

## CHAPITRE IX

# TECHNIQUES DE MESURE EN HAUTE TENSION

## I) VOLTMETRE ELECTROSTATIQUE

Il fonctionne suivant le principe de la force d'attraction électrique  $F_e$  entre deux charges.

Le disque mobile M relié au potentiel HT à mesurer, et situé au centre de l'anneau de garde G, est attiré par le disque fixe F, l'attraction est d'autant plus forte que le potentiel est élevé. Une aiguille d'indication de mesure est reliée à l'électrode M, la force de rappel du disque M étant assurée par un contre-poids P qui permet aussi de régler le calibre de mesure.

L'anneau de garde G, de même diamètre que l'électrode fixe F, assure l'uniformité du champ électrostatique suivant l'axe vertical entre les électrodes fixe et mobile.

### Calcul de la force électrostatique : (EXERCICE)

L'énergie électrostatique accumulée est :

$$W = \frac{1}{2} CU^2$$

La capacité vaut

$$C = \epsilon_0 S/x$$

Etant donné qu'il s'agit d'un champ uniforme, la tension U est égale à

$$U = E x$$

Soit

$$W = \frac{1}{2} \epsilon_0 (S/x) E^2 x^2$$

Comme  $dW = F dx$

$$F = dW/dx = \frac{1}{2} \epsilon_0 S E^2$$

Soit donc:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 S V^2 / x^2$$

La force appliquée sur M est  $F = \frac{1}{2} \epsilon_0 S V^2 / x^2$  ;

avec

$S$  (cm<sup>2</sup>) : Surface du disque mobile M ;

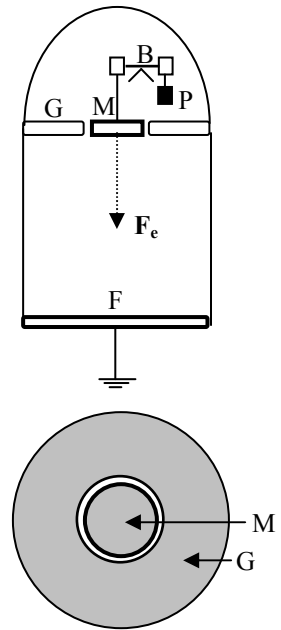
$x$ (cm) : longueur inter-électrodes ;

$V$ (kV) : ddP entre les électrodes.

Les gammes de mesure de l'appareil se règlent en modifiant la distance  $d$  entre les électrodes.

La précision augmente,

- *en augmentant  $d$*  : au delà d'une certaine valeur, le voltmètre devient volumineux et encombrant.



Le disque mobile et l'anneau de garde (vus de dessus)

Figure 1

- *en diminuant  $l$*  : en descendant en dessous d'une certaine valeur, ceci empêche la mesure des tensions plus grandes car le champ qui augmente ( $E = V/l$ ) finit par provoquer le claquage entre les électrodes M et F.

La précision de mesure de ces appareils égale à environ 0,1, est bonne. De plus, le voltmètre électrostatique permet de mesurer des tensions allant jusqu'à 270 kV.

Des voltmètres spéciaux peuvent mesurer des tensions de 600 kV et plus ; dans ce cas, le voltmètre est placé dans une enceinte étanche où l'espace inter électrodes est rempli par un gaz électronégatif comme le SF<sub>6</sub> ou le nitrogène, et porté à une haute pression de 15 atmosphères. Quelques fois, le gaz pressurisé est remplacé tout simplement par du vide.

Il n'y a pratiquement pas d'énergie perdue par ce voltmètre car le seul courant qui puisse circuler est un courant de fuite entre les électrodes qui est négligeable. Les pertes sont donc négligeables lors de la mesure des tensions continues et alternatives. Néanmoins, comme ces pertes sont proportionnelles à la fréquence de la tension elles deviennent considérables lors de la mesure des hautes tensions HF (Haute Fréquence de l'ordre du MHz).

C'est le meilleur moyen recommandé pour la mesure des tensions continues et alternatives.

## II) MESURE PAR ECLATEUR

L'éclateur est constitué de deux électrodes sphériques identiques, dont l'une est reliée à la terre et l'autre reliée au potentiel à mesurer, où la distance inter-électrodes  $d$  est réglable.

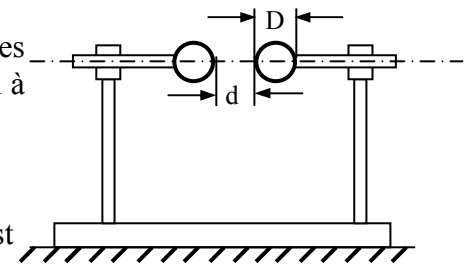


Figure 3

Il peut être conçu pour être utilisé soit :

- dans une position horizontale (voir la figure ci-devant) qui est la disposition la plus fréquemment utilisée ;
- dans une position verticale, utilisée pour les sphères de grand diamètre  $D$  ( $D \geq 50\text{cm}$ ).

### Principe de fonctionnement :

Chaque éclateur possède une abaque, qui est une courbe d'étalonnage entre la tension critique de claquage  $U_c$  et la longueur inter-électrodes  $d$  (voir figure ci-dessous).

La tension à mesurer est appliquée aux deux électrodes, puis on augmente la distance  $d$  jusqu'à une valeur critique  $d_c$  qui provoque le claquage. Comme chaque éclateur possède une abaque tracée  $U_c = f(d_c)$  qui fait correspondre à chaque distance critique la tension critique  $U_c$ , cette abaque donne la mesure de la tension appliquée qui correspond à la valeur  $d_c$ .

### Exemple :

Par exemple, la tension à mesurer provoque un claquage de l'éclateur pour une distance critique  $d_c = 9\text{cm}$ . Si on suppose que la figure ci-devant représente l'abaque de cet éclateur, la tension mesurée est donc 200 kV.

Si par exemple, l'éclateur claque à  $d_c = 50\text{cm}$ , l'abaque montre que la tension appliquée dans ce cas est de 1000 kV.

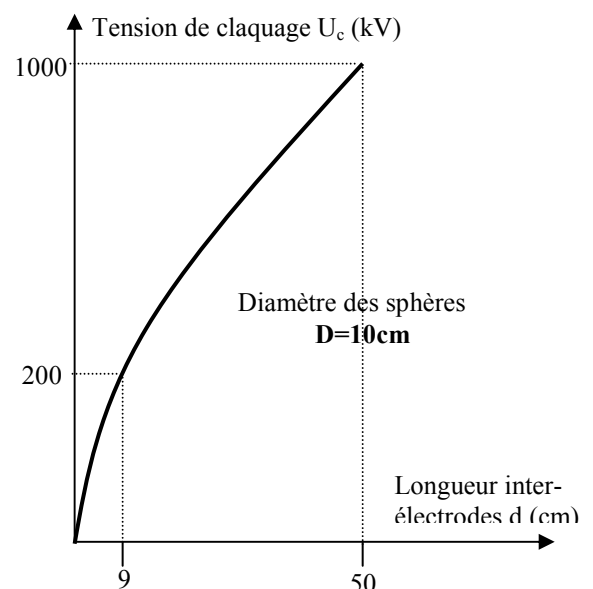


Figure 4

L'éclateur peut être utilisé pour la mesure des trois types de tension : alternative et onde de choc (valeur crête), ainsi que la tension continue. Il compte parmi les tous premiers appareils utilisés pour la mesure des HT. Il constitue la référence conventionnelle permettant d'étalonner tous les types de voltmètres utilisés dans un laboratoire d'essais à haute tension.

La précision de mesure dépend entre autres de l'uniformité du champ entre les sphères ; celle-ci pourrait être améliorée avec une forme géométrique des électrodes moins arrondie et plus plate (voir figure).

Remarque : L'éclateur constitue la référence conventionnelle permettant d'étalonner tous les types de voltmètres utilisés dans un laboratoire d'essais à HT.

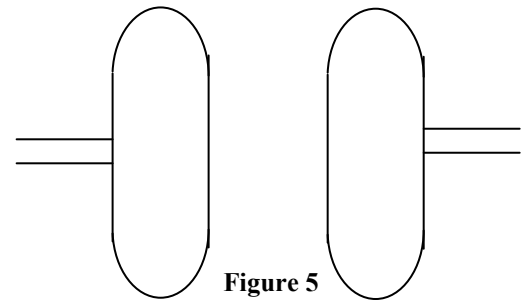


Figure 5

### III) MESURE GALVANOMETRIQUE

La mesure de la tension est effectuée par la dérivation d'un courant  $I$  à travers une grande résistance de mesure  $R$  ( $R \geq 1 M\Omega$ ).

La mesure du courant  $I$  donne la valeur de la tension  $U = RI$ .

Vu la grande valeur de  $R$ , le courant  $I$  doit être très petit (de l'ordre du milliampère) pour minimiser l'échauffement par effet Joule. D'autre part, la mesure d'un courant faible pourrait éventuellement être faussée par des courants parasites, tels que les courants de fuite ou ceux produits par effet couronne.

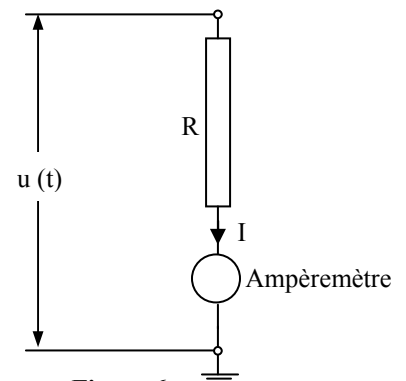


Figure 6

La précision de mesure dépend de la qualité de la résistance qui ne doit pas varier énormément avec la température et avoir un faible coefficient de température ; la précision est généralement très bonne, de l'ordre de 0,01 %.

La précision de mesure est difficile à garantir étant donné que la valeur de la résistance est fonction de la température, de l'humidité, du vieillissement, etc...

### IV) DIVISEURS DE TENSION

#### IV.1. Diviseur résistif :

Un diviseur de tension est formé d'une grande résistance  $R_1$  et d'une petite résistance  $R_2$  placées en série.

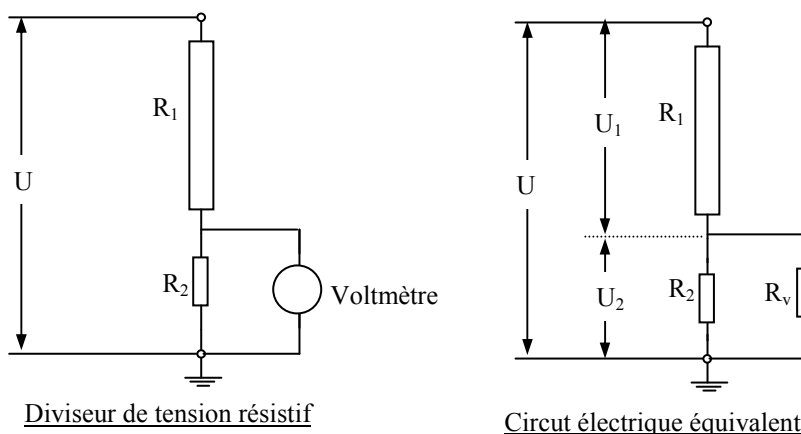


Figure 8

Rapport de division g:

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2'}{R_2'}$$

avec  $\frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_v}$  où  $R_v$  résistance du voltmètre.

$$\text{or } R_v \gg R_2 \Rightarrow R_2' \approx R_2 \Rightarrow g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$\text{comme aussi } R_1 \gg R_2 ; g = \frac{U}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow U = \frac{R_1}{R_2} U_2$$

La mesure de la ddP  $U_2$  aux bornes de  $R_2$  nous donne la valeur de la tension globale  $U$ .

Comme il s'agit d'un rapport ( $R_1 / R_2$ ), les variations de température, d'humidité et de vieillissement ayant lieu en général dans le même sens, la précision de mesure est peu affectée (généralement inférieure à 1 %).

#### IV.2. Diviseur capacitif :

En tension alternative, on recourt au diviseur capacitif pour minimiser les pertes d'énergie.

La capacité  $C_1$  est un condensateur à haute tension dont la valeur de capacité est beaucoup plus faible que celle du condensateur  $C_2$  de la branche basse tension. D'autre part, on néglige la grande impédance du voltmètre devant celle de  $C_2$ .

Rapport de division :

$$g = \frac{U}{U_2} = \frac{\left(\frac{1}{C_1 \omega} + \frac{1}{C_2 \omega}\right) I}{\frac{1}{C_2 \omega} I} = \frac{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_2}} = \frac{C_2 + C_1}{C_1}$$

Comme  $U = \frac{C_2 + C_1}{C_1} U_2$ , la mesure de  $U_2$  nous donne la tension globale  $U$ .

Notons que puisque  $C_2 \gg C_1 \Rightarrow \frac{U}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$ .

#### V) TRANSFORMATEUR DE MESURE

On utilise aussi tout simplement un transformateur de tension abaisseur de petite puissance; afin de connaître la tension à mesurer il suffit de multiplier la tension mesurée au secondaire par le rapport de transformation.

Il donne des mesures très précises, mais il est surtout utilisé pour la mesure des tensions des réseaux de puissance et rarement utilisé dans les laboratoires.

#### VI) OSCILLOSCOPE A MEMOIRE

L'oscilloscope n'est pas un appareil destiné pour la mesure en HT, mais il permet d'enregistrer en mémoire les tensions très brèves comme les ondes de choc. Ils sont généralement utilisés dans les expériences brusques et brèves, telles que le contournement ou le claquage. Ils offrent l'avantage de visualiser l'allure de la tension et ne donnent que la

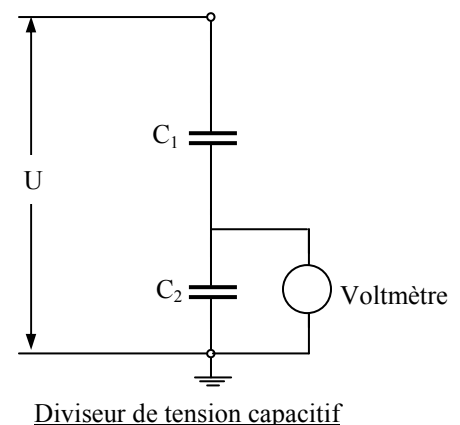


Figure 9

valeur crête de la tension. La tension visualisée sur l'oscilloscope est prélevée à l'aide d'une sonde spéciale HT.

#### Oscilloscope de choc :

Les phénomènes de choc enregistrés étant de l'ordre de la  $\mu\text{s}$ , on utilise des oscilloscopes spéciaux, appelés *oscilloscopes de choc*.

### VII) RESUME

TENSION CONTINUE	TENSION ALTERNATIVE	TENSION DE CHOC
-Voltmètre électrostatique -Mesure par éclateur -Diviseur résistif -Mesure galvanométrique à l'aide d'une résistance	-Voltmètre électrostatique -Mesure par éclateur -Mesure galvanométrique à l'aide d'une capacité -Diviseur capacitif -Transformateur de tension	-Mesure par éclateur -Diviseur capacitif avec adaptation -Diviseur résistif avec adaptation