Chapitre 2
Principes de base des appareils de mesure

1 Définition

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 prés. Cette valeur est donnée sous une forme de nombre (affichage numérique).

2 Appareils de mesure analogiques (à déviation)

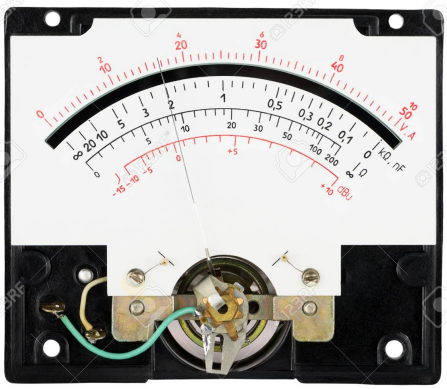

FIGURE 1 – Appareil analogique

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.

2.1 Types d'appareils analogiques

2.1.1 Appareils magnétoélectriques

L'inducteur fixe est un aimant fixe en forme de U, la déviation de l'aiguille est proportionnelle au courant moyen qui traverse une bobine placée à l'intérieur du champ magnétique créé par l'aimant fixe. Utilisable exclusivement en courant continu.

Les appareils magnétoélectriques à redresseurs sont des appareils magnétoélectriques équipés d'un pont redresseur à diodes. Ils sont signalés par un symbole de diode apparaissant sur leur cadran. Ils mesurent ainsi la valeur moyenne du signal redressé, et sont gradués pour indiquer la valeur efficace d'un signal

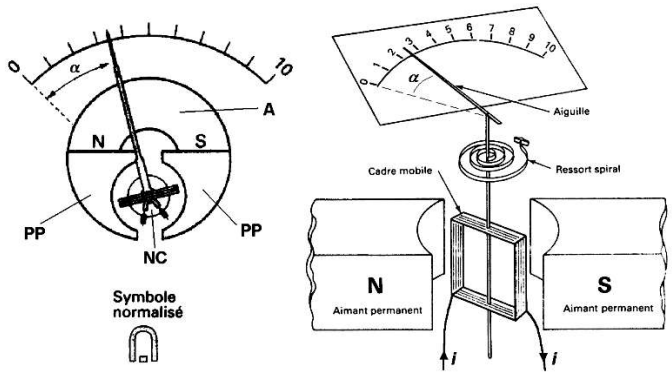

FIGURE 2 – Appareil magnétoélectrique

sinusoïdal. On peut donc les employer seulement en continu et en sinusoïdal.

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. Le déplacement du cadre mobile est toujours dans le sens d'augmentation de l'énergie électromagnétique du système (partie fixe + partie mobile).

2.1.2 Appareils ferromagnétiques

Fondamentalement, ces appareils mesurent la valeur efficace du signal, quelle que soit sa forme, et sont gradués pour indiquer cette valeur. Cependant, ils ont une bande passante faible (souvent de 50 à 400 Hz) ce qui limite leur utilisation. Ces appareils sont largement utilisés en sinusoïdal ou pour des signaux à faible distorsion.

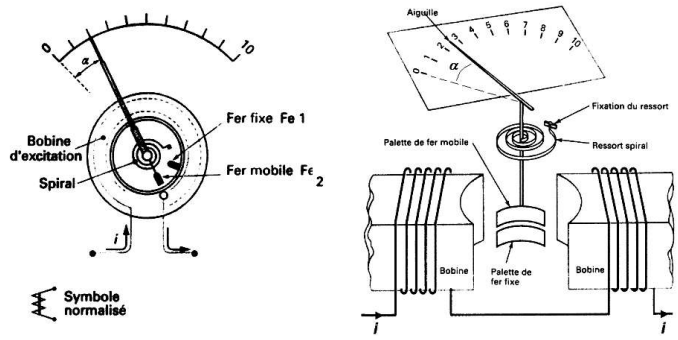

FIGURE 3 – Appareil ferromagnétique

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

- **Appareil à attraction :** le principe utilisé est l'action magnétique produite par une bobine fixe traversée par un courant sur une palette en fer doux (organe mobile) montée sur deux pivots. Cet équipage mobile est muni d'une aiguille et d'un dispositif d'amortissement.
- **Appareil à répulsion :** le champ magnétique créé par la bobine fixe agit sur deux palettes placées dans ce champ qui subissent une aimantation de même sens. La répulsion des deux palettes fait dévier l'aiguille.

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

2.1.3 Appareils électrostatiques

Ce type d'appareils est caractérisé par une force exercée par l'armature fixe d'un condensateur sur son armature mobile. Ce type d'appareils est toujours utilisé en voltmètre. Lorsqu'on applique une tension entre les deux plaques de cet appareil, l'une se charge positivement et l'autre négativement, ce qui produit une force d'attraction qui tend à faire tourner la plaque mobile qui est solidaire d'une aiguille. Ils sont utilisables en courant continu et en courant alternatif et possèdent une échelle non linéaire.

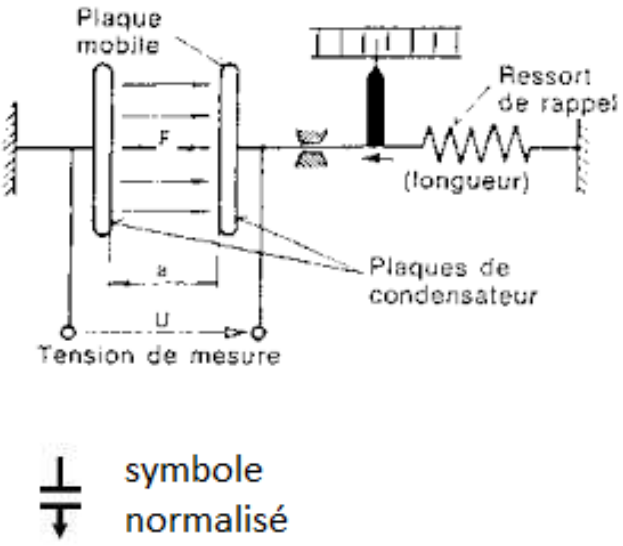

FIGURE 4 – Appareil électrostatique

2.1.4 Appareils électrodynamiques

Un appareil électrodynamique est formé principalement par un circuit fixe (généralement deux demi bobines) créant un champ magnétique à l'intérieur du quel se déplace un cadre mobile de faible inertie monté sur deux pivots et entrainant une aiguille. Les appareils électrodynamiques sont non polarisés. Ils sont utilisables en courant continu et en courant alternatif. Ils sont généralement utilisables pour la fabrication des wattmètres.

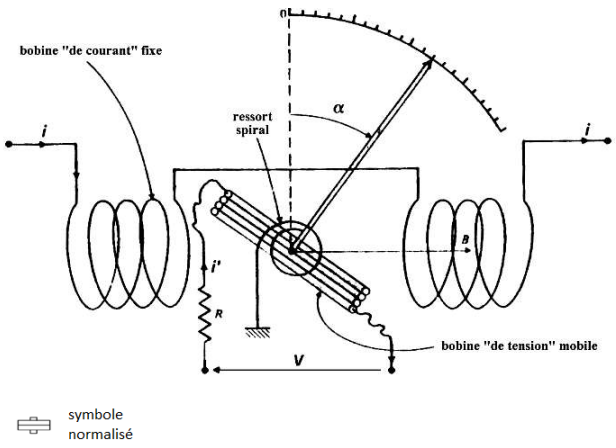

FIGURE 5 – Wattmètre électrodynamique

2.1.5 Appareils Ferrodynamiques

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. 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.

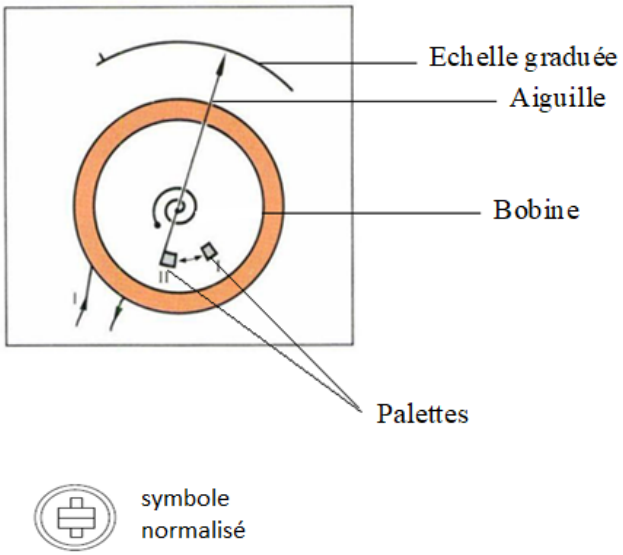

FIGURE 6 – Appareil Ferrodynamique

2.1.6 Appareils à induction

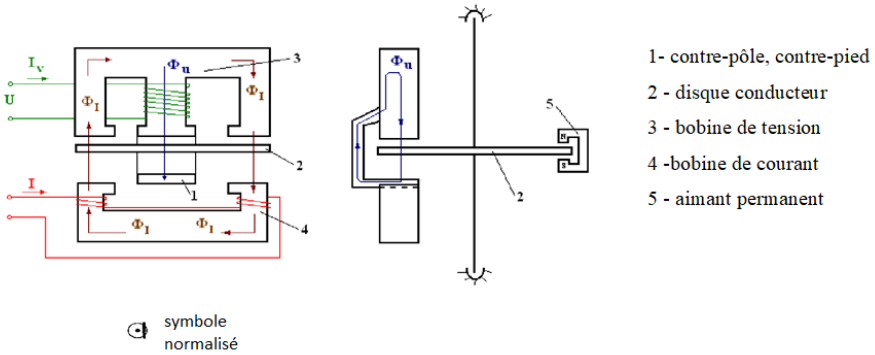

FIGURE 7 – Appareil à induction

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. 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.

2.1.7 Appareils Thermiques

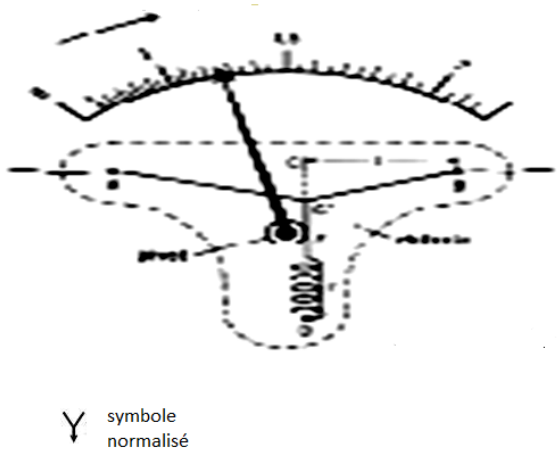

FIGURE 8 – Appareil Thermique

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

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.

Symbole	Signification
—	Courant contenu
~	Courant alternatif
- ~	Courant contenu et alternatif
	Appareil magnétoélectrique
	Appareil férromagnétique
	Appareil électrostatique
	Appareil électrodynamique
	Appareil ferrodynamique
	Appareil thermique
	Appareil à induction
	Tension d'isolement entre les deux bornes de l'appareil est 2KV
	Tension d'isolement entre les deux bornes de l'appareil est 500V
	Position de lecture : Horizontale
	Position de lecture : Verticale
	Position de lecture : Inclinée
20Hz…….500Khz	*Bande de fréquence* dans laquelle l'appareil peut fonctionner correctement
0.5	*Classe de précision* de l'appareil est de 0.5% du calibre
1	*Classe de précision* de l'appareil est de 1% du calibre
2	*Classe de précision* de l'appareil est de 2% du calibre

FIGURE 9 – Résumé des symboles des appareils de mesure analogiques

3 Appareils numériques

FIGURE 10 – Appareil numérique

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 :

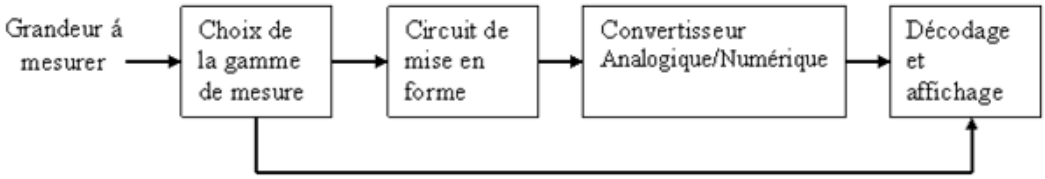

FIGURE 11 – Schéma synoptique général d'un appareil de mesure numérique

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.

3.1 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 = 104).

- **Pas de quantification** : (q) la plus petite valeur différente de 0 dans la gamme de mesure (exemple : pour un appareil de mesure à 4 afficheurs, utilisé dans la gamme de 10 V, le pas de quantification est q = 10/N = 1 mV).
- **Digit :** Désigne le dispositif qui affiche tous les chiffres de 0 à 9 de même poids dans un nombre.
- **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. Résolution = gamme de mesure / nombre de points N. (Exemple : la résolution d'un appareil de 100000 points dans la gamme de 1 V est égale à $10\mu V$.
- **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 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) prés. (Exemple : gamme 2 V ; Résolution 1 mV ; précision ±0.1 % + 2 dgt ; lecture 1V. La précision de cette mesure sera 0.1 % . 1V + 2 . 1mV = 3 mV).

3.2 Multimètre numérique

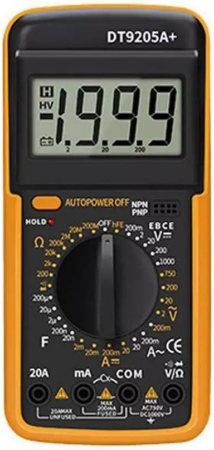

FIGURE 12 – Multimètre numérique

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.

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.

FIGURE 13 – Oscilloscope analogique

4.1 Description de l'oscilloscope analogique

En général l'oscilloscope possède 2 voies (CH1 et CH2) et permet alors d'observer deux tensions V1 et V2 en fonction du temps. Pour l'observation de l'évolution de tensions en fonction du temps, la tension Vx est une tension de balayage horizontal, proportionnelle au temps, qui est fournie par l'élément dit "base de temps" (figure 14).

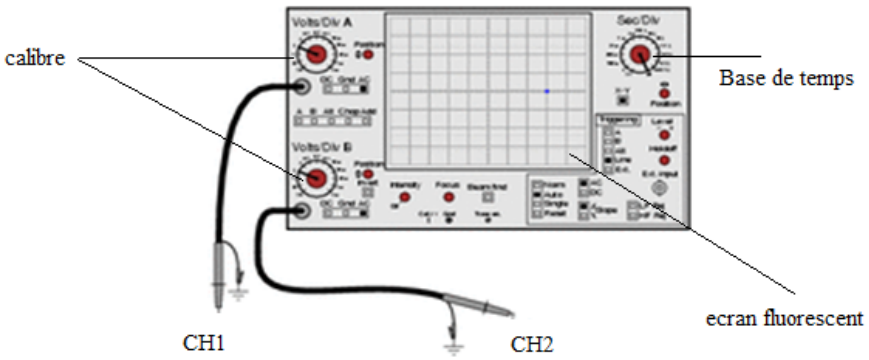

FIGURE 14 – Oscilloscope analogique

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.
L'élément essentiel est le tube cathodique (figure 2.15) 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 Vx et Vy appliquées sur les plaques de déviation horizontale et verticale.

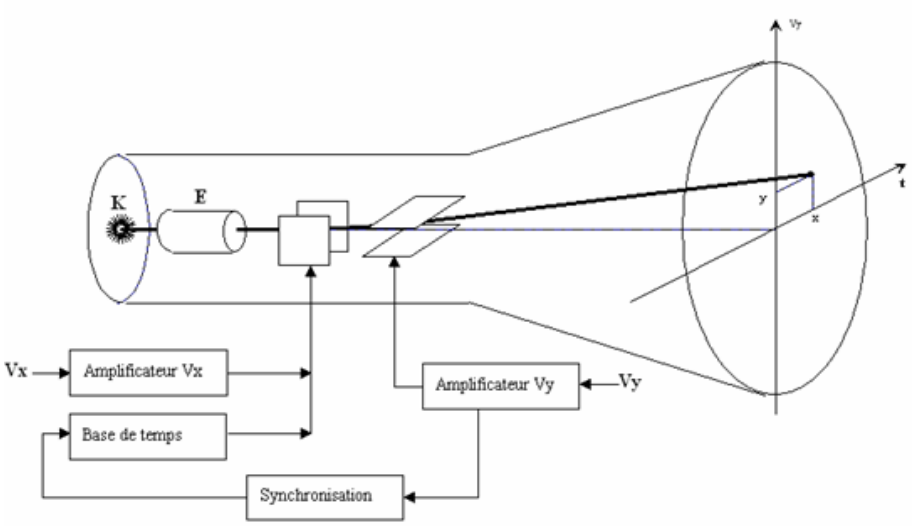

FIGURE 15 – Principe de l'oscilloscope

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

4.2 Les mesures sur l'oscilloscope

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

$$V_{eff} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$$

4.2.1 Méthode directe

Soient $v_1(t) = V_{max}\cos\omega t$ et $v_2(t) = V_{max}\cos(\omega t + \varphi)$, deux tensions sinusoïdales de même période $T = 2\pi/\omega$ mais déphasées l'une par rapport à l'autre d'un angle φ. La figure 2.16 montre ce qu'on observe sur l'écran de l'oscilloscope.

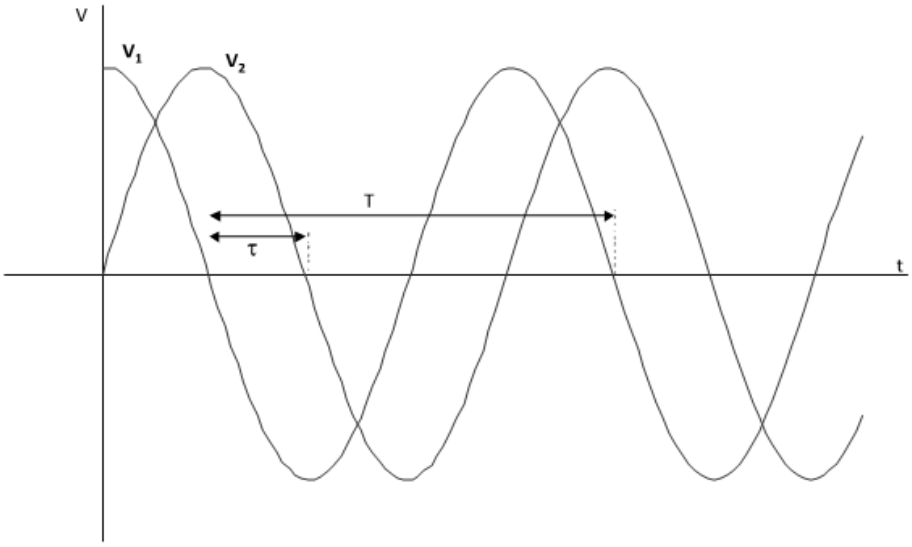

FIGURE 16 – Observation du déphasage entre v_1 et v_2

Le déphasage est alors :

$\varphi = 2\pi\tau/T$ (en radian)

ou : $\varphi = 360\tau/T$ (en degré)

4.2.2 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 :

$x = V_{max} \cos \omega t$

et

$y = V_{max} \cos(\omega t + \varphi)$

Le spot va alors décrire sur l'écran une ellipse (figure 2.17) inscrite dans un rectangle de côtés ($2V_1$, $2V_2$)

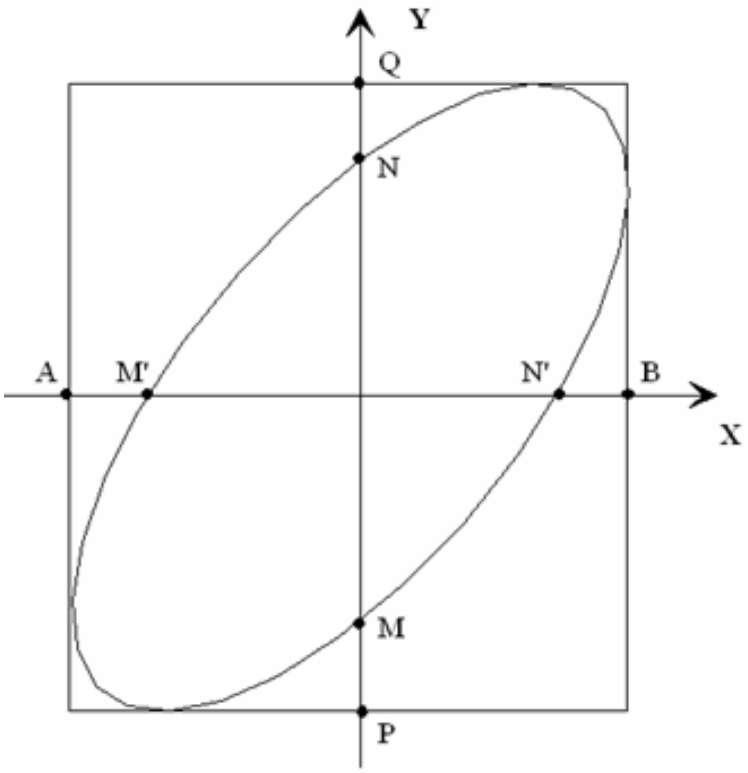

FIGURE 17 – Courbe de Lissajou

L'équation de cette ellipse est :

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

La valeur du déphasage est donnée par :

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