



Faculté : Sciences de l'ingénierie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**COORDINATION DE L'ISOLEMENT ET DES PROTECTIONS
CONTRE LES SURTENSIONS DANS LES RESEAUX HT**

Présenté par :

- HEMISSI CHAIMA
- BALHI NAHLA

Encadrant : AZZAG EL- BAHI

PR

BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

ADJABI MOHAMED	PR	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
AZZAG EL- BAHI	PR	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
KSENTINI A/HAMID	MCB	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Mes remerciements Avant tout, louange à « ALLAH » qui ma donnée la force, le courage et la patience de mettre ce modeste travail

*Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à mon rapporteur Monsieur, **Mr. AZZAG EL-BAHI** qui a été à l'origine de ce travail, pour sa disponibilité, pour sa confiance qu'il m'a témoignée, ainsi que ses conseils précieux et ses encouragements qui m'ont beaucoup aidé à mener à bien la réalisation de ces travaux. Qu'ils trouvent ici ma profonde reconnaissance.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **KESNTINI**. qui me fait un grand honneur en acceptant d'aider.*

Je remercie les membres de jury, chacun par son nom, qui m'a honoré en acceptant d'examiner ce travail.

- *« **Pr. Adjabi Mohamed** »*
- *« **Dr. Ksentini Abdelhamid.** »*

De lire, commenter et juger cette mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

D'abord je tiens à remercier mon dieu tout de nous donner

La force pour réaliser ce modeste travail

*Avec tout l'amour que l'on porter mon cœur je dédié ce fruit de tant d'années
a la plus chère au monde, la grande fontaine de l'amour, la plus proche de
mon cœur, ma mère.*

*Le symbole de courage et de tendresse celui qui m'a suivie le long de ce
chemin, mon père*

A mes frères et sœurs

Toute la famille et tous mes amis

HEMISSI CHAIMA

*J'exprime mon profond respect et ma sincère gratitude aux êtres qui me sont
les*

*Plus chères au monde, à mes parents qui ont su me faire confiance et me
soutenir*

*En toute circonstance au cours de toutes mes années d'existence, c'est avec
Émotion que je leur exprime toute ma gratitude mon admiration et mon
profond respect.*

Au charme et à la bonne humeur de notre famille, mes sœurs ; mes frères

Mes grandes familles grandes et petites.

Que Dieu garde ma famille toujours réunis.

BALHI NAHLA

Sommaire

Sommaire	I
Liste des Figures.....	V
Liste des abréviations.....	VII
Introduction Générale	1

Chapitre I : Surtensions Electriques

I.1.Introduction.....	04
I.2.Définition.....	04
I.3.Origine des surtensions.....	04
I.4.Classification des surtensions	05
I.4.1. Les surtensions temporaires	05
I.4.2. Les surtensions transitoires.....	06
I.5.formes de tensions normalisées	07
I.5.1. Surtensions à fréquences industriels.....	08
I.5.1.1.surtension sur une longue ligne à vide (effet ferrani)	08
a) Modèle (Matlab/ Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son à enclenchement à vide	10
b) Analyse du comportement d'une ligne pour différents niveaux de tension	13
c) Analyse des résultats de la simulation	15
I.5.1.2.surtensions provoquée par un défaut d'isolement.....	15
I.5.1.3. Perte de charge.....	16
I.5.1.4. Surtension de ferrorésonance	18
I.5.2. Surtensions internes transitoires de manœuvre	18
I.5.3. Surtensions externes d'origine atmosphérique	19
I.5.3.1. Impacts des coups de foudre.....	20
I.5.3.2. Les effets de la foudre.	21
I.5.4. Surtensions par décharges électrostatiques.....	22
I.6.Conclusion.....	23

Chapitre II : Etude Des Matériaux Diélectriques

II.1.Introduction.....	25
II.2. Quelques définitions des isolants	25
II.2.1. Courant de fuite critique	25
II.2.2. Tension de tenue (tension d'essai)	25

Sommaire

II.2.3. Contournement	26
II.2.4. Contrainte de contournement	26
II.2.5. Tension de contournement	26
II.2.6. courant de fuite	26
II.3. Les isolateurs	26
II.3.1. Définition des isolateurs de haute tension	26
II.3.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur	26
II.3.3. Caractéristiques d'un isolateur..	28
II.4. Caractéristique diélectrique	28
II.4.1. Permittivité relative	28
II.4.2. Rigidité diélectrique.....	29
II.4.3. Résistivité diélectrique	29
II.4.4. Conductivité électriques	30
II.4.5. Circuit équivalent d'un isolateur en courant alternatif..	30
II.4.6. Les pertes diélectriques	30
II.4.7. Calcul de l'angle de pertes diélectriques	30
II.5. Claquage diélectrique.....	31
II.5.1. Claquage électrique	31
II.6. Influence de la température sur les isolateur	31
II.7. Types d'isolateur..	32
II.7.1. Isolateurs rigides.....	32
II.7.2. Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne	32
II.7.3. Isolateur long fut.....	32
II.7.4. Isolateur capot et tige.....	33
II.7.4.1. Les différents profils de l'isolatrice capot tige	33
II.7.4.2. Profil standard.	34
II.7.4.3. Profil antibrouillard (forme A)	34
II.7.4.4. Profil antibrouillard (forme B).....	34
II.7.4.5. Profil sphérique.....	35
II.7.4.6. Profil plat	35
II.8. Choix des isolateurs.....	36
II.9. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs.....	36
II.9.1. Céramique.....	37
II.9.2. Le verre	37

Sommaire

II.9.3. Matériaux synthétiques	38
II.10. Défauts des isolateurs	39
II.10.1. Défauts électriques	40
II.11. Conclusion	40

Chapitre III : Les Protections Electriques

III.1. Introduction	42
III.2. Modèle structural de principe	42
III.3. Protection contre les surtensions internes.....	42
III.3.1 Protection à maximum de tension	42
III.3.2 Relais de protection à maximum de tension.	44
III.3.2.1. Définition.....	44
III.3.2.2. Transformateurs de tension	44
III.4. Moyens de protection contre les surtensions externes (la foudre)	44
III.4.1. Paratonnerre	45
III.4.1.1. Zones de protection contre la foudre.....	45
III.4.1.2. Distance critique d'amorçage dc... ..	46
III.4.2. Câble de garde	46
a) Rôle statique	46
b) Rôle dynamique	47
III.4.3.Éclateur	47
III.4.3.1. Principe de fonctionnement	47
III.4.4. Les parafoudres	48
III.4.4.1. Principe de fonctionnement	49
III.4.4.2. Courbe caractéristique « courant-tension » d'une varistance.....	49
III.4.4.3. Caractéristiques	50
a) Parafoudre à résistance variable avec éclateur (Les Parafoudres à SiC)..	50
b) Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO)	52
III.4.4.4. Emplacement des parafoudres	54
III.5. Conclusion	54

Chapitre IV : Coordination entre l'isolement et la protection

IV.1. Introduction	57
IV.2. Procédure de la coordination	57

Sommaire

IV.3 Principe de la coordination.....	57
IV.4. Coordination des isolements et des protections d'un équipement	58
IV.5. La Coordination d'une installation	59
IV.6. Méthodes de la Coordination	59
IV.6.1. Méthode de la coordination statistique	60
IV.6.2. Méthode de la coordination déterministe	60
IV.7. Conclusion.....	62
CONCLUSION GENERALE.....	41
BIBLIOGRAPHIQUES.....	42

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1: Ordre de grandeur des surtensions électriques	5
Figure I.2: Paramètres caractérisant l'onde de choc (tension ou courant)	6
Figure I.3: Superposition des surtensions transitoires à la tension du réseau	7
Figure I.4: Schéma équivalent : Ligne à paramètres distribués	9
Figure I.5: Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte.....	10
Figure I.6: Modèle (Matlab / Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son déclenchement à vide	11
Figure I.6.a: Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement $L_1=100\text{km}$	12
Figure I.6.b: Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement $L_2=250\text{km}$	12
Figure I.6.c: Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement $L_3=500\text{km}$	13
Figure I.7.a : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 60KV, 220KV	14
Figure I.7.b : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 380KV, 500KV	15
Figure I.8: Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé, en présence d'un défaut d'isolement.....	16
Figure I.9 : Schéma d'étude de perte de charge	17
Figure I.10: Onde de Choc de manœuvre normalisée 250/2500 μs	19
Figure I.11 : Formes des ondes de foudre normalisées	19
Figure I.12: Forme des courants de foudre	20
Figure I.13: Les montées et différences de potentiel des terres d'une installation électrique.....	21
Figure I.14: Origine d'une surtension électrostatique	23

Chapitre II :

Figure II.1: Isolateur en chaînes de haute tension.....	27
Figure II.2: Les caractéristiques d'un isolateur	28
Figure II.3: Permittivité relative	28
Figure II.4: Circuit équivalent d'un isolateur en courant alternatif	30
Figure II.5: l'angle de pertes diélectriques	31
Figure II.6: Isolateur rigide.....	32
Figure II.7: Isolateur long fut	33

Liste des figures

Figure II.8: Isolateur capot et tige	33
Figure II.9: Isolateur capot et tige avec profil standard	34
Figure II.10: Profil antibrouillard (forme A)	34
Figure II.11: Profil antibrouillard (forme B)	35
Figure II.12: Profil sphérique	35
Figure II.13: Isolateur capot et tige de profil plat	36
Figure II.14: Isolateur en céramique	37
Figure II.15: Isolateur en verre trempé	37
Figure II.16: Isolateur en verre recuit	38
Figure II.17: Isolateur composite.....	39
Figure II.18: La bonne prospérité Hydrophobe	39
Figure II.19: Vieillessement d'un Isolateur composite.....	39

Chapitre III :

Figure III.1: Schéma de principe de la protection.....	42
Figure III.2: Protection à maximum et minimum de tension	43
Figure III.3: Protection contre les surtensions internes	43
Figure III.4: Schéma de branchement	44
Figure III.5: Protection par paratonnerre à tige.....	45
Figure III.6: Détermination d'une zone protégée par la méthode de la sphère fictive	46
Figure III.7: Câble de garde.....	47
Figure III.8: Éclateur avec tige anti-oiseaux	48
Figure III.9: Le parafoudre.....	49
Figure III.10: Courbe caractéristique courant-tension d'une varistance.....	50
Figure III.11: Structure d'un parafoudre à SiC.....	51
Figure III.12: Structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine.....	52
Figure III.13: Caractéristique typique (courant-tension) d'une varistance à oxyde de zinc	53

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Schéma général de la coordination entre l'isolement et la protection	58
Figure IV.2 : Procédure de détermination des niveaux d'isolation standard.....	61

Liste des abréviations

HT : Haute tension

THT : Très haute tension

T_{cr} : Durée jusqu'a la crête

T_h : Durée jusqu'a la mi-amplitude

L : l'inductance

C : la capacité totale de la ligne

U_s : Tension à l'extrémité ouverte

U_e : Tension à l'entrée de la ligne

V, I : tension et courant au point d'abscisse (x).

V₀, I₀ : tension et courant à l'origine.

Z_c : Impédance caractéristique.

γ : Coefficient de propagation.

L, R, C, G : Paramètres linéique de la ligne.

U : le potentiel de terre

D : la distance du point d'impact de la foudre

I : courant de foudre

ρ_s : résistivité du sol

μ_s : Unité de mesure de temps

kV : Unité de mesure de tension électrique

kA : Unité de courant électrique

Hz : l'unité dérivée de fréquence

ϵ_0 : la permittivité absolue du vide ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$)

ϵ_r : La permittivité relative

ϵ : La permittivité absolue

δ : Densité relative.

Liste des abréviations

dc : Distance critique d'amorçage

σ : Conductivité volumique.

v : Vitesse de propagation de l'onde.

x : Variable de distance.

E0 : Champ critique de claquage.

CEI : La commission internationale d'électrotechnique



INTRODUCTION
GENERALE

1. Généralités :

Le domaine de l'énergie électrique comprend la conception et l'exploitation des systèmes de production, de transport et de distribution. Le génie électrique a connu diverses avancées majeures en ce domaine depuis la fin des années 1970.

Les systèmes d'énergies électriques peuvent être soumis à des surtensions de toute nature, ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants « au niveau de l'isolation des lignes de transport et au niveau des équipements constituant le système d'énergie électrique ».

Dans la gamme des très hautes tensions, le dimensionnement de l'isolation externe est déterminé principalement par les surtensions électriques. Dans ces conditions, la tenue à la tension nominale à 50 Hz des isolateurs propres et secs est excellente. Généralement elle est également suffisante pour supporter les surtensions temporaires. Cependant, en l'absence de surtensions de foudre ou de manœuvre, de nombreux défauts sont enregistrés sur les lignes aériennes,

Les surtensions dans un réseau électrique peuvent être engendrées par une large variété de facteurs comme les défauts, les manœuvres, et la foudre.

La conception et le fonctionnement des réseaux électriques dépendent des matériaux disponibles ainsi que des propriétés des conducteurs et des isolants qui jouent un rôle très important dans la gestion des réseaux électriques. **1**

L'évolution du choix et du dimensionnement des isolateurs est basée sur l'analyse des différentes contraintes que l'isolateur subit ; sachant que les surtensions électriques qui peuvent provoquer leur détérioration influencent ses propriétés diélectriques et électriques.

Les isolateurs sont des éléments essentiels dans la conception d'une ligne aérienne. Leur rôle est de relier les conducteurs sous tension aux supports et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties constitutives de la ligne. En effet, le choix du type d'isolateur, les contrôles de réception, la surveillance en exploitation doivent être faite avec un maximum de soin, pour assurer le bon fonctionnement de la ligne.

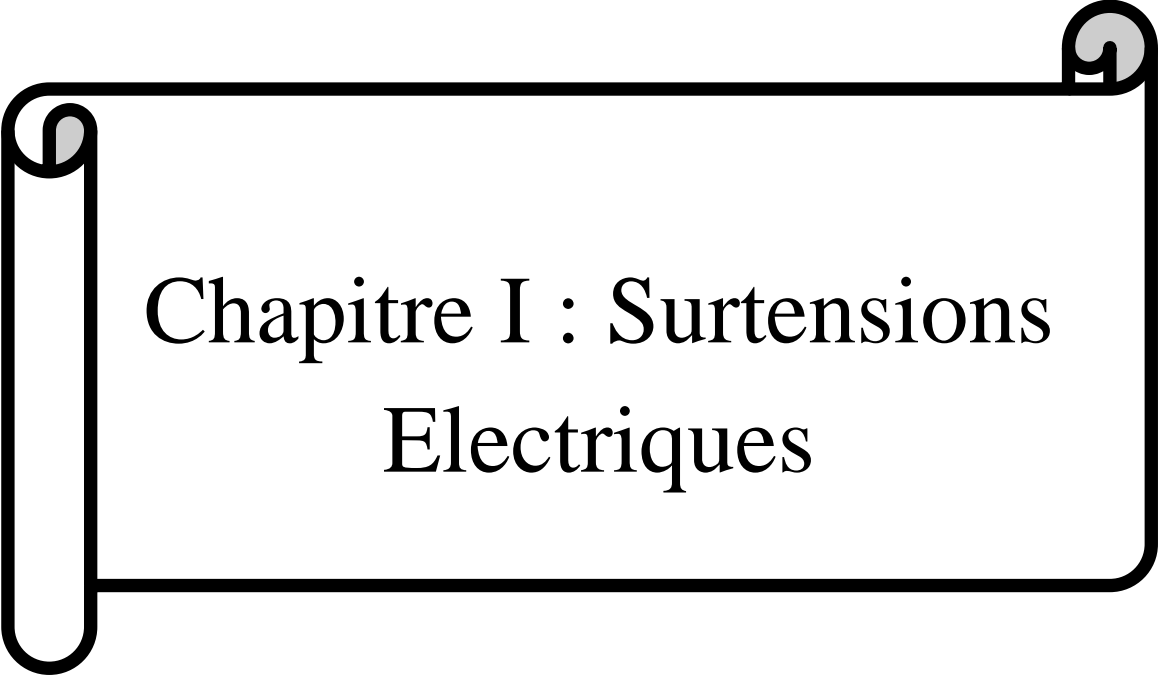
Les dispositifs de protection des réseaux électriques contre les surtensions sont multiples : le fil de garde ; l'éclateur et le parafoudre...etc. Il est nécessaire, en revanche, d'utiliser des parafoudres dès que l'on veut réduire l'isolement des matériels ou améliorer la qualité de service. Ces dispositifs présentent de meilleures caractéristiques de protection, moyennant toute fois un coût plus élevé.

Afin de bien mener cette étude, nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres.

- Au premier chapitre, nous présentons les différents types et origines des surtensions (internes et externes). Après avoir passé en revue toutes les surtensions internes (effet

Férranti, défaut monophasé, perte de charge férrorésonance). On a procédé à deux simulations du comportement de la ligne (à vide ou perte de charge) en variant la tension d'alimentation et la distance de la ligne. Cette simulation nous a permis de caractériser l'effet Férranti et ces effets nocifs sur l'isolation.

- Dans le deuxième chapitre, nous présentons, l'importance des isolateurs, leur utilité et leurs principaux types, profils et matériaux.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons Les dispositifs de protection des réseaux électriques contre les surtensions
- Le chapitre quatre présente une revue de la littérature concernant la coordination des isolements et les protections électriques.



Chapitre I : Surtensions
Electriques

I.1. Introduction :

Une surtension est toute tension entre un conducteur de phase et la terre, ou entre conducteurs de phase, dont la valeur de crête dépasse la valeur de crête correspondant à la tension la plus élevée pour le matériel

Dans ce chapitre, il est question de traiter les phénomènes de surtensions résultants des différentes origines, les contre-mesures pour parer à ces phénomènes et leurs conséquences sur les installations électriques.

I.2. Définition :

C'est une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau. Une surtension est dite de mode différentiel si elle apparaît entre conducteurs de phase ou entre circuits différents. Elle est dite de mode commun si elle apparaît entre conducteurs de phase et la masse ou la terre.

I.3. Origine des surtensions :

Les surtensions peuvent être d'origine interne ou externe [1]:

➤ Origine interne :

Ces surtensions sont causées par un élément du réseau considéré et ne dépendent que des Caractéristiques et de l'architecture du réseau lui-même.

A titre d'exemple, la surtension qui apparaît à la coupure du courant magnétisant d'un transformateur.

- Effet feranti ;
- Surtension provoquée par un défaut à la terre ;
- Résonance et Ferro résonance ;
- Rupture du conducteur neutre ;
- Surtensions de manœuvre ;

➤ Origine externe :

Ces surtensions sont provoquées ou transmises par des éléments externes au réseau, dont on peut citer à titre d'exemple :

- Surtension provoquée par la foudre (atmosphérique) ;
- Propagation par induction sur un réseau électrique ;

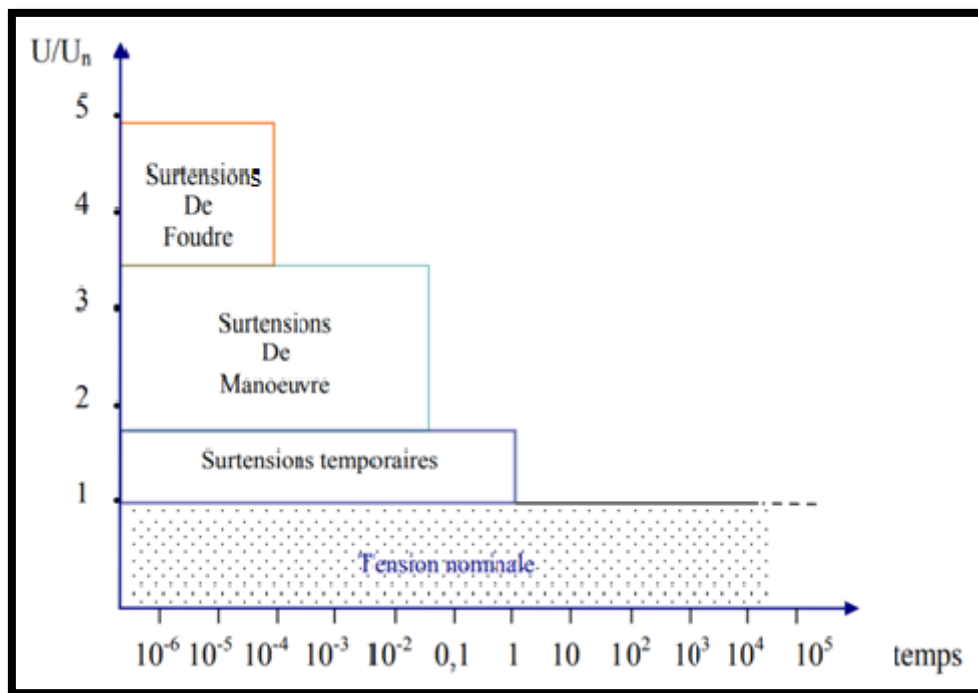


Figure I.1 : Ordre de grandeur des surtensions électriques.

I.4. Classification des surtensions :

Les surtensions sont classées aussi selon leur durée d'application [1]:

- surtension temporaire : surtension à fréquence industrielle de durée relativement longue (de quelques périodes à quelques secondes).
- surtension transitoire : surtension de courte durée ne dépassant pas quelques millisecondes, oscillatoire ou non, généralement fortement amortie.

Les surtensions transitoires sont divisées en :

- Surtension à front lent.
- Surtension à front rapide.
- Surtension à front très rapide.

I.4.1. Les surtensions temporaires :

Ces perturbations peuvent avoir des formes alternatives ou oscillatoires dont la durée est limitée au temps de fonctionnement des dispositifs de contrôle et de protection du réseau, elles se présentent soit à la fréquence industrielle, soit à d'autres fréquences plus élevées [2].

Elles apparaissent lors de la modification brusque de la configuration du réseau ou lors d'un défaut à la terre.

- Effet Ferranti provoqué par le fonctionnement à vide d'une ligne de grande longueur;
- Défauts entre phase et terre (déplacement du point du neutre).
- Déclenchement brusque d'une charge.
- Alimentation d'une charge capacitive au travers d'une impédance élevée (surtout en H.T. et T.H.T.).
- Phénomène de Ferro résonance; etc.....

Ces différentes causes peuvent coexister et, en conséquence, les surtensions générées se superposer.

Les surtensions temporaires, ont une amplitude relativement non élevée, sont de longue durée (quelques secondes) et de basse fréquence.

I.4.2. Les surtensions transitoires :

Les ondes transitoires sont caractérisées par les paramètres suivants [2] :

- Le temps de montées (**T_{cr}**) en μs
- La pente de montées mesurée en $\text{kV}/\mu\text{s}$ ou en $\text{kA}/\mu\text{s}$
- La durée de la surtension (**T_h**) qui est mesurée jusqu'à la descente à mi-hauteur en μs

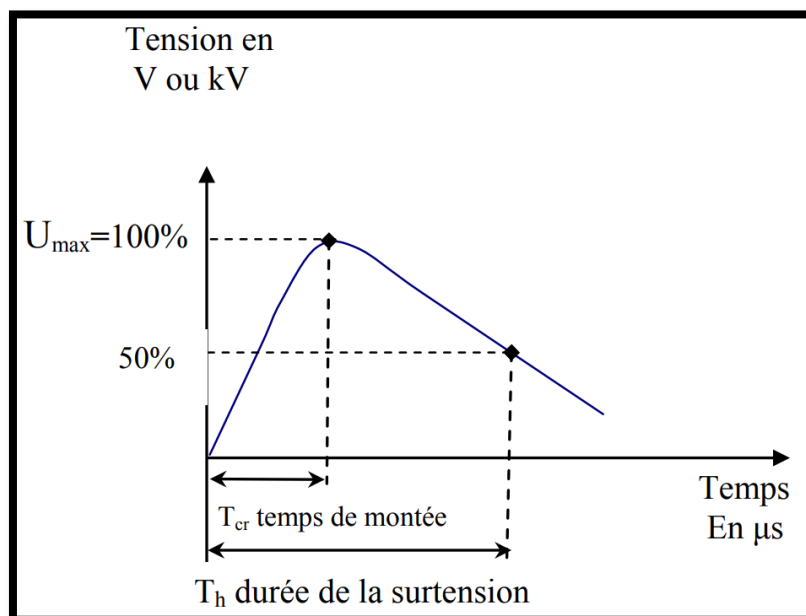


Figure I.2 : Paramètres caractérisants l'onde de choc (tension ou courant).

Avec T_{cr} : Durée jusqu'à la crête

T_h : Durée jusqu'à la mi-amplitude.

Les surtensions transitoires sont classées en fonctions de leur origine en surtensions atmosphériques (foudre) et en onde de manœuvre. Elles se superposent à la tension nominale comme montré sur la (Figure I.3)

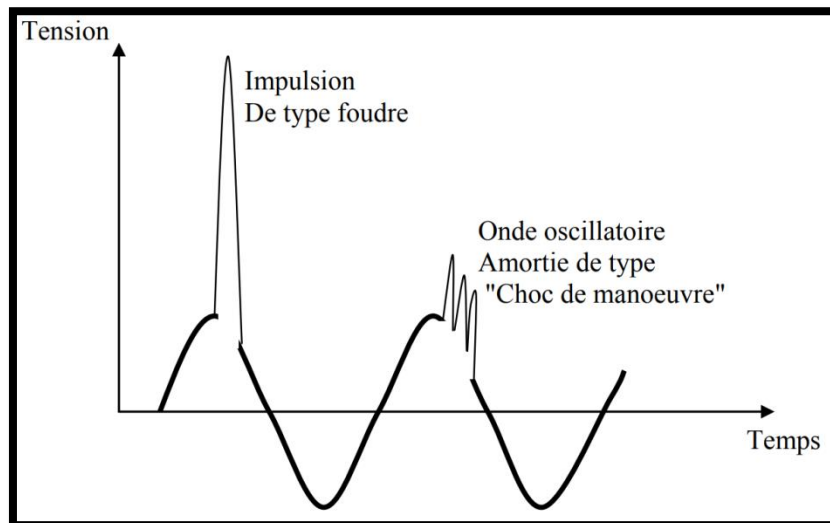


Figure I.3 : superposition des surtensions transitoires à la tension du réseau.

I.5. Formes de tensions normalisées :

Les formes d'ondes normalisées utilisées pour effectuer les essais des matériels sont :

- **Tension de courte durée à fréquence industrielle** : c'est une tension sinusoïdale de fréquence comprise entre 48 Hz et 62 Hz et de durée égale à 60 s.
- **Tension de choc de manœuvre** : c'est une tension de choc ayant une durée jusqu'à la crête de 250 μ s et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 2500 μ s.
- **Tension de choc de foudre** : c'est une tension de choc ayant une durée de front montant de 1,2 μ s et une durée de descente jusqu'à la mi-valeur de 50 μ s.
- **Surtensions causées par des décharges électrostatiques** : Surtensions à très haute fréquence très courtes (quelques nanosecondes) causées par la décharge de charges électriques accumulées.

I.5.1. Surtension à fréquences industriels :

Sous cette appellation de fréquence industrielle sont regroupées les surtensions ayant des fréquences inférieures à 500 Hz [3].

Rappel : les fréquences industrielles les plus fréquentes sont : 50, 60Hz.

Les surtensions à fréquence industrielle ont généralement pour origine :

- un défaut à la terre.
- une résonance ou une Ferrorésonance.
- un défaut d'un régulateur de tension d'un alternateur ou d'un régleur en charge de transformateur.
- une surcompensation de l'énergie réactive suite à un défaut d'un régulateur varométrique.
- un délestage de charge, notamment lorsque la source d'alimentation est un alternateur.

I.5.1.1. Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti) :

Une surtension peut se produire lorsqu'une ligne longue est alimentée à l'une de ses extrémités et non chargée à l'autre. Elle est due à un phénomène de résonance qui se manifeste par une onde de tension à croissance linéaire le de la ligne [4].

Une ligne est un élément à constantes réparties que nous pouvons imaginer comme constituée d'une échelle de cellules élémentaires : inductance série, capacité parallèle **figure I.4.**

Chaque cellule est constituée d'un circuit résonnant dont le gain est très légèrement supérieur à l'unité .On conçoit donc bien que la tension sera plus élevée en extrémité de ligne et que cette augmentation sera donc d'autant plus importante que la ligne soit plus longue.

Chaque cellule est constituée d'un circuit résonnant dont le gain est très légèrement supérieur à l'unité .On conçoit donc bien que la tension sera plus élevée en extrémité de ligne et que cette augmentation sera donc d'autant plus importante que la ligne soit plus longue.

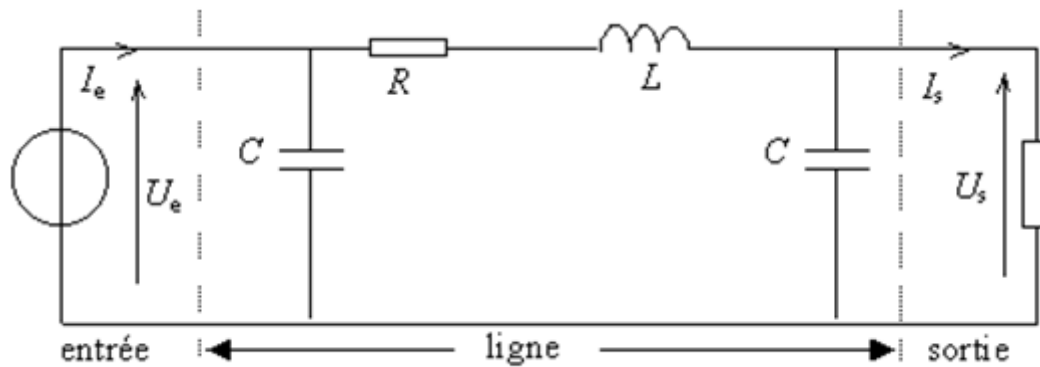


Figure I.4 : Schéma équivalent : Ligne à paramètres distribués

Ce résultat peut d'ailleurs se montrer rigoureusement à partir des équations de télégraphistes de la ligne considérée comme quadripôle [4] :

$$V(x) = V_0 \cdot \text{ch} \gamma x - Z_c I_0 \cdot \text{sh} \gamma x \tag{I.1}$$

$$I(x) = I_0 \cdot \text{ch} \gamma x - \frac{1}{Z_c} V_0 \text{sh} \gamma x \tag{I.2}$$

V, I : tension et courant au point d'abscisse (x).

V₀, I₀ : tension et courant à l'origine.

Z_c : Impédance caractéristique,
$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

γ : Coefficient de propagation,
$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}, \text{ avec } \omega = 2\pi f$$

En extrémité de ligne ouverte (x = l) ; le courant est nul ; donc on déduit de I.2 :

$$I_0 \text{ch} \gamma l = \frac{1}{Z_c} V_0 \text{sh} \gamma l \tag{I.3}$$

On a alors :

$$V(l) = V_0 \text{ch} \gamma l - V_0 \frac{\text{sh}^2 \gamma l}{\text{ch} \gamma l} = V_0 \frac{1}{\text{ch} \gamma l} \tag{I.4}$$

Tant que γ l est suffisamment petit ; l'équation I.4 peut se limiter à son développement au second ordre ; soit :

$$V(l) \approx V_0 \left(1 + \frac{\gamma^2 l^2}{2}\right) \quad \text{I.5}$$

En première approximation : $G = 0$ et, R petite ; donc :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{R}{Z_c} + j\omega\sqrt{LC}$$

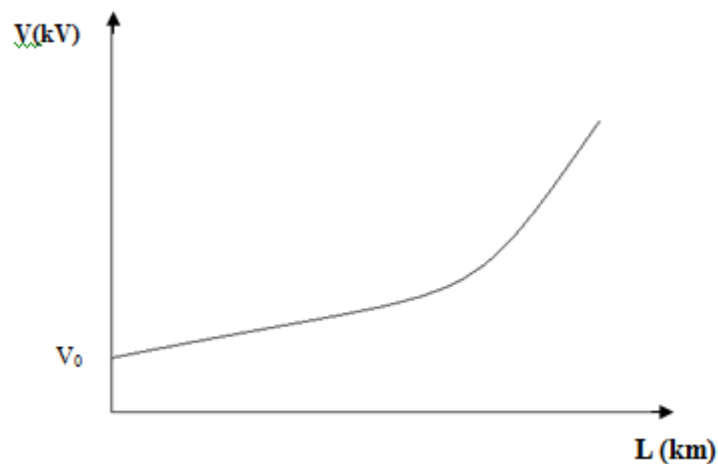


Figure I.5 : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte.

On déduit donc :

$$V = V_0 (1 + 5,5 \cdot 10^{-7} \cdot L^2) \quad \text{I.6}$$

L'équation I.6 est illustrée par la figure I.5.

a) Modèle (Matlab/ Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son à enclenchement à vide :

Le modèle de simulation a été construit par l'utilisation des éléments de la bibliothèque de Simulink représenté sur la figure I.6. Afin d'étudier le comportement d'une ligne lors de son déclenchement à vide, on a procédé à une simulation numérique en adoptant un modèle d'une ligne à paramètres distribués figure I.6.

Etant donné que le déclenchement s'effectue en triphasé et afin d'alléger les calculs on a pris en considération une seule phase de la ligne [5].

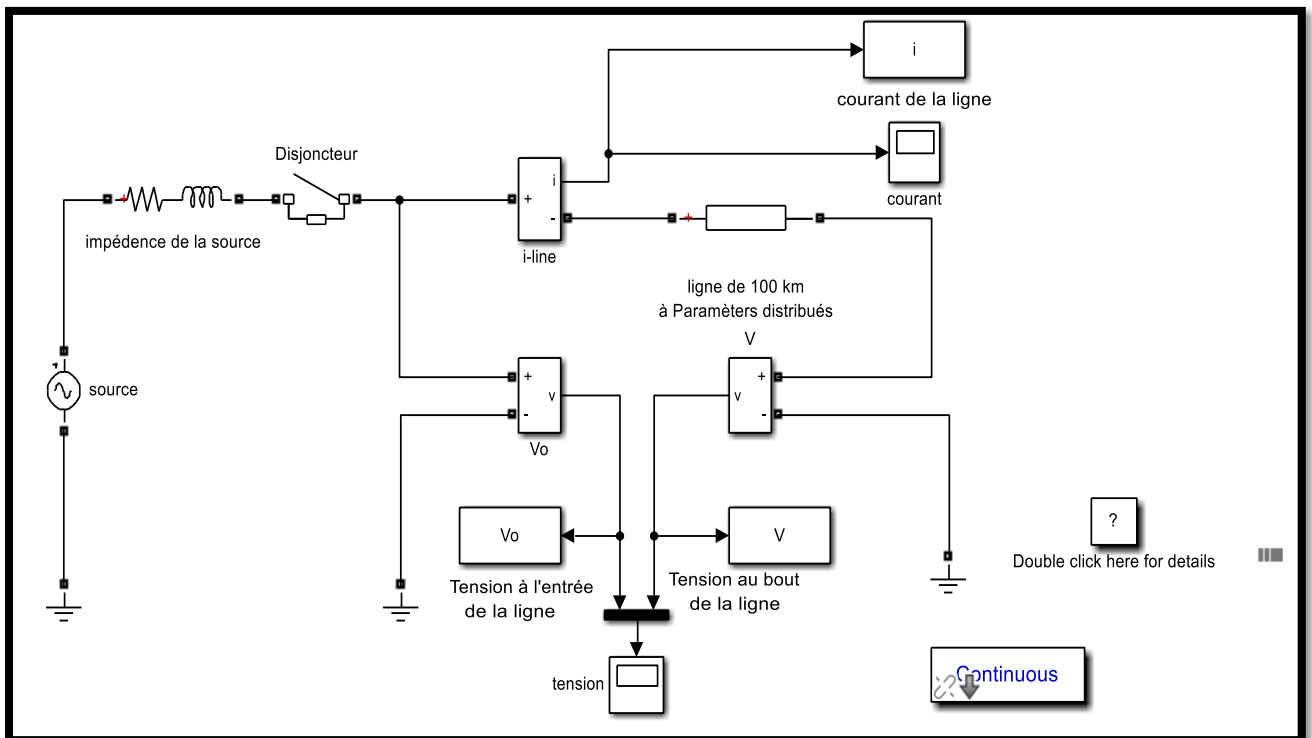


Figure I.6 : Modèle (Matlab / Simulink) pour l'étude du comportement d'une ligne à paramètres distribués lors de son déclenchement à vide [10].

Les données de la ligne prise dans le modèle sont:

$$U = 380 \text{ KV}$$

$$R_0 = 0.2568 \ \Omega / \text{Km}$$

$$L_0 = 2.0 \text{ mH} / \text{Km}$$

$$C_0 = 8.6 \text{ nF} / \text{Km}$$

Pour trois longueurs différentes : $L_1 = 100\text{Km}$, $L_2 = 250\text{Km}$, $L_3 = 500\text{Km}$. Les résultats de la simulation sont présentés sur les figures (I-6a, I- 6b, I-6c).

Avec :

— : V_0 Tension a l'entrée de la ligne

— : V Tension au bout de la ligne

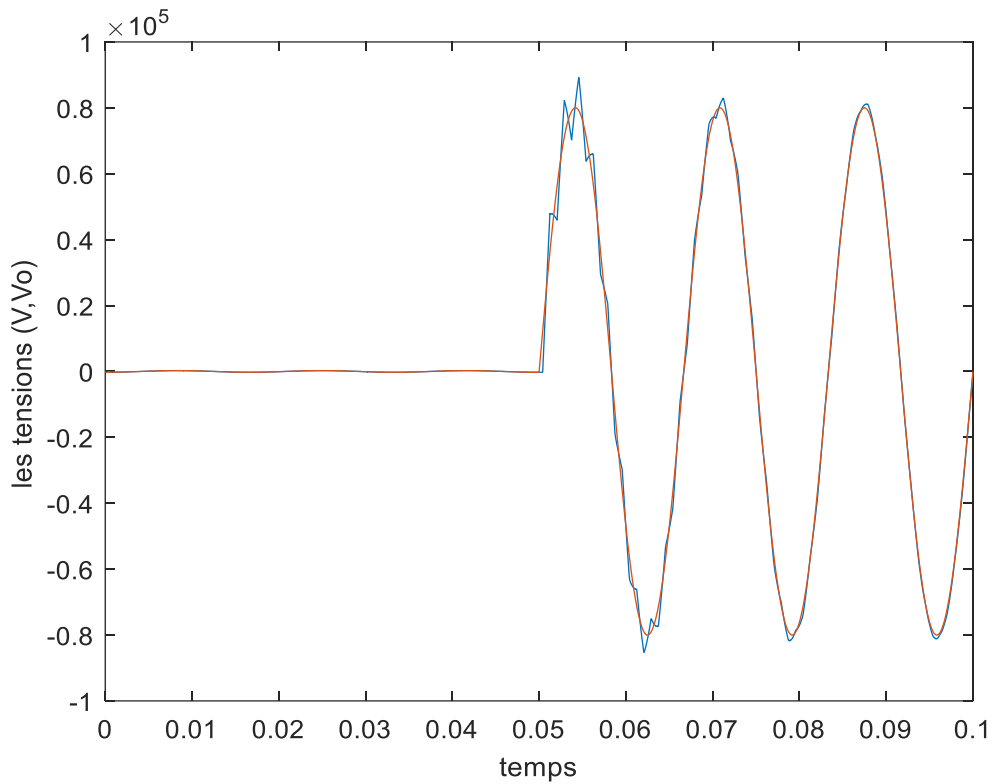


Figure I.6.a : Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement $L_1 = 100\text{Km}$.

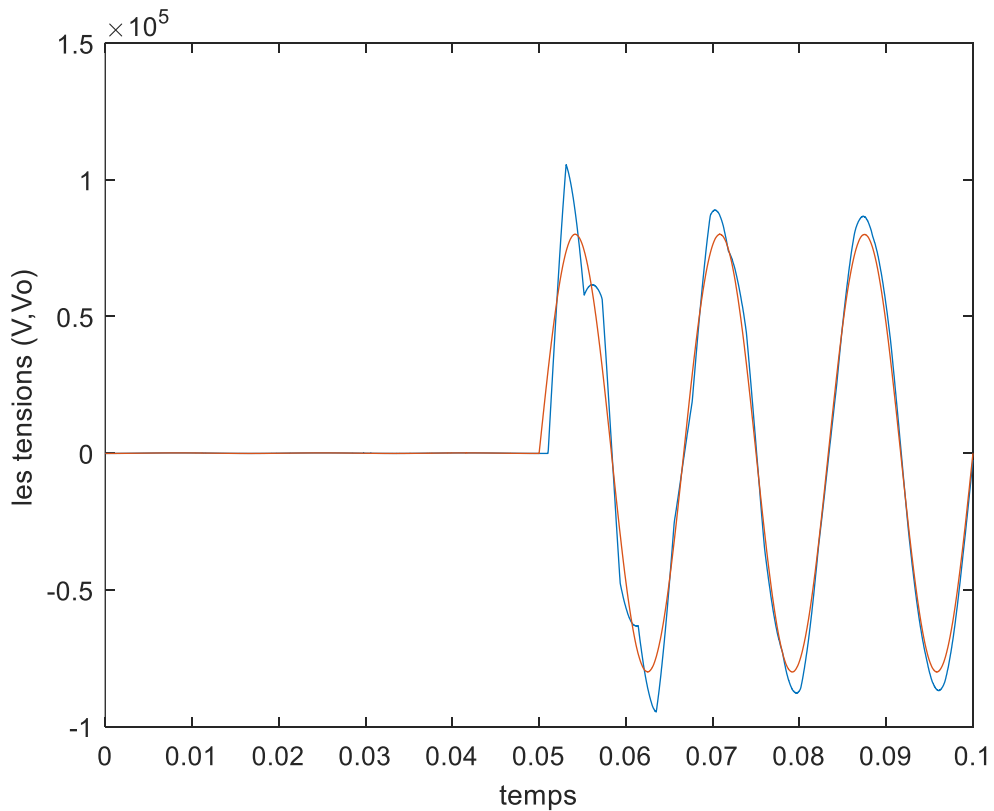


Figure I.6.b : Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement $L_2 = 250\text{Km}$.

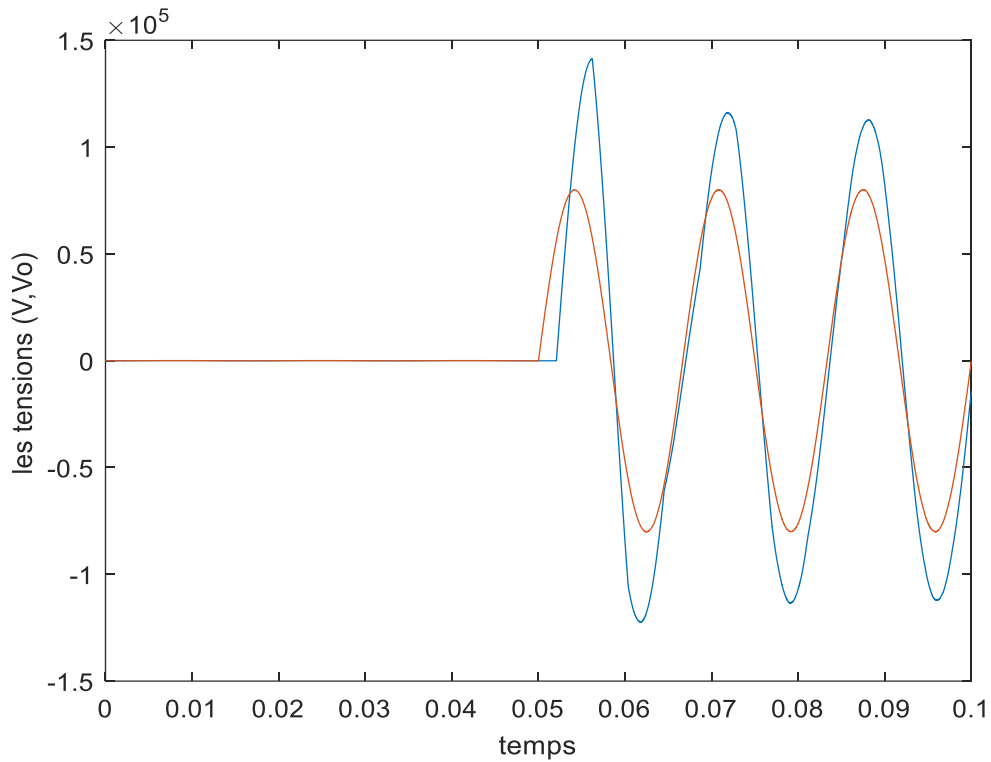
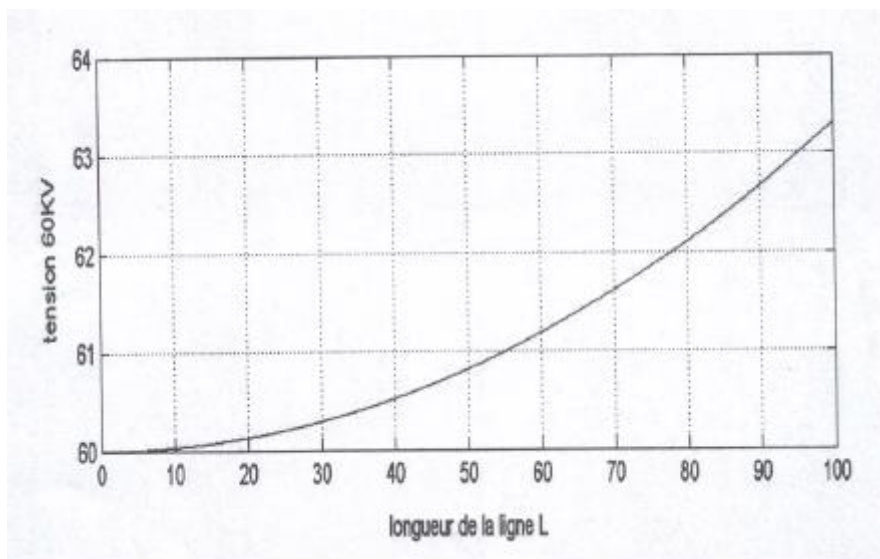


Figure I.6.c : Surtension en extrémité d'une ligne lors de son déclenchement $L_3=500$ Km.

b) Analyse du comportement d'une ligne pour différents niveaux de tension [5] :

L'analyse de la formule (I.6) nous permet de réaliser un programme informatique Matlab dont l'organigramme et en annexe. Dans cette analyse on a pris une ligne de 100Km de longueur, pour les niveaux de tension suivants: $U = 60$ kV, $U = 220$ kV, $U = 380$ kV, $U = 500$ kV. Les résultats de ce programme sont interprétés par les courbes des figures suivantes :



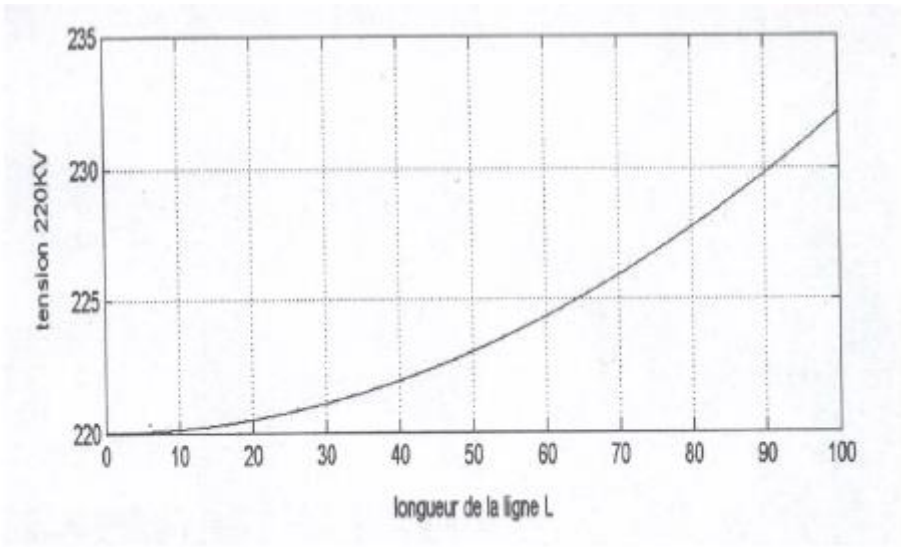
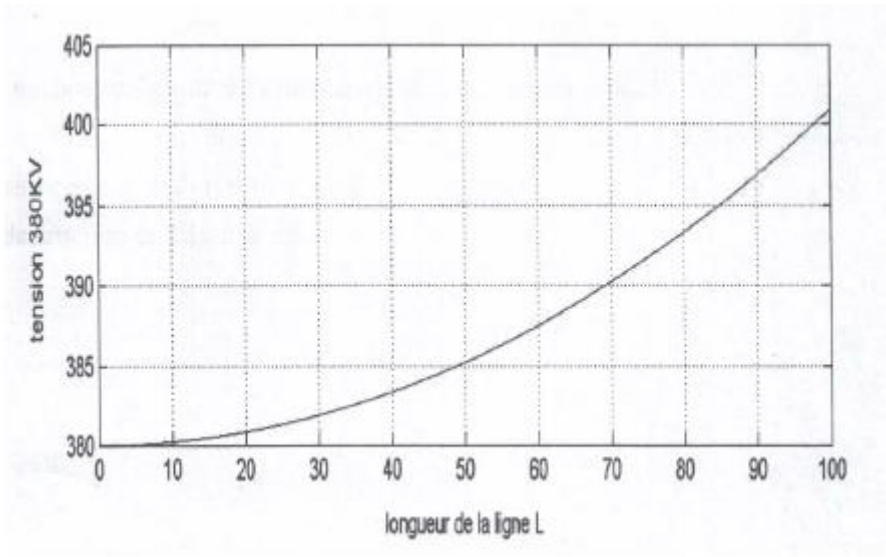


Figure I.7.a : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 60KV, 220KV. [5].



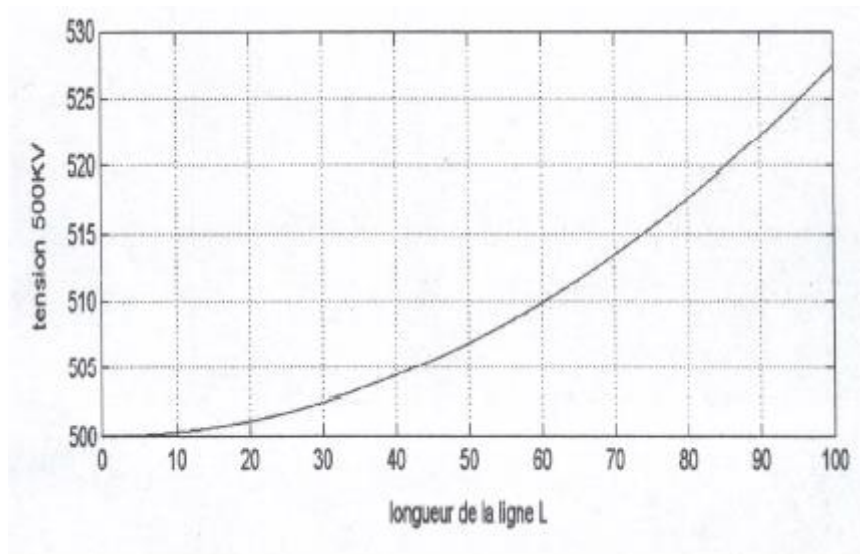


Figure I.7.b : Augmentation de la tension en extrémité d'une ligne ouverte pour une tension de 380KV, 500KV. [5]

c) Analyse des résultats de la simulation :

Pour l'analyse de la simulation on remarque que la tension à l'extrémité passe par un régime transitoire qui est initialement nul puis prend brusquement le potentiel de la source d'alimentation. Le régime final peut être interpréter comme étant la superposition de deux régimes; l'un permanent et l'autre transitoire. Aux premiers instants du déclenchement de la ligne, on remarque des oscillations dues à aux réflexions successives de l'onde injectée, ces oscillations vont s'amortir pour tendre vers le régime à fréquence industrielle imposée par la source. L'analyse des courbes du programme informatique, pour une même longueur l'effet de la surtension à la fin de la ligne est plus importante avec l'augmentation de la tension.

Ceci est du à l'effet capacitif de la ligne (capacité entre la ligne et la terre et capacité entre les phases). Pour les deux simulations la tension à la fin de la ligne est supérieure à la tension d'entrée de ce qui va influencer de façon négative sur l'isolation. Ce phénomène peut sembler paradoxal: les lignes électriques sont habituellement connues pour leur "chute de tension" lorsqu'elles sont parcourues par un courant, mais lorsqu'elles ne sont pas parcourues par aucun courant, le phénomène est inversé. L'extrémité ouverte de la ligne est à un potentiel plus élevé que celle connectée au réseau. Ce phénomène est potentiellement destructeur pour les équipements du réseau (contournement perforation des isolateurs). [5]

I.5.1.2. Surtension provoquée par un défaut d'isolement :

Une surtension due à un défaut d'isolement apparaît sur un réseau triphasé, lorsque le neutre est isolé ou impédant [3].

En effet, lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la masse ou la terre (blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement...), la phase concernée est mise au potentiel de la terre et les deux autres sont alors soumises, par rapport la terre, à la tension composée

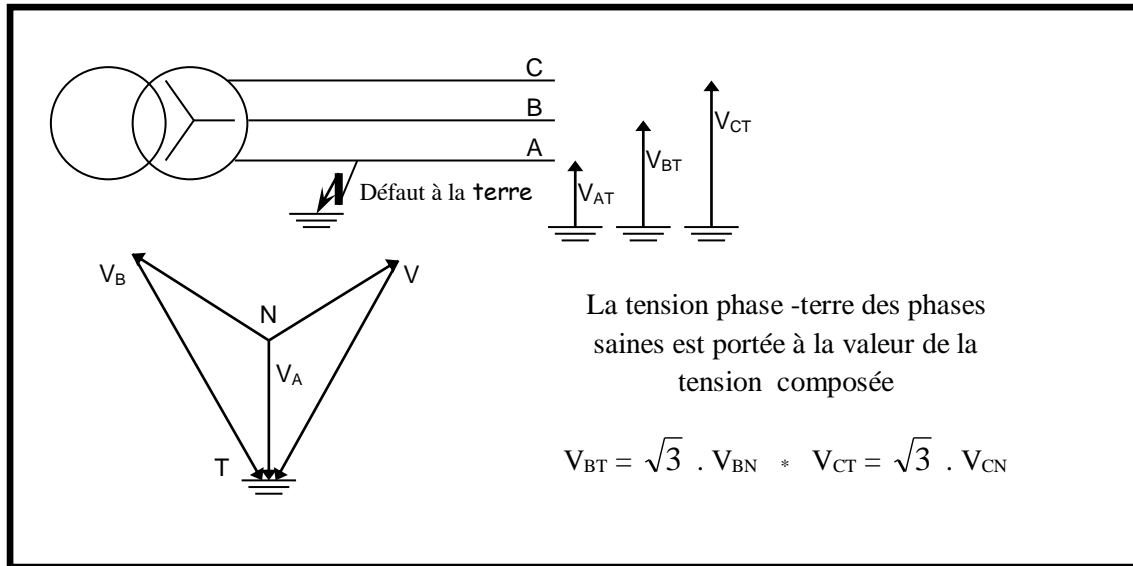


Figure I.8 : surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé, en présence d'un défaut d'isolement.

I.5.1.3. Perte de charge :

Considérons le schéma de la figure I.9. Le transit d'énergie provoque dans les impédances du réseau des chutes de tension [4]

$$\Delta V = Z_L i \tag{I.7}$$

$$S_{ch} = V_2 \cdot i^* \tag{I.8}$$

Donc :

$$I = \frac{S_{ch}^*}{V_2^*} = \frac{P - jQ}{V_2^*} \tag{I.9}$$

Alors :

$$\Delta V = (R + jX) \frac{P - jQ}{V_2^*} \approx \frac{P.R + Q.X}{V_2^*} \approx \frac{X.Q}{V_2^*} \tag{I.10}$$

Si on augmente la tension de source pour assurer une tension (V_2) normalisée et si le disjoncteur (D_2) s'ouvre (perte de la charge R_2); il y aura apparition de l'effet Ferranti au point 3.

Supposons maintenant que (D_2) est ouvert; la charge va donc disparaître, On aura alors une ligne qui est représentée par sa capacité. On peut écrire :

$$E = \Delta V + V_1 \tag{I.11}$$

$$E \approx j.X_s i + V_1 = j.X_s i - j \frac{1}{\omega C} i$$

$$E \approx j.(X_s - \frac{1}{\omega C})i \tag{I.12}$$

$$V_1 = \frac{-j}{\omega C} i \tag{I.13}$$

$$\frac{V_1}{E} = \frac{1}{1 - X_s \omega C_1} = \frac{1}{1 - L_s C_0 \omega^2 l} \tag{I.14}$$

Les différentes expressions données ci-dessous montrent clairement que les surtensions dues aux pertes de charge sont d'autant plus importantes :

- Que le transit initial, en particulier sa composante réactive, est important ;
- Que la ligne est plus longue ;
- Que la source est moins puissante.

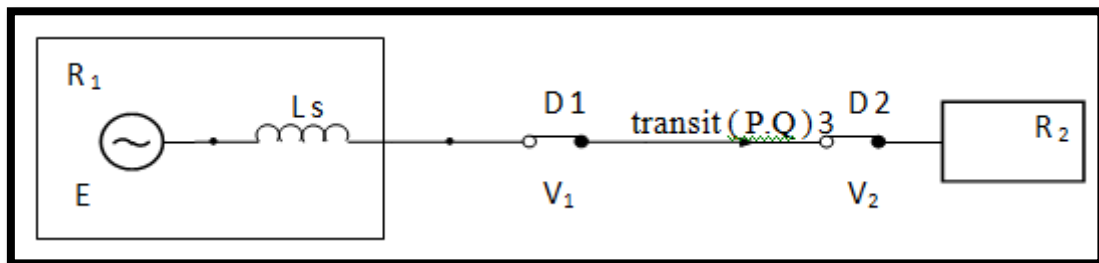


Figure I.9 : Schéma d'étude de perte de charge

I.5.1.4. Surtensions de ferrorésonance :

La ferrorésonance est un phénomène de résonance non linéaire qui peut affecter les réseaux de transport et de distribution de l'électricité. Elle désigne tous les phénomènes oscillatoires (surtensions ou surintensités transitoires ou permanentes), le plus souvent périodiques, qui se manifestent dans un circuit électrique composé d'une part d'une ou de plusieurs inductances non linéaires (comportant des matériaux ferromagnétiques saturables) et d'autre part d'un réseau comprenant au moins une capacité alimentée par une ou plusieurs sources de tensions généralement sinusoïdales [6].

I.5.2. Surtensions internes transitoires de manœuvre :

Les manœuvres d'interrupteurs ou de disjoncteurs entraînent des changements dans la configuration électrique des réseaux.

Ces changements provoquent des surtensions plus ou moins élevées [2]:

- Coupure des courants de ligne à vide, des câbles à vide ou de batteries de condensateurs.
- Coupure des faibles courants inductifs ou magnétisants (transformateurs à vide ou chargés par des inductances shunts).
- Mise sous tension des lignes.
- Rétablissement d'une ligne après défaut.

Ces surtensions se caractérisent généralement par un échelon de tension d'une amplitude 1,3 à 3,4 fois la tension normale d'un réseau aérien et 2,2 à 3,5 fois celle d'un réseau de câbles, et une durée de quelques ms. Leurs fréquences s'échelonnent entre 50 Hz et 200 kHz. Les valeurs de surtension de manœuvres les plus élevées sont obtenues lors du réamorçage de disjoncteurs.

Les surtensions de manœuvres sont moins dangereuses que celles de foudre. Toutefois la grande énergie qui leur est associée à cause de leur longue durée peut provoquer dans les cas les plus extrêmes l'emballement thermique de la varistance.

La forme conventionnelle d'une surtension de manœuvre est dite 250/2500 μ s (**Figure I.10**)

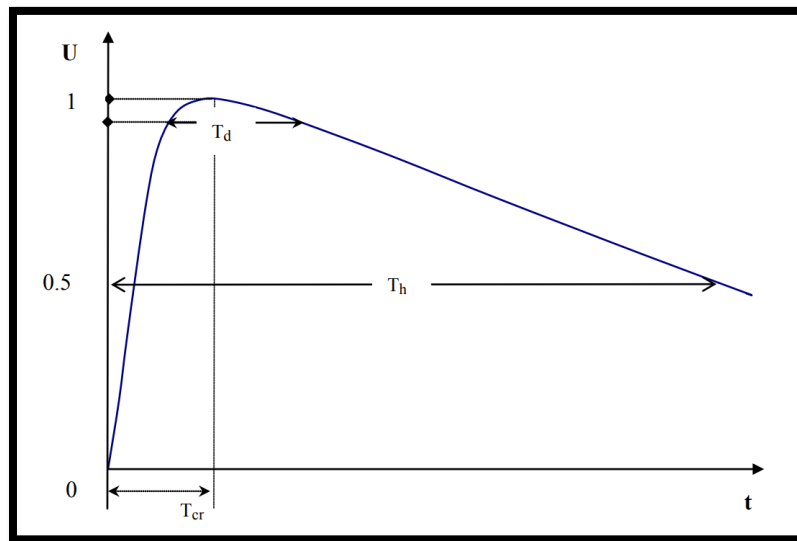


Figure I.10 : Onde de choc de manœuvre normalisée 250/2500µs.

$T_{cr}=250 \pm 50 \mu s$; $T_h=2500 \pm 1500 \mu s$ (durée jusqu'à la mi-amplitude)

I.5.3. Surtensions externes d'origine atmosphérique :

Dans le monde, entre 2000 et 5000 orages sont constamment en formation. Ces orages sont accompagnés de coups de foudre qui constituent un sérieux risque pour les personnes et les équipements électriques. Les foudres frappent le sol à la moyenne de 30 à 100 coups par seconde, soit 3 milliards de coups de foudre chaque année dans le monde. Comme il peut être constaté, 50% des coups de foudre sont d'intensité supérieure à 33 kA et 5% d'intensité supérieure à 65 kA. L'énergie transportée par le coup de foudre est donc très élevée [6].

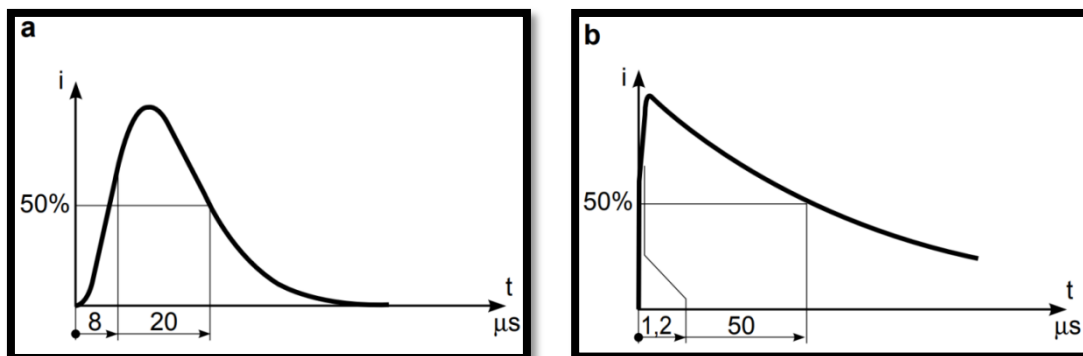


Figure I.11 : formes des ondes de foudre normalisées.

a- onde 8/20 µs dite de courant / **b-** onde 1,2/50 µs dite de tension.

I.5.3.1. Impacts des coups de foudre :

- **Le coup de foudre direct :**

Dans le domaine de l'électrotechnique, le coup de foudre «direct» est celui qui atteint directement les installations électriques (lignes aériennes, postes, ...).

Son énergie est importante puisque 50 % des coups de foudre dépassent 25 kA crête et 1% sont au-delà de 180 kA. La raideur de ces décharges peut atteindre 100 kA/ μ s. De plus, un coup de foudre est rarement unique, plusieurs impulsions (décharges) séparées de dizaines de millisecondes sont détectables (**Figure I.12**)

Les effets destructeurs d'un coup de foudre direct sont bien connus électrocution d'êtres vivants, fusion de composants si ce n'est incendie des bâtiments [6].

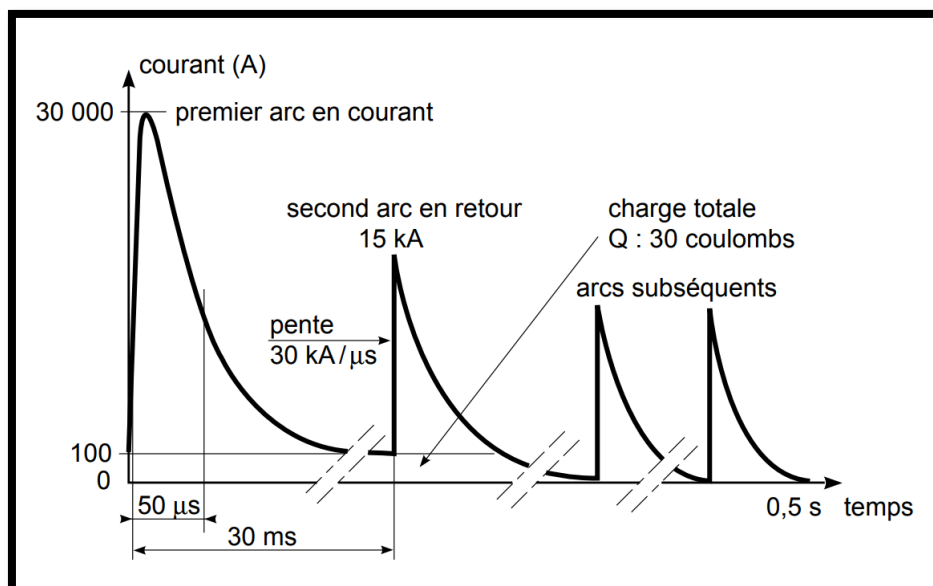


Figure I.12 : forme des courants de foudre.

- **Le coup de foudre indirect :**

C'est la manifestation à distance d'un coup de foudre direct.

Ses effets sont ici abordés selon trois aspects : les surtensions conduites, l'élévation du potentiel de terre, et le rayonnement [7].

Une élévation du potentiel de terre a lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre (**Figure I.13**).

Ainsi à une distance donnée D du point d'impact de la foudre, le potentiel U s'exprime par l'équation

$$U = \frac{0,2 \cdot I \cdot \rho s}{D} \quad \text{I.15}$$

I : courant de foudre
ρs : résistivité du sol

En appliquant cette formule au cas de la **Figure I.13** avec

$I = 20 \text{ kA}$,
 $\rho s = 1\,000 \text{ Ohm.m}$,
 Distance au point neutre = 100 m,
 Distance au point de l'installation = 50 m,

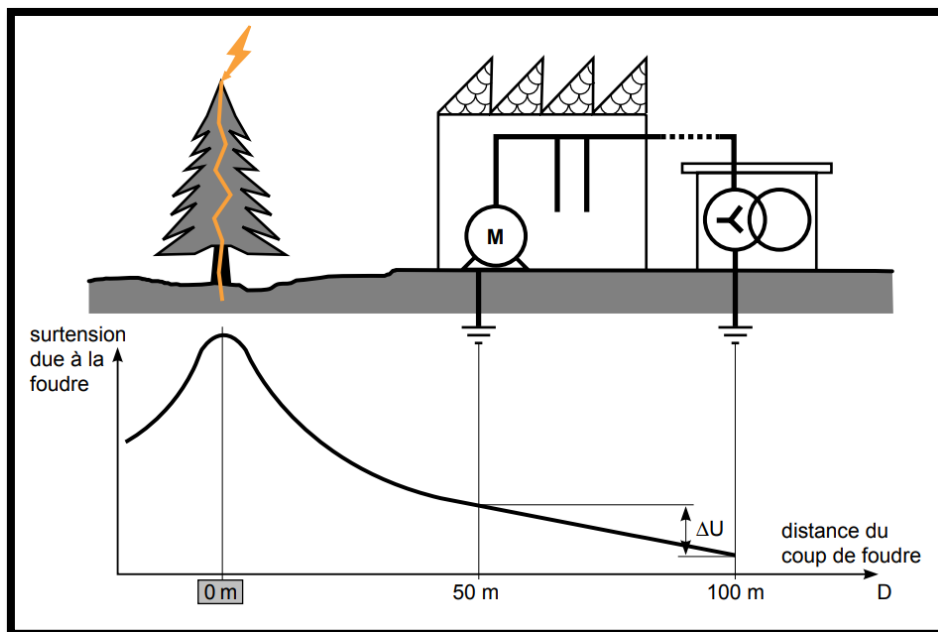


Figure I.13 : les montées et différences de potentiel des terres d'une installation électrique.

I.5.3.2. Les effets de la foudre :

La foudre étant une agression naturelle, peut causer des dégâts soit d'ordre direct lié aux risques dus au point d'impact et l'évacuation de l'énergie de la foudre, soit d'ordre indirect dus à la circulation d'un courant de grande amplitude ou au rayonnement électromagnétique de l'éclair qui, par conduction ou induction, va venir perturber le bon fonctionnement des réseaux électrique [6].

Ces effets, qui concernent donc tous les niveaux de tension, sont :

- thermiques (fusion d'éléments, incendies, explosions).
- mécaniques, dus aux efforts électrodynamiques des conducteurs parallèles proches.

Entrainant un choc diélectrique, suite aux montées en potentiel lors de la propagation d'onde à travers les impédances présentées par les conducteurs qui engendrent les effets suivants :

- de perte d'isolement par contournement de l'isolateur d'une phase entraînant un «courant de suite» à la terre à fréquence industrielle.
- d'élévation de potentiel de terre : il est usuel d'atteindre des potentiels de plusieurs centaines de kV au puits de terre de l'équipement HT concerné. La loi de variation, fonction de la distance à la prise de terre, est approximativement hyperbolique, d'où des potentiels, et leurs gradients associés, très grands à proximité des puits de terre, même à plusieurs dizaines de mètres.
- électromagnétiques à haute fréquence (spectre très large) : rayonnement parasite, induction et couplage de circuits.
- également électrochimiques, acoustiques et physiologiques.

I.5.4. Surtensions par décharges électrostatiques :

Dans un milieu très sec, il est fréquent qu'un être humain chargé électro statiquement par frottement (notamment sur une moquette synthétique) atteigne une tension de plusieurs dizaines de kilovolts. Sa décharge est un courant impulsionnel de quelques dizaines d'ampères. Des perforations de composants électroniques ont été observées suite à ces décharges dont les fronts de montée sont très raides (quelques nanosecondes au maximum).

En effet, si la plupart des surtensions induites sont d'origine électromagnétique, certaines sont d'origine électrostatique et intéressent particulièrement les réseaux isolés de la terre. Par exemple, durant les minutes qui précèdent un coup de foudre, lorsqu'un nuage chargé à un certain potentiel se trouve au-dessus d'une ligne, celle-ci prend une charge de sens contraire (**Figure I.14**).

Avant que ne se produise le coup de foudre, qui permet la décharge du nuage, il existe donc entre la ligne et le sol un champ électrique E pouvant atteindre 30 kV/m sous l'effet duquel se charge le condensateur ligne/terre à un potentiel de l'ordre de 150 à 500 kV selon la hauteur de la ligne par rapport au sol. Il en résulte des risques de claquages peu énergétiques au niveau des composants, les moins bien isolés, du réseau. Lors de l'amorçage entre le nuage et la terre, le champ électrique ayant disparu, les capacités se déchargent [8].

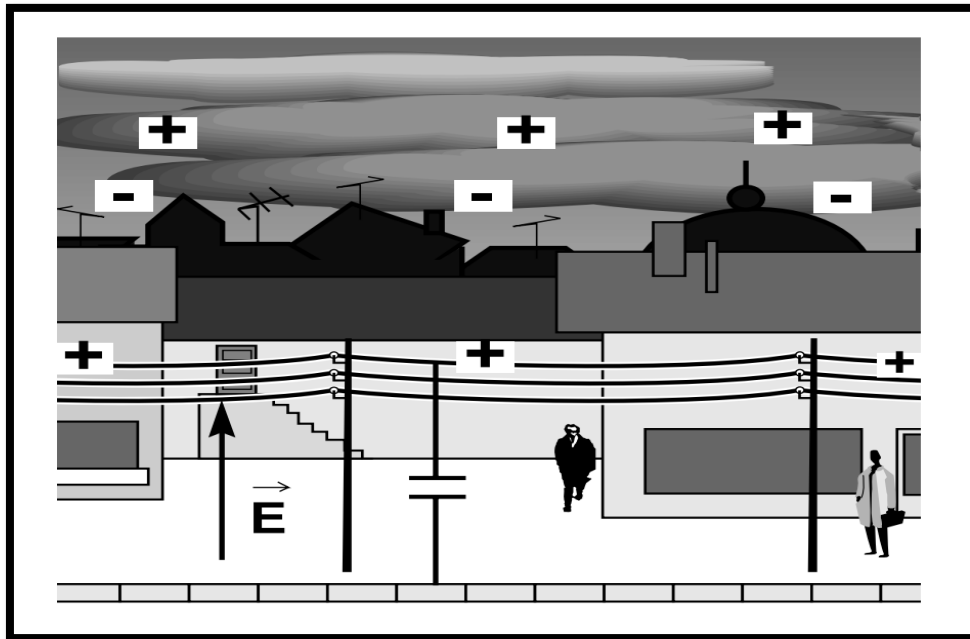


Figure I.14 : origine d'une surtension électrostatique.

I.6. Conclusion :

L'aspect statistique du comportement aux surtensions en général et aux surtensions transitoires de foudre interdit à prétendre à des solutions absolues.

La connaissance des différents types de surtensions internes et externes et le mode de leurs propagations, nous permet de prévoir des recommandations et d'assurer la continuité de services en ajoutant des moyens de protection adéquats.

A l'issue de ce qui précède nous avons mis en évidence l'origine des surtensions, leurs classifications ainsi que les problèmes posés par leur présence dans les installations de production et de distribution d'énergie électrique.

Comme on a analysé les effets néfastes des surtensions électriques en devons prévoir une isolation conséquente c'est pour cette raison qu'on va décrire les différents matériaux diélectriques.



Chapitre II: Etude Des Matériaux Electriques

II.1 Introduction :

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée :

De l'ordre de 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$ car ils contiennent très peu d'électrons libres.

Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande.

Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue.

Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif.

Les isolants sont utilisés pour :

- assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés → protection des personnes et des équipements ;
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur ;

Dans les réseaux de transport d'énergie électrique, l'isolement pylône-conducteur est assuré par une chaîne d'isolateurs. Chaque chaîne est caractérisée principalement par sa longueur de fuite (nombre d'éléments). Cette longueur est adéquate au niveau de tension de service.

L'isolateur est un matériau isolant solide, capable de résister à la contrainte électrique.

Il est caractérisé par une grande impédance au passage du courant électrique. Son rôle des isolateurs est de relier les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique.

Dans ce chapitre, nous allons parler sur les types des isolateurs et les matériaux utilisés dans la fabrication.

II.2. Quelques définitions des isolants:**II.2.1. Courant de fuite critique:**

C'est le courant minimum qui provoque une dérivation lorsque l'isolant est contaminé à une tension donnée. Cela n'a rien à voir avec le processus de test et la forme de l'isolant.

II.2.2. Tension de tenue (tension d'essai):

C'est le niveau de tension le plus élevé qu'un isolant peut supporter sans provoquer de décharge destructrice (contournement dans le cas d'un isolant).

La tension d'essai ou de tenue est définie par les réglementations nationales ou internationales et autorisée isoler correctement.

II.2.3. contournement :

La décharge destructive de ce dernier (dans le cas des isolateurs) est contournée le long de la piste de la surface solide. Le terme contournement est utilisé pour perturber la décharge initiale dans l'air entourant l'isolant.

II.2.4. Contrainte de contournement :

La contrainte de contournement d'un isolant est le rapport de la tension de contournement à la longueur totale de l'isolant.

II.2.5. Tension de contournement :

La tension de contournement est le niveau de tension le plus bas auquel tous les arcs lubrifient les deux électrodes. La tension de contournement dépend de:

- La résistivité volumique moyenne de la pollution.
- La répartition de la couche de pollution.
- La longueur de l'isolant.
- Le profil de l'isolant.

II.2.6. Courant de fuite :

C'est un courant de faible amplitude qui traverse la couche de pollution le long de la surface de l'isolant et, lorsqu'il est proche de la tension de contournement, sa force devient très importante. Cela dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature de la couche de pollution et la longueur de la ligne de fuite. Dans des conditions d'humidité élevée, la dissolution du sel contenu dans la couche contaminée peut conduire à la formation d'une couche d'électrolyte.

II.3. Les isolateurs :**II.3.1. Définition des isolateurs de haute tension :**

Le nom de l'isolant implique l'isolement entre deux ou deux objets Les pièces ont des tensions différentes pour éviter les courts-circuits, les coupures de courant et la charge par choc électrique. Les isolants sont des matériaux solides, liquides ou gazeux qui présentent une résistance élevée au passage du courant et leur conductivité électrique est pratiquement nulle [12].

II.3.2. Fonctionnement et constitution d'un isolateur :

Les isolateurs sont une partie importante de la transmission et de la distribution d'énergie. Leur fonction est de réaliser la connexion mécanique entre les conducteurs, de maintenir inchangés les différents potentiels connectés à la tour de câbles aériens, de maintenir les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), et d'assurer la

transition entre l'intérieur (huile, SF6) et l'extérieur. L'isolation de l'isolant, Utilisés pour connecter les équipements électriques au réseau (traversée du transformateur, extrémité de câble), ils forment également la coque de certains équipements (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèle ayant des comportements différents [12].

- l'intervalle d'air.
- le matériau diélectrique.
- l'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite, ligne le long de laquelle circulerait le courant de fuite).

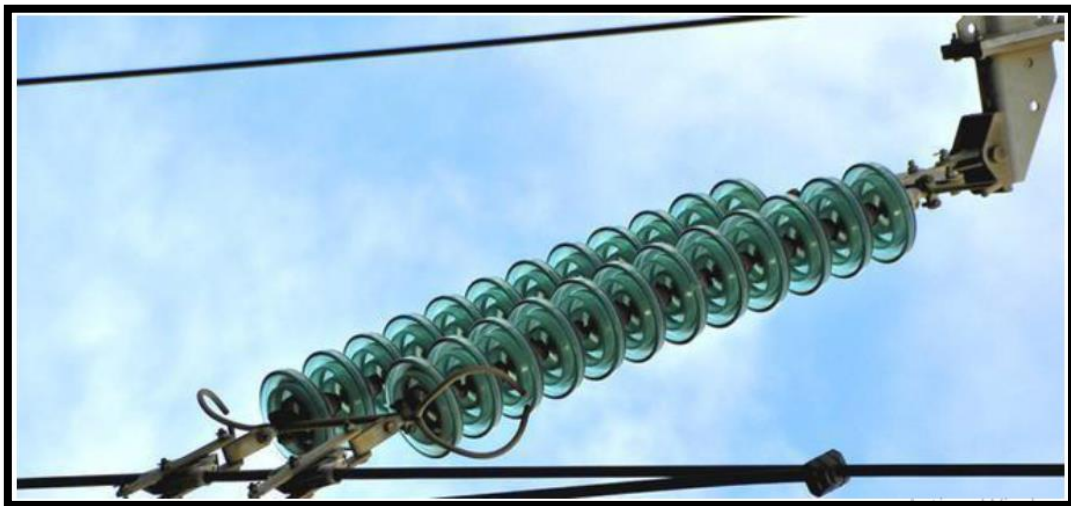


Figure II.1 : Isolateur en chaînes de haute tension

II.3.3. Caractéristiques d'un isolateur :

Parmi les valeurs spécifiées dans les normes d'essais d'isolateurs, nous pouvons citer :

- **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 Lf** : 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 Lc** : C'est la distance la plus courte dans l'air entre deux parties conductrices [12].

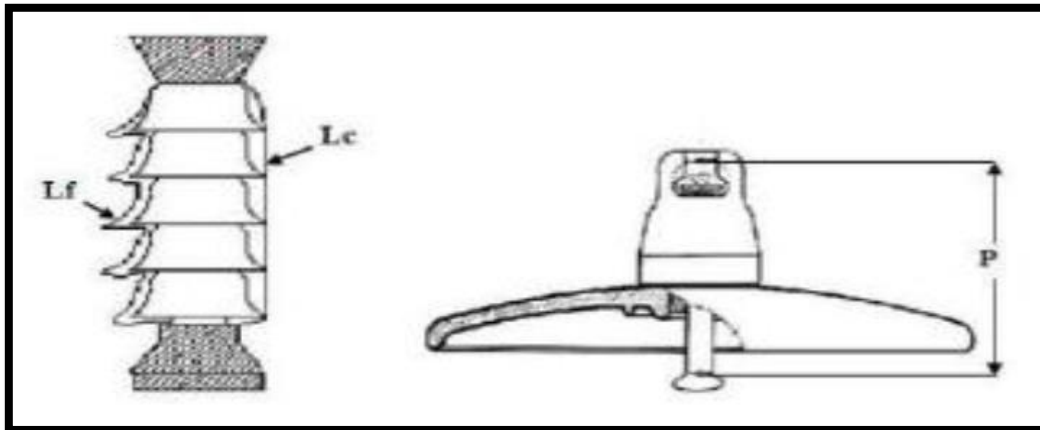


Figure II.2 Les caractéristiques d'un isolateur

II.4. Caractéristique diélectrique :

II.4.1. Permittivité relative :

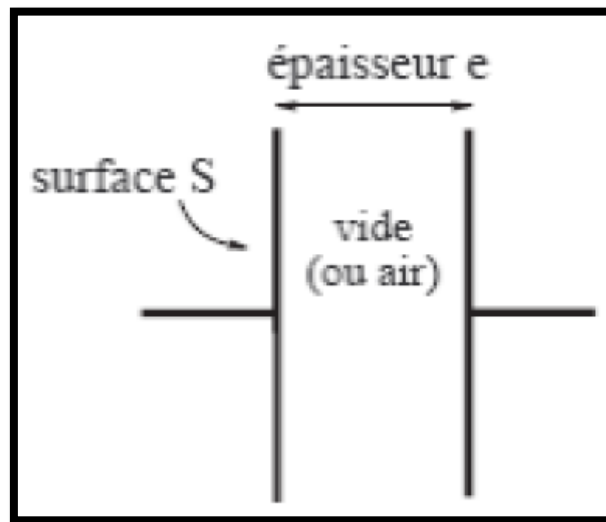


Figure II.3 Permittivité relative

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :

Sa capacité est :

$$C = \epsilon S/e \tag{II.1}$$

C ou $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$ est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C = C_0 \cdot \epsilon_r = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r S/e \tag{II.2}$$

La permittivité relative est définie par le rapport:

$$\epsilon_r = C/C_0 \quad \text{[II.3]}$$

La permittivité absolue est : $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$

Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$

Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$.

II.4.2. Rigidité diélectrique :

Si la tension sur l'isolant est augmentée à une valeur qui dépasse la tension de claquage, un arc apparaîtra dans l'isolant: le long du chemin formé par l'arc sur l'isolant, un fort courant traverse l'isolant. Dans ce cas, la couche isolante est percée: le claquage diélectrique ou le claquage destruction de l'isolant est irréversible pour les isolants solides (carbonisation), et réversible pour les isolants gazeux et liquides (combinaison d'ions avec d'électrons).

En ce qui concerne la position relative de la direction du champ électrique et de la surface principale de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La rigidité diélectrique dépend de:

- La fréquence, la forme et la durée de la tension appliquée;
- La température, la pression et l'humidité de l'atmosphère;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...)

Cependant, La rigidité diélectrique C'est la propriété d'un diélectrique de s'opposer à la décharge disruptive. Si on augmente progressivement la tension entre les deux armatures de condensateur jusqu'à une certaine valeur (tension disruptive); il se produit une décharge entre ces deux armatures avec l'apparition d'une étincelle (arc électrique). Numériquement, la rigidité diélectrique est le rapport entre le potentiel appliqué et la distance entre les électrodes au moment où la rupture s'effectue.

$$E = U/d \quad \text{(II.4)}$$

II.4.3. Résistivité diélectrique :

Sous l'action du champ électrique, toutes les charges commencent à se déplacer. Dans les diélectriques, ce mouvement est un courant électrique, bien que la quantité de charges libres soit très faible, leur mouvement constitue un courant de fuite.

Ce dernier a deux chemins possibles: il traverse le diélectrique lui-même, ou il traverse la surface du diélectrique. Nous aurons donc un courant de fuite surfacique et un autre volumique. Chacun d'eux développe une résistance surfacique (RS) et une autre volumique (Rv).

II.4.4. Conductivité électriques :

La conductivité électrique est la capacité d'un matériau à laisse passer et conduire le courant électrique, comme la plupart métaux et les solutions chargées en ions.

II.4.5. Circuit équivalent d'un isolateur en courant alternatif

Un isolant placé entre deux conducteurs peut être modélisé de manière simplifiée par le circuit équivalent :

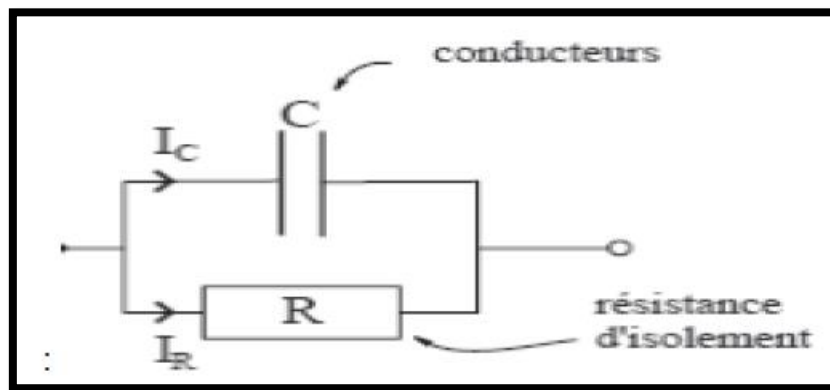


Figure II.4 Circuit équivalent d'un isolateur en courant alternatif

C représente la capacité entre les deux conducteurs et la résistance R est la résistance d'isolement de l'isolant, elle est toujours $\geq 10^{12} \Omega$.

II.4.6. Les pertes diélectriques :

Ce sont l'énergie dissipée dans le diélectrique en unités de volume sous l'action d'un champ électrique. Ces pertes entraîneront un échauffement du diélectrique et peuvent provoquer des dommages thermiques. Si nous appliquons une tension entre les plaques d'un condensateur avec un constant diélectrique parfait, nous constaterons que le courant est déphasé de 90° avec la tension. Si un isolant industriel est utilisé à la place d'un diélectrique idéal, le courant et la tension seront déphasés d'un angle (ϕ) inférieur à 90° , entraînant ainsi une perte d'énergie proportionnelle à la tangente (δ) de l'angle. La différence entre 90° et l'angle de phase (ϕ) entre le courant et la tension s'appelle l'angle de perte diélectrique, qui est un schéma équivalent.

II.4.7 Calcul de l'angle de pertes diélectriques

L'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite I traversant l'isolant :

On a :

La valeur $\tan \delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique.

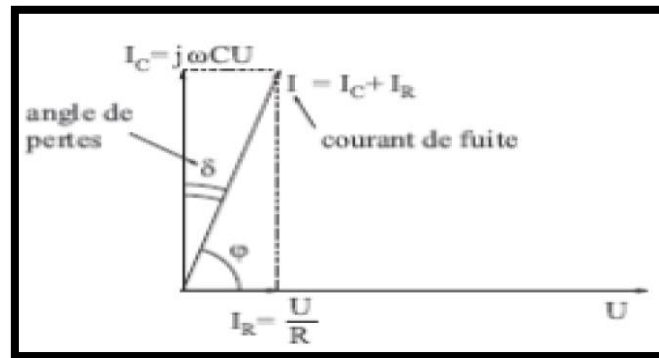


Figure II.5 : l'angle de pertes diélectriques

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- bon isolant → résistance d'isolement R élevée δ faible ;
- mauvais isolant → R faible δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4} .

II.5. Claquage diélectrique :

La rigidité diélectrique est l'une des principales caractéristiques des matériaux isolants.

L'intensité du champ électrique sous laquelle le diélectrique peut travailler ne doit pas dépasser un certain seuil. Sinon, le diélectrique sera percé d'étincelles et perdra ses propriétés isolantes, car sa résistance chutera brusquement, et les parties conductrices précédemment séparées par l'isolant se court-circuiteront: il s'agit d'un claquage diélectrique.

Il existe trois types de claquage :

- Claquage électrique.
- Claquage électrochimique
- Claquage thermique

Chaque type de claquage peut se produire sur le même diélectrique.

II.5.1. Claquage électrique.

Elle se caractérise par le développement rapide du processus d'ionisation après le choc électrique, dans lequel les électrons forment une avalanche et forment ainsi un canal de décharge. Cet échec (claquage) est caractérisé par un développement rapide, $t = 0$ à 10 secondes [5].

II.6. Influence de la température sur les isolants :

Une élévation de température contribue à diminuer la durée de vie d'un isolant :

- diminution de la résistance d'isolement (les isolants ont généralement un coefficient de température négatif) ;
- diminution de la rigidité diélectrique ;
- oxydation ;
- ramollissement pouvant atteindre la fusion

II.7. Types d'isolateurs :

Vu les différentes façons d'utilisations et les différentes conditions de fonctionnement des isolateurs, on en distingue des types différents des isolateurs. La différence entre ces types se fait soit par leur fonction (support ou traversée), soit par le matériau isolant utilisé pour la fabrication de ces isolateurs, soit encore par leur profil ou par leur mode de fixation.

II.7.1. 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 entre eux, ils sont fixés aux pylônes par des ferrures de différentes formes. Ils sont montés sur pylônes soit d'une façon verticale, horizontale ou oblique (inclinée). Mais ce type d'isolateurs est utilisé pour les lignes aériennes qui ne dépassent pas le niveau de tension de 60 KV [12].



Figure II.6. Isolateur rigide.

II.7.2. 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. La chaîne d'isolateurs est montée sur le pylône en suspension soit verticalement (chaîne d'alignement), soit d'une façon horizontale (chaîne d'ancrage).

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne :

- L'isolateur capot et tige.
- L'isolateur long fut.

I.7.3. Isolateur long fut :

Il est constitué d'un bâton cylindrique plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques muni d'ailettes. A chaque extrémité il y a une pièce métallique pour les liaisons. Cette extrémité métallique peut se présenter sous deux formes distinctes, soit elle enveloppe

les extrémités tronconiques sur le cylindre, soit en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.



Figure II.7 Isolateur long fut.

II.7.4. Isolateur capot et tige :

Capot et tige est constitué d'un corps isolant qui porte à l'intérieur une tige en acier, où la tête conique de cette tige est scellée dans le matériau isolant soit le verre soit la porcelaine. L'extrémité supérieure de l'isolateur porte un capot scellé en fonte malléable troué de telle sorte qu'on peut faire entrer l'extrémité inférieure de la tige dans ce trou, et le scellement des éléments de chaîne capot et tige se fait de cette façon en faisant pénétrer la partie inférieure de la tige de l'élément supérieur dans le capot de l'élément inférieur en utilisant du ciment [12].

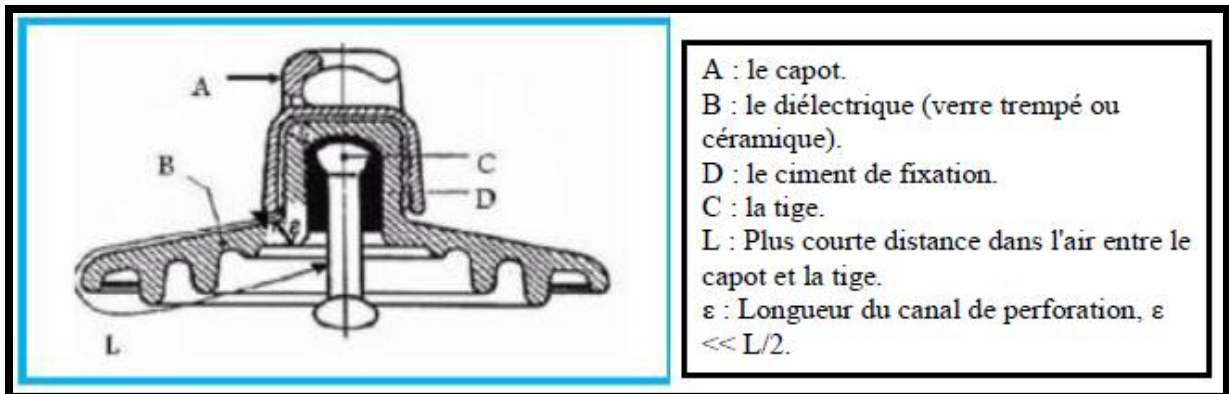


Figure II.8. Isolateur capot et tige

II.7.4.1. Les différents profils de l'isolatrice capot tige :

Afin d'améliorer le fonctionnement des isolateurs dans les régions polluées, la CEI (comité international d'électrotechnique) a proposé plusieurs profils. Nous pouvant citer :

II.7.4.2. Profil standard :

La forme et les dimensions sont en accord avec la normalisation internationale (CEI 305 1978), à cause de leur planéité, les rainures internes bien espacées et la longueur de la ligne de fuite supérieure à la demande standard. Ce type est très utilisé dans les endroits à pollution moyenne.



Figure II.9. Isolateur capot et tige avec profil standard.

II.7.4.3. Profil antibrouillard (forme A) :

Il est de conception avec un diamètre plus grand que le type de profil standard muni de deux ou trois rainures à grande profondeur. Cette conception permet également un lavage manuel facile si c'est nécessaire et empêche le claquage entre rainures voisines quand il y a une pollution sévère et tout le profil intérieur simplifie la maintenance [12].



Figure II.10. Profil antibrouillard (forme A)

II.7.4.4. Profil antibrouillard (forme B) :

Dans cette conception, l'épaisseur de la rainure extérieure agit comme une barrière contre l'action du brouillard et le dépôt des sels minéraux sur la surface de l'isolateur, empêchant alors la formation d'un électrolyte conducteur sur la surface. Ce type d'isolateur est efficace dans les zones côtières.



Figure II.11. Profil antibrouillard (forme B).

II.7.4.5. Profil sphérique :

La forme sphérique permet une longueur de fuite équivalente à celle l'absence de rainures internes permet un lavage manuel facile et efficace.



Figure II.12. Profil sphérique.

II.7.4.6. Profil plat :

L'élimination complète des rainures internes réduit grandement l'accumulation de pollution sur la surface basse, grâce au courant d'air. Cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques où l'auto lavage est peu fréquente par pluie [12].



Figure II.13. Isolateur capot et tige de profil plat.

II.8. Choix des isolateurs :

Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

Même bien choisie, une isolation n'est jamais à l'abri d'un incident :

- La sévérité de la pollution d'un site peut changer.
- L'apparition d'une nouvelle usine à proximité d'un poste.
- La construction d'un ouvrage routier voisin ou plus simplement, un événement météorologique. Exceptionnel peuvent augmenter, durablement ou temporairement, la pollution d'un site, alors qu'un poste ou une ligne y sont déjà en exploitation.

Le dimensionnement initialement correct des isolateurs peut alors devenir insuffisant et il faut pouvoir protéger les installations existantes contre les nouvelles sources de pollution éventuelles [12].

II.9. Matériaux isolants utilisés pour la fabrication des isolateurs :

On trouve plusieurs isolants solides qui peuvent être utilisés pour la fabrication des isolateurs de haute tension comme le verre, la céramique et la porcelaine. Mais durant ces dernières années.

La porcelaine est de plus en plus abandonnée à cause de deux inconvénients principaux qui sont :

Le poids lourd des isolateurs et la difficulté de détection des amorçages. Ces dernières années on s'intéresse de plus en plus à l'utilisation des isolateurs en matériaux polymères [12].

II.9.1. Céramique :

Le développement et la fabrication des céramiques datent depuis longtemps à cause de leurs performances. Pour les isolateurs qui vont être utilisés dans des lieux où il y a des contraintes mécaniques très importantes, on utilise de préférence des céramiques à grains très fins.

Souvent on trouve les céramiques dans les postes : isolateurs supports, couverture isolante des sectionneurs, des disjoncteurs, des transformateurs de potentiel, des bornes de traversées des transformateurs de puissance.

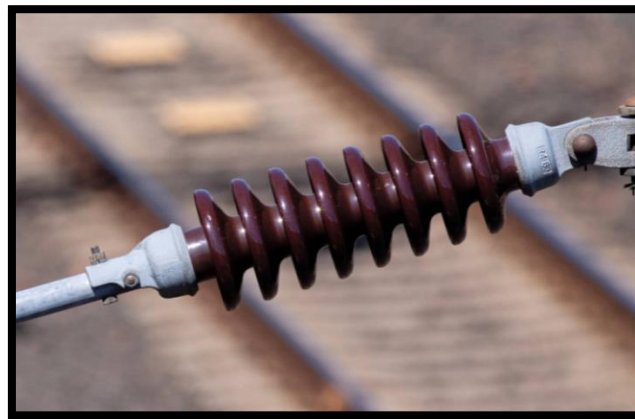


Figure II.14 : Isolateur en céramique.

II.9.2. Le verre :

Outre son bas prix, le verre présente l'avantage de permettre de déceler les défauts par une simple observation. On trouve deux types de verre pour la fabrication des isolateurs : le verre trempé et le verre recuit.

- **Le verre trempé :**

La résistance à la traction du verre trempé est environ 5 à 6 fois plus grande que le verre recuit et peut supporter des variations brusques de température pouvant atteindre 100° C.



Figure II.15: Isolateur en verre trempé.

- **Le verre recuit :**

Le verre recuit est utilisé pour la fabrication d'isolateurs rigides, mais présente cependant des inconvénients. Parmi ces inconvénients, nous citons le fait qu'il ne résiste pas aux variations brusques de température et qu'il ne supporte que des tensions mécaniques relativement faibles et c'est pour cette raison qu'il n'est pas utilisé pour la fabrication des isolateurs de suspension.

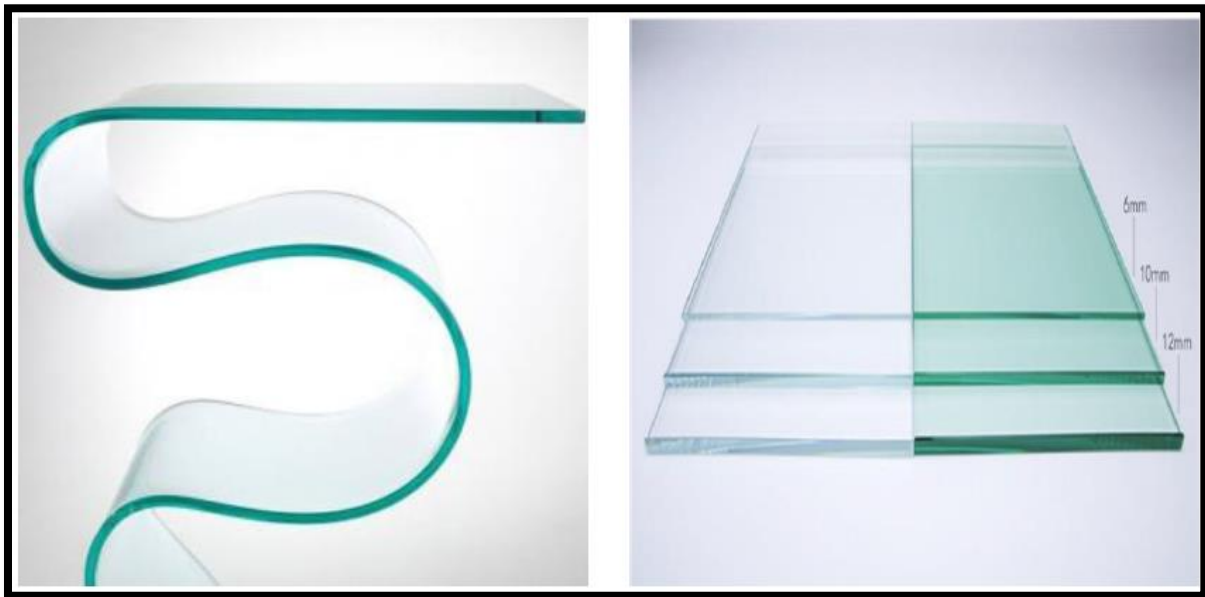


Figure II.16 : Isolateur en verre recuit.

II.9.3. Matériaux synthétiques :

Les isolateurs en matériaux synthétiques sont composés d'un centre en fibres de verre imprégnées d'une résine et d'un revêtement à ailettes de type élastomère. Leur avantage est qu'ils sont légers et présentent une grande résistance mécanique (**Figure I.17**).

Ils ont de bonnes propriétés hydrophobes et peuvent être utilisés dans des conditions de pollution très sévères (**Figure I.18**). L'inconvénient de ces isolateurs est le vieillissement sous l'effet des différentes contraintes auxquelles ils sont soumis (électriques, mécaniques, atmosphériques...) (**Figure I.19**).

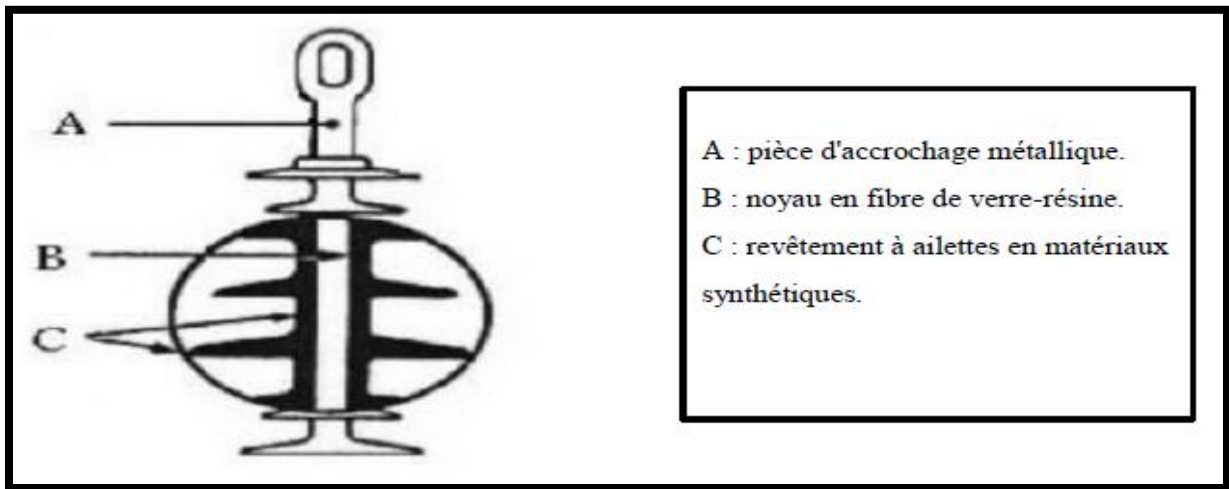


Figure II.17. Isolateur composite.

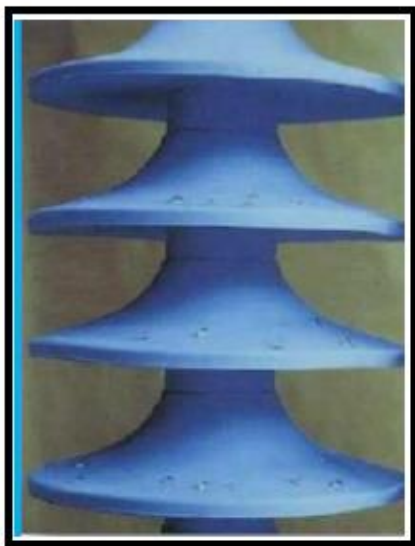


Figure II.18 : La bonne Prospérité hydrophobe.



Figure II.19 : Vieillessement d'un Isolateur composite.

II.10. Défauts des isolateurs :

Les isolateurs composites des générations précédentes ont présenté comme principaux problèmes l'érosion, l'acheminement, la décharge de couronne...etc. Ces problèmes ont été éliminés par le bon choix des matériaux et le développement de nouvelles techniques de fabrication. L'inconvénient des isolateurs composites est la difficulté d'identifier l'isolateur défectueux de l'isolateur sain, d'où la nécessité de développer une méthode de diagnostic pour différencier entre un isolateur défectueux et un isolateur sain.

On peut distinguer deux types de défauts : défauts électriques et défauts mécaniques. Ces deux types de défauts sont mutuellement dépendants [12].

II.10.1. Défauts électriques :

Le vieillissement des isolateurs est causé par les conditions climatiques auxquelles l'isolateur est exposé ainsi que son profil. Un profil qui permet l'accumulation des agents polluants favorise l'apparition des décharges locales menant à l'érosion et par la suite au cheminement. L'effet de couronne est considéré comme agent principal de vieillissement des Isolateurs. Cet effet se caractérise par la réduction de l'hydrophobie, la décoloration de la surface de l'isolateur ainsi que, l'érosion sous l'effet des gaz de décharge.

Les gouttelettes d'eau sur la surface de l'isolateur affectent la distribution du champ sur cette surface (la permittivité relative de l'eau est élevée ce qui augmente l'intensité du champ aux voisinages des gouttelettes).

II.11. Conclusion :

Ce chapitre, nous a permis d'étudier les différents types d'isolateurs selon leurs caractéristiques électriques et mécaniques.

Les isolateurs qui relient les conducteurs aux supports en assurant leur isolation électrique, sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement possèdent les meilleures caractéristiques de résistivité, permittivité et de rigidité.

L'isolation électrique à ses limites ce qui nous oblige ce prévoir des protections contre les surtensions.



Chapitre III: LES
Protection Electrique

III.1. Introduction :

Les systèmes de protection permettent d'éviter les conséquences des incidents qui peuvent être dangereuses pour les personnes et pour le matériel.

Pour cela ils doivent pouvoir :

- Assurer la protection des personnes contre tout danger électrique.
- Limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont soumis le matériel.
- Préserver la stabilité du réseau.

Toutes les protections utilisées contre les surtensions internes et externes consistent à dévier le courant vers la terre. Notons que les perturbations dues aux coups de foudre directs (déclenchement et ré enclenchement des disjoncteurs) sont beaucoup plus fréquentes que les dégâts eux-mêmes dont on a appris à se prémunir [12].

III.2. Modèle structural de principe :

Le schéma suivant représente le principe de base d'un système de protection :

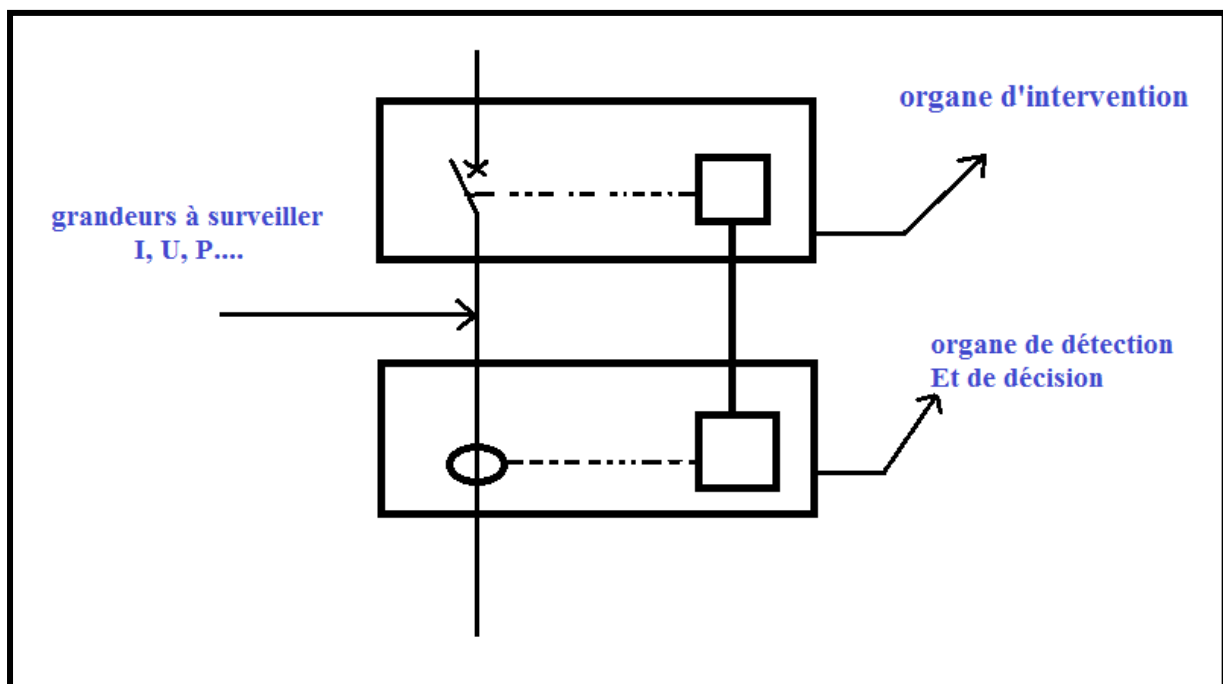


Figure III.1 : Schéma de principe de la protection

III.3. Protection contre les surtensions internes :

III.3.1. Protection à maximum de tension :

Les surtensions sont très dangereuses dans un réseau électrique, cette protection nécessite un relais à maximum de tension, la valeur de déclenchement peut être mise continuellement, et liée à l'intervalle (1.05-1.3).

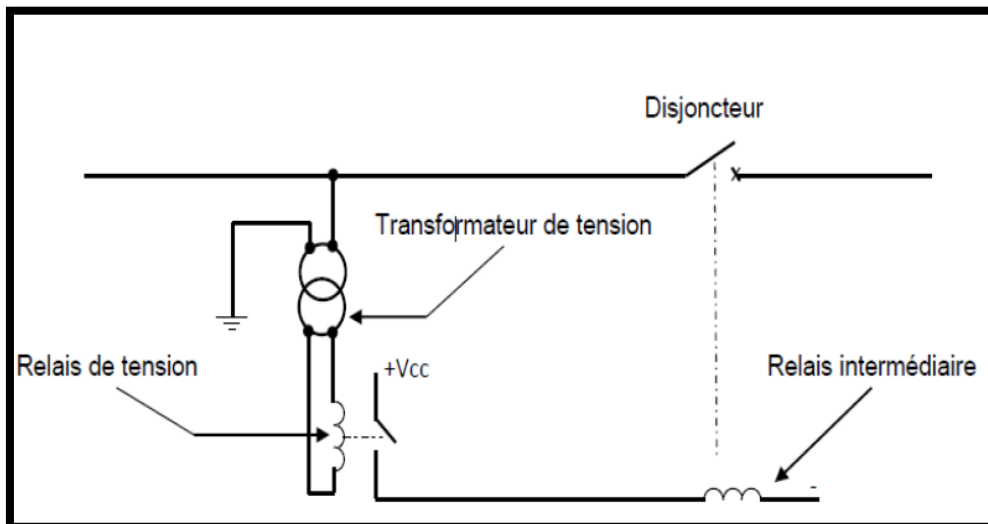


Figure III.2 : Protection à maximum et minimum de tension

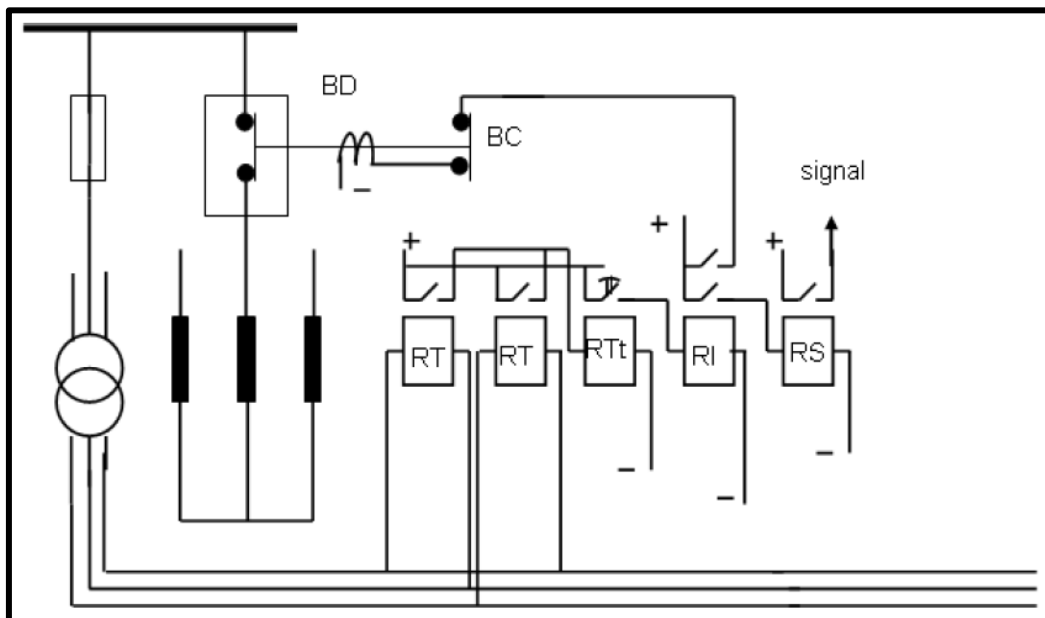


Figure III.3 : Protection contre les surtensions internes

Pendant le régime nominal, la protection ne fonctionne pas. Si la tension augmente et dépasse $U_f(P)$, la protection déclenche le disjoncteur.

$$U_f(p) = (1.5 \div 1.7)U_n \quad \text{III.1}$$

$$t_f(p) = (0.5 \div 1) = \quad \text{III.2}$$

III.3.2. Relais de protection à maximum de tension :

III.3.2.1. Définition :

Le relais est un dispositif à action mécanique ou électrique provoquant le fonctionnement des systèmes qui isolent une certaine zone du réseau en défaut ou actionnant un signal en cas de défaut ou de conditions anormales de marche (alarme, signalisation). Un relais est désigné selon la grandeur surveillée (tension, courant, puissance, fréquence, impédance,) et dans le cas des surtensions internes ont choisis-le :

- Relais à maximum de tension RMV ou TV

III.3.2.2. Transformateurs de tension :

Ils ont le même principe que les transformateurs de puissance, mais les tensions primaires et les tensions secondaires sont en phase.

Ils sont caractérisés par :

- Le rapport de transformation
- La classe de précision
- La puissance d'échauffement

Les bornes sont repérées de telle manière que la tension secondaire soit en phase avec la tension primaire [11].

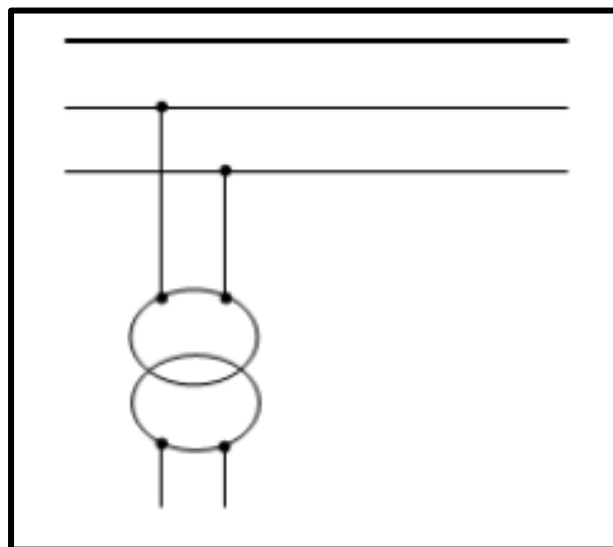


Figure III.4 : Schéma de branchement

III.4. Moyens de protection contre les surtensions externes (la foudre) :

Les dispositifs utilisés pour écrêter, limiter les sur tensions transitoires de forte amplitude, sont câble de gardes, parafoudres, éclateurs et le paratonnerre, Ils sont généralement dimensionnés pour intervenir sur les surtensions de foudre.

III.4.1. Paratonnerre :

Le Paratonnerre est un conducteur relié à la terre qui présente au sommet une forme pointue. Il est placé sur ou près de l'installation à protéger

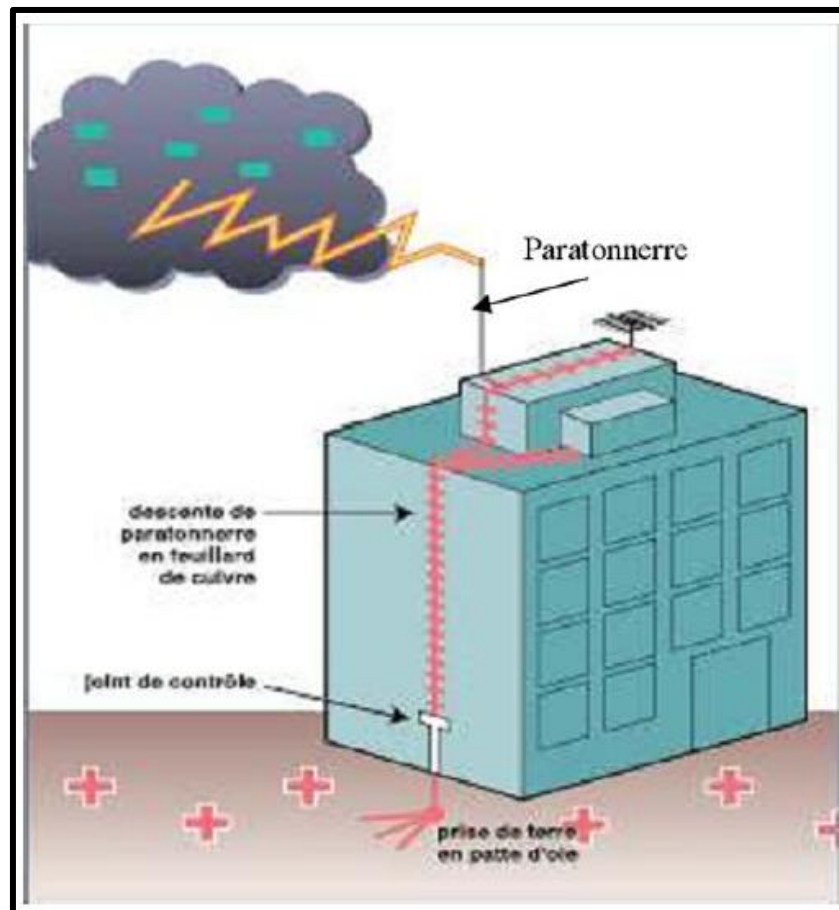


Figure III.5 : protection par paratonnerre à tige.

III.4.1.1. Zones de protection contre la foudre :

Le paratonnerre détourne la foudre vers lui afin de protéger les équipements. Son principe est basé sur la distance d'amorçage ; des tiges effilées sont placées en haut des équipements à protéger, elles sont reliées à la terre par le chemin le plus direct.

Le modèle électro géométrique permet de déterminer la zone à protéger par la méthode de la sphère fictive.

Le point d'impact de la foudre est déterminé par l'objet au sol le plus proche de la distance d'amorçage d du traceur. Tout se passe comme si le traceur était entouré d'une sphère fictive de rayon d se déplaçant à protection, il faut que la sphère fictive roulant sur le sol atteigne le paratonnerre sans toucher les objets à protéger.

De façon approximative, la protection contre les coups de foudre directs est bonne dans un cône dont le sommet est la pointe du paratonnerre et le demi-angle au sommet est α lui.

Pour une bonne ($\alpha = 45^\circ$). [12].

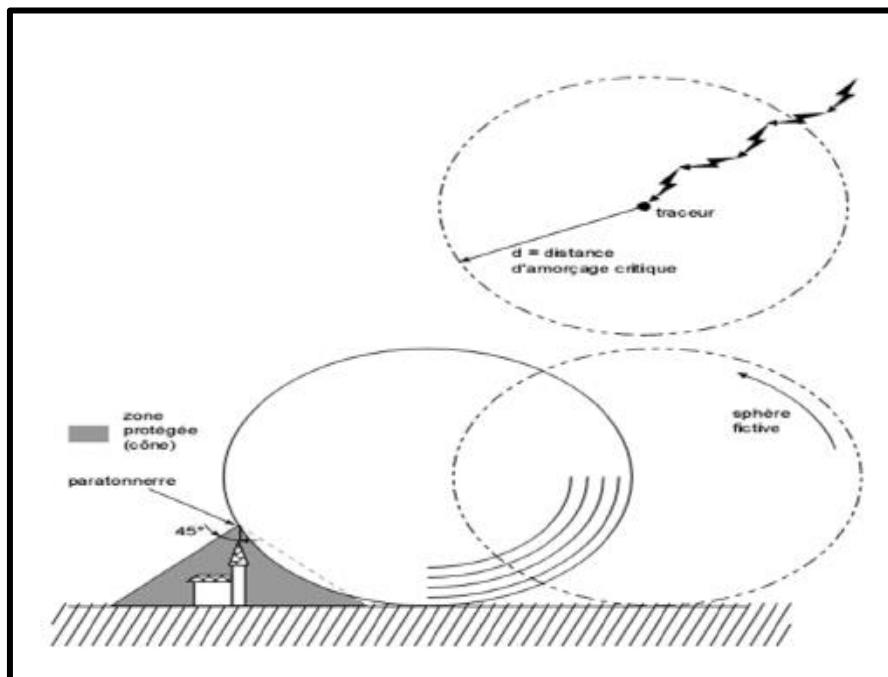


Figure III.6: Détermination d'une zone protégée par la méthode de la « sphère fictive ».

III.4.1.2. Distance critique d'amorçage d_c :

Elle représente la distance de capture (saut final) entre le traceur et le sommet de la tige. Elle est donnée par la formule empirique :

$$d_c = 6.7 * I^{0.8} \quad \text{III.3}$$

I : courant de crête de la foudre.

III.4.2. Câble de garde :

Le câble de garde (ou câble protecteur) est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à un niveau supérieur à ceux – ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône

Le câble de garde, dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de la foudre, joue un certain nombre d'autres rôles parallèles :

- Rôle statique
- Rôle dynamique

a) Rôle statique :

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne placés sous un nuage orageux. Ceci n'est valable que si les conducteurs de phases

sont laissés flottants, ce qui en pratique n'est jamais le cas. En effet, les lignes sont alimentées ou mises à la terre pour des raisons de sécurité.

b) Rôle dynamique :

Les rôles dynamiques du câble de garde sont du type :

- Protection contre l'impact direct de la foudre.
- Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.
- Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension.

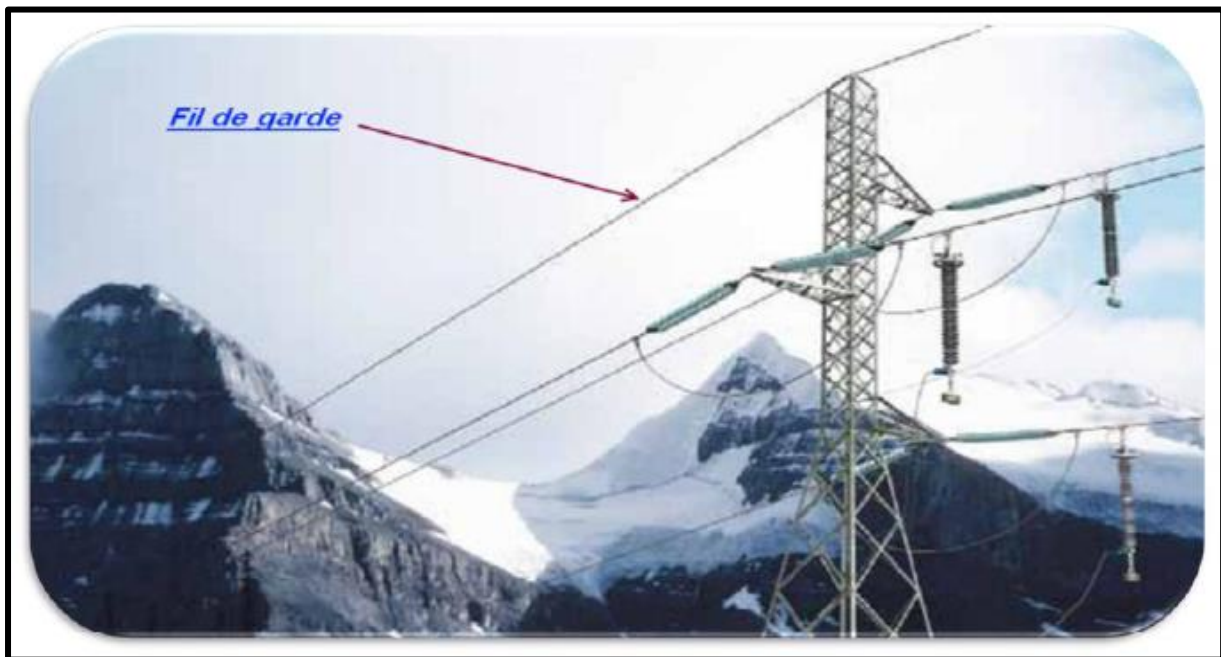


Figure III.7 : câble de garde

III.4.3. Eclateur :

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre.

A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel. [12].

III.4.3.1. Principe de fonctionnement :

Quand l'onde de tension frappe l'installation, la grande surtension qui apparaît aux bornes de l'éclateur produit un arc électrique qui dévie le courant vers la Terre, car le courant choisit le chemin le moins résistant.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans le matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur.

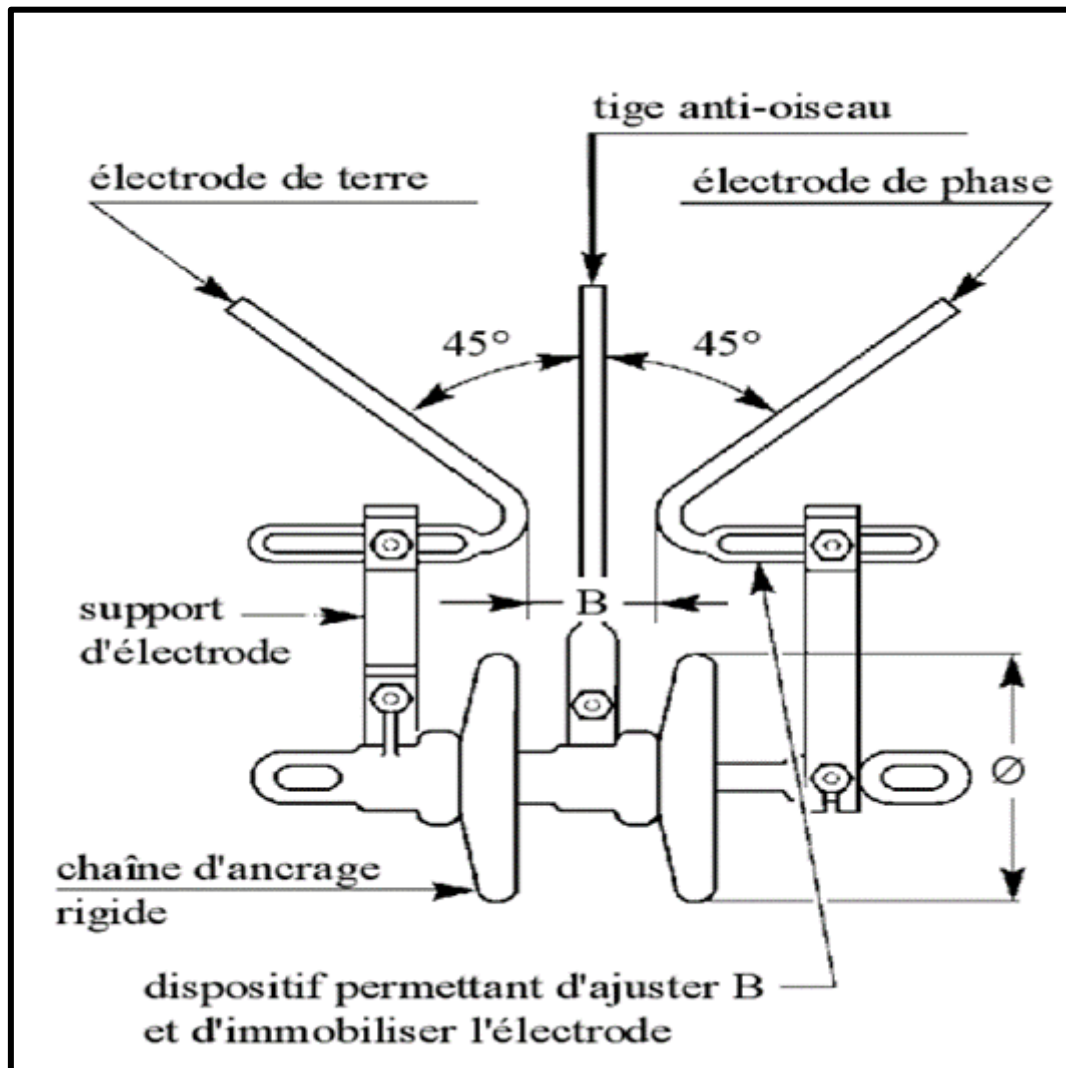


Figure III.8 : Éclateur avec tige anti-oiseaux

➤ **Avantages :**

Les principaux avantages des éclateurs sont :

- 1- Leur faible prix.
- 2- Leur simplicité.
- 3- La possibilité de réglage de la tension d'amorçage.
- 4- Très robuste.

➤ **Inconvénients :**

L'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase-terre à fréquence industrielle en raison du maintien de l'arc, celui-ci dure jusqu'à son élimination par les appareils de coupure (ce court-circuit s'appelle courant de suite).

III.4.4. Les parafoudres :

Pour pallier les inconvénients des éclateurs, différents modèles de parafoudres ont été conçus dans le but d'assurer une meilleure protection des installations et une bonne continuité de service.

Les parafoudres à résistance variable avec éclateur sont les plus répandus dans les installations HT et MT en exploitation depuis quelques années. La tendance Actuelle est vers les parafoudres à oxyde de zinc qui possèdent des performances Meilleures. [12].



Figure III .9 : Le parafoudre

III. 4.4.1 Principe de fonctionnement :

La varistance est une résistance non linéaire ou variable qui chute considérablement lorsque la tension augmente. En fonctionnement normal en l'absence de surtension, la résistance de la varistance est très élevée et empêche le passage du courant de la ligne vers la terre. Par contre, en régime de surtension la résistance chute subitement pour dévier le courant, et donc la surtension, vers la terre.

Quand l'onde de tension arrive par la ligne électrique, le courant de la foudre choisit le chemin le moins résistant, celui de la varistance, et dévie ainsi vers la terre. C'est pratiquement le même principe de fonctionnement que l'éclateur, car dans les deux cas c'est la résistance de l'équipement de protection qui chute :

Pour l'éclateur grâce au claquage, pour la varistance grâce à la résistance non linéaire. [12].

III.4.4.2 Courbe caractéristique « courant-tension » d'une varistance :

On a choisi pour les abscisses une échelle logarithmique par exemple, quand le courant est multiplié par 107, la tension aux bornes de la varistance n'est multipliée que par 2 environ. La résistance est non linéaire et la chute de tension très faible, ce sont là les deux propriétés principales de la varistance.

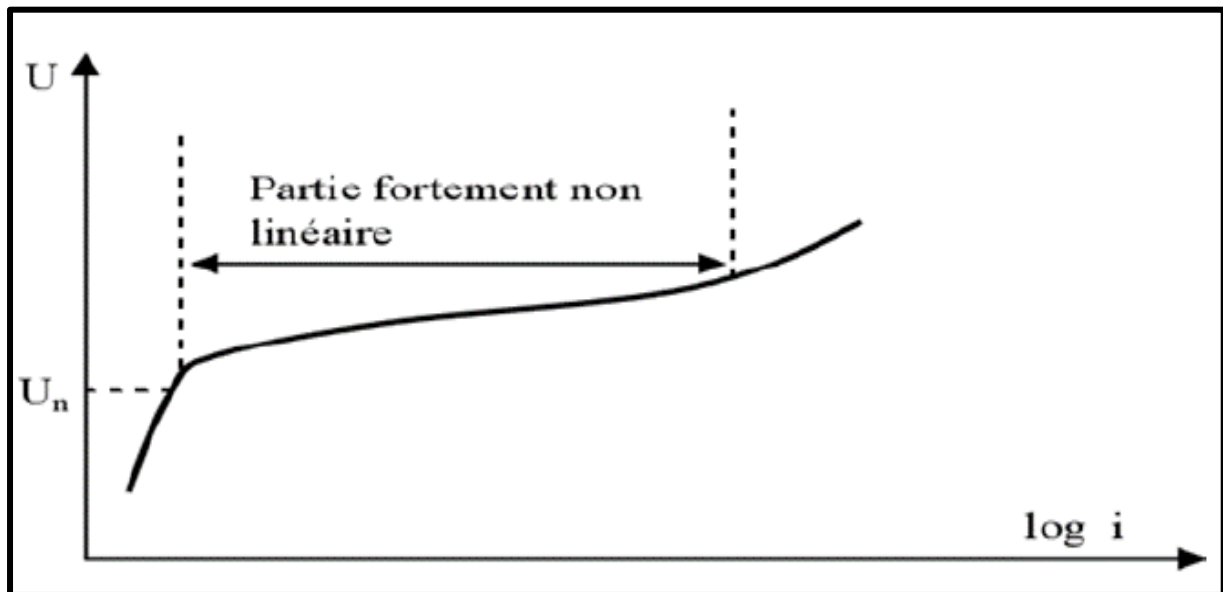


Figure III.10 : Courbe caractéristique courant-tension d'une varistance

III.4.4.3 Caractéristiques :

- Courant de décharge d'un parafoudre
- Onde de courant écoulee par le parafoudre après amorçage des éclateurs série.
- Courant de suite d'un parafoudre
- Courant à fréquence industrielle débité par le réseau et écoulee par le parafoudre après le passage du courant de décharge.
- Tension résiduelle d'un parafoudre
- Tension qui apparaît entre les bornes d'un parafoudre pendant le passage du courant de décharge

a) Parafoudre à résistance variable avec éclateur (Les Parafoudres à SiC) :

➤ Principe de fonctionnement :

Un parafoudre à SiC (carbure de silicium) est constitué par des résistances non linéaires (varistance) au SiC en série avec des éclateurs. Lorsque la tension dépasse le niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et provoquent l'écoulement du courant de décharge à travers les résistances. Lorsque la tension augmente, les valeurs de ces résistances diminuent rapidement et limitent ainsi la surtension.

Une fois la tension revenue à la valeur normale du réseau, le courant est limitée à une faible intensité et peut être facilement interrompu par les éclateurs à son premier passage par zéro. Après écoulement de l'onde de choc à la terre, le parafoudre n'est soumis qu'à la tension du réseau, et le courant de suite se trouve limité par la varistance.

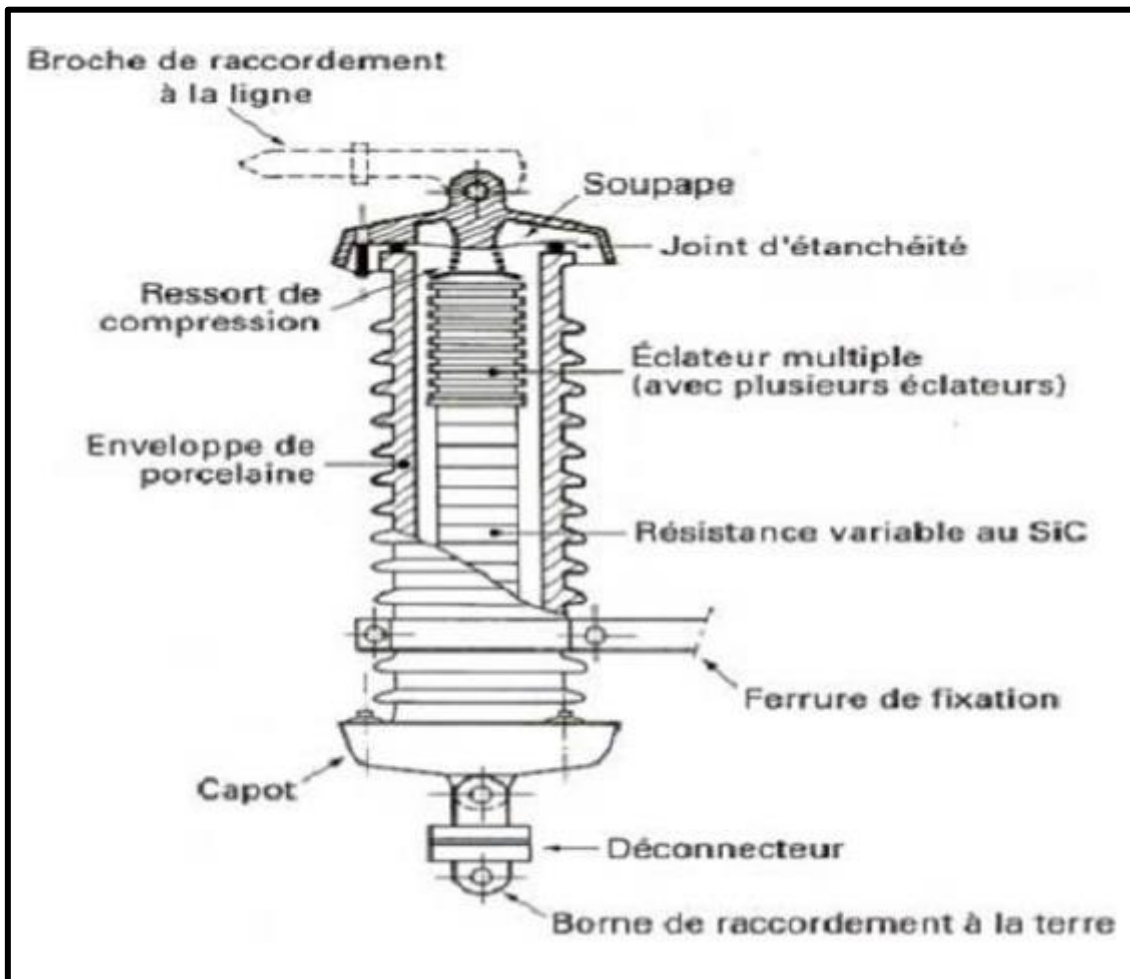


Figure III.11 : structure d'un parafoudre à SiC

➤ **Avantages :**

- Elimination du défaut sans l'intervention des protections.
- La présence des résistances en série avec les éclateurs empêche l'apparition d'un front raide (onde coupée) lors de l'amorçage des éclateurs.
- Les contraintes atmosphériques sont éliminées car l'ensemble est placé dans une enveloppe de porcelaine étanche remplie d'un gaz sec (air ou azote).
- Moins de dispersion de la tension d'amorçage, surtout pour les surtensions à front raide.
- De par sa construction, un parafoudre à SiC peut limiter les surtensions de manœuvre (particulièrement en THT), ce qui se traduit par une diminution du niveau de protection par rapport à celui obtenu avec des éclateurs.

➤ **Inconvénients :**

Les céramiques à SiC supportent très mal un écoulement prolongé de courant. De ce fait, un parafoudre ne doit jamais fonctionner lorsqu'il est soumis à une tension temporaire ; l'énergie qu'il aurait à dissiper provoquerait sa destruction.

- Pour le fonctionnement correct des parafoudres, il faut que la tension appliquée soit uniformément répartie entre les éclateurs. On fait face à ce problème par des systèmes de répartition de tension résistifs ou capacitifs, ce qui fait augmenter le prix de l'appareil et le rend plus complexe et moins fiables.

b) Parafoudre à oxyde de zinc (ZnO) :

C'est au cours des années soixante que des varistances constituées d'une céramique à base d'oxyde de zinc sont apparues sur le marché pour la protection des circuits électroniques. Dès 1970, des constructeurs de parafoudres se sont lancés dans la mise au point de parafoudres utilisant ces céramiques. Pour l'électrotechnicien, ces composants présentent deux avantages essentiels :

- d'une part, ils ont un coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire des parafoudres sans éclateurs.
- d'autre part, leur capacité d'absorption d'énergie est élevée et on peut les utiliser sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'au transport d'énergie à très haute tension (225 ou 400 kV).

➤ **Constitution :**

Ils sont constitués uniquement de varistances et remplacent de plus en plus les parafoudres à résistances variables et éclateurs. (Fig.III.9).

L'absence d'éclateur fait que le parafoudre à ZnO est continuellement conducteur mais, sous la tension nominale du réseau protégé, avec un courant de fuite à la terre très faible (inférieur à 10 mA).

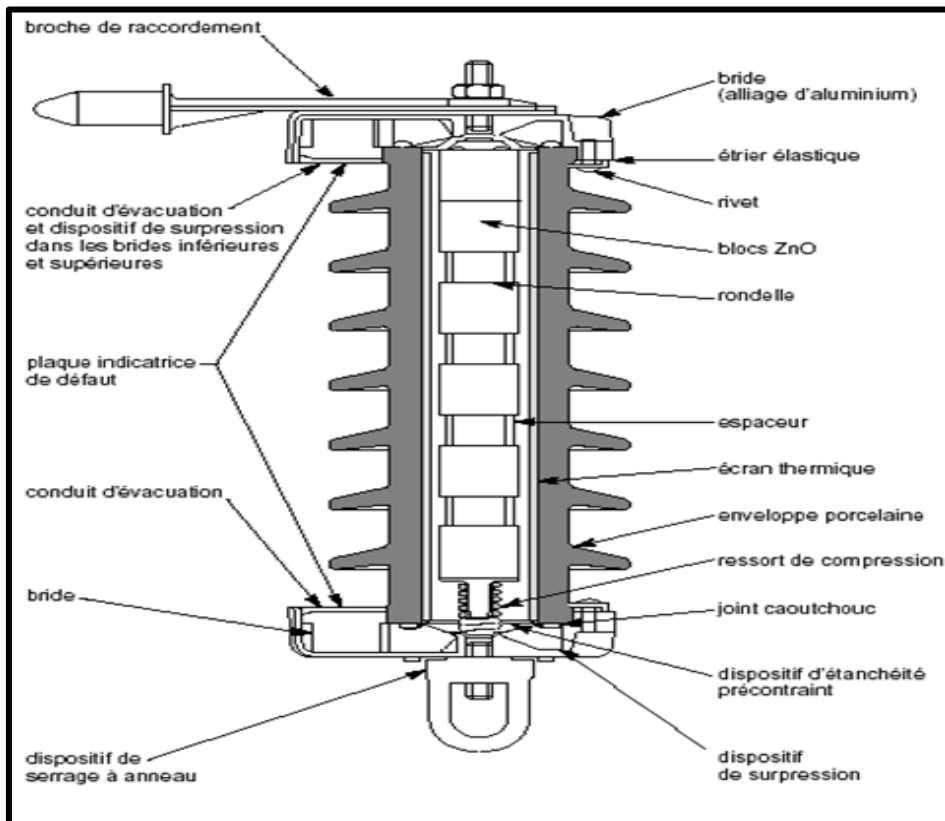


Figure III.12 : Structure d'un parafoudre ZnO en enveloppe porcelaine

➤ **Principe de fonctionnement :**

Tout l'intérêt de la varistance à base d'oxyde de zinc réside dans sa caractéristique courant-tension. Sous la tension de service permanent, son impédance est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît, la résistance diminue rapidement ; elle passe de 1,5 MΩ à la tension de service à 15 Ω pendant la décharge.

La varistance écrête la surtension en lui livrant un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre.

La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de

0,1 mA à 10 kA, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal.

Le fort non linéarité du parafoudre ZnO fait qu'une forte variation de courant provoque une faible variation de tension

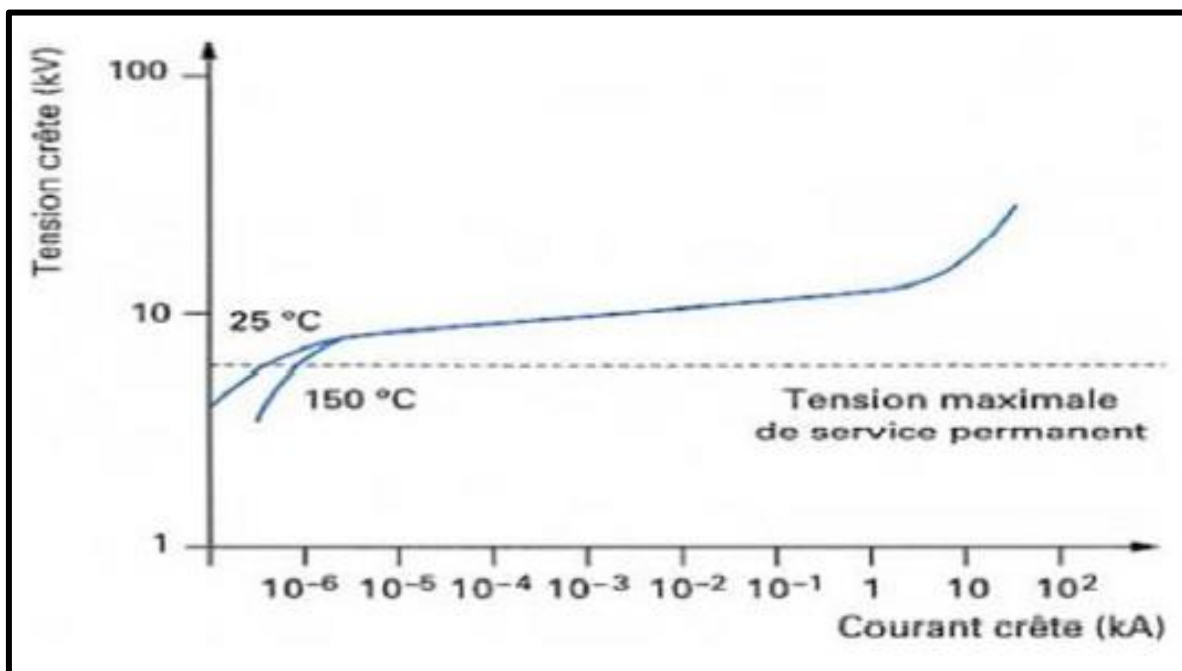


Figure III.13 : Caractéristique typique (courant-tension) d'une varistance à oxyde de zinc

➤ **Niveau de protection :**

Le niveau de protection défini arbitrairement comme la tension résiduelle du parafoudre traversé par une onde de courant donnée ; arbitrairement, en THT, l'onde de courant choisie est bi exponentielle (8/20μs) son amplitude est de 5 KA (valeur de crête) en MT et 10KA en THT.

A ces différents paramètres caractéristiques de la protection offerte par le parafoudre, il y a lieu, lors du choix, de ne pas oublier de vérifier que les contraintes énergétiques qui seront imposées aux parafoudres seront toujours inférieures à sa capacité d'absorption et de dissipation d'énergie. [12].

III.4.4.4. Emplacement des parafoudres :

Les parafoudres seront toujours placés les plus près possible des installations à protéger, ou aux jonctions aéro-souterraines.

Les parafoudres doivent être placés au voisinage des alternateurs et des transformateurs.

En effet, du fait qu'ils présentent une grande impédance, il y aura réflexion et donc augmentation locale de la tension.

La combinaison des ondes peut conduire à des ventres et des nœuds.

Un parafoudre placé à quelques dizaines de mètres peut très bien se trouver dans un nœud et ne jamais amorcer [4].

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous citons les différents types moyens de protection contre les surtensions internes et externes.

Les buts visés par les dispositifs de protection sont multiples :

- participer à la protection des personnes contre les dangers électriques,
- éviter les détériorations de matériel ;
- limiter les contraintes thermiques, diélectriques et mécaniques auxquelles sont soumis ces matériels.
- Préserver la stabilité et la continuité de service du réseau,
- Protéger les installations voisines (par exemple, réduire les tensions induites dans les circuits proches).

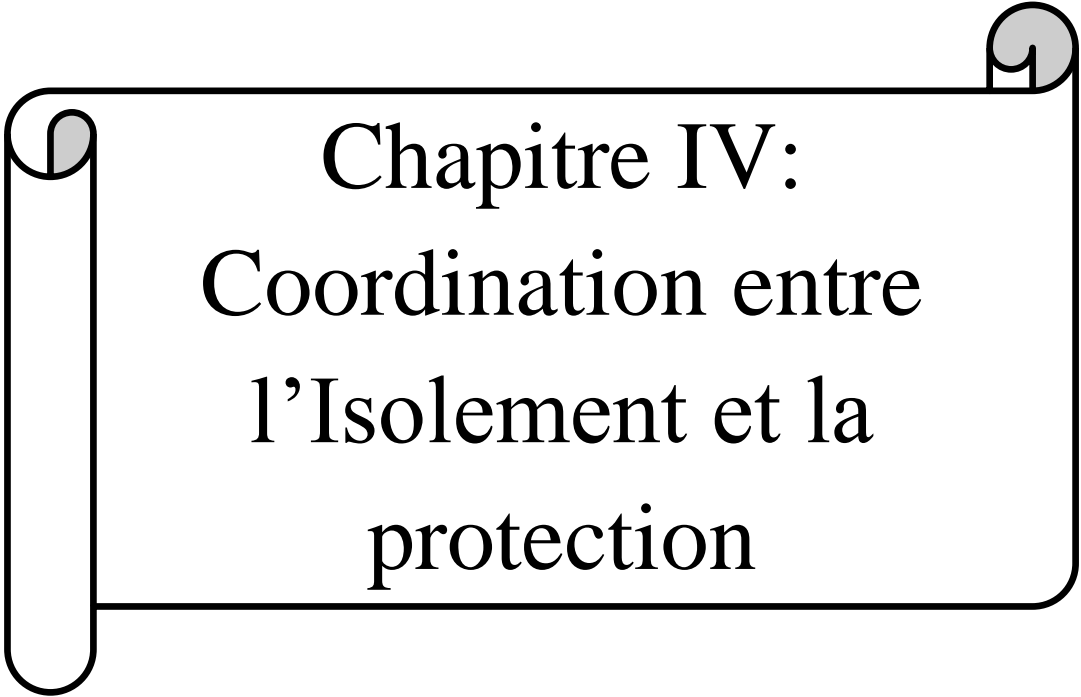
Pour atteindre ces objectifs, un système de protection doit avoir des qualités de rapidité, sélectivité et fiabilité [12].

Cependant, il faut être conscient des limites de la protection : les défauts doivent tout d'abord se produire pour qu'elle agisse.

La protection ne peut donc empêcher les perturbations ; elle ne peut que limiter leurs effets et leur durée.

De plus, le choix d'une protection est souvent un compromis technico-économique entre la sécurité et la disponibilité de l'alimentation en énergie électrique.

Pour assurer une bonne isolation suivie d'une bonne protection, nous devons prévoir une coordination.



Chapitre IV:
Coordination entre
l'Isolement et la
protection

IV.1. Introduction:

La coordination des isolements est une discipline qui permet de réaliser le meilleur compromis technico-économique dans la protection du matériel contre les surtensions pouvant apparaître sur les installations électriques indépendamment de la fréquence mise en jeu.

Ce chapitre discutera la procédure et les méthodes de la coordination entre l'isolement et la protection [13].

IV.2. Procédure de la coordination :

La coordination des isolements a pour objet de déterminer les caractéristiques d'isolation nécessaires et suffisantes des équipements des réseaux électriques et de garantir que le niveau d'isolation des équipements soit supérieur à la tension qui peut apparaître.

Cette dernière est limitée seulement si les dispositifs de protection sont installés. Pris en compte des conditions environnementales et de l'emplacement du poste, la coordination des isolements consiste à mettre en relation les surtensions pouvant apparaître dans le système et les niveaux de protection des parafoudres avec les niveaux d'isolation des équipements. Le niveau d'isolation est défini comme une valeur d'essai pour laquelle l'isolation, dans des conditions spécifiées, prend en charge un certain nombre de décharges électriques sans présentation de défaillance.

Une procédure de coordination des isolements doit prendre en compte les facteurs qui influencent la résistance de l'isolation: la polarité des surtensions, la forme des ondes de surtension, le type d'isolation, les conditions atmosphériques (en cas d'isolation externe) et enfin l'état physique des équipements.

La procédure proposée dans la norme consiste à sélectionner le niveau d'isolation normalisé et à déterminer les distances dans l'air, à partir des tensions représentatives (surtensions) et des facteurs qui influent sur la résistance de l'isolation. La méthode de la coordination des isolements à appliquer dépendra des informations disponibles sur les surtensions. Les sections suivantes détaillent les principes des méthodes de la coordination des isolements et les étapes à suivre dans la procédure proposée par la CEI (Commission électrotechnique internationale) [13].

IV.3. Principe de la coordination :

Étudier la coordination de l'isolement d'une installation électrique c'est donc définir, à partir des niveaux de tensions et surtensions susceptibles d'être présents sur cette installation, un ou des niveaux de protection contre les surtensions. Les matériels de l'installation et les dispositifs de protection sont alors choisis en conséquence.

Le niveau de protection est déduit des conditions :

- d'installation,
- d'environnement,
- d'utilisation du matériel.

L'étude de ces «conditions» permet de déterminer le niveau de surtension qui pourra solliciter le matériel durant son utilisation.

Le choix du niveau d'isolement adapté permettra de s'assurer que, vis-à-vis de la fréquence industrielle et des chocs de manœuvre au moins, ce niveau d'isolement ne sera jamais dépassé.

Vis-à-vis du choc de foudre, un compromis doit généralement être fait entre le niveau d'isolement, le niveau de protection de parafoudres éventuels et le risque de défaillance admissible. Pour bien maîtriser les niveaux de protection apportés par les limiteurs de surtension, il convient de bien connaître leurs caractéristiques et leur comportement; c'est l'objet du chapitre ci-après [9].

IV.4. Coordination des isolements et des protections d'un équipement:

Les critères généraux de la coordination des isolements appliqués individuellement à chaque équipement sont présentés au moyen d'une courbe tension-temps comme le montre la figure IV.1. Les tensions impulsionnelles sont situées dans la partie supérieure de la figure, tandis que les courbes de tension de fréquence industrielle sont situées dans la partie inférieure, dans un ordre correcte pour la coordination des isolements.

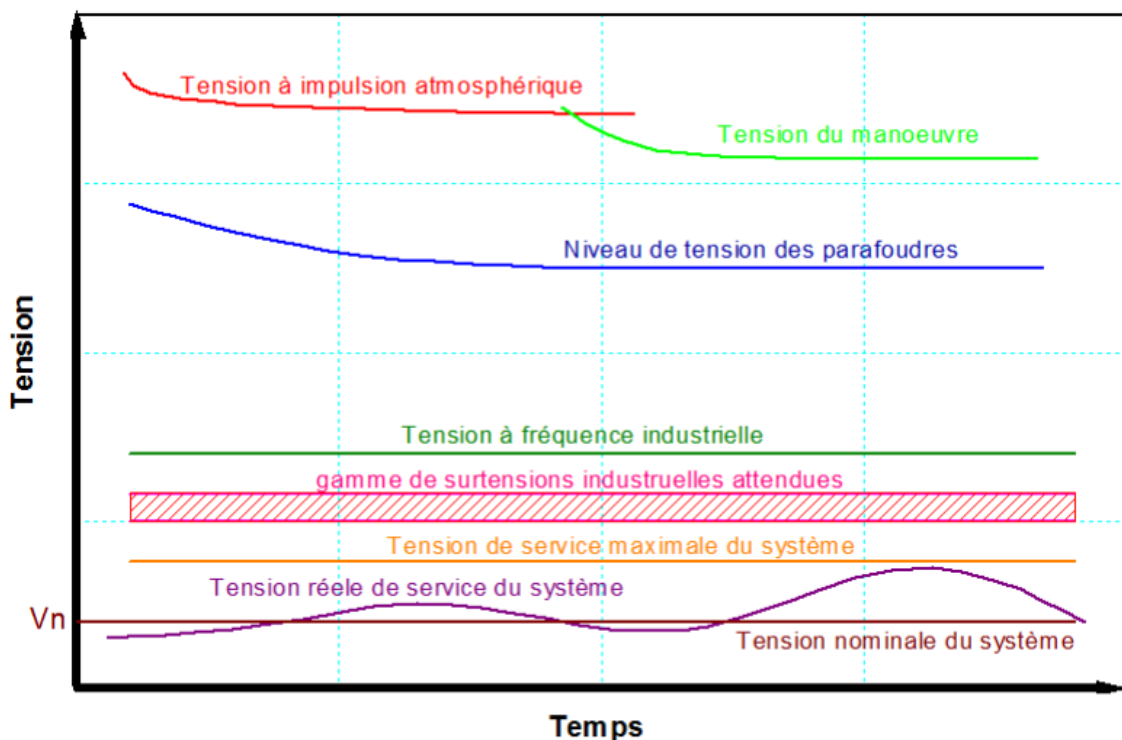


Figure IV.1 Schéma général de la coordination entre l'isolement et la protection

Lors de l'analyse des niveaux d'isolation, une distinction doit être faite entre l'isolation externe et l'isolation interne.

Pour la présente étude, on considérera qu'une isolation externe est auto régénératrice et qu'une isolation interne est automatiquement non auto régénératrice.

Dans le cadre de la coordination des isolements, le critère de l'amélioration de la protection des équipements les plus importants du système sera pris en compte, ce qui, dans le cas des postes, correspond au transformateur de puissance. Pour cela, des parafoudres spécifiques sont nécessaires.

Pour le reste des équipements, il faut vérifier qu'ils s'intègrent bien dans la zone de protection des parafoudres existants. De plus, dans les postes qui contiennent des générateurs, l'utilisation de parafoudres spécifiques pour leur protection doit être définie par des études et des simulations appropriées [13].

IV.5. La coordination d'une installation :

La première étape consiste à déterminer la tension nominale dans les équipements ou dans l'installation à concevoir, en tenant compte des niveaux de protection fournis par les dispositifs de protection installés et de la valeur maximale de la tension du fonctionnement.

- Pour les installations de type I (entre 1 kV et 245 kV), les surtensions temporaires et d'origine atmosphérique sont analysées ;
- Pour les installations de type II (>245 kV), les surtensions à fronts lents et d'origine atmosphérique sont analysées ;

Le niveau d'isolation de base étant choisi, c'est-à-dire le niveau d'isolation attribué dont les tensions supportées normalisées sont associées à la tension de service la plus élevée selon la classification CEI.

Les objectifs d'une étude de la coordination des isolements seront différents en fonction de l'équipement à étudier, du type d'isolation à sélectionner et des surtensions qui influenceront cette sélection [13].

IV.6. Méthodes de la coordination:

Deux méthodes de la coordination, déterministe et statistique, peuvent être distinguées.

L'application de l'une ou de l'autre dépendra des informations disponibles sur le système ou l'installation à étudier et des informations permettant d'estimer les surtensions.

Les surtensions provenant d'un réseau électrique haute tension, principalement causées par des manœuvres et des décharges atmosphériques, ont un caractère statistique et sont généralement caractérisées au moyen d'une fonction de densité de probabilité.

De plus, le comportement de l'isolation dans des conditions normalisées est aléatoire et peut être caractérisé par une distribution statistique normale ou gaussienne. Bien que, dans ce cas, il soit normal d'utiliser la fonction de distribution cumulative, c'est-à-dire, la probabilité que l'isolation se perd lorsque la valeur de l'onde de tension normalisée appliquée dépasse le niveau d'isolement. Cette manière de caractérisation est généralement utilisée lorsque l'isolation est auto-régénératrice, tandis que pour une isolation non auto-régénératrice, on suppose généralement une valeur limite, qui sépare la zone de défaillance de la zone saine.

IV.6.1 : Méthode de la coordination statistique :

La méthode de la coordination statistique peut être appliquée lorsqu'il est possible d'obtenir la fonction de densité de probabilité des surtensions, qui sera utilisée dans la sélection de l'isolation. A partir de la distribution statistique des surtensions et de la fonction de probabilité de défaillance de l'isolation, il est possible d'obtenir risque ou le taux de défaillance d'un dispositif contre un certain type de contrainte diélectrique. Cela permet de sélectionner et de dimensionner l'isolation de manière à ce que le taux de défaillance se situe dans les limites acceptables.

Avec les informations produites d'une étude statistique de la coordination, on pourra penser à faire une étude d'optimisation de l'isolement, reliant le coût de l'énergie non fournie au type de défaillance. En pratique, ces études ne sont pas mises en œuvre du fait de la difficulté d'évaluer les conséquences des défaillances d'isolement pour les différents états de fonctionnement du réseau et de l'incertitude liée à la définition des coûts de l'énergie non fournie. Par conséquent, il est préférable de sur dimensionner le système d'isolation plutôt que de l'optimiser [13].

IV.6.2. Méthode de la coordination déterministe :

La méthode déterministe, également appelée conventionnelle, s'applique lorsqu'il n'est pas possible de connaître la distribution statistique des surtensions à partir de tests ou de simulations. Avec cette méthode, le choix de l'isolation peut être fait de manière à supporter la surtension maximale pouvant être générée, c'est-à-dire une probabilité de 100% de supporter les tensions de test appliquées.

Toutefois, lors de l'application de cette méthode, les taux de défaillances possibles de l'équipement ne sont pas pris comme référence.

En pratique, une distinction est généralement faite entre l'isolation auto régénératrice et l'isolation non auto-régénératrice. La Figure IV.2 montre un organigramme de la procédure de la coordination des isolements.

A partir de là, on peut conclure que la méthode statistique de la coordination des isolements, contrairement à la méthode déterministe, permet d'estimer le taux de défaillance en fonction des facteurs de conception à l'aide de méthodologies plus complexes et des études plus élaborées.

Cependant, un bon nombre des procédures appliquées combinent les deux méthodes. Par exemple, certains facteurs utilisés dans la méthode déterministe ont été dérivés d'expériences statistiques et certaines considérations statistiques peuvent être omises dans la méthode statistique, faisant ainsi d'une méthodologie hybride [13].

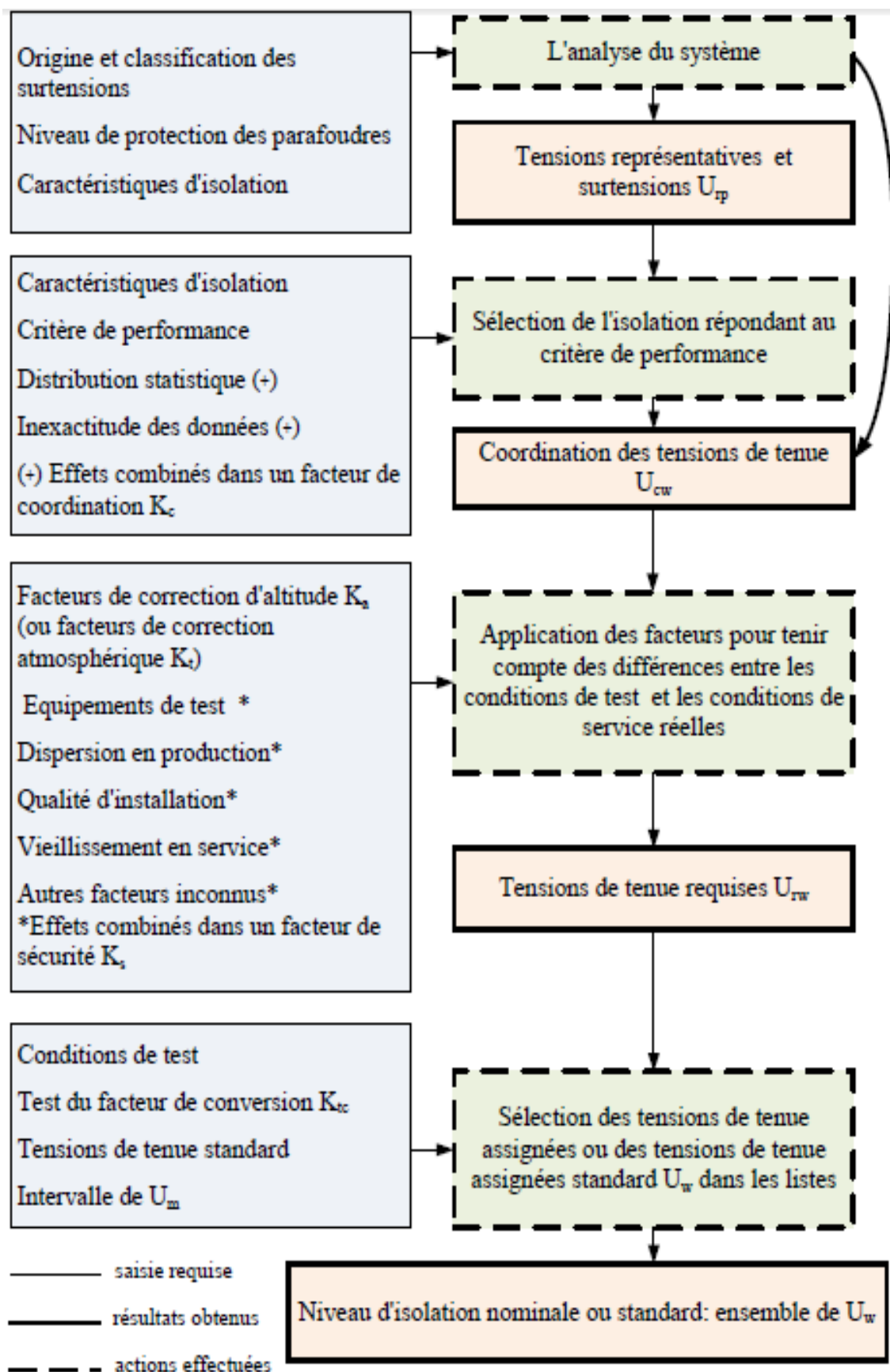


Figure IV.2. Procédure de détermination des niveaux d'isolation standard

IV.7. Conclusion

Ce chapitre a traité les points essentiels pour les études de la coordination des isolements et protections. Le processus de la coordination des isolements permet d'obtenir un ensemble de tensions de tenues qui constituent le niveau d'isolation normalisé à spécifier dans les équipements du poste. Par ailleurs, il a été montré que l'une des difficultés essentielles du processus de la coordination des isolements réside dans le fait que les contraintes des tensions appliquées aux matériels et les tenues diélectriques de ces matériels sont de nature probabiliste; cette double incertitude rend délicat l'ajustement des tenues diélectriques à spécifier par rapport aux contraintes. Cependant, il a été conclu que la méthode statistique de la coordination des isolements permet d'estimer le taux de défaillance en fonction de conception.

On a résumé le niveau de coordination au diagramme (Figure IV.2) pour la détermination des différentes contraintes pour assurer une conduite adéquate du réseau électrique

Conclusion générale

La mission principale de l'exploitation des réseaux électriques est de fournir sans interruption de l'énergie quelque soit les conditions environnementales.

Cependant, ces derniers ne sont pas à l'abri des incidents et sont souvent le siège de perturbations de toutes natures telles que les surtensions d'origines internes ou externes. La plupart de ces incidents sont dus à des amorçages produisant le contournement des isolateurs des lignes aériennes par un arc électrique.

Les isolateurs sont des éléments essentiels dont dépendent la sécurité d'exploitation, la qualité Et la continuité de service.

Les surtensions sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale. Ces perturbations peuvent conduire à des interruptions plus ou moins longues des réseaux électriques et peuvent même endommagées leur isolation.

Dans notre travail après énuméré les différentes surtensions internes et externes, on a étudié l'effet Ferranti, celui ci désigne l'apparition d'une surtension lorsque une ligne est alimentée à vide.

Ce phénomène peut sembler paradoxal, les lignes électriques sont habituellement connues par leur chute de tension lorsqu'elles sont parcourues par un courant mais lorsqu'elles ne sont pas parcourues le phénomène est inversé (effet capacitif). L'extrémité ouverte de la ligne est à un potentiel plus élevé que celle connecté au réseau. (La figure I.7 relative à la formule I.9) décrit bien ce phénomène.

Les différentes simulations effectuées pour différentes tensions et différentes distances grâce au Matlab 6.5 ont bien confirmées ces surtensions, en conclusion plus la ligne est longue plus la surtension est importante.

Les surtensions externes ou surtensions atmosphériques sont très dangereuses pour les réseaux électriques. Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et les surintensités d'origine atmosphériques. Une particularité des coups de foudre est leur polarisation, ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif).

Environ 10 % sont de polarité inverse, mais ceux sont les plus violents. A noter que le front de montée des chocs de foudre retenu par les normes est de $1,2\mu\text{s}$ Pour les tensions et de $8\mu\text{s}$ pour le courant (**Figure I.10**). Une distinction est souvent établie entre coup de foudre direct et indirect, celui qui touche directement la ligne et celui qui tombe à proximité.

L'étude de ces conditions permet de déterminer le niveau d'isolement de surtension qui pourra solliciter le matériel durant son utilisation. Le choix du niveau d'isolement adapté permettra de s'assurer que, vis à vis de la fréquence industrielle et des chocs de manœuvre au moins, ce niveau d'isolement ne sera jamais dépassé. Vis à vis du choc de foudre, un compromis doit généralement être fait entre le niveau d'isolement et le niveau de protection (fils de garde, éclateurs, parafoudres).

Les surtensions transitoires ont une grande importance dans la coordination des isolements et le choix du type de protection et du lieu de leur emplacement, ainsi toute atténuation doit être adéquatement évaluée.

La coordination de l'isolement a pour rôle de déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires et suffisantes de divers constituants des réseaux en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normales, ainsi que aux surtensions de diverses origines.

Le but final est de permettre une distribution sûre et optimisée de l'énergie électrique. Pour optimiser il faut chercher le meilleur rapport économique entre les différents paramètres dépendant de cette coordination (isolation, protection, défaillance subie)

Bibliographie

- [1] Schneider Electric - Guide de Guide de conception des réseaux électriques, "Les surtensions et la coordination de l'isolement," pp. 393–486.
- [2] A. Medjdoub, "Régimes transitoires des systèmes électriques."
- [3] D. Fulchiron, "Surtensions Et coordination de l'isolement," *Cah. Tech. Schneider Electr.*, p. 24, 1987.
- [4] AZZAG, EB ; cours de techniques de Haute Tension ; Annaba.
- [5] AZZAG, EB; Problèmes de contournement et perforation des isolateurs de haute tension ; Annaba ; 2007
- [6] S. Saïd, "Étude des surtensions dues à la ferrorésonance en phases incomplètes," 2013.
- [7] Daas Abdelhakim, "Contribution à l'amélioration de la protection contre les surcharges atmosphériques," 2004.
- [8] L. M. HAMEL Taher, "Sélection du parafoudre pour la protection des postes de transformation," 2018.
- [9] MARLIN, GERIN ; Cahier Technique n°151, P4 ; 1992.
- [10] le logiciel MATLAB -Simlink, Toolbox, version R2016B.
- [11] AZZAG, EB. Cours protection électrique.
- [12] KAROUT, W et BELHADJ, S ; ANALYSE DES SURTENSIONS ELECTRIQUES ET LEURS PROTECTIONS ; Annaba ; 2019.

[13] SAMIR BEDOUI ; Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO ; SETIF 1 ; 2018