

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ OUM EL BOUAGHI

FACULTÉ DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE

*RAPPORT DE COURS
TECHNIQUE DE LA HAUTE
TENSION*

DR. HAMDİ NAOUËL

ANNÉE UNIVERSITAIRE
2020-2021

Plan de cour technique de la haute tension

Introduction général	4
Chapitre 1 : généralités sur la haute tension	7
I.1 Définition	8
I.2 domaines d'applications de la haute tension	8
I.3 transport de l'énergie électrique en haute tension	9
I.3.1 Définition	
I.3.2 Classe des tensions	
I.3.3 Puissance active transportée	10
I.3.4 Les lignes aériennes	
I.3.5 Câbles souterrain ou marin	11
I.3.6 Comparaison ligne aérienne et câble souterraine	12
Chapitre 2 : coordination de l'isolement	14
II .1 Introduction	15
II.2 Définition	15
1.La rigidité diélectrique	
2.Permittivité	
3.Diélectrique	
4.Isolant	
5.Isoler	
6.Isolation	
7.Isolement	
8.Système d'isolation	
9.Isolateur	16
II.3 facteur de pertes diélectrique	17
a. Diélectrique sans pertes	
b. Diélectrique avec pertes	
II.4 schéma équivalent série et parallèle	19
II.4.1 schéma série d'un isolant	
II.4.2 schéma parallèle d'un isolant	
II.5 gradation de l'isolement	21
II.5.1 tension de perforation ou de claquage	
II.5.2 Tension de contournement, tension de cheminement	
II.5.3 Tension d'essai	
II.6 Gradation des niveaux d'isolement dans un réseau	22
Chapitre 3 : maîtrise des champs électriques	23
III.1 Introduction	24
III.2 champ électrique et dépendance de la forme	24
III.2.1 les principaux fondamentale	26
III.2.2 facteur de forme ou efficacité (facteur de Schwaiger)	
III.2.3 applications	
a. Le champ électrique pour une ligne coaxiale	
b. Le champ électrique dans le cas de deux lignes cylindrique parallèle	
c. Le champ électrique dans le cas Deux sphères conductrices	

Plan de cour technique de la haute tension

IV.6.4. Différent types d'isolateurs	
IV.6.4.1 Isolateurs rigides	
IV.6.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	50
IV.6.4.3 Isolateur capot et tige	
Chapitre 5 : générateurs de la haute tension	51
V. 1 .Introduction	52
V.2. Générateurs électrostatiques	
V.2.1 Machines à triboélectricité	
V.2.2 Électrophore de Volta	53
V.2.3 Machine de Wimshurst	
V.2.4 Générateur Van de Graff	54
V.2.5 Générateur de Felici	
V.3. Générateurs de tension alternative	55
V.3.1 transformateurs de puissance	
V.3.2 transformateur de potentiel	57
V.3.3 les transformateurs d'essai	
V. 3.4 les transformateurs à résonance	58
V.3.4.1 les transformateurs à résonance série	59
V.3.4. les transformateurs à résonance parallèle	60
V.4 Générateurs de hautes tensions continues	
V.4.1 les redresseurs	61
V.4..1.1 Redresseurs Simple alternance	
V.4..1.2 Redresseurs double alternance	62
V4.2 les doubleurs	
V.4.2.1 doubleur de LATOUR	63
V.4.2.2 doubleur de SCHENKEL	
V.5 les générateurs de choc	64
V.5.1 Générateur de choc à un étage	65
V.5.2 Générateur de choc à plusieurs étages (Générateur de Marx)	66
Chapitre 6 : mesure de haute tension en laboratoire	68
VI .1 Introduction	69
VI .2 . Mesure des hautes Tensions continues	
VI .2.1 L'Electromètre	
VI. 2 .2 Voltmètre électrostatique	
VI.2.3 Galvanomètre	70
VI.2.4 Diviseur résistif	71
VI. 3 Mesure de HT alternatives	
VI .3.1Mesure galvanométrique	
VI.3.2 diviseur capacitif	72
VI .3.4 Transformateur de tension	
VI .3.5 Transformateur de tension capacitif	73
VI.4 Mesure des hautes Tensions de choc	
VI.4.1 Diviseur de choc purement résistif	
VI.4.2 Diviseur de choc capacitif	74
VI.5 Mesure des courants sous Haute Tension	

Plan de cour technique de la haute tension

VI.5.1 les transformateurs de courant	
VI.5.2 Les transducteurs magnéto-optiques	75
VI.5.3 Sonde à effet Hall	
VI.5.4 La bobine de Rogowsk	76
VI.6 Mesure par éclateur à sphères	76

INTRODUCTION GENERALE

Les domaines de tension sont définis en fonction du type de courant (alternatif ou continu) et du type de tension (basse tension ou haute tension).

On distingue le domaine haute tension A (HTA), encore appelé domaine moyenne tension, et le domaine haute tension B (HTB). En régime alternatif, le domaine HTA couvre une plage comprise entre 1.000 et 50.000 volts. En régime continu, il couvre une plage comprise entre 1.500 et 75.000 volts. En effet, à tension égale, le courant continu est moins dangereux que le courant alternatif (moins de contractions musculaires mais autant de brûlures internes et de réactions chimiques dans le sang). L'étude de la haute tension est donc d'une nécessité majeure et traite de systèmes à l'action de champs électrique élevés qui, pour les phénomènes traités, sont prépondérants par rapport aux champs magnétiques. La principale raison de l'utilisation de hautes tensions est de faciliter le transport de l'énergie électrique et ceci pour charger et accélérer des particules en physique ou encore dans les applications industrielles de l'électricité statique, et qui nécessite la connaissance des méthodes de calcul et techniques particulières à la haute tension. Il est donc nécessaire de maîtriser tout système physique, de manière à concevoir des appareils résistant aux contraintes subies lors de son utilisation en HT.

Pourquoi utiliser la haute tension ?

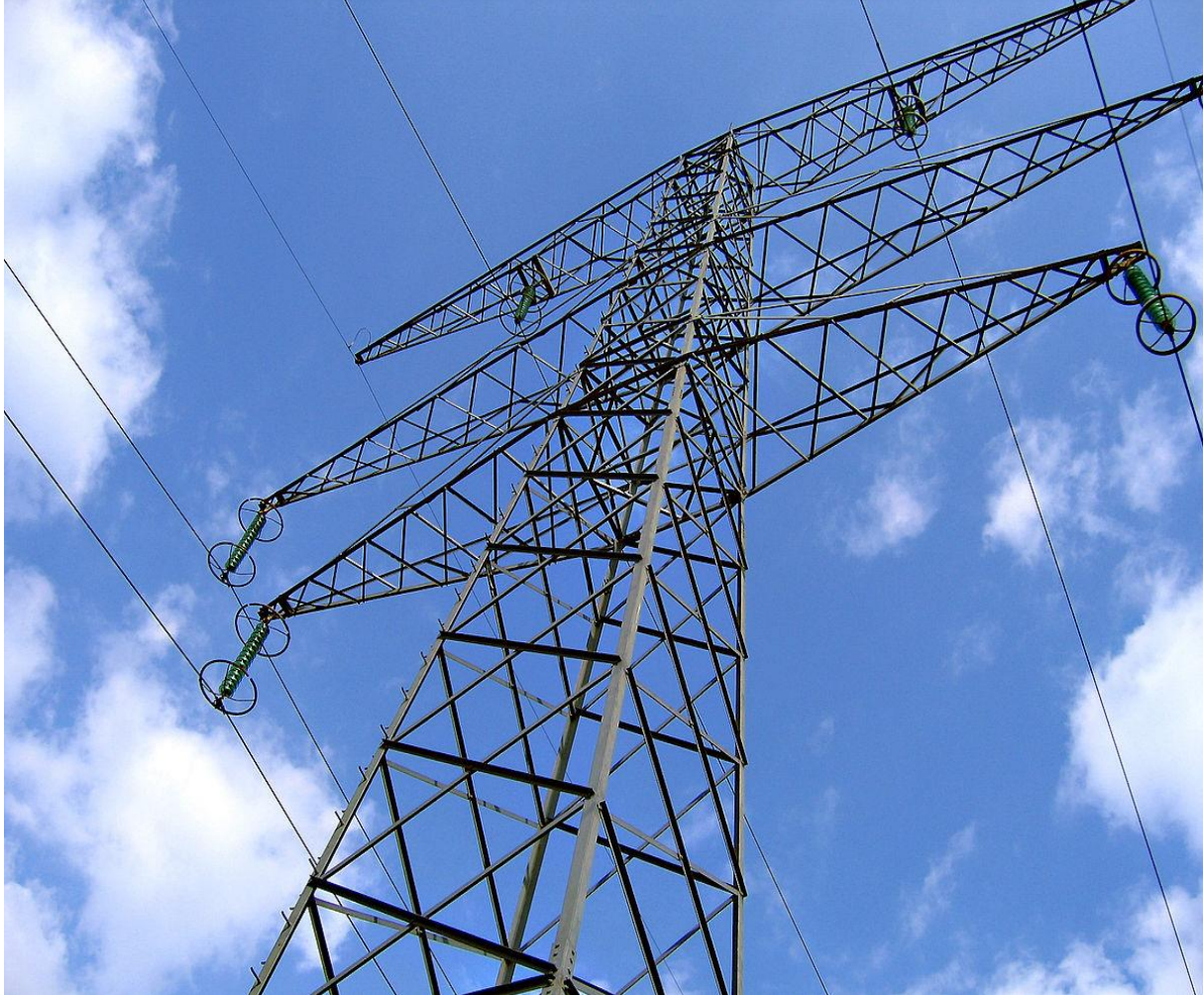
Comme définition la plus simple, on **utilise** des lignes à **Haute Tension** pour transporter l'électricité parce que l'augmentation de la **tension** limite les pertes d'énergie (c'est ce qu'on appelle « l'effet Joule »). La **Haute** et la Très **Haute Tension** permettent donc de transporter l'énergie sur de très longues distances. En effet, Tout transfert d'énergie impose d'utiliser un système de liaisons associant une grandeur de flux et une grandeur d'effort. Pour le transfert d'énergie par l'électricité, la grandeur d'effort est la tension électrique et la grandeur de flux est l'intensité du courant. La plus grande partie de l'énergie perdue lors de ce transfert dépend de la grandeur de flux, responsable des pertes liées au déplacement. Donc, le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne et, également, d'améliorer la stabilité des réseaux.

Les pertes en ligne sont principalement dues à l'effet Joule ne dépendant que de deux paramètres : la résistance ainsi que l'intensité du courant. L'utilisation de la haute tension permet donc et ceci à puissance transportée équivalente, de diminuer le courant et par la même occasion les pertes. D'un autre côté, pour diminuer la résistance, aux fréquences industrielles, il n'y a que deux facteurs, la résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles de

transport, et la section de ces câbles. À matériau de fabrication et section équivalents, les pertes sont donc égales, en principe, pour les lignes aériennes et pour les lignes souterraines

Avant l'installation de la première ligne à haute tension, le transport de l'énergie sur des distances importantes fut rendu possible à partir de 1729 et ceci grâce à la transmission d'impulsions électriques. La technique a été mise au point par Stephen Gray. Celui-ci a utilisé des cordes de Chanvre et des fils de soie. Le physicien a ainsi créé la télégraphie.

Il faudra attendre 1882 pour voir naître la première ligne à haute tension en Allemagne. Dès la fin du XIX^e siècle, plusieurs villes sont alimentées en électricité grâce à des lignes à haute tension. Pendant tout le XX^e siècle, ces infrastructures se sont multipliées et, surtout, leur capacité n'a cessé d'augmenter. En 1909 sont construites des lignes à 60 000 volts. La capacité atteindra 160 000 volts en 1920, 380 000 volts en 1957 (en Italie) et 1 100 000 volts en 1982 (en Russie). Au XXI^e siècle, les capacités n'ont pas beaucoup évolué. Cependant, de plus en plus de pays se dotent de lignes à haute tension.



CHAPITRE 1
GENERALITES SUR LA HAUTE
TENSION

I. GENERALITES

I.1 Définition

La haute tension traite de l'ensemble des systèmes soumis à l'action des champs électriques élevés, dont l'effet concernant les phénomènes traités est de manière générale prépondérant par rapport à l'effet du champ magnétique.

De même, un diélectrique mince d'un élément de condensateurs soumis à un champ électrique de quelques dizaines de v/m requiert le recours à des techniques qui se rapporte directement à la haute tension.

Généralement, en régime alternatif, un niveau de tension efficace de service de 1kv est fixé comme étant le seuil inférieur du domaine de la haute tension. Mais chaque pays doit se référer à ses propres normes concernant ce domaine.

Il est bien connu que pour les installations à haute tension, on distingue des installations à courant fort et d'autres à courant faible.

Les installations à faible courant produisent ou utilisent normalement des courants qui n'engendre aucun danger pour les personnes ($<10\text{mA}$) ainsi que les objets, par exemple un appareil de traitement médical par ozonothérapie. Les installations à fort courant quant à eux, produisent ou utilisent des courants présentant dans certaines circonstances, un danger pour les personnes ou les objets ($\geq 10\text{mA}$ à 50Hz) tel que, par exemple une ligne de transport de l'énergie électrique.

I.2 domaines d'applications de la haute tension

Les principaux domaines d'application de la haute tension sont ;

- ✓ Les réseaux électriques en tension alternative ou continue (lignes aériennes, câbles, isolateurs, transformateurs, sectionneurs, disjoncteurs, parafoudre....)
- ✓ électricité statique (charge et décharge) générateurs électrostatiques moteurs électrostatiques, filtres électrostatiques, imprimantes électrostatique, peintures électrostatique....).
- ✓ physique ; microscope électronique accélérateurs de particules.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA HAUTE TENSTION

- ✓ médecine Effets biologiques des champs électriques, diagnostique par rayons X, thérapie par rayons X, ozonothérapie.
- ✓ électronique ; tubes cathodique, lampe à décharge, filtre bactérie logique
- ✓ Impulsions électromagnétiques d'origine nucléaire (NEMP) Protection des lignes de transmission, protection des antennes, protection des appareils électroniques, cages blindées (cage de Faraday).

L'application de la haute tension dans le domaine des réseaux électrique étant la plus importante et fait l'objet de notre cours.

I.3 transport de l'énergie électrique en haute tension

I.3.1 Définition

Le transport de l'électricité se fait par le biais d'un réseau de grand transport et d'interconnexion ainsi qu'un réseau de distribution (figure1.1)

Par la suite, l'électricité est dirigée vers un poste de transformation dit « poste source », qui transforme la Très Haute Tension en Haute Tension (environ 90 K volts) et en Moyenne Tension (20 K volts) puis elle se transformée à Moyenne Tension est enfin, elle est acheminée sur le réseau de distribution.

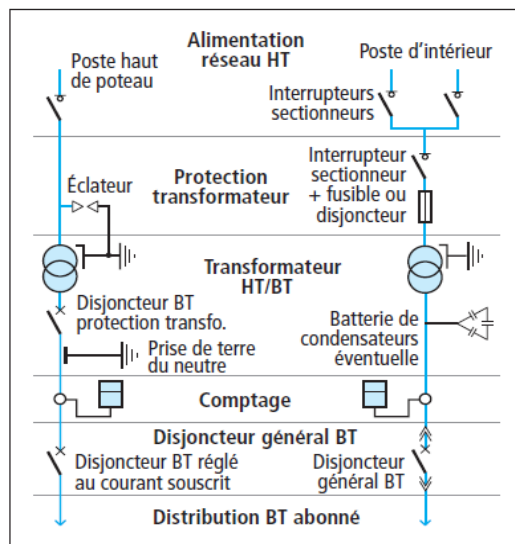


Figure 1.1 Structure générale d'un poste HTA/BT

I.3.2 Classe des tensions

Le tableau suivant présente les différentes classes de tensions faisant partie du domaine de la haute tension.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA HAUTE TENSTION

Niveau de tension	Gamme de tension	Classe de tension kV	Réseau de	Extension
Moyenne tension MT	A	1 - 45	Répartition	Région
Haute tension HT	B	45 - 300	Transport	Pays
Trés haute tension THT	C	300 - 750	Transport Interconnexion	Pays Entre pays
Ultra haute tension UHT	D	> 750	Interconnexion	Continent Pays à continent

I.3.3 Puissance active transportée

Soit une ligne de transport de l'énergie électrique monophasée ou l'on néglige comme première approximation les capacités et les conductances transversales.

La puissance active p_e délivrée en un point de consommation 2 situe à distance l du centre de production 1. Nous aurons alors :

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \theta_2 \quad (1 - 1)$$

$$\text{Et } I_1 = I_2 = I \quad (1 - 2)$$

De (1-1) on constate que deux variables entre en jeu afin d'augmenter la puissance électrique transportée ce sont :

- L'élévation de la tension U_2
- L'élévation du courant I_2

L'élévation de tension justifie le recours à l'utilisation des hautes tensions Quand l'élévation du courant est lie principalement aux pertes joules et aux chutes de tensions inductives. Une élévation du courant emporte :

L'augmentation de la densité de courant dans la ligne pouvant provoquer des échauffements des conducteurs.

Un surdimensionnement de la section du conducteur pouvant devenir indispensable aux isolateurs des lignes (barres) et difficilement maniables (câbles)

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA HAUTE TENSTION

A cause de ces facteurs, il est nécessaire de se diriger vers un transport de tension élevée. il y a plusieurs possibilités de transiter l'énergie, soit par tension continue, soit par tension alternative sinusoïdale.

Le transport d'énergie électrique en haute tension alternative peut s'effectuer par ligne aérienne ou par câbles.

I.3.4 Les lignes aériennes

Les lignes électriques assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances.

Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres (figure1.2).



Figure1.2 ligne aérienne

I.3.5 Câbles souterrain ou marin

Les câbles se composent d'un conducteur central, d'une isolation pour qui la rigidité diélectrique est élevée ainsi que la permittivité et les pertes diélectriques sont les plus faibles possibles ayant également un manteau conducteur en général mis à la terre.

La présence du manteau permet de rendre homogène la répartition radiale du champ électrique E rendant ainsi les caractéristiques du câble indépendantes du mode de pose (figure1.3).



Figure1.3 Schéma d'un câble coaxial

I.3.6 Comparaison ligne aérienne et câble souterrain :

Les lignes aériennes sont soumises plus fréquemment que les câbles à des interruptions de courte durée (orage, brouillard, givre, branches d'arbres, oiseaux, grues, engins de terrassement, matériels de construction de la ligne...).

- Les câbles demandent une durée de réparation plus longue que les lignes aériennes.
- Des surcharges de longue durée sont plus néfaste en souterrain qu'en aérien.
- Le vieillissement des câbles risque d'être fortement affecté. En revanche, les surcharges de courte durée sont plus facilement supportées par les câbles.
- Les câbles souterrains ont une impédance plus faible que leur équivalent aérien, ce qui implique des courants de défaut plus élevés et une rétrogradation de la sélectivité des protections. La répartition de charge est également fortement modifiée.
- Les contraintes environnementales et de coûts, ainsi que la sécurité et la fiabilité de l'alimentation doivent être parallèlement envisagées lors d'une comparaison souterrain-aérien.
- L'impact visuel des lignes peut nécessiter un acheminement approprié.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LA HAUTE TENSTION

- Les câbles souterrains vont générer moins de champs électromagnétiques (sauf aux bornes terminales et au droit de la liaison dans les dispositions en nappe où il peut être jusqu'à trois fois plus élevé), pas de bruit couronne et peu d'interférence.
- Une liaison souterraine occupe moins de passage au niveau du sol.
- Le courant capacitif d'un câble souterrain de haute tension est plus élevé que celui d'une ligne aérienne. De longs tronçons doit donc nécessiter une installation de compensateurs réactifs.
- La plupart des défauts en aérien sont fugitifs, mais deviennent permanents lorsqu'ils sont en souterrain.
- La liaison souterraine permet une diminution des pertes électriques d'environ $\frac{1}{4}$ par rapport à l'aérien pour une section du conducteur plus important.
- concernant le coût de la réalisation d'une ligne aérienne, elle sera appréciablement plus faible qu'une ligne électrique avec des câbles.



CHAPITRE 2

COORDINATION DE L'ISOLEMENT

II. 1 Introduction

Les dispositifs des postes et des réseaux électriques à haute tension sont soumis en exploitation à des surtensions d'origine atmosphérique ou de service provenant de manœuvres, de mises à la terre, de court-circuit ou d'autres incidents conduisant à des phénomènes transitoires.

On entend par coordination de l'isolement, l'ensemble des mesures qui sont prises pour éviter des décharges disruptives de perforation ou de contournement dans le matériel des installations.

Ce chapitre donne les définitions fondamentales ayant trait aux isolants, isolations et systèmes d'isolation. Par la suite on étudie la gradation de l'isolement et la gradation des niveaux d'isolement dans un réseau.

II.2 Définition

1. La rigidité diélectrique

C'est une propriété isolante des matériaux isolants, elle est définie par la valeur du champ appliqué qui donne naissance à un courant incontrôlable à travers le matériau.

2. Permittivité

C'est un paramètre constant électrique qui est défini pour caractériser la propriété macroscopique.

3. Diélectrique

C'est un milieu matériel dans lequel les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV. Ce milieu matériel peut être constitué par un solide, un liquide ou un gaz.

4. Isolant

Un isolant est une substance ou un corps dont la conductivité est nulle, en pratique très faible.

5. Isoler

L'action d'isoler est le moyen d'empêcher la conduction entre conducteurs électriques soumis à des tensions différentes.

6. Isolation

L'isolation est l'ensemble des matériaux isolants utilisés pour isoler un dispositif.

7. Isolement

C'est l'ensemble des qualités acquises par un corps conducteur du fait de son isolation.

8. Système d'isolation

CHAPITRE 2 : COORDINATION DE L'ISOLEMENT

Un système d'isolation est constitué par de matériaux isolants ou un assemblage de matériaux isolants (isolations à considérer, en liaison avec les parties conductrices associées).

9. Isolateur

C'est un composant destiné à maintenir et à isoler un ou plusieurs pièces électriquement conductrices. Il existe deux classes selon la température qu'il supporte on distingue

- **isolant organique**

Comme le caoutchouc, papier, l'huile, le coton .cette classe ne peut pas supporter une température très élevée.

- **isolant inorganique**

Comme le Mika, porcelaine, l'air .cette classe supporte une température qui va jusqu'à 1000c actuellement on trouve des isolants synthétiques qui sont des mélanges et chimiquement des polymères.

Parmi les valeurs spécifiées dans les normes d'essais d'isolateurs ; figure (2.1).

Nous pouvons citer :

a) **Pas P** : c'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs

Consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.

b) **La ligne de fuite L_f** : c'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques (armatures de l'isolateur).

c) **La ligne de contournement L_c** : c'est la distance la plus courte dans l'air entre parties Conductrices.

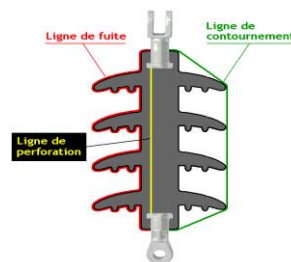


Figure 2.1 caractéristique d'un isolateur

Remarque

Les éléments caractéristiques d'un isolant du point de vue électrique sont :

- Permittivité relative ϵ_r
- Résistivité en courant continu ρ_{cc}
- Le facteur de perte diélectrique en tension alternative $tg\theta$
- La rigidité diélectrique définie par la valeur du champ E_r (v/m)
- La décharge disruptive E_d (v/m)
- La résistance transversale
- La résistance superficielle

II-3 étude des différentes grandeurs électrique

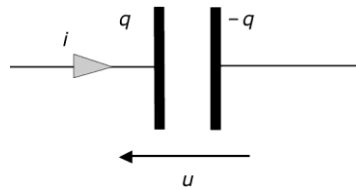
II.3 facteur de pertes diélectrique

En tension alternative sinusoïdale les pertes d'énergie actives sont dues :

- 1 – la conductivité du diélectrique (qualité de conduite)
- 2- phénomène de relaxation dû à l'existence d'un déphasage entre \vec{D} et \vec{E} dans le temps. Si ϵ est complexe donc on aura la relation non linéaire suivant :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \Rightarrow \vec{D} = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j \epsilon_r'') \vec{E} \tag{2 - 1}$$

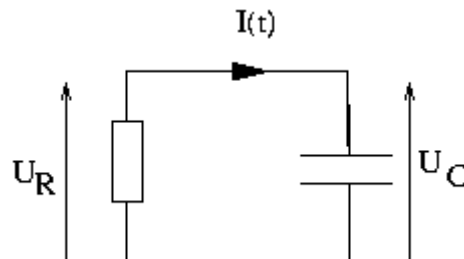
a- Diélectrique sans pertes



$$U = U_0 e^{j\omega t} \tag{2 - 2}$$

$$I = C_0 I_0 j \omega e^{j\omega t} \tag{2 - 3}$$

b- Diélectrique avec pertes



CHAPITRE 2 : COORDINATION DE L'ISOLEMENT

$$U = U_0 e^{j\omega t} \quad (2 - 4)$$

$$I = C_0 I_0 j\omega e^{j\omega t} = CUj\omega \quad (2 - 5)$$

$$\text{Avec } C = \frac{\epsilon S}{d}$$

$$I = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} U j\omega = \frac{\epsilon_0 S}{d} \epsilon_r U j\omega \quad (2 - 6)$$

$$I = C_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r) U j\omega \quad (2 - 7)$$

$$I = \underbrace{\epsilon'_r U \omega C_0}_{I_a} + j \underbrace{\epsilon''_r U \omega C_0}_{I_r} \quad (2 - 8)$$

$$\epsilon'_r = \frac{I_a}{U \omega C_0} \quad \text{Permittivité relative qui représente la composante active}$$

$$\epsilon''_r = \frac{I_r}{U \omega C_0} \quad \text{Permittivité relative qui représente la composante réactive}$$

$$\tan \varphi = \frac{\text{Re}(Z_{eq})}{\text{Im}(Z_{eq})} \quad (2 - 9)$$

Avec φ l'angle de pertes

$$Z_{eq} = \left[\frac{\left(\frac{1}{jC\omega} + R \right)}{\left(\frac{R}{jC\omega} \right)} \right]^{-1} = \frac{R}{1+(RC_0\omega)^2} - \frac{R^2 C_0 \omega}{1+(RC_0\omega)^2} j \quad (2 - 10)$$

$$\tan \varphi = \frac{1}{RC_0\omega} \quad (2 - 11)$$

Le facteur de pertes en fonction de ϵ'_r et ϵ''_r

$$I = \epsilon'_r C_0 \omega U + j \epsilon''_r C_0 \omega U \quad (2 - 12)$$

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{U}{\epsilon'_r C_0 \omega U + j \epsilon''_r C_0 \omega U} \quad (2 - 13)$$

$$I_m(Z) = \epsilon'_r C_0 \omega U$$

$$R_e(Z) = \epsilon''_r C_0 \omega U$$

Le facteur de pertes diélectriques vaut dans le cas du schéma parallèle

$$\tan \varphi = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r} \quad (2 - 14)$$

La conductivité diélectrique en tension alternative

CHAPITRE 2 : COORDINATION DE L'ISOLEMENT

L'expression générale de la conductivité diélectrique

$$I = j\omega CU = j\omega\epsilon_r C_0 U = j\omega(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')\epsilon_0 \frac{S}{d} U$$

La densité du courant complexe J vaut :

$$J = \frac{I}{S} \quad \text{et} \quad J = \sigma E \quad \text{avec} \quad E = \frac{U}{d} \quad \text{et} \quad C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d}$$

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{E}{J} = \frac{U}{Jd} = \frac{Us}{dI} = \frac{sU}{d^2 C \omega j U} = \frac{s}{jd\omega \epsilon_r \epsilon_0} \quad (2 - 15)$$

Donc La conductivité diélectrique :

$$\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon_r' + j\omega\epsilon_0\epsilon_r''$$

La conductivité est un nombre complexe donc elle a deux composants réelles et imaginaire et la conductivité interne du diélectrique et définit par :

$$\sigma = \omega\epsilon_0\epsilon_r'' \quad (\Omega m)^{-1}$$

La conductivité diélectrique σ tient compte du mécanisme de conduction et de relaxation à l'intérieur des matériaux isolants.

II.4 schéma équivalent série et parallèle

Suivant les cas un isolant peut être modélisé par un schéma équivalent série (figure 2-4) ou parallèle (figure 2-5)

On s'attache à chercher les relations permettant de passer du schéma série au schéma parallèle.

II.4.1 schéma série d'un isolant

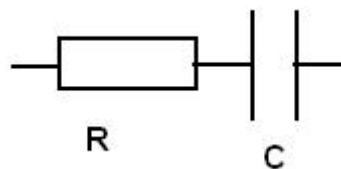


Figure 2-4

$$Z_s = R_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (2 - 16)$$

En tenant compte de la définition du facteur de pertes diélectrique vaut :

CHAPITRE 2 : COORDINATION DE L'ISOLEMENT

$$\tan \varphi = \omega R_s C_s \quad (2 - 17)$$

En introduisant (2 - 16) dans (2 - 17) on trouve l'impédance équivalente en fonction du facteur de pertes diélectrique :

$$Z_s = \frac{j \tan \varphi + 1}{j \omega C_s} = \frac{1}{\frac{j \omega C_s (1 - j \tan \varphi)}{1 + \tan^2 \varphi}} \quad \Omega \quad (2 - 18)$$

II.4.2 schéma parallèle d'un isolant

Dans le cas du schéma équivalent (figure 2-5) l'impédance équivalente vaut :

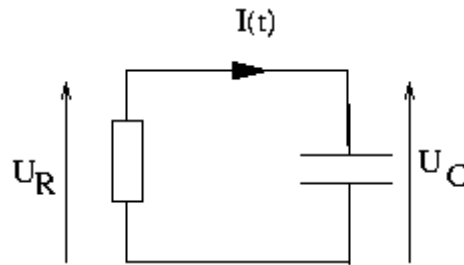


Figure (2-5)

$$Z_p = \frac{1}{\left(\frac{1}{R_p} + j \omega C_p\right)} \quad \Omega \quad (2 - 19)$$

En tenant compte de la définition du facteur de pertes diélectrique vaut :

$$\tan \varphi = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2 - 20)$$

En identifiant les impédances série et parallèle on trouve :

$$Z_s = Z_p$$

$$R_p = \frac{R_s (1 + \tan^2 \varphi)}{\tan^2 \varphi} \quad (2 - 21)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \tan^2 \varphi} \quad (2 - 22)$$

En prenant (2-20) et en introduisant (2-21) et (2-22) on a :

$$\tan \varphi = \omega R_s C_s = \omega \frac{R_p \tan^2 \varphi}{1 + \tan^2 \varphi} C_p (1 + \tan^2 \varphi) \quad (2 - 23)$$

D'où

CHAPITRE 2 : COORDINATION DE L'ISOLEMENT

$$\tan \varphi = \omega R_s C_s = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2 - 24)$$

Le facteur de pertes diélectrique permet de calculer les pertes d'énergie dans les isolants soumis à des hautes tensions.

Dans le cas du schéma équivalent parallèle, on a :

$$p = \frac{U^2}{R_p} = \omega C_p U^2 \tan \varphi \quad (2 - 25)$$

Dans le cas du schéma équivalent série, on obtient :

$$p = \omega C_s U^2 \frac{\tan \varphi}{1 + \tan^2 \varphi} \quad (2 - 24)$$

II.5 gradation de l'isolement

L'étudier de la coordination de l'isolement d'une installation électrique, elle est définie, à partir des niveaux de tensions et surtensions susceptibles d'être présents sur cette installation.

II.5.1 tension de perforation ou de claquage

La tension de perforation ou de claquage est celle qui conduit à la perforation ou percement de l'isolation interne. Décharge complète et destructive au travers de l'isolant. Cette tension doit être évidemment plus grande que la tension de contournement de l'appareil.

II.5.2 Tension de contournement, tension de cheminement

La tension de contournement est la tension disruptive, qui produit une décharge dans l'air, le long de l'isolation externe de l'appareil. Cette tension doit être plus élevée que la tension d'essai. En effet, selon les règles précitées, l'appareil soumis à la tension d'essai ne doit présenter aucun contournement au cours des essais.

II.5.3 Tension d'essai

La tension d'essai ou de tenue est fixée par les règles nationales ou internationales et permet une coordination correcte de l'isolement.

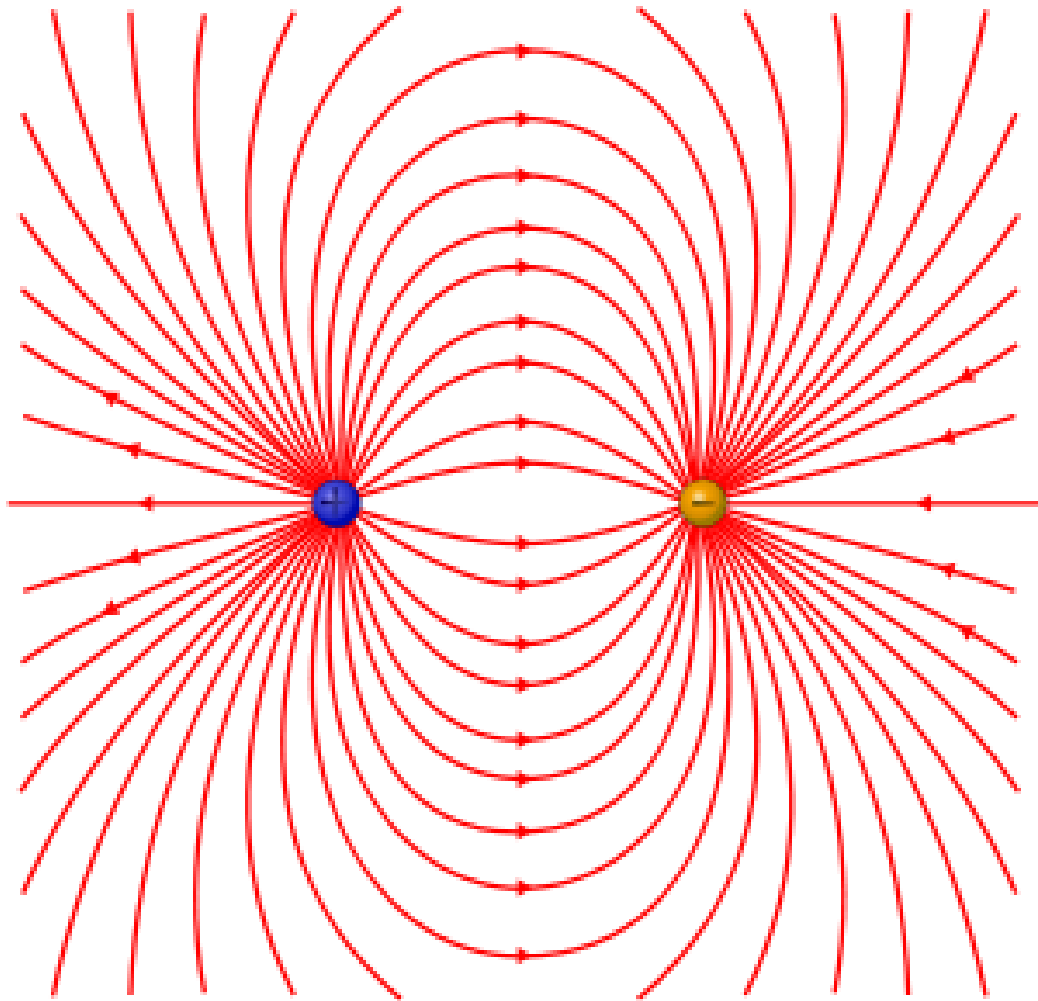
Pour déterminer la tension de perforation de l'isolateur, il faut immerger ce dernier dans de l'huile ou dans du gaz sous pression (par exemple N₂, SF₆).

II.6 Gradation des niveaux d'isolement dans un réseau

La gradation des niveaux d'isolement dans un réseau est pratiquement impossible, pour des raisons économiques d'isoler, parfaitement un réseau. Des surtensions très fortes créeront ainsi des perturbations, d'où les dispositions suivantes:

- ✓ Limiter l'importance de ces perturbations, si possible pas d'interruption de service
- ✓ Limiter les dégâts à des parties secondaires facilement accessibles et remplaçables.
- ✓ Les lignes, étant peu accessibles, seront bien isolées. Des 30kV, fil de garde .
- ✓ Les sous-stations étant bien surveillées, les surtensions peuvent être bien contrôlées

De ces principes, on comprend que la gradation des niveaux d'isolement des diverses parties est indispensable.



CHAPITRE 3

MAITRISE DES CHAMPS ELECTRIQUES

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

III. 1 Introduction

L'espace qui entoure tout objet soumis à une tension élevée est le siège d'un champ électrique. Il est bien connu que l'étude de champs électriques est indispensable dans le domaine de la haute tension. En effet, les champs électriques élevés constituent une contrainte pour matériel électrique ainsi que un danger pour le personnel d'exploitation des postes mais aussi des lignes et des laboratoires à haute tension. Donc, avec l'élévation de la tension, il est nécessaire d'augmenter les distances d'isolation.

III.2 champ électrique et dépendance de la forme

En fonction de la fréquence de la haute tension qui les produit, les champs électriques peuvent être

- Stationnaires (hautes tensions continues)
- Quasi stationnaires (haute tension à fréquence industrielle de 50 ou 60Hz)
- Transitoires (haute tensions de choc)

Les méthodes de calcul des champs électriques statiques sont applicables aux champs stationnaires et quasi stationnaires avec une approximation.

Pour l'étude de champ électrique, on se retournera au cours d'électrostatique.

III.2.1 les principaux fondamentale**Grandeurs physiques**

- Charges au repos

densité de charge électrique : ρ (volumique) [C/m³]

σ (superficielle) [C/m²]

λ (linéique) [C/m]

- Charges en mouvement = courants

densité de courant : \mathbf{J} (volumique) [A/m²]

\mathbf{J}_s (superficielle) [A/m]

- Champs dans le vide

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

champ électrique **E**, engendré par les charges [V/m]

champ magnétique **H**, engendré par les courants [A/m]

➤ Dans la matière

Polarisation **P** [C/m²]

Déplacement électrique **D** [C/m²]

Ou'

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (3 - 1)$$

Aimantation **M** [A/m]

Densité de flux magnétique **B** [T]

Constantes

$$\mu_0 = 1,2566370614 \dots 10^{-6} \cong 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Vs/Am]}$$

$$\varepsilon_0 = 8,854187817 \dots 10^{-12} \cong (1/36\pi) \cdot 10^{-9} \text{ [As/Vm]}$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3 - 2)$$

Relations constitutives

➤ **Dans les milieux linéaires**

La polarisation *P* est proportionnelle au champ électrique :

$$D = \varepsilon E \quad (3 - 3)$$

(ε = permittivité électrique absolue)

L'aimantation *M* est proportionnelle au champ magnétique :

$$B = \mu H \quad (3 - 4)$$

(μ = perméabilité magnétique absolue)

La densité de courant est proportionnelle au champ électrique :

$$J = \sigma E \quad (3 - 5)$$

(σ = conductivité électrique)

La loi de la circulation du champ électrique indique :

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

$$E \vec{dl} = -dU \quad (3 - 6)$$

E : le champ électrique

U : le potentiel

l : la distance

Entre deux électrodes parallèles, le champ E égal à :

$$E = -\frac{U}{d} \quad (3 - 7)$$

III.2.2 facteur de forme ou efficacité (facteur de Schwaiger)

Le champ électrique naissant entre différentes parties des structures soumises à de hautes tensions est défini comme étant en fonction de leur configuration.

Pour définir l'intensité maximale d'un champ électrique régnant entre deux électrodes de formes géométriques quelconques, on peut comparer le champ électrique homogène équivalent $E_h = \frac{U}{d}$ entre deux électrodes au champ maximal E_{max} , entre ces deux électrodes lorsque celles-ci sont soumises à une tension U. Le rapport entre ces deux valeurs est appelé facteur de Schwaiger.

$$\eta = \frac{E_h}{E_{max}} = \frac{U}{E_{max}d} \quad (3 - 8)$$

Dans un condensateur plan infini, le champ électrique est uniforme Par définition, le facteur de Schwaiger $\eta = 1$

Le théorème de Gauss est également très souvent nécessaire ; car il exprime le fait que le flux total du déplacement électrique à travers une surface fermée, est égal à la charge totale contenue à l'intérieur du volume considéré :

$$\iint D \vec{dS} = \iiint \delta dv = \sum q \quad (3 - 9)$$

Il est donc important d'appliquer ces lois en haute tension

III.2.3 applications

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

a. Le champ électrique pour une ligne coaxiale

Soit une ligne coaxiale (figure3.1) formée d'un conducteur interne de rayon r_1 et d'un cylindre externe dont le rayon intérieur vaut r_2

$$E(r) = \frac{q_{int}}{2\pi\epsilon l r} \quad (3 - 10)$$

Le champ maximum sera à périphérie du conducteur et le champ minimum ; pour le champ max

$$E_{max} = \frac{q_{int}}{2\pi\epsilon l r_1} \quad (3 - 11)$$

Pour le champ moyen

$$E_{moy} = \frac{1}{r_2 - r_1} \frac{q_{int}}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3 - 12)$$

On applique la loi de la circulation du champ on obtient l'expression du champ en fonction de tension :

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3 - 13)$$

Et le champ maximal

$$E_{max} = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3 - 14)$$

Le facteur de Schwaiger dans ce cas

$$\eta = \frac{r_1}{r_2 - r_1} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (3 - 15)$$

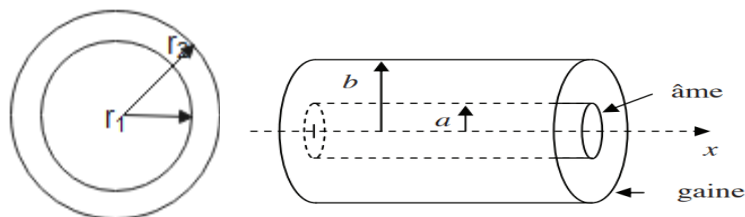


Figure3.1 ligne coaxiale

b. Le champ électrique dans le cas de deux lignes cylindrique parallèle

Si l'on applique le principe de superposition, le champ résultant entre les deux conducteurs (figure3.2) est donné par :

$$E(r) = E(r_+) + E(r_-) = \frac{q}{2\pi\epsilon l} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{d + 2r - r_1} \right) \quad (3 - 16)$$

La tension entre le deux conducteurs vaut alors :

$$U = \int_{r_1}^{d+r_1} E(r) dr \quad (3 - 17)$$

Après intégral on trouve :

$$U = \frac{2q}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{d + r_1}{r_1} \quad (3 - 18)$$

Pour $r = r_1$ on trouve la valeur maximum du champ égale à :

$$E_{max} = \frac{U}{2 \ln[(d + r_1)/r_1]} \cdot \frac{d + 2r_1}{r_1(d + r_1)} \quad (3 - 19)$$

D'où le facteur de Schwaiger pour deux cylindres parallèles :

$$\eta = \frac{2r_1(d + r_1) \ln[(d + r_1)/r_1]}{d(d + 2r_1)} \quad (3 - 20)$$

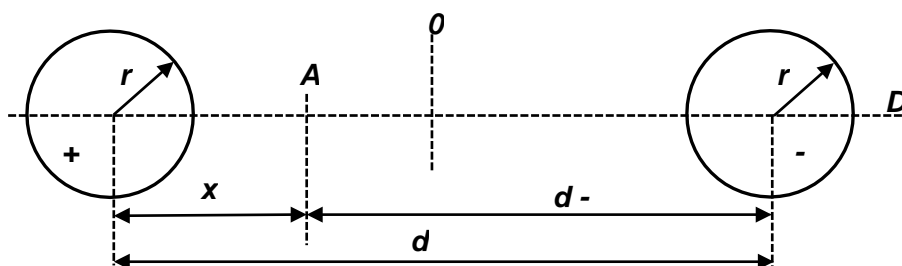


Figure 3.2 deux lignes cylindrique parallèle

c. Le champ électrique dans le cas Deux sphères conductrices concentrique

Dans le cas de deux sphères conductrices concentrique (figure3.3) et d'après la relation

$E = -\frac{dV}{dr}$ nous obtenons le champ électrique entre les conducteurs:

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

$$E(r) = \frac{U}{r^2} \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (3 - 21)$$

On retrouve également que le champ électrique est non homogène entre les conducteurs mais aussi, il est maximum à la surface de la sphère interne et minimum à la surface de la sphère externe:

$$E_{max} = \frac{U}{r_1} \frac{r_2}{r_2 - r_1} \quad (3 - 22)$$

$$E_{min} = \frac{U}{r_2} \frac{r_1}{r_2 - r_1} \quad (3 - 23)$$

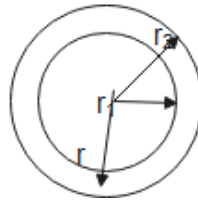


Figure 3.3 Deux sphères conductrices concentrique

d. Le champ électrique dans le cas une ligne coaxiale à n couche

En appliquant la loi de Gauss, on déduit le champ dans les couches (figure 3.4)

$$E(x) = \frac{U}{\epsilon_{xx} \sum_{n=1}^m \frac{1}{\epsilon_n} \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right)} \quad (3 - 24)$$

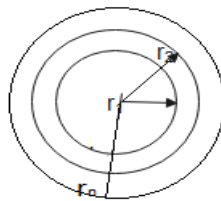


Figure 3.4 ligne coaxiale à n couche

III.3 méthodes d'évaluation du champ électrique

III.3.1 Introduction

Les méthodes permettant d'évaluer la valeur des champs électriques font appel soit à l'expérience ainsi qu'à la mesure directe ou simulée ; soit au calcul analytique ou numérique ;

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

il est nécessaire, cependant de s'arrêter plus particulièrement sur les méthodes appliquées en haute tension.

III.3.2 méthodes expérimentales

Il existe deux méthodes expérimentales, toutes deux faisant appel à la mesure des équipotentielles on distingue :

1. La méthode de mesure directe
2. La méthode par compensation

Dans les deux méthodes on suppose entre deux équipotentielles une répartition uniforme de champ et l'on calcule celui-ci en divisant la tension par la distance sur laquelle elle s'applique.

III.3.2.1 la méthode de mesure directe

En connectant un voltmètre électrostatique V entre le point de mesure P et la terre on lit directement la tension U (figure3-4)

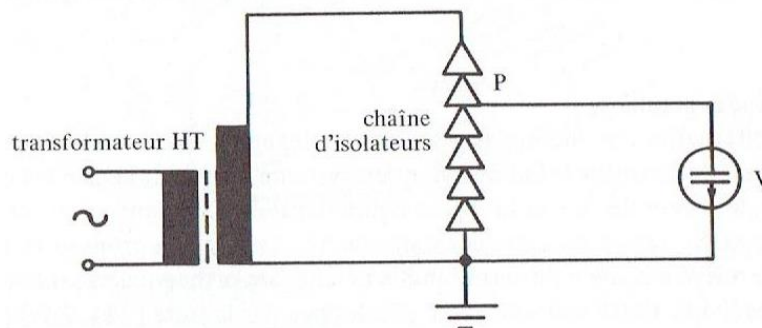


Figure3.4 .Schéma de mesure directe

III.3.2.2 la méthode de mesure par compensation

Le point P dont on veut déterminer la tension est relié à travers un éclateur à gaz au secondaire d'un transformateur et alimenté par le réseau à travers un régulateur de tension. Lorsque la tension au secondaire du transformateur T_2 a atteint la valeur et la phase de la tension du point P à mesurer, l'éclateur à gaz s'éteint et si l'on connaît le rapport de

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

transformation de T_2 . On peut lire directement la valeur de U_p sur un voltmètre connecté au primaire de T_2 (figure 3.5)

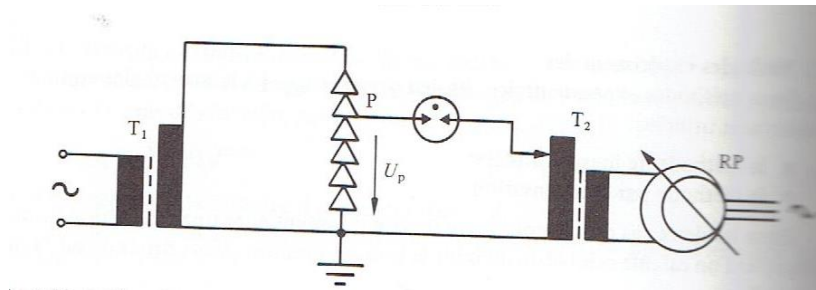


Figure 3.5 .Schéma de mesure par compensation

III 3.3 méthodes analogique

Les plus connues sont :

- Les méthodes graphiques , par lesquelles on trace un ensemble de lignes orthogonales.
- La cuve électrolytique ; des électrodes ayant la forme de l'objet sont immergées dans un liquide semi-conducteur. l'objet est mis sous tension ($\leq 50V$), la cuve à la terre et les champs sont relevés au moyen de sondes

III 3.4 méthodes analytiques et numériques

- 1- Transformations conformes
- 2- Principe des charges fictives
- 3- Méthode des différences finie
- 4- Méthode des éléments finie

III.4 décharge de couronne –impact sur le réseau électrique

III.4.1 définition

C'est un phénomène de décharge que l'on distingue autour d'un conducteur électrique en haute tension. Cet effet se voit quand la tension dépasse une valeur critique (tension disruptive du gaz (aire)) (figure 3..6).

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

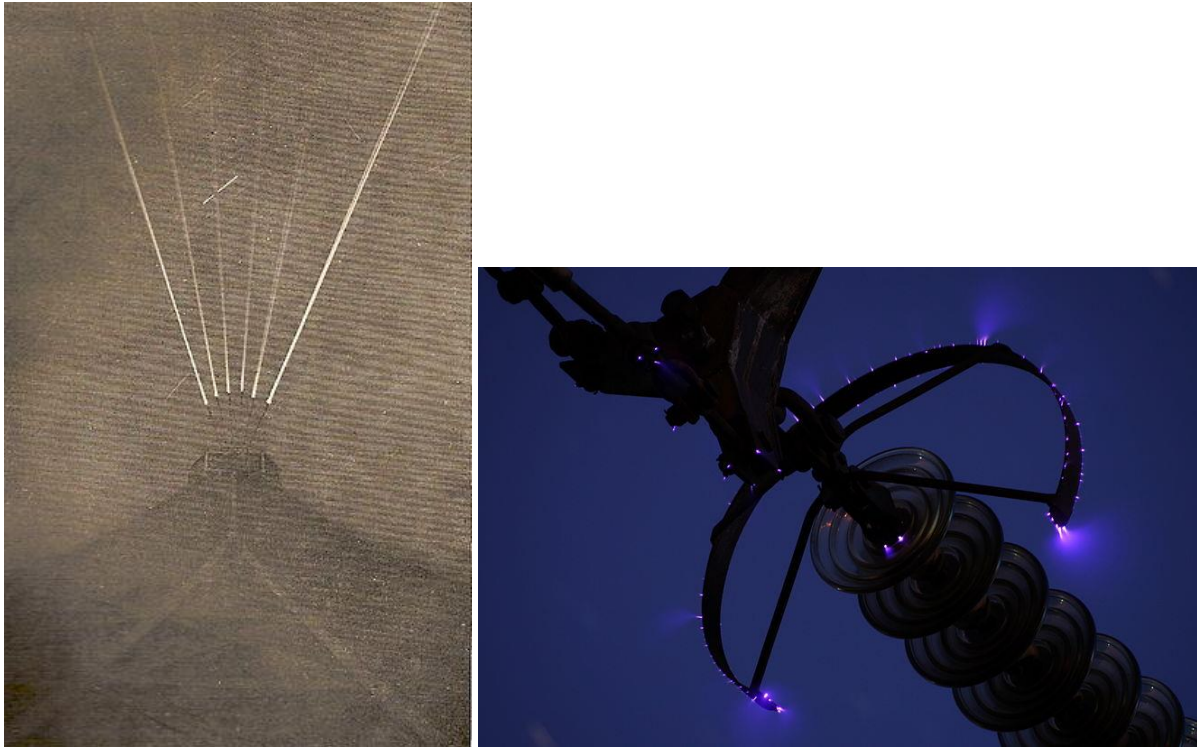


Figure 3.6 Effet de couronne autour des fils d'antenne et sur un éclateur

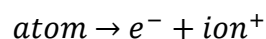
III.4.2 manifestation de l'effet de couronne

L'effet de couronne se manifeste par :

- 1- L'apparition d'effluves lumineux entourant le conducteur à haute tension dues à l'ionisation du gaz sous l'effet du champ électrique.
- 2- L'existence de pertes électrique due à un courant
- 3- L'effet couronne produit un bruit ressemblant au bourdonnement d'abeilles
- 4- L'effet couronne est à l'origine des perturbations des ondes radio, car les fréquences du courant de couronne (de l'ordre du MHz) sont du même ordre de grandeur que celles des ondes radio.
- 5- La décharge couronne, à l'instar de la décharge de claquage, est aussi accompagnée d'un dégagement d'odeur due à la formation de l'ozone.

III.4.3 approche physique

Lorsque l'effet de couronne apparait, .il se produit une dissociation de l'atome sous l'effet du champ



CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

Pour l'effet de couronne le conducteur génère des ions négatifs autour de lui dont elles portent le même signe que la charge qu'il porte.

III.4.4 condition d'apparition de l'effet de couronne

Pour connaître les paramètres qui influent sur l'apparition de l'effet couronne on prend un exemple d'un conducteur formé de deux cylindres coaxiaux

Le calcul du champ électrique à $r_1 < r < r_2$ selon le théorème de GOSSE on aura $\int E ds = \frac{q}{\epsilon_0}$

$$\Rightarrow E = \frac{q}{2\pi r l \epsilon_0} = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 l} \frac{1}{r}$$

Nous distinguons que le champ est proportionnel inversement avec le rayon r.

Si on fixe le rayon extérieur r_2 et on prend r_1 variable égal à r.

On cherche la valeur de r qui rend le champ électrique maximal donc qui fait apparaître l'effet couronne.

La tension entre r_2 et r se calcule par :

$$U = \int_r^{r_2} E(r) dr = \int_r^{r_2} \frac{q}{2\pi \epsilon l} \frac{1}{r} dr = \frac{q}{2\pi l \epsilon} \ln \frac{r_2}{r}$$

III.4.5 Effet de couronne sur ligne coaxiale

Lorsqu'on applique une tension croissante à une ligne coaxiale de rayons R_1 et R_2 , la décharge disruptive survient à partir d'un seuil de tension, U_C .

Deux cas sont à distinguer :

$R_1 < R_2/e$ Apparition d'une zone ionisée, de rayon croissant, autour du conducteur central ; puis amorçage d'une étincelle.

Ou $e = 2.718$

$R_1 > R_2/e$ Amorçage d'une étincelle sans effet de couronne.

Correction de Peek pour la ligne coaxiale

$$U_C = E_{do} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \cdot R_1}} \right) R_1 \ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

E_{do} : champ disruptif standard.

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

K et m : facteurs de correction

III.4.6 Effet de couronne sur ligne monophasé

Pour une ligne monophasée, avec une distance D entre les conducteurs de rayon R, la valeur efficace de la tension d'apparition de l'effet de couronne est donnée par :

Correction de Peek pour la ligne monophasée

$$U_C = 2 E_{do} K m \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \cdot R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

III.4.7 Effet de couronne sur ligne triphasé

Pour une ligne triphasée symétrique dans laquelle les trois conducteurs sont disposés en triangle équilatéral, l'effet de couronne apparaît dès que les tensions simples atteignent la valeur :

Correction de Peek pour la ligne triphasée

$$U_C = E_{do} \frac{K m}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{0,03}{\sqrt{K \cdot R}} \right) R \ln \left(\frac{D}{R} \right)$$

III.4.8 Impact de couronne dans les réseaux

Les lignes électriques sont dimensionnées pour éviter l'effet de couronne. Celui-ci se produit toutefois dans différents cas:

- par temps pluvieux ou par brouillard. Les gouttes ou gouttelettes d'eau favorisent l'apparition d'aigrettes autour des conducteurs ;

Ce sont bien les gouttes qui produisent cet effet; l'humidité a normalement l'effet inverse, sauf quand elle produit de la condensation sur les conducteurs.

- lorsque les conducteurs ou les isolateurs de la ligne commencent à être pollués, comme cela finit forcément par arriver après un certain nombre d'années ;

- lorsqu'un conducteur ou un isolateur est devenu défectueux, à la suite d'une rupture mécanique localisée. Dans ce cas, les perturbations engendrées par l'effet de couronne peuvent servir à localiser le défaut.

III.4.9 Pertes dues à l'effet de couronne

En pratique les pertes varient fortement selon l'état de surface des conducteurs, qui lui-même dépend de facteurs climatiques, ainsi que du vieillissement des conducteurs.

Pour $U_S \geq 1,8 \times U_C$, les pertes de puissance active par phase, dues à l'effet de couronne, sont données par la formule de Peek :

$$P' = 2,41 \cdot 10^{-9} \frac{f [\text{Hz}] + 25}{K} \sqrt{\frac{R}{D}} (U_S - U_C)^2$$

P' : perte de puissance active par unité de longueur [W/m = kW/km]

f : fréquence du réseau

U_S : tensions simples

Pour $U_S < 1,8 \times U_C$, les pertes de puissance active par phase, dues à l'effet de couronne, sont données par la formule de Peterson :

$$P' = \frac{2.25 \cdot 10^{-16} E_{do} f U_S^2}{[\ln(D/R)]^2} \cdot F$$

Ou : F facteur dépend du rapport U_S / U_C :

U_S / U_C	1	1,2	1,4	1,6	1,8
F	0,05	0,08	0,3	1	3,5

Remarque

Les pertes dues à l'effet de couronne deviennent négligeables, par rapport aux pertes par effet Joule, pour les lignes de grandes longueurs.

III.4.10 Utilisation de l'effet de couronne

L'effet de couronne peut être indésirable autour des lignes à haute tension, ou au contraire mis à profit dans certaines applications :

CHAPITRE 3 : MAÎTRISE DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

1. Production d'ozone

- pour purifier : élimination des bactéries dans l'eau et dans l'air, oxydation des métaux lourds dans les rejets industriels.
- pour blanchir : aliments, papier, textiles...

2. Production d'ions

- pour (dé)charger : élimination des charges statiques, xérographie.
- pour séparer : analyse chimique, élimination de poussière...
- pour la santé : ioniseurs d'airs.

3. Générateur corona



CHAPITRE 4

LES SURTENSIONS

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

IV.1 Introduction

On qualifie la surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension de régime permanent et qui est susceptible d'endommager les éléments de circuits (lignes machines, transformateur, etc.....).

On distingue deux types de surtensions :

Transversales apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs.

Longitudinales ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur.

IV.2 origine des surtensions

Les surtensions peuvent avoir trois origines :

- Atmosphériques
- les surtensions d'origine électrostatique
- manœuvres sur le réseau (phénomènes transitoires)

IV.2.1 les surtensions atmosphériques

Elles sont dues à la chute de la foudre sur ou près d'une ligne électrique. Les surtensions de foudre se répartissent en trois types principaux:

- ✓ les décharges entre nuage et terre
- ✓ les décharges entre nuages
- ✓ les décharges à l'intérieur des nuages

IV.2.2 les surtensions d'origine électrostatique

On parle de décharge électrostatique lorsque un ou plusieurs corps isolants sont mis en relation galvanique avec un ou plusieurs corps isolants ou conducteurs.

La décharge électrostatique peut être provoquée par diverses causes dont:

- ✓ l'ionisation de l'air (effet de couronne)
- ✓ l'humidification de l'air
- ✓ l'utilisation de matières solides ou liquides partiellement conductrices
- ✓ l'arc

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

IV.2.3 les surtensions de manoeuvre

Les surtensions de manoeuvre proviennent essentiellement de l'enclenchement ou du déclenchement d'interrupteurs (relais, sectionneur, disjoncteur, fusibles, etc.). Les phénomènes physiques à l'origine de surtensions de manoeuvre sont:

- les résonances
- la ferrorésonances
- les coupures de courant capacitive ou inductive
- l'arrachement de courant
- les enclenchements
- les réflexions

IV.3 propagation des ondes dans les lignes à constantes réparties

Les phénomènes de propagation d'onde sur des lignes peuvent donner naissance à des régimes stationnaires et transitoires.

En présence d'une perturbation interne au système ou à une ligne les équations de propagation sont :

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = R' i(x) + L' \frac{\partial i(x)}{\partial t} \quad \left(\frac{V}{m}\right) \quad (3 - 1)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = G' u(x) + c' \frac{\partial u(x)}{\partial t} \quad \left(\frac{A}{m}\right) \quad (3 - 2)$$

OU

R' : La résistance linéique (Ω/Km)

L' : L'inductance linéique ($\frac{H}{Km}$)

C' : Capacité linéique (F/Km)

G' : Conductance linéique (S/Km)

En combinant ces deux équations on retrouve soit l'équation commune à u et i ou l'équation des télégraphistes de tension.

$$-\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} = R' G' u + (R' c' + L' G') \frac{\delta u}{\delta t} + L' c' \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad (3 - 3)$$

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

La solution de cette équation est complexe, dans ce cas si l'on néglige les pertes actives $R' = G' = 0$, l'équation de propagation devient :

$$-\frac{\delta^2 u}{\delta x^2} = L'c' \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \quad (3-4)$$

Cette équation admet comme solution de la forme :

$$u(x, t) = u_p(x - vt) + u_r(x + vt) \quad (3-5)$$

Avec

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{L'c'}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} \quad (3-6)$$

v : la vitesse de propagation

c_0 : la vitesse de la lumière ($c_0 = 3 \cdot 10^8$)

μ_r : la perméabilité relative

ϵ_r : la permittivité relative

$u_p(x - vt)$: est une onde progressive

$u_r(x + vt)$: est une onde rétrograde

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{c'}} : L' \text{ impédance d'onde}$$

La résolution du système d'équation donne pour le courant, en posant :

$$i(x, t) = \left(\frac{1}{Z}\right) \cdot [u_p(x - vt) + u_r(x + vt)] \quad (3-7)$$

IV.4 surtensions atmosphériques

IV.4.1 définition de la foudre

La foudre est définie comme une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La source la plus commune de la foudre est la séparation des charges dans les nuages d'orage : *les cumulo-nimbus*. Les orages les plus fréquents font suite à des fronts froids, à l'arrivée d'un de ceux-ci, la masse d'air froid s'infiltré sous l'air chaud et le soulève; ceci engendre des turbulences dans l'air chaud rejeté en altitude: ainsi se forment les nuages d'orage ou les cumulo-nimbus (figure 4.1).



Figure 4-1 : Eclaire de la foudre, image prise en Floride USA

IV.4.2 Catégories de coups de foudre

Bien que les décharges inter- et intra-nuages constituent plus de la moitié des décharges de foudre, ce sont surtout les décharges nuage-sol qui ont été l'objet d'études les plus approfondissements; ceci dû essentiellement aux raisons d'ordre pratique (cause de blessure et mort, incendies de forêts, et perturbations des systèmes électriques de transport), et aussi du fait qu'il est plus facile de mesurer les caractéristiques optiques et électriques des décharges nuage-sol.

Les décharges de foudre nuage-sol ont été subdivisées en quatre catégories. Ces catégories sont définies selon d'une part la direction, ascendante ou descendante, du *traceur* (*leader* en anglais) qui déclenche la décharge, et d'autre part le signe de la charge portée par le traceur, positive ou négative. La figure ci-dessous illustre les quatre catégories des décharges nuage-sol.

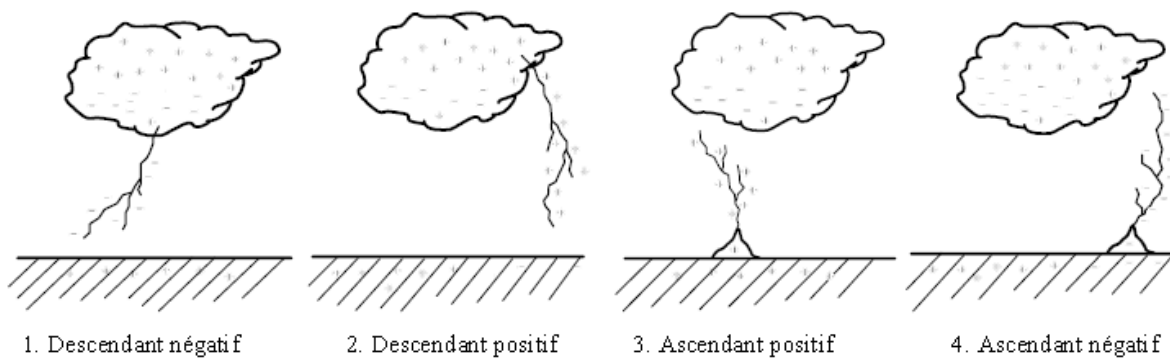


Figure 4-2 : Catégories de coups de foudre

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

Dans les régions tempérées, plus de 90% des coups de foudre nuage-sol sont de la catégorie 1, ce type de décharges, appelées décharges négatives, peuvent par conséquent être considérées comme la forme la plus commune des décharges nuage-sol. Cette forme de décharge est déclenchée par un traceur descendant chargé négativement. Les coups de foudre appartenant à la 3^{ème} catégorie sont aussi déclenchés par un traceur descendant, mais chargé positivement (décharge dite positive). Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol. Enfin, les décharges des catégories 2 et 4 qui sont déclenchées par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement aux sommets des montagnes ou des longues structures.

IV.4.3 Coups de foudre directs (sur conducteurs de phase)

Lorsque la foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde Z de valeur comprise entre 300 et 500 Ω (figure 4-4).

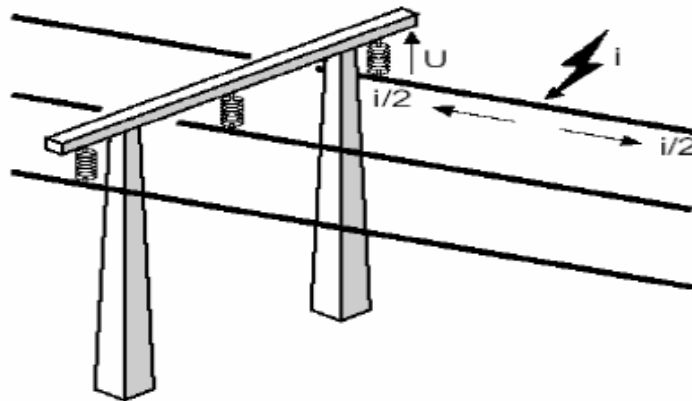


Figure 4-4 : Coup de foudre sur conducteur de phase et propagation bidirectionnelle

S'en suit une onde de tension associée :

$$U(t) = Z \frac{i(t)}{2} \quad (3 - 8)$$

Au niveau des pylônes la tension croît et se propage : n en onde pleine en atteignant sa valeur maximale $U_{max} = Z \frac{i_{max}}{2}$ (3 - 9)

IV.4.4 Coups de foudre (sur conducteurs de garde ou sur un pylône)

Dans ce cas l'écoulement du courant de foudre vers la terre provoque une élévation du potentiel des structures métalliques. La tête du pylône atteint un potentiel dépendant de son inductance propre L et de la résistance de terre R au choc (figure 4.5).

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (3 - 10)$$

La tension peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs. Il s'agit de l'amorçage en retour ou «backflashover». Une partie du courant se propage alors sur la ou les phases amorcées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un coup de foudre direct. En très haute tension, l'amorçage en retour est peu probable (niveau d'amorçage des isolateurs), c'est pourquoi l'installation de câbles de garde est intéressante (interruptions de service limitées). Mais en dessous de 90 kV, l'amorçage en retour se produit même pour de faibles valeurs de la résistance de terre ($< 15 \Omega$), d'où un intérêt limité (interruptions de service plus fréquentes).

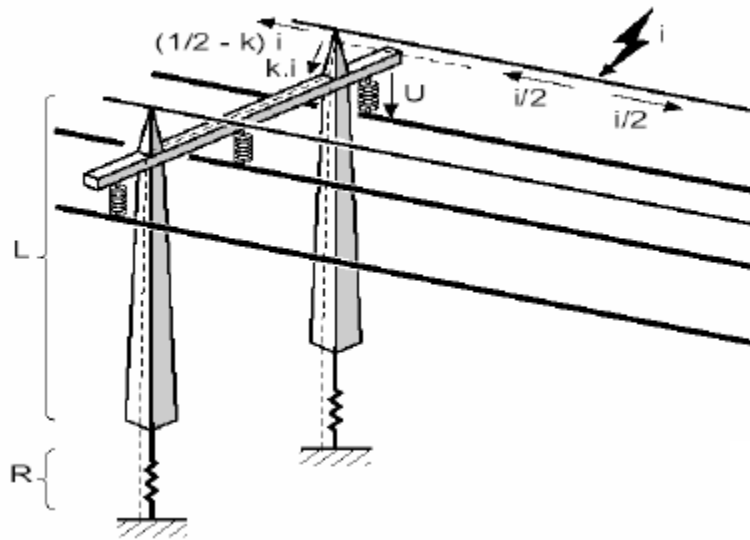


Figure 4-5: Coup de foudre sur conducteur garde et propagation bidirectionnelle

IV.5 dispositifs de protection

Les protections sont généralement dimensionnées en fonction des chocs de foudre descendants négatifs, qui sont de loin les plus fréquents. On distingue deux types de protection :

- les parafoudres (ou déchargeurs)
- les éclateurs à tige ou de coordination

IV.5.1 L'Eclateur

L'éclateur est dispositif de limitation des surtensions, comportant un intervalle d'éclatement d'air libre entre une électrode sous tension et une électrode à la terre.

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

Les éclateurs ont fait leurs preuves de façon satisfaisante sur des réseaux de tension inférieure ou égale à 345 KV dans les pays où l'activité orageuse est modérée. Le réglage de l'intervalle est souvent un compromis entre protection et continuité de service.

La tension d'amorçage et le retard à l'amorçage d'éclateur dépendent principalement de la distance entre électrode, de la polarité par leurs dispositions et les distances relatives aux parties voisines sous tensions et à la terre.

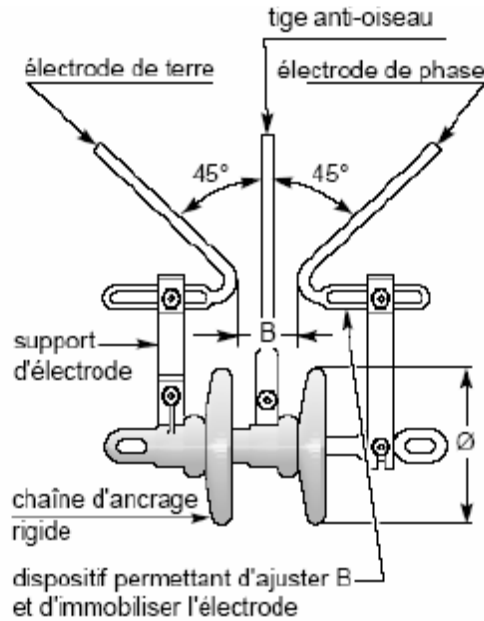


Figure 4.6 : Eclateur MT/HT à tige d'oiseau

Pour améliorer le fonctionnement des éclateurs soumis aux surtensions à front raide et leur donner une caractéristique tension-temp d'amorçage plus plate, on modifie la configuration des électrodes pointe-pointe.

L'écartement entre électrodes des éclateurs de protection est choisi de manière à obtenir un niveau de protection nettement inférieur au niveau de tenue de l'objet à protéger.

IV.5.1.1 Tension d'amorçage d'un éclateur

La tension d'amorçage d'un éclateur dépend :

- de la distance d'amorçage d (distance la plus courte dans l'air entre les extrémités des électrodes).
- des conditions atmosphériques (essentiellement de la densité de l'air).
- de la forme des électrodes et de leur effet de polarité (on recherche une forme telle que la dépendance de la polarité du choc soit aussi faible que possible).
- de leur situation par rapport à leur support et aux surfaces voisines conductrices et

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

Isolantes).

Le comportement de l'éclateur de choc est défini en onde normalisée, $1,2 \mu\text{s}/50\mu\text{s}$, pour la polarité qui donne la tension d'amorçage la plus élevée (en général c'est la polarité à pointe négative). Le comportement de l'éclateur aux surtensions de manœuvre est caractérisé par la valeur de la tension d'amorçage pour ces surtension. Cette valeur est intermédiaire entre la tension d'amorçage à fréquence industrielle et la tension d'amorçage au choc.

IV.5.1.2 Limite d'utilisation des éclateurs de protection

Lorsque un éclateur fonctionne d'une surtension et qu'un arc s'établit, cet arc se maintient fréquemment jusqu'à ce qu'il soit coupé par un des disjoncteurs de protection entourant le défaut ; Il en résulte un défaut à la terre dans le cas où le réseau a son neutre directement à la terre.

Les éclateurs augmentent la probabilité d'onde coupée près des bornes de l'appareil protégé, ce qui doit être pris en considération pour l'isolation des écoulements à haute tension.

La disposition géométrique des éclateurs de chaque phase doit être choisie de façon à limiter le risque de l'extension d'un arc à la phase voisine qui transformerait un défaut monophasé en défaut triphasé.

IV.5.2 Le Parafoudre

Le parafoudre est un dispositif installé dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions transitoires et la limitation de la durée et de l'amplitude des courants de suite dus à l'amorçage. Dans sa version classique, un parafoudre est constitué d'un éclateur sous atmosphère contrôlée, mis en série avec une ou plusieurs résistances non linéaires.



Figure 4-7 : image d'un poste de transformation HT avec parafoudre

Le parafoudre se distingue de l'éclateur, dans son fonctionnement, par les faits suivants :

- il travaille en atmosphère contrôlée, c'est-à-dire que sa tension n'est pratiquement pas influencée par les conditions atmosphériques.
- contrairement aux éclateurs, il ne produit pas de front raide lors de son amorçage, grâce à la présence de la résistance non linéaire.
- la résistance non linéaire placée en série avec l'éclateur limite le courant de suite, qui est coupé lors du prochain passage par zéro de la tension.

IV.5.2.1: Eléments de parafoudre à Oxyde de Zinc.

Pour les hautes tensions, il faut mettre plusieurs éléments en série, chaque élément comportant un petit éclateur en série avec la résistance non linéaire, en parallèle avec une grande résistance et avec une petite capacité qui ont pour mission d'assurer l'égalité des tensions sur tous les éclateurs.

Construction details

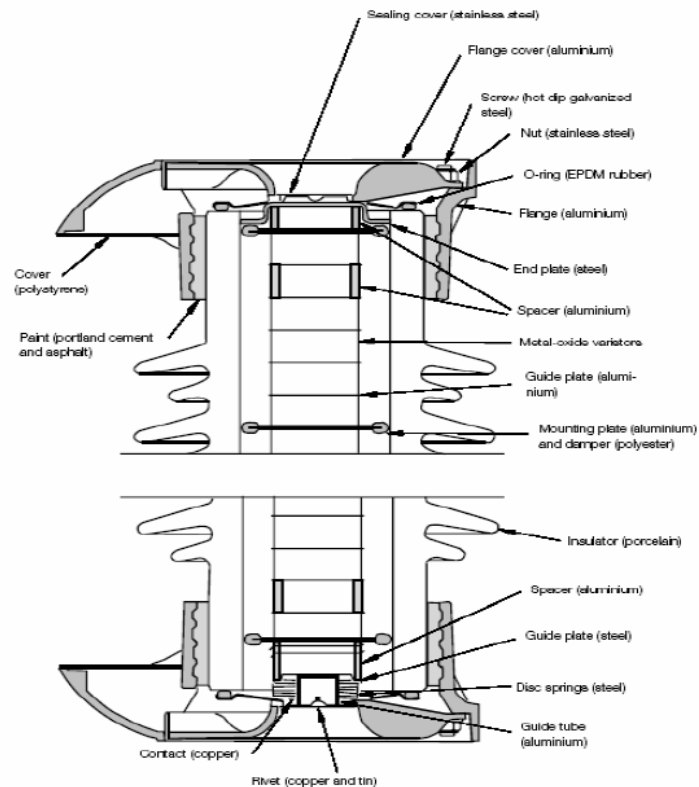


Figure4-8 :Structure interne d'un parafoudre à Oxide de Zinc

IV.5.2.2:Paramètres électriques de parafoudre

a) Tension normale du parafoudre

La tension normale d'un parafoudre est la valeur spécifiée maximum de la tension efficace à fréquence industrielle et elle ne présente aucun risque d'amorçage

b) Courant de décharge

Le courant de décharge est le courant écoulé par le parafoudre après un amorçage et provenant d'une onde de surtension propagée par une ligne.

c) Courant de suite

Le courant de suite d'un parafoudre est le courant débité par le réseau et écoulé par le parafoudre après le passage du courant de décharge.

d) Tension résiduelle d'un parafoudre

la tension résiduelle d'un parafoudre est la tension qui apparaît entre les bornes d'un parafoudre pendant le passage du courant de décharge.

e) Tension d'amorçage à fréquence industrielle d'un parafoudre

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

La tension d'amorçage à fréquence industrielle d'un parafoudre est la valeur efficace de la plus basse tension à fréquence industrielle qui, appliquée entre bornes d'un parafoudre, provoque l'amorçage du parafoudre.

f) Tension d'amorçage au choc d'un parafoudre

La tension d'amorçage au choc d'un parafoudre est la valeur la plus élevée de la tension qui est atteinte avant le passage du courant de décharge quand une onde de forme et de polarité données est appliquée entre les bornes d'un parafoudre.

IV .5.2.3: Choix d'un parafoudre

Le choix d'un parafoudre basé sur les paramètres suivants:

- * La tension maximale de régime permanent U_c .
- * Le courant de court-circuit admissible I_{cc} .
- * Le niveau de protection U_p .
- * Le courant maximal de décharge I_{max} .

IV.5. 2.4:Emplacement des éclateurs et des parafoudres

Le parafoudre installé aussi près que possible de l'appareil à protéger, soit monté le parafoudre sur la cuve du transformateur, soit relier la borne à haute tension et la borne de terre du parafoudre aux bornes correspondantes du transformateur par des connexions les plus courtes possible.

IV.6 Isolateurs des lignes aériennes hautes tension

IV.6.1 définition

Un isolateur est un élément composé de matériau isolant destiné à fixer et assurent l'isolation électrique entre les conducteurs et les pylônes des lignes aériennes.

IV.6.2 Propriété de l'isolateur et son fonctionnement

L'isolateur est formé par un isolant auquel sont fixés deux pièces métalliques M1 et M2.

Isolant : Verre, céramique, matériaux synthétiques. M1 se fixe au pylône ; M2 porte le conducteur (figure 4.10).

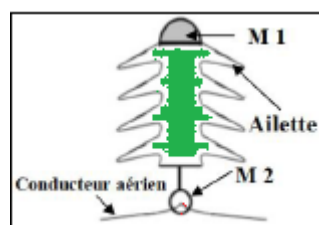


Figure 4.9 forme d'un isolateur

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Leur importance est liée directement au fait de :

CHAPITRE 4 : LES SURTENSIONS

- Réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes.
- Ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage) ;
- Ils assurent la transition entre l'isolation interne (huile, SF6) et l'isolation externe (air atmosphérique),
- ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateur, extrémités de câbles) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

IV.6.3. Caractéristiques d'un isolateur

Selon les valeurs spécifiées dans les normes d'essais d'isolateurs, nous pouvons mentionner (figure 4.10) :

Le pas P : C'est la distance séparant deux parties homologues de deux isolateurs consécutifs dans une chaîne. La détermination de ce paramètre nous permet donc de connaître la longueur d'une chaîne ayant un nombre donné d'isolateurs.

La ligne de fuite L_f : C'est la plus courte distance, suivant les contours de la surface extérieure des parties isolantes, mesurée entre les parties métalliques.

La ligne de contournement L_c : C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices.

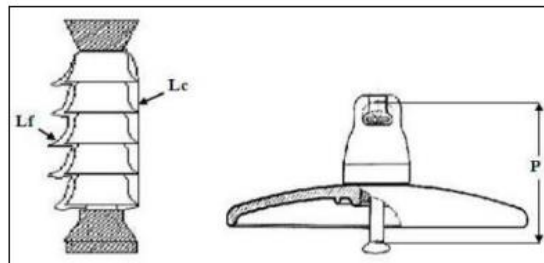


Figure 4.10 Les caractéristiques d'un isolateur

IV.6.4. Différent types d'isolateurs

Les principaux types d'isolateurs sont :

IV.6.4.1 Isolateurs rigides

Ce type d'isolateur permet d'obtenir une liaison rigide entre le support et le câble. Il est constitué d'un ou plusieurs isolateurs encastrés et scellés les uns dans les autres (figure 4.11).

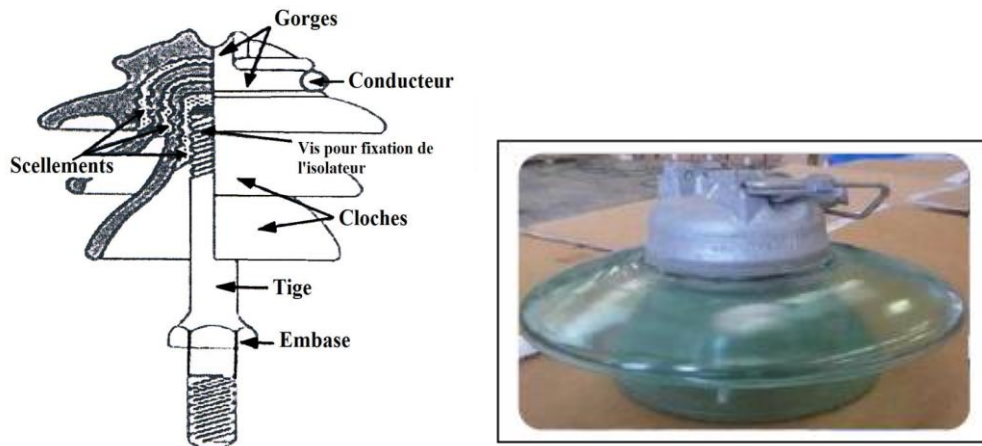


Figure 4.11 .isolateur rigide

IV.6.4.2 Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne

Ils sont constitués par le matériau isolant et d'une pièce métallique qui sert à réaliser la liaison entre deux isolateurs et à donner une certaine flexibilité à la chaîne d'isolateurs (figure 4.12).

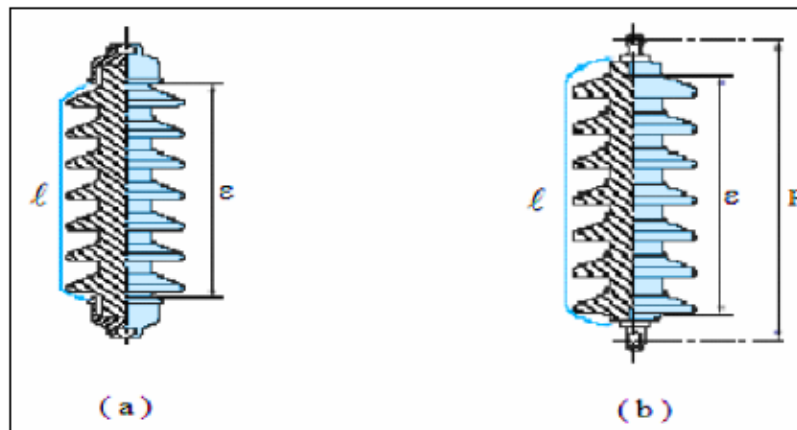


Figure 4. 12 isolateur suspendus ou éléments de chaîne

IV.6.4.3 Isolateur capot et tige

Élément de chaîne constitué d'un capot, d'une partie isolante en forme de jupe et d'une tige (figure 4.13).

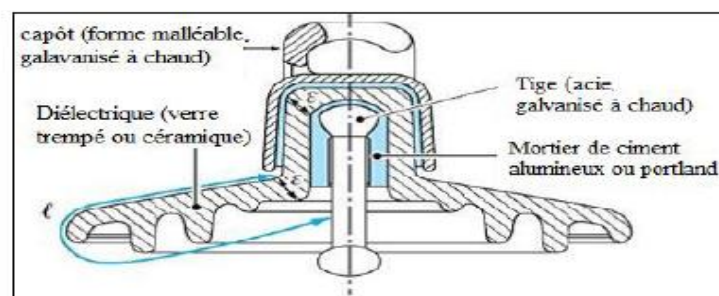


Figure 4.13 isolateur capot et tige



CHAPITRE 5
LES GENERATEURS DE LA HAUTE
TENSION

V. 1 .Introduction

Les générateurs de haute tension sont utilisés dans les laboratoires de recherches scientifiques et d'essais, pour effectuer des essais diélectriques sur les isolants, les appareils mais aussi les systèmes, tout ceci ce fait en simulant les surtensions temporaires pouvant apparaître dans les réseaux électriques. Cependant, et ceci par mesure de sécurité, les tensions d'essai utilisées sont bien entendu supérieures à la tension de service de l'équipement testé.

Il y a trois types de tensions conventionnelles :

- Tension alternative
- Tension continue
- Tension de choc

En distingue quatre générateurs de haute tension :

- Générateurs électrostatiques
- Générateurs de Haute Tension Alternative et continue
- Générateurs de Haute Tension Transitoire
- Générateurs de Haute Tension de choc

V.2. Générateurs électrostatiques

Le générateur électrostatique est un dispositif qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrostatique emmagasinée dans un milieu diélectrique. On distingue différent type de générateurs électrostatique.

V.2.1 Machines à triboélectricité

C'est une machine qui est composé d'une sphère ou un cylindre de matériau isolant est mis en rotation et frotté à l'aide d'un coussinet également isolant, mais formé d'un matériau différent (figure5.1).



Figure 5.1 Machines à triboélectricité

V.2.2 Électrophore de Volta

Le principe de fonctionnement de cette machine combine le principe du frottement à celui de la charge par influence (figure 5.2).

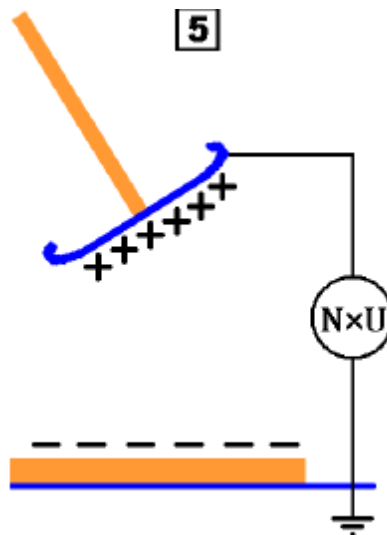


Figure 5.2 électrophore de volta

V.2.3 Machine de Wimshurst

Ce dispositif est équipé de deux larges disques constitués de matériaux isolants et recouverts de secteurs métalliques. Les deux disques tournent en sens opposé l'un par rapport à l'autre dans un plan vertical. Cette machine permet d'atteindre 100 kV, avec un courant de l'ordre du microampère (figure 5.3).



Figure5.3 machine de Wimshurst

V.2.4 Générateur Van de Graaff

Le générateur de Van de Graaff est quant à lui constitué d'une courroie en caoutchouc ou en tissu isolant et qui fait fonction de transporteur de charges électriques. Son mouvement est assuré par deux poulies cylindriques. L'une d'entre elles, en Téflon ou en Nylon, est dans la sphère métallique creuse. La sphère se trouve au sommet d'une colonne isolante qui contient la courroie. À la base du dispositif se trouve le moteur qui actionne la poulie motrice qui peut être en métal ou tournée dans un matériau isolant différent de celui de l'autre poulie (figure 5.4).

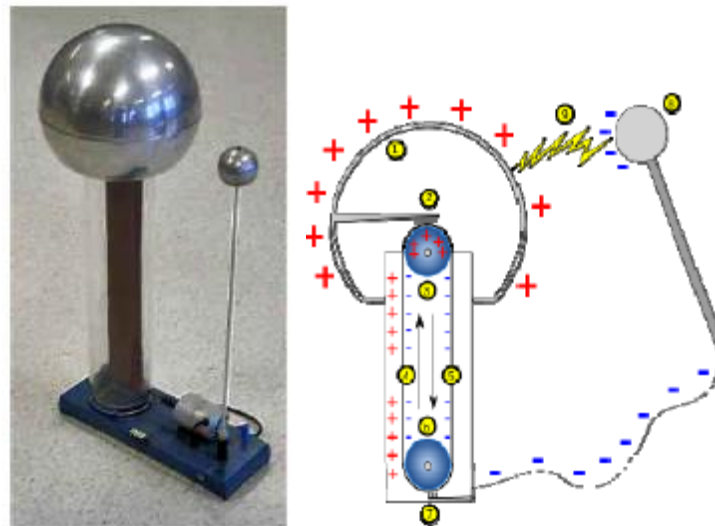


Figure 5.4 Générateur Van de Graff

V.2.5 Générateur de Felici

Le générateur de Felici ce défini comme une variante de la machine de Van de Graff qui est bien adaptée à la production de tension de 50 kV à 1 MV, avec des intensités qui peuvent

CHAPITRE 5 : LES GENERATEURS DE LA HAUTE TENSION

aller jusqu'à 50 mA. La courroie est remplacée par un rotor isolant à parois minces tournant à grande vitesse autour d'un stator cylindrique légèrement conducteur (figure5.5).

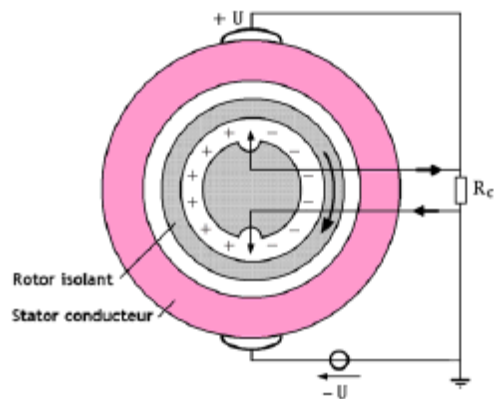


Figure5.5 Générateur de Felici

V.3. Générateurs de tension alternative

Les générateurs de haute tension alternative à fréquence industrielle, situés entre quelques Hz et 1kHz, sont des transformateurs de puissance, de potentiel, d'essai ou de transformateurs à résonance série.

- Les transformateurs de puissance monophasés ou triphasés, élévateur de tension ou abaisseur sont utilisés pour l'alimentation des réseaux électriques.
 - transformateur de potentiel (abaisseur de tension) sont pour leurs part, utilisés Pour la mesure des hautes tensions (surveillance de la tension dans les réseaux).
 - les transformateurs d'essai monophasés Haute tension mais faible puissance sont quant à eux, utilisés pour les essais en laboratoire
 - les transformateurs à résonance série sont utilisés pour les essais à l'extérieur.
- Les essais à haute tension alternative
 - L'alimentation des redresseurs à courant continu, des générateurs à circuit oscillant et des générateurs de choc
 - L'alimentation des tubes d'éclairage à gaz rare (néon, argon).

V.3.1 transformateurs de puissance

Pour les transformateurs de puissance il existe

1. Transformateurs immergés à 3 colonnes dont la tension peut dépasser le MV quant à la puissance, elle abouti jusqu'à plus du GVA pour le Poids, il peut aller jusqu'à 600 tonnes. Il est conçu avec une centaine de tonnes d'huile (figure 5.6).

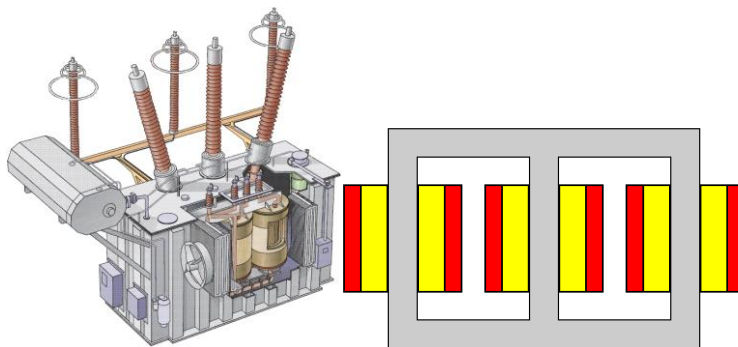


Figure 5.6 Transformateurs de puissances immergées à 3 colonnes

2. Transformateurs immergés à 5 colonnes ou blindés sont pour leurs part plus compacts, résistent également plus aux contraintes mécaniques et supportent mieux les courts-circuits que les transformateurs à 3 colonnes. Mais ils sont coûteux (figure5.7)

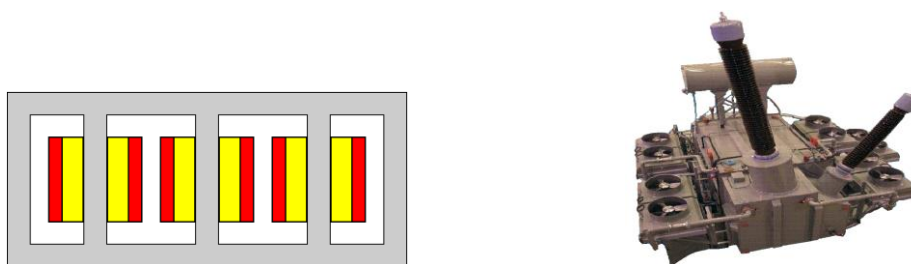


Figure 5.7 Transformateurs immergés à 5 colonnes ou cuirassés

1. Transformateur secs sans huile isolé par la résine époxy son avantages est d'être plus léger, il n'engendre pas de risque de pollution ainsi que pas de risque d'incendie. Sa

CHAPITRE 5 : LES GENERATEURS DE LA HAUTE TENSION

Tension peut aller jusqu'à environ 50 kV et sa puissance jusqu'à environ 20 MVA (figure5.8).

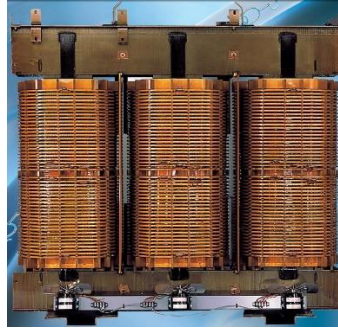


Figure 5.8 Transformateur secs

V.3.2 transformateur de potentiel

Un transformateur de potentiel ou de tension est un transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire qui est pratiquement proportionnelle à la tension primaire est déphasée par rapport à celle-ci d'un angle voisin de zéro.

Il est utilisé pour la mesure de fortes tensions électriques. Ce dernier, sert à faire l'adaptation entre la tension élevée d'un réseau électrique HTA ou HTB (jusqu'à quelques centaines de kilovolts) et l'appareil de mesure (voltmètre, ou wattmètre par exemple) ou bien le relais de protection, qui sont prévus pour mesurer des tensions de l'ordre de la centaine de volts (figure5.9).



Figure 5.9 transformateur de potentiel

V3.3 les transformateurs d'essai

Les transformateurs d'essai (figure 5.10) sont spécialement conçus pour atteindre de très hautes tensions alternatives. Ils servent de source de tension dans les laboratoires de haute-tension, où est testé le matériel électrique. Ils permettent de mesurer la qualité de l'isolation électrique, d'essai qui sont habituellement monophasés et de faible puissance. En général, les transformateurs d'essai comportent plusieurs enroulements primaires ou/et secondaires. Ceci offre une certaine souplesse pour s'accorder à différentes spécificités des essais à réaliser. Il est plus intéressant de rapporter les grandeurs au secondaire, car ce qui importe est d'estimer le comportement pour une charge particulière (figure 5.11).



Figure 5.10 transformateur d'essai

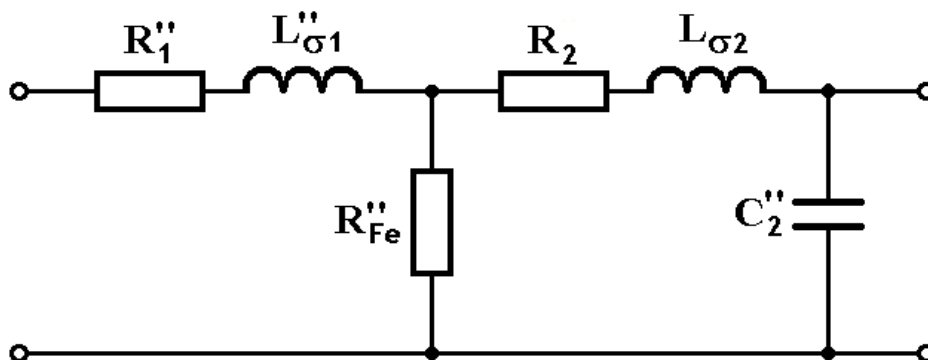


Figure 5.11 schéma équivalent de transfo d'essai ramené au secondaire

V. 3.4 les transformateurs à résonance

Lorsqu'on veut obtenir, sur une capacitive d'essai à haute tension (isolation) une tension U_c de plusieurs ordres de grandeur supérieure à la tension de sortie U_s d'un transformateur de haute tension, on peut raccorder au circuit :

- Résonnant série
- Résonnant parallèle

V.3.4.1 les transformateurs à résonance série

Les générateurs à circuit résonnant série (figure 5.12) sont une inductance série L_s qui est rajoutée en série avec le transformateur et la charge C et qui doit calculée de façon à être accordée avec C pour la fréquence de la tension d'alimentation U_p principalement utilisés pour les tests de câbles sur site.

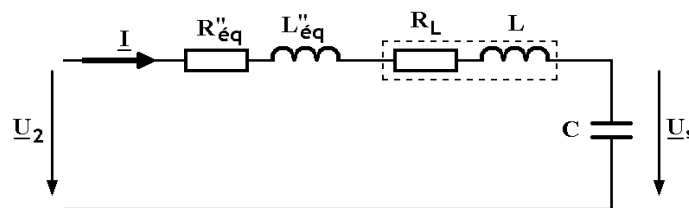


Figure 5.12 générateur de haute tension alternative à circuit résonnant série

La tension de sortie du transformateur est alors multipliée par un facteur d'amplification égal au facteur de qualité Q de l'inductance L_{eq} série (figure 5.13).

$$\text{D'où } Q = \frac{U_c}{U_p} = \frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}} = \alpha$$

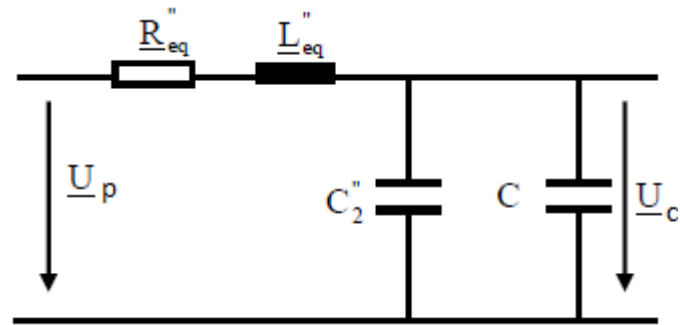


Figure 5.13 circuit résonant série

V.3.4.les transformateurs à résonance parallèle

Les transformateurs à circuit résonant parallèle contiennent une inductance L_p rajoutée en parallèle avec la charge C (figure 5.14). Ces circuits ont l'avantage de diminuer le courant du transformateur HT.

Le facteur de réduction de courant est défini par : $\beta = \frac{R}{\omega L} = Q$

Le courant I sera donc de 5 à 200 fois plus faible que le courant I_c traversant l'objet C en essai.

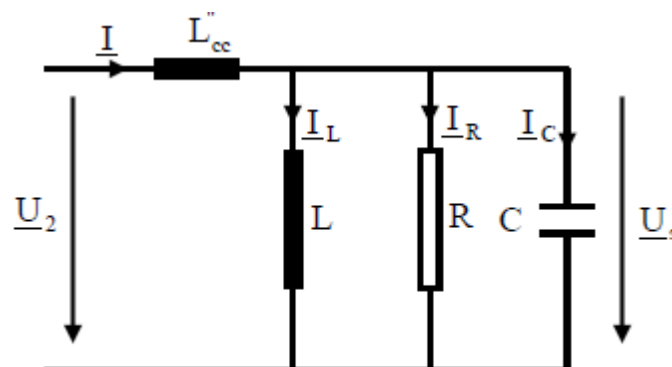


Figure 5.14 circuità résonance parallèle

V.4 Générateurs de hautes tensions continues

Les générateurs de hautes tensions continues peuvent fonctionner sur le principe électrostatique permettant d'atteindre des tensions de plusieurs méga volts, mais avec des courants secondaires de l'ordre du milliampère ou électrodynamique permettant d'atteindre des tensions de l'ordre du méga volt avec des courants secondaires de l'ordre de quelques ampères. Ils peuvent être de type machine tournant à courant continu ou redresseurs statique .ils sont utilisées dans plusieurs applications, telles que les essais de haute tension continu, dans les appareils de mesure d'isolement, pour la microscopie électronique, les générateurs de rayons X, les accélérateurs de particules....

V.4.1 les redresseurs

V.4.1.1 Redresseurs Simple alternance

La redresseuse simple alternance le plus simple des générateurs à haute tension continu (figure 5.15)

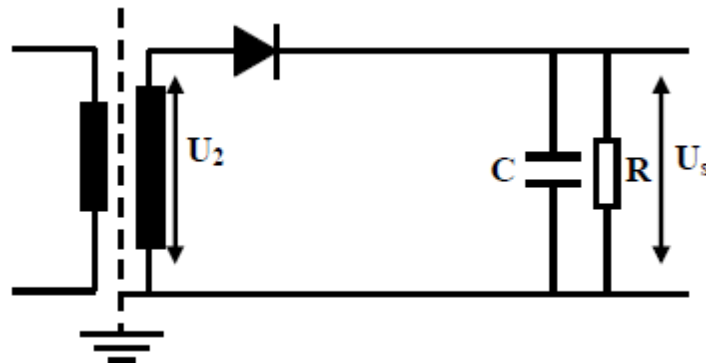


Figure5.15 redresseur simple alternance

Lors du fonctionnement du redresseur, on obtient les formes présentées par (figures5.16)

CHAPITRE 5 : LES GENERATEURS DE LA HAUTE TENSION

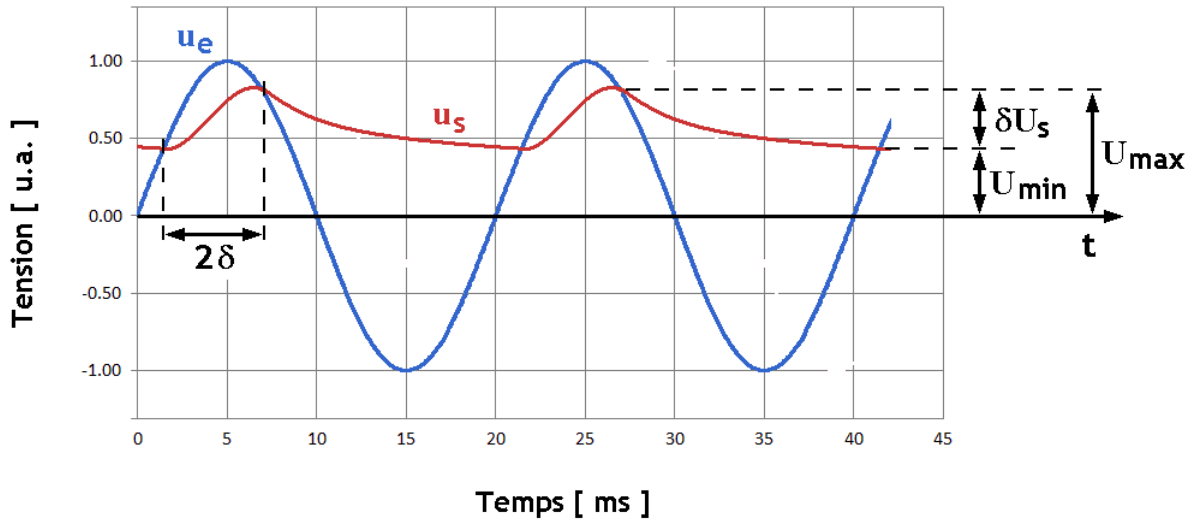


Figure 5.16 : Formes de la haute tension redressée

La Tension moyenne $\bar{U}_s = \frac{U_{min} + U_{max}}{2}$

Profondeur d'ondulation : δU_s

Amplitude d'ondulation : $\delta U_s / 2$

V.4.1.2 Redresseurs double alternance

Contrairement au redresseur a simple alternance, l'alternance négative est également redressée. Il n'y a pas de très grande différence entre montages redresseurs simple et double alternance, en présence d'une capacité de lissage (figure 5.17).

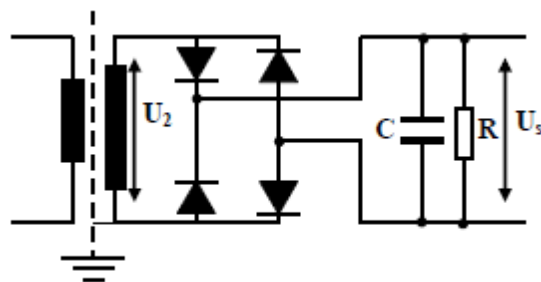


Figure 5.17 redresseur à double alternance

CHAPITRE 5 : LES GENERATEURS DE LA HAUTE TENSION

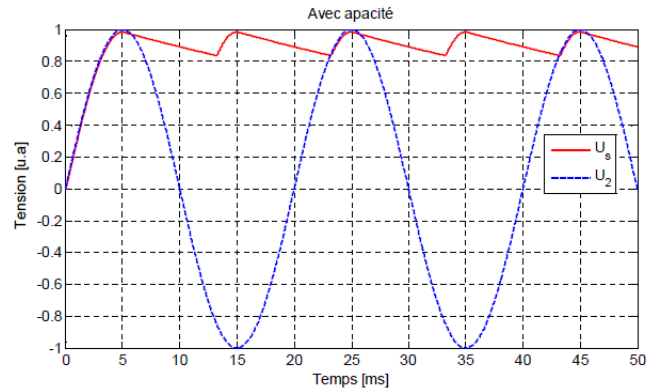


Figure 5.18 tension du redresseur à double alternance

V4.2 les doubleurs

Les doubleurs de tension permettant d'obtenir une tension de sortie égale à deux fois la tension d'entrée. Il y a plusieurs types de doubleurs de tension, mais le principe est le même ; Le plus courant est le doubleur de SCHENKEL et doubleur de LATOUR.

V.4.2.1 doubleur de LATOUR

Le doubleur de LATOUR (figure 5.19), est basé sur deux condensateurs en cascade dont se charge au cours de l'alternance positive de la tension U_2 , à la valeur crête, et le deuxième se charge au cours de l'alternance négative $U_c = 2\sqrt{2}U_2$

L'inconvénient de doubleur de LATOUR est de nécessiter un transformateur haute tension dont le secondaire n'a pas de point à la terre. Mais, il nécessite le recours à un transformateur haute tension dont le secondaire comporte deux bornes isolées à la terre.

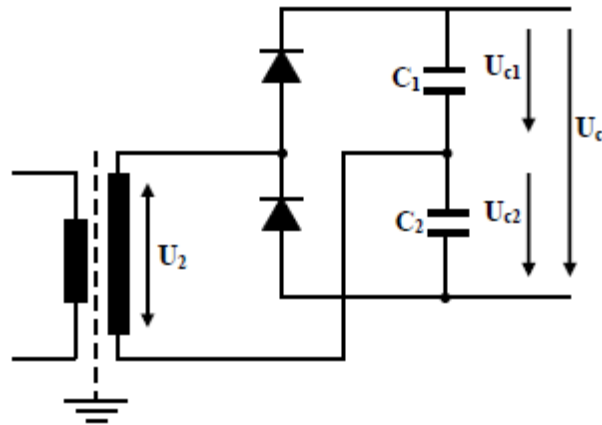


Figure 5.19 doubleur de LATOUR

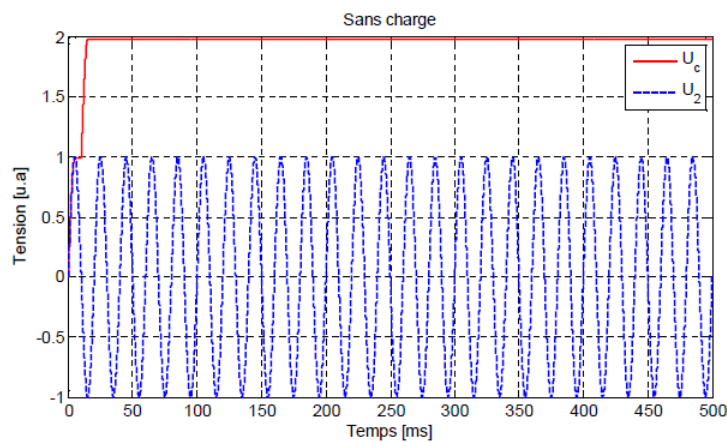


Figure.5.20 Formes de la HT continue de Doubleur de LATOUR sans charge

V.4.2.2 doubleur de SCHENKEL

Le doubleur de SCHENKEL a le même principe de fonctionnement que celui du doubleur de LATOUR. Pendant l'alternance négative le condensateur C1 se charge à la tension V_{max} , a l'alternance suivante cette tension qui s'ajoute a la tension du transformateur donne une tension aux bornes de C égale à $2 V_{max}$. Cependant, son avantage est de recourir à un transformateur haute tension avec un point à la terre (figure 5.21)

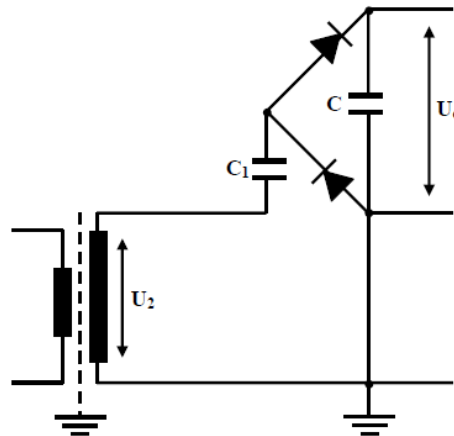


Figure 5.21 doubleur de SCHENKEL

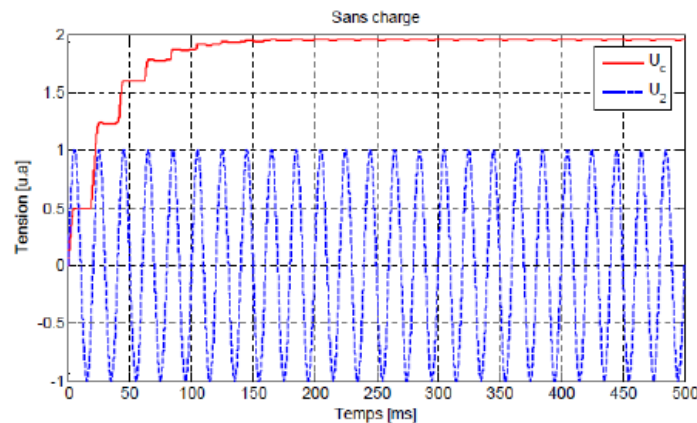


Figure.5.21 Formes de la HT continue de Doubleur de SCHENKEL sans charge

V.5 les générateurs de choc

Le générateur de choc destiné à produire une impulsion ou une haute tension transitoire apériodique, caractérisée par une montée rapide de la tension suivie généralement d'une décroissance plus lente qui peut être défini par la différence de deux exponentielles (figure 5.22).

$$U = U_0 \left[e^{\left(-\frac{t}{T_1}\right)} - e^{\left(-\frac{t}{T_2}\right)} \right]$$

Où T1 et T2 sont les constantes de temps de front et de queue, respectivement :

$$T_1 = 1.67(T_{90} - T_{30})$$

$$T_2 = T_{50}$$

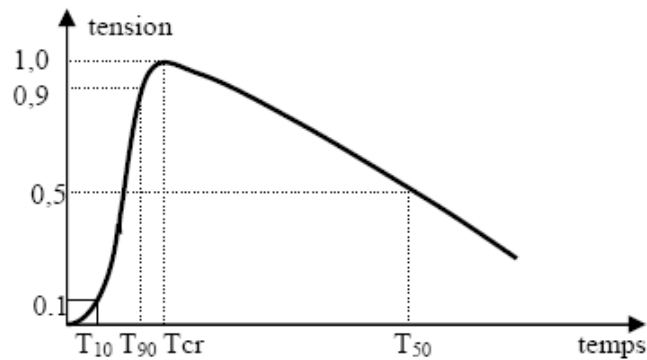


Figure 5.22 tension de choc

Le générateur de choc Largement utilise c'est le générateur de Marx mais Avant de présenter le générateur de Marx, il convient de présenter le générateur de choc à un étage.

V.5.1 Générateur de choc à un étage

Le générateur de choc à un étage comporte un redresseur dont la capacité de lissage se décharge dans un circuit résistif, à travers un éclateur (figure 5.23).

Le générateur de choc à un étage fonctionne, dans une première phase ou Le condensateur C_1 se charge par l'intermédiaire d'un transformateur, associée à la diode D qui empêche la décharge du condensateur quand la tension alternative est négative. La résistance R_a limite la vitesse de charge ; sa constante de temps est égale à $R_a \times C_1$. Lorsque la tension disruptive, V_0 , de l'éclateur E est atteinte, un arc électrique apparaît entre ses deux électrodes. C_1 se décharge brusquement et charge le condensateur C_2 à travers la résistance de front R_1 . R_2 étant plus grande que R_1 , son effet est limité au début de la décharge. Plus le condensateur C_2 est chargé, plus le courant traversant R_2 est important.

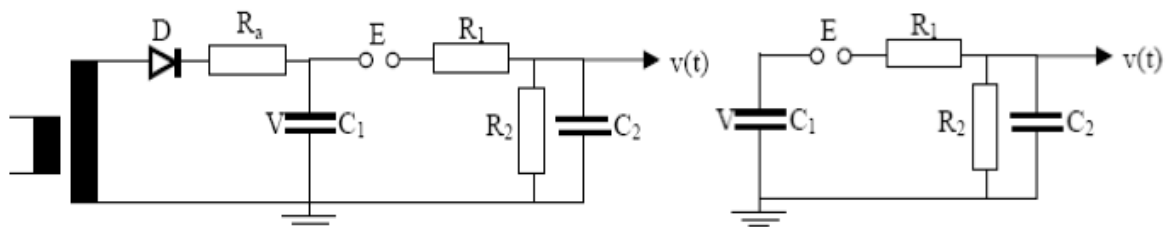


Figure 5.23 Générateur de choc à un étage

V.5.2 Générateur de choc à plusieurs étages (Générateur de Marx)

Le générateur de choc de Marx C'est une cascade de générateur de choc à un étage, qui permet d'obtenir des tensions de choc de sortie plus importantes. Il a été inventé en 1924, par l'ingénieur allemand Erwin Otto Marx il est largement utilisé de nos jours (figure 5.24).

Le générateur de Marx fonctionne en deux phases :

- ✓ Durant la première phase : Charge en parallèle des capacités C de chaque étage à travers les résistances de charge R_{ch} , R_1 et R_2 jusqu'à la tension d'amorçage des éclateurs à sphères.
- ✓ Lors de la deuxième phase, les condensateurs C se déchargent en série, par l'intermédiaire des éclateurs.

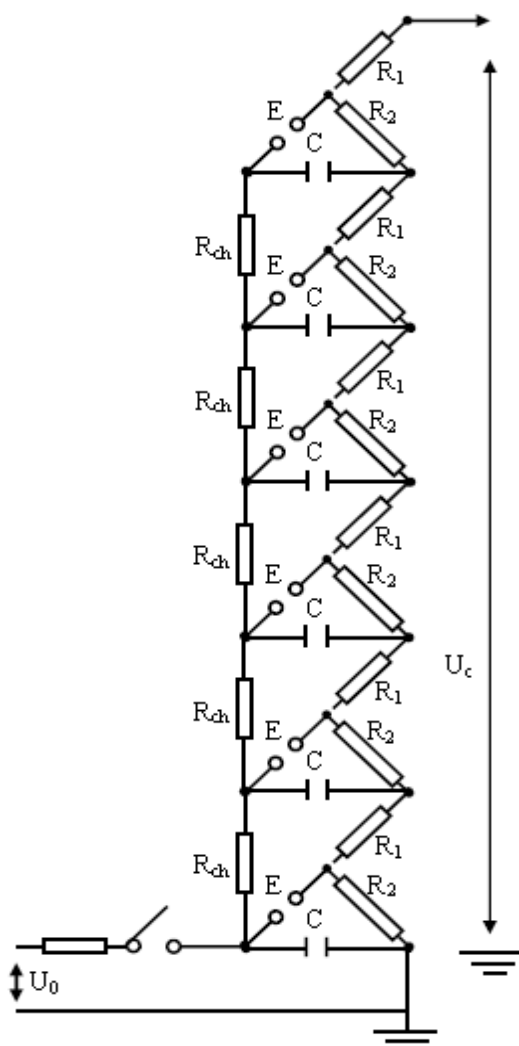


Figure 5.24 Générateur de Marx à 6 étage



CHAPITRE 6
MESURE DE HAUTE TENSION EN
LABORATOIRE

VI.1 Introduction

Un système de mesure en haute tension est défini comme un ensemble complet de dispositifs utilisable et ceci afin réaliser une mesure de haute tension continue, alternative ou de choc, ou encore de courant impulsionnel. Toute chaîne de mesure comporte en générale :

- Une saisie de la mesure
- Un codage de l'information
- Une transmission de l'information
- Une réception permettant l'interprétation de l'information
- Un décodage de l'information
- Un stockage de l'information permettant une utilisation ultérieure
-

VI.2 . Mesure des hautes Tensions continues

VI.2.1 L'Electromètre

L'Electromètre est connu comme le premier instrument utilisé en physique pour la mesure des hautes tensions. Il est basé sur la loi de Coulomb qui entraîne la répulsion de fines surfaces métalliques (feuilles d'or ou d'argent) chargées d'électricité de même signe.

On calibre l'électromètre, en tension, en fonction de l'angle de déviation α de la feuille métallique par rapport à la verticale. Cet appareil de laboratoire fragile reste néanmoins très peu précis, il est donc plutôt utilisé à des fins qualitatives que quantitatives (figure 6.1).

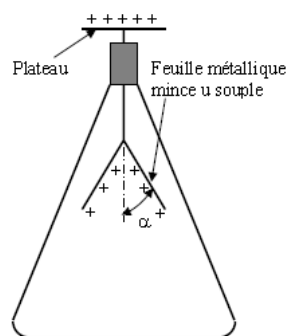


Figure 6.1 L'Electromètre

VI. 2 .2 Voltmètre électrostatique

Le voltmètre électrostatique est quant à lui un condensateur dont une des plaques est mobile. Lorsque le condensateur est chargé, les plaques s'attirent mutuellement et le mouvement de la

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

plaque mobile est agrandi et visualisé sur une échelle. Cet appareil permet la mesure de tensions élevés qui se situent entre 50Vet 1M sous faible charge (figure 6.2).

L'avantage essentiel du voltmètre électrostatique est sa consommation pratiquement nulle en tension continue. Mais, cet appareil est sensible aux champs électriques parasites.

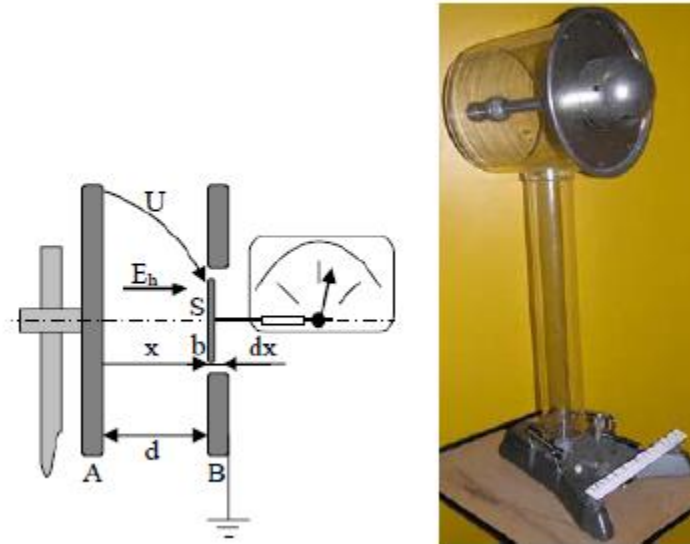


Figure 6.2 Voltmètre électrostatique

VI.2.3 Galvanomètre

La mesure de la tension est effectuée par la dérivation d'un courant I à travers une grande résistance de mesure R ($R \geq 1M$) (figure6.3).

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 encore ceux produits par effet couronne.

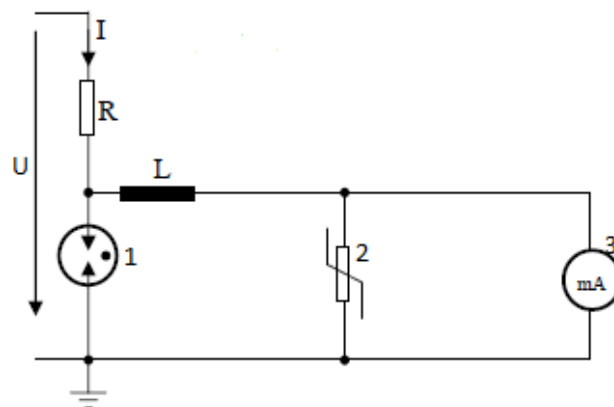


Figure 6.3 circuit de mesure galvanométrique

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

- 1 : limiteur de surtension à gaz
- 2 : limiteur de surtension à semi-conducteur
- 3 : milliampèremètre

VI.2.4 Diviseur résistif

Les hautes tensions continues sont mesurées à l'aide de diviseurs résistifs. Mais des problèmes produisent dans le dimensionnement d'un diviseur résistif destiné à la mesure des hautes tensions sont l'échauffement des résistances et la résistance parasite des supports. Donc pour protéger le diviseur, en cas d'ouverture accidentelle de la branche basse tension du diviseur il est nécessaire de mettre un éclateur (figure6.4).

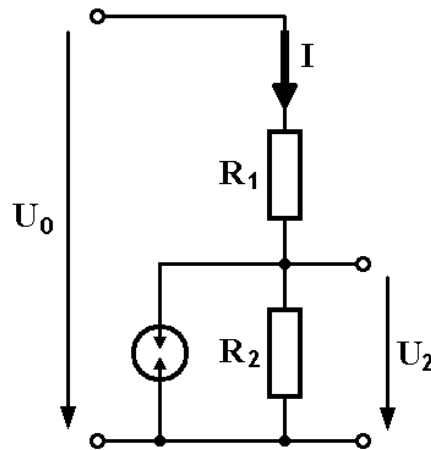


Figure 6.4 diviseur résistive

VI. 3 Mesure de HT alternatives

VI .3.1 Mesure galvanométrique

Les mesures galvanométriques peuvent être effectuées comme dans le cas de la haute tension continue en remplaçant la résistance R par unecapacité C. par ce moyen on mesure la valeur efficace de la tension $U = \frac{I}{c\omega}$ (figure 6.5).

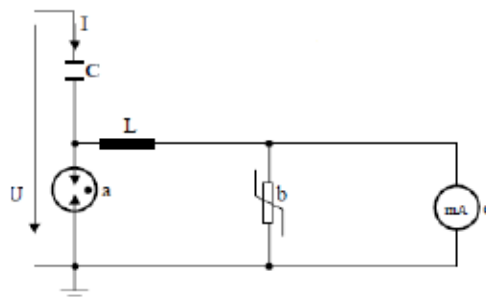


Figure 6.5 mesure galvanomètre

VI.3.2 diviseur capacitif

Les hautes tensions alternatives peuvent être mesurées à l'aide de diviseurs capacitifs à des fins de 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 . On néglige également les capacités parasites contre l'alimentation haute tension pour simplifier les calculs. L'avantage du diviseur capacitif sa consommation minimale d'énergie active (figure 6.6).

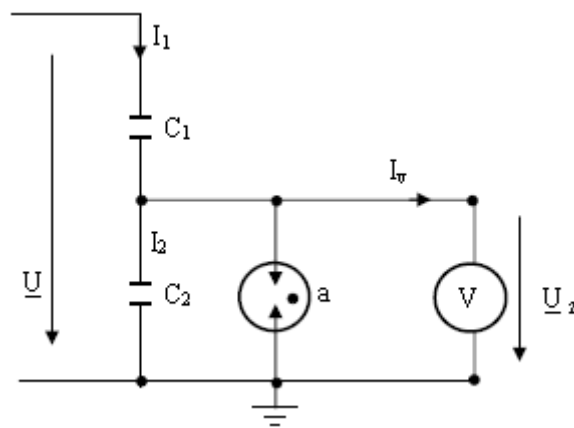


Figure 6.6 diviseur capacitif

VI .3.4 Transformateur de tension

Les transformateurs de tension sont généralement monophasés transformateur de mesure dans lequel la tension secondaire est pratiquement proportionnelle à la tension primaire mais déphasée par rapport à celle-ci d'un angle approximativement nul .Il donne des mesures très précises, et son utilisés à surveiller la valeur de la tension d'un réseau, et ceci pour pouvoir procéder éventuellement aux ajustements nécessaires. Dans certains cas, le transformateur de tension peut aussi servir à la protection en cas de défaut dans le réseau. La mesure obtenue au secondaire du transformateur sera alors transmise à un système de relais de protection. . Il est cependant rarement utilisé dans les laboratoires (figure 6.7).

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

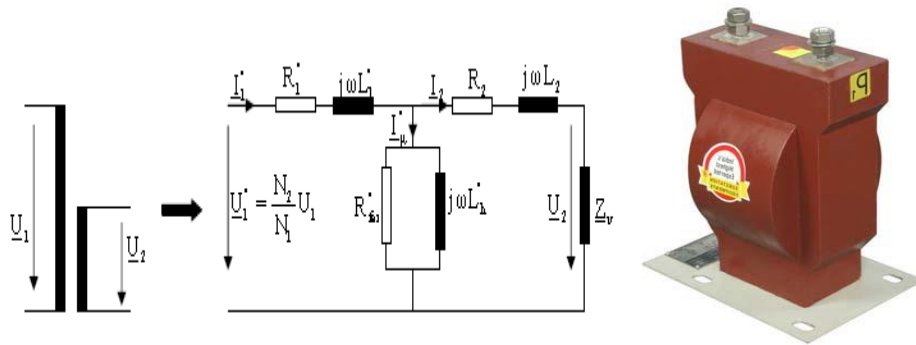


Figure 6.7 schéma équivalent et réel du transformateur de tension

VI .3.5 Transformateur de tension capacitif

Le transformateur de tension capacitif, utilisé dans les réseaux électriques, est composé d'un diviseur capacitif et un transformateur de tension (figure 6.8).

Le primaire du transformateur et la branche basse tension du diviseur forme un circuit résonant.

Ce dispositif présente plusieurs avantages :

1. la résonance permet d'obtenir un courant plus important à la sortie, d'où une meilleur immunité aux perturbations pour des mesures transmises à grande distance.
2. le circuit résonant fonctionne comme un filtre qui élimine les tensions transitoires.
3. construction économique jusqu'à des niveaux de tension très élevés (MV).

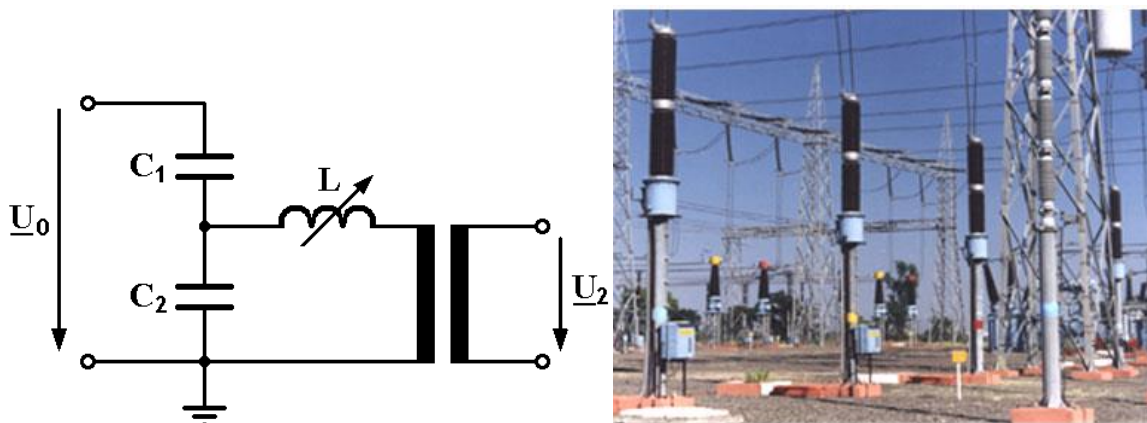


Figure 6.8 transformateur de tension capacitif

VI.4 Mesure des hautes Tensions de choc

VI.4.1 Diviseur de choc purement résistif

Dans le cas de mesure des tensions de choc, il est nécessaire d'accorder le câble coaxial à la sortie avec une résistance R égale à l'impédance caractéristique Z du câble coaxial afin d'éviter les réflexions parasites ($Z = 10 \text{ à } 100 \Omega$). R est parfois déjà incluse dans l'appareil de mesure.

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

De même la résistance R_2 doit si possible être égale à l'impédance caractéristique Z du câble afin d'éviter les réflexions parasites (figure6.8).

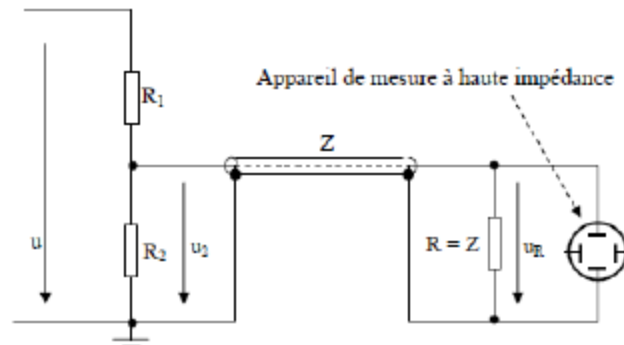


Figure 6.8 Diviseur de choc purement résistif

VI.4.2 Diviseur de choc capacitif

Le schéma de principe d'un diviseur purement capacitif, c'est-à-dire simplifié en négligeant la présence des éléments parasites (figure6.9).

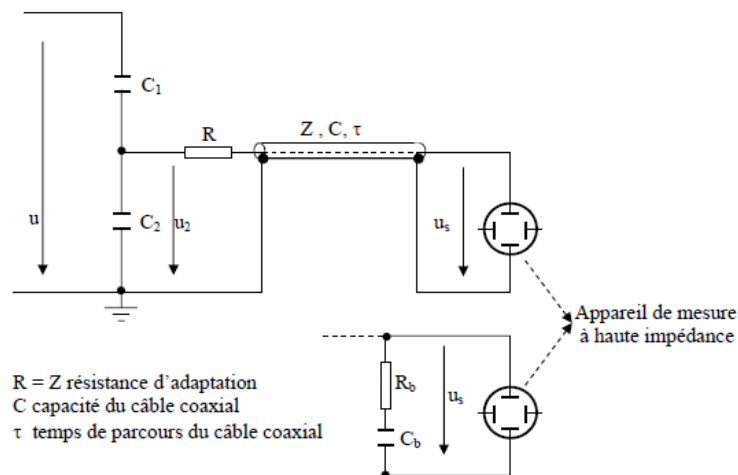


Figure 6.9 Diviseur de choc capacitif

VI.5 Mesure des courants sous Haute Tension

VI.5.1 les transformateurs de courant

Les transformateurs de courant ou connu également comme pinces ampèremétriques sont utilisé pour mesurer les courants dans les réseaux électriques. On y trouve le courant secondaire est pratiquement proportionnel au courant primaire déphasé par rapport à celui-ci d'un angle approximativement nul (figure6.10).

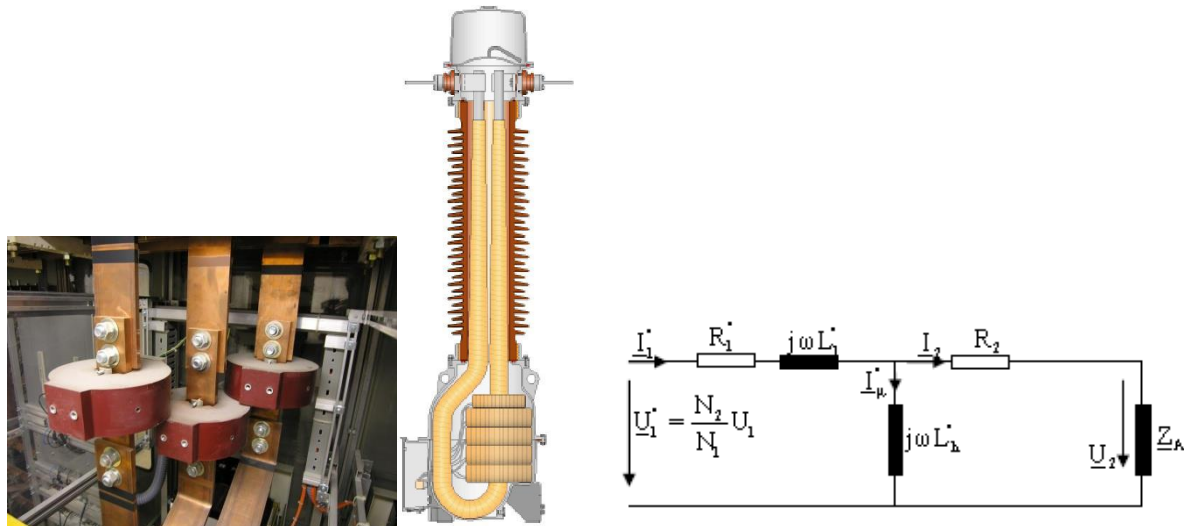


Figure 6.10 transformateur de courant

VI.5.2 Les transducteurs magnéto-optiques

Les transducteurs magnéto-optiques (*MOCT : Magneto-OpticCurrent Transformer*)

fonctionnent selon l'effet Faraday (figure 5.11) ses avantages.

- Excellent précision, de quelques ampères à plusieurs kA.
- Linéarité parfaite (pas de noyau magnétique).
- Pas de secondaire → sécurité de l'utilisateur
- Encombrement et poids réduits.

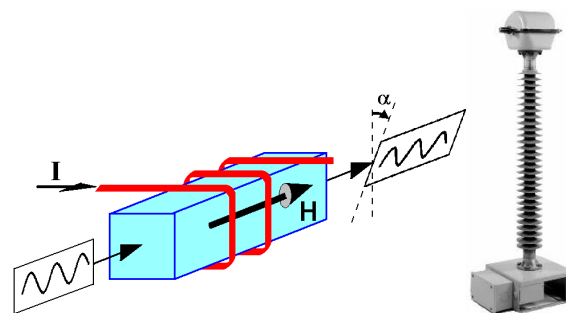


Figure 6.11 Les transducteurs magnéto-optiques

VI.5.3 Sonde à effet Hall

La sonde à effet Hall fonctionne sous le principe de l'effet Hall. Il est une conséquence des forces électromagnétiques de Laplace-Lorentz qui s'exerce 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 $u = k_{\frac{H}{d}} B$.

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

Où k_H est la constante de Hall et d l'épaisseur de la plaquette de la sonde de l'ordre de μm (figure 6.12)

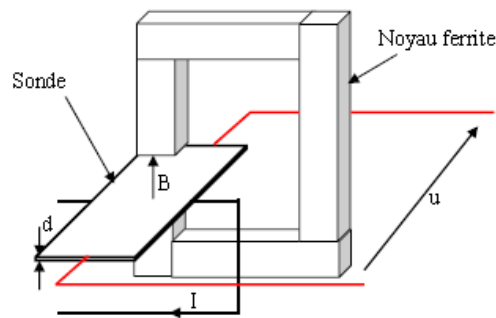


Figure 6.12 Sonde à effet Hall

VI.5.4 La bobine de Rogowski

La bobine de Rogowski (figure 5.13) est formée d'un fil enroulé en spirale, et dont le retour se fait par le centre de la spirale, utilisé pour mesurer les courants dans les transformateurs de puissance ainsi que les courants de foudre. Son avantage est qu'il est un système ouvert, permettant donc de mesurer un courant sans contact galvanique. Il a aussi la possibilité d'avoir une bobine de très grandes dimensions.

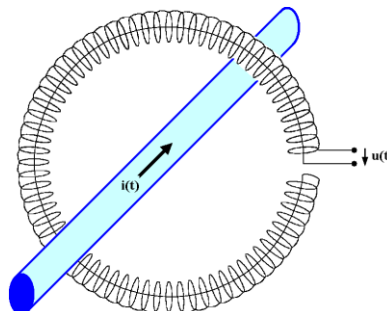


Figure 6.13. La bobine de Rogowski

VI.6 mesure par éclateur à sphères

L'éclateur est composé 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 horizontalement ou verticalement.

- horizontalement (figure 6.14) qui est la disposition la plus fréquemment utilisée ;
- verticalement (figure 6.15), utilisée pour les sphères de grand diamètre D ($D \geq 50 \text{ cm}$).

Les éclateurs à sphères utilisent pour la mesure :

- des tensions alternatives à fréquence industrielle
- des tensions de chocs de foudre et de manœuvre
- des tensions continues

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

Son 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 .

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 $U_c = f(d_c)$ (figure 6.16) 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 .

. Il est connu comme étant parmi les tout 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.

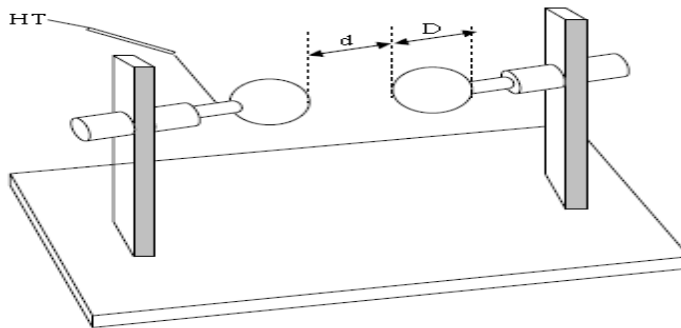
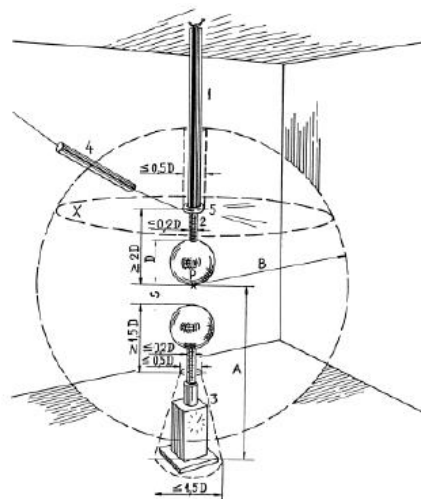


Figure 6.14 éclateur à sphère horizontal



© FPF -

Figure6.15 éclateur à sphère vertical

CHAPITRE 6 : MESURE DE HAUTE TENSION EN LABORATOIRE

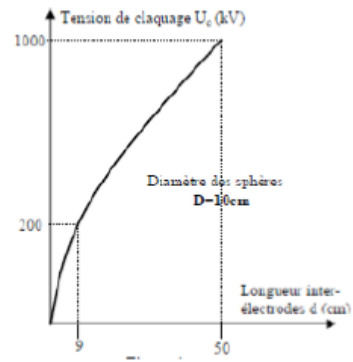


Figure 6.16 Abaque $U_c = f(d)$ de l'éclateur à sphères

REFERENCES

- [1]. AGUET, Michel et LANOVICI, Mircea. Traité d'Electricité. *Haute tension*. Volume XXII, Première édition, Edition Georgi.
- [2]. Pierre Zweiacker, <http://www.surprises.ch/HT/cours.html>
- [3]. A. Tilmatine, « cour : Techniques de la Haute Tension »
- [4]. <http://www.wikipedia.org/>
- [5]. Djilali Benyoucef « cour : Techniques de la Haute Tension »
- [6]. AFFOLTER Jean Francois « cour : la Haute Tension »
- [7]. M S Naidu , V Kamaraju « HIGH VOLTAGE ENGINEERING »
- [8]. E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel « High Voltage Engineering , *Fundamentals, Second edition* »
- [9]. "Energie Electrique", Volume XII, EPFL, Aguet et Morf, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.