الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Spécialité : **Réseaux électriques**

THEME

Étude de l'impact de la foudre sur les lingne de transport d'énergie électrique

Proposé et dirigé par :

Mr. : DINE Mohamed

Préparé et présenté par :

Mr.: SACOUCHI toufik

Mr.: BOUAKKAZ abdelkader

Année Universitaire : 2014-2015

Remerciement

Nous tenons à remercier :

****Le dieu de cette réussite***

****nos parents qui sacrifient pour nous aident***

****A toutes les professeurs de l'universitée de Médéa qu'ils nous ont apportent tout au long de notre étude et sur notre promoteur dine mohamed***

**** directeur de l'université***

**** A toutes les promotions de 2010- 2015.***

****A toutes les étudiants de l'université de Médéa***

Nous tenant à remercier tous ceux contribues à notre étude de près ou

De loin et qu'ils nous ont donné des conseils.

Et en fin nous dédions ce modeste travail à la famille

Sakouchi et Bouakkaz

Ou se Trouvent, et à touts nos amis

Toufik *Abdelkader*

Dédicace

Je tien à dédier ce modeste travail à ma très cher mère

Et mon père qui ma donner tout l'amour et le courage pour Faire ce travail.

- *Mes chères sœurs : Naima-Hamida.*

- *Mon cher frère Naceur-Rezki et le grande Saad.*

Et La femme qui partagera ma vie : Aida

- *Mon binôme abdelkader, mes amis : Omar, Saddam, REDOUANE, ZOUBIR et ABED ERAHMAN et Abdelkader , Hamza-t-y ,diamel,ismail,Hicham, Abd elrahmane , Mohamed G , Mbarek et tout les travailleurs de policlinique sidi naamane et tout les travailleurs de C.E.M.de Chaibia bir touta*

- *Aux enseignants de l'université de MEDEA et ainsi que tous les Travailleurs .*

- *Et ainsi qu'a toute personne connaissant : Toufik.*

Toufik

Dédicace

Je tien à dédier ce modeste travail à ma très cher mère

Et qui ma donner tout l'amour et le courage pour

Faire ce travail et la familles de BOUAKAZ ,BEN-DJABALLH.

- *Mes chères sœurs : Assia,Fatima,Aicha,Ahlameet les hommes de cette sœurs.*
- *Mes chers frères :Farouk,Taher,Kamal,Hossam,Rachide et femmes des frères .*
- *Mes chères les enfants :Aissa, fayez, Islam Imane .*
- *La femme qui partagera ma vie : Laila.*

- *Mes amis : mon binôme Toufik, Mes amis touts les collègues de travail a C .E.M. Chaibia ,*
- *Aux enseignants de l'université de MEDEA et ainsi que tous les Travailleurs.*
- *Et ainsi qu'a toute personne connaissant : Abdelkader.*

Abdelkader.

الملخـــــص:

هذا العمل بعنوان:دراسة تأثير صاعقة البرق على الخطوط الكهربائية ذات التوتر العالي،يهتم بما يلي:

- تذكير حول التوترات الزائدة التي تؤثر على الشبكة الكهربائية.
- مفهوم ظاهرة البرق:(خصائصه تأثيراته على الشبكة الكهربائية، الخ...).
- تنسيق العزل ومختلف معدات الحماية ضد البرق .
- محاكاة في ماتلاب لخط نقل ذو التوتر العالي في النظام العادي.
- محاكاة التوتر الزائد الذي تسببه صاعقة البرق غير المتكررة والمتكررة على خط النقل ذو التوتر العالي.

فائدة هذا العمل فهم ظاهرة البرق وتأثيراتها ومستوى التوتر الزائد الذي تسببه صاعقة البرق على شبكة نقل الطاقة الكهربائية ذات التوتر العالي.

Résumé :

Le présent travail intitulé : étude les effets de coup de foudre sur les lignes haute tension, s'intéresse à ce qui suit.

- Un rappel sur les surtensions qui perturbent le réseau électrique
- Une compréhension sur la foudre : (caractéristique leur effet sur le réseau électrique ete…).
- La coordination d'isolement et les différents dispositifs de protection contre la foudre.
- Simulation sur MATLAB d'une ligne de transport à haute tension en régime normale.
- Simulation des surtensions de foudre induites par un coup de foudre non-répétitif et répétitif tombant directement sur la ligne.

Ce travail trouve son utilité de bien comprendre le phénomène de la foudre et le niveau surtension par un coup de foudre tombé directement sur une ligne de transport l'énergie électrique.

Abstract :

This work entitled : study the effects of the stroke of the high voltage power lines, is interested in the following :

- A reminder about thr power surges that disruptbthe electrical network.
- An understanding on the lightning : (chareccteristics, their effect on the electrical network, été…).
- The coordination of isolation and the various protection devices against the lightning.
- Simulation on a MATLAB of transmission line to high voltage in normal regime.
- Simulation of power surges form lightning induced by a lightning strike non-repetitive and repititive falling directly on the line.

This work found its usefulness to understand the phenomenon of the lightning and level of surge by a stroke of lightnning falls directly on a line of transport of electrical energy.

Tables des Matières

Liste des figures……..……..……..Viii

Liste des tableaux ……...……Xii

Liste des abréviations…….…….……..…….Xiii

Introduction général : 1

CHAPITRE I : LE PHENOMENE DE LA FOUDRE

I.1 Introduction : 3

II.2 Historique de la foudre : 3

I.4 Différents types d'orage: 5

I.4.1 Les orages frontaux : 5

I.4.2 Les orages orographiques : 6

I.4.3 Les orages thermiques : 6

I.5 Distribution statistique des orages et moyens de détection : 6

I.6 Le nuage d'orage et phénomènes précurseurs : 7

I.7 Déférents type de foudre : 9

I.7.1 Décharges nuage-sol : 9

I.7.2 Décharges intra-nuages : 10

I.7.3 Décharges entre nuages : 11

I.7.4 Foudre en boule : 11

I.8 Les étapes d'une décharge de foudre : 12

I.8.1 La décharge préliminaire : 12

I.8 .2 Le traceur par bonds (stepped leader) : 12

I.8.3 Arc en retour : 13

I.8.4 Traceur continu et les arcs en retour subséquents : 13
I.9 Paramètres électrique de la foudre : 14
I.10 Les formes d'onde des courants de foudre : 16
I.11 Les effets de la foudre : 17
I.12 La foudre et les réseaux électriques : 18
I.12.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase (direct) : 19
I.12.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône indirecte: 19
I. 13 propagations des surtensions de foudre vers les postes : 20
I. 14 montées en potentiel de la prise de terre : 21
I.14.1 Tension de pas : 22
I.15 Conclusion : 23

CHAPITRE II: GENERALITE SUR LES SURTENSIONS

II.1 Introduction : 24
II.2 Définition des surtensions: 24
II.3. Origine des surtensions : 24
II.3.2 Origine externe 24
II. 4 Classification des surtensions : 25
II. 4.1 Les surtensions transitoires : 26
II. 4.1.1 Les surtensions transitoires d'origine externe (la foudre) : 26
II. 4.1.1.1 Le coup de foudre direct 26
II. 4.1.1.2 Le coup de foudre indirect : 29
II. 4.1.2 Les surtensions transitoires d'origine interne (de manoeuvre) : 30

II.4.1.2.1 Surtensions de manoeuvre dues à la perte d'une charge ... 32

II.4.1.2.2 Surtensions de manoeuvre dues à la coupure des courants capacitifs et inductifs……..……..32

II.4.1.2.2.1 Tension transitoire de rétablissemen……...…..32

II.4.1.2.3 Surtensions de manoeuvre dues à l'apparition et la disparition d'un défaut…… ..……..……34

II.4.1.2.4 Surtensions de manoeuvre dues à la perte d'une charge:…… 34

II.4.2 Les surtensions temporaires :…….....…… ..…..35

II.4.2.1 Les surtensions externes temporaires…….……35

II.4.2.2 Les surtensions internes temporaires……..……..…35

II.4.2.2.1 Surtension provoquée par un défaut d'isolement……35

II.4.2.2.2 Surtension sur une longue ligne à vide (effet Ferranti)…….…… .36

II.4.2.2.3 Surtension par ferrorésonance …… ……..37

II.5 Les effets des surtensions :…… ……..……38

II.6 Conclusion ……. ……39

CHAPITRE III : COORDINATION D'ISOLEMENT ET DISPOSITIFS DE PROTECTION CONTRE LA FOUDRE

III.1 Introduction…….. ……..40

III.2 Coordination des isolements..……..……40

III2.1 Définition ……....……40

III.2.2 Rôle de la coordination d'isolement. ……..….43

III.2·3 Distance d'isolement et tenue en tension…..……...44

III.2.3.1 Distance de l'isolement……...……44

III.2.3.2 Tenue en tension……...……..…….……44

III.2.4 Principe de la coordination d'isolement……45

III.2.5 Le niveau de protection est déduit des conditions……..……46

III.3 Les dispositifs de protection contre la foudre……..……46

III.3.1 Câble de garde.……..……46

III.3.1.1 Conception..……..……..……47

III.3.2. Méthodes……..….47

III.3.2.1 Méthode de l'angle fixe.……...…...47

III.3.2.2 Méthode électro géométrique..……..……..48

III.3.2.3 problématique .……...……..49

III.3.3 Protection par éclateur……..……..50

III.3.3.1 Définition..……..……..50

III.3.3.2 Principe de fonctionnement ..……...50

III.3.3.3 Tension d'amorçage d'un éclateur……...……51

III.3.3.4 Caractéristique de protection d'un éclateur:…….52

III.3.3.5 Avantages et inconvénients d'un éclateur:…….…52

III.3.3.5.1 Avantage:…….……...52

III. 3.3.5.2 Inconvénients :……...52

III.3.3.6 limites d'utilisation de l'éclateur:…….……53

III.3.4 Protection par parafoudre ……...……54

III.3.4.1 Définition:……..……...54

III.3.4.2 Les paramètres caractéristiques des parafoudres…….…….54

III.3.4.3 Les type des parafoudres:……56

III.3.4.3.2 Parafoudre à oxyde de zinc: 57

III.3.4.3.2.1 Définition:..... 57

III.3.4.3.2.2Constitution: 58

III.3.4.3.2.3 Principe de fonctionnement: 59

III.3.4.3.2.4 utilisations: 60

III.3.4.3.2.5 les inconvénients:..... 61

III.4 Conclusion :..... 62

CHAPITRE IV: SIMULATION DE LA FOUDRE:

IV.1.Introduction……..…….63

IV-2 .Description du système étudie :.....63

IV-2-1.Fonctionnement en régime normal :……...…....65

IV-3. Un modèle impulsionnel de la foudre :……67

IV-4. Simulation de la foudre :…….…68

IV-5 .Amplitude du coup de foudre :…….....68

IV-6.Simulation d'une frappe directe de la foudre sur un conducteur de phase 69

IV-7. Résultats des simulations et analyses :……..……...70

IV-7-1.Tension et courant barre B4:……71

IV-7-2.Tensions ligne-neutre:……..…73

IV-7-3.Tensions ligne-ligne:……...……76

IV-7-4 .Courants de ligne:……..79

IV-7-5.Tension et courant dans les bancs de compensation…..……..81

IV-7-6. Analyse des résultats de simulation :……..83

IV-8: conclusion: ……..……83

Conclusion Général……...……84

Liste de figure

Figure I.1 : Schéma illustratif de la distribution de charges Dans le nuage d'orage……..….5

Figure I.2 : Répartition des charges électriques au sein d'un cumulonimbus ordinaire…..….8

Figure I.3 : Classification des coups de foudre……10

Figure I.4 : Décharges intra-nuages…….**10**

figure I.5 : représente une décharge entre nuage……11

Figure I.6 : foudre en boule……12

Figure I.7 : Évolution de courant à la base de canal de foudre…….……14

Figure I.8 : Courant de l'onde de foudre pendant l'arc en retour……....16

Figure I.9 : coup de foudre tombant sur un conducteur de phase……....19

Figure I.10 : Coup de foudre tombant sur un câble de garde…….….20

Figure II.11 : réduction due à l'effet couronne, de la pente moyenne et de l'amplitude d'une surtension due à la foudre durant sa propagation le long de la ligne……21

Figure I.12 : montée en potentiel de la prise de terre référence…… ….22

Figure I.13 : montée en potentiel de la prise de terre……..….23

Figure. II-1 : Chute de la foudre sur un conducteur de phase……...28

Figure II.2 : Courbe de distribution des intensités totales de la foudre (valeurs crêtes)……....28

Figure. II-3 : Onde de choc normalisée dans le cas d'une onde de foudre……...29

Figure II.4 : Coup de foudre indirect (sur un câble de garde)……...31

Figure II.5 : Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manœuvre……..33

Figure. II-6 : La TTR aux bornes du disjoncteur……..36

Figure II.7 : Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement…….…….38

Figure II.8 : Principe de la ferrorésonance……40

Figure III.1 Niveau de tenue d'isolation d'un équipement électrique……43

Figure III.2 : Onde de choc standard pour le test de la tenue d'isolation Des équipements électriques……..…43

Figure III.3 : différents niveaux de tensions présents sur des réseaux HT……..45

Figure III. 4 : distance dans l'aire et la ligne de fuite…….….46

Figure III 5: coordination de l'isolement: le niveau de protection et le tenu de l'appareillage en fonction des surtensions……...…47

Figure III 6 : câble de garde d'une ligne haute tension……...…49

Figure III.7 : positionnement du câble de garde……..50

Figure III.8: ligne de positionnement du câble de garde pour θ =30°…….50

Figure III.9 : Méthode électro géométrique……....51

Figure III.10: éclateur avec tige anti oiseaux……..53

Figure III.11: comportement d'un éclateur à pointes, en choc de foudre normalisé, en fonction de la valeur de crête……...….55

Figure III.12 : Elément de parafoudre……..…56

Figure III.13 : constitution d'un parafoudre de carbure de silicium et à éclateur……..….59

Figure III.14 : exemple de Structure d'un parafoudre ZnO……....61

Figure III.15 : caractéristiques V-I d'un parafoudre à ZnO……....62

Figure III.16 : domaine d'application des parafoudres ZnO……..….63

Figure IV-1: Modèle du réseau électrique pour les simulations.[29]……..…64

Figure IV-2 : Modèle de simulation du réseau de transport dans MatLab-Simulink. [29] 65

Figure IV.3 : Tension et courant triphasée au niveau de jeu barre B1……66

Figure IV.4 : Tension et courant triphasée au niveau de jeu barre B3…….....66

Figure IV-5: Modélisation de la forme d'onde impulsionnelle du courant de la foudre……..67

Figure IV-6 : Forme d'onde impulsionnelle du modèle du courant de la foudre…….67

Figure IV-7: Modélisation de la foudre dans MatLab-Simulink……**.**68

Figure IV-8 : Forme d'onde impulsionnelle du courant de la foudre obtenue par Matlab…..69

Figure IV-9 : Modèle de simulation pour une frappe directe de la foudre sur un conducteur de phase, entre les barres B1 et B2…… 70

Figure IV-10 : tensions ligne - neutre à la barre B4……**...**….71

Figure IV-11 : Courants de ligne à la barre B4……**...**…71

Figure IV-12: Impulsioninitiale (28 kA) de la foudre……**..**…72

Figure IV-13 : Frappe de la foudre entre les barres B l et B2 (tensions ligne - neutre)…..…..73

Figure IV-14 : Délai de la réception de l'impulsion de foudre à la barre B l……**...**74

Figure IV-15 : Délai de la réception de l'impulsion de foudre à la barre B2……**...**74

Figure IV-16 : Délai de la réception de l'impulsion de foudre à la barre……75

Figure IV-17 : Tensions ligne - ligne à la barre B4 suite au coup de foudre……..76

Figure IV-18 : Frappe de la foudre entre les barres B l et B2 (tensions ligne - ligne)…...….77

Figure IV-19 : Représentation des 3 premiers fronts d'onde à la barre B2……78

Figure IV-20 : Premier front d'onde à la barre B2……..78

Figure IV-21 : Deuxième front d'onde à la barre B2 après 300 km……**...**….79

Figure IV-22 : Courants de ligne après une frappe de la foudre entre les barres B l et B2.…80

Figure IV-23 : Modèle d'un banc de condensateur série (Matlab-simulink)……..81

Figure IV-24 : Tension dans la capacité de la phase A……82

Figure IV-25 : Courant dans la varistance (MOV) de la phase A……..…….82

Liste de Tableau

Tableau : I .1 : paramètres caractéristiques de décharges de foudre..……. ……16

Tableau .II.1 : Classification des surtensions……..…26

Tableau II.2 : Les valeurs normalisées de la tension crête en KV (BIL)…….30

Tableau III. 1 : Niveaux de tenue d'isolation standards……..…….44

Tableau III.2 : Tension nominales des parafoudres en kV…….…….**.57**

liste de abréviations

$\vec{A}$: le potentiel vecteur .

C' : La capacité linéique de la ligne

C : la vitesse de la lumière

D : Le diamètre de la sphère fictive dépendant de courante crête I du premier arc en retour assigné par le niveau de protection.

d : diamètre de conducteur.

d_c : La distance de capteur.

E : Total electric field

E^i_x (x h,t) : La composante horiontale de champ électrique incident le long l'axe y à la hauteur des conducteurs.

H : Hauteur de canal de la foudre.

$\vec{H}$: le champ magnétique.h :

h : La hauteur de la ligne.h_x : Altitude à la quelle l'observateur voit la source à l'instant t.

I_0 : Courant a la base de canal de la fonction de heidler.

I_I : Amplitude de i_I (i_2).

I_D : Correspond à l'amplitude du courant à t=0.

$I^{0.8}$: Le courant de crête de la foudre.

I_u : Le courant du leader.

I_c : Le courant de fonctionnent permanent.

I_{cc} : Le courant de court-circuit admissible.

In : Le courant nominal de décharge.

Imax : Le courant maximal de décharge.

I(z,t) : le courant de décharge dans le canal.

I(x,t) : Courant le long de la ligne .

I_p(0,t) : Représente le courant impulsionnel à la base de canal.

L' : L'inductance linéique de la ligne

L : longueur de la ligne aérienne.

L imp : Le courant de choc.

R : La distance constante sur chaque dipôle élémentaire.

R_p : Le rayon de protection d'un PDA.

Ut : Tension de tenue aux surtensions temporaires.

Us : Tension de seuil.

Uc : la tension maximal de régime permanent.

Up : le niveau de protection .

$U^S(y,t)$: la dispersées de la tension.

V : vitesse de l'arc en retour.

Δt : le pas de temps d'intégration.

Δx : Etape l'intégration spatiale.

$\xi 0$: la permittivité constante.

τ_{11} : Temps de montée i1(i2).

τ_{12} : Temps de l'impulsion de i1(i2).

y_a : Représente le taux de décroisement de l'intensité de courant impulsionnel.

y_c : Représente le taux de décroissance du courant.

η : Facteur correctif de I.

α : L'inverse du temps de descente

β : L'inverse du temps de montée

Introduction générale :

La foudre est un phénomène perturbateur important du fonctionnement de toutes les installations électriques, à plusieurs titres, depuis le transport d'énergie à très haute tension (THT) jusqu'aux circuit intégrés en passant par les alimentation basses tension (BT) et les transmissions de données.Elle peut aussi être à l'origine de perturbation momentanée dans la continuité de service, donc de dégradation de la qualité des alimentations, et en conséquence de longues interruptions de service des installations. Elle constitué également un danger pour les personnes (tension de pas, élévation de potentiel des masses et du circuit de terre).

La foudre a toujours été une cause de perturbations dans l'utilisation de l'électricité, mais il faut noter l'exercice assez récent et croissant de la qualité des systèmes électriques (fiabilité, disponibilité, continuité de service…) ainsi que le souci toujours permanent de minimiser les couts de production et d'utilisation de l'électricité.Cela conduit à constater que la foudre est devenue un « point dur » dans l'amélioration de tous ces facteurs.C'est pour cela qu'elle fait maintenant partie des grandes préoccupations des électrotechniciens, qu'ils soient distributeurs d'énergie ou constructeurs des matériels, ou installateurs.

Lors d'un orage ; la décharge de foudre génère des surtensions transitoires : ces élévations brutales de tension (plusieurs milliers de volt pendant quelque millionièmes de seconde) qui vont parcourir les câbles électriques de toute sorte (alimentation électrique, téléphonique, informatique…) provoquent d'importantes perturbations électromagnétiques dans les réseaux électrique de distribution d'énergie et de télécommunication.

Pour éviter cette perturbation, nous proposants cette étude sur l'impact de foudre que nous exposons dans ce document.

Pou ce faire, nous partageons notre travail en quatre chapitre :

- Dans le premier chapitre, nous présentons généralité sur la foudre
- Le deuxième chapitre est dédié Généralités sur les surtensions dans les lignes aériennes
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la protection contre la foudre.
- Et enfin le dernier chapitre est dédié a la modélisation et simulation de l'impact de la foudre sur les lignes de transmission on utilisant le logiciel matlab.

  A la fin conclusion général

I.1 Introduction :

Depuis l'aube de l'humanité, la foudre et le tonnerre ont inspiré crainte et émerveillement à l'homme. Ce dernier, a longtemps rattaché ces phénomènes à une cause surnaturelle contre laquelle on ne résiste pas. Ainsi la foudre, était associée à la colère des dieux et à la notion de châtiment pour les fautes ou les pêchés. On retrouve des représentations chez tous les peuples et dans toutes les religions. **[1]**

De nos jours, grâce aux progrès scientifique, on sait que les orages proviennent des décharges électriques initiées par un nuage électrisé. Les principaux aspects physiques deviennent assez bien connus notamment les phénomènes précurseurs ainsi que la décharge à proprement parler.

Malheureusement, malgré toutes ces avances scientifiques effectuées au niveau de la connaissance de l'arc de foudre, l'orage resté un phénomène que l'homme ne peut maitriser. Il essaye donc d'en contrôler et limiter les effets [6]

II.2 Historique de la foudre :

La foudre, des la plus haute antiquité, était associée à la colère des dieux ou à la notion de châtiment pour des fautes ou des péchés l'homme faisait appel à des divinités pour expliquer la foudre et pour en conjurer le danger.

Les phénomènes précurseurs de l'orage sont ces petites décharges ou effluves, dont le siège est la pointe d'objet métallique, et qui s'accompagnent d'un grésillement caractéristique.

Ces phénomènes intriguaient et effrayaient les hommes de cette époque.

Ils sont bien connus des alpinistes, mais aussi des navigateurs des XV iéme et XVI iéme siècles, au sommet des mats des navires.

Ces derniers les appelaient " feux de Saint-Elme " du nom de leur saint patron.

~~Venons-en aux explications scientifiques de la foudre.~~

~~"Scientifique" ne veut pas dire "exact», en effet, René Descartes, pourtant considéré comme le grand penseur rationaliste du XVII iéme siècle, prétendait que la foudre résultait de "L'explosion des exhalations sulfureuses de l'atmosphère sous la pression, lorsqu'un nuage plus lourd tombait~~ sur un nuage plus l léger !"

Heureusement au XVIII iéme siècle l'expérimentation vint au secours du seul raisonnement.

L'observation minutieuse des faits permis de percer les secrets de l'univers.

On venait de découvrir l'électricité. La plus part des expériences avaient lieu dans les "Salons de physique" que l'on aménageait un peu partout

En 1748, l'abbé jean Antoine Nollet dressait une liste de similitude entre la foudre et l'étincelle électrique.

Le français jean Théophile Desaguliers, l'allemand johan Heinrich winckler avaient également établi de telles comparaisons.

Le 7 novembre 1749 Benjamin Franklin, en Amérique, rédigeait lui aussi une liste de douze similitudes.

Cette même année l'Académie de Bordeaux choisit pour sujet de son concours le thème" le rapport entre les phénomènes du tonnerre et ceux de l'électricité». On constate une étrange similitude de l'évolution des idées et des hypothèses sur la science de l'électricité et sur la nature de la foudre et sur la nature de la foudre Mais personne n'avait encore suggéré les moyens de les vérifier.

Ils sont bien connus des alpinistes, mais aussi des navigateurs des XV iéme et XVI iéme siècles, au sommet des mats des navires.

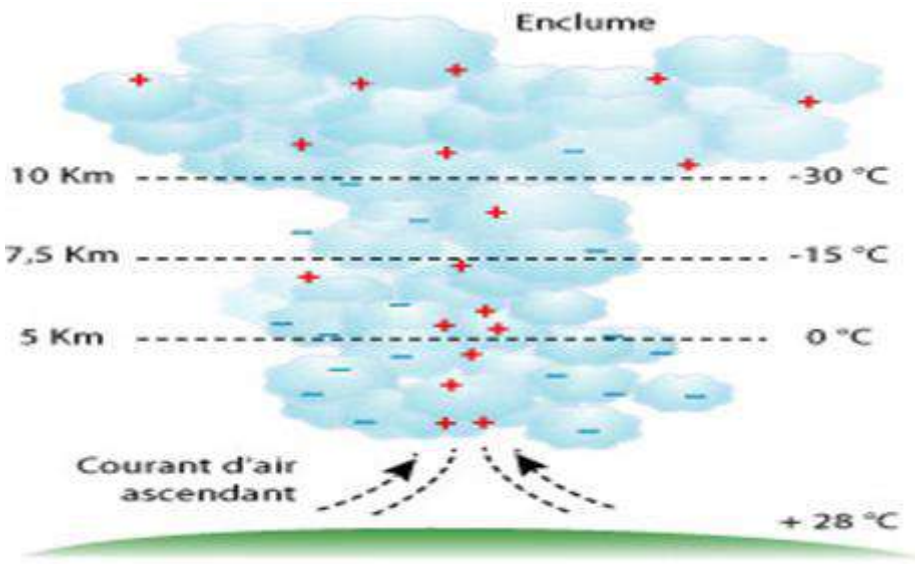
Ces phénomènes intriguaient et effrayaient les hommes de cette époque.

Ils sont bien connus des alpinistes, mais aussi des navigateurs des XV iéme et XVI iéme siècles, au sommet des mats des navires.**I.3 Connaissances actuelles du phénomène:**

La foudre est définie comme une décharge électrique associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La source la plus commune de la foudre est la séparation des charges dans les nuages d'orage, les cumulo-nimbus.

De nos jours, la foudre est la principale cause de mise hors service des installations électriques ainsi que téléphoniques. Elle est aussi la source majeure d'interférence au niveau des communications radio. Cependant, ces effets sur l'environnement ne sont pas tous aussi néfastes. En effet, elle joue aussi un rôle important dans le maintien de la charge électrique au sol et c'est donc un composant essentiel du circuit électrique terrestre global.

Le nuage orageux, est généralement un cumulo-nimbus : un nuage dont le sommet a la forme d'une enclume et dont la base est plate. Sa base peut se situer à une altitude comprise entre 500 et 2000 m, tandis que son sommet peut atteindre des altitudes de 15000 m **[6]**



La figure I.1 : Schéma illustratif de la distribution de charges Dans le nuage d'orage.

I.4 Différents types d'orage:

I.4.1 Les orages frontaux :

Sont issue de la rencontre de deux masses d'air dont les températures et les taux d'humidité présentent des différences plus ou moins marquées. Dans cette classe d'orages, on peut distinguer les orages de type front chaud, et les orages de type front froid.

Les orages à front chaud se forment lorsque l'air instable s'élève puis parcourt la surface frontale de ce phénomène. Leur front peut occuper des centaines de kilomètre et est donc très étendu. Leur largeur ne dépasse pas, la plupart du temps, une cinquantaine de kilomètres. Le ciel se charge alors de cumulo-nimbus sporadique avec des courants ascensionnels peu intenses. Ces nuages ont une forme avec des contours gonflés à cause de ces mouvements convectifs. Les orages à front froid sont issus de la montée rapide et brutale d'un air chaud et humide le long la ligne frontale entraînant ainsi d'énormes et intenses courants d'air ces orages sont pour la plupart d'une violence extrême.

I.4.2 Les orages orographiques :

Sont généralement causés par la poussé vers le haut d'un air chaud et humide dû à la topographie de la région (montagne, …) : les cumulo-nimbus qui se forment grâce au vent montent alors toujours à des altitudes de plus en plus élevées par rapport au relief environnant. Par contre, ces nuages se dissolvent sous l'effet de ce même vent.

Le réchauffement de l'air près du sol est un autre facteur venant s'ajouter à la topographie du terrain. Ces orages se produisent surtout en période chaude. Ils éclatent principalement sur les reliefs et restent toujours au même endroit. Si les conditions météorologiques restent stationnaires, il peut arriver qu'ils se produisent pendant plusieurs jours et toujours au même moment de la journée.

I.4.3 Les orages thermiques :

Elles surviennent lorsque les sols sont surchauffés et l'air saturé en humidité, comme au niveau des tropiques par exemple. D'importants mouvements convectifs peuvent engendrer des super-cellules orageuses provocantes des précipitations abondantes et des coups de foudre exceptionnellement intenses et durables.

La particularité de ces orages est qu'ils peuvent éclater à n'importe quelle heure de la journée ou de la nuit également, contrairement aux autres orages. Ils n'éclatent qu'en saison chaude, l'après-midi sur la terre ferme et la nuit en mer. Ces orages peuvent se répéter plusieurs jours de suite.

I.5 Distribution statistique des orages et moyens de détection :

La sévérité orageuse d'une région est caractérisée par son niveau kéraunique (keraunos signifie foudre en grec). Le niveau kéraunique d'un lieu représente le nombre de jours par an où le tonnerre a été entendu. Cela ne fournit aucune indication sur la densité de foudroiement de ce lieu. La connaissance de cette donnée permet l'établissement de statistique. En Algérie, le niveau kéraunique moyen est d'environ 20.

Il dépend fortement de la morphologie du terrain : il dépasse 30, au niveau des régions montagneuses et est inférieur à 10, au niveau des régions côtières. Au niveau mondial, le niveau kéraunique est assez hétérogène : il peut dépasser les 200 en Ouganda, en Indonésie ou dans la forêt amazonienne et est très faible dans les zones de hautes pressions océaniques ainsi qu'au niveau des pays situés au-dessus de 60éme parallèle.

La notion de niveau kéraunique est trop peu adaptée pour donner une mesure utilisable de la sévérité orageuse. Les mesures de détection actuelles donnent une information plus intéressante : la densité de coup de foudre au sol. Elle est exprimée en nombre de coups par kilomètre carré et par an. En France, il existe un réseau national nommé "Météorage" qui rassemble sous forme de base de données les amplitudes et les densités des coups de foudre.

Grâce à des capteurs situés au sol, météorage détecte les impacts de foudre nuage-sol à partir de de l'onde électromagnétique émise et envoie les informations à un centre de traitement en temps réel. Ces données sont bien plus fiables que celle obtenues grâce au niveau kéraunique.

Un autre réseau, complémentaire de météorage est implémenté en france : c'est le système Safir. Il permet de détecter, l'activité électrique des nuages et en particulier les éclaires intra-nuages qui précèdent les coups de foudre au sol **[1, 7,8].**

Des relations empiriques plus ou moins complexe ont été établies entre la densité de foudroiement au sol N_d, et le niveau kéraunique N_k, suivant les caractéristiques météorologiques locales. Pour la France, on admet que **[1, 6] :**

$$N_d = 0.04 N_k^{1.25} \qquad \text{(I.1)}$$

Pour un niveau kéraunique moyen de 20 on obtiendrait avec cette formule une densité de foudroiement d'environ 1,7 coup de foudre par an et par kilomètre carré. Cette densité de foudroiement est de l'ordre de 0,2 à4 pour l'Europe et peut atteindre des valeurs de 10 pour

les États-Unis, l'Afrique de Sud ou le Mexique. Malheureusement, cette valeur de la densité peut varier d'une région à l'autre, influencée par des facteurs locaux topologique.

I.6 Le nuage d'orage et phénomènes précurseurs :

Le phénomène orageux se situe principalement au niveau de la troposphère. Cette dernière se situe à des altitudes de l'ordre de 20 km au niveau de l'équateur et de 6 km, au niveau des pôles. La troposphère est constituée d'air instable avec des courants ascendants chauds et humides.

Au sein d'un nuage orageux typique, de violents courants ascendants provoque la collision de différents types d'hydrométéores (grêlons, eau surfondue, neige, cristaux déglaces,….). Le frottement entre ces hydrométéores engendre une électrisation suivie d'une séparation de charges variant avec la taille de ces derniers. Les particules les plus légères, porteuses de charges positives, sont attirées vers le sommet du nuage par des effets convectifs ascendant tandis que les particules lourdes, porteuses de charges négatives, sont attirées vers la base du nuage par des effets gravitationnels. Ces charges sont réparties dans deux zones (voire figure I.2).

Une zone inferieure, chargée négativement, composée de gouttes d'eau et de neige qui se situe à des altitudes de l'ordre de 4 à 8 km et où règnent des températures de l'ordre de -10C° à 20C°. Il est à noter qu'au niveau de la base du nuage se situe souvent une poche de charges positives.

Une zone supérieure, chargée positivement, composée essentiellement de cristaux de glace qui se situe à des altitudes de 8 à 16 km et où les températures avoisinent les -25C° jusqu'a -60C°.

Le nuage d'orage ressemble donc à un véritable dipôle. Lorsque le champ électrique de claquage dans l'air est atteint, une décharge électrique peut s'opérer soit entre deux zones du nuage (éclair), soit entre le nuage et le sol (foudre).

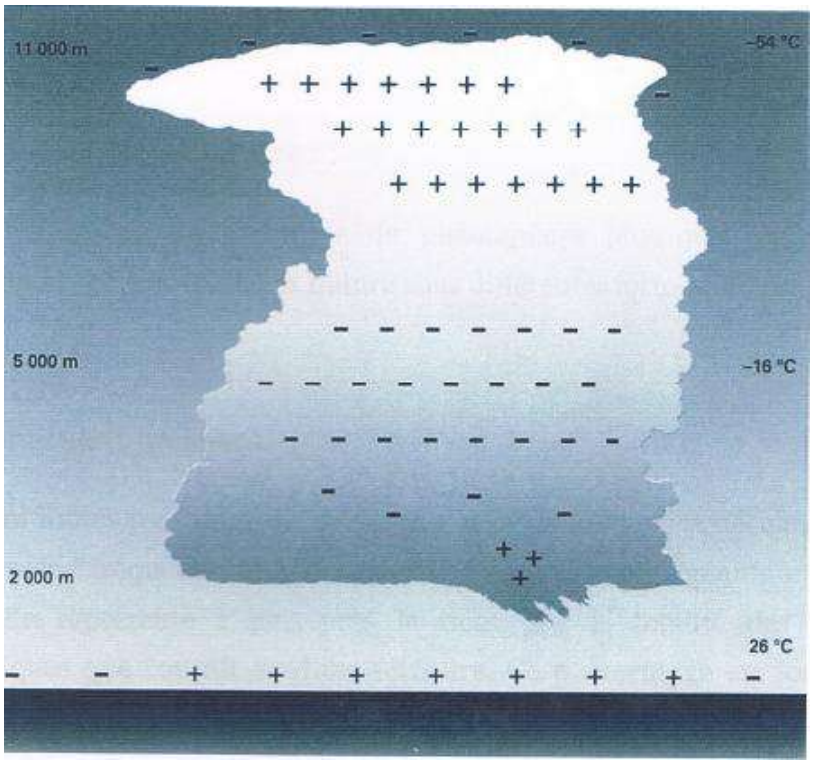


figure I.2 : Répartition des charges électriques au sein d'un cumulonimbus ordinaire.

Au niveau du sol, la différence de charges entre le nuage et le sol permet d'avoir un champ électrique qui par beau temps, est de l'ordre de 100V/m (champ orienté de l'atmosphère vers le sol). Lors de l'approche du nuage d'orage, ce champ électrique commence à s'inverser et croitre pour atteindre des valeurs de l'ordre de -10 à -15kV/m. A partir de ce moment, on peut dire qu'une décharge au sol est imminente.

Ceci est valable pour un sol totalement plan.

On sait que la présence d'aspérités peut augmenter le champ local par effet de pointe. Ce champ local ainsi augmenté est souvent largement suffisant pour déclencher des avalanches électroniques et ainsi ioniser l'air ambiant à ces aspérités : c'est l'effet couronne. Ce phénomène se manifeste sous la forme d'effluves bleutées et de crépitements.

Leur longueur peut varier de quelques centimètres, selon la taille de l'aspérité. Ces décharges couronnes ont pour influences de diminuer le champ électrique pour qu'une décharge au sol puisse se produire **[9, 10,11].**

I.7 Déférents type de foudre :

La foudre est un ensemble de phénomènes physiques et électriques complexe qui se présente dans la nature sous différentes formes : **[7, 12, 13,14].**

I.7.1 Décharges nuage-sol :

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage-sol est la moins fréquente mais certainement la plus contraignant et la mieux étudiée. Elle représente à peu près le tiers de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ce pourcentage est fonction des conditions météorologiques et physiques (humidité, température, localisation des charges dans le nuage,…), de l'altitude du nuage et enfin de la latitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges " nuage-sol-nuage" appelées coups de foudre. Ces derniers sont classés en deux groupes selon deux critères **[6, 7, 15,16].**

La polarité du canal ionisé : les coups de foudre sont dits positifs ou négatifs.

Le sens du traceur principal : les coups de foudre sont dits ascendants ou descendants.

On définit ainsi quatre types de foudre comme indiqué à la (Figure II.3) où **v** est la vitesse de propagation du canal ionisé et **i** le courant de foudre.

Dans les régions tempérées, le type le plus fréquent est toutefois le coup de foudre négatif et descendant (80 à 90%).

Les effets nuisibles de ces décharges touchent principalement les réseaux de communications et de transports d'énergie, les équipements industriels à base d'électronique et le transport aérien.

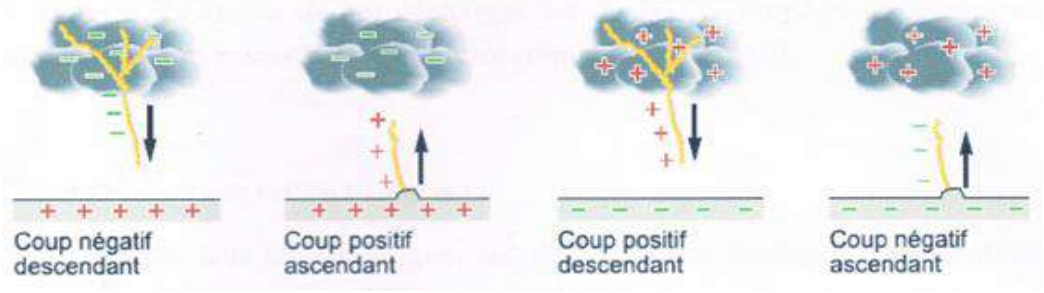


Figure I.3 : Classification des coups de foudre.

I.7.2 Décharges intra-nuages :

Contrairement aux décharges nuages-sol, la décharge intra-nuage est de loin la plus fréquente mais la moins étudiée.

Elle se présente sous la forme d'une succession d'arcs électriques qui se tendent entre une ou plusieurs poches de charges opposées contenues un même nuage.



Figure I.4 : Décharges intra-nuages**.**

En règle générale, ces arcs sont fortement ramifiés et se produisent à l'intérieur du nuage. Mais il arrive parfois qu'ils sortent du nuage pour y revenir en passant par l'extérieur, formant ainsi une espèce de pont très lumineux et visible de la terre.

La durée de ces décharges est de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes et leurs effets sont plutôt minimes. **[7, 17,18]**

I.7.3 Décharges entre nuages :

Comme leur nom l'indique, ces développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible. Elles se produisent généralement à de très grandes altitudes, et elles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible.

Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmissions par satellite.



figure I.5 : représente une décharge entre nuage.

I.7.4 Foudre en boule :

Il s'agit là de l'une de des formes les plus rares et les plus spectaculaires de la foudre. Une boule de feu, lumineuse de quelques dizaines de centimètres de diamètre, qui se déplace librement et avec une vitesse vertigineuse du ciel vers la terre. La foudre en boule est crainte surtout par les fermiers, en raison des incendies et des dégâts qu'elle peut provoquer. **[18]**



Figure I.6 : foudre en boule.

.I .7.5 Autres formes

D'autres formes de décharges sont observées de temps à autre, comme les décharges nuages-air, fréquentes dans les régions arides et en période de beau temps, ou encore les décharges chaudes, une forme très rare qui associe plusieurs types de décharges (les types 2 et

3) et qui se produisent à de très grandes altitudes, si bien qu'il est impossible d'entendre le tonnerre qui les accompagne, ou de les distinguer à l'œil nu**. [18]**

Dans la partie qui suit, nous étudierons plus précisément le premier type de décharge. Nous analyserons les mécanismes de formation des nuages orageux, de développement des arcs électriques entre le sol et le nuage.

I.8 Les étapes d'une décharge de foudre :

I.8.1 La décharge préliminaire :

Plusieurs enregistrements spectroscopiques ont montré l'existence de plusieurs décharges dans la partie inférieure du nuage à environ « **o.1 s** » juste avant l'émergence du premier arc (stepped leader). Ces décharges sont connues sous le nom de "décharges préliminaires "L'apparition de ces décharges est possible dès que le gradient de claquage de l'air séparant ces deux masses est atteint. **[14, 17]**

I.8 .2 Le traceur par bonds (stepped leader) :

A la suite de la décharge préliminaire, une série d'arcs électriques commence à progresser vers le sol par bonds successifs intermittents d'une longueur de 3 à 50 mètre, avec une vitesse moyenne de 150 à 200 km /s. Entre deux bonds successifs, il marque un temps d'arrêt pendant lequel il perd sa luminosité ; ce temps varie entre 40 et 100 Ps. **[13, 18, 20]**

Les courants ont une intensité de l'ordre de 3.3 à 100 kA. **[12, 19]**

La progression de ces arcs, crée au niveau du sol, des champs variables qui s'intensifient au fur et à mesure que le " stepped leader " s'approche du sol, il se ramifie et la luminosité du chemin ionisé s'accroît.

Le point d'impact du leader n'est défini qu'à l'approche de ce dernier de sol (environ 20 à 100 m). **[17, 18, 20]**

Cette distance appelée " distance d'amorçage " (striking distance), est en fonction de l'état de surface du sol (présence d'aspérités ou de proéminence) et de quantité de charge électrique drainée par le leader.

I.8.3 Arc en retour :

Lorsque la jonction entre le précurseur ascendant et le traceur et établie, une onde de potentiel se propage du sol vers le nuage avec une vitesse de l'ordre **(1,1x108 ms),** et neutralise le canal chargé par le traceur. Le premier arc de retour produit alors un courant au niveau du sol de valeur crête typique 15 kA et d'une durée de quelques dizaines de micro seconde. L'élévation rapide de la température du canal atteignant jusqu'à 30000°K provoque une onde de choc appelé tonnerre. Le premier arc de retour constitue, de par son énergie, la plus grande manifestation lumineuse communément appelée éclair.

I.8.4 Traceur continu et les arcs en retour subséquents :

Néanmoins, plusieurs décharges peuvent succéder au premier arc en retour (10 à 70 ms). Il s'agit des arcs en retour subséquents provenant d'une quantité éventuelle de charge résiduelle au sommet du canal. Il se développe dans ce même canal un traceur continu beaucoup plus rapide que le premier appelé trait pilote.

L'amplitude des arcs subséquents associés aux coups de foudre négatifs est inférieur à celle du premier arc de retour, tandis que leurs temps de montée sont beaucoup plus rapide (Figure II.7). Entre deux décharges consécutives, il reste toujours un courant d'une centaine d'Ampères, appelé « courant persistant ».

Ce phénomène, s'écoulant à travers le canal, est à l'origine des effets thermiques les plus importants. **[23]**

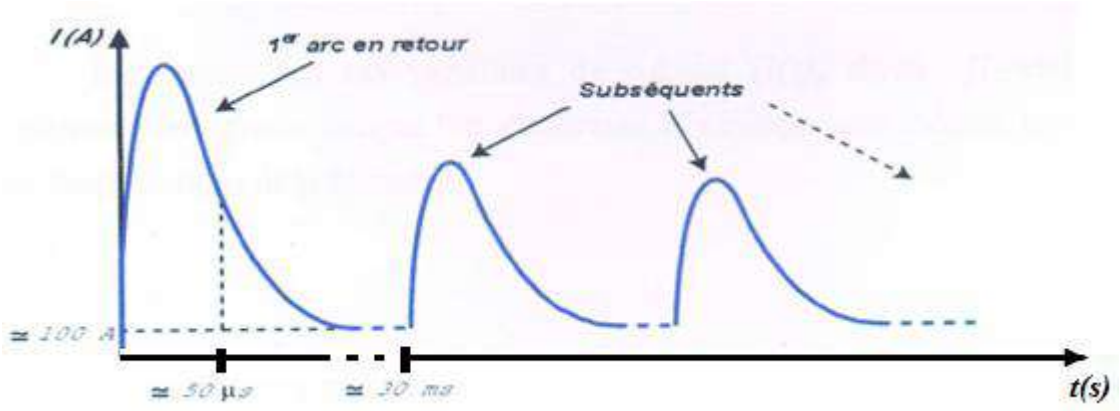


Figure I.7 : Évolution de courant à la base de canal de foudre.

I.9 Paramètres électrique de la foudre :

Les allures des courants associés au coup de foudre négatif sont variées aussi bien en amplitude qu'en durée. On peut cependant dire que pour le premier arc en retour, le temps de montée (ou le temps de front) de l'impulsion de courant est de l'ordre de 5 à 10 µs et que la durée de sa décroissance est d'environ 100 ms. L'ordre de grandeur de la valeur crête du courant est de quelques dizaines de KA.

Les décharges subséquentes présentent un temps de front inférieur à la microseconde, une décroissance plus régulière et une amplitude plus petite que celle de l'arc en retour**. [22]**

Les coups de foudre positifs ne sont quant à eux constitues que d'une seule décharge de durée totale variant de 0,1 à 0,2 S

La durée du front est relativement longue (20 à 50µs) et l'amplitude du courant peut atteindre des valeurs supérieures à 100 KA.

Outre les grandeurs décrites ci-dessus, il existe deux autres caractéristiques de la foudre, intéressante à déterminer.

La première représente la charge totale ***q*** neutralisée au cours d'un coup de foudre. La valeur moyenne est de l'ordre de la dizaine de coulombs mais peut atteindre dans certains cas 300C

La deuxième appelée énergie spécifique et définie par la relation : $\int i^2 dt$**.** Elle est utilisée lors du calcul des effets thermiques de la foudre ou du dimensionnement de paratonnerre.

Les temps lies aux variations de courant **(i(t),di/dt, $\int i^2 dt$)** sont également importants lorsque l'on s'intéresse à la composante induite, rayonnée ou électrostatique de la décharge.

Le tableau I.1, récapitule les caractéristiques électriques moyennes de la foudre (polarité positive et négative confondues**). [11]**

Paramètres	**Unités**	**Probabilités**		
Amplitude	KA	95%	50%	5%
Premier coup		7	33	85
Coup subséquent		4,6	12	30

Coup positif		4,6	35	250
Raideur max	KA/µs			
Premier coup		9,1	24	65
Coup subséquent		10	40	162
Coup positif		0,2	2,4	32
Energie spécifique	KA^2			
Premier coup		6,0	55	550
Coup subséquent		0,55	6,0	52
Coup positif		25	650	$1,5\ 10^4$
Charge totale	C			
Coup négatif		1,3	7,5	40
Coup positif		20	80	350
Durée totale	ms			
Coup négatif		0,15	13	1100
Coup positif		14	85	500
Nombre de réilluminations	N	1	2	6

Tableau I .1 : paramètres caractéristiques de décharges de foudre.

I.10 Les formes d'onde des courants de foudre :

Comme dans le cas de la décharge de foudre positive, les coups de foudre négatifs présentent des charges riches et variées en courants impulsionnels d'amplitude et de durée diverses lors de sa propagation.

La première impulsion correspond à l'initiation de la première couronne de streamers. Elle est suivie par des impulsions d'amplitude de plus en plus importante correspondant essentiellement aux ré-illuminations du canal de décharges.

L'onde de courant peut être modélisée par une fonction bi-exponentielle (Figure I .8), pendant le saut final et de l'arc en retour. La durée de front (t_m) varie entre 10 et 15 µs et la durée de la queue à mi- amplitude (t_o) est de l'ordre de la centaine de microsecondes lors de cette phase final de la décharge.

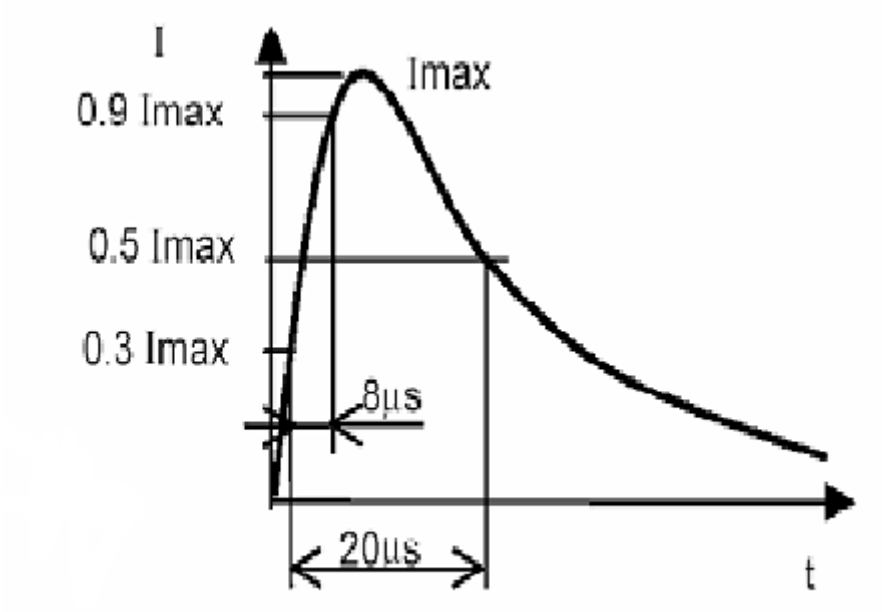


Figure I.8 : Courant de l'onde de foudre pendant l'arc en retour.

I.11 Les effets de la foudre :

Le courant de foudre est donc un courant électrique haute-fréquence. En plus des effets d'induction et de surtension important, il provoque les mêmes effets que toute autre courant basse fréquence circulant dans un conducteur :

- **Effets visuels (éclairs) :** dus au mécanisme de l'avalanche de Townsend.
- **Les effets thermiques :** fusion aux points d'impacts de la foudre et effet joule dû à la circulation du courant, provoquant des incendies.
- **Les effets électrodynamiques :** lorsque les courants de foudre circulent dans des conducteurs parallèles, ils provoquent des forces d'attraction ou de répulsion entre les câbles entrainant des ruptures ou des déformations mécaniques (câbles écrasés ou aplatis).
- **Les effets de déflagration (acoustiques) :** le canal de foudre engendre une dilatation de l'air et surpression jusqu'à une dizaine de mètres de distance. Un effet de souffle brise les vitres ou cloisons et peut projeter des animaux ou des personnes à plusieurs mètres. Cette onde de choc se transforme simultanément en onde sonore : le tonnerre.

Les surtensions conduites à la suite d'un impact sur des lignes aériennes d'alimentation électrique ou téléphonique.

Les surtensions induites par l'effet de rayonnement électromagnétique du canal de foudre qui est une antenne de plusieurs kilomètres traversée par un courant Impulsionnel très important.

- **Effets électromagnétiques :** Les effets électromagnétiques sont des effets induits sur des boucles ouvertes où les différences de potentiel atteintes peuvent provoquer des étincelles et donc des incendies, surtout en présence de matières inflammables ou explosibles.

Les effets électromagnétiques se manifestent par différents processus de couplages sur une structure : le couplage résistif ou galvanique (conduction, résistance de blindage des câble, résistance et montée en potentiel de la prise de terre, etc.), le couplage par champ magnétique (boucles d'induction dans l'installation, inductances de liaison, etc.), le couplage capacitif par champ électrique (antennes tiges isolées du sol, etc.).

Les couplages sont influencés par les mises à la terre, les liaisons d'équipotent alité, les blindages, le cheminement et la disposition des conducteurs métalliques. Vu l'importance des amplitudes de courant en jeu, les phénomènes d'induction électromagnétique liés à la propagation d'ondes de courant sur les conducteurs se manifestent à des hectomètres du point d'impact, notamment sur les lignes d'alimentation aériennes ou les lignes de télécommunications, où des surtensions sont véhiculées jusqu'aux équipements électriques et électroniques en leurs extrémités provoquant des dégâts, voire des destructions complètes, et altérant la qualité de service.

- **Effets électrochimiques :** Même sur des descentes de paratonnerre fréquemment foudroyé il n'y a pas lieu de s'attendre à des décompositions électrochimiques. La corrosion accélérée due à des courants circulants dans le sol est importante sur les conducteurs enterrés (câbles, canalisations, installations de mise à la terre, etc.). Toutefois, compte tenu de la courte durée des coups de foudre, ces effets sont généralement négligeables par rapport à ceux provoqués par les courants telluriques (courants électriques qui circulent naturellement dans la Terre, surtout dans les couches sous-jacentes, contenant ou non des parties métalliques, au niveau du sol, ces courants

résultent des champs électriques induits par les variations du champ magnétique terrestre, dès que le sol est légèrement conducteur), appelés aussi courants vagabonds.

- **Effets sur un être vivant (humain ou animal) :** le passage d'un courant d'une certaine intensité, pendant une courte durée suffit à provoquer des risques d'électrocution par arrêt cardiaque ou arrêt respiratoire. A cela s'ajoutent les dangers de brulures.

I.12 La foudre et les réseaux électriques :

I.12.1 Coup de foudre sur un conducteur de phase (direct) :

Pour déterminer les conséquences d'un coup de foudre touchant un conducteur de phase, on considéré généralement une injection de courant i(t) due à la foudre .ce courant se répartit par moitié de part et d'autre du point d'impact (figureII.9) et se propage vert les extrémités de la ligne.

Les surtensions qui se propagent immédiatement après l'impact s'expriment à partir de l'impédance caractéristique (ou impédance d'onde) Zc de la ligne, d'après la formulation simplifiée suivante (II.2) (en valeurs instantanées). **[15,23]**

$$V(t)=i(t)Z_c/2 \qquad (I.2)$$

L'impulsion de tension va se propager le long de la ligne vers les pylônes en subissant des déformations dues aux éventuels amorçages des chaînes d'isolateurs. En effet, lorsque la surtension arrive au niveau d'un pylône où le conducteur est suspendu par une chaîne d'isolateurs, selon les valeurs respectives de tension de tenue de cette chaîne et d'amplitude de la surtension, il y a ou non amorçage. En cas d'amorçage, il y a défaut d'isolement de la ligne dont l'élimination nécessite l'ouverture des disjoncteurs.

Sachant que l'ordre de grandeur de Z_c est 300Ω à 400Ω et que les courants de foudre les plus faibles sont de l'ordre de 3 à 4KA, on voit que l'amorçage sur le premier pylône rencontré est pratiquement systématique sur les lignes de tension inférieure à 400KV dont l'isolement en choc de foudre est inférieur ou de l'ordre de 1000 KV

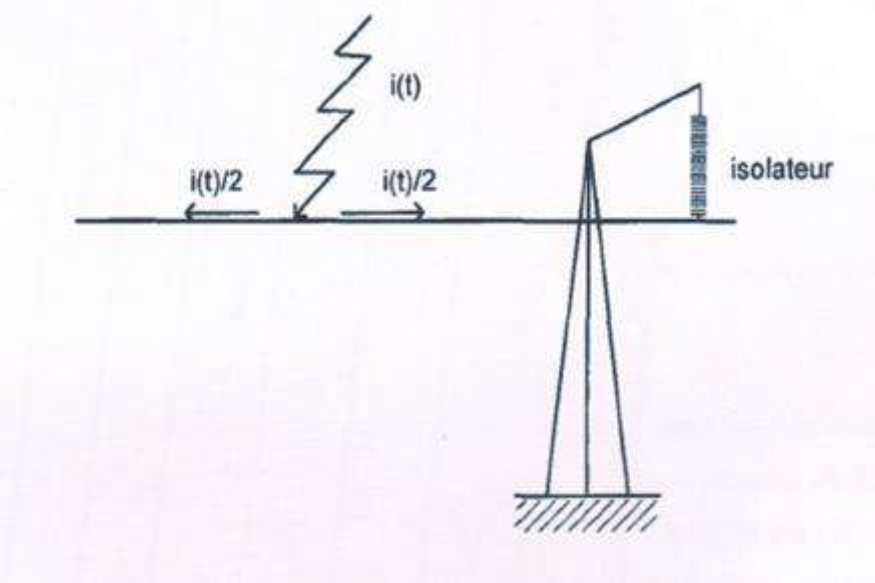


Figure I.9 : coup de foudre tombant sur un conducteur de phase.

I.12.2 Coup de foudre sur un câble de garde ou un pylône indirecte:

Pour protéger une ligne des impacts directs de la foudre, on utilise un câble de garde placé au-dessus des conducteurs et relié à la terre au niveau de chaque pylône. Si le coup de foudre tombe sur un pylône ou un câble de garde qui lui est relié, l'écoulement du courant vers la terre entraîne une élévation de potentiel de la tête de pylône.

Lorsque la différence de potentiel aux bornes des chaînes d'isolateurs supportant les conducteurs de phase atteint ou dépasse leur tenue diélectrique, il y a amorçage d'au moins une d'entre elles. On parle alors d'amorçage en retour (Figure II.10).

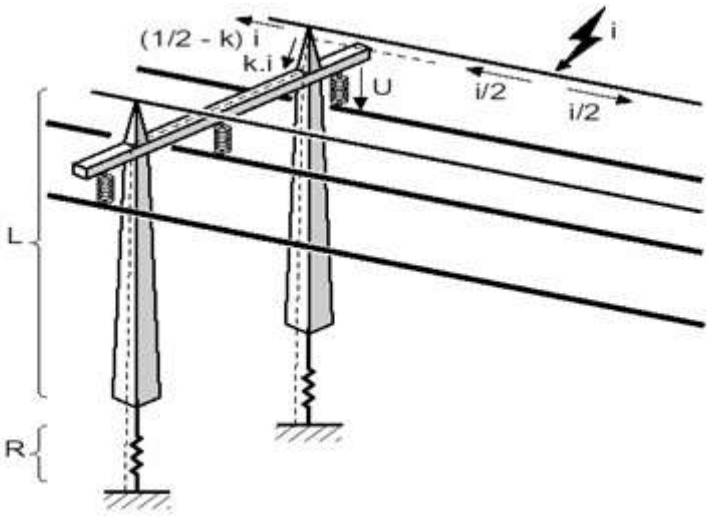


Figure I.10 : Coup de foudre tombant sur un câble de garde [25]

Les surtensions se propagent le long de la ligne vers les postes et peuvent à nouveau provoquer des amorçages sur d'autres pylônes si le coup de foudre est de forte amplitude et la tenue diélectrique des chaînes d'isolateur est faible (quelques centaines de kilovolts). On retrouve alors les phénomènes décrits dans le paragraphe précédent.

Une approche statistique utilisant la fonction de réparation des amplitudes des courants de foudre permet de calculer les taux d'amorçage en retour d'une ligne.

Ces calcules montrent qu'il n'est pas nécessaire d'installer un câble de garde sur les lignes dont la tenue est faible (cas des lignes de distribution), mais que cela est efficace pour les lignes de transport H.T.il n'ya pratiquement plus de risque d'amorçages en retour sur une ligne T.H.T. de 750 kV.

I. 13 propagations des surtensions de foudre vers les postes :

La surtension de foudre, dont la forme dépend des éventuels amorçages au niveau des pylônes, se propage le long de la ligne jusqu' au poste en subissant un amortissement du à l'effet de peau mais surtout à l'effet couronne. Les surtensions réellement contraignantes pour l'équipement constituant le poste dû à des coups de foudre tombant sur la ligne entre le poste et une distance dite distance limite, de quelques kilomètres au maximum.

Pour les coups de foudre tombant au-delà de cette distance limite, les surtensions sont le plus souvent suffisamment amorties par les l'effet couronne pour ne plus pouvoir provoquer d'amorçage dans le poste (figure II.11).

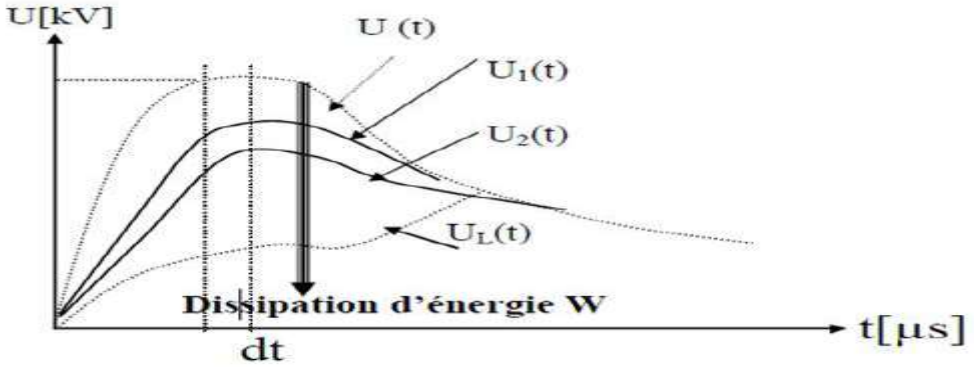


Figure I.11 : réduction due à l'effet couronne, de la pente moyenne et de l'amplitude d'une surtension due à la foudre durant sa propagation le long de la ligne**. [23]**

Par ailleurs, pour les postes, on parle d'effet d'autoprotection lorsque plusieurs lignes sont en permanence raccordées au poste car dans ce cas, la pente de l'onde de foudre incidente est divisée par le nombre de ligne raccordée.

Par contre, la configuration pour la quelle les surtensions sont les plus importantes est celle d'une ligne qui arrive sur un appareil de coupure en position ouverte.

Ces éléments ne sont que des indications. Il est préférable d'effecteur un calcul précis des contraintes avec les moyennes actuels de simulation permettant de représenter la ligne et le poste.

Ils permettent de déterminer, à partir des éléments statistiques connus des paramètres de foudre, les fonctions de répartition des surtensions sur les points du poste ou un dimensionnement est nécessaire. Cela permet de mieux prendre en compte le caractère aléatoire du phénomène de foudre.

I. 14 montées en potentiel de la prise de terre :

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 a proximité de leurs prises de terre. Le courant circulant dans la terre peut provoquer la montée en potentiel des équipements par les prises terre (figure II. 12)

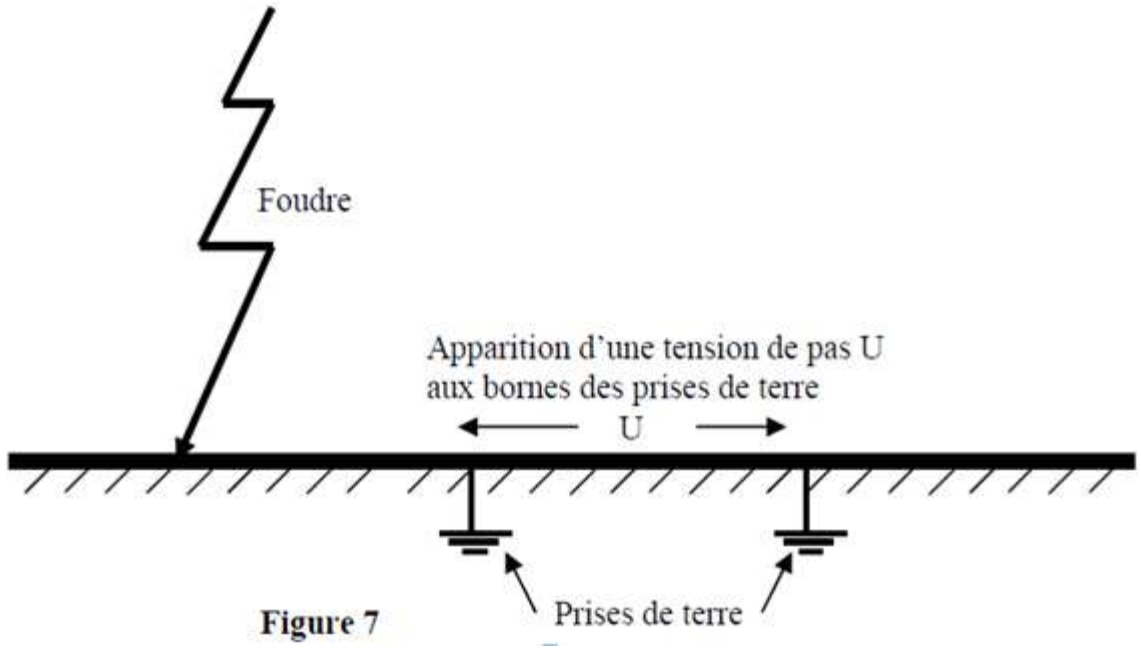


Figure I.12 : montée en potentiel de la prise de terre référence.

I.14.1 Tension de pas :

La distribution des courants de foudre dans un sol dépend de la nature du chemin parcouru. dans le cas d'un sol hétérogène, des différences de potentiel dangereuses peuvent s'établir entre deux points voisins. Cette différence est appelée tension de pas.

Les charpentes métalliques des bâtiments et les prises de terre doivent être toutes reliées entre elles afin d'éviter des tensions dangereuses pour l'homme, ainsi que pour les risque d'incendie et d'explosions dus aux amorçages d'arc (figure I .13)

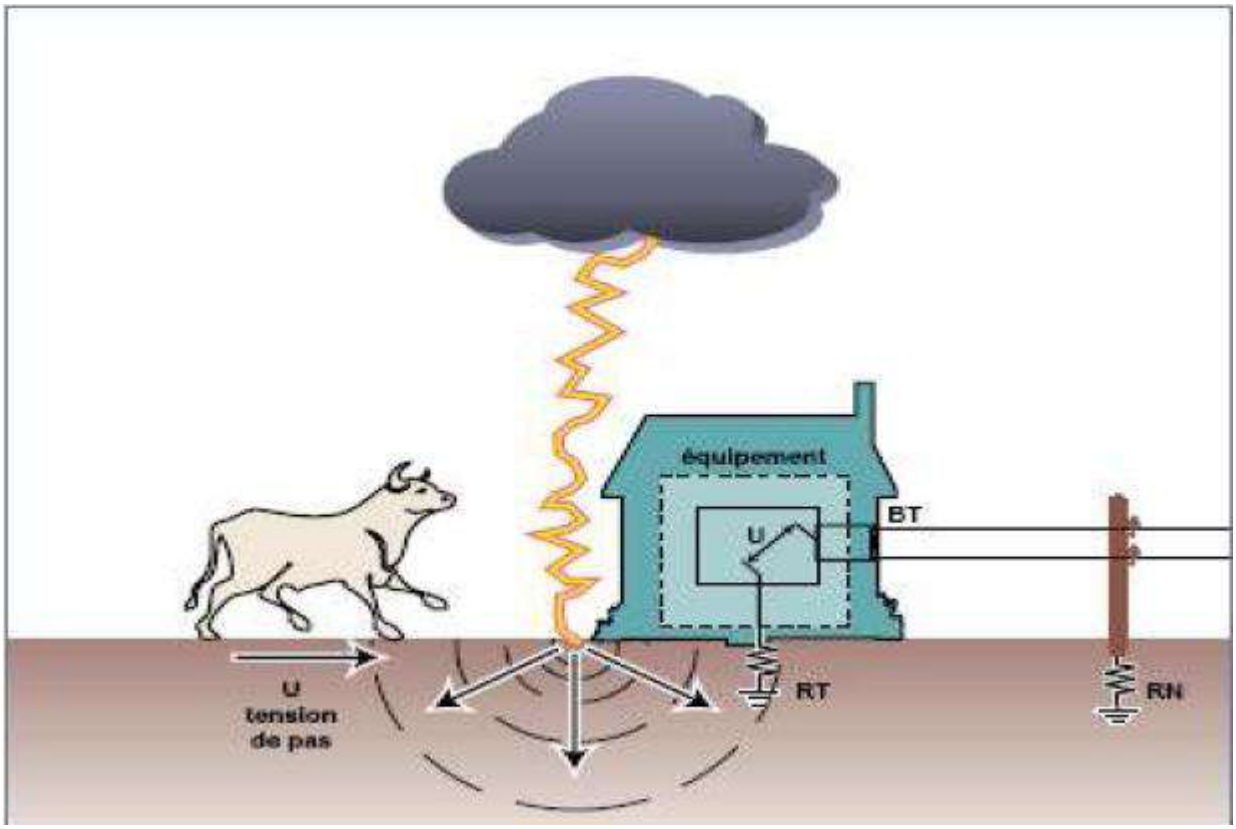


Figure I.13 : montée en potentiel de la prise de terre. [25]

• C'est ce phénomène qui explique souvent le foudroiement indirect des animaux : même à100m du point d'impact, une vache dans une prairie peut subir entre ses pattes arrière et ses pattes avant, une différence de potentiel de 500V. **[24 ,25].**

I.15 Conclusion :

A partir de ce chapitre on peut conclure que la foudre est un phénomène météorologique d'instabilité atmosphérique, elle est caractérisée par le niveau karénique et la densité des coups de foudre.

Malgré les dégâts qu'elle produit, elle reste indispensable à la vie , puisque les orages assurent le maintien du champ électrique de notre planète.

La foudre a tendance à frapper les régions de haute altitude et les objets proéminents. Pour nous protéger de la foudre il faut des dispositifs de protection contre la foudre cela fera l'objet du chapitre III

II.1 Introduction : [1]

Des perturbations électriques de différentes natures se propagent dans les réseaux. On cherche à les caractérisée, à les analyser et à donner les moyens d'étude et d'évaluation qui serviront à connaître leurs effets et à s'en protéger.

II.2 Définition des surtensions:[2]

Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit électrique et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc...). Elles peuvent apparaître :

- Entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel.
- Entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun.

II.3. Origine des surtensions : [2]

Les surtensions de mode commun ou de mode différentiel qui peuvent apparaître sur des réseaux industriels ou tertiaires peuvent avoir deux origines: interne, externe.

II.3.1Origine interne:

La surtension a pour origine le réseau lui même Elle ne dépend que des caractéristiques du réseau interne et des matériels qu'il alimente. Il peut s'agir par exemple

• Des surtensions transitoires de rétablissement apparaissant à l'ouverture des circuits (surtensions de manœuvre).

• De la monté à la tension composée des phases saines dans un réseau à neutre impédant en cas de défaut phase-terre (surtension temporaire).

II.3.2 Origine externe

Elles sont générées ou véhiculées par des éléments extérieurs au réseau. On peut citer par exemple:

• Les surtensions atmosphériques dues à un coup de foudre direct ou indirect.

II. 4 Classification des surtensions : [3]

Une classification peut être établie suivant divers critères tels que l'origine la durée et la forme (voir tableau.I-1).

Dans cette classification on distingue:

a) Les surtensions transitoires:

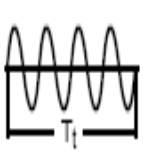
• Les surtensions transitoires d'origine externe (foudre).

• Les surtensions transitoires d'origine interne (de manœuvre).

b) Les surtensions temporaires:

• Les surtensions externes temporaires.

• Les surtensions internes temporaires.

classe de surtension	basse fréquence		transitoire		
	permanente	temporaire	à front lent	à front rapide	à front très rapide
forme					
gamme des formes (fréquence, front de montée, durée)	f = 50 ou 60 Hz $T_t \geq 3\,600$ s	10 < f < 500 Hz $3\,600 \geq T_t \geq 0{,}03$ s	$5000 > T_p > 20\ \mu s$ 20 ms ≥ T_2	$20 > T_1 > 0{,}1\ \mu s$ 300 µs ≥ T_2	100 > T_f > 3 ns 0,3 > f_1 > 100 MHz 30 > f_2 > 300 kHz 3 ms ≥ T_t
forme normalisée	f = 50 ou 60 Hz T_t (*)	48 ≤ f ≤ 62 Hz T_t = 60 s	T_p = 250 µs T_2 = 2 500 µs	T_1 = 1,2 µs T_2 = 50 µs	(*)
essai de tenue normalisé	(*)	Essai à fréquence industrielle de courte durée	Essai de choc de manœuvre	Essai de choc de foudre	(*)

(*) à spécifier par le Comité de produit concerné

Tableau .II-1 : Classification des surtensions.

II. 4.1 Les surtensions transitoires :

II. 4.1.1 Les surtensions transitoires d'origine externe (la foudre)[2] :

L'orage est un phénomène naturel connu de tous, spectaculaire et dangereux.
1 000 orages éclatent en moyenne chaque jour dans le monde, ils causent chaque année 10 % des incendies, la mort de 40 personnes et de 20 000 animaux, et 50 000 coupures d'électricité ou de téléphone.

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. 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 ce sont les plus violents.

A noter que le front de montée des chocs de foudre retenu par les normes, est de 1,2 µs pour la tension et 8 µs pour le courant. Une distinction est souvent établie entre :

- Le coup de foudre «direct» touchant une ligne
- Le coup de foudre «indirect» tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône métallique, ou, ce qui revient au même, sur le câble de garde (mis à la terre, ce câble relie les sommets des pylônes, il est destiné à protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs).

II. 4.1.1.1 Le coup de foudre direct :

Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (fig. I-1), provoque une augmentation de tension.

U donnée par la formule :

$$U = Z_C \frac{i}{2} \qquad (II.1)$$

ic : le courant injecté.
Zc : Impédance caractéristique de la ligne (300 à 500 ohms).

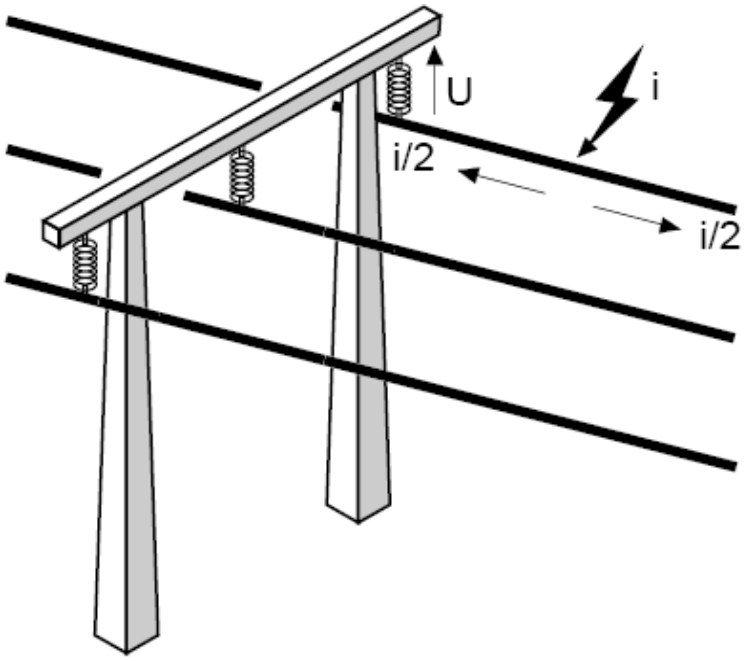


Figure. II-1 : Chute de la foudre sur un conducteur de phase.

U atteint donc des valeurs de plusieurs millions de volts, ce qui n'est supportable par aucune ligne.

L'amplitude de ces surtensions est on fonction de l'intensité de la foudre qui est elle même on fonction de la charge accumulée dans les nuages et de l'impédance caractéristique rencontrée par cette intensité.

D'après des études statistiques, presque 87% des coups de foudre ont des intensités plus grandes ou égales à 20 kA (valeur crête) tandis qu'environ 60% d'intensités plus grandes ou égale à 40 kA (valeur crête) suivant la figure .I-2.[4]

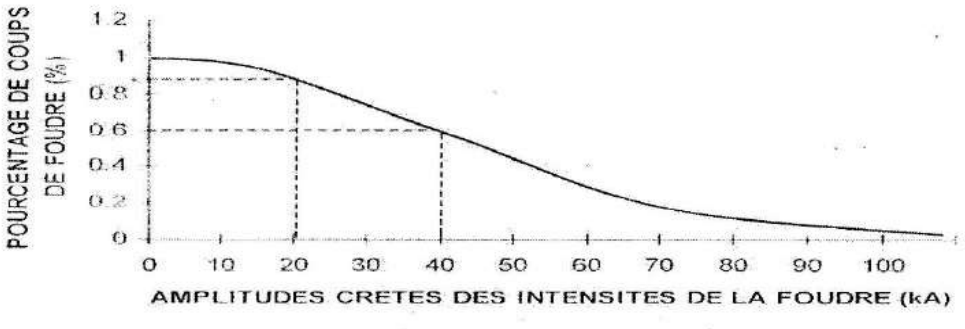


Figure II.2 : Courbe de distribution des intensités totales de la foudre (valeurs crêtes).

Lorsque cette surtension rencontre la chaîne d'isolateur, cette dernière subit un choc violent et de courte durée.

Si cette chaîne d'isolateurs est incapable de résister à cette surtension, il se produit un arc électrique (contournement): les disjoncteurs ouvrent le circuit. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si la tenu critique de la chaîne d'isolateurs est supérieur à l'intensité de surtension, l'onde se propage plus loin pour aboutir éventuellement au poste de transformation.

Ces elles peuvent également endommager les disjoncteurs, sectionneurs, isolateurs, faisant partie du poste **[4].**

Pour les réseaux dont la tension est inférieure à 400 kV, pratiquement tous les coups de foudre directs entraînent un amorçage et un défaut à la terre.

La valeur limite du courant de foudre au delà de laquelle il y a amorçage, donc interruption de service, est appelée courant critique Ic.

L'ordre de grandeur de Ic est de : 5,5 kA pour les lignes 225 kV,
8,5 kA pour 400 kV,
19 kA pour 750 kV.

***Tension de tenue aux ondes de choc "** BIL " : [1]

L'appareillage utilisé dans les postes doit pouvoir résister à cette onde de choc. A cette fin, des organismes de normalisation ont établi une onde de tension de choc standard, comme montrée à la figure. I-3, définie par "T1/T2".

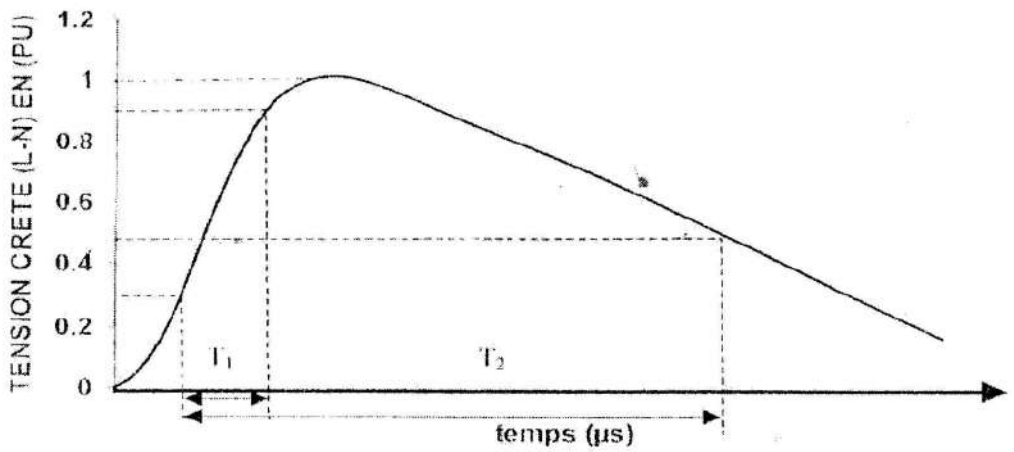


Figure. II-3 : Onde de choc normalisée dans le cas d'une onde de foudre.

Cette onde de foudre atteint sa valeur crête en 1.2 µs, décroît à la moitié de cette valeur en 50 µs, la tension crête peut prendre une série de valeurs normalisées comprise entre (2400 et 30 kV), ainsi tout appareil qui peut résister à une onde de choc est dit posséder une tension de tenue au choc ou "BIL", voir le tableau. I-2.

BIL : Basic Impulse Level.

Quelques valeurs normalisées de la tension crête en KV (BIL*)		
1550	900	350
1420	820	250
1300	750	200
1175	650	150
1050	550	110
	450	90

Tableau II.2 : Les valeurs normalisées de la tension crête en KV (BIL).

II. 4.1.1.2 Le coup de foudre indirect : [5]

Lorsqu'il se produit sur un support, ou même simplement à proximité d'une ligne, des surtensions importantes sont générées dans le réseau.

Ce deuxième cas, plus fréquent que le précédent, peut se révéler presque aussi dangereux.

Si la foudre tombe sur le pylône ou le câble de garde, l'écoulement du courant provoque l'augmentation du potentiel de la masse métallique par rapport à la terre (fig. I- 4).

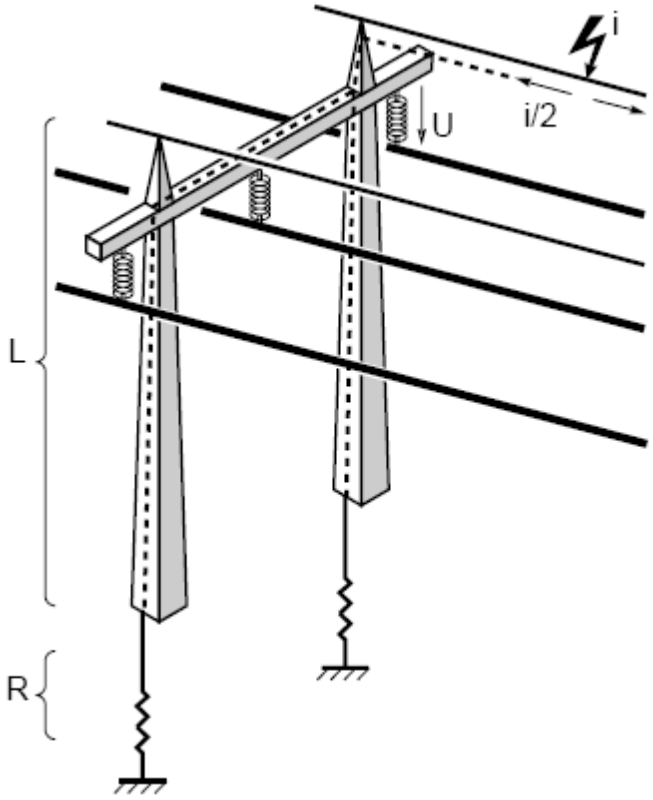


Figure II.4 : Coup de foudre indirect (sur un câble de garde).

La surtension U correspondante peut atteindre plusieurs centaines de kV.

$$U=R.\frac{i}{2}+\frac{L}{2}.\frac{di}{dt} \qquad \text{(II-2)}$$

R : Résistance en onde raide de la prise de terre.

L : Inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre.

Lorsque cette tension atteint la tension d'amorçage d'un isolateur, il se produit un «amorçage en retour» entre la structure métallique et un ou des conducteurs actifs.

Pour les tensions de réseau supérieures à 150 kV, cet amorçage en retour est peu probable.

La qualité de la prise de terre des pylônes joue un rôle important. A partir de 750 kV, il n'y a pratiquement plus aucun risque d'amorçage en retour, ce qui justifie l'installation de câbles de garde sur les lignes à THT.

En dessous de 90 kV, ces câbles ne constituent une protection efficace que si la prise de terre des pylônes est excellente.

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, l'écoulement de l'énergie vers le sol provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. Les ondes induites sur la ligne sont similaires en forme et en amplitude à celles obtenues par choc de foudre direct (durée de front de 1,2 ms et durée de queue 50 ms).

II. 4.1.2 Les surtensions transitoires d'origine interne (de manoeuvre) : [6]

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique (ouverture d'appareils de protection, fermeture et ouverture d'appareils de commande) provoque l'apparition de phénomènes transitoires. Ceux-ci se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension ou d'un train d'ondes haute fréquence de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide.

Les surtensions engendrées se propagent en générale sous forme d'onde haute fréquence à amortissement rapide.

L'étude statique des surtensions de manœuvre a conduit à la normalisation des ondes présentées par la figure.I-5.

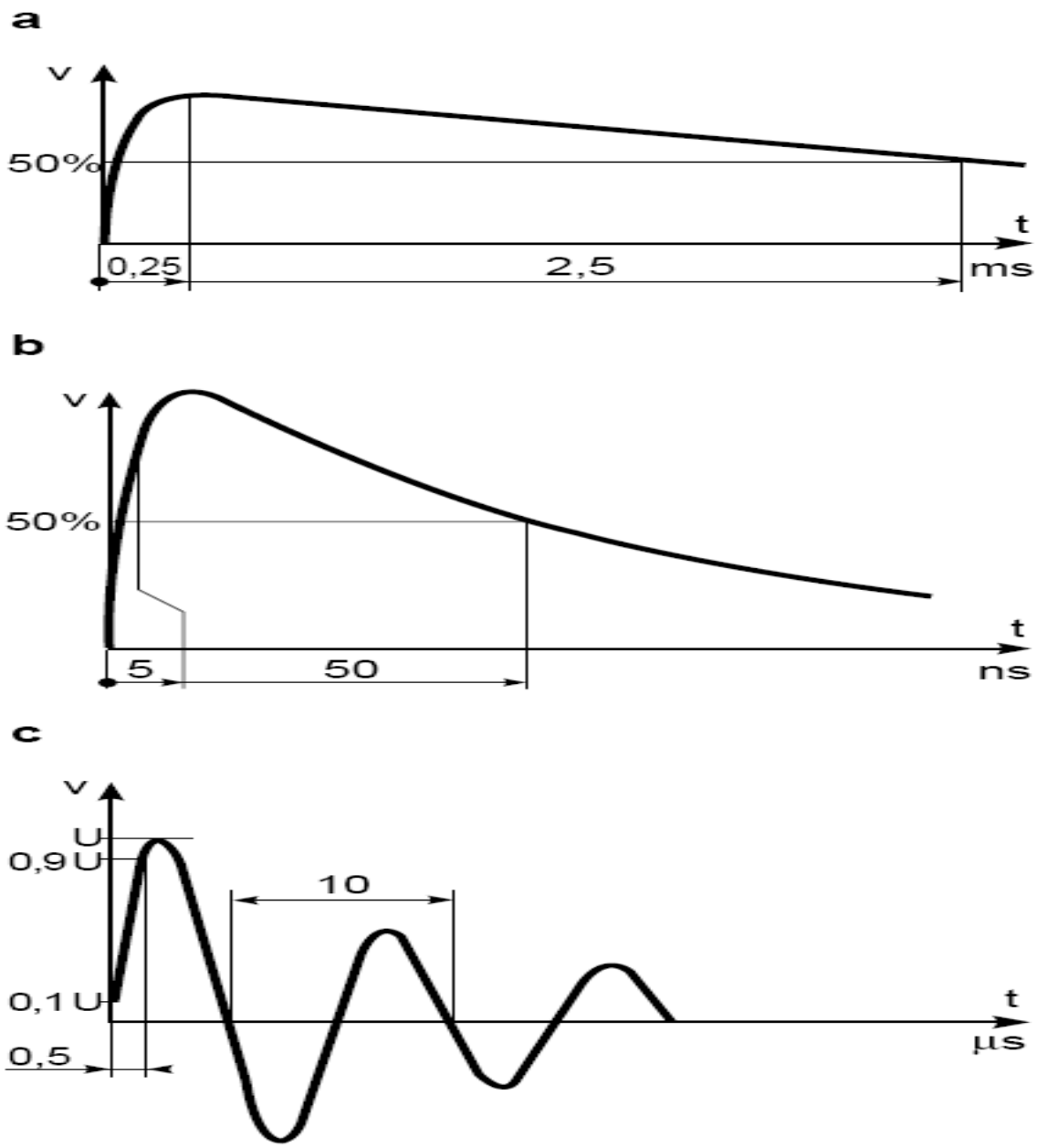


Figure II.5 : Formes des ondes normalisées représentant les surtensions de manoeuvre

a- Onde 250/2500 ms, dite onde longue amortie.

b- Onde 5/50 ns, dite onde impulsionnelle récurrente.

c- Onde 0.5 µs, dite onde sinusoïdale amortie.

Ces surtensions de manœuvre sont dues à :

- misse en service d'une ligne.
- La coupure des courants capacitifs et inductifs.
- L'apparition et la disparition du défaut.
- La perte d'une charge.

II.4.1.2.1 Surtensions de manœuvre dues à l'enclenchement et au réenclenchement des linges:

Ce type de surtension apparaît lors de la mise sous tension d'une ligne ou lors de la remise sous tension de la ligne à la suite d'une ouverture sur défaut, dans le premier cas les surtensions de manoeuvres sont essentiellement dues au phénomène de réflexion d'onde Dans le deuxième cas, des phénomènes dus aux charges résiduelles de la ligne peuvent amplifier ces phénomènes de réflexions.

Les surtensions dues à l'enclenchement présentent une grande importance pour le choix de l'isolement dans les réseaux électriques HT et THT. Pour les autres gammes de tension, sauf cas particulier, ces surtensions présentent moins d'importance **[7]**.

II.4.1.2.2 Surtensions de manoeuvre dues à la coupure des courants capacitifs et inductifs :

Dans les réseaux moyens tension (MT), la coupure des courants inductifs ou capacitifs peut provoquer des surtensions nécessitant une attention spéciale, que ce soit dans les réseaux de distribution ou dans les installations industrielles des centrales.

Dans les réseaux hauts tension (HT), les surtensions provoquées par la coupure des courants capacitifs (coupure de ligne à vide, de câble, ou de batterie de condensateurs) peuvent être particulièrement dangereuses à cause des réamorçage dans les disjoncteurs.

On doit spécialement prendre en considération les manoeuvres suivantes:

- Coupure des courants de démarrage.
- Coupure des courants inductifs (coupure des courants magnétisants d'un transformateur ou d'une réactance).
- Manoeuvre de câbles à vide et de batterie de condensateurs.

Pour illustrer les surtensions de manoeuvre de coupure, on étudie le comportement de la tension transitoire de rétablissement [4].

II.4.1.2.2.1 Tension transitoire de rétablissement (TTR) : [1]

C'est la tension qui apparaît aux bornes de chaque pole d'un appareil de coupure (sectionneur, interrupteur, disjoncteur), immédiatement après la coupure du circuit.

Cette tension peut être considérée comme la somme de deux composantes:

- La 1 ere est la tension transitoire de rétablissement (TTR), elle se développe aux bornes du disjoncteur immédiatement après le passage à zéro naturel du courant de court-circuit, elle correspond donc à une tentative de coupure.
- La 2 eme est la tension qui oscille à la fréquence du réseau, elle est mesurée après la disparition des phénomènes transitoires sur tous les pôles du disjoncteur et s'exprime en valeur efficace.

Cette TTR est caractérisée par deux importants paramètres:

Le premier est défini par le rapport de la tension de crête maximale (UCMax) à la tension de service (UMax), ce rapport est appelé facteur de surtension de la ligne et est désigné par (Ks).

$$K_s = \frac{U_{c\max}}{U_{\max}} \text{(p.u)} \qquad \text{(II-3)}$$

Avec :

U_{CMax} : Valeur crête de la surtension.

U_{Max} : Valeur crête de la tension permanente avant la coupure du courant.

Le deuxième paramètre: la vitesse d'accroissement maximale de la tension de rétablissement (VATR) juste après la coupure, figure.I-6.

$$\text{VATR} = \frac{U\max}{T\max} \ \text{(V/µs)} \qquad \text{(II-4)}$$

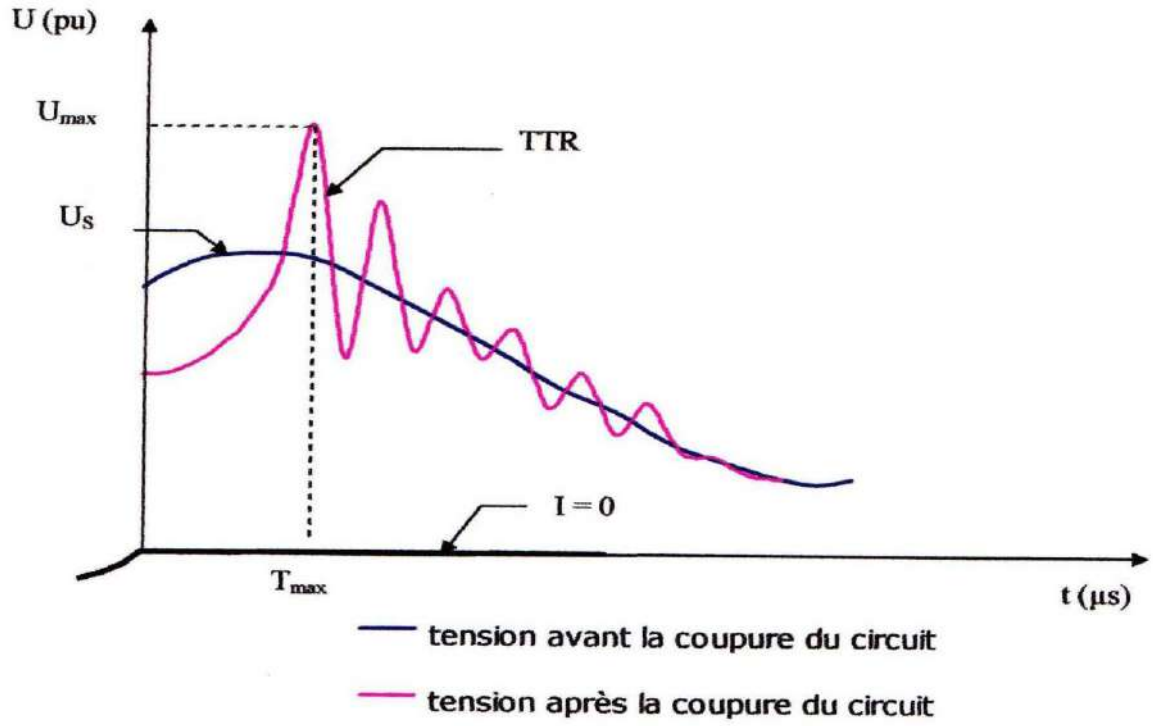


Figure. II-6 : La TTR aux bornes du disjoncteur.

Plus la VATR est plus élevée, plus l'arc risque de se réamorcer facilement et rapidement après le passage par zéro du courant.

II.4.1.2.3 Surtensions de manoeuvre dues à l'apparition et la disparition d'un défaut:

L'apparition et la disparition d'un défaut conduisent généralement à des surtensions relativement faibles, et les réseaux sont alors dimensionnées en fonction des surtensions provoquées par d'autre types de manoeuvre, en pratique le réenclenchement.

Ce type des surtensions particulièrement sensibles dans le cas des réseaux faiblement maillés, comportant des générateurs ou des charges importantes **[7].**

II.4.1.2.4/ Surtensions de manoeuvre dues à la perte d'une charge:

Les variations brusques de charge entraînent des surtensions de manœuvres importantes et se poursuivent par des surtensions temporaires. Le délestage ou la perte d'une charge occasionne des surtensions, car au moment ou le réseau perd une charge ou une partie de sa charge, la ligne se comporte comme un condensateur (l'effet capacitif), ce qui engendre des surtensions importantes **[7].**

II.4.2 Les surtensions temporaires :

II.4.2.1 Les surtensions externes temporaires [1]:

Les surtensions externes temporaires sont indépendantes des caractéristiques propres du réseau électrique considéré.

Elles peuvent durer de quelques secondes à quelques heures, les causes principales sont:

- Influence entre lignes de tensions différentes.
- Contact entre lignes de tensions différentes.

II.4.2.2 Les surtensions internes temporaires : [1]

Les surtensions internes temporaires dépendent des génératrices, des utilisateurs et des caractéristiques du réseau électrique.

Les principales causes de ce genre de surtension sont :

II.4.2.2.1 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.

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 à la terre, à la tension composée :

$$U = V.\sqrt{3} \qquad \text{(II-5)}$$

De façon plus précise, lors d'un défaut d'isolement sur la phase A, un facteur S_d de défaut à la terre est défini par le rapport de la tension des phases B et C par rapport à la terre, à la tension simple du réseau.

L'équation ci-après permet de calculer S_d :

$$S_d = \frac{\sqrt{3.\left(K^2 + K + 1\right)}}{K + 2} \qquad \text{(II-6)}$$

Avec : $$K = \frac{X_0}{X_d} \qquad \text{(II-7)}$$

X_d : La réactance directe du réseau vu du point de défaut.

X_0 : La réactance homopolaire.

A noter que :

- Si le neutre est parfaitement isolé, soit $X_0 = \infty$: $S_d.3^{1/2} = \sqrt{3}$.
- Si la mise à la terre du neutre est parfaite soit $X_0 = X_d$: $S_d = 1$.
- Si, comme dans le cas général, $X_0 \leq 3\ X_d$: $S_d \leq 1{,}25$.

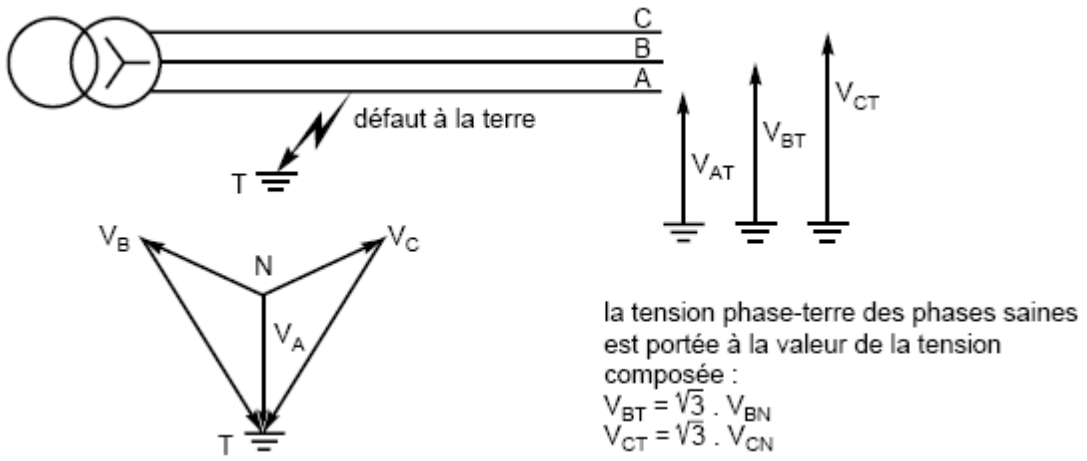


Figure II.7 : Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement.

II.4.2.2.2 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 long de la ligne.

En effet, avec

- L et C désignant respectivement l'inductance et la capacité totale de la ligne.
- Us et Ue étant les tensions à l'extrémité ouverte et à l'entrée de la ligne.

Le facteur de surtension est égal à:

$$\frac{U_s}{U_e} = \frac{1}{1 - \frac{1.L.C.\omega^2}{2}} \qquad \text{(II-8)}$$

Ce facteur de surtension est de l'ordre de 1,05 pour une ligne de 300 km et de 1,16 pour une ligne de 500 km.

Ces valeurs sont sensiblement les mêmes pour les lignes HT et THT.
Ce phénomène se produit en particulier lorsqu'une ligne longue est brusquement déchargée.

II.4.2.2.3 Surtension par ferrorésonance :

La surtension est alors le résultat d'une résonance particulière qui se produit lorsqu'un circuit comporte tout à la fois un condensateur (volontaire ou parasite) et une self avec circuit magnétique saturable (un transformateur par exemple).

Cette résonance peut apparaître surtout lorsqu'une manoeuvre (ouverture ou fermeture d'un circuit) est réalisée sur le réseau avec un appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultané.

Le circuit représenté par le schéma de la figure.I-8, avec en série une inductance à noyau saturable L et la capacité du réseau C, facilite la compréhension du phénomène. Il est alors possible de dessiner les trois courbes :

$$U_c = f(i)\ ;\ U_l = f(i)\ ;\ \left(U_l - \frac{1}{C}.\omega.i\right) = f(i)\ . \qquad \text{(II-9)}$$

• La première est une droite de pente $\frac{1}{C}$,

• La seconde présente un coude de saturation,

• Et la dernière permet de visualiser deux points de fonctionnement (O et B) pour lesquels la tension aux bornes de l'ensemble L C est nulle et deux autres points de fonctionnement stables M et P ; N est un point d'équilibre instable.

Les tensions aux bornes de L et de C (point P) sont élevées. Le passage de M vers P peut n'être dû qu'à un transitoire qui augmente momentanément la tension e à une valeur supérieure à E.

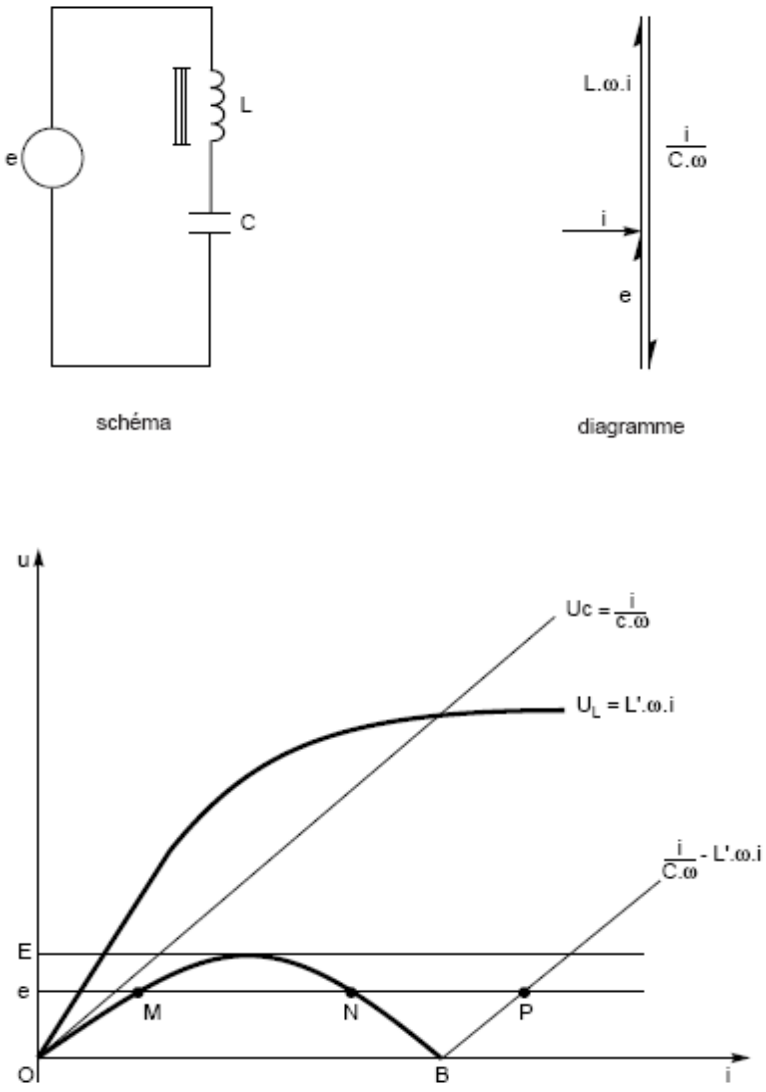


Figure II.8 : Principe de la ferrorésonance.

II.5 Les effets des surtensions : [8]

Les effets sont notablement différents suivant l'amplitude la fréquence et la durée des surtensions.

Les surtensions véhiculées par les lignes électriques peut atteindre tous les circuits électriques.

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

• Dégradation de matériel, de façon brutale comme les claquages diélectriques par surtension, ou par vieillissement prématuré à cause de contraintes non destructrices immédiatement mais répétées,

• Dysfonctionnement des installations particulièrement au travers des circuits à courants faibles, exemple : perturbations parasites des équipements de contrôle-commande et de communication,

• Réduction de la continuité de service par des interruptions longues (cas de destruction de matériel) ou courtes (dysfonctionnement des automatismes de réseaux),

• Danger pour l'homme et les animaux, notamment par l'apparition de la tension de pas pouvant entraîner une électrisation voire électrocution.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé les notions fondamentales des surtensions dans le réseau électrique, la connaissance des concepts tels que les caractéristiques diélectriques des surtensions, et leurs conséquences sur les installations du réseau électrique, ainsi que le mécanisme du phénomène incontournable de la foudre qui sera l'objectif du chapitre suivant.

III.1 Introduction :

La coordination de l'isolement consiste à ajouter les tenues d'diélectriques, en service d'équipement (lignes, postes, transformateurs, alternateurs) aux niveaux des surtensions susceptibles d'apparaître sur ces équipements durant leur exploitations. De telle sorte que la probabilité de court-circuit due à la défaillance d'un isolement donné soit acceptable du point de tant opérationnel qu'économique.

Qu'ils soient directs ou indirects, les effets de la foudre sur les biens et les personnes peuvent être considérables, en particulier lorsqu'ils sont associés à des perturbations liées au vent, à la pluie ou à la grêle. Trop souvent sous-estimé et malgré 2000 et 5000 orages se forment en permanence autour du globe, chaque année, la terre est frappée de près de 3 milliards de coups de foudre. Le risque foudre peut être anticipé grâce à des dispositifs de protection adaptés: l'éclateur, parafoudre, câble de garde.

Des dispositifs de protection passive (extérieur et intérieur) permettent d'assurer la maitrise de la connexion de la foudre sur les structures, d'évacuer son énergie à la terre et de limiter les perturbations électromagnétiques. Mais cette action de protection passive doit être accompagnée d'une démarche de protection active basée sur la prévention de risque: alerte et prévention de situation orageuse.

III.2 Coordination des isolements: [26]

III2.1 Définition:

La coordination de l'isolement est le processus de sélection de niveaux de tenue d'isolation d'un équipement électrique en corrélation avec les caractéristiques des dispositifs de protection afin que l'équipement soit protégé contre la surtension attendue.

À partir des niveaux de tensions et surtensions susceptibles d'être présents sur l'installation, on définit 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 choix du niveau de tenue d'isolation d'un équipement et le niveau de tension protégée du dispositif de protection est étroitement lié au jugement et au coût.

La figure III.1, montre la variation du niveau de tenue d'isolation d'un équipement en fonction de la durée de la surtension. En général, la tenue en tension d'un équipement est plus élevée lorsque la surtension est de courte durée.

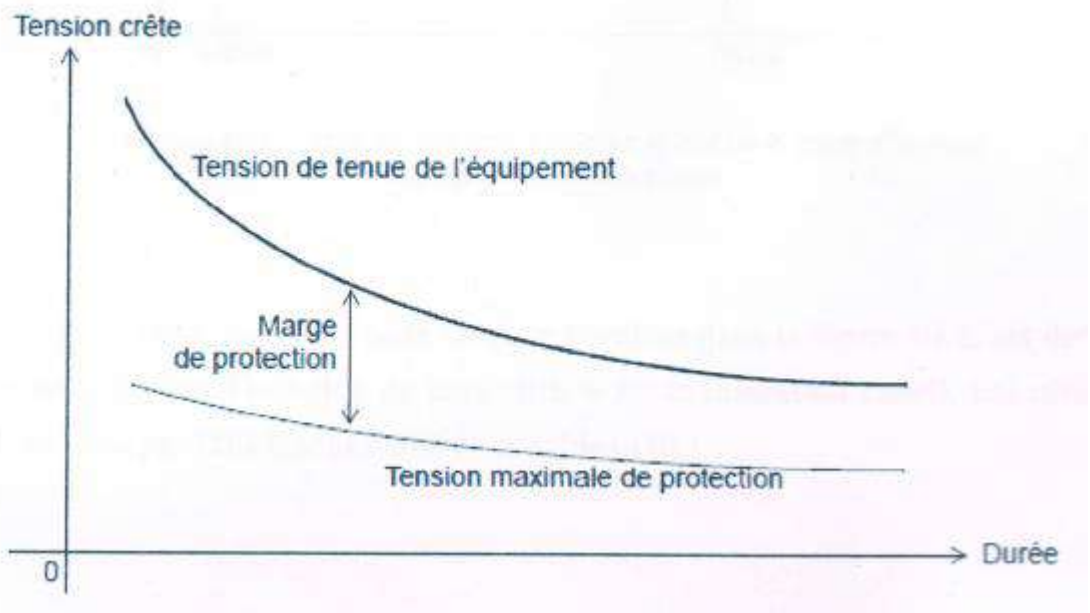


Figure III.1 Niveau de tenue d'isolation d'un équipement électrique

Pour tester le niveau de tenue des équipements, on utilise une forme d'onde (appelée onde de choc) standard définie dans la figure III.2.

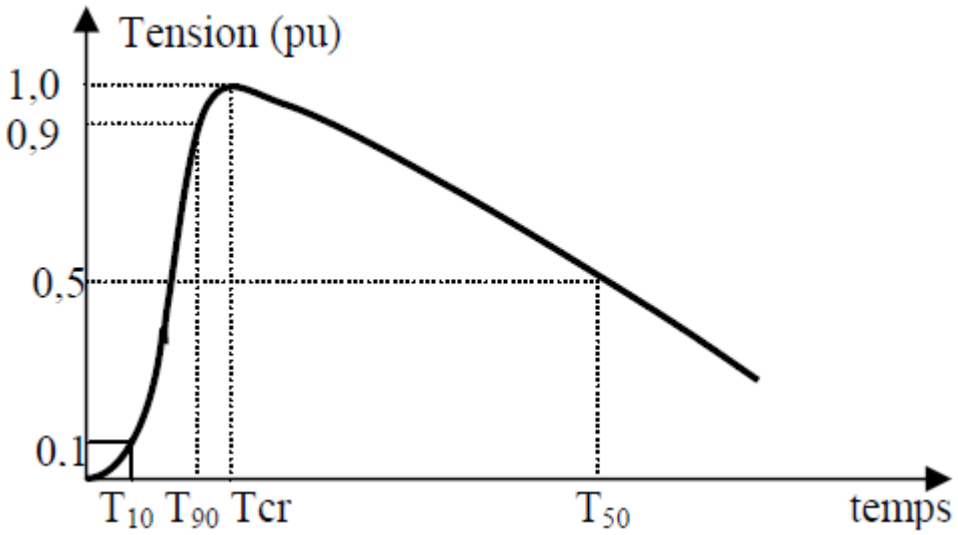


Figure III.2 : Onde de choc standard pour le test de la tenue d'isolation Des équipements électriques

La tension V_{max}, de l'onde de choc montrée dans la figure III.2, est définie comme le niveau d'isolation de base (BIL = Basic Insulation Level). Les niveaux BIL adoptés par l'IEEE sont montrés au tableau III. 1

Le BIL : réduit est appliqué aux réseaux avec une bonne mise à la terre

Tension nominate du réseau kV (eff)	**BIL standard kV**	**BIL réduit kV**
1.2	45	
2.5	60	
5.0	75	
8.7	95	
15	110	
23	150	
34.5	200	
46	250	
69	350	
92	450	
115	550	450
138	650	550
161	750	650
196	900	750
230	1050	825-900
287	1300	1000-1100
345	1550	1175-1300
500		1300-1800
765		1675-2300

Tableau III. 1 : Niveaux de tenue d'isolation standards

III.2.2 Rôle de la coordination d'isolement: [4]

La coordination de l'isolation a pour rôle de déterminer les caractéristiques d'isolement nécessaires et suffisantes des divers constituants des réseaux en vue d'obtenir une tenue homogène aux tensions normales, ainsi qu'aux surtensions de diverses origines (figure III.3).

Son but final est de permettre une distribution sure et optimisée de l'énergie électrique, il faut comprendre et rechercher le meure rapport économique entre les différents paramètres dépendant de cette coordination:

- Cout de l'isolement.
- Cout des protections et le cout des défiances (perte d'exploitation et réparation).

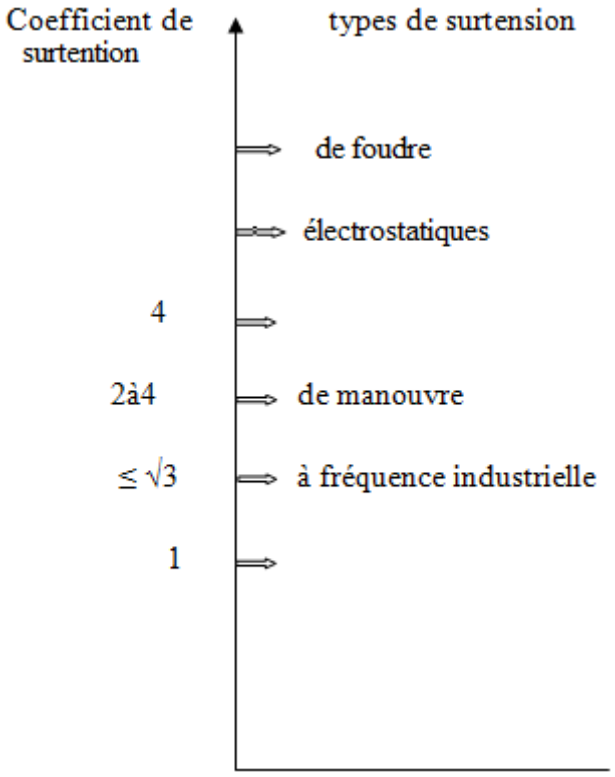


Figure III3 : différents niveaux de tensions présents sur des réseaux HT.

III.2·3 Distance d'isolement et tenue en tension: [4]

III.2.3.1 Distance de l'isolement :

Cette appellation regroupe deux notions, l'une de «distance dans les gaz (air, SF6, etc. ...) » et l'autre de «ligne de fuite» des isolants solides (figure III.4).

- La distance dans les gaz est plus court chemin entre de parties conductrices.
- La ligne de fuite est également le plus court chemin entre deux conducteurs, mais suivant la surface externe U un isolant solide.

Ces deux distances sont directement liées au souci de protection contre les surtensions, mais leurs tenues ne sont pas identiques.

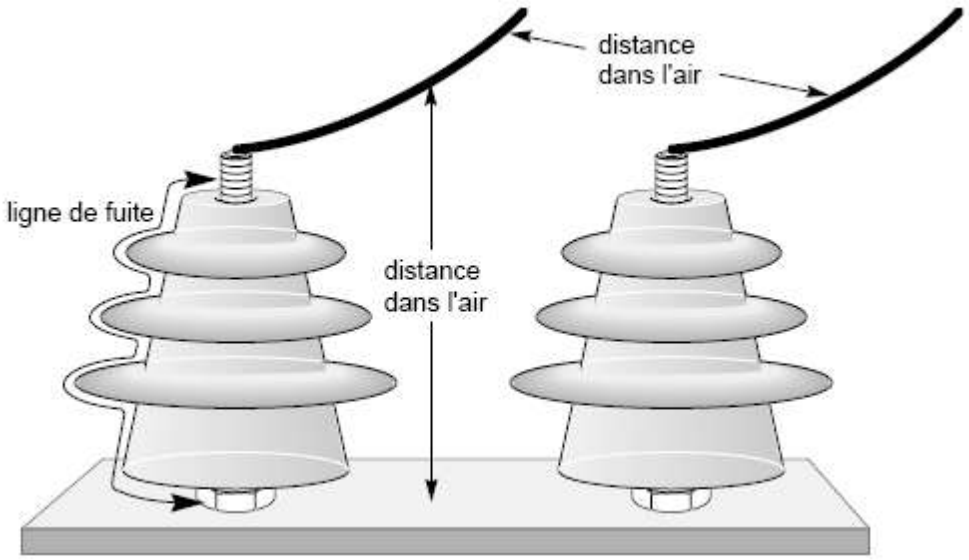


Figure III. 4 : distance dans l'aire et la ligne de fuite.

III.2.3.2 Tenue en tension:

Elle diffère, en particulier suivant le type de surtension appliqué (le niveau de tension, le front de montée, la fréquence, la durée ....).

De plus, les lignes de fuite peuvent être sujettes à des phénomènes de vieillissement propres à la matière isolante considérée, entrainant une dégradation de leurs caractéristiques.

a) Les facteurs influents sont principalement:

- les conditions d'environnement
- les contraintes électriques permanentes (valeur locale du champ électrique).

b) La tenue des distances dans les gaz est également fonction de pression:

- Variation de la pression de l'air avec l'altitude.
- Variation de la pression de remplissage d'un appareil.

III.2.4 Principe de la coordination d'isolement: [4]

La coordination de l'isolement d'une installation électrique c'est donc définie, à partir des niveaux de tensions et surtensions susceptibles d'être présents sur cette installation, un ou Des niveaux de protection sont alors choisis en conséquence la figure suivant (figure III.5).

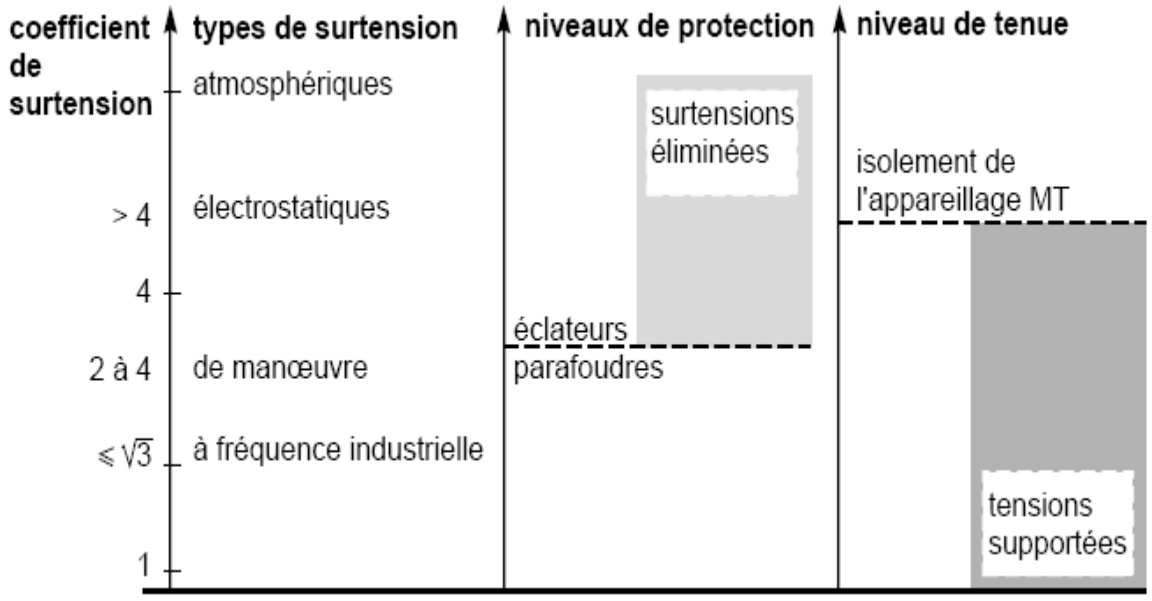


Figure III 5: coordination de l'isolement: le niveau de protection et le tenu de l'appareillage en fonction des surtensions.

Le niveau de protection est déduit des conditions:

- D'installations.
- D'environnement.
- D'utilisation de matériel.

L'étude de ces conditions permet de déterminer le niveau de surtension qui pourra solliciter le matériel durant son utilisation 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 le niveau d'isolement, le niveau de protection de parafoudres éventuels et le risque de défaillance admissible.

Pour bien maitriser les niveaux de protection apportés par les limiteurs de surtension, il convient de bien connaitre leurs caractéristiques et leur comportement.

III.3 Les dispositifs de protection contre la foudre :

III.3.1 Câble de garde: [27]

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs.

Ils sont en général réalisés en almélec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

La figure III.6, représente l'impact d'un coup foudre sur le câble de garde.

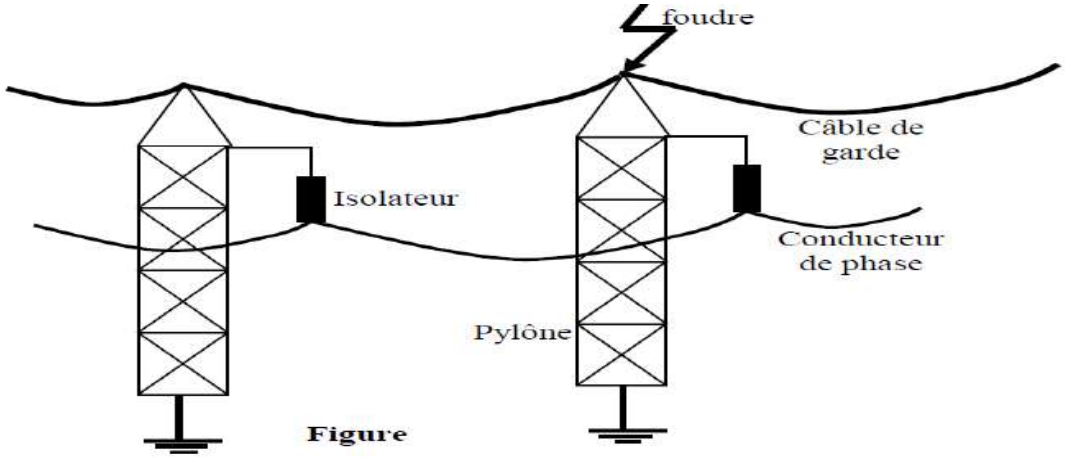


Figure III 6 : câble de garde d'une ligne haute tension.

III.3.1.1 Conception:

- La conception d'un câble de garde consiste essentiellement à la détermination de leur localisation dans la structure.
- Les caractéristiques mécaniques doivent être envisagés de manière, de résister à la charge mécanique et ne va pas avoir une flèche excessive.
- Les caractéristiques électriques, doivent garantir faibles pertes par induction et faibles tensions de passage et de contact.

III.3.2. Méthodes :

III.3.2.1 Méthode de l'angle fixe:

* L'angle d'isolement est l'angle réel qui existe entre le câble de garde et le conducteur de la phase.

La figure III.7, représente le positionnement d'un câble de garde par rapport au conducteur de phase suivant le type de pylône.

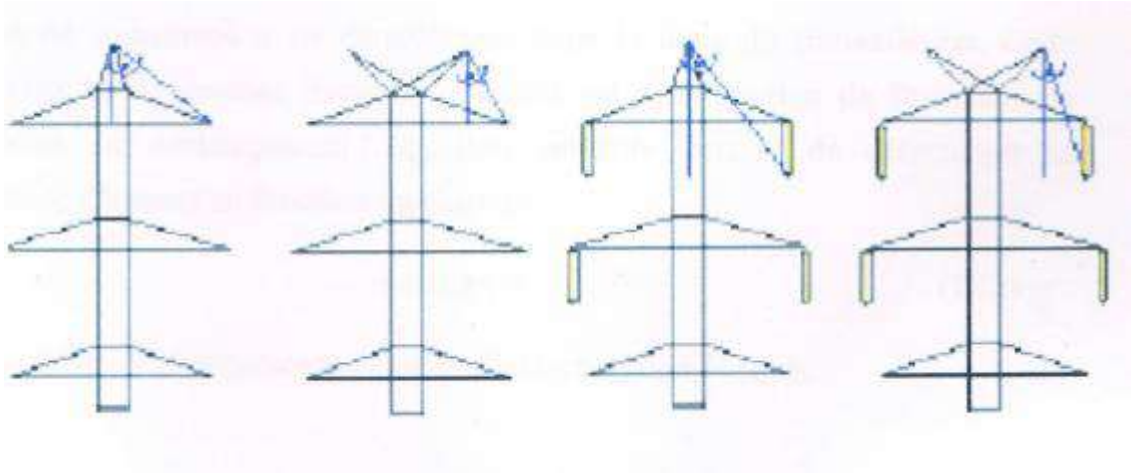


Figure III.7 : positionnement du câble de garde.

Les tests en laboratoires prouvent qu'un bon angle moyen est de 30 degrés.

La figure III.8, représente le positionnement d'un câble de garde pour un angle moyen θ =30°.

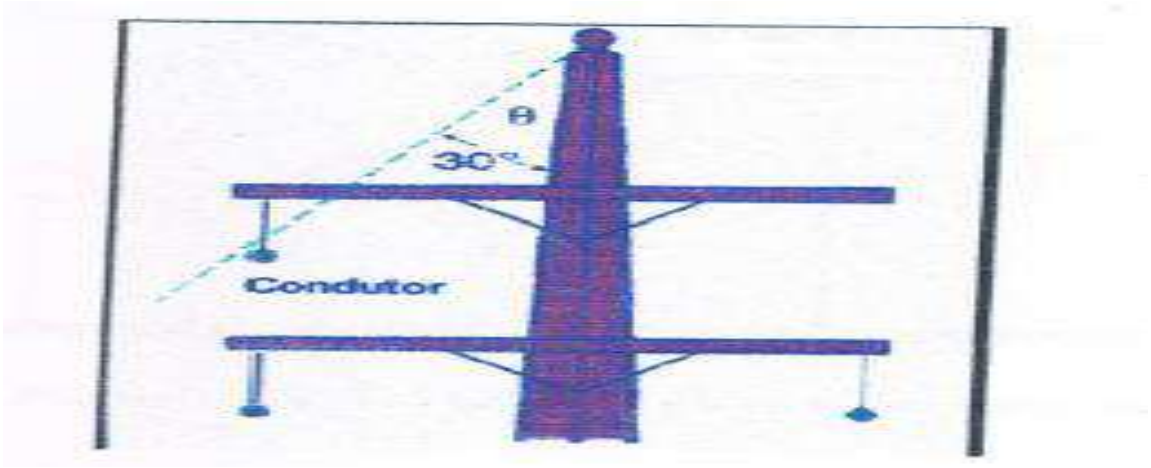


Figure III.8: ligne de positionnement du câble de garde pour θ =30°.

III.3.2.2 Méthode électro géométrique: [27]

Une décharge atmosphérique peut tomber direct à la terre à proximité d'une ligne de transmission ou directement dans la ligne de transmission. Cette distance **r**, dénommée distance d'impact est une fonction de l'ampleur de courant du déchargement.

L'équation suivante permet de déterminer la distance d'impact en fonction du courant.

$$R=10.i^{0.65} \qquad \text{(III.1)}$$

La figure III.9 : Représente la méthode électro géométrique.

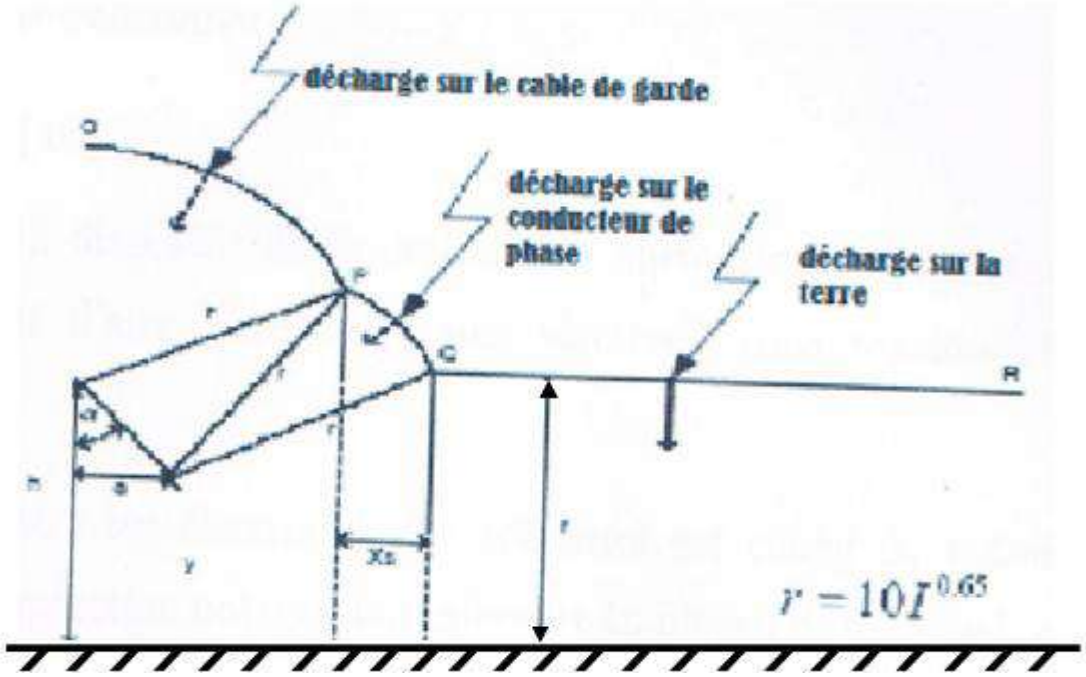


Figure III.9 : Méthode électro géométrique.

La méthode électro géométrique permet de déterminer de manière approximative, le courant maximal pouvant provoque une défaillance de l'isolé.

La méthode consiste à déterminer par une analyse géométrique ainsi la distance qui peut provoquer une panne isolement.

III.3.2.3 problématique :[28]

Le câble de garde est un meilleur collecteur de givre ou de verglas que les conducteurs de phase.

Des courtes-circuits se produisent sur les lignes suite:

- ✓ à l'étirement des câbles.
- ✓ au glissement dans les pinces.
- ✓ au bris des chevalets.
- ✓ au bris des câbles.

Il est difficile d'intervenir sur des pylônes couverts de verglas.

III.3.3 Protection par éclateur:

III.3.3.1 Définition: [16]

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

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

Les éclateurs utilisées en MT et HT sont placés sur les points des réseaux particulièrement exposés à l'entrée des postes MT/BT.

III.3.3.2 Principe de fonctionnement :[24]

L'éclateur est le plus simple, le plus ancien, le plus robuste et le moins cher des moyens de protection. Il est généralement constitué de deux électrodes, la première est reliée au conducteur à protéger, la deuxième relié a la terre, qui sont séparées par de l'air ambiant.

La distance entre ce deux électrodes est réglables et détermine la tension d'amorçage. Au-delà d'une certaine tension entre les bornes, donc d'un certain champ électrique entre les électrodes, un amorçage se produit et le courant passe en format un arc électrique.

Les éclateurs permettent de dévier des courants de foudre important; cependant l'arc électrique qui apparait lors d'un fonctionnement est maintenu par le courant que débite le réseau: il faut donc prévoir la coupure de court-circuit.

La (figure III.10) représente un schéma d'un éclateur.

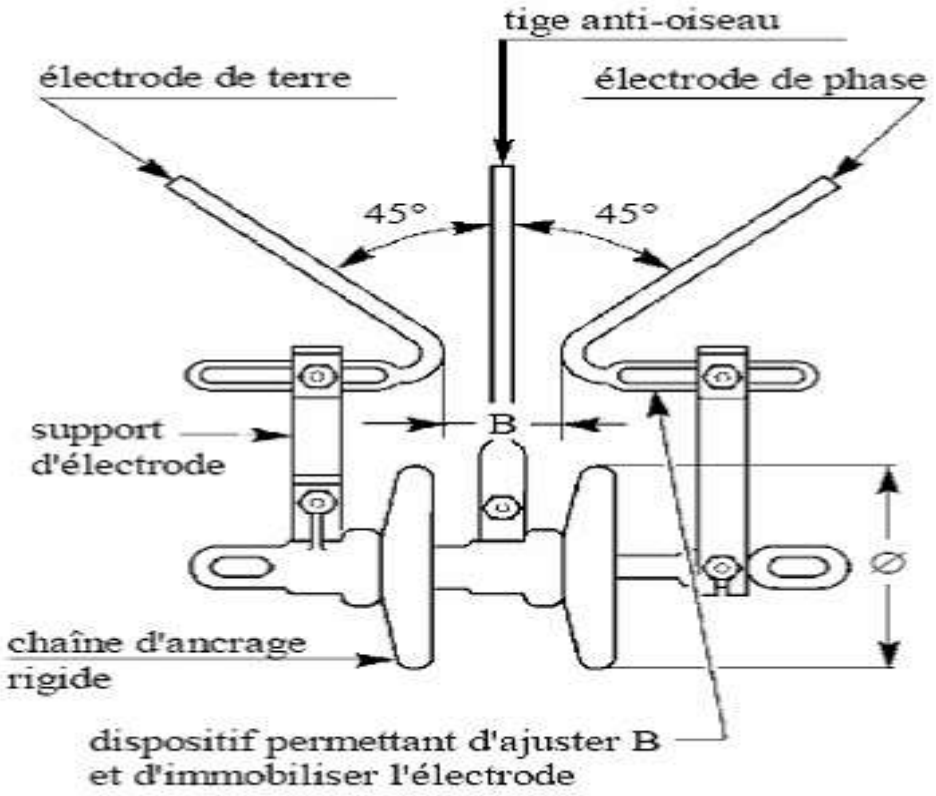


Figure III.10: éclateur avec tige anti oiseaux

III.3.3.3 Tension d'amorçage d'un éclateur: [16]

La tension d'amorçage d'un éclateur dépend:

- De la distance d'amorçage (distance la plus courte dans l'air entre les extrémités des électrodes).
- Des conditions atmosphériques (essentiellement de la densité de l'air) .
- De la forme des électrodes et de leur effet de polarité (on recherche une forme tels que la dépendance de la polarité du choc soit aussi faible que possible).
- De leur situation par apport à leur support et aux surfaces voisines conductrices et isolantes.
- De l'usure des électrodes (dépendant du nombre de fonctionnement intérieur, des courants écoulés par l'arc et de leur duré).

Le comportement de l'éclateur à fréquence industrielle est caractérisé par sa tension d'amorçage à sec, fréquence industrielle (valeur de crête).

Le comportement de l'éclateur au choc est défini en onde normalisé, 1.2 µs/50 µs, pour la polarité qui donne la tension d'amorçage la plus élevé (en générale c'est la polarité à point négative).

Le comportement de l'éclateur aux surtensions de manœuvre est caractérisé par la valeur de la tension d'amorçage pour ces surtensions. Cette valeur est intermédiaire entre la tension d'amorçage de fréquence industrielle et la tension d'amorçage au choc.

Dans les deux derniers cas on peut définir ou la tension d'amorçage 100% en coordination d'isolement classique, ou la tension d'amorçage 50% et l'écart type d'isolement probabilisable.

III.3.3.4 Caractéristique de protection d'un éclateur: [16]

La caractéristique dépend:

- De la dispersion de la tension d'amorçage d'un espace d'air.
- De l'accroissement de la tension d'amorçage lorsque s'accroit la pente de la surtension appliquée dans le cas où l'amorçage à lieu sur le front de ronde.

III.3.3.5 Avantages et inconvénients d'un éclateur: [30]

III.3.3.5.1 Avantage:

Ce dispositif est simple, assez efficace et économique.

III. 3.3.5.2 Inconvénients :

- La tension d'amorçage présente une dispersion importante. En effet, elle dépend fortement des conditions atmosphériques; des variations de plus de 40 % en (p.µ) être observées.
- Le niveau d'amorçage dépend aussi de l'amplitude de la surtension (figure III.11).
- Le retard à l'amorçage est d'autant plus long que la surtension est faible.

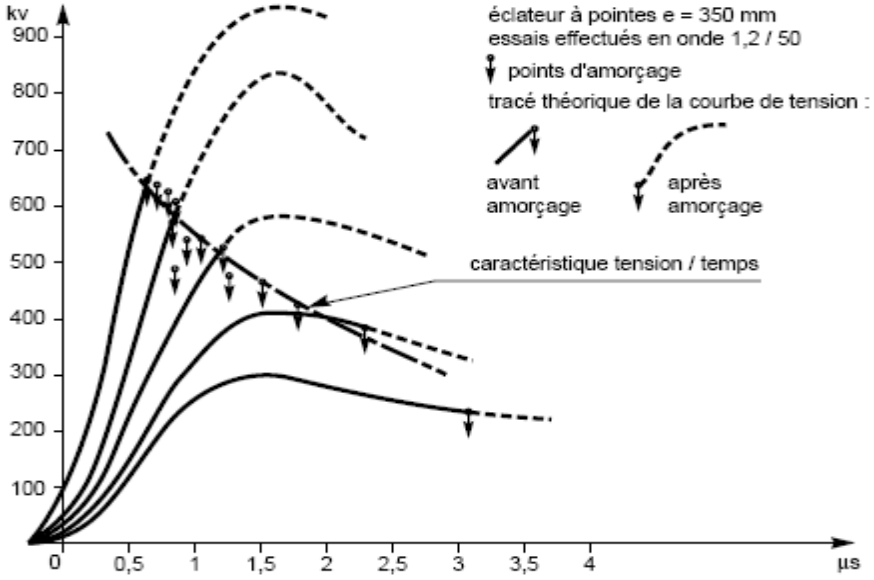


Figure III.11: comportement d'un éclateur à pointes, en choc de foudre normalisé, en fonction de la valeur de crête.

III.3.3.6 limites d'utilisation de l'éclateur: [16]

Lorsque un éclateur fonctionne du fait d'une surtension et qu'un arc s'établit, cet arc se maintient fréquemment jusqu'à ce qu'il soit coupé par les disjoncteurs de protection entourent le défaut; il en résulte un défaut à la terre dans le cas où le réseau à son neutre directement à la terre, des contraintes mécaniques dans déférents parties des installations du réseau et éventuellement des troubles pour les usagers.

L'éclateur est incapable du point de vue de la continuité du service si sa présence accroit notablement le nombre de défaut, dans le cas où les amorçages ne sont ni auto-extincteurs ni interrompu par des disjoncteurs à déc1anchement rapide, suivi de ré-enclenchement rapide.

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

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

III.3.4 Protection par parafoudre :

III.3.4.1 Définition: [16]

Un parafoudre ou par sur tenseur est un dispositif de protection des appareillages électriques ou électronique contre les surtensions électriques transitoires généré par la foudre ou certain équipement industriel. Le principe de parafoudre consiste a assuré un lien entre les conducteurs actif et la terre moment de la surtension provoqué par la décharge.

L'impédance présenté par la foudre doit être très faible l'ors de la surtension et élevé lors du fonctionnement normale.

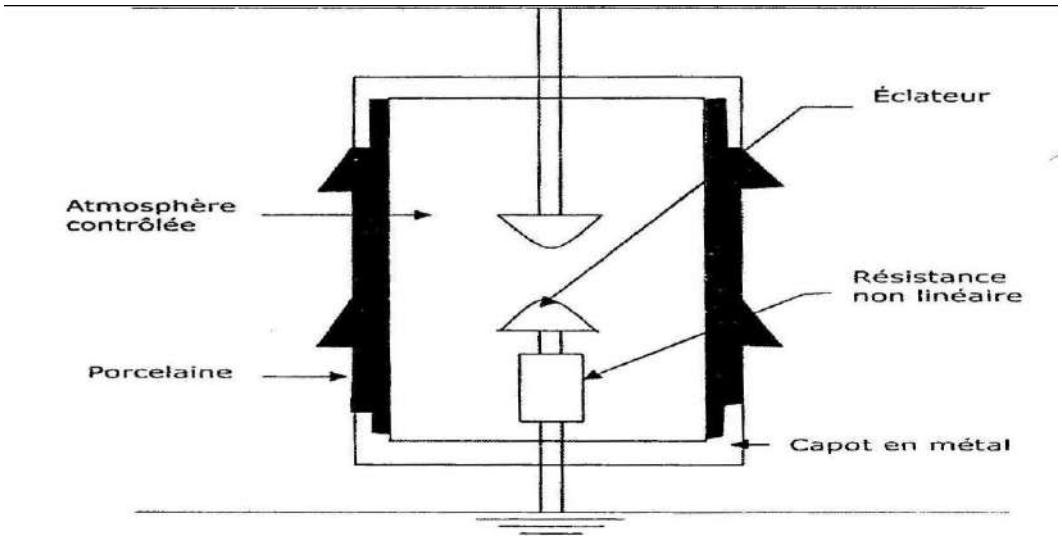


Figure III.12 : Elément de parafoudre**.**

III.3.4.2 Les paramètres caractéristiques des parafoudres:

- **Tension nominale de parafoudre:**

La tension nominale d'un parafoudre est la valeur spécifiée maximum de la tension efficace admissible entre ses bornes de ligne et de terre présentant aucun risque amorçage.

Le tableau III.2, représente les valeurs normales des tensions nominales des parafoudres sont données en kilovolt.

0.175	3	9	18	30	42	75	108	150
0.280	4·5	10·5	21	33	51	84	120	175
0.500	6	12	24	36	54	96	126	186
0.660	7.5	15	27	39	60	102	138	198

Tableau III.2 : Tension nominales des parafoudres en kV.

• Courant de décharge:

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

• Courant de suite:

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

• Tension résiduelles d'un parafoudre:

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

• Tension d'amorçage a fréquence industriel d'un parafoudre:

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

• Niveau de protection au choc de foudre:

Le niveau de protection au choc de foudre d'un parafoudre est caractérisé par les tensions suivantes :

- La tension d'amorçage sous un choc de foudre plein normalisé.

- La tension résiduelle (de décharge) sous le courant nominale normalisé choisie.
- La tension d'amorçage sur front d'onde.

Cette évaluation du niveau de protection fournit trois valeurs conventionnelles qui constituent une approximation généralement acceptable.

• Niveau de protection au choc de manœuvre :[16]

Le niveau de protection au choc de manœuvre d'un parafoudre est caractérisé par les tensions suivantes:

- La tension maximale d'amorçage pour la forme d'onde normalisé.
- La tension totale aux bornes du parafoudre qui est maintenu par le parafoudre au cours des décharges en surtensions de manœuvre.

III.3.4.3 Les type des parafoudres: [30]

Il existe deux types de parafoudres :

- L'un dont la partie active est constitué d'éclateurs et de varistances au carbure de silicium (SIC), appelé aussi parafoudre au carbure de silicium.
- L'autre dont la partie active est constitué uniquement de varistances à base d'oxyde de zinc (Zno) et que dénommera parafoudre à oxyde zinc.

III .3.4.3.1 les parafoudres au carbure de silicium et à éclateur: [29]

Moyennant un cout beaucoup plus élevé le parafoudre permet d'éviter la plupart des inconvénients inhérents au principe de l'éclateur.

Ses avantages sur l'éclateur:

- Une dispersion moins grande de la tension d'amorçage.
- Une extinction spontanée de l'arc.
- Une tension aux bornes de parafoudre dite, tension résiduelle, non nul après amorçage, évitant ainsi la transmission.

- d'une onde tension coupé.

Une insensibilité (jusqu'à certain point) à l'agression extérieur.

La figure III.12, représente un parafoudre de carbure de silicium et à éclateur.

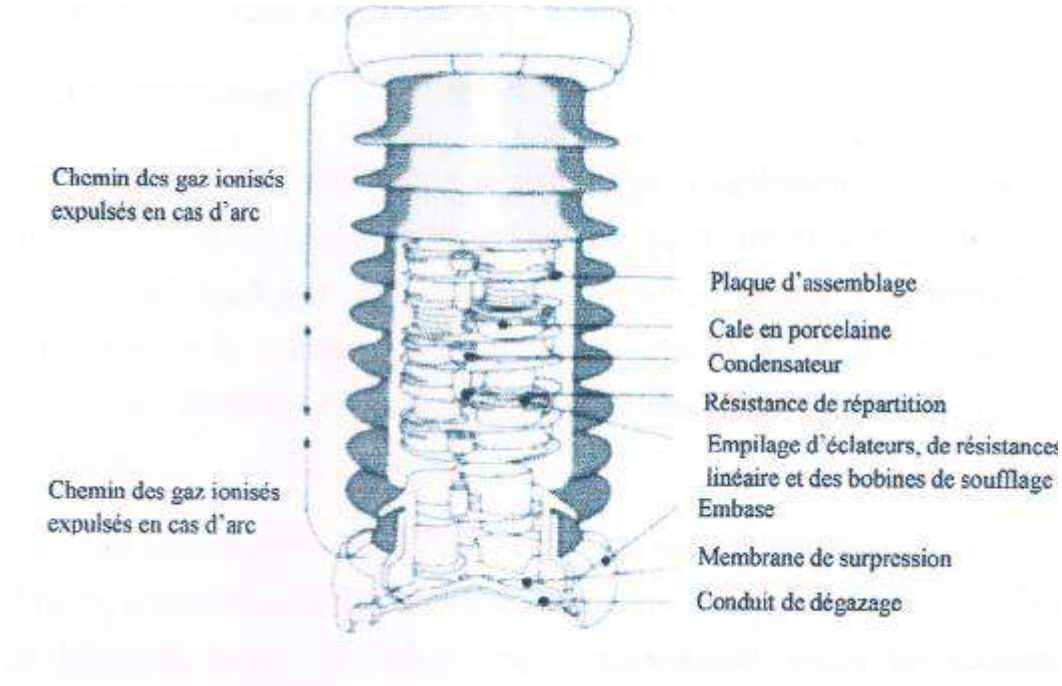


Figure III.12 : constitution d'un parafoudre de carbure de silicium et à éclateur.

III.3.4.3.2 Parafoudre à oxyde de zinc: [29]

III.3.4.3.2.1 Définition:

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. Dés en 1970, des constructeurs de parafoudre se sont lancés dans la mise en point de parafoudre utilisant ces céramiques.

Pour l'électrotechnicien, ces composantes 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 utilisé sur tous les réseaux, de l'électronique jusqu'au transport d'énergie à très haute tension (225 KV ou 400 KV).

III.3.4.3.2.2Constitution:

Le parafoudre à ZnO est constitué d'un empilement de résistances non linéaires à oxyde de Zinc mais parfois pour les très hautes tensions, ils comportent quelques capacités additionnelles placés en parallèle sur les varistances à la partie supérieure du parafoudre. Le tout est placé dans une enveloppe étanche et isolante généralement en porcelaine ou matériau synthétique.

Les céramiques à base d'oxyde de Zinc sont obtenues par frittage, en phase liquide, d'un mélange de poudre d'oxydes divers ; oxyde de Zinc (90%), Oxyde de bismuth, oxyde de cobalt, oxyde manganèse, oxyde de chrome, oxyde d'étain... le frittage consiste à compacter des poudres fines selon la forme de pièce désirée, puis à les chauffer à une température assez haute pour remettre aux particules de se souder, tandis qu'un retrait d'ensemble élimine la porosité.

Une micrographie montre que les grains d'oxyde de Zinc dopés, de quelques microns de diamètre, sont enrobés essentiellement dans une phase riche en oxyde de bismuth de quelques millièmes de micron d'épaisseur

La figure III.13 représente une structure d'un parafoudre de type ZnO.

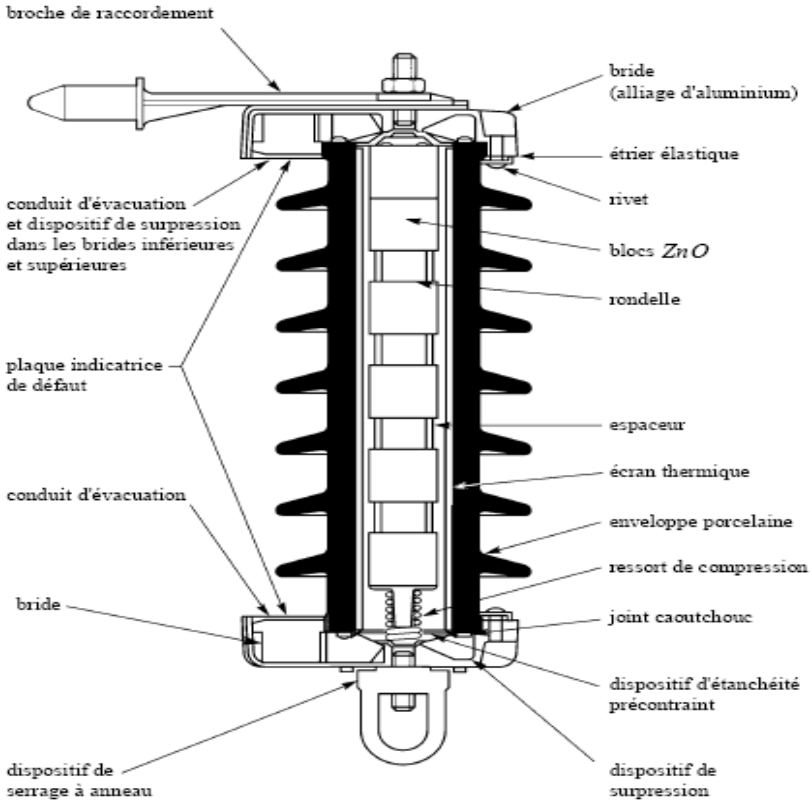


Figure III.13 : exemple de Structure d'un parafoudre ZnO

III.3.4.3.2.3 Principe de fonctionnement:

A des tensions normales, l'impédance de parafoudre est élevée, et le varistances sont parcourues par un courant très faible de l'ordre de µA et les pertes sont de quelques watts. Durant des surtensions, la résistance diminue rapidement, la varistance écrête la surtension, elle représente un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondant vers la terre.

Lorsque le courant traversant la varistance n'est multiplié que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal.

La figure III.14 montre la caractéristique d'un parafoudre à ZnO typique connecté entre une phase et la terre d'un réseau 420 KV (avec le neutre mis à la terre).

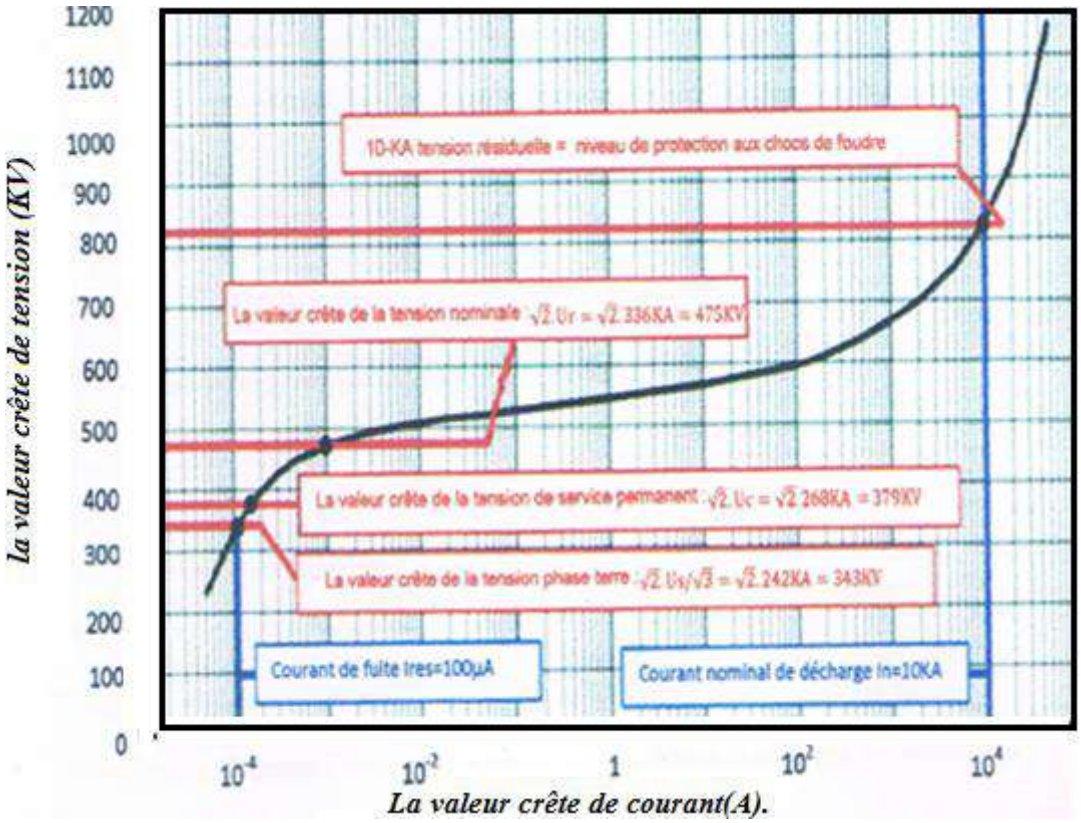


Figure III.14 : caractéristiques V-I d'un parafoudre à ZnO.

III.3.4.3.2.4 utilisations:

Les parafoudres à ZnO sont utilisés pour limiter (écrêté) les surtensions transitoires (atmosphériques ou de manœuvre) de courte durée.

La figure III.15 illustre les domaines d'application des parafoudres à ZnO.

Surtension, p.u.

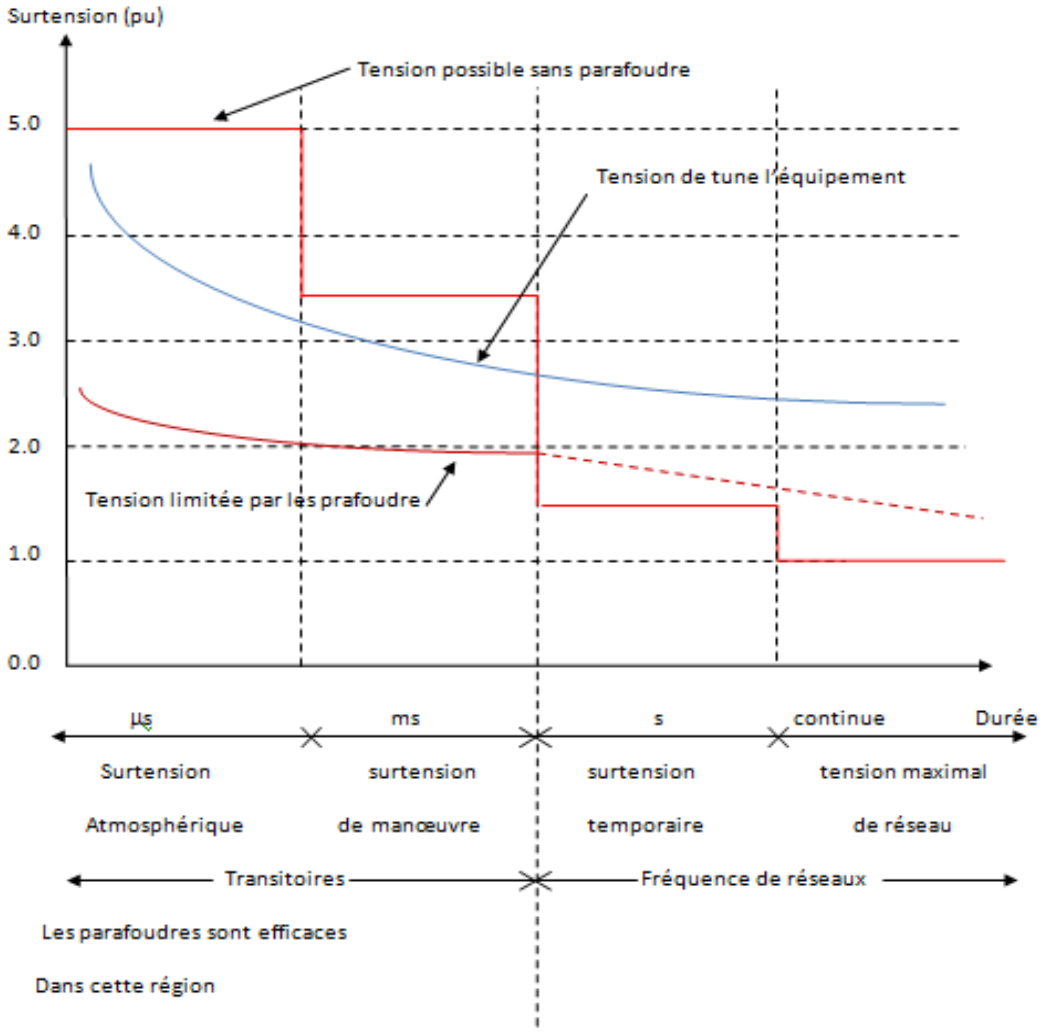


Figure III.15 : domaine d'application des parafoudres ZnO

III.3.4.3.2.5 les inconvénients:

- L'ensemble de ces avantages se traduit par un cout élevée par rapport aux éclateurs comparés aux parafoudres conventionnels, ils sont plus économique en THT qu'en MT.

- Dans la zone des faibles courants, la caractéristique Ver) des varistances présente un coefficient de température négatif. Une augmentation de température provoque une augmentation de la puissance consommée. Une élévation excessive de la température ambiante pourrait même, dans certaines conditions, conduire à la défaillance thermique de parafoudre.

- La caractéristique électrique peut se dégrader du fait de l'absorption du courant très élevée (coup de foudre). Ceci se traduit par une élévation de réchauffement à sa tension de service et par une diminution de sa capacité d'absorption du choc énergie. Cette dégradation peut entrainer l'emballement thermique dans des conditions normales de fonctionnement.

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté plusieurs types dispositifs de protection contre la foudre .

Le câble de garde représente un moyen efficace pour protéger les lignes électriques THT et HT contre la foudre à condition de réaliser une bonne mise à la terre des pylônes.

Le parafoudre offre une protection efficace pour les postes contre la foudre, il réduit le niveau d'isolement, donc le niveau de protection et permet une continuité de service.

IV .1 . Introduction :

Le bute de ce chapitre est d'étudier l'effet d'un coup de foudre directe sur une ligne de transport THT (735KV) de l'énergie électrique en courant alternatif .Il s'agit de montrer par simulation les réponses du système suite à des coupes de foudre non répétitive sur ligne.

Toutes les simulations sans réalisées avec **Sim power système** de **simulink** de logiciel **MATLAB.** Les résultats des simulations sont analysés afin de démontrer la performance du système suite à de diverses perturbations causées par la foudre.

Les teste de performances incluent :

1. Fonctionnement en régime normale.
2. Coupe de foudre sur la ligne de 735KV, sans dispositif de protection.

IV-2 .Description du système étudie :

Hydro-Québec a déjà développé différents modèles de simulation de réseaux de transport dans MatLab-Simulink- ces modèles sont présents dans la section SimPowerSystems de MatLab-Simulink, et un modèle parmi ceux-là est choisi.

Le modèle utilisé, présenté à la figure IV-1, est une représentation des réseaux de transport électrique présents au Québec qui sont tous des réseaux avec compensation série pour un meilleur transit de puissance : le nom du modèle de simulation est There-phase Sériés Compensated Network, présenté à la figure IV-2.

Les paramètres de simulation du modèle sont ceux des réseaux réels d'Hydro-Québec ce réseau de transport triphasé de 735 kV, 60 Hz, a une longueur de 600 km, a une extrémité, une source triphasée, composée de 6 alternateurs de 350 MYA à 13.8 kV, génère la puissance au réseau.

Une charge triphasée de 100 MW est connectée à sa sortie pour sa protection, à l'autre extrémité se trouve un réseau équivalent de 30000 MVA à 735 kV.

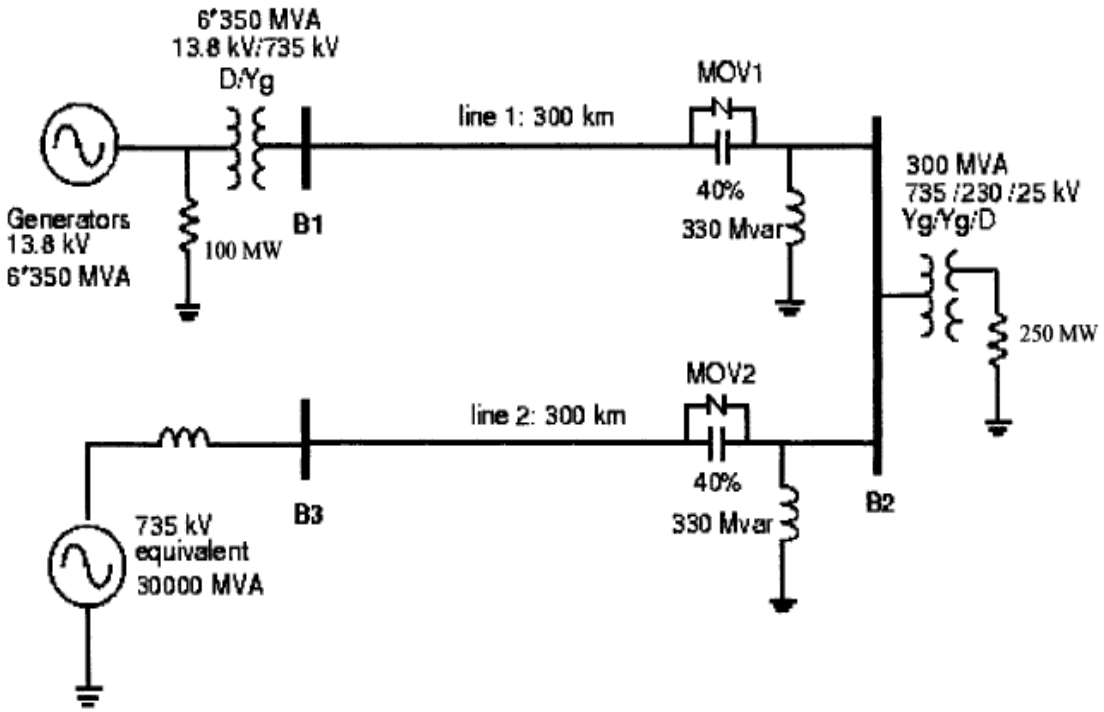


Figure IV-1: Modèle du réseau électrique pour les simulations.[29]

Le réseau choisi est séparé en deux lignes de 300 km chacune, connectées entre les barres B l, B2, et B2, B3. Il est compensé série par des condensateurs représentant 40% de la réactance totale de la ligne, et il est aussi compensé shunt par des réactances de 330 MVAR.

Les compensations séries et shunt sont localisés à la sous-station B2 où un transformateur de 300 MVA 735/230/25 kV alimente une charge résistive de 250 MW à 230kvle tertiaire de 25 kV du transformateur est laissé ouvert.

Les compensations séries des deux parties de la ligne de transport sont identiques.
ces modules de compensation contiennent des condensateurs séries, un varistance à oxyde de métal (MOV) protégeant les condensateurs et un sectionneur parallèle protégeant le MOV lorsque l'énergie dissipée par ce dernier excède la valeur limite de 30 MJ.

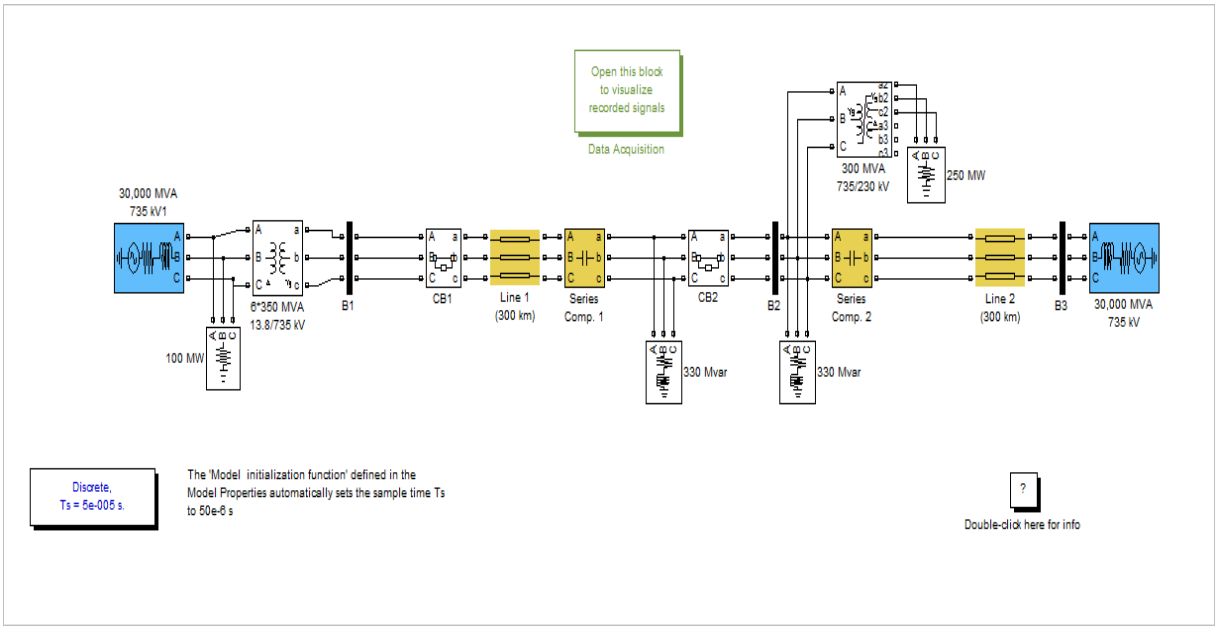


Figure IV-2 : Modèle de simulation du réseau de transport dans MatLab-Simulink. [29]

IV-2-1.Fonctionnement en régime normal :

Le fonctionnement du réseau en régime normale consiste à alimenter une charge de 30000 MVA, à travers une ligne de transport de 600Km de longueur, pour une durée de simulation << t=0.02s>>.

Le but de cette partie, est de bien décrire le fonctionnement normale au niveau des jeux de barre B1 (figure IV.3) et B3 (figure IV.4).

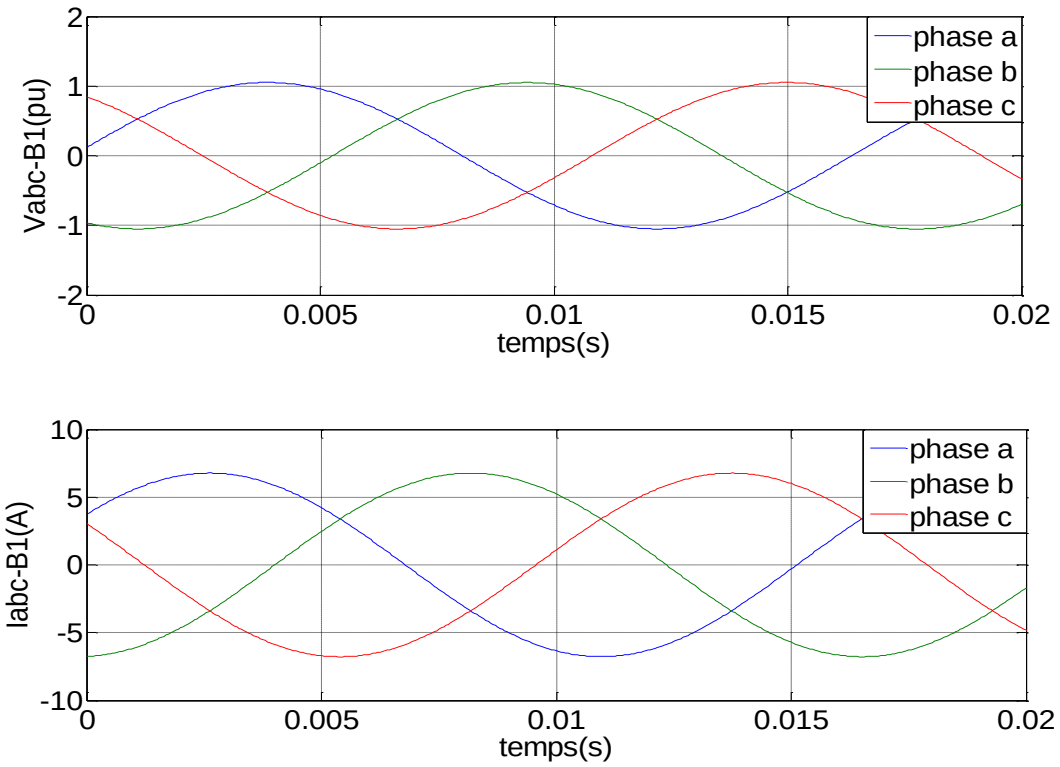


Figure IV.3 : Tension et courant triphasée au niveau de jeu barre B1.

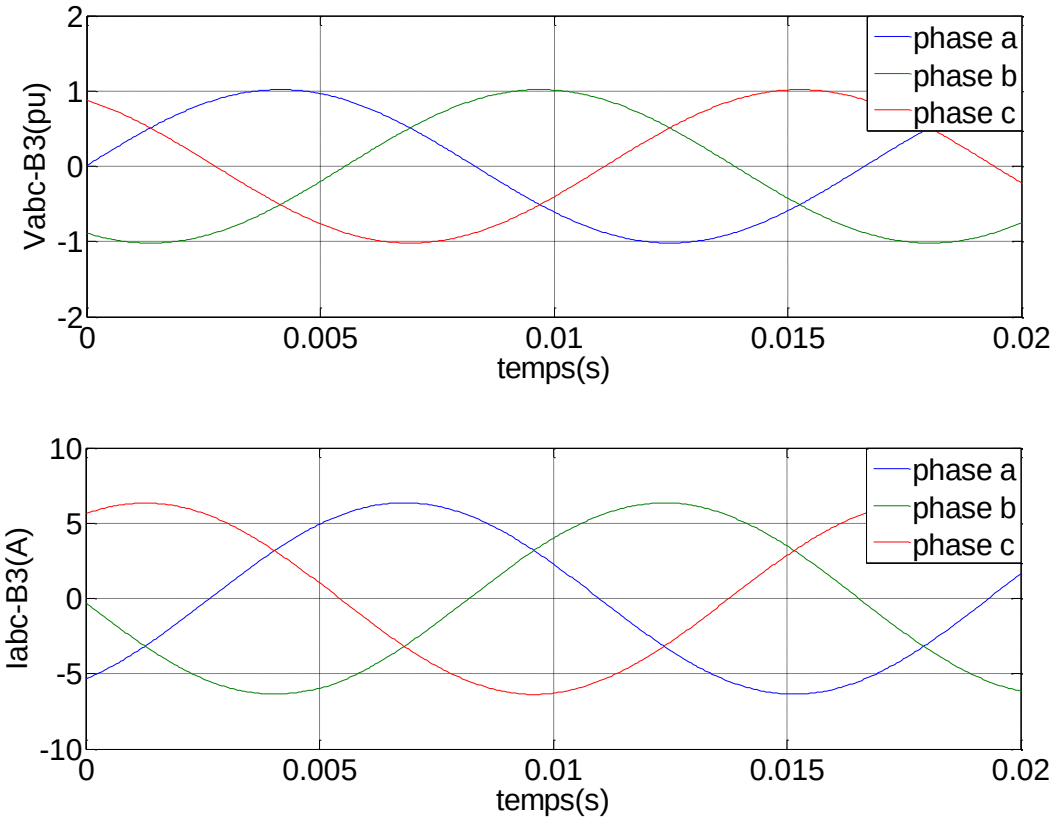


Figure IV.4 : Tension et courant triphasée au niveau de jeu barre B3.

IV-3. Un modèle impulsionnel de la foudre :

Pour la simulation, la foudre peut être ramenée à un modèle d'impulsion choc de tension ou de courant. Dans ce mémoire, c'est le modèle mathématique représentant la forme d'onde standardisée d'une onde impulsionnelle de courant qui est utilisé pour le coup de foudre sur un réseau électrique. Les figures IV-5présentent la forme d'onde du modèle mathématique. La figure IV-6 montre plus en détail le temps de montée de l'impulsion de courant.

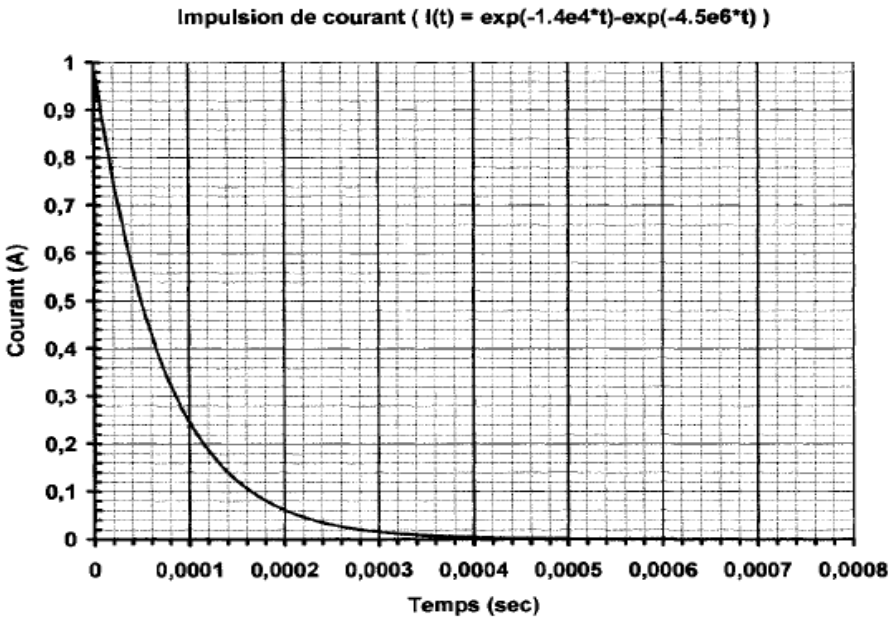


Figure IV-5: Modélisation de la forme d'onde impulsionnelle du courant de la foudre

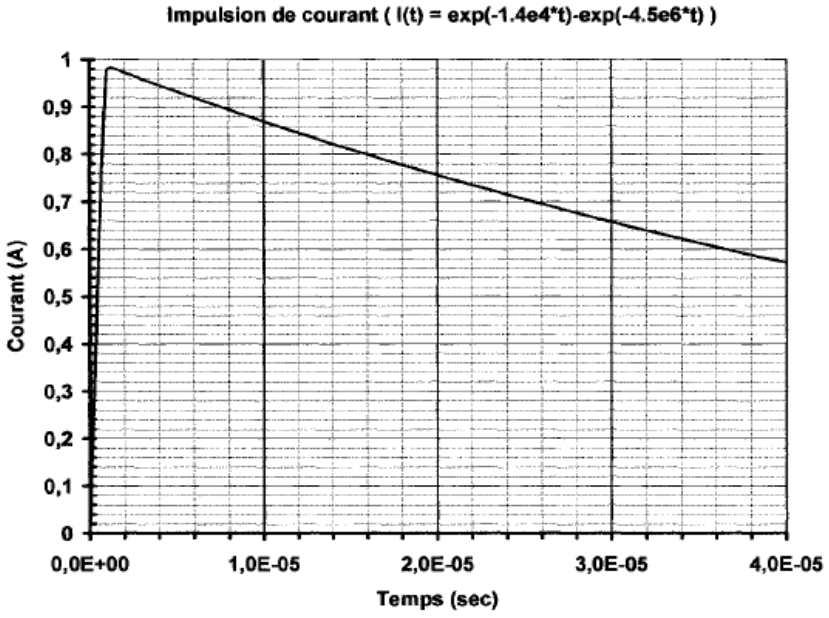


Figure IV-6 : Forme d'onde impulsionnelle du modèle du courant de la foudre

IV-4. Simulation de la foudre :

La figure IV-6 présente les blocs utilisés dans MatLab-Simulink pour la création du modèle de foudre.

On implante dans le bloc F en la fonction suivante :

F(u) = B*(exp(-(1.4e4)*u) - exp(-(4.5e6)*u))

Le bloc source de courant commandé (ou signât) permet de transformer la fonction F(u) en courant I(u), courant impulsionnel de la foudre, et la référence est celle de la mise à la terre.

Pour l'injection de l'onde de tension, c'est MatLab-Simulink qui le calculera dépendamment de l'endroit de l'injection de courant.

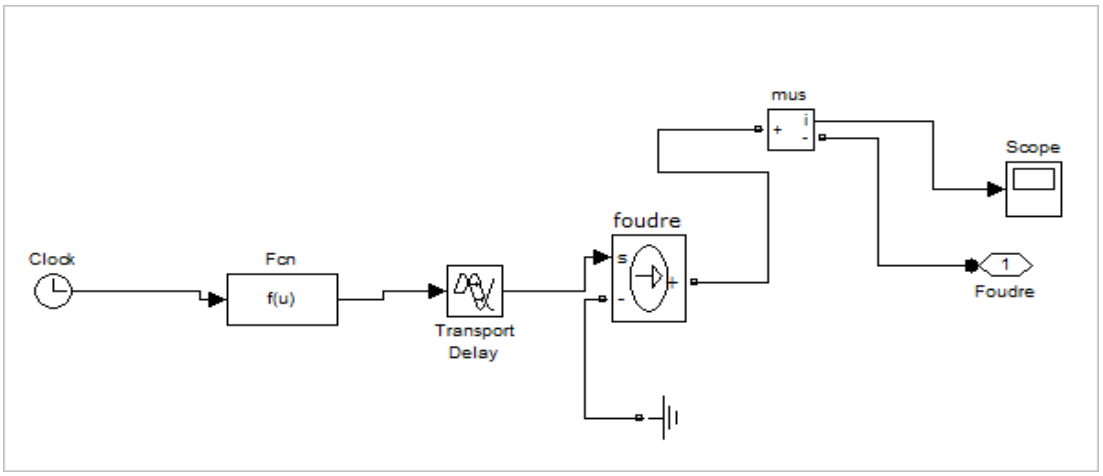


Figure IV-7: Modélisation de la foudre dans MatLab-Simulink

IV-5 .Amplitude du coup de foudre :

Il est possible d'intégrer la fonction de la forme de l'impulsion de courant pour trouver la quantité de Coulombs injectée par le modèle choisi. Ensuite, une amplitude B de la fonction impulsionnelle pour l'intensité de foudre peut être trouvée.

Connaissant la fonction du courant, on trouve la charge totale qu'elle apporte :

Q = 71.206//C Puisque la foudre injecte en moyenne de 1C à 5C lors d'une frappe, et que les courants de foudre mesurés sont en moyenne de l'ordre de 20 à 40 kA (cf. figure 2-4),on choisit une valeur de charges injectées de 2C (cas plus probable).

Ainsi, on utilise un facteur B de 28088 (2C/71.206//C = 28088). Or, puisque la fonction impulsionnelle possède déjà un facteur intrinsèque maximal de 0.975, alors

B = 28808 dans notre modèle de simulation de la foudre. Alors, le modèle mathématique de la foudre qui sera utilisé dans les simulations sera, pour une décharge d'environ 2C :

F(u) = 28808*(exp(-(l ,4e4)*u) - exp(-(4.5e6)*u)))

La figure IV-7 justifie notre choix puisqu'un coup de foudre ayant une intensité d'environ 30 kA est le plus probable, et notre modèle fournira un peu plus de 28 kA.

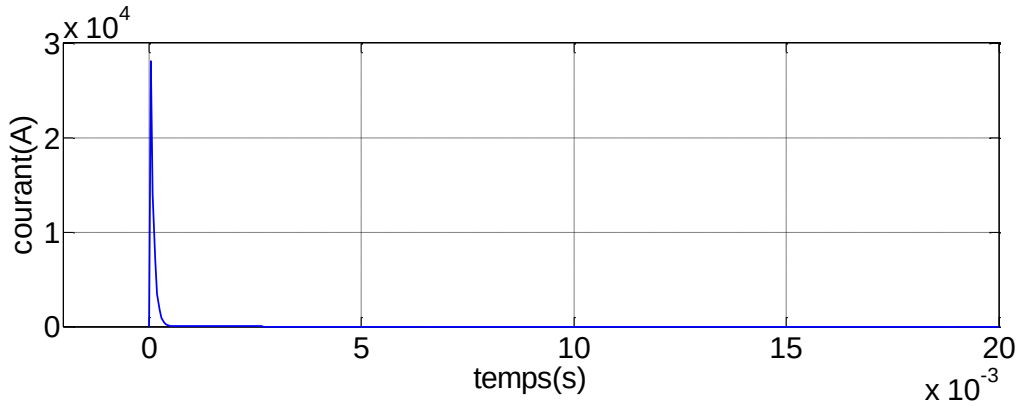


Figure IV-8 : Forme d'onde impulsionnelle du courant de la foudre obtenue par Matlab.

IV-6.Simulation d'une frappe directe de la foudre sur un conducteur de phase :

Pour la simulation d'un coup de foudre, une seule frappe sera considérée, même si lors du coup de foudre plus de trois frappes sont habituellement faites : les frappes étant distancées entre 20 et 50 millisecondes chacune environ, ce temps est suffisant pour la dissipation ou l'amortissement complet de la première, et principale, impulsion injectée avant les suivantes.

Pour la frappe directe de la foudre sur un conducteur de phase, l'injection de courant est faite sur la phase A du réseau.

Une injection dans la phase B a été considérée , mais étant donné la symétrie du système, les réactions des phases A et C auraient été identiques dans les premières millisecondes puisque le réseau est équilibré et transposé. Cette dernière option a donc été abandonnée.

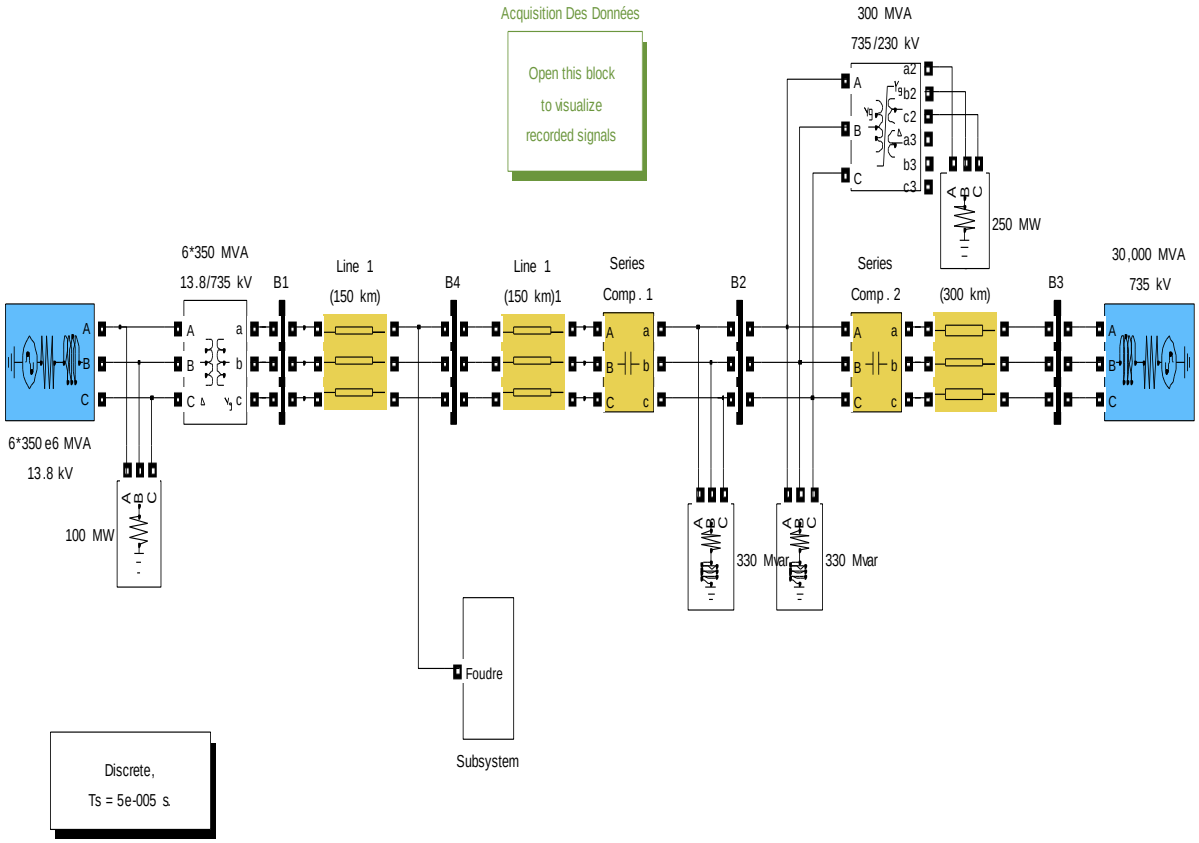


Figure IV-9 : Modèle de simulation pour une frappe directe de la foudre sur un conducteur de phase, entre les barres B1 et B2.

Puisque le modèle du réseau est discret et que la forme de l'onde impulsionnelle simulée pour la foudre est de 1.2 / 50 µs, les simulations auront un pas de calcul fixé à 50µsec. Ceci permet de prendre en considération les limites apportées par la compensation série, et le transformateur saturable à la barre B2 du réseau simulé, et d'éviter des messages d'erreur du MatLab-Simulink. L'intensité de la frappe de foudre simulée sera de 28 kA, comme déterminé plus tôt.

IV-7. Résultats des simulations et analyses :

Dans cette partie on présente les résultats obtenus aux jeux de barres B l, B2 et B3 pour les tensions ligne -neutre et ligne - ligne, ainsi que les courants de ligne.

Les valeurs sont données en pu, pour une puissance de base triphasée de 100 MVA.

IV-7-1.Tension et courant barre B4:

Les figures IV-10 et IV-11 présentent l'impact du coup de foudre sur la phase A, entre les barres Bl et B2, soit au côté de la barre B4.

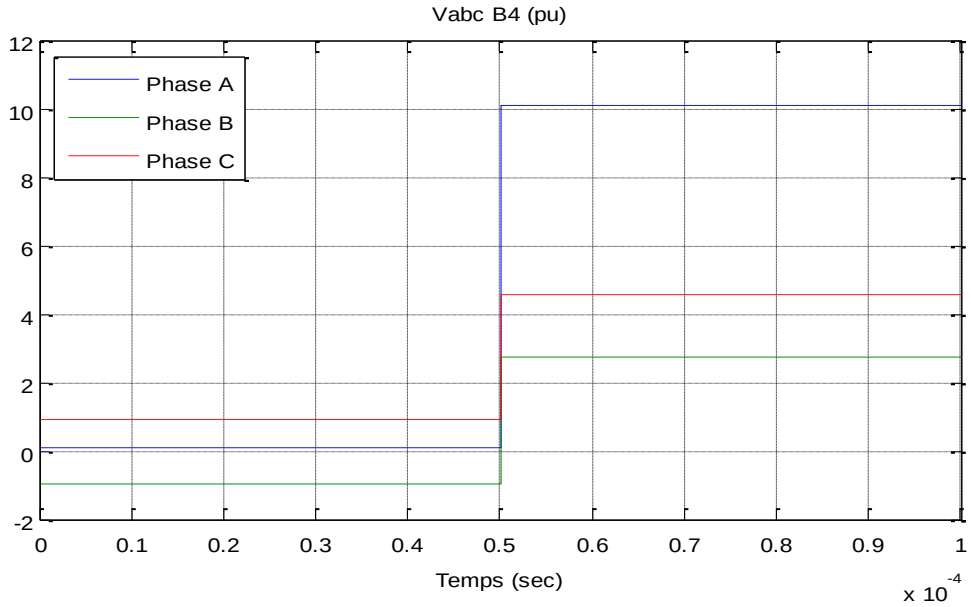


Figure IV-10 : tensions ligne - neutre à la barre B4.

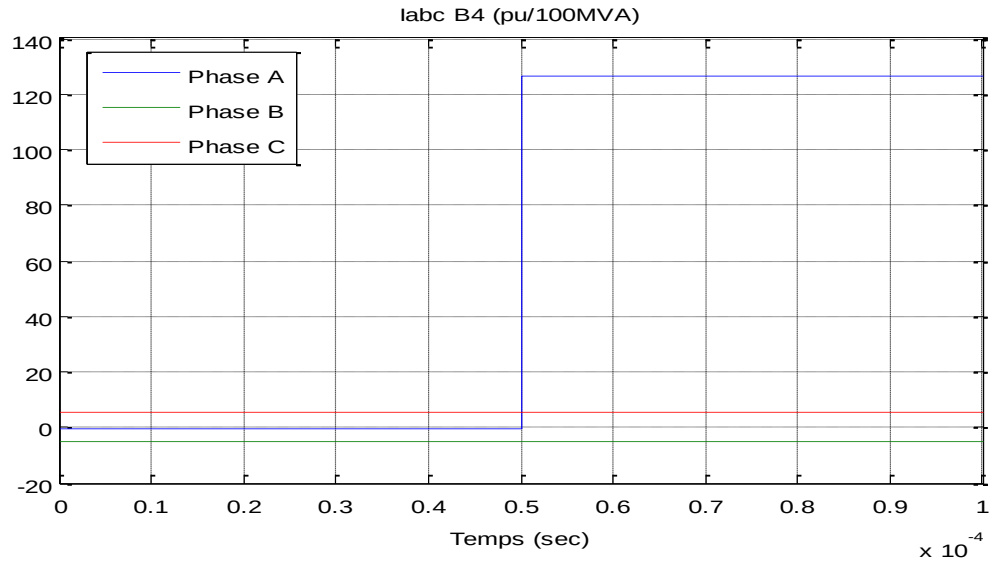


Figure IV-11 : Courants de ligne à la barre B4

En remarque par les figures IV-10 et IV-11 que le réseau réagit instantanément au niveau des tensions et pour l'injection du courant de haute intensité sur le conducteur touché, contrairement aux courants de ligne des phases B et C : une ligne de transport étant intrinsèquement inductive à cause de sa longueur, les courants des phases adjacentes ne peuvent changer instantanément par couplage électromagnétique ou par induction voltaïque.

La figure IV-12 **:** présente l'impulsion totale de courant, en ampère, injectée à la phase A.

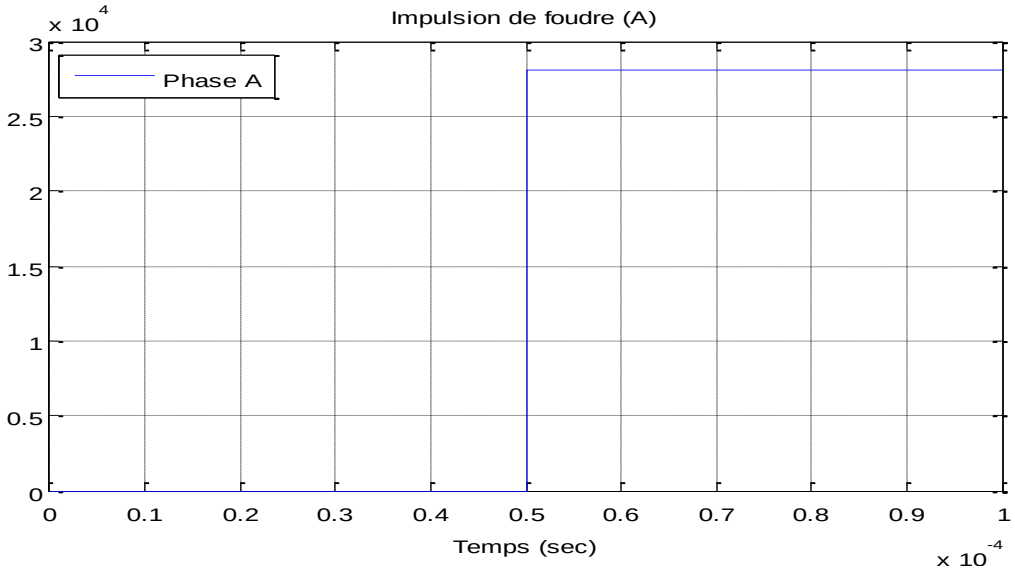


Figure IV-12: Impulsioninitiale (28 kA) de la foudre

IV-7-2.Tensions ligne-neutre:

La figure IV-13 présente les résultats pour les tensions et courant aux barres B l, B2 et B3.

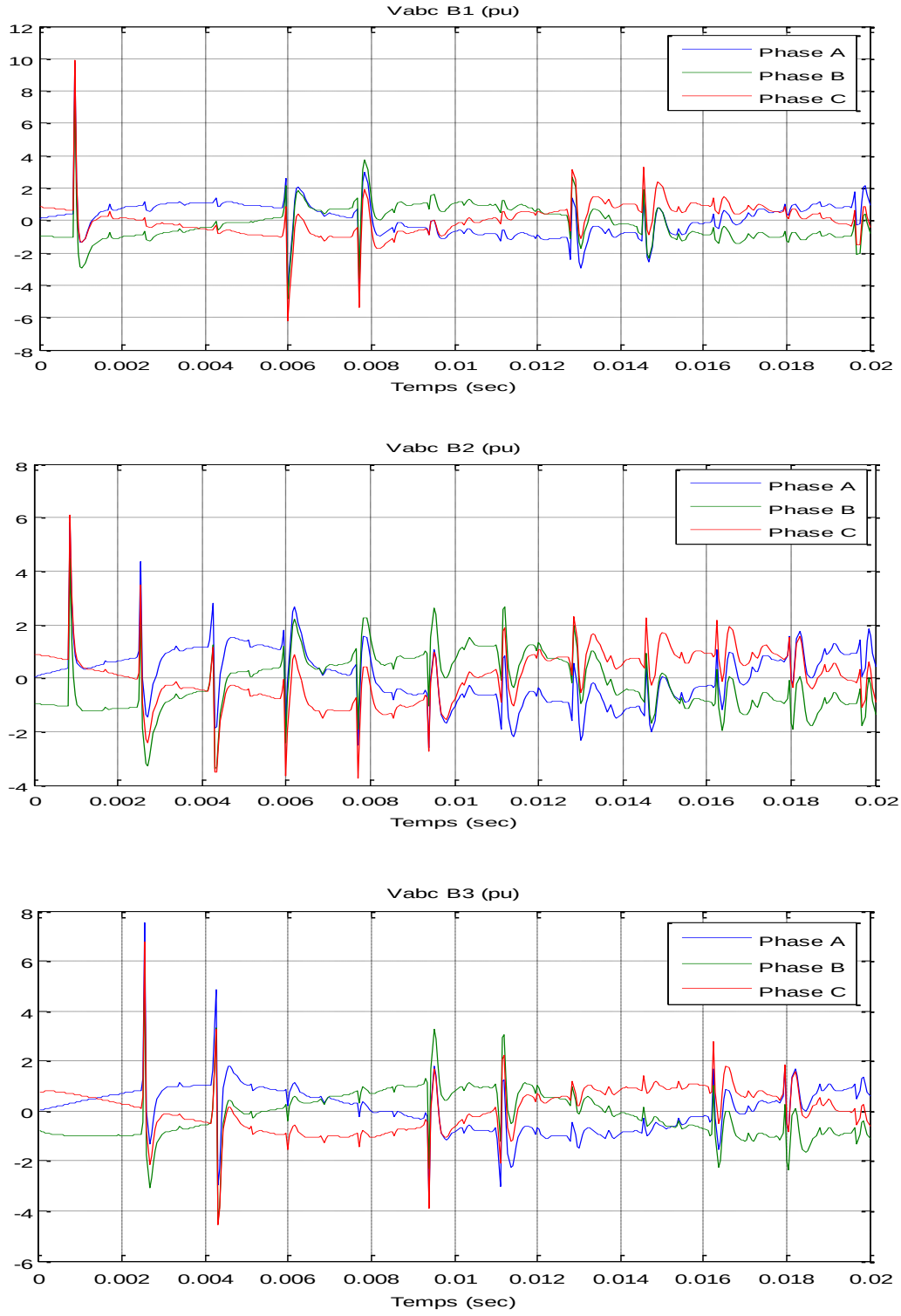


Figure IV-13 : Frappe de la foudre entre les barres B l et B2 (tensions ligne - neutre)

À la figure IV-13, on remarque une propagation de fronts d'onde de tension, de même, un délai de 850 µs pour la réception du premier front d'onde à la barre Bl et à la barre B2, séparées l'une et l'autre de 150 km du point de frappe de la foudre, peut être trouvé (figure IV-14 et IV-15). De plus, la barre B3 étant à 3 x 150 km (450 km) du point de frappe, ce qui explique que le délai de l'arrivé du front d'onde est de 2550 µs, soit 3 x 850 µs (figure IV-16).

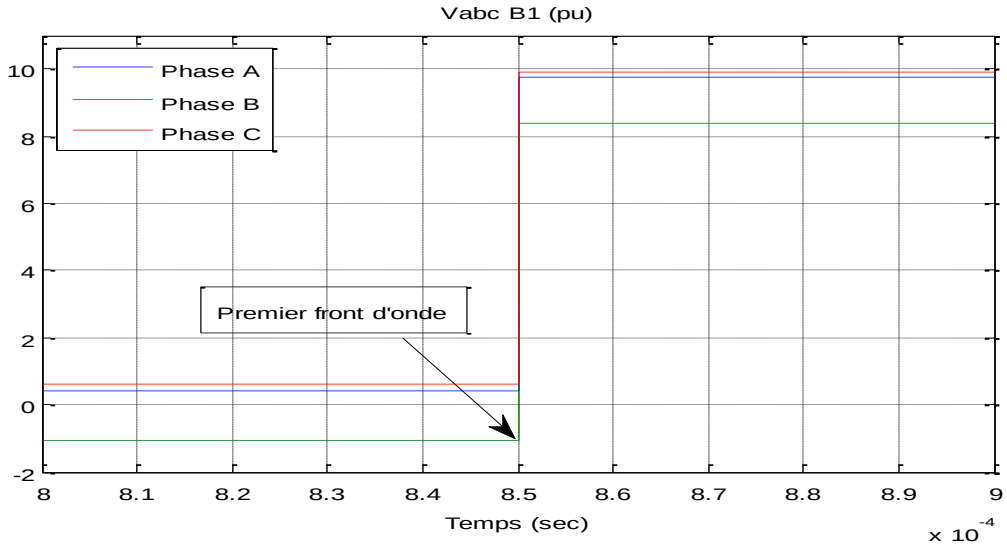


Figure IV-14 : Délai de la réception de l'impulsion de foudre à la barre B l.

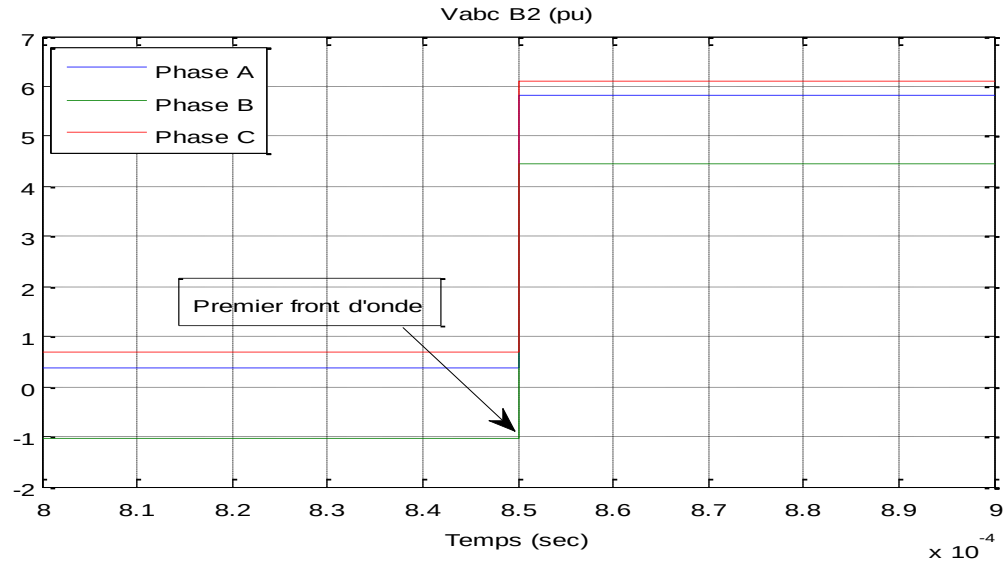


Figure IV-15 : Délai de la réception de l'impulsion de foudre à la barre B2.

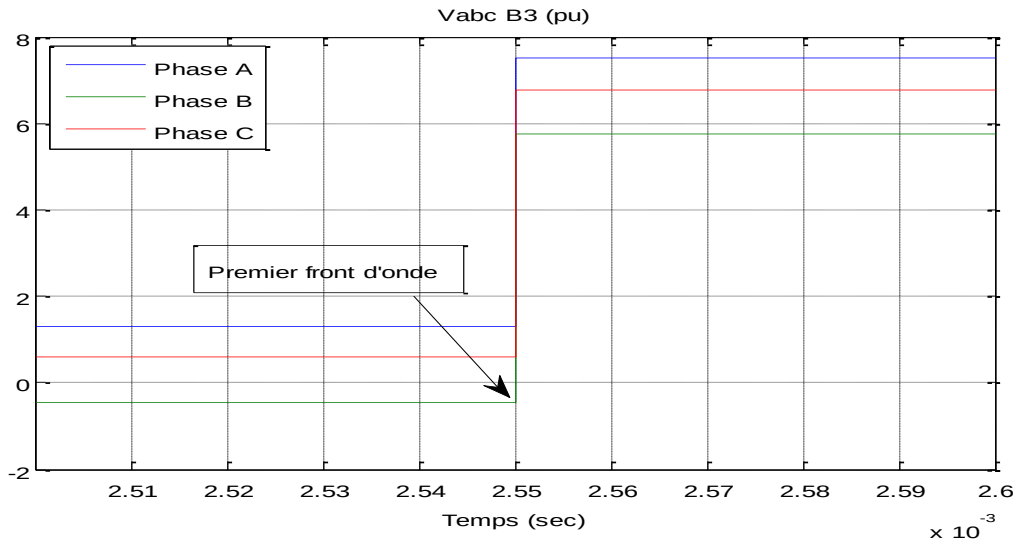


Figure IV-16 : Délai de la réception de l'impulsion de foudre à la barre B3.

À partir des résultats de simulation, on calcule la vitesse de la propagation d'onde de tension :

$$V=\frac{150Km}{849\mu s}=176678Km/s \simeq 176700\ Km/s \qquad \text{(IV-1)}$$

Cette vitesse est bien loin de la vitesse que devrait avoir une onde électromagnétique dans le vide (environ 300000 km/s). Pour connaitre la nature de cette vitesse de propagation il suffit de calculé les vitesses de propagation qui existe dans les lignes électriques et la comparé avec notre résultats.

La vitesse d'un front d'onde sur une ligne de transport est définie par (annexe) :

$$V= 1/\sqrt{LC} \qquad \text{(IV-2)}$$

Où L et C sont les valeurs caractéristiques des paramètres distribués de la ligne.

Cette définition s'applique aussi aux vitesses de séquences. Ainsi, en utilisant les paramètres distribués de séquences de la ligne simulée, il est possible d'obtenir une approximation des vitesses de propagation des séquences présentes sur la ligne de transport.

Ainsi, pour la séquence homopolaire, avec les inductances et capacitances distribuées de la ligne utilisé dans notre modèle, soient Lo= 4.1264e-3 H/km et Co = 7.751e-9 F/km, la vitesse de propagation d'ondes de la séquence homopolaire sur la ligne devrait être :

$$V_0 = 1/\sqrt{L_0 V_0} = 176822 \text{ km /s} \qquad \text{(IV-3)}$$

Cette valeur est plus proche de la valeur retrouvé dans l'équation (IV-1).Cette vitesse serait donc celle d'une séquence homopolaire. Alors, la tension ligne - neutre a permis de trouver la vitesse de séquence homopolaire des fronts d'onde de tension et de courant.

Et pour la vitesse de propagation de séquence directe, avec les valeurs d'inductance et de capacitance distribuées L_1 = 0.9337e-3 *H/ km* et C_1 = 12.74e-9 *FI km*, elle devrait être :

$$V_1 = 1/\sqrt{L_1 V_1} = 290000 \text{km /s} \qquad \text{(IV-4)}$$

IV-7-3.Tensions ligne-ligne:

On observe maintenant à la figure IV-17 la tension ligne - ligne du réseau suite au coup de foudre, entre les barres Bl et B2, à la barre B4.

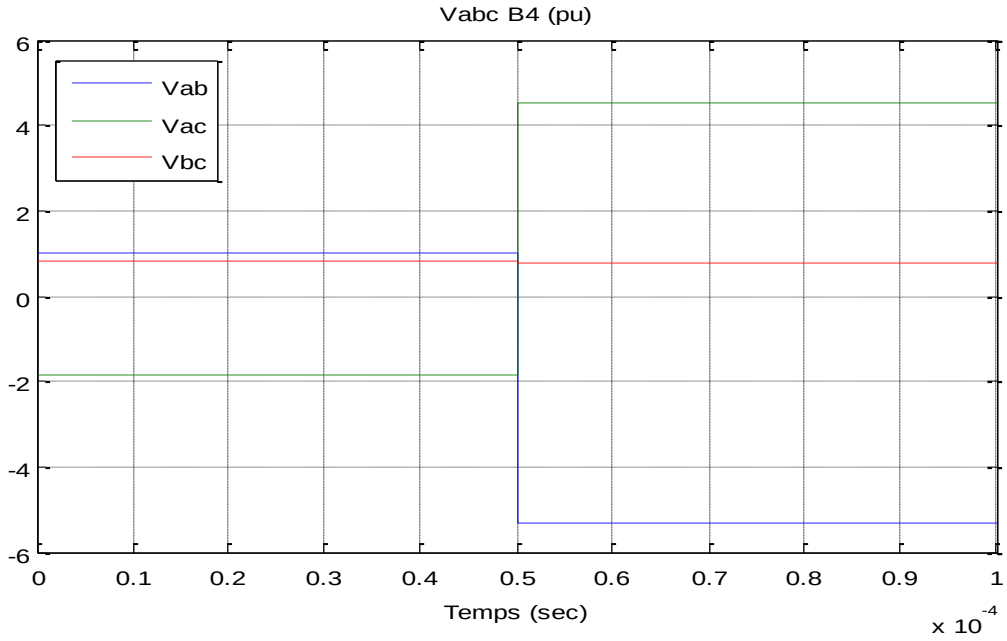


Figure IV-17 : Tensions ligne - ligne à la barre B4 suite au coup de foudre.

Il est intéressant de voir l'équilibre des tensions de phase suite au coup de foudre : la tension Vab est quasi égale à la tension Vac, mais de valeur opposée, et Vbc ne subit rien, à cause de l'équilibre et de la symétrie de la ligne (conservation de l'énergie).

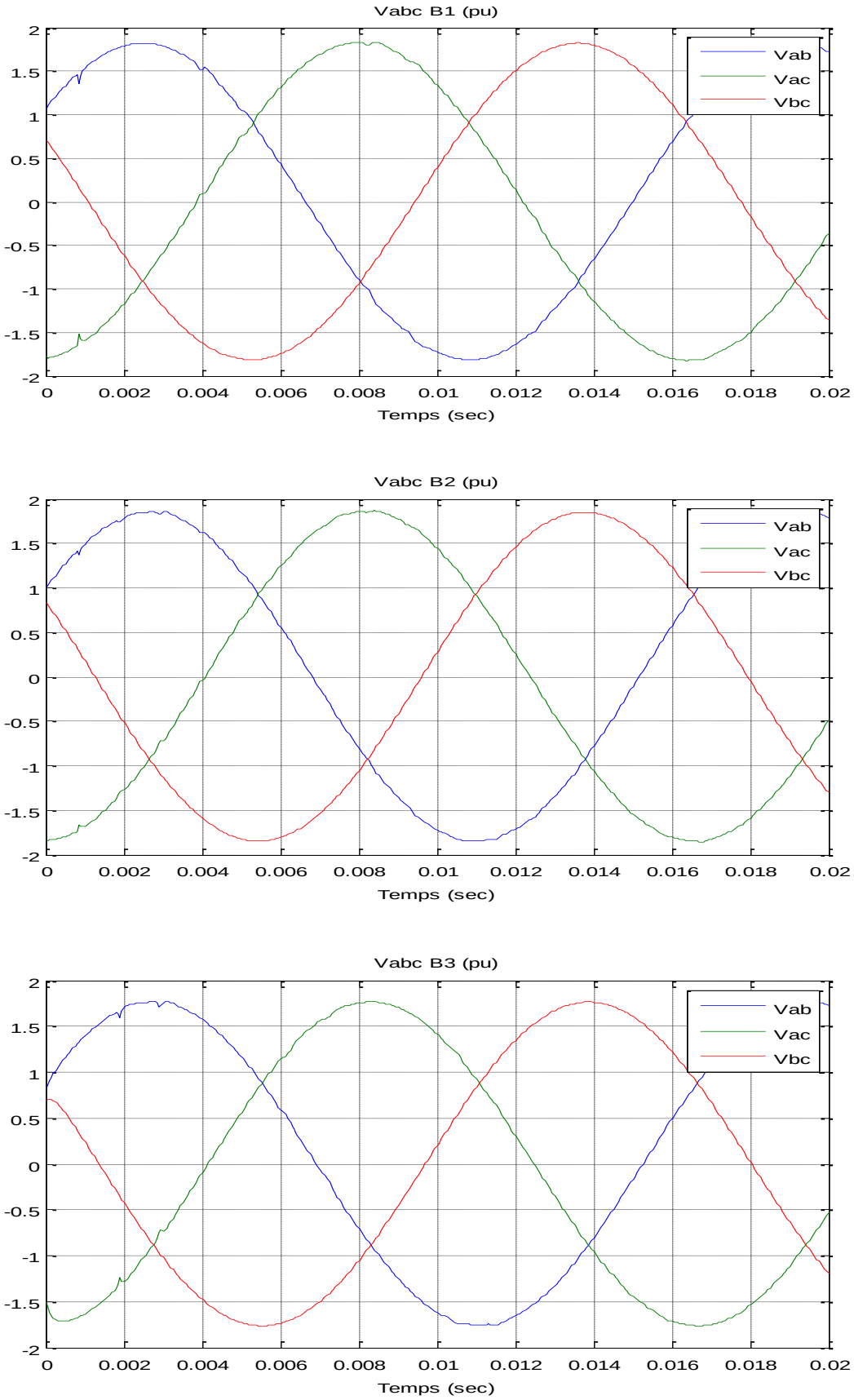


Figure IV-18 : Frappe de la foudre entre les barres B l et B2 (tensions ligne - ligne).

La figure IV-19 présente un autre type de fronts d'onde voyageant à une autre vitesse spécifique sur les conducteurs de phase.

Si on effectue un agrandissement du graphique Vabc B2 de la figure IV-18 (figure IV-19) pour les premières millisecondes, on observe un front d'onde pour environ chaque 300 km de parcours par milliseconde : ceci équivaut à une vitesse de300000 km/s.

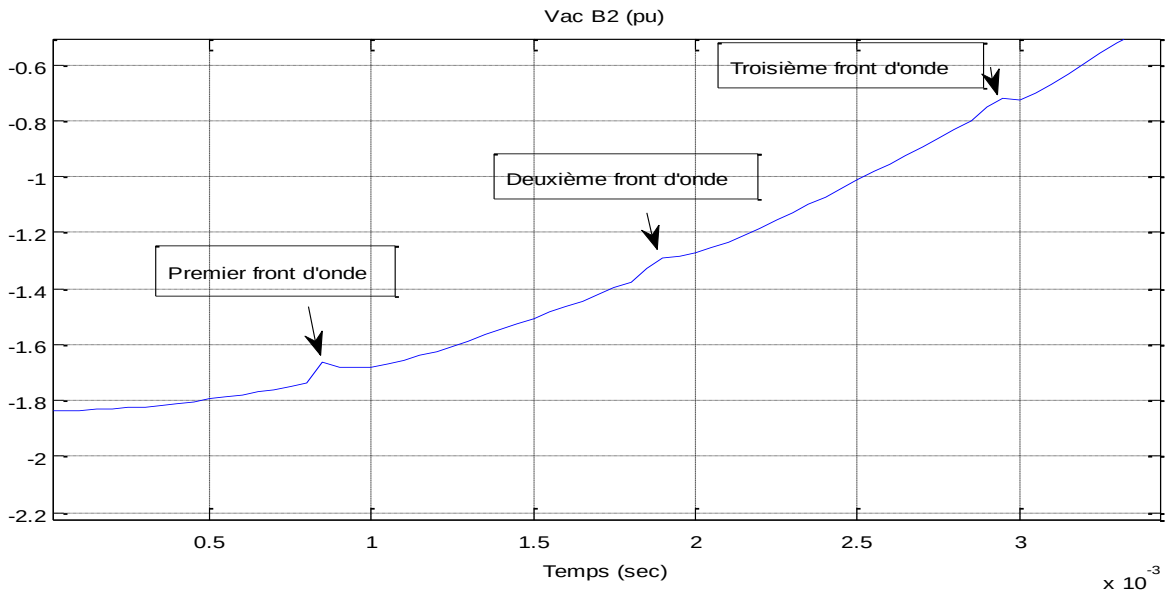


Figure IV-19 : Représentation des 3 premiers fronts d'onde à la barre B2.

Le premier front d'onde à la figure IV-19 est représenté à la figure IV-20.

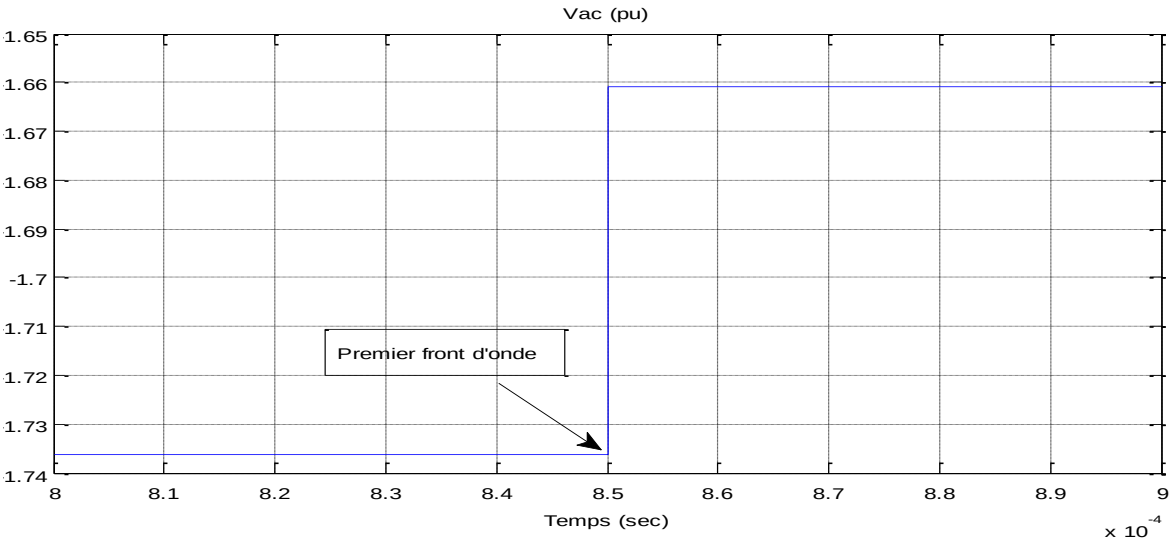


Figure IV-20 : Premier front d'onde à la barre B2.

D'après la Figure IV-20 on trouve un premier temps d'arrivée à la barre B2 de 850 µs. Toujours avec l'aide de la figure IV-19, on présente à la figure IV-21 le second front d'onde, provenant de la barre Bl et arrivant à la barre B2 après un parcours de 300 km.

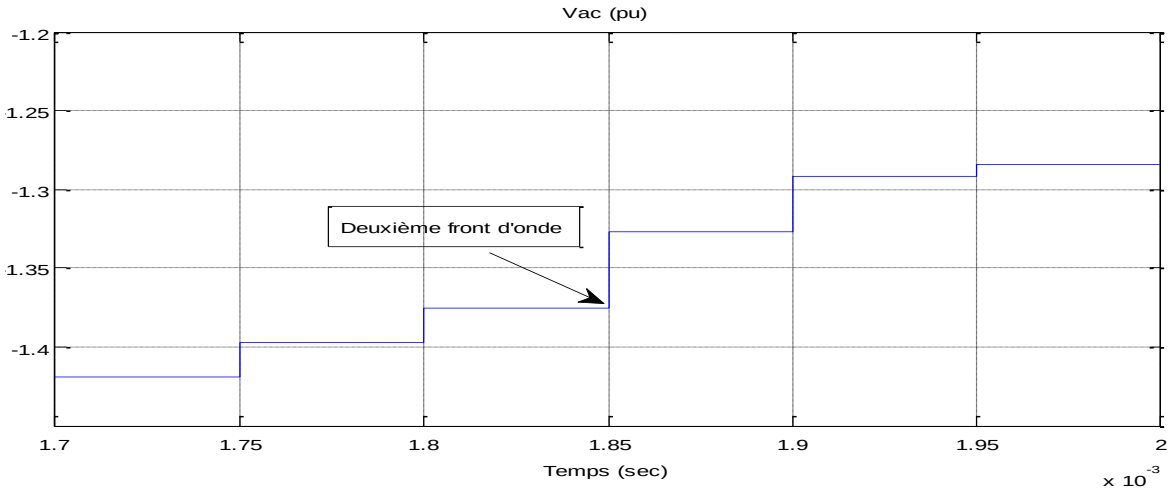


Figure IV-21 : Deuxième front d'onde à la barre B2 après 300 km.

On remarque que le front d'onde a pris, considérant les premiers 150 km parcouru avant l'atteinte de la barre B l : 1.85e-3 - 850e-6 = 1e-3 sec. Alors,

$$V_1 = 300/1.10^{-3} = 30000 km/s \qquad (IV-5)$$

La vitesse est très élevée et elle est égale à la vitesse de la lumière. Ce résultat est très proche de la vitesse de propagation de séquence directe calculé précédemment. Cette vitesse serait celle d'une séquence directe .Donc, à l'aide de la tension ligne - ligne, il a été possible de trouver la vitesse de séquence directe des fronts d'onde de tension.

IV-7-4 .Courants de ligne:

La figure IV-22 présente les résultats obtenus pour les courants de ligne suite au coup de foudre sur la phase A. On rappelle que 1 pu de courant est calculé pour une puissance de base de 100 MVA.

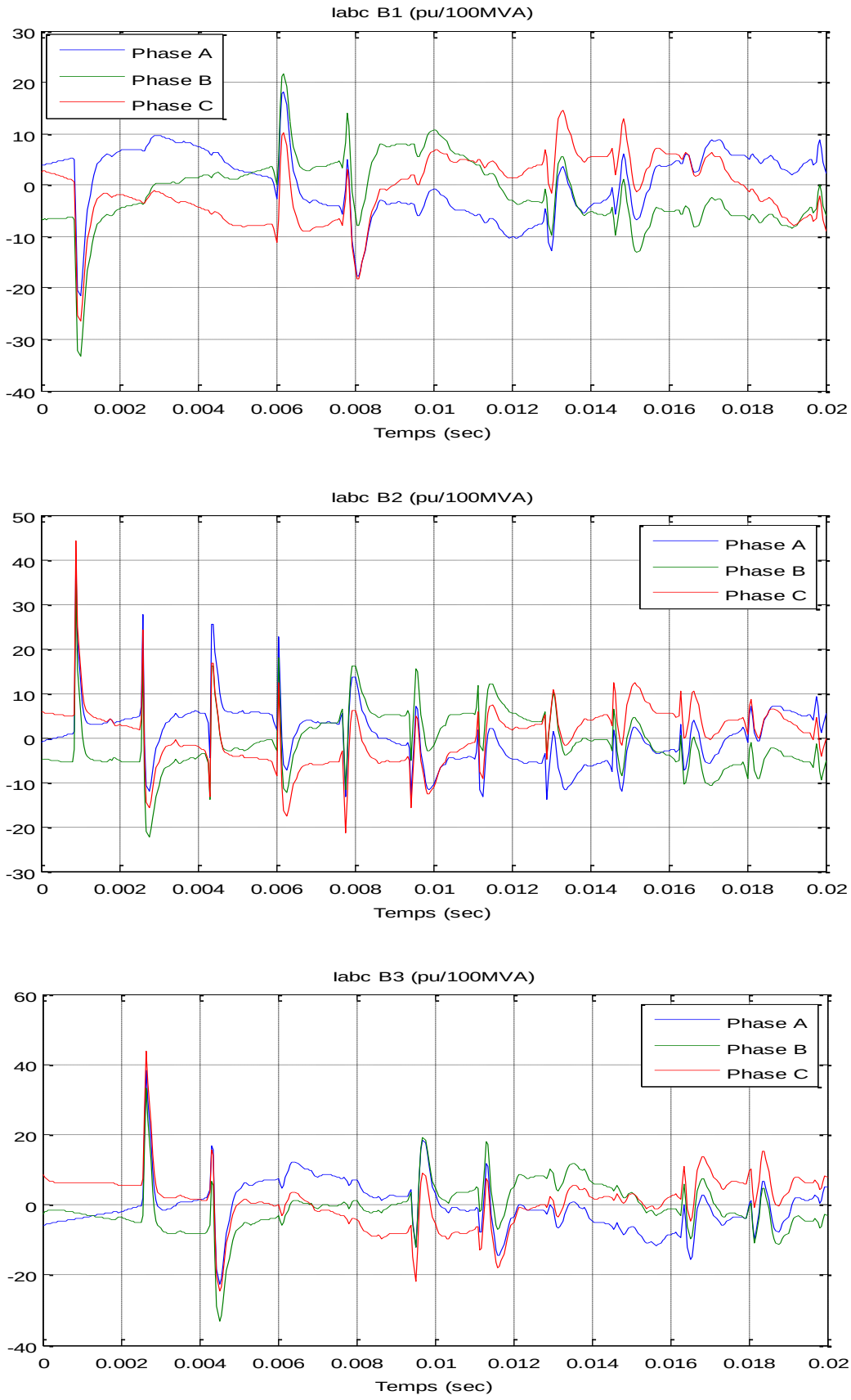


Figure IV-22 : Courants de ligne après une frappe de la foudre entre les barres B l et B2.

IV-7-5.Tension et courant dans les bancs de compensation:

Le modèle que nous avons utilisé est équipé des bancs de condensateur branché en série. Ces condensateur serve amélioré le transit de puissance et réduire les pertes, mais ce type de compensation nécessite des protections particulier pour protégé les condensateurs en cas d'un défaut ou surtension affectant le réseau. Si on examine les bancs de condensateur utilisé dans notre modèle en remarque que cette tache est accomplie en plaçant des varistances (MOV) en parallèle avec la capacité pour assurer leur protection (Figure IV-23). Nous avons jugé très utile de présenter les résultats des simulations obtenue dans les bans de condensateur pour mieux comprendre leur fonctionnement.

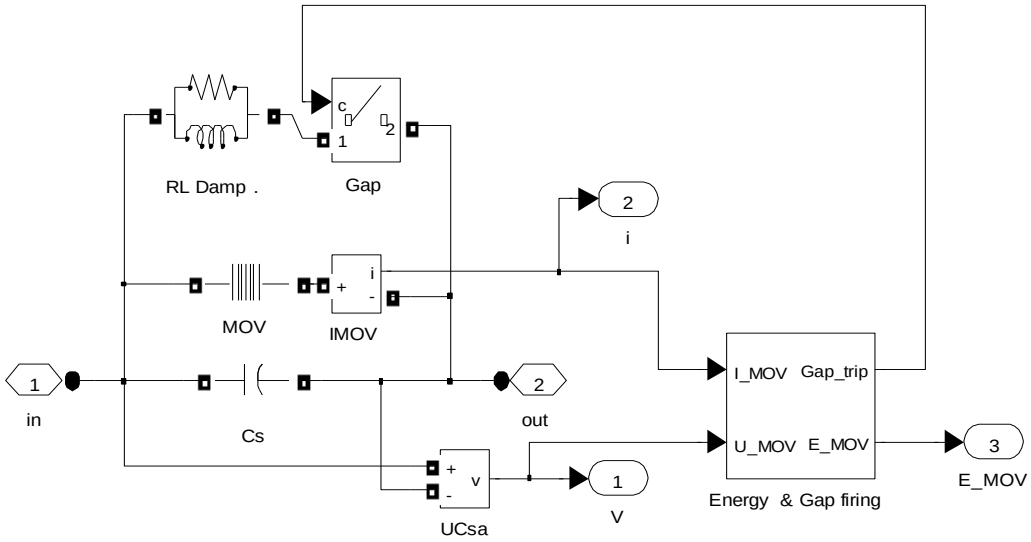


Figure IV-23 : Modèle d'un banc de condensateur série (Matlab-simulink)

Les figures IV-24 et IV-25 représente respectivement la tension dans la capacité et le courant dans la varistance de la phase A en cas d'une frape de foudre entre B1 et B2.

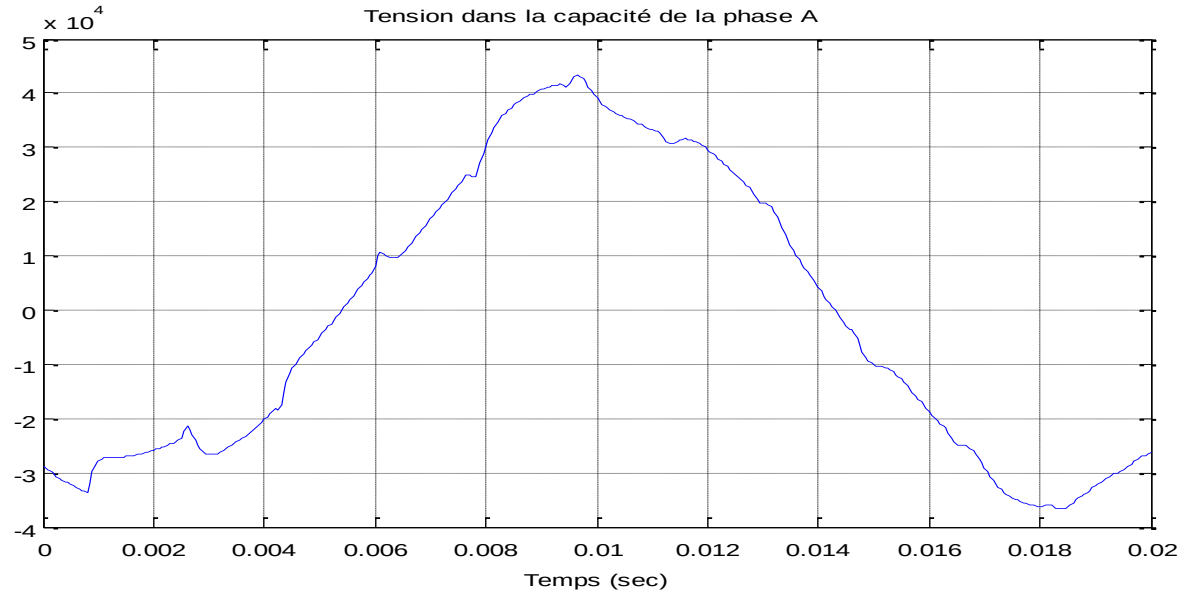


Figure IV-24 : Tension dans la capacité de la phase A

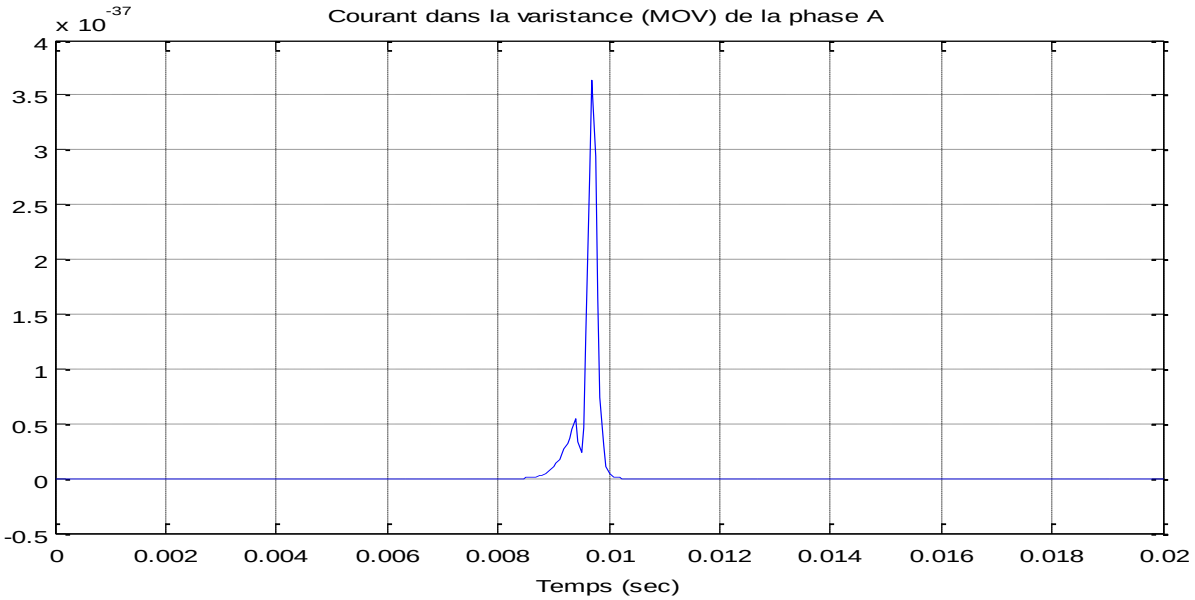


Figure IV-25 : Courant dans la varistance (MOV) de la phase A.

D'après ces résultats on remarque que la varistance (MOV) qui est une résistance non linéaire à clairement remplie son rôle on protégeant la capacité est ceci on absorbant l'excès de courant au moment du coup de foudre. Cette expérience nous montre l'importance d'équipé certain élément du réseau telle que les transformateurs et les condensateurs de compensation série d'une varistance ou parafoudre pour garantir leur protection.

IV-7-6. Analyse des résultats de simulation :

On a vu, par les simulations, qu'à la suite d'une injection d'un courant très intense dans une phase, il y avait apparition du phénomène de propagation de fronts d'onde de tension et de courant de haute intensité sur la ligne touché, et sur les autres phase adjacentes par couplage électromagnétique, et que ces fronts d'onde s'amortissent rapidement dans leurs progressions. Deux types de propagation du front d'onde on été observé (direct et homopolaire). Cependant, pour la frappe directe de la foudre sur un conducteur de phase, on ne devrait apercevoir qu'une seule vitesse de propagation : celle du mode direct dans les premières microsecondes, puisque la ligne de transport n'est pas mise directement à la terre, mais ce n'est pas le cas en réalité. On peut aussi le remarquer dans les résultats de simulation. De plus, le fait de simuler un réseau complet présentant des mises à la terre (transformateurs, charges réactives, sources, etc.), un transitoire de foudre suite à un coup direct apportera nécessairement un mode de propagation homopolaire, en plus de celui directe. Et c'est ce premier mode de propagations d'ondes qui peut être destructif étant donné les amplitudes en jeu, comparativement à celles du mode direct.

Conclusion :

Dans ce chapitre , on a modélisé le coupe de foudre sur ligne THT <<735KV>> , par un modèle simulink et d'après les résultats obtenus, on constate que la foudre provoque une très grande élévation de tension et de courant dans une durée très bref , et elles nous confirment que la foudre reste un phénomène très dangereux qui peut provoquer des dégâts de matériel , et pour démunie cette surtension il faut insérer des dispositifs de protection comme le parafoudre .

Conclusion générale

La foudre est un phénomène météorologique d'instabilité atmosphérique, elle est caractérisée par le niveau kéraunique et la densité des coups de foudre.

Le coup de foudre est une décharge électrique se produisant dans un grand intervalle dont les << électrodes >> sont d'une part un nuage orageux charge et d'autre part la terre.

De nos jours, la foudre est la principale cause de mise hors servisse des installations électriques ainsi que téléphonique.

Elle est aussi la source majeure d'interférences au niveau des communications radio. Qu'elle soit directe ou indirecte, et les personnes, en particulier lorsqu'ils sont associés à des perturbations liées au vent, à la pluie ou à la grêle.

La protection contre la foudre est encore inadaptée et nettement insuffisante sur conséquence, les progrès réalisé dans la connaissance de phénomène de la foudre permet d'aidé de concevoir des appareillages de protection adéquats.

Parmi ces dispositifs nous sommes intéressées d'une manière particulière par : le câble de garde qui assure une bonne protection contre la foudre car il transfert la décharge de la foudre vers la terre à condition de réaliser une bonne mise à la terre des pylônes , et le parafoudre qui fait l'écrêtage de surtension , il réduit le niveau d'isolement , donc le niveau de protection et permet une continuité de service.

La simulation sous MATLAB (Simulink), pendant un temps de 0.02s , nous a permis de voir l'effet d'un coup de foudre non répétitif sur une ligne de transport de l'énergie de électrique THT 735KV , d'après les allures de tension et de courant qu'on a obtenus, nous prouvent que le coup de foudre provoque des surtension et surintensités de grades amplitudes dans une durée très bref, qui représente un danger pour les matériels

BIBLIOGRAPHIE

[1] A .HERMENT, << électricité atmosphérique et la foudre >> , année 1997, presse universitaire de la France.

[2] étude de simulation des surtensions transitoires causée par l'ouverture de disjoncteur.

[3] protection des réseaux électriques parles parafoudres.

[4] D.FLUUGHIRON, << surtension et coordination d'isolement >> cahier technique ,MERLEIN GERIN n° 151, année 1992.

[5] étude des surtensions engendre par la manœuvre (2008-2009).

[6] A. ROSSEAU, G. BERGER , << foudre et protection des bâtiments >> , technique de l'ingénieur , C 3307, année 2000 .

[7] FOUFOUNA and A.BEROULA << modelling of the leader current with an equivalent electrical network >>, vol 28, n°2 , année 1995.

[8] C. GARY , << la foudre >> , paris année 1995.

[9] BERGER , K.RB.ANDERSON,<< paremetre of lighting flasher >> ,année 1995.

[10] HT.WE<< analysis and design sélection of lightining arrester for distribution substation >> acdemy of science, engineering and technology , année 2008.

[11] GALLUMBERT, BONCHOU , Modélisation des décharges des éclairs >>, rapport interne ONERA , année 1992.

[12] M.A.UMAN, << lightining discharge >>, acadimic press, année 1987.

[13] M.A.UMAN, << lightining discharge >>,vol 3 , année 1987.

[14] FOUFOUNA , << étude de décharge de foudre >> , rapport de D,E,A, école central de lyon (France) , juin 1993.

[15] ASABOT et J. MICHOUD , << ligne et postes choix et coordination de l'isolement >> , D.4750 – technique de l'ingénieur , année 1987.

[16] MICHEL AGUET et JEAN JAQUE , << traité d'électricité >> , énergie électrique volume XII.

[17] JOSE – LUIS , BERMUDEZ , << lightening and électromagnitic fields associated with return strikers to elevatedstruck objects >> , doctorat soutenu en 2003.

[18] A. DARCHERIF, << contribution de la modélisation de phénomène d'interface électromagnétique dans les réseaux électriques >> , thèse doctorat année 1990.

[19] M.A. UMAN , << lightining discharge >> , vol 39, année 1987.

[20] G.ROY , J.LALOT , << les propriétés électriques se l'aire et les très hautes tension >> , collection de la D.E.R d'E.D.F n°51 , année 1984.

[21] C.SERAUDIE, << surtensions et parafoudres en BT >> ,n°179.

[22] F.J.SCHNLAND , << the lightening discharge >> hand band book vol 22,Berlin 1956.

[23] CHRISITIAN,<< doit-on craindre de la foudre >> , EDB sciences, année 2006.

[24] BENTOIT de METZ , << la foudre et les installations électriques HT >>, cahier technique MERLIN GERIN n°168, année 1993.

[25] SCHNEDER ELECTRIQUE,<<la protection des installations électrique contre la foudre >>, novembre 2000.

[26] HONG LE HUY , << protection – surtension et parafoudre >> , université Laval année 2009.

[27] << cable de garde et fibre optique >> , année 2009.

[28] MICHEL BOURDAGES , << déglaçage de câble se garde >> , Unité lignes TTD.

[29] ZELMAT AMINA, << protection réseaux électrique par le parafoudre >> master année 2011.

[30] BEKARI ABD ELMOUMEN , BELAMI ABD ELHAFID, << réduction des surtensions d'enclenchement dans les réseaux électriques >>, PFE, année 2003.

Annexe

Le modèle à paramètres distribués (Bergeron) d'une ligne de transport disponible dans MatLab-Simulink [29,30]

Ce modèle permet de simuler une ligne de transport équilibrée et transposée à paramètres distribués de N phases, basé sur la méthode de la propagation d'ondes de Bergeron. Le modèle de simulation est présenté à la figure 2-7. Il est utilisé pour simuler toutes longueurs de ligne, mais plus particulièrement les longues. Ce modèle est aussi utilisé dans d'autres programmes de simulation de réseaux électriques.

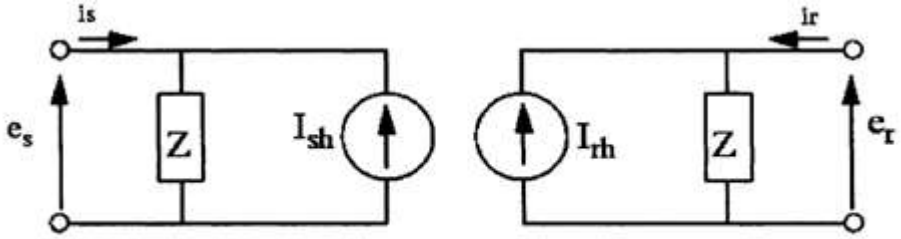


Figure I : Modèle de ligne à paramètres distribués (Bergeron) dans MatLab-Simulink [29]

Le modèle de ligne à paramètres distribués (Bergeron) est caractérisé par deux valeurs : l'impédance caractéristique Zc = -*Jl[c* et la vitesse de propagation v -1*f*^ *L C* . MatLab-Simulink utilise la quantité V + ZI, où V et I sont respectivement la tension et le courant de ligne, qui entrent à un bout de la ligne et doivent arriver inchangés à l'autre bout après un délai de transport de r = *d / v* (d étant la longueur de la ligne et v la vitesse de propagation). Pour une ligne polyphasée, les valeurs distribuées des phases sont converties en valeurs modales, indépendantes les unes des autres. Dans le domaine temporel, selon la figure 2-7, [29]

$$I_{sh}(t)=\left(\frac{1+h}{2}\right)\left[\frac{1}{Z}e_r(t-\tau)+hi_r(t-\tau)\right]+\left(\frac{1-h}{2}\right)\left[\frac{1}{Z}e_s(t-\tau)+hi_s(t-\tau)\right]$$

$$I_{rh}(t)=\left(\frac{1+h}{2}\right)\left[\frac{1}{Z}e_s(t-\tau)+hi_s(t-\tau)\right]+\left(\frac{1-h}{2}\right)\left[\frac{1}{Z}e_r(t-\tau)+hi_r(t-\tau)\right]$$

avec

$$Z=Z_C+\frac{R}{4}$$

$$h=\frac{Z_C-\frac{R}{4}}{Z_C+\frac{R}{4}}$$

Les pertes résistives séries de la ligne sont considérées dans le modèle de ligne, mais elles sont simulées comme étant constantes : elles agissent principalement dans F amortissement de l'amplitude des fronts d'onde.

Le modèle à paramètres distribués (Bergeron) a cependant des limitations : il considère que les paramètres de ligne sont constants neu importe les variations de fréquence dans les simulations.

Il ne représente donc pas fidèlement la dépendance en fréquence des paramètres RL d'une ligne de transport. En effet, R et L des lignes, sans oublier les câbles de garde et les pylônes, présentent une forte dépendance en fréquence pour des fronts d'onde impulsionnels du domaine fréquentiel des hautes fréquences pouvant causer ainsi leurs atténuations.

De plus, ce modèle de ligne amplifie l'amplitude de la séquence de propagation homopolaire. Néanmoins, le modèle à paramètres distribués (Bergeron) peut être représentatif pour des modélisations spécifiques, considérant des hypothèses réduisant la complexité des systèmes simulés.

les paramètre des réseaux dans un tableau :

Les éléments de la ligne	**Paramètre**
Source	V= 13.8 KV ,Θ = 0° ,F= 60hz Base voltage =6*350^{e}6 VA ,X/R =10 Ω
Charge	- P= 100^{e}6 W
Transformateur	[P , F] = [6*350e6 VA , 60 HZ] ,[V1 Ph –Ph (Vrms) , R1(pu) , L1 (PU)] = [13.8e3 , 0.002 , 0.08] ,[V2 Ph- Ph (Vrms) , R2(pu) , L2(pu)]= [735e3 , 0.002 , 0.08] ,RM = 500 (pu)
La ligne	N= 3 phase ,F=60 hz , L= 600 Km Risistance (H/Km) [N*N matrix] or [R1 R0 LO] = [[0.012730.3864] Capacitance (F/KM) [N*N matrix] or [C1 C0 C0m] = [12.74e-9 7.751e-9]
Capacité :	Total line reactance in positive-sequence: X1 = 0.9337e-3*(2*pi*60)*300=105.6 ohms Capacitance required for 40% compensation: Required series capacitance: Xc=0.4*105.6 = 42.24 ohms ,or Cs= 62.8 uF
Jeu de barre	P_a= 100e6 VA V= 735e3 V