

Chapitre 1 : Notions fondamentales sur la mesure

I- Généralités : •

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

- Dans le domaine électrique et électronique, on utilise plusieurs types d'appareils de mesure, tels que :
- -Le voltmètre (analogique et numérique) pour mesurer des tensions ;
- -L'ampèremètre, pour mesurer des intensités ;
- -Le wattmètre pour mesurer des puissances ;
- -L'ohmmètre pour mesurer des résistances etc...
- Le voltmètre, ampèremètre et ohmmètre sont souvent regroupés en un seul appareil qui s'appelle **multimètre**.
- Le multimètre possède, dans la plus part des cas, un testeur de composants (diodes et transistors). Certains modèles sont dotés d'un capacimètre (pour mesurer des capacités), d'un fréquencemètre, etc...

- Parmi les autres appareils de mesure couramment utilisés par l'électricien ou électronicien, l'oscilloscope, qui permet de visualiser la forme d'une onde et d'obtenir de nombreux renseignements (amplitude, période, etc...).
- **II- Pourquoi mesuré ?**
- La mesure reste bien souvent, le seul moyen de vérifier le fonctionnement ou les performances d'un procédé industriel, grâce à des appareils de mesure très performants.

- **III-Les grandeurs électriques et leurs unités**
- Les principales grandeurs électriques qu'un électrotechnicien est amené à mesurer sont les suivants :
- La tension, ou ddp entre deux points ;
- L'intensité d'un courant dans une branche ;
- La résistance d'un récepteur ;
- La capacité d'un condensateur ;
- La puissance dissipée dans un circuit ;
- La fréquence et la période d'un signal.

Les grandeurs et unités de base dans le système international sont donnés par le tableau suivant:

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

Tableau 1 : Grandeurs et unités de base

Les différentes unités peuvent être subdivisées en multiples et sous multiples:

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

Tableau 2: multiples et sous multiples des unités

IV- Grandeurs physiques et équations aux dimensions

• IV.1-Principales grandeurs de base :

- · **La longueur** : Mesure la distance séparant 2 points.
- Unité : le mètre (m)
- Grandeur : **[longueur] = L**
- · **Le temps t** : C'est une des notions les plus intuitives et familières et pourtant une des plus délicates à définir. En plus ça varie tout le temps !
- Grandeur: **[temps] = T**
- Unité : la seconde.
- · **La masse : Quantité de matière.**
- Attention : ne pas confondre l'abréviation de masse (m) avec l'unité de longueur le mètre
- (m aussi).
- Grandeur : **[masse] = M**
- Unité : le kilogramme (kg) (pas le gramme)

- **L'intensité électrique i** : dite aussi 'le courant'. Provoque un échauffement des conducteurs et un champ magnétique autour. (utilisé dans les galvanomètres pour la mesurer, mais aussi dans les moteurs électriques).
- Grandeur: **[intensité] = [I]**
- Unité : l'Ampère (A).
- **IV.2- Grandeurs dérivées :**
- **Surface** : La surface étant le produit de 2 longueurs, sa grandeur physique S est égale à $L \times L = L^2$
Unité: le mètre carré (m^2).
- **Volume** : Produit d'une surface par une longueur.
- Unité le mètre cube (m^3)
- **Vol = S L = L³**

- **Angle plan :**
- Unité le radian.
- Angle qui sous-tend un arc de cercle de longueur égale au rayon.
- (1 tour complet = 2 pi radian)
- **Fréquence :**
- Nombre d'évènements (de périodes pour un signal périodique) par seconde.
$$f = \frac{1}{t}$$
- **Vitesse**
- Distance parcourue par unité de temps (vitesse moyenne), ou limite de la distance parcourue dans un petit intervalle de temps lorsque ce dernier tend vers zéro.
$$v = \frac{dx}{dt}$$
- d'ou le grandeur : **V = L T⁻¹**
- Unité : le **m/s** (mètre par seconde)
- Unité dérivée : le **km/h**

- **Accélération (Υ):**

- Accroissement (ou diminution) de la vitesse par unité de temps (accélération moyenne), ou limite de la variation de la vitesse dans un petit intervalle de temps lorsque ce dernier

- tend vers zéro.

$$\gamma = \frac{dv}{dt}$$

- $[\Upsilon] = \mathbf{V T^{-1}} = \mathbf{L T^{-2}}$

- Unité : le (m/s) /s = **m/s²**

- **Force**

- Une force appliquée à une masse la fait accélérer. C'est l'équation fondamentale de la dynamique.

$$\gamma = \frac{F}{m}$$

- donc $F = m \Upsilon$. grandeur : $F = M [\Upsilon] = \mathbf{M LT^{-2}}$

- Unité : le Newton (N) force qui accélère une masse de 1kg de 1m/s².

- **Pression**

- Force appliquée par unité de surface.

$$P = \frac{F}{S}$$

- grandeur : $[P] = M L T^{-2} / L^2 = \mathbf{M L^{-1}T^{-2}}$

- Unité : le Pascal. (Pa). $1Pa = 1N/m^2$

- Remarque : $1 \text{ bar} = 1kg/cm^2 = 10^5 \text{ Pa} = 10 \text{ tonnes} / m^2$

- **Energie (ou 'Travail')**

- $E = F.L$ grandeur : $E = F L = \mathbf{M L^2 T^{-2}}$

- Unité: le Joule. Energie produite par une force (constante) de 1N qui déplace son point d'application de 1m.

- **Puissance (Pu)**

$$Pu = \frac{E}{T}$$

- grandeur : $[puissance] = M L^2 T^{-2} / T = \mathbf{M L^2 T^{-3}}$

- L'unité de puissance est le Watt (W) qui vaut 1 Joule/seconde.
(c'est aussi 1 volt x 1 ampère).

V- Erreurs et Incertitudes de mesure

• V-1. Introduction

- Aucune mesure n'est parfaite. Quelque soit le soin apporté à 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.

- **V-2. Classification des erreurs**
- Suivant les causes, on a deux types d'erreurs :
- **V-2.1. Les erreurs systématiques**
- C'est toute erreur due à une cause connue ou connaissable. Elles ont pour causes :
- ***V-2.1.1. La méthode de mesure***
- Parfois la méthode de mesure choisie entraîne une perturbation sur la grandeur à mesurer (par exemple : pour la mesure d'une résistance ou d'une puissance ; on a à choisir entre le montage amont et aval).

- ***V-2.1.2. L'opérateur***

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

- ***V-2.1.3. L'appareil de mesure***

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

- **V-2.2. Les erreurs aléatoires**

- Ce sont des erreurs non reproductibles (exemple du bruit), qui obéissent à des lois statistiques.
- Pour remédier à ces erreurs, il suffit que les montages soient clairs et soignés et les paramètres mis en jeu soient bien connus et maîtrisés.
- Suivant l'expression de la mesure on a deux types d'erreurs :
 - ❖ L'erreur absolue
 - ❖ L'erreur relative

- **V-3. Erreur absolue, incertitude absolue**
- Soient :
- **X** : la valeur mesurée de la grandeur
- **X_e** : la valeur théorique exacte de la même grandeur
- L'erreur absolue, notée δX , est l'écart qui existe entre la valeur mesurée et sa valeur théorique exacte exprimée avec la même unité.
- **$\delta X = X - X_e$**
- Comme la valeur exacte de la grandeur à mesurer est inconnue, il faut évaluer une limite supérieure de l'erreur absolue qui n'est autre que
- l'incertitude absolue notée :
- **$\Delta X = \sup(|\delta X|)$**

- **V-4. Erreur relative, incertitude relative**

- L'erreur relative est le quotient de l'erreur absolue à la valeur exacte.

$$\varepsilon_r = \frac{\delta X}{X_e} = \frac{X - X_e}{X_e}$$

- Comme il s'agit d'un nombre sans dimension (pas d'unité), on l'exprime généralement en pourcentage (%) :

$$\varepsilon_r \% = \frac{\delta X}{X_e} \times 100 = \frac{X - X_e}{X_e} \times 100$$

- Egalement, si la valeur exacte de la grandeur est inaccessible, on prendra la limite supérieure de l'erreur relative qui n'est autre que l'incertitude relative : $\frac{\Delta X}{X_e}$

- On peut l'exprimer en % : $\frac{\Delta X}{X_e} \times 100$

- **Remarque** : les erreurs sont de signe quelconque (positif ou négatif).

- **V-5. Expression du résultat**

- Le résultat peut s'exprimer de deux façons :

- **V-5.1. 1^{ère} façon**

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

$$X_e = X \pm \Delta X \text{ [unité]}$$

- **V-5.2. 2^{ème} façon**

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

$$X_e = X \text{ [unité]} \pm \left(\frac{\Delta X}{X} \right) \%$$

- **Exemples :**

- $R = 10 \Omega \pm 5\%$ ou $R = (10.0 \pm 0.5) \Omega$

VI. Calcul d'incertitude pour les opérations de base

- En général, la valeur de la grandeur à mesurer (X_e) est obtenue par une relation mathématique : $X_e = f(a, b, c, K)$. De ce fait, on peut utiliser l'outil mathématique « calcul de la différentielle » afin de déterminer les incertitudes :
- L'incertitude absolue s'exprime sous la forme suivante :

$$\Delta X = \left| \frac{\partial f}{\partial a} \right|_{b,c=cte} \cdot \Delta a + \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right|_{a,c=cte} \cdot \Delta b + \left| \frac{\partial f}{\partial c} \right|_{a,b=cte} \cdot \Delta c$$

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

$$\frac{\Delta X}{X} = \left| \frac{\partial f}{\partial a} \right|_{b,c=cte} \cdot \frac{\Delta a}{X} + \left| \frac{\partial f}{\partial b} \right|_{a,c=cte} \cdot \frac{\Delta b}{X} + \left| \frac{\partial f}{\partial c} \right|_{a,b=cte} \cdot \frac{\Delta c}{X}$$

- Appliquons ces deux formules afin de déterminer les incertitudes absolues et relatives dans le cas des opérations de base :

- **VI.1. Somme**

- Cas d'une association de boîtes de résistances en série :

- $R = R_1 + R_2 + R_3$

- On obtient : $\Delta R = \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3$ ou encore $\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$

- **VI.2. Différence**

- Soit : $I = I_1 - I_2$

- On obtient : $\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2$ ou encore $\frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2}{I_1 - I_2}$

- **VI.3. Produit**

- Cas d'une énergie : $W = U \cdot I \cdot t$

- On obtient : $\Delta W = It\Delta U + Ut\Delta I + UI\Delta t$ ou encore $\frac{\Delta W}{W} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t}$

- **VI.4. Quotient**

- Soit : $X = \frac{a}{b}$

- On obtient : $\Delta X = \frac{\Delta a}{b} + \frac{a}{b^2}\Delta b$ ou encore $\frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta b}{b}$

VII. Calcul pratique de l'incertitude

- **VII.1. Cas des 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 :
$$X = \frac{C \times L}{E}$$
- 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 :

■ Une incertitude de classe

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

$$\Delta X_C = \frac{Cl \times C}{100} = \frac{\text{Classe} \times \text{Calibre}}{100}$$

■ Une incertitude de lecture

- Si on désigne par ΔL la fraction de graduation d'erreur commise (appelée aussi la fraction de division estimé lors de la mesure), l'incertitude de lecture sera donnée par la relation suivante :

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

□ 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, de l'incertitude de lecture et de l'incertitude de méthode si elle existe :

$$\Delta X = \Delta X_C + \Delta X_L + \Delta X_{\text{méthode}}$$

- **VII.2. Cas des 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 de deux façons :

- **1^{ère} façon**

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

- On obtient donc :

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

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

- **2^{ème} façon**

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

- On obtient donc :

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

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