, l'erreur systématique ΔR commise en mesurant R vaut $\Delta R = r_A$

et l'erreur relative est donnée par : $\frac{\Delta R}{R} = \frac{r_A}{R_m - r_A}$

La mesure correcte suppose que $R_m \gg r_A$.

Un ampèremètre a une résistance interne faible (quelques dizaine d'ohms), ce qui permet de

la négliger dans le dénominateur. On a alors : $\frac{\Delta R}{R} = \frac{r_A}{R_m}$

La courbe de l'erreur relative $\frac{\Delta R}{R}$ en fonction de R est représentée dans la figure 3:

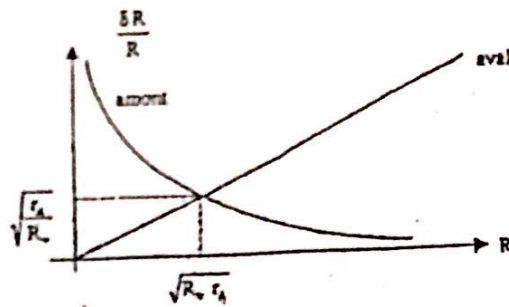


Figure 3

- Pour une résistance $R < \sqrt{R_v r_A}$ c'est le montage aval qui convient
- Pour une résistance $R > \sqrt{R_v r_A}$ c'est le montage amont qui convient
- Pour une résistance $R = \sqrt{R_v r_A}$ c'est les deux montages conviennent

b-2-Méthode de comparaison

Elle consiste à faire traverser par le même courant la résistance à mesurer R et une résistance connue R_s

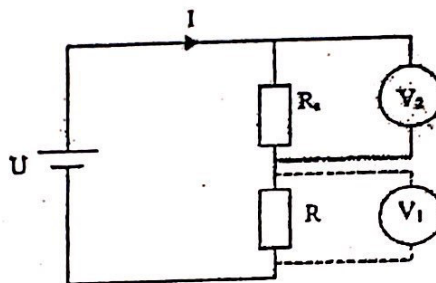


Figure 4 : Schéma de principe de la méthode de comparaison

$$R = R_s \frac{V_1}{V_2} \quad I = \frac{V_2}{R_s} = \frac{V_1}{R} \Rightarrow R = R_s \frac{V_1}{V_2}$$

b-3-Méthode de substitution

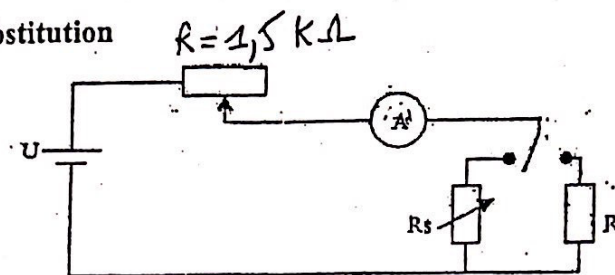
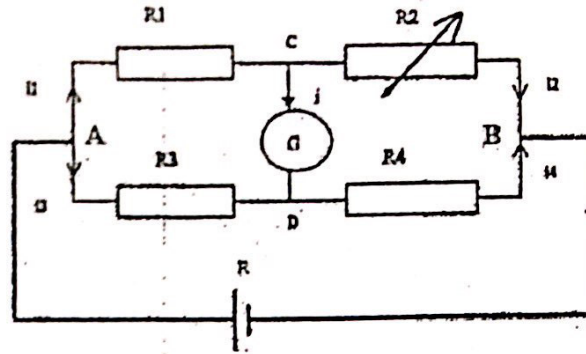


Figure 5 : Schéma de principe de la méthode de substitution

On positionne l'interrupteur pour faire passer un courant à travers la résistance R ensuite on change la position de l'interrupteur afin de faire traverser R_s par un le même courant. Ainsi, en agissant sur R_s on aura $R = R_s$. Dans le montage, on utilise un rhéostat pour avoir un courant facile à lire.

b-4-Méthode du pont de Wheastone

Le pont de Wheastone est constitué de 4 résistances dont l'une est inconnue (R_x), d'un galvanomètre et d'une source de tension continue.



. Figure 6 : Schéma de principe d'un pont de Wheatstone

Le principe de fonctionnement du pont repose sur le réglage de la résistance R_2 pour obtenir l'équilibre dans ce cas $i = 0$, c'est-à-dire $U_{CD} = 0V$. Dans ces conditions on peut écrire

$$i_1 = i_2 \text{ et } U_{AC} = U_{AD} \quad i_3 = i_4 \text{ et } U_{CB} = U_{DB}$$

On pose $R_1 = R_x$ avec R_2 variable, R_3 et R_4 sont des résistances fixes dont on connaît le rapport ($K = R_3/R_4$).

$$U_{CD} = U_D - U_C = U_D - U_A + U_A - U_C = U_{AD} + U_{CA}$$

$$U_{AD} = \frac{R_3}{(R_3 + R_4)} E \quad U_{CA} = -\frac{R_x}{(R_x + R_2)} E$$

$$U_{CD} = \frac{R_3(R_x + R_2) - R_x(R_3 + R_4)}{(R_3 + R_4)(R_x + R_2)} E = \frac{R_3 R_2 - R_x R_4}{(R_3 + R_4)(R_x + R_2)} E$$

$$\text{Si } U_{CD} = 0V \Rightarrow R_x R_4 = R_2 R_3 \Rightarrow R_x = R_2 \left(\frac{R_3}{R_4} \right)$$

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

Les erreurs dans une mesure avec le pont de Wheatstone sont dues à plusieurs causes:

- Les erreurs de construction des résistances R_2 , R_3 et R_4 .

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4}$$

- Les erreurs dues à une mauvaise appréciation de la nullité du courant dans le galvanomètre.

On choisit le rapport R_3/R_4 de façon à avoir une sensibilité maximale du pont ($K=1$).

TP Mesures électriques et électroniques

d-Manipulation n°3 : Mesure par la méthode de comparaison

- Réaliser le montage de la figure 4
- Placer dans le montage la résistance R_{X1} à mesurer et $R_S=4.7\text{ k}\Omega$
- Relever les indications des deux voltmètres.
- Refaire la même manipulation avec la résistance R_{X2} .
- Reporter les valeurs dans le tableau ci-dessous :

	V_1	V_2	$R_S V_1/V_2$	$\Delta R_X/R_X$
R_{X1}				
R_{X2}				

e-Manipulation n°4 : Mesure par la méthode de substitution

En utilisant le montage de la figure 5, placer la résistance R_{X1} ensuite relever l'indication de l'ampèremètre. Changer la position de l'interrupteur pour faire passer un courant à travers R_S . Faites varier R_S afin d'avoir le même courant ayant traversé R_{X1} . Noter alors la valeur finale de R_S .

Refaites la même manipulation avec la résistance R_{X2} .

Reporter les valeurs dans le tableau ci-dessous :

	R_S	R_X	$\Delta R_X/R_X$
R_{X1}			
R_{X2}			

f-Manipulation n°5 : Mesure par la méthode du pont de Wheastone

Réaliser le montage de la figure 6 avec $R_3=R_4=10\text{ k}\Omega$, placer la résistance R_{X1} dans le circuit et faites varier la valeur de R_2 jusqu'à l'équilibre du pont ($U_{CD}=0V$). Noter la valeur finale de R_2 . Refaire la même manipulation avec R_{X2} .

Reporter les valeurs expérimentales dans le tableau ci-dessous.

	R_2	$R_X=R_2 R_3/R_4$	$\Delta R_X/R_X$
R_{X1}			
R_{X2}			

- Compléter les différents tableaux des mesures en procédant aux calculs des erreurs relatives à chaque méthode de mesure.
- Donner une comparaison entre les valeurs des résistances mesures pour chaque méthode.
- Donner une conclusion générale sur ce TP.

III- Manipulation

a- Matériel :

- Alimentation stabilisée ($E=5\text{ V}$)
- Ohmmètre (multimètre)
- Voltmètre
- Ampèremètre
- Résistances inconnues R_{x1} et R_{x2}
- 02 résistances fixes $10\text{ k}\Omega$, une résistance de $4.7\text{ k}\Omega$, $1,5\text{ k}\Omega$

- Résistance à décades

b- Manipulation n°1 : Mesure directe avec l'ohmmètre

- > Sélectionner la fonction ohmmètre (position Ω) d'un multimètre.
- > Placer entre les 2 bornes de l'ohmmètre R_{x1} ensuite R_{x2} .
- > Relever les valeurs indiquées dans chaque cas.

c- Manipulation n°2: Mesure par la méthode voltampérométrique

- Réaliser les montages de la figure 1 et 2 pour mesurer les valeurs des résistances inconnues R_{x1} et R_{x2} .
- Relever les indications des appareils dans chaque cas.
- Reporter les valeurs dans le tableau ci-dessous

$$R_V = \frac{E}{I} = \frac{5}{0.00011} \text{ V} = 45.45 \text{ k}\Omega$$

Montage aval		
Résistances inconnues	R_{x1}	R_{x2}
U		
I		
$R_m = U/I$		
$(\Delta R/R)_{\text{systematique}} = R_m/R_v$		
$(\Delta R/R)_{\text{appareil}} = \Delta U/U + \Delta I/I$		
$R_x = R_m \pm \Delta R$		

Montage amont		
Résistances inconnues	R_{x1}	R_{x2}
U		
I		
$R_m = U/I$		
$(\Delta R/R)_{\text{systematique}} = r_A/R_m$		
$(\Delta R/R)_{\text{appareil}} = \Delta U/U + \Delta I/I$		
$R_x = R_m \pm \Delta R$		

Chapitre 3

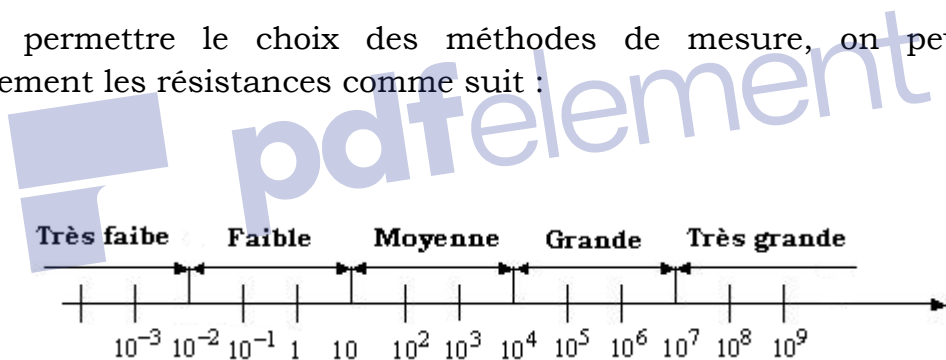
MESURE DES RESISTANCES

1. INTRODUCTION

Le degré d'opposition au déplacement du courant électrique dans un circuit définit la résistance électrique de ce circuit.

Dans la pratique industrielle, il est indispensable, pour assurer la maintenance et le dépannage des appareils et équipements électriques et électroniques de contrôler la continuité d'un circuit, de connaître la valeur d'une résistance, de vérifier le niveau d'isolement d'une installation.

Pour permettre le choix des méthodes de mesure, on peut classer arbitrairement les résistances comme suit :



2. METHODE DE MESURE DIRECTE

C'est la méthode la plus simple et la plus utilisée dans la mesure de résistances. Cette méthode utilise, comme un appareil de mesure principal : l'ohmmètre (c'est un appareil à lecture directe gradué en ohm qui donne directement la valeur de résistance par une déviation α).

2.1. Principe

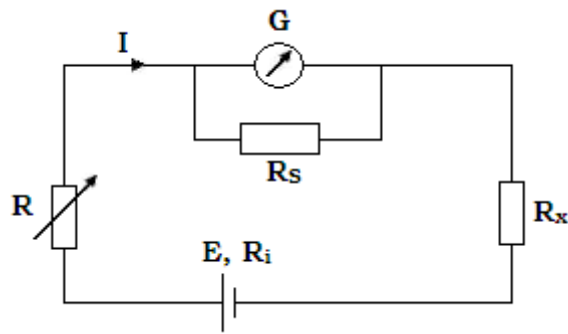


Figure 5.1 : Schéma de principe de la méthode mesure directe

Avec :

E : fém. d'une pile intérieure de résistance interne R_i , alimente le circuit.

R : résistance ajustable pour réglage de zéro.

G : un galvanomètre muni d'un shunt R_s .

K : constante en A/div.

α : déviation maximale.

D'après la loi des mailles, on a :

$$I = \frac{E}{R + R_i + R_s + R_x}$$

Et on a $I = K \cdot \alpha$

Donc :

$$K \cdot \alpha = \frac{E}{R + R_i + R_s + R_x}$$

2.2. Méthode de mesure

- On court-circuite les bornes de l'ohmmètre, un courant de court-circuit I_{cc} parcourt l'appareil.

$$I_{cc} = \frac{E}{R + R_i + R_s} = K \cdot \alpha_{cc}$$

- On coupe le court-circuit et on branche la résistance R_x à mesurer, un courant I parcourt l'appareil.

$$I = \frac{E}{R + R_i + R_s + R_x} = K \cdot \alpha$$

En faisant le rapport membre à membre, on obtient :

$$\frac{\alpha_{cc}}{\alpha} = \frac{E}{R + R_i + R_s} * \frac{R + R_i + R_s + R_x}{E} = 1 + \frac{R_x}{R + R_i + R_s}$$

$$\frac{\alpha_{cc}}{\alpha} = \frac{E + k\alpha_{cc} \cdot R_x}{E}$$

D'où :

$$R_x = \frac{E}{K} \frac{(\alpha_{cc} - \alpha)}{\alpha_{cc} \cdot \alpha}$$

La fonction $R_x = f(\alpha)$ a pour représentation une hyperbole dont le zéro de la graduation correspond à une résistance infinie et la déviation maximale correspond à une résistance nulle.

Remarque :

Un ohmmètre à déviation permet d'obtenir très rapidement une valeur approchée des résistances. Mais la précision est généralement médiocre (10%).

3. METHODES DE MESURE INDIRECTE

3.1. Méthode Voltampèremétrique

Cette méthode consiste à déterminer la valeur d'une résistance en appliquant la loi d'ohm. En effet, on mesure la tension U à ses bornes et le courant I qui la parcourt. La valeur de la résistance sera déduite par la relation suivante :

$$R_x = \frac{U}{I}$$

Pour la mesure de ces deux grandeurs, on doit utiliser un voltmètre et un ampèremètre et selon leur position on distingue deux montages :

3.1.1. Montage amont

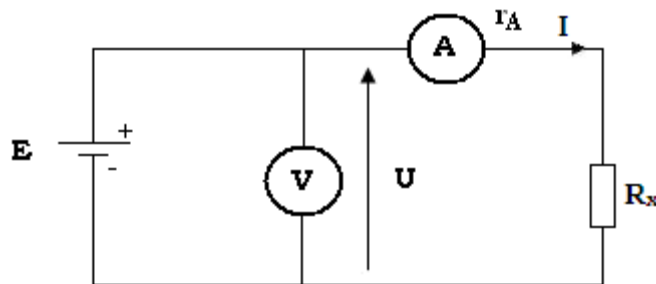


Figure 5.2 : Montage voltampèremétrique amont

En appliquant la loi de maille

On a : la résistance mesurée : $R = \frac{U}{I}$ où $R = r_A + R_x$;

Avec r_A : la résistance interne de l'ampèremètre ;

D'où :

$$R_x = R - r_A = \frac{U}{I} - r_A$$

- L'incertitude absolue de méthode est : $\Delta R_x)_{\text{mé}} = |R - R_x| = r_A$
- L'incertitude relative sera :

$$\left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)_{\text{mé}} = \frac{r_A}{R_x}$$

➤ Interprétation :

L'incertitude relative de la méthode amont est d'autant plus faible si la résistance à mesurer est plus grande devant la résistance interne de l'ampèremètre ($R_x \gg r_A$).

Ainsi, et comme la résistance interne de l'ampèremètre est de faible valeur, ce montage s'adapte pour la mesure des résistances de grande valeur.

3.1.2. Montage aval

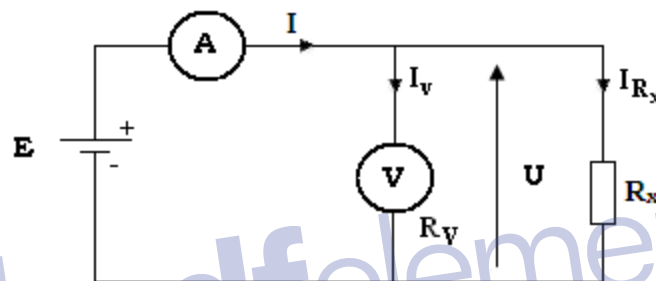


Figure 5.3 : Montage voltampère-métrique aval

On a :

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{avec} \quad I = I_{R_x} + I_V ;$$

D'où :

$$\frac{1}{R} = \frac{I_{R_x}}{U} + \frac{I_V}{U} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_V}$$

Avec R_V : la résistance interne du voltmètre;

On obtient donc :

$$R = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V}$$

L'erreur absolue sur cette mesure est : $\Delta R = \text{Valeur mesurée} - \text{Valeur exacte}$.

- L'incertitude absolue de méthode de cette mesure est :

$$\begin{aligned} \Delta R_x)_{\text{mé}} &= |R - R_x| \\ &= \left| \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} - R_x \right| = \left| \frac{R_x R_V - R_x^2 - R_x R_V}{R_x + R_V} \right| = \frac{R_x^2}{R_x + R_V} \end{aligned}$$

- L'incertitude relative sera :

$$\left(\frac{\Delta R_x}{R_x} \right)_{\text{mé}} = \frac{R_x}{R_x + R_V} = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_x}}$$

➤ Interprétation :

L'incertitude relative de la méthode aval est d'autant plus faible si la résistance à mesurer est plus petite devant la résistance interne du voltmètre ($R_x = R_V$).

Ainsi, et comme la résistance interne du voltmètre est de grande valeur, ce montage s'adapte pour la mesure des résistances de faible valeur.

3.1.3. Choix entre montage amont ou aval

Si on représente la fonction $\frac{\Delta R_x}{R_x} = f(R_x)$ pour les deux montages (amont et aval), on obtient les courbes suivantes :

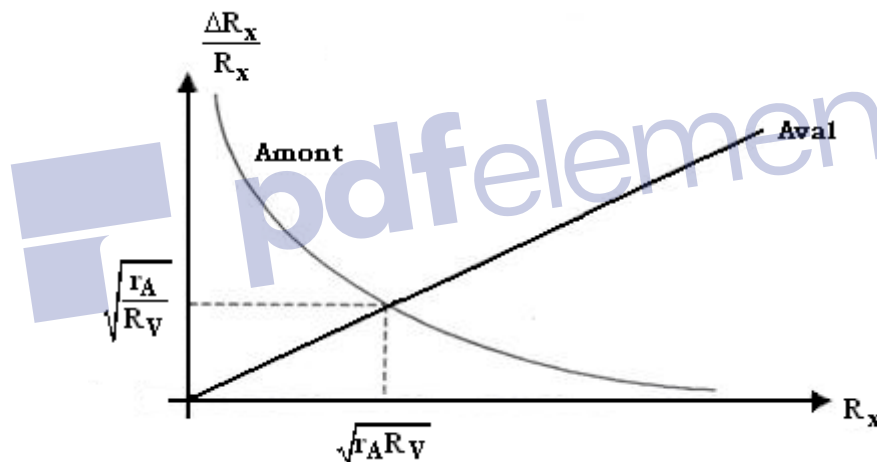


Figure 5.4 : Courbes $\frac{\Delta R_x}{R_x} = f(R_x)$

D'après les courbes on peut tirer les affirmations suivantes :

- Si $R_x < \sqrt{R_A R_V} \rightarrow$ on adopte le montage aval ;
- Si $R_x > \sqrt{R_A R_V} \rightarrow$ on adopte le montage amont.

3.2. Méthode du pont de Wheatstone

3.2.1. Schéma de principe

Un pont de Wheatstone permet la mesure des faibles et moyennes résistances. Il est constitué de :

- Quatre résistances dont trois sont étalonnées et connues (R_1 , R_2 , R) et une résistance inconnue R_x ;

- Un détecteur de courant généralement un galvanomètre à zéro central très sensible.
- Une alimentation continue délivrant un courant continu.

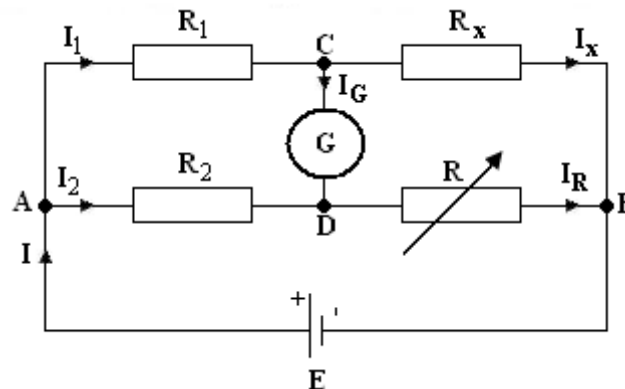


Figure 5.5 : Pont de Wheatstone

3.2.2. Condition d'équilibre

Le pont est équilibré lorsqu'aucun courant ne passe dans le détecteur **G** suite à un réglage des résistances étalonnées **R₁**, **R₂** et **R**.

Si $I_G = 0$, alors :

- $U_{CD} = 0$
- I_1 traverse **R₁** et **R_x** et I_2 traverse **R₂** et **R**.

Et, en appliquant le diviseur de tension, on obtient :

$$U_{AD} = \frac{R_2}{R_2 + R} E \quad \text{et} \quad U_{AC} = \frac{R_1}{R_1 + R_x} E$$

On a:

$$\begin{aligned} U_{CD} &= U_{CA} + U_{AD} \\ &= \frac{-R_1}{R_1 + R_x} E + \frac{R_2}{R_2 + R} E \end{aligned}$$

$$\text{Or, à l'équilibre: } U_{CD} = 0 \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_x} = \frac{R_2}{R_2 + R} \Leftrightarrow R_1 R_2 + R_1 R = R_1 R_2 + R_2 R_x$$

D'où :

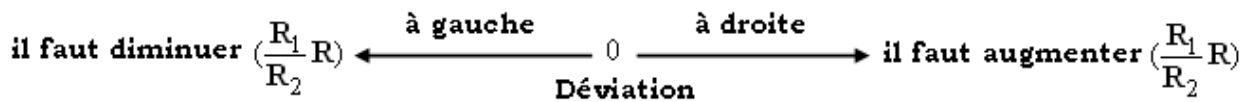
$$\boxed{R_x = \frac{R_1}{R_2} R}$$

- Le rapport $\frac{R_1}{R_2}$ est appelé rapport de proportion.
- Les résistances **R₁** et **R₂** seront constituées par des boîtes de type 10 n de façon que ce rapport appartienne à l'ensemble suivant {0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100, 1000}.

- La résistance **R** sera constituée par une association de boîtes à décades (*1, *10, *100, *1000).

3.2.3. Mode opératoire

On choisit une convention de définition du galvanomètre :



- Généralement, on règle le rapport de proportion $\frac{R_1}{R_2}$ à 1
- On choisit arbitrairement **R** et on définit la direction du spot, et selon sa direction on augmente ou on diminue sa valeur jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (un courant $I_G = 0$).
- Sinon on varie le rapport de proportion et on varie de nouveau **R** jusqu'à atteindre l'équilibre.
- On détermine **R_x** par la relation $R_x = \frac{R_1}{R_2} R$.

3.2.4. Calcul d'incertitude

On a $R_x = \frac{R_1}{R_2} R$, par conséquent :

- L'incertitude absolue s'exprime sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} \Delta R_x &= \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_1} \right|_{R_2, R=\text{cte}} \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_2} \right|_{R_1, R=\text{cte}} \cdot \Delta R_2 + \left| \frac{\partial R_x}{\partial R} \right|_{R_1, R_2=\text{cte}} \cdot \Delta R \\ &= \frac{R}{R_2} \cdot \Delta R_1 + \left| \frac{-R_1 R}{R_2^2} \right| \cdot \Delta R_2 + \frac{R_1}{R_2} \cdot \Delta R \end{aligned}$$

- L'incertitude relative sera :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R}{R}$$

Or $R = R_d + R_c + R_b + R_a = r_{1000} + r_{100} + r_{10} + r_1$ (décades)

Donc : $\Delta R = \Delta R_d + \Delta R_c + \Delta R_b + \Delta R_a$

3.3. Méthode du voltmètre en série

3.3.1. Schéma de principe

Cette méthode est utilisée spécialement pour la mesure des résistances de grande valeur. Son montage est constitué d'un voltmètre de résistance interne **R_v** et d'un générateur de tension continue.

Pour déterminer la valeur de la résistance, on procède comme suit :

- On mesure par le voltmètre la tension U aux bornes du générateur,
- puis on réalise le montage de la figure (5.6),
- enfin, sans changer le voltmètre et en conservant le même calibre, on mesure la tension U' aux bornes du voltmètre.

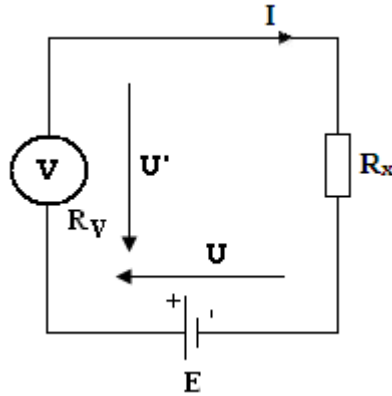


Figure 5.6 : Montage du voltmètre en série

En appliquant la loi de maille, on obtient :

$$U - U' - R_x I = 0 \Rightarrow R_x = \frac{U - U'}{I}$$

Or $U' = R_V I \Rightarrow I = \frac{U'}{R_V}$

D'où :

$$R_x = \frac{U - U'}{U'} \cdot R_V = \left(\frac{U}{U'} - 1 \right) \cdot R_V$$

Soient :

- n_1 : l'indication du voltmètre pour la tension U
- n_2 : l'indication du voltmètre pour la tension U'

Donc la valeur de résistance sera donnée par l'expression suivante :

$$R_x = (x - 1) \cdot R_V$$

Où $x = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U}{U'}$

3.3.2. Calcul d'incertitude

On a $R_x = (x - 1) \cdot R_V$, par conséquent :

- L'incertitude absolue s'exprime sous la forme suivante :

$$\Delta R_x = \left| \frac{\partial R_x}{\partial R_V} \right|_{x=\text{cte}} \cdot \Delta R_V + \left| \frac{\partial R_x}{\partial x} \right|_{R_V=\text{cte}} \cdot \Delta x$$

D'où :

$$\Delta R_x = (x-1) \cdot \Delta R_V + R_V \cdot \Delta x$$

- L'incertitude relative sera :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_V}{R_V} + \frac{x}{(x-1)} \cdot \frac{\Delta x}{x}$$

Avec $\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_2}{n_2}$

Comme les erreurs de lecture commises sur les deux mesures sont les mêmes, on a : $\Delta n_1 = \Delta n_2$, on obtient donc :

$$\begin{aligned} \frac{\Delta x}{x} &= \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_2}{n_2} \quad \text{or} \quad n_2 = \frac{n_1}{x} \\ &= \frac{\Delta n_1}{n_1} + \frac{\Delta n_1}{n_1} \cdot x \\ &= (x+1) \frac{\Delta n_1}{n_1} \end{aligned}$$

D'où :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_V}{R_V} + \frac{x(x+1)}{(x-1)} \cdot \frac{\Delta n_1}{n_1}$$

Chapitre 3

LES APPAREILS DE MESURE

1. INTRODUCTION

Un appareil de mesure est un système qui traduit un phénomène physique non ou difficilement accessible à nos sens, en un autre phénomène pouvant être visualisé et estimé.

On distingue deux types d'appareils :

- Les appareils analogiques : par leur principe de fonctionnement, donne théoriquement une valeur de la grandeur à mesurer exactement proportionnelle à cette grandeur.
- Les appareils numériques : ils donnent une valeur représentant la grandeur à mesurer au pas de quantification près. Cette valeur est donnée sous une forme de nombre (affichage numérique).

2. LES APPAREILS DE MESURE ANALOGIQUES

2.1. Généralités

Un appareil de mesure analogique comporte généralement un ou plusieurs inducteurs fixes (aimant permanent, électroaimant, ...) agissant sur un équipage mobile autour d'un axe.

La technologie interne de ces appareils repose sur trois éléments :

- La suspension de l'équipage mobile ;
- Le dispositif de lecture qui peut être à aiguille ou à spot lumineux ;
- Le dispositif d'amortissement qui peut être magnétique ou par air.

Selon leur terminologie, il existe plusieurs types d'appareils analogiques, à savoir :

- Les quotientmètres (balance électrique) ;
- Appareils intégrateurs (compteur, fluxmètre) ;
- Appareils électroniques ;
- Appareils analogiques à affichage numérique ;
- Appareils à déviation.

On s'intéressera dans ce qui suit à l'étude des appareils analogiques à déviation.

2.2. Classification des appareils analogiques à déviation

On peut classer les appareils de mesure analogiques, de type à déviation, selon la nature du phénomène physique qui détermine leur fonctionnement :

- **Appareils magnétoélectriques** : ils reposent sur l'action du champ magnétique d'un aimant fixe sur une bobine traversée par un courant.
- **Appareils ferromagnétiques** : ils reposent sur l'action des forces électromagnétiques sur une partie métallique en fer doux.
- **Appareils électrodynamiques** : ils reposent sur l'action du champ produit par une bobine fixe sur celui produit par une bobine mobile.
- **Appareils ferro-dynamiques** : même principe que les appareils électrodynamiques, mais avec un noyau de fer doux à l'intérieur des bobines.
- **Appareil à induction** : ils reposent sur l'action de champs alternatifs sur un équipement mobile.
- **Appareils thermiques** : ils reposent sur l'action de la dilatation due à l'effet joule dans un conducteur traversé par un courant, ou déformation d'un dispositif bimétallique ou encore par phénomène de thermocouple.
- **Appareils électrostatiques** : ils reposent sur l'action d'attraction exercée par l'armature fixe d'un condensateur sur son armature mobile.

2.3. Qualité des appareils analogiques de mesure

Principe de fonctionnement et mode de construction sont les principaux facteurs de la qualité d'un appareil de mesure.

2.3.1. Indice de classe de précision

Elle exprime l'imperfection de fabrication des appareils de mesure.

Les matériaux utilisés, les techniques de fabrication et de mise au point font qu'un appareil n'indique jamais la vraie valeur. La norme C42-100 définit les valeurs suivantes de classe :

- Les appareils étalons : classe 0.5 ; 0.1 et 0.2 (utilisés en laboratoire).
- Les appareils de contrôle : classe 0.5 et 1 (utilisés pour contrôle et vérification)
- Les appareils industriels : classe 1.5 et 2.5.
- Les indicateurs : classe 5.

2.3.2. Sensibilité

C'est l'aptitude de l'appareil à détecter de petites variations de la longueur à mesurer.

2.3.3. Fidélité

C'est la qualité de l'appareil à donner toujours la même indication pour la même valeur de la même grandeur mesurée. La fidélité peut être perturbée par :

- Les chocs sur les parties mobiles ;
- Les champs magnétiques terrestres ou produits par un appareil voisin générateur de champ parasite ;
- Les phénomènes électrostatiques ;
- L'humidité qui fait diminuer la résistance d'isolement des circuits électriques de l'appareil ;
- Le vieillissement de l'appareil qui se manifeste par la diminution du champ magnétique des aimants permanents dans les appareils magnétoélectriques ;
- La température en dilatant les pièces mécaniques et la résistance des conducteurs.

2.3.4. Rapidité d'indication

C'est la qualité que possède un appareil à donner dans un temps minimal la valeur de la grandeur à mesurer ou ses variations.

2.3.5. Justesse

C'est la qualité d'un appareil à traduire la vraie valeur qu'il mesure.

2.4. Normalisation

D'après l'UTE (Union Techniques de l'Electricité), la publication homologuée concernant les appareils de mesure à déviation est la C42-100.

2.4.1. Indications données par le constructeur

Les indications indispensables à une utilisation rationnelle de l'appareil, portées sur le cadran sont :

- Marque et modèle ;
- Indication de la nature du courant à mesurer ;
- Tension d'épreuve diélectrique ;
- Position d'utilisation du cadran (verticale, horizontale, inclinée) ;
- Classe de précision ;
- Principe de fonctionnement ;
- Domaine d'utilisation en fréquence ;
- La chute de tension pour le choix d'un shunt extérieur.

3. LES APPAREILS DE MESURE NUMERIQUES

3.1. Généralités

Les appareils de mesure numériques sont de plus en plus utilisés grâce à leur fidélité, précision et facilité de lecture.

Il est nécessaire que les utilisateurs d'appareils numériques connaissent le langage adopté par les constructeurs de ces appareils.

Le principe est de convertir une grandeur analogique en une valeur numérique pouvant être affichée. Pour cela il faut utiliser des circuits électroniques dont les principaux sont : les convertisseurs analogiques numériques, l'oscillateur, le compteur, l'afficheur.

3.2. Constitutions

Un multimètre ou appareil numérique peut être décomposé en plusieurs blocs fonctionnels :

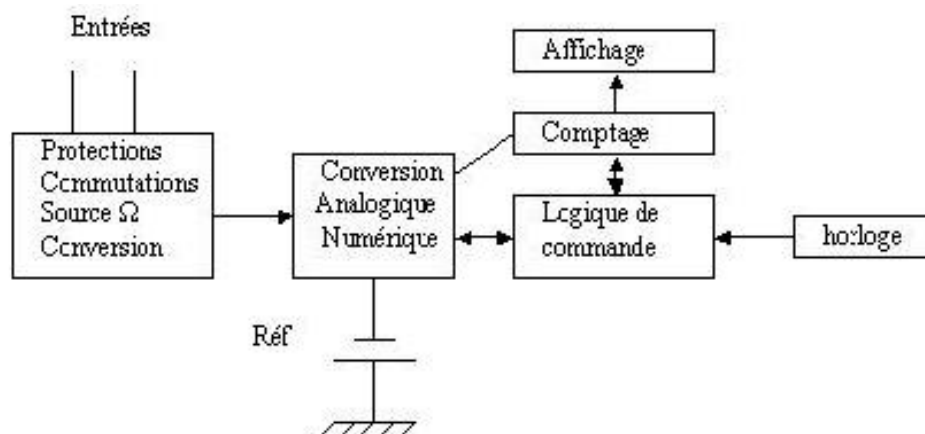


Figure 3.1 : Blocs fonctionnels d'un appareil numérique

Le circuit d'entrée reçoit le signal et a pour fonctions :

- La commutation de fonctions et de gammes, indication de la position du point décimal au circuit d'affichage ;
- Division de tension ou amplification ;
- Conversion des tensions et de courants alternatifs en valeur efficace ;
- Génération de courant ou de tensions permettant la mesure des résistances ;
- La protection de l'appareil contre les mauvaises utilisations.

Ce circuit transforme le signal reçu en une tension mesurable par le convertisseur analogique/numérique (CAN). Ce dernier compare la tension analogique à une tension de référence et fournit sa valeur numérique sous forme d'un nombre d'impulsions, à un compteur qui affichera le résultat. Le convertisseur fournit également la polarité du signal mesuré au circuit d'affichage. L'ensemble est piloté par un circuit de commande, une horloge assurant le déroulement successif des opérations de conversion et de comptage.

3.3. Caractéristiques d'un multimètre

Les multimètres sont caractérisés par :

3.3.1. Nombre de points

C'est la première caractéristique d'un multimètre ;

- Exemple : Affichage de 0000 à 9999 : 10000 valeurs possibles donc 10000 points de mesure.

3.3.2. Résolution

C'est la valeur du pas de quantification dans la gamme. Elle correspond à la petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme.

- Exemple : Appareil à 100000 points de mesure, dans la gamme 1V, la résolution est égale à $10\mu\text{V}$.

3.3.3. Fidélité

Elle est liée à la stabilité des caractéristiques des composants électroniques utilisés et la stabilité des références de tension et de temps.

- Exemple : Oscillateur ou horloge à quartz à 5MHz. à Stabilité : $5 \cdot 10^{-7}$ par mois.

La variation de fréquence en un mois : $5 \cdot 10^6 \times 5 \cdot 10^{-7} = 2.5\text{Hz}$.

3.3.4. Précision

Elle ne dépend que de la résolution et qui fait intervenir la qualité des composants, la précision des références de tension et de temps.

Egalement, elle permet de calculer l'erreur totale sur la mesure.

La précision est également donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme.

