



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université de Relizane
Département de : Génie Electrique



جامعة غليزان
RELIZANE UNIVERSITY

Support de cours

Techniques de la Haute Tension

Technique de mesure en Haute Tension

1^{ère} Année Master
Option: Electrotechnique Industrielle

Générateurs Haute Tension

1. Introduction.
2. Utilité de la mesure.
3. Aperçu des mesures de haute tension
4. Système de mesure en HT .
5. Nécessité de la mesure en haute tension.
6. Différents technique de mesure en haute tension

Introduction

La mesure joue un rôle de plus en plus important dans les domaines électriques et électroniques.

Elle peut être utilisée pour :

- ❑ **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...

Ces appareils des mesures présentent généralement une limitation d'utilisation surtout lorsque les grandeurs électriques sont devenues plus grandes ce qui **nous oblige d'adopter des nouvelles méthodes** pour faire la mesure.

Utilité de la mesure

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

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

Aperçu des mesures de haute tension

La tension est la différence de potentiel électrique entre deux points d'un circuit électrique, ou électronique, exprimée en **volts**. Elle mesure l'énergie potentielle d'un champ électrique qui génère un courant électrique dans un conducteur. La plupart des matériels de mesure peuvent mesurer, ou lire, la tension.

La méthode de mesure des hautes tensions consiste à **obtenir une image réduite du signal à haute tension** en transformant ce signal en **un signal basse tension (de niveau inférieur au kilovolt)** mesurable.

4. Système de mesure en HT

Un système de mesure en haute tension est un ensemble complet de dispositifs utilisable pour réaliser une mesure de haute tension **continue**, **alternative** ou **de choc**, ainsi que de courant **impulsionnel**, lors d'essais mettant en œuvre de telles tensions ou de tels courants.

Les résultats de mesure devront préciser :

1. L'incertitude sur les grandeurs mesurées ;
2. L'aspect éventuellement aléatoire des phénomènes en jeu ;
3. Une éventuelle détérioration progressive de l'objet sous test, lors d'une application répétée de la tension.

6. Nécessité de la mesure en haute tension

Les nombreuses applications de ce jour de la haute tension dans différents domaines sont devenues **une priorité**, en particulier dans le domaine de **la recherche scientifique** et même dans le **domaine industriel**.

En effet l'utilisation de la haute tension doit être spécifique et non **aléatoire** c'est ce qui rend la mesure est très nécessaire et **primordiale** pour être significative, objective et utile.

- **L'utilisation devra donc maîtriser ce système physique de mesure, de manière à concevoir des appareils résistant aux contraintes subies lors de son utilisation en haute tension.**

6. Nécessité de la mesure en haute tension

Dans le domaine de la haute tension, on mesure la tension entre une électrode mise au potentiel de la terre et une électrode à potentiel élevé. Pour protéger le personnel et le matériel, l'oscilloscope est placé à une distance suffisante de l'électrode haute tension.

Les applications de la mesure en haute tension se décomposent en **deux grandes parties** :

la mesure pour contrôler le bon fonctionnement d'une installation (**poste de distribution électrique...**) et celle appliquée à des appareils embarqués (générateurs de rayons X, générateurs micro-ondes...). Si dans le premier cas il est possible d'utiliser du matériel sophistiqué et onéreux, en revanche dans le second cas, le constructeur doit souvent se tourner vers des solutions rustiques, telles que **les diviseurs résistifs associés à des filtres RC.**

7.1. Voltmètre électrostatique

Le voltmètre électrostatique permet la mesure de potentiels élevés sous faible charge.

Le voltmètre électrostatique est un condensateur dont une des plaques est mobile. Lorsque le condensateur est chargé, les plaques s'attirent mutuellement et le mouvement de la plaque mobile est agrandi et visualisé sur une échelle.

Le voltmètre électrostatique peut mesurer des tensions entre 50 V et 1 MV, avec une impédance d'entrée qui atteint 10 TΩ.

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.1. Voltmètre électrostatique



**voltmètre
électronique
+/-10KV, 1
GΩ**



Figure.1 : Photo de voltmètre électrostatique

7.1. Voltmètre électrostatique

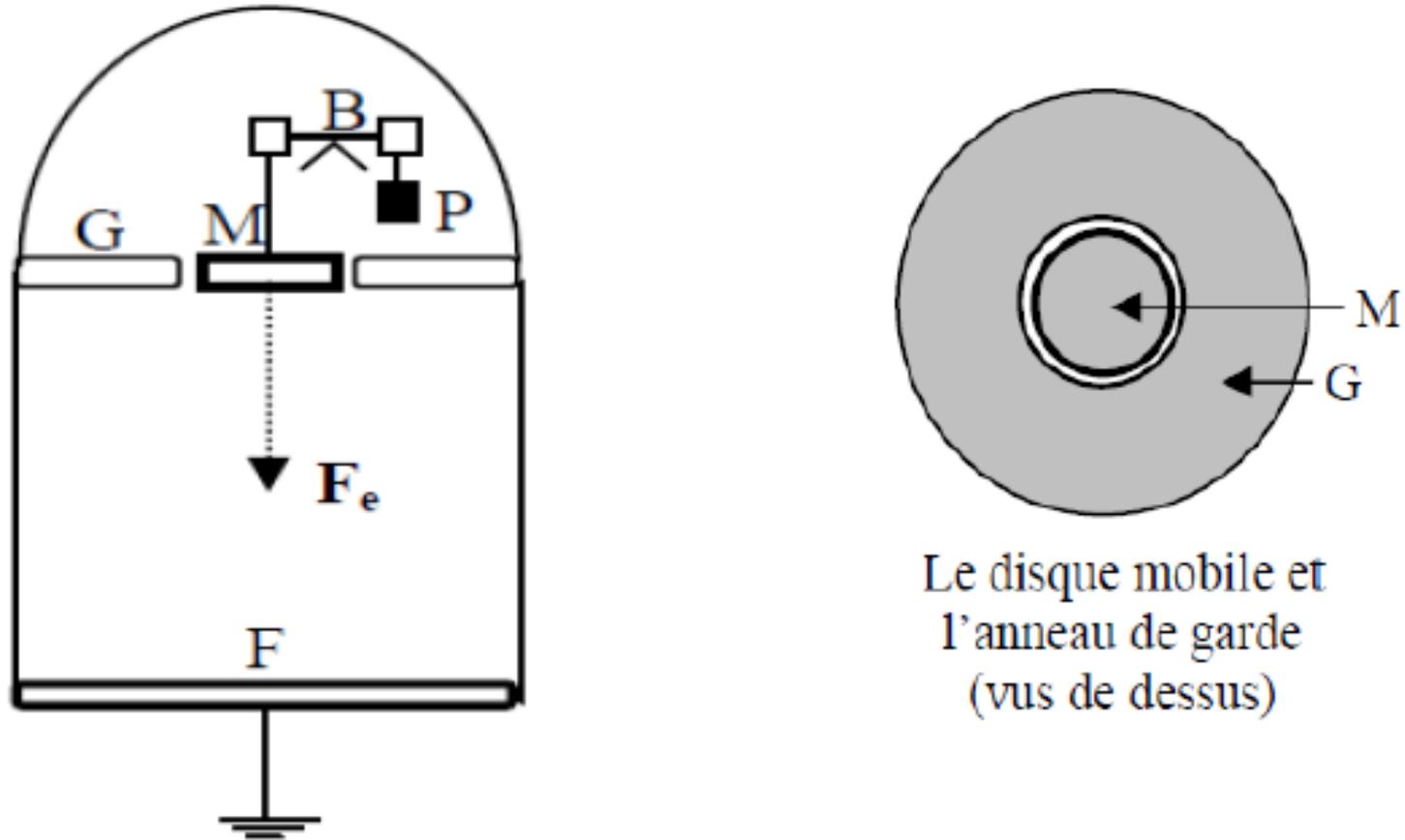
Il fonctionne suivant le principe de la force d'attraction électrique F_e entre deux charges.

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 contrepoids 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.(figure.2)

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.1. Voltmètre électrostatique



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

Figure.2: Photo représente fonctionnement d'un voltmètre électrostatique

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.1. Voltmètre électrostatique

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.

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 a environ 0,1, est bonne.

7.1. Voltmètre électrostatique

Des voltmètres spéciaux peuvent mesurer des tensions de 600 kV et plus ; dans ce cas, le voltmètre est placé dans une enceinte étanche ou l'espace inter électrodes est rempli par un gaz électronégatif comme le **SF6** ou le **nitrogène**, et porte 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.

7.1. Voltmètre électrostatique

7.1.1. Avantages et inconvénients

Avantages : Assez simple à construire. Robuste. Consommation très faible (Charge du condensateur).

Inconvénients : Très peu sensible pour les faibles tensions (échelle quadratique) et les fortes tensions (quand le recouvrement est total, il n'y a plus de couple électrostatique). A cause des effets de bord, il faut réaliser en fait un étalonnage individuel.

7.2. Voltmètre électrostatique TREK520

Ce nouveau type de voltmètre électrostatique portable exécute des mesures précises et sans contact de tensions électrostatiques de surface pour applications dans des environnements ionisés ou non ionisés (figure.3).

- Pour mesurer, il n'est pas nécessaire d'avoir une distance fixe.
- Mesure l'accumulation des charges dans les petits espaces.
- Circuit stabilisé (à chopper) pour des mesures précises, même en environnement ionisé.
- Batterie alcaline 9V fournie (pour 8 heures de fonctionnement).

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.2. Voltmètre électrostatique TREK520



Figure.3 : Voltmètre électrostatique type *TREK520*

7.2. Voltmètre électrostatique TREK520

Ce voltmètre répond aux nouveaux besoins de l'industrie électro-photographique (photocopieurs, imprimantes laser ou numériques) en améliorant la précision et la vitesse de mesure. Il s'adresse aux services qualité des fabricants pour le développement de nouveaux produits, et aux laboratoires de recherches pour l'exploration de nouveaux procédés relatifs à l'électrostatique.

Il trouve également son application dans tout environnement industriel sensible aux perturbations liées à la présence de **charges statiques**, ainsi que dans le **domaine des semi-conducteurs**.

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

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, ou la distance **inter-électrodes d** est réglable. Il peut être conçu pour être utilisé soit:

- **dans une position horizontale** (qui est la disposition la plus fréquemment utilisée (figure.4).
- **dans une position verticale**, utilisée pour les sphères de grand diamètre **D ($D \geq 50\text{cm}$)**. (figure.5).

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

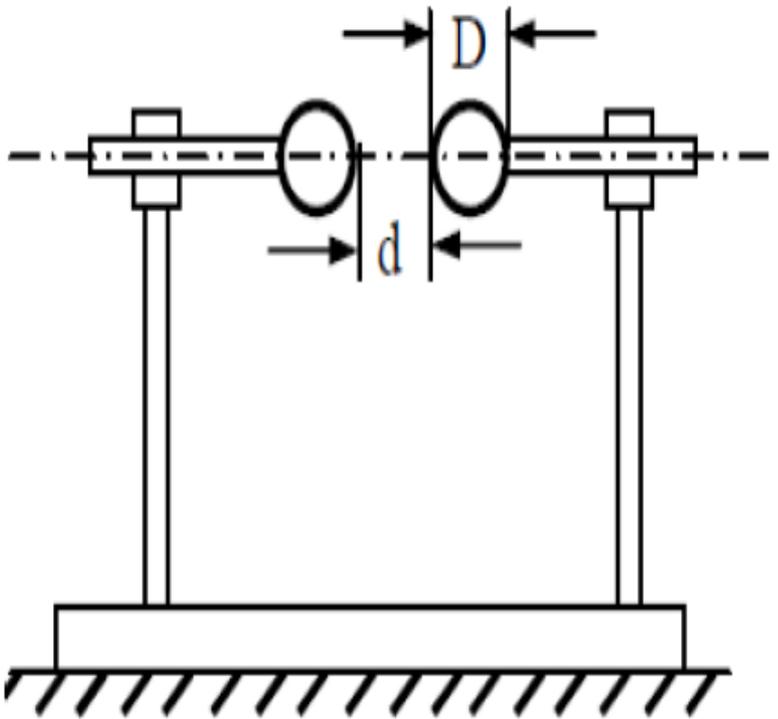


Figure.4: Photo représente un éclateur (position horizontale)



Figure.5 : Photo représente un éclateur (position verticale)

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

7.3.1 Principe de fonctionnement

Chaque éclateur possède un abaque, qui est une courbe d'étalonnage entre la tension Critique de claquage U_c et la longueur inter-électrodes d (figure.6.et figure.7).

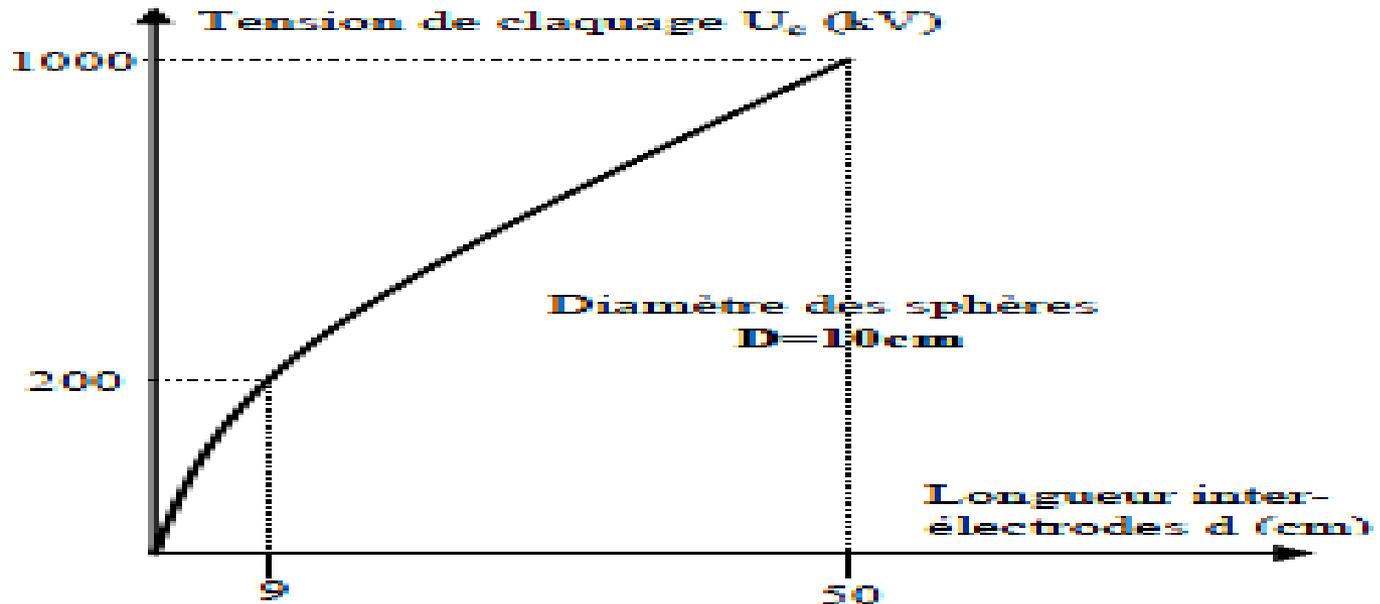
La tension à mesurer est appliquée aux deux électrodes, puis on **augmente la distance d** jusqu'à une valeur critique **dc qui provoque le claquage**. Comme chaque éclateur possède un abaque tracé $U_c = f(d)$ qui fait correspondre à chaque distance critique la tension critique U_c , cet abaque donne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

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

Exemple

Par exemple, la tension a 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**.



7. Différents technique de mesure en haute tension

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

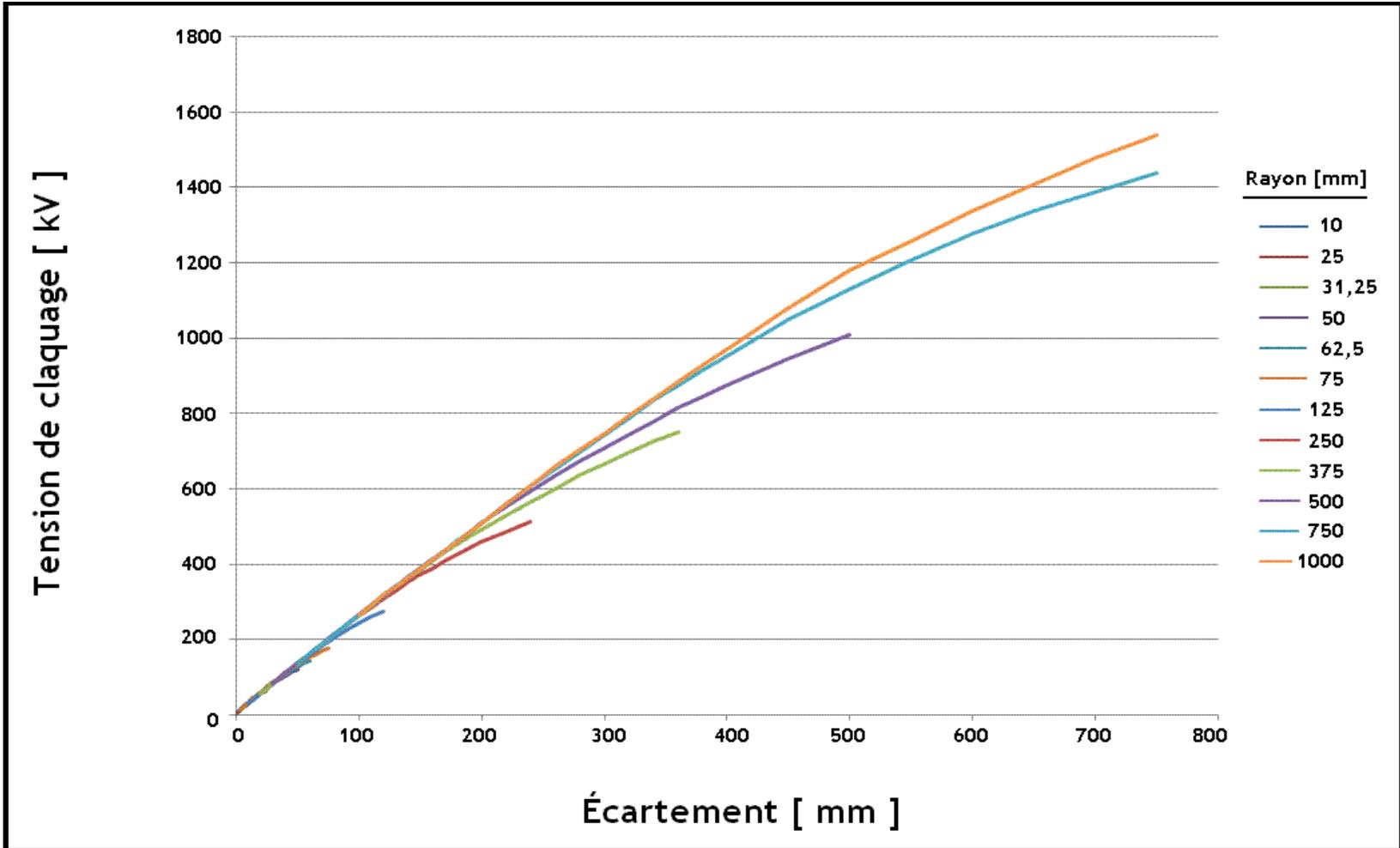


Figure.7 : Tensions de claquage aux conditions **atmosphériques standards**, applicables en **AC 50 Hz, DC**, ainsi que **chocs de foudre et de manoeuvre** en polarité négative

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

7.3.2. Corrections atmosphériques

Les tensions de claquage données par les figures précédentes sont valables aux conditions atmosphériques suivantes :

✦	Température standard T_o :	293	K (= 20°C)
✦	Pression standard P_o :	101,3	kPa
✦	Humidité absolue standard H_{abs} :	8,5	g/m^3 ($\Rightarrow H_{rel} = 50\%$ à P_o et T_o)

Dans des conditions différentes, une valeur de tension U_c , définie précédemment doit être corrigée par **un facteur de correction atmosphérique K**. La tension réelle **U_r** est donnée par l'équation

$$U_r = U_c \cdot K \quad (2.1)$$

Avec :

$$K = \delta \cdot k$$

$$\delta = \frac{P}{P_o} \cdot \frac{T_o}{T} \quad (\text{Densité})$$

$$k = 1 + \left[0,002 \left(\frac{H_{abs}}{\delta} - 8,5 \right) \right] \quad (\text{Humidité})$$

P : pression atmosphérique [kPa].

T : température [K].

H_{abs} : humidité absolue [g/m^3] [6]

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.3. Mesure par Éclateur à sphères

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.

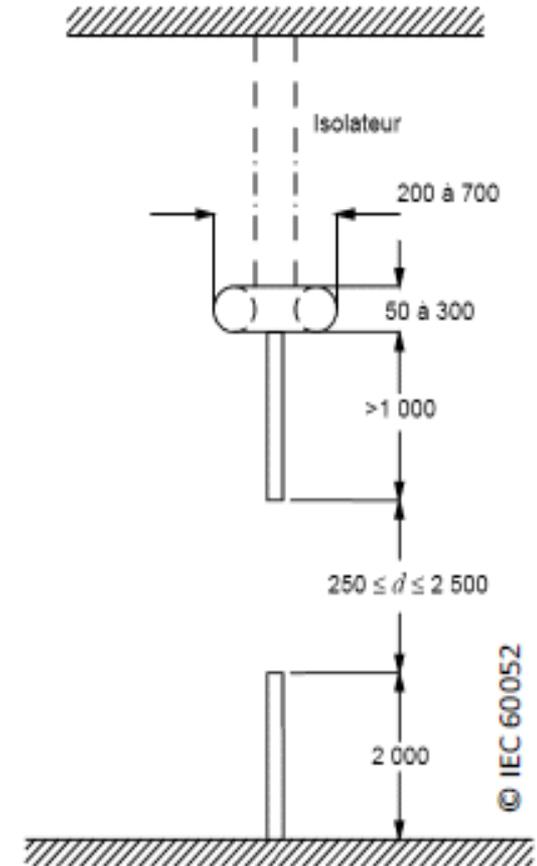
7.4. Mesure par Éclateur pointe à pointe

L'éclateur pointe-pointe est recommandé pour la mesure des tensions continues.

Les «pointes » sont en réalité des cylindres coupés perpendiculairement à leur axe, avec des « bords saillants » d'où la décharge va s'amorcer.

Dans les conditions climatiques standards, la tension disruptive est donnée par la relation empirique (2.)

(Pour $d > 250$ mm) :



7.5. Mesure galvanométrique

Contrairement à la mesure précédente, La mesure de la tension est effectuée par la dérivation d'un courant I à travers une grande résistance de mesure R ($R \geq 1\text{M}\Omega$). La mesure du courant I donne la valeur de la tension $U = RI$. (figure.8).

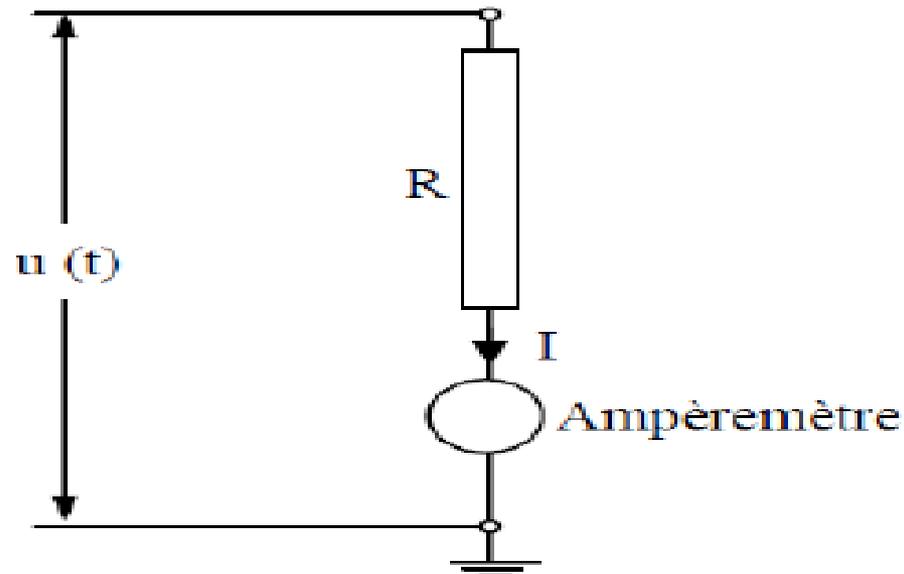


Fig.8 : Principe de mesure galvanométrique

7.5. Mesure galvanométrique

1. Avantages

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**. Le courant de mesure soutiré est suffisant pour rendre **la mesure fiable** même **en présence de champs électriques perturbateurs**.

2. Inconvénients

On est conduit en général, pour des raisons de dissipation thermique à utiliser des résistances de l'ordre de $M\Omega$.

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

(Précision de l'ordre de %).

7.6. Diviseurs de tension

Un diviseur de tension est un embiellage de **composants passifs connectés en série** comportant en général, une borne de haute tension B_1 , une borne de basse tension B_2 et une borne commune terre (figure.9).

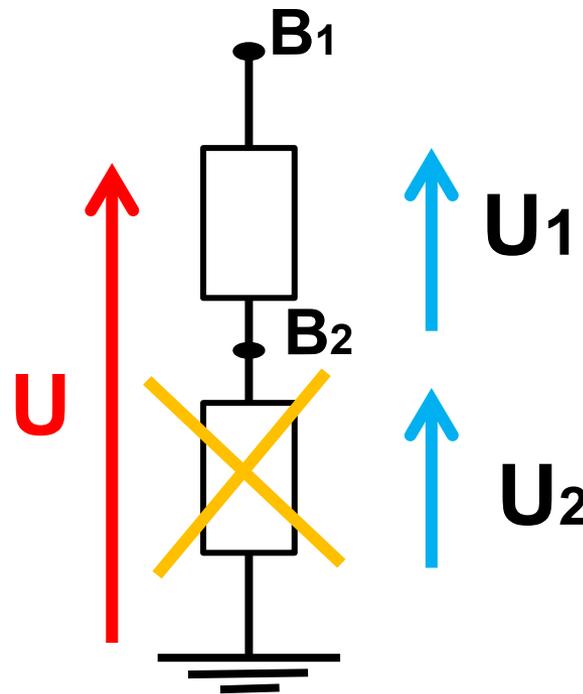


Figure .9: Diviseur de tension

7.6. Diviseurs de tension

7.6.1. Diviseur résistif

Le diviseur résistif est couramment utilisé pour la mesure des **tensions continues**, en association avec un simple voltmètre basse tension. Un diviseur de tension est formé d'une grande résistance **R₁** et d'une petite résistance **R₂** placées en série.

(Figure 10.a).

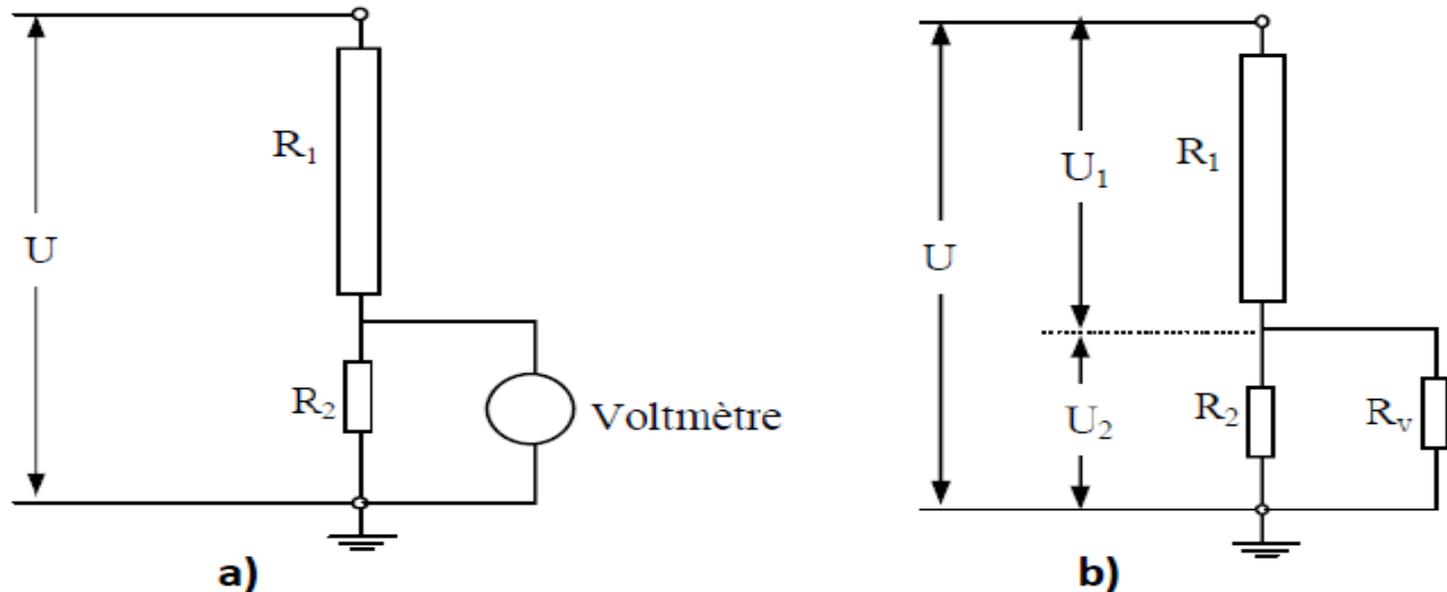


Figure. 10 : a) Diviseur de tension résistif
b) Circuit électrique équivalent

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6. Diviseurs de tension

7.6.1. Diviseur résistif

Rapport de division g

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

Avec

$$\frac{1}{R_2'} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_v}$$

Ou R_v résistance du voltmètre.

Or

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

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 U2** aux bornes de **R2** nous donne la valeur de la tension globale U.

Comme il s'agit d'un rapport (**R1 / R2**), 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 a 1 %**).

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6. Diviseurs de tension

7.6.2. Diviseur capacitif

Les hautes tensions alternatives peuvent être mesurées à l'aide de diviseurs capacitifs.

L'avantage du diviseur capacitif est **qu'il consomme très peu d'énergie active**.

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

(Figure.11).

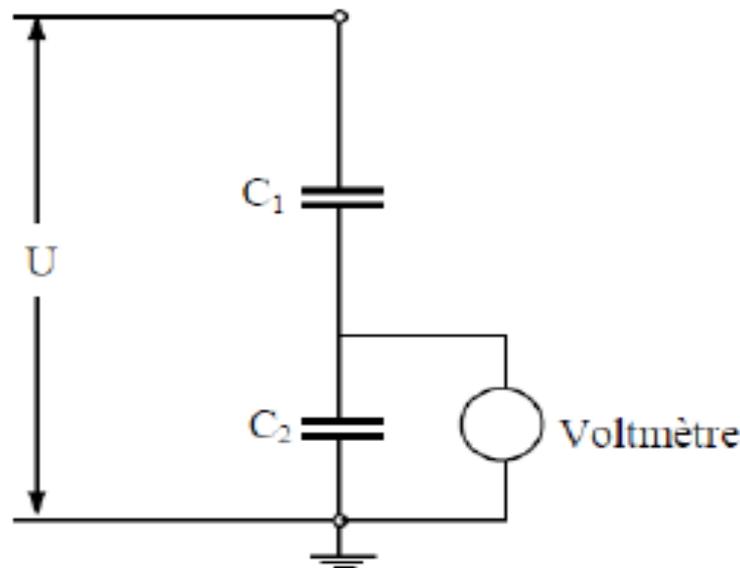


Figure.11 : Diviseur de tension capacitif

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6. Diviseurs de tension

7.6.2. Diviseur capacitif

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

$$C_2 \gg C_1 \Rightarrow \frac{U}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

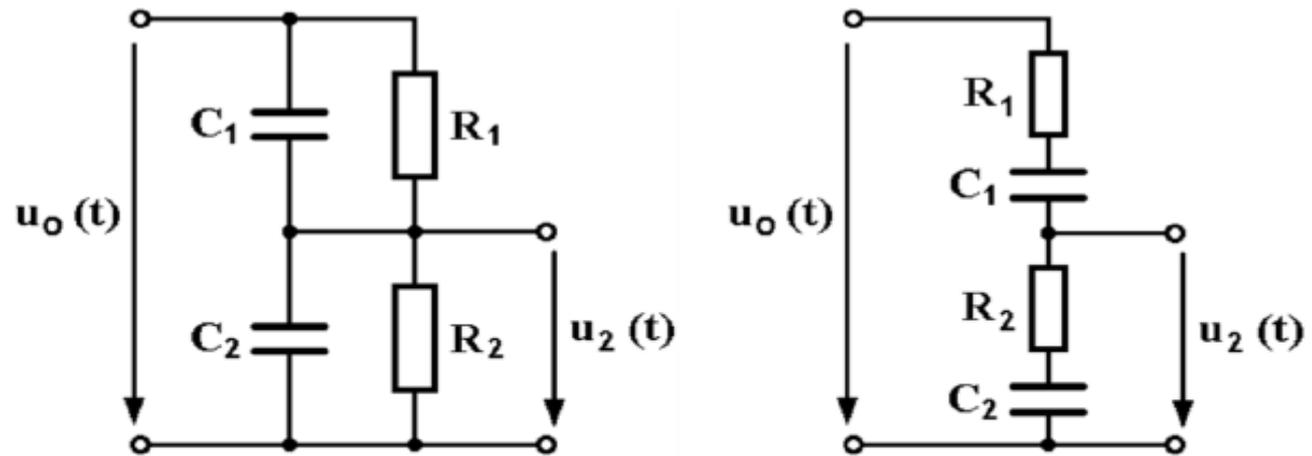
7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6. Diviseurs de tension

7.6.3. Diviseur capacitif – résistif

Le diviseur **capacitif – résistif** est utilisé pour la mesure **des tensions de choc** ; il peut aussi **fonctionner en alternatif**. Les tensions comportant des fréquences élevées, en particulier des **tensions de choc**, sont mesurées à l'aide de diviseurs capacitif – résistif. (figure.12).

De tels diviseurs présentent l'avantage d'éliminer les oscillations dues aux **inductances parasites**.



Diviseur C – R parallèle

Diviseur C – R série

Figure.12 : Montage de diviseurs capacitif-résistif

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6. Diviseurs de tension

7.6.3. Diviseur capacitif – résistif

Des analyses détaillées de la bande passante d'un tel système – tenant compte de l'échauffement des résistances et des capacités parasites – ont montré qu'elle ne dépasse guère **les 100 kHz**. Cette limite est insuffisante pour utiliser un tel diviseur en **onde de choc de foudre**, par exemple. L'étude poussée de type diviseur **R-C série** a été faite en 1965, en particulier du point de vue de la réponse en fréquence.

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6.4. Mesure de la haute tension par une sonde

La sonde utilisée pour mesurer des tensions élevées sont reposé sur le principe de diviseur de tension.

Une sonde est un simple câble caractérisée par des éléments passifs (**Résistance, capacité**). On distingue les sondes directes, qui peuvent être modélisées par une capacité parallèle et, les sondes réductrices (**x10, x20, x100, ...**) qui divisent par (10, 20, 100), celles-ci présentent une capacité et une résistance en parallèle. Elles sont utilisées pour **diviser les tensions à mesurer** et **diminuer les perturbations sur la mesure**, l'impédance équivalente de l'ensemble de mesure étant augmentée.

(figure.13)



Figure.13 : Une sonde pour mesurer la haute tension

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.6.4. Mesure de la haute tension par une sonde

Oscilloscope a mémoire

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



Figure.16 : photo d'un oscilloscope à mémoire

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.7. Transformateur de mesure

Le transformateur de tension est un **transformateur de mesure** dans lequel la tension secondaire est pratiquement proportionnelle à la tension primaire et déphasée par rapport à celle-ci d'un angle approximativement nul.



Figure.14 : Transformateur de tension 33 kV / 110 V

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.

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.7. Transformateur de mesure

7.7.1. Transformateur de tension capacitif

Le transformateur de tension dit « capacitif », utilisé dans les réseaux électriques, **combine** un **diviseur capacitif** à un **transformateur de tension**.

Le primaire du transformateur et la branche basse tension du diviseur forme un circuit résonant. (Figure 15)

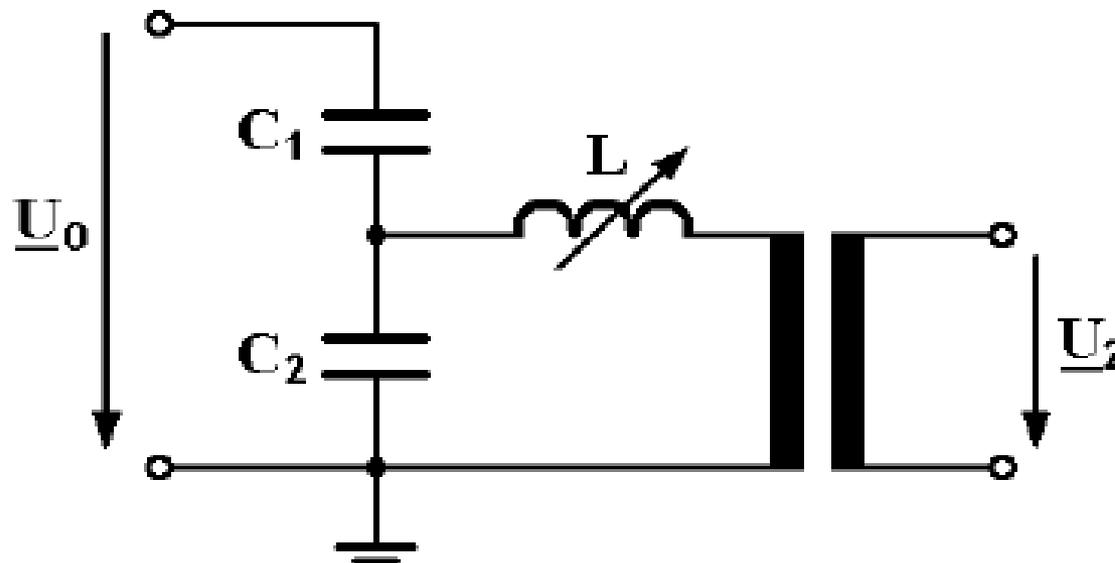


Figure.15 : Transformateur de tension capacitif

7.7. Transformateur de mesure

7.7.1. Transformateur de tension capacitif

1. Avantages du transformateur de tension capacitif

- ❖ **La résonance** permet d'obtenir **un courant plus important** à la sortie, d'où une meilleure **immunité** aux perturbations pour des mesures transmises à grande distance.
- ❖ **Le circuit résonant fonctionne comme un filtre** qui élimine les tensions transitoires. Construction économique jusqu'à des niveaux de tension très élevés (MV)

7. Différents technique de mesure en haute tension

7.7. Transformateur de mesure

7.8. Mesure de courant

Il est également possible de mesurer le courant de grande valeur par des différents systèmes. On distingue parmi celles-ci :

7.8.1. Transformateur de courant

Le transformateur de courant est un **transformateur de mesure** dans lequel le courant secondaire est pratiquement proportionnel au courant primaire et déphasée par rapport à celui-ci d'un angle approximativement nul. (figure.17)

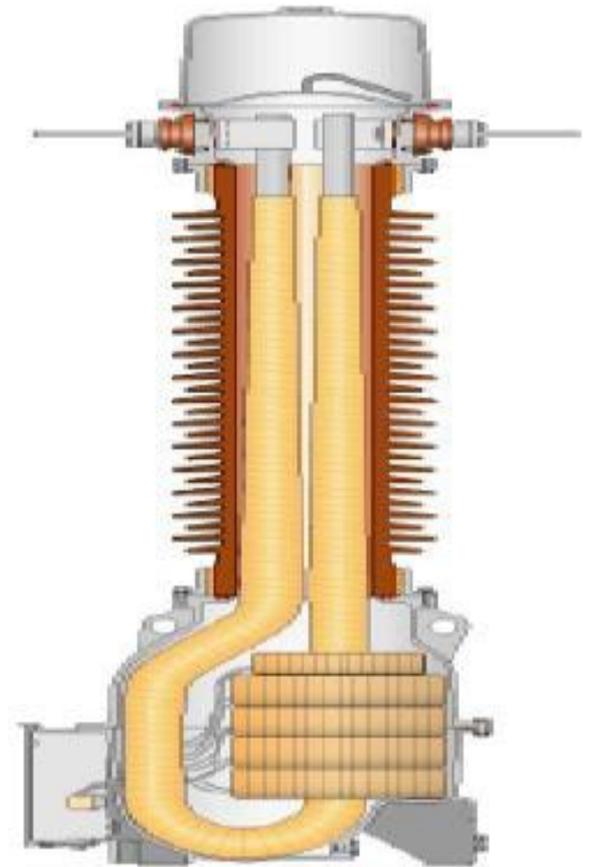


Figure.17 : Transformateur de courant isolé à l'huile 170 kV Courant primaire < 4000 A

7.6. Transformateur de mesure

7.8.2. Bobine de Rogowski

Elle sert à Mesurer des **courants alternatifs ou impulsionnels**. Ce dispositif est formé d'un fil enroulé en spirale, et dont le retour se fait par le centre de la spirale. (figure.18)

I. Avantages

Système ouvert, permettant de mesurer un courant sans contact galvanique. Possibilité de bobine de très grandes dimensions.

II. Utilisation

- o Courants dans les transformateurs de puissance
- o Courants de foudre

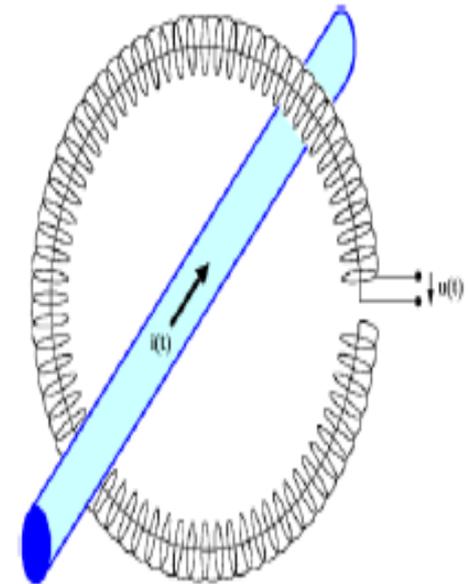


Figure.18 : Principe d'une bobine de Rogowski

7.6. Transformateur de mesure

7.8.3. Transformateur de courant HF

La mesure des courants impulsionnels (foudre, DES...) est possible avec des transformateurs de courants dimensionnés pour les hautes fréquences. (figure.19). Les transformateurs de courant HF sont aussi appelé **sonde de courant**.



Figure.19: Transformateur de courant HF

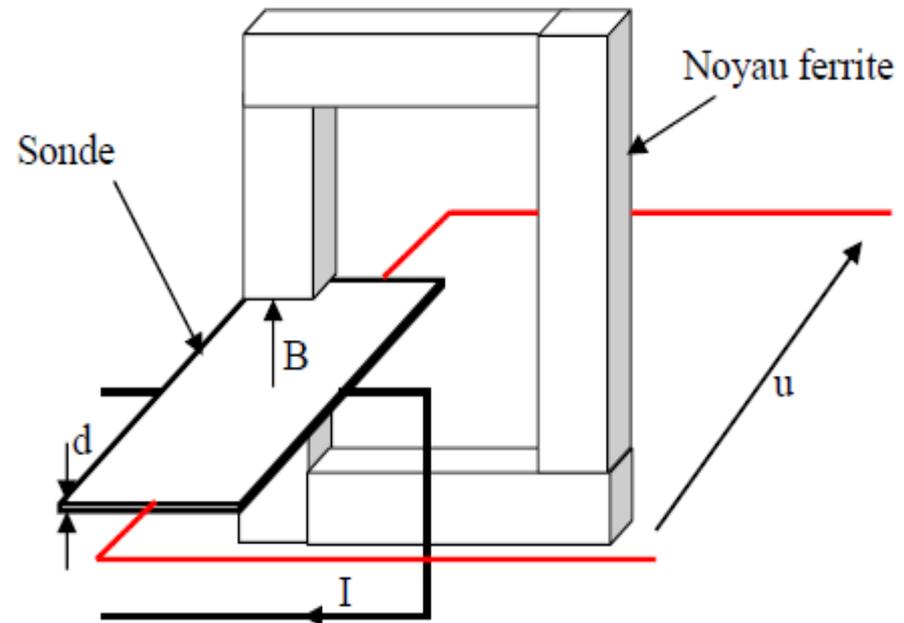
7.8.4. Sonde à effet Hall

L'effet Hall est une conséquence des forces électromagnétiques de **Laplace-Lorentz** s'exerçant sur un courant d'électrons i , baigné dans un champ magnétique. L'**effet Hall** manifeste par l'apparition d'une tension u , induite aux bornes de la sonde semi-conductrice.

Ce dispositif est permet à mesurer les **courant sous haute tension de choc**.

$$u = k_H \cdot \frac{B}{d}$$

Où k_H est la constante de Hall et d l'épaisseur de la plaquette de la sonde de l'ordre de μm .



7. Différents technique de mesure en haute tension

Le tableau 1 résume les différentes méthodes de mesure en haute tension.

Tableau 1 : Méthode de mesure pour chaque type de tension

TENSION CONTINUE	TENSION ALTERNATIVE	TENSION DE CHOC
<ul style="list-style-type: none">-Voltmètre électrostatique-Mesure par éclateurDiviseur résistif-Mesure galvanométrique a l'aide d'une résistance	<ul style="list-style-type: none">-Voltmètre électrostatique-Mesure par éclateur-Mesure galvanométrique a l'aide d'une capacité-Diviseur capacitifTransformateur de tension	<ul style="list-style-type: none">-Mesure par éclateur-Diviseur capacitif avec adaptation-Diviseur résistif avec adaptation