

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA - BEJAIA



Faculté de Technologie
Département d'Automatique, de Télécommunication et d'Electronique

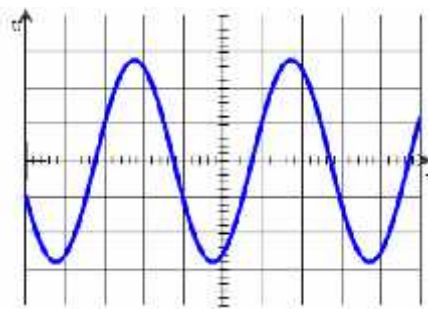
Polycopié de Cours

MESURES ELECTRIQUES ET ELECTRONIQUES

Elaboré par :

M^{me} IDJDARENE Née HADJI Souad

Maître de Conférences Classe B



Année Universitaire 2021-2022

Table des matières

Avant-propos

Chapitre I : Notions fondamentales sur la mesure

I.1. Définitions	1
I.2. Système d'unités	3
I.3. Equations aux dimensions	3
I.4. Grandeurs électriques et unités de mesure	5
I.5. Méthodes de mesure	6
I.5.1. Méthodes de déviation	6
I.5.1.1. Méthode de déviation directe	6
I.5.1.2. Méthode de déviation indirecte	7
I.5.2. Méthodes des ponts	7
I.5.2.1. Ponts de mesure en continu.....	7
I.5.2.2. Ponts de mesure en alternatif	8
I.5.3. Méthode de résonance	9
I.6. Erreurs et incertitudes de mesure	9
I.6.1. Erreurs de mesure	9
I.6.1.1. Erreurs systématiques	10
I.6.1.2. Erreurs aléatoires	10
I.6.2. Incertitudes de mesure	11
I.7. Présentation du résultat	11

Chapitre II : Qualité des appareils de mesure

II.1. Caractéristiques des appareils de mesure	12
II.1.1. Gamme de mesure et étendue de mesure.....	12
II.1.2. Classe de précision et résolution	12
II.1.3. Sensibilité	13
II.1.4. Fidélité	13
II.1.5. Justesse	14
II.1.6. Rapidité d'indication	14
II.2. Calcul pratique de l'incertitude	14
II.2.1. Incertitudes de mesure pour un appareil analogique	14

II.2.2. Incertitudes de mesure pour un appareil numérique.....	15
II.3. Règles de calcul d'incertitude	16

Chapitre III : Appareils de mesure analogiques

III.1. Classification des appareils analogiques à déviation	17
III.1.1. Appareils magnétoélectriques	17
III.1.1.1. Mesure en alternatif	20
III.1.1.2. Appareil magnétoélectrique avec redresseur	21
III.1.1.3. Utilisation des appareils magnétoélectriques	23
III.1.1.3.1. Utilisation en ampèremètre	23
III.1.1.3.2. Utilisation en voltmètre	25
III.1.1.3.3. Utilisation en ohmmètre	26
III.1.1.3.4. Utilisation en multimètre	27
III.1.2. Appareils ferromagnétiques	28
III.1.3. Appareils électrodynamiques	30
III.1.4. Appareils électroniques	31
III.2. Symboles portés sur les cadrans des appareils analogiques	32
III.3. Oscilloscopes analogiques	34
III.3.1. Principe de fonctionnement de l'oscilloscope analogique.....	34
III.3.2. Mesure sur l'oscilloscope	36
III.3.2.1. Mesure de tension	36
III.3.2.2. Mesure de période et de fréquence.....	37
III.3.2.3. Mesure de déphasage	37
III.3.2.3.1. Méthode directe.....	37
III.3.2.3.2. Méthode de Lissajous (mode XY)	38

Chapitre IV : Appareils de mesure numériques

IV.1. Principe de fonctionnement d'un appareil de mesure numérique	41
IV.2. Convertisseurs analogiques numériques (CAN)	41
IV.1.1. Convertisseur simple rampe.....	41
IV.1.2. Convertisseur double rampe	43
IV.3. Capteurs	45
IV.3.1. Mesure de courant	45

IV.3.2. Mesure de résistance	46
IV.3.3. Mesure d'impédance	46
IV.4. Multimètre numérique.....	47
IV.5. Caractéristiques	51
IV.6. Oscilloscopes numériques.....	52

Chapitre V : Méthodes de mesures des grandeurs électriques

V.1. Mesure des tensions	54
V.1.1. Types de voltmètres utilisés pour mesurer la tension	55
V.1.2. Accessoires de mesure	56
V.2. Mesure des courants	58
V.2.1. Types d'ampèremètres pour mesurer le courant	58
V.2.2. Accessoires de mesure	59
V. 3. Mesure des résistances	61
V.3.1. Ohmmètre	61
V.3.2. Méthode voltampèremétrique.....	63
V.3.2.1. Montage amont	63
V.3.2.2. Montage aval	64
V.3.3. Pont de Wheatstone	65
V.4. Mesure des impédances	66
V.4.1. Méthode voltampèremétrique	66
V.4.2. Ponts de mesure des impédances	67
V.4.2.1. Mesure d'impédances capacitives	67
V.4.2.1.1. Pont de Sauty	67
V.4.2.1.2. Pont de Wien	68
V.4.2.2. Mesure d'impédances inductives	69
V.4.2.2. 1. Pont de Maxwell	69
V.4.2.2.2. Pont de Hay	70
V.4.3. Méthode de résonance	70
V.5. Mesures des Puissances	72
V.5.1. Mesure de la puissance en courant continu (DC)	72
V.5.1.1. Méthode voltampèremétrique	72
V.5.1.1.1. Montage amont	72

V.5.1.1.2. Montage aval	73
V.5.1.2. Méthode du wattmètre	74
V.5.1.2.1. Montage amont	74
V.5.1.2.2. Montage aval	75
V.5.2. Mesure de la puissance en courant alternatif monophasé (AC)	75
V.5.2.1. Mesure de la puissance apparente	77
V.5.2.2. Mesure de la puissance active	77
V.5.2.3. Mesure de la puissance réactive	79
V.6. Mesures des fréquences et des déphasages	80
V.6.1. Mesure des fréquences	80
V.6.1.1. Fréquencemètre	80
V.6.1.2. Périodemètre.....	82
V.6.2. Mesure des déphasages	83
Exercices	84
Solutions.....	87
Bibliographies	95

Avant- propos

La mesure joue un rôle de plus en plus importante dans les domaines électriques et électroniques. On mesure avec pour but la vérification expérimentale d'un circuit, la modélisation, la mise au point ou le dépannage d'un montage, la certification d'un procédé ou d'un produit dans le domaine industriel et la maintenance ou la réparation d'un dispositif électrique ou électronique.

Dans le domaine électrique et électronique, on utilise plusieurs types d'appareils de mesure tels que les voltmètres pour mesurer des tensions, les ampèremètres pour mesurer des intensités et les ohmmètres pour mesurer des résistances,... etc. Et on utilise souvent des multimètres numériques pour leurs précisions.

Ce polycoché de cours a pour objectif d'initier les étudiants aux systèmes de mesures (analogiques et numériques), de choisir les méthodes de mesures et le matériel approprié à leurs expériences afin d'obtenir de bons résultats. Il propose une présentation pédagogique de l'enseignement du module "Mesures électriques et électronique", destiné à l'usage des étudiants de la deuxième année licence, de l'université de Bejaia, des filières Automatique, Télécommunication et Electronique.

Le présent manuscrit est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre est un rappel des notions fondamentales de la mesure. Le deuxième chapitre fait découvrir à l'étudiant la qualité d'un appareil de mesure et les règles de calcul d'erreurs. Les appareils de mesure analogiques et mesure à l'oscilloscope sont traités dans le troisième chapitre. Les appareils de mesure numériques sont exposés en détail dans le cinquième chapitre. Du fait qu'il existe une variété de grandeurs électriques, différentes méthodes et plusieurs appareils de mesure, le contenu du dernier chapitre est limité à certaines grandeurs et quelques méthodes usuelles. Il présente les méthodes de mesure des grandeurs électriques : mesures des courants et des tensions, mesure des résistances et des impédances, mesures des puissances, et mesure des fréquences et des déphasages. Enfin, une série d'exercices corrigés est proposée.

Chapitre I

Notions fondamentales sur la mesure

Dans le domaine électrique et électronique comme dans les autres sciences, la mesure joue un rôle de plus en plus important. En générale, la mesure est nécessaire à toute connaissance, à toute prise de décision et à toute action. Dans ce domaine, elle a comme objectifs :

- Vérification expérimentale d'un circuit ;
- Maintenance ou la réparation d'un dispositif électrique ou électronique;
- Acceptation d'un produit (mesure des caractéristiques, des performances);
- Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé.

I.1. Définitions

Mesurer une grandeur consiste à lui attribuer une valeur quantitative en prenant pour référence une grandeur de même nature appelée unité. Dans le langage courant des métrologues, on entend souvent dire mesurer c'est comparer.

Un résultat de mesure s'écrit sous la forme :

$$G = X[U] \quad (\text{I.1})$$

Où G est le nom de la grandeur physique, [U] représente l'unité et X est la valeur numérique de la grandeur exprimée dans l'unité choisie.

Lors de la mise en œuvre d'un processus de mesure, interviennent des erreurs élémentaires qui affectent le résultat. La mesure est une représentation quantifiée d'une grandeur physique (température, masse, longueur, champ électrique ...) à laquelle on lui associé une incertitude afin d'évaluer la qualité de la mesure (mesurage). La figure I.1 montre la chaîne de mesure.



Figure I.1 : Chaîne de mesure.

- **Mesurande** : grandeur physique soumise à mesurage.
- **Mesurage** : ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- **Mesure** : valeur numérique représentant la grandeur à mesurer ($2m$, $20^{\circ}C$, $2 m.s^{-1}$...).

- **Unité de mesure** : grandeur particulière, définie par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement.

- **Incertitude de mesure** : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être attribuées à la grandeur mesurée.

Exemple : $5 \text{ cm} \pm 10\%$ ou $5 \text{ cm} \pm 1 \text{ mm}$.

- **Étalon de mesure** : un instrument auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude des résultats fournis par un instrument de mesure. Un étalon sert à étalonner d'autres étalons ou des équipements qui mesurent la même grandeur. Il existe donc pour chaque grandeur physique un étalon.

Lors d'une mesure d'une grandeur en utilisant directement un appareil de mesure, tel que la mesure d'une tension, se fait sans étalon. C'est l'appareil de mesure lui-même qui est étalonné, à l'aide d'un appareil de calibrage de grande précision qui doit être conforme à la valeur du volt légal.

Pour réaliser les mesures et vérifier la précision et la stabilité des instruments on a besoin d'un certain nombre d'étalons. Il existe des unités au niveau mondial pour fabriquer les étalons (par exemple BNM : Bureau National de Métrologie). Parmi les étalons on trouve la pile Weston (voir la figure II.2) qui est un étalon de force électromotrice de 1.018 V à 20°C .



Figure I.2 : Pile de Weston.

- **Étalonnage d'un instrument de mesure** : une opération qui consiste à mesurer la même grandeur avec l'instrument à étalonner et l'équipement étalon, et à comparer les indications des deux instruments. La figure I.3 montre l'étalonnage d'un voltmètre par la méthode

d'étalonnage par comparaison directe. L'appareil à étalonner, V_x , est monté en parallèle avec l'appareil étalon, V_e , aux bornes d'une source de tension réglable.

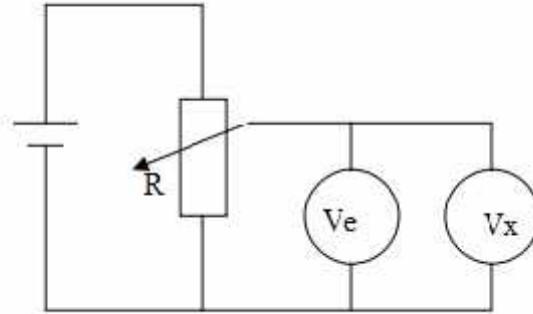


Figure I.3 : Etalonnage d'un voltmètre.

I.2. Système d'unités

Le système international (système SI ou MKSA) repose sur sept unités de base. Les grandeurs des unités fondamentales dans le système international ainsi que leurs symboles sont données dans le tableau I.1.

Deux unités sont ajoutées aux unités fondamentales, ce sont les unités d'angles (plan et solide) le radian et le stéradian. Les unités dérivées sont exprimées en fonction des unités de base. Certaines d'entre elles possèdent des noms et symboles spéciaux.

Tableau I.1 : Grandeurs physiques de base du SI avec leurs unités et symboles.

Grandeur	Unité	Symbole
Longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Courant électrique	ampère	A
Température thermodynamique	kelvin	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité lumineuse	candela	cd

I.3. Equations aux dimensions

Dans une relation entre grandeurs, on remplace chaque terme par la grandeur fondamentale correspondante : L pour une longueur, M pour une masse, T pour un temps, I pour une intensité..., on obtient ainsi l'équation aux dimensions. Cette équation permet de :

- Déterminer l'unité composée d'une grandeur en fonction des grandeurs fondamentales.
- Vérifier l'homogénéité d'une formule.

Exemple 1: L'unité d'une force F s'exprime en newton. Si on revient aux unités de base du système SI la force est exprimée par une masse m et une accélération selon la relation suivante :

$$F = m \cdot \gamma$$

On remplace chaque terme de cette équation par son symbole et sa dimension correspondante (1 par rapport à la masse, 1 par rapport à la longueur et -2 par rapport au temps) et on écrit $[F] = M L T^{-2}$.

Pour les unités, on peut dire que le newton est équivalent au $kg.m.s^{-2}$ dans le système international.

Exemple 2: Vérifier que la fréquence f de résonance d'un circuit RLC est homogène.

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

On utilise par exemple ces deux équations :

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

$$\text{et } i = C \frac{du}{dt} \quad (2)$$

On remplace chaque terme par son symbole et sa dimension, on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \Rightarrow [L] = \frac{[u][T]}{[I]} \\ (2) \Rightarrow [C] = \frac{[I][T]}{[u]} \end{array} \right. \Rightarrow [LC] = [T^2] \quad \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{[LC]}} = \frac{1}{[T]} = s^{-1} = \text{Hz}$$

D'où, l'expression de f est homogène.

I.4. Grandeurs électriques et unités de mesure

Les principales grandeurs électriques qu'on est amené à mesurer sont :

- La tension ou différence de potentiel entre 2 points,
- L'intensité d'un courant dans une branche d'un circuit,
- La résistance d'un dipôle,
- La capacité d'un condensateur,
- L'inductance d'une bobine,
- La puissance dissipée dans un circuit,
- La fréquence et la période et le déphasage d'un signal.

Le tableau suivant contient les principales grandeurs électriques et leurs unités dans le système international.

Tableau I.2 : Grandeurs électriques, leurs unités et leurs appareils de mesure.

Grandeur	Symbole	Unité	Symbole	Appareils de mesure
Tension	U	Volt	V	Voltmètre
Intensité	I	Ampère	A	Ampèremètre
Puissance	P	Watt	W	Wattmètre
Résistance	R	Ohm		Ohmmètre
Capacité	C	Farad	F	Capacimètre
Inductance	L	Henry	H	Henrymètre
Période	T	seconde	s	Périodemètre
Fréquence	f	Hertz	Hz	Fréquencemètre
Eclairement	E	Luxe	Lux	Luxmètre

Les différentes unités peuvent être subdivisées en multiples et sous multiples (voir tableau I.3).

Tableau I.3 : Multiples et sous multiples des unités.

Préfixe	Symbole	Multiplicateur
Exa	E	10^{18}
Péta	P	10^{15}
Téra	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Méga	M	10^6
Kilo	k	10^3
hecto	h	10^2
déca	da	10^1
déci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro	μ	10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
alto	a	10^{-18}

I.5. Méthodes 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.5.1. Méthodes de déviation

I.5.1.1. Méthode de déviation directe

La méthode directe consiste à lire directement sur l'appareil de mesure la valeur de la grandeur à mesurer, tel que la lecture d'une tension sur un voltmètre, d'une puissance sur un wattmètre ou d'une résistance sur un ohmmètre.

I.5.1.2. Méthode de déviation indirecte

Cette méthode consiste à utiliser plusieurs appareils pour mesurer une grandeur, et ce en utilisant une ou plusieurs relations entre les différentes grandeurs mesurées. Pour mesurer une puissance P on utilise un voltmètre pour mesurer la tension U et un ampèremètre pour mesurer le courant I , la puissance est déduite de la relation :

$$P = U \cdot I \quad (\text{I.2})$$

I.5.2. Méthodes des ponts

Les ponts ont été très utilisés pour la mesure des résistances, inductances et capacités, voir des fréquences. La grandeur à mesurer est une fonction déterminée de grandeurs connues lorsqu'une grandeur auxiliaire est nulle. La nullité est indiquée par un indicateur de zéro.

I.5.2.1. Ponts de mesure en continu

Pour la mesure de résistances, on utilise le pont de Wheatstone (voir figure I.4). Il est constitué de 4 résistances : la résistance à mesurer, une résistance variable et deux résistances fixes, un générateur continu et un indicateur de zéro (généralement un appareil de grande sensibilité (Galvanomètre)).

Le pont est dit qu'il est en équilibre lorsque le courant i est nul, c'est-à-dire $U_{CD} = 0V$.

Dans ces conditions on peut écrire :

$$\begin{cases} i_1 = i_2 \Rightarrow U_{AC} = U_{AD} \\ i_3 = i_4 \Rightarrow U_{CB} = U_{DB} \end{cases} \Rightarrow \frac{R_1}{R_1 + R_2} E = \frac{R_3}{R_3 + R_4} E$$

$$\Rightarrow R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (\text{I.3})$$

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

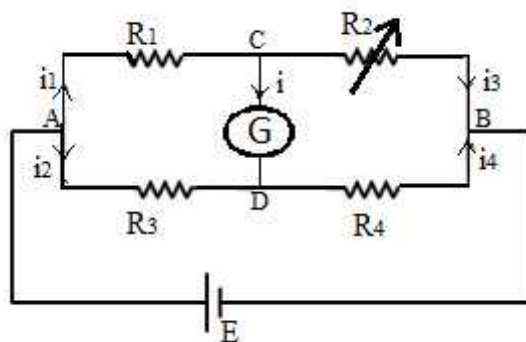


Figure I.4 : Pont de Wheatstone.

Si R_1 la résistance à mesurer, R_2 la résistance variable, R_3 et R_4 sont des résistances fixes connues, on peut déduire que :

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} \quad (\text{I.4})$$

Toute variation de R_2 provoquera le déséquilibre du pont.

I.5.2.2. Ponts de mesure en alternatif

Ce type de pont est utilisé pour la mesure d'impédances (inductive et capacitive). On utilise une source alternative et un millivoltmètre comme indicateur de zéro. 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 diagonaux des impédances sont égaux (égalité entre parties réelles et parties imaginaires).

On distingue les ponts PQ et P/Q présentés sur la figure I.5.

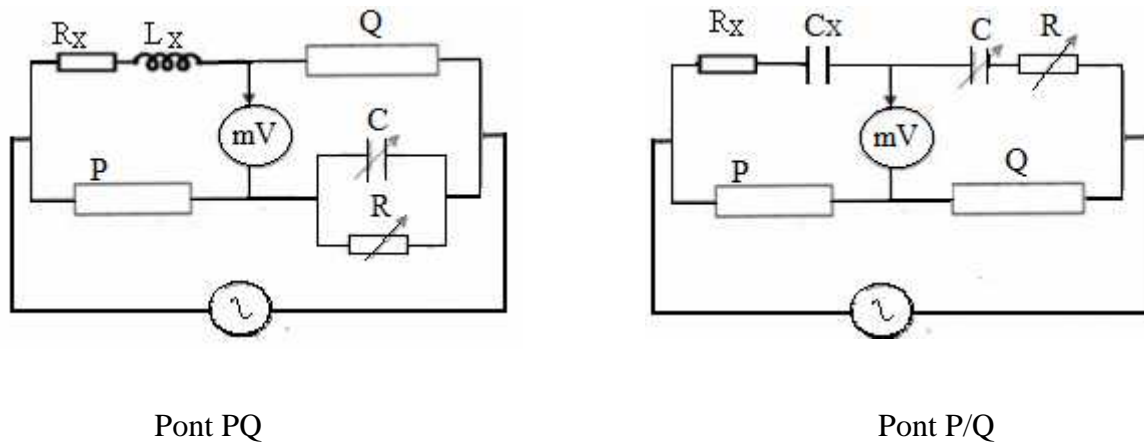


Figure I.5 : Ponts de mesure en alternatif.

P et Q sont des résistances pures. Z_x est l'impédance inconnue.

$$Z_x = R_x + jX_x$$

Z est une impédance variable et connue.

$$Z = R + jX$$

Dans le pont PQ, on a :

$$P \cdot Q = (R_x + jX_x) \cdot (R + jX) \Rightarrow P \cdot Q = (R_x \cdot R - X \cdot X_x) + j(R_x \cdot X + R \cdot X_x) \quad (\text{I.5})$$

Puisque, P et Q sont des résistances, le produit est un nombre réel. Donc on aura :

$$\begin{cases} P \cdot Q = R_x \cdot R - X \cdot X_x \\ \frac{R_x}{R} = -\frac{X_x}{X} \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

Z_x et Z sont de natures différentes. Comme Z est une impédance capacitive, donc ce pont est utilisé pour mesurer les impédances inductives.

Pour le pont P/Q, on a donc :

$$\frac{P}{Q} = (R_x \cdot R + X \cdot X_x) + j(R_x \cdot X - R \cdot X_x) \quad (I.7)$$

P et Q sont deux résistances, le quotient est un nombre réel :

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{P}{Q} = R_x \cdot R + X \cdot X_x \\ \frac{R_x}{R} = \frac{X_x}{X} \end{cases} \quad (I.8)$$

Z_x et Z sont de même nature. Comme l'impédance Z est capacitive, donc ce pont est utilisé pour mesurer les impédances capacitatives.

I.5.3. Méthode de résonance

La méthode de résonance est utilisée pour mesurer des capacités et des inductances. Elle consiste à placer la grandeur à mesurer dans un circuit RLC (résistance, inductance et capacité) résonant série ou parallèle et d'en déduire la grandeur inconnue à la résonance. En effet, si on considère un circuit résonant série, à la résonance le courant qui circule dans le circuit est maximal et l'impédance agit comme une résistance R .

Donc on peut écrire :

$$LC\omega^2 = 1 \quad (I.9)$$

Avec ω est la pulsation du signal.

À partir de l'équation précédente on déduit la grandeur inconnue (L ou C).

I.6. Erreurs et incertitudes de mesure

I.6.1. Erreurs de mesure

Dans toute expérimentation, la prise de mesure comporte une part d'imprécision. Les seuls mesurands dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque

leur valeur est fixée par convention. La valeur de toute autre mesure ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. Toutefois, l'incertitude permet de décrire la dispersion de la valeur, soit l'intervalle dans laquelle la valeur exacte se situe. L'incertitude peut être associée à l'instrument de mesure utilisé, au manque de rigueur dont fait preuve celui ou celle qui prend la mesure ou à la difficulté d'interpréter une mesure sur une échelle donnée. Suivant les causes, on a deux types d'erreurs :

- Erreurs systématiques
- Erreurs aléatoires

I.6.1.1. Erreurs systématiques

Les erreurs systématiques sont des erreurs reproductibles dues à des causes connues. Elles sont généralement liées à l'appareil de mesure. Elles peuvent être réduites ou corrigées. Leurs origines sont :

- le choix de la méthode de mesure (mesurer la même grandeur avec différentes méthodes).
- l'appareil de mesure (indice de classe de précision, mauvais réglage du zéro électrique ou mécanique).
- l'opérateur : Parfois, lors d'une mesure, l'aiguille ou le spot lumineux s'immobilise entre deux traits de la graduation ce qui oblige l'opérateur à estimer une fraction de division de l'échelle de lecture, il en résulte une erreur inévitable.

On peut remédier à ces erreurs par un bon réglage de zéro, un bon étalonnage et une appréciation de la fraction de division, en tenant compte des erreurs de méthode dans la mesure en les calculant.

I.6.1.2. Erreurs aléatoires

Ce sont des erreurs non reproductibles, qui obéissent à des lois statistiques. Elles peuvent provenir de l'instrument à cause de variation d'un milieu (température, humidité,..) et fluctuation d'un réseau.

On peut réduire ces erreurs en faisant une série de mesures. La valeur moyenne, arithmétique donne un résultat proche de la valeur exacte si le nombre de mesure augmente.

La valeur moyenne obtenue sur les N mesures indépendantes est :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} X_i \quad (\text{I.10})$$

Où : X_i est le $i^{\text{ème}}$ résultat de la série de N mesures.

La dispersion des mesures se caractérise par l'estimateur de son écart-type :

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N} (X_i - \bar{X}) \quad (\text{I.11})$$

I.6.2. Incertitudes de mesure

On distingue deux types d'incertitudes de mesure :

- Incertitude absolue ΔX qui est la limite supérieure de l'erreur absolue X , l'écart entre la valeur mesurée X_m et la valeur exacte du mesurande X . Elle a la même unité que la grandeur mesurée.

$$\Delta X = |X_m - X| \quad (\text{I.12})$$

- Incertitude relative est définie par :

$$\frac{\Delta X}{X} = \frac{|X_m - X|}{X} \quad (\text{I.13})$$

C'est un nombre sans dimension, donc généralement on l'exprime en %.

I.7. Présentation du résultat

Le résultat de mesure peut s'exprimer de deux manières :

- La première : la valeur adoptée est égale à la valeur mesurée suivie de l'évaluation de l'incertitude absolue.

$$X = (X_m \pm \Delta X) [\text{unité}] \quad (\text{I.14})$$

- La seconde : la valeur adoptée est égale à la valeur mesurée suivie de l'évaluation de l'incertitude relative.

$$X = X_m [\text{unité}] \pm \left(\frac{\Delta X}{X} \right) \% \quad (\text{I.15})$$

Chapitre II

Qualité des appareils de mesure

Un appareil de mesure est un instrument qui permet d'obtenir des informations avec plus ou moins de précision sur une grandeur physique que l'on souhaite connaître. On distingue deux types d'appareils :

- Les appareils de mesure analogiques : Ils sont équipés d'une aiguille qui indique sur une échelle graduée la valeur de la grandeur mesurée.
- Les appareils de mesure numériques : La valeur de la mesure est affichée sous forme numérique.

La qualité métrologique d'un appareil de mesure est l'ensemble des données qui caractérisent la qualité de la mesure effectuée par le dispositif considéré.

II.1. Caractéristiques des appareils de mesure

Les principales caractéristiques des instruments de mesure sont :

II.1.1. Gamme de mesure et étendue de mesure

La gamme de mesure correspond à l'ensemble des valeurs de la grandeur à mesurer pour lesquelles un instrument de mesure est supposée fournir une mesure correcte. Alors que l'étendue de mesure est la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure. Ces deux valeurs extrêmes s'appellent la portée minimale et la portée maximale. Par exemple, un voltmètre pourrait avoir une étendue de mesure comprise entre 1 volt et 10 volt.

Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle (voir figure II.1).

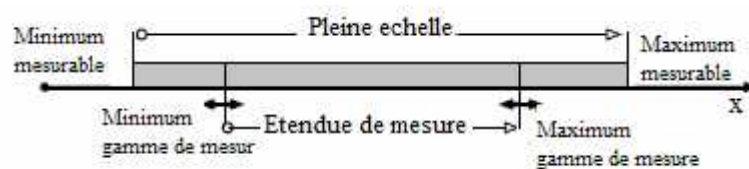


Figure II. 1 : Gamme de mesure et étendue de mesure.

II.1.2. Classe de précision et résolution

La classe d'un appareil de mesure correspond à la valeur du rapport entre la plus grande erreur possible et l'étendue de mesure. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\text{Classe} = 100 \left(\frac{\text{plus grande erreur possible}}{\text{étendue de mesure}} \right) \quad (\text{II.1})$$

Cette incertitude est fournie par le constructeur, un nombre figurant sur le cadran de l'appareil de mesure. Plus ce nombre est petit, plus la précision est meilleure.

Il existe :

- Appareils étalons : classe 0,5 ; 0,2 et 0,1 (utilisés en laboratoire).
- Appareils de contrôle : classe 0,5 et 1 (utilisés pour contrôle et vérification).
- Appareils industriels : classe 1,5 et 2.5.
- Appareils indicateurs : classe 5 (utilisés sur les tableaux).

La résolution est la plus petite variation détectée par l'appareil. Pour les appareils de mesure numériques, on définit la résolution par :

$$\text{résolution} = 100 \left(\frac{\text{Gamme}}{\text{nombre de points de la mesure}} \right) \quad (\text{II.2})$$

Exemple : un multimètre de 2000 points pour une étendue de 2 V peut afficher toutes les valeurs comprises entre 0,000 V et 1,999 V. Donc, sa résolution est de 1 mV.

II.1.3. Sensibilité

La sensibilité est la variation du signal de sortie s d'un appareil de mesure en fonction de la variation du signal d'entrée e . On peut écrire alors :

$$\sigma = \frac{\Delta s}{\Delta e} = \frac{ds}{de} \quad (\text{II.3})$$

Un appareil est dit de grande sensibilité s'il peut détecter la plus petite variation de la grandeur d'entrée.

II.1.4. Fidélité

La fidélité correspond à 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 ;
- 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.

II.1.5. Justesse

La Justesse est la qualité d'un appareil à traduire la vraie valeur qu'il mesure. Un appareil précis est à la fois fidèle et juste.

II.1.6. Rapidité d'indication

La rapidité d'indication correspond à la qualité que possède un appareil à donner dans un temps minimal la valeur de la grandeur à mesurer ou ses variations.

II.2. Calcul pratique de l'incertitude

II.2.1. Incertitudes de mesure pour un appareil analogique

Pour ce type d'appareil la déviation de l'aiguille sur l'échelle graduée est proportionnelle à la valeur du mesurande. La valeur mesurée est exprimée par la relation suivante :

$$X_m = \frac{\text{lecture} \times \text{calibre}}{\text{échelle}} \quad (\text{II.4})$$

Si on prend un appareil analogique tel que un voltmètre, on peut avoir une erreur due à :

- l'indice de classe de précision défini par :

$$\Delta U_c = \frac{\text{classe} \times \text{calibre}}{100} \quad (\text{II.5})$$

C'est l'incertitude instrumentale.

De plus, l'opérateur n'étant pas parfait ; il peut commettre une erreur de lecture qui entraîne :

- une incertitude de lecture donnée par :

$$\Delta U_c = \frac{\text{erreur de lecture en division (appréciation)} \times \text{calibre}}{\text{nombre de division du cadran (échelle)}} \quad (\text{II.6})$$

Généralement l'erreur de lecture est estimable à 1/4 de division.

- une erreur due à la méthode ΔU_m s'il elle existe.

L'incertitude total est donnée par :

$$\Delta U_T = \Delta U_c + \Delta U_l + \Delta U_m \quad (\text{II.7})$$

Lorsqu'on utilise un appareil à déviation, il faut choisir le calibre donnant la plus grande déviation afin d'obtenir la mesure la plus précise. Pour effectuer une bonne lecture, nous devons nous placer de telle façon que l'aiguille masque totalement son image tel que le montre la figure II.2.

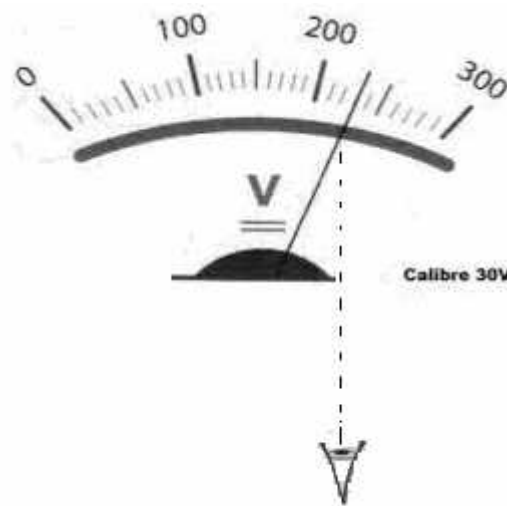


Figure II. 2 : Lecture correcte sur un appareil de mesure à déviation.

II.2.2. Incertitudes de mesure pour un appareil numérique

Pour les appareils numériques, les constructeurs fournissent sous le nom de précision une indication qui permet de calculer l'incertitude totale sur la mesure. La précision est généralement donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme. L'incertitude totale est exprimée par :

$$\Delta X = \pm (a \% \times \text{Lecture} + b \times \text{résolution}) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$a\%$: Donnée par le constructeur.

b : Nombre de points d'erreur commise par appareil, donnée par le constructeur. indique de combien le chiffre binaire de poids le plus faible peu être faux.

On remplace l'expression de la résolution, on obtient :

$$\Delta X = \frac{a \cdot L}{100} + \frac{b \cdot G}{N} \quad (\text{II.9})$$

Où :

G : la gamme utilisée [unité].

L : la lecture (affichée directement sur l'afficheur de l'appareil).

N : le nombre total de points de l'appareil.

Exemple : Un appareil de mesure de gamme 2V et de résolution 1mV.

On a : $\Delta U = \pm 0,1\% L \pm 2d$

Avec d : digit ou unité.

L'incertitude absolue pour une lecture $L=1V$ est :

$$\Delta U = 0,001 \times 1V + 2 \times 1mV = 3mV ;$$

Donc l'erreur absolue est : $\pm 3 mV$.

II.3. Règles de calcul d'incertitude

Supposons que des mesures ont donné des valeurs x , y et z avec des incertitudes absolues instrumentales U_x , U_y et U_z . Considérons la fonction $f(x, y, z)$ dont on veut calculer l'incertitude f .

1^{ère} étape : on exprime la différentielle

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial f}{\partial z} \cdot dz \quad (\text{II.10})$$

2^{ème} étape : on calcule Δf ,

$$Uf = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \cdot U_x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \cdot U_y + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \right| \cdot U_z \quad (\text{II.11})$$

On applique ces deux formules pour déterminer les incertitudes absolues et relatives dans le cas des opérations de base :

$$\text{➤ Somme : } f(x, y) = x + y \Rightarrow df = dx + dy \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{➤ Différence : } f(x, y) = x - y \Rightarrow df = dx - dy \Rightarrow Uf = U_x + U_y \Rightarrow \frac{Uf}{f} = \frac{U_x + U_y}{x - y} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{➤ Produit : } f(x, y) = x \cdot y \Rightarrow df = ydx + xdy \Rightarrow Uf = yU_x + xU_y \Rightarrow \frac{Uf}{f} = \frac{U_x}{x} + \frac{U_y}{y} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{➤ Quotient : } f(x, y) = \frac{x}{y} \Rightarrow df = \frac{1}{y} dx - \frac{x}{y^2} dy \Rightarrow Uf = \frac{U_x}{y} + \frac{U_y}{y^2} \Rightarrow \frac{Uf}{f} = \frac{U_x}{x} + \frac{U_y}{y} \quad (\text{II.15})$$

Exemple : La puissance P est calculée en fonction de la tension U et le courant I avec des incertitudes absolues instrumentales U et I .

On a :

$$P = U \cdot I \Rightarrow dP = IdU + U dI$$

$$\Rightarrow \Delta P = I \Delta U + U \Delta I$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}$$

Chapitre III

Appareils de mesure analogiques

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. La figure III.1 illustre l'objectif de l'appareil de mesure.

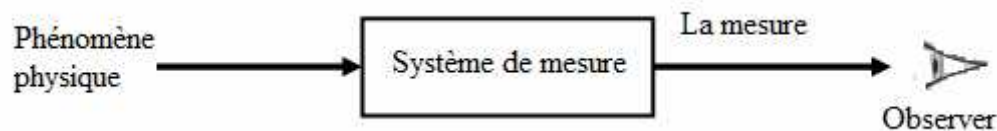


Figure III.1 : Objectif de l'appareil de mesure.

Les appareils analogiques à déviation sont équipés d'une aiguille qui indique sur une échelle graduée la valeur de la grandeur mesurée. Ils se présentent sous deux formes :

- l'appareil comportant un équipage mobile et un certain nombre de résistances. Le signal à mesurer (courant, tension) provoque la déviation de l'aiguille. L'appareil ne nécessite pas une source d'alimentation (excepté l'ohmmètre).
- l'appareil comportant un équipage mobile et des composants passifs et actifs. Le signal à mesurer est traité (amplification, atténuation, filtrage,...) avant d'être appliquée sous une forme adaptée à l'équipage mobile. C'est ce qu'on appelle l'appareil électronique, il nécessite une source d'alimentation.

Il existe aussi un autre appareil de mesure, très utilisé, dont ses éléments constitutifs et son principe de fonctionnement est différent des autres appareils, c'est l'oscilloscope.

III.1. 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.

III.1.1. Appareils magnétoélectriques

Les appareils magnétoélectriques reposent sur l'action d'un champ magnétique dû à un aimant permanent fixe sur un champ créé par un courant circulant dans une bobine (cadre mobile). La figure III.2 illustre les composants d'un appareil magnétoélectrique.

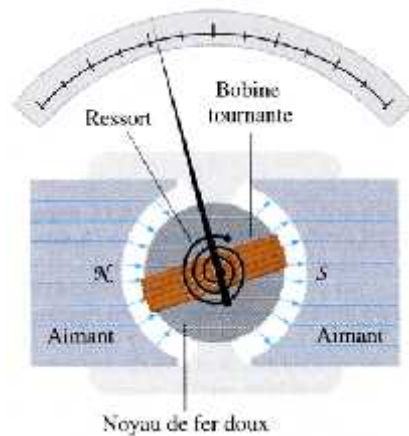


Figure III.2 : Eléments d'un appareil magnétoélectrique.

La bobine est rectangulaire composée de n spires de fil conducteur de surface S (voir figure III.3). Le fil conducteur, traversé par le courant I , qui est placé dans un champ magnétique uniforme est soumis à une force de la place F , exprimée comme suit :

$$\vec{F} = l \cdot \vec{I} \wedge \vec{B} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

I : Intensité du courant dans le fil conducteur [A].

l : Longueur du fil conducteur qui baigne dans le champ magnétique [m].

B : Intensité du champ magnétique créé par l'aimant [T].

Puisque la bobine comporte n spires, donc :

$$\vec{F} = n \cdot B \cdot l \cdot \vec{I} \quad (\text{III.2})$$

Les forces agissant sur les branches AB et CD sont nulles (les largeurs AB et CD sont parallèles au champ B).

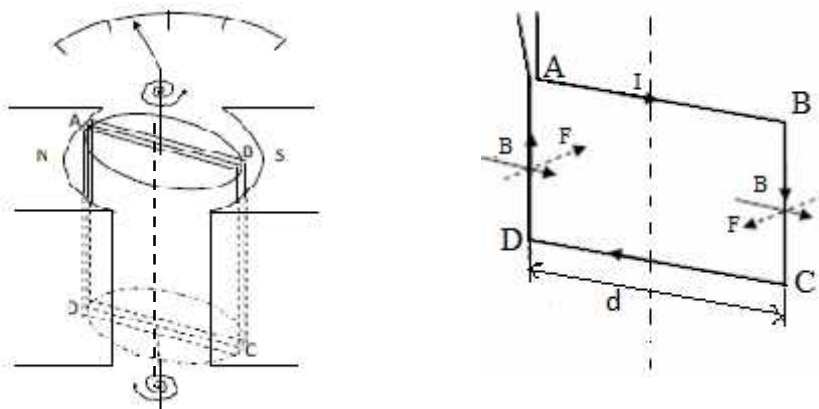


Figure III.3 : Principe de fonctionnement d'un appareil magnétoélectrique.

Les forces agissant sur branches AD et BC forment un couple. C'est ce couple moteur qui tend à faire tourner le cadre autour de son axe (ligne en pointillé sur la figure III.3).

Le couple moteur est donné par la formule:

$$\Gamma_m = F \cdot r \Rightarrow \Gamma_m = F_1 \cdot \frac{d}{2} + F_2 \cdot \frac{d}{2} = F \cdot d \quad (\text{III.3})$$

Avec : $d = AB = CD$

On obtient :

$$\Gamma_m = n \cdot I \cdot l \cdot d \cdot B = n \cdot B \cdot S \cdot I \quad (\text{III.4})$$

L'équipage mobile contient deux ressorts en spirale, qui développent un couple résistant (de rappel) Γ_r s'opposent à la rotation de la bobine. Ils sont reliés aux extrémités de la bobine et servent à y amener le courant I.

Le couple résistant est donné par :

$$\Gamma_r = C\alpha \quad (\text{III.5})$$

Avec C est la constant de raideur des ressorts.

Si en néglige les frottements et l'amortissement les deux couples sont égaux. À l'équilibre, le couple total appliqué au cadre est nul, d'où :

$$\Gamma_m = \Gamma_r \quad (\text{III.6})$$

Soit : $C\alpha = nBSI$

Donc :

$$\alpha = \frac{nBS}{C} I \quad (\text{III.7})$$

La déviation est proportionnelle au courant I dans le cadre.

Caractéristiques des appareils magnétoélectriques

- Grande sensibilité: $\sigma = \frac{d\alpha}{dI} \Rightarrow \sigma = \frac{nBS}{C}$ (III.8)

Donc ils sont utilisés pour réaliser des galvanomètres (faible courant μA , nA et pA).

- Très précis : 0.2 à 1.5

- Le sens de la déviation dépend de celui du courant. L'appareil magnétoélectrique est dit "polarisé".

- Ils ne sont utilisables qu'en courant continu (DC) : la déviation du cadre est proportionnelle à la valeur moyenne du courant qui le traverse.

- L'échelle de la graduation est linéaire.
- Faible consommation (de l'ordre de mW).
- Fréquence : fréquence maximal du travail.

III.1.1.1. Mesure en alternatif

Un signal alternatif est caractérisé par sa forme (sinus, carré, dent de scie,...), sa période (fréquence ou pulsation) et son amplitude et aussi par sa valeur moyenne et sa valeur efficace.

➤ La valeur moyenne d'un signal périodique $i(t)$ sur une durée T est :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (\text{III.9})$$

La valeur moyenne d'un signal est la composante continue du signal.

➤ La valeur efficace d'un signal périodique $i(t)$ est :

$$V^2_{\text{eff}} = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \quad (\text{III.10})$$

La valeur crête : est la valeur maximale (Amplitude) du signal.

La figure III.4 montre le montage d'un appareil magnétoélectrique pour avoir la valeur crête.

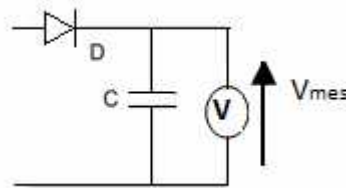


Figure III.4 : Circuit de mesure de la valeur crête.

Exemple : On a $V(t) = V_0 \sin(\omega t)$

La valeur moyenne est :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0 \sin(\omega t) dt$$

$\Rightarrow V_{\text{moy}} = 0$ (La valeur moyenne d'un signal alternatif est nulle)

La valeur efficace est :

$$V^2_{\text{eff}} = \frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T V_0^2 \sin^2(\omega t) dt$$

$$V_{\text{eff}}^2 = \frac{V_0^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t)}{2} dt = \frac{V_0^2}{T} \int_0^T \frac{1}{2} dt - \frac{V_0^2}{T} \int_0^T \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$$

$$= \frac{V_0^2}{2} \left(\int_0^T \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt \rightarrow 0 \right)$$

$$\Rightarrow V_{\text{eff}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

La valeur crête :

$$V_C = V_{\text{max}} = V_0$$

III.1.1.2. Appareil magnétoélectrique avec redresseur

Pour un usage en alternatif, on fait appel à un redresseur (simple ou double alternance (figure III.5)). La déviation est proportionnelle à la valeur moyenne du signal redressé.

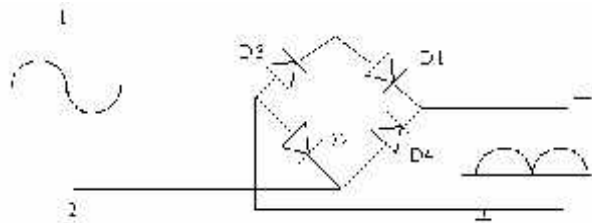


Figure III.5 : Circuit de redressement double alternance.

Exemple : signal sinusoïdal $u(t) = U_m \sin(\omega t)$.

$$V_{\text{moy}} = 0$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Pour redressement simple alternance :

$$V_{\text{moy}} = \frac{U_m}{f}$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{U_m}{2}$$

Pour redressement double alternance :

$$V_{\text{moy}} = \frac{2U_m}{f}$$

$$V_{\text{eff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

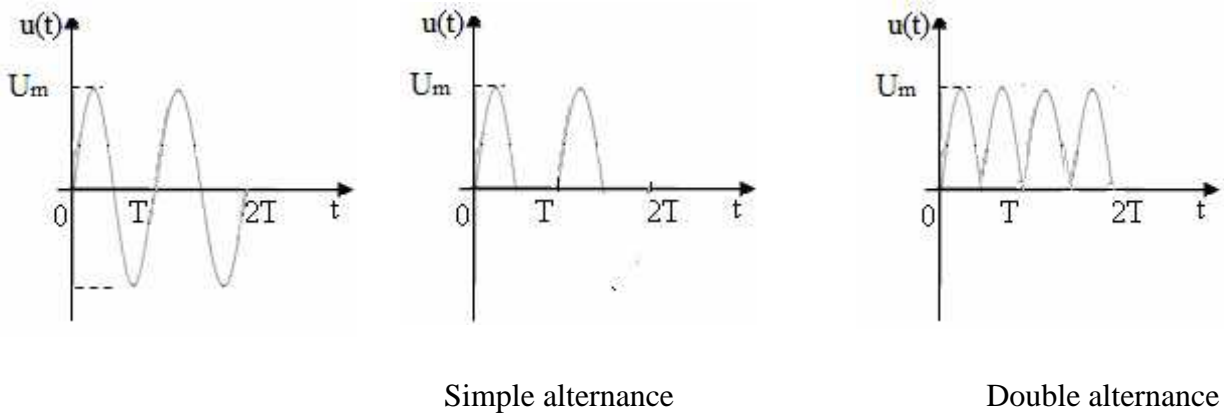


Figure III.6 : Redressement du signal sinusoïdal $u(t)$.

La valeur efficace obtenue pour le signal redressé double alternance est la même que le signal $u(t)$ sans redressement.

En double alternance :



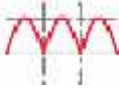
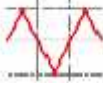

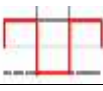
$$U_{\text{eff}} = U_{\text{moyred}} \times \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad (\text{III.11})$$

$\frac{f}{2\sqrt{2}} = 1.11$: est le facteur de forme d'un signal sinusoïdal.

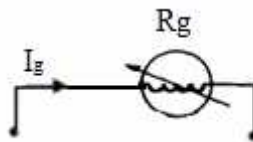
Donc la valeur mesurée par un appareil magnétoélectrique avec redresseur est la valeur moyenne du signal redressé multiplié par 1.11.

Le facteur de forme décrit le rapport entre la valeur efficace et la valeur redressée. Comme la valeur redressée n'est jamais supérieure à la valeur efficace, le facteur de forme est compris entre 1 et l'infini, selon la forme d'onde. Le tableau III.1 donne la forme du signal et le facteur de forme et correspondant.

Tableau III.1 : Type de signal et le facteur de forme et correspondant.

Type de signal	forme de l'onde	Facteur de forme
Sinusoidal		1.11
Redressement mono-alternance		1.571
Redressement double-alternance		1.11
Triangulaire		1.155
Dent de scie		1.155
Rectangulaire		1

On peut modéliser un équipement à cadre mobile (ECM) par le schéma simplifiée suivant :

**Figure III.7 :** Schéma simplifié d'un ECM.

R_g est la résistance totale des N spires de la bobine et I_g est le courant qui traverse le cadre. La déviation à pleine échelle est obtenue pour $I = I_g$.

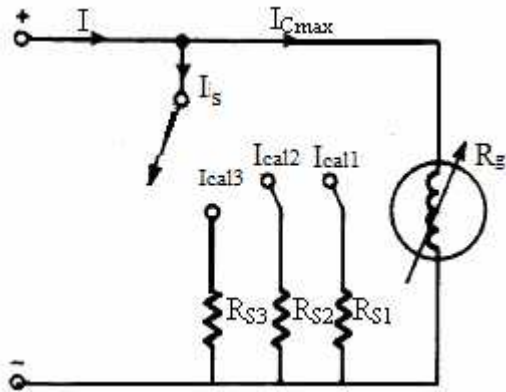
III.1.1.3. Utilisation des appareils magnétoélectriques

La plus part des appareils magnétoélectriques sont utilisés en Ampèremètres, voltmètres et ohmmètres.

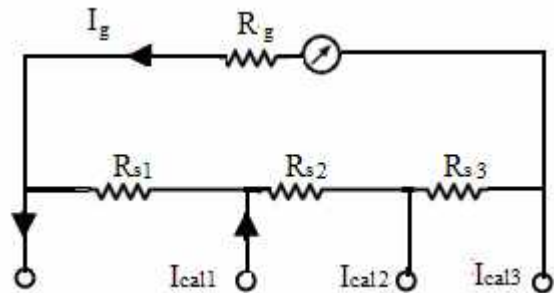
III.1.1.3.1. Utilisation en ampèremètre

L'appareil magnétoélectrique est un ampèremètre qui mesure des courants inférieurs à I_g . Ce dernier est limité par les dimensions de la bobine et du ressort de rappel. Pour obtenir un

ampèremètre qui mesure des courants supérieurs à I_g , on lui adjoint des résistances additionnelles (appelées shunts) R_s en parallèle avec l'ECM, qui doivent être précises et assez faibles. Il existe deux types d'ampèremètres: multi-gamme et universel. La figure III.8 montre le schéma d'un ampèremètre à trois calibres réalisé avec un cadre mobile.



Ampèremètre multi-gamme



Ampèremètre à shunt universel

Figure III.8 : Schéma de principe de l'ampèremètre.

Dans le cas d'un ampèremètre multi-gamme, on a :

$$R_C \cdot I_{C_{\max}} = I_S \cdot R_{Si} \quad \text{Et} \quad I_S = (I_{\text{cal}} - I_{C_{\max}})$$

$$\Rightarrow R_{Si} = \frac{I_{C_{\max}}}{I - I_{C_{\max}}} R_C \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$I_{C_{\max}} = I_g$: courant maximal supporté par le cadre mobile.

La résistance interne de l'ampèremètre est :

$$R_{\text{int}} = R_C // R_{Si}$$

$$\Rightarrow R_{\text{int}} = \frac{R_C \cdot R_{Si}}{R_C + R_{Si}} \quad (\text{III.13})$$

avec : $i = 1, 2, 3$

Dans le cas d'un ampèremètre universel, on calcul un facteur multiplicatif m .

$$\text{Soit : } m_i = \frac{I_i}{I_{C_{\max}}} \quad (\text{III.14})$$

On détermine le facteur multiplicatif m_i en appliquant la loi des mailles.

Pour le calibre 1, on obtient :

$$(R_g + R_{S2} + R_{S3}) \cdot I_{C_{\max}} = I_S \cdot R_{S1} = (I_{\text{cal1}} - I_{C_{\max}}) \cdot R_{S1}$$

$$\Rightarrow (R_g + R_{S2} + R_{S3} + R_{S1}) \cdot I_{C_{\max}} = I_{\text{cal1}} \cdot R_{S1}$$

$$\text{Et } m_1 = \frac{I_{\text{call}}}{I_{C_{\text{max}}}}$$

d'où,

$$(R_g + R_{S2} + R_{S3} + R_{S1}) = m_1 \cdot R_{S1} \quad (\text{III.15})$$

De la même manière on trouve m_2 et m_3 .

$$(R_g + R_{S2} + R_{S3} + R_{S1}) = m_2 \cdot (R_{S1} + R_{S2})$$

$$\text{Et } (R_g + R_{S2} + R_{S3} + R_{S1}) = m_3 \cdot (R_{S1} + R_{S2} + R_{S3})$$

On calcule les rapports entre les facteurs multiplicatifs et à partir des expressions précédentes on détermine les résistances shunt.

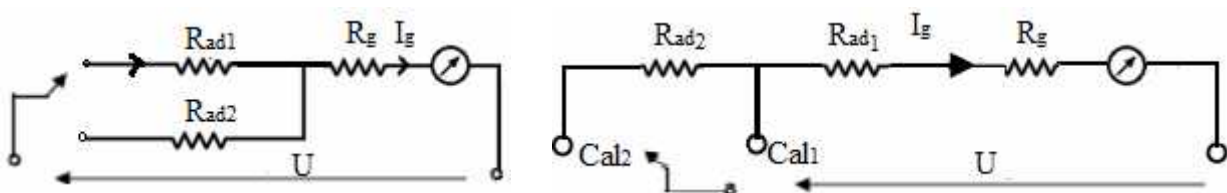
Exemple : Ampèremètre multi-gamme de caractéristiques $I = 100 \text{ mA}$, $I_{C_{\text{max}}} = 50 \mu\text{A}$ et $R_C = 5000$

$$R_{Si} = \frac{I_{C_{\text{max}}}}{I - I_{C_{\text{max}}}} R_C$$

$$\Rightarrow R_{Si} = \frac{50 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-3} - 50 \cdot 10^{-6}} 5000 = 2.5 \Omega$$

III.1.1.3.2. Utilisation en voltmètre

Le cadre mobile seul est un voltmètre qui mesure des tensions inférieures à $(R_g \cdot I_g)$. Pour obtenir un voltmètre qui mesure des tensions supérieures à $(R_g \cdot I_g)$, on doit ajouter des résistances additionnelles R_{ad} en série, comme illustré en figure III.9, qui doivent être assez grandes. On trouve des voltmètres multi-gamme et universel.



Voltmètre multi-gamme à deux calibres

Voltmètre universel à deux calibres

Figure III.9 : Schéma de principe de voltmètre.

Dans le cas d'un voltmètre multi-gamme on a :

$$U_{\text{cal}} = (R_{\text{adi}} + R_g) I_{C_{\text{max}}} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

$I_{Cmax} = I_g$: courant maximal supporté par le cadre mobile.

R_c : Résistance du cadre mobile.

$i=1,2,..$

$$\Rightarrow R_{adi} = \frac{U_{cal}}{I_{Cmax}} - R_g \quad (III.17)$$

La résistance interne du voltmètre est :

$$R_{int} = R_{adi} + R_c \quad (III.18)$$

Dans le cas d'un voltmètre universel, on a :

$$U_{ca11} = (R_{ad1} + R_g) I_{Cmax}$$

$$U_{ca12} = (R_{ad1} + R_{ad1} + R_g) I_{Cmax} \quad (III.19)$$

$$\Rightarrow R_{ad1} = \frac{U_{ca11}}{I_{Cmax}} - R_g$$

$$R_{ad2} = \frac{U_{ca12}}{I_{Cmax}} - R_g - R_{ad1} \quad (III.20)$$

La résistance interne du voltmètre est:

$$R_{int} = \sum_{i=1}^2 R_{adi} + R_g \quad (III.21)$$

Exemple : voltmètre multi-gamme de caractéristiques $R_c = 100$ et $I_{Cmax} = 100 \mu A$

Calibre 1 = $U_{ca11} = 0,1 V$

$$R_{ad1} = \frac{U_{ca11}}{I_{Cmax}} - R_c$$

$$\Rightarrow R_{ad1} = \frac{0.1}{100 \cdot 10^{-6}} - 100 = 900 \Omega$$

III.1.1.3.3. Utilisation en ohmmètre

Un ohmmètre mesure la résistance d'un circuit ou d'un composant. Le schéma simplifié d'un ohmmètre comprend, en plus du cadre mobile, une résistance r variable (dépend du calibre) et une pile qui alimente le montage tel que le montre la figure III.10.

R_x : résistance à mesurer.

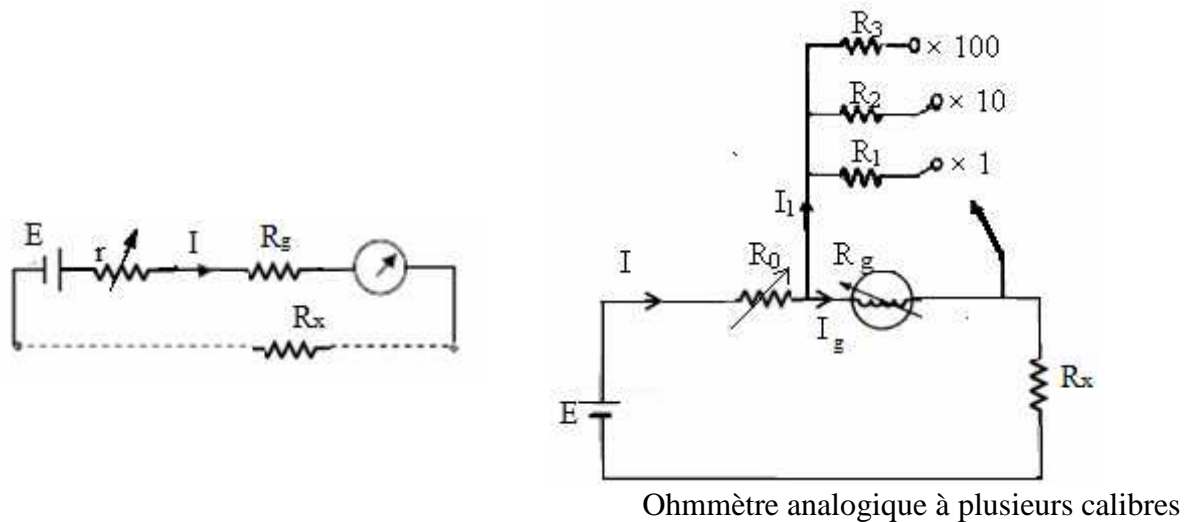


Figure III.10 : Ohmmètre avec un ECM.

Le courant parcourant le circuit est :

$$I = \frac{E}{R_g + r + R_x} \quad (\text{III.22})$$

Or la déviation de l'aiguille de l'équipage mobile est proportionnelle à I par la relation :

$$\alpha = kI = k \frac{E}{R_g + r + R_x} \quad (\text{III.23})$$

Lorsque $R_x = 0 \Rightarrow I = I_{\max} = E/(R_g + r)$

Si on court-circuite les bornes de l'appareil, l'appareil serait parcouru par un courant maximal I_C et la déviation de l'aiguille maximale soit :

$$\alpha_{\max} = kI_g = k \frac{E}{R_g + r} \quad (\text{III.24})$$

En faisant le rapport, membre à membre, des relations (V.23) et (V.22), on obtient:

$$\frac{\alpha_{\max}}{\alpha} = \frac{I_C}{I} = \frac{R_g + r + R_x}{R_g + r}$$

$$\Rightarrow R_x = (R_g + r) \frac{I_C - I}{I} \quad (\text{III.25})$$

III.1.1.3.4. Utilisation en multimètre

Un multimètre analogique est un appareil de mesure qui regroupe les fonctions ampèremètre, voltmètre et ohmmètre en un seul. Le passage d'une fonction à l'autre se fait en agissant sur un commutateur pour sélectionner la fonction et le calibre souhaité. La figure III.11 illustre un multimètre analogique.



Figure III.11 : Multimètre analogique.

III.1.2. Appareils ferromagnétiques

Le fonctionnement des appareils ferromagnétiques résulte de l'action exercée par un courant électrique qui traverse une bobine fixe sur deux pièces de fer doux à l'intérieur de cette bobine (voir figure III.12). Une des pièces est fixe, l'autre solidaire de l'aiguille est montée sur pivot. Quand le courant passe dans la bobine, les deux pièces s'aimantent et se repoussent quelque soit le sens du courant. Un ressort est chargé de rappeler la pièce dans sa position du zéro.

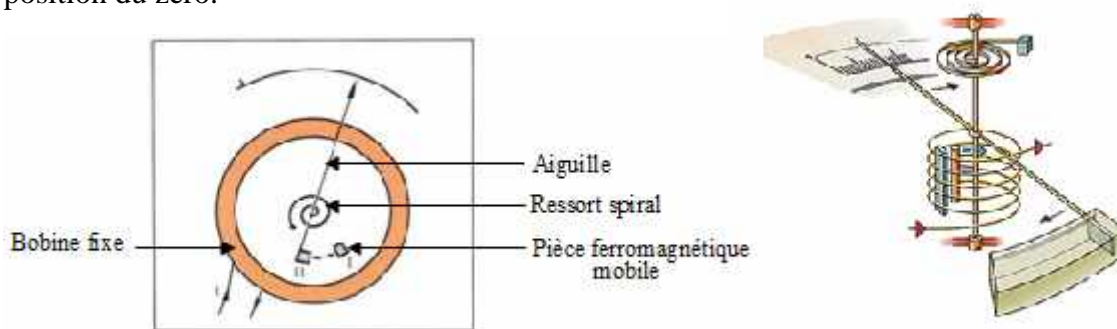


Figure III.12 : Principe de fonctionnement d'un appareil ferromagnétique.

La pièce ferromagnétique mobile se déplace dans le sens d'augmentation de l'inductance L de la bobine.

La self inductance augmente ainsi que l'énergie magnétique :

$$W = \frac{1}{2} Li^2 \quad (\text{III.26})$$

Le couple moteur est :

$$\Gamma_m = \frac{dW}{dr} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dr} i^2 \quad (\text{III.27})$$

Et le couple rappel est : $\Gamma_r = Cr$

A l'équilibre :

$$\Gamma_m = \Gamma_r \Rightarrow r = \frac{1}{2C} \frac{dL}{dr} i^2 \quad (\text{III.28})$$

$$\Rightarrow r = \frac{1}{2C} \frac{dL}{dr} \underbrace{\int_0^T i^2}_{i_{eff}^2} \Rightarrow r = k I_{eff}^2 \quad (\text{III.29})$$

La déviation est proportionnelle au carré du courant.

Ce type d'appareils est classé en appareils TRMS (True Root Mean Square ou valeur efficace vraie) quelque soit la forme du signal mesuré.

Caractéristiques

- Faible sensibilité
- Précis
- Utilisable en continu et en alternatif (mesure la vraie valeur efficace du signal).
- Ces appareils ne sont pas polarisés. On peut les branchés sans tenir compte du sens du courant.
- Non linéaire (voir figure III.13).
- L'appareil indique la valeur efficace.
- Ces appareils sont robustes, ils sont utilisés souvent dans l'industrie.

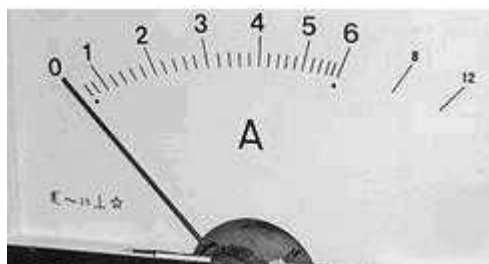


Figure III.13 : Non linéarité de l'échelle de l'appareil ferromagnétique.

III.1.3. Appareils électrodynamiques

Le fonctionnement de ces appareils résulte de l'action exercée par un courant électrique sur un autre courant électrique. Un appareil électrodynamique est constitué de deux bobines, l'une fixe, parcourue par un courant i , l'autre mobile autour d'un axe et parcourue par le courant i' (voir figure III.14).

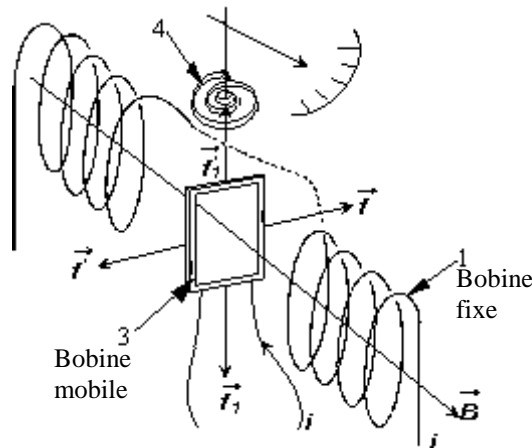


Figure III.14 : Principe de fonctionnement d'un appareil électrodynamique.

M étant la mutuelle entre ces deux bobines, l'énergie de couplage magnétique est :

$$W = M i i' \quad (\text{III.30})$$

Par suite, il se développe entre elles le couple moteur :

$$\Gamma_m = i i' \frac{\partial M}{\partial r} \quad (\text{III.31})$$

Par ailleurs, un ressort ou fil de torsion développe un couple opposé : $X_r = Cr$

À l'équilibre on a :

$$X_r = X_m \Rightarrow i i' \frac{\partial M}{\partial r} = Cr \Rightarrow r = \frac{1}{C} \frac{\partial M}{\partial r} i i' \quad (\text{III.32})$$

Si les deux bobines sont parcourues par le même courant ($i = i' = i$), on aura :

$$r = k i^2 \quad (\text{III.33})$$

L'appareil électrodynamique en pratique est utilisé pour mesurer une puissance, donc en tant que un wattmètre. Les bornes d'entrée des bobines courant et tension sont reliées entre elles. Le branchement d'un wattmètre se fait comme le montre la figure III.15.

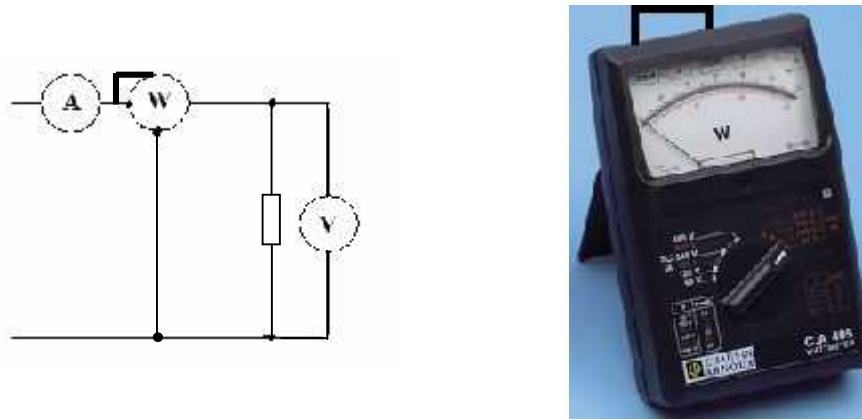


Figure III.15 : Montage d'un wattmètre.

Caractéristiques

- Faible sensibilité
- Plus précis en alternatif (classe 0.2)
- Grande consommation
- Mesure la puissance
- Les appareils électrodynamiques sont non polarisés. Ils sont utilisables en courant continu (DC) et en courant alternatif (AC).
- Leur consommation propre est de l'ordre de quelques watts. On ne peut pas les utiliser dans les circuits de faible puissance.

Remarque

- L'appareil magnétoélectrique est l'appareil le plus utilisé. Il présente les meilleurs caractéristiques.
- L'appareil ferromagnétique est très robuste. Limité en fréquence, il est utilisé souvent dans l'industrie.
- L'appareil électrodynamique est utilisé comme wattmètre.

Il existe d'autres types d'appareils basés sur des principes différents : électrostatique, thermiques, à induction, ...etc.

III.1.4. Appareils électroniques

En général, les cadres mobiles utilisés dans les appareils passifs donnent le maximum de déviation lorsqu'ils sont parcourus par un courant de $50 \mu\text{A}$. De plus la résistance du cadre étant de 5000Ω , il ne peut pas mesurer une tension inférieure à 0.25 V .

Donc la sensibilité est limitée. Pour mesurer des tensions ou des courants plus faibles il faut d'abord amplifier et puis mesurer; c'est le rôle de l'appareil électronique. La figure III.16 montre le schéma synoptique d'un appareil électronique.

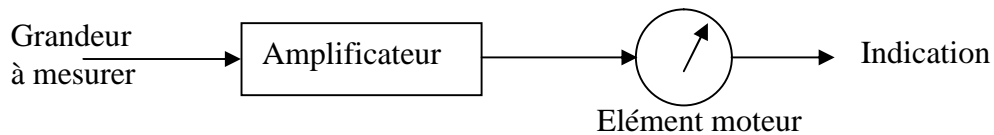


Figure III.16 : Schéma synoptique d'un appareil électronique.

Les calibres peuvent être :

Voltmètre : calibre de de $3\mu\text{V}$ à 1000V

Ampèremètre : calibre de 30 pA à 10A

Caractéristiques

- Résistance d'entrée grande (10 M quelque soit le calibre).
- Capacité d'entrée $30 - 100\text{ pF}$.
- Bonne précision 2% à 3%
- Grande sensibilité.
- Dépend de la fréquence AC (à cause de l'amplificateur).
- Nécessite une alimentation externe.
- Mesure qu'en AC (l'impédance d'entrée élimine la composante continue (DC)).

III.2. Symboles portés sur les cadrans des appareils analogiques
















Sur le cadran d'un appareil de mesure analogique, le constructeur indique souvent, le type de l'appareil, la nature du courant, la tension d'isolement, la position de lecture, la classe de précision, la résistance interne par volt,...etc. Le tableau III.2 porte la signification de quelques symboles et caractéristiques qu'on peut trouver sur un appareil analogique.

Exemple : Interprétation des symboles sur un appareil analogique.

Ampèremètre magnétoélectrique utilisable en courant continu. La position de lecture est verticale, classe 2.5, dont l'isolement a été essayé sous 2000 V .



Tableau III.2 : Signification des symboles et caractéristiques d'un appareil analogique.

Symbole	Signification
	Courant continue
	Courant alternatif
	Courants continue et alternatif
	Position de lecture verticale
	Position de lecture horizontale
	Position de lecture inclinée
Calibre (Cal)	Plus grande valeur mesurable par l'appareil (1V, 10V, 100V, 1000V).
Echelle (ech)	Etendue de la graduation sur le cadran. Elle s'exprime en division (de 0 à 30 divisions, de 0 à 100 divisions).
Classe de précision	0.5: classe de précision de l'appareil est de 0.5% du calibre, 1 : classe de précision de l'appareil est de 1% du calibre
Bande de fréquence	gamme de fréquence dans laquelle l'appareil peut fonctionner correctement (20 Hz 500 kHz).
Résistance interne (R_{int})	Voltmètre magnétoélectriques $R_{int} = 20000 \ \Omega/V$ Ampèremètre très faible
	Tension d'isolement entre les deux bornes de l'appareil est 500 V
	Tension d'isolement entre les deux bornes de l'appareil est 2 kV
	Appareils magnétoélectrique
	Appareils magnétoélectrique avec redresseur
	Appareil ferromagnétique
	Appareil électrodynamique
	Appareil à induction
	Appareil électrostatique
	Appareil thermique

III.3. Oscilloscopes analogiques

L'oscilloscope est un appareil de mesure destiné à visualiser l'allure d'un ou plusieurs signaux électriques, le plus souvent, variation de la tension en fonction du temps. Il existe des oscilloscopes "simple trace ou mono courbes" et "double trace" permettant d'étudier simultanément un ou deux signaux. La courbe obtenue sur l'écran d'un oscilloscope est appelée un oscillogramme.

III.3.1. Principe de fonctionnement de l'oscilloscope analogique

L'élément essentiel est le tube cathodique dans lequel règne un vide très poussé (voir figure III.17). À l'entrée du tube, des électrons sont émis par la cathode chauffée puis accélérés et focalisés en un faisceau par une série d'électrodes, portées à une tension élevée. Ce faisceau est dévié par deux jeux de plaques pour la déviation verticale (mesure) et horizontale (base de temps). La rencontre du faisceau électronique et de l'écran produit le point lumineux appelé "spot". Le spot se déplace sur l'axe X par les plaques de déviation horizontales, via l'amplificateur horizontal, et sur l'axe Y par les plaques de déviation verticales, via l'amplificateur vertical.

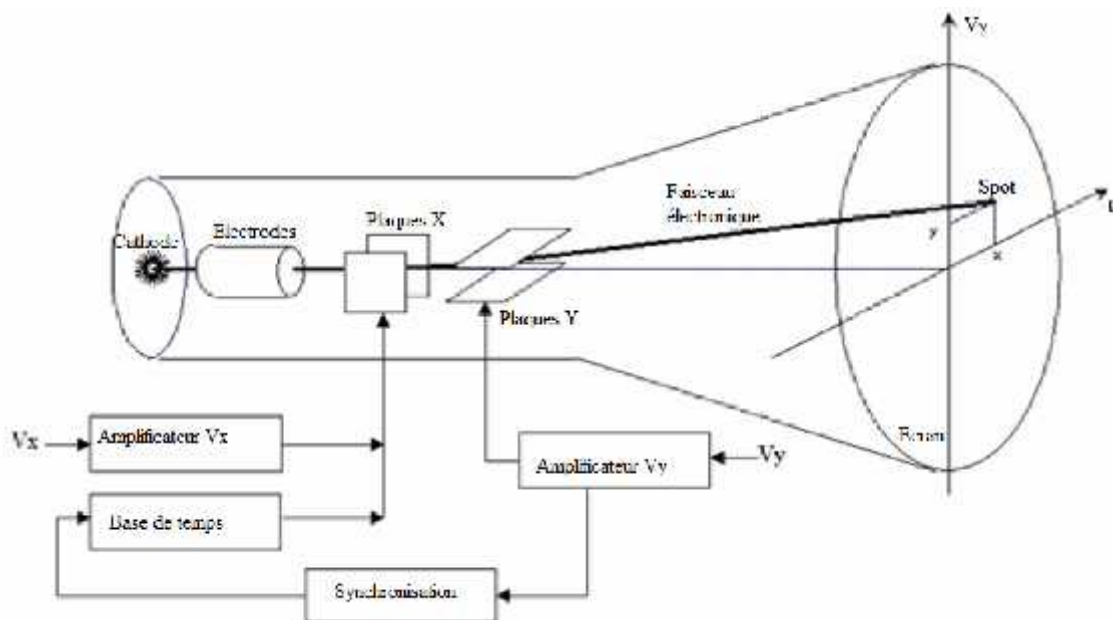


Figure III.17 : Schéma de principe d'un oscilloscope.

Le faisceau semble donc dessiner une ligne continue, appelée trace. L'écran du tube est quadrillé par un graticule de 10 divisions horizontales et 8 verticales.

Le spot a donc, à chaque instant, une position telle que ses coordonnées (x , y) soient proportionnelles aux tensions V_x et V_y appliquées sur les plaques de déviation horizontale et verticale. Les amplificateurs (voir figure III.17) permettent de régler l'amplitude du signal afin que le spot couvre convenablement l'écran et soit facilement observable.

En général l'oscilloscope possède 2 voies (CH1 et CH2) et permet alors d'observer deux tensions V_1 et V_2 en fonction du temps. Pour l'observation de l'évolution de tension en fonction du temps, la tension V_x est une tension de balayage horizontal, proportionnelle au temps, qui est fournie par l'élément dit "base de temps"(ou vitesse du balayage). Ce circuit synchronise le système en générant une impulsion chaque fois que la forme d'onde traverse une certaine valeur de réglage de la tension. Le commutateur de la base de temps (Time/div) permet de choisir le temps de balayage du spot d'une division verticale à la suivante, ce qui explique comment de nombreux cycles peuvent être visualisés sur un écran d'oscilloscope. La figure III.18 montre un oscillogramme tel qu'il va apparaître sur l'écran de l'oscilloscope en imposant les formes suivantes pour $V(t)$ et $V_x(t)$.

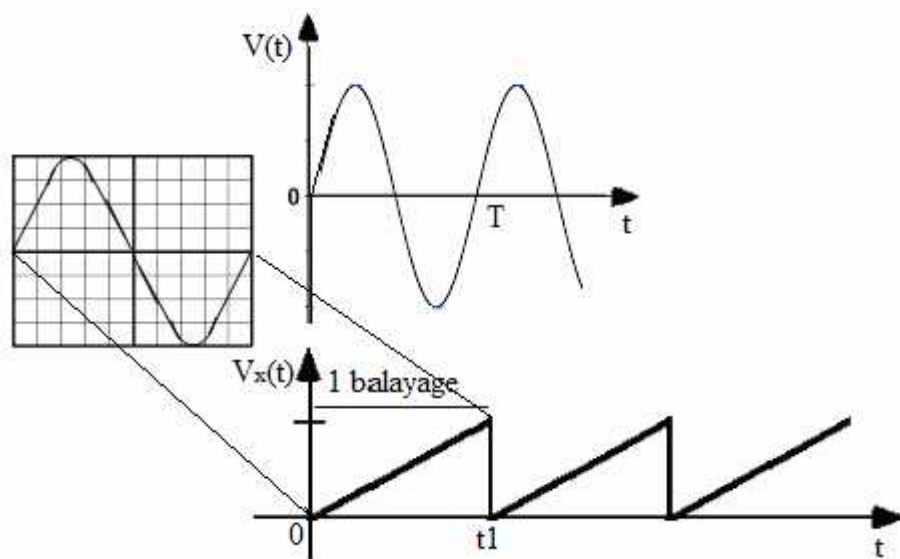


Figure III.18 : Tracé d'un oscillogramme avec synchronisation de la base de temps.

Sur l'écran d'un oscilloscope branché aux bornes d'un générateur de tension continue, on observe :

- Un point si le balayage n'est pas enclenché.
- Une ligne horizontale si le balayage est enclenché.

Sur l'écran d'un oscilloscope branché aux bornes d'un générateur de tension alternative sinusoïdale, on observe :

- Un segment vertical si le balayage n'est pas enclenché.
- Une sinusoïde si le balayage est enclenché.

III.3.2. Mesure sur l'oscilloscope

L'oscilloscope est appareil indispensable pour l'étude des signaux électrique (courants, tension). Il permet de faire des mesures d'amplitude, de période et donc de fréquence et de déphasage.

III.3.2.1. Mesure de tension

L'oscilloscope ne peut mesurer que des tensions. Sa résistance d'entrée est très grande ($> 1 \text{ M} \Omega$) et il n'est pas possible de mesurer un courant sans réaliser un montage spécial. Pour pouvoir mesurer les caractéristiques d'une tension sur l'oscilloscope, on utilise l'une de ces voies CH1 ou CH2. L'oscilloscope permet de mesurer une tension continue. Si on applique une tension aux plaques horizontales, on provoque un déplacement vertical du spot. Ce déplacement est proportionnel à la tension appliquée V , tel que :

$$V = K \cdot Y \quad (\text{III.34})$$

avec :

V : la tension appliquée exprimée en Volts (V).

Y : le déplacement du spot exprimé en (cm).

K : le coefficient de proportionnalité (ou encore sensibilité) exprimé en "V/cm".

Si la tension appliquée est sinusoïdale de forme : $v(t) = V_{\max} \sin(\check{S}t)$.

On visualise sur l'oscilloscope une sinusoïde (voir la figure III.19). La tension mesurée correspond à la valeur maximal V_{\max} et non pas la valeur efficace. On peut déduire sa valeur (seulement en sinusoïdal) par la relation :

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (\text{III.35})$$

Chaque oscilloscope possède un sélecteur de calibre appelé aussi commutateur de sensibilité qui permet des mesures de tension dans une gamme assez étendue allant de 5 mV à 20V.

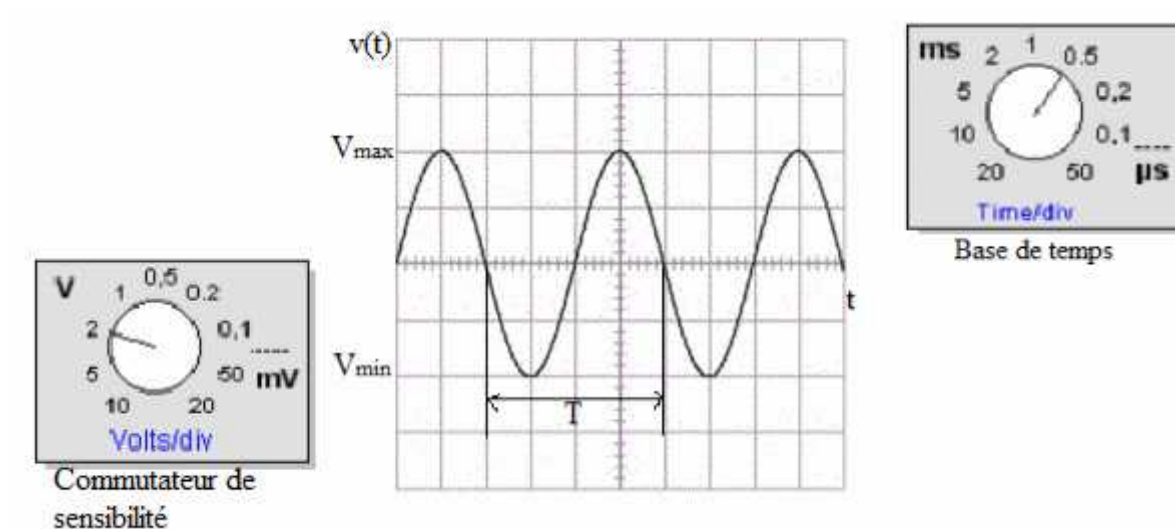


Figure III.19 : Représentation d'un signal sinusoïdal.

III.3.2.2. Mesure de période et de fréquence

La période T est la plus petite durée pendant laquelle se reproduit le phénomène identique à lui-même. Pour mesurer la période d'un signal à l'aide d'un oscilloscope, on choisit une position de la base de temps de telle manière que la période du signal occupe la majeure partie de la longueur de l'écran de visualisation, et ce pour minimiser les erreurs de lecture. Elle correspond au nombre de division multiplié par la base de temps (voir la figure III.19).

La fréquence f d'un phénomène périodique correspond au nombre de répétitions de ce dernier pendant une seconde. Elle est reliée à la période par la relation :

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{III.36})$$

III.3.2.3. Mesure de déphasage

Pour pouvoir mesurer le déphasage entre deux signaux, il faudrait les observer simultanément. Deux méthodes permettent de mesurer le déphasage à l'aide d'un oscilloscope.

III.3.2.3.1. Méthode directe

Cette méthode est utilisée lorsque les deux signaux ont la même fréquence. Soient deux signaux périodiques dont l'un est déphasé par rapport à l'autre (en retard ou en avance), comme illustré sur la figure III.20. Le déphasage est défini selon la formule suivante :

$$\{ = \frac{\ddagger}{T} \times 360^\circ \quad (\text{III.37})$$

Avec :

T : Période du signal.

: Décalage entre les deux signaux.

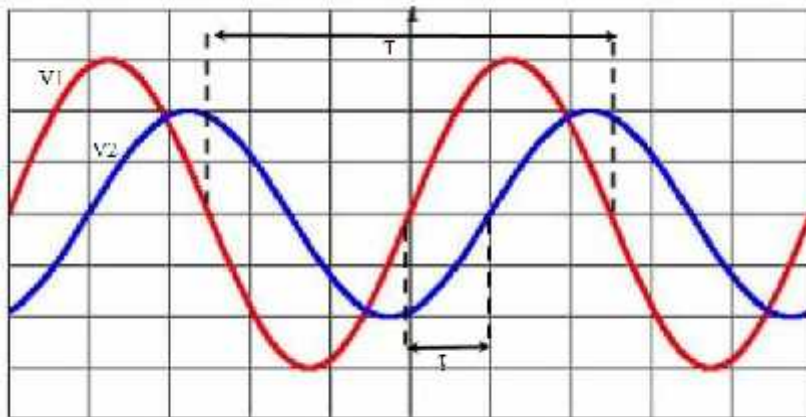


Figure III.20 : Représentation de deux signaux déphasés.

III.3.2.3.2. Méthode de Lissajous (mode XY)

Une tension étant appliquée sur chaque voie, on supprime le balayage (base de temps). On observe alors une courbe qui montre la variation de l'une des tensions en fonction de l'autre. On obtient alors une courbe de Lissajous. Par cette méthode, on peut mesurer :

- Le déphasage entre deux signaux de même fréquence.

En éliminant la base de temps, en appuyant sur la touche **XY**, on obtient une ellipse dont la figure III.21 présente un exemple.

Le déphasage entre deux signaux de même fréquence est l'angle φ (en radian) est tel que :

$$\{ = \arcsin\left(\frac{h}{H}\right) \quad (\text{III.38})$$

Avec :

h : La distance entre deux intersections de l'ellipse avec l'axe vertical.

H : L'amplitude maximale du signal (crête à crête).

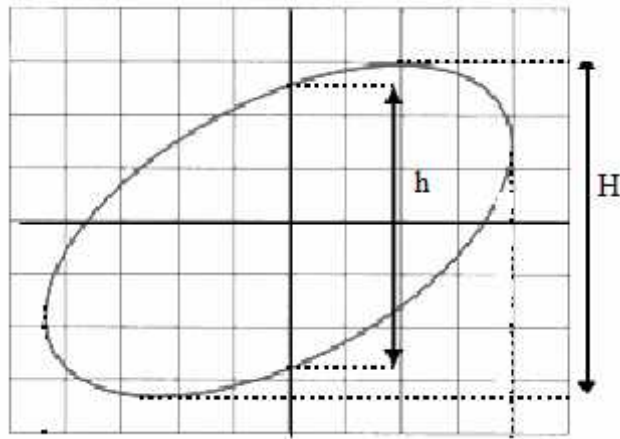


Figure III.21 : Mesure de déphasage par la méthode de Lissajous.

Cas particuliers :

- Si $\varphi=0$ ou $\xi = f$, l'ellipse se réduit à une droite : une des diagonales du rectangle.
- Si $\xi = \frac{f}{2}$ ou $\xi = \frac{3f}{2}$, les axes de l'ellipse se confondent avec ceux du rectangle.

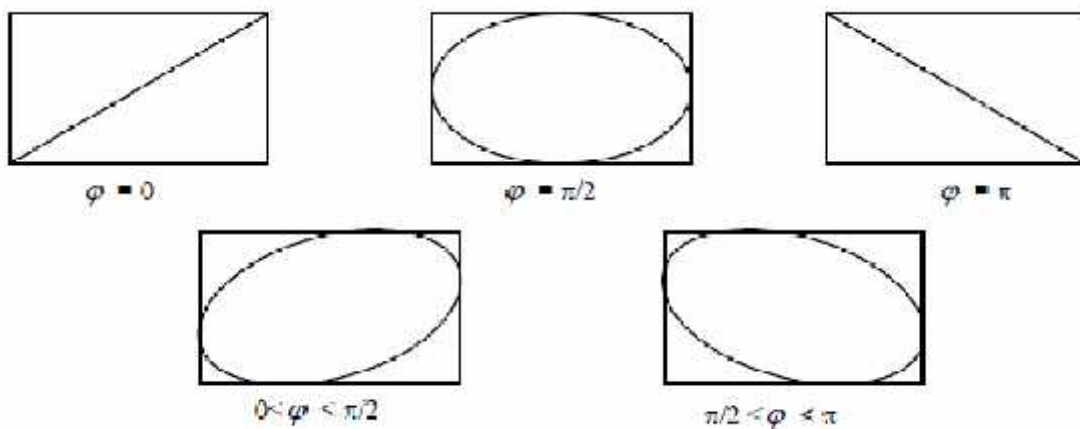


Figure III.22 : Cas particuliers d'ellipse pour différentes valeurs du déphasage φ .

➤ Le rapport des fréquences des deux signaux

Si à l'une des entrées on applique une tension V_1 de fréquence f_1 et à l'autre entrée une tension V_2 de fréquence f_2 inconnue, alors en éliminant le temps entre les deux tensions. On obtient une courbe fermée inscrite dans un rectangle de côté deux fois l'amplitude maximale

de V_1 et deux fois l'amplitude maximale de V_2 . Cette courbe présente un certain nombre de points de tangence N_x avec le côté horizontal et N_y avec le côté vertical, voir figure III.23. Si V_1 est appliquée aux plaques de déviations horizontales et V_2 aux plaques de déviations verticales, on aura alors :

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{N_x}{N_y} \quad (\text{III.39})$$

Où :

N_x : Nombre de points d'intersection de la courbe avec l'axe horizontal.

N_y : Nombre de points d'intersection de la courbe avec l'axe vertical.

Exemple : Mesure de la fréquence par la méthode de Lissajous.

Dans cet exemple : $N_x = 3$ et $N_y = 2$

$$\Rightarrow f_2 = \frac{3}{2}f_1$$

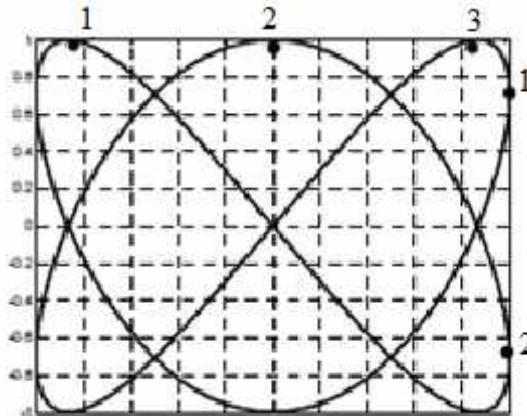


Figure III.23: Mesure de la fréquence par la méthode de Lissajous.

Chapitre IV

Appareils de mesure numériques

Les appareils numériques sont des appareils dont la valeur de la grandeur à mesurer est affichée sous forme numérique. Ils sont de plus en plus utilisés du fait de leur fiabilité, leur précision, leur robustesse et leur facilité de lecture.

Généralement pour ce type d'appareils on trouve les fonctions d'un voltmètre, d'un ampèremètre, d'un ohmmètre et parfois d'autres encore sont regroupées dans un seul boîtier appelé multimètre numérique.

IV.1. Principe de fonctionnement d'un appareil de mesure numérique

Les appareils numériques sont basés sur une méthode de comptage d'impulsions électroniques dont le nombre correspond à la valeur de la grandeur à mesurer. Ils sont généralement constitués d'un convertisseur analogique-numérique (simple ou double rampe), d'un système de traitement et d'un système d'affichage. Le schéma synoptique général d'un appareil de mesure numérique est donné par le schéma fonctionnel de la figure IV.1.

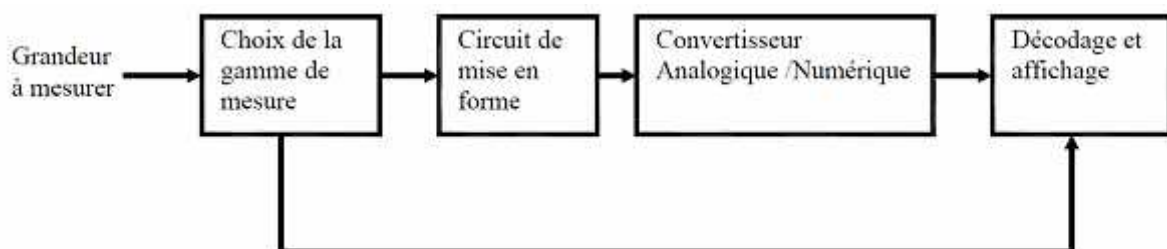


Figure IV.1 : Schéma fonctionnel d'un appareil numérique.

IV.2. Convertisseurs analogiques numériques (CAN)

L'organe essentiel d'un appareil numérique est le convertisseur analogique numérique (CAN). L'information que ce dispositif peut traiter est une tension continue. Il compare la tension analogique à une tension de référence, puis fournit sa valeur numérique sous forme d'un nombre d'impulsions à un compteur qui affichera le résultat.

IV.2.1. Convertisseur simple rampe

Le schéma de principe de fonctionnement d'un convertisseur simple rampe est représenté sur la figure IV.2.

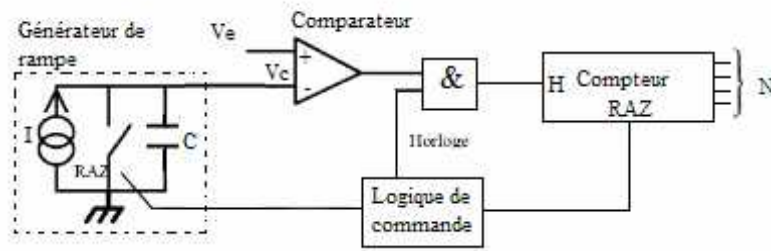


Figure IV.2 : Schéma de principe de fonctionnement d'un CAN simple rampe.

La tension à mesurer V_e est comparée avec une rampe. Cette dernière est engendrée par la charge d'un condensateur avec un courant constant I . Tant que la tension de la rampe, V_c , est inférieure à la tension à mesurer, V_e , le comparateur donne une sortie égale à 1 et le compteur commence le comptage (voir la figure IV.3). La mesure cesse lorsque le comparateur bascule de 1 à 0 (à $t = t_1$). La sortie du compteur fournit la valeur numérique N (nombre d'impulsions) correspondant à la tension d'entrée.

À l'instant $t = 0$, l'interrupteur est ouvert, le condensateur est déchargé et le compteur est remis à zéro.

La tension V_c est donnée par l'expression suivante :

$$V_c = \frac{1}{C} \int_0^t I dt \quad (\text{IV.1})$$

Comme le courant I est constant, donc on aura :

$$V_c = \frac{1}{C} I t \quad (\text{IV.2})$$

À l'instant $t = t_1$: $V_c = V_e$

$$\Rightarrow \frac{1}{C} I t_1 = V_e$$

On peut déduire la relation entre N et V_e en connaissant la période T de l'horloge H .

On a : $N = t_1 / T$

Donc,

$$N = \frac{C}{IT} V_e \quad (\text{IV.3})$$

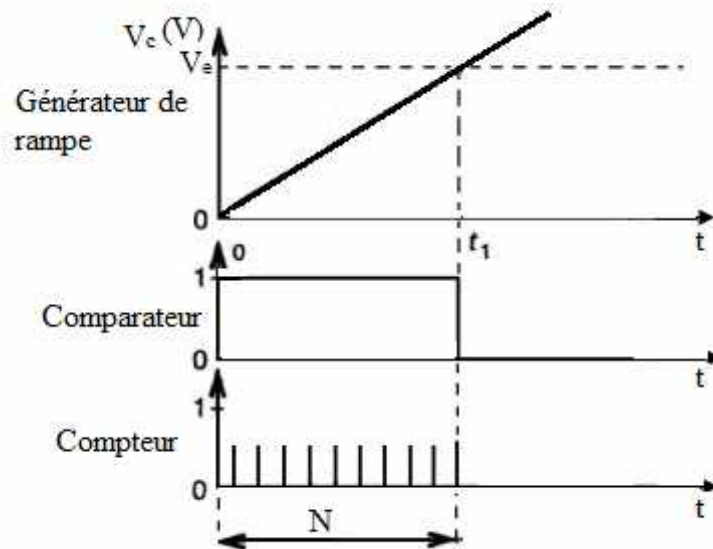


Figure IV.3 : Signaux en sortie de comparateur et du compteur.

Ce type de convertisseur est simple mais lent. La durée de conversion est fonction de la valeur à mesurer.

IV.2.2. Convertisseur double rampe

La figure IV.4 illustre le schéma de principe d'un CAN double rampe. On intègre le signal à convertir, V_e , à l'aide du générateur de rampe pendant une durée fixe, mesurée par le compteur. On obtient ainsi une rampe croissante de durée N_1T en sortie de l'intégrateur. T est la période de l'Horloge. Ensuite, la logique de commande commute l'entrée du générateur de rampe sur la tension de référence, $-E_{ref}$, qui est de signe opposé à V_e . La tension de sortie de l'intégrateur décroît linéairement jusqu'à s'annuler. Le compteur mesure la durée N_2T de cette décroissance.

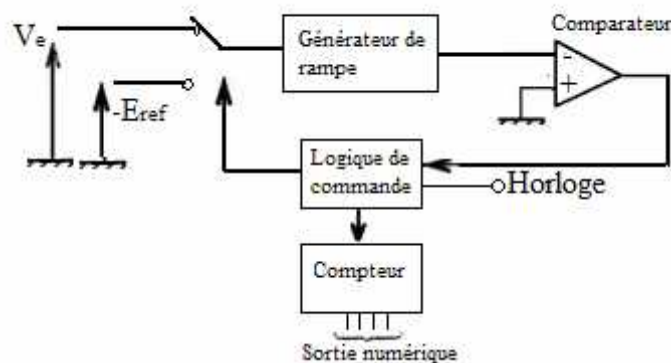


Figure IV.4 : Schéma de principe de fonctionnement d'un CAN double rampe.

La figure IV.5 donne les signaux en sortie des différents blocs du montage. t_0-t_1 est la durée constante d'intégration de V_e et t_2-t_1 est le temps de mesure.

Quand la tension s'annule la sortie du comparateur bascule et donne l'ordre au circuit de commande d'arrêter le compteur. Ensuite le contenu du compteur est transmis vers une un afficheur.

On a alors :

$$N_2 V_e = N_1 E_{\text{ref}} \quad (\text{IV.4})$$

$$\Rightarrow N_2 = \frac{N_1 E_{\text{ref}}}{V_e} \quad (\text{IV.5})$$

N_2 est la valeur numérisée de V_e .

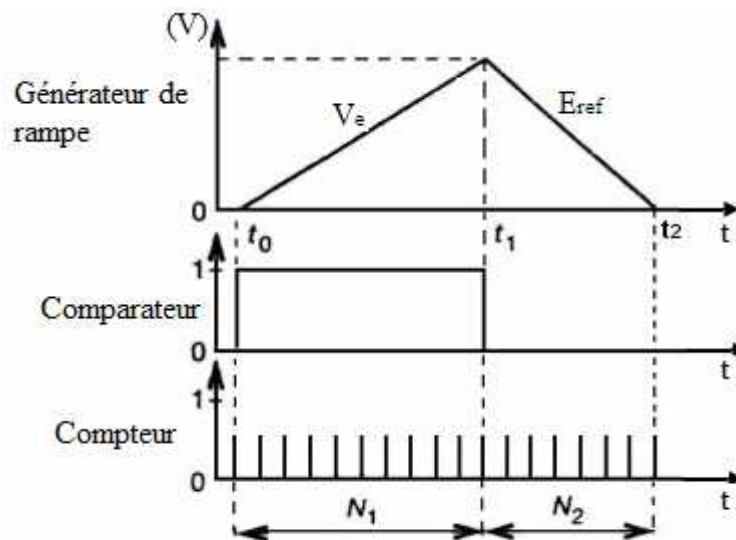


Figure IV.5 : Signaux en sortie des différents blocs du montage.

Le convertisseur à double rampe est lent mais très précis.

Description des autres blocs

Compteur : c'est un diviseur de fréquence.

Exemple : un compteur décimal

Il divise par 10, le résultat est transmis au compteur suivant et le reste est affiché.

Décodeur : à chaque chiffre écrit en binaire il faut correspondre un ensemble de tensions qui appliquée à l'afficheur, donne la forme du chiffre écrit en décimale.

Afficheur : transformer la tension du signal délivré par le décodeur en forme visible (émission de la lumière).

- afficheur à LED (20 LED)

Grande consommation $50\mu\text{A}$ par afficheur

- afficheur à cristaux liquides (7 segments)

Il est basé sur la réflexion de lumière selon la tension appliquée. (si la tension appliquée est nulle les cristaux liquides sont transparent et avec une tension il devient opaque (noir).

- Consommation très faible inférieure à 0.1 mA par afficheurs
- Ils sont invisible dans l'obscurité.

IV.3. Capteurs

Les multimètres de mesure numériques sont le plus souvent constitués d'un capteur transformant la grandeur à mesurer (tension, intensité ou résistance) en tension continue associé à un voltmètre numérique. On peut citer conversion de courant, de résistance, d'impédance,... etc. La figure IV.6 donne le schéma synoptique d'un multimètre (A,V,).

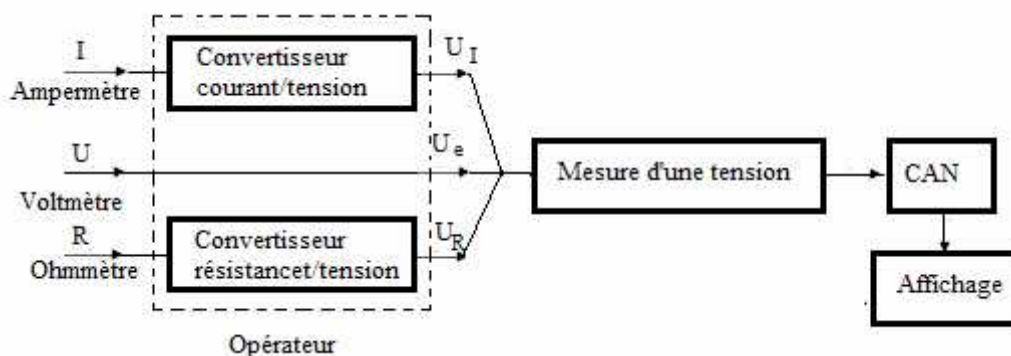


Figure IV.6 : Schéma synoptique simplifié d'un multimètre.

IV.3.1. Mesure de courant

Le principe consiste à mesurer la tension aux bornes d'une résistance connue R_s , traversée par le courant à mesurer. Cette résistance doit être le plus faible possible pour ne pas perturber le circuit étudié (l'impédance d'entrée de l'ampèremètre soit négligeable). Le schéma de principe est représenté sur la figure IV.7.

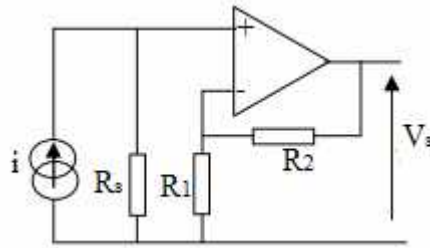


Figure IV.7 : Montage de conversion courant-tension.

La tension de sortie est :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_s \cdot i \quad (\text{IV.3})$$

IV.3.2. Mesure de résistance

Le principe de cet ohmmètre consiste à générer un courant fixe connu dans la résistance à mesurer. Il suffit de mesurer la tension aux bornes de cette résistance (voir figure IV.8).

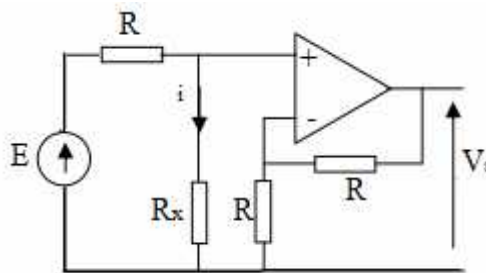


Figure IV.8 : Mesure de résistance.

On a :

$$i = \frac{E}{R} \quad (\text{IV.4})$$

La tension de sortie est :

$$V_s = \left(\frac{2E}{R}\right) R_x \quad (\text{IV.5})$$

Avec R_x est la résistance à mesurer.

IV.3.3. Mesure d'impédance

Un pont d'impédance automatique fonctionne selon le principe de la contre réaction. Selon le montage de la figure IV.9 la tension V_s est l'image de l'impédance Z_x .

La tension V_s et la tension d'alimentation e permet de déterminer les parties réelle et imaginaire de l'impédance. La pulsation ω étant connu il est possible à partir de la réactance d'afficher L ou C.

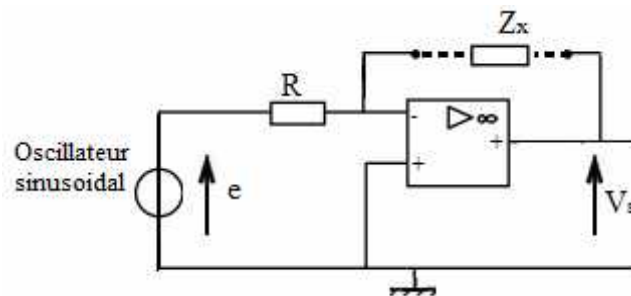


Figure IV.9 : Mesure de résistance.

IV.4. Multimètre numérique

Le multimètre numérique est un instrument qui permet d'effectuer diverses mesures courantes en électricité :

- Mesure de tension : fonction en voltmètre (v), mesure en AC et DC.
- Mesure de courant : fonction en ampèremètre (A), mesure en AC et DC.
- Mesure de résistance : fonction en ohmmètre (Ω).

Certains multimètres ont également pour fonction de mesurer d'autres grandeurs telles que :

- Mesure de tension de seuil : test diode.
- Test de connectivité : capable de tester la connectivité des fils dans un circuit pour assurer le fonctionnement normal de divers appareils dans le circuit;
- Mesure de la température : nécessitant généralement un capteur de température supplémentaire.
- Test de capacité : pour tester la qualité et les performances des condensateurs du circuit.
- Mesure de fréquence : capable de mesurer la fréquence dans un circuit pour déterminer l'état de fonctionnement des signaux électriques dans le circuit.

Le choix du type de mesure (de l'instrument), du calibre de mesure se fait généralement à l'aide d'un commutateur rotatif, des boutons poussoirs peuvent commander des fonctions supplémentaires. Les multimètres les plus récents, souvent les plus simples d'emploi, choisissent automatiquement le bon calibre. La figure IV.10 illustre les fonctions d'un multimètre numérique.

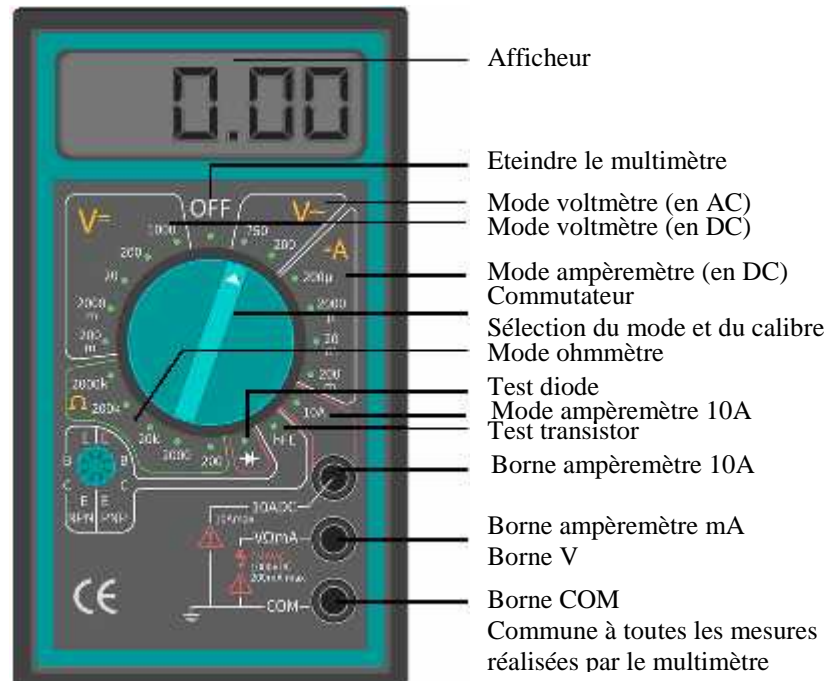


Figure IV.10 : Fonctions d'un multimètre numérique.

La mesure des tensions est l'une des principales fonctions d'un multimètre. L'appareil numérique mesure en position "continu" (DC) la valeur moyenne du signal. L'extraction de cette valeur consiste à passer ce signal à travers un filtre passe-bas qui ne conserve que la composante continue. Le principe de mesure est donné par le schéma synoptique de la figure IV.11.

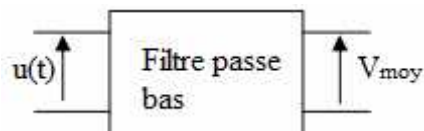


Figure IV.11 : Mesure de la valeur moyenne.

En position "alternatif" (AC), il mesure :

- La valeur efficace d'un signal sinusoïdal uniquement sans composante continue (voltmètre numérique en AC)
- La valeur efficace d'un signal sans composante continue (appareils RMS: Root Mean Square). Le voltmètre indique la valeur efficace uniquement du signal alternatif. Il élimine en premier lieu la composante continue du signal (filtre passe haut), puis affiche la valeur efficace de la composante alternative.

Dans ce cas la valeur efficace du signal à mesurer est calculée par la relation suivante :

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{V_{\text{DC}}^2 + V_{\text{AC}}^2} \quad (\text{IV.6})$$

➤ La valeur efficace d'un signal avec sa composante continue (appareils TRMS : True RMS).


En outre que la fonction voltmètre, ampèremètre et ohmmètre, le multimètre peut être utilisé comme moyen simple et rapide pour mesurer ou vérifier certains composants.

- Test de diodes

Rappelons qu'une diode polarisée en sens direct agit comme un interrupteur fermé, laissant le courant circuler dans un seul sens. La meilleure façon de tester une diode consiste à mesurer la chute de tension dans la diode lorsqu'elle est polarisée en sens direct.

La procédure de contrôle de diode est la suivante :

1- Bien vérifier que tout le circuit est hors tension et il n'y a aucune tension sur la diode.

2- Mettre le multimètre sur la fonction diode (). Une petite tension entre les cordons de mesure. Connecter les cordons de mesure à la diode polarisée en sens direct (le cordon noir (com) sur la cathode et le cordon rouge (+) sur l'anode). La figure IV.12 montre le sens passant (polarisation direct) de la diode.

➤ Lorsque la diode fonctionne (en bon état), le multimètre affiche une tension comprise entre 0,5 et 0,8 V pour les diodes au silicium. Certaines diodes au germanium présentent une chute de tension comprise entre 0,2 et 0,3 V.

➤ Lorsque la diode ne fonctionne pas (défectueuse). Le multimètre affiche OL dans les deux sens (directe et inverse) qui indique que elle est comme un interrupteur ouvert.

➤ Le multimètre affiche la même valeur (0 V) dans les deux sens lorsque la diode est court-circuitée.

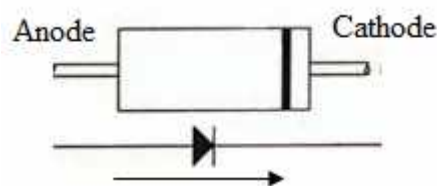


Figure IV.12 : Sens passant de la diode.

- Test de transistors

1. Test de transistors par la fonction hFE

Certains multimètres sont munis d'une prise réceptrice (fonction hFE) pour vérifier un transistor en fonction de sa valeur de gain en courant β (hFE). En effet, si le transistor est en bon état, le multimètre affiche une valeur qui correspond à son gain. Si le transistor est mal inséré ou si l'une de ses jonctions est défectueuse, le multimètre indique 0 ou 1 clignotant.

Le transistor type NPN et schéma équivalent sont donnés en figure IV.13.



Figure IV.13 : Transistor NPN et schéma équivalent.

Un multimètre peut être utilisé comme moyen simple et rapide pour vérifier un transistor, afin d'identifier une possible défaillance à jonction ouverte ou court-circuitée.

2. Test de transistors par la fonction test de diode

La jonction base-collecteur (B-C) et la jonction base-émetteur (B-E) sont équivalentes à des diodes, voir le schéma équivalent de la figure IV.13.

- En polarisation direct les deux jonctions devraient indiquer $0.7V \pm 0.2V$.
- En polarisation inverse les deux jonctions devraient indiquer un circuit ouvert.

Le multimètre fournit une mesure de tension ou une autre indication pour afficher la condition de la jonction du transistor lors du test.

Transistor est en bon état

- Lorsque la jonction B-E est polarisée en directe, le cordon rouge (+) est connecté à la base et le cordon noir (com) est connecté à l'émetteur, le multimètre affiche une valeur de tension de $0.7V \pm 0.2V$.
- Lorsque la même jonction est polarisée en inverse (inversion des bornes du multimètre), le multimètre affiche une valeur typique est de 2.6 V.

➤ La procédure doit ensuite être répétée pour la jonction B-C.

Dans le cas d'un transistor PNP, il faut inverser la polarité des bornes du multimètre pour chacun des tests.

Transistor est défectueux

➤ La jonction du transistor est ouverte, on obtient une tension de circuit ouvert (typiquement 2.6 V) pour les deux cas de polarisation (directe et inverse).

➤ Lorsque la jonction est court-circuitée, le multimètre indique 0V dans les deux tests de polarisation direct et inverse.

➤ Parfois, une jonction défectueuse peut indiquer une faible résistance pour les deux conditions de polarisation plutôt qu'un court-circuit. Le multimètre affiche une faible tension plus faible que la tension exacte en circuit ouvert (1.1 V par exemple).

- Test de capacités

Un capacimètre est souvent intégré sur un multimètre. Il permet de mesurer la capacité d'un condensateur. Pour mesurer la capacité d'un condensateur ou vérifier son état, on met le sélecteur sur la fonction capacimètre (choisir le calibre approprié). On met ensuite les pattes du condensateur dans les accès prévus sur l'appareil : la capacité du condensateur s'affiche à l'écran.

➤ Si la valeur affichée est exacte avec ce qui est inscrite sur le condensateur, alors le condensateur est bon.

➤ Si la valeur affichée est légèrement différente de celle inscrite sur le condensateur, on peut aussi supposer que le condensateur est bon avec une certaine incertitude.

➤ Si la valeur affichée est carrément différente de celle inscrite sur le condensateur ; soit le condensateur est mauvais, soit la valeur inscrite ne correspond à aucun calibre (une mauvaise mesure).

IV.5. Caractéristiques

- Erreurs de lecture sont éliminées.

- Facilité d'utilisation et de lecture.

- Grande précision (0.05 en DC et 0.5% en AC).

- Indication peut être enregistrée sous forme numérique et exploité par un ordinateur.

Comme inconvénients leur prix qui reste assez élevé, leur fragilité (n'accepte pas les chocs électriques et mécaniques) et les difficultés à repérer le maximum ou le minimum d'un signal.

IV.6. Oscilloscopes numériques

Pour les oscilloscopes numériques, le signal à visualiser est préalablement numérisé par un convertisseur analogique-numérique (CAN). La figure IV.14 montre illustre le schéma fonctionnel simplifié d'un oscilloscope numérique.

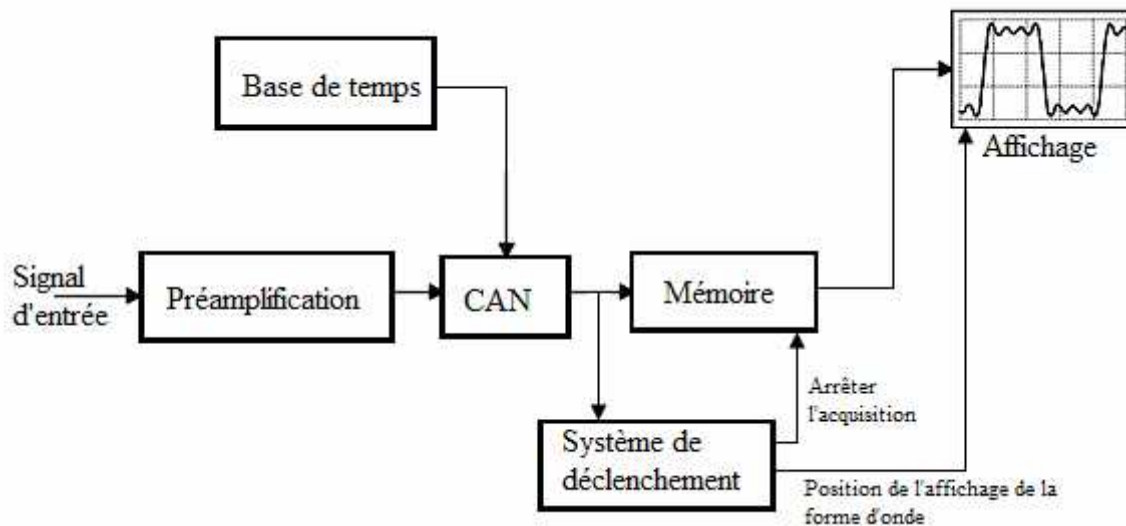


Figure IV.14 : Schéma fonctionnel simplifié d'un oscilloscope numérique.

Un signal d'entrée analogique est envoyé à l'étage de pré-amplification afin d'amplifier l'amplitude du signal. On l'appelle système vertical car il dépend de la commande d'échelle verticale. Ce signal est ensuite transmis au bloc d'acquisition, où le CAN est utilisé pour échantillonner et convertir la tension du signal en une valeur numérique. Le système horizontal, qui contient une horloge d'échantillonnage, donne à chaque échantillon de tension une coordonnée temporelle (horizontale) précise. L'horloge d'échantillonnage pilote le CAN et sa sortie numérique est stockée en mémoire à des emplacements consécutifs. Le système de déclenchement (trigger) détecte une condition spécifiée par l'utilisateur dans le flux de signal entrant et l'applique comme référence temporelle dans l'enregistrement de la forme d'onde. L'événement répondant aux critères de déclenchement est affiché. L'affichage s'effectue de plus en plus souvent sur un écran à cristaux liquides, ce qui rend l'appareil facile à déplacer et beaucoup moins consommateur d'énergie.

Les principales caractéristiques à prendre en compte sont :

- La résolution du convertisseur analogique-numérique.

- La fréquence d'échantillonnage en Mé/s (méga échantillons par seconde) ou Gé/s (giga échantillons par seconde).

- La mémoire.

Les oscilloscopes numériques modernes possèdent plusieurs fonctions d'affichage et de mesure, telles que :

- Le zoom et le dé-zoom d'un signal et l'utilisation de curseurs ou marqueurs pour effectuer des mesures manuelles.

- Un grand nombre de fonctions automatisées, comme la valeur de crête ou crête / crête, la fréquence, les temps de montée et descente, la vitesse de balayage, le facteur de crête.

- Transformation rapide de Fourier qui permet d'obtenir le spectre du signal.

Avantages

- Possibilité de stocker des données numériques pour une visualisation rapide, de les télécharger sur un ordinateur.

- Afficher des formes d'onde immédiatement après un événement de déclenchement.

- Mémoire de stockage élevée et la précision du signal en temps réel.

Chapitre V

Méthodes de mesures des grandeurs électriques

Au cours de ce chapitre, nous allons voir les différentes méthodes utilisées pour mesurer des grandeurs électriques à savoir : mesure des tensions, mesure des courants, mesure des résistances, mesure des impédances, mesure des puissances et mesure des fréquences et des déphasages.

V.1. Mesure des tensions

On appelle tension électrique entre deux points A et B d'un dipôle la différence de potentiel électrique (ddp) entre les deux bornes A et B.

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (\text{V.1})$$

L'unité de la (ddp) est le Volt (V), symbolise par la lettre U.



Figure V.1 : Tension aux bornes d'un générateur et d'un récepteur.

L'appareil de mesure qui permet de mesurer la (ddp) entre deux points d'un circuit est le voltmètre. Celui-ci se branche toujours en parallèle sur le circuit.

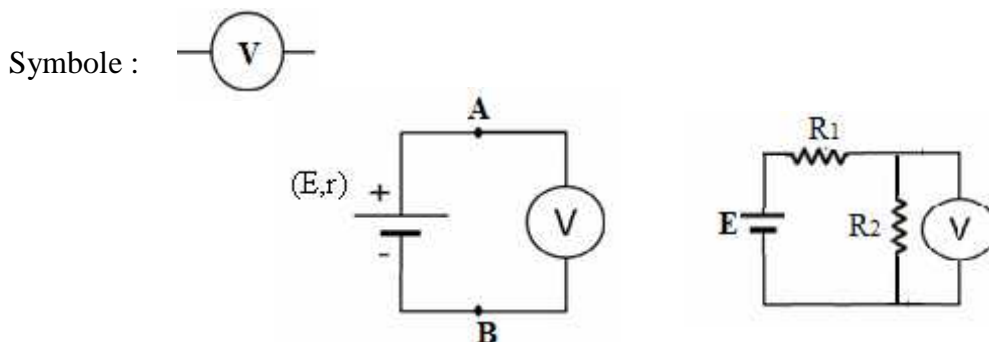


Figure V.2 : Branchement du voltmètre.

- Tension continue : la tension mesurée correspond à la valeur moyenne (V_{moy})
- Tension Alternatif : la tension mesurée correspond à la valeur efficace (V_{eff})

Pour mesurer ces deux grandeurs on peut utiliser différents voltmètres

V.1.1. Types de voltmètres utilisés pour mesurer la tension

- Voltmètre magnétoélectrique 

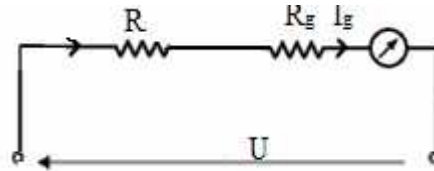


Figure V.3 : Voltmètre avec cadre mobile.

On a :

$$\alpha = \frac{nBS}{C} I = \frac{nBS}{C} \frac{U}{R + R_g} \quad (\text{V.2})$$

La déviation de l'aiguille est proportionnelle à une tension. Ce type de voltmètre mesure la valeur moyenne.

- Voltmètre 

Mesure la valeur moyenne redressée multiplié par 1.11.

Donc :

$$U = U_{\text{moyred}} \times 1.11 \quad (\text{V.3})$$

($U = V_{\text{eff}}$ dans le cas d'un signal sinusoïdal)

- Voltmètre ferromagnétique 

Mesure la valeur efficace quelque soit la forme du signal mesuré. (utilisé pour les grandes tensions "60V à 100V").

- Voltmètre électronique

Il mesure qu'en AC à cause de son impédance à l'entrée (un condensateur à l'entrée qui élimine la composante continue).

Il affiche :

$$V_{\text{moy red}} \times 1.11 \quad (\text{V.4})$$

Impédance d'entrée : $R_{\text{int}} = 10\text{M}$ quelque soit le calibre, $C = 30\text{pF}$.

- Voltmètre numérique

- Mesure la valeur efficace vraie (TRMS).
- Résistance d'entrée constante égale à 10M quelque soit la gamme.
- Grande précision.

Tout multimètre, mesure en position courant continu (DC) la composante continue d'un signal (sa valeur moyenne).

Mesure de la valeur efficace avec multimètre numérique RMS vrai, couplage "AC+DC"

Mesure de la valeur efficace avec un multimètre "RMS" (alternatif uniquement), couplage "AC".

V.1.2. Accessoires de mesure

Lorsque le plus grand calibre du voltmètre ne suffit pas on peut utiliser :

- Résistance additionnelle

Voir le montage de la figure V.4 (a).

$$U_{\text{mes}} = \frac{R_v}{R_v + R_{\text{ad}}} U \quad (\text{V.5})$$

$$\text{Si } R_v = R_{\text{ad}} \Rightarrow U_{\text{mes}} = \frac{U}{2} \quad (\text{V.6})$$

(U = 2 calibre max)

- Diviseur de tension

Selon le montage de la figure V.4 (b) :

$$U_{\text{mes}} = \frac{R_2 // R_v}{R_1 + R_2 // R_v} U \quad (\text{V.7})$$

$$\text{Si } R_v \gg R_2 \Rightarrow U_{\text{mes}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U \quad (\text{V.8})$$

En alternatif en peut utiliser un diviseur capacitif (voir le montage de la figure V.4 (c)):

$$U_{\text{mes}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} U \quad (\text{V.9})$$

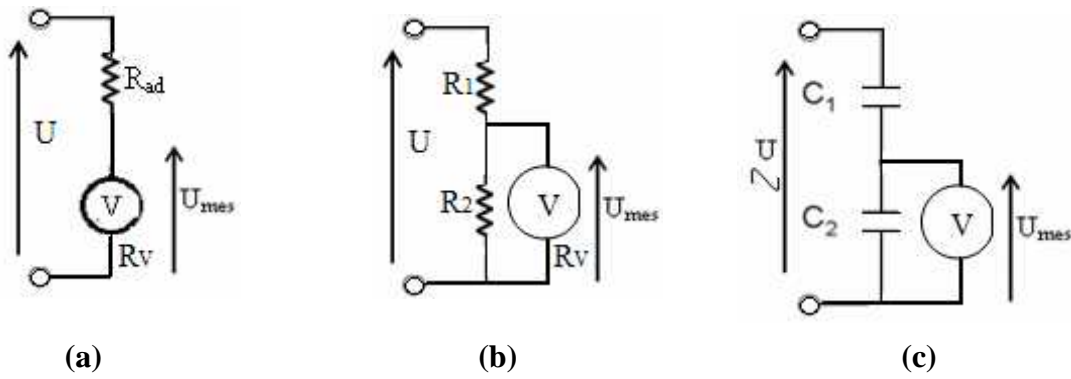


Figure V.4 : Montages diviseur de tension en DC et AC.

- Transformateur de tension

Les transformateurs de tension sont utilisés surtout pour les mesures de tension alternative dont la valeur est trop élevée pour les calibres usuels des voltmètres et pour la sécurité. Le primaire du transformateur est branché en dérivation sur la ligne et le secondaire relié au voltmètre usuel (voir figure V.5). La tension secondaire, en général est 100 V ou 110 V, dans les conditions normales d'utilisation, pratiquement proportionnelle à la tension primaire.

Un transformateur de tension est constitué de deux bobines couplées par un noyau magnétique. Les circuits primaire et secondaires sont électriquement séparés l'un de l'autre. Le courant primaire parcourt la bobine primaire, ce qui crée un champ magnétique. Ce champ est transmis par le noyau à la bobine secondaire ; une tension est induite par ce champ magnétique aux bornes du circuit secondaire. En fermant le circuit secondaire, un courant circule et il existe une relation de proportionnalité entre le courant primaire et le courant secondaire :

$$U_{\text{mes}} = \frac{n_2}{n_1} U \quad (\text{V.10})$$

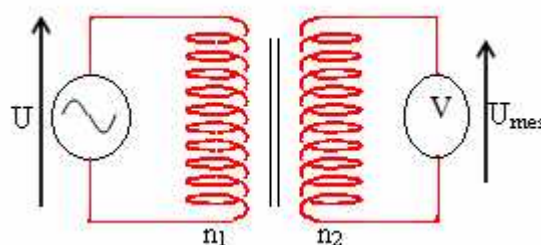


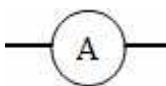
Figure V.5 : Mesure par transformateur de tension.

La relation (V.10) dépend du nombre d'enroulements utilisés pour les bobines n_1 et n_2 .

$n_2 < n_1$ (pour abaisser la tension)

V.2. Mesure des courants

L'intensité du courant électrique représente la quantité d'électrons qui ont traversé le circuit (générateur, conducteur et charge). L'intensité du courant se mesure en Ampère (A), symbolisé par la lettre I. Pour mesurer cette intensité, on utilise un ampèremètre qui se branche en série sur le circuit et la pince ampérométrique.

Symbole : 

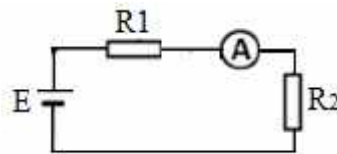



Figure V.6 : Branchement d'ampèremètre.

La résistance interne de l'appareil doit être la plus faible possible.

V.2.1. Types d'ampèremètres utilisés pour mesurer le courant

- Ampèremètre magnétoélectrique 

$\alpha = \frac{nBS}{C} I \Rightarrow$ indique la valeur moyenne (V_{moy})

- Ampèremètre  \Rightarrow indique la valeur moyenne redressée $\times 1.11$

- Ampèremètre ferromagnétique 

Mesure la valeur efficace quelque soit la forme du signal mesuré. (utilisé pour mesurer les courants importants avec le calibre 10A)

- Ampèremètre numérique

Lors de la mesure en DC, le courant doit entrer dans l'ampèremètre par la borne marquée "A" (ou mA ou +) et ressortir par la borne "commune" marquée COM (ou -).

- Tout multimètre, mesure en position courant continu (DC) la composante continue d'un signal donc sa valeur moyenne.
- Mesure de la valeur efficace avec multimètre numérique RMS vrai.
- Mesure de la valeur efficace avec un multimètre "RMS" (alternatif uniquement), couplage "AC".

V.2.2. Accessoires de mesure

Si le courant est supérieur à 5A on peut utiliser :

- Shunt externe

Pour avoir un ampèremètre de 50A, il faut un shunt de $R_s = 2\text{ m}\Omega$ avec un voltmètre de 0.1V

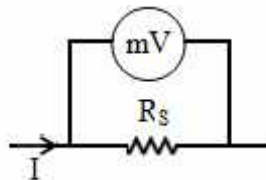


Figure V.7 : Shunt une résistance avec un millivoltmètre

- Transformateur d'intensité

La mesure de courants alternatifs s'effectue généralement par un transformateur de courant. Ce dernier permet de convertir le courant passant dans le conducteur primaire en un courant secondaire d'intensité inférieure à l'intensité au primaire.

La bobine primaire est en général constituée d'un enroulement et le noyau magnétique a la forme d'un anneau (voir figure V.8). Le courant parcouru dans l'enroulement primaire crée un champ magnétique qui est transmis par le noyau à la bobine secondaire. Cette dernière est constituée de quelques enroulements placés autour du noyau. Le courant primaire et le courant secondaire sont proportionnels et ont la même phase. La relation entre les deux courants est :

$$I_2 = \frac{n_1}{n_2} I_1 \quad (\text{V.11})$$

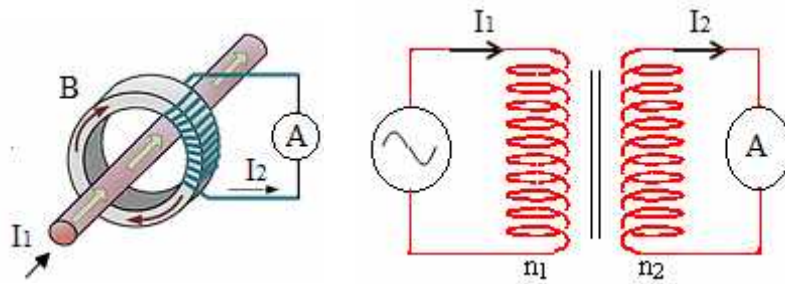


Figure V.8 : Mesure par transformateur d'Intensité.

Par précaution un transformateur de courant ne doit jamais fonctionner avec son secondaire ouvert. En effet il se développe alors une tension aux bornes du secondaire n fois supérieure à la tension d'alimentation. Cette tension de plusieurs kilo Volts est très dangereuse pour le personnel, elle peut aussi entraîner la destruction de l'enroulement.

- Pince ampèremétrique



Une pince de mesure est généralement utilisée pour mesurer des courants élevés, résoudre des problèmes d'installation et effectuer des tests de circuit. La mesure d'un courant s'effectue sans contact (sans coupure du circuit). Ce type d'appareils ne peut mesurer le courant que dans un seul conducteur. On doit donc séparer les fils avant de prendre une mesure. Il est recommandé, comme pour les autres types d'ampèremètre, de choisir le plus grand calibre avant de prendre une mesure.

Pince à induction électromagnétique

Utilisable uniquement en alternatif (AC). Les éléments constituant cet instrument sont assez comparables à celui d'un transformateur de courant. Dans ce cas, le primaire c'est le fil que l'on doit mesurer ($n_1=1$), le secondaire c'est l'enroulement autour d'un circuit magnétique. La pince étant le circuit magnétique qui est actif lorsque celle-ci est fermée.

Lors de la mesure le fil conducteur traversé par un courant électrique fournit au secondaire une énergie magnétique. Cette inductance induit un courant proportionnel au nombre de spires de la bobine du secondaire. Un circuit électronique transforme ce signal électrique afin d'être lu sur l'afficheur.

Pince ampèremétrique à effet Hall

Ce type de pince peut mesurer en alternatif et en continu (pince AC/DC). Les systèmes à effet Hall mesurent un flux magnétique et non un courant induit par sa variation. La pince est composée d'un circuit magnétique sans bobines et d'un élément semi-conducteur, le

capteur. Le circuit magnétique va canaliser toutes les lignes de champ généré par le champ magnétique induit par le courant traversant le fil. Une tension de l'ordre de quelques millivolts est obtenue, elle est amplifiée et convertie pour permettre une lecture sur l'afficheur.

Résumé

Pour mesurer une valeur moyenne : on utilise les appareils magnétoélectriques en position continue, et les appareils numériques en position continue.

Pour mesurer une valeur efficace :

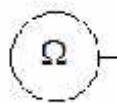
- En régime sinusoïdal on utilise tous les appareils magnétoélectriques (avec redresseur) et les appareils numériques RMS.
- Si le courant ou la tension sont non sinusoïdaux mais alternatifs on utilise les appareils numériques RMS et TRMS.
- Si le courant ou la tension sont quelconques on utilise les appareils ferromagnétique et les appareils numériques TRMS.

V. 3. Mesure des résistances

V.3.1. Ohmmètre

L'ohmmètre est l'appareil de mesure des résistances. Il incorpore nécessairement une pile, ce qui lui permettra d'injecter du courant dans le circuit à mesurer.

Le symbole est :



L'unité de la grandeur mesurée est le Ohm notée " Ω ".

La mesure de résistance se fait à vide. Déconnecter la résistance à mesurer du reste du circuit (voir figure V.9).

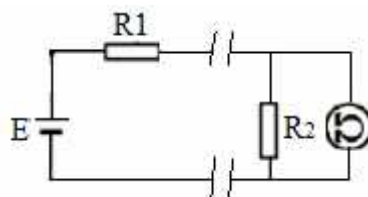


Figure V.9 : Branchement de l'ohmmètre.

Le schéma d'un ohmmètre analogique (à aiguille) est représenté sur la figure V.10.

L'ohmmètre à aiguille est constitué par :

- Un équipage à cadre mobile (R_g).
- Une résistance ajustable r (pour le réglage externe du zéro).
- Une pile interne de force électromotrice E alimentant le circuit.

R_x : résistance à mesurer qui se branche entre les deux bornes de l'appareil.

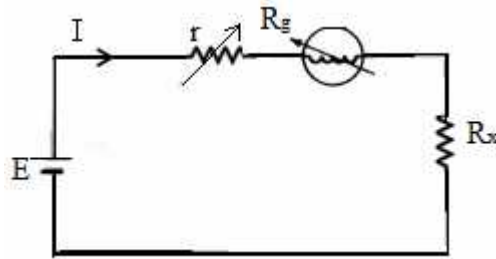


Figure V.10 : Ohmmètre analogique.

Le courant qui circule dans le circuit est donné par la relation :

$$I = \frac{E}{R_C + r + R_x} \quad (\text{V.12})$$

Or la déviation de l'aiguille de ECM est proportionnelle à I par la relation :

$$\alpha = kI = k \frac{E}{R_C + r + R_x} \quad (\text{V.13})$$

Lorsque R_x tend vers l'infinie () le courant I est nul.

Le zéro de l'échelle d'un ohmmètre correspond à la déviation maximale de l'aiguille (cas d'un court circuit), voir la figure V.13.

La déviation nulle de l'aiguille correspond à une résistance infinie (les deux bornes de l'appareil sont à l'air libre).

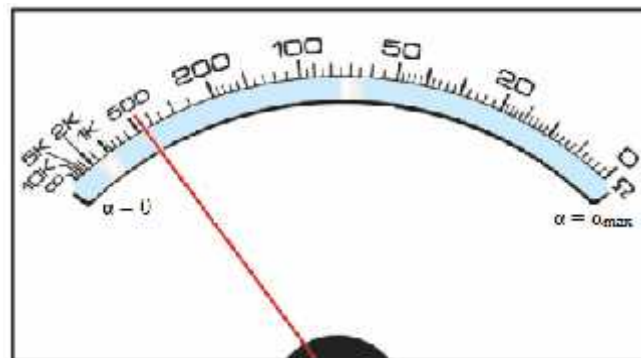


Figure V.11 : Echelle d'un ohmmètre analogique.

Mode opératoire

Pour un ohmmètre analogique la mesure se fait en deux étapes :

1. On court-circuite les deux bornes de l'appareil et on agit sur la borne de réglage du zéro (résistance r) jusqu'à obtenir une déviation maximale c'est à dire l'aiguille se place devant la graduation zéro de l'échelle de l'ohmmètre.
2. On enlève le court-circuit et on branche la résistance à mesurer aux bornes de l'ohmmètre et on lit la déviation de l'aiguille qui correspond à la valeur de la résistance à mesurée.

Dans le cas d'un ohmmètre numérique, on court-circuite les deux bornes de l'appareil. Une fois le zéro est affiché sur l'afficheur de l'appareil, on enlève le court-circuit et on branche la résistance à mesurer aux bornes de l'ohmmètre et on lit la valeur affichée sur la gamme qui convient.

La mesure des résistances se fait en courant continu le plus souvent. Les méthodes et les appareils utilisés dépendent de la nature de la résistance mesurée et de son ordre de grandeur.

On distingue :

- Les faibles résistances : généralement inférieures à 1Ω .
- Les résistances de moyennes valeurs : de 1Ω à $1M \Omega$.
- Les grandes résistances : généralement supérieures à $1M \Omega$.

V.3.2. Méthode voltampèremétrique

Les deux méthodes utilisées sont les montages amont et aval.

V.3.2.1. Montage amont

$$\text{On a : } U = (r_A + R_x)I \quad (\text{V.14})$$

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{et} \quad U = \frac{(r_A + R_x)I}{I}$$

$$\Rightarrow \Delta R = R_{\text{mes}} - R = (r_A + R_x) - R_x \quad (\text{V.15})$$

Donc l'erreur systématique relative est :

$$\frac{\Delta R}{R_x} = \frac{r_A}{R_x} \quad (\text{V.16})$$

Où r_A est la résistance interne de l'ampèremètre.

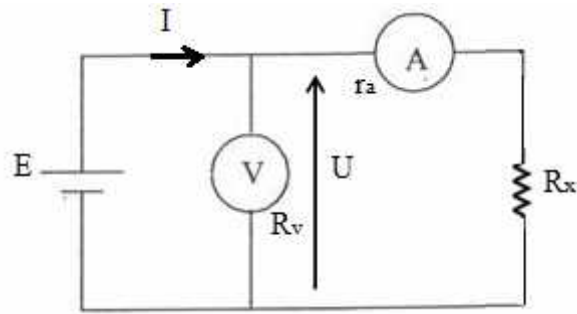


Figure V.12 : Montage amont.

V.3.2.2. Montage aval

$$\text{On a : } I_{\text{mes}} = I_R + I_V \Rightarrow I_{\text{mes}} = \frac{U}{R} + \frac{U}{R_v} \quad (\text{V.17})$$

$$\frac{I_{\text{mes}}}{U} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_v} \Rightarrow R = \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}$$

$$\Rightarrow \Delta R = R - R_x = \frac{R R_x}{R_v} \quad (\text{V.18})$$

Et on aura, l'erreur systématique relative:

$$\frac{\Delta R}{R_x} = \frac{R_x}{R_v} \quad (\text{V.19})$$

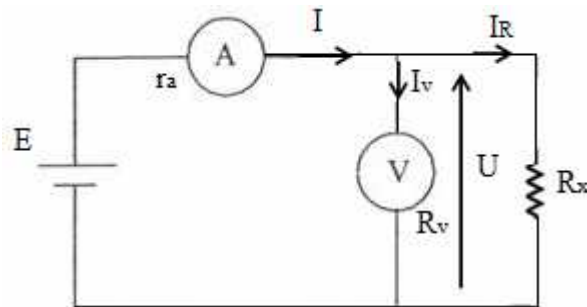


Figure V.13 : Montage aval.

La courbe de l'erreur relative $\frac{\Delta R}{R}$ en fonction de R est tracée sur la figure V.13:

$$R = \sqrt{R_v r_A} \quad \rightarrow \quad \text{résistance critique les deux montage son valable}$$

$$R < \sqrt{R_v r_A} \quad \rightarrow \quad \text{montage aval}$$

et $R > \sqrt{R_v r_A}$ → montage amont

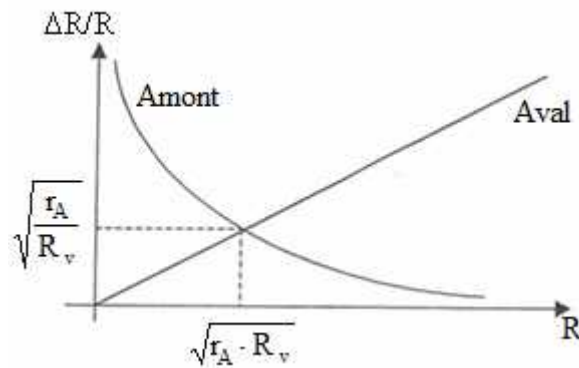


Figure V.14 : Courbe de l'erreur relative $\frac{\Delta R}{R}$.

Le montage aval est utilisé pour les faibles résistances alors que le montage amont est utilisé pour les grandes résistances.

V.3.3. Pont de Wheatstone

Le pont de Wheatstone est constitué de 4 résistances, d'un galvanomètre (microampèremètre) et d'une source de tension.

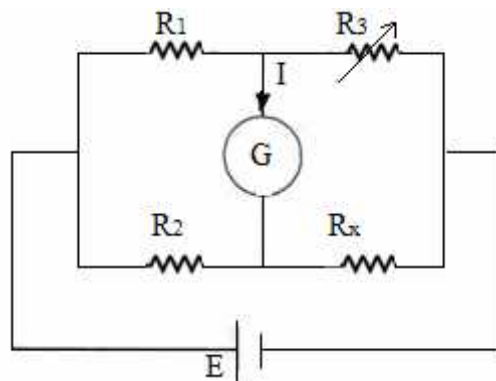


Figure V.15 : Pont de Wheatstone.

A l'équilibre du pont ($I = 0$) on a :

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_1} \quad (\text{V.20})$$

La résistance R_3 est une résistance à décade constituée pour avoir une grande sensibilité.

Les erreurs dans une mesure au pont de Wheatstone sont dues à plusieurs causes, telle que :

- Les erreurs de construction des résistances R_1 , R_2 et R_3 .
- Les erreurs dues à une mauvaise appréciation de la nullité du courant dans le galvanomètre.

L'erreur relative commise sur la mesure de résistance avec ce pont est :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} \quad (\text{V.21})$$

V.4. Mesure des impédances

V.4.1. Méthode voltampèremétrique

Elle consiste à utiliser un voltmètre et un ampèremètre et une source alternative.

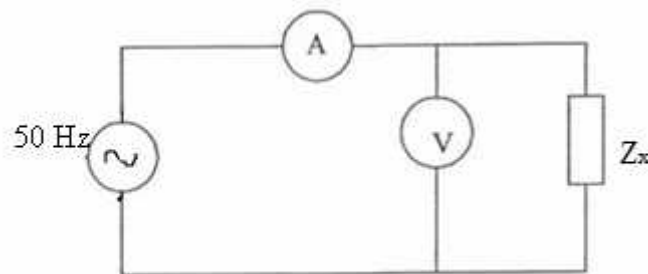


Figure V.16 : Méthode voltampèremétrique.

On a :

$$|z_x| = \frac{U_{\text{mes}}}{I_{\text{mes}}} \quad (\text{V.22})$$

$$\text{Inductance parfaite : } \frac{U_{\text{mes}}}{I_{\text{mes}}} = L\omega \quad (\text{V.23})$$

$$\text{Capacité parfaite : } \frac{U_{\text{mes}}}{I_{\text{mes}}} = 1/C\omega \quad (\text{V.24})$$

En pratique, les bobines réels contiennent une faible résistance en série (résistance du fil bobiné). Les condensateurs réels possèdent également une résistance parallèle de forte valeur qui caractérise les pertes diélectriques (courants de fuites). Plus faibles seront les pertes meilleur sera l'élément.

$$\text{Inductance réelle : } |z_x| = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + (L\omega)^2} \quad (\text{V.25})$$

$$\text{Capacité réelle : } |z_x| = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + 1/(C\omega)^2} \quad (\text{V.26})$$

Si on utilise une source continue (DC) on obtient :

$$\frac{U_{\text{mes}}}{I_{\text{mes}}} = r \quad (\text{V.27})$$

Si on cherche L Ou C on utilise une source alternative (AC)

V.4.2. Ponts de mesure des impédances

La figure V.21 montre un pont de mesure en alternatif. Il est constitué de :

Z_1 et Z_2 sont des résistances pures,

Z_3 : impédance variable,

Z_x : impédance inconnue, et

I_z : indicateur de zéro.

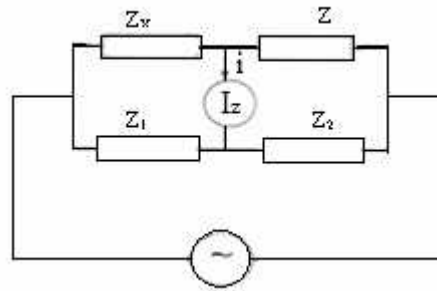


Figure V.17: Pont en alternatif.

A l'équilibre du pont ($I_z = 0$), on peut écrire :

$$Z_1 Z = Z_2 Z_x \Leftrightarrow \begin{cases} \Re(Z_1 Z) = \Re(Z_2 Z_x) \\ \Im(Z_1 Z) = \Im(Z_2 Z_x) \end{cases} \quad (\text{V.28})$$

V.4.2.1. Mesure d'impédances capacitives

Parmi les ponts utilisés pour mesurer les capacités, on trouve le pont de Sauty et de Wien.

V.4.2.1.1. Pont de Sauty

$$Z = R + \frac{1}{jC\omega} \quad \text{et} \quad Z_x = R_x + \frac{1}{jC_x\omega}$$

A l'équilibre du pont, on peut écrire :

$$R_1 \left(R + \frac{1}{jC\omega} \right) = R_2 \left(R_x + \frac{1}{jC_x\omega} \right) \quad (\text{V.29})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} R_x = \frac{R_1 R}{R_2} \\ C_x = C \frac{R_2}{R_1} \end{cases} \quad (\text{V.30})$$

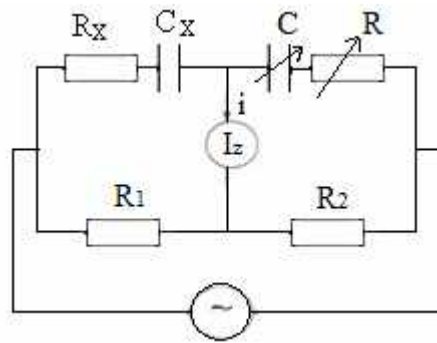


Figure V.18 : Pont de Sauty.

Le facteur de perte est :

$$\text{tg}\delta = R_x C_x \omega = RC\omega \quad (\text{V.31})$$

Si les pertes sont faibles (R_p négligeable devant l'impédance condensateur), tg restera faible et inversement.

Ce pont est utilisé pour la mesure des impédances capacitives à faible perte.

V.4.2.1.2. Pont de Wien

Le pont de Wien est utilisé pour la mesure des impédances capacitives à pertes importantes.

On a :

$$Z = R // \left(\frac{1}{jC\omega} \right) \Leftrightarrow Z = \frac{R}{1 + jRC\omega}$$

A l'équilibre du pont, on aura :

$$\begin{cases} R_x = \frac{R_1}{R_2} \frac{R}{(1 + R^2 C^2 \omega^2)} \\ C_x = \frac{R_2}{R_1} \frac{(1 + R^2 C^2 \omega^2)}{R^2 C \omega^2} \end{cases} \quad (\text{V.32})$$

Le facteur de perte :

$$\operatorname{tg}\delta = R_x C_x \omega = 1/RC\omega \quad (\text{V.33})$$

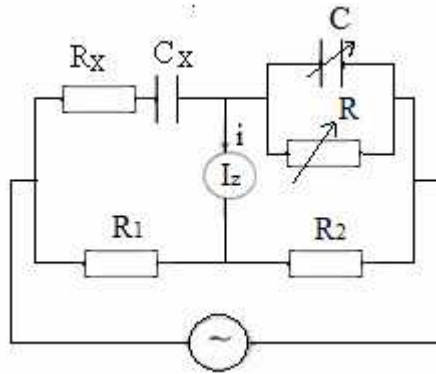


Figure V.19 : Pont de Wien.

V.4.2.2. Mesure d'impédances inductives

Le pont de Maxwell et le pont de Hay sont des ponts utilisés pour mesurer des impédances inductives.

V.4.2.2. 1. Pont de Maxwell

Soit : $Z_x = R_x + jL_x \tilde{S}$

A l'équilibre du pont, on trouve :

$$\begin{cases} R_x = \frac{R_1 R_2}{R} \\ L_x = CR_1 R_2 \end{cases} \quad (\text{V.34})$$

Le facteur de qualité :

$$Q = \frac{L_x \omega}{R_x} = RC\omega \quad (\text{V.35})$$

Ce pont est utilisé pour la mesure des impédances inductives avec facteur de qualité faible (pertes importantes). Le facteur de qualité est compris entre 0 et 10.

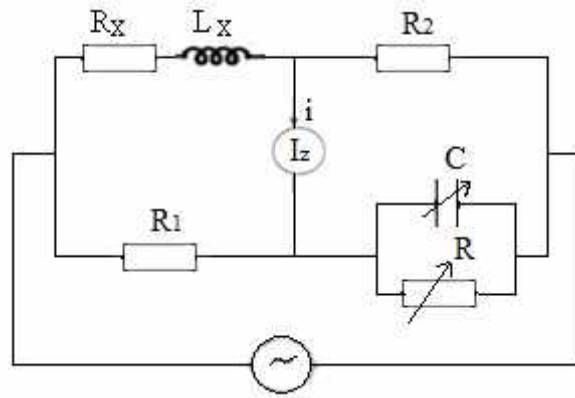


Figure V.20 : Pont de Maxwell.

V.4.2.2.2. Pont de Hay

A l'équilibre du pont, on trouve :

$$\begin{cases} R_x = \frac{R_1 R_2 R C^2 \omega^2}{(1 + R^2 C^2 \omega^2)} \\ L_x = \frac{R_1 R_2 C}{(1 + R^2 C^2 \omega^2)} \end{cases} \quad (\text{V.36})$$

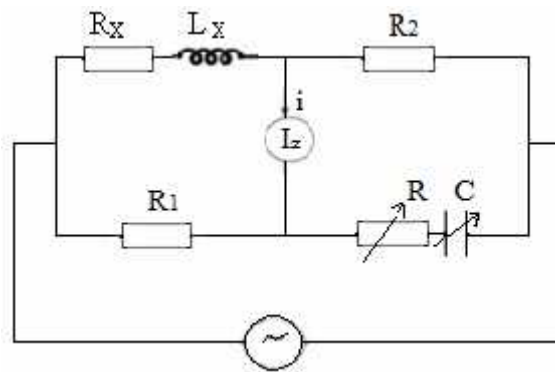


Figure V.21 : Pont de Hay.

Ce pont est utilisé pour la mesure des impédances inductives avec facteur de qualité important Q est supérieur à 10.

V.4.3. Méthode de résonance

Le courant qui circule dans le circuit de la figure V.22 est donné par :

$$i = \frac{e}{Z_x + \frac{1}{jC\omega}} \Rightarrow I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (L_x \omega - \frac{1}{C\omega})^2}} \quad (\text{V.37})$$

$$\text{À la résonance } I = I_{\max} \Rightarrow I = \frac{E}{R} \quad (Z \rightarrow R)$$

Le courant i et la tension e sont en phase.

$$\Rightarrow L_x \omega - \frac{1}{C\omega} = 0 \Rightarrow L_x = \frac{1}{C\omega^2} \quad (\text{V.38})$$

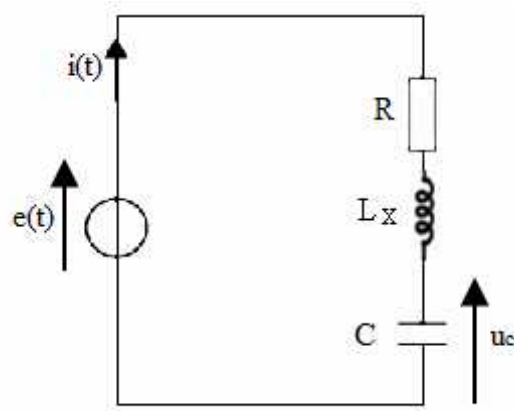


Figure V.22 : Circuit de résonance.

Le montage de la méthode résonance il nous permet de mesurer le facteur de qualité Q . Ce dernier est défini par :

$$Q = 2\pi \frac{\text{énergie maximale emmagasinée}}{\text{énergie dissipée par période}} \quad (\text{V.39})$$

Le facteur de qualité est sans unité.

L'énergie emmagasinée dans les éléments réactifs (bobine ou condensateur) est :

$$W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} C U^2 \quad (\text{V.40})$$

L'énergie dissipée dans la résistance par effet Joules pendant une période T (avec $\omega = 2\pi / T$) est donnée par :

$$W_d = \int_0^T R i^2 dt = \frac{1}{2} R I^2 T \quad (\text{V.41})$$

Donc,

$$Q = \frac{U_c}{E} \quad (\text{V.42})$$

Plus la résistance R est petite, plus le facteur de qualité Q de la bobine réelle est grand.

V.5. Mesures des Puissances

La puissance est l'une des grandeurs les plus importantes en électricité. Elle décrit le mieux les besoins énergétiques d'un système.

V.5.1. Mesure de la puissance en courant continu (DC)

En courant continue, la puissance consommée par une charge est :

$$P = U \cdot I \quad (\text{V.43})$$

Pour mesurer cette puissance on utilise soit la méthode indirecte soit la méthode directe.

V.5.1.1. Méthode voltampèremétrique

Cette méthode consiste à utiliser des appareils de mesure (ampèremètre et voltmètre), puis on calcule la puissance P en fonction de leurs indications. Selon la position du voltmètre on a deux montages.

V.5.1.1.1. Montage amont

On a: $P = U \cdot I$

$$\Rightarrow P_{\text{mes}} = U_{\text{mes}} \cdot I_{\text{mes}} \quad (\text{V.44})$$

$$= U \cdot I_V + r_A \cdot I_R^2$$

$$P_{\text{mes}} = P + r_A \cdot I_R^2$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{r_A \cdot I_R^2}{U \cdot I_R} = \frac{r_A}{R} \quad (\text{V.45})$$

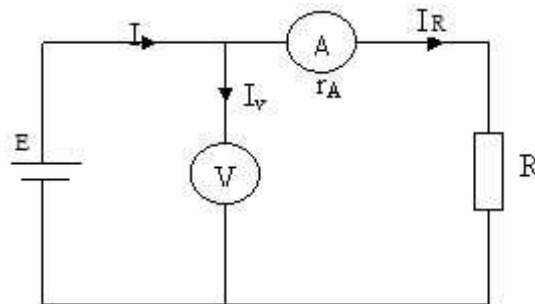


Figure V.23 : Montage amont.

Où r_A est la résistance interne de l'ampèremètre.

$\frac{\Delta P}{P}$ est l'erreur systématique qui est d'autant plus petite que R et plus grande que r_A .

V.5.1.1.2. Montage aval

On a :

$$I_{\text{mes}} = I_R + I_V = I_R + \frac{I_R R}{R_v} \quad (\text{V.46})$$

$$U = I_R \cdot R$$

$$\Rightarrow P_{\text{mes}} = U \cdot I_R + \frac{U^2}{R_v} \quad (\text{V.47})$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{U^2}{R_v U \cdot I_R} = \frac{R}{R_v} \quad (\text{V.48})$$

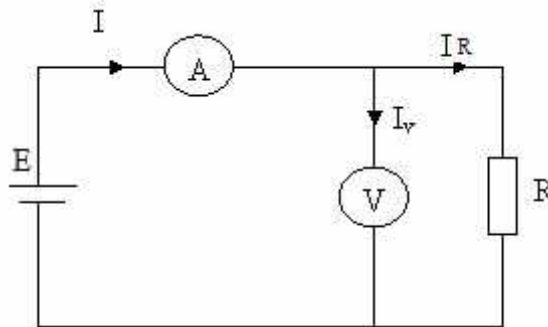


Figure V.24 : Montage aval.

Où R_v est la résistance interne du voltmètre.

L'erreur systématique est d'autant plus faible que R_v est plus grand que R. La correction est en général plus sûre avec le montage aval, car R_v est habituellement mieux définie que r_A .

$$R < \sqrt{R_v r_A} \rightarrow \text{montage aval} \quad \text{et} \quad R > \sqrt{R_v r_A} \rightarrow \text{montage amont}$$

Dans le cas général, l'erreur commise sur la mesure de puissance est :

$$\left. \frac{\Delta P_{\text{mes}}}{P} \right|_{\text{tot}} = \left. \frac{\Delta U}{U} \right|_C + \left. \frac{\Delta I}{I} \right|_C + \left. \frac{\Delta U}{U} \right|_l + \left. \frac{\Delta I}{I} \right|_l + \left. \frac{\Delta P}{P} \right|_m \quad (\text{V.49})$$

V.5.1.2. Méthode du wattmètre

L'appareil qu'on utilise pour mesurer la puissance est le Wattmètre. Il mesure directement la puissance électrique absorbée par un récepteur quelconque. Il comprend donc deux circuits (voir figure V.25) : l'un mesure le courant et doit être placé en série avec le composant et l'autre mesure la tension et doit être placé en dérivation à ces bornes.

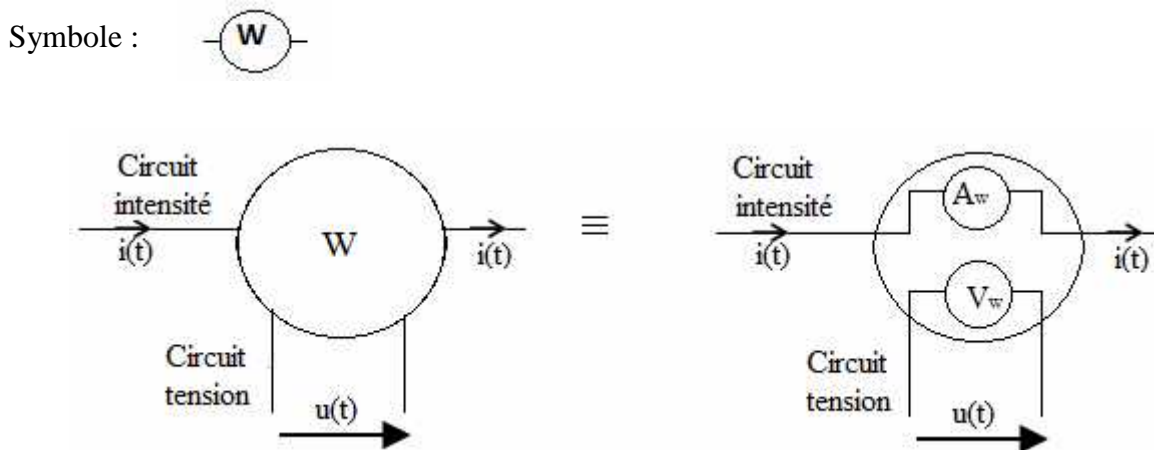


Figure V.25 : Circuit de bobinages du wattmètre.

Deux montages du wattmètre sont possibles suivant que la mesure de tension est en amont ou en aval de la mesure d'intensité.

V.5.1.2.1. Montage amont

L'erreur systématique de mesure provient de la chute de potentiel aux bornes du circuit intensité. Le voltmètre mesure en effet la tension aux bornes du dipôle et du circuit intensité du wattmètre.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{r_A \cdot I^2}{U \cdot I} \Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{r_A}{R} \quad (\text{V.50})$$

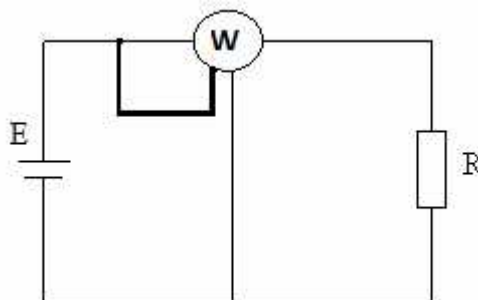


Figure V.26 : Montage amont.

r_A est la résistance interne du circuit courant du wattmètre.

V.5.1.2.2. Montage aval

L'erreur systématique de mesure provient du courant dans le circuit tension. L'ampèremètre mesure en effet la somme des courants dans le dipôle et dans le circuit tension du wattmètre.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{U^2}{R_v \cdot U \cdot I}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{R}{R_v} \quad (\text{V.51})$$

R_v est la résistance interne du circuit tension du wattmètre.

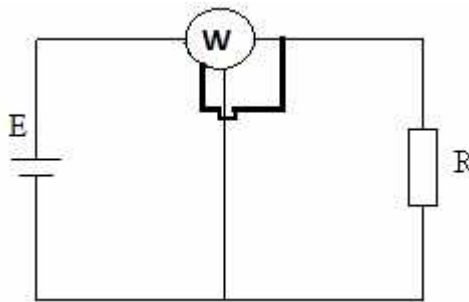


Figure V.27 : Montage aval.

Le montage aval est le plus utilisé vu que la résistance du circuit de tension R_v est bien définie.

V.5.2. Mesure de la puissance en courant alternatif monophasé (AC)

Si le récepteur est purement résistif la puissance est encore donnée par le produit U et I . Si le circuit comporte un récepteur ayant une partie réactive le courant n'est plus en phase avec la tension et on détermine les trois puissances.

En courant alternatif la puissance mesurée est :

$$P(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (\text{V.52})$$

Elle représente la puissance instantanée

Si on a des tensions et des courants périodiques on travaille toujours avec la puissance moyenne :

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (\text{V.53})$$

Si on a des courants et tensions sinusoïdaux de même fréquence :

$$u(t) = U\sqrt{2} \cos \omega t$$

$$i(t) = I\sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\Rightarrow P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T 2U I \cos \check{S}t \cdot \cos(\check{S}t + \{ \}) dt \quad (\text{V.54})$$

est le déphasage entre le courant et la tension.

La figure V.28 montre le triangle de puissance.

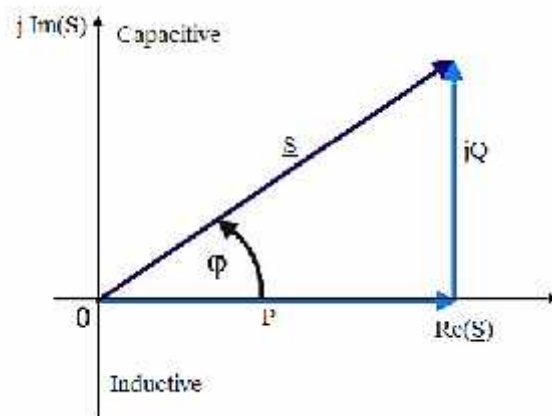


Figure V.28 : Triangle de puissance.

En alternatif, il y'a trois puissances données par ces expressions:

$$P = U \cdot I \cos \{ \quad (\text{V.55})$$

C'est la puissance active exprimée en Watt (W). Correspond à une fourniture réelle d'énergie transmise au récepteur. Elle est mesurée avec un wattmètre.

$$P = U \cdot I \sin \{ \quad (\text{V.56})$$

Représente la puissance réactive exprimée en voltampère réactif (VAR). Elle caractérise l'échange de puissance entre la source et la charge dans une période. Elle existe seulement dans les circuits plus ou moins réactifs.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{V.57})$$

C'est la puissance totale ou apparente exprimée en voltampère (VA). Elle est mesurée avec un voltmètre et un ampèremètre.

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (\text{V.58})$$

$\cos \phi$ correspond au facteur de puissance.

V.5.2.1. Mesure de la puissance apparente

Pour mesurer la puissance apparente S , il faut utiliser un ampèremètre et un voltmètre pour relever les valeurs efficaces du courant et de la tension, voir le montage de la figure V.29.

$$S = U_{\text{mes}} \cdot I_{\text{mes}} \quad (\text{V.59})$$

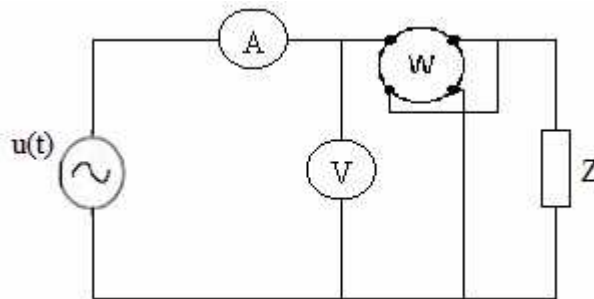


Figure V.29 : Circuit de mesure de puissance apparente.

V.5.2.2. Mesure de la puissance active

Pour mesurer la puissance active P , il suffit de brancher un wattmètre selon le montage aval vu en courant continu (voir figure V.27) et de remplacer la résistance R par une impédance Z .

$$\text{On a : } P = \alpha = k i_1 i_2$$

Et

$$i_1 = i_2 + i_Z$$

i_1 : Courant circulant dans circuit courant du wattmètre.

i_2 : Courant circulant dans le circuit tension ($R_2 + jL$) du wattmètre.

i_Z : Courant circulant dans l'impédance Z .

$$\alpha = k(i_2^2 + i_Z i_2)$$

$$\alpha = k \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{R_2^2 + (L\omega)^2}} \cos(\omega t + \theta) \left[I\sqrt{2} \cos(\omega t + \phi) + \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{R_2^2 + (L\omega)^2}} \cos(\omega t + \theta) \right]$$

Θ est la réactance du circuit tension du wattmètre.

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{L\omega}{R_2}$$

On aura :

$$P_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T P \Rightarrow P_{\text{moy}} = k' [P_Z + P_Z \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \theta + P_V] \quad (\text{V.60})$$

$$\text{Avec : } \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Im(Z)}{\Re(Z)} \quad (\text{V.61})$$

Il ya deux erreurs :

- Erreur du montage due à la consommation de la bobine tension P_V .
- Erreur de déphasage :

$$\frac{\Delta P}{P} = \operatorname{tg} \theta \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{V.62})$$

Sans un Wattmètre, on peut mesurer la puissance active en utilisant l'une de ces méthodes :

- Méthode de trois ampèremètres

Trois ampèremètres utilisés pour mesurer les valeurs efficaces et une résistance auxiliaire R (qui est une résistance étalon de valeur connue et d'incertitude très faible). Le schéma de principe de cette méthode est donné par la figure V.30 :

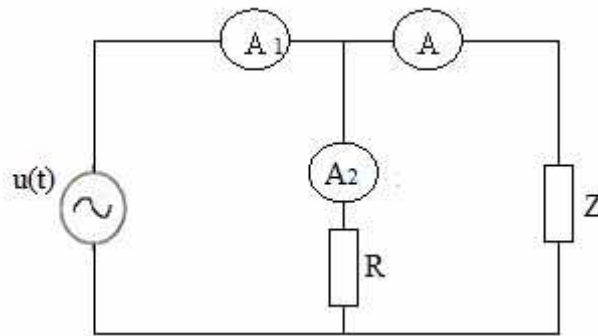


Figure V.30 : Schéma de principe de la méthode de trois ampèremètres.

Soit i_1 , i_2 et i les valeurs instantanées des courants circulants respectivement dans les trois ampèremètres A_1 , A_2 et A . On a :

$$i_1 = i_2 + i \Rightarrow i_1^2 = (i_2 + i)^2 \quad (\text{V.63})$$

$$P = u \cdot i \text{ et } i_2 = \frac{u}{R}$$

$$(\text{V.63}) \Rightarrow P = \frac{R}{2} (i_1^2 + i_2^2 - i^2) \quad (\text{V.64})$$

Par définition la puissance instantanée est la puissance moyenne, donc :

$$P = \frac{R}{2} (I_1^2 + I_2^2 - I^2) \quad (\text{V.65})$$

Avec I_1 , I_2 et I désignent les valeurs efficaces des courants i_1 , i_2 et i .

On remarque que cette relation ne dépend que de la valeur de la résistance étalon R et des valeurs des courants indiquées par les ampèremètres.

- Méthode de trois voltmètres.

Cette méthode est de même principe que la méthode précédente. Les voltmètres sont branchés selon la figure ci-dessous. Où R représente une résistance étalon de valeur connue et d'incertitude très faible.

Suivant le même principe que la précédente méthode on trouve :

$$P = \frac{I}{2 \cdot R} (U_1^2 + U_2^2 - U^2) \quad (\text{V.66})$$

Avec U_1 , U_2 et U désignent les valeurs efficaces des tensions u_1 , u_2 et u respectivement.

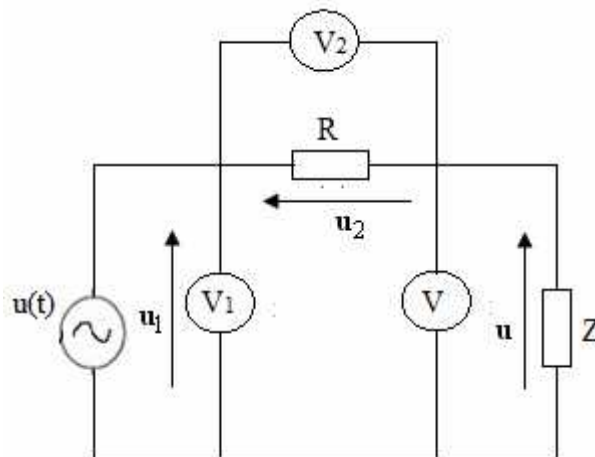


Figure V.31 : Schéma de principe de la méthode de trois voltmètres.

V.5.2.3. Mesure de la puissance réactive

Pour avoir la puissance réactive Q , il faut mesurer S et P .

$$Q = \pm \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{V.67})$$

En tenant compte du type du récepteur :

- Pour une charge purement résistive : $\cos \phi = 1$ et $Q = 0$

- Pour un récepteur inductif : $Q > 0$

- Pour un récepteur capacitif : $Q < 0$

La figure V.32 montre le triangle de phase. Le triangle des puissances dépend de la nature de la charge considérée.



Figure V.32 : Triangle de phase.

V.6. Mesures des fréquences et des déphasages

Pour la mesure de fréquence et de déphasage deux méthodes sont possibles. La première est par l'utilisation de l'oscilloscope dont le principe de mesure est décrit dans le chapitre 3 section mesure sur l'oscilloscope. La seconde correspond à la lecture directement sur l'appareil de mesure de la grandeur à mesurer.

V.6.1. Mesure des fréquences

V.6.1.1. Fréquencemètre

Le fréquencemètre est utilisé en haute fréquence. Il est destiné à mesurer la fréquence d'un signal périodique. L'unité est le Hertz (Hz). Le schéma de principe d'un fréquencemètre numérique est donnée sur la figure V.33. L'appareil convertit la tension sinusoïdale en un train d'impulsions unidirectionnelles. Il compte le nombre d'événements survenant dans les oscillations pendant un intervalle de temps donné. Lorsque la période pré réglée est terminée, la valeur du compteur s'affiche à l'écran et le compteur se remet à zéro.

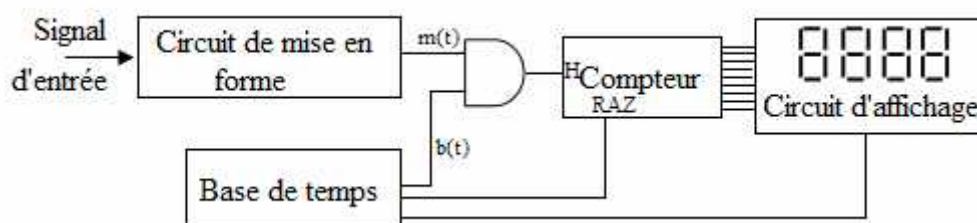


Figure V.33 : Schéma de principe d'un fréquencemètre numérique.

Le circuit de mise en forme permet de transformer le signal d'entrée périodique de fréquence f , de forme quelconque, en un signal périodique rectangulaire $m(t)$ (train d'impulsion) de même fréquence.

La base de temps génère un signal logique $b(t)$, de fréquence connue et très précise, fournit à l'intervalle de temps T (par exemple une seconde) pendant le quel s'opère la mesure.

Le signal RAZ sert à remettre à zéro le compteur. Il peut être généré par un monostable déclenché sur les fronts descendants de $b(t)$.

Le signal de base de temps appliqué à l'afficheur permet d'allumer la LED adéquate qui représente la virgule au niveau du circuit d'affichage.

Le compteur compte le nombre de fronts qui lui arrivent à son entrée d'horloge H et transmet le résultat de comptage au circuit d'affichage qui affiche un nombre selon un format bien déterminée qui correspond à la fréquence f du signal d'entrée. Il est régulièrement remis à zéro par les impulsions RAZ.

Le nombre affiché est le nombre N d'impulsions $m(t)$ comptées pendant le temps T .

La fréquence est donnée par :

$$\Delta T = N \cdot T = \frac{N}{f} \Rightarrow f = \frac{N}{\Delta T} \quad (\text{V.68})$$

Le chronogramme de la figure. V.37 représente l'évolution des tensions en différents points du montage.

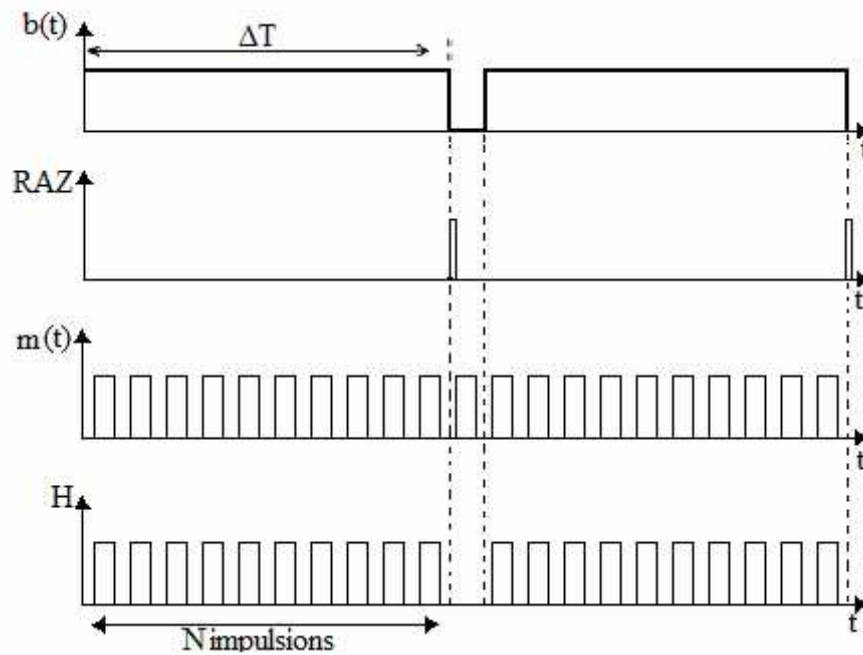


Figure V.34 : Signaux aux différents points du schéma de fréquencemètre numérique.

V.6.1.2. Périodemètre

Le périodemètre est utilisé en basse fréquence. Son schéma de principe est identique à celui d'un fréquencemètre (voir figure V.34). Une base de temps (un oscillateur à quartz) génère un temps T fixé (par exemple une milliseconde). On mesure par comptage des intervalles T le temps écoulé pendant une période du signal.

La figure V.35 montre le chronogramme des tensions en différents points du montage.

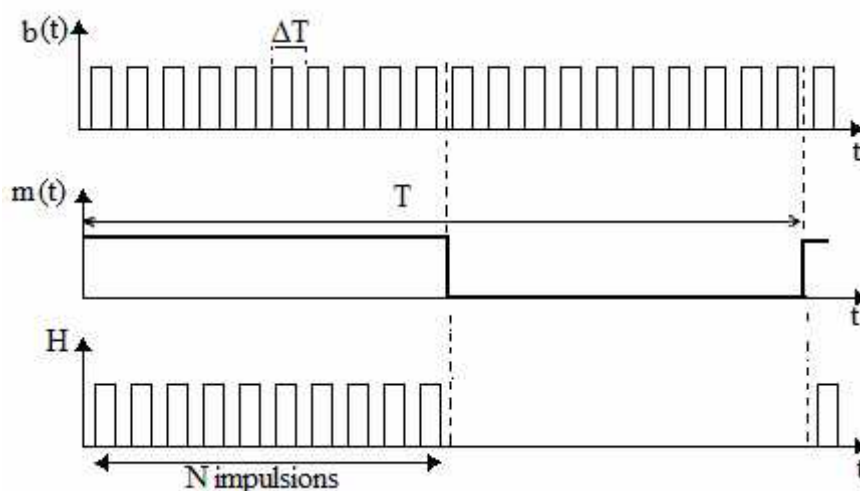


Figure V.35 : Signaux aux différents points du schéma du périodemètre.

L'appareil affiche le nombre d'impulsions qui arrivent sur son entrée horloge qui correspond à la période du signal. La période T est donnée par :

$$T = N \cdot \Delta T \quad (\text{V.69})$$

V.6.2. Mesure des déphasages

Le phasemètre est un appareil qui permet de mesurer la phase entre deux signaux e_1 et e_2 ayant la même fréquence. Le principe de fonctionnement d'un phasemètre numérique est représenté sur la figure V.36.

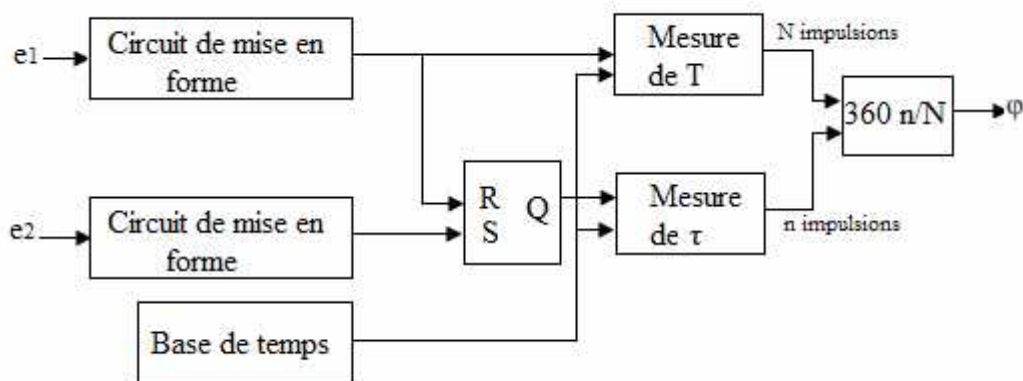


Figure V.36 : Schéma de principe de fonctionnement d'un phasemètre numérique.

Les deux signaux sont appliqués à l'entrée de circuit de mise en forme de l'appareil. Ce dernier mesure d'abord la période T du signal e_1 , puis il mesure le décalage entre les deux signaux. Le déphasage entre eux, exprimé en degrés, est alors donné par l'expression suivante :

$$\varphi = 360 \cdot \frac{\tau}{T} \quad (\text{V.70})$$

Exercices

Exercice 01 :

Un élément de circuit soumis à une tension constante U est parcouru par un courant I . L'étude expérimentale a donné $U = (120 \pm 2) [V]$ et $I = 24,2A \pm 1,65\%$.

- 1) Calculer l'incertitude absolue sur la puissance consommée par cet élément de circuit $P = U.I$.
- 2) Quelle est l'erreur relative correspondante.
- 3) Exprimer le résultat de deux façons.

Exercice 02 :

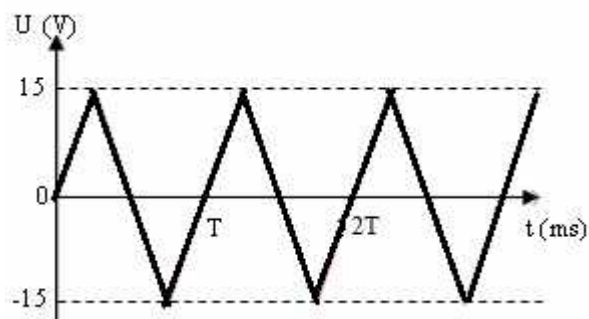
Un instrument numérique avec affichage de 3 chiffres et une précision de $\pm(1\% + 2 \text{ chiffres})$ indique 100 mV. Quel est la plage de la valeur réelle de cette tension.

Exercice 03 :

Pour mesurer un courant de 70 mA on dispose d'un ampèremètre (classe 0,5, calibre 150 mA, cadran 150 divisions) et d'un ampèremètre (classe 1, calibre 100 mA, cadran 100 divisions). Lequel faut-il utiliser si on apprécie $\frac{1}{2}$ division.

Exercice 04:

On considère le circuit suivant :



- 1- Calculer les valeurs moyenne et efficace (V_{moy} et V_{eff}) de ce signal.
- 2- On mesure ce signal par un voltmètre de type magnétoélectrique. Donner l'indication de l'appareil.
- 3- On mesure ce signal par un appareil ferromagnétique. Quel est l'indication de l'appareil.

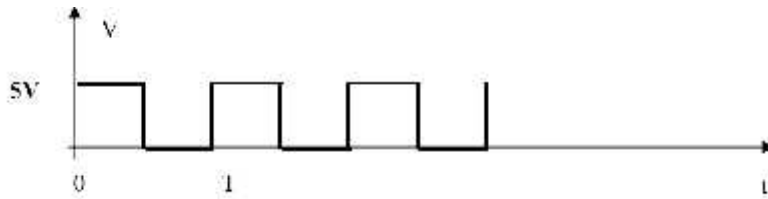
Exercice 05:

Soit une tension $v(t) = 5 + 6 \sin(\omega t)$

On veut mesurer cette tension avec trois types de voltmètres : magnétoélectrique, électronique et un voltmètre numérique TRMS. Quelle est l'indication de chacun de ces voltmètres.

Exercice 06:

Soit le signal électrique donné par la figure suivante :



Préciser dans le tableau suivant l'indication de chaque appareil de mesure.

				Voltmètre TRMS (AC)
V_{moy}				
V_{eff}				

Exercice 07:

On dispose d'un équipement à cadre mobile (1 mA, 100 Ω) et on veut réaliser un voltmètre multi-calibre ayant les calibres suivants : 1 V ; 3 V ; 10 V et 30 V.

- 1- Donner le schéma de principe de ce voltmètre.
- 2- Calculer les résistances additionnelles nécessaires.
- 3- Calculer la résistance interne du voltmètre pour chaque calibre.

Exercice 08:

On dispose d'un équipement à cadre mobile (50 μ A, 5000 Ω) et on veut réaliser un ampèremètre universel ayant les calibres suivants : 10 mA ; 30 mA et 100 mA.

Déterminer les résistances shunts.

Exercice 09:

On désire mesurer une résistance de valeur approximative 100 Ω en utilisant un ampèremètre (1A, 0,5 Ω) et un voltmètre (100 V, 10000 Ω). Les 2 appareils sont de classe 1.

- 1) Quel est le meilleur montage à utiliser (amont ou aval).
- 2) Dans le montage précédent on obtient les lectures suivantes: $I = 0.32$ A et $U = 45.5$ V.
En déduire la valeur de la résistance et l'erreur de mesure.

Exercice 10 :

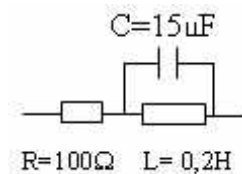
On dispose de 2 résistances $R_1 = 1 \text{ K}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ K}\Omega$, d'une résistance R et d'une capacité C variables, d'une source (10 V, 1 KHz) et d'un détecteur de zéro. On désire mesurer une inductance (L_x, r_x).

- 1) Quelles sont toutes les méthodes susceptibles d'être utilisées.
- 2) Lorsqu'on utilise le pont à résonance, trouver les formules donnant L_x et r_x .
- 3) Calculer L_x et r_x si à l'équilibre $R = 800 \Omega$ et $C = 0,8 \mu\text{F}$
- 4) Calculer l'incertitude relative sur L_x et r_x si les précisions sont : 0,2 % sur R_1, R_2 et R , 2 % sur C et 1 % sur f .
- 5) Calculer le coefficient de qualité de L_x . Comment le mesurer.

Exercice 11:

On considère la charge ci-contre :

- 1) Calculer son impédance $Z = R + j X$ à 50 Hz.
- 2) Quelles sont les méthodes qu'on peut utiliser pour la mesurer.
- 3) Pour quelles fréquences se comporte-t-elle comme une résistance
- 4) Pour quelles fréquences peut-on utiliser le pont de Maxwell pour la mesurer ?



- 5) On l'alimente par une tension continue de 60 V.
 - a) Calculer la puissance ($P=UI$) mesurée par un wattmètre de classe 0,5, de bobine tension ($200 \Omega/\text{V}$, 100 mH) et de calibres 5A, 60 V et 120 V. (indiquer le calibre approprié)
 - b) Calculer l'erreur relative de classe et de montage.
- 6) On l'alimente par une tension alternative d'amplitude 71 V et de fréquence 50 Hz.
Calculer la puissance mesurée par le wattmètre précédent.

Solutions

Exercice 01 :

$$U = (120 \pm 2) \text{ [V]} \text{ et } I = 24,2\text{A} \pm 1,65\%, P = U \cdot I$$

1) Calculer l'incertitude absolue sur la puissance P

$$\Delta P = I \cdot \Delta U + U \cdot \Delta I \Rightarrow \Delta P = I \cdot \Delta U + U \cdot I$$

$$\Rightarrow P = (24,2)(2) + (120)(24,2)(0,0165)$$

$$\Rightarrow P = 96,316 \text{ W}$$

2) Calculer l'erreur relative

$$\text{on a : } \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{2}{120} + 0,0165 = 3,31\%$$

$$3) P = (2904 \pm 96,316) \text{ W} ; P = (2904\text{W} \pm 3,31\%)$$

Exercice 02 :

On calcul l'erreur absolue :

$$\Delta x = \pm \left(\frac{1 \cdot 100 \text{ mV}}{100} + 2 \cdot 1 \text{ mV} \right) \Rightarrow \Delta x = \pm 3 \text{ mV}$$

La plage de la valeur réelle de la tension est :

$$97 \text{ mV } V_{\text{réel}} \quad 103 \text{ mV}$$

Exercice 03 :

On calcule les erreurs de classe et d'appréciation et on compare les erreurs totales

$$I = 70 \text{ mA, appréciation } 0,5$$

$$\text{L'erreur de classe : } \Delta I_c = \frac{\text{classe} \times \text{calibre}}{100}$$

$$\text{Et l'erreur de lecture : } \Delta I_l = \frac{\text{appréciation} \times \text{calibre}}{\text{nombre de division}}$$

- Ampèremètre 1

$$\Delta I_{tot1} = \Delta I_c + \Delta I_l = \frac{0.5 \times 150}{100} + \frac{0.5 \times 150}{150} = 1.25 \text{ mA} \Rightarrow \frac{\Delta I_{tot1}}{I} = 1.78\%$$

- Ampèremètre 2

$$\Delta I_{tot2} = \Delta I_c + \Delta I_l = \frac{1 \times 100}{100} + \frac{0.5 \times 100}{100} = 1.5 \text{ mA} \Rightarrow \frac{\Delta I_{tot2}}{I} = 2.14\%$$

$I_{tot1} < I_{tot2}$, donc il faut utiliser le premier ampèremètre.

Exercice 04 :

1- Valeurs moyenne V_{moy} et valeur efficace V_{eff}

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt$$

- $U_{moy} = 0$ (signal alternatif)

$$V_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt$$

$$- U_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U_1^2(t) dt \Rightarrow U_{eff} = V_m / \sqrt{3} = 15 / \sqrt{3} = 8.66 \text{ V}$$

2- Le résultat de mesure avec le voltmètre magnétoélectrique

Mesure la valeur moyenne : $U_{moy} = 0 \text{ V}$

3- Le résultat de mesure avec le voltmètre ferromagnétique

Mesure la valeur efficace : $U_{eff} = 8.66 \text{ V}$

Exercice 05 :

$$v(t) = 5 + 6 \sin(\omega t) \text{ V}$$

Voltmètre magnétoélectrique : mesure la valeur moyenne.

$$V_{moy} = 5 \text{ V}$$

Voltmètre électronique : mesure seulement en AC.

$$V = V_{moyred} \times 1.11 = V_{eff} \text{ (signal sinusoïdal)}$$

$$V_{eff} = \frac{6}{\sqrt{2}} = 4.24 \text{ V}$$

Voltmètre numérique TRMS : mesure la valeur efficace vraie de $v(t)$.

$$V_{eff} = \sqrt{\left(5^2 + \frac{6^2}{2}\right)} = 6.56 \text{ V}$$

Exercice 06 :

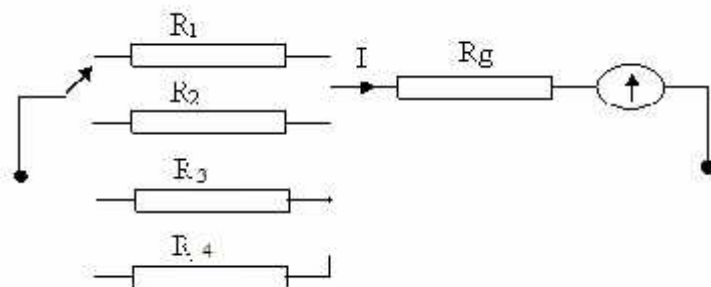
					Voimètre TRMS (AC)
V_{moy}	V	2.78	2.5		-
V_{eff}	V	-	-	3.53	3.53

Exercice 07 :

$I_{c\max} = 1 \text{ mA}$, $R_c = 100 \Omega$

1- Schéma de principe de ce voltmètre :

(1 V ; 3 V ; 10 V et 30 V)



2- Calculer les résistances additionnelles nécessaires : (1 V ; 3 V ; 10 V et 30 V)

$$\text{On a : } R_{ad} = \frac{U_{cal}}{I_{c\max}} - R_c$$

$$R_{ad1} = 900 \quad , \quad R_{ad2} = 2,9k \quad , \quad R_{ad3} = 9,9k \quad , \quad R_{ad4} = 29,9k$$

3- Calculer la résistance interne du voltmètre pour chaque calibre

$$R_{int} = R_{ad} + R_c$$

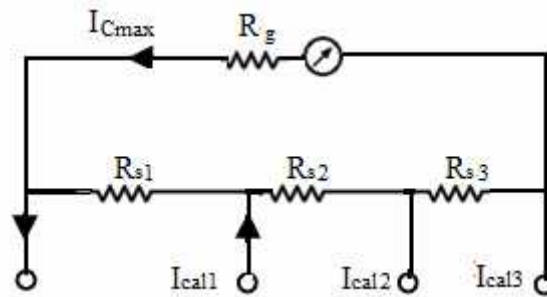
$$R_{int1} = 1k \quad , \quad R_{int2} = 3k \quad , \quad R_{int3} = 10k \quad , \quad R_{int4} = 30k$$

Exercice 08:

Equipage à cadre mobile ($50 \mu\text{A}$, 50Ω)

réaliser un ampèremètre universel ayant les calibres suivants : 100 mA V ; 30 mA et 10 mA.

Détermination des résistances shunt.



On détermine les facteur multiplicatif m_i

Pour le calibre 1, on a :

$$(R_g + R_{S2} + R_{S3}) \cdot I_{Cmax} = I_S \cdot R_{S1} = (I_{cal1} - I_{Cmax}) \cdot R_{S1}$$

$$\Rightarrow (R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) \cdot I_{Cmax} = I_{cal1} \cdot R_{S1}$$

$$\text{Soit } m_1 = \frac{I_{cal1}}{I_{Cmax}}$$

$$\Rightarrow (R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = m_1 \cdot R_{S1} \Rightarrow (R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = \frac{100}{50 \cdot 10^{-3}} \cdot R_{S1}$$

$$\Rightarrow (R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = 2000 R_{S1}$$

De la même manière on trouve m_2 et m_3 :

$$m_2 = \frac{I_{cal2}}{I_{Cmax}}$$

$$(R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = m_2 \cdot (R_{S1} + R_{S2}) \Rightarrow (R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = 600(R_{S1} + R_{S2})$$

$$m_3 = \frac{I_{cal3}}{I_{Cmax}}$$

$$(R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = m_3 \cdot (R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) \Rightarrow (R_g + R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = 200 \cdot (R_{S1} + R_{S2} + R_{S3})$$

On calcule les rapports :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{(R_{S1} + R_{S2})}{R_{S1}} \Rightarrow \frac{(R_{S1} + R_{S2})}{R_{S1}} = \frac{2000}{600} \Rightarrow (R_{S1} + R_{S2}) = \frac{10}{3} R_{S1} \Rightarrow R_{S2} = \frac{7}{3} R_{S1}$$

$$\frac{m_2}{m_3} = \frac{(R_{S1} + R_{S2} + R_{S3})}{(R_{S1} + R_{S2})} \Rightarrow \frac{(R_{S1} + R_{S2} + R_{S3})}{(R_{S1} + R_{S2})} = \frac{600}{200} \Rightarrow (R_{S1} + R_{S2} + R_{S3}) = 3(R_{S1} + R_{S2})$$

$$\Rightarrow R_{S3} = 2(R_{S1} + R_{S2}) \Rightarrow R_{S3} = 2\left(R_{S1} + \frac{7}{3}R_{S1}\right) \Rightarrow R_{S3} = \frac{20}{3}R_{S1}$$

On a :

$$\left(R_g + R_{S1} + \frac{7}{3}R_{S1} + \frac{20}{3}R_{S1}\right) = m_1 R_{S1} \Rightarrow R_{S1} = \frac{R_g}{m_1 - 10}$$

$$\Rightarrow R_{S1} = \frac{50}{2000 - 10} = 0.025\Omega$$

$$\Rightarrow R_{S2} = \frac{7}{3} \times 0.025\Omega = 0.058\Omega$$

$$\Rightarrow R_{S3} = \frac{20}{3} \times 0.025\Omega = 0.166\Omega$$

Exercice 09 :

$R_X = 100 \Omega$, ampèremètre (1A, 0.5Ω), voltmètre (100 V, 10000Ω). Les 2 appareils sont de classe 1.

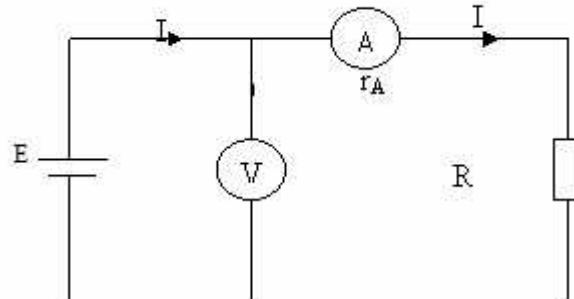
1) Le meilleur montage à utiliser (amont ou aval)

$$r_a \times R_v = 0,5 \times 10000 = 5000\Omega$$

$$\sqrt{r_a \times R_v} = \sqrt{5000} = 70,71\Omega$$

$$R_X > \sqrt{r_a \times R_v} \Rightarrow \text{Donc le meilleur}$$

montage est le montage amont



2) Déduire la valeur de la résistance et l'erreur de mesure.

$$I = 0.32 \text{ A et } U = 45.5 \text{ V}$$

$$R = \frac{U}{I} \Rightarrow R = \frac{45,5}{0.32} = 142,187\Omega$$

Puisque l'appréciation n'est pas donnée donc on calcule seulement l'erreur de classe et celle de montage.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta U}{U} \Big|_c + \frac{\Delta I}{I} \Big|_c + \frac{\Delta R}{R} \Big|_{montage}$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{montage} = \frac{r_a}{R} \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{1 \times 100}{100 \times 45,5} + \frac{1 \times 1}{100 \times 0,32} + \frac{0,5}{142,187}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = 5,67\%$$

Si on prend une appréciation de 1/4 de division on trouve :

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_I = \left. \frac{\Delta U}{U} \right|_I + \left. \frac{\Delta I}{I} \right|_I \Rightarrow \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_I = \frac{0,25 \times 100}{100 \times 45,5} + \frac{0,25 \times 1}{100 \times 0,32} = 1,33\%$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = 5,67\% + 1,33\% = 7\%$$

Exercice 10 :

$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $f = 1 \text{ kHz}$

1) Méthodes utilisées pour mesurer une impédance inductive sont : méthode de résonance, ponts de Maxwell, Hay et résonance. (Pont à résonance est utilisé pour mesurer des impédances inductives à hautes fréquence).

2) Pont à résonance à l'équilibre : $r_x = R_1 R / R_2$ et $L_x = 1 / C$ ²

3) Calculer L_x et r_x si à l'équilibre $R = 800 \Omega$ et $C = 0,8 \mu\text{F}$

$$r_x = \frac{10^3 \times 800}{10^4} \Rightarrow r_x = 80 \Omega \quad \text{et} \quad L_x = \frac{1}{0,8 \cdot 10^{-6} (2\pi f)^2} \Rightarrow L_x = 31,25 \text{ mH}$$

4) Calculer l'incertitude relative sur L_x et r_x

$$\frac{\Delta r_x}{r_x} = \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \Rightarrow \frac{\Delta r_x}{r_x} = 3 \times 0,2\% \Rightarrow \frac{\Delta r_x}{r_x} = 0,6\%$$

$$\frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{\Delta C}{C} + 2 \frac{\Delta f}{f} \Rightarrow \frac{\Delta L_x}{L_x} = 2\% + 2 \times 1\% \Rightarrow \frac{\Delta L_x}{L_x} = 4\%$$

5) Le coefficient de qualité de L_x : $\{x = \frac{L_x \check{S}}{r_x}$

$$\{x = \frac{(31,25 \cdot 10^{-3})(2\pi \cdot 10^3)}{80} \Rightarrow \{x = 2,45$$

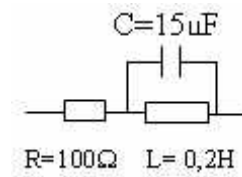
Pour le mesurer on peut utiliser la méthode de résonance. Si l'indicateur de zéro est un

voltmètre on le branche aux bornes de C et on déduit : $\{x = \frac{U_C}{U_e} = \frac{U_C}{10}$

Exercice 11 :

1) Calculer son impédance $Z = R + j X$ à 50 Hz.

$$Z = 100 + j \frac{L\omega}{1 - LC\omega^2} \Rightarrow Z = 100 + j89$$



2) La partie imaginaire de Z est positive ($X > 0$) donc cette impédance est inductive. Les méthodes qu'on peut utiliser pour la mesurer sont : méthode de résonance, ponts de Maxwell, Hay et résonance.

3) Z se comporte comme une résistance si $X = 0$ soit $\omega = 0$ (continu) ou $\omega = \omega_0$ (HF)

4) On utilise le pont de Maxwell si $X > 0$: $\omega > 0$ et $1 - LC\omega^2 > 0$ se qui donne :

$$0 < \omega < \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow 0 < \omega < 578 \text{ rad/s} \Leftrightarrow 0 < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow 0 < f < 92 \text{ Hz}$$

5) On l'alimente par une tension continue de 60 V.

a) En DC $Z = R = 100$

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R}$$

$$\Rightarrow P = 36 \text{ W}$$

Wattmètre de classe 0,5, de bobine tension (200 Ω/V , 100 mH) et de calibres 5A, 60 V et 120 V.

Calibre 1: $5A \times 60V = 300W$ et Calibre 2: $5A \times 120V = 600W$

Le calibre approprié est 300W.

b) Calculer l'erreur relative de classe et de montage.

Comme on a la résistance de la bobine tension, on utilise le wattmètre en montage aval.

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta P}{P} \Big|_c + \frac{R}{R_v}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{0,5 \times 300}{100 \times 36} + \frac{100}{200 \times 60} = 5\%$$

6) On l'alimente par une tension alternative d'amplitude 71 V et de fréquence 50 Hz.

$$U = U_{\max} / \sqrt{2} = 71 / \sqrt{2} = 50,2 \text{ V}$$

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{50.2}{\sqrt{100^2 + 89^2}} \Rightarrow I = 0.375 \text{ A}$$

$$\varphi = \arctg(89/100) \Rightarrow \cos \varphi = 0.74$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \Rightarrow P = 13.36 \text{ W}$$

Bibliographies

- [1] J. Libois, «Guide des unités de mesure. Un mémento pour l'étudiant», Sciences et Méthodes, De Boeck, 2^{ème} Edition, 1999. ISBN-10 : 2804120554, ISBN-13 : 978-2804120559.
- [2] P. A. Paratte, P. Robert, «Traité d'Electricité - Systèmes de mesure», TE volume XVII, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, Edition 2016.
- [3] S. Tumanski, «Principles of electrical measurement», CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006, ISBN : 0-7503-1038-3.
- [4] John P. Bentley, « Principles of measurement systems», Pearson Education, 4^{ème} Edition, 2005, ISBN : 0 130 43028 5.
- [5] J. C. Taylor, « Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques », Dunod, 2000, EAN13: 9782100043071, ISBN1: 978-2-10-004307-1.
- [6] Alan S. Morris, « Measurement and Instrumentation Principles », Butterworth-Heinemann, 3^{ème} Edition, 2001, ISBN : 0750650818.
- [7] G. Chateigner, D. Bouix, M. Boès, J. Vaillant, D. Verkindère, «Manuel de génie électrique - Rappels de cours, méthodes, exemples et exercices corrigés», Dunod, Paris, 2006, ISBN : 978-2-10-048499-7.
- [8] F. Coulon, M. Jufer, « L'introduction à l'électrotechnique », Lausanne : P.P.U.R, Traité des matériaux, num. 1, 8^{ème} édition, 2001, ISBN/ISSN/EAN : 978-2-88074-041-2.
- [9] A. Elenkov, cours mesures électriques, Université Technique, Sofia (lien: https://ff.tu-sofia.bg/courses/Elenkov_Coourse_ME_V.pdf#)
- [10] M. BOUKEZZATA, "Méthode et techniques de mesures électriques", Edition Office des publications universitaires, 3^{ème} Édition, 2003, I.S.B.N: 9961.0.0611.9.
- [11] R. CHARBONNIER, "Fréquences et intervalles de temps", Techniques de l'Ingénieur, R 1050.

Liens

<https://www.yamcu Electrotechnique 12/ Editions de la Dunanche / 2000>

<https://www.lelectronique.com/dossier/loscilloscope-14.html>

<http://www.eleccc.free.fr>

<http://www.technique-ingenieur.fr/fr/dossier/appareilsdemesure>

<http://portelatine.chez-alice.fr/electronique/montages/freq/freq.html>

http://meteosat.pessac.free.fr/Cd_elect/perso.wanadoo.fr/f6crp/elec/metrolog/fm.htm

https://www.electronique-et-informatique.fr/Digit/Pratique/Digit_13PS2.php

<https://www.technologuepro.com>

<https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/le-transistor-bipolaire-test-au-multimetre>

<https://www.actutem.com/comment-fonctionne-le-systeme-de-declenchement-numerique-dun-oscilloscope/>