

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed kheider Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie électrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes en Vu de l'Obtention du Diplôme de Master Thème

**Comparaison des Modèles d'Arc en Retour
d'un Coup de Foudre en Présence d'une Tour**

Proposé et dirigé par :

Dr. M'ZIOU Nassima

Présenté par :

- **ATAOUA Mohamed**
- **MEHAMDIA Oualid**

Promotion Juin 2010

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mohamed Kheider Biskra
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie Electrique

AUTORISATION DE SOUTENANCE

NOMS ET PRENOMS DES ETUDIANTS

ATAOUA Mohamed ET MEHAMDIA Oualid

Thème

**Comparaison des Modèles d'Arc en Retour d'un
Coup de Foudre en Présence d'une Tour**

Proposé et dirigé par : Dr. N. M'ZIOU

Membres du jury :

.....président

.....Encadreur

.....Examineur

..... Examineur

Avis de l'Encadreur :

Le président du jury :

visa du chef du département

REMERCIEMENTS

*AU TERME DE CE TRAVAIL NOS REMERCIEMENTS VONT
PREMIÈREMENT À « DIEU » QUE NOUS A AIDÉ ET POUR LA VOLONTÉ,
LA SANTÉ, QU'IL NOUS A DONNÉ DURANT TOUTES CES ANNÉES
D'ÉTUDE.*

*NOUS TENONS À REMERCIER TRÈS VIVEMENT À NOTRE
ENCADREUR M'ZIOU NASSIMA POUR LE SUIVIT, LE CONSEIL,
LA CONFIANCE ET QUI GRÂCE À LUI NOUS AVONS PU RÉALISER NOS
OBJECTIFS.*

*NOS GRANDS REMERCIENT AUSSI POUR TOUS LES ENSEIGNANTS
DU DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE QUI ONT CONTRIBUÉ
À NOTRE FORMATION.*

*EN FIN NOUS TENONS À EXPRIMER NOTRE RECONNAISSANCE
À TOUS NOS AMIS ET COLLÈGUES POUR LEUR SOUTIEN ET LEUR
COMPRÉHENSION.*



Résumé du Mémoire de Fn d'Etude

En vue de préparation du diplôme de Master

Option : Réseaux Electriques

Thème

Comparaison des Modèles d'Arc en Retour d'un Coup de Foudre en Présence d'une Tour

Proposé et dirigé par : Dr. M'ZIOU Nassima

Résumé

Les perturbations électromagnétiques produites par un coup de foudre constituent un danger permanent pour tout système électrique ou électronique. Dans ce travail nous avons modélisé le courant de l'arc en retour à la présence d'un objet élevé (tour) ainsi une comparaison entre les cinq modèles de l'ingénieur qui sont: BG, TCS, TL, MTLL, MTLE.

Ce travail est composé d'une étude théorique sur le phénomène de la foudre et les différents modèles de l'ingénieur initié du sol afin de modéliser le courant de l'arc en retour à la présence d'une tour et une simulation où le modèle de Rachidi est utilisé.

Le résultat obtenu d'après cette étude est que la présence de la tour influe considérablement sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre. Cette influence apparait dans la distorsion du courant qui est expliqué par la réflexion du courant au deux extrémités de la tour ainsi que le courant se divise au sommet de la tour et circule au même instants avec deux vitesses différentes: la vitesse v dans le canal de foudre et la vitesse de la lumière dans la tour.

Abstract

The electromagnetic disturbances produced by a love at first sight constitute a permanent danger to any electric or electronic system. In this work we modeled the current of the arc-back to the presence of a high object (turn) thus a comparison between the five models of the engineer which are: BG, TCS, TL, MTLL, MTLE.

This work is made up d' a theoretical study on the phenomenon of the lightning and the various models of the engineer initiated of ground in order to model the current of the arc-back to the presence of a tower and a simulation where the model of Rachidi is used.

The result obtained d' after this study is that the presence of the tower influences considerably the distribution of the current along the tower and the channel of the lightning. This influence appears in the distortion of the current which is explained by the reflexion of the current at the two ends of the tower as well as the current currency at the top of turn and circulates at same the moments with two different speeds: the speed v in the channel of the lightning and speed of light in the tower.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage répartition du champ électriques au sol au moment au va éclater la foudre.	5
Figure I.2 Les différents types de décharge.	6
Figure I.3 Descendant négatif.	6
Figure I.4 Descendant positif.	7
Figure I.5 Ascendant négatif.	7
Figure I.6 Ascendant positif.	7
Figure I.7 Développement du traceur par bonds.	8
Figure I.8 Développement de l'arc en retour.	9
Figure I.9 Chute de la foudre sur un conducteur de phase.	9
Figure I.10 Chute de la foudre sur un câble de garde.	10
Figure I.11 Onde normalisée de foudre type 8/20 μ s.	12
Figure I.12 Champ électrique vertical correspondant au premier arc en retour (trait continu) et à l'arc en retour subséquent (trait pointillé) à des distances variant de 1 Km à 200 km.	14
Figure II.1 Distribution spatio-temporelle selon le modèle de BG.	22
Figure II.2 Distribution spatio-temporelle selon le modèle de ligne de transmission.	23
Figure II.3 Courant à la base du canal de foudre (normalisé), correspondant au premier arc en retour et à l'arc en retour subséquent, calculés à l'aide du modèle bi-exponentiel.	28
Figure II.4 Courant à la base du canal d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (modèle d'Heidler et modèle bi-exponentiel).	30
Figure II.5 Représentation du canal de foudre.	31
Figure II.6 Le canal de foudre et son image.	32
Figure III.1 Exemple d'un déclenchement artificiel de la foudre en Floride.	36
Figure III.2 Lanceurs et fusées utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre (a) lanceur fixe, (b) lanceur mobile et (c) fusées.	36
Figure III.3 Exemple de mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée Tour CN à Toronto au Canada.	37

Figure III.4 Classification des coups de foudre selon Berger et al.	38
Figure III.5 Forme moyenne normalisée du courant des arcs en retour premier et subséquent (a) premier arc en retour, (b) arc en retour subséquent.	38
Figure III.6 Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d'Ostankino, Moscow.	41
Figure III.7 Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m.	42
Figure III.8 (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour.	43
Figure III.9 Propagation du courant le long du canal de foudre et le long de la tour.	45
Figure IV.1 Courant non contaminé.	50
Figure IV.2 Organigramme de notre programme pour la présentation du courant au sommet et à la base de la tour.	51
Figure IV.3 Courant au sommet de la tour.	53
Figure IV.4 Courant à la base de la tour.	53
Figure IV.5 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de BG.	54
Figure IV.6 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de MTLE.	55
Figure IV.7 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de MTLL.	56
Figure IV.8 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de TCS.	57
Figure IV.9 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de TL.	58
Figure IV.10 Influence de la hauteur du canal sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1 \mu s$.	59
Figure IV.11 Influence de la hauteur de la tour sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1 \mu s$.	60
Figure IV.12 Influence de la vitesse du courant sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1 \mu s$.	61
Figure VI.13 Influence du facteur λ sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1$.	62

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1	P (z) et v pour les cinq modèles d'ingénieur.	26
Tableau II.2	Paramètres des fonctions exponentielles.	27
Tableau II.3	Paramètres des fonctions exponentielles.	29
Tableau III.1	Paramètres du courant d'un coup de foudre descendant négatif.	39
Tableau III.2	Caractérisation du courant de l'arc en retour.	40
Tableau IV.1	Paramètres du courant non contaminé.	49

LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

Symboles	Acronymes
U	La tension d'amorçage
R'	Résistance de terre
L	L'inductance propre
i	Le courant de foudre
v	La vitesse de l'arc en retour
Z'	Un point du canal de foudre
t	Le temps
λ	Le facteur de décroissance
H	La longueur totale du canal de foudre
c	La vitesse de la lumière
P (z')	Est le facteur d'atténuation d'écrit dans les modèles MTLE et MTL.
v_f	La vitesse du front
H _{tot}	La hauteur totale du canal de foudre
v	La vitesse de propagation de l'onde du courant
I ₀	L'amplitude du courant à la base du canal
I ₀₁	L'amplitude du courant à la base du canal
I ₀₂	L'amplitude du courant à la base du canal
α	Constante de temps
β	Constante de temps
γ	Constante de temps
δ	Constante de temps
τ_1	Constante du temps du front du courant
τ_2	Constante du temps de décroissance du courant
η	Facteur de correction de l'amplitude
n	Est un exposant variable entre 2 et 10
E _z	Le champ électrique vertical
E _r	Le champ électrique radial
H ϕ	Le champ magnétique azimutal

ϵ_0	La permittivité diélectrique du vide
μ_0	La perméabilité magnétique du vide
R	La distance du dipôle au point d'observation
r	La distance horizontale entre le canal de foudre et le point d'observation
P	Le point d'observation
σ_s	La conductivité du sol

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I

Généralité sur la foudre

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Mécanisme de la formation de l'orage.....	4
I.4 L'éclair et le déclenchement du foudre	5
I.5 Catégories des coups de foudre	6
I.5.1 Coup de foudre descendant négatif	6
I.5.2 Coup de foudre descendant positif	7
I.5.3 Coup de foudre ascendant (négatif et positif).....	7
I.6 Le traceur	8
I.7 L'arc en retour	8
I.8 Type de coups de foudre.....	9
I.8.1 Coups de foudre direct (sur conducteurs de phase)	9
I.8.2 Coups de foudre indirect (sur conducteurs de garde ou pylônes).....	10
I.9 Propagation d'onde.....	11
I.10 Onde de foudre.....	11
I.11 Les paramètres électriques de la foudre	12
I.12 Déclenchement artificiel de la foudre	13
I.13 Le champ électromagnétique généré par la foudre.....	13
I.14 Les effets thermiques.....	15
I.14.1 Les effets électromagnétiques.....	15
I.14.2 Les effets acoustiques.....	15
I.14.3 Les effets sur l'être vivants.....	16
I.14.4 Les effets sur les structures	17
I.14.5 Les effets sur l'homme et l'être vivants.....	17
I.14.6 Les effets sur les structures.....	17
I.15 Conclusion	18

SOMMAIRE

CHAPITRE II

Modèles de l'ingénieur

I.1 Introduction	19
II.2 Modélisation de la distribution du courant de l'arc en retour dans le canal de foudre	19
II.2.1 Classification des modèles de l'arc en retour.....	19
II.2.2 Modèles d'ingénieurs.....	21
II.2.2.1 Modèle de Bruce et Golde (BG).....	21
II.2.2.2 Modèle de ligne de transmission (Transmission Line, TL).....	22
II.2.2.3 Modèle de ligne de transmission modifiée (MTL).....	23
II.2.1.4 Modèle de la source de courant progressive (Travelling Curent	24
Source, (TCS).....	
II.3 Généralisation des modèles d'ingénieur.....	25
II.4 Représentation analytique du courant d'arc en retour à la base du canal.....	26
II.4.1 Modèle bi-exponentiel.....	26
II.4.2 Modèle de Heidler.....	28
II.5 Géométrie du problème.....	30
II.6 Formulation du champ électromagnétique rayonné par la foudre.....	31
II.6.1 Cas d'un sol parfaitement conducteur.....	31
II.7 Conclusion.....	34

CHAPITRE III

Modélisation du courant d'arc en retour à la présence d'une tour

III.1 Introduction	35
III.2 Caractéristiques du courant de l'arc en retour.....	35
III.2.1 Données obtenues en utilisant de petites tours (moins de 100 m).....	37
III.2.2 Données obtenues en utilisant le déclenchement artificiel de la foudre.....	40
III.2.3 Données obtenues en utilisant des tours élevées (plus de 100 m).....	41
III.2.3.1 tour d'Ostankino à Moscow	41
III.2.3.2 la tour CN à Toronto au Canada.....	42
III.2.3.3 La tour Peissenberg en Allemagne.....	42
	43

SOMMAIRE

III.3 Estimation indirect des courants à partir des systèmes de détection de la foudre.....	
III.4 Vitesse de l'arc en retour.....	44
III.5 Distribution de courant du courant dans la tour et dans le canal de la foudre.....	44
III.5.1 Modèle de Rachidi et al.....	45
III.5.2 Modèle de Baba et Rakov.....	47
III.6 Conclusion	48

CHAPITRE IV

Validation et résultats obtenus

IV.1 Introduction.....	49
IV.2 Comparaison des différents modèles de distribution du courant de l'arc en retour en présence d'une tour.....	49
IV.2.1 Courant non contaminé.....	49
IV.2.2. Courant au sommet et à la base de la tour.....	50
IV.2.3 Distribution spatiotemporelle du courant le long de la tour et le long du canal de la foudre en fonction des modèles d'ingénieur.....	54
IV.2.4. Influence de la hauteur du canal de foudre.....	59
IV.2.5 Influence de la hauteur de la tour.....	60
IV.2.6 Influence des paramètres du courant d'arc en retour.....	61
IV.5 Conclusion.....	62

CONCLUSION GENERALE	63
---------------------------	----

♦ BIBLIOGRAPHIE.....	64
----------------------	----

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Toutes installations électriques, lignes de transmission aérienne ou appareillages sont soumis aux phénomènes perturbateurs naturels. Parmi ces phénomènes on précise la foudre. Cette dernière influe directement sur les réseaux électriques par l'impact direct sur les lignes ou indirectement par un rayonnement électromagnétiques.

Ce travail est consacré à la modélisation du courant de l'arc en retour engendré par un coup de foudre à la présence d'une tour.

Nous avons basé dans cette étude sur la comparaison entre les différents modèles de l'ingénieur pour la modélisation du courant de l'arc en retour à la présence d'un objet élevé (tour), d'où nous allons conclure le quel parmi ces modèles qui s'approche à la réalité.

L'interaction de la foudre avec des objets élevés a récemment attiré une attention considérable de beaucoup de chercheurs, principalement parce que les données du courant de foudre sont souvent rassemblées au moyen d'instruments installés sur des tours.

Des études basées sur l'observation de la foudre ont montré que la présence de la structure foudroyée, ou celle utilisée pour la déclenchée, « contamine » la mesure du courant de la foudre. Cette « contamination », qui dépend de la géométrie de la structure elle-même, affecte aussi les champs EM associés.

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 et le champ électromagnétique. La présence de la tour dans tels modèles a été considérée en la supposant comme une ligne de transmission uniforme et sans pertes.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres. Il est présenté comme suit :

Dans le chapitre I nous présentons des généralités sur la foudre, la formation des orages et les catégories des coups de foudre ainsi que ses effets.

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

Pour tenir compte de la présence de la tour, les modèles d'ingénieurs connus sont modifiés et présentés dans le chapitre III. Dans ce dernier nous présentons aussi les données du courant d'arc en retour de chaque tour.

Le dernier chapitre est réservé pour la présentation des résultats de la modélisation du courant d'arc en retour en présence de la tour. Dans cette modélisation le modèle de Rachidi et al. est utilisé afin de comparer les différents modèles du courant.



Chapitre I



Généralité sur la foudre

I.1 Introduction

Ce premier chapitre a pour but la connaissance de l'origine de la décharge naturelle, d'où en tenant compte leurs causes et conséquences.

La foudre constitue une source de perturbation majeure pour le bon fonctionnement des réseaux. En effet, on distingue deux types d'agressions de la décharge orageuse, selon que l'éclair touche directement l'ouvrage où tombe à proximité.

I.2 Historique

Depuis longue temps de l'humanité, l'homme a été terrorisé et fasciné par la foudre et le tonnerre. Pour expliquer ces phénomènes et pour conjurer le danger, il faisait appel à des divinités. La foudre était associée à la colère des dieux et à la notion de châtement pour les fautes ou les péchés [1].

On retrouve ces représentations primitives chez tous les peuples et dans toutes les religions de la terre, y compris chez les chrétiens du Moyen Age [1].

Ce n'est qu'au 17^{ème} siècle que l'homme commence à se dégager de ces superstitions, et c'est du 18^{ème} siècle que l'on peut dater les débuts de la connaissance proprement scientifique de la foudre. Celle-ci coïncide avec la formidable épopée des travaux de Franklin, Nollet, Dalibard et d'autres savants, au cours de laquelle la nature électrique de la foudre fut identifiée, grâce notamment aux expériences du cerf-volant et de la tige de Marly [1].

Le 19^{ème} siècle fut principalement consacré à la collecte d'observations visuelles et statistiques de foudroiements, faute d'une instrumentation adéquate pour pouvoir véritablement progresser [1].

Au cours du premier tiers du 20^{ème} siècle cependant, disons jusqu'en 1930, divers dispositifs de mesure et d'observation photographique avaient déjà permis de défricher un peu la phénoménologie de l'électricité atmosphérique, et de rassembler quelques données numériques [1].

Depuis le milieu du 20^{ème} siècle à aujourd'hui, le développement des réseaux de transport et de distribution d'énergie, de l'informatique et de l'électronique motive sérieusement la recherche en matière de protection contre la foudre et donc sur le phénomène lui-même [1].

I.3 Mécanisme de la formation de l'orage

La foudre est définie comme une décharge électrique d'une longueur de plusieurs kilomètres associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La source la plus commune de la foudre est la séparation des charges dans les nuages d'orage, les cumulo-nimbus [2].

Les orages les plus fréquents font suite à des fronts froids. À l'arrivée d'un de ceux-ci, la masse d'air froid s'infiltré sous l'air chaud et le soulève; ceci engendre des turbulences dans l'air chaud rejeté en altitude: ainsi se forment les nuages d'orage ou les cumulo-nimbus [2].

L'électrisation de ces nuages résulte d'un processus complexe. La distribution des charges dans un nuage d'orage est présentée dans la figure ci-dessous. La partie supérieure, constituée de glace, est chargée positivement (région P), tandis que la partie inférieure constituée de gouttelettes d'eau est chargée négativement (région N). Souvent, un îlot de charges positives (région p) est enserré dans cette masse de charges négatives. À l'approche d'un nuage orageux, le champ électrique atmosphérique au sol qui est de l'ordre d'une centaine de volts par mètre par beau temps commence par s'inverser, puis croît dans de fortes proportions. Lorsqu'il atteint 10 à 20 kV/m, une décharge au sol est imminente [2].

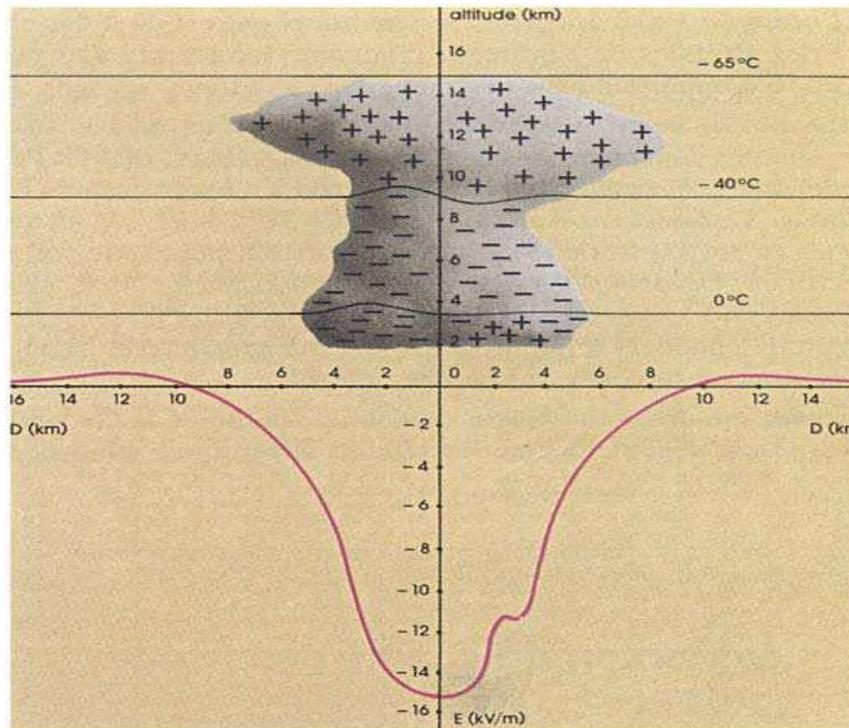


Figure I.1 La distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage répartition du champ électriques au sol au moment au va éclater la foudre [2].

I.4 L'éclair et le déclenchement du foudre

L'éclair est un phénomène résulte lorsqu'il y a une décharge produite à l'intérieur du même nuage, ou entre deux nuages orageux (intra-nuage ou inter-nuage) figure I.2. (a) et (b).

La décharge qui frappe le sol est appelé foudre ou coup de foudre la figure I.1. (c) illustre le phénomène. Précisons que 90% des décharges se produisent à l'intérieur des nuages (éclaires). on trouve seulement 10% des décharges qui frappent le sol, ce sont les coupes de foudre.

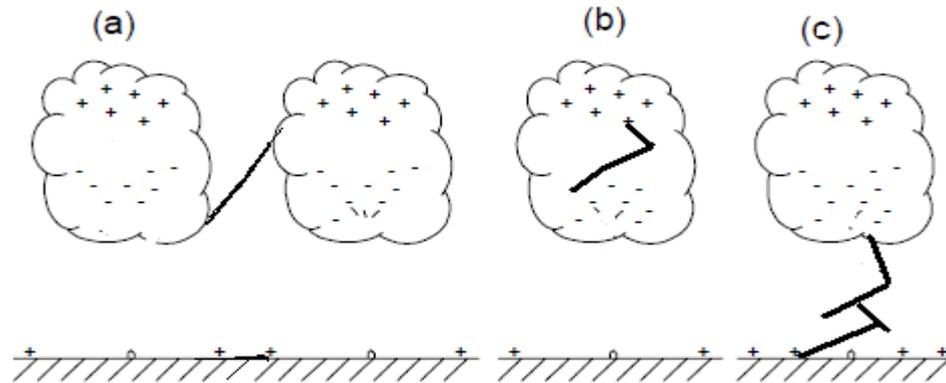


Figure I.2 Les différents types de décharge [2].

I.5 Catégories de coups de foudre

Les décharges de foudre nuage-sol ont été subdivisées en quatre catégories. Ces catégories sont définies selon d'une part la direction, ascendante ou descendante, du traceur (leader en anglais) qui déclenche la décharge, et d'autre part le signe de la charge portée par le traceur, positive ou négative [2].

I.5.1 Coup de foudre descendant négatif

Dans les régions tempérées, plus de 90% des coups de foudre nuage sol sont de cette catégorie. Ce type de décharges appelées décharges négatives, Cette forme de décharge est déclenchée par un traceur descendant chargé négativement. Le traceur ici progresse en direction du sol par bonds successifs d'environ 10 mètres. La figure ci-dessous illustre cette catégorie [2].

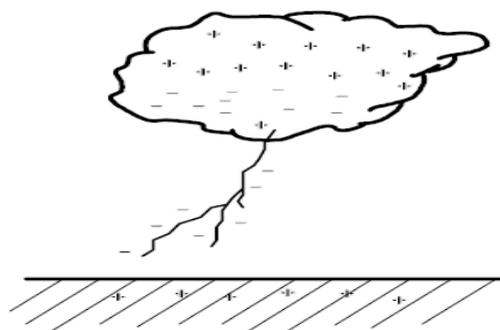


Figure I.3 Descendant négatif [2].

I.5.2 Coup de foudre descendant positif

Les coups de foudre appartenant à cette catégorie sont aussi déclenchés par un traceur descendant, mais chargé positivement (décharge dite positive). Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol la figure suivante montre le phénomène [2].

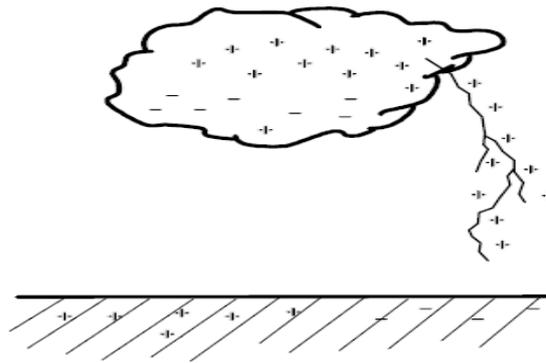


Figure I.4 Descendant positif [2].

I.5.3 Coup de foudre ascendant (négatif et positif)

Les décharges des catégories (Ascendant négatif ou positif) figure(I.5) et (I.6) qui sont déclenchées par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement aux sommets des montagnes ou des longues structures [3].

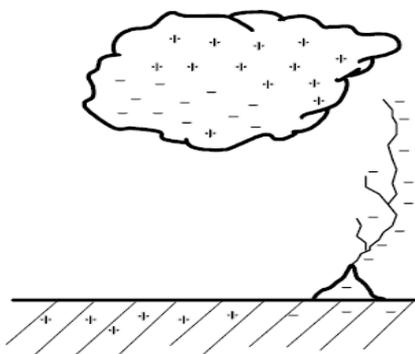


Figure I.5 Ascendant négatif [2].

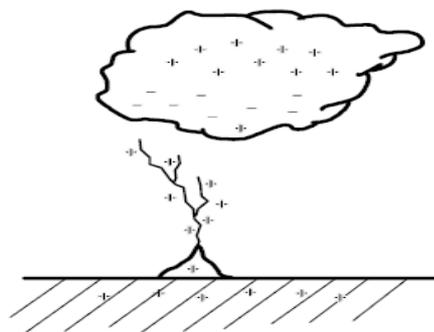


Figure I.6 Ascendant positif [2].

I.6 Le traceur

Le canal ionisé formé établi ainsi entre les deux pôles un pont suffisamment conducteur pour permettre à la foudre de se propager. On dit un traceur car il trace le chemin de l'éclair, en formant une ramification dans le ciel visible par l'œil nu, en progressant par bonds. la figure ci-dessous présente les différents étapes du développement d'un traceur par bonds [3].

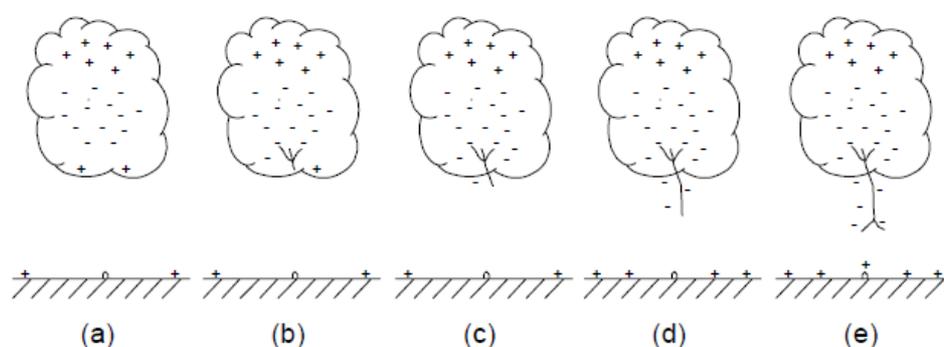


Figure I.7 Développement du traceur par bonds [2].

I.7 L'arc en retour

Dès que la pointe du traceur s'approche du sol, les pré-décharges ascendantes se forment et rejoignent le traceur ascendant situé à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol (60 mètre en moyenne), dès que le traceur par bonds négatif rencontre les pré-décharges positives du sol, une connexion se produit entre elle. Les pré-décharges qui neutralisent à ce moment le traceur par bonds en remontant le canal ionisé est appelé « arc en retour » [3].

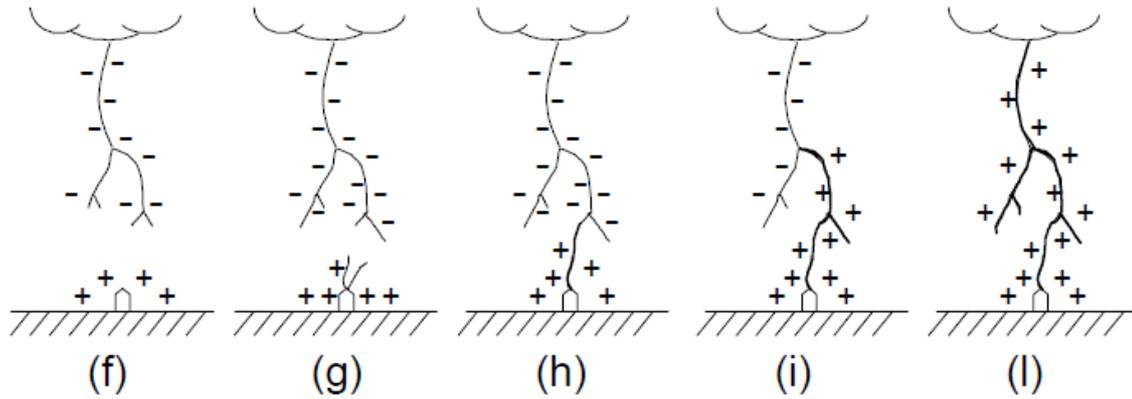


Figure I.8 Développement de l'arc en retour [2].

I.8 Type de coup de foudre

I.8.1 Coups de foudre direct (sur conducteurs de phase)

On dit un coup de foudre direct lorsque la foudre tombe directement sur un conducteur de phase d'une ligne électrique, la figure suivante illustre le phénomène [4].

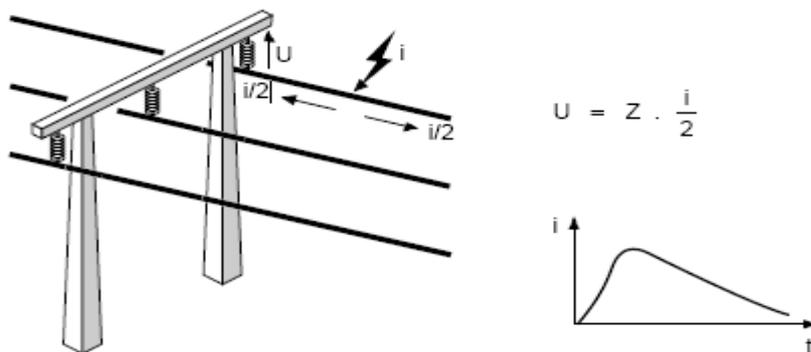


Figure I.9 Chute de la foudre sur un conducteur de phase [4].

I.8.2 Coups de foudre indirect (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 [3].

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.1})$$

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 [4].

En très haute tension l'amorçage en retour est peu probable (niveau d'amorçage des isolateurs), c'est pourquoi l'installation de câbles de garde est intéressante (interruptions de service limitées). Mais en dessous de 90 kV l'amorçage en retour se produit même pour de faibles valeurs de la résistance de terre ($< 15 \Omega$), d'où un intérêt limité (Interruptions de service plus fréquentes) [4].

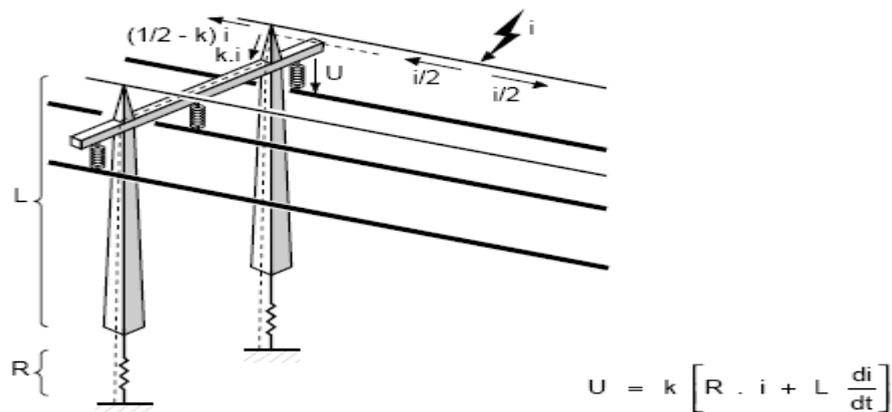


Figure I.10 Chute de la foudre sur un câble de garde [4].

I.9 Propagation d'onde

La propagation de l'onde de foudre est un concept auquel l'électrotechnicien a peu à faire dans ses travaux quotidiens.

Qu'en est-il en réalité ?

Toute modification de l'état électrique d'un conducteur en l'un de ses points se propage à grande vitesse, de 150 000 à 300 000 km/s selon le diélectrique entourant le conducteur, soit à la fréquence industrielle de 50 Hz une distance parcourue de 3 000 à 6 000 km en une période.

Dans le domaine industriel, cette distance est, sauf cas particulier, sans commune mesure avec la longueur des conducteurs concernés. Il est alors légitime de simplifier en considérant que la transmission d'onde est instantanée en tout point de l'installation.

Dans le cas de la foudre, il s'agit de phénomènes à «haute fréquence» : de quelques dizaines de kHz à plusieurs MHz, à comparer avec la «basse fréquence» industrielle de 50 Hz ou 60 Hz [4].

I.10 Onde de foudre

Le spectre de l'onde de foudre est beaucoup plus large (fréquences très élevées), que celui de l'onde de manœuvre. Un coup de foudre comporte plusieurs décharges (4 en moyenne) et chaque décharge est précédée par des milliers de précurseurs ou traceurs, créant des milliers de surtensions, chacune pouvant être décomposée en série de Fourier pour former le spectre. La configuration du réseau produit des effets encore plus aléatoires sur ces milliers d'ondes générées par la foudre. En laboratoire, on se borne à simuler la foudre par des ondes biexponentielles, mais cela ne correspond pas à la réalité du spectre observé sur un site donné et résultant d'une multitude de couplages [5].

Exemple d'une onde de laboratoire dite 8/20

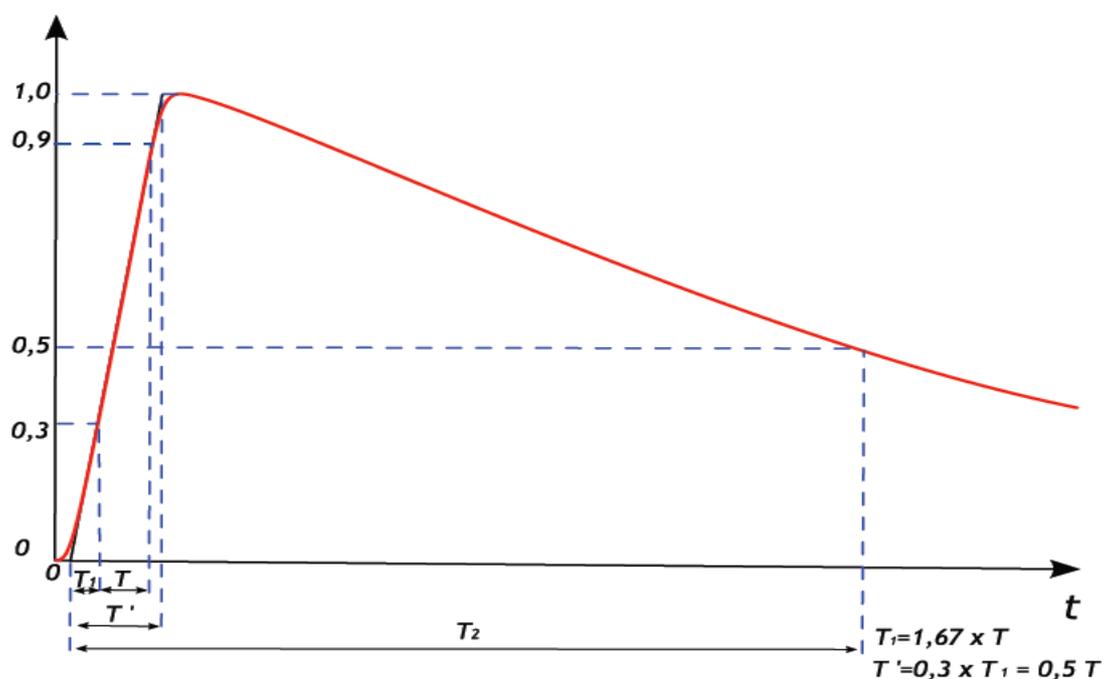


Figure I.11 Onde normalisée de foudre type 8/20 μs [5]

I.11 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 [3] :

- 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.12 Le champ électromagnétique génère par la foudre

Les coups de foudre perturbent le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique ou de télécommunication, ainsi que les circuits auxiliaires des sous stations. On distingue deux types d'effets de la foudre, selon que l'éclair touche directement l'ouvrage ou tombe à proximité. Dans le premier cas, on parle de coup de foudre direct et dans le second de coup de foudre indirect [6].

On s'intéresse ici au cas du coup de foudre indirect qui génère un champ électromagnétique perturbateur. Ce champ va induire par couplage une tension sur les lignes du réseau de distribution d'énergie et sur les lignes de transmission du système de contrôle commande. L'estimation des effets indirects des coups de foudre est nécessaire pour déterminer une coordination correcte des protections [6].

I.13 Caractérisation du champ électromagnétique rayonné par la foudre

Les figures 9 et 10 représentent des formes d'ondes typiques des champs électriques et magnétiques pour le premier arc en retour (en trait continu), et les arcs subséquents (en trait discontinu) en fonction de la distance du point d'impact.

Les champs EM pour des distances entre 1 km et 200 km présentent un premier pic dont l'intensité est approximativement inversement proportionnelle à la distance. A des distances relativement proches, le champ magnétique présente une bosse (hump) à environ 30 μ s, alors que le champ électrique a une croissance en rampe après son pic initial. Les champs électrique et magnétique lointains (distance supérieure à environ 50km du point d'impact) ont essentiellement la même forme d'onde, et présentent une inversion de polarité.

Les deux champs sont essentiellement composés de la composante rayonnée des champs totaux. Ils sont caractérisés par un pic initial suivi par une inversion de polarité à quelques dizaines de microsecondes. Nous observons le temps de montée rapide à toutes les distances. Ce temps est un paramètre extrêmement important dans l'évaluation du couplage [7] du champ EM avec une ligne aérienne de transport d'énergie électrique ou avec un câble souterrain.

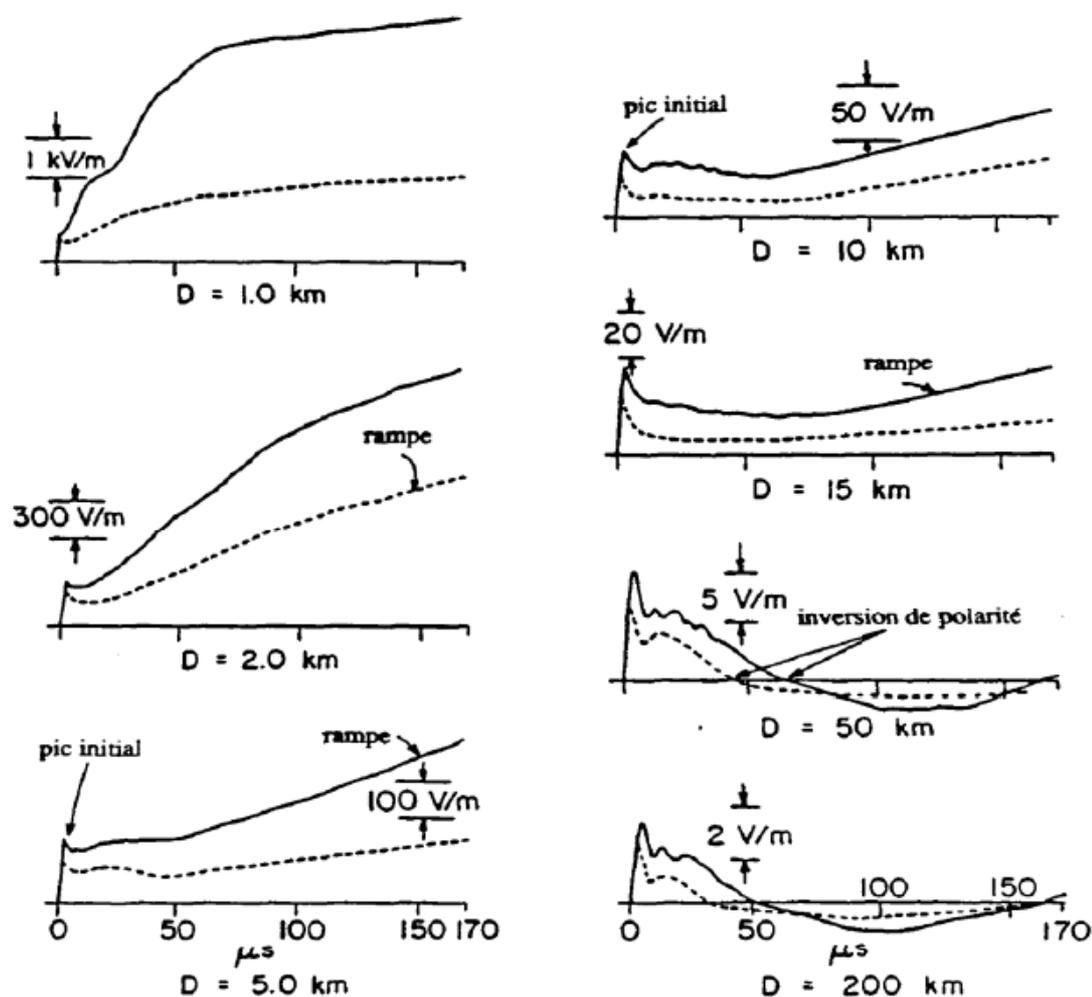


Figure I.12 Champ électrique vertical correspondant au premier arc en retour (trait continu) et à l'arc en retour subséquent (trait pointillé) à des distances variant de 1 Km à 200 km [8].

I. 14 Les effets de la foudre

La foudre est un courant électrique de haute fréquence qui entraîne les mêmes effets que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique notamment. Dans ce paragraphe sont pris en considération les principaux effets, directs et indirects [3].

I.14.1 Les effets électriques

Dans le chemin variés et complexe empruntés par la foudre pour s'écouler dans le sol apparaissent des différences de potentiel importantes sur de faibles distances provoquant des claquages locaux qui endommagent les conducteurs présents dans le sol. Ces tensions présentent un grave danger pour les êtres vivants en surface (tension de pas) [9].

I.14.2 Les effets thermique

La décharge atmosphérique produit la fusion des parties métalliques. Les coups chauds peuvent enflammer du bois sec et provoquer des incendies. On assiste à l'éclatement explosif d'arbres, de mats mauvais conducteurs, de poutres et de murailles là où s'accumule l'humidité (forte densité de courant). Dans des sols mauvais conducteurs (silice) il y a vitrification au passage du courant (formation de fulgurites).

Sur des surfaces métalliques planes, si l'on suppose que la chute de tension anodique U à la racine de l'arc reste constante pendant la durée de la décharge, l'énergie dissipée localement vaut $W = Q U$. Par exemple un coup moyen ($Q=30$ C, $U=20$ V, $W = 600$ J) entraîne la fusion d'environ 60 mm^3 d'acier ce qui correspond à une pénétration de 0.15 à 0.25 mm dans ce métal (0.1 à 0.6 mm dans le cuivre ou l'aluminium) sur un diamètre de 25 mm en supposant qu'aucune chaleur ne soit dissipée dans la masse du métal. Un coup exceptionnel ($Q = 300$ C) perce des d'acier de 2 à 3 mm d'épaisseur.

Les décharges de longue durée entraînent facilement une mise à feu. Il faut prendre garde aux mauvais contacts. L'eau contenue dans le bois ou les maçonneries (en particulier dans les fissures, les jointures, les cavités, la sève des arbres,...) s'évapore une explosion. Il faut prévoir des conducteurs de section suffisante sans qu'elle ne soit excessive (le courant de foudre à haute fréquence circule par effet pelliculaire) [9].

I.14.3 Les effets électromagnétique

Les effets électromagnétique se manifestent par différents processus de couplage sur une structure : le couplage résistif (conduction, résistance de blindage des câbles, ...), le couplage par champ magnétique (boucles d'induction dans l'installation, inductances de liaison,...), le couplage capacitif par champ électrique (antenne tiges isolées du sol,...). Les couplages sont influencés par les mises à la terre, les liaisons d'équipotentialité, les blindages, le cheminement et la disposition des conducteurs métalliques [9].

Lorsqu'un coup de foudre tombe à proximité d'une ligne, le champ électromagnétique intense généré par l'arc en retour induit des surtensions, qui peuvent dans certains cas provoquer un amorçage. Les coups de foudre indirects représentent un danger plus important du fait que ce mécanisme de production de surtensions est bien plus fréquent que celui qui résulte des impacts directs.

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

- le coup de foudre «direct» touchant une ligne,
- et 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) [4].

I.14.4 Les effets acoustiques

Le tonnerre est une onde de choc violente qui génère des pressions importantes à courte distance (des centaines de d'atmosphère dans le plasma du canal de foudre) qui peuvent provoquer des bris de vitres a quelque mètres du point d'impact.

La perception des tonner ne dépasse guère 10 km dans les régions tempérées a grande densité de population ; elle atteint 30 à 40 km dans les régions tropicales naturelles [9].

I.14.5 Les effets sur l'homme et l'être vivants

On peut classer les effets sur l'homme et l'être vivant selon deux classes :

- ceux qui sont directement liés au foudroiement et qui sont de nature thermique, électrique, auditif, oculaire etc. et qui sont très spécifiques à la foudre.
- ceux qui font suite aux conséquences des effets indirects d'un foudroiement ; brulures liées à un incendie, courants électriques a fréquence industrielles de défauts, etc [3].

I.14.6 Les effets sur les structures [3]

Les coups de foudre peuvent engendrer tous les dégâts suivants :

- Incendies, des chutes d'arbre provoquant des accidents.
- Explosions de liquides ou de gaz inflammables.
- Dommages sur les réseaux électriques et téléphoniques.
- Dommage sur les sites industriel : installation portuaires, raffineries de pétrole.
- Dommage sur les sites agricoles : élevages, piscicultures.

I.15 Conclusion

A partir cette étude sur la foudre on peut dire que ce phénomène cause un grand danger pour l'homme, les structures et les installations électriques, d'où le coup de foudre frappe directement la victime ou indirect par les rayons électromagnétiques Dans le chapitre suivant nous allons présenter les modèles de l'ingénieur afin de modéliser le courant de l'arc en retour.



Chapitre II



Modèles de l'ingénieur

II.1 Introduction

La connaissance et la caractérisation du champ électromagnétique (EM) rayonné par un coup de foudre permettant une meilleure protection des systèmes électriques et électroniques contre les perturbations engendrées par la foudre. Les variations les plus brutales et de grandes amplitudes du champ émis ont lieu lors de la phase de l'arc en retour. Plusieurs modèles de l'arc en retour, avec différents degrés de complexité, ont été développés par plusieurs chercheurs afin de permettre l'évaluation de son rayonnement électromagnétique.

Nous avons abordé ce chapitre par la modélisation du courant d'arc en retour, d'où on considère le canal de foudre est verticale sur le sol. A partir de cette étude nous étudierons aussi les différents modèles de l'arc en retour.

II.2 Modélisation de la distribution du courant de l'arc en retour dans le canal de foudre

II.2.1 Classification des modèles de l'arc en retour

Durant les dernières décennies, plusieurs modèles de l'arc en retour avec différents degrés de complexité ont été développés. Ces modèles ont fait l'objet de plusieurs revues ces dernières années (voir par exemple : (1997), (1998), (2000), (2002), (2003), (2004), (2005), (2005)). Ainsi, les modèles de l'arc en retour sont classés en quatre catégories[10] :

- (1) modèles physiques,
- (2) modèles électromagnétiques,
- (3) modèles RLC et
- (4) modèles d'ingénieur.

Nous pouvons décrire ces modèles comme suit :

1. La première catégorie définit la classe des modèles à gaz dynamique ou modèles "physiques", considère principalement l'évolution radiale d'une décharge électrique dans un plasma [11].

2. Dans les modèles électromagnétiques, la théorie des Antennes est adoptée pour simuler le canal de foudre. La distribution spatio-temporelle du courant le long du canal est obtenue par le biais de la résolution numérique des équations de Maxwell. Le calcul du champ électromagnétique s'effectue, en général, par l'utilisation de la méthode des moments [7], [12].
3. Les modèles de la troisième catégorie sont connus sous le nom « modèles RLC » ou « modèles des lignes de transmission ». La décharge de foudre est représentée comme un processus transitoire sur une ligne de transmission caractérisée par une résistance, une inductance et une capacité, tous par unité de longueur. Ce type de modèles est utilisé pour déterminer le courant de foudre en fonction du temps et de la hauteur et par la suite le calcul du champ électromagnétique rayonné [13], [14].
4. 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 [15], [16] et [17].

Dans ce travail, nous utilisons les modèles d'ingénieur pour deux raisons essentielles :

- La première liée au faible nombre de paramètres ajustables caractérisant ces modèles.
- La deuxième raison est liée au fait que la distribution spatio-temporelle du courant le long du canal de foudre est reliée au courant à la base du canal par une expression simple.

L'avantage de l'utilisation de ces modèles est qu'on dispose de données expérimentales notamment celle du courant mesuré à la base du canal de foudre.

II.2.2 Modèles d'ingénieurs

Les modèles d'ingénieurs se basent sur la description de la distribution spatio-temporelle 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 [18] :

II.2.2.1 Modèle de Bruce et Golde (BG)

Il s'agit de l'un des premiers modèles dans le genre et probablement le plus simple [18]. Il a été développé par Bruce et Golde en 1945. Selon ce modèle, le courant $i(z', t)$, à des hauteurs inférieures au front de l'arc en retour, est égalé au courant à la base du canal, à des hauteurs supérieures au front de l'arc en retour, le courant est nul. Mathématiquement, il est décrit comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{ll} i(z', t) = i(0, t) & z' \leq v.t \\ i(z', t) = 0 & z' > v.t \end{array} \right. \quad (\text{II.1})$$

Où :

v : la vitesse de l'arc en retour.

Z' : un point du canal de foudre.

t : le temps.

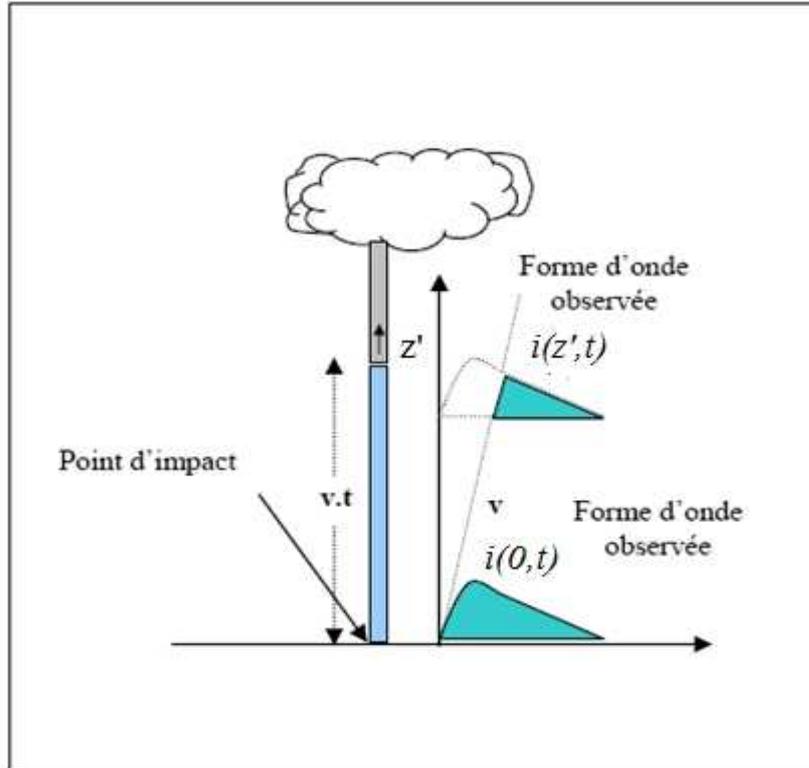


Figure. II.1 Distribution spatio-temporelle selon le modèle de BG[18].

On note que ce modèle stipule que le courant se propage le long du canal modélisé comme une antenne verticale de très faible section sans atténuation et sans introduire la notion du retard.

II.2.2.2 Modèle de ligne de transmission (Transmission Line, TL)

Le modèle assimile le canal de foudre à une ligne de transmission sans pertes ou une impulsion de courant se propage à partir du sol à la vitesse de l'arc en retour. En introduisant l'effet du retard ce modèle fut présenté par Uman et Melain en 1969, il est largement utilisé [18]. La distribution du courant est définie par les relations suivantes :

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

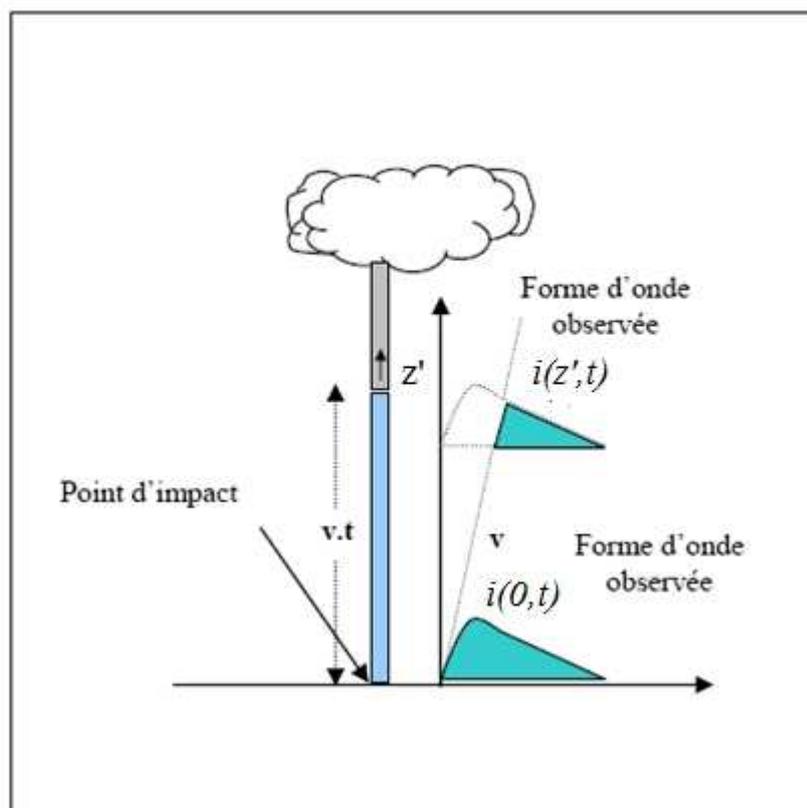


Figure. II.2 Distribution spatio-temporelle selon le modèle de ligne de transmission [18].

II.2.2.3 Modèle de ligne de transmission modifiée (MTL)

Le modèle de ligne de transmission TL a été modifié par Nucci et al. [15] et par Rakov et Dulzon, [19], tout en introduisant le facteur d'atténuation de l'amplitude du courant avec la hauteur. Les deux modèles sont décrits comme suit :

a- modèle de ligne de transmission modifié avec une atténuation exponentielle
"Modified Transmission Line with Exponential decay" (MTLE [15])

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

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.

b- modèle de ligne de transmission modifié avec une décroissance linéaire
"Modified Transmission Line with Linear decay" (MTLL)

Dans le modèle MTLL proposé par Rakov et Dulzon [19], l'amplitude du courant décroît linéairement lors de sa propagation dans le canal il est décrit par :

$$\begin{cases} i(z', t) = (1 - z'/H) i(0, t - z'/v) & z' \leq v.t \\ i(z', t) = 0 & z' > v.t \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Où :

H : la longueur total du canal de foudre.

II.2.1.4 Modèle de la source de courant progressive (Travelling Current Source, (TCS) [19,20])

Selon ce modèle, proposé par Heidler en 1985, les charges du traceur sont instantanément neutralisées à l'arrivée du front de l'arc en retour.

Une source de courant est associée au front de l'arc-en-retour et parcourt le canal à la vitesse v de celui-ci. Le courant résultant se propage jusqu'au sol à la vitesse de la lumière.

Le courant injecté par la source mobile à une hauteur « z' » atteint la base du canal avec un retard de z'/c :

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

c : la vitesse de la lumière.

Les résultats obtenus grâce à ce modèle semblent en très bon accord avec les enregistrements, notamment en ce qui concerne le premier pic du champ rayonné à faible distance et ce qui concerne l'inversion de la polarité du champ lointain.

II.3 Généralisation des modèles d'ingénieur

Rakov dans [14] a présenté les modèles d'ingénieur décrit précédemment suivant une équation généralisée de la distribution de courant dans le canal, elle est définie comme suit :

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

Où :

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

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

$P(z')$: le facteur d'atténuation décrit dans les modèles MTLE et MTL.

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

Tableau II.1 $P(z)$ et v pour les cinq modèles d'ingénieur [18].

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

II.4 Représentation analytique du courant d'arc en retour à la base du canal

Pour modéliser les courants d'arc en retour nous faisons recours au courant à la base du canal de foudre qui est la seule grandeur mesurable. Différentes expressions analytiques sont utilisées dans la littérature afin de simuler l'allure du courant à la base du canal de foudre. Parmi ces modèles, on cite [18] :

II.4.1 Modèle bi-exponentiel

Ce modèle est souvent utilisé en raison de sa simplicité. Par ailleurs, il s'adapte à l'analyse fréquentielle du champ électromagnétique, puisque sa transformée de Fourier s'exprime analytiquement. L'expression du courant [21] est :

$$i(0, t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (\text{II.7})$$

Quant à l'arc en retour subséquent, l'expression du courant est exprimée comme suit [21] :

$$i(0, t) = I_{01} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{02} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

I_0 , I_{01} et I_{02} représentent l'amplitude du courant à la base du canal.

α , β , γ , et δ sont des constantes de temps.

Le tableau II.2 présente les paramètres de ces deux fonctions.

Tableau II.2 Paramètres des fonctions exponentielles [21].

	$I_{01}(\text{KA})$	$A(\text{s}^{-1})$	$\beta(\text{s}^{-1})$	$I_{02}(\text{KA})$	$\gamma(\text{s}^{-1})$	$\delta(\text{s}^{-1})$
Premier arc en retour	33.7	$9.2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$	-	-	-
Arc en retour subséquent	14.3	$18 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^6$	10	10^4	$9.4 \cdot 10^4$

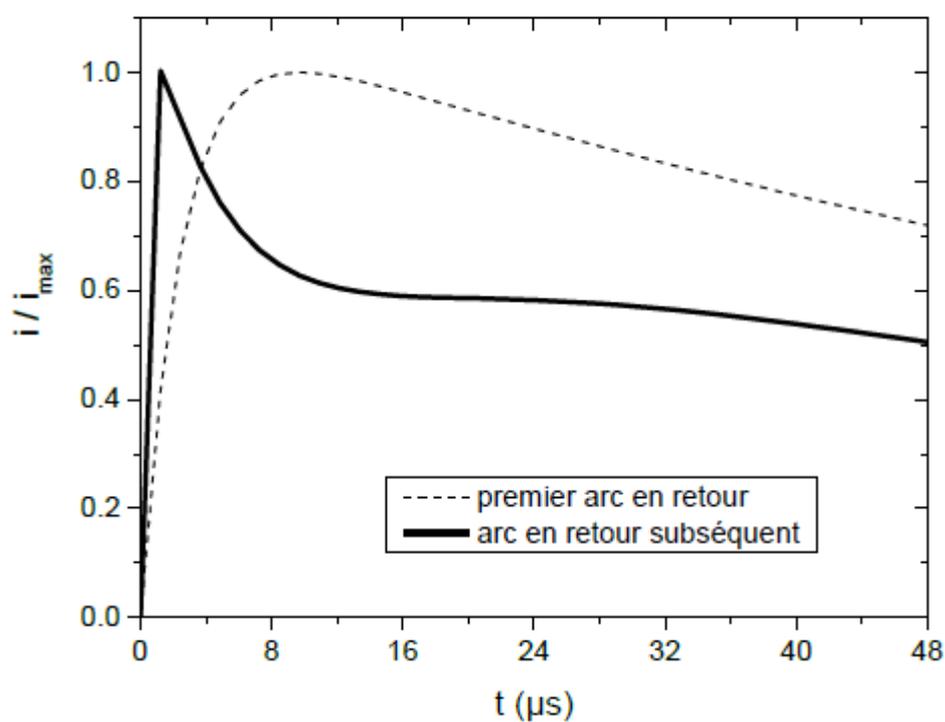


Figure II.3 Courant à la base du canal de foudre (normalisé), correspondant au premier arc en retour et à l'arc en retour subséquent, calculés à l'aide du modèle bi-exponentiel [10].

II.4.2 Modèle de Heidler

L'expression analytique du courant à la base du canal était proposée par Heidler en 1985, elle est référée par la fonction de Heidler [11]:

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (\text{II.9})$$

Où :

$$\eta = \exp\left(\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)\right)^{1/n} \quad (\text{II.10})$$

- I_0 : amplitude du courant à la base du canal ;
- τ_1 : constante du temps du front;
- τ_2 : constante du temps de décroissance;
- η : facteur de correction de l'amplitude ;
- n : un exposant variable entre 2 et 10.

La somme de deux fonctions d'Heidler de type (II.10) représente mieux le premier pic typique du courant d'arc en retour subséquent :

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}}{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}} \exp(-t/\tau_{21}) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^{n_2}}{\left(\frac{t}{\tau_{22}}\right)^{n_2}} \exp(-t/\tau_{22}) \quad (\text{II.10})$$

Le tableau (II.3) représente les paramètres de la fonction de Heidler pour l'arc en retour (premier et subséquent) accordés aux données expérimentales de Berger et al. [22].

Tableau II.3 Paramètres des fonctions exponentielles [22].

	I_{01} (kA)	τ_{11} (µs)	τ_{21} (µs)	n_1	I_{02} (kA)	τ_{12} (µs)	τ_{22} (µs)	n_2
Premier arc en retour	28	1.8	95	2	-	-	-	-
Arc en retour subséquent	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2.1	230	2

La figure II.4 donne à titre d'exemple la courbe du courant à la base du canal de foudre d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (Heidler et la bi-exponentielle).

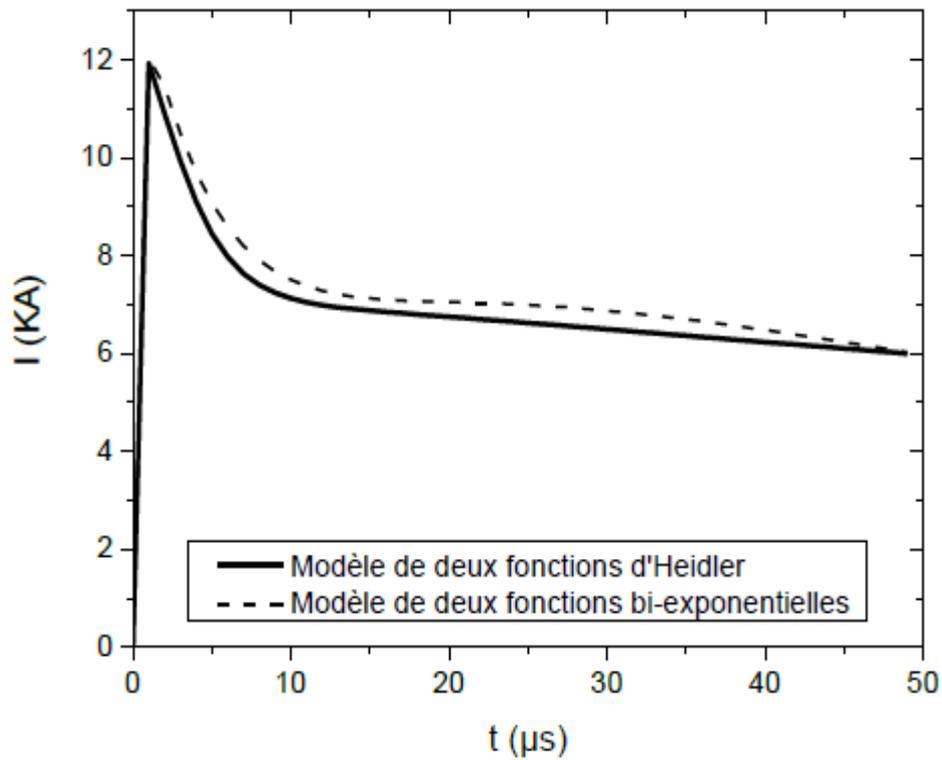


Figure II.4 Courant à la base du canal d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (modèle d'Heidler et modèle bi-exponentiel) [10].

II.5 Géométrie du problème

Pour le calcul du champ électromagnétique rayonné par une décharge de foudre sol-nuage, la géométrie communément adoptée est celle présentée à la figure II.5. Le canal de foudre est considéré comme une antenne verticale unidimensionnelle de hauteur H placée au-dessus d'un plan conducteur. L'arc en retour se propage verticalement à partir du sol avec une vitesse v . U est parcouru par un courant dont la distribution spatio-temporelle $i(z', t)$ détermine le champ électromagnétique en un point quelconque de l'espace [7].

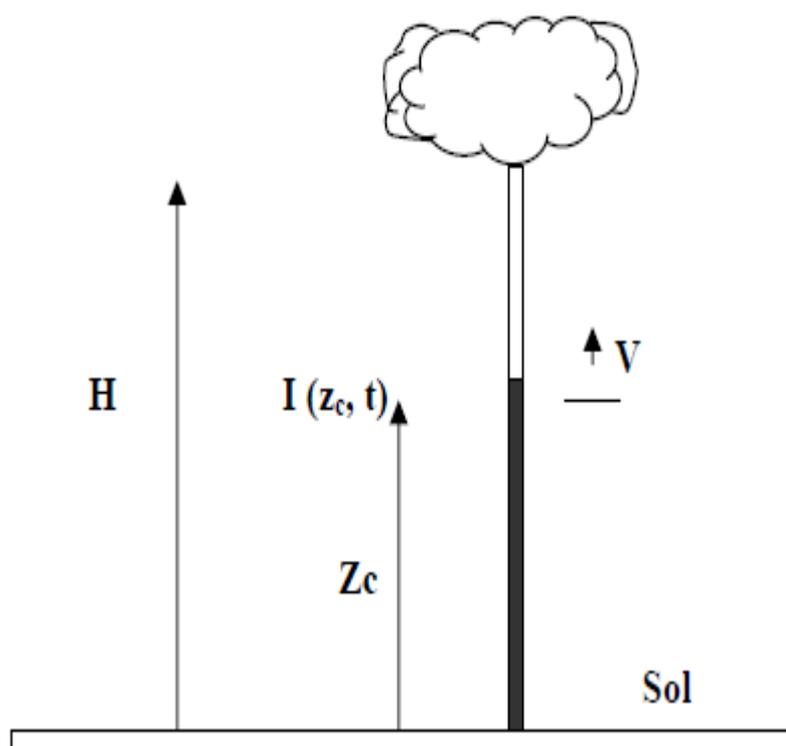


Figure. II.5 Représentation du canal de foudre [18].

II.6 Formulation du champ électromagnétique rayonné par la foudre

II.6.1 Cas d'un sol parfaitement conducteur

Le canal de foudre est considéré comme une antenne verticale unidimensionnelle de hauteur H perpendiculaire à un plan infini parfaitement conducteur, comme la montre la figure II.6 [11].

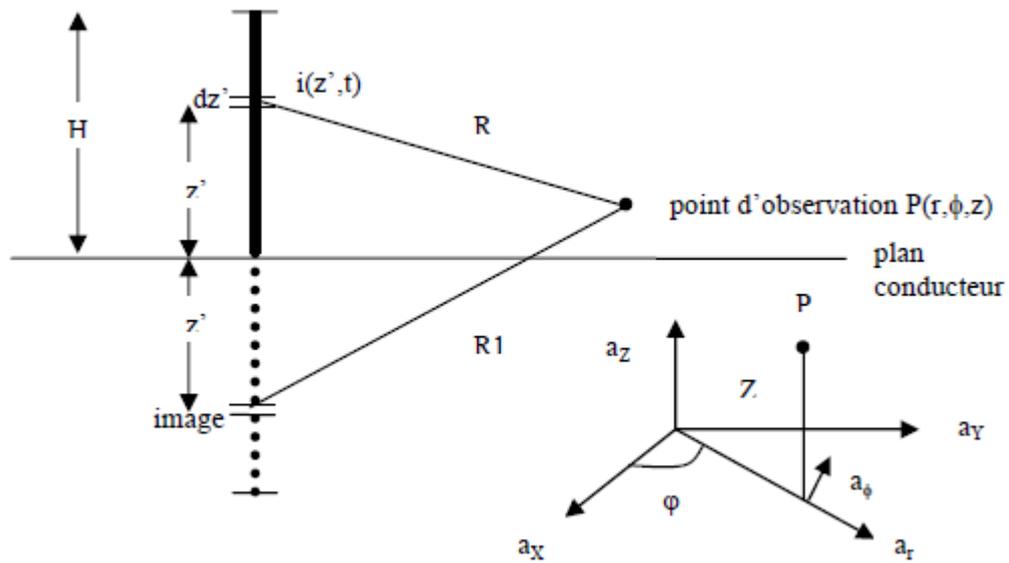
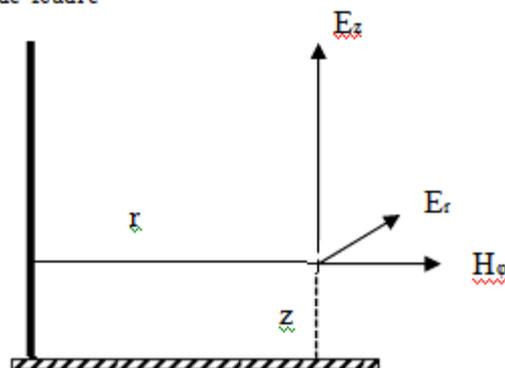


Figure. II.6 Le canal de foudre et son image [11].

En un point quelconque de l'espace, le champ électromagnétique est caractérisé par :

- Le champ électrique vertical E_z ;
- Le champ électrique radial E_r ;
- Le champ magnétique azimuthal H_ϕ .

Canal de foudre



Les champs électriques E_z , E_r et magnétique H_ϕ sont la somme de plusieurs contributions dues à des sources différentes:

$$E_z(r, z, t) = E_{z\acute{e}l}(r, z, t) + E_{zind}(r, z, t) + E_{zray}(r, z, t) \quad (\text{II.11})$$

$$E_r(r, z, t) = E_{r\acute{e}l}(r, z, t) + E_{rind}(r, z, t) + E_{rray}(r, z, t) \quad (\text{II.12})$$

$$E_\phi(r, z, t) = E_{\phi\acute{e}l}(r, z, t) + E_{\phiind}(r, z, t) + E_{\phiray}(r, z, t) \quad (\text{II.13})$$

- La contribution électrostatique (él) a pour source l'intégrale du courant de foudre, c'est à dire la charge déposée dans le canal.
- La contribution d'induction (ind) a pour source le courant de foudre.
- La contribution de rayonnement (ray) a pour source la dérivée du courant de foudre.

$$dE_z(r, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - \frac{R}{c}) d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^5} i(z', t - \frac{R}{c}) - \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] \quad (\text{II.14})$$

$$dE_r(r, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i(z', \tau - R/c) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i(z', t - R/c) + \frac{r(z-z')}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \right] \quad (\text{II.15})$$

$$dH_\phi(r, z, t) = \frac{dz'}{4\pi} \left[\frac{r}{R^3} i(z', t - R/c) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z', t - R/c)}{\partial t} \right] \quad (\text{II.16})$$

$$\text{Avec : } R = \sqrt{r^2 + (z - z')^2}$$

ϵ_0 est la permittivité diélectrique du vide, μ_0 la perméabilité magnétique du vide, c la vitesse de la lumière, R la distance du dipôle au point d'observation et r la distance horizontale entre le canal de foudre et le point d'observation P .

Les champs, électrique et magnétique totaux s'obtiennent par l'intégration des équations (II.14)-(II.16) le long du canal et de son image.

Le champ électrique est la somme de trois termes, le premier terme contenant l'intégrale du courant, appelé « champ électrostatique », le deuxième contenant le courant, appelé « champ d'induction » et le troisième contenant la dérivée du courant, appelé « champ rayonné ». Concernant le champ magnétique, il est composé d'un terme d'induction, appelé aussi « champ magnétostatique » et un terme de rayonnement. A des distances proches du canal de foudre, le champ électrique est dominé par la composante électrostatique et le champ magnétique est dominé par la composante magnétostatique, par contre, le champ électromagnétique lointain est dominé par la composante rayonnée [10].

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de présenter les modèles d'ingénieur utilisés pour la modélisation du courant de l'arc en retour. 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. Nous avons aussi présenté la modélisation du courant d'arc en retour et le calcul du champ électromagnétique associé.



Chapitre III

**Modélisation du
courant d'arc en
retour à la présence
d'une tour**

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour but la modélisation du courant d'arc en retour de la foudre en présence d'une tour. Pour atteindre cet objectif, nous utilisons les modèles de l'ingénieur modifiés pour la modélisation du courant d'arc en retour en présence d'une tour.

III.2 Caractéristiques du courant d'arc en retour

Pour mesurer directement le courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre, la connaissance du point d'impact de la foudre est nécessaire. Les techniques utilisées de nos jours pour l'obtention des données expérimentales des courants de foudre sont :

- ❖ Déclenchement artificiel de la foudre (Figure III.1 et III.2).
- ❖ L'utilisation des tours instrumentées (Figure III.3).

Dans les deux techniques, l'idée principale est d'augmenter la probabilité des impacts de la foudre aux points prédéfinis. La technique du déclenchement artificiel de la foudre permet de provoquer celle-ci lors de passage de nuages orageux et de l'attirer en un lieu déterminé. A l'approche d'un nuage orageux, on lance en direction du nuage une petite fusée (Figure III.4) qui déroule derrière elle un fil mince métallique s'échappant d'une bobine. Lorsque la fusée atteint une certaine hauteur, typiquement 200 à 300 m, un traceur ascendant est déclenché du sommet de la fusée. Le courant de foudre s'écoule alors le long du fil métallique, tout en le volatilisant.



Figure III.1 Exemple d'un déclenchement artificiel de la foudre en Floride [24]



(a)

(b)



(c)

Figure III.2 Lanceurs et fusées utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre (a) lanceur fixe, (b) lanceur mobile et (c) fusées [23]

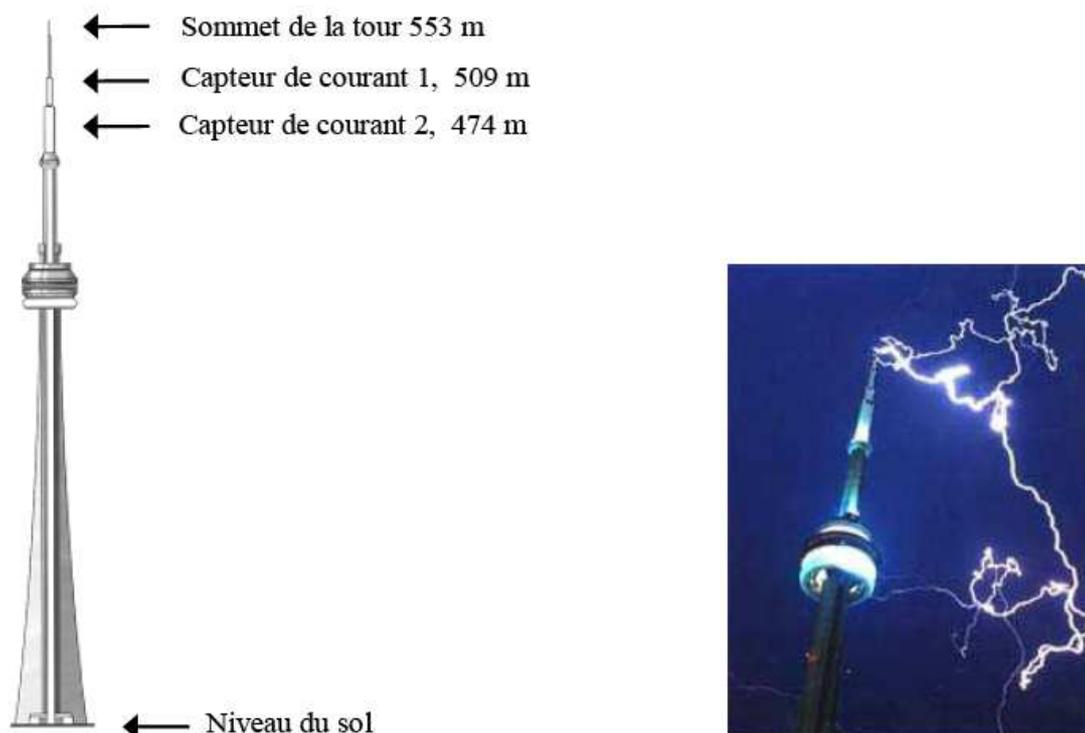


Figure III.3 Exemple de mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée.
Tour CN à Toronto au Canada [24]

III.2.1 Données obtenues en utilisant de petites tours (moins de 100 m)

La description la plus complète du courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre est donnée par l'équipe du Professeur Berger (rapporté par Uman [25]), qui durant les années 1950-1980 a exploité une station expérimentale au sommet de Monte San Salvatore, Lugano, Suisse. La mesure du courant a été effectuée au sommet de deux tours de 55 m de haut. Environ 15 % des mesures rapportées par l'équipe du Prof. Berger sont dues à des traceurs descendants (Figure III.4.a). La plupart des décharges sont initiées par des traceurs ascendants positifs et négatifs (Figure III.4.b et III.4.d). La figure (III.5) illustre les formes moyennes des courants typiques correspondant aux arcs en retour premier et subséquent d'une décharge négative. Dans cette figure, il est possible de voir un temps de montée rapide du courant correspondant à l'arc en retour subséquent. La distribution statistique des principaux paramètres du courant est présentée dans le tableau III.1

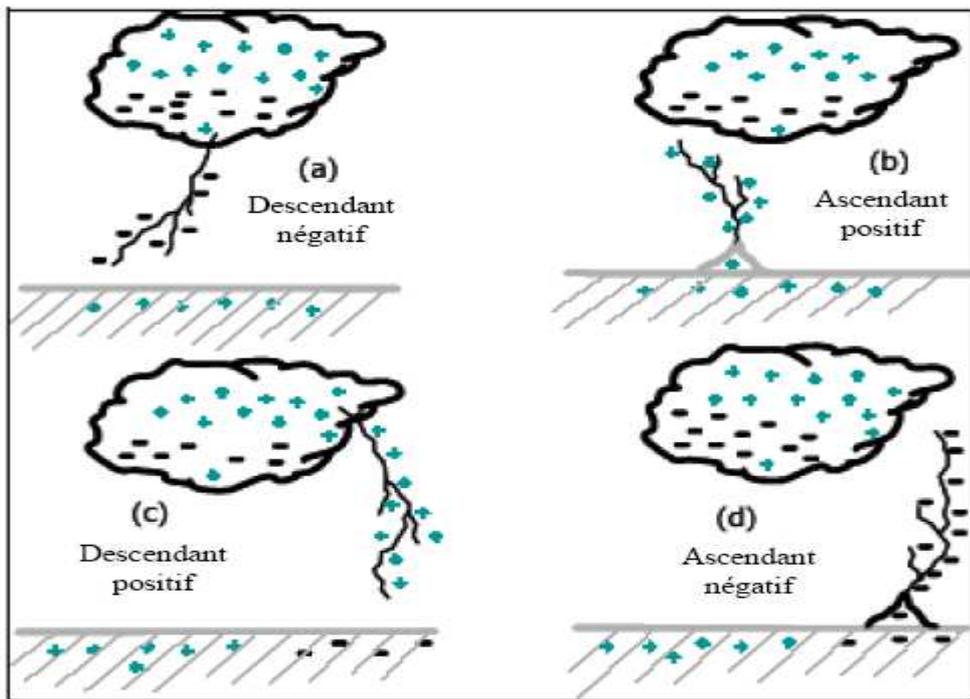


Figure III.4 Classification des coups de foudre selon Berger et al [25].

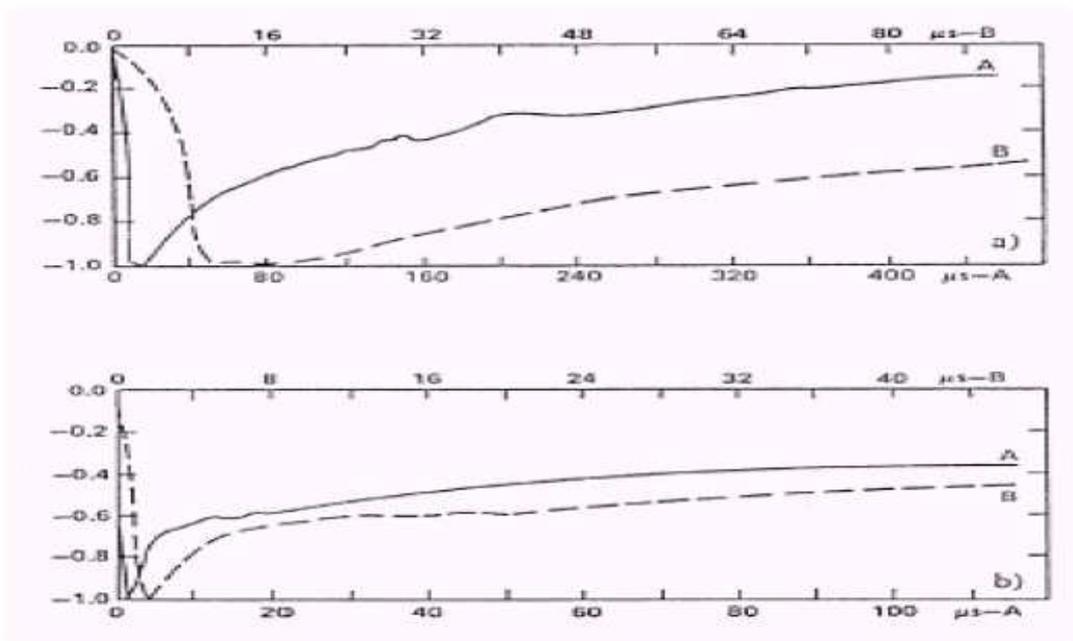


Figure III.5 Forme moyenne normalisée du courant des arcs en retour premier et subséquent (a) premier arc en retour, (b) arc en retour subséquent [25].

Tableau III.1 Paramètres du courant d'un coup de foudre descendant négatif [25].

Paramètre	Unité	Nombre D'évènement	Pourcentage de cas dépassant la valeur indiquée		
			95%	50%	5%
Courant de crête					
Premier arc en retour négatif	kA	101	14	30	80
Arc en retour subséquent négatif	kA	135	4.6	12	30
Charge totale					
Premier arc en retour négatif	C	93	1.1	5.2	24
Arc en retour subséquent négatif	C	122	0.2	1.4	11
Temps de montée (2kA-crête)					
Premier arc en retour négatif	μsec	89	1.8	5.5	18
Arc en retour subséquent négatif	μsec	118	0.22	1.1	4.5
di/dt maximal					
Premier arc en retour négatif	kA/ μsec	92	5.5	12	32
Arc en retour subséquent négatif	kA/ μsec	122	12	40	120
Durée de l'impulsion (2kA-mi-amplitude)					
Premier arc en retour négatif	μsec	90	30	75	200
Arc en retour subséquent négatif	μsec	115	6.5	32	140
Interval du temps					
Entre deux décharges négatives	msec	133	7	33	150

De ce tableau, on peut extraire les remarques suivantes concernant les décharges de foudre descendantes négatives:

- Les amplitudes du courant du premier arc en retour sont supérieures à celles des arcs en retour subséquents.

- La valeur maximale de la variation du courant dans le cas d'un arc subséquent est supérieure à celle du premier arc en retour.

- Le temps de montée du courant de l'arc en retour subséquent est plus rapide que celui d'un courant du premier arc en retour. - La durée de l'impulsion du courant de l'arc en retour subséquent est inférieure à celle du premier arc en retour.

III.2.2 Données obtenues en utilisant le déclenchement artificiel de la foudre

Cette technique donne en plus des informations sur le courant à la base du canal de foudre, le champ électromagnétique associé.

Rakov [13] a résumé les caractéristiques du courant de l'arc en retour, à savoir le pic du courant et le pic de sa dérivée à partir de deux campagnes expérimentales l'une en France et l'autre en Floride comme il est indiqué au tableau III.2

Tableau III.2 Caractérisation du courant de l'arc en retour [26].

L'endroit	L'année	Nombre D'évènement	Valeur moyenne du pic du courant (kA)	Valeur moyenne du pic de la dérivée du courant (kA/ μ s)
Floride	1985-1991	305/134	12.1	91.2
France	1986. 1990-1991	54/47	9.8	36.8

De ce tableau, on note une similitude entre la valeur moyenne du pic du courant mesurée en Floride et celle rapportée par le Professeur Berger (Tableau I.1).

La technique du déclenchement artificiel de la foudre constitue un outil très fiable pour bien comprendre la phénoménologie d'une foudre naturelle [24]. En effet, les résultats obtenus par cette technique seront virtuellement impossibles à obtenir à partir des recherches faites sur une foudre naturelle à cause de l'aspect aléatoire de la foudre tant sur le plan spatial que sur le plan temporel.

III.2.3 Données obtenues en utilisant des tours élevées (plus de 100 m)

Dans cette section, on présente trois exemples de mesure du courant de l'arc en retour en utilisant une tour élevée instrumentée :

III.2.3.1 Tour d'Ostankino à Moscow [14]

Cette tour est de 540 m de hauteur, le courant est mesuré dans trois endroits de la tour : 47 m, 272 m et 533 m (Figure III.6). On remarque que la forme du courant mesuré change d'un endroit à un autre, la valeur du pic de ce courant augmente en allant du sommet de la tour vers le sol, Bermudez [24] rapporte que ceci est dû aux réflexions multiples de l'onde de courant au sommet avec un coefficient négatif et les réflexions multiples à la base de la tour avec un coefficient positif.

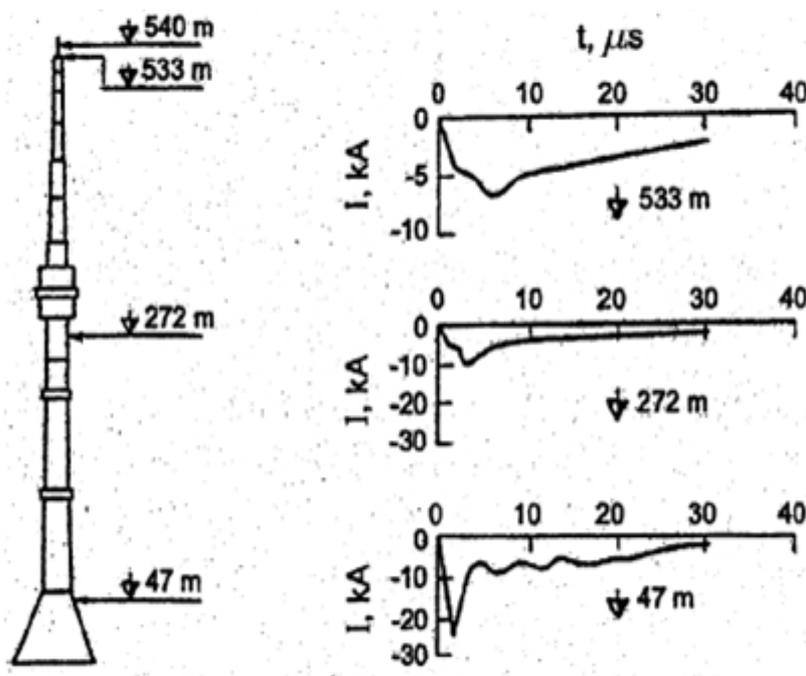


Figure III.6 Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d'Ostankino, Moscow [27].

III.2.3.2 Tour CN à Toronto au Canada

La tour CN est la tour la plus élevée dans le monde, en tous les cas jusqu'à présent, elle est de 553 m de hauteur, le courant de l'arc en retour est mesuré à 474 m et à 509 m. Les mesures effectuées en 1999 sont présentées sur la figure (III.7).

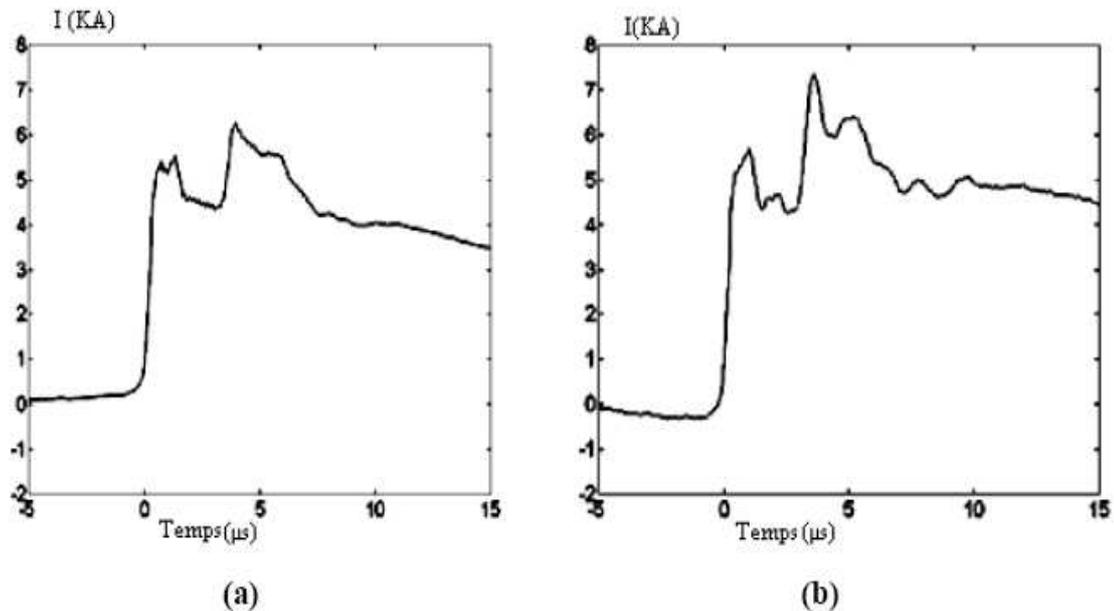


Figure III.7 Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m [24].

On a les mêmes remarques que pour le cas précédent, sauf que dans ce cas, la forme du courant est plus complexe, Shostak [28] rapporte que ceci est dû à la structure complexe de la tour CN.

III.2.3.3 Tour Peissenberg en Allemagne

Cette tour est de 168 m de hauteur, les mesures du courant de l'arc en retour sont effectuées à 167 m et à 13 m. La figure (III.8. a) a montré une photographie de la tour Peissenberg et la figure (III.8.b) décrit les variations temporelles du courant d'arc en retour mesuré simultanément, au sommet et à la base de la tour. La contamination du courant par les réflexions multiples est bien mise en évidence.

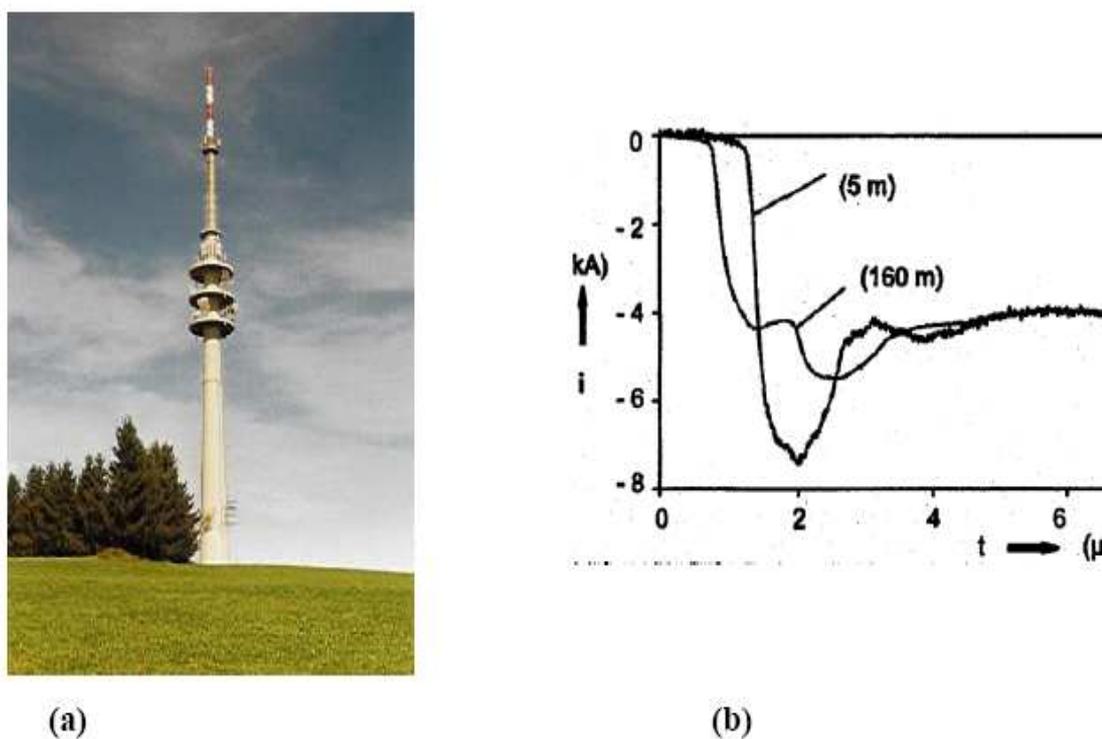


Figure III.8 (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour [24]

III.3 Estimation indirect des courants à partir des systèmes de détection de la foudre

Les systèmes de détection de la foudre (Lightning Location systems : LLS) constituent une référence pour le développement des normes liées à la protection des réseaux électriques et des systèmes de télécommunication contre la foudre [29]. La méthode la plus utilisée dans les LLS, consiste en la déduction du courant d'arc en retour à partir du champ électrique ou magnétique mesuré à grande distance du point d'impact de la foudre.

III.4 Vitesse de l'arc en retour

La vitesse moyenne des arcs en retour est de l'ordre du tiers de la vitesse de la lumière. La vitesse des arcs en retour subséquents est en général plus grande que celle des arcs en retour premiers. D'autre part, il a été mis en évidence que la vitesse de l'arc en retour, tant pour les premiers que pour les subséquents, décroît en fonction de la hauteur; cette décroissance est plus marquée pour les premiers arcs en retour [2].

III.5 Distribution du courant dans la tour et dans le canal de la foudre

Pour analyser l'interaction de la foudre avec les objets élevée (la tour), les modèles d'ingénieur utilisés pour la modélisation du courant de l'arc en retour initié du sol ont été modifiés pour tenir compte de la présence des objets élevés. Dans ces modèles, il est supposé que l'impulsion du courant $i_0(t)$ est injectée dans le canal de la foudre et la tour au même instant. Depuis le point de connexion de la foudre avec la tour : une onde ascendante se propage le long de la foudre avec une vitesse v , du courant de l'arc en retour, et l'autre onde descendante se propage avec la vitesse c de la lumière figure (III.9) le long de la tour. Cette dernière est considérée comme étant une ligne de transmission homogène sans pertes et de longueur h . Elle est caractérisée par son impédance caractéristique z_t et possède deux coefficients de réflexion du courant de aux deux extrémités de la tour, (ρ_t au sommet de la tour, ρ_g à la base de la tour). Il existe deux représentations du courant de l'arc en retour pour les modèles d'ingénieurs avec la présence de la tour [11].

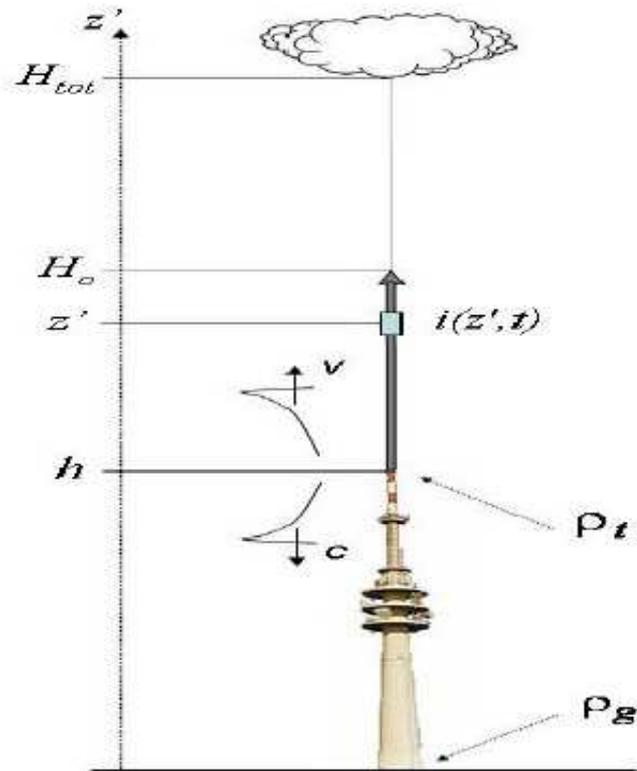


Figure III.9 Propagation du courant le long du canal de foudre et le long de la tour [11].

III.5.1 Modèle de Rachidi et al

Les modèles d'ingénieur initialement proposés dans le cas d'un arc en retour initié du sol ont été récemment modifiés par Rachidi et al. Pour prendre en compte le cas d'un arc en retour initié à partir du sommet d'une tour. Rachidi et al ont présenté le canal par une source distribuée. La distribution du courant le long de la tour ($0 \leq z' \leq h$) et le long du canal de foudre ($z' \geq h$) (figure III.9) est représentée par les équations suivantes :

Pour ($0 \leq z' \leq h$)

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_t^n \rho_g^n i_0 \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_0 \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] u \left(t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \quad \text{III.1}$$

Et pour ($z' \geq h$)

$$i(z', t) = P(z' - h)i_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{v^*} \right) - \rho_t i_0 \left(h - t - \frac{h - z'}{c} \right) + (1 - \rho_t) \left(1 + \rho_t \right) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] u \left(t - \frac{z' - h}{v} \right) \quad \text{III.2}$$

h : est la hauteur de la tour

ρ_t, ρ_g : sont respectivement les coefficients du courant au sommet et la base de la tour ;

c : est la vitesse de la lumière.

v : est la vitesse de front d'arc en retour.

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

$P(z')$: est un facteur d'atténuation du courant.

$U(t)$: est une fonction unité.

n : représente le nombre de réflexion aux deux extrémités de la tour.

Ces deux équations sont basées sur le concept du courant « non contaminé » $i_0(t)$, représente le courant idéal qui serait mesuré au sommet de la tour si les coefficients de réflexion a ses deux extrémités sont nuls. Les expressions de $P(z')$ et v^* pour les modèles de l'ingénieur les plus utilisés sont exprimés au tableau II.1 [10].

III.5.2 Modèle de Baba et Rakov

En 2005, Baba et Rakov ont proposé une autre approche basée sur l'utilisation d'une série de sources de tension dans la jonction tour-canal. Ils ont montré qu'une telle représentation est équivalente à celle de Rachidi et al. Dans leur représentation, Baba et Rakov ont exprimé la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre en terme du courant de court-circuit $i_{sc}(t)$, qui est relié au courant « non contaminé » par :

$$i_{sc}(t) = 2i_0(t)$$

Les équations du courant de l'arc en retour $i(z', t)$ le long de la tour ($0 \leq z' \leq h$) et le long du canal de foudre ($z' \geq h$) développées par Baba et Rakov s'écrivent comme suit :

Pour ($0 \leq z' \leq h$) :

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) / 2 \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_t^n \rho_g^n i_{sc} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_{sc} \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad (\text{III.3})$$

Et pour ($z' \geq h$) :

$$i(z', t) = (1 - \rho_t / 2) \left[i_{sc} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} \right) + \sum_{n=0}^{\infty} \rho_t^n \rho_g^{n-1} (1 + \rho_t) i_{sc} \left(h, t - \frac{h - z'}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad (\text{III.4})$$

Ces deux équations montrent que des ondes de courant d'une même amplitude $(1-\rho t) i_{sc}(h, t)/2$, sont initialement injectées, simultanément, dans le canal de foudre et dans la tour [10].

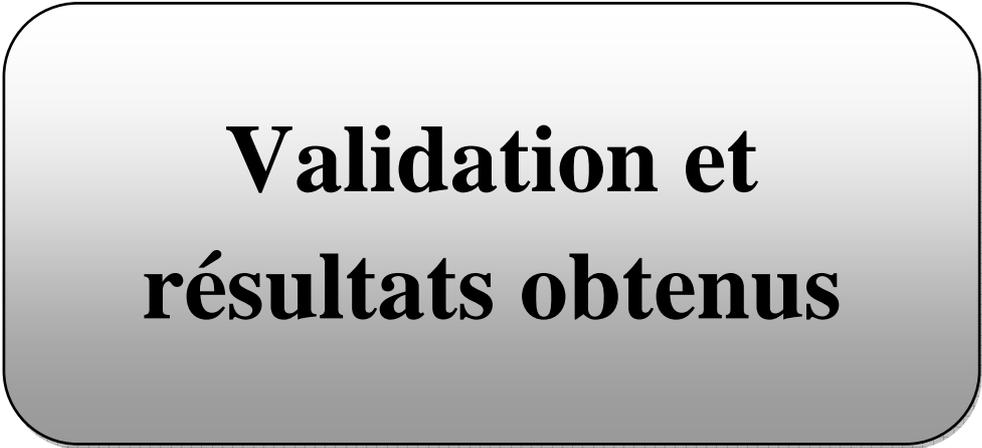
On note que ces deux équations sont identiques aux équations (III.1) et (III.2) écrites en terme du courant « non contaminé », $i_0(h, t) = i_{sc}(h, t) / 2$.

II.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à modéliser le courant d'arc en retour à la présence d'une tour. Dans cette étude nous avons présenté une brève étude sur le courant de l'arc en retour avec les techniques utilisées pour l'obtention des données expérimentales des courants de foudre, pour les différents types de tour.



Chapitre IV



**Validation et
résultats obtenus**

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous comparons entre les différents modèles de l'ingénieur pour la modélisation du courant de l'arc en retour à la présence d'un objet élevé (tour), à savoir modèle de Bruce-Golde (BG), modèle de la ligne de transmission (TL), modèle de la source de courant progressive (TCS), modèle de ligne de transmission modifié (MTLL), (MTLE).

IV.2 Comparaison des différents modèles de distribution du courant de l'arc en retour en présence d'une tour

IV.2.1 Courant non contaminé

Afin de rendre possible la comparaison des cinq modèles d'ingénieurs, nous devons choisir le même courant non contaminé $i_0(t)$. Ce courant est modélisé par Nucci et al. [15] et exprimé comme suit :

$$i(0, t) = \left(\frac{I_{01}}{\eta} \right) \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} + I_{02} (e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (\text{IV.1})$$

Les paramètres du courant non contaminé illustrés à la figure (IV.1) sont mentionnés dans le tableau IV.1 ci-dessous :

Tableau IV.1 Paramètres du courant non contaminé [15].

$I_{01}(\text{kA})$	$\tau_1 (\mu\text{s})$	$\tau_2 (\mu\text{s})$	$I_{02}(\text{kA})$	$\tau_3 (\mu\text{s})$	$\tau_4 (\mu\text{s})$	η
9.9	0.072	5.0	7.5	100	6	0.845

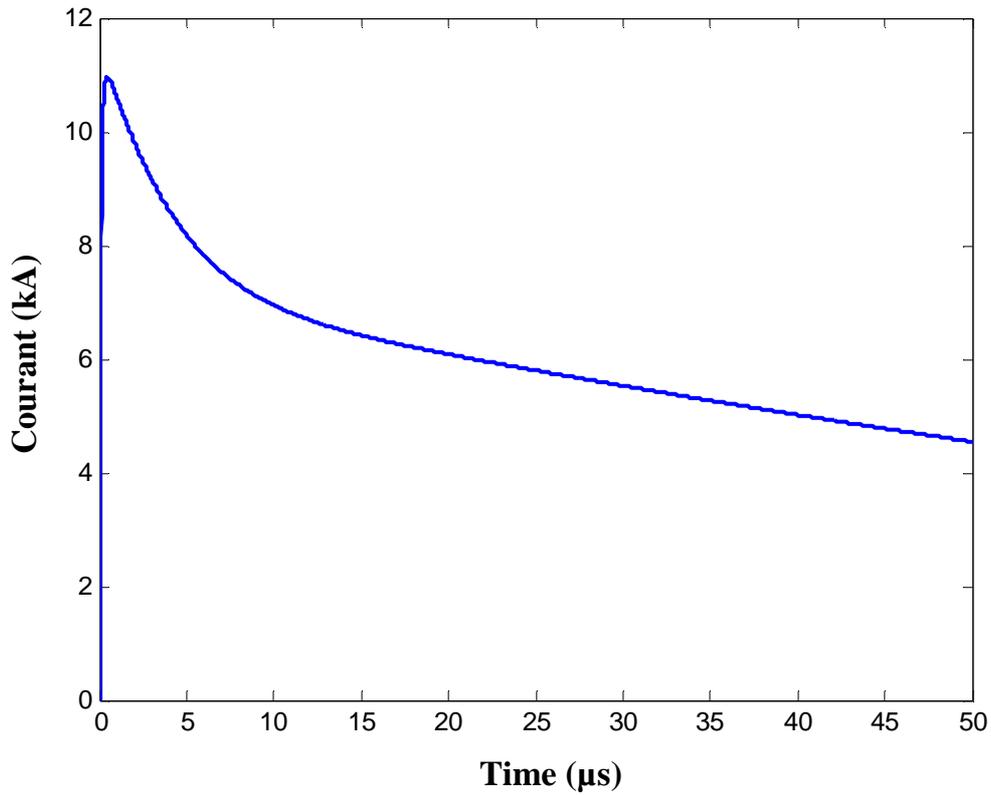
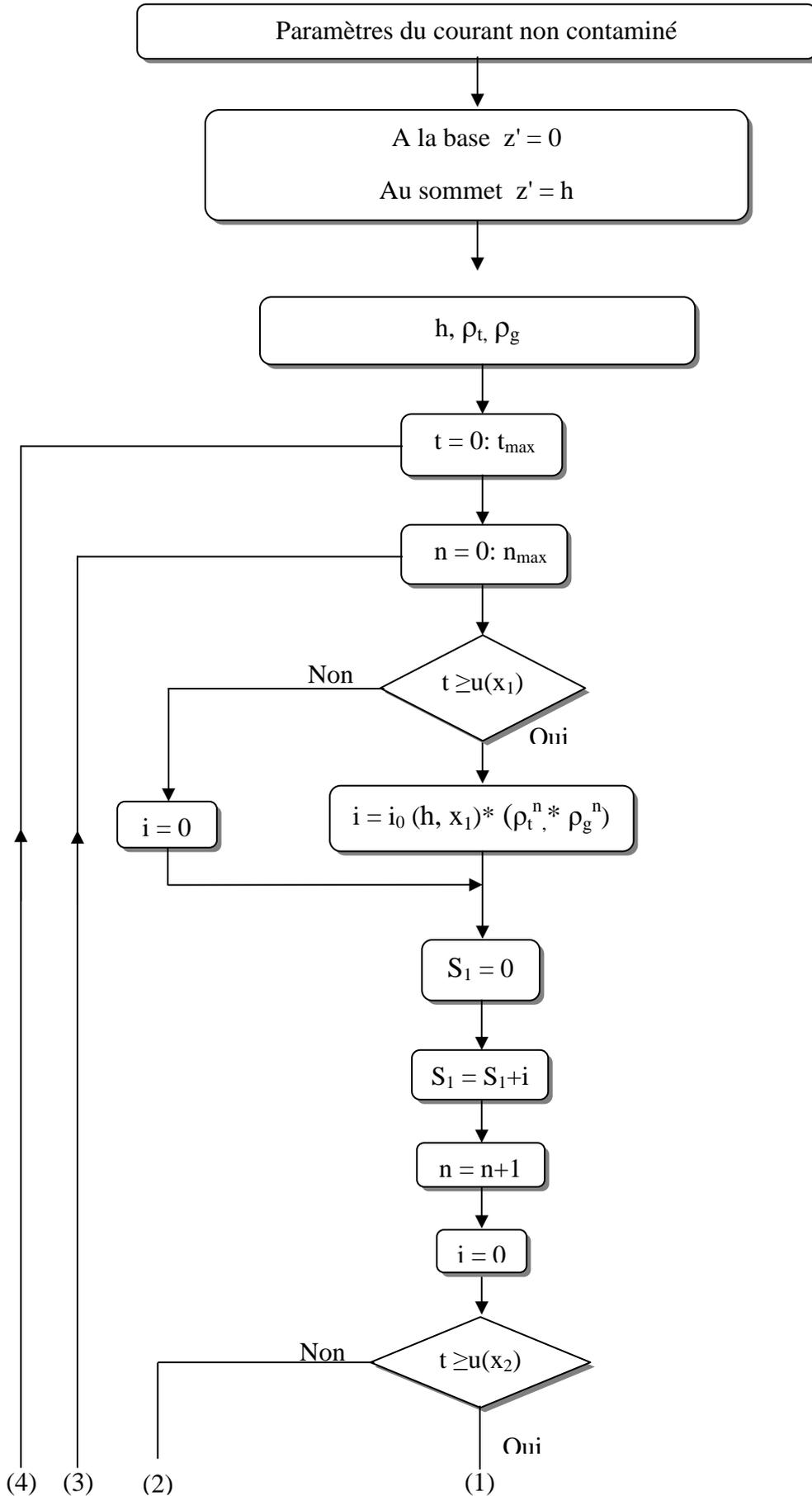


Figure IV.1 Courant non contaminé.(Notre résultat)

IV.2.2. Courant au sommet et à la base de la tour

Dans cette comparaison l'objet élevé est de hauteur $h = 168$ m, correspond à la tour de Peissenberg, avec les coefficients de réflexion $\rho_t = -0.53$ et $\rho_g = 0.7$. Les valeurs de taux de croissance du courant est $\lambda = 2$ km, la hauteur du canal est $H = 8$ km et la vitesse de l'arc en retour est $v = 150$ m/μs. Les figures (IV.2 et IV.3) présentent respectivement le courant au sommet (168 m) et à la base (0 m) de la tour [11].



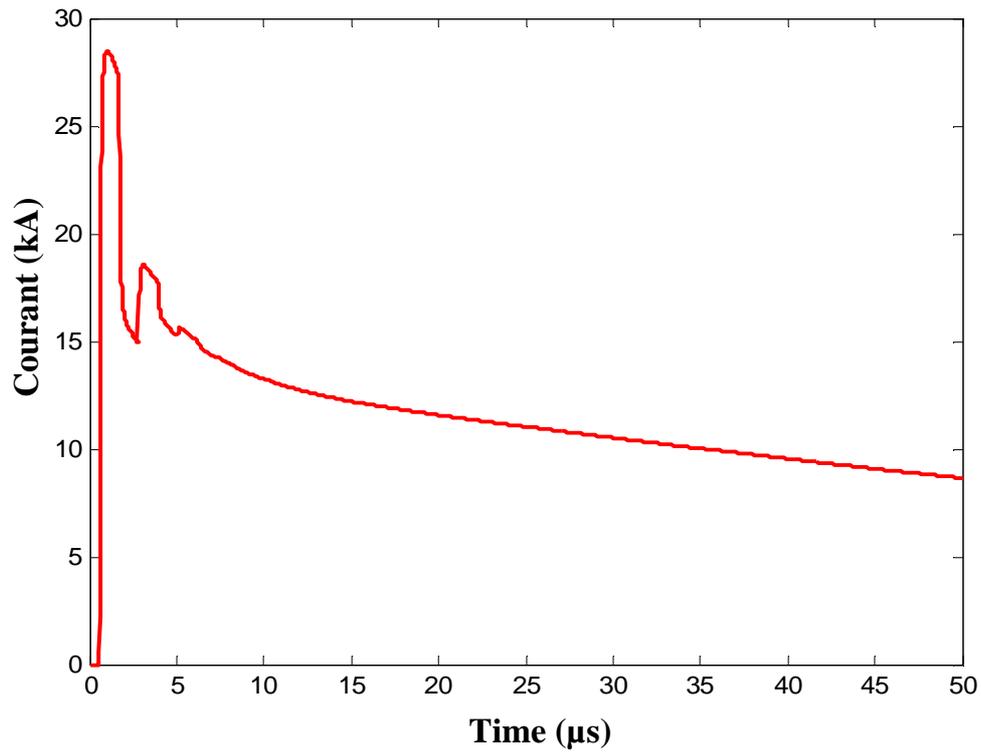


Figure IV.3 Courant au sommet de la tour. (Notre résultat)

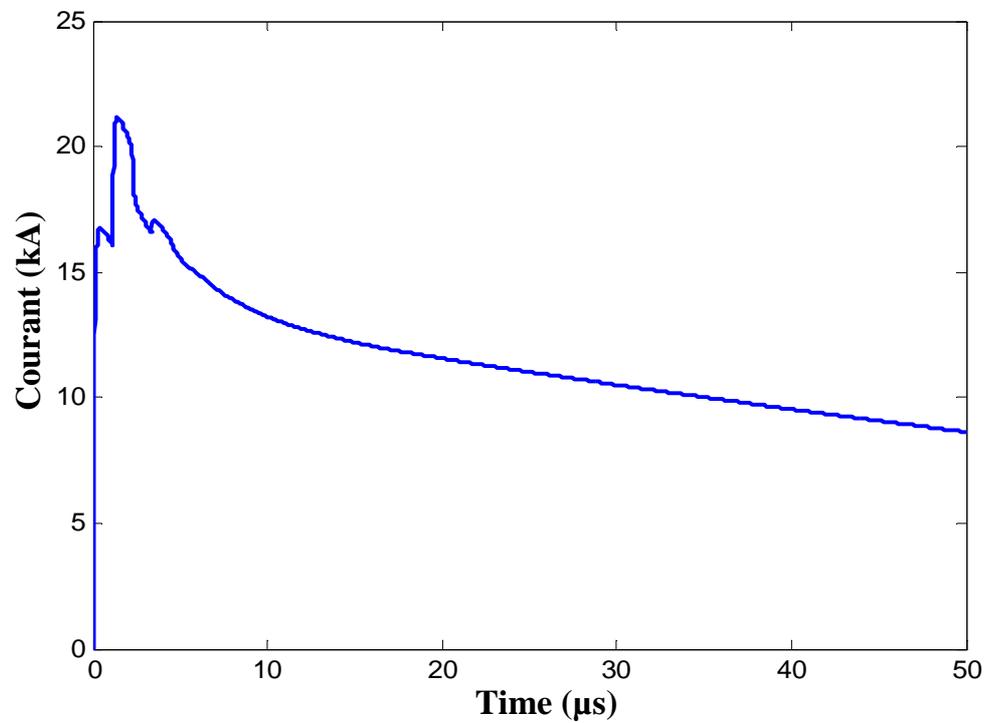


Figure IV.4 Courant à la base de la tour. (Notre résultat).

IV.2.3 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de la foudre en fonction des modèles d'ingénieur

Les figures suivantes présentent la distribution spatio-temporelle des cinq modèles d'ingénieur du courant d'arc en retour en présence d'un objet élevé pour 10 instants.

a- Le modèle BG

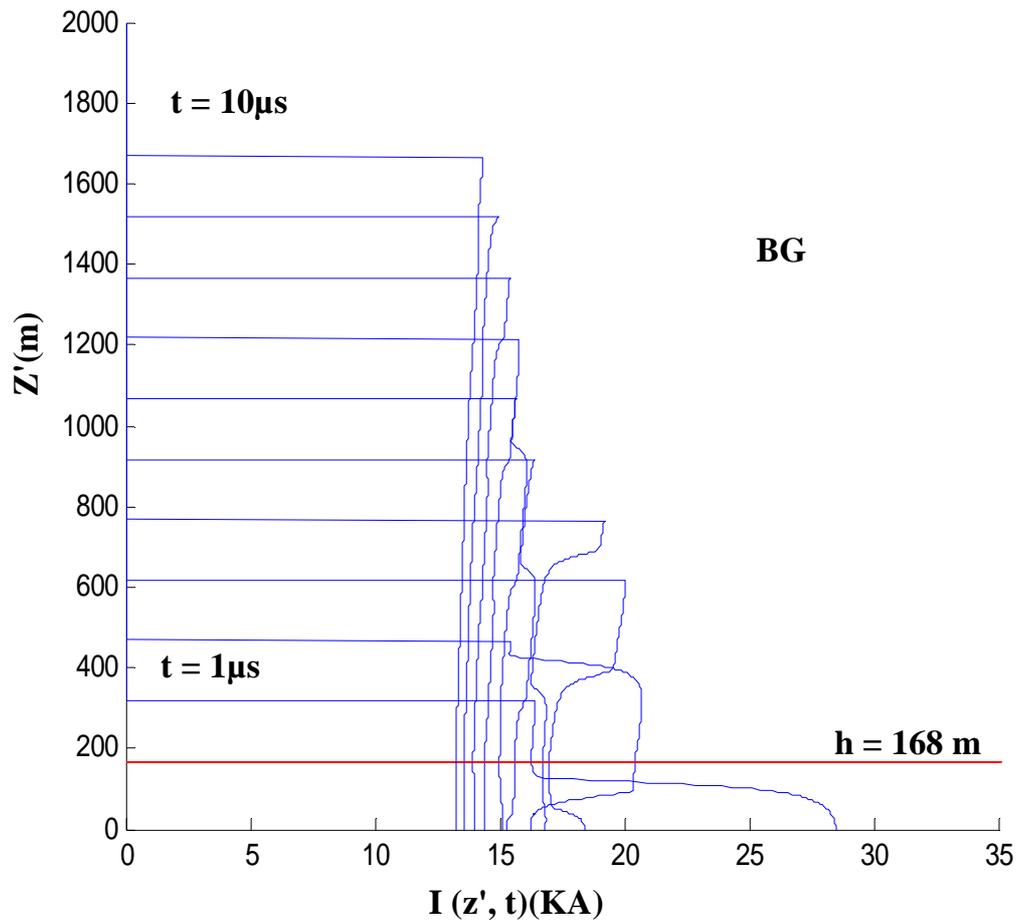


Figure IV.5 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de BG (Notre résultat).

b. Modèle MTLE

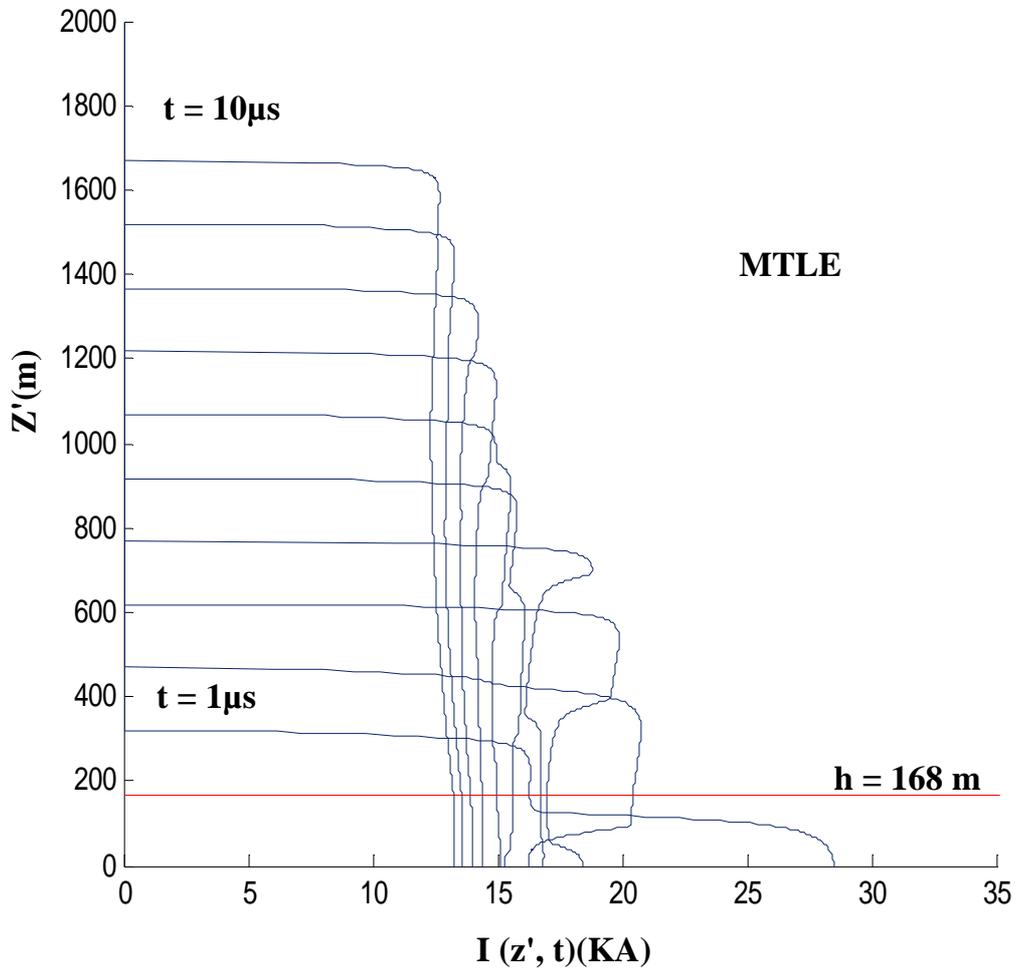


Figure IV.6 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de MTLE (Notre résultat).

c. Modèle MTLL

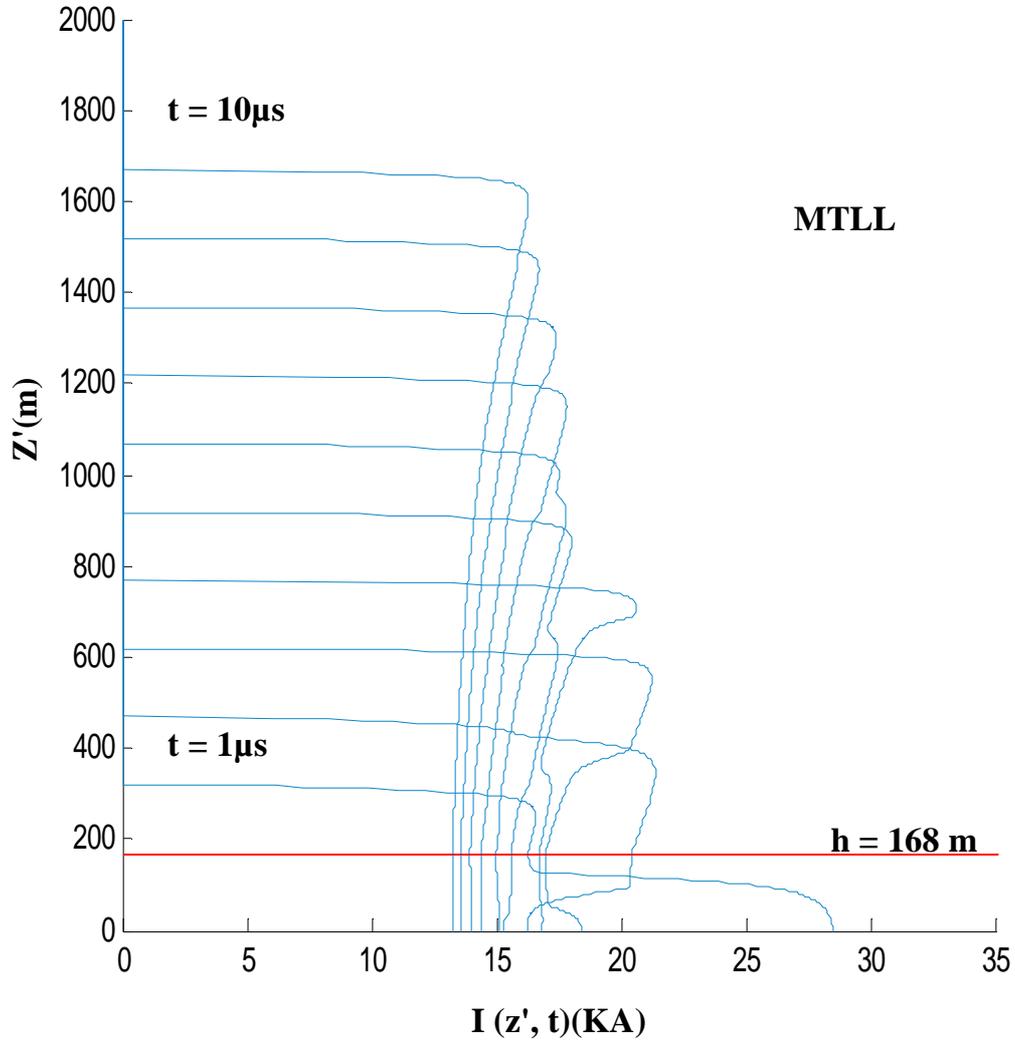


Figure IV.7 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de MTLL (Notre résultat).

d. Modèle TCS

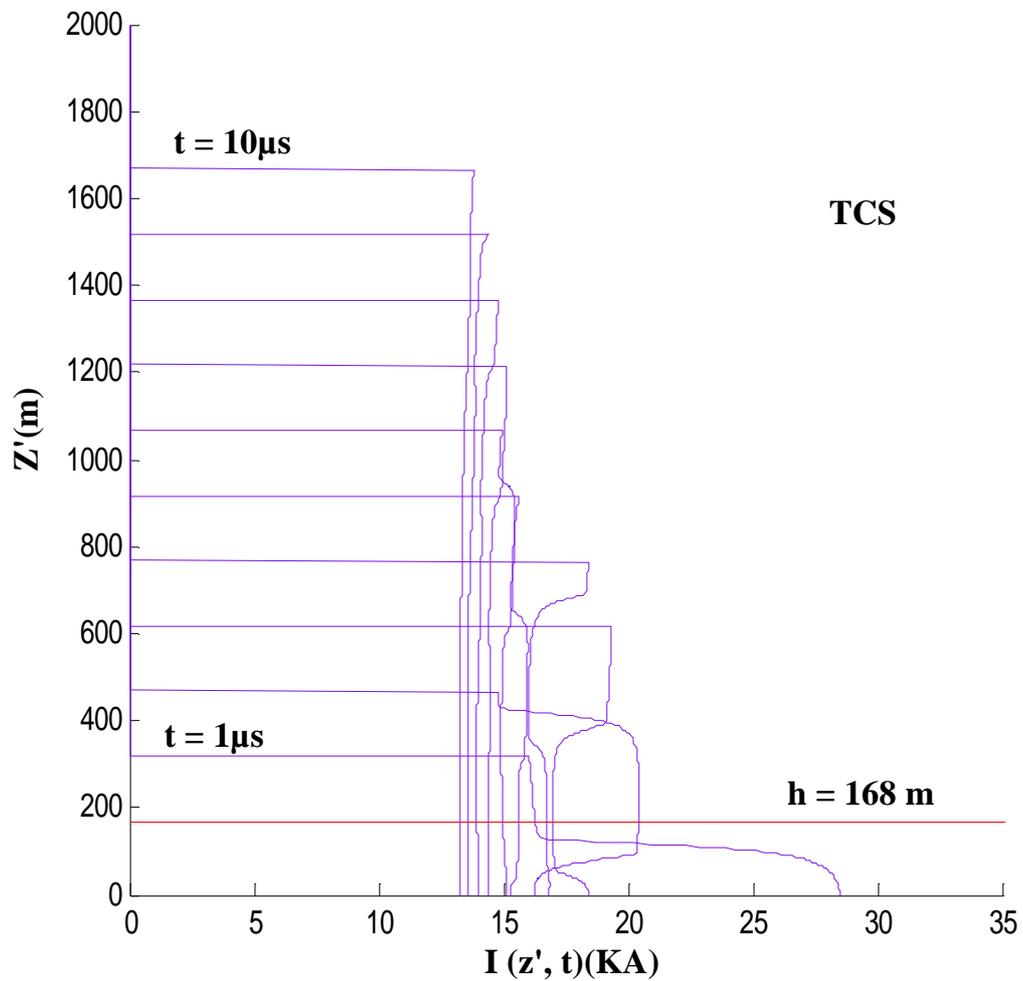


Figure IV.8 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de TCS (Notre résultat).

e. Modèle TL

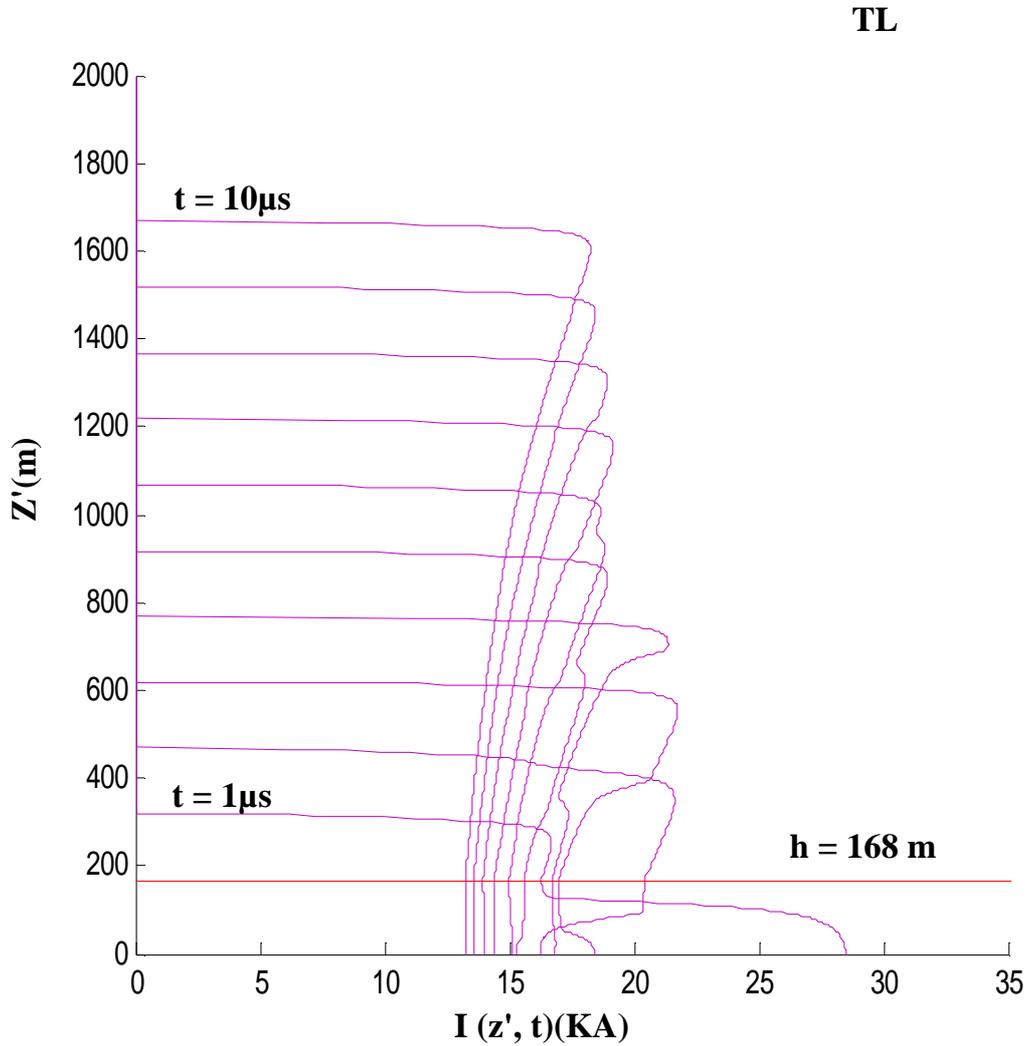
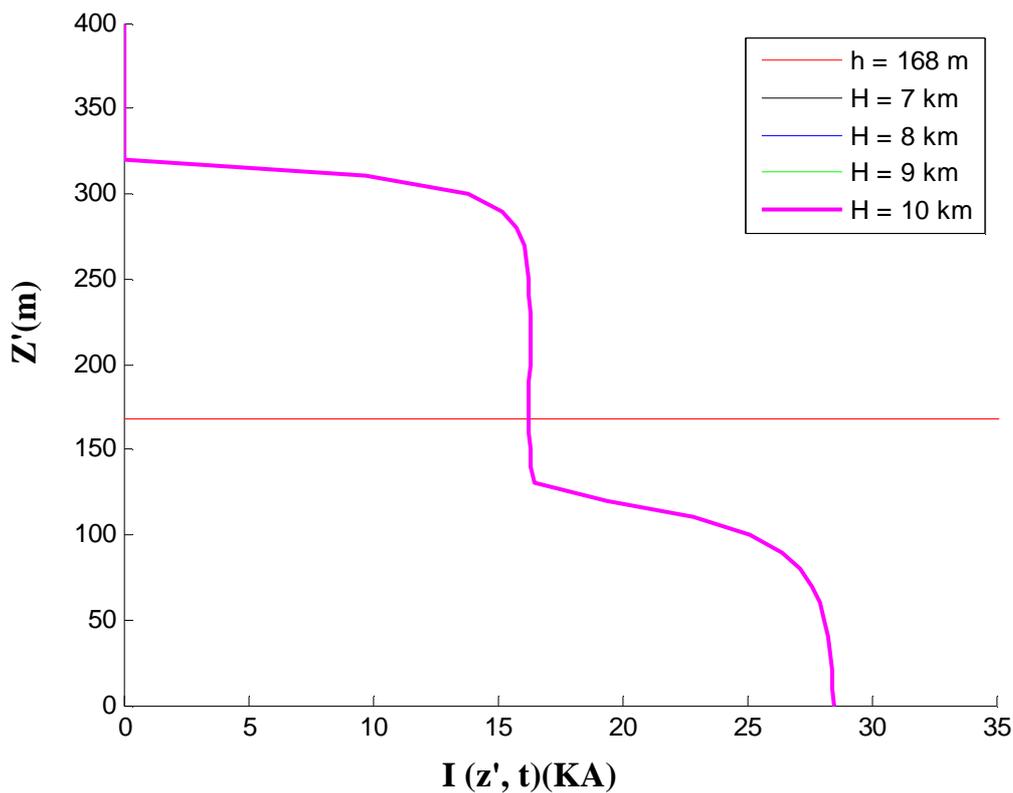


Figure IV.9 Distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle de TL (notre résultat).

D'après ces figures, nous remarquons que la distribution du courant le long de la tour est indépendante des modèles, ainsi tous les modèles ont une discontinuité au front du courant de l'arc en retour. Cette discontinuité est très importante pour les modèles BG et TCS que les autres modèles. Elle est due, d'après Rachidi, à la présence des deux courants. Un courant se propageant le long du canal de foudre avec la vitesse de l'arc en retour v et l'autre courant se propageant le long de la tour vers le sol avec la vitesse de la lumière c .

IV.2.4 Influence de la hauteur du canal de foudre.

Pour voir l'influence de la hauteur du canal sur la distribution du courant, on a choisi le modèle MTLE, on a fixé $t = 1 \mu s$ et on a varié la hauteur H du canal. Le résultat est illustré à la figure suivante:



D'après cette figure on constate que la hauteur du canal n'influe pas sur la distribution du courant.

IV.2.5 Influence de la hauteur de la tour

Pour voir l'influence de la hauteur de la tour sur la distribution du courant, on a choisi le modèle MTLE, on a fixé $t = 1 \mu s$ et on a varié la hauteur h de la tour. Le résultat est illustré à la figure suivante:

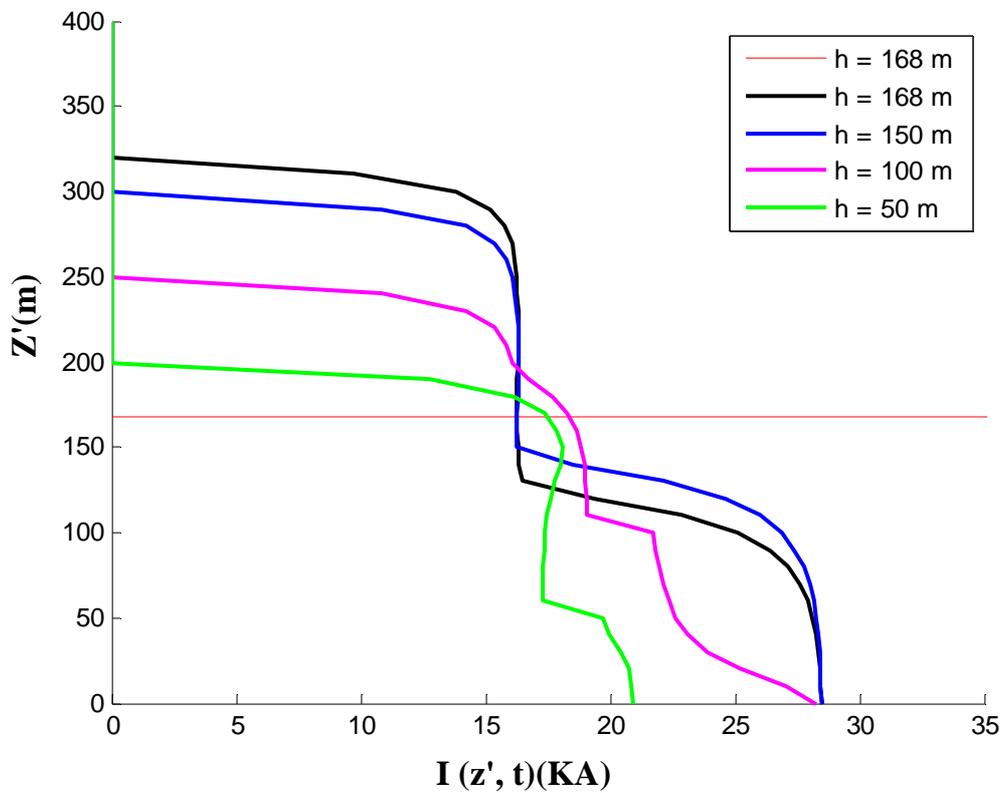


Figure IV.11 Influence de la hauteur de la tour sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1 \mu s$

(Notre résultat).

On remarque que la distorsion du courant augmente au temps qu'on s'approche au sol, cela est expliqué par la réflexion du courant au niveau du sol.

IV.2.6 Influence des paramètres du courant d'arc en retour

Pour voir l'influence de la vitesse (figure IV.12) et du facteur λ (figure IV.13) sur la distribution du courant, on a choisi le modèle MTLE, on a fixé $t = 1 \mu s$.

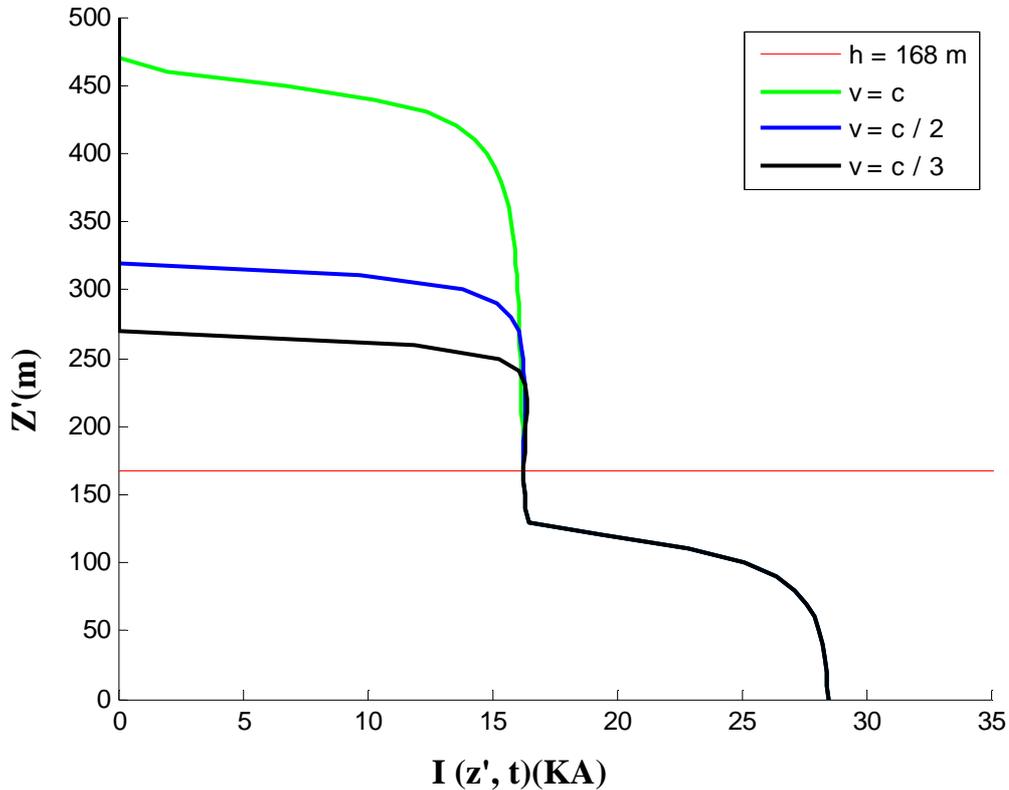


Figure IV.12 Influence de la vitesse du courant sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1 \mu s$

(Notre résultat).

On remarque que la variation de la vitesse du courant v influe seulement sur la distribution du courant au niveau du canal de la foudre.

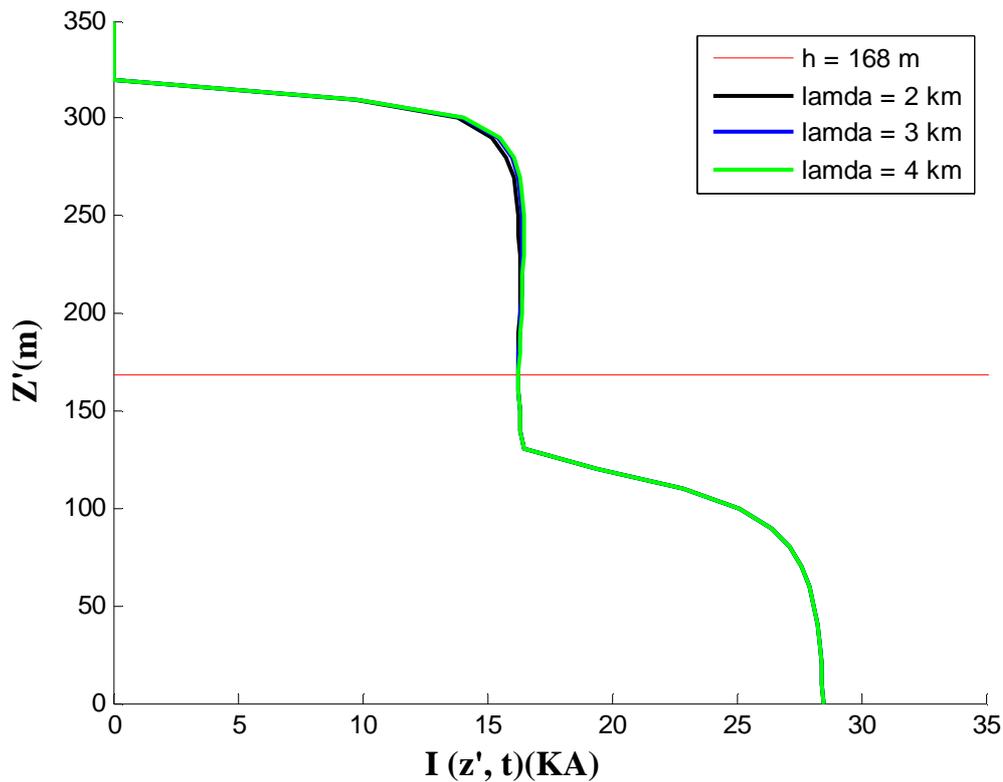


Figure VI.13 Influence du facteur λ sur la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour le modèle MTLE pour $t = 1$ (Notre résultat).

D'après ce résultat on remarque que λ n'influe pas sur la distribution du courant dans la présence de la tour.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le courant au sommet et à la base de la tour on a illustré aussi la distribution spatio-temporelle du courant le long de la tour et le long du canal de foudre pour les différents modèles de l'ingénieur. A partir ce chapitre nous avons aussi vu l'influence de la hauteur du canal de foudre et la tour sur la distribution du courant suivant la modèle MTLE et on a présenté l'influence du facteur λ et la vitesse du courant sur la distribution spatio-temporelle du courant d'arc en retour.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Afin de protéger nos installations électriques et nos structures contre les coups de foudre, il faut tenir compte de la distribution spatio-temporelle du courant de l'arc en retour. Dans ce travail nous avons modélisé ce courant à la présence d'une tour à partir du modèle de Rachidi.

Après la réalisation de ce travail, nous déduisons les conclusions suivantes :

- La distribution du courant le long de la tour est indépendante des modèles, ainsi que tous les modèles ont une discontinuité au front du courant de l'arc en retour. Cette discontinuité est très importante pour les modèles BG et TCS ce qui favorise les autres modèles.
- la distorsion du courant augmente au temps qu'on s'approche du sol et l'autre extrémité de la tour, cela est expliquée par la réflexion du courant sur les deux extrémités.
- Le facteur λ n'influe pas sur la distribution du courant dans la présence de la tour.
- la variation de la vitesse du courant v influe seulement sur la distribution du courant au niveau du canal de la foudre.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C.Gary « la foudre des mythologies antiques a la recherche moderne ». Edition Masson, 1994.
- [2] F. Rachidi « La foudre et ses effets électromagnétiques". Eté 2004.
- [3] Lassoued Issa et slimani soufiane« Etude de la foudre ». Mémoire de fin d'étude, juin 2006.
- [4] Cahier technique 168 : « la foudre et les installations électriques HT ».juillet 1993.
- [5] François Gerard : « Généralité sur la foudre et les surtensions ».Octobre 2008
- [6] David Orzan" Couplage externe et interne entre un champ electromagnetique et un reseau de lignes multifilaires". Thèse de doctorat, 1998.
- [7] F., Rachidi, "Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes: modélisation et simulation", Thèse N° 974 (1991), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [8] Y. T Lin., M. A. Uman, J. A. Tiller, R. D. Brantley, W. H. Beasley, E. P. Krider, and C. D. Weidman, "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two station measurements", Journal of Geophysical Research, 84 (C10), pp. 6307-6314, 1979.
- [9] Christian Bouquegneau « la foudre : Phénoménologie, effets et protection » 2004.
- [10] Mimouni Abdenbi « Analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre » thèse de doctorat 2007.
- [11] M'ziou Nassima « Modélisation de la Décharge de Foudre en Vue d'une Application en Compatibilité Electromagnétique » .Thèse de doctorat, juillet 2009
- [12] A.Darcherif, « Contribution à la modélisation des phénomènes d'interférences électromagnétiques dans les réseaux électriques », Thèse de Doctorat de L'INPG de Grenoble, 1990.
- [13] N. Theethayi, and V. Cooray "On the representation of the lightning return stroke process as a current pulse propagating along a transmission line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20 (2), pp. 823-837, 2005.
- [14] N. Theethayi, and V. Cooray "Transmission line model – an idealisation or reality", Power tech Conference, June 23-26, Bologna, Italy, 2003.

- [15] C.A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel base current: A review and comparison", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95, n°. D12, pp. 20395 -20408, 1990.
- [16] V. Rakov and M.A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40 (4), 403-26, 1998.
- [17] C. Gomes and V. Cooray, "Concepts of lightning return stroke models", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 42 (1), pp. 82-96, 2000.
- [18] Ghemri Boualem, "etude et analyse du couplage champ electromagnetique-lignes de transmission".Thèse de magister .
- [19] V.Rakov and A. Dulzon, "A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations", 9th International Zurich Symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 229-235, 1991.
- [20] C.E.R. Bruce and R.H. Golde, "The lightning discharge", *The journal of the institution of electrical engineers*, 88 (6), 487-520, 1941.
- [21] J.M. Cević, F. Heidler, A. Schwab, « The dependence of lightning current parameters on the channel height », *Proceedings of The International Conference on Lightning and Static Electricity*, 1999, pp: 344.
- [22] K. Berger, B. Anderson, and H. Kroninger, " Parameters of lightning flashes", *Electra*. no., 41, 23-37, 1975.
- [23] E. Petrache, "Lightning electromagnetic field coupling to overhead transmission line networks and to buried cables", Thèse N° 3024 (2004), Ecole Polytechnique Federally de Lausanne.
- [24] J. L. Bermudez " Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects", Thèse N° 2741 (2003), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [25] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger « Parameters of lightning flashes », *Electra* N° 41, pp. 23-37, 1975.
- [26] V.A. Rakov "Lightning discharges triggered using rocket-and-wire techniques",in *Recent Research Development on geophysics*, edited by R. Signpost, pp. 141-171, India, 1999.
- [27] V. A. Rakov "Transient response of a tall object to lightning", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43 (4), pp. 654-661, 2001.

[28] V. Shostak "Modeling of return stroke current for lightning events at a complex tall structures", International Workshop on Electromagnetic radiation from lightning to tall structures, pp. 4, Toronto, Canada, 2001.

[29] F. Rachidi, J. L. Bermudez, and M. Rubinstein "Statistical evaluation of lightning current parameters from remote electromagnetic field measurements", 26th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp 96-99, Cracow, Poland, 2002.

[30] F. Rachidi, "Modeling Lightning Return Strokes to Tall Structures": A Review, Journal of Lightning Research, Vol. 1, pp 16-31, 2007.