

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid  
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique**

**Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen  
Faculté de Technologie**



**Département de Télécommunication**

**Domaine :**

**LMD : 2<sup>ème</sup> Année - Semestre 4**

**Cours**

**Mesures Electriques et Electroniques**

**Dr. BOURI Sihem**







**Année universitaire 2018 / 2019**



## TABLE DES MATIERES

Avant-propos .....	7
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les mesures</b> .....	<b>8</b>
1.1 Introduction .....	8
1.2 Métrologie .....	8
1.3 Termes de métrologie .....	9
1.4 Grandeurs électriques et unités de mesures .....	10
1.4.1 Grandeurs et unités de base dans le système SI.....	10
1.4.2 Equivalences des unités traditionnelles et les unités légales .....	11
1.4.2.1 Multiples et sous multiples des unités .....	12
1.5 Appareils de mesure .....	13
1.6 Conclusion.....	13
<b>Chapitre 2 : Les erreurs de mesure</b> .....	<b>14</b>
2.1 Introduction .....	14
2.2 Classification des erreurs.....	14
2.2.1 Les erreurs systématiques.....	14
2.2.1.1 La méthode de mesure (Erreur systématique de la méthode).....	14
2.2.1.2 L'opérateur (Erreur systématiques de lecture) .....	14
2.2.1.3 L'appareil de mesure (Erreur systématique instrumentale).....	14
2.2.2 Les erreurs accidentelles.....	15
2.2.2.1 L'opérateur .....	15
2.2.2.2 L'appareil .....	15
2.2.2.3 Le montage .....	15
2.2.3 Les erreurs aléatoires.....	15
Observationnelle .....	16
Environnementale : .....	16
2.2.3.1 Approche statistique .....	16
2.3 Les incertitudes de mesure .....	17
2.3.1 Expression des résultats.....	17
2.3.1.1 1 <sup>ère</sup> forme.....	17
2.3.1.2 2 <sup>ème</sup> forme .....	17
2.3.1.3 3 <sup>ème</sup> forme .....	18
2.4 calcul pratique de l'incertitude .....	18
2.4.1 Les appareils analogiques (ou à déviation).....	18

## Mesures électriques et électroniques

2.4.1.1 Une incertitude de classe .....	19
2.4.1.2 Une incertitude de lecture.....	19
2.4.1.3 L'incertitude totale .....	19
2.4.2 Les appareils numériques .....	20
2.4.2.1 1 <sup>ère</sup> forme.....	20
2.4.2.2 2 <sup>ème</sup> forme .....	20
2.4.3 Calcul d'incertitudes par différentielle .....	21
2.5 Conclusion.....	21
<b>Chapitre 3 : Principes de base des appareils de mesure .....</b>	<b>22</b>
3.1 Introduction .....	22
3.2 Appareils analogiques à déviation.....	22
3.2.1 Types d'appareils analogiques .....	22
3.2.1.1 Appareils magnétoélectriques  .....	22
3.2.1.2 Appareils ferromagnétiques  .....	24
3.2.1.3 Appareils électrostatiques  .....	25
3.2.1.4 Appareils électrodynamiques  .....	25
3.2.1.5 Appareils Ferro dynamiques.....	26
3.2.1.6 Appareils à induction  .....	27
3.2.1.7 Appareils Thermiques  .....	28
3.2.2 Symboles portés sur les cadrans des appareils de mesure analogique.....	28
3.3 Appareils numériques.....	30
3.3.1 Caractéristiques d'un appareil numérique .....	31
3.3.2 Multimètre numérique .....	32
3.4 Oscilloscope .....	32
3.4.1 Description de l'oscilloscope analogique.....	32
3.4.2 Les mesures sur l'oscilloscope .....	34
3.4.2.1 Mesure de tensions .....	34
a) Méthode directe .....	34
b) Méthode de Lissajous.....	35
3.5 Conclusion.....	36
<b>Chapitre 4 : Les appareils analogiques.....</b>	<b>37</b>
4.1 Introduction .....	37

## Mesures électriques et électroniques

4.2	Galvanomètre à cadre mobile .....	37
4.3	Réalisation d'un ampèremètre .....	38
4.3.1	Calcul du shunt .....	40
4.3.2	Réalisation d'un voltmètre .....	40
4.3.2.1	Calcul de la résistance additionnelle ou multiplicateur .....	41
4.3.4	Conclusion .....	42
<b>Chapitre 5 : Mesure des résistances et des impédances .....</b>		<b>43</b>
5.1	Introduction .....	43
5.2	Mesure des résistances .....	43
5.2.1	Ohmmètres à déviation .....	43
5.2.2	Ohmmètre numérique .....	45
5.2.3	Méthode voltampère métrique .....	46
5.2.3.1	Montage aval .....	46
5.2.3.2	Montage amont .....	48
5.2.3.3	Evolution de l'incertitude relative .....	49
5.2.4	Mesure des résistances avec le pont de Wheatstone .....	51
5.2.5	Mesure de la résistance à l'aide de la méthode de comparaison .....	52
5.2.6	Comparaison des précisions obtenues .....	52
5.3	Mesures des impédances .....	53
5.3.1	Méthode voltampère-métrique .....	53
5.3.1.1	Mesure de l'inductance d'une bobine .....	53
5.3.1.2	Mesure d'une capacité .....	53
5.3.2	Pont à courant alternatif .....	54
5.4	Conclusion .....	57
<b>Chapitre 6 : Mesure des puissances .....</b>		<b>58</b>
6.1	Introduction .....	58
6.2	Mesure de la puissance en courant continu .....	58
6.2.1	Mesure indirecte « méthode voltampère métrique » .....	58
6.2.1.1	Montage aval .....	58
6.2.1.2	Montage amont .....	59
6.2.2	Mesure directe « utilisation d'un Wattmètre » .....	60
6.2.2.1	Branchement d'un Wattmètre .....	60
6.3	Mesure de la puissance en courant alternatif .....	61
6.3.1	Mesure de la puissance en courant alternatif monophasé .....	62

## Mesures électriques et électroniques

6.3.1.1 Mesure de la puissance apparente .....	63
6.3.1.2 Mesure de la puissance active .....	64
6.3.1.3 Mesure de la puissance réactive .....	66
6.3.2 Mesure de la puissance en triphasé .....	66
6.3.2.1 Mesure de la puissance apparente .....	69
6.3.2.2 Mesure de la puissance active .....	70
6.3.2.3 Mesure de la puissance réactive .....	71
6.4 Conclusion.....	72
Références .....	74
Annexe 1 .....	75
Exercices résolus .....	75
Enoncés : .....	75
Corrigé :.....	75
Exercices proposés .....	76
Exercice 1 .....	76
Exercice 2 .....	77
Exercice 3 .....	77
Exercice 4 .....	78
Annexe 2 .....	79
Exercices résolus .....	79
Enoncés : .....	79
Corrigé :.....	79
Exercices proposés .....	80
Exercice1 :.....	80
Exercice2 : .....	80
Exercice3 .....	80
Exercice4 .....	81
Annexe 3 .....	83
Exercices résolus .....	83
Enoncés : .....	83
Exercice 1 .....	83
Exercice 2 .....	83
Corrigé :.....	84
Exercice1 .....	84

## Mesures électriques et électroniques

Exercice 2 .....	85
Exercices proposes .....	88
Exercice 1 .....	88
Exercice 2 .....	88
Annexe 4 .....	89
Exercices proposes .....	89
Exercice 1 .....	89
Exercice 2 .....	89
Exercice 3 .....	90
Exercice 4 .....	91
Annexe 5 .....	93
Exercices proposes .....	93
Exercice 1 .....	93
Exercice 2 .....	94
Exercice 3 .....	94
Exercice 4 .....	95
Exercice 5 .....	96
Exercice 6 .....	96

### AVANT-PROPOS

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 et la maintenance ou la réparation d'un dispositif électrique ou électronique. Dans le domaine électrique et électronique, on utilise plusieurs types d'appareils de mesure, tels que les voltmètres (analogique et numérique) pour mesurer des tensions, les ampèremètres pour mesurer des intensités, les wattmètres pour mesurer des puissances et les ohmmètres pour mesurer des résistances etc...

Le module TS 441 « Mesures électriques et électroniques » est un module enseigné en S4 qui fait partie de l'unité méthodologique UEM coefficient 2 et crédit 3 de durée 1h30 cours/TD.

Ce module est destiné aux étudiants 2<sup>ème</sup> année licence Télécommunication (L2 TTL). Le but est d'initier l'étudiant aux techniques de mesure des grandeurs électriques et électroniques et le familiariser à l'utilisation des appareils de mesures analogiques et numériques.

L'évaluation du module est 40% CC et 60% examen.

Contenu de la matière :

**Chapitre 1 : Généralités sur la mesure :**

**Chapitre 2 : Les appareils de mesure**

**Chapitre 3 : Les appareils analogiques**

**Chapitre 4 : Les erreurs de mesure**

**Chapitre 5 : Mesure de puissances**

**Chapitre 6 : Mesure des résistances et impédances**



# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES MESURES

## 1.1 INTRODUCTION

La mesure est un processus de connaissance qui grâce à une expérience physique nous donne une information quantitative (valeur) du rapport entre la grandeur mesurable et une grandeur de même nature prise comme unité.

## 1.2 METROLOGIE

La métrologie est la science de la mesure. Dans le langage des métrologues, on entend souvent dire « mesurer c'est comparer ».

Les résultats des mesures servent à prendre des décisions :

- ❖ Acceptation d'un produit (mesure des caractéristiques, des performances),
- ❖ Réglage d'un instrument de mesure, validation d'un procédé,
- ❖ Réglage d'un paramètre dans le cadre d'un contrôle d'un procédé de fabrication,
- ❖ Validation d'une hypothèse,
- ❖ Définition des conditions de sécurité d'un produit ou d'un système.

Un résultat de mesure s'écrit sous la forme :

$$X = |X| \cdot [X]$$

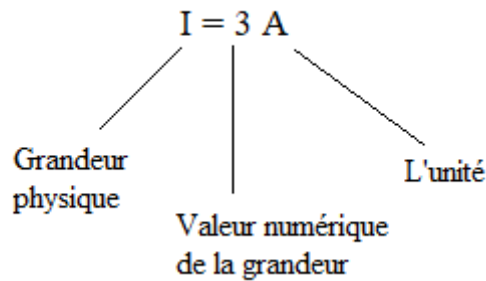
Où :

X : est le nom de la grandeur physique,

[X] : représente l'unité

|X| : est la valeur numérique de la grandeur exprimée dans l'unité choisie.

*Exemple :*



### 1.3 THERMES DE METROLOGIE

- ❖ **Grandeur (mesurable)** : attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance susceptible d'être distinguée qualitativement et déterminée quantitativement
- ❖ **Grandeur directement mesurable** : l'unité de la grandeur est la même que le nom de l'appareil (**Exemple** : mesurer la tension avec un voltmètre)
- ❖ **Grandeur indirectement mesurable** : l'unité n'est pas la même que l'appareil de mesure (**Exemple** : mesurer la résistance en utilisant un voltmètre et un ampèremètre et une loi physique)
- ❖ **Grandeur pseudo-mesurable** : Faire une comparaison entre deux grandeurs dont on ne peut pas faire la somme (**Exemple** : résistivité de l'aluminium et la résistivité du cuivre)
- ❖ **Grandeur repérable** : Qui n'appartient à aucune des trois grandeurs citées au-dessus.
- ❖ **Unité de mesure** : c'est une grandeur particulière, définie par convention, à laquelle on compare les autres grandeurs de même nature pour les exprimer quantitativement.
- ❖ **Mesurage** : ensemble des opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

- ❖ *Mesurande* : grandeur particulière soumise à mesurage.
- ❖ *Incertitude de mesure* : paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être attribuées au mesurande.
- ❖ *Etalon de mesure* : dispositif auquel on doit se fier pour contrôler l'exactitude des résultats fournis par un appareil de mesure.

### 1.4 GRANDEURS ELECTRIQUES ET UNITES DE MESURES

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

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

#### 1.4.1 Grandeurs et unités de base dans le système SI

Les grandeurs électriques et leurs unités de base dans le système international (SI) sont données par le tableau suivant :

**Tableau 1.1 : Grandeurs et unités de base en SI**

Grandeur	Symbole	Unité	Symbole	Appareil de mesure
Tension (d.d.p)	U	Volt	V	Voltmètre
Intensité	I	Ampère	A	Ampèremètre
Puissance	P	Watt	W	Wattmètre

## Mesures électriques et électroniques

<b>Résistance</b>	R	Ohm	$\Omega$	Ohmmètre
<b>Capacité</b>	C	Farad	F	Capacimètre
<b>Inductance</b>	L	Henry	H	Inductancemètre
<b>Période</b>	T	Seconde	S	Période mètre
<b>Fréquence</b>	F	Hertz	Hz	Fréquencemètre
<b>Température</b>	T	Degrés Celsius	$^{\circ}\text{C}$	Thermomètre
<b>Pression</b>	P	Pascal	Pa (ou bar)	Baromètre
<b>Chaleur</b>	Q	Calorie	Cal	Calorimètre
<b>Éclairement</b>	E	Luxe	Lux	Luxmètre
<b>Intensité Lumineuse</b>	I	Candela	Cd	Candela mètre
<b>Vitesse de rotation</b>	$\Omega$ ou N	Tour par minute	tr/mn	Tachymètre

### 1.4.2 Equivalences des unités traditionnelles et les unités légales

Tableau 1.2 : Equivalence des unités traditionnelles et les unités légales

Grandeurs	Unités traditionnelles	Unités légales
Force	1 Kgf	9,8 N
	0.102 Kgf	1 N
Pression	1 Kgf/m <sup>2</sup>	9.8 Pa
	0.102 Kgf/m <sup>2</sup>	1 Pa=10 <sup>-5</sup> bar
Energie	1 cal	4.1855 J
	0.2389 cal	1 J

## Mesures électriques et électroniques

	1 Kcal	1.163 Wh
	0.860 Kcal	1 Wh= 3600J
Puissance	1 Kcal/h	1.163 W
	0.860 Kcal/h	<b>1</b> W

### 1.4.2.1 Multiples et sous multiples des unités

Tableau 1.3 : Multiples des unités

Préfixe du nom de l'unité	Symbole à placer devant celui de l'unité	Multiplicateur de l'unité
Yotta	Y	$10^{24}$
Zetta	Z	$10^{21}$
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	$10^1$

Tableau 1.4 : Sous multiples des unités

Préfixe du nom de l'unité	Symbole à placer devant celui de l'unité	Multiplicateur de l'unité
Déci	D	$10^{-1}$
Centi	C	$10^{-2}$
Milli	M	$10^{-3}$
Micro	$\mu$	$10^{-6}$

Nano	N	$10^{-9}$
Pico	P	$10^{-12}$
Femto	F	$10^{-15}$
Atto	A	$10^{-18}$
Zepto	Z	$10^{-21}$
Yocto	Y	$10^{-24}$

### 1.5 APPAREILS DE MESURE

Dans le domaine électrique et électronique, on utilise plusieurs types d'appareils de mesures, tels que :

- ✓ Le voltmètre pour mesurer des tensions,
- ✓ L'ampèremètre pour mesurer des intensités,
- ✓ Le wattmètre pour mesurer des puissances,
- ✓ L'ohmmètre pour mesurer des résistances ; ect...
- ✓ L'oscilloscope pour visualiser la forme d'une onde et d'obtenir de nombreux renseignements (amplitude, période...).
- ✓ Le voltmètre, ampèremètre, et ohmmètre sont souvent regroupés en un seul appareil qui s'appelle **multimètre**.

### 1.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a défini la mesure, donné les grandeurs électriques et unités de mesure, et les termes de méthodologie (mesurage, mesurande, ...).

## CHAPITRE 2 : LES ERREURS DE MESURE

### 2.1 INTRODUCTION

Aucune mesure n'est parfaite. Quel que soit sa mise en œuvre, la précision de l'appareil, la compétence de l'opérateur, le respect des règles de manipulation et de contrôle sévère de tous les paramètres d'influence, il restera toujours une incertitude sur la mesure. Tous les efforts accomplis dans le domaine de l'instrumentation visent à faire tendre cette incertitude vers une valeur de plus en plus faible, tout en sachant qu'il ne sera jamais possible de l'annuler. C'est pourquoi toute mesure, pour être complète, doit comporter la valeur mesurée et les limites de l'erreur possible sur la valeur donnée.

### 2.2 CLASSIFICATION DES ERREURS

Suivant les causes, on a deux types d'erreurs :

#### 2.2.1 Les erreurs systématiques

C'est toute erreur due à une cause connue ou connaissable. Elles ont pour causes :

##### 2.2.1.1 *La méthode de mesure (Erreur systématique de la méthode)*

La méthode de mesure choisie entraîne une perturbation sur la grandeur à mesurer (ce sont les résistances internes  $R_A$  et  $R_V$ ).

##### 2.2.1.2 *L'opérateur (Erreur systématiques de lecture)*

Lors d'une mesure, l'aiguille ou le spot lumineux s'immobilise entre deux traits de la graduation ce qui oblige l'opérateur à estimer une fraction de division de l'échelle de lecture, il en résulte une erreur inévitable.

##### 2.2.1.3 *L'appareil de mesure (Erreur systématique instrumentale)*

La classe de précision d'un appareil de mesure dépend des imprécisions de fabrication, de calibrage et de conception. Plus la fabrication est soignée, plus l'erreur est petite. De plus l'erreur dépend du réglage de zéro électrique ou

## Mesures électriques et électroniques

mécanique et de la courbe d'étalonnage de l'appareil.

$$\Delta X = \frac{\text{Classe} \cdot \text{Calibre}}{100}$$

### 2.2.2 Les erreurs accidentelles

C'est toute erreur qui n'obéit à aucune loi connue lorsqu'elle est prise sur un seul résultat. Elle obéit aux lois de la statistique lorsque le nombre de résultats devient très grand. Elles peuvent provenir de :

#### 2.2.2.1 L'opérateur

Pour les multimètres analogiques avec plusieurs échelles imbriquées de façon compliquée et graduée d'une façon ambiguë sur un même cadran, l'opérateur peut se tromper sur l'échelle de lecture. Ajoutons à cela le défaut de parallaxe qui est une erreur que l'on commet lors d'une lecture « en biais » lorsque l'aiguille est toujours un peu écartée de l'échelle.

#### 2.2.2.2 L'appareil

A cause des influences extérieures comme la position, la température, l'humidité de l'air, les champs parasites magnétiques ou électriques, l'instrument peut fausser une mesure.

Également, la position (horizontale ou verticale) d'utilisation des appareils de mesure est aussi décisive. Ces appareils doivent être utilisés conformément à la position indiquée sur le carton.

#### 2.2.2.3 Le montage

Les mauvais contacts, à savoir : serrage des pièces, état de surface, fils de connexion..., et le défaut d'isolement, qui peut causer un courant de fuite, sont à l'origine des erreurs.

### 2.2.3 Les erreurs aléatoires

Il existe deux origines des erreurs aléatoires :



### *Observationnelle*

- Lecture, ou appréciation de la dernière division sur un vernier, choix du dernier digit sur un appareil numérique.
- Limite de résolution (largeur d'une fente de spectromètre, effet de la diffractions, processus de numérisation.)
- Limitation intrinsèque de la précision de l'appareil de mesure.

### *Environnementale :*

- Fluctuation de la résistance des contacts électriques, variation des tensions d'alimentation d'AO. Parasites extérieurs.
- Vibration mécanique.

Contrairement aux erreurs systématiques les erreurs aléatoires se font tantôt à l'excès tantôt en défaut, leur moyenne est nulle.

### **2.2.3.1 Approche statistique**

Dans le cas d'un mesurage, comportant plusieurs mesures individuelles, l'erreur de mesure est une variable aléatoire. On peut appliquer les lois de la statistique à ce mesurage.

Considérons une série de  $N$  mesures indépendantes  $X_i$ , de la grandeur  $X$ . Plaçons nous dans le cas où seules sont présentes des erreurs aléatoires.

### *Valeur Moyenne*

La valeur moyenne obtenue sur les  $N$  mesures indépendantes :

$$X_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} X_i$$

Où :

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

### *Ecart type*

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{i=N} (X - X_N)^2}$$

La dispersion sur la moyenne par l'estimateur de son écart-type :

$$\sigma_X = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

### 2.3 LES INCERTITUDES DE MESURE

On appelle incertitude de mesure  $\Delta X$ , la limite supérieure 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  $\Delta X$** , qui s'exprime en même unité que la grandeur mesurée
- **L'incertitude relative  $\frac{\Delta X}{X_m}$**  qui s'exprime généralement en pourcentage (%).

Où :

$X_m$  : mesure de X (valeur mesurée)

#### 2.3.1 Expression des résultats

Le résultat peut s'exprimer sous deux formes différentes :

##### 2.3.1.1 1<sup>ère</sup> forme

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

$$X_e = X_m \pm \Delta X$$

##### 2.3.1.2 2<sup>ème</sup> forme

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

$$X_e = X_m \pm \left( \frac{\Delta X}{X_m} \right) \%$$

### 2.3.1.3 3<sup>ème</sup> forme

$$X_m - \Delta X < X_e < X_m + \Delta X$$

## 2.4 CALCUL PRATIQUE DE L'INCERTITUDE

### 2.4.1 Les appareils analogiques (ou à déviation)

Ce type d'appareil a pour principe de donner une déviation d'aiguille sur une échelle graduée proportionnelle à la valeur de la grandeur à mesurer. Ainsi la valeur mesurée sera donnée par la relation suivante :

$$X = \frac{C \cdot L}{E}$$

Avec:

- $C$  : le calibre utilisé [unité]
- $L$  : la lecture (nombre de graduations lues sur l'échelle)
- $E$  : l'échelle (nombre total de graduations de l'échelle)

Un appareil de mesure à déviation est caractérisé par son indice de classe de précision qui entraîne, suite à son utilisation.

#### **Exemple**

Une mesure du courant a été effectuée par un ampèremètre analogique. L'appareil possède les caractéristiques suivantes :

- Nombre totale de divisions :  $N=100$
- Calibre :  $5A$
- Numéro de graduation durant laquelle s'immobilise l'aiguille est 82.

La valeur mesurée est :

$$X = \frac{5 \cdot 82}{100} = 4,1 A$$

### 2.4.1.1 Une incertitude de classe

$$\Delta X_c = \frac{C_l \cdot C}{100} = \frac{\text{Classe} \cdot \text{Calibre}}{100}$$

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

### 2.4.1.2 Une incertitude de lecture

Si on désigne par  $\Delta L$  la fraction de graduation d'erreur commise :

$$\Delta X_L = \frac{1}{n}$$

$n$  : la fraction de division estimé lors de la mesure.

Si la valeur mesurée est donnée en division, l'incertitude de lecture sera donnée par la relation suivante :

$$\Delta X_L = \frac{C \cdot L}{E}$$

### 2.4.1.3 L'incertitude totale

La méthode est aussi une source d'incertitude à évaluer (notée  $\Delta X_{\text{méthode}}$ ).

D'où l'incertitude totale commise sur une mesure employant un appareil analogique sera la somme de l'incertitude de classe (instrumentale), de l'incertitude de lecture et de l'incertitude de méthode si elle existe :

$$\varepsilon_{X_t} = \varepsilon_{X_m} + \varepsilon_{X_L} + \varepsilon_{X_i}$$

$$\Delta X_t = \Delta X_{\text{met}} + \Delta X_L + \Delta X_i$$

Avec :

$\varepsilon_{X_t}$  : Incertitude totale

$\varepsilon_{X_t}$  : Incertitude de méthode

## Mesures électriques et électroniques

$\varepsilon_{xt}$  : Incertitude de lecture

$\varepsilon_{xt}$  : Incertitude instrumentale (de classe)

### 2.4.2 Les appareils numériques

Pour les appareils à affichage numérique, les constructeurs fournissent sous le nom de précision une indication qui permet de calculer l'incertitude totale sur la mesure.

La précision est généralement donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme. Elle peut être exprimée sous deux formes différentes :

#### 2.4.2.1 1<sup>ère</sup> forme

$$\Delta X = \pm(x\% \text{ Lecture} + y\% \text{ Gamme})$$

On obtient donc :

$$\Delta X = \frac{x.L}{100} + \frac{y.G}{100}$$

Avec :

- $G$ : la gamme utilisée [unité]
- $L$ : la lecture (affichée directement sur l'afficheur de l'appareil)

#### 2.4.2.2 2<sup>ème</sup> forme

$$\Delta X = \pm(x\% \text{ Lecture} + n \text{ points})$$

On obtient donc :

$$\Delta X = \frac{x.L}{100} + \frac{n.G}{N}$$

Avec :

## Mesures électriques et électroniques

- $n$  : le nombre de points d'erreur commise par appareil
- $N$  : le nombre total de points de l'appareil

### 2.4.3 Calcul d'incertitudes par différentielle

La grandeur mesurée s'obtient par une mesure indirecte. Supposons que des mesures ont donné deux valeurs  $x$  et  $y$  avec des incertitudes absolues  $\Delta x$  et  $\Delta y$ . Considérons la fonction  $f(x, y)$  dont on veut calculer  $\Delta f$ .

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y$$

*Règles particulières :*

- Somme :  $f(x, y) = x + y \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
- Différence :  $f(x, y) = x - y \Rightarrow \Delta f = \Delta x + \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
- Produit :  $f(x, y) = x \cdot y \Rightarrow \Delta f = y \cdot \Delta x + x \cdot \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
- Quotient :  $f(x, y) = \frac{x}{y} \Rightarrow \Delta f = \frac{1}{y} \cdot \Delta x + \frac{x}{y^2} \cdot \Delta y \Rightarrow \frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$

Exemple :

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

$R$  : valeur mesurée indirectement par un voltmètre et un ampèremètre.

$U$  : mesurée par un voltmètre.

$I$  : mesuré par un ampèremètre.

$$\Delta R = \frac{1}{I} \cdot \Delta U + \frac{U}{I^2} \cdot \Delta I$$

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

## 2.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a parlé des erreurs de mesures des appareils analogiques et numériques, comment calculer les incertitudes absolues et relatives.

Des exercices proposés sont donnés dans l'annexe 1.

## CHAPITRE 3 : PRINCIPES DE BASE DES APPAREILS DE MESURE

### 3.1 INTRODUCTION

Un appareil de mesure est un système qui traduit un phénomène physique difficilement accessible ou non accessible à nos sens, en un autre phénomène pouvant être visualisé et estimé. On distingue deux types d'appareils :

- Les appareils analogiques : par leur principe de fonctionnement, donne théoriquement une valeur de la grandeur à mesurer exactement proportionnelle à cette grandeur. On s'intéressera dans ce qui suit à l'étude des appareils analogiques à déviation.
- Les appareils numériques : ils donnent une valeur représentant la grandeur à mesurer au pas de quantification près. Cette valeur est donnée sous une forme de nombre (affichage numérique).

### 3.2 APPAREILS ANALOGIQUES A DEVIATION

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

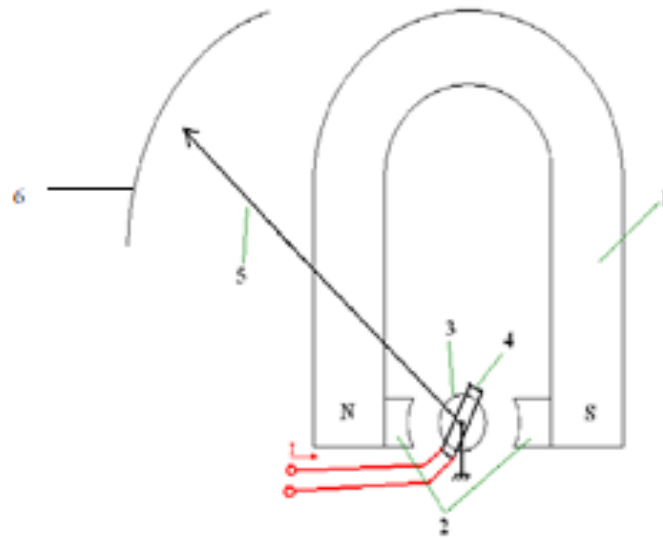
La technologie interne de ces appareils repose sur trois éléments :

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

Parmi les appareils analogiques à déviation on trouve : les appareils magnétoélectriques, les appareils ferromagnétiques, etc.....

#### 3.2.1 Types d'appareils analogiques

##### 3.2.1.1 Appareils magnétoélectriques



**Figure 3.1 : Appareil magnétoélectrique**

- 1 – Aimant permanent
- 2 – Pièces polaires
- 3 – Noyau d'acier doux
- 4 – Cadre mobile
- 5 – Aiguille de l'appareil
- 6 – Cadran gradué

Le fonctionnement des appareils magnétoélectriques est basé sur l'action exercée par un aimant permanent fixe sur un cadre mobile traversé par un courant électrique traduisant la grandeur mesurée (figure 3.1). Le déplacement du cadre mobile est toujours dans le sens d'augmentation de l'énergie électromagnétique du système (partie fixe + partie mobile).

Les appareils magnétoélectriques sont généralement utilisés en ampèremètres, en voltmètres et en ohmmètres.



### 3.2.1.2 Appareils ferromagnétiques

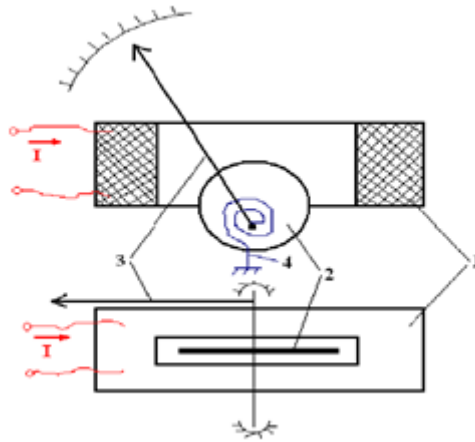


Figure 3.2 : Appareil ferromagnétique

1. Bobine fixe
2. Pièce ferromagnétique mobile
3. Aiguille
4. Ressorts spiraux

Le fonctionnement des appareils ferromagnétiques résulte de l'action exercée par un courant électrique qui traverse une bobine fixe sur une pièce ferromagnétique mobile qui se déplace dans le sens d'augmentation de l'inductance de la bobine traduisant la grandeur mesurée (figure 3.2).

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

### 3.2.1.3 Appareils électrostatiques

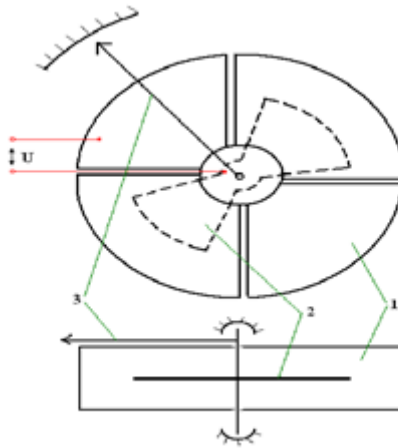


Figure 3.3 : Appareil électrostatique

1. Plaque fixe
2. Plaque mobile
3. Aiguille

Le fonctionnement des appareils électrostatiques est basé sur l'attraction de deux systèmes de plaques portés à des tensions diverses traduisant la grandeur mesurée (figure 3.3).

Les appareils électrostatiques sont utilisables en courant continu et en courant alternatif et possèdent une échelle non linéaire.

### 3.2.1.4 Appareils électrodynamiques

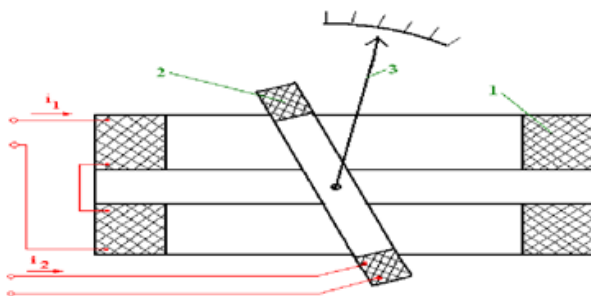


Figure 3.4 : Appareil électrodynamique

## Mesures électriques et électroniques

- 1-bobine fixe
- 2-bobine mobile
- 3-aiguille

Le fonctionnement de ces appareils résulte de l'action exercée par un courant électrique sur un autre courant électrique (figure 3.4). C'est l'action électrodynamique dirigée toujours dans le sens d'augmentation de l'inductance mutuelle de deux bobines. Les deux courants en cause traversent presque toujours deux bobines – l'un est fixe, l'autre est mobile.

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

### 3.2.1.5 Appareils Ferro dynamiques

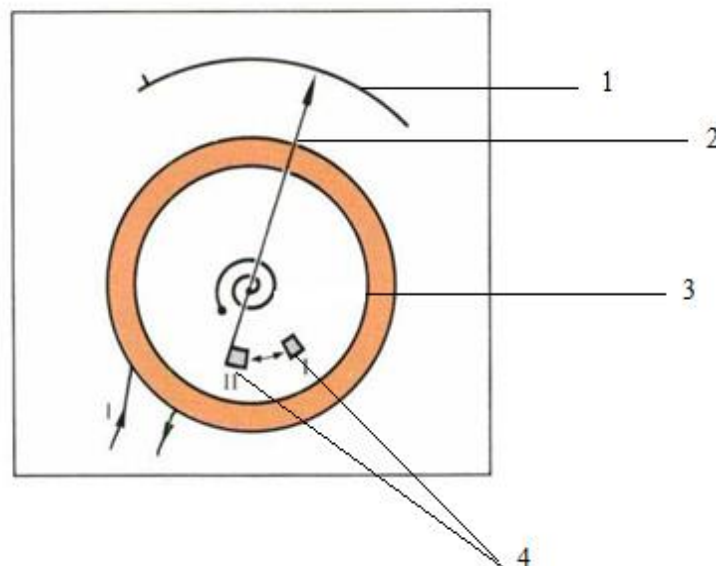


Figure 3.5 : Appareil Ferro dynamique

- 1- Echelle graduée
- 2- Aiguille
- 3- Bobine
- 4- Palettes

Deux palettes (I et II) de matériau ferromagnétique (comme le fer doux) sont placées au centre d'une bobine parcourue par le courant à mesuré (figure 3.5). Les deux palettes s'aimantent et se repoussent. Une palette est fixe l'autre est mobile et est liée à l'aiguille qui se déplace sur le cadran.

### 3.2.1.6 Appareils à induction

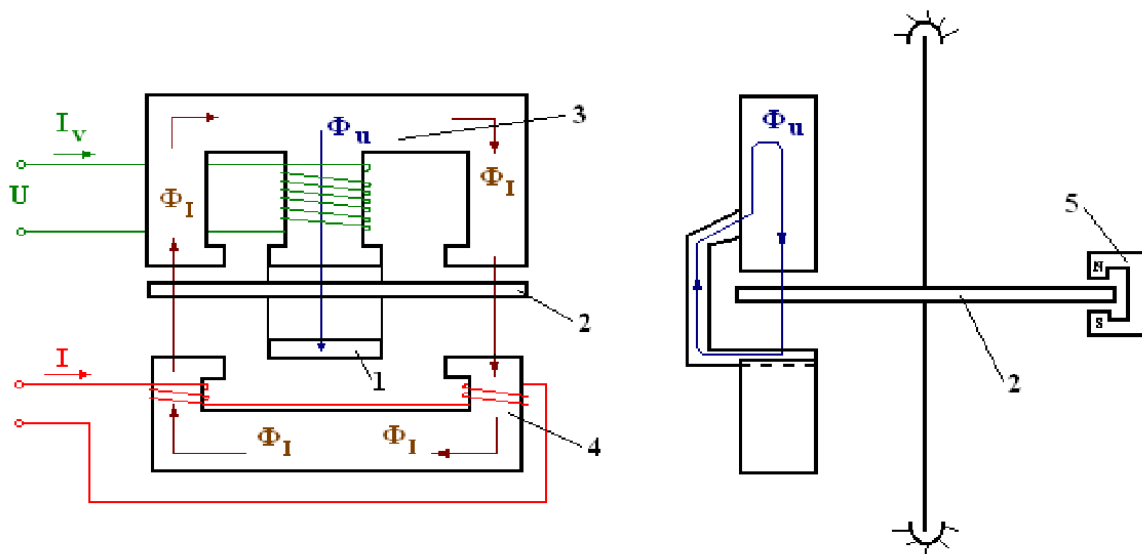
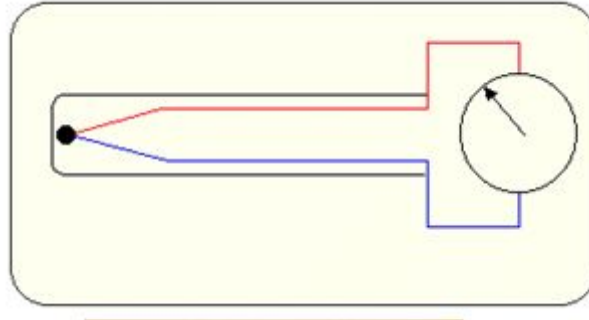


Figure 3.6 : Appareil à induction (à attraction)

- 1.-contre-pôle, contre-pied ;
- 2.-disque conducteur ;
- 3.- bobine de tension ;
- 4.-bobine de courant ;
- 5.- aimant permanent.

Le principe de fonctionnement résulte de l'action exercée d'un ou plusieurs champs magnétiques sur les courants de Foucault induits par les mêmes champs dans un disque conducteur mobile (Figure 3.6). Les champs électriques sont produits par un ou plusieurs circuits, traversés par différents courants. Selon le principe de fonctionnement ils ne fonctionnent qu'en régime alternatif.

### 3.2.1.7 Appareils Thermiques



**Figure 3.7 : Thermocouple**

Le principe de fonctionnement repose sur l'action de la dilatation due à l'effet joule dans un conducteur traversé par un courant, ou déformation d'un dispositif bimétallique ou encore par phénomène de thermocouple.

Les appareils thermiques sont non polarisés, utilisables en courant continu et en courant alternatif.

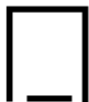






### 3.2.2 Symboles portés sur les cadrans des appareils de mesure analogique


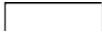


Sur le cadran d'un appareil de mesure analogique, le constructeur indique :

- Marque et modèle,
- La nature du courant à mesurer,
- La tension d'épreuve diélectrique,
- La position d'utilisation du cadran,
- La classe de précision,
- La sensibilité,
- Domaine d'utilisation en fréquence,
- La chute de tension pour le choix d'un shunt extérieur.

Dans le tableau suivant, on résume les principaux symboles trouvés pour la plupart des appareils

Tableau 3.1. Résumé des symboles des appareils de mesure analogiques

Symbole	Signification
<p style="text-align: center;">-</p> <p style="text-align: center;">~</p> <p style="text-align: center;">- ~</p>	<p><i>Nature du courant :</i></p> <p>Courant contenu</p> <p>Courant alternatif</p> <p>Courant contenu et alternatif</p>
     	<p>Appareil magnétoélectrique</p> <p>Appareil ferro- magnétique</p> <p>Appareil électrostatique</p> <p>Appareil électrodynamique</p> <p>Appareil thermique</p> <p>Appareil à induction</p>
	<p><i>Tension d'isolement</i> entre les deux bornes de l'appareil est 2KV</p> <p><i>Tension d'isolement</i> entre les deux bornes de l'appareil est 500V</p>

	
	<b>Position de lecture :</b> Verticale
	Horizontale
	Inclinée
20Hz.....500Khz	<b>Bande de fréquence</b> dans laquelle l'appareil peut fonctionner correctement
0.5	<b>Classe de précision</b> de l'appareil est de 0.5% du calibre
1	<b>Classe de précision</b> de l'appareil est de 1% du calibre
2	<b>Classe de précision</b> de l'appareil est de 2% du calibre

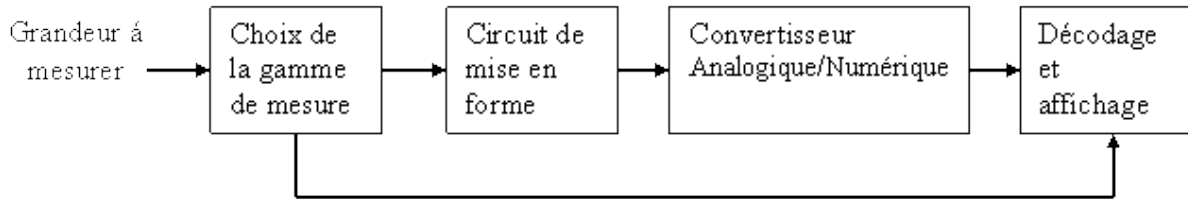
### 3.3 APPAREILS NUMERIQUES

Les appareils de mesure numériques sont basés sur un principe tout à fait différent de celui des appareils analogiques. Les appareils numériques ne contiennent pas de pièces mécaniques en mouvement, mais seulement des composants électroniques. Leur constitution est purement électronique depuis l'amplificateur à haute impédance d'entrée jusqu'à l'affichage de la mesure par les diodes électroluminescentes ou par les cristaux liquides.

Ces appareils sont généralement dotés d'un commutateur qui permet de changer les calibres et de fonctions.

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.

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



**Figure 3.8 : Schéma synoptique général d'un appareil de mesure numérique**

Le circuit transforme le signal reçu en une tension mesurable par le convertisseur analogique/numérique (CAN). Ce dernier compare la tension analogique à une tension de référence et fournit sa valeur numérique sous forme d'un nombre d'impulsions, à un compteur qui affichera le résultat.

### 3.3.1 Caractéristiques d'un appareil numérique

- ❖ **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  $q = 10/N = 1 \text{ mV}$ ).
- ❖ **Digit** : Désigne le dispositif qui affiche tous les chiffres de 0 à 9 de même poids dans un nombre.
- ❖ **Résolution** : C'est la valeur du pas de quantification dans la gamme. Elle correspond à la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme.  $\text{Résolution} = \text{gamme de mesure} / \text{nombre de points } N$ . (Exemple : la résolution d'un appareil de 100000 points dans la gamme de 1 V est égale à  $10 \mu\text{V}$ ).
- ❖ **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



## Mesures électriques et électroniques

lecture pour chaque gamme. Cette précision peut être très grande pour certains appareils. 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 plupart des cas à une ou deux unités (ou digits) près. (Exemple : gamme 2 V ; Résolution 1 mV ; précision  $\pm 0.1\% + 2 \text{ dgt}$  ; lecture 1V. La précision de cette mesure sera  $0.1\% \cdot 1V + 2 \cdot 1\text{mV} = 3 \text{ mV}$ ).

### 3.3.2 Multimètre numérique

Le multimètre numérique est construit autour d'un voltmètre numérique et comporte à minima un convertisseur courant-tension permettant de le faire fonctionner en ampèremètre et un générateur de courant constant pour fonctionner en ohmmètre.

Le choix du type de mesure (de l'instrument), du calibre ou échelle de mesure se fait généralement à l'aide d'un commutateur rotatif, des boutons poussoirs peuvent commander des fonctions supplémentaires. Les multimètres les plus récents, souvent les plus simples d'emploi, choisissent automatiquement le bon mode et le bon calibre.

## 3.4 OSCILLOSCOPE

Un **oscilloscope** est un instrument de mesure destiné à visualiser un signal électrique, le plus souvent variable au cours du temps. Il est utilisé par de nombreux scientifiques afin de visualiser soit des tensions électriques, soit diverses autres grandeurs physiques préalablement transformées en tension au moyen d'un convertisseur adapté ou de capteurs. La courbe de rendu d'un oscilloscope est appelée oscillogramme.

On distingue généralement les oscilloscopes **analogiques** qui utilisent directement un multiple de la tension d'entrée pour produire la déviation du spot et les oscilloscopes **numériques** qui transforment, préalablement à tout traitement, la tension d'entrée en nombre. L'affichage est reconstruit après coup.

### 3.4.1 Description de l'oscilloscope analogique

En général l'oscilloscope possède 2 voies (CH1 et CH2) et permet alors d'observer deux tensions  $V_1$  et  $V_2$  en fonction du temps. Pour l'observation de l'évolution de tensions en fonction du

## Mesures électriques et électroniques

temps, la tension  $V_x$  est une tension de balayage horizontal, proportionnelle au temps, qui est fournie par l'élément dit "base de temps" (figure 3.10).

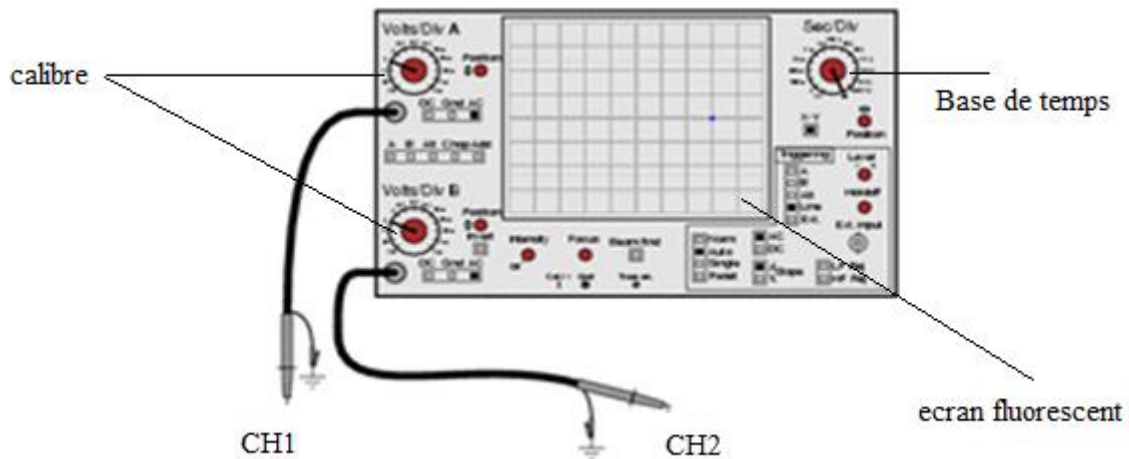


Figure 3.10 : Oscilloscope analogique

Le signal à mesurer est visualisé sur un tube cathodique généralement vert. La trace de l'oscilloscope est déterminée par deux composantes : une horizontale et une verticale.

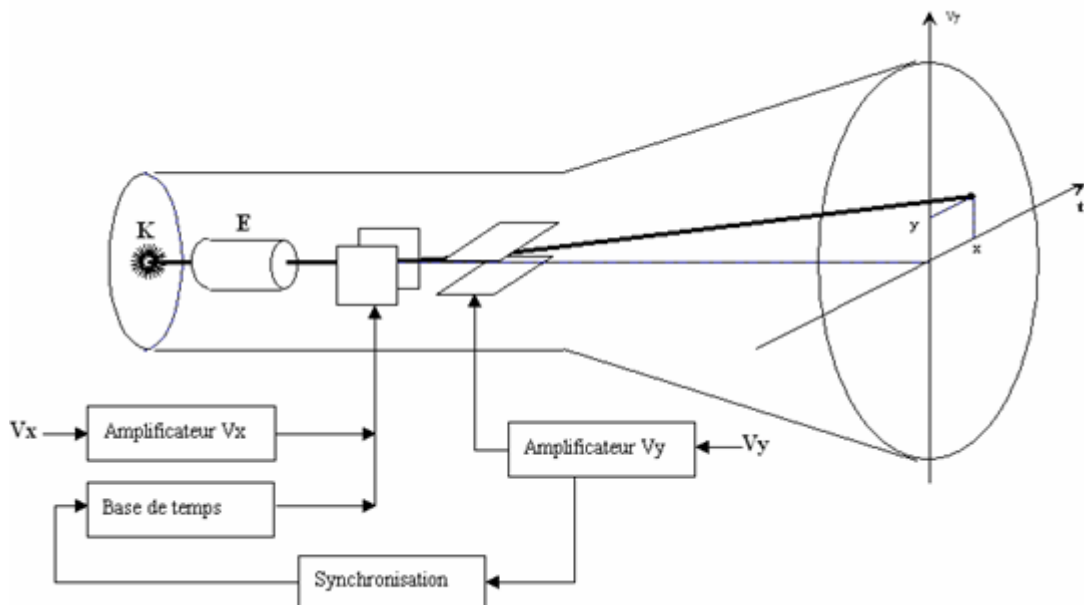


Figure 3.11 : Principe de l'oscilloscope

## Mesures électriques et électroniques

L'élément essentiel est le tube cathodique (figure 3.11) dans lequel règne un vide très poussé. A l'entrée du tube, des électrons sont émis par la cathode chauffée **K** puis accélérés et focalisés par une série d'électrodes **E**, portées à une tension élevée. Ce faisceau vient frapper l'extrémité du tube sur laquelle a été déposée une substance fluorescente : on observe donc un spot lumineux au point d'impact des électrons sur l'écran.

Sur son parcours, le faisceau peut être dévié horizontalement par le champ électrique créé entre deux plaques d'un condensateur ; le déplacement correspondant  $x$  du spot est proportionnel au champ électrique et par conséquent à la tension  $V_x$  existant entre les plaques de déviation horizontale :

$$x = K_x \cdot V_x$$

De même, le faisceau peut être dévié verticalement par deux autres plaques portées au potentiel  $V_y$  et l'on a :

$$y = K_y \cdot V_y$$

Le spot a donc, à chaque instant, une position telle que ses coordonnées  $(x, y)$  soient proportionnelles aux tensions  $V_x$  et  $V_y$  appliquées sur les plaques de déviation horizontale et verticale.

Les amplificateurs de la figure 3.11 permettent de régler l'amplitude du signal afin que le spot couvre convenablement l'écran et soit facilement observable.

### 3.4.2 Les mesures sur l'oscilloscope

#### 3.4.2.1 Mesure de tensions

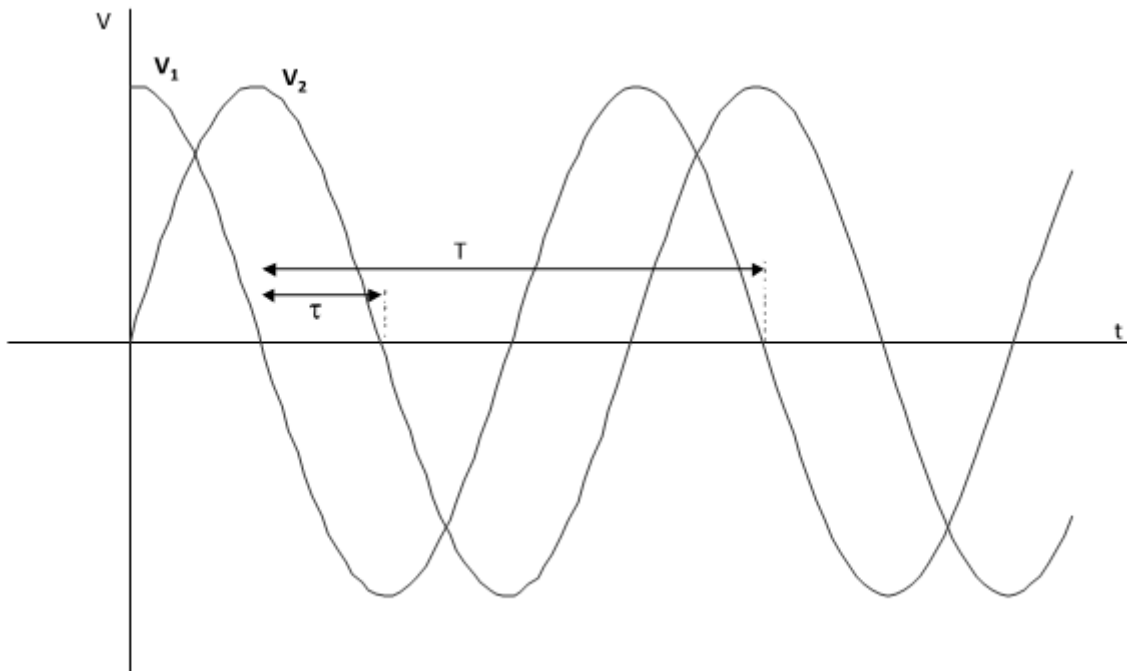
Soit une tension  $v(t) = \hat{V} \sin(\omega t + \varphi)$ , l'oscilloscope permet de mesurer l'amplitude crête  $\hat{V}$  de la tension appliquée à ses bornes. Dans le cas d'une tension sinusoïdale, la tension efficace  $V_e$  mesurée par un voltmètre est :

$$V_e = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}$$

##### a) Méthode directe

Soient  $v_1(t) = \hat{V} \cos \omega t$  et  $v_2(t) = \hat{V} \cos(\omega t + \varphi)$ , deux tensions sinusoïdales de même période  $T = \frac{2\pi}{\omega}$  mais déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle  $\varphi$ . La figure 3.12 montre ce qu'on observe

sur l'écran de l'oscilloscope.



**Figure 3.12 : Observation du déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$**

Le déphasage est alors :  $\varphi = 2\pi \frac{\tau}{T}$  (en radian) ou :  $\varphi = 360 \frac{\tau}{T}$  (en degré)

### **b) Méthode de Lissajous**

Une autre méthode consiste à appliquer les tensions  $V_1$  et  $V_2$  respectivement sur les voies  $Y_1$  et  $Y_2$ . La touche de fonction (X - Y) est actionnée. La tension  $V_2$  est alors appliquée au balayage de x tandis que  $V_1$  est appliquée au balayage de y:  $x = \hat{V} \cos \omega t$  et  $y = \hat{V} \cos(\omega t + \varphi)$

Le spot va alors décrire sur l'écran une ellipse (figure 3.13) inscrite dans un rectangle de côtés  $(2V_1, 2V_2)$

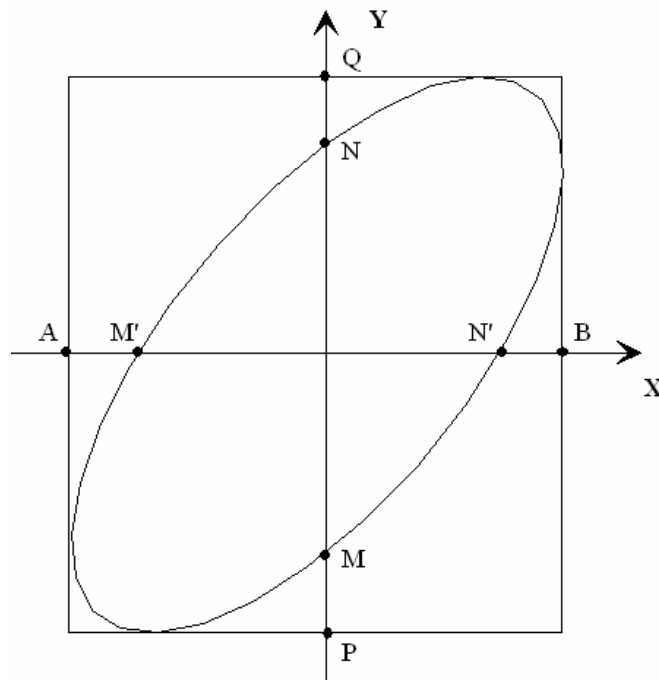


Figure 3.13 : Courbe de Lissajou

L'équation de cette ellipse est :

$$\frac{x^2}{V_2^2} + \frac{y^2}{V_1^2} - \cos \frac{2xy}{V_1 V_2} \cos \varphi = \sin^2 \varphi$$

La valeur du déphasage est donnée par :

$$\sin \varphi = \frac{MN}{PQ} = \frac{M'N'}{AB}$$

### 3.5 CONCLUSION

Ce chapitre était consacré aux appareils de mesure, analogiques à déviation, numériques et l'oscilloscope. Des exercices proposés sont donnés dans l'annexe 2.

## CHAPITRE 4 : LES APPAREILS ANALOGIQUES

### 4.1 INTRODUCTION

Un appareil de mesure comprend généralement un ou plusieurs inducteurs fixes (aimant permanent ou électroaimant) agissant sur un équipage à cadre mobile autour d'un axe fixe. C'est un appareil à déviation ou à aiguille. Les appareils de mesure électriques analogiques sont en général conçus à partir du galvanomètre à cadre mobile.

### 4.2 GALVANOMETRE A CADRE MOBILE

Une bobine rectangulaire (cadre) montée sur pivot et munie d'un noyau de fer doux est placée dans l'entrefer d'un aimant. Une aiguille est fixée au cadre.

En l'absence de courant, des ressorts spiraux maintiennent le cadre dans une position telle que l'aiguille indique zéro.

Lorsqu'un courant traverse le cadre, un couple magnétique entraîne la rotation de l'équipage mobile (cadre, noyau et aiguille). Les ressorts spiraux s'opposent à cette rotation et le cadre atteint une position d'équilibre après avoir tourné d'un angle proportionnel à l'intensité du courant qui la traverse. Compte tenu que l'enroulement de la bobine d'un mouvement basique est petit et léger, il ne peut transporter que des courants très faibles. Quand des courants relativement élevés sont à mesurer, il est nécessaire de shunter la plus grande partie du courant à travers une résistance qu'on appelle shunt.

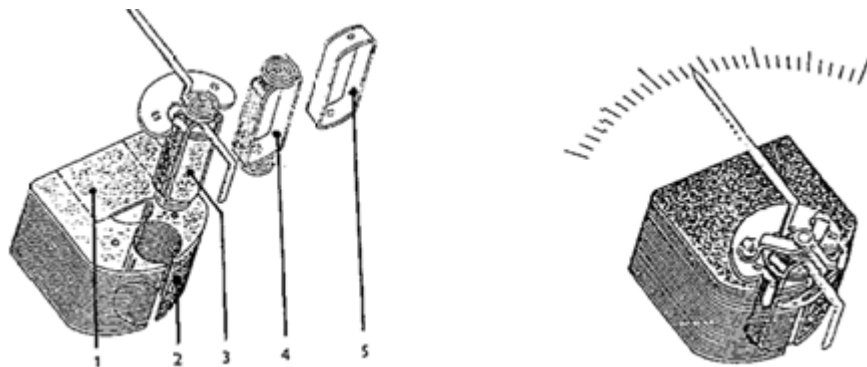


Figure 4.1 : Galvanomètre à cadre mobile

## Mesures électriques et électroniques

- 1- Aimant permanent,
- 2- Noyau en fer doux pour guider les lignes de force de l'aimant permanent,
- 3- Noyau en fer doux pour guider les lignes de force de la bobine siège du courant mesuré
- 4- Bobine à cadre mobile dans laquelle circule le courant mesuré
- 5- Cadre en aluminium, support de la bobine.

On considère un galvanomètre à cadre mobile. Le cadre est rectangulaire et sa surface vaut  $S$ , le nombre de spires est  $N$ , l'induction magnétique radiale au niveau des spires vaut  $B$ . Le moment d'inertie du cadre vaut  $I$  et la constante de rappel des fils de torsion est  $C$ .

L'équation du mouvement s'écrit sous la forme suivante :

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{\phi^2}{R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} + C\alpha = 0$$

C'est une équation différentielle linéaire à coefficients constants dont l'équation caractéristique est :

$$I \cdot r^2 + r \cdot \frac{\phi^2}{R} + C = 0$$

- ❖ Si le déterminant est négatif : Le mouvement est oscillatoire amortie.
- ❖ Si le déterminant est nul, le cadre revient à sa position d'équilibre sans osciller. Le mouvement est dit critique.
- ❖ Si le déterminant est positif : le cadre retourne à sa position d'équilibre sans osciller. Le mouvement est dit apériodique.

### 4.3 REALISATION D'UN AMPEREMETRE

En montant des résistances en dérivation avec le galvanomètre on obtient un ampèremètre. On distingue deux types d'ampèremètres :

- ✚ Ampèremètre à shunt universel (figure 4.2)
- ✚ Ampèremètre multi- gammes (figure 4.3)

Pour changer le calibre, on utilise des shunts. Ce sont des résistances additionnelles branchées en dérivation. Plus le calibre est grand, plus la résistance du shunt est faible pour dériver une plus grande partie du courant.

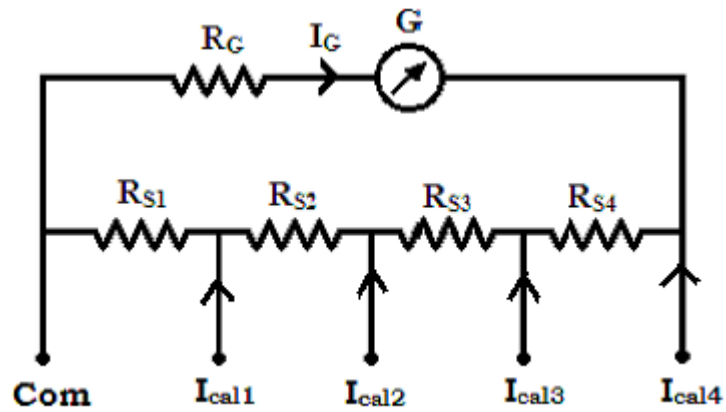


Figure 4.2 : Ampèremètre à shunt universel

$R_G$  : Résistance interne du galvanomètre.

$R_{si}$  : Shunts

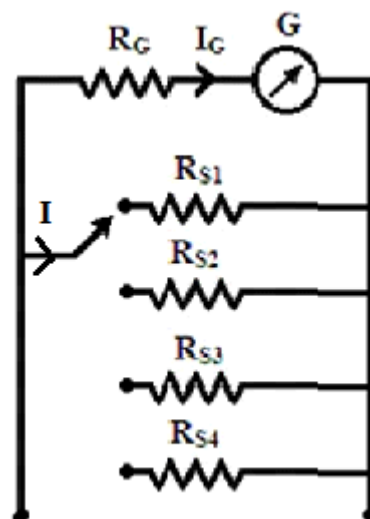
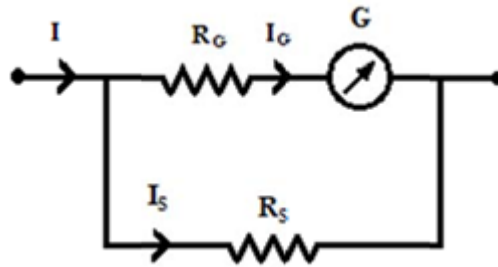


Figure 4.3. Ampèremètre multi-gammes



### 4.3.1 Calcul du shunt



On a :

$$R_G \cdot I_G = R_S \cdot I_S$$

Or :

$$I = I_G + I_S = I_{cal}$$

$$\Rightarrow R_G \cdot I_G = R_S \cdot (I - I_G)$$

D'ou :

$$R_S = \frac{R_G \cdot I_G}{(I - I_G)}$$

En posant :

$$m = \frac{I}{I_G} : \text{facteur multiplicateur}$$

On aura :

$$R_S = \frac{R_G}{m - 1}$$

Pour chaque valeur pleine échelle de mesure de courant  $I$ , on détermine le  $R_S$  correspondant en utilisant l'expression  $R_S$ .

### 4.3.2 Réalisation d'un voltmètre

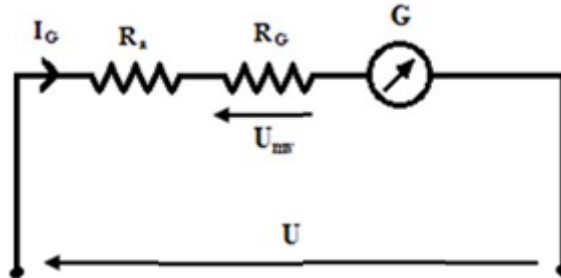
Il est réalisé à partir :

- D'un galvanomètre de résistance interne  $R_G$  et de courant maximal  $I_G$ .
- Des résistances de précision ou un choix de résistances fixes et ajustables.

## Mesures électriques et électroniques

Pour mesurer des tensions plus fortes, on augmente la résistance de l'appareil en ajoutant, en série avec le cadre, une résistance additionnelle.

### 4.3.2.1 Calcul de la résistance additionnelle ou multiplicateur



Le multiplicateur (la résistance  $R_a$  en série avec le galvanomètre) limite la valeur du courant pour que le mouvement du cadre (déflexion) ne dépasse pas la valeur maximale.

- **Résistance additionnelle**

On a :

$$U = (R_G + R_a) \cdot I_G$$

Où :

$$R_G + R_a = R_T$$

Avec :

$U$  : La tension pleine échelle du voltmètre.

$R_T$  : Résistance totale

D'où :

$$R_a = \frac{U}{I_G} - R_G$$

- **Résistance caractéristique**

On a :

$$R_c = \frac{R_G}{U_{mv}} = \frac{R_G}{R_G I_G}$$

D'où :

$$R_c = \frac{1}{I_G} [\Omega/V]$$

- *Résistance totale*

$$R_T = R_c \cdot \text{le plus grand calibre}$$

Ainsi la résistance additionnelle  $R_a$  est aussi obtenue par :

$$R_a = R_c \cdot U - R_G$$

### 4.3.4 Conclusion

Ce chapitre était consacré à la réalisation du voltmètre et de l'ampèremètre à partir du galvanomètre et l'ohmmètre à aiguille.

Des exercices proposés sont donnés dans l'annexe 3 pour une meilleure assimilation du cours.

## CHAPITRE 5 : MESURE DES RESISTANCES ET DES IMPEDANCES

### 5.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on parlera de la mesure des résistances en courant continu directe et indirecte et la mesure des impédances en courant alternatif directe et indirecte. On citera quelques ponts utilisés pour la mesure des impédances.

### 5.2 MESURE DES RESISTANCES

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

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

#### 5.2.1 Ohmmètres à déviation

L'ohmmètre est réalisé à partir d'un :

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

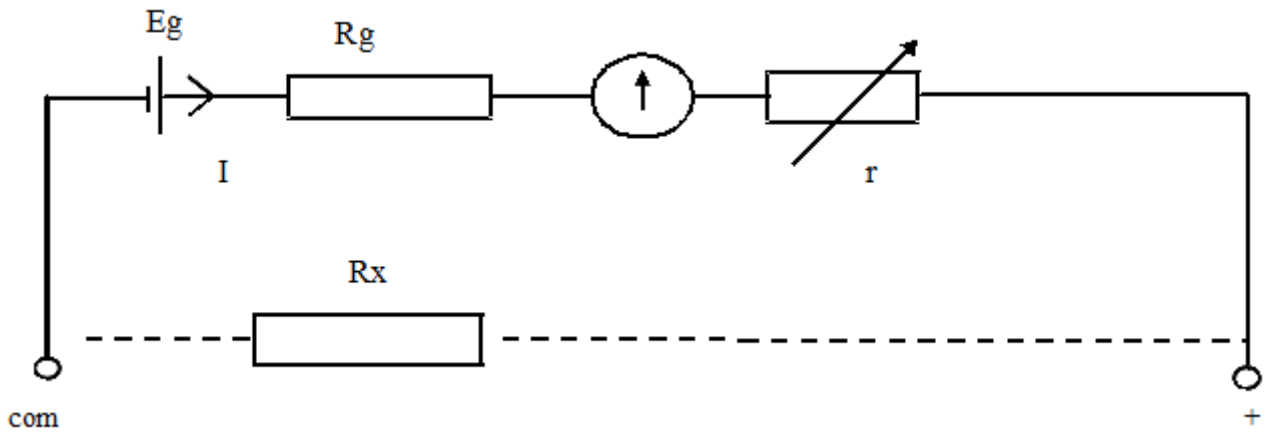


Figure 5.1. Schéma de principe d'un ohmmètre à aiguille

$R_x$  : 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  $R_x$ . En effet, le courant  $I$  parcourant le circuit à pour expression :

$$I = \frac{E_g}{R_g + r + R_x}$$

Or la déviation de l'aiguille de l'ECM (Equipage à Cadre Mobile) est proportionnelle à  $I$  par la relation :

$$d = K.I = K \cdot \frac{E_g}{R_g + r}$$

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

$$d_{cc} = K.I_g = K \cdot \frac{E_g}{R_g + r + R_x}$$

Ces deux dernières équations permettent d'écrire :

$$\frac{d_{cc}}{d} = \frac{I_g}{I} = \frac{R_g + R_x + r}{R_g + r} = 1 + \frac{R_x}{R_g + r}$$

## Mesures électriques et électroniques

$$\Rightarrow R_x = K \cdot E_g \cdot \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_{cc}} \right)$$

$R_x$  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).

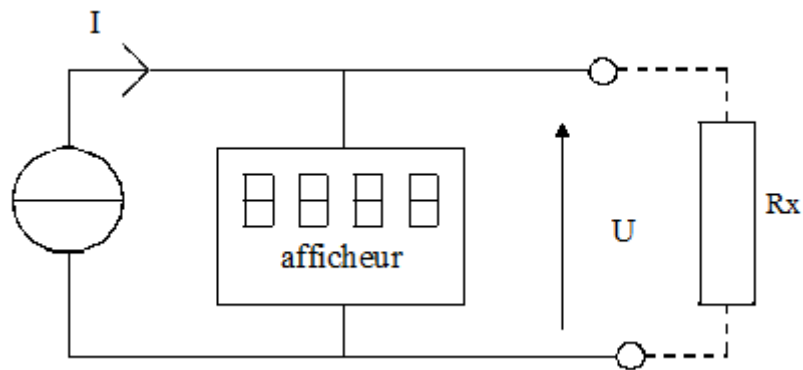
**Mode opératoire :** La mesure se fait en deux étapes :

- ✓ 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 à 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 ( $E_g$ ,  $R_g$  et  $r$ ) qui est généralement entre 3% et 5%.

### **5.2.2 Ohmmètre numérique**

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 5.2).



**Figure 5.2. Schéma de principe d'un ohmmètre numérique**

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

Les appareils actuels sont plus élaborés 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 négligeables, donc la mesure est plus précise.

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

$\pm ( \dots \% \text{ of reading} + \dots \text{ digit} )$  digit : résolution de l'appareil.

### 5.2.3 Méthode voltampère métrique

Cette méthode utilise la loi d'Ohm ( $V = R \cdot I$ ). On cherche la résistance  $R$  à partir de la tension  $V$  aux bornes de la résistance et de l'intensité  $I$  du courant dans le circuit.

Selon la résistance on choisit le montage « aval » ou « amont ». Il s'agit d'un montage dans lequel un générateur de tension  $E$  débite un courant  $I$  dans la résistance  $R_x$  à mesurer ; selon l'emplacement du voltmètre (**avant ou après** l'ampèremètre utilisé pour mesurer  $I$ ) utilisé pour mesurer  $V$ , deux montages sont utilisés les montages aval et amont.

#### 5.2.3.1 Montage aval

Pour le montage aval, l'ampèremètre est placé avant le voltmètre.

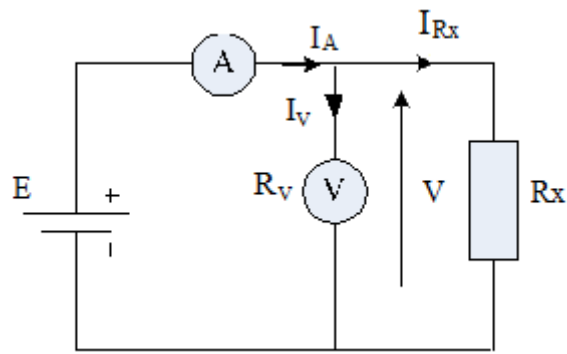


Figure 5.3 : Montage aval

$R_A$  et  $R_V$  : Résistances internes respectives de l'ampèremètre et du voltmètre.

$$R_A = \frac{U_c}{I_c}$$

$R_A$  : Résistance interne de l'ampèremètre

$U_c$  : Chute de tension aux bornes de  $R_A$  (donné par le constructeur)

$I_c$  : Calibre de l'ampèremètre

$$R_V = r \cdot U_c$$

$R_V$  : Résistance interne du voltmètre

$r$  : Résistance spécifique (donné par le constructeur)

$U_c$  : Calibre du voltmètre.

On a :

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

Avec :

$$I = I_{Rx} + I_V$$

D'où :



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

On obtient donc :

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

L'incertitude absolue de méthode de cette mesure est :

$$\Delta R_x = |R - R_x|$$

$$\Delta R_x = \left| \frac{R_x \cdot R_V}{R_x + R_V} - R_x \right|$$

$$\Delta R_x = \frac{R_x^2}{R_x + R_V}$$

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x}{R_x + R_V} = \frac{1}{1 + \frac{R_V}{R_x}}$$

L'incertitude relative est autant plus faible si la résistance à mesurer  $R_x$  est plus petite que la résistance interne du voltmètre  $R_V$ .

Comme la résistance du voltmètre est importante, on peut dire que le montage aval est utilisé pour mesurer les **résistances de faibles valeurs**.

### 5.2.3.2 Montage amont

Pour le montage amont, l'ampèremètre est placé avant le voltmètre.

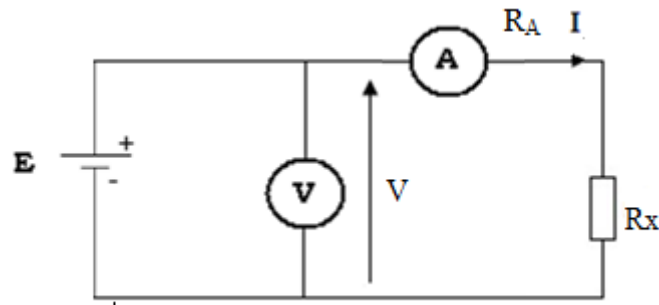


Figure 5.4 : Montage amont

## Mesures électriques et électroniques

En appliquant la loi des mailles :

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

Où :

$$R = R_A + R_x$$

Avec :

$R_x$  : Résistance à mesurer

$$R_x = R - R_A$$

L'incertitude absolue de méthode de cette mesure est :

$$\Delta R_x = |R - R_x| = R_A$$

L'incertitude relative de  $R_x$  :

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}$$

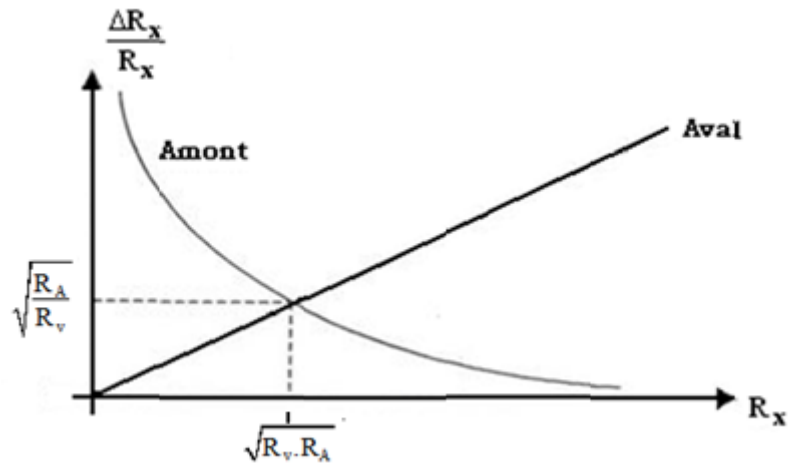
L'incertitude relative est autant plus faible si la résistance à mesurer  $R_x$  est plus grande que la résistance interne de l'ampèremètre  $R_A$ .

Comme la résistance de l'ampèremètre est de faible valeur, on peut dire que le montage amont est utilisé pour mesurer les **résistances de valeurs élevées**.

### 5.2.3.3 Evolution de l'incertitude relative

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

la figure suivante :



**Figure 5.5 : Evolution des incertitudes relatives en fonction de la valeur de résistance à mesurer**

Le choix du montage sera fait selon la règle suivante :

- ✓ Si  $R_x < \sqrt{R_A R_V}$  : montage aval
- ✓ Si  $R_x > \sqrt{R_A R_V}$  : montage amont
- ✓ Si  $R_x = \sqrt{R_A R_V}$  : les deux montages sont équivalents du point de vue précision

Le choix de l'appareillage doit tenir compte des incertitudes introduites et de la précision recherchée. En électrotechnique (domaine des courants forts) les perturbations introduites par les appareils sont pratiquement négligeables, mais il convient d'être plus prudent en électronique (domaine des courants faibles).

### 5.2.4 Mesure des résistances avec le pont de Wheatstone

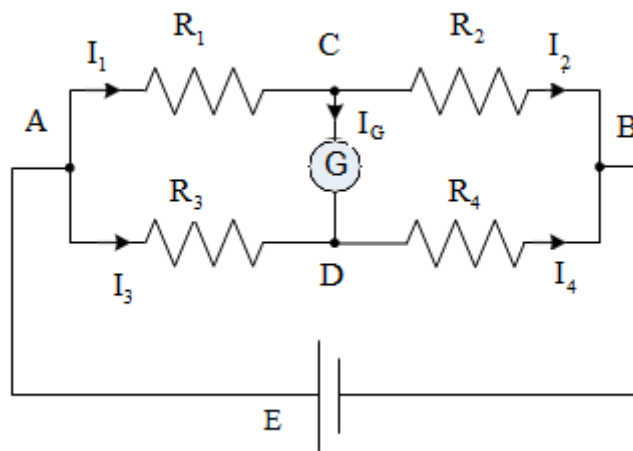


Figure 5.6 : Schéma de principe du pont de Wheatstone

G : Galvanometre.

L'équilibre se traduit par  $I_G = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_1 = I_2 \text{ et } I_3 = I_4 \\ U_{AC} = U_{AD} \text{ et } U_{CB} = U_{DB} \end{cases} \Rightarrow R_1 R_4 = R_2 R_3$

L'équation d'équilibre est symétrique par rapport aux quatre résistances du pont. Ce qui nous permet de placer la résistance  $R_X$  dans n'importe quelle branche.

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

- Les erreurs de fabrication des résistances (tolérance)
- Les erreurs dues à une mauvaise appréciation de la nullité du courant dans le galvanometre.

Le pont de Wheatstone est utilisé pour mesurer de  $1 \Omega$  à  $10^7 \Omega$ . La précision de la mesure est de l'ordre de 0,01%.

**Remarque :**

**- Le courant  $I_G$  n'est pas nulle, il est minimal**

**- Il faudrait utiliser des résistances  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  et  $R_4$  avec une bonne précision (0.2 % au moins) (boites à décades)**

### 5.2.5 Mesure de la résistance à l'aide de la méthode de comparaison

Elle consiste à faire traverser par le courant la résistance à mesurer et une résistance connue  $R$ .

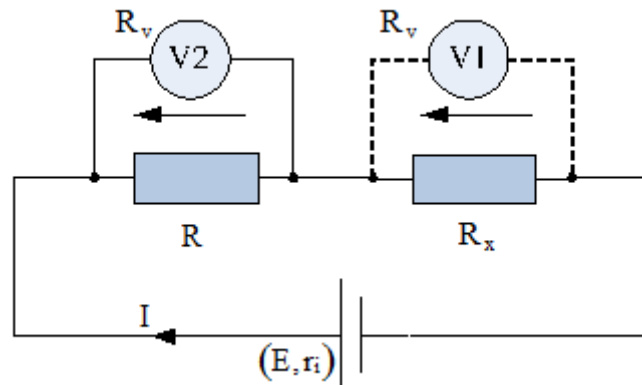


Figure 5.7 : Schéma de principe de la méthode de comparaison

$$I = \frac{V_2}{R} = \frac{V_1}{R_x} \Rightarrow R_x = \frac{V_1}{V_2} R$$

$$R_v \gg R, R_x$$

Si on tient compte de la résistance interne des voltmètres  $R_v$  et de la résistance interne  $r$  de la source de tension (c'est le même voltmètre que l'on place successivement sur  $R$  puis sur la résistance inconnue  $R_x$ ).

### 5.2.6 Comparaison des précisions obtenues

La méthode la plus précise que nous avons testée est la méthode du pont de Wheatstone avec des incertitudes très faibles. Ce n'est pas étonnant car les résistances testées se trouvent dans la large gamme où cette méthode est précise ( $1\Omega - 1M\Omega$ ).

La méthode de l'ohmmètre est très rapide à mettre en œuvre et est plutôt précise (bien que moins précise que le pont de Wheatstone), c'est une méthode directe. La méthode la moins précise est la méthode « Volt-Ampère-métrique » car elle ajoute l'incertitude de l'ampèremètre et du voltmètre, et de plus nous avons fait des simplifications sur les calculs ce qui est source d'erreur.

## 5.3 MESURES DES IMPEDANCES

### 5.3.1 Méthode voltampère-métrique

La méthode voltampère-métrique (montage aval et amont) permet de mesurer à la fréquence industrielle l'impédance  $Z$ .

#### 5.3.1.1 Mesure de l'inductance d'une bobine

L'impédance d'une bobine  $Z_L = R + jL\omega$  est généralement faible  $Z_L \ll Z_V$ . Le montage aval est alors le plus convenable.

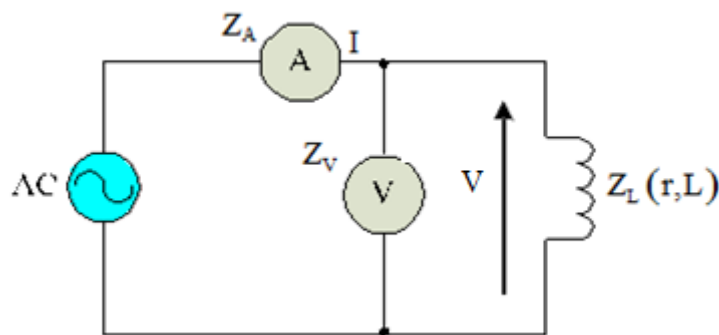


Figure 5.8 : Montage aval

Pour mesurer l'inductance d'une bobine réelle, on effectue deux essais pratiques :

- Essai en courant continu pour déterminer la résistance interne de la bobine  $r_i$ .
- Essai **en courant alternatif** pour déterminer le module de l'impédance  $Z_L$ .

#### 5.3.1.2 Mesure d'une capacité

Dans la plupart des cas l'impédance du condensateur est assez élevée ( $Z_C \gg Z_V$ ). Le montage amont est alors le plus convenable.

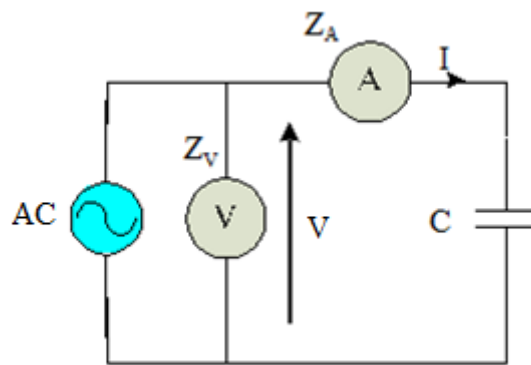


Figure 5.9 : Montage amont

### 5.3.2 Pont à 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.

Dans la plupart des cas on utilise les ponts de type Wheatstone à basse fréquence ou à fréquence acoustique (16 à 20KHz).

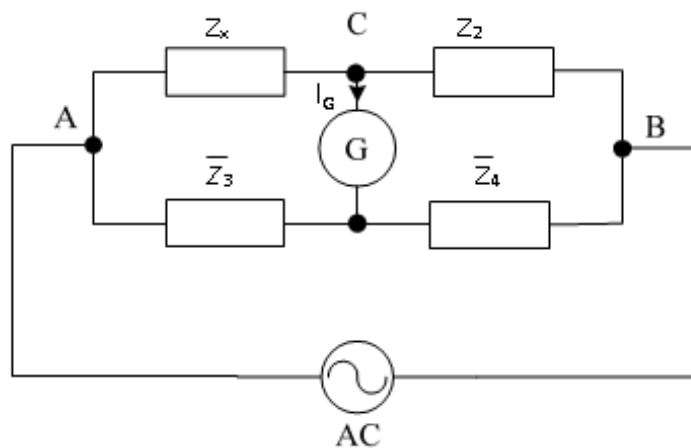


Figure 5.10 : Schéma de principe du pont à courant alternatif

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

a) *Pont de SAUTY*

Ce pont convient pour la mesure des impédances capacitives à grandes arguments, c'est-à-dire les condensateurs de bonne qualité.

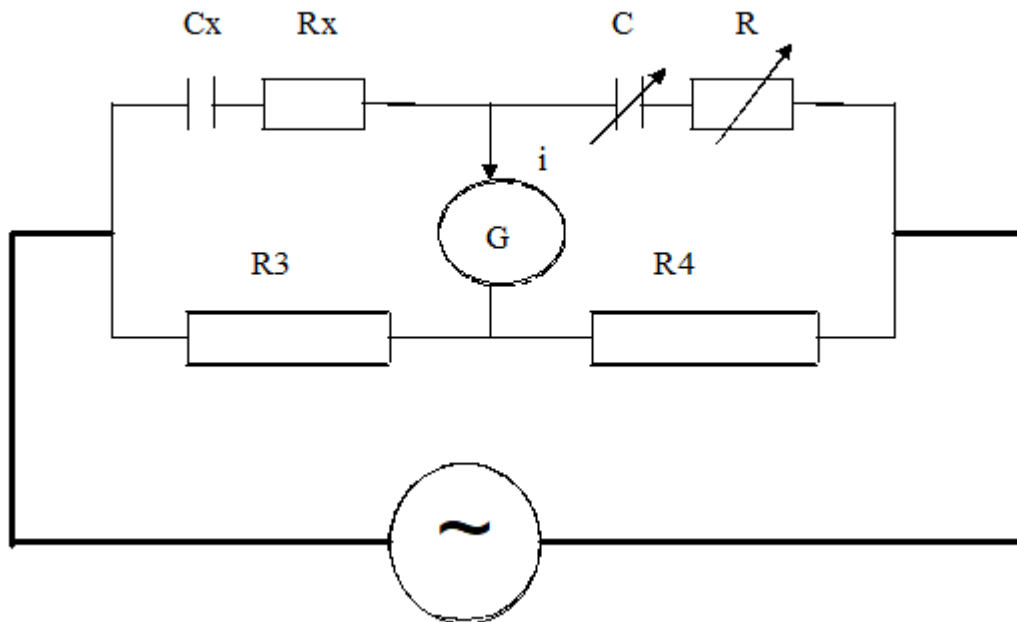


Figure 5.11 : Schéma de principe du pont de Sauty

A l'équilibre du pont on peut écrire :

$$R_x = R \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

et

$$C_x = C \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

a) *Pont d'OWEN*

Ce pont convient pour la mesure des impédances capacitives à faibles arguments, c'est-à-dire les à fortes pertes.



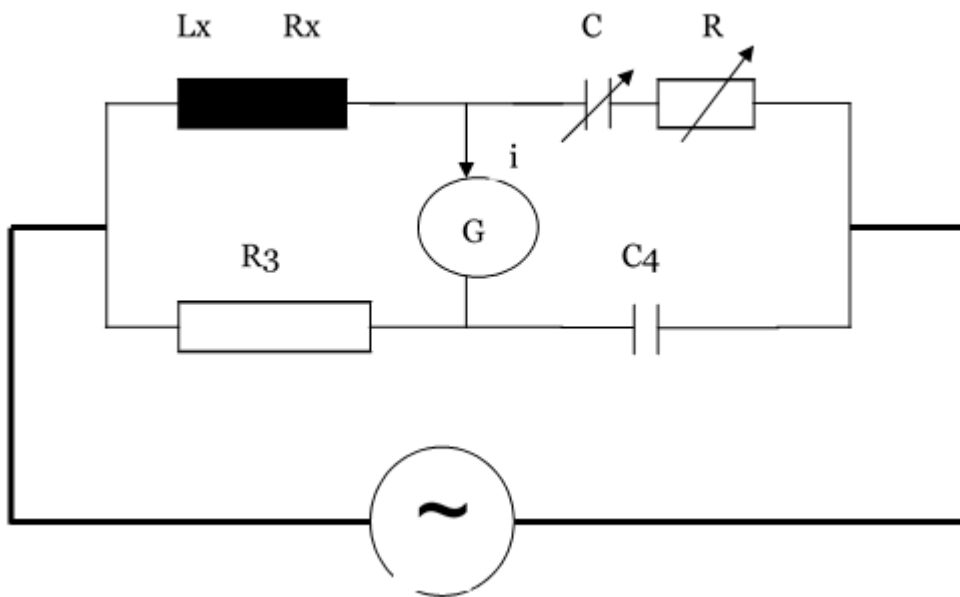


Figure 5. 12 : Schéma de principe du pont d'OWEN

A l'équilibre du pont on peut écrire :

$$R_x = R_3 \cdot \frac{C_4}{C}$$

et

$$L_x = R_3 \cdot R \cdot C_4$$

**b) Pont de MAXWELL**

Ce pont convient pour la mesure des impédances inductives à faibles arguments.

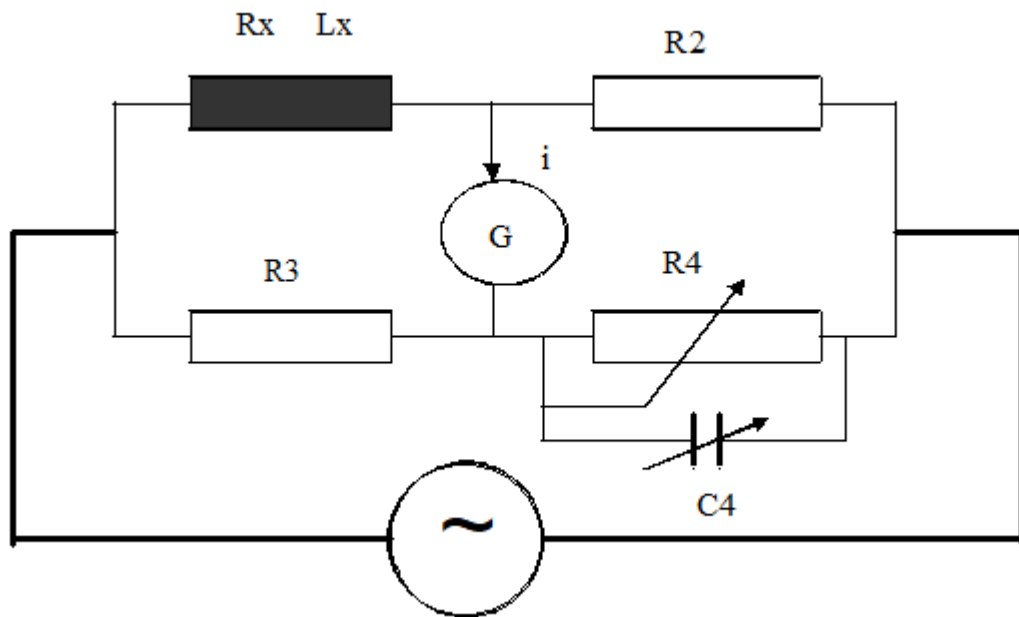


Figure 5. 13 : Schéma de principe du pont de Maxwell

A l'équilibre du pont on peut écrire :

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

et

$$L_x = R_3 \cdot R_2 \cdot C_4$$

## 5.4 CONCLUSION

Ce chapitre était consacré à la mesure des résistances et des impédances respectivement en courant continu et en courant alternatif.

Des exercices proposés sont donnés dans l'annexe 4, pour une meilleure assimilation de ce chapitre.

## CHAPITRE 6 : MESURE DES PUISSANCES

### 6.1 INTRODUCTION

Les puissances électriques peuvent être mesurées en courant continu et en courant alternatif monophasé et triphasé. Il existe les mesures directes et les méthodes indirectes.

Le but de ce chapitre est de donner les différentes méthodes de mesure et on le terminera par des exercices.

### 6.2 MESURE DE LA PUISSANCE EN COURANT CONTINU

#### 6.2.1 Mesure indirecte « méthode voltampère métrique »

La puissance fournie à un récepteur est exprimée par la relation :

$$P = V \cdot I.$$

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*).

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

##### 6.2.1.1 Montage aval

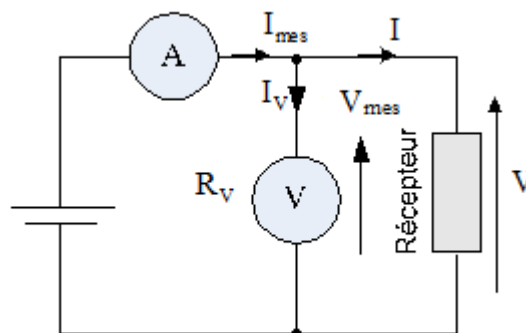


Figure 6. 1 : Montage aval

La puissance mesurée est :

## Mesures électriques et électroniques

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

La puissance consommée par le récepteur est :

$$P = V \cdot I$$

La puissance consommée par le voltmètre est :

$$P_V = \frac{V^2}{R_V}$$

La puissance mesurée est donc :

$$P_{mes} = P + \frac{V^2}{R_V}$$

L'erreur due à la méthode de mesure est donc :

$$\Delta P_{méthode} = \frac{V^2}{R_V}$$

### 6.2.1.2 Montage amont

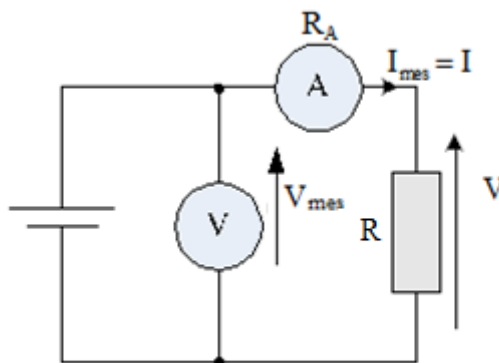


Figure 6.2 : Montage amont

$$P_{mes} = V_{mes} \cdot I_{mes} = (R + R_A)I^2 = P + R_A \cdot I^2$$

L'erreur due à la méthode de mesure est donc :

$$\Delta P_{méthode} = R_A \cdot I^2$$

### 6.2.2 Mesure directe « utilisation d'un Wattmètre »

La mesure de puissance utilise un wattmètre qui est un appareil de type électrodynamique. Il est utilisable en courant alternatif (CA ou AC) et en courant continu (CC ou DC).

Le wattmètre est un appareil insensible aux champs extérieurs ; il est constitué essentiellement d'un circuit courant et d'un circuit tension.

La constante du wattmètre est donnée par  $K$  qui représente la puissance par division de l'échelle.

$$K = \frac{\text{calibre } V \cdot \text{calibre } I}{\text{échelle}}$$

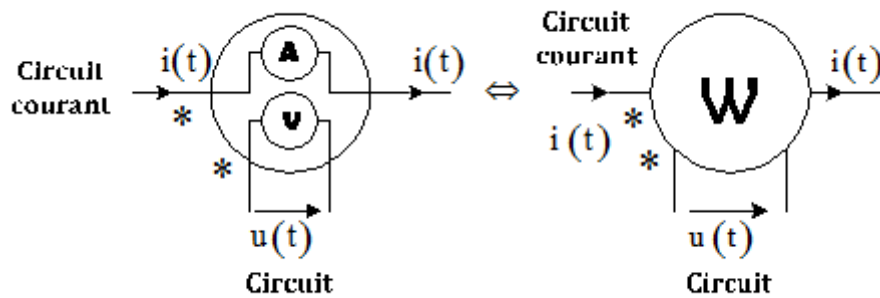


Figure 6.3 : Schéma équivalent et symbole d'un wattmètre

Le circuit courant se branche en série et le circuit tension se branche en dérivation selon deux manières différentes : montage amont et montage aval. R représente le récepteur ou charge.

#### 6.2.2.1 Branchement d'un Wattmètre

L'appareil mesure lui-même la tension (2 bornes fonctionnent comme un voltmètre) et le courant (2 bornes fonctionnent comme un ampèremètre) et effectue le produit et l'affiche sur l'écran.

## Mesures électriques et électroniques

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

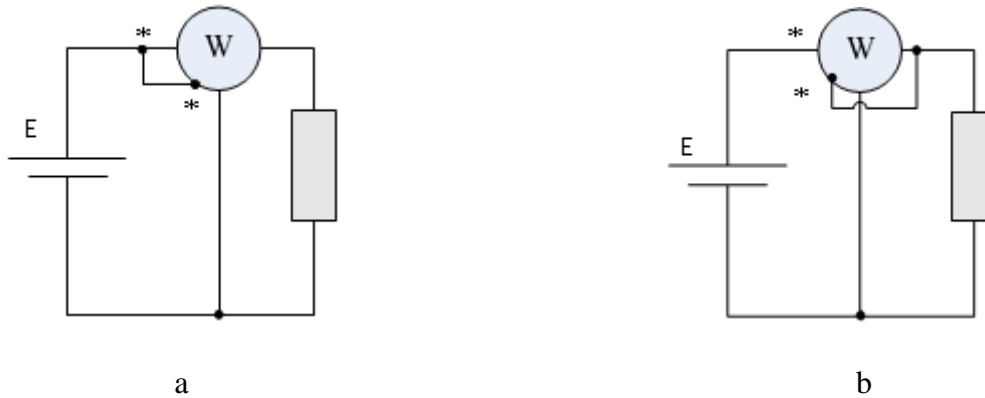


Figure 6.4 : a) Montage amont, b) Montage aval

- Pour le montage amont :

$$\Delta P_{tot} = \frac{\text{classe.calibre de } V \cdot \text{calibre de } I}{100} + R'_{AW} I^2$$

- Pour le montage aval :

$$\Delta P_{tot} = \frac{\text{classe.calibre de } V \cdot \text{calibre de } I}{100} + \frac{V^2}{R'_{VW}}$$

$R'_{AW}$  : Résistance interne du circuit intensité du wattmètre

$R'_{VW}$  : Résistance interne du circuit tension du wattmètre

## 6.3 MESURE DE LA PUISSANCE EN COURANT ALTERNATIF

Le courant alternatif est un courant électrique périodique qui change de sens deux fois par période et qui transporte des quantités d'électricité alternativement égales dans un sens et

dans l'autre. Il y a deux types de courants alternatifs : courant alternatif monophasé et courant alternatif triphasé.

Les puissances électriques peuvent être mesurées en courant alternatif monophasé et en courant alternatif triphasé.

### 6.3.1 Mesure de la puissance en courant alternatif monophasé

On entend par régime sinusoïdal le régime permanent qui s'établit après la mise sous tension d'un circuit linéaire en réponse à une entrée (source de tension ou de courant) sinusoïdale.

$$\text{Soient } v(t) = \hat{V}\cos\omega t \text{ et } i(t) = \hat{I}\cos(\omega t + \varphi)$$

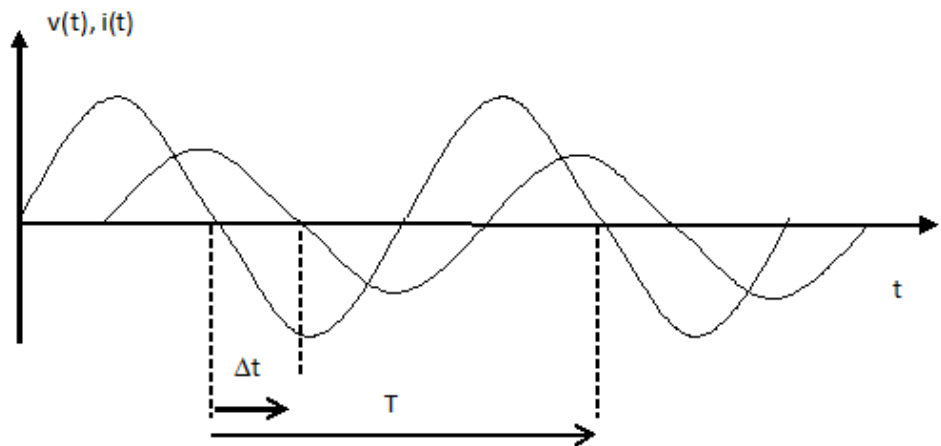


Figure 6.5 : Représentation de  $v(t)$  et  $i(t)$

Les expressions des puissances en courant alternatif sont données par :

#### Puissance apparente :

La puissance apparente est la puissance totale fournie à la charge. Elle se mesure en voltampères (VA) et correspond à la somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive du circuit.

$$S = V.I \quad [VA]$$

## Mesures électriques et électroniques

### Puissance active :

La puissance active est la puissance réellement disponible pour exécuter le travail. Elle se mesure en watts (W). Elle est de la forme :

$$P = V.I.\cos\varphi \quad [W]$$

### Puissance réactive :

La puissance réactive représente la puissance engendrée par les éléments réactifs du circuit, qui sont des condensateurs (réactance capacitive) ou des bobines (réactance inductive). La puissance réactive ne consomme pas d'énergie, mais n'effectue aucun travail. Elle se mesure en voltampères réactifs (VARs).

$$Q = V.I.\sin\varphi \quad [VAR]$$

Avec :

$V$  : Tension efficace simple absorbée par la charge :

$$V = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2}}$$

$I$  : Courant efficace absorbé par la charge

$$I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$$

$\rho$  : Déphasage entre le courant et la tension.

#### 6.3.1.1 Mesure de la puissance apparente

Pour mesurer la puissance apparente, il faut utiliser un ampèremètre et un voltmètre.



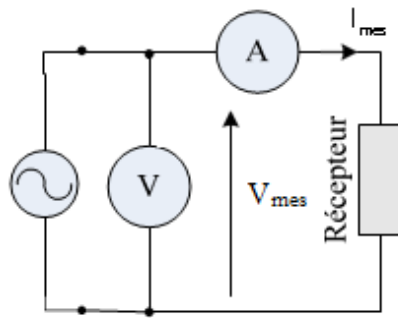


Figure 6.6 : Mesure de la puissance apparente

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

### 6.3.1.2 Mesure de la puissance active

#### Méthode directe

Pour mesurer la puissance active, on utilise un wattmètre. Le mode de branchement est le même que celui du courant continu.

#### Méthode de trois ampèremètres

Le principe de cette méthode consiste à brancher trois ampèremètres suivant le schéma, ou R représente une résistance étalon de grande puissance.

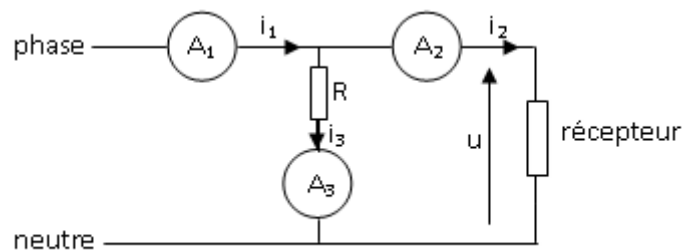


Figure 6.7 : Mesure de la puissance active.

$$i_1 = i_2 + i_3 \Rightarrow i_1^2 = (i_2 + i_3)^2 = i_2^2 + i_3^2 + 2i_2i_3$$

$$p = u \cdot i_2 = R \cdot i_3 \cdot i_2 = R(i_1^2 - i_2^2 - i_3^2)$$

## Mesures électriques et électroniques

La puissance active consommée par le récepteur est :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{R}{T} \int_0^T (i_1^2 - i_2^2 - i_3^2)$$

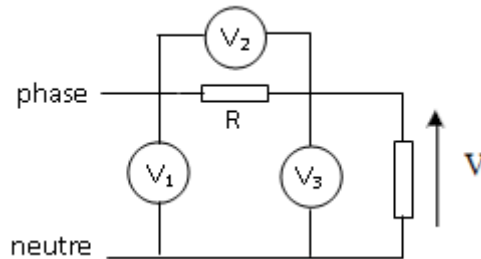
Donc :

$$P = \frac{R}{2} (I_1^2 - I_2^2 - I_3^2)$$

Avec :

$I_1, I_2, I_3$  : Valeurs efficaces des courants.

### Méthode de trois voltmètres



**Figure 6.8 : Mesure de la puissance active avec trois voltmètres**

$$v_1 = v_2 + v_3 \Rightarrow v_1^2 = (v_2 + v_3)^2 = v_2^2 + v_3^2 + 2v_2v_3$$

$$p = v \cdot \frac{v_2}{R} = \frac{1}{2R} (v_1^2 - v_2^2 - v_3^2)$$

La puissance active consommée par le récepteur est :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \cdot dt = \frac{1}{2RT} \int_0^T (v_1^2 - v_2^2 - v_3^2)$$

Donc :

$$P = \frac{1}{2R} (V_1^2 - V_2^2 - V_3^2)$$

$V_1, V_2, V_3$  : Valeurs efficaces des tensions.

### 6.3.1.3 Mesure de la puissance réactive

Pour avoir la puissance réactive, il faut mesurer la puissance apparente  $S$  et la puissance active  $P$ .

La puissance apparente peut s'écrire comme suit :

$$\vec{S} = P + jQ$$

$$\Rightarrow S = \sqrt{Q^2 + P^2}$$

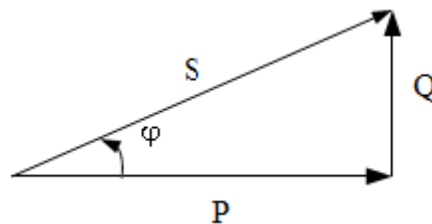


Figure 6.9 : Triangle de puissance en régime sinusoïdal

La puissance réactive est donc :

$$Q = \pm\sqrt{S^2 - P^2}$$

En tenant compte du type du récepteur :

- Pour une charge résistive  $\Rightarrow Q = 0, \varphi = 0$
- Pour une charge inductive  $\Rightarrow Q > 0, \varphi > 0$
- Pour une charge capacitive  $\Rightarrow Q < 0, \varphi < 0$

### 6.3.2 Mesure de la puissance en triphasé

❖ Pour un couplage étoile :

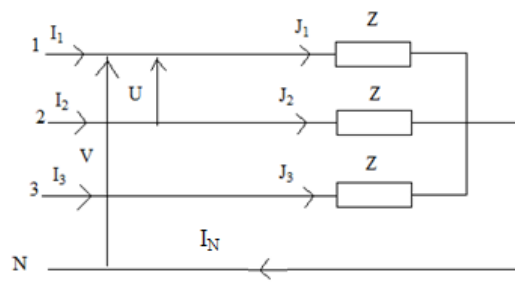


Figure 6.10 : Récepteur couplé en étoile

## Mesures électriques et électroniques

- Puissance active :

$$P = 3.V.I.\cos\varphi$$

Sachant que :

$$U = \sqrt{3}.V$$

Avec :

U : Tension efficace composée (entre phases)

V : Tension efficace simple (entre phase et neutre).

Donc :

$$P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$$

- Puissance réactive :

$$Q = 3.V.I.\sin\varphi$$

Sachant que :

- $U = \sqrt{3}.V$

- Donc :

$$Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi$$

- Puissance apparente :

$$S = 3.V.I$$

Sachant que :

$$U = \sqrt{3}.V$$

Donc :

$$S = \sqrt{3}.U.I$$

- ❖ Pour un couplage triangle :

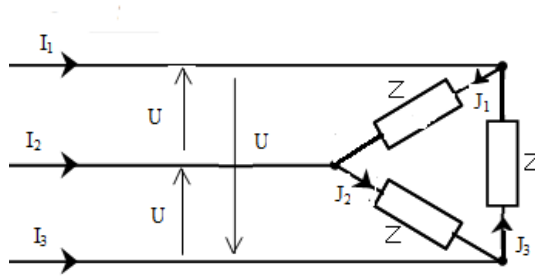


Figure 6.11 : Récepteur couplé en triangle

- Puissance active :

$$P = 3. U. J. \cos\varphi$$

Sachant que :

$$I = \sqrt{3}. J$$

Avec :

I : Courant efficace de ligne

J : Courant efficace de phase

Donc :

$$P = \sqrt{3}. U. I. \cos\varphi$$

- Puissance réactive :

$$Q = 3. U. J. \sin\varphi$$

Sachant que :

- $I = \sqrt{3}. J$

- Donc :

$$Q = \sqrt{3}. U. I. \sin\varphi$$

- Puissance apparente :

$$S = 3. U. J$$

## Mesures électriques et électroniques

Sachant que :

$$I = \sqrt{3}.J$$

Donc :

$$S = \sqrt{3}.U.I$$

Donc, on peut dire que quel que soit le type de couplage du récepteur, les puissances en triphasé s'expriment de la manière suivante :

➤ Puissance active :

$$P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi$$

➤ Puissance réactive :

$$Q = \sqrt{3}.U.I.\sin\varphi$$

➤ Puissance apparente :

$$S = \sqrt{3}.U.I$$

### 6.3.2.1 Mesure de la puissance apparente

Pour le cas « a » :

$$S = \sqrt{3}.U_{mes}.I_{mes}$$

Pour le cas « b » :

$$S = 3.V_{mes}.I_{mes}$$

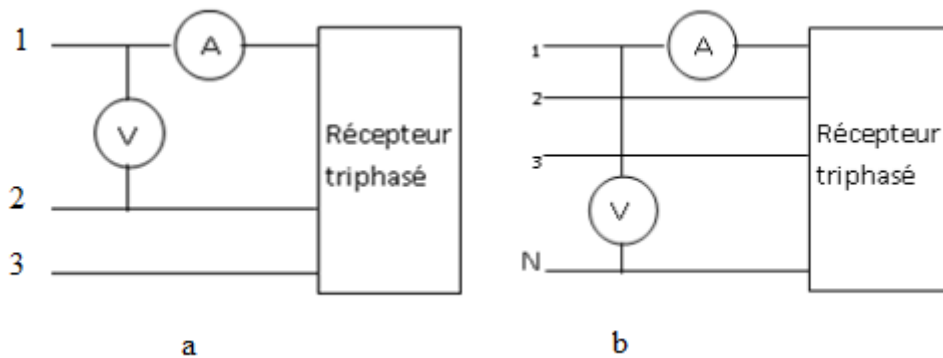


Figure 6.13 : Mesure de la puissance apparente

### 6.3.2.2 Mesure de la puissance active

Pour mesurer la puissance active on utilise :

- ❖ Trois wattmètres :

Chaque wattmètre mesure la puissance active consommée par une phase du récepteur.

La puissance active totale mesurée est donc :

$$P_{mes} = P_1 + P_2 + P_3$$

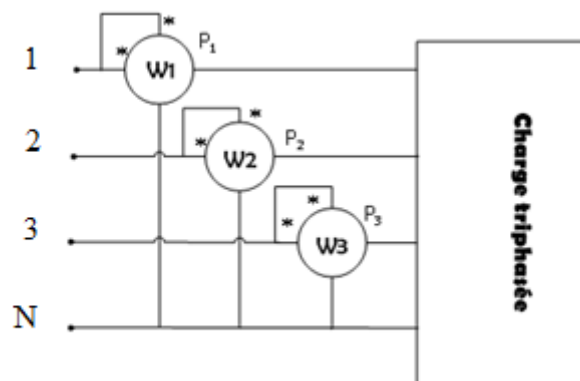


Figure 6.14 : Mesure de la puissance active avec 3 wattmètres

- ❖ Deux wattmètres

Dans le cas où on dispose de trois phases, on utilise la méthode des deux wattmètres.

## Mesures électriques et électroniques

Les deux wattmètres mesurent la puissance active consommée

Pour une charge inductive :  $P_{mes} = P_1 + P_2$

Pour une charge capacitive :  $P_{mes} = P_1 - P_2$

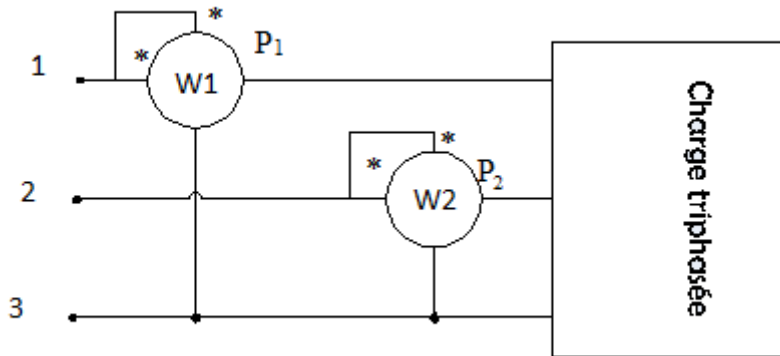


Figure 6.15 : Mesure de la puissance active avec deux wattmètres

### ❖ Un wattmètre

Pour un système triphasé équilibré, on peut utiliser un seul wattmètre branché entre phase et neutre. Sachant que la puissance mesurée est la même pour les trois phases, la puissance mesurée peut s'écrire :

$$P_{mes} = 3.P$$

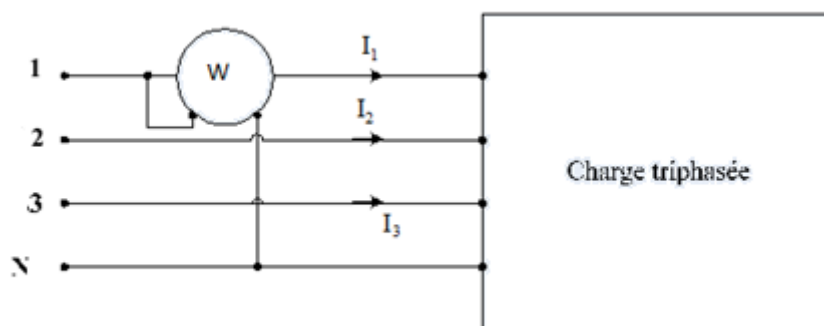


Figure 6.16 : Mesure de la puissance active avec un wattmètre

### 6.3.2.3 Mesure de la puissance réactive

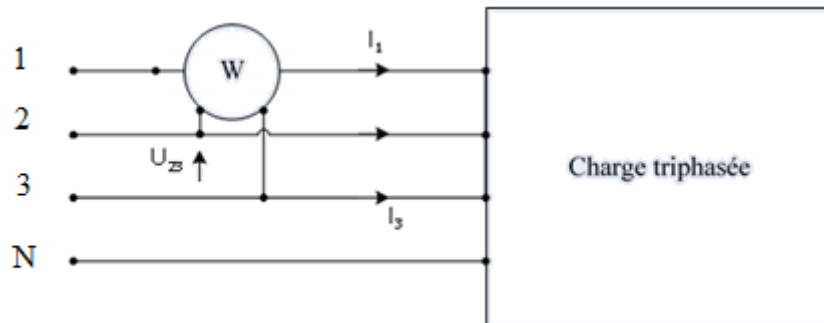
Pour mesurer la puissance réactive on utilise :



### ❖ Un wattmètre

On peut mesurer la puissance réactive en utilisant un wattmètre branché aux bornes de deux phases. La puissance réactive mesurée est donc :

$$Q_{mes} = \sqrt{3} \cdot P$$



**Figure 6.17 : Mesure de la puissance réactive avec un wattmètre**

### ❖ Deux wattmètres

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.

Pour une charge inductive :

$$Q_{mes} = \sqrt{3}(P_1 - P_2)$$

Pour une charge capacitive :

$$Q_{mes} = \sqrt{3}(P_1 + P_2)$$

## 6.4 CONCLUSION

Ce chapitre était consacré à la mesure des puissances actives en courant continu en utilisant la méthode directe (wattmètre) et la méthode indirecte (voltampère métrique).

En courant alternatif, on a vu comment mesurer les puissances actives, réactives et apparentes, en monophasé et en triphasé.

## Mesures électriques et électroniques

Des exercices proposés sont dans l'annexe 5 pour une meilleure assimilation de ce chapitre.

## REFERENCES

- [1] P. Oguic ; Mesures et PC ; Edition ETSF.
- [2] D. Hong ; Circuits et mesures électriques ; Dunod ; 2009.
- [3] W. Bolton; Electrical and electronic measurement and testing ; 1992.
- [4] A. Fabre ; Mesures électriques et électroniques ; OPU ; 1996.
- [5] G. Asch ; Les capteurs en instrumentation industrielle ; édition DUNOD, 2010.
- [6] L. Thompson; Electrical measurements and calibration: Fundamentals and applications, Instrument Society of America, 1994.
- [7] J. P. Bentley; Principles of measurement systems ; Pearson education ; 2005.
- [8] J. Niard ; Mesures électriques ; Nathan ; 1981.
- [9] P. Beauvilain ; Mesures Electriques et Electroniques.
- [10] Andrey Elenkov, cours mesures électriques, Université Technique, Sofia. [ff.tu-sofia.bg/courses/Elenkov\\_Coourse\\_ME\\_V.pdf](http://ff.tu-sofia.bg/courses/Elenkov_Coourse_ME_V.pdf)
- [11] Khaterchi Hechmi, Support de cours de mesure électrique, Département Génie Electrique, ISET, Nabeul. [www.technologuepro.com/Mesure-electrique/Introduction.pdf](http://www.technologuepro.com/Mesure-electrique/Introduction.pdf)
- [12] Samir Arfa, cours mesure électrique, Département Génie Electrique, ISE, Kairouan. [www.isetkr.rnu.tn/new/index.php?option=com\\_k2&view=item&task](http://www.isetkr.rnu.tn/new/index.php?option=com_k2&view=item&task).
- [13] Narjess Sghaier, Redia Douiri, Cours mesures Electriques, ISET, Nabeul. [www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-19-mesures-electriques-11](http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-19-mesures-electriques-11)
- [14] [www.technologuepro.com/mesures-electriques-11/chapitre-2-les-erreurs-de-mesure.pdf](http://www.technologuepro.com/mesures-electriques-11/chapitre-2-les-erreurs-de-mesure.pdf)
- [15] [www.technologuepro.com/mesures-electriques.../chapitre-1-generalites-sur-la-mesure](http://www.technologuepro.com/mesures-electriques.../chapitre-1-generalites-sur-la-mesure)
- [15] [lire.me/search/Oscilloscope: Numerique/pdf/3](http://lire.me/search/Oscilloscope:Numerique/pdf/3)
- [16] [cours-examens.org/.../336-10-cours-et-35-corriges-d-examens-de-technique-de-mesur](http://cours-examens.org/.../336-10-cours-et-35-corriges-d-examens-de-technique-de-mesur).
- [17] Mesures en électrotechnique ; (Document D 1 501) par André Leconte Les techniques de l'ingénieur

## ANNEXE 1

### EXERCICES RESOLUS

#### Enoncés :

En appliquant à une résistance inconnue  $R$ , une tension  $U = 27,2V$  lue sur un voltmètre numérique possédant 3 tubes lumineux, 300 points de mesure, une gamme de 30V et une précision de :  $\pm (0,2\% L, 2\text{points})$ .

Le courant  $I$  est mesuré à l'aide d'un ampèremètre à dérivation de classe : 0,5, de calibre divisions 1A, de lecture  $L=92,85$  divisions et une échelle de 100. On estime le quart de division.

- 1) Calculer l'incertitude absolue sur  $R$ .
- 2) Calculer l'incertitude relative.
- 3) Exprimer  $R$  de deux façons.

#### Corrigé :

- 1) Calcul de l'incertitude absolue sur  $R$

$$U = R.I \Rightarrow R = \frac{U}{I}$$

$$\Delta R = \left| \frac{\partial R}{\partial U} \right| \Delta U + \left| \frac{\partial R}{\partial I} \right| \Delta I$$

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

$$U = 27.2 V$$

$$\Delta U = \frac{0.2 * 27.2}{100} + \frac{2 * 30}{N}$$

$$\Delta U = 0.2544 V$$

$$I = \frac{L.C}{E}$$

## Mesures électriques et électroniques

$$I = \frac{92.85 * 1}{100}$$

$$I = 0.93 \text{ A}$$

$$\Delta I = \frac{C_L \cdot C}{100} + \frac{C \cdot \Delta L}{E}$$

$$\Delta I = \frac{0.5 * 1}{100} + \frac{1 * 0.25}{E}$$

$$\Delta I = 0.0075 \text{ A}$$

$$\Delta R = \frac{1}{0.93} * 0.2544 + \frac{27.2}{(0.93)^2} * 0.0075$$

$$\Delta R = 0.51 \Omega$$

2) Calcul de l'incertitude relative

$$R = \frac{U}{I} = 29.25 \Omega$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) \% = \frac{0.51}{29.25} * 100$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) \% = 1.74 \%$$

3) L'écriture de R sous les deux formes

$$R = (29.25 \pm 0.51) \Omega$$

$$R = (29.25 \Omega \pm 1.74 \%)$$

## EXERCICES PROPOSES

### Exercice 1

On procède de mesurer la puissance électrique dissipée dans un circuit composé de trois résistances associées en série dont  $\mathbf{R}_1 = 47 \Omega \pm 5\%$  ,  $\mathbf{R}_2 = 33\Omega \pm 3\%$  et  $\mathbf{R}_3 = 22 \Omega \pm 2\%$  .

L'intensité de courant  $I=2\text{A}$  a été mesurée avec une incertitude absolue totale de  $\pm 0,05\text{A}$ .

## Mesures électriques et électroniques

- 1) Calculer l'erreur relative, commise sur la mesure de puissance totale  $P=R.I_2$ .
- 2) Exprimer le résultat de deux façons. Déterminer l'intervalle de confiance P.

### Exercice 2

Une résistance  $R = 3\Omega \pm 0,5\%$  est parcourue par un courant I qui a été mesuré par l'ampèremètre dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Classe : 0,5
- Nombre totale de divisions :  $N=100$
- Calibre : 5A
- Numéro de graduation durant laquelle s'immobilise l'aiguille est 82.

- 1) Calculer l'incertitude absolue sur la mesure de la puissance  $P=R.I_2$ . (On estime le quart de division).
- 2) Donner la valeur numérique de P.
- 3) Calculer l'incertitude relative correspondante.

### Exercice 3

On vient de mesurer un courant ( $I=2,5A$ ) d'un circuit électrique successivement par :

- Un ampèremètre analogique à déviation de classe 1,5 sur un calibre de 3A et d'une échelle de 30 divisions. La lecture est appréciée à une demie de division.
- Un ampèremètre numérique de 300 points, sur sa gamme de 4A, dont la précision indiquée est :  $\pm (0,1\%$  de lecture,  $0,01\%$  de la gamme).

- 1) Déterminer les incertitudes absolues et relatives en pourcentages sur la mesure du courant par l'appareil analogique.
- 2) Déterminer les incertitudes absolues et relatives en pourcentages sur la mesure du courant par l'appareil numérique.
- 3) Quel type d'appareil choisissez-vous pour cette mesure ? Justifier votre réponse.

### Exercice 4

On a mesuré le courant  $I$  traversant un dipôle en utilisant un ampèremètre de classe 1,5 comportant 5 calibres (10mA, 30mA, 100mA, 300mA et 1A) et deux échelles (30 et 100). On a effectué quatre essais de mesure différents de courant.

1<sup>ère</sup> mesure : avec le calibre 300mA sur l'échelle 30.

2<sup>ème</sup> mesure : avec le calibre 300mA sur l'échelle 100.

3<sup>ème</sup> mesure : avec le calibre 1A sur l'échelle 30.

4<sup>ème</sup> mesure : avec le calibre 1A sur l'échelle 100.

1) Compléter le tableau suivant :

	Calibre/ Echelle			
	30mA/30	300mA/100	1A/30	1A/100
Lecture	25	83	7,5	25
<b>I</b>				
<b><math>\Delta I_1</math></b>				
<b><math>\Delta I_c</math></b>				
<b><math>\Delta I</math></b>				
<b><math>\Delta I/I</math></b>				

On choisit une appréciation de la lecture  $n=0,5$ .

2) En admettant qu'on peut une incertitude de 5%. Quel calibre peut-on choisir ? Conclure sur le choix du calibre lors d'une mesure.

3) Quelle échelle doit-on choisir pour ce même calibre ? Pourquoi ?

## ANNEXE 2

### EXERCICES RESOLUS

#### Enoncés :

- 1) Dans un ampèremètre numérique avec les calibres 10 A, 200 mA, 20 mA et 2 mA, quel calibre faut-il utiliser en premier ?
- 2) On dispose des calibres 10 A, 200 mA, 20 mA et 2 mA. Le courant à mesurer est de 0,005 A. Quel est le meilleur calibre à utiliser pour faire cette mesure ?
- 3) On dispose des calibres 10 A, 200 mA, 20 mA et 2 mA. Le courant à mesurer est de 0,05 A. Quel est le meilleur calibre à utiliser pour faire cette mesure ?
- 4) Quel problème sur la mesure apparaît si on prend un calibre plus grand que celui de la question précédente ?
- 5) On dispose des calibres 10 A, 200 mA, 20 mA et 2 mA. Le courant à mesurer est de 0,35 A. Quel est le meilleur calibre à utiliser pour faire cette mesure ?
- 6) Que se passe-t-il si on prend un autre calibre que celui de la question précédente ? Qu'affiche alors le multimètre ?
- 7) Sur le calibre 200 mA, L'appareil affiche 119. Quelle est la précision de l'intensité donnée par l'appareil ?
- 8) Sur le calibre 10 A, L'appareil affiche 0.37. Quelle est la précision de l'intensité donnée par l'appareil ?

#### Corrigé :

1. On utilise le calibre 10 A pour la première mesure.
2.  $0,005 \text{ A} = 5 \text{ mA}$ . On prend le calibre 20mA.
3.  $0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$ . On prend le calibre 200mA.
4. La mesure sera moins précise.
5.  $0,35 \text{ A} = 350 \text{ mA}$ . On prend le calibre 10A.
6. Le calibre peut-être plus petit que la mesure. Alors le multimètre affiche un1.
7. La précision est de 1mA.
8. La précision est de 0,01A.



## EXERCICES PROPOSES

### Exercice1 :

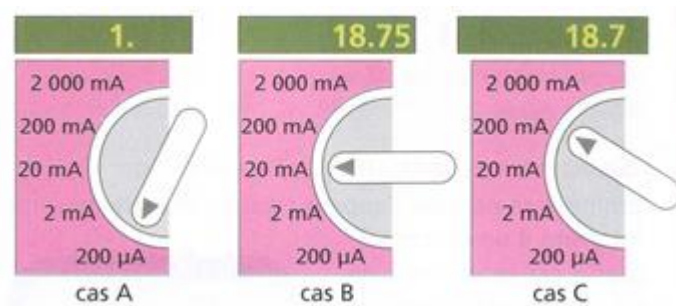
Voici les calibres disponibles sur un ampèremètre : 2 mA, 20 mA, 200 mA, 10A

Choisi le calibre le mieux adapté pour mesurer chacune des intensités suivantes :

- a) 0,16 A
- b) 4A
- c) 0,15mA
- d) 15 mA

### Exercice2 :

Un ampèremètre est inséré dans un circuit. Selon le calibre utilisé, on obtient les indications suivantes (cas A, cas B et cas C).

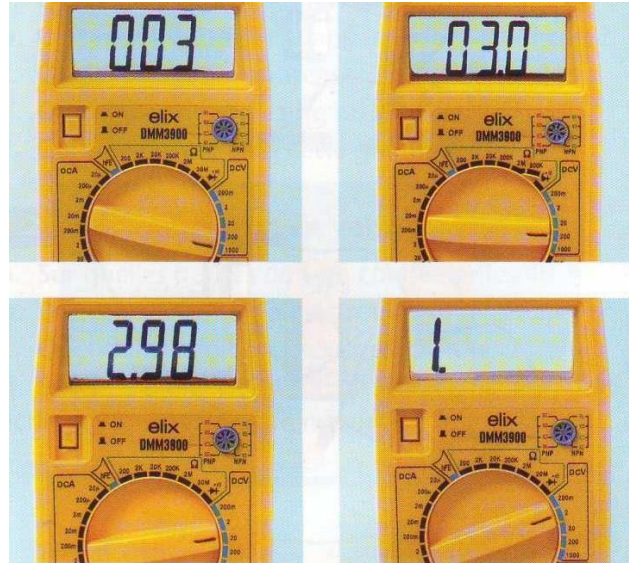


- 1) Dans quel cas le calibre sélectionné est trop petit ? Pourquoi ?
- 2) Quel est le calibre le mieux adapté à la mesure ? Justifie ta réponse.

### Exercice3

Vous branchez un voltmètre aux bornes d'une pile pour mesurer la tension sur différents calibres.

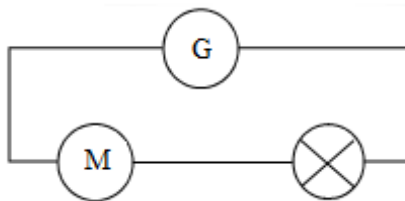
## Mesures électriques et électroniques



- 1) Par quel calibre doit-on commencer lorsque l'on ne connaît pas l'ordre de grandeur de la tension ?
- 2) Quel est l'intérêt de changer de calibre ?
- 3) Que signifie l'indication sur l'afficheur pour la dernière mesure ?
- 4) Quel est le calibre le mieux adapté ?
- 5) Ecrire le résultat de la mesure.

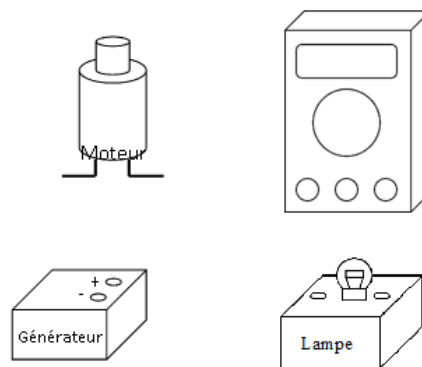
### Exercice4

- 1) Le schéma ci-dessous montre une lampe et un moteur en série. Complétez ce schéma pour mesurer la tension aux bornes de la lampe.

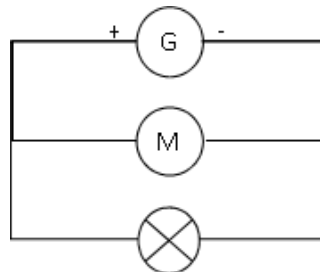


- 2) Représentez les connexions qui relient les appareils en dessous pour former le circuit ci-contre qui permet de mesurer la tension aux bornes de la lampe.

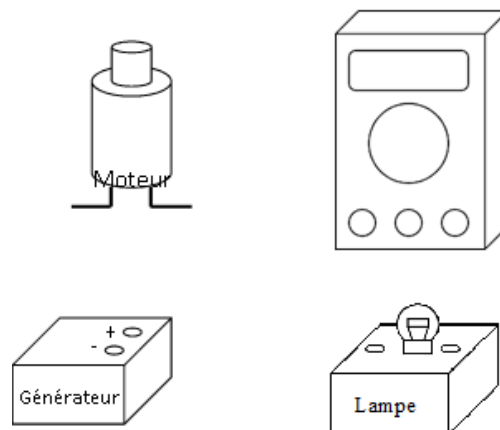
## Mesures électriques et électroniques



- 3) Le schéma en dessous montre une lampe et un moteur en dérivation. Dessinez les fils qui relient les appareils en dessous pour former ce circuit et mesurer l'intensité qui sort du moteur.



- 4) Représentez les connexions qui relient les appareils en dessous pour former le circuit ci-dessus qui permet de mesurer l'intensité qui sort du moteur



## ANNEXE 3

### EXERCICES RESOLUS

#### Enoncés :

#### Exercice 1

On dispose d'un voltmètre construit à partir d'un cadre mobile de résistance interne

$R_G = 1000 \Omega$  et de sensibilité  $I_G = 50 \mu A$  ayant les calibres **1V ; 3V, 10V et 30V**.

- 1) Représenter le schéma de ce voltmètre.
- 2) Déterminer les résistances additionnelles.
- 3) Déterminer la résistance caractéristique de ce voltmètre.
- 4) Déterminer la résistance totale.

#### Exercice 2

Les caractéristiques d'un cadre mobile sont :  $R_G=50 \Omega$  ;  $I_G=0.5 mA$

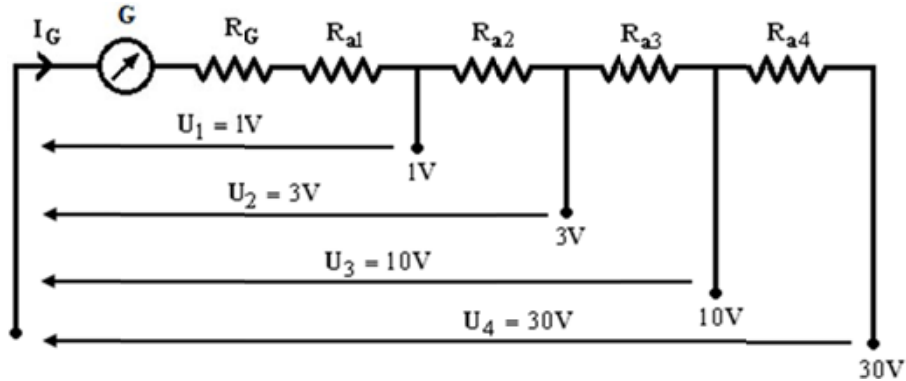
On veut réaliser de deux manières différentes un ampèremètre ayant trois calibres : **0.5 A ; 0.2A et 0.05A**.

- 1) Ampèremètre multi-gammes :
  - a) Donner le schéma de principe
  - b) Déterminer les facteurs multiplicateurs de chaque calibre
  - c) Déterminer les résistances shunt  $R_1$  ;  $R_2$  et  $R_3$ .
- 2) Ampèremètre à shunt universel :
  - a) Donner le schéma de principe
  - b) Déterminer les facteurs multiplicateurs ( $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ) en fonction de ( $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ ,  $R_{S3}$  et  $R_G$ ).
  - c) Calculer les valeurs de  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$  et  $R_{S3}$ .

Corrigé :

Exercice1

1) Schéma du voltmètre



2) Détermination des résistances additionnelles :

$$U_1 = R_G \cdot I_G + R_{a1} \cdot I_G \Rightarrow R_{a1} = \frac{U_1}{I_G} - R_G$$

$$R_{a1} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} - 10^3$$

$$\Rightarrow R_{a1} = 19 \text{ K}\Omega$$

$$U_2 = (R_G + R_{a1} + R_{a2}) \cdot I_G \Rightarrow R_{a2} = \frac{U_2}{I_G} - R_G - R_{a1}$$

$$R_{a2} = \frac{3}{50 \cdot 10^{-6}} - 10^3 - 19 \cdot 10^3$$

$$\Rightarrow R_{a2} = 40 \text{ K}\Omega$$

$$U_3 = (R_G + R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}) \cdot I_G \Rightarrow R_{a3} = \frac{U_3}{I_G} - R_G - R_{a1} - R_{a2}$$

$$R_{a3} = \frac{10}{50 \cdot 10^{-6}} - (1 + 19 + 40) \cdot 10^3$$

$$\Rightarrow R_{a3} = 140 \text{ K}\Omega$$

$$U_4 = (R_G + R_{a1} + R_{a2} + R_{a3} + R_{a4}) \cdot I_G \Rightarrow R_{a4} = \frac{U_4}{I_G} - R_G - R_{a1} - R_{a2} - R_{a3}$$

$$R_{a4} = \frac{30}{50 \cdot 10^{-6}} - (1 + 19 + 40 + 140) \cdot 10^3$$

$$\Rightarrow R_{a4} = 400 \text{ K}\Omega$$

## Mesures électriques et électroniques

3) La résistance caractéristique

$$R_c = \frac{1}{I_G}$$

$$R_c = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6}} = 2000 \Omega/V$$

4) La résistance totale

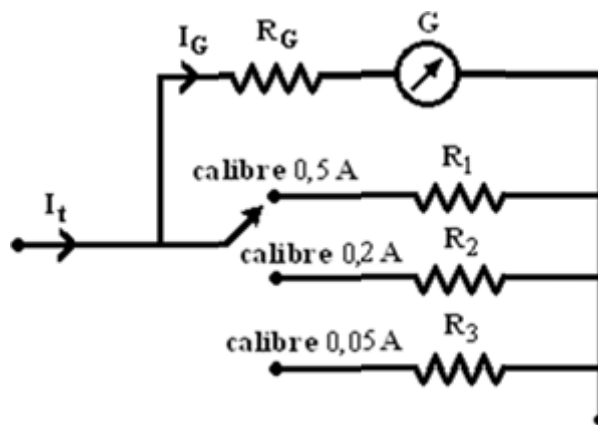
$$R_T = R_c \cdot \text{le plus grand calibre}$$

$$R_T = 2000 \cdot 30 = 60000 \Omega$$

### Exercice 2

1) Ampèremètre multi- gammes :

a) Schéma de principe :



b) Détermination des facteurs multiplicateurs :

On a :

$$m_i = \frac{I_i}{I_G}$$

Avec :

$I_i$  : calibre

Donc :

$$m_1 = \frac{0.5}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 1000$$

## Mesures électriques et électroniques

$$m_2 = \frac{0.2}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 400$$

$$m_3 = \frac{0.05}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 100$$

c) Détermination des résistances shunt :

On a :

$$R_i = \frac{R_G}{m_i - 1}$$

Donc :

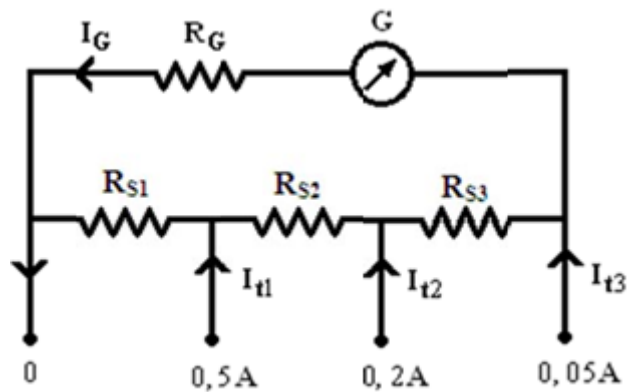
$$R_1 = \frac{50}{1000 - 1} = 0.05 \Omega$$

$$R_2 = \frac{50}{400 - 1} = 0.125 \Omega$$

$$R_3 = \frac{50}{100 - 1} = 0.5 \Omega$$

2) Ampèremètre universel :

a) Schéma de principe :



b) Détermination des facteurs multiplicateurs  $m_1$  ;  $m_2$  et  $m_3$  en fonction de  $R_{S1}$  ;  $R_{S2}$  et  $R_{S3}$

$$R_{S1}(I_1 - I_G) = (R_{S2} + R_{S3} + R_G)I_G$$

$$R_{S1}(1 - m_1) = (R_{S2} + R_{S3} + R_G)$$

$$m_1 = \frac{R_{S2} + R_{S3} + R_G + R_{S1}}{R_{S1}}$$

## Mesures électriques et électroniques

$$(R_{s1} + R_{s2})(I_2 - I_G) = (R_{s3} + R_G)I_G$$

$$(R_{s1} + R_{s2})(1 - m_2) = (R_{s3} + R_G)$$

$$m_2 = \frac{R_{s2} + R_{s3} + R_G + R_{s1}}{R_{s1} + R_{s2}}$$

$$(R_{s1} + R_{s2} + R_{s3})(I_3 - I_G) = R_G I_G$$

$$(R_{s1} + R_{s2} + R_{s3})(1 - m_3) = R_G I_G$$

$$m_3 = \frac{R_{s2} + R_{s3} + R_G + R_{s1}}{R_{s1} + R_{s2} + R_{s3}}$$

c) Calcul de  $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$  et  $R_{s3}$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_{s2} + R_{s3} + R_G + R_{s1}}{R_{s1}} \cdot \frac{R_{s2} + R_{s1}}{R_{s2} + R_{s3} + R_G + R_{s1}}$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{R_{s1} + R_{s2}}{R_{s1}}$$

$$m_1 \cdot R_{s1} = m_2 \cdot (R_{s1} + R_{s2})$$

$$R_{s2} = \frac{R_{s1} \cdot (m_1 - m_2)}{m_2}$$

$$R_{s2} = \frac{R_{s1} \cdot (1000 - 400)}{400}$$

$$R_{s2} = 1.5 R_{s1}$$

$$\frac{m_2}{m_3} = \frac{R_{s2} + R_{s3} + R_{s1}}{R_{s2} + R_{s3} + R_G + R_{s1}} \cdot \frac{R_{s2} + R_{s3} + R_G + R_{s1}}{R_{s1} + R_{s2}}$$

$$\frac{m_2}{m_3} = \frac{R_{s2} + R_{s3} + R_{s1}}{R_{s1} + R_{s2}}$$

$$m_2 \cdot (R_{s1} + R_{s2}) = m_3 \cdot (R_{s1} + R_{s2} + R_{s3})$$

$$R_{s3} = \frac{(R_{s1} + R_{s2})(m_2 - m_3)}{m_3}$$



## Mesures électriques et électroniques

$$R_{S3} = \frac{(R_{S1} + 1.5 R_{S1})(m_2 - m_3)}{m_3}$$

$$R_{S2} = \frac{2.5 R_{S1} \cdot (400 - 100)}{100}$$

$$R_{S3} = 7.5 R_{S1}$$

$$R_{S1}(m_1 - 1) = R_{S2} + R_{S3} + R_G$$

$$R_{S1}(m_1 - 1 - 1.5 - 7.5) = R_G$$

$$R_{S1} = \frac{R_G}{m_1 - 10}$$

$$R_{S1} = 0.05 \Omega$$

$$R_{S2} = 0.075 \Omega$$

$$R_{S3} = 0.375 \Omega$$

## EXERCICES PROPOSES

### Exercice 1

On dispose d'un équipement à cadre mobile (**1 mA, 1 K $\Omega$** ) et on veut réaliser un ampèremètre universel ayant les calibres suivants : **100 mA ; 1 A ; et 5 A**.

- 1) Donner le schéma de principe de cet ampèremètre.
- 2) Calculer les résistances shunt nécessaires.
- 3) Calculer la résistance interne de l'ampèremètre pour chaque calibre.

### Exercice 2

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

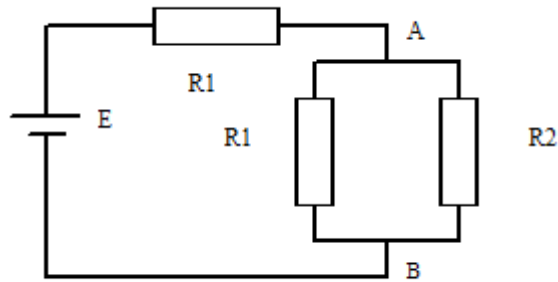
- 1) Donner le schéma de principe de ce voltmètre.
- 2) Calculer les résistances additionnelles nécessaires.
- 3) Calculer la résistance totale du voltmètre pour chaque calibre.

## ANNEXE 4

### EXERCICES PROPOSES

#### Exercice 1

On considère le montage suivant :

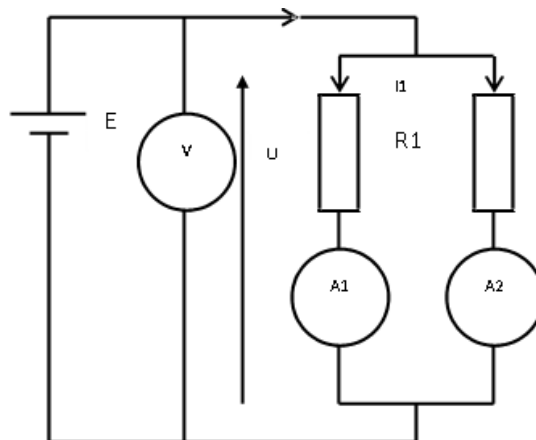


On donne :  $R1 = 8 \Omega \pm 1 \%$  ,  $R2 = 4 \Omega \pm 2 \%$  et  $E = 30 \text{ V} \pm 3 \%$

- 1- Calculer la résistance équivalente  $R_{AB}$
- 2- Calculer l'erreur absolue et l'erreur relative de  $R_{AB}$
- 3- Calculer  $U_{AB}$
- 4- Calculer l'erreur absolue et l'erreur relative de  $U_{AB}$

#### Exercice 2

On considère le circuit électrique suivant :



## Mesures électriques et électroniques

On donne les caractéristiques des appareils de mesure :

Appareil	Type	calibre	lecture	échelle	classe
A1	Numérique LGDM-341		1.5 A		
A2	Magnétoélectrique	1 A	50	100	0.5
V	Magnétoélectrique	150 V	100	150	1.5

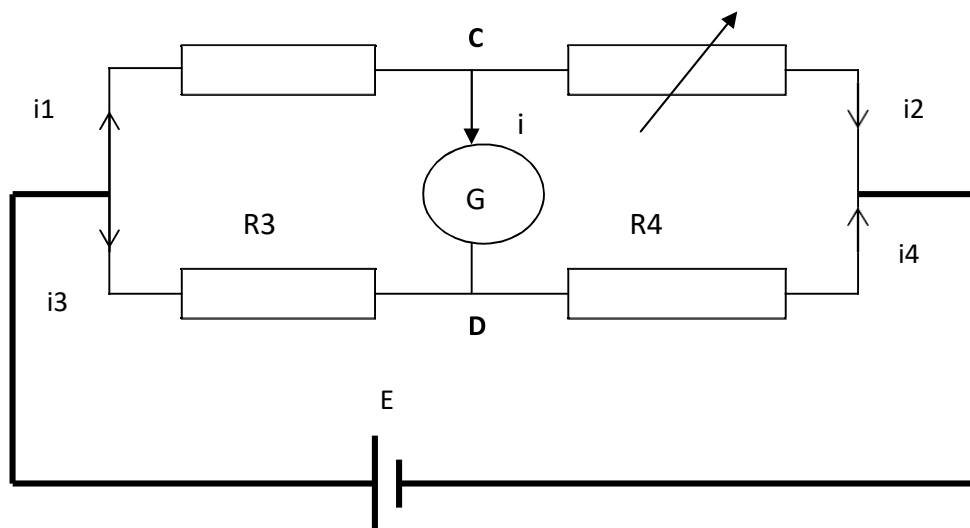
1- Calculer  $I_2$  et  $U$ . En déduire  $I$

2- Donner l'expression de la résistance équivalente du circuit en fonction de  $U$ ,  $I_1$  et  $I$ .

3- Calculer la résistance équivalente, son l'incertitude absolue et son incertitude relative.

### Exercice 3

On considère le montage de mesure suivant. Le pont est alimenté par une f.e.m  $E$ .



Avec  $G$  : galvanomètre de résistance interne très faible

$R_x$  : résistance inconnue à mesurée.

$R_3$  et  $R_4$  : résistances fixes et connues.

$R_2$  : résistance variable.

On agit sur la résistance  $R_2$  jusqu'à obtenir l'équilibre du pont (c'est à dire  $i = 0$ ).

1- A l'équilibre du pont, montrer que  $R_x = \frac{R_3}{R_4} R_2$

## Mesures électriques et électroniques

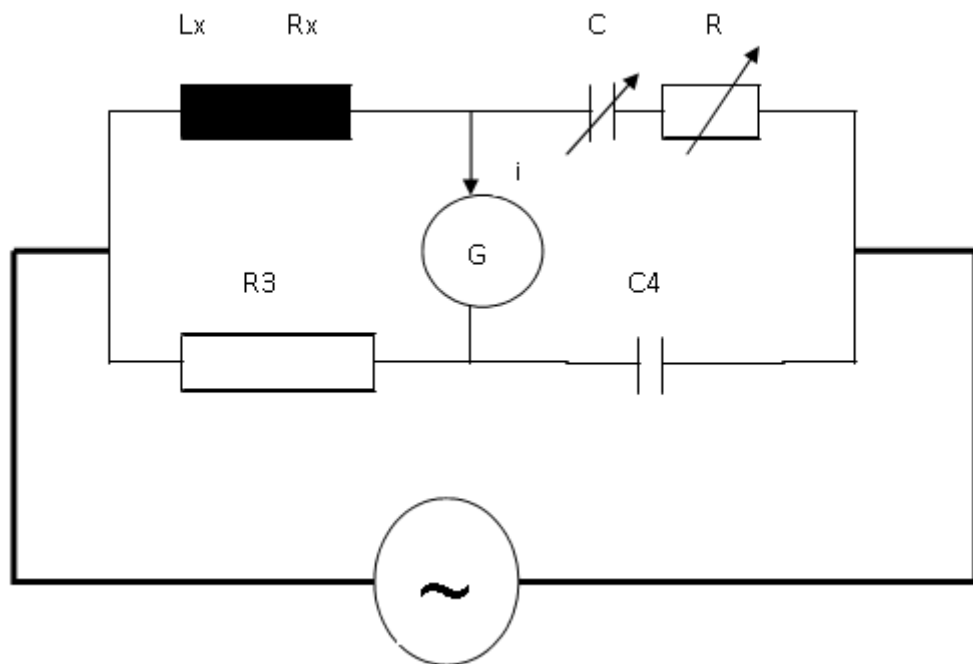
2- On donne  $R_3 = 100 \Omega \pm 0.2 \%$  ;  $R_4 = 1 \text{ K } \Omega \pm 0.2 \%$  et  $R_2$  est formée par l'association en série de quatre résistances  $R_a, R_b, R_c$  et  $R_d$  avec  $R_a = 3 \Omega \pm 0.2 \%$  ,  $R_b = 20 \Omega \pm 0.2 \%$  ,  $R_c = 400 \Omega \pm 0.2 \%$  et  $R_d = 2 \text{ K } \Omega \pm 0.2 \%$  .

a) Calculer  $R_x$ , l'erreur absolue  $\Delta R_x$  et l'erreur relative  $\frac{\Delta R_x}{R_x}$ .

b) Ecrire  $R_x$  sous les deux formes

### Exercice 4

On considère le pont d'owen suivant :



$R_3$  : Résistance pure fixe

$C_4$  : condensateur idéal connu

$Z_L$  : impédance connue

$Z_C$  : impédance variable et connue

On agit sur  $R$  et  $C$  jusqu' à obtenir l'équilibre du pont (c'est à dire  $i = 0$ ).

1- A l'équilibre du pont, exprimer  $R_x$  et  $L_x$  en fonction des éléments du pont ( $R, C, R_3, C_4$  et  $w$ ).

2- A l'équilibre du pont on donne :  $R_3 = 100 \Omega \pm 0.2 \%$  ;  $R = 25 \text{ K } \Omega \pm 2 \%$  ;  
 $C = 4 \mu\text{F} \pm 0.1 \%$  et  $C_4 = 1 \mu\text{F} \pm 0.5 \%$

## Mesures électriques et électroniques

- a) Calculer  $R_x$ ,  $L_x$ ,
- b) Calculer l'incertitude absolue de la résistance  $\Delta R_x$  et de l'inductance  $\Delta L_x$ ,
- c) Calculer l'incertitude relative de la résistance  $\Delta R_x / R_x$  et de l'inductance  $\Delta L_x / L_x$
- d) Ecrire la résistance  $R_x$  et l'inductance  $L_x$  sous les deux formes

## ANNEXE 5

### EXERCICES PROPOSES

#### Exercice 1

On se propose de mesurer les puissances **P**, **Q** et **S** d'un moteur asynchrone triphasé.

Pour mesurer la puissance apparente **S**, on utilise un ampèremètre (**A**) et un voltmètre

Pour mesurer les puissances active et réactive **P** et **Q**, on utilise deux wattmètres (**W1**) et (**W2**).

1- Donner les schémas de branchement des appareils de mesure.

2- Sachant que les caractéristiques des appareils de mesure sont :

Appareil	Type	Calibre	Lecture	Échelle	Classe
V	Magnétoélectrique avec redresseur	500 V	86	100	1,5
A	Magnétoélectrique avec redresseur	20 V	78	100	1
W1	Electrodynamique	600 V-25 A	66	150	1,5
W2	Electrodynamique	600 V-25 A	26	150	1,5

a- Calculer l'incertitude  $\Delta I$  et l'incertitude relative  $\Delta V$ . En déduire l'incertitude relative  $\Delta S/S$  et l'incertitude absolue  $\Delta S$ .

b- Calculer l'incertitude absolue des puissances  $\Delta P1$  et  $\Delta P2$ . En déduire les incertitudes absolues de  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  et les incertitudes relatives  $\Delta P/P$  et  $\Delta Q/Q$ .

c- Exprimer de deux manières différentes les résultats de mesure.

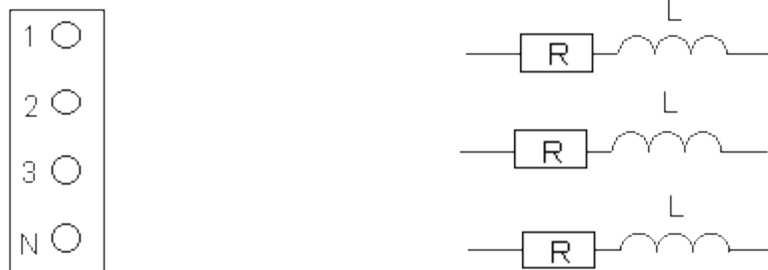
### Exercice 2

Dans le montage ci-dessous, on désire mesurer l'intensité du courant par phase  $J_{12}$ .

On précise que le récepteur :

- Est couplé en triangle ;
- Est alimenté par un réseau triphasé 220 V / 380 V, 50 Hz ;
- Est inductif ( $R = 100 \text{ W}$  et  $L = 0,1 \text{ H}$ ).

1. Compléter le schéma du montage ci-dessous permettant de réaliser cette mesure.



2. Prévoir la valeur de  $J_{12}$ .

### Exercice 3

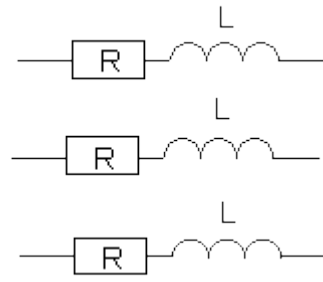
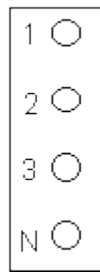
Dans le montage ci-dessous, on désire mesurer l'intensité du courant en ligne  $I_1$ .

On précise que le récepteur :

- Est couplé en étoile ;
- Est alimenté par un réseau triphasé 220 V / 380 V, 50 Hz ;
- Est inductif ( $R = 100 \text{ W}$  et  $L = 0,1 \text{ H}$ ).

1. Compléter le schéma du montage ci-dessous permettant de réaliser cette mesure.

## Mesures électriques et électroniques



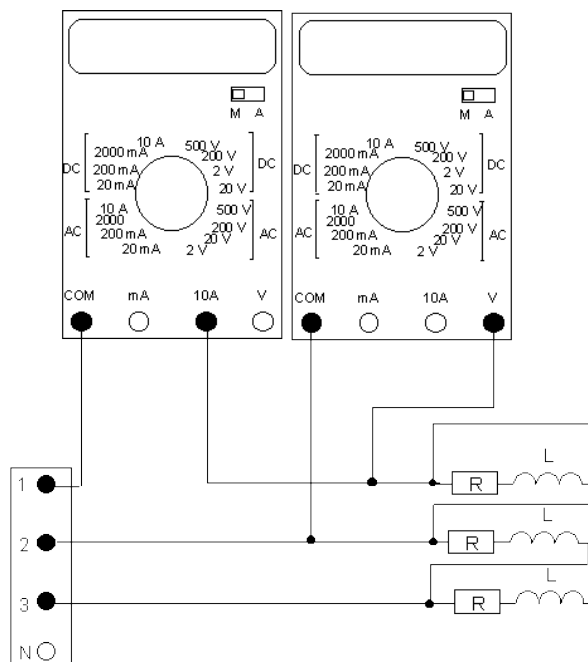
2. Prévoir la valeur de  $I_1$ .

### Exercice 4

Soit le schéma de montage ci-dessous :

On donne :

- Réseau triphasé 220 V / 380 V, 50 Hz ;
- $R = 100 \text{ W}$  et  $L = 0,1 \text{ H}$ .



1. Quelles sont les grandeurs (préciser les indices) dont les valeurs efficaces pourront être mesurées par les appareils ?



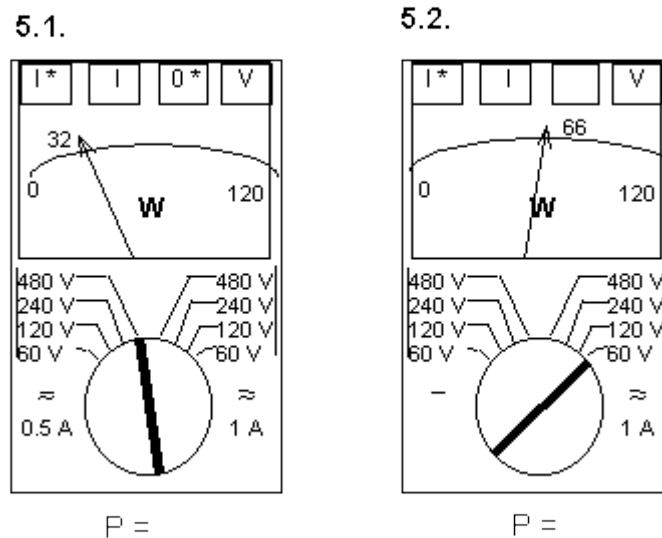
## Mesures électriques et électroniques

2. Prévoir les valeurs affichées par les appareils.

3. Choisir les calibres les mieux adaptés pour réaliser ces mesures et dessiner les positions des commutateurs sur les appareils.

### Exercice 5

Quelle est la puissance mesurée par chacun des deux wattmètres ci-dessous ?



### Exercice 6

On donne ci-dessous les schémas représentant deux multimètres, un wattmètre, le bornier d'un réseau triphasé de tension 220 V / 380 V et celui d'un moteur asynchrone 220 V / 380 V. On sait par ailleurs que le courant en ligne absorbé par le moteur est proche de 7 A.

- c) Comment doit-on coupler le moteur ?
- d) Compléter le schéma du montage permettant de mesurer la puissance active absorbée par le moteur avec un seul wattmètre. On précisera les positions des commutateurs de chaque appareil.

# Mesures électriques et électroniques

