



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
السَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللَّهِ وَبَرَكَاتُهُ



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA
BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Sciences de l'ingénierie

Département : Electrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Licence

Thème:

**TITRE(Arial, 16)...PROTECTION CONTRE LES
SURTENSIONS.....**

Présentées par:

- *Nom et Prénom Zenati Nazim*
- *Nom et Prénom Belgacem Ahmed Moubarek*

Encadrant: AZZAG El Bahi *Grade: Professeur* BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

AZZAG El Bahi	PR	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
KSENTINI Abdelhamid	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Président

AnnéeUniversitaire : 2020/2021



REMERCIEMENT

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électrotechnique

de l'Université BADJI MOKHTAR , ANNABA..

Mes remerciements vont tout premièrement a dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'l ma a donnée durant toutes ces années.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à notre encadreur le docteur « AZZAG EL-BAHI » pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.

Je tiens tout particulièrement à remercier tous les enseignants surtout le professeur pour leurs conseils, informations, critiques et encouragements.

Me sincères remerciements aux messieurs les membres du jury <mr KSSSENTINI> pour

l'honneur qu'il me font en participant au jugement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement toutes personnes qui m'aidé a élaboré et réalisé ce mémoire, ainsi à tous ceux qui mon aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.

Mes remerciement vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à ma formation.

Les meilleurs sentiments sont destinés pour la famille « BELGACEM » «HANNACHI », et la famille « ZENATI», « ». Je remercie également tous les amis et tous les potes. Si on a oublié quelqu'un, on le prie de nous pardonner

DEDICACE

A ma chère mère, pour ses sacrifices de puis qu'elle mis au monde,

*A mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les
difficultés,*

Pour tous ce qui a fait pour que je puisse les honorer,

A mon frère à toute ma famille.

A mon binôme <zenati nazim>

A tous mes amis.

Je dédie ce modeste travail

<BELGACEMAhmedMoubarek>

*Je dédie ce travail à mon grand père qui est decédé récemment
à mes deux chères parents
à mon frère Anis Zenati
et finalement
à mes amis proches qui ont été la quand ' j'avais besoins d'eux
et il sont rares*

SOMMAIRE

SOMMAIRE	
CONTENUE	PAGE
Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	01
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA Foudre	02 – 17
I- 1 - La foudre	03
I- 2 - classification des coups du foudre	06
I- 3 - Les paramètres électriques de la foudre	09
I- 4 - effets dus à la foudre	10
I- 5 - foudroiement d'une ligne	12
I- 6 - Propagation d'une onde de foudre	15
CHAPITRE II : MODÉLISATION DES COURANTS DE LA Foudre	18 – 25
II-1- Courant dans le canal de la foudre	19
II-2- Détermination du courant de foudre à la base du canal	24
CHAPITRE III : PROTECTION CONTRE LA Foudre	
III 1-fil de garde	
III 2-Paratonnerre	
III 3-Parafoudre	
CONCLUSION	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : coup de foudre et éclair ascendant.

Figure I-2 : L'électrification d'un nuage d'orage.

Figure I-3 : Initiation du coup du foudre.

Figure I-4 : Bateau sans mise à la terre.

Figure I-5 : Bateau avec mise à la terre.

Figure I-6 : Descendants négatifs, avec arc en retour positif.

Figure I-7 : Coups de foudre descendants positifs.

Figure I-8 : Les différents Types du Traceur.

Figure I-9 : Développement de l'arc en retour.

Figure I-10 : La conduction.

Figure I-11 : L'induction.

Figure I-12 : La remontée de terre.

Figure I-13 : Répartition du foudroiement d'une ligne entre les pylônes et les conducteurs.

Figure I-14 : Chute de la foudre sur un conducteur de phase.

LISTE DES FIGURES

Figure I-15 : Chute de la foudre sur un câble de garde.

Figure I-16 : Propagation d'une onde foudre dans un conducteur

Figure I-17 : Réflexion d'une onde foudre à l'extrémité d'un câble.

Figure II-1 : Propagation d'arc en retour par le modèle de BG.

Figure II-2 : Distribution spatio-temporelle selon le modèle de ligne de transmission.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DE TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II-1 : P (z) et v pour les cinq modèles d'ingénieur.

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

Symboles	Acronymes
U	La tension d'amorçage.
I	Le courant de foudre.
V	La vitesse de l'arc en retour.
NK	Niveau céramique.
NL	Foudroiement de la ligne.
N1	Foudroiement du conducteur Horizontal le plus élevé .
L	Longueur de la ligne en km.
L	Largeur de la ligne en m (entre les conducteurs extérieurs).
A	Facteur d'influence des pylônes et des câbles de garde
Z'	Un point du canal de foudre.
T	Le temps.
Λ	Le facteur de décroissance.
H	La longueur totale du canal de foudre.
P (z')	Facteur d'atténuation d'écrit dans les modèles MTLE et MTLL.
Htot	La hauteur totale du canal de foudre.
V	La vitesse de propagation de l'onde du courant.
I0	L'amplitude du courant à la base du canal.
I01	L'amplitude du courant à la base du canal.
I02	L'amplitude du courant à la base du canal.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Tous les réseaux, installations électriques, lignes de transmission aériennes ou appareillages sont exposés à plusieurs phénomènes naturels destructeurs, Parmi ces phénomènes on précise **La Foudre**.

La Foudre est un phénomène naturel dangereux, imprévisible et inévitable pouvant avoir un impact important sur les systèmes électriques : destruction ou dysfonctionnements des équipements. La foudre constitue le principal phénomène naturel générateur de perturbations électromagnétiques.

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il produit une surtension considérable.

La foudre reste scientifiquement assez mal connue car étant brève et imprévisible, son étude en laboratoire est donc difficile. Dans les grands laboratoires on provoque le coup de foudre par le lancement d'une fusée reliée par un fil à la terre.

Ce travail est consacré à l'étude du coup de foudre et son influence sur les réseaux électrique et la modélisation des courant du l'arc en retour engendré par un coup de foudre.

Dans cette étude, nous avons basé sur l'étude les différents modèles de l'ingénieur pour la modélisation des courants de la foudre et détermination du courant de ce phénomène à la base du canal.

Dans les modèles d'ingénieur, la distribution spatio-temporelle du courant dans le canal de foudre dépend des paramètres mesurés comme le courant à la base du canal, la vitesse de l'arc en retour.

Ce mémoire se composé de trois chapitres. Il est présenté comme suit :

Dans **le chapitre I** nous présentons des généralités sur la foudre, la formation des orges, les catégories des coups de foudre, et les effets dues à la foudre et l'influence du coup de foudre sur les réseaux électriques.

Le chapitre II est consacré à la présentation des principaux modèles d'ingénieur du courant d'arc en retour d'un coup de foudre initié du sol (BG, TL, TCS, MTL, MTLE).

Le chapitre 3 est notre thème du mémoire qui est consacré à la poredctions contre les surtensions et ses différentes méthodes tels que le fil de garde, la paratonnerre et le prafoudre.

CHAPITRE I :
GÉNÉRALITÉ SUR LA Foudre

Introduction :

Ce mémoire se compose de trois chapitres. Il est présenté comme suite :

Dans le chapitre I nous présentons des généralités sur la foudre, la formation des orages, les catégories des coups de foudre, et les effets dues à la foudre, foudroiement d'une ligne et propagation d'onde.

I - 1 - La foudre :

I - 1 - 1 - Définition :

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive qui peut se produire lorsqu'une grande quantité d'électricité statique s'est accumulée dans des zones de nuages d'orage, dans ces nuages, entre eux ou entre de tels nuages et le sol (la terre ou la mer).

La différence de potentiel électrique (électrostatique) entre les deux zones peut atteindre 10 à 20 millions de volts et pour qu'apparaisse la foudre un plasma est produit dans l'air sur le parcours de la décharge, causant les deux phénomènes observés : l'éclair d'une part, qui se propage très rapidement, et d'autre part le tonnerre, qui résulte d'une dilatation explosive de l'air échauffé par l'éclair, et se propage relativement lentement (à la vitesse du son dans l'air, qui dépend de sa température).

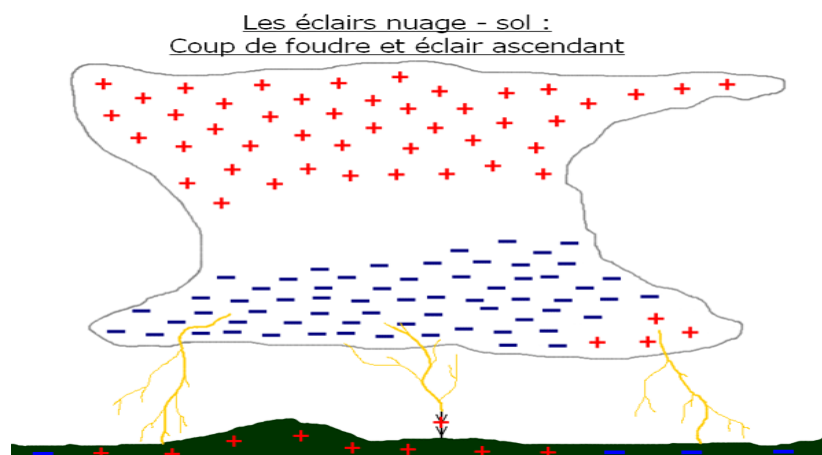


Figure I - 1 : coup de foudre et éclair ascendant

I - 1 - 2- L'électrification d'un nuage d'orage :

Les nuages orageux sont d'énormes masses généralement du types cumulonimbus en forme d'enclume, couvrant plusieurs kilomètres et plus carrés et atteignant souvent dix kilomètres et plus d'altitude, composés de cristaux de glace, de grêlons d'eau surfondue.

A l'intérieur du nuage coexistent des vents violents (jusqu'à 200 km/h) conduisant à des processus d'ionisation par collisions des particules constituant le nuage.

Il se forme alors des charges électriques de signes opposés. La partie inférieure du nuage présente presque toujours une région riche en charges positives, entourées de charges négatives. Les petits cristaux de glace qui se trouvent dans la partie supérieurs des cumulus ont des charges positives.

On pense que l'électrification des nuages est due au choc des masses d'air chaud s'élevant contre les masses d'air froid qui descendent. [1]

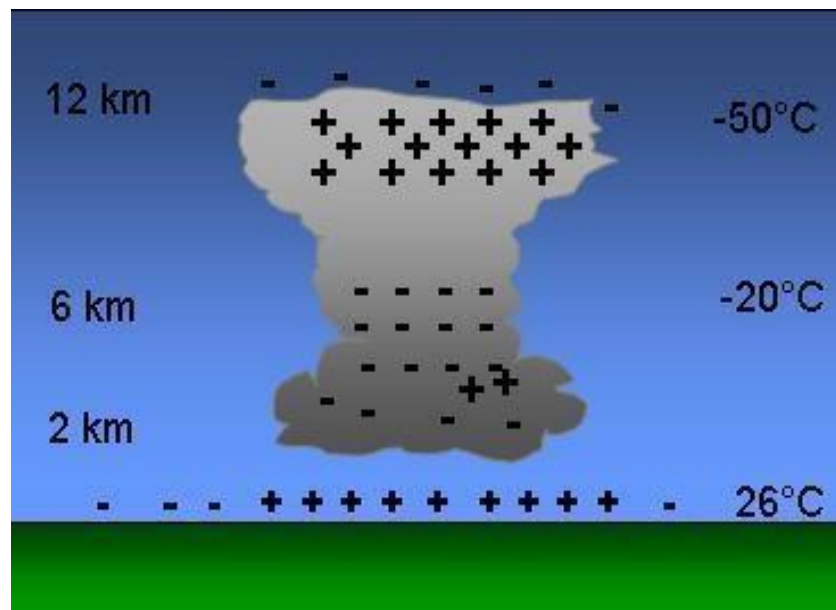


Figure I - 2 : L'électrification d'un nuage d'orage

I - 1 - 3-Initiation d'un éclair :

L'air n'est généralement pas bon conducteur de courant, cependant, sous l'effet des charges électrique, une masse d'air peut devenir légèrement conductrice : on dit alors qu'elle est « Ionisée ».

La transition de l'état isolant de l'air en un état conducteur permet de rétablir l'équilibre entre les charges électriques. Ce phénomène peut se produire aussi bien dans le nuage (éclairs intra-nuages), qu'entre le nuage et le sol (décharges nuages-sol intra-nuages), un tiers seulement des éclairs frappe le sol.

Il se forme ainsi une sorte de parcours sur lequel le courant électrique pourra passer avec plus la facilité. Ce canal est appelé traceur.

Tout le long de ce canal d'air ionisé, une série de décharges électrique éclate alors, si rapidement qu'à nos yeux elle a l'air d'une seule et même décharge : c'est la foudre.

Celle-ci peut être descendante, mais également certaine fois, ascendante.

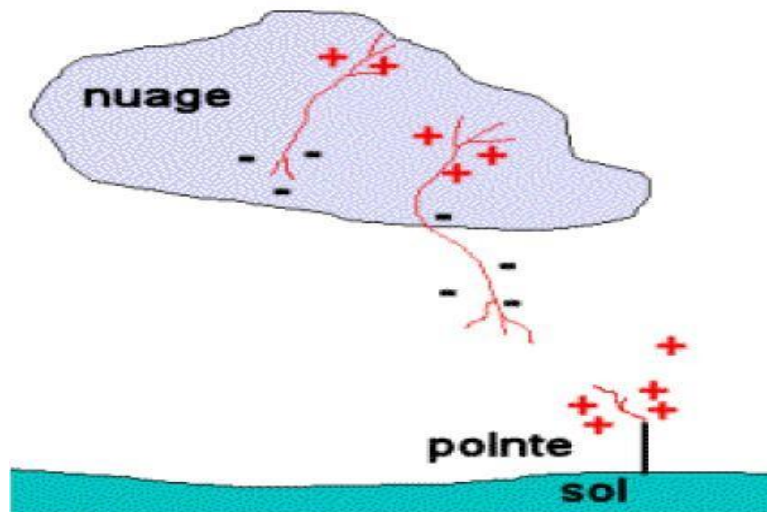


Figure I – 3 : Initiation du coup du foudre

I - 1 - 4 – Ce qui attire la foudre :

- Les lignes d'énergie électrique.
- Le métal.
- Les conducteurs électriques.
- Les endroits élevés, les objets très visibles ou très hauts. La foudre cherche à frapper le sol le plus rapidement possible.
- Un bateau sur un grand plan d'eau.

Exemple : Comportement de la foudre sur un bateau. [1]

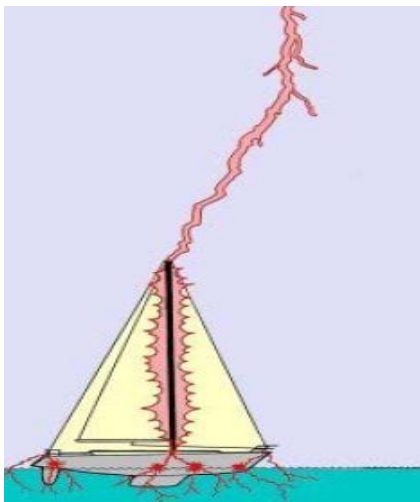


Figure I - 4 : Bateau sans mise à la terre.

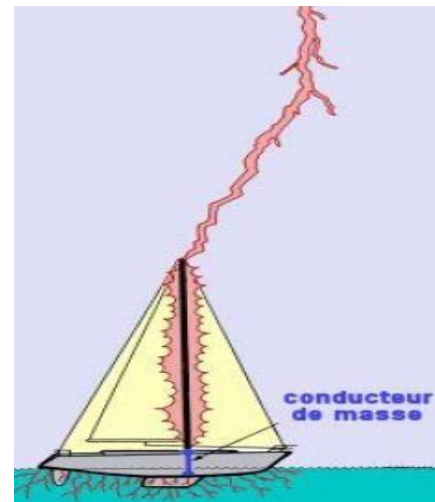


Figure I - 5 : Bateau avec mise à la terre.

I - 2 - classification des coups de foudre :

La classification des coups de foudre est réalisée en fonction des charges écoulées et de la nature du système de traceurs conduisant à la connexion de la foudre au sol.

I - 2 - 1- Coups de foudre descendants négatifs, avec arc en retour positif :

Ceux sont les plus fréquents (70 à 90 % des cas de foudroiement). Dans ce type de décharge, il y a émission d'un précurseur négatif descendant du nuage (étape a). Le champ électrique sur un objet au sol est alors suffisamment renforcé par l'approche du précurseur négatif pour provoquer la naissance d'un arc en retour positif (étape b). Cet arc va aller à la rencontre du traceur provenant du nuage, donnant naissance, lorsqu'ils se rencontrent, à la décharge principale de foudre.

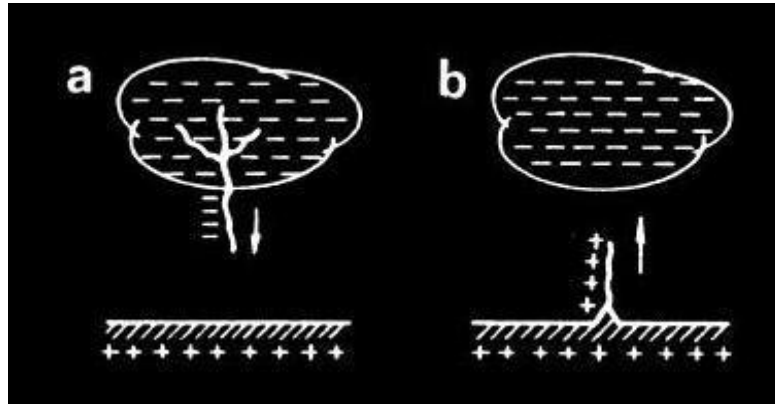


Figure I - 6 : descendants négatifs, avec arc en retour positif. [3]

I - 2 - 2 - Coups de foudre descendants négatifs, sans arc en retour positif :

Ce type de décharge est identique à la précédente, mais les conditions de champ électrique au sol ne permettent pas le développement d'un arc en retour. Il y a alors connexion directe au sol.

I - 2 - 3 - Coups de foudre descendants positifs :

Initié par un traceur positif se propageant depuis la charge positive supérieure du cumulonimbus vers le sol, ce type de décharge est rare mais est accompagné d'un transfert des charges nuage - sol important.



Figure I - 7 : coups de foudre descendants positifs [3]

I - 2 - 4 - Coups de foudre ascendants positifs :

Ce type de connexion correspond au cas où le champ électrique au sol créé par le nuage est suffisamment intense pour qu'un précurseur puisse se développer du sol vers le nuage. Ceci est généralement le cas dès lors qu'il existe au sol des structures de grande hauteur (plusieurs dizaines de mètres). Ce type de décharge est ainsi fréquent dans les régions montagneuses. [2]

I - 2 - 5 - Le traceur :

La foudre s'amorce tout d'abord par une toute petite étincelle, à environ 8km à l'intérieur du nuage. Cette pré-décharge est appelée "**traceur**". Dans le cas d'un éclair descendant négatif, le traceur sera dit « par bonds » car son parcours vers la Terre est constitué de bonds successifs. En revanche, il est nettement plus droit pour les éclairs positifs.

Le traceur est formé d'électrons qui jaillissent du nuage, puis s'arrêtent, se rapprochent pendant quelques millièmes de secondes, puis s'éloignent à nouveau. Ils recommencent ce même schéma plusieurs fois, pour arriver à la formation d'un canal ionisé.

Ce canal se divise alors en plusieurs branches, suivant les différents mouvements des électrons. On appelle ce phénomène le **précurseur**. Le précurseur précède l'arrivée de l'éclair.

Etant formé d'électrons, le traceur est donc chargé *négativement*. Lorsqu'il s'approche de la surface de la Terre, il provoque donc une concentration d'électricité négative. Le sol, par contre du coup, se charge alors *positivement*. [2]

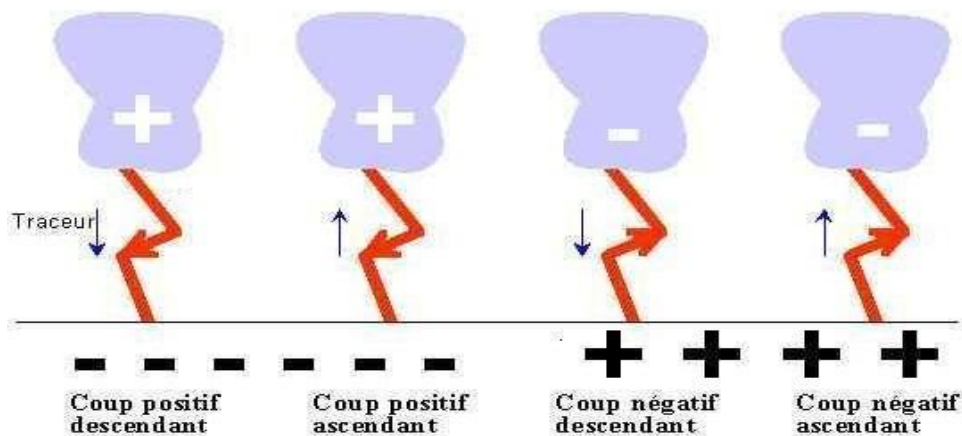


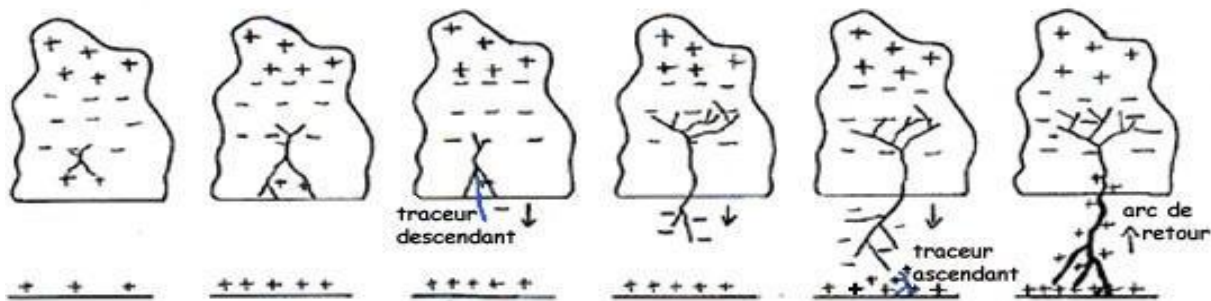
Figure I - 8 : Les différents Types du Traceur.

I - 2 - 6 - L'arc en retour :

Lorsque les deux têtes des traceurs entrent en contact, c'est la **jonction**. Leurs canaux respectifs se rejoignent, reliant ainsi le nuage à la Terre par un *canal ionisé*. Puis les charges positives remontent ce canal en neutralisant les charges négatives: il s'agit de l'**arc en retour**.

Quelques instants plus tard de nouveaux précurseurs descendants et arcs en retour vont emprunter cette trace en progressant beaucoup plus rapidement. On compte en moyenne 4 allers-retours sur cette même trace. L'œil humain, du fait de la persistance rétinienne, ne perçoit qu'un seul éclair.

Les électrons sont donc attirés vers le sol, et leur électricité se disperse dans toutes les directions et parcourt plusieurs centaines de mètres dans le sol. Les électrons les plus près du sol sont attirés les premiers et ainsi de suite jusqu'à la charge du nuage lui-même. [2]



0

Figure I – 9 : développement de l'arc en retour.

I - 3 - Les paramètres électriques de la foudre :

Un coup de foudre est composé en général de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé de l'arc en retour qui est responsable de la majorité des dégâts causés par la foudre, les principales caractéristiques de la foudre sont généralement les suivantes :

- Valeur de crête du courant.
- Temps de montée.
- Temps de décroissance.
- Raideur de l'impulsion.
- L'énergie spécifique.
- La charge totale.
- La durée de l'éclair.
- Le nombre de l'arc en retour.

- L'onde de choc acoustique (tonnerre).

I - 4 - effets dus à la foudre :

Les effets de la foudre sont ceux d'un courant d'impulsion à haute résistance qui se propage initialement dans un milieu gazeux (l'atmosphère), puis dans un milieu solide, plus ou moins conducteur (la terre) :

- effets visuels (flash): causée par le mécanisme d'avalanche 'Townsend'.
- effets acoustiques : causés par la propagation d'une onde de choc (élévation de la pression), dont l'origine est le passage de la décharge ; cet effet est perceptible jusqu'à une distance d'environ 10 km.
- effet thermique : la chaleur générée par effet Joule dans le canal ionisé.
- effets électrodynamiques : ce sont les forces mécaniques appliquées aux conducteurs placés dans un champ magnétique créé par la circulation à haute tension. Ils peuvent entraîner des déformations.
- des effets électrochimiques induction d'effets ces effets relativement mineurs sont véhiculés sous la forme d'une décomposition électrolytique par l'application de la loi de Faraday.
- les effets sur un être vivant (humain ou animal) : le passage d'un courant transitoire d'une certaine valeur efficace est suffisant pour entraîner des risques d'électrocution par une attaque cardiaque ou d'insuffisance respiratoire, avec le risque de brûlures.

La foudre provoque deux principaux types d'accidents :

- les accidents causés par un coup de foudre direct lorsque cette dernière frappe un bâtiment ou une zone spécifique. Cela peut causer des dommages considérables, généralement par l'incendie. La protection contre ce danger est fournie par les paratonnerres.
- les accidents causés indirectement, lorsque les coups de foudre ou une surtension frappe des câbles ou des liaisons de transmission électriques. D'où la nécessité de protéger avec un parafoudre le matériel à risque contre la surtension et les courants indirects générés.

I - 4 - 1 - Les effets directs :

Les effets thermiques : ces effets sont liés aux quantités de charges mises en jeu lors des coups de foudre. Ils se traduisent par des points de fusion plus ou moins importants au niveau des impacts lorsqu'il s'agit de matériaux de grande résistivité. Sur des matériaux mauvais conducteurs, une grande énergie est libérée sous forme de chaleur. L'humidité qu'ils contiennent provoque alors une surpression localisée brutale pouvant aller jusqu'à leur éclatement. [4]

Les effets dus à l'amorçage : La résistivité des sols fait que les prises de terre sont résistantes et qu'elles peuvent générer lors du passage du courant de foudre, une montée brutale en potentiel de la terre de l'installation. Des différences de potentiels se créeront aussi entre certains éléments métalliques. D'où l'intérêt de prendre un soin particulier à la réalisation des prises de terre et à la liaison des masses métalliques jouxtant les descentes.

Effets acoustiques - le tonnerre : Le tonnerre est dû à la brusque élévation de pression (2 à 3 atmosphères) du canal de décharge contracté par les forces électrodynamiques pendant l'éclair. La durée du tonnerre est en fonction de la longueur du canal ionisé. La propagation à des fréquences élevées, des composantes spectrales libérées par l'onde de choc, s'effectue perpendiculairement au canal. Pour des fréquences basses, cette propagation est omnidirectionnelle ; d'où les différentes formes de grondements ou claquements perçues par un observateur suivant la distance et l'orientation des canaux successifs empruntés par l'éclair.

Effets lumineux : Un coup de foudre proche sensibilise violemment la rétine d'un observateur. L'impression est telle que l'œil reste pendant de longues secondes ébloui sans pouvoir récupérer la vision.

Effets électrodynamiques : Les effets électrodynamiques se produisent entre conducteurs et autres parties métalliques qui se trouvent dans le champ magnétique créé par le courant de foudre. Ils se manifestent par des efforts mécaniques substantiels, d'attraction et de répulsion, d'autant plus intenses que les conducteurs sont rapprochés et que le courant est fort.

Effets électrochimiques : Très négligeables et sans influence sur les prises de terre en raison du caractère fugitif des impacts de foudre (comparativement aux courants vagabonds du sol). [4]

I - 4 - 2 - Les effets indirects :

La présence de plus en plus fréquente d'électronique sensible confère aux équipements électriques une vulnérabilité accrue aux surtensions transitoires liées à la foudre. Les surtensions sont soit d'origine atmosphérique, soit d'origine industrielle. Les plus néfastes sont toutefois les surtensions atmosphériques qui sont les conséquences de trois principaux effets :

La conduction : il s'agit d'une surtension qui se propage le long d'un conducteur qui est entré en contact direct avec la foudre. Cet effet est d'autant plus destructeur que la majorité de l'énergie du coup de foudre est propagée le long du réseau. Ce problème est résolu en dotant l'installation d'une protection pouvant supporter un fort courant. (**fig.10**).

L'induction : provoquée par le champ électromagnétique rayonné par le coup de foudre, elle génère une surtension sur les conducteurs dans un périmètre proportionnel à la puissance et à la variation de vitesse du coup de foudre. En conséquence, sous l'influence des brusques variations de courant, les câbles et mêmes les canalisations qui se comportent comme des antennes peuvent être soumis à des surtensions destructrices. C'est pourquoi enterrer les réseaux n'en garantit pas la protection contre la foudre. (**fig.11**). [4]

La remontée de terre : lors d'un coup de foudre, une surtension peut être remontée par la terre. Cela peut être en partie réglé a) par des liaisons équipotentielle des structures métalliques aux masses et des terres de l'ensemble de l'installation d'une structure. B) par une protection contre les surtensions installée sur les services. (**fig.12**).



Figure I – 10 : La conduction

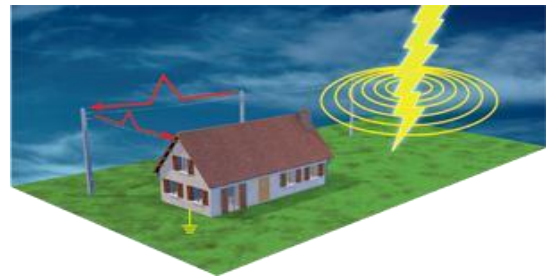


Figure I – 11 : L'induction.



Figure I– 12 : La remontée de terre [4].

I- 5 - foudroiement d'une ligne :

La formule empirique générale indiquant le foudroiement (nombre total de CdF par an) d'une ligne (pylônes, câbles de phases et de garde) est la suivante :

$$NL = NK.) N1/30 + 1/70) . \alpha . L/100 \quad (\text{I.1})$$

Avec :

NK = niveau kéraunique.

NL = foudroiement de la ligne.

NI = foudroiement du conducteur Horizontal le plus élevé.

L = longueur de la ligne en km.

I = largeur de la ligne en m (entre les conducteurs extérieurs).

α = facteur d'influence des pylônes et des câbles de garde (**fig. 13**).

Cette expression prend en compte :

- le foudroiement d'un conducteur ($N1$).
- la présence des conducteurs extérieurs (l).
- la répartition entre pylône et ligne fonction de la structure de la ligne (a).
- la longueur de la ligne (L) :
 - pour un calcul de coordination d'isolement, $L = 1,5$ km est généralement choisie car au-delà l'effet de la foudre devient négligeable.
 - pour un calcul de continuité de service, c'est la longueur totale de la ligne sur laquelle des amorçages sont possibles, donc des interruptions de service, qui est retenue.

		nombre de câbles de garde			
		0	1	2	3
foudroiement	sur pylône (%)	55	35	20	10
	sur portée (%) (câbles de garde et de phases)	45	65	80	90
facteur d'influence	α	1,65	1,40	1,20	1,05

Figure I-13 : répartition du foudroiement d'une ligne entre les pylônes et les conducteurs. [5]

II – 5 - 1 - Coups de foudre directs (sur conducteurs de phase) :

Lorsque la foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde Z de valeur comprise entre 300 et 500 Ω (**fig. 13**). Il s'en suit une onde de tension associée :

$$U(t) = Z \cdot i(t) / 2 \quad (\text{I.2})$$

Au niveau des pylônes la tension croît et se propage :

- en onde pleine en atteignant sa valeur maximale

$$U_{max} = Z \cdot I_{max} / 2 \quad (\text{I.3})$$

Lorsque :

$$Z \cdot I_{max} / 2 < U_a \quad (\text{I.4})$$

Avec U_a = tension d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs ou des éventuels éclateurs de protection, elle est sensiblement proportionnelle à la longueur de la distance dans l'air ($\gg 550 \text{ kV / m}$), et doit tenir compte d'un retard à l'amorçage pour les fronts très raides :

- en onde coupée à la tension d'amorçage lorsque :

$$Z \cdot I_{max} / 2 \geq U_a \quad (\text{I.5})$$

La valeur limite du courant de foudre au-delà de laquelle il y a amorçage, donc interruption des services, est appelée courant critique I_c :

$$I_c = 2 \cdot U_a / Z \quad (\text{I.6})$$

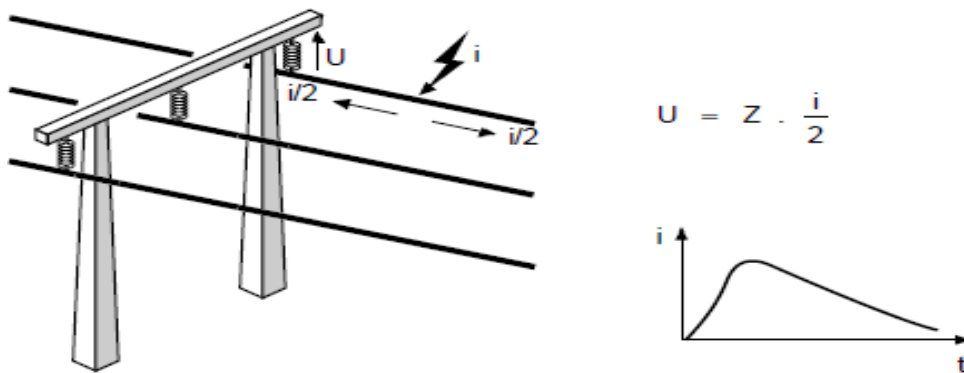


Figure I – 14 : chute de la foudre sur un conducteur de phase. [5]

II - 5 - 2 - Coups de foudre indirects (sur conducteurs de garde ou pylônes) :

Dans ce cas l'écoulement du courant de foudre vers la terre provoque une élévation du potentiel des structures métalliques. La tête du pylône atteint un potentiel dépendant de son inductance propre L et de la résistance de terre R au choc. (fig. 14)

$$U(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di}{dt} \quad (\text{I.7})$$

La tension peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs. Il s'agit de l'«amorçage en retour» ou «backflashover». Une partie du courant se propage alors sur la ou les phases amorçées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un CdF direct.

En très haute tension l'amorçage en retour est peu probable (niveau d'amorçage des isolateurs), c'est pourquoi l'installation de câbles de garde est intéressante (interruptions de service limitées). Mais en dessous de 90 KV l'amorçage en retour se produit même pour de faibles valeurs de la résistance de terre (< 15 W), d'où un intérêt limité (interruptions de service plus fréquentes). [5]

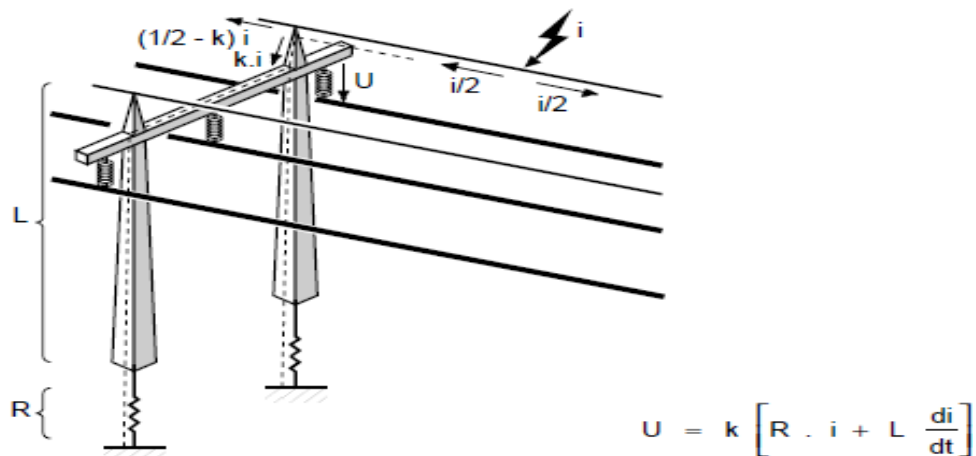


Figure I – 15 : chute de la foudre sur un câble de garde.

II - 6 - Propagation d'une onde de foudre :

Les réseaux électriques sont à basse fréquence et, de ce fait, la propagation de l'onde de tension est instantanée par rapport à la fréquence du phénomène : en tout point d'un conducteur, la tension instantanée est la même. [6]

L'onde de foudre est un phénomène haut fréquence (quelques centaines de kHz au MHz) :

- l'onde de foudre se propage le long d'un conducteur à une certaine vitesse par rapport à la fréquence du phénomène. De ce fait, à un instant donné, la tension n'a pas la même valeur en tout point du support (**fig. 15**).
- un changement de support crée un phénomène de propagation et/ou de réflexion de l'onde dépendant.
 - de la différence d'impédance entre les deux supports.
 - de la fréquence de l'onde progressive (raideur du temps de montée en cas d'une impulsion).
 - de la longueur du support.

En particulier en cas de réflexion totale, la valeur de la tension peut doubler.

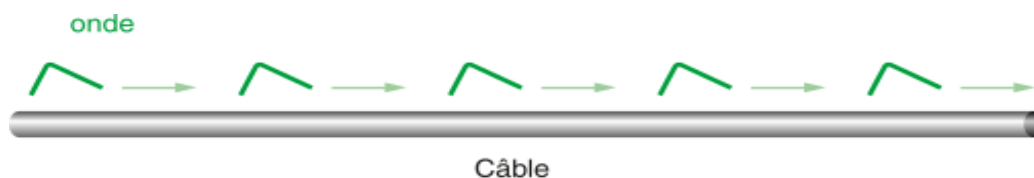


Figure I – 16 : Propagation d'une onde foudre dans un conducteur.

II - 6 - 1 - Exemple cas de la protection par parafoudre :

La modélisation du phénomène appliquée à une onde de foudre et les essais en laboratoire ont montré qu'une charge alimentée par 30 m de câble protégé en amont par un parafoudre à la tension U_p subit du fait des phénomènes de réflexion une tension maximale de $2 \times U_p$ (**fig.16**). Cette onde de tension n'est pas énergétique.

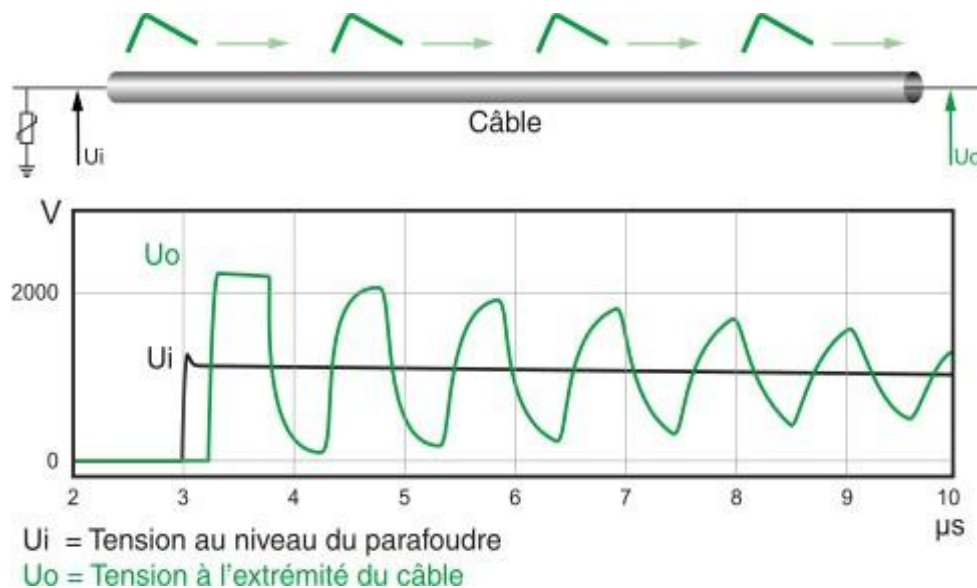


Figure I – 17 : Réflexion d'une onde foudre à l'extrémité d'un câble. [6]

Conclusion :

A partir cette étude sur la foudre on peut dire que ce phénomène atmosphérique dangereux, responsable de plusieurs décès par an et de nombreux dégâts matériels, d'où le coup de foudre frappe directement ou indirect.

CHAPITRE II :
Modélisation des courants de la foudre

Introduction

Nous avons abordé ce chapitre par la modélisation du courant de la foudre, d'où on considère le canal de foudre est verticale sur le sol. A partir de cette étude nous étudierons aussi les différents modèles d'ingénieurs, le modèle bi-exponentiel et Heidler (courant de foudre à la base du canal).

II-1- Courant dans le canal de la foudre :

II -1-1-Modèles d'ingénieurs

La dernière classe est celle des modèles d'ingénieur, dans lesquels la distribution spatiale et temporelle du courant du canal de foudre (ou la densité des charges du canal) est spécifiquement basée sur certaines observations des caractéristiques de l'arc en retour comme le courant à la base du canal, la vitesse de propagation ascendante du front d'onde et le profil de luminosité du canal de foudre. Dans ce travail, nous utilisons les modèles d'ingénieur. [7]

Les modèles d'ingénieurs se basent sur la description de la distribution spatiotemporelle du courant le long du canal de foudre en fonction du courant mesuré à la base du canal, ceci a donné une certaine simplicité analytique. Les modèles les plus populaires dans cette classe sont :

II-1-2- Modèle de Bruce et Golde (BG) :

Le modèle de Bruce et Golde considère que le courant de base $I(0, t)$ circule de bas en haut dans l'arc en retour à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière. Ainsi qu'une valeur nulle du courant au-dessus du front d'onde. Mathématiquement, ces hypothèses peuvent se traduire par l'expression (II.1) [8]

$$\begin{aligned} I(z', t) &= I(0, t) & z' < v. \\ I(z', t) &= 0 & z' > v. \end{aligned} \tag{II.1}$$

z' : altitude le long du canal.

v : vitesse de propagation de l'onde dans l'arc en retour.

t : temps.

CHAPITRE II : MODÉLISATION DES COURANTS DE LA FOUDRE

En effet Bruce et Golde proposent que le courant en tout point du canal soit identique à celui situé à la base du canal à ce même instant (**FigII. 1**). Ceci exigerait une vitesse de propagation des charges infinie.

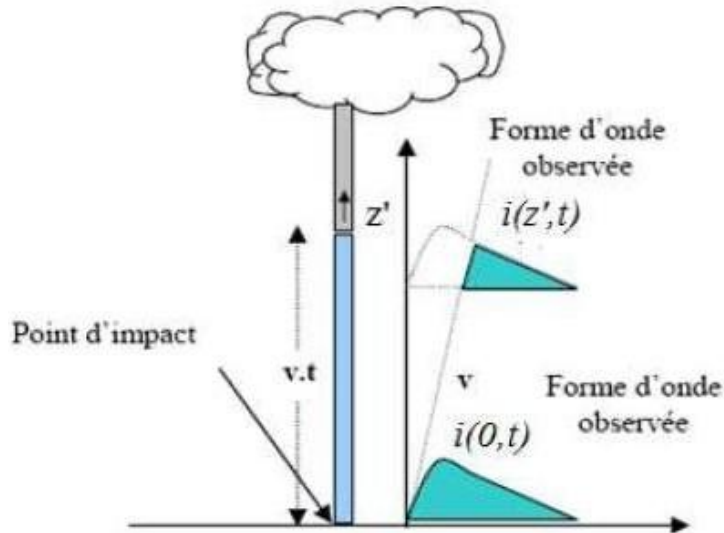


Figure II-1 : Propagation d'arc en retour par le modèle de BG.

II-1-3- Modèle de Ligne de transmission (TL) :

Ce modèle proposé par Uman et McLain, assimile le canal foudre à une ligne de transmission verticale sans pertes. Le courant de foudre se propage donc vers le haut du canal avec une vitesse constante v sans subir de déformation (**Fig II.2**). [9]

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) \quad z' \leq v.t \quad (\text{II.2})$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' > v.t$$

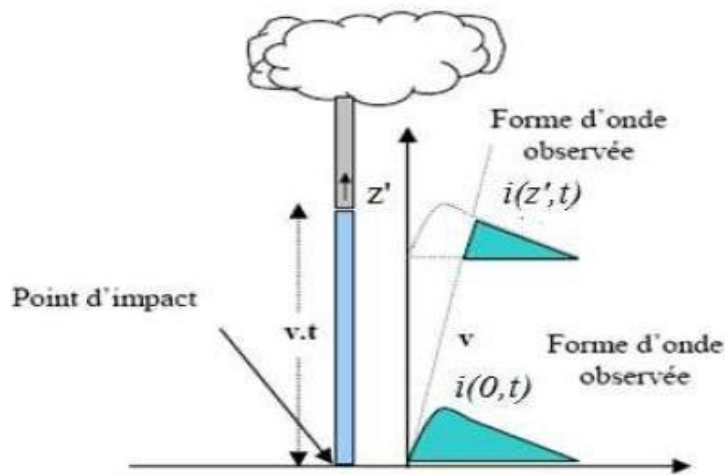


Figure II-2 : Distribution spatio-temporelle selon le modèle de ligne de transmission. [10]

Le modèle TL n'est pas en accord avec les observations expérimentales. En effet, il ne prend pas en compte les distorsions et affaiblissements du courant de foudre le long du canal. De plus, ce modèle ne permet pas l'intégration des variations de la vitesse de propagation le long du canal.

Modèle de ligne de transmission modifiée (MTL) :

Le modèle de ligne de transmission TL a été modifié par Nucci et al. Et par Rakov et Dulzon, tout en introduisant le facteur d'atténuation de l'amplitude du courant avec la hauteur. Les deux modèles sont décrits :

Modèles de lignes de transmission modifiées avec atténuation linéaire (MTLL) :

Dans ce modèle le courant est atténué en fonction de la hauteur :

$$\begin{aligned}
 i(z', t) &= \exp(z' / \lambda) i(0, t - z'/v) & z' \leq v.t \\
 i(z', t) &= 0 & z' > v.t
 \end{aligned}
 \tag{II.3}$$

CHAPITRE II : MODÉLISATION DES COURANTS DE LA Foudre

Le facteur λ est la constante de décroissance introduite pour tenir compte de l'effet de charges stockées dans le leader qui sont neutralisées durant la phase de l'arc en retour. Sa valeur typique est de l'ordre de 1.5 à 2 km.

Modèle de ligne de transmission modifiée avec atténuation exponentielle du courant (MTLE) :

$$i(z', t) = (1 - z'/H) i(0, t - z'/v) \quad z' \leq v.t \quad (\text{II.4}) [11]$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' > v.t$$

H : la longueur total du canal de foudre.

Modèle de la source de courant progressive (Travelling Current Source) (TCS) :

Dans le modèle TCS, une source de courant, se déplace en haut le long d'un canal à une vitesse v , du sol vers le nuage. Le courant injecté par cette source à une hauteur z' est assumé de se propager vers le bas à la vitesse de la lumière c . Dans ces conditions, le courant à la hauteur z' doit être égal au courant au sol avec un retard de z'/c qui peut être exprimé de la façon suivante :

$$i(z', t) = i(0, t + z'/c) \quad z' \leq v.t \quad (\text{II.5})$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' > v.t$$

c : la vitesse de la lumière.

Généralisation : Les modèles ingénieurs :

Rakov a présenté les modèles d'ingénieur décrit précédemment suivant une équation généralisée de la distribution de courant dans le canal :

$$I(z', t) = u(t - z'/vf) P(z') i(0, t - z'/v) \quad (\text{II.6})$$

CHAPITRE II : MODÉLISATION DES COURANTS DE LA Foudre

$$U(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases}$$

U(x) : la fonction de Heaviside égale à l'unité pour $t \geq z/v_f$ et zéro ailleurs.

P(z') : le facteur d'atténuation d'écrit dans les modèles MTLE et MTLL.

V_f : la vitesse du front.

H_{tot} : la hauteur totale du canal de foudre.

C : la vitesse de la lumière.

v : la vitesse de propagation de l'onde du courant.

Le tableau II.1 est le résumé des modèles d'ingénieurs décrits précédemment

Le modèle	P(z')	v
TL	1	v_f
MTLE	$1e^{-z'/\lambda}$	v_f
MTLL	$1-z'/H$	v_f
BG	1	∞
TCS	1	-c

Tableau II-1 : P(z) et v pour les cinq modèles d'ingénieur. [10]

II-2- Détermination du courant de foudre à la base du canal :

Il importe de connaître en premier lieu le courant situé à la base du canal, ainsi que sa vitesse de propagation le long de l'arc en retour. Afin de pouvoir le modéliser facilement, en négligeant la tortuosité du canal, l'arc en retour est assimilé à une antenne verticale, excitée à sa base par un générateur de courant symbolisant le rattachement de l'arc au sol.

II-2-1-Forme analytique du courant de foudre :

Les formes analytiques du courant de foudre, généralement rencontrées au sein de la littérature, se composent de sommes de fonctions exponentielles. Ce type de fonction présente l'intérêt d'avoir une transformée de Fourier pouvant être calculée de manière analytique, ce qui facilite l'analyse dans le domaine fréquentiel.

II-2-2- Modèle bi-exponentiel :

$$i(t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad (\text{II.7})[12]$$

La formule (II.7) est l'expression analytique d'une bi-exponentielle, où I_0 représente la valeur crête du courant, α est l'inverse du temps de descente et β est l'inverse du temps de montée. Cette fonction est la plus utilisée dans la littérature.

I_0 Représentent l'amplitude du courant à la base du canal.

α et β sont des constantes de temps.

Conclusion :

Le but de ce chapitre était de présenter les modèles d'ingénieur utilisés pour la modélisation du courant de la foudre. Cette modélisation se base sur la connaissance de la seule grandeur mesurable qui est **le courant** à la base du canal de la foudre, dans le cas d'un coup de foudre tombant au sol

CHAPITRE 3: PROTECTION CONTRE LA Foudre

Introduction:

Dans ce dernier chapitre on va parler de la protection contre la foudre qui est notre sujet essentiel et le plus important dans notre thème de mémoire.

il ya bcp de méhtodes de protection mais on va citer les les plus utilisés et connus dans le monde

fil de garde

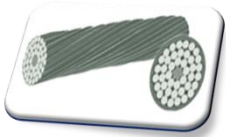
Le câble de garde (ou câble protecteur) est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalent au conducteur de phase d'une ligne. Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à un niveau supérieur à ceux – ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône.



Types câbles de garde

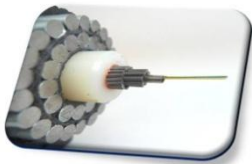
Câbles de garde almélec-acier :

Ils sont analogues aux câbles conducteurs, Certains sont d'ailleurs utilisés comme conducteur sur les ligne HTA



Câbles de garde à circuits de télécommunication incorporés

Ils permettent la transmission d'ordres ou de données entre deux postes haute tension.



✓ Rôle statique :

Le câble de garde contribue à la réduction du potentiel statique des conducteurs de phases d'une ligne placés sous un nuage orageux.

✓ Rôle dynamique :

Protection contre l'impact direct de la foudre.

Amortissement des ondes de surtensions de foudre par abaissement de l'impédance caractéristique des conducteurs de phase.

Blindage contre les surtensions induites par le transport d'énergie électrique en haute tension.

Eclateurs :

CONCLUSION GENERALE

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la 1^{ère} reliée au conducteur à protéger, la 2^{ème} reliée à la terre.

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

<ul style="list-style-type: none">* Avantages* Leur faible prix.* Leur simplicité.* La possibilité de réglage de la tension d'amorçage	<ul style="list-style-type: none">* inconvénients* Les caractéristiques d'amorçage de l'éclateur sont très variables en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité, pression).* Le niveau d'amorçage dépend de la valeur de la surtension.* L'amorçage de l'éclateur provoque un court-circuit phase-terre qui s'appelle (courant de suite), à fréquence industrielle.
--	---

Le paratonnerre

Le paratonnerre est un dispositif destiné à guider le courant de foudre à la terre. situé sur le sommet d'un bâtiment permet de capter la foudre

Le paratonnerre est constitué de trois composantes:

Un dispositif de capture, qui peut prendre plusieurs formes.

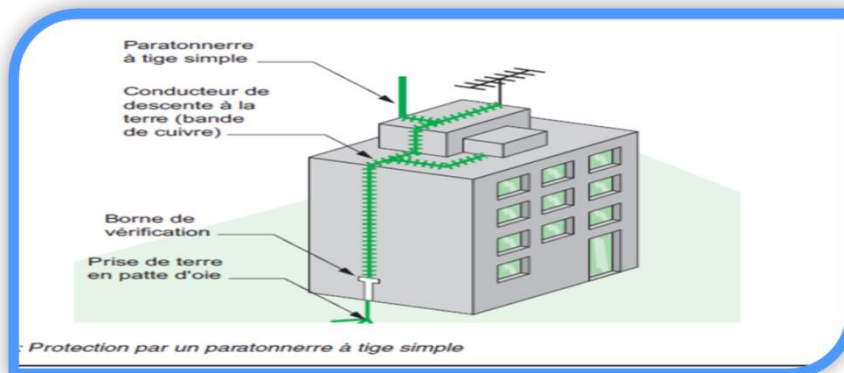
*Une prise de terre, constituée d'un réseau de conducteurs nus et enterrés, qui doit permettre de disperser facilement les courants dans le sol.

*Un conducteur de descente, qui assure la jonction entre le dispositif de capture et la prise de terre.

Les paratonnerres à tige simple

Le paratonnerre à tige est une pointe de capture métallique placée au sommet du bâtiment. Il est mis à la terre par un ou plusieurs conducteurs (souvent des bandes de cuivre

|



Avantages

Economiquement intéressant
*Facilité de mise en oeuvre
*Intégration possible à l'architecture du bâtiment sans altération de l'esthétique

Inconvénients

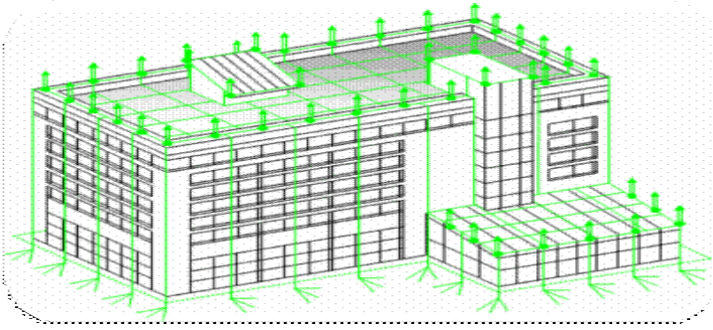
*Limité à la protection de structure de faibles dimensions
*Contrainte de tenue mécanique des mats

Les cages maillées ou cage de Faraday

le système de protection est constitué de plusieurs pointes, couvrant toute la toiture et les arêtes du bâtiment à préserver.

CONCLUSION GENERALE

Les pointes sont reliées entre elles par des filins conducteurs interconnectés, reliés à la terre et formant une cage



Avantages	Inconvénients
- Facilité de mise en œuvre	- Limité à la protection de structure de faibles dimensions.
- Economiquement intéressant	- Contrainte de tenue mécanique des mâts.
- Intégration possible à l'architecture du bâtiment sans altération de l'esthétique	

Le paratonnerre à fil tendu

Ces fils sont tendus au dessus de la structure à protéger. Ils sont utilisés pour protéger des structures particulières : aires de lancement de fusées, applications militaires et protection des lignes aériennes à haute tension

Avantages	Inconvénients
- Diminution des effets de rayonnement électromagnétique à l'intérieur de la structure protégée. Répartition des courants entre plusieurs descentes.	- Les fils tendus peuvent être des obstacles dangereux dans les zones de manutention avec utilisation d'appareil de levage.
- Contribue à l'équipotentialité globale des masses et terres.	- Mise en œuvre difficile et coûteuse.
- Protection des zones ouvertes	- Souvent inesthétique de par la complexité de sa structure

Le parafoudre

Les parafoudres sont des appareils de protection situés de part et d'autre des transformateurs de puissance. Leur partie supérieure est raccordée à un des conducteurs d'une ligne tandis

CONCLUSION GENERALE

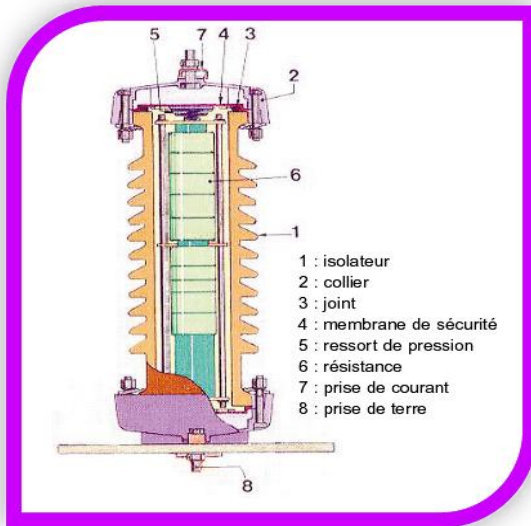
que leur partie inférieure est reliée à la terre.

Leur avantage est de ne pas présenter de courant de suite et d'éviter que le réseau soit mis en court-circuit.

On trouve généralement deux types de parafoudres

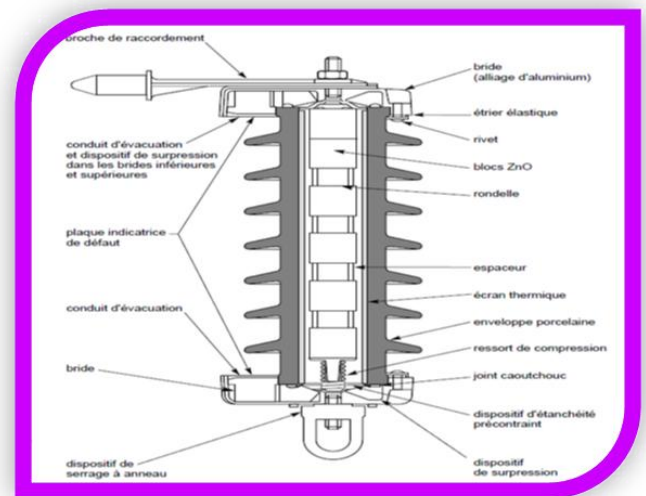
Les parafoudres SiC (au carbure de Silicium)

Ces parafoudres sont constitués d'une ou plusieurs varistances SiC associées en série avec un ou plusieurs éclateurs.



Les parafoudre ZnO (à oxyde de Zinc)

Ce type de parafoudres présente l'avantage d'être équipés de varistances à coefficient de non-linéarité si important que l'on peut en faire ces parafoudres sans éclateurs.



Les parafoudres HT



Les parafoudres MT



Les parafoudres BT



Multi prise Parafoudres



Parafoudres en boîtier prise



Conclusion:

en terminant ce chapitre ,on peut dire qu'on a parlé des différentes méthodes de protection contre la foudre et on a basés sur les plus efficaces telles que le paratonnerre ,fil de garde et la parafoudre malgré leur inconvénients mais cee sont les solutions qui marchent le plus face à la foudre

CONCLUSION :

Dans ce présent travail ,on a présenté ce phénomène ainsi que sa génération et son déroulement. on a cité aussi, les différents dégâts causés par la foudre et les dispositifs de protection conçus contre celle-ci.

Pour éviter les dégâts causés par ce phénomène naturel on a utilisé les paratonnerres et les parafoudres contre les effets directs et indirects de la foudre.