République Tunisienne
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

ISET Nabeul

Département Génie Electrique

SUPPORT DE COURS DE MESURE ELECTRIQUE

Réalisé par :

KHATERCHI Hechmi

Agrégé en Génie Electrique et Technologue à l' ISET de Nabeul

Année Universitaire : 2007 - 2008

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

TABLE DE MATIERE

1 LES GRANDEURS ELECTRIQUES ET UNITES DE MESURE..... 3

2 GENERALITES SUR LESAPPREILS DE MESURE.....6

3 LES APPREILS A DEVIATION EN COURANT CONTINU 11

4 LES APPREILS DE MESURE EN COURANT ALTERNATIF 17

5 UTILISATION DU MULTIMETRE NUMERIQUE 23

6 LES METHODES DE MESURE 26

7 MESURE DES TENSIONS ET DES COURANTS 30

8 MESURES CHRONOMETRIQUES 35

9 MESURE DE LA PUISSANCE.....40

10 MESURE DES RESISTANCES.....48

11 LES ERREURS DE MESURE.....57

Exercices d'application.....63

Annexes.....70

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

LES GRANDEURS ELECTRIQUES ET UNITES DE MESURE

I- GENERALITES :

La mesure joue un rôle de plus en plus important 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 ;
- 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 :

- Le voltmètre (analogique et numérique) pour mesurer des tensions ;
- L'ampèremètre, pour mesurer des intensités ;
- Le wattmètre pour mesurer des puissances ;
- L'ohmmètre pour mesurer des résistances etc…

Le voltmètre, ampèremètre et ohmmètre sont souvent regroupés en un seul appareil qui s'appelle **multimètre**.

Le multimètre possède, en outre, dans la plus part des cas, un testeur de composants (diodes et transistors). Certains modèles sont dotés d'un capacimètre (pour mesurer des capacités), d'un fréquencemètre, etc…

Compte tenu des difficultés spécifiques soulevées par la mesure de l'intensité é dans un circuit, dés que l'ampérage dépasse quelques dizaines d'ampères, on utilise la **pince amperemetrique.**

Parmi les autres appareils de mesure couramment utilisés par l'électricien ou électronicien, on doit mentionner l'**oscilloscope**, qui permet de visualiser la forme d'une onde et d'obtenir de nombreux renseignements (amplitude, période,etc…).

II- POURQUOI MESURER ?

La mesure reste bien souvent, le seul moyen de vérifier le fonctionnement ou les performances d'un procédé industriel, grâce à des appareils de mesure très performants.

Il faut savoir que les laboratoires disposent maintenant d'appareils extrêmement sophistiqués, pilotés par ordinateurs. Par exemple on peut mesurer simultanément plusieurs paramètres d'un véhicule en marche à l'aide d'une unité d'acquisition reliée à un ordinateur.

III- LES GRANDEURS ELECTRIQUES ET LEURS UNITES.

Les principales grandeurs électriques qu'un électrotechnicien est amené à mesurer sont les suivants :

- La tension, ou ddp entre deux points ;
- L'intensité d'un courant dans une branche ;

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

- La résistance d'un récepteur ;
- La capacité d'un condensateur ;
- La puissance dissipée dans un circuit ;
- La fréquence et la période d'un signal.

Les grandeurs et unités de base dans le système international sont donnés par le tableau suivant (voir tableau 1).

Grandeur	**Symbole**	**Unité**	**Symbole**	**Appareil de mesure**
Tension	U	Volt	V	Voltmètre
Intensité	I	Ampère	A	Ampèremètre
Puissance	P	Watt	W	Wattmètre
Résistance	R	Ohm	Ω	Ohmmètre
Capacité	C	Farad	F	Capacimètre
Inductance	L	Henry	H	Henry mètre
Période	T	seconde	S	périodemètre
Fréquence	f	Hertz	Hz	fréquencemètre
Température	T	Degrés celsius	°C	Thermomètre
Pression	P	Pascal	Pa (ou bar)	Baromètre
Chaleur	Q	Calorie	Cal	Calorimètre
Eclairement	E	Luxe	Lux	luxmètre
Intensité lumineuse	I	Candela	Cd	Candelamètre

Tableau 1 : Grandeurs et unités de base

Les différentes unités peuvent être subdivisées en multiples et sous multiples (voir tableau 2).

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}

Tableau 2: multiples et sous multiples des unités

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Grandeurs	Unités traditionnelles	Unités légales
Force	1 Kgf 0.102 Kgf	9.8 N 1 N
Pression	1 Kgf/m^2 0.102 Kgf/m^2 1 Kgf/cm^2 1.02 Kgf/cm^2 1 mCE 1 mmCE 10.2 mCE 10.2 mmCE	9.8 Pa 1 Pa 0.98 bar = 98060 Pa 1 bar 0.098 bar = 9806 Pa 0.098 mbar = 9.8 Pa 1 bar 1 mbar
Energie	1 Kgm 0.102 Kgm 1 Kcal 0.2389 Kcal 1 Kcal 0.860 Kcal 860 Kcal	9.8 J 1 J 4.1855 KJ 1 KJ 1.163 Wh 1 Wh 1 KWh
Puissance	1 Kgm/s 0.102 Kgm/s 1 Kcal/h 0.860 Kcal/h 860 Kcal/h	9.8 W 1 W 1.163 W 1 W 1 KW

Tableau 3 : Equivalences des unités traditionnelles et les unités légales

Grandeurs	Unités françaises	Unités anglo-saxonnes
Logeur	1 mm 25.4 mm	0.0394 pouce 1 pouce
Volume	1 dm^3 3.79 dm^3	0.264 gallon 1 gallon
Pression	1 g/cm^2 70.3 g/cm^2 1 Pa 6889 Pa 1 bar 0.0689 bar	0.0142 p.s.i 1 p.s.i 1.45 x 10^{-4} p.s.i 1 p.s.i 14.5 p.s.i 1 p.s.i
Température	Température celsius tc tc = (tf – 32) / 1.8	Température Fahrenheit tf tf = 1.8 tc + 32
Chaleur	1 KJ 1.0548 KJ 1 KWh 0.7457 KWh	0.948 BTU 1 BTU 1.341 HPH 1 HPH
Puissance	1 KW 0.7457 KW	1.341 HP 1 HP

Tableau 4 : Equivalence des unités anglo-saxonnes

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

GENERALITES SUR LES APPAREILS DE MESURE

I- LES APPAREILS DE MESURE ANALOGIQUES:

Un appareil de mesure comprend généralement un ou plusieurs inducteurs fixes (aimant permanant ou électroaimant) agissant sur un équipage à cadre mobile autour d'un axe fixe.

I-1- Classifications des appareils à déviation :

La classifcation usuelle des appareils à déviation utilise la nature du phénomène physique qui régit le fonctionnement de l'appareil. On distingue plusieurs types d'appareils, dont les principaux types sont :

* Appareil magnéto électrique () :

L'inducteur fixe est un aimant fixe en forme de U, la déviation de l'aiguille est proportionnelle au courant maoyen dui traverse une bobine placé à l'interieur du champ magnétique crée par l'aimant fixe.

* Appareils ferromagnétiques () :

Le principe de fonctionnement d'un appareil ferromagnétique est basé sur l'action d'un champ créer par un circuit parcoru par un courant sur une ou plusieurs pièces de fer doux et dont certaines sont mobiles. On distingue deux types d'appareils : à **attraction** ou à **répulsion**.

Pour le type d'appareil à attraction, le principe utilisé est l'action magnétique priduite par une bobine fixe traversée par un courant sur une palette en fer doux (organe mobile) montée sur deux pivots. Cet équipage mobile est muni d'une aiguille et d'un dispositif d'amrotissement .

Pour le type d'appareil à répulsion, le champ magnétique céer par la bobine fixe agit sur deux palettes placées dans ce champ qui subissent une aimantation de même sens. La répulsion des deux palettes fait dévier l'aiguille.

Un appareil ferromagnétique est très simple à construire, robuste, utilisable en courant continu et en alternatif. La graduation de son échelle est non linéaire.

* Appareils électrodynamiques () :

Un appareil électrodynamique est formé principalement par un circuit fixe (généralement deux demi bobines) créant un champ magnétique à l'interieur du quel se déplace un cadre mobile de faible inertie monté sur deux pivots et entrainant une aiguille.

Les appareils électrodynamiques sont non polarisés. Ils sont utilisables en courant continu et en courant alternatif. Ils sont généralement utilisable pour la fabrication des wattmètres.

* Appareils électrostatiques () :

Ce type d'appareils est caractérisé par une force exercée par l'armature fixe d'un condensateur sur son armature mobile. Ce type d'appareils est toujours utilisée en voltmètre. Lorsqu'on applique une tension entre les deux plaques de cet appareil, l'une se

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

charge positivement et l'autre négativement, ce qui produit une force d'attraction qui tend à faire torner la plaque mobile qui est solidaire d'une aiguille. Ils sont utilisables en courant continu et en courant alternatif et possèdent une échelle non linéaire.

* Appareils thermiques () :

Le principe de fonctionnement de ce type d'appareils est basé sur la dilatation d'un fil conducteur qui s'échauffe lors du passage d'un courant électrique d'intensité I. Cet effet est la conséquence directe de la puissance dissipée par effet joule dans le fil à dilatation. Le fil à dilatation utilisée est généralement en bronze ou un alliage platine et argent.

Le appareils thermiques sont non polarisés, utilisable en courant continu et en courant alternatif.

I-2- Symboles portés sur les cadrants des appareils de mesure nanlogiques :

Sur le cadrant d'un appreil de mesure analogique, le constructeur indique souvent , le type d'appareil, la nature du courant, la tension d 'epreuve dielctrique, la position de lecture, la classe de précision, la sensiblilté etc…

Dans le tableau 5, on résume les principax symboles trouvés pour la plus part des appareils :

Symbole	Signification
--- ~ ≂	***Nature du courant :*** Courant continu Courant alternatif Courant continu et alternatif
 	***Tension d'isolement*** entre les deux bornes de l'appareil est 2 KV ***Tension d'isolement*** entre les deux bornes de l'appareil est 500 V
  	***Position de lecture :*** Verticale Horizontale Inclinée

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

20 Hz …. 500 Khz	***Bande de fréquence*** dans la quelle L'appareil peut fonctionner correctement
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
2	***Classe de précision*** de l'appareil est de 2% du calibre

Tableau 5 : Principaux symboles portés sur le cadrant d'un appareil de mesure analogique

I-3- Sécurité des appareils de mesure :

Les appareils de mesure doivent être conformes aux normes de sécurité qui leur sont applicables et doivent porter le marquage **CE** qui atteste la conformité à la directive **CEM** et à la directive basse tension. Le marquage de l'appareil doit comporter :

- la valeur assignée de la tension phase - neutre,
- la catégorie d'installation,
- le degré de pollution.

CEM : signifie compatibilité électromagnétique.

Exemple :

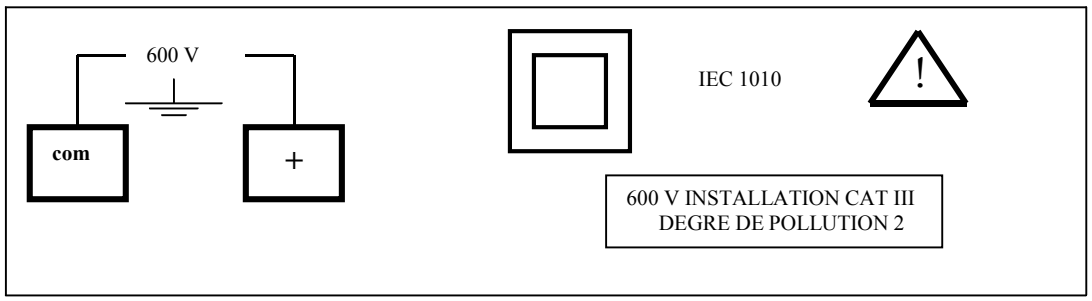


Figure 1 : faces avant et arrière d'un multimètre (d'après Chauvin Arnoux)

L'appareil de l'exemple précédent est conforme à la norme IEC 1010 avec :

- double isolation ⧈ ,
- degré de pollution 2,
- tension phase - terre 600 V.

II- LES APPAREILS DE MESURE NUMERIQUES:

II-1- Schéma synoptique d'un appareil de mesure numérique :

Le schéma synoptique général d'un appareil de mesure numérique est donnée par le schéma fonctionnel suivant :

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

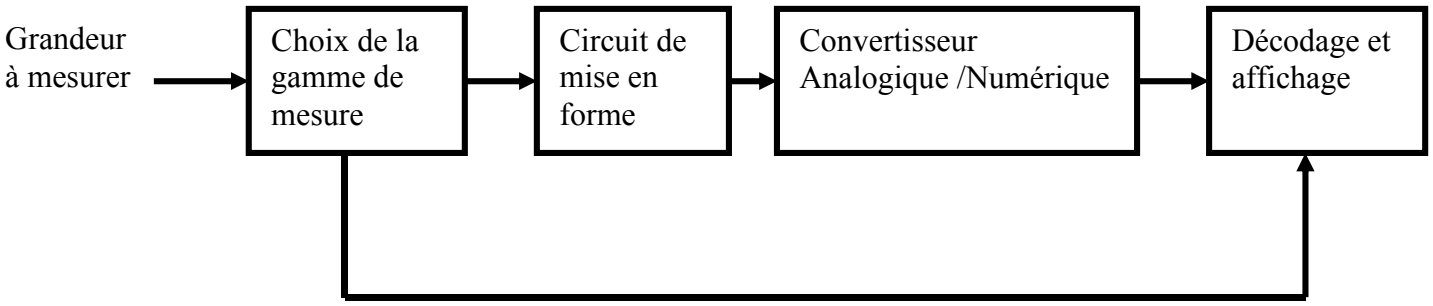


Figure 2 : Schéma synoptique d'un appareil numérique

II-2- Vocabulaire propre aux techniques numériques :

Les appareils de mesure numériques sont de plus en plus utilisés du fait de leur fiabilité, leur précision, leur robustesse et leur facilité de lecture. Ils sont aussi de moins en moins onéreux et deviennent même compétitifs avec les appareils analogiques de bas de gamme. Les principaux définitions utilisées par les constructeurs des appareils numériques sont :

- *Information* : Ce terme désigne la donnée physique à l'entrée de l'appareil
- *Signal* : C'est la grandeur électrique (courant ou tension) image de l'information.
- *Capteur* : C'est le dispositif qui saisit l'information et la transforme en un signal exploitable par l'appareil de mesure. (exemple : le microphone est un capteur qui transforme le son en un signal électrique)
- *Nombre de points* : (N) Il correspond au nombre de valeurs différentes que peut afficher l'appareil dans une gamme de mesure (exemple : pour un appareil à 4 afficheurs, le nombre de points de mesure est $N = 10^4$).
- *Pas de quantification* : (q) la plus petite valeur différente de 0 dans la gamme de mesure (exemple : pour un appareil de mesure à 4 afficheurs, utilisé dans la gamme de 10 V, le pas de quantification est $q = 10/N = 1$ mV).
- *Digit* : Désigne le dispositif qui affiche tous les chiffres de 0 à 9 de même poids dans un nombre.

II-3- Vocabulaire propre aux techniques numériques :

- *Résolution* : C'est la valeur du pas de quantification dans la gamme. Elle cprrespond à la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme. Résolution = gamme de mesure / nombre de points N. (Exemple : la résolution d'un appareil de 100000 points dans la gamme de 1 V est égale à 10 µV.
- *Précision* : La précision d'un appareil dépend de la résolution de l'appareil, de la qualité des composants, la précision des références de tension et de temps etc… La précision d'un appareil numérique est généralement donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme. Cette précision peut être très grande pour certains appareils (exemple 0.0005% pour le modèle 7075 d'Enertec Schlumberger pour la gamme de 10 V). Les appareils portatifs courants ont des précisions variant de 0.1% à 1% de la lecture suivant la gamme et la grandeur mesurée, et dans la plus part des cas à une ou deux unités (ou digits) prés. (Exemple : gamme 2 V ; Résolution 1 mV ; précision ± 0.1% + 2 dgt ; lecture 1V. La précision de cette mesure sera ± 0.1%*1V + 2*1mV = 3 mV).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

- *Cadence de lecture* : Elle indique le nombre de mesures qu'effectue l'appareil en une seconde.
- *Réjection des interférences* : Elle caractérise l'affaiblissement par l'appareil des signaux parasites issus du secteur. Ils fausseraient la mesure s'ils n'étaient pas filtrés.

III- COMPARAISON ENTRE LES APPAREILS NUMERIQUES ET ANALOGIQUES:

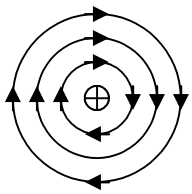
Les appareils numériques sont de plus en plus utilisés. Ils ne faut pas s'imaginer que les appareils analogiques vont disparaître complètement. Dans la pratique, le technicien aura à sa disposition durant plusieurs annaées les deux types d'appareils. En général leur coût est moins élevé que celui de leurs homologues numériques. Enfin un certains nombre d'utilisateurs préfèrent l'affichage par aiguille que par valeur numérique.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

LES APPAREILS A DEVIATION EN COURANT CONTINU (LES APPREILS MAGNETOELECTRIQUES)

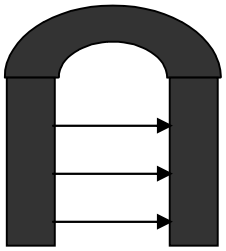
I- PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

Le principe de fonctionnement d'un appareil magnéto-électrique est basé sur les forces agissant sur un conducteur porteur de courant et placé dans un champ magnétique B uniforme.



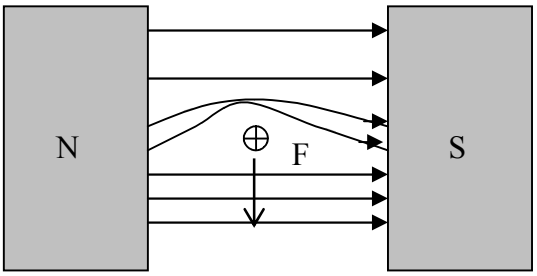
Un conducteur parcoru par un courant I, cré autour de lui un champ magnétique dont les lignes sont circulaires et concentriques.

Figure 3 : lignes de champ crées par un conducteur parcouru par un courant rentrant



Champ magnétique uniforme créer par un aimant en U. Les lignes de champ sont rectilignes et dirigés du pole nord vers le pole sud.

Figure 4 : lignes de champ magnétique crées par un aimant en forme de U.



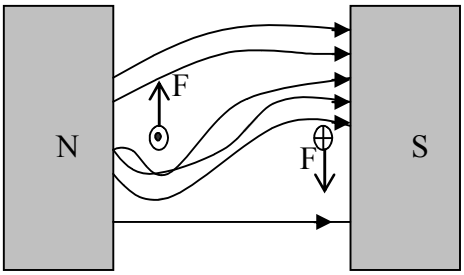
Superposition du champ magnétique du conducteur avec celui de l'aimant :

- Au dessus du conducteur, les lignes de champ ont la même direction, et par conséquent la densité du flux augumente.
- Au dessous du conducteur, les lignes de champ sont oposées, et par conséquent la densité du flux diminue.

Figure 5 : Force agissant sur un conducteur porteur de courant dans un champ magnétique uniforme B

Le fil conducteur, porteur de courant I, qui est placé dans un champ magnétique uniforme est soumis à une force F = B.I.l avec I : Intensité du courant dans le fil conducteur.[A]
l : longeur du fil conducteur qui reigne dans le champ magnétique B.[m]
B : Intensité du champ magnétique créer par l'aimant.[T]

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر



Lorsqu'on place deux conducteurs (deux cotés d'une boucle) porteurs d'un même courant, dans un champ magnétique B uniforme , il ya apparition de deux forces directements opposées et distante d'une distance d dont le couple mécanique est

C = F.d = B.I.l.d

Si la boucle comporte N spires, alors **C = N. B.I.l.d**

Figure 6 : couple mécanique généré par un courant électrique

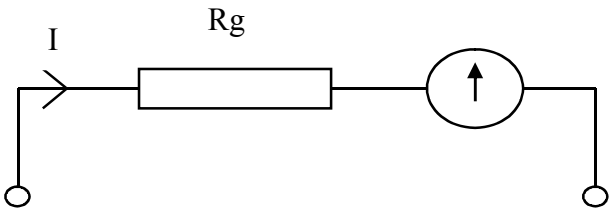
Si on associe à ce dispositif une aiguille , un ressort spiral de rappel et une échelle graduée , on obtient un appareil de mesure élémentaire dont la déviation de l'aiguille est proportionnelle au courant qui traverse la bobine (boucle à N spires) appaelé équipage à cadre mobile (ECM).

II- SCHEMA EQUIVALENT D'UN EQUIPAGE A CADRE MOBILE

Si on note

- Ig : Le courant maximal qui fait dévier l'aiguille de l'ECM à sa pleine échelle.
- Rg : résistance totale de la bobine à N spire .

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



I = Ig si l'aiguille de L'ECM dévie à sa pleine échelle.

Figure 7 : Schéma équivalent d'un ECM

III- CARACTERISTIQUES DES APPREILS MAGNETO-ELECTRIQUES

- Les appreils magnéto-électriques ne sont utilisables qu'en courant continu. En effet, en courant alternatif et pour des fréquences dépassant quelques dizaines de Hz , l'inertie de l'équipage mobile est trop grande pour que celui ci suit les variations du coupe mécanique exercé sur la bobine.
- Les appareils magnéto électriques sont des appareils polarisées.
- Les appareils magnéto électriques ont des graduaions d'échelle libnéaires.
- Le champ magnétique créer par l'aimant permanant est important, ce qui rend l'effet des champs magnétiques externes et negligeables.

IV- UTILISATION DES APPAREILS MAGNETO-ELECTRIQUES

La plus part des appareils magnéto-électriques est utilisés en : Ampèremètres, voltmètres et ohmmètres.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

IV-1- Utilisation en ampèremètres :

L'ECM est un ampèremètre qui mesure des courants inférieurs à Ig. Ce courant Ig est limité par les dimensions de la bobine et du ressort de rappel. Pour obtenir un ampèremètre qui mesure des courants superieurs à Ig, on lui adjoint des résisatnces additionnelles (appelées **shunts**) en parallèle avec l'ECM, qui doivent être précises et assez faibles.

Deux cas de figures sont possibles :

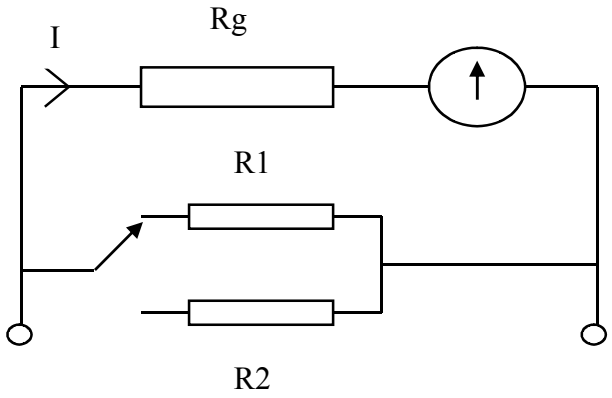


Figure 8 : Schéma de principe d'un **ampèremetre multigamme** à deux calibres.

En écrivant la loi d'ohm entre les deux bornrs de l'appareil pour chaque calibre , on peut calculer les valeurs de R1 et R2. En effet :

$$R1 = Rg.Ig/(I_{cal1} - Ig)$$
$$R2 = Rg.Ig/(I_{cal2} - Ig)$$

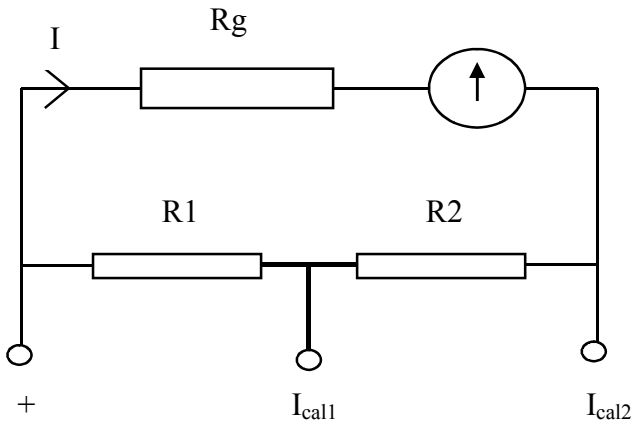


Figure 9 : Schéma de principe d'un **ampèremetre universel** à deux calibres.

Les résistances R1 et R2 sont déterminées en écrivant la loi d'ohm entre les bornes d'utilisation de l'appareil. En effet :

$$(R1 + R2).(I_{cal2} - Ig) = Rg.Ig \quad \text{et} \quad R1.(I_{cal1} - Ig) = (Rg + R2).Ig$$

ce qui donne : $R2 = [\, Rg.Ig.(I_{cal1} - Ig)/(I_{cal2} - Ig) - Rg.Ig \,] / I_{cal1}$.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

$$R1 = [\ Rg.Ig / (\ I_{cal2} - Ig\ ) - R2\ ].$$

La caractéristique principale d'un ampèremètre est la chute de tension que peut introduire dans un circuit. Un ampèremètre est aussi caractérisé par sa résistance interne notée **Ra**.

En pratique on doit choisir un ampèremètre dont sa résistance Ra est beaucoup plus faible que l'impédance du circuit de mesure.

IV-2- Utilisation en voltmètres :

Un ECM seul est un voltmètre qui mesure des tensions inferieurs à Rg.Ig. Pour obtenir un voltmètre qui mesure des tensions superieurs à Rg.Ig, on doit ajouter des résistances additionnelles en série qui doivent être assez grandes, insensibles aux avriations de la température ambiante. Ces résistances sont généralement fabriquées en manganite ou en constantin.

Deux cas de figures sont possibles :

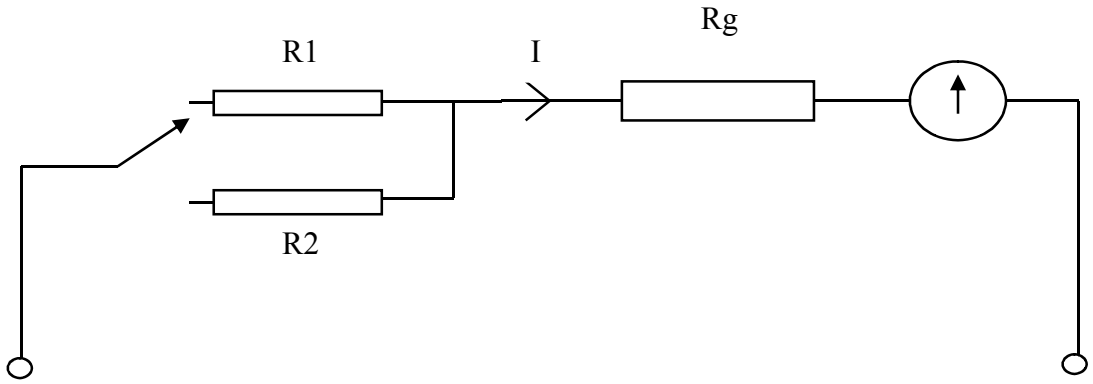


Figure 10 : Schéma de principe d'un **voltmètre multigamme** à deux calibres.

Les résistances R1 et R2 sont déterminées en écrivant la loi d'ohm entre les bornes d'utilisation de l'appareil. En effet :

$$R1 = U_{cal1}/Ig - Rg$$
$$R2 = U_{cal2}/Ig - Rg$$

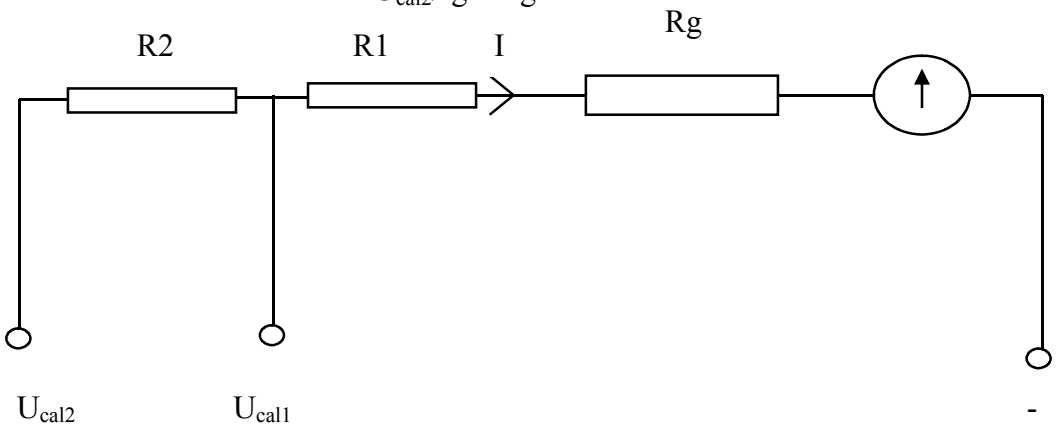


Figure 11 : Schéma de principe d'un **voltmètre universel** à deux calibres.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Les résistances R1 et R2 sont déterminées en écrivant la loi d'ohm entre les bornes d'utilisation de l'appareil. En effet :

$$R1 = U_{cal1}/Ig - Rg$$
$$R2 = U_{cal2}/Ig - (Rg + R1)$$

La caractéristique principale d'un voltmètre est la chute de courant que peut introduire dans un circuit. Un voltmètre est aussi caractérisé par sa résistance interne notée **Rv**.

En pratique, on doit choisir un voltmètre dont sa résistance interne Rv est beaucoup plus élevée que l'impédance du circuit aux bornes du quel il est branché.

IV-3- Utilisation en ohm-mètre :

Un ohm-mètre mesure la résistance d'un circuit ou d'un composant. Le schéma simplifié d'un ohm-mètre est constitué par une pile qui fournit le courant à la résistance à mesurée à travers l'ECM, selon la figure 11.

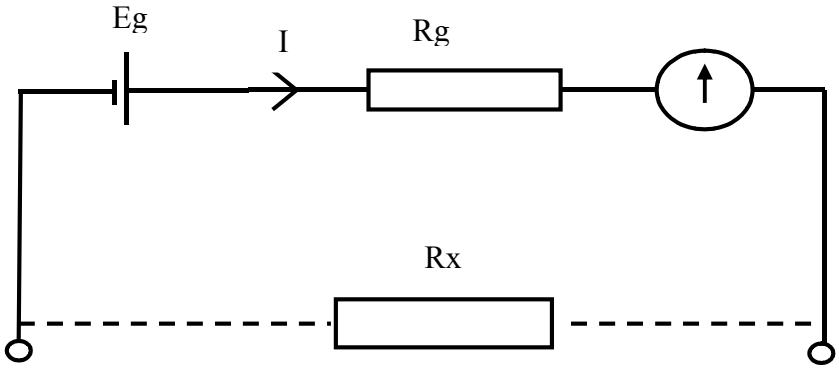


Figure 12 : Schéma de principe d'un **ohm-mètre** .

Rx : Résistance à mesurer.

$$Rx = Eg/I - Rg \quad \text{avec } Eg = Rg.Ig$$

Avant de mesurer Rx, il faut :

- débrancher toute source de tension,
- déconnecter le composant dont on veut mesurer sa résistance Rx,
- mettre les deux bornes de l'appareil en court circuit, afin d'obtenir une déviation pleine échelle,
- enlever le court circuit,
- connecter la résistance Rx (à mesure) entre les bornes de l'ohm-mètre et lire la déviation de l'aiguille.

La résistance Rx est inversement proportionnel au courant I qui circule dans l'ECM, de ce fait l'échelle de l'ohm-mètre est donc non linéaire et une faible résistance conduit à un déplacement maximale de l'aiguille de l'ECM.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

IV-4- Utilisation en multimètre :

Dans un multimètre, qui combine plusieurs fonctions (ampèremètre, voltmètre, ohm-mètre) 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 désiré.

Actuellement, pour la plus part des applications, les appareils à aiguilles ont été supplantés par des appareils à affichage numérique, généralement moins chers, plus robustes et plus précis. Ceux ci ne sont pas basés sur un équipage à cadre mobile (ECM), mais sur des circuits électroniques comportant des composants permettant une mesure directe de différence de potentiel. Les autres échelles (ampèremètres et ohmmètres) sont obtenus à partir de ce voltmètre par des opérations analogues à celles à base de l'ECM.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

LES APPREILS DE MESURE EN COURANT ALTERNATIF

I- PARAMETRES CARACTERISTIQUES D'UN SIGNAL ALTERNATIF :

Un signal alternatif est caractérisé par sa forme (sinus, carré, dent de scie,…), sa période (fréquence ou pulsation) et son amplitude. On peut aussi attribuer à un signal alternatif, deux autres paramètres, qui sont : **valeur moyenne** et **valeur efficace.**

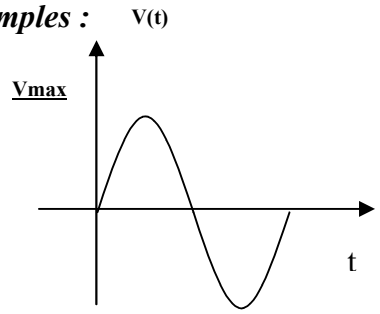
I-1- Valeur moyenne :

La valeur moyenne d'un signal périodique s(t) est définie par :

$$Smoy=\frac{1}{T}\int_0^T s(t)dt$$

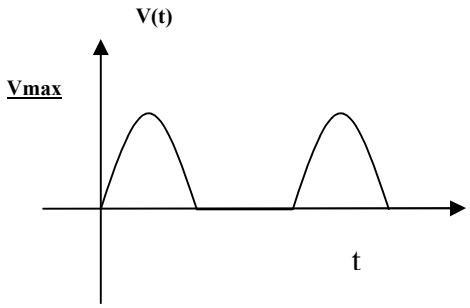
La valeur moyenne d'un signal est la valeur de la composante continue dans le signal (offset).

Exemples :



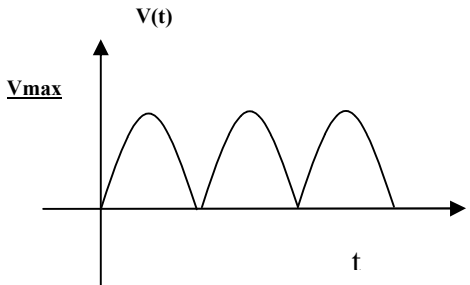
$Vmoy=0$

Figure 13 : signal sinusoïdal



$Vmoy=\frac{Vmax}{\pi}$

Figure 14 : signal sinusoïdal redressé simple alternance



$Vmoy=\frac{2.Vmax}{\pi}$

Figure 15: signal sinusoïdal redressé double alternance

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

I-2- Valeur efficace :

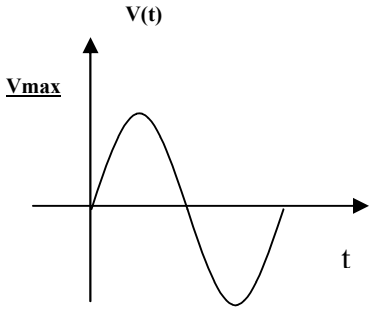
La valeur efficace Seff d'un signal périodique s(t) est définie de la façon suivante :

$$Seff=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T S^2(t)dt}$$

Il s'agit du racine carré de la valeur moyenne du carré du signal (RMS : Root Mean Square)

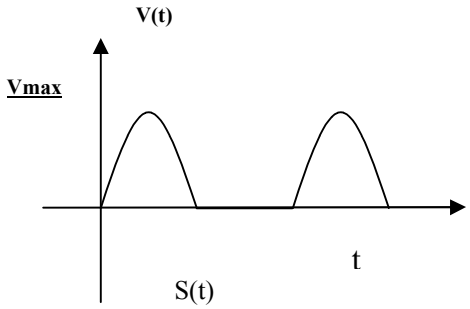
La valeur efficace étant liée aux effets énergétiques, en effet, elle représente la valeur de la même grandeur en courant continu qui à les mêmes effets énergétiques que le signal alternatif pendant la même durée.

Exemples :



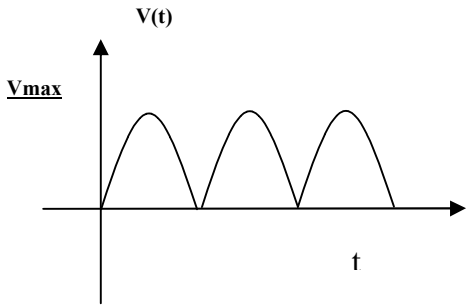
$$Veff=\frac{Vmax}{\sqrt{2}}$$

Figure 16 : signal sinusoïdal



$$Veff=\frac{Vmax}{2}$$

Figure 17 : signal sinusoïdal redressé simple alternance



$$Veff=\frac{Vmax}{\sqrt{2}}$$

Figure 18: signal sinusoïdal redressé double alternance

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

II- LES APPAREILS MAGNETOELECTRIQUES EN COURANT ALTERNATIF

D'après le principe de fonctionnement de ces appareils, le dispositif qui fait dévier l'aiguille est sensible à la composante continue du signal. La déviation de l'aiguille de ces appareils est proportionnel à la valeur moyenne du signal.

On peut schématiser ce type d'appareils par le schéma synoptique suivant :

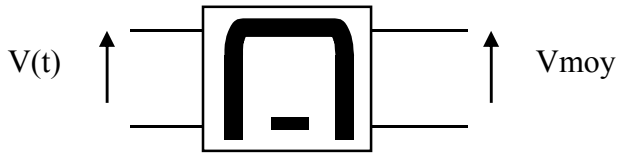


Figure 19 : schéma synoptique d'un appareil magnétoélectrique en courant alternatif.

III- LES APPREILS MAGNETOELECTRIQUES AVEC REDRESSEUR.

Le symbole de la diode , caractérise l'existence d'un montage redresseur à l'intérieur de l'appareil de mesure. Ce type d'appareils, réalise le redressement du signal à mesurer (redressement simple alternance ou double alternance), puis l'aiguille dévie proportionnellement à la valeur moyenne du signal redressé. Le dispositif magnétoélectrique mesure la valeur moyenne du signal mesuré .

Comme en courant alternatif, on a besoin souvent de la valeur efficace du signal mesuré. Les fabricants de ce type d'appareils, utilisent un facteur correctif dans les graduations de l'échelle de l'appareil pour avoir une correspondance entre la valeur mesurée par le dispositif et la valeur que doit lire l'utilisateur, en effet :

- cas d'un redresseur simple alternance : le facteur correctif est $k=\frac{\frac{Vmax}{\sqrt{2}}}{\frac{Vmax}{\pi}}=\frac{\pi}{\sqrt{2}}=2.22$

- cas d'un redresseur double alternance : le facteur correctif est $k=\frac{\frac{Vmax}{\sqrt{2}}}{\frac{2.Vmax}{\pi}}=\frac{\pi}{2\sqrt{2}}=1.11$

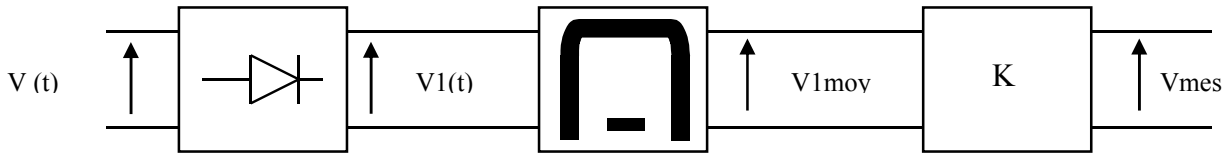
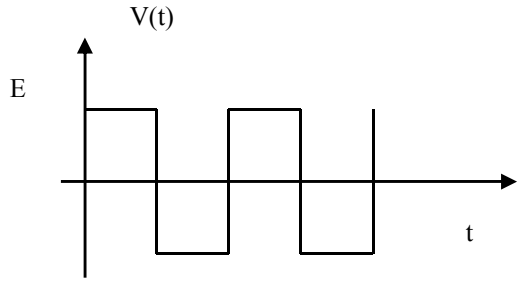


Figure 20 : schéma synoptique d'un appareil magnétoélectrique avec redresseur en courant alternatif.

Le facteur correctif (k) est calculé pour le cas d'un signal sinusoïdal, cela est due au fait qu'on manipule dans la plus part des cas des signaux sinusoïdaux.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Remarque :



Veff=E

Figure 21 : signal carré.

Si on mesure ce signal par un appareil magnétoélectrique avec redresseur, celui ci donne 1,11.E ≠ E , ce qui prouve que la valeur mesurée ne correspond pas à la vraie valeur efficace u signal .

IV- LES APPREILS FERROMAGNETIQUES :

En se basant sur le principe de fonctionnement de ce type d'appareils, on remarque que la déviation de leurs aiguilles est rigoureusement proportionnelle à la vraie valeur efficace de la grandeur mesurée. Ce type d'appareils est classé en appareils TRMS (True RMS) quelque soit la forme du signal mesuré.

La déviation de l'aiguille est proportionnelle à la vraie valeur efficace du signal mesuré, donc l'échelee de ce type d'appareils est non linéaire.

V- PRINCIPE DES MULTIMETRES A AFFICHAGE NUMERIQUES :

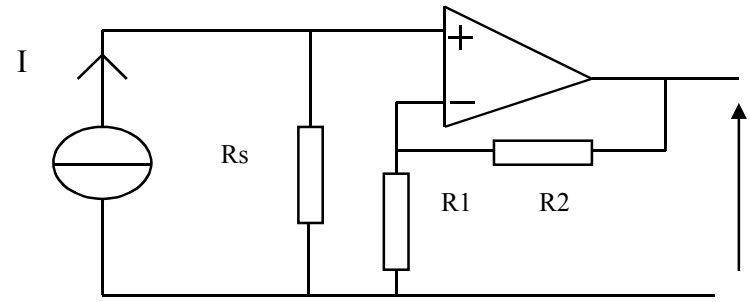
La plus part des multimètres numériques, peuvent permettre de mesurer des intensitées et des tensions (moyennes et efficaces) ainsi que des résisatnces, mais dans tous les cas, le système va dans un premier temps transformer l'information (tension, intensité ou résistance) en une tension, transformée par la suite en tension continue. Cette dernière sera numérisée au moyen d'un convertisseur analogique- numérique (CAN) en un mot binaire. Un circuit électronique, convertit ce mot binaire en une valeur lue.

V-1- Conversion du signal mesuré en tension :

Dans le cas ou le signal étudié n'est pas une tension, on va dans un premier temps le convertir en une tension qui lui est proportionnelle.

- ***cas d'un courant*** : Le principe consiste à mesurer la tension aux bornes d'une résistance connue, traversée par le courant à mesuré. Cette résistance doit être le plus faible possible pour ne opas perturber le circuit étudié. Le circuit électronique qui permet de faire cette conversion est donné par la figure suivante (figure 22).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر



$$Vs=(1+\frac{R2}{R1}).Rs.I$$

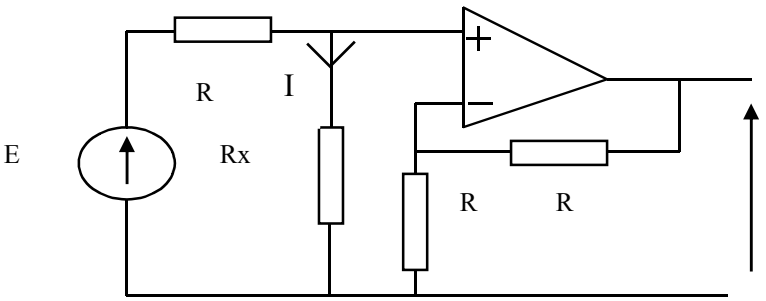
I : courant à mesurer

Figure 22 : principe de mesure d'un courant.

L'avantage de cette méthode réside essentiellement dans sa simplicité. Les inconvénients sont, quand à eux, plus nombreux :

- pour mesurer des courants d'intensités supérieure à quelques ampères, il faut utiliser un shunt extérieur,
- la limite en fréquence se situe aux alentours de 25 KHz,
- etc…

- ***cas d'une résistance*** : Le principe de l'ohm-mètre, consiste à faire un courant fixé dans la résistance à mesuré. On mesure alors la tension entre ses bornes (figure 23).



$$V+=Rx.I$$

$$V-=\frac{Vs}{2}$$

$$I=\frac{E}{R}$$

$$Vs=\frac{2E}{R}.Rx$$

Rx : résistance à mesuré

Figure 23 : principe de mesure d'une résistance.

V-2- Obtention d'une valeur moyenne :

Le principe consiste à filtrer le signal pour ne conserver que sa composante continue. Le principal problème sera de réaliser un filtre suffisamment sélectif pour éliminer intégralement la partie variable du signal. Le schéma fonctionnel est donnée par la figure 24 :

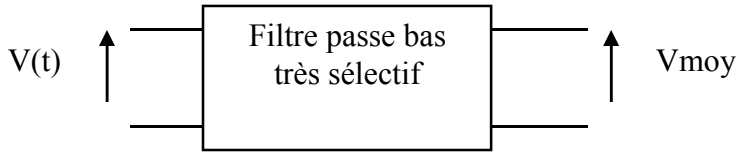


Figure 24 : principe d'obtention de la valeur moyenne

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

V-3- obtention d'une valeur efficace :

On distingue deux types d'appareils :

- les appareils à vraie valeur efficace (True RMS)
- Les appareils qui donnent la valeur efficace pour des signaux de forme particulière (sinusoïdale)

V-3-1- Obtention par redressement et prise de la valeur moyenne :

Le signal à l'entrée de l'appareil est redressé puis filtré à fin d'obtenir la valeur moyenne du signal redressé. L avaleur obtenu est multiplié par un coefficient constant (k = 1.11 ou k = 2.22) puis envoyé vers le bloc d'affichage selon le schéma fonctionnel suivant (figure 25).

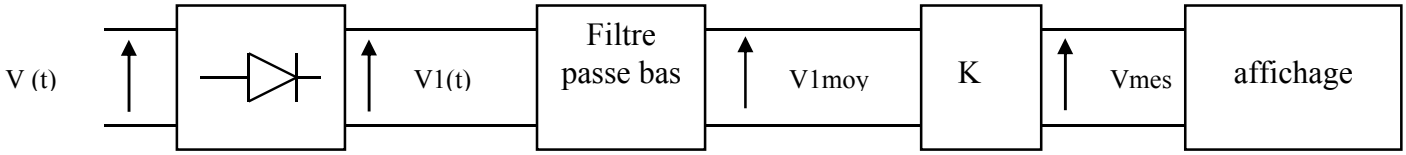


Figure 25 : schéma de principe d'un appareil numérique

En pratique, les appareils de ce type ne donnent une valeur efficace que pour des signaux sinusoïdaux sans composante continue. Ils sont principalement utilisé pour faire des mesures sur le réseau électrique à 50 Hz.

V-3-1- Obtention de la vraie valeur efficace :

Dans ce type d'appareils on réalise chacune des étapes permettant de calculer la valeur efficace d'après sa définition c'est à dire $Veff = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt}$.

Le schéma de principe de ces appareils est donné par la figure suivante (figure 26).

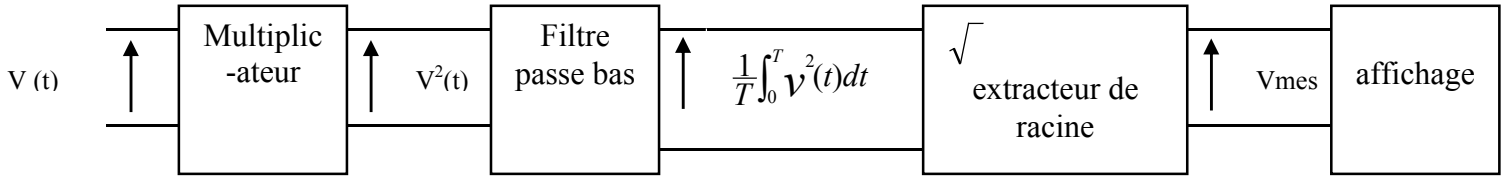


Figure 26 : schéma de principe d'un appareil numérique True RMS

En pratique on utilise très souvent le circuit intégré de mesure de la valeur efficace vraie : le AD 636 de « Analog devices », dont le schéma de principe ainsi que ses caractéristiques se trouve dans l'annexe.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

UTILISATION DU MULTIMETRE NUMERIQUE

I- VERIFICATION D'UNE DIODE

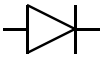
I-1- Vérification par mesure de sa résistance.

Un multimètre peut être utilisé comme moyen simple et rapide pour vérifier une diode. Rappelons qu'une diode en bon état présente une résistance extrêmement élevée (circuit ouvert) en polarisation inverse et une très faible résistance en polarisation directe :

- une diode défectueuse, qui devenue ouverte, indiquera une résistance élevée à la fois en polarisation directe et inverse.
- Une diode défectueuse, qui devenue court-circuitée, indiquera zéro ou une faible résistance à la fois en polarisation direct et inverse.

I-2- Vérification par utilisation de la fonction « test de diode » :

Plusieurs multimètres numériques possèdent une fonction de test de diode qui fournit un moyen pratique pour vérifier une diode.

Un multimètre positionné sur la position test de diode (), fournit une tension suffisante pour une polarisation directe ou inverse sur une diode. Cette tension interne peut varier selon la marque du multimètre, bien qu'elle se situe typiquement entre 2.5 V et 3.5 V.

- Lorsque la diode est en bon état, le multimètre affiche une lecture entre 0.5 V et 0.9 V en sens direct (anode (+), cathode (com)) et une valeur entre 2.5 V et 3.5 V en sens inverse (Anode(com), cathode(+)).
- Lorsque la diode est défectueuse, le multimètre affiche une valeur entre 2.5 V et 3.5 V dans les deux cas (sens direct et sens inverse) lorsqu'elle est ouverte et une tension 0V lorsqu'elle est court-circuitée.

II- VERIFICATION D'UN TRANSUSTOR

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.

La jonction B-C est équivalente à une diode et de même pour la jonction B-E :

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

II-1- Vérification d'un transistor par la fonction test de diode :

Plusieurs multimètres numériques possèdent une fonction de test de diode, qui fournit un moyen pratique pour vérifier un transistor. Lorsqu'un multimètre est positionné sur la fonction test de diode, celui-ci fournit une tension interne suffisante pour une polarisation directe ou inverse sur la jonction du transistor. Cette tension peut varier selon la marque du multimètre bien qu'elle se situe typiquement entre 2.5 V et 3.5 V. Le multimètre fournit une lecture de tension ou une autre indication pour afficher la condition de la jonction du transistor lors du test.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Lorsque le transistor est en bon état :

- la borne (+) est connecté à la base B du transistor NPN et la borne (com) est connectée à l'émetteur E du transistor, afin de fournir une polarisation directe de la jonction B-E, on obtient une lecture de $0.7V \pm 0.2V$.
- pour polariser en inverse la même jonction, il suffit d'inverse les bornes du multimètre, on obtient une lecture en fonction de la source interne du multimètre. La 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.

Lorsque le transistor est défectueux :

- lorsque la jonction du transistor ou est ouverte, on obtient une tension de circuit ouvert (typiquement 2.6V) pour les deux conditions 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, dans ce cas le multimètre affichera une faible tension plus faible que la tension exacte en circuit ouvert (1.1 V par exemple).
- Certains multimètres sont munis d'une prise réceptrice pour vérifier un transistor en fonction de sa valeur de β. En effet, si le transistor est mal inséré ou si l'une de ses jonctions est défectueux, le multimètre indique 0 ou 1 clignotant, si le transistor est en bon état, le multimètre affiche une valeur qui correspond à β.

II-2- Vérification d'un transistor avec la fonction ohm-mètre :

Si l'on désire vérifier les jonctions d'un transistor avec un multimètre dépourvu de la fonction du test de diode ou de prise réceptrice pour tester β du transistor, il faudra positionner le multimètre sur la fonction ohm-mètre.

- en polarisation directe de la jonction PN, si elle est en bon état, le multimètre donne une lecture de résistance (quelques centaines d'ohm à quelques milliers d'ohm) en fonction de la batterie interne du multimètre.
- En polarisation inverse de la jonction PN, si elle est en bon état , la lecture sera hors de portée sur la plus part des multimètres. Une indication de résistance hors de portée peut être indiquée par un « 1 » clignotant ou une série de tirets selon le modèle.

III- TEST DE CAPACITE PAR LA FONCTION OHM-METRE.

Avant de commencer le test d'une capacité il faut la décharger en court-circuitant ces deux électrodes.

- On connecte le multimètre sur la plus grande gamme de mesure (… MΩ), le multimètre indique une valeur faible (proche de zéro) puis, il indique une valeur

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

de plus en plus grande en fonction de la charge du condensateur à partir de la batterie de l'ohm-mètre. Lorsque le condensateur est totalement chargé, l'ohm-mètre indique une résistance très élevée.

- Pour des faibles valeurs des capacités (pF) la réponse de l'ohm-mètre est insuffisante pour indiquer l'action de la charge du condensateur :

    - Si la capacité est court-circuitée, l'ohm-mètre indique toujours une valeur faible (zéro).
    - Si la capacité est défectueuse, l'ohm-mètre indique une valeur moins faible que celle de l'état normal.
- La plus part des condensateurs ont une résistance de quelques centaines de MΩ, à l'exception des capacités électrolytiques dont la résistance est inférieur à 1 MΩ.
- Si la capacité est ouverte, l'ohm-mètre indique toujours une valeur infinie.

IV- TEST D'UNE INDUCTANCE PAR LA FONCTION OHM-METRE.

Pour tester une inductance, il faut la débrancher du circuit.

- si l'ohm-mètre indique une résistance infinie, l'inductance est en circuit ouvert,
- si l'ohm-mètre indique une faible résistance (zéro), l'inductance est court-circuitée.
- si l'ohm-mètre indique une faible résistance (de 1 quelques 100Ω), l'inductance est en bonne état.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

LES METHODES DE MESURE

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

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

I- METHODES DE DEVIATION :

I-1- méthode de déviation directe :

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

Exemples :

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

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

I-2- méthode de déviation indirecte :

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

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

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

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

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

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

Exemple : mesure d'une f.e.m

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

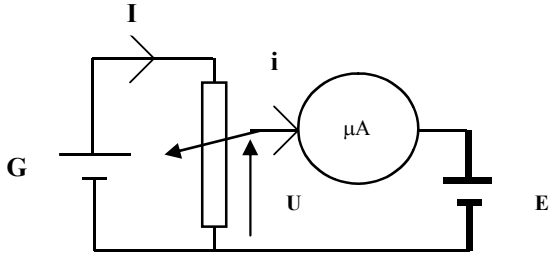


Figure 27 : schéma de principe de la méthode de mesure d'une f.e.m

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

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

On remplace la f.e.m à mesurée E par une f.e.m étalon **E0**, et on agit de nouveau sur le potentiomètre jusqu'à obtenir i = 0. On a donc $E_0=U=R''.I$

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

II- METHODES DES PONTS :

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

II-1- Pont de wheatstone :

On associe quatre résistances R1 à R4 selon le schéma de la figure 28. Le pont est alimenté par une f.e.m E

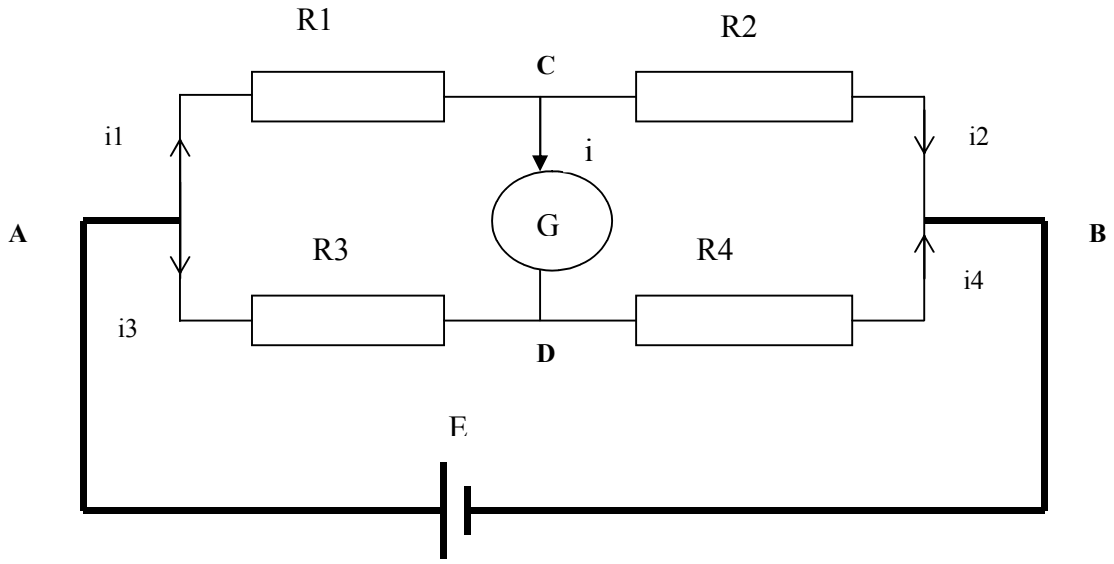


Figure 28 : Schéma de principe d'un pont de wheatstone.

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

$$\begin{cases} i1=i2 \quad et \quad UAC=UAD \\ i3=i4 \quad et \quad UCB=UDB \end{cases}, \text{ ce qui donne } R1.R4=R2.R3$$

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

En pratique, on place la résistance inconnue en R1, R2 est une résistance connue ajustable et R3 et R4 sont des résistances fixes dont on connaît le rapport ($K=\frac{R3}{R4}$).

A l'équilibre du pont on peut écrire $R1=\frac{R3}{R}.R2=K.R2$.

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

II-2- Ponts en courant alternatif :

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

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

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

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

R3,R4 :résistances pures fixes

$Z1=Rx+\frac{1}{jCxw}$:impédance inconnue

$Z1=R+\frac{1}{jCw}$: impédance variable et connue

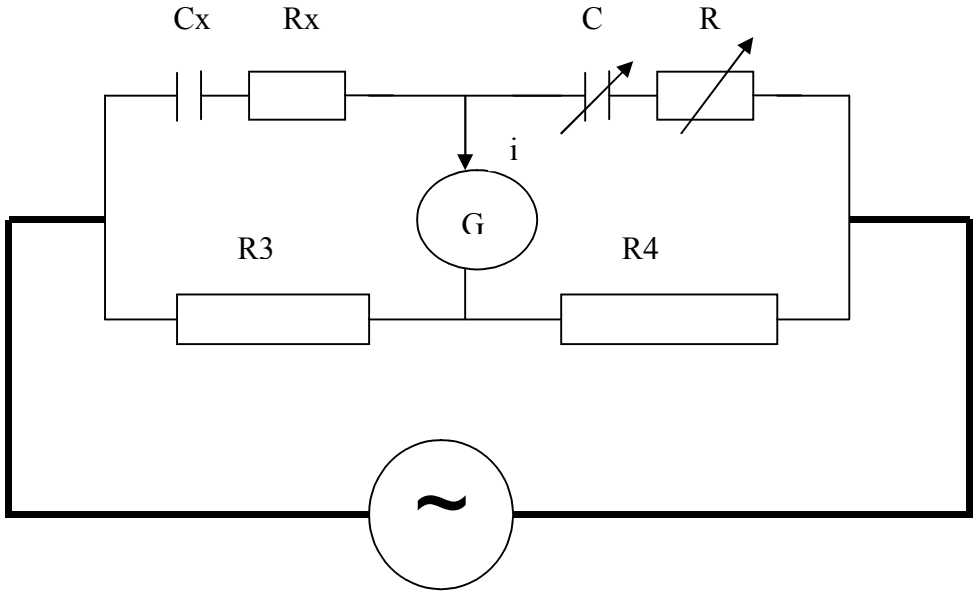


Figure 29 : Schéma de principe du pont de sauty.

A l'équilibre du pont on peut écrire que $Rx=R.\frac{R3}{R4}$ et $Cx=C.\frac{R4}{R3}$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

R3:résistance pure fixe

$Z4=\frac{1}{jCw}$: condensateur idéal connu

$Z1=Rx+jLxw$:impédance inconnue

$Z1=R+\frac{1}{jCw}$: impédance variable et connue

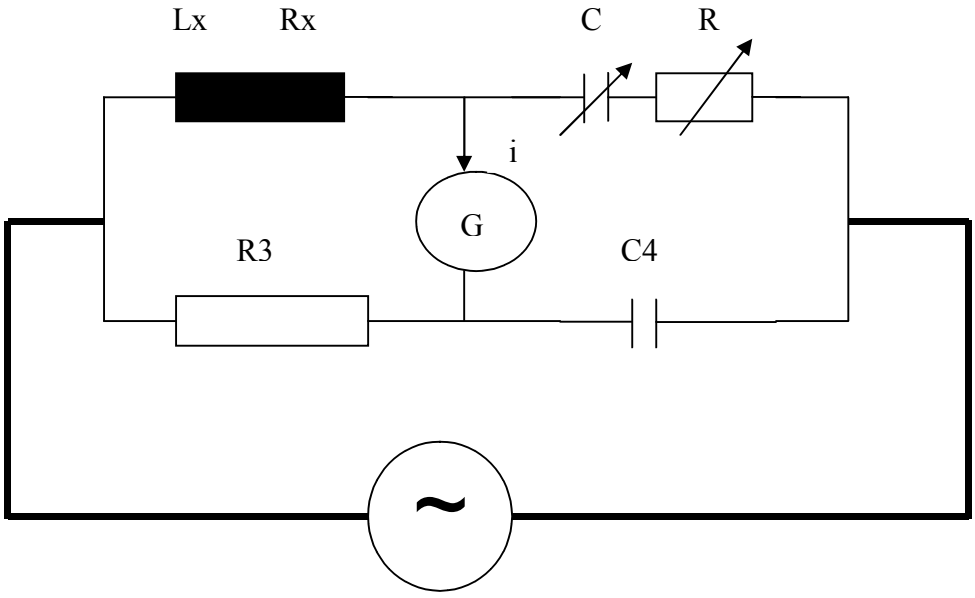


Figure 30 : Schéma de principe du pont de Owen.

A l'équilibre du pont on peut écrire que $Rx=R3.\frac{C4}{C}$ et $Lx=R3.R.C4$

R2,R3 : résistances pures fixes

$Z1=Rx+jLxw$:impédance inconnue

$\frac{1}{Z4}=\frac{1}{R4}+jC4w$:impédance variable de précision

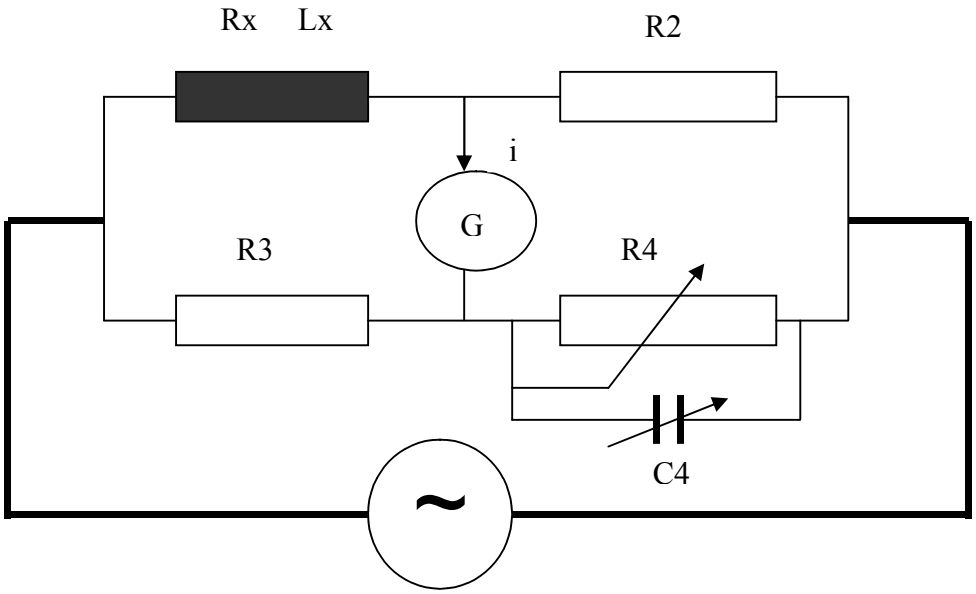


Figure 31 : Schéma de principe du pont de Maxwell.

A l'équilibre du pont on peut écrire que $Rx=R2.\frac{R3}{R4}$ et $Lx=R3.R2.C4$

III- METHODE DE RESONANCE :

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

MESURE DES TENSIONS ET DES COURANTS

I- MESURE DES TENSIONS :

I-1- Généralités :

Pour mesurer la tension UAB aux bornes d'un récepteur, il faut brancher un voltmètre entre les points A et B (le point A est relié à la borne marquée **V** ou (+) et le point B est relié à la borne marquée « **com** » ou (-)).

Le calibre est la plus forte tension que peut mesurer le voltmètre. Pour éviter de détériorer le voltmètre, on a intérêt à le brancher sur le plus grand calibre.

On a intérêt à abaisser le calibre si nécessaire pour obtenir une lecture suffisamment précise. Le bon calibre est celui immédiatement supérieure à la tension mesurée.

L'indication lue sur le cadran d'un voltmètre , ne représente qu'un nombre de divisions. Il faut déduire la tension à partir de cette lecture en tenant compte du calibre :

$$\text{tension mesurée} = \frac{\text{lecture.calibre}}{\text{echelle}}$$

pour un voltmètre numérique, la valeur de la tension mesurée est celle indiquée par l'afficheur du voltmètre.

I-2- mesure de tension en courant alternatif :

En courant alternatif on a besoin souvent de la valeur efficace du signal mesuré. Pour cela on peut utiliser un voltmètre de type ferromagnétique ou magnétoélectrique avec redresseur lorsque le signal mesuré est de type sinusoïdal ou un voltmètre numérique.

Pour les voltmètres numériques de type TRMS, on distingue deux modes de couplage :

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

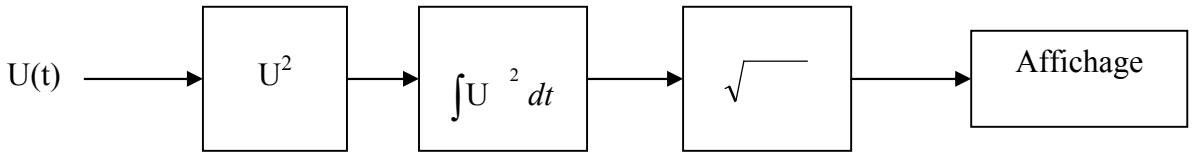


Figure 32 : schéma de principe d'un voltmètre TRMS en mode DC.

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

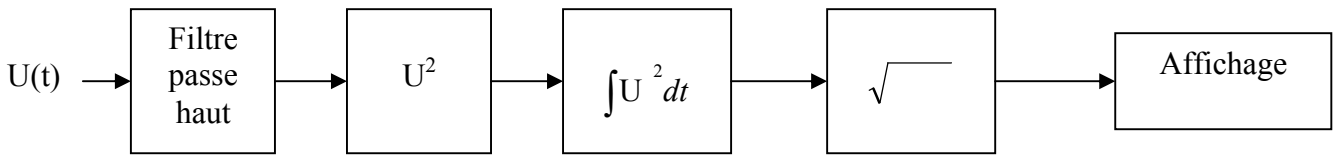


Figure 33 : schéma de principe d'un voltmètre TRMS en mode AC.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

I-3- Utilisation d'un transformateur de tension :

Les transformateurs de tension (ou de potentiel) 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.

La tension secondaire, en général 100 V ou 110 V, est, dans les conditions normales d'utilisation, pratiquement proportionnelle à la tension primaire.

La norme NFC 42-501 à énoncé les définitions concernant la classe de précision, l'erreur nominale $K=\frac{V1}{V2}$ et le déphasage nominal entre la tension du primaire V1 et celle du secondaire V2 (voir tableau 5)

Classes de précision	**Erreur nominale de rapport (%)**	**Déphasage nominal**	
		minutes	**Centi-radians**
0.2	±0.2	±10	±0.3
0.5	±0.5	±20	±0.6
1	±1	±40	±1.2
2	±2	Non spécifié	

Tableau 5 : Précision des transformateurs de tension

II- MESURE DES COURANTS (AMPEREMETRES) :

II-1- Généralités :

Un ampèremètre se branche en série dans un circuit électrique, cela veut dire qu'il faut ouvrir le circuit pour intercaler l'ampèremètre entre les deux points d'ouverture en respectant le sens de branchement. En effet, le courant doit entrer dans l'ampèremètre par la borne marqué **A** (ou **mA** ou +) et ressortir par la borne commune marquée **com** ou (**-**).

Pour éviter de détériorer l'ampèremètre, on a intérêt à le brancher sur le plus grand calibre et n'oubliant pas d'abaisser le calibre si nécessaire pour obtenir un affichage suffisamment précis.

L'indication lue sur le cadran d'un ampèremètre , ne représente qu'un nombre de divisions. Il faut déduire la tension à partir de cette lecture en tenant compte du calibre :

$$\text{courant mesuré}=\frac{\text{lecture.calibre}}{\text{echelle}}$$

pour un ampèremètre numérique, la valeur de la tension mesurée est celle indiquée par l'afficheur de l'appareil.

I-2- mesure de courant en alternatif :

En courant alternatif on a besoin souvent de la valeur efficace du signal mesuré. Pour cela on peut utiliser un ampèremètre de type ferromagnétique ou magnétoélectrique avec redresseur lorsque le signal mesuré est de type sinusoïdal ou un ampèremètre numérique.

Pour les ampèremètre numériques de type TRMS, on distingue deux modes de couplage :

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

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

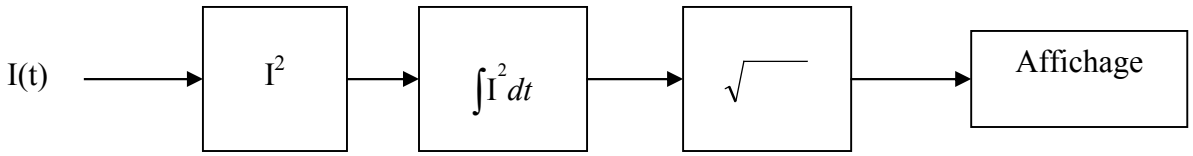


Figure 34 : schéma de principe d'un ampèremètre TRMS en mode DC.

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

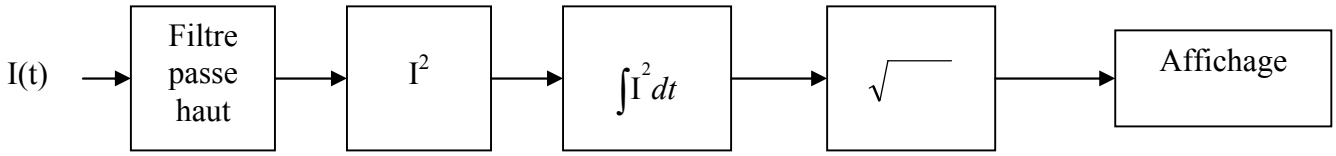


Figure 35 : schéma de principe d'un ampèremètre TRMS en mode AC.

Pour les fortes intensités, on utilise le shunt extérieur pour le courant continu et le transformateur de courant (TI) ou pince ampère- métrique en courant alternatif.

II-2- Shunts extérieurs :

Ils sont utilisés en courant continu et montés en parallèle aux bornes d'un milliampèremètre magnétoélectrique, dont la consommation n'excède pas quelques milliampères. Un shunt est relié à l'instrument de mesure par des cordons spéciaux dont la résistance totale ne doit pas dépasser 0.05 Ω afin de limiter l'incertitude dans la lecture.

La norme C 42-100 donne la classe de précision des shunts :

- 0.5 pour la mesure (shunt de table)
- 1 et 2 pour les appareils de tableau.

Les chutes de tensions pour les shunts usuels sont donnés par le tableau 6 :

Chute de tension	**50 mV**	**100 mV**	**150 mV**	**300 mV**
constructeur	METRIX	AOIP	PEKLY	Chauvin Arnoux

Tableau 6 : chutes de tension de quelques shunts extérieur

II-3- Transformateur de courant ou d'intensité (TC ou TI) :

C'est un transformateur monophasé dont l'intensité secondaire I2, de faible valeur est proportionnelle au courant primaire I1, qui est beaucoup plus élevé. Les deux enroulements de N1 et N2 spires, placés sur un circuit magnétique sans fuite (tore) de grande perméabilité et travaillant à faible induction (0.1 T) assurent un transfert des courants tels que :

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

$N1.I1+N2.I2=0$ ou encore $\frac{I1}{I2}=\frac{N2}{N1}=K$ (N1 et N2 : nombres de spires primaires et secondaire et K : rapport de transformation).

A la limite pour les intensités élevées à mesurer, le primaire se réduit à une spire, c'est à dire au passage direct du conducteur dans « l'œil » du tore.

Un transformateur de courant doit toujours travailler à secondaire en court circuit (c'est à dire fermé sur un ampèremètre de faible résistance).

Les caractéristiques essentielles d'un transformateur de courant sont :

* courants primaires : 10 A; 12.5 A; 16 A ; 20 A; 32 A; 40 A; 64 A; 80 A ;….
* courants secondaires : 1 A et 5 A.
* fréquences nominales : 50 Hz et 400 Hz.
* classes de précision : 0.1 ; 0. 2 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; …
* puissances apparentes disponibles au secondaires : de 2.5 à 100 VA.

La norme NFC 42-501 à énoncé les définitions concernant la classe de précision, l'erreur nominale $K=\frac{I1}{I2}$ et le déphasage nominal entre le courant du primaire I1 et celui du secondaire I2 (voir tableau 7)

Classe de précision	Erreurs de rapport (en %)			Déphasage (en min)		
	Pour 0.1In	Pour 0.2In	Pour In	Pour 0.1In	Pour 0.2In	Pour In
0.1	0.25	0.2	0.1	10	8	5
0.2	0.5	0.35	0.2	20	15	10
0.5	1	0.75	0.5	60	45	25
1	2	1.5	1	120	90	50
2	4	3	2	Non spécifié		

Tableau 7 : Précision des transformateurs de courant

II-4- la Pince ampèremètrique :

C'est un transformateur à circuit magnétique ouvrable. Le primaire de ce transformateur est constitué par le conducteur sur lequel porte la mesure, le secondaire est bobiné sur un circuit magnétique pouvant s'ouvrir pour enserrer le conducteur.

Le rapport de transformation de la pince dépend du nombre de spires de l'enroulement secondaire qui est caractéristique de la pince. La sortie de mesure peut aussi s'effectuer en tension, le rapport de transformation est alors donné en volt/ampère (V/A).

Les pinces pour courant continu utilisent le principe de l'effet Hall. Un capteur à effet Hall transforme le champ magnétique produit par l'intensité qui lui est proportionnelle. Ces pinces permettent la mesure de tout type de courant.

Le choix d'une pince ampère métrique dépend :

- de la nature du courant à mesurer et de son intensité,
- du diamètre du conducteur entourer,
- du type d'appareil de mesure en sortie et de sa sensibilité.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Exemple :

Une pince de rapport 500/1 fournit 1 A pour 500 A. Si l'intensité dans le conducteur est 20 A, le courant de sortie sera de 0.04 A soit 40 mA.

II-5- Sondes de courant pour oscilloscopes et acquisition de données :

Une sonde de courant fonctionne de la même manière q'une pince ampère métrique mais avec une bande passante plus importante. Elle permet l'observation des formes d'ondes dans un conducteur et la mesure des harmoniques éventuels.

Une sonde de courant peut être connectée à un oscilloscope ou à un analyseur de réseau.

Remarque :

- La bande passante est l'ensemble des fréquences transmises par la sonde. Elle est de l'ordre de 20 Hz à 1 KHz.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

MESURES CHRONOMETRIQUES

I- FREQUENCEMETRE :

Le schéma de principe d'un fréquencemètre numérique est donné par la figure 36.

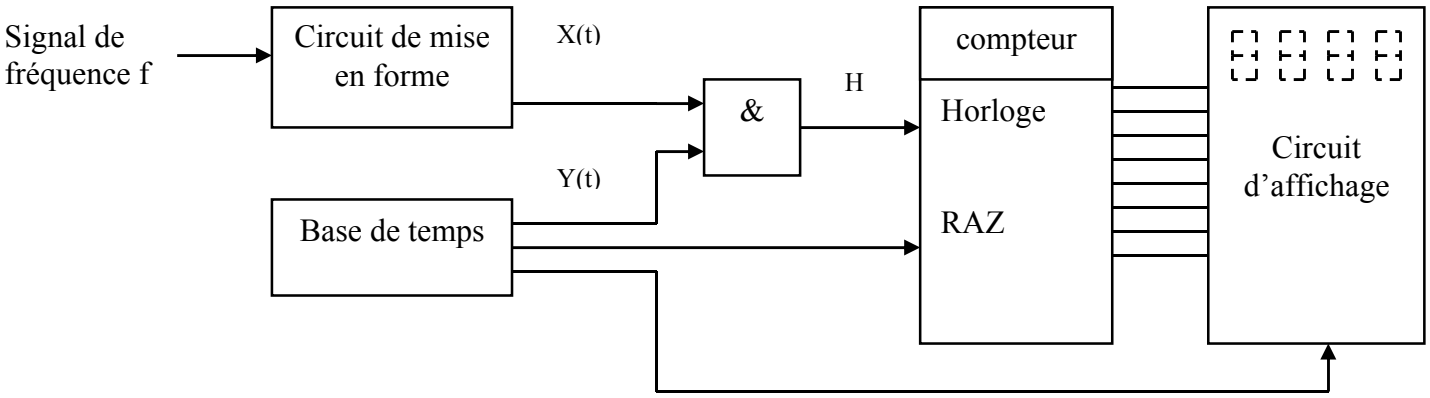


Figure 36 : schéma de principe d'un fréquencemètre.

La base du temps génère un temps ΔT fixe (par exemple 1 s), on compte le nombre de périodes du signal d'entrée pendant ΔT. Le compteur compte le nombre de fronts qui lui arrivent à son entrée d'horloge 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.

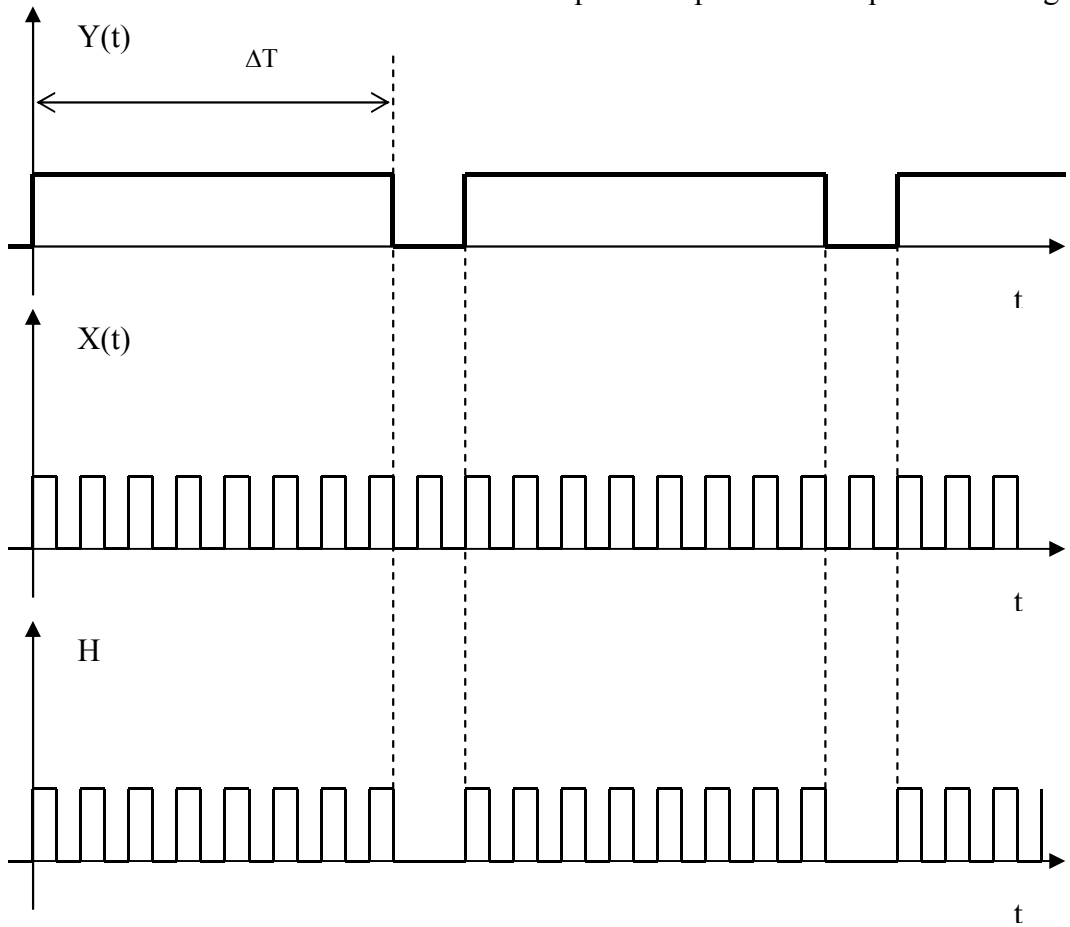


Figure 37 : principe de comptage d'un fréquencemètre.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

$$\Delta T=N.T \Rightarrow T=\frac{\Delta T}{N} \Rightarrow f=\frac{N}{\Delta T}$$

Le circuit de mise en forme est un dispositif qui permet de transformer un signal quelconque en un signal périodique rectangulaire de même période que le signal à mesurer (un comparateur par exemple).

Remarques :

- le début du comptage est toujours synchronisé avec l'apparition du premier front du signal à mesurer, par contre la fin du comptage est liée à la gamme choisie.
- Pour avoir une mesure plus exacte, on augmente ΔT, mais on aura un temps de mesure plus long.

II- PERIODEMETRE :

Le schéma de principe d'un période mètre est identique à celui d'un fréquencemètre. La mesure se fait sur une période du signal, c'est à dire on compte le nombre des intervalles ΔT, pendant une période du signal (entre deux fronts).

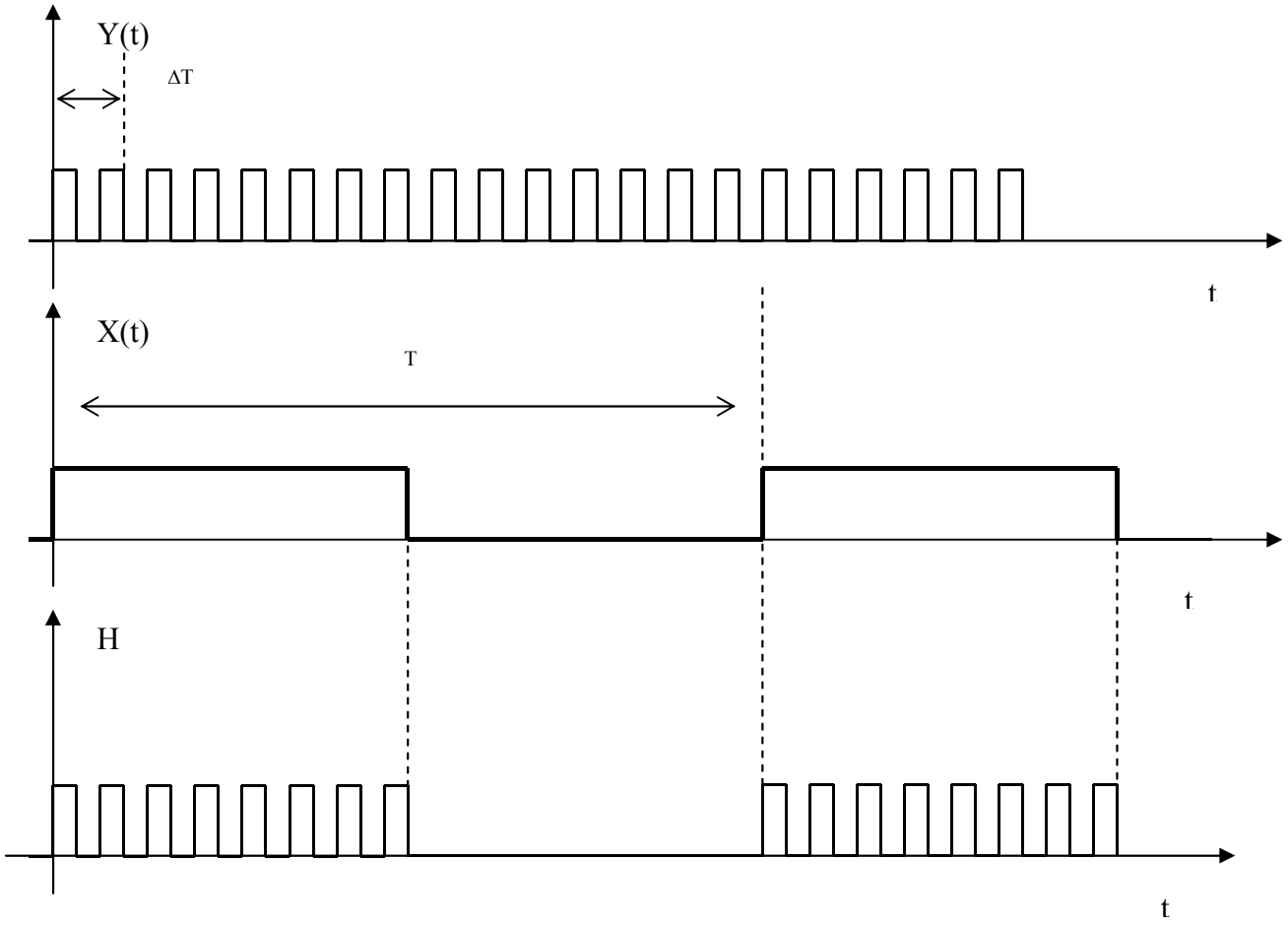


Figure 38 : principe de comptage d'un période mètre.

$$T=N.\Delta T$$

Le système affiche le nombre d'impulsions qui arrivent sur son entrée horloge qui correspond à la période du signal.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Cette méthode est plus rapide que celle d'un fréquencemètre (car ΔT est faible).

III- MESURE DU RAPPORT CYCLIQUE :

On définit le rapport cyclique d'un signal carré comme étant le rapport entre la durée de la partie positive et la durée d'une période du signal . $\alpha=\frac{ton}{T}$

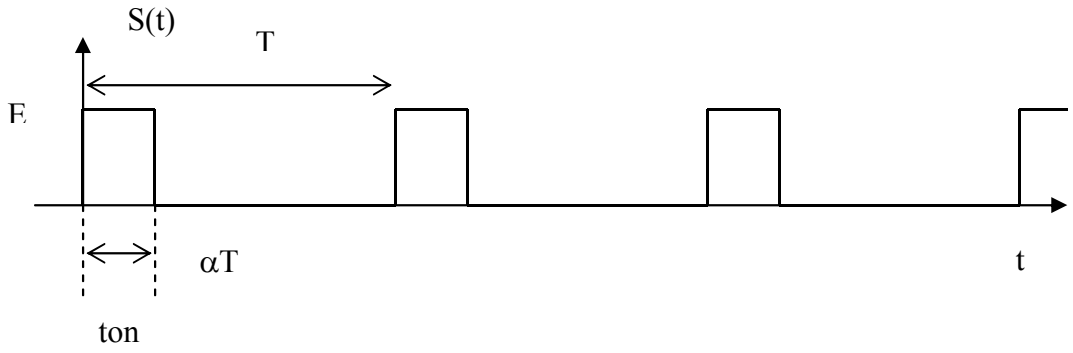


Figure 39 : définition du rapport cyclique d'un signal.

La valeur moyenne du signal s(t) est $Smy=\alpha E \Rightarrow \alpha=\frac{Smoy}{E}$.

La mesure du rapport cyclique d'un signal se fait par extraction de la valeur moyenne du signal en utilisant un filtre passe bas par exemple, selon la figure 40 .

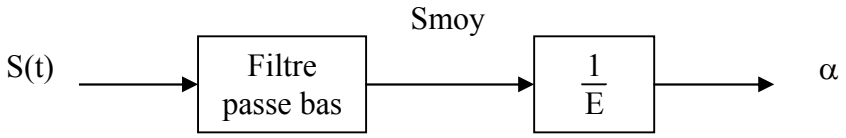


Figure 40 : Schéma de principe de mesure du rapport cyclique d'un signal S(t).

IV- PHASEMETRE :

IV-1- Principe de fonctionnement :

Le phasemètre est un appareil de mesure, qui sert à mesurer la phase d'un signal SA par rapport à un autre signal SB de même fréquence qui sert de référence.

Les deux signaux sont mis en forme à l'entrée de l'appareil. Dans un premier temps, l'appareil mesure la période du premier signal Sa soit T0, dans un deuxième temps, il mesure ΔT le décalage horaire entre les deux signaux, ensuite il calcule le déphasage selon la formule suivante :

$$\varphi=2\pi.\frac{\Delta T}{T0}(rd) \text{ ou } \varphi=360.\frac{\Delta T}{T0}(\text{deg}rés).$$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

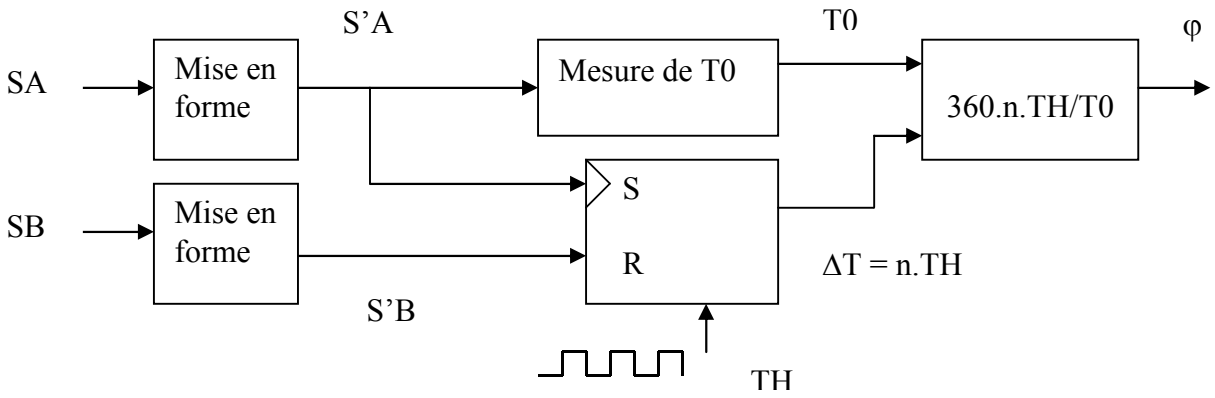


Figure 41 : schéma de principe d'un phasemètre

Remarques :

- La mesure de T0 s'effectue comme le cas du fréquencemètre,
- La mesure de ΔT s'effectue de la manière suivante : un front de S'A déclenche le comptage des impulsions de l'horloge TH, le front de S'B suivant arrête le comptage.

IV-2- Phasemètre à OU EXCLUSIF :

Le principe de ce phasemètre consiste à appliquer les deux signaux mises en formes S'A et S'B dans un OU EXCLUSIF, puis mesurer le rapport cyclique du signal résultant et de de le convertir par la suite en degré ou en radian.

Le schéma de principe est donné par la figure 42.

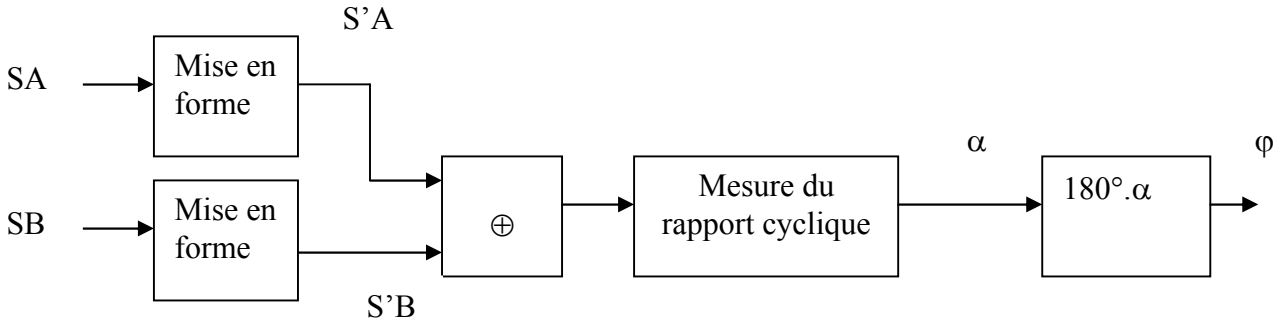
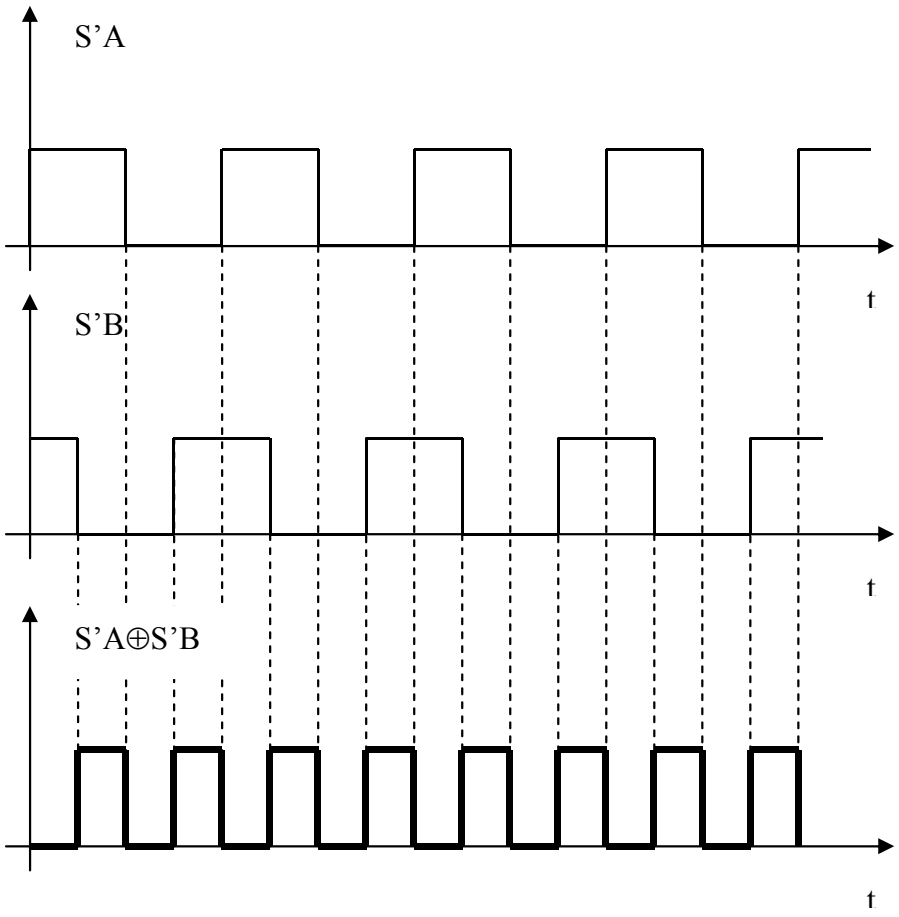


Figure 42 : principe du phasemètre à OU EXCLUSIF.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر



Le rapport cyclique de S’A⊕S’B est $\alpha = 0.5$ donc $\varphi = 180°.\alpha = 90°$ (soit $\pi/2$)

Figure 43 : exemple de mesure du déphasage par la méthode du OU EXCLUSIF.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

MESURE DE LA PUISSANCE

I- INTRODUCTION :

La mesure de la puissance fait appel à un appareil de type électrodynamique, qui est le wattmètre.

Sur le cadran d'un wattmètre, on trouve :

- la classe de précision ,
- nature du courant AC ou DC,.dans la cas général, une seule échelle utilisable en AC et en DC,
- la consommation en courant du circuit tension.

Le wattmètre est un appareil astatique (insensible aux champs extérieurs), il est constitué essentiellement par :

- un circuit courant : on trouve deux calibres directes dans un rapport de 1 à 2 (exemple : 0.5 A et 1 A ou 1.25 A et 2.5 A),
- un circuit tension : on trouve de nombreux calibres (de 15 V à 600 V),
- Une échelle à graduations régulières.

La consommation du circuit tension permet de déterminer la résistance du circuit tension.

La constante du wattmètre est définie par $K=\frac{calibreU.calibreI}{echelle}$ qui représente la puissance par division de l'échelle.

Le circuit courant se branche en série et le circuit tension se branche en dérivation selon deux modes différent (montage amont et montage aval).

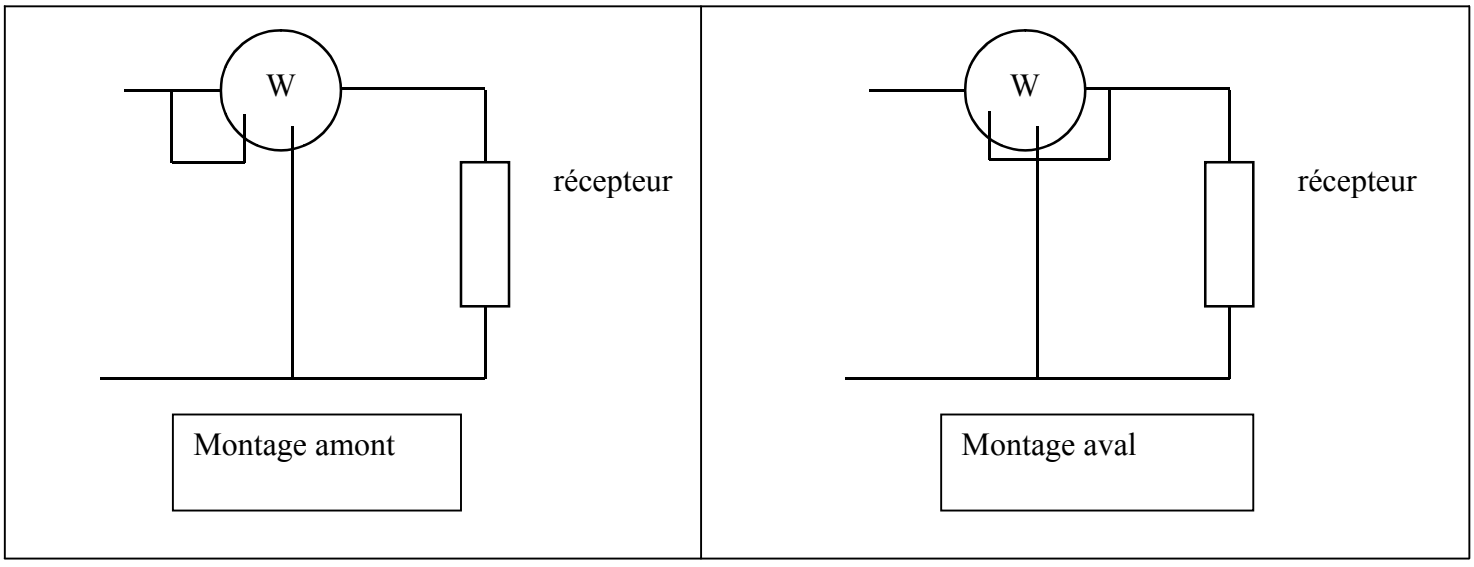


Figure 44 : schémas de branchement d'un wattmètre.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

II- PRINCIPE DE FONCTIONNEMET D'UN WATTMETRE :

Par construction un wattmètre indique la valeur moyenne du produit de l'intensité i(t) du courant traversant son circuit intensité par la différence de potentiel (ddp) u(t) aux bornes de son circuit tension.

Dans le cas où les deux grandeurs sont sinusoïdales et de même fréquence,

$$\begin{cases} i(t)=I\sqrt{2}.\cos(\omega t) \\ u(t)=U.\sqrt{2}\cos(\omega t-\varphi) \end{cases}$$

la puissance indiquée par le wattmètre est $P=\frac{1}{T}\int_0^T u(t).i(t)dt$.

En courant continu $P=U.I$ et en courant alternatif $P=U.I.\cos(\varphi)$

En courant alternatif, si $\varphi\geq\frac{\pi}{2}$ la puissance P indiquée par le wattmètre est négative et l'aiguille dévie dans le sens négatif de l'échelle. Dans cette situation, il faut permuter les deux bornes du circuit tension.

III- MESURE DE LA PUISSANCE EN COURANT CONTINU :

III-1- Méthode volt-ampèremétrique :

La puissance fournie à un une portion de circuit AB, ou un récepteur est exprimée par la relation P = U.I. ⇒ Donc pour mesurer cette puissance on utilise un ampèremètre pour mesurer I et un voltmètre pour mesurer U selon deux cas de montages (montage amont et montage aval) :

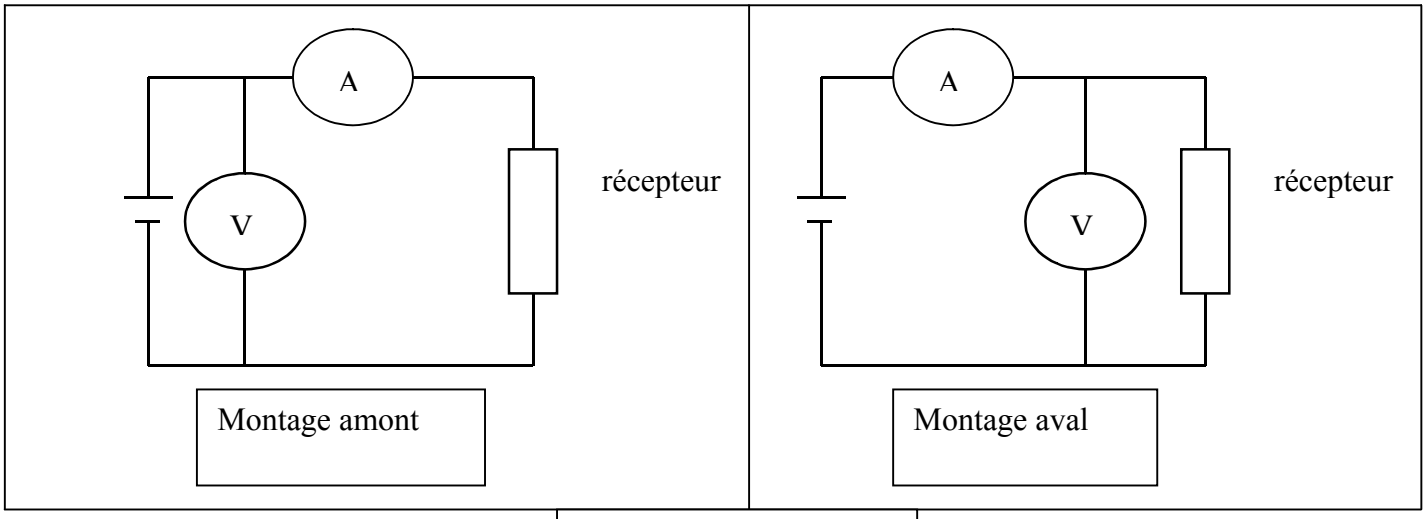


Figure 45 : montages de mesure de la puissance en courant continu.

La précision de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure et du mode du branchement de ces appareils (montage amont et montage aval). En effet :

Pour le montage amont	Pour le montage aval
Pmes = Umes.Imes = P + ra.I^2 ⇒ ΔPméthode = ra.I^2	Pmes = Umes.Imes = P + $\frac{U^2}{Rv}$ ⇒ ΔPméthode = $\frac{U^2}{Rv}$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Ra et Rv : résistances internes de l'ampèremètre et du voltmètre.

L'incertitude instrumentale de la puissance est $\Delta P_{instrument}=(\frac{\Delta U}{U}+\frac{\Delta I}{I}).P_{mes}$

L'incertitude totale sur la puissance est $\Delta P_{tot}=\Delta p_{methode}+\Delta P_{instrument}$

III-2- Méthode directe :

Pour cette méthode on utilise un wattmètre pour mesurer la puissance selon deux cas de montages (montage amont et montage aval) :

- pour le montage amont : ΔP_{tot} = (classe.calibreU.calibreI/100)+r'a.I^2,
- pour le montage aval : ΔP_{tot} = (classe.calibreU.calibreI/100)+ $\frac{u^2}{R'v}$,

avec r'a et R'v : résistances internes du circuit intensité et circuit tension du wattmètre.

IV- MESURE DE LA PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF MONOPHASE :

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

$S=V.I$ $[VA]$: puissance apparente,
$P=V.I.\cos(\varphi)$ $[W]$: puissance active et
$Q=V.I.\sin(\varphi)$ $[VAR]$: puissance réactive

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

IV-1- Mesure de S :

Pour mesurer la puissance apparente S, il faut utiliser un ampèremètre et un voltmètre pour mesurer les valeurs efficaces du courant et de la tension selon le schéma de montage suivant (voir figure 46).

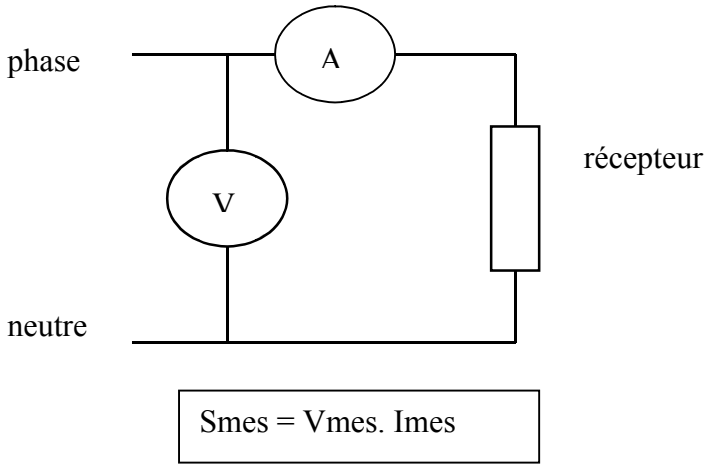


Figure 46 : schéma de principe de mesure de la puissance apparente S.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

La précision de mesure de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure.

IV-2- Mesure de P :

IV-2-1-méthode directe :

Pour mesurer P, il suffit de brancher un wattmètre selon le montage aval (voir figure 47).

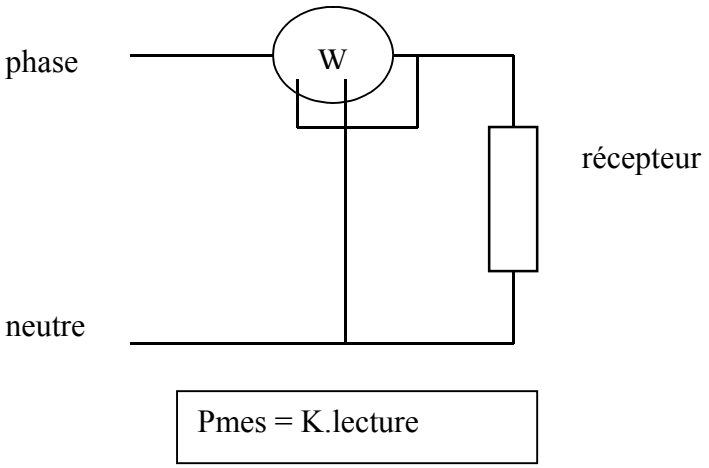


Figure 47 : schéma de principe de mesure de la puissance active P par la méthode directe

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

IV-2-2- méthode de trois ampèremètres :

Le principe de cette méthode consiste à brancher trois ampèremètres suivant la configuration de la figure 48 où R représente une résistance étalon de grande précision.

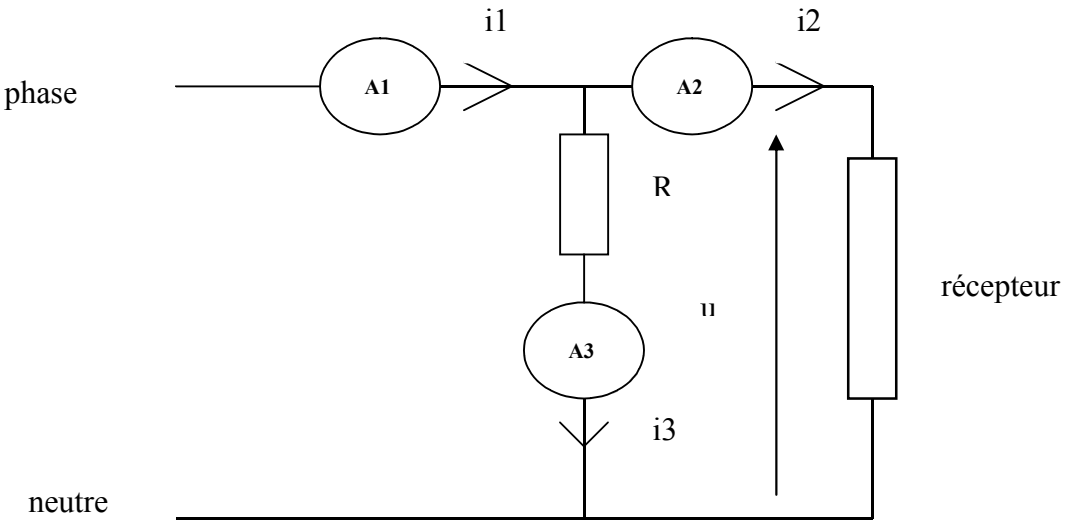


Figure 48 : schéma de principe de la méthode de trois ampèremètres

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Si i1, i2 et i3 désignent les valeurs instantanées des courants circulant dans les trois ampèremètres, on peut écrire :

$$\begin{cases} p=u.i3 \\ i1=i2+i3 \\ i2=\dfrac{u}{R} \end{cases} \text{ et } i1^2=(i2+i3)^2=i2^2+i3^2+2i2.i3 = i2^2+i3^2+2i3.\frac{u}{R} = i2^2+i3^2+2\frac{p}{R}$$

$$\Rightarrow \qquad p=\frac{R}{2}(i1^2-i2^2-i3^2)$$

Or la puissance active d'un récepteur est donnée par $P=\frac{1}{T}\int_0^T pdt=\frac{R}{2T}\int_0^T (i1^2-i2^2-i3^2)dt$

$$P = \frac{R}{2}.(I1^2-I2^2-I3^2)$$ avec I1, I2 et I3 les valeurs efficaces des courants i1, i2 et i3.

La précision de cette méthode dépende de la précision des appareils de mesure utilisés et de la résistance étalon R, ce qui rend cette méthode peut précise. En effet :

$$\frac{\Delta P}{P}=\frac{\Delta R}{R}+\left|\frac{2I1^2}{I1^2-I2^2-I3^2}\right|.\frac{\Delta I1}{I1}+\left|\frac{2I2^2}{I1^2-I2^2-I3^2}\right|.\frac{\Delta I2}{I2}+\left|\frac{2I3^2}{I1^2-I2^2-I3^2}\right|.\frac{\Delta I3}{I3}$$

L'avantage de cette méthode est la mesure de la puissance en haute fréquence et pour des charges de faible facteur de puissance.

IV-2-2- méthode de trois voltmètres :

Cette méthode est analogue à la précédente. Les voltmètres sont branchés selon la figure 49 où R représente une résistance étalon de grande précision.

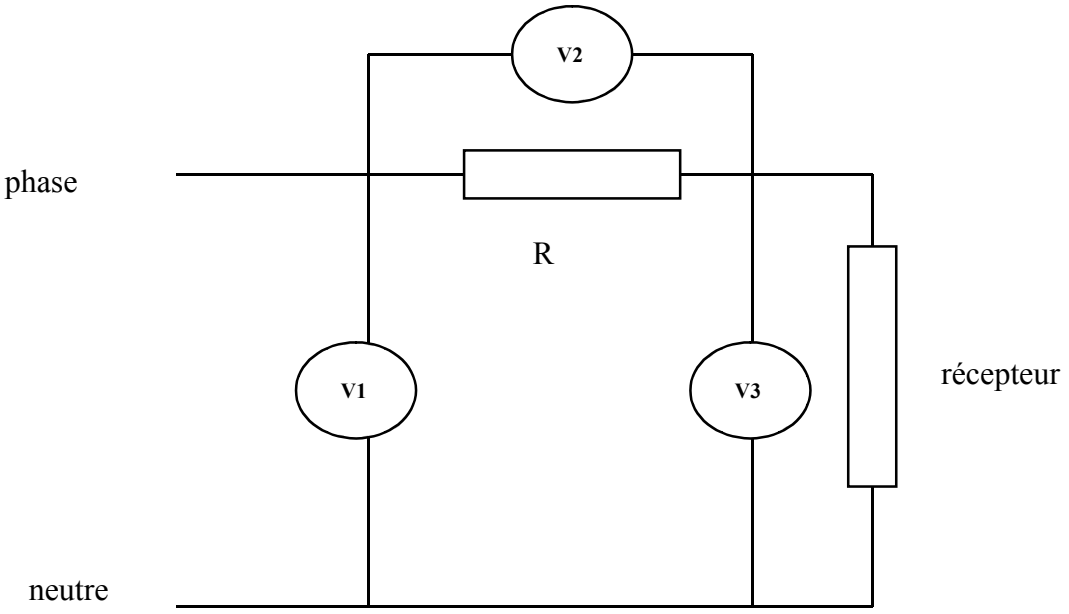


Figure 49: schéma de principe de la méthode de trois voltmètres

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Si u1, u2 et u3 désignent les valeurs instantanées des tensions aux bornes des trois voltmètres, on peut écrire :

$p = u3.\frac{u2}{R}$ et

$u1 = u2+u3 \Rightarrow u1^2 = (u2+u3)^2 = u2^2+u3^2+2u2.u3 \Rightarrow u2.u3 = \frac{1}{2}(u1^2-u2^2-u3^2)$

Or la puissance active d'un récepteur est donnée par $P=\frac{1}{T}\int_0^T pdt=\frac{1}{2.R.T}\int_0^T (u1^2-u2^2-u3^2)dt$

$P = \frac{1}{2R}.(U1^2-U2^2-U3^2)$ avec U1, U2 et U3 les valeurs efficaces des tensions u1, u2 et u3.

La précision de cette méthode dépende de la précision des appareils de mesure utilisés et de la résistance étalon R, ce qui rend cette méthode peut précise. En effet :

$$\frac{\Delta P}{P}=\frac{\Delta R}{R}+\left|\frac{2U1^2}{U1^2-U2^2-U3^2}\right|.\frac{\Delta U1}{U1}+\left|\frac{2U2^2}{U1^2-U2^2-U3^2}\right|.\frac{\Delta U2}{U2}+\left|\frac{2U3^2}{U1^2-U2^2-U3^2}\right|.\frac{\Delta U3}{I3}$$

Ces deux méthodes de mesures de la puissance active permettent également la détermination de la valeur de l'impédance et du facteur de puissance du récepteur.

IV-3- Mesure de Q :

Pour mesurer la puissance réactive Q, il suffit de brancher un ampèremètre, un voltmètre et un wattmètre puis calculer $Q=\pm\sqrt{S^2-P^2}$ en tenant compte du type du récepteur (Q = 0 pour un récepteur résistif, Q>0 pour un récepteur inductif et Q<0 pour un récepteur capacitif).

V- MESURE DE LA PUISSANCE EN TRIPHASE :

Quelque soit le type de couplage du récepteur, les puissances en triphasé s'expriment de la manière suivante :

$S=\sqrt{3}.U.I.=3.V.I$ [VA] : puissance apparente,

$P=\sqrt{3}.U.I.\cos(\varphi)=3.V.I.\cos(\varphi)$ [W] : puissance active et

$Q=\sqrt{3}.U.I.\sin(\varphi)=3.V.I.\sin(\varphi)$ [VAR] : puissance réactive

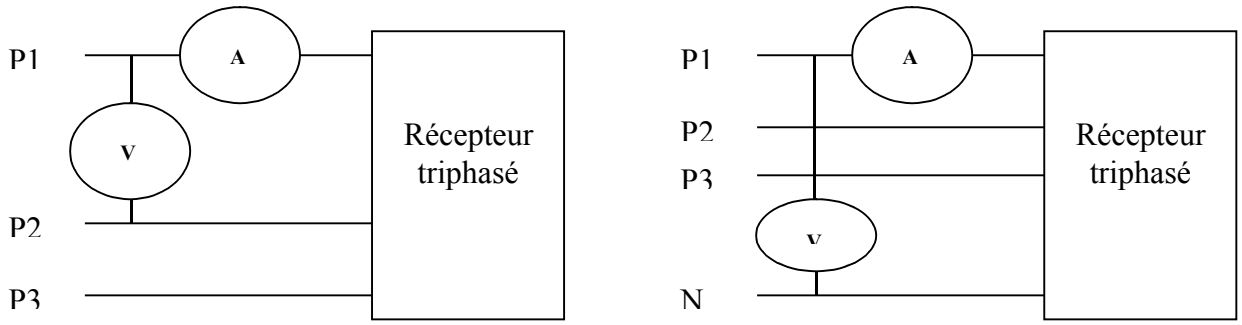
avec V et I : valeurs efficace de la tension simple (entre phase et neutre) et du courant absorbé par le récepteur, φ étant le déphasage entre le courant et la tension et U la tension efficace composée (entre deux phases).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

V-1- Mesure de S :

Pour mesurer S, il suffit de mesurer la tension simple ou composé et le courant I traversant une ligne d'alimentation (on suppose que le système triphasé disponible est équilibré direct) selon la figure 50.

Ligne à 3 fils **Ligne à 4 fils**



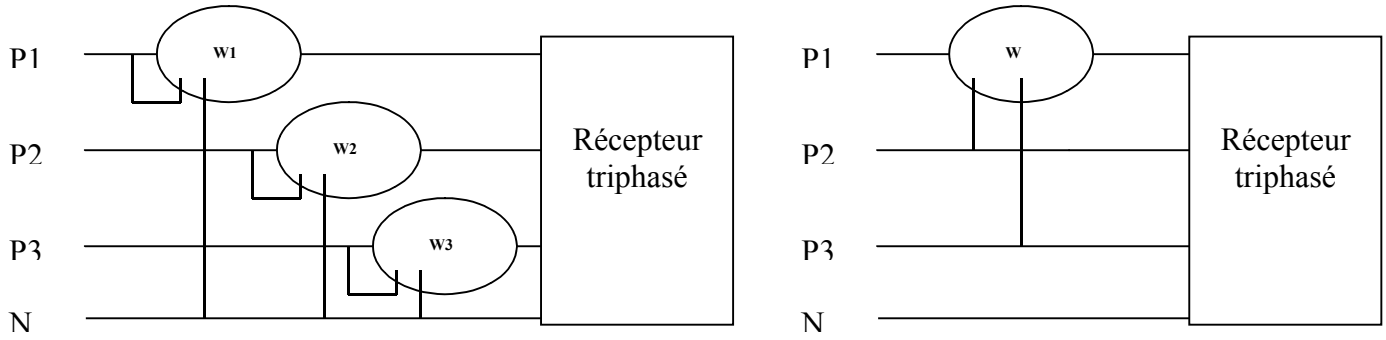
$S=\sqrt{3}.Umes.Imes$ $S=3.Vmes.Imes$

Figure 50 : mesure de la puissance apparente en triphasé.

V-2-Mesure de P et Q :

Pour mesurer les puissances active et réactive on fait appel aux wattmètres.

Mesure de P **Mesure de Q**

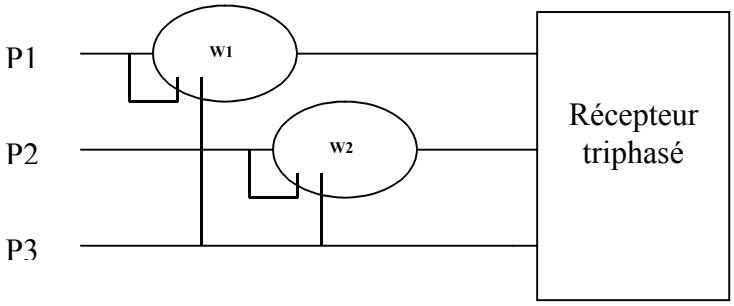


$P=Pmes1+Pmes2+Pmes3$ $Q=\sqrt{3}.Pmes$

Figure 51 : mesure des puissances P et Q en ligne triphasée à 4 fils.

Dans le cas ou on dispose d'une ligne triphasée à 3fils (trois phases uniquement), on utilise la méthode des deux wattmètres selon la figure 52 .

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر



$P=Pmes1+Pmes2$ et $Q=\sqrt{3}.(Pmes1-Pmes2)$

Figure 52 : mesure des puissances P et Q en ligne triphasée à 3 fils.

Remarques :

- La méthode des deux wattmètres ne permet de déterminer la puissance réactive que dans le cas d'un système équilibré en tension et en courant, alors qu'elle fournit la puissance active dans tous les cas de fonctionnement.
- L'application de cette méthode, nécessite de repérer l'ordre de succession des phases (opération non évidente) $\Rightarrow$ il suffit alors de se placer dans le cas de fonctionnement pour le quel le signe de Q est connue et observer les indications des deux wattmètres. ($Q>0$ pour une charge inductive et $Q<0$ pour une charge capacitive).
- Si le calibre I de l'un des deux wattmètres ne permet pas de supporter le courant I $\Rightarrow$ on alimente le circuit d'intensité du wattmètre par un transformateur de courant.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

MESURE DES RESISTANCES

I- INTRODUCTION :

Dans la pratique, il est indispensable, pour assurer la maintenance et le dépannage des appareils et équipements électriques et électroniques de contrôler la continuité d'un circuit et de vérifier le niveau d'isolement d'une installation. Selon leurs caractères d'exploitation et l'ordre de grandeur des résistances à mesurer , ces mesures et contrôles se divisent en deux grandes familles :

- ***les méthodes directes*** : elles sont généralement rapides et efficaces (les appareils utilisés sont portables et toujours prêtes pour des mesures rapides dans les installations et les circuits électriques et électroniques (exemples : ohm mètres analogique et numérique, contrôleur d'isolement)
- les méthodes indirectes : elles se pratiquent généralement dans les laboratoires, à cause de leur caractère statique non portatif et offrent ainsi une meilleure précision (exemples : méthode volt-ampèremétrique, méthode des ponts …)

II- METHODES DIRECTES :

II-1- ohmmètre à déviation :

Le schéma de principe d'un ohmmètre analogique (à aiguille) est donné par la figure 53.

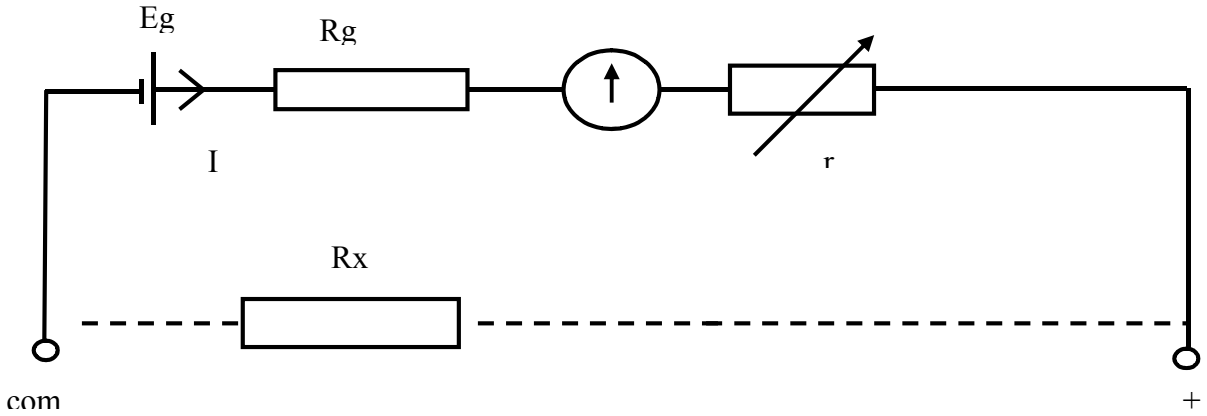


Figure 53 : schéma de principe d'un ohmmètre à aiguille

Comme le montre la figure ci dessus, l'ohmmètre à aiguille est constitué par :

- un équipage à cadre mobile (Rg),
- une résistance ajustable r (pour le réglage externe du zéro),
- une pile interne de force électromotrice Eg alimentant le circuit.

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

Le principe de fonctionnement consiste à mesurer la diminution du courant dans la boucle de mesure lorsqu'on introduit la résistance à mesurer Rx. En effet, le courant I parcourant le circuit à pour expression :

$$I=\frac{Eg}{Rg+r+Rx}$$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Or la déviation de l'aiguille de l'ECM (équipage à cadre mobile) est proportionnelle à I par la relation $d=k.I=k.\frac{Eg}{Rg+Rx+r}$.

Si on court-circuite les bornes de l'appareil, l'appareil serait parcouru par un courant maximal Ig et la déviation de l'aiguille est donc maximale soit $dcc=k.Ig=k.\frac{Eg}{Rg+r}$. Ces deux dernières équations permettent d'écrire $\frac{dcc}{d}=\frac{Ig}{I}=\frac{Rg+Rx+r}{Rg+r}=1+\frac{Rx}{Rg+r} \Rightarrow Rx=kEg.(\frac{1}{d}-\frac{1}{dcc})$

Rx est donc une fonction hyperbolique de d, c'est pour cette raison que l'échelle d'un ohmmètre est non linéaire.

Remarques :

- Le zéro de l'échelle d'un ohmmètre correspond à la déviation maximale de l'aiguille (cas d'un court circuit),
- La déviation nulle de l'aiguille correspond à une résistance infinie (les deux bornes de l'appareil sont à l'air libre).

Mode opératoire : La mesure se fait en deux étapes :

- 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 a dire l'aiguille se place devant la graduation zéro de l'échelle de l'ohmmètre.
- 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.

La précision de cette méthode dépend intrinsèquement de la précision des composants internes de l'appareil (Eg, Rg et r) qui est généralement entre 3% et 5%.

II-2- Ohmmètre numérique :

Comme le montre la figure 54, l'ohmmètre numérique est constitué par un générateur électronique de courant et un voltmètre à courant continu dont l'indication est affichée d'une manière numérique (digitale).

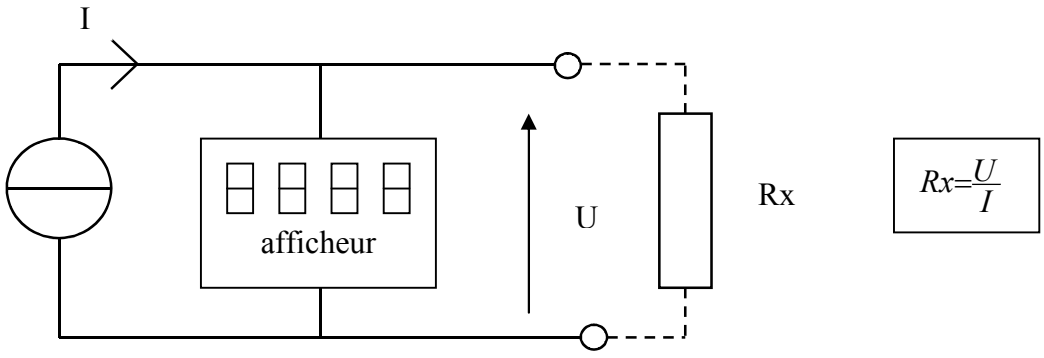


Figure 54 : schéma de principe d'un ohmmètre numérique.

Si le courant de mesure I est constant, on voit que la résistance inconnue Rx est directement proportionnelle à la tension U entre ses bornes. Il suffit alors de convertir l'indication du voltmètre en ohms (Ω).

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Les appareils actuels sont plus élaborées et utilisent des amplificateurs opérationnels, ce qui permet d'envoyer un courant de mesure plus faible et plus stable. Avec un faible courant, les phénomènes thermoélectriques de contact sont négligeable, donc la mesure est plus précise.

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

± (…% of reading + … digit) digit : résolution de l'appareil.

III- **METHODES INDIRECTES** :

III-1- Méthode volt-ampéremètrique :

Il s'agit, par l'application de la loi d'ohm, d'évaluer rapidement et avec des moyens simples la valeur des résistances passives pendant leur fonctionnement. On applique une tension constante U au borne de la résistance à mesurer et par la suite on mesure le courant I et la tension U et on calcule la résistance $Rx=\frac{U}{I}$.

Pour appliquer cette méthode deux montages sont possibles : le montage amont et le montage aval (voir figure 55).

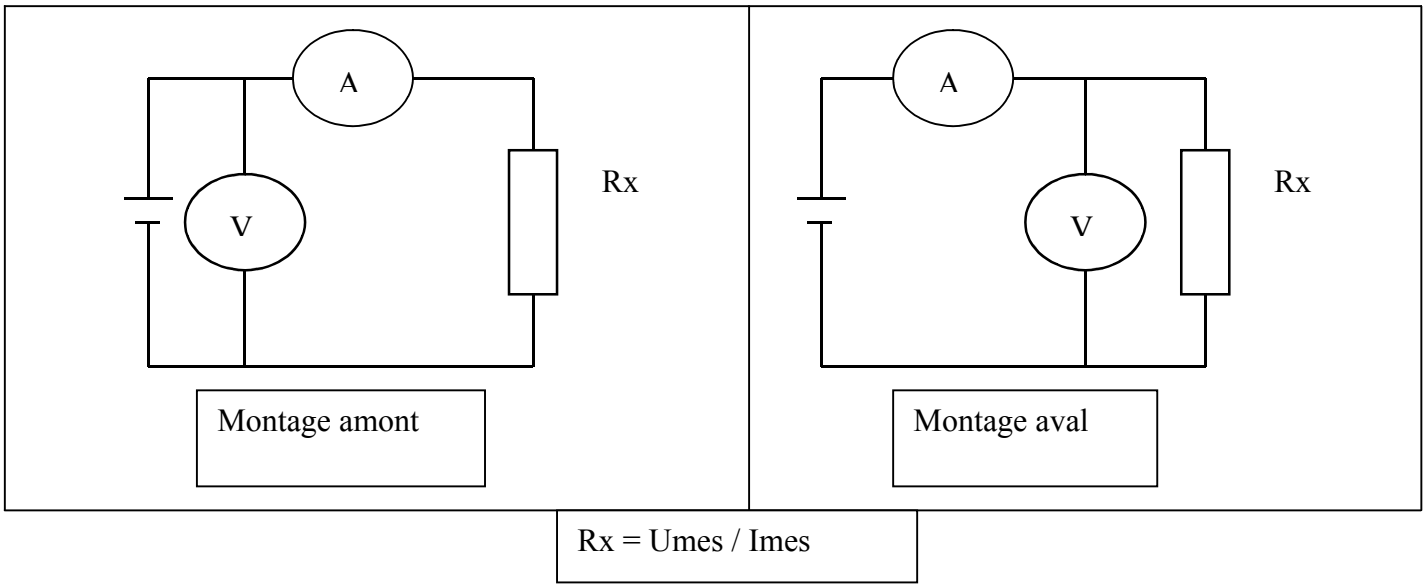


Figure 55 : mesure des résistances par la méthode volt-ampéremètrique.

La précision de mesure de cette méthode dépend de la précision des appareils de mesure utilisés et du montage de mesure (erreur méthodique), en effet :

- **Pour le montage amont :**

$\begin{cases} Umes=Ux+raI \\ Imes=I \end{cases} \Rightarrow Rxmes=\frac{Ux}{I}+ra \Rightarrow Rxmes=Rx+ra \Rightarrow \Delta Rx)meth= ra$ avec ra :résistance interne de l'ampèremètre utilisé.

ΔRx)meth est d'autant plus faible que ra est très faible (tend vers zéro).

- **Pour le montage aval :**

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

$$\begin{cases} Umes=Ux \\ Imes=I+Iv \end{cases} \Rightarrow \quad Rxmes=\frac{Ux}{I+Iv}=\frac{1}{\frac{I}{Ux}+\frac{Iv}{Umes}} \quad \Rightarrow \quad Rxmes=Rx//Rv \Rightarrow$$

$$\Delta Rx)meth=|Rxmes-Rx|=\frac{Rx^{2}}{Rx+Rv} \Rightarrow \frac{\Delta Rx}{Rx})meth=\frac{Rx}{Rx+Rv}$$ avec Rv :résistance interne du voltmètre utilisé.

$\frac{\Delta Rx}{Rx})meth=\frac{Rx}{Rx+Rv}$ est d'autant plus faible que Rv est très grande (tend vers l'infini).

Remarques :

- Si on désire que l'incertitude méthodique du montage amont soit au plus égale à 1 %, il faut que Rx > 100 ra. De ce fait, cette méthode est non valable pour des faibles résistances. Sur le plan pratique cette méthode est applicable pour des résistances supérieurs à quelques centaines d'ohms (≈ 500 Ω).
- Si on désire que l'incertitude méthodique du montage aval soit par exemple au plus égale à 1 %, il faut que Rv > 100 Rx. De ce fait, cette méthode est non valable pour des grandes résistances. Sur le plan pratique, cette méthode est applicable pour des résistances de quelques dizaines d'ohms jusqu'à quelques centaines d'ohms (≈ 200 Ω).
- Entre 200 Ω et 500 Ω, les deux montages sont de performances comparables.

III-2- Méthode des ponts :

III-2-1- Pont de wheatstone :

Ce dispositif permet une mesure rapide et précise des résistances, généralement dans le domaine des valeurs moyennes (de quelques Ω à quelques dizaines de KΩ).

Le schéma de principe d'un tel pont est donné par la figure 56.

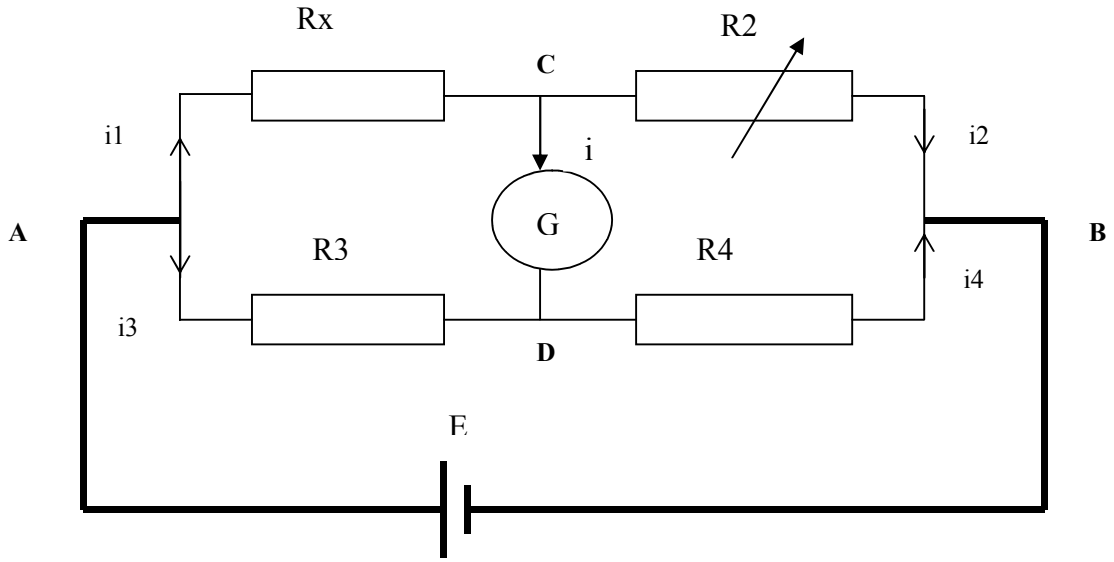


Figure 56 : schéma de principe du pont de weatstone.

Ce pont, constitué de 4 résistances et d'un galvanomètre, alimenté par une source de tension continue E. On agit sur la résistance variable R jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (i = 0 c'est

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

à dire UCD = 0 ⇔Uc = Ud), ce qui permet de déterminer la résistance inconnue Rx. En effet, à l'équilibre du pont on peut écrire :

$\begin{cases} i1=i2 \quad et \quad UAC=UAD \\ i3=i4 \quad et \quad UCB=UDB \end{cases}$, ce qui donne $Rx.R4=R2.R3$

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

A l'équilibre du pont on peut écrire $Rx=\frac{R3}{R4}.R2=K.R2$ avec $K=\frac{R3}{R4}$.

Sur le plan pratique, R3 et R4 sont deux boites de résistances variants par sauts (1 – 10 – 100 – 1000 Ω) alors que R2 est une boite à 4 ou 5 décades (x0.1 ; x1 ; x10 ; x100 ; x1000Ω).

Mode opératoire :

L'exploitation du pont se fait en deux étapes :

- On choisit le rapport $K=\frac{R3}{R4}$ de façon à avoir le maximum de chiffres significatif sur la mesure de Rx,
- On règle R2 jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (c'est à dire i = 0),
- On calcule $Rx=\frac{R3}{R4}.R2=K.R2$.

III-2-2- Pont double de THOMSON :

Le pont double de THOMSON est destiné à la mesure des faibles résistances (de 10^{-1} à 10^{-3} Ω) ce qui fait que même la résistance des fils de connexion peut fausser la mesure. Pour éviter les incertitudes introduites par les fils de connexion et par les contacts (dont les résistances sont de l'ordre de quelques mΩ), on emploie des résistances à 4 bornes constituées de 2 résistances jumelées (liées mécaniquement) selon le schéma de la figure 57 :

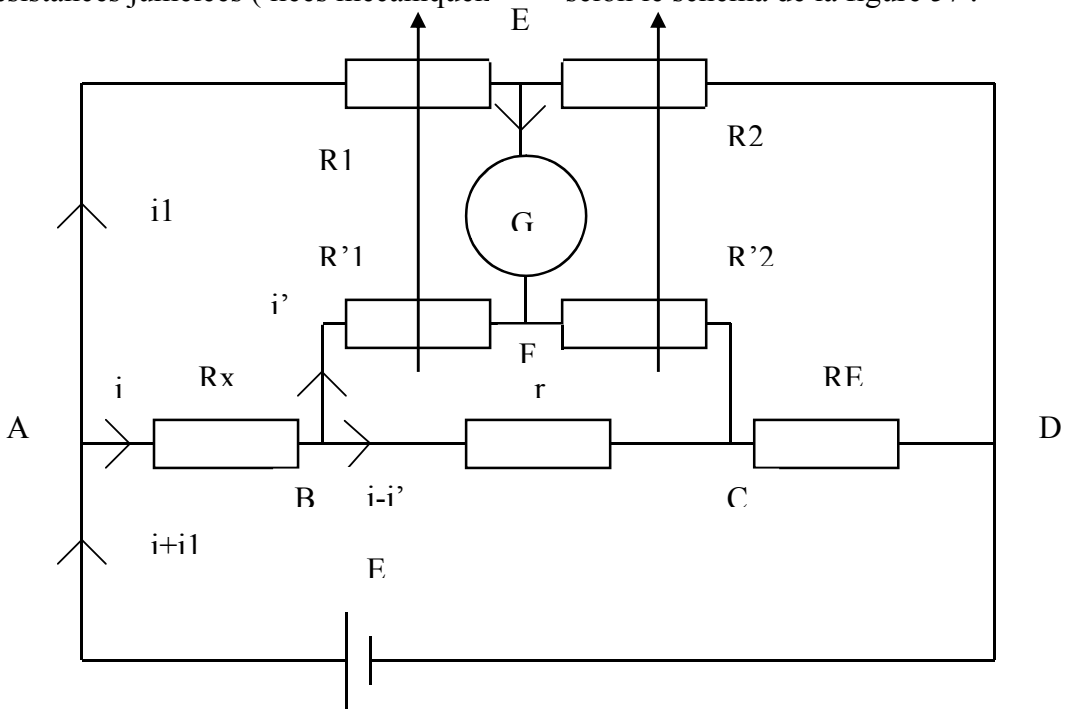


Figure 57 : schéma de principe du pont de THOMSON

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

A l'équilibre du pont (ig = 0 $\Leftrightarrow$ UE = UF) on peut écrire :

$\begin{cases} UAE=UAB+UBF \\ UED=UFC+UCD \end{cases}$ donc $\begin{cases} R1.i1=Rx.i+R'1.i'1 \\ R2.i1=R'2.i'1+RE.i \end{cases}$ d'où $Rx=RE.\frac{R1}{R2}+\frac{(R'2.R1-R2.R'1)}{R2}.\frac{i'1}{i}$

Si la résistance entre les points B et C est r, alors la mille BFC permet d'écrire :

$i'1.(R'1+R'2)=r.(i-i'1) \Rightarrow \frac{i'1}{i}=\frac{r}{R'1+R'2+r} \Rightarrow Rx=RE.\frac{R1}{R2}+\frac{(R'2.R1-R2.R'1)}{R2}.\frac{r}{R'1+R'2+r}$

Si on prend dans la manipulation R'2.R1 – R2.R'1 = 0, on obtient finalement $Rx=RE.\frac{R1}{R2}$.

En pratique les résistances R1 et R'1 d'une part et R2 et R'2 d'autre part sont jumelées (commandées mécaniquement par le même commutateur) et on a R1 = R'1 et R2 = R'2.

Les résistances R1 et R'1 sont formées par des boites de résistances variables par saut de 5 décades (x0.1 ; x1 ; x10 ; x100 ; x1000Ω) alors que les résistances R2 et R'2 sont formées par des boites de résistances variables par saut à 4 décades (x0.1 ; x1 ; x10 ; x100Ω).

La résistance RE est de même ordre de grandeur que Rx.

Mode opératoire : La mesure se fait en trois étapes :.

- on choisit R2 = R'2,
- on fait varier R1=R'2 jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (ig = 0),
- on calcule $Rx=RE.\frac{R1}{R2}$.

IV- MESURE DE RESISTANCE DE TERRE :

La résistivité d'un terrain dépend de la nature de celui-ci. Elle varie avec la température et le taux d'humidité. Le tableau 8 donne des valeurs moyennes de résistivités pour quelques terrains. La valeur de la résistivité peut être estimée par la mesure de la résistance de prise de terre.

Nature du terrain	Résistivité (Ω.m)
Tourbe humide	5 à 100
Argile compact	100 à 200
Sable	200 à 300
granits	1500 à 10000

Tableau 8 : Résistivité des sols.

Une prise de terre est constituée par une pièce ou un ensemble de pièces conductrices, enfouies dans le sol et assurant une liaison électrique avec la terre. L'efficacité d'une prise de terre est fonction de sa résistance. La valeur de la résistance de terre nécessaire pour assurer la protection d'une installation dépend de la sensibilité du disjoncteur différentiel au quel est associé. (voir tableau 9).

Résistance de la prise de terre pour une tension limite de 50 V.	**Valeur maximale du courant différentiel résiduel assigné du dispositif de protection.**
100 Ω	500 mA
166 Ω	300 mA
500 Ω	100 mA
> 500 Ω	< 30 mA

Tableau 9 : relation entre résistance de terre et courant maximal différentiel de protection.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Pour mesurer la résistance d'une prise de terre il existe plusieurs méthodes :

IV-1- méthode des trois pôles – telluromètre.

Cette méthode nécessite l'utilisation de deux prises de terres auxiliaires (voir figure 58).

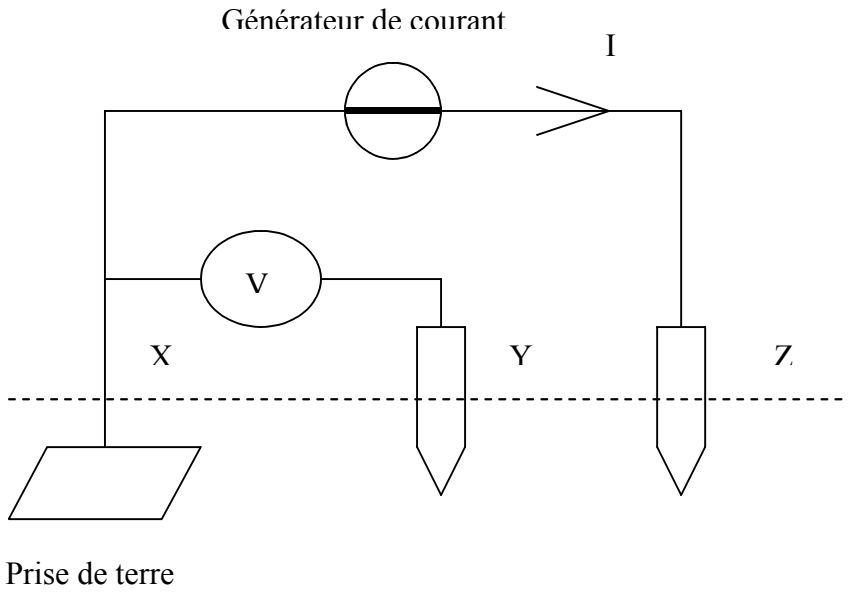


Figure 58 : mesure de résistance de terre par la méthode de telluromètre.

La prise de terre Y sert de référence de potentiel, la prise de terre Z reçoit le courant I. Le voltmètre (V) du telluromètre mesure la chute de tension due à la résistance de terre et affiche directement la valeur de cette résistance.

IV-2- Mesure de la résistance de boucle de terre.

Cette méthode est utilisable pour les installations où le neutre est directement relié à la terre. Elle consiste à mesurer, avec un ohmmètre de boucle la résistance entre le point de terre choisi et un conducteur du réseau, lui même relié à la terre par l'intermédiaire du transformateur de distribution (voir figure 59).

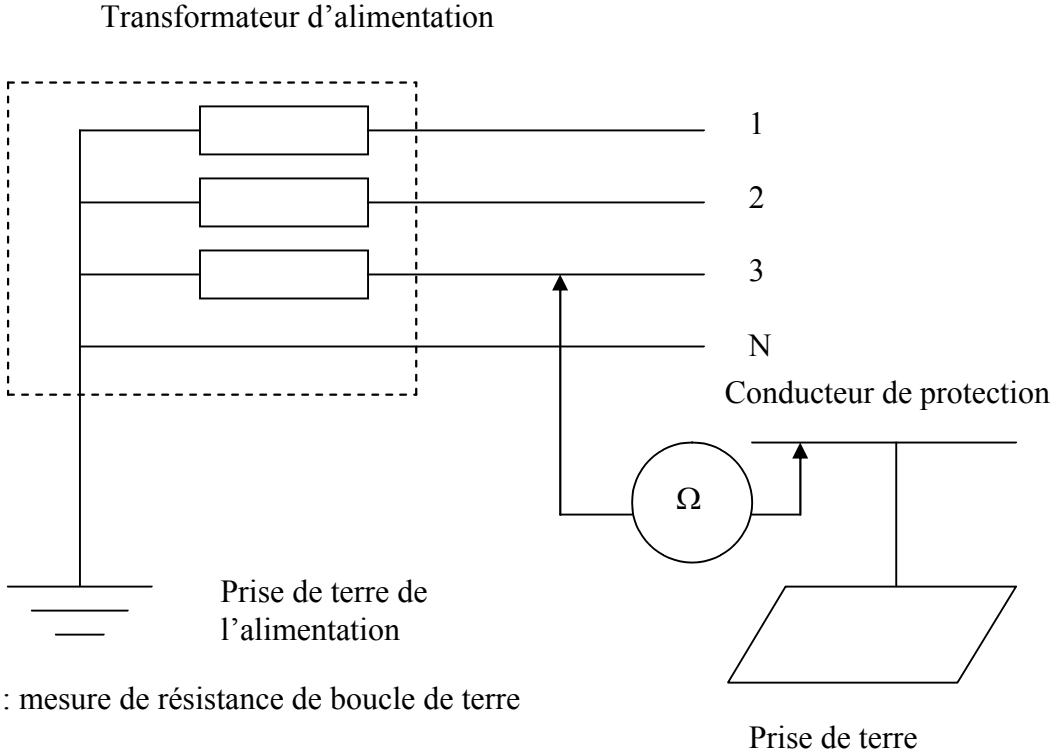


Figure 59 : mesure de résistance de boucle de terre

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Cette méthode est adaptée aux sites urbains où il est souvent difficile de placer des points de terre auxiliaires. Elle présente une grande facilité de mise en œuvre. Il suffit de connecter l'ohmmètre de boucle à une prise secteur et de lire le résultat.

IV-3- Mesure à la pince de terre.

Semblable à la pince ampère métrique, La pince de terre mesure directement la résistance de boucle de terre en se plaçant autour du conducteur de l'installation électrique (voir figure 60).

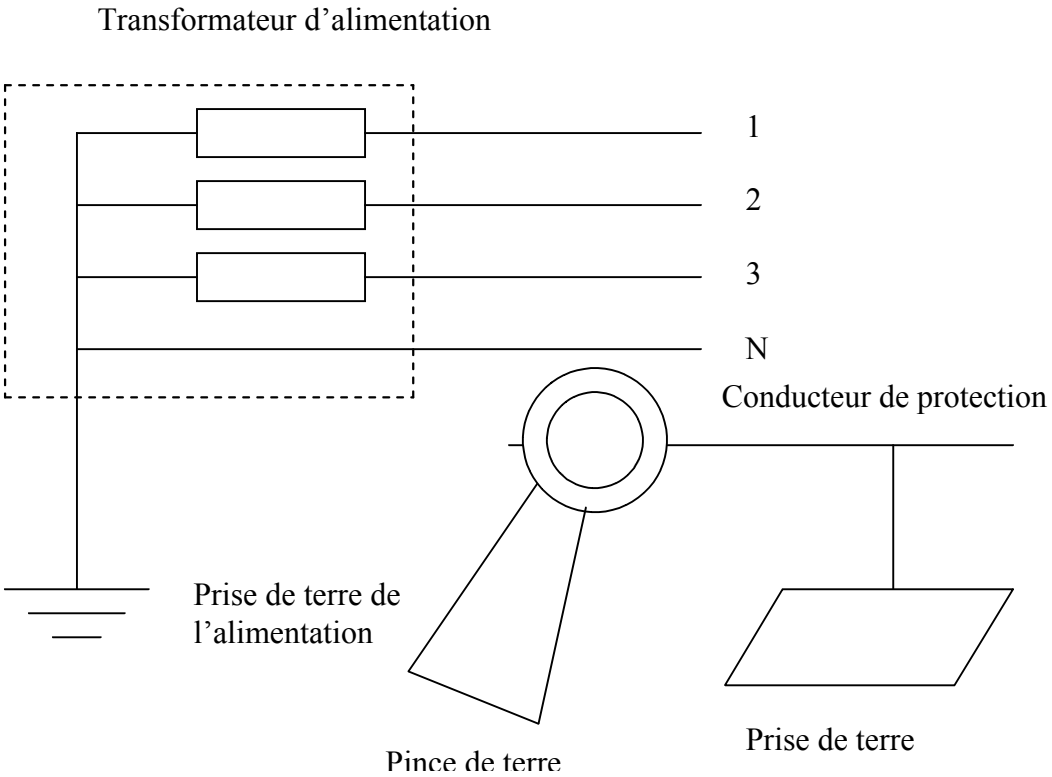


Figure 60 : mesure de résistance de terre par la pince de terre.

V- MESURE D'ISOLEMENT :

La mesure de la résistance d'isolement doit être faite :

- entre les conducteurs actifs pris deux à deux,
- entre chaque conducteur actif et la terre,
- entre tous les conducteurs actifs reliés ensemble à la terre.

La valeur minimale de la résistance d'isolement dépend de la tension d'alimentation de l'installation (voir tableau 10).

Tension nominale de l'installation	Tension continue de test	Résistance d'isolement
TBTS	250 V	> 0.25 MΩ
< 500 V	500 V	> 0.5 MΩ
> 500 V	1000 V	> 1 MΩ

Tableau 10 : tensions de test et résistance d'isolement.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

La mesure se fait au moyen d'un contrôleur d'isolement qui délivre la tension de 250 V, 500 V ou 1000 V sous la quelle est faite la mesure de résistance (voir figure 61).

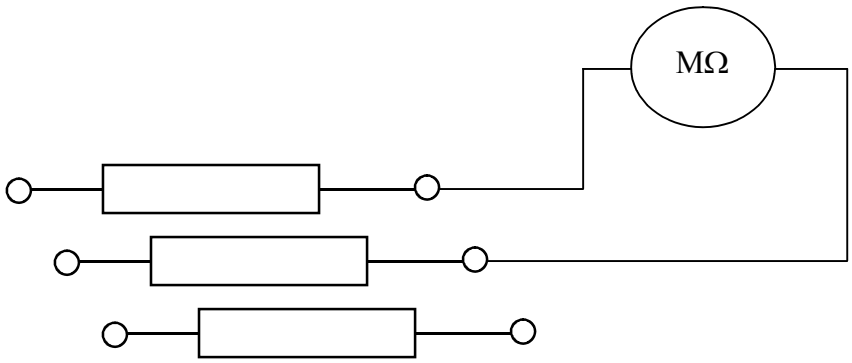


Figure 61 : mesure d'isolement entre les bobinages d'un moteur triphasé.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

LES ERREURS DE MESURE

I- INTRODUCTION :

Les seuls mesurandes dont la valeur est parfaitement connue sont les grandeurs étalons puisque leur valeur est fixée par convention. La valeur de tout autre mesure ne peut être connue qu'après traitement par une chaîne de mesure. L'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte est l'erreur de mesure : celle ci est due en particulier aux imperfections des appareils de mesure. L'erreur de mesure ne peut être donc qu'estimée, cependant une conception rigoureuse de la chaîne de mesure et du choix des instruments de mesure permet de réduire l'erreur de mesure et donc l'incertitude sur la valeur vraie.

II- NATURE DES ERREURS :

II-1- **les erreurs systématiques** :

Ce sont des erreurs reproductibles reliées à leur cause par une loi physique, donc susceptible d'être éliminées par des corrections convenables. Parmi ces erreurs on cite :

- erreur de zéro (offset),
- L'erreur d'échelle (gain) : c'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.
- L'erreur de linéarité : la caractéristique n'est pas une droite,
- L'erreur due au phénomène d'hystérésis : lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente,
- L'erreur de mobilité : cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.

II-2- Les erreurs aléatoires :

Ce sont des erreurs non reproductibles, qui obéissent à des lois statistiques.

II-3- Les erreurs accidentelles :

Elles résultent d'une fausse manœuvre, d'un mauvais emploi ou de disfonctionnement de l'appareil. Elles ne sont généralement pas prises en compte dans la détermination de la mesure.

III- CARACTERISTIQUES DES INSTRUMENTS DE MESURE :

III-1- Gamme de mesure - étendue de mesure :

La gamme de mesure, c'est l'ensemble des valeurs du mesurande pour les quelles un instrument de mesure est supposée fournir une mesure correcte.

L'étendue de mesure correspond à la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la gamme de mesure.

Pour les appareils à gamme de mesure réglable, la valeur maximale de l'étendue de mesure est appelée pleine échelle.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

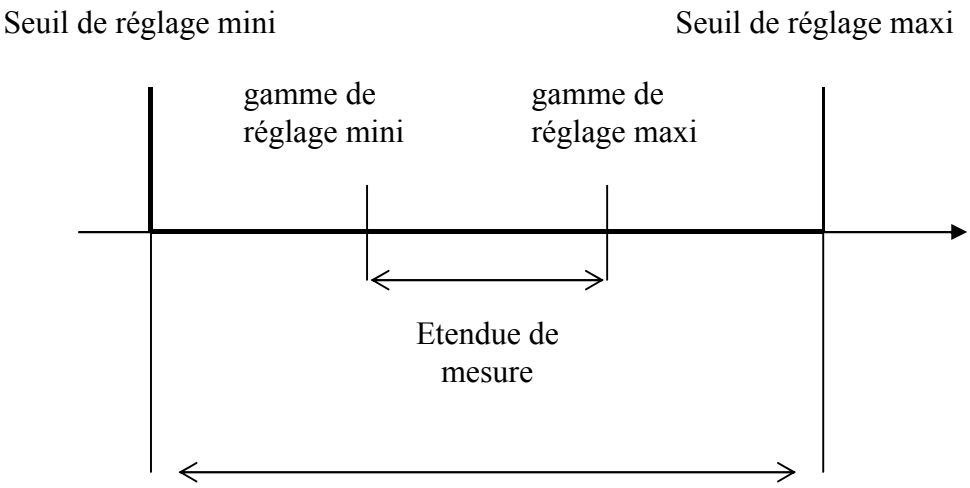


Figure 62 : gam Pleine échelle endue de mesure

III-2- Courbe d'étalonnage :

Elle est propre à chaque appareil. Elle permet de transformer la mesure brute en mesure corrigée. Elle est obtenue en soumettant l'instrument à une valeur vraie de la grandeur à mesurer, fournie par un appareil étalon, et en lisant avec précision la mesure brute qu'il donne.

III-3- Sensibilité :

Soit X la grandeur à mesurer, x l'indication ou le signal fourni par l'appareil. A toutes valeur de X, appartenant à l'étendue de mesure, correspond une valeur de x (x = f(X)). La sensibilité autour d'une valeur X0 de X est $m=\frac{dx}{dX}(X0)=f'(X0)$. Si la fonction est linéaire, la sensibilité de l'appareil est constante. Lorsque x et X sont de même nature, m qui est alors sans dimension peut être appelée gain qui s'exprime généralement en dB [gain (dB) = 20log(m)].

III-4- Classe de précision – résolution :

La classe de précision d'un appareil de mesure correspond à la valeur en % du rapport entre la plus grande erreur possible sur l'étendue de mesure :

$$\text{classe}(\%) = 100.\frac{\text{plus grande erreur possible}}{\text{étendue de mesure}}$$

Lorsque l'appareil de mesure est un appareil numérique, on définit la résolution par la formule suivante :

$$\text{résolution} = \frac{\text{étendue de la mesure}}{\text{nombre de points de la mesure}}$$

III-5- Rapidité, temps de réponse :

C'est l'aptitude d'un instrument de mesure à suivre les variations de la grandeur à mesurer. Dans le cas d'un échelon de la grandeur entraînant la croissance de la mesure

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

on définit le **temps de réponse à 10 %** : c'est le temps nécessaire pour que la mesure croisse, à partir de sa valeur initiale jusqu'à rester entre 90 % et 110 % de sa variation totale.

III-6- Bande passante :

La bande passante est la bande de fréquence pour laquelle le gain de l'instrument de mesure est compris entre deux valeurs.
Par convention, le signal continu à une fréquence nulle.

III-7- Grandeur d'influence et compensation :

On appelle grandeur d'influence, toutes les grandeurs physiques autres que la grandeur à mesurer, susceptibles de perturber la mesure. Généralement, la température est la grandeur d'influence qui le plus souvent rencontré.

IV- LES INCERTITUDES DE MESURES.

On appelle incertitude de mesure ΔX, la limite supérieur de la valeur absolue l'écart entre la valeur mesurée et la valeur exacte de la mesurande. En pratique on ne peut qu'estimer cette incertitude. On distingue deux types d'incertitudes : **incertitude absolue ΔX**, qui s'exprime en même unité que la grandeur mesurée et l'**incertitude relative** $\frac{\Delta X}{X}$ qui s'exprime généralement en pourcentage (%).

IV-1-incertutude absolue instrumentale :

L'incertitude instrumentale est l'incertitude due à l'appareil de mesure . Elle est fonction de la précision de l'appareil et elle est présentée de la manière suivante :
Δ(symbole de la grandeur mesurée), exemples : ΔU, ΔI, ΔP, ΔR ou d'une manière générale $\Delta(X)$ avec X : symbole de la grandeur mesurée.

Cette incertitude instrumentale est donnée par les expressions suivantes :
$\Delta(X)\text{inst} = \frac{\text{classe.calibre}}{100}$ pour un appareil à déviation et **Δ(X)inst = ± (…% de la lecture + …dgt)** pour un appareil de mesure numérique.

Remarque : Pour les appareils à déviation,i l n'est pas tenu de calculer l'incertitude sur la lecture, car d'après la norme NFC 42100, cette incertitude est déjà prise en considération dans la classe de précision de l'appareil.

IV-2- Incertitude absolue de la méthode :

Cette incertitude sera calculer lorsqu'il y a plus qu'une manière de branchement des appareils de mesure. Cette incertitude est notée **Δ(X)méth**.

IV-3- Incertitude absolue totale :

C'est la somme de l'incertitude instrumentale avec celle de méthode. Cette incertitude est notée **Δ(X)tot = Δ(X)inst + Δ(X)méth**.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

V- CALCUL D'INCERTITUDE ABSOLUE INSTRUMENTALE SUR UN RESULTAT DE MESURE (propagation des erreurs).

La grandeur mesurée s'obtient par la mesure de 2 ou plusieurs grandeurs.

V-1- Règle générale :

Supposons que des mesures ont donné des valeurs x, y et z avec des incertitudes absolues instrumentales **Δx**, **Δy** et **Δz**. Considérons la fonction f(x,y,z) dont on veut calculer **Δf**.

1ère étape : on exprime la différentielle $df = \frac{\partial f}{\partial x}.dx + \frac{\partial f}{\partial y}.dy + \frac{\partial f}{\partial z}.dz$

2ème étape : on calcule Δf, en faisant une majoration de df : $\Delta f = \left|\frac{\partial f}{\partial x}\right|\Delta x + \left|\frac{\partial f}{\partial y}\right|\Delta y + \left|\frac{\partial f}{\partial z}\right|\Delta z$

Lorsque la fonction f, se présente sous forme d'un produit ou d'un quotient, on est conduit à des calculs un peut plus simple en utilisant la différentielle logarithmique.

Exemple : $f(x,y) = \frac{x - y}{x + y}$

1ère étape : on calcule $\ln(f) = \ln(x - y) - \ln(x + y)$

2ème étape : on exprime la différentielle $\frac{df}{f} = \frac{d(x - y)}{x - y} + \frac{d(x + y)}{x + y}$, la faute à ne pas commettre à ce stade est de majorer tout de suite l'erreur relative, ce n'est qu'après avoir regroupés tous les termes en dx et en dy qu'on à le droit de majorer.

$$\frac{df}{f} = \frac{d(x) - d(y)}{x - y} - \frac{d(x) + d(y)}{x + y} = \frac{dx}{x - y} - \frac{dy}{x - y} - \frac{dx}{x + y} - \frac{dy}{x + y}$$

$$= dx.\left(\frac{1}{x - y} - \frac{1}{x + y}\right) - dy.\left(\frac{1}{x - y} + \frac{1}{x + y}\right)$$

$$= dx.\left(\frac{2y}{x^2 - y^2}\right) - dy.\left(\frac{2x}{x^2 - y^2}\right)$$

3ème étape : on calcule $\frac{\Delta f}{f} = \left|\frac{2y}{x^2 - y^2}\right|\Delta x - \left|\frac{2x}{x^2 - y^2}\right|\Delta y$

V-2- Règles particulières :

- Somme : $f(x,y) = x + y \Rightarrow df = dx + dy \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
- Différence : $f(x,y) = x - y \Rightarrow df = dx - dy \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
- Produit : $f(x,y) = x.y \Rightarrow df = y.dx + x.dy \Rightarrow \Delta f = y.\Delta x + x.\Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
- Quotient :

$$f(x,y) = \frac{x}{y} \Rightarrow df = \frac{1}{y}.dx + \left(-\frac{x}{y^2}\right).dy \Rightarrow \Delta f = \frac{1}{y}.\Delta x + \frac{x}{y^2}.\Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$$

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

Conclusion :

Dans le cas d'une somme ou d'une différence **les incertitudes absolues s'ajoutent**.

Dans le cas d'un produit ou d'un quotient **les incertitudes relatives s'ajoutent**.

VI- PRESENTATION D'UN RESLTAT DE MESURE ET CHIFFRES SIGNIFICATIFS.

VI-1- Chiffres significatifs :

Les chiffres qui veulent vraiment dire quelques chose sont dits significatifs, ce sont eux qui servent à écrire un nombre, au delà de ces chiffres, la précision qu'apporterait d'autres chiffres serait illusoire.

On rappelle que tous les zéros à gauche d'un nombre ne sont pas significatifs, par contre les zéros droite d'un nombre sont significatifs.

Exemple : 2006 ---→ 4 chiffres significatifs,
187.50 ---→ 5 chiffres significatifs
0.52 ---→ 2 chiffres significatifs
0.200 ---→ 3 chiffres significatifs

Remarque : les zéros placés à la fin d'un nombre sans virgule, peuvent être ou ne pas être significatifs. Pour sortir de cette ambiguïté, on peut changer d'unité et faire apparaître des virgules.

Exemple : 200 mA ----→ 0.2 A (1 chiffre significatif)
----→ 0.20 A (2 chiffres significatifs)
----→ 0.200 A (3 chiffres significatifs)

Pour avoir un nombre correct de chiffres significatifs, il faut arrondir certains résultats et on garde le nombre de chiffres significatifs désiré :

- si le chiffre délaissé $\in \{5, 6, 7, 8, 9\}$, on ajoute une unité au dernier chiffre signification (avec retenue éventuelle),
- si le chiffre délaissé $\in \{0, 1, 2, 3, 4\}$, on garde le dernier chiffre sans changement.

Exemple : 527.3975 V s'arrondit à :

----→ 527.398 V (6 chiffres significatifs)
----→ 527.40 V (5 chiffres significatifs)
----→ 527.4 V (4 chiffres significatifs)
----→ 527 V (3 chiffres significatifs)
----→ 0.53 KV (2 chiffres significatifs)
----→ 0.5 KV (1 chiffres significatifs)

VI-2- Présentation d'un résultat de mesure :

On peut écrire un résultat de mesure de deux manières différentes, en utilisant l'incertitude absolue ou l'incertitude relative, tout en respectant le nombre de chiffres significatifs.

X = (Xmes ± ΔXtot) unité de mesure

X = (Xmes (unité de mesure) ± $\frac{\Delta Xtot}{X}$ (%))

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر

En général, un résultat de mesure donné avec **3 chiffres significatifs** suffit pour les mesures ordinaires en électricité. Ce niveau de précision correspond d'une part à la précision d'un appareil de mesure courant, d'autre part au niveau de bruit électronique qui se superpose à la grandeur mesurée.

Il est conseiller d'effectuer les calculs intermédiaires avec un nombre de chiffres significatifs plus élevé (les calculatrices font cela sans problème), pour éviter les arrondis de calcul, par contre il faut arrondir le résultat final au même nombre de chiffres significatifs que celui adopté lors de la mesure initiale.

Un résultat de mesure ne peut pas être plus précis que la moins précise des mesures qui à permis son calcul.

Une incertitude est donnée avec au plus **deux chiffres significatifs** et n'est jamais écrite avec une précision plus grande que le résultat.

WWW.DZPEN.COM | قلم الجزائر