

RÉPUBLIQUE ALGIRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT de GÉNIE ÉLECTRIQUE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques et haute tension

**Comportement du champ électromagnétique de la foudre en
présence de la tour Skytree au Japon, étude théorique et
Simulation.**

Préparé par :

AROSSI ABDELHAK

KHALED KHODJA AMAR

Devant du jury

Grade

Mme. H. BOURENANE

MAA

Président

Mr. K.HABRI

MAA

Examineur

Mr. A. MOKHTARI

MAA

Examineur

Mme. A.LAKHDAR

MAA

Encadreur

PROMOTION : 2021/2022

Remerciements

*On remercie Allah le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté
d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier très vivement notre encadreur
Mme. **Asmaa LAKHDAR** pour le suivi, les conseils, la confiance et qui grâce à elle
nous avons pu réaliser ce mémoire.*

*Nous remercions vivement les membres du jury de nous faire honneur d'examiner et
d'évaluer notre travail.*

*Le grand remerciement va aussi à tous les enseignants du département de génie
électrique.*

*A tous nos amis, collègues et tous les membres de nos familles pour leur soutien et
leur compréhension.*

Résumé :

Dans ce mémoire, nous présentons une analyse du comportement du champ électromagnétique à proximité de la tour Tokyo Skytree de 634 m de hauteur frappée par la foudre. Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à des distances proches de la tour pour deux points d'observation, à savoir au-dessus et en-dessous de la surface du sol, en utilisant la méthode FDTD-2D (Finite Difference Time Domain). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par la foudre sur la tour CN au Canada. Le champ électromagnétique a le même comportement pour les deux tours, la seule différence se situe au niveau de la valeur du pic initial et du temps de montée des composantes du champ électromagnétique. Les résultats obtenus montrent que les champs électromagnétiques au-dessus et en-dessous du sol sont nettement affectés par la présence de la tour.

Table des matières

Sommaire

Introduction générale :	2
-------------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur le phénomène de foudre.

I.1. Introduction:	5
I.2. Phénomène de foudre :	6
I.2.1. Définition :	6
I.2.2. Mécanisme de formation des nuages orageux :	6
I.2.3. Mécanisme d'électrisation des nuages orageux :	6
I.2.4. Type de coup de foudre :	7
a. Coup de foudre descendant négatif :	7
b. Coup de foudre descendant positif :	7
c. Coup de foudre ascendant négatif :	8
d. Coup de foudre ascendant positif :	8
I.3. Effets de la foudre:	9
I.3.1. Effets électriques:	9
I.3.2. Effets thermique:	9
I.3.3. Effets électromagnétiques:	9
I.3.4. Effets électrodynamiques:	10
I.4. Moyens de mesure du courant de l'arc en retour:	11
I.4.1. Méthode du déclenchement artificiel de la foudre:	11
I.4.2. Utilisation des tours instrumentées:	12
a. Tour d'Ostankino à Moscow:	12
b. Tour CN à Toronto :	13
c. Tour Peissenberg en Allemagne:	14
d. Tour Skytree au Japon :	14
I.4.3. Estimation indirecte des courants à partir des systèmes de détection de la foudre :	15
I.5. Protection contre les effets néfastes de la foudre :	15

I.5.1. Câble de garde:.....	16
I.5.2. Paratonnerres à tige simple:	16
I.5.3 Cages maillées :.....	17
I.6.Conclusion:	18

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

II.1. Introduction:	20
II.2. Modélisation du courant à la base du canal :.....	20
II.2.1. Modèle bi-exponentiel:.....	20
II.2.3 Modèle de Heidler:.....	21
II.2.2.3 Modèle hybride :	23
II.3. Présentation des modèles de la distribution spatiotemporelle du courant de l'arc en retour initié au sol :.....	24
II.3.1. Modèle RLC :	24
II.3.2. Modèle électromagnétiques:.....	24
II.3.3. Modèles d'ingénieur:.....	24
II.3.3.1. Modèle de Bruce et Gold (BG):.....	24
II.3.3.2. Modèle "Ligne de Transmission" (Transmission Line, TL) :.....	25
II.3.3.3. Modèle de "ligne de transmission modifié" (Modified Transmission Line, MTL model) :.....	26
II.3.3.4. Modèle « Source de Courant Mobile » (Travelling Current Source, TCS):.....	26
II.3.4. Généralisation des modèles ingénieurs :	27
II.4. Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal et le long de l'objet élevé :	28
II.4.1. Modèle de Rachidi et al :.....	28
II.4.2. Modèle de Baba et Rakov :.....	30
II.4.3. Comparaison entre les deux modèles :.....	31
a. Modèle de Rachidi et al :	31
b. Modèle de Baba et Rakov :.....	31

II.4.4. Les inconvénients des deux modèles :	32
II.5. Calcul du champ électromagnétique par la méthode des différences finies FDTD :.....	32
II.5.1. Principes de base de la méthode FDTD :	33
II.5.2. Conditions aux limites absorbantes :.....	36
II.6. Conclusion :.....	36

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l’interaction d’un coup de foudre avec la tour Skytree.

III.1. introduction:	39
III.2.Géométrie du problème:.....	39
III.3. Distribution spatio-temporelle du courant de foudre :.....	40
III.4. Résultats et discussion :	41
III.4.1.Champ électromagnétique de la foudre au-dessus du sol en présence de la tour Skytree :.....	41
III.4.2. Champ électromagnétique souterrain :	44
III.4.3. Effet de la hauteur de l’objet élevé sur le rayonnement EM de la foudre:.....	46
III.5. Conclusion:.....	48
Conclusion générale:	51
Références bibliographiques :.....	54

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur le phénomène de foudre.

Figure I. 1 : La distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage et la répartition du champ électriques au sol au moment au va éclater la foudre. [4]	7
Figure I. 2 : Classification des coups de foudre selon Berger et al. [6].....	8
Figure I. 3: Exemple d'un déclenchement artificiel de la foudre en Floride [12].....	11
Figure I. 4: Equipements expérimentaux utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre (a) Lanceur fixe, (b) lanceur mobile, (c) fusées. [13].....	11
Figure I. 5: Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d'Ostankino, Moscow [14]	12
Figure I. 6: Exemple de mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée. Tour CN à Toronto au Canada. [15]	13
Figure I. 7: Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m [15].....	13
Figure I. 8: (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour [16].	14
Figure I. 9: La tour Tokyo Skytree. [17]	15
Figure I. 10: Les fils de garde. [8].....	16
Figure I. 11: Exemple de protection par tige simple [9].....	17
Figure I. 12: Exemple de protection par cage maillée [10].	18

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

Figure II. 1: Courant à la base du canal de foudre, correspondant au premier arc en retour et à l'arc en retour subséquent, calculés à l'aide du modèle bi-exponentiel [12].....	21
Figure II. 2: Courants à la base du canal d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (modèle d'Heidler et modèle bi-exponentiel). [12]	22
Figure II. 3: Courant à la base du canal de foudre modélisé par le modèle hybride. [23].....	23
Figure II. 4: Distribution spatiale et temporelle du courant d'arc en retour pour le modèle BG. [25]	25
Figure II. 5: Distribution spatiale et temporelle du courant d'arc en retour pour le modèle TL. [25]	26
Figure II. 6: Distribution spatiale et temporelle du courant d'arc en retour pour le modèle TCS. [25]	27
Figure II. 7: Propagation du courant le long de la tour et le long du canal de foudre [12].	30

Figure II. 8: Principe de discrétisation temporelle en différences finies [30].	33
Figure II. 9: Maillage spatial 3D en différences finies- modèle de Yee [13]	34
Figure II. 10: Domaine de calcul à deux dimensions (2D) avec un système à coordonnées cylindriques [13].	35

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l’interaction d’un coup de foudre avec la tour Skytree.

Figure III. 1: Géométrie du problème.	39
Figure III. 2: Formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre au-dessus du sol.	42
Figure III. 3: Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre au-dessus du sol.	43
Figure III. 4: Formes d'ondes du champ magnétique de la foudre au-dessus du sol.	43
Figure III. 5: Formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre en-dessous du sol.	44
Figure III. 6: Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre sous le sol.	45
Figure III. 7 : Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre sous le sol.	45
Figure III. 8: Formes d'ondes du champ électrique vertical calculées pour différentes valeurs de conductivité du sol à une distance de 27 km par Araki. [17]	46
Figure III. 9: Formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre au-dessus du sol.	47
Figure III. 10: Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre au-dessus du sol.	47
Figure III. 11: Formes d'ondes du champ magnétique de la foudre au-dessus du sol.	48

Liste des tableaux

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

Tableau II. 1: Paramètres des fonctions exponentielles [19].	21
Tableau II. 2: Paramètres de la somme de deux fonctions d' Heidler. [6]	22
Tableau II. 3: P (z') et v pour les cinq modèles d'ingénieur [4].....	28

Introduction générale

Introduction générale :

La foudre est l'un des phénomènes naturels les plus étudiés, à cause de son pouvoir de destruction et pour son apparence magnifique qui reste jusqu'à aujourd'hui mystérieuse. Initialement, le phénomène de la foudre était considéré comme un message ou un symbole de divinités dans différentes cultures (religion et / ou mythologies), de nos jours cette fausse croyance a été remplacée par une connaissance scientifique, les chercheurs du monde entier ont contribué à l'avancement de notre compréhension de la décharge de foudre. Cette dernière est une source électromagnétique presque imprévisible et sa caractérisation expérimentale est tout à fait une tâche difficile. Le courant de foudre est certainement un des paramètres les plus importants à déterminer pour toutes les études sur les effets électromagnétiques de la foudre. Il convient de noter que ce courant ne peut être mesuré qu'à la base du canal et l'utilisation des modèles est nécessaire pour prédire la distribution spatio-temporelle du courant le long du canal. Les structures de grande taille ou des objets élevés sont des moyens intéressants pour mesurer les courants de foudre, car ils sont souvent frappés par la foudre. En effet, la majeure partie de la disposition des données sur les courants de foudre sont obtenues en utilisant des tours instrumentées (par exemple la tour CN à Toronto au Canada). Une autre technique dont les données sur le courant de foudre peuvent être obtenues grâce au déclenchement artificiel de la foudre en utilisant des petites fusées. Cependant, dans cette mémoire, nous allons essentiellement se concentrer sur la foudre tombant sur les objets élevés.

L'objectif de ce mémoire est d'évaluer les composantes du champ électromagnétique proche engendré par l'interaction de la foudre avec la tour Skytree au Japon de 634 m de hauteur frappée par un éclair. Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à des distances proches de la tour pour deux points d'observation, à savoir au-dessus et au-dessous de la surface du sol, en utilisant la méthode FDTD-2D (Finite Difference Time Domain). Le modèle d'ingénieur adopté dans cette étude et celui qui prend en compte la présence de la tour. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par l'interaction de la foudre sur la tour CN au Canada.

Notre mémoire est subdivisé en trois chapitres :

-Le chapitre I entame une généralité sur le phénomène de foudre ainsi qu'à ses effets néfastes qui peuvent être destructeurs. Il présente également les moyens de mesure du courant de l'arc en retour et les moyens de protection contre ce phénomène.

Introduction générale.

-Le deuxième chapitre est réservé à la modélisation du champ électromagnétique de la foudre. En premier lieu, nous décrivons les différentes classes des modèles de l'arc en retour plus précisément les modèles d'ingénieur, nous aborderons ensuite les approches mathématiques utilisées dans la littérature pour le calcul du champ électromagnétique de la foudre.

-Dans le chapitre III nous présentons une analyse du comportement du champ électromagnétique à proximité de la tour Skytree à Tokyo frappée par une foudre. Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à des distances proches de la tour pour deux points d'observation. Les résultats sont comparés à ceux obtenus par l'interaction de la foudre sur la tour CN au Canada.

Chapitre I

Généralité

sur le

phénomène

de foudre

I.1. Introduction:

Dans l'histoire de l'humanité, la foudre a peut-être été la première source de feu, fondamentale pour le développement technique. Ainsi, les éclairs ont éveillé la fascination, étant incorporés dans d'innombrables légendes et mythes représentant le pouvoir des dieux. Des recherches scientifiques ultérieures ont révélé leur nature électrique et, depuis lors, les décharges ont fait l'objet d'une surveillance constante, en raison de leur relation avec les systèmes de tempête.

La foudre est une des manifestations des orages, c'est une perturbation atmosphérique violente, accompagnée d'un fort bruit de tonnerre et de rafales de vent. La naissance de ces phénomènes orageux est généralement subordonnée à une grande instabilité atmosphérique, soit à des différences importantes de température entre l'air au niveau du sol et l'air en altitude. Ceci explique pourquoi les orages « électriques » sont plus généralement observés en été qu'en hiver où cette différence de température peut être suffisante pour générer une grande instabilité.

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique disruptive de grande intensité qui se produit dans l'atmosphère, entre des régions chargées électriquement, et peut se produire soit à l'intérieur d'un nuage (décharge intra-nuageuse), soit entre plusieurs nuages (inter-nuageux), soit entre un nuage et le sol (nuage-sol ou sol-nuage). Bien que les décharges intra-nuageuses et inter-nuageuses soient plus fréquentes, les décharges nuage-sol présentent un plus grand danger pour l'homme ainsi que pour le réseau et les équipements électriques.

La foudre est généralement liée à une situation atmosphérique instable permettant la formation de cumulo-nimbus, masse puissante de nuages sombres. Les cumulo-nimbus sont des lieux propices aux phénomènes orageux, générateurs de foudre.

Certaines théories scientifiques considèrent que ces décharges électriques peuvent avoir été fondamentales dans l'émergence de la vie, en plus d'avoir contribué à son maintien [1].

Ce chapitre sera consacré entièrement à l'étude expérimentale de la foudre en décrivant brièvement le mécanisme de formation des nuages, les différents types des coups de foudre, les effets de la foudre et les moyens de mesures expérimentales ainsi que de protections du phénomène de foudre.

I.2. Phénomène de foudre :

I.2.1. Définition :

La foudre est une très violente et brève décharge d'électricité, équivalente à une immense étincelle (un courant transitoire de très forte amplitude) de plusieurs kilomètres de long qui traverse l'espace atmosphérique depuis la masse des nuages orageux électrisés jusqu'au sol. [2]

I.2.2. Mécanisme de formation des nuages orageux :

Les nuages orageux sont généralement de type cumulo-nimbus. Ils se forment sous l'effet de courants d'air chaud ascensionnels qui montent à des vitesses importantes, entraînant dans ces turbulences des centaines de milliers de tonnes d'eau. Le mouvement est si puissant que le sommet du nuage s'écrase contre une couche supérieure de l'atmosphère (la stratosphère) ce qui explique qu'ils ont très souvent une forme caractéristique dite, « en enclume ». Leur base peut atteindre des surfaces de plusieurs dizaines de km² et ils s'étendent entre des altitudes allant de 2 à 20 km. [3]

I.2.3. Mécanisme d'électrisation des nuages orageux :

Le prodigieux brassage à l'intérieur de ces nuages arrache des électrons aux différents éléments d'eau et de glace qui se télescopent. Ces charges électriques vont se répartir à l'intérieur du nuage, majoritairement en bas de celui-ci pour les charges négatives (du fait de la présence de gouttes d'eau, chargées négativement) et en haut du nuage pour les charges positives (à cause de l'entraînement vers le haut des cristaux de glace légers, chargé positivement). Cette répartition des charges ne peut jamais être parfaite du fait qu'il existe toujours des îlots de charges positives en serrés dans la masse de charges négatives voir figure I.1 qui montre la distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage et la répartition du champ électriques au sol au moment au va éclater la foudre. [4]

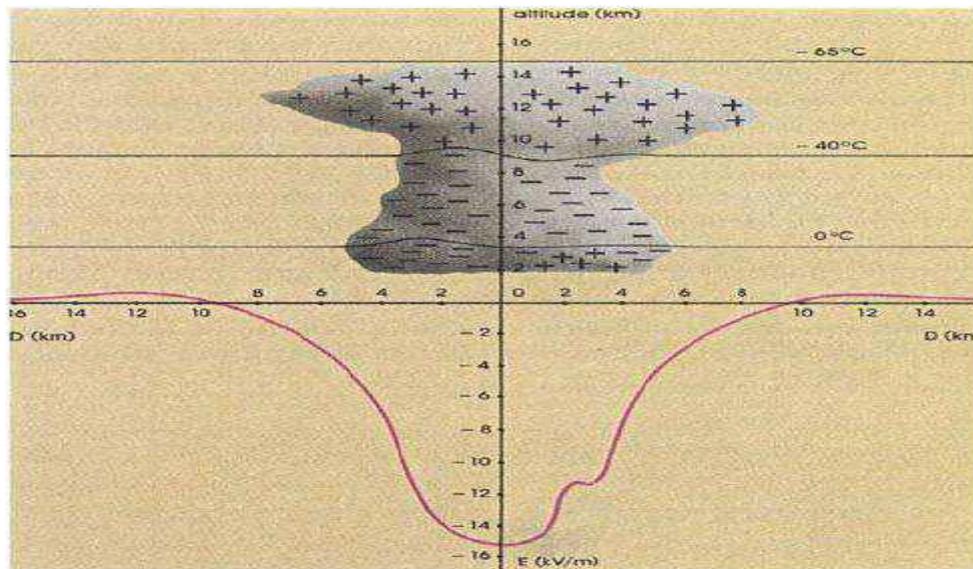


Figure I. 1 :La distribution des charges électriques dans la masse d'un nuage et la répartition du champ électrique au sol au moment où va éclater la foudre. [4]

I.2.4. Type de coup de foudre :

La première phase d'un coup de foudre est toujours une pré-décharge peu lumineuse, ou un traceur qui progresse à travers l'air avec une vitesse relativement faible. Cette pré-décharge à son origine peut être, soit dans le nuage et elle progresse alors en direction du sol, ou bien au niveau du sol et progresse vers le nuage.

On classe en premier lieu, les coups de foudres selon le sens de développement du traceur (ou leader) [5], [6].

a. Coup de foudre descendant négatif :

Le bas du nuage est chargé négativement. Les décharges sont multiples et variées: à une première décharge partielle de durée de front de 10 à 15 μ s succèdent des décharges d'attaque plus raides et de descente plus douces [2]. Voir la figure I.2.

b. Coup de foudre descendant positif :

Le bas du nuage est chargé positivement. Une seule décharge apparaît durant 0,1 à 0,2s. La durée d'attaque varie entre 20 et 50. L'amplitude du courant des "coups de foudre positifs" est généralement supérieure à celle des "coups de foudre négatifs" [7]. Voir la figure I.2.

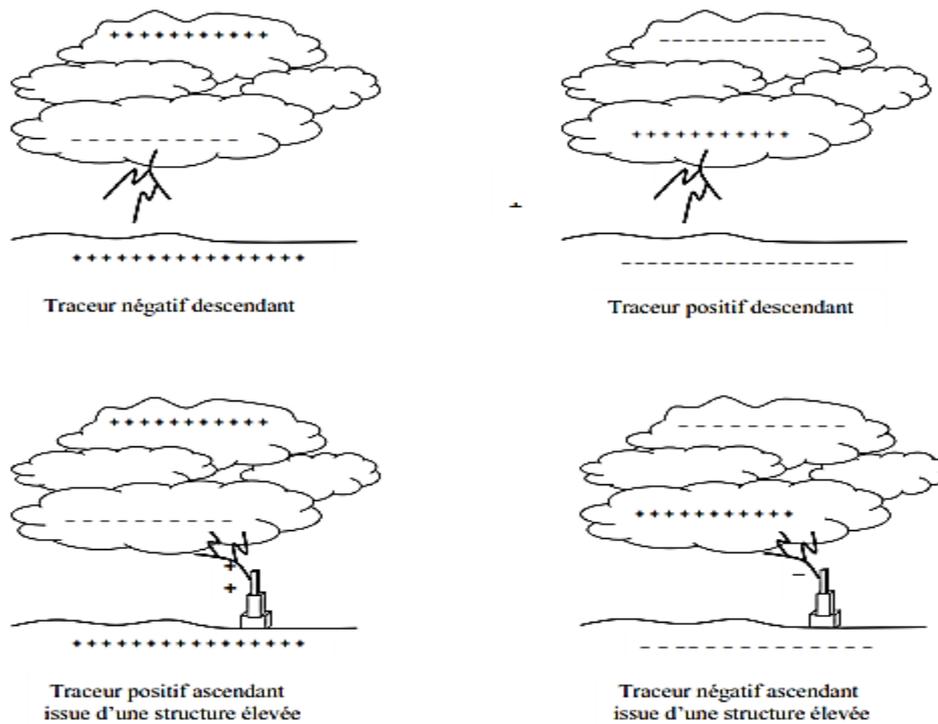


Figure I. 2 :Classification des coups de foudre selon Berger et al. [6]

c. Coup de foudre ascendant négatif :

Dans un champ négatif, les effluves d'effet couronne qui apparaissent au sommet des aspérités du sol sont des émanations de type positive, puisque par l'effet d'induction, le sol porte des charges positives (voir la figure I.2). Ces émanations se développent d'autant plus loin et avec d'autant plus d'intensité que les dimensions de l'aspérité sont plus importantes. A partir d'une certaine taille de l'aspérité, entraînant une certaine intensité d'effluve, le phénomène se modifie brusquement et l'effluve se transforme en une décharge ascendante, qui se développe suffisamment loin pour atteindre le nuage (coup de foudre ascendant) [8].

d. Coup de foudre ascendant positif :

Des mesures optiques ont montré que la vitesse de progression des traceurs ascendants positifs était comprise entre 0,2 et 1 m/s [8]. Au cours de cette progression, le leader se ramifie plusieurs fois, et on assiste à la formation d'arborescences (Voir la figure I.2), avec des ramifications orientées vers le haut, chacune des illuminations étant provoquée par le passage d'une impulsion de courant intense, d'amplitude excédant parfois 20000 ampères. Ce courant croît très rapidement jusqu'à la valeur de crête, le temps de montée étant inférieur à la

Chapitre I : Généralité sur le phénomène de foudre.

microseconde, puis décroît plus lentement, avec une durée de l'ordre de la centaine de microsecondes [8].

I.3. 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 [9].

I.3.1. Effets électriques:

Dans le chemin varié et complexe emprunté 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.3.2. 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'arbre, de mats mauvais conducteurs, de poutres et de murailles là où s'accumule l'humidité (fortes densité de courant). Dans des sols mauvais conducteurs (silice) il y a vitrification au passage du courant (formation de fulgurites).

Les décharges de longue durée entraînent facilement une mise à feu. Il faut prendre garde aux mauvais contacts [9].

I.3.3. Effets électromagnétiques:

Les effets électromagnétiques 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 [10].

Lorsqu'un coup de foudre tombe à proximité d'une ligne, le champ électromagnétique intense génère par l'arc en retour induit des surtensions, qui peuvent dans certains cas provoquer un

Chapitre I : Généralité sur le phénomène de foudre.

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. A 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 [10]. Une distinction est souvent établie entre :

- Le coup de foudre «direct» touchant une ligne,
- Le coup de foudre «indirect» tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône métallique, ou, ce qui revient au même, sur le câble de garde, (mis à la terre, ce câble relie lessommets des pylônes, il est destiné à protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs) [10].

I.3.4.Effets électrodynamiques:

Les courants électriques ayant la propriété d'exercer des forces sur les conducteurs qu'ils traversent (loi de Laplace), les effets engendrés sont dus à ces forces qui dépendent de l'intensité du courant et de la distance entre les conducteurs. Outre les forces de répulsion qui, dans de rares cas peuvent causer des déformations de conducteurs, il y a aussi des puissants efforts d'attraction entre conducteurs traversés par le courant de foudre et dont l'écartement est assez faible.

C'est ainsi que des antennes tubulaires minces s'écrasent et que des conducteurs parallèles s'entrechoquent. Si le courant de foudre parcourt des conducteurs électriques isolés très rapprochés, l'isolant qui les sépare est aplati.

Pendant un très violent coup de foudre (100 kA), ces forces atteignent 105 N par mètre de conducteur pour un écartement de 5 mm, et 103 N par mètre pour 50 cm d'écartement. Pour des écartements plus grands, les efforts devraient presque toujours être sans conséquence [11].

Les conséquences de ces efforts électrodynamiques se traduisent par la déformation des structures métalliques, l'explosion d'ouvrages en béton armé, le déplacement ou l'arrachement de connexions électriques, l'écrasement de tubes métalliques ainsi que les blindages des câbles électriques, etc. [11].

I.4. Moyens de mesure du courant de l'arc en retour:

Pour mesurer directement le courant de l'arc en retour à la base du canal, 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 :

1. Déclenchement artificiel de la foudre
2. L'utilisation des tours instrumentées
3. L'utilisation des systèmes de détection la foudre (LLS).

I.4.1. Méthode du déclenchement artificiel de la foudre:

Cette méthode s'appuie sur la technique fusée-fil [12], elle permet de provoquer la foudre lors de passage de nuages orageux et de l'attirer en un lieu déterminé.

A l'approche d'un nuage orageux, on lance une petite fusée connectée au sol par un fil mince métallique. 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 (Voir la figure I.4)



Figure I. 3: Exemple d'un déclenchement artificiel de la foudre en Floride [12].



Figure I. 4: Equipements expérimentaux utilisés lors d'un déclenchement artificiel de la foudre (a) Lanceur fixe, (b) lanceur mobile, (c) fusées. [13]

I.4.2. Utilisation des tours instrumentées:

Comme la foudre frappe souvent les objets élevés, les chercheurs utilisent aujourd'hui des tours instrumentées afin d'obtenir des données concernant le courant de coup de foudre et ses caractéristiques ainsi que pour le champ électromagnétique rayonné.

a. Tour d'Ostankino à Moscow:

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. La figure I.5 représente l'emplacement des capteurs de mesure de courant [14].

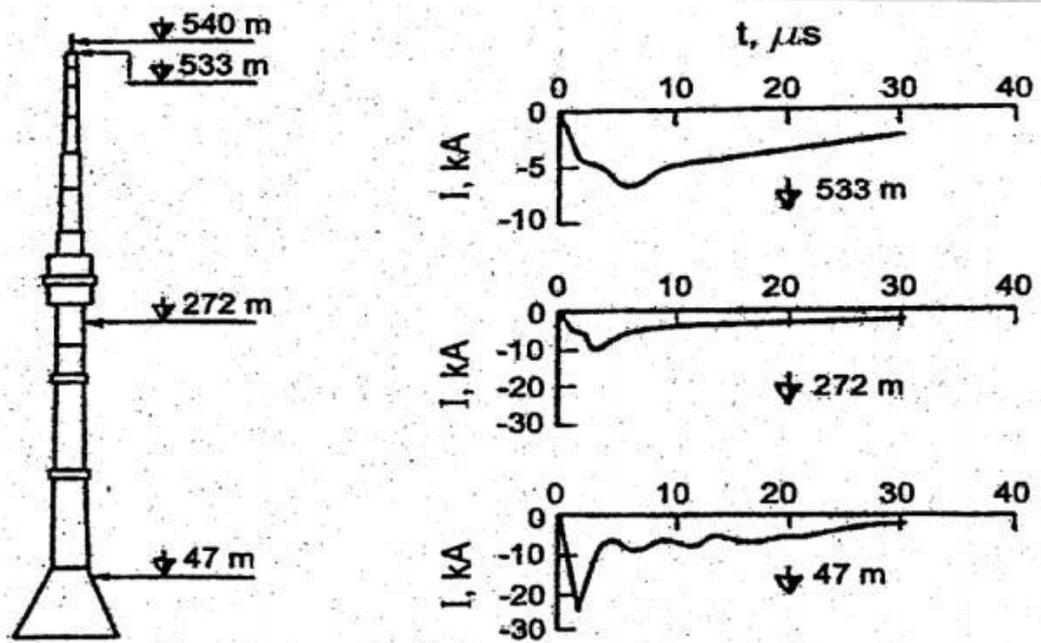


Figure I. 5: Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d'Ostankino, Moscow [14]

b. Tour CN à Toronto :

La tour CN est parmi les tours les plus élevées au monde, elle est de 553 m de hauteur (voir la figure I.6).



Figure I. 6:Exemple de mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée. Tour CN à Toronto au Canada. [15]

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 (I.7). On a les mêmes remarques que pour le cas précédent (La tour d'Ostankino), sauf que dans ce cas, la forme du courant est plus complexe, ceci est dû à la structure complexe de la tour CN.

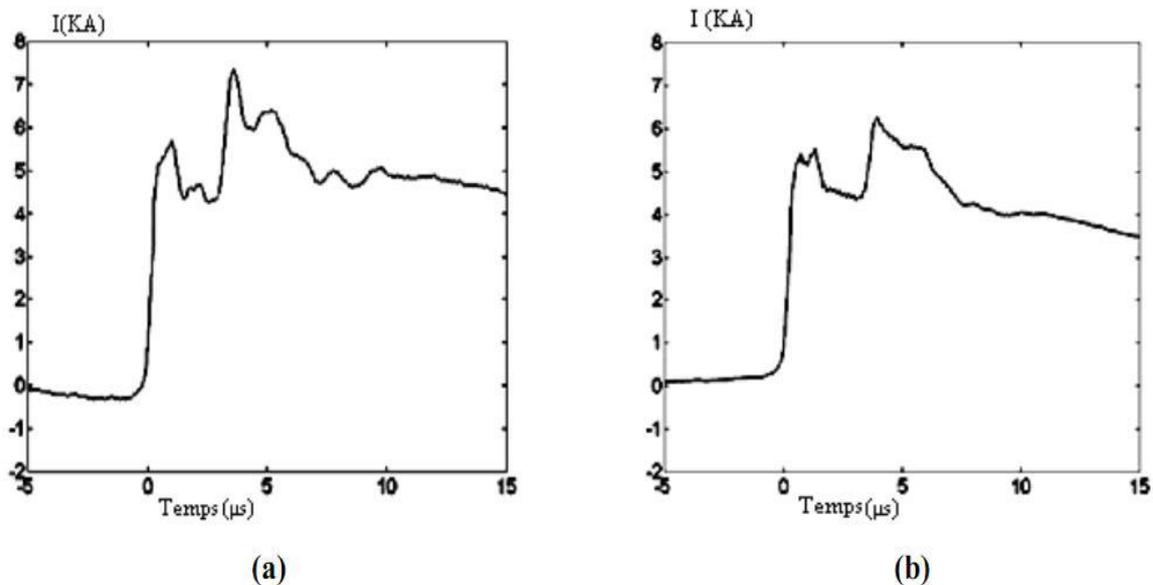


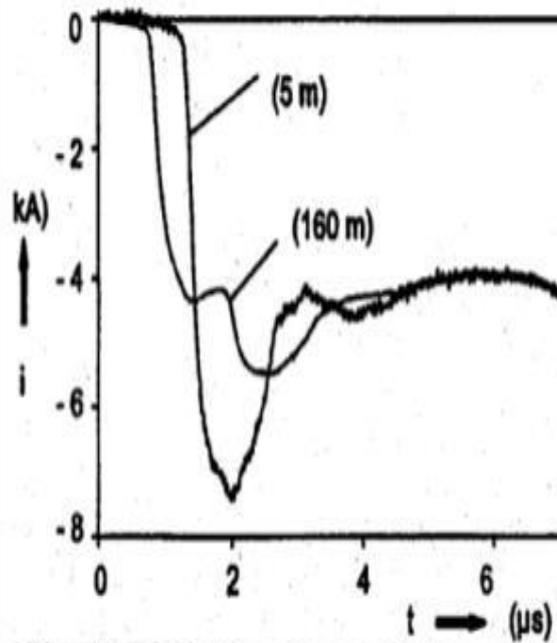
Figure I. 7: Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m [15].

c. 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 13 m. (La figure I.8.a) montrée une photographie de la tour Peissenberg et (La figure I.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. [16].



(a)



(b)

Figure I. 8: (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour [16].

d. Tour Skytree au Japon :

La Tokyo Skytree est une tour japonaise de diffusion numérique, inaugurée en 2012 dans le quartier de Sumida aux abords d'Asakusa, au nord-est de la capitale. Elle est l'une des plus hautes du monde, avec un point culminant à 634 mètres (Voir la figure I.9). Ses deux

observatoires ainsi que le centre commercial à son pied font, depuis son ouverture, partie des principales attractions de Tokyo [17].



Figure I. 9: La tour Tokyo Skytree. [17]

I.4.3. Estimation indirecte des courants à partir des systèmes de détection de la foudre :

Un détecteur de foudre est un appareil qui permet de capter l'onde électromagnétique générée par un éclair provenant d'un orage [18]. Les détecteurs de foudre sont utilisés par les services météorologiques, comme le Service météorologique du Canada, Météo-France et le National Weather Service américain, pour suivre les orages et prévenir les populations de leur arrivée. Différentes autres organisations comme celles pour la prévention des feux de forêts, le transport électrique, la fabrication de matériel explosif et l'industrie du transport aérien se fient à ces appareils pour coordonner leurs opérations.

I.5. Protection contre les effets néfastes de la foudre :

Les systèmes de protection doivent répondre à deux objectifs :

- En cas d'impact direct sur la structure, le système de protection doit écouler le courant de foudre vers la terre en évitant des amorçages avec les différentes parties de l'installation. Ce type de protection est assuré par des paratonnerres constitués par des tiges simples, des fils tendus ou encore une cage maillée.
- Limiter ou supprimer les contraintes des surtensions dans les installations. Cette protection est généralement assurée par des dispositifs composés de parafoudres à gaz, et/ou varistances.

[11]

I.5.1. Câble de garde:

Le fil tendu ou bien de garde, est constitué d'un ou plusieurs conducteurs d'un diamètre inférieur ou équivalant au conducteur de phase d'une ligne.

Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône (figure I.10).

Le câble protecteur (câble de garde), dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de la foudre. [8]

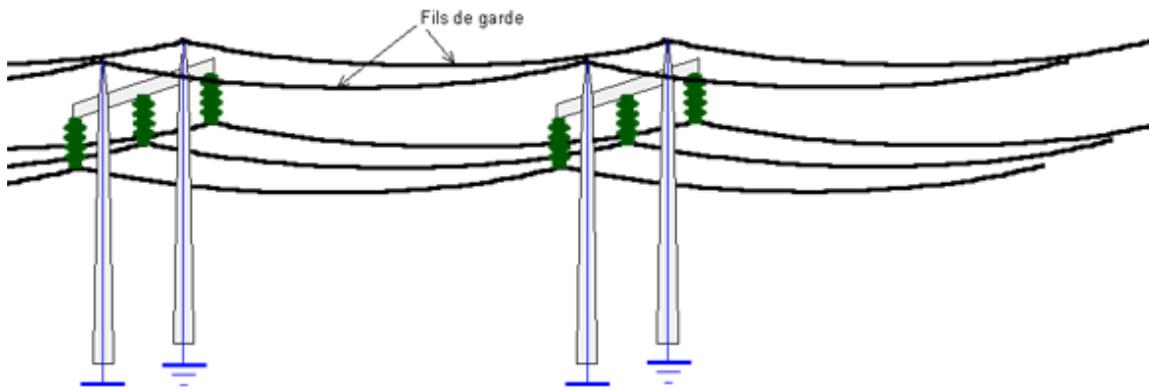


Figure I. 10: Les fils de garde. [8]

I.5.2. Paratonnerres à tige simple:

Le paratonnerre à tige simple est constitué d'une tige simple effilée à son extrémité de manière à favoriser l'effet de pointe. Le but est de capter la foudre sur une zone donnée afin d'écouler le courant de foudre vers la terre par l'intermédiaire de conducteurs de descente. La zone de protection assurée par un paratonnerre est directement liée à sa hauteur et peut être déterminée à l'aide du modèle de la sphère fictive proposée dans la norme française NF EN 62305. Ce type de protection est plus particulièrement réservé aux petites structures de type, pylône, cheminée industrielle, mat ou cuve.

Comme indiqué sur la Figure I.11 l'installation d'une tige simple comporte

- Une tige simple (biseautée à son extrémité).
- Un ou plusieurs conducteurs de descente.
- Un réseau de terre. [9]

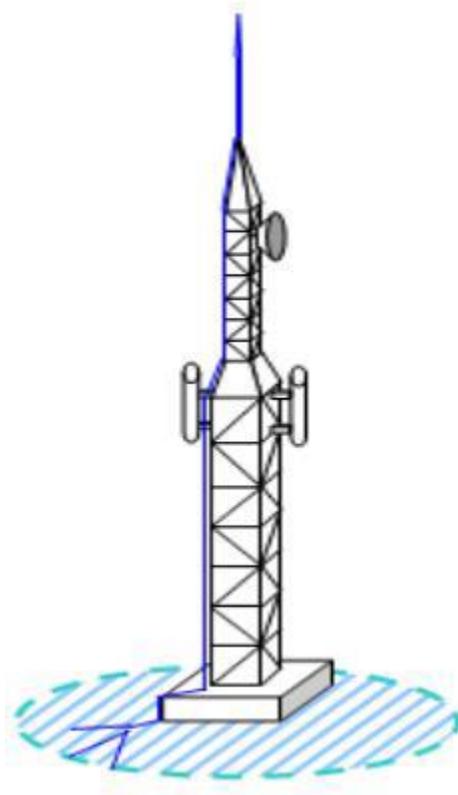


Figure I. 11: Exemple de protection par tige simple [9].

I.5.3 Cages maillées :

Le principe d'une protection par cage maillée, présenté sur la Figure I.12, consiste à favoriser la répartition et l'écoulement vers la terre du courant de foudre par un ensemble de conducteurs et de prises de terre. Une cage maillée est constituée d'un nombre important de conducteurs de descente, elle constitue de ce fait une solution intéressante lorsque le matériel situé à l'intérieur du bâtiment est sensible aux perturbations électromagnétiques. En effet, le courant de foudre obéit à la loi de Kirchoff, et la faible valeur du courant circulant dans les mailles permet de diminuer le couplage de type inductif. [10]

Une installation de cage maillée doit inclure :

- Des dispositifs de capture des décharges atmosphériques constitués par des pointes de choc et des conducteurs de toiture;
- Des conducteurs de descente;
- Des prises de terre;
- Une liaison équipotentielle dé-connectable entre chaque prise de terre et le circuit de terre général de la structure.

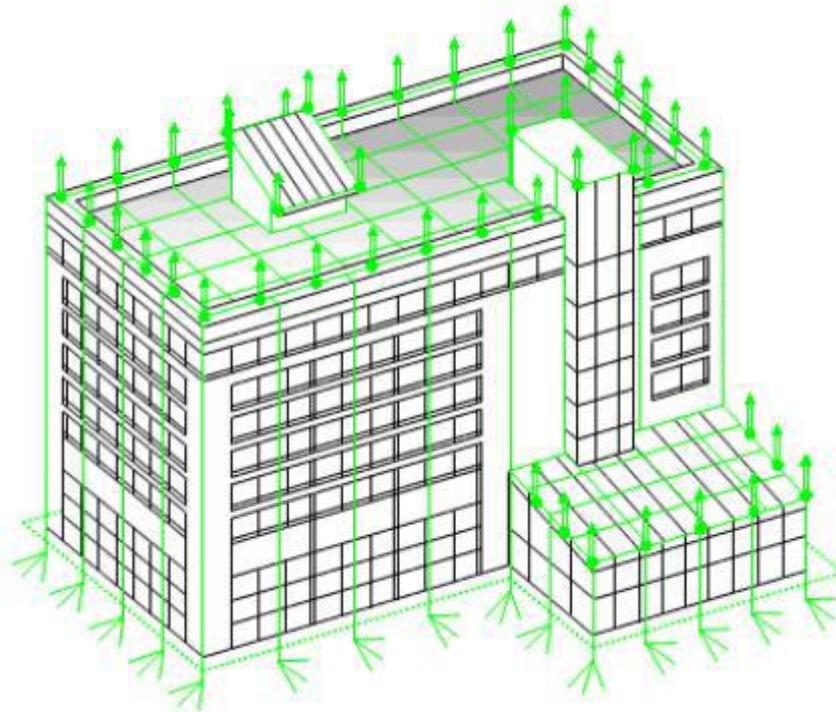


Figure I. 12: Exemple de protection par cage maillée [10].

I.6.Conclusion:

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude brève de la phénoménologie de la foudre ainsi qu'à ces caractéristiques, les mécanismes de génération des charges dans les nuages orageux, ainsi des moyens de mesures notamment le principe de déclenchement artificiel de cette dernière, les tours instrumentées et les LLS. Nous avons également présenté les moyens de protection contre ses effets. L'étude théorique sur la modélisation du champ électromagnétique généré par l'interaction d'un coup de foudre avec un objet élevé fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II
Modélisation d'un
champ
électromagnétique
de la foudre

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

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.

Dans ce chapitre nous aborderons la modélisation du courant à la base du canal, en suite nous présenterons les modèles de la distribution spatiotemporelle du courant de l'arc en retour initié au sol et en fin nous ferons la modélisation du courant d'arc en retour en présence d'une tour élevée.

II.2. Modélisation du courant à la base du canal :

Pour modéliser le courant d'arc en retour nous aurons besoin des données du courant à la base du canal de foudre qui est considéré comme étant la seule grandeur mesurable. Différentes expressions analytiques sont utilisées dans la littérature afin de modéliser le courant à la base du canal de foudre. Parmi ces modèles, on cite :

II.2.1. 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 [19] est:

$$I(0, t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{II.1}$$

-Quant à l'arc en retour subséquent, l'expression du courant est exprimée comme suit [19].

$$I(0, t) = I_{01} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{02} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad \text{II.2}$$

Avec :

I_0 , I_{01} et I_{02} représentent l'amplitude du courant à la base du canal. α et β sont des constantes de temps. Le tableau II.1 présente les paramètres de ces deux fonctions.

Tableau II. 1: Paramètres des fonctions exponentielles [19].

	$I_{01}(\text{kA})$	$A(\text{s}^{-1})$	$\beta(\text{s}^{-1})$	$I_{01}(\text{kA})$	$\gamma(\text{s}^{-1})$	$\sigma(\text{s}^{-1})$
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	$9.4 \cdot 10^4$

La figure II.1 représente le courant à la base du canal de foudre, correspondant au premier arc en retour et à l'arc en retour subséquent, calculés à l'aide du modèle bi-exponentiel.

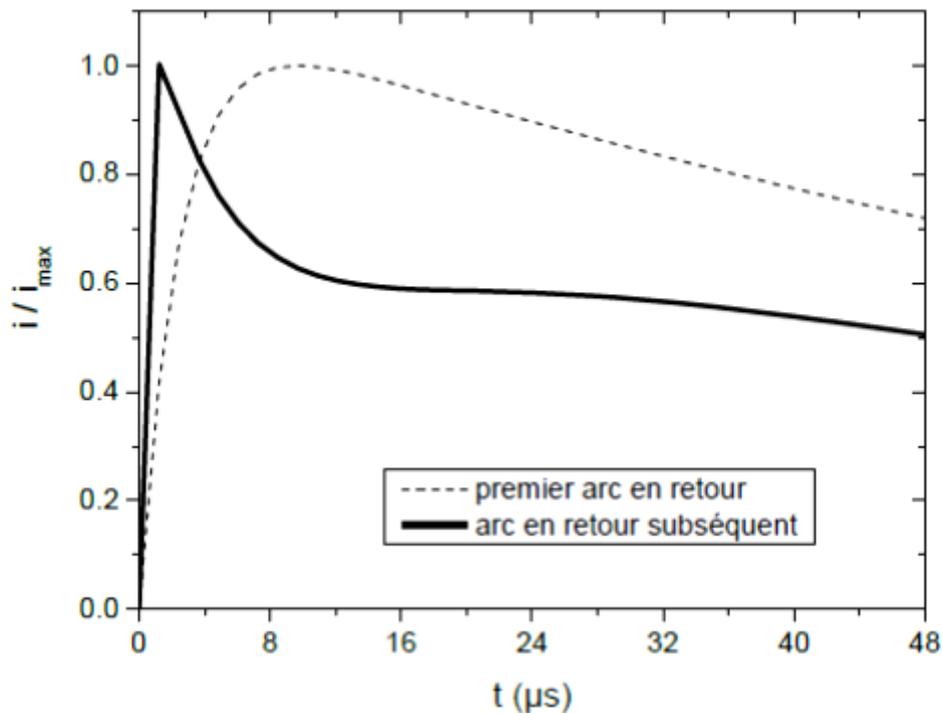


Figure II. 1: Courant à la base du canal de foudre, correspondant au premier arc en retour et à l'arc en retour subséquent, calculés à l'aide du modèle bi-exponentiel [12].

II.2.3 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 II.3 [20] :

$$i(0, t) = \frac{I_0}{\eta} = \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad \text{II.3}$$

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

$$\eta = \exp\left(\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)\right)^{1/n} \quad \text{II.4}$$

I_0 : amplitude du courant à la base du canal

T_1 : constante du temps du front

T_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.5) représente mieux le premier pic typique du courant d'arc en retour subséquent :

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1} \exp(-t/\tau_{21}) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^{n_2} \exp(-t/\tau_{22}) \quad \text{II.5}$$

Le tableau (II.2) représente les paramètres de la fonction d'Heidler pour l'arc en retour (premier et subséquent) accordés aux données expérimentales de Berger et al. [6]

Tableau II. 2: Paramètres de la somme de deux fonctions d' Heidler. [6]

	$I_{01}(\text{Ka})$	$\tau_{11}(\mu\text{S})$	$\tau_{21}(\mu\text{S})$	n_1	$I_{02}(\text{kA})$	$\tau_{12}(\mu\text{S})$	$\tau_{22}(\mu\text{S})$	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.2 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).

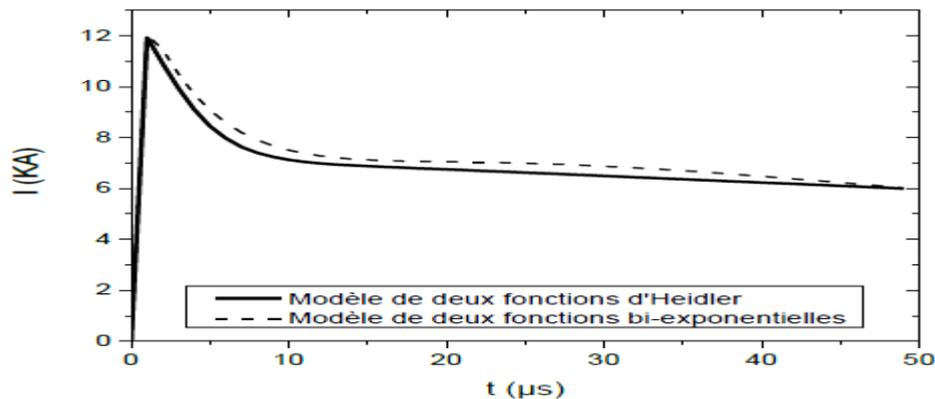


Figure II. 2: Courants à la base du canal d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (modèle d'Heidler et modèle bi-exponentiel). [12]

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

Heidler et Cvetić [21], ont approximé la transformée de Fourier de la fonction analytique d'Heidler en domaine fréquentiel en 2002.

II.2.2.3 Modèle hybride :

Nous pouvons citer aussi une autre formulation analytique proposée en 1990 par *Nucci et al* [22]. Cette formulation appartenant à un modèle connu sous le nom « *Modèle hybride* », du fait qu'elle constitue une sommation entre deux termes, l'un écrit sous la forme de la fonction d'Heidler, et l'autre écrit sous la forme bi exponentielle. Cette formulation s'écrit comme suit :

$$i(0, t) = \left(\frac{I_{01}}{\eta}\right) \left[\frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \right] e^{(-t/\tau_2)} + I_{02} \cdot (e^{-\alpha_2 t} - e^{-\beta_2 t}) \quad \text{II.6}$$

La figure II.3 représente le courant à la base du canal de foudre modélisé par le modèle hybride. [22]

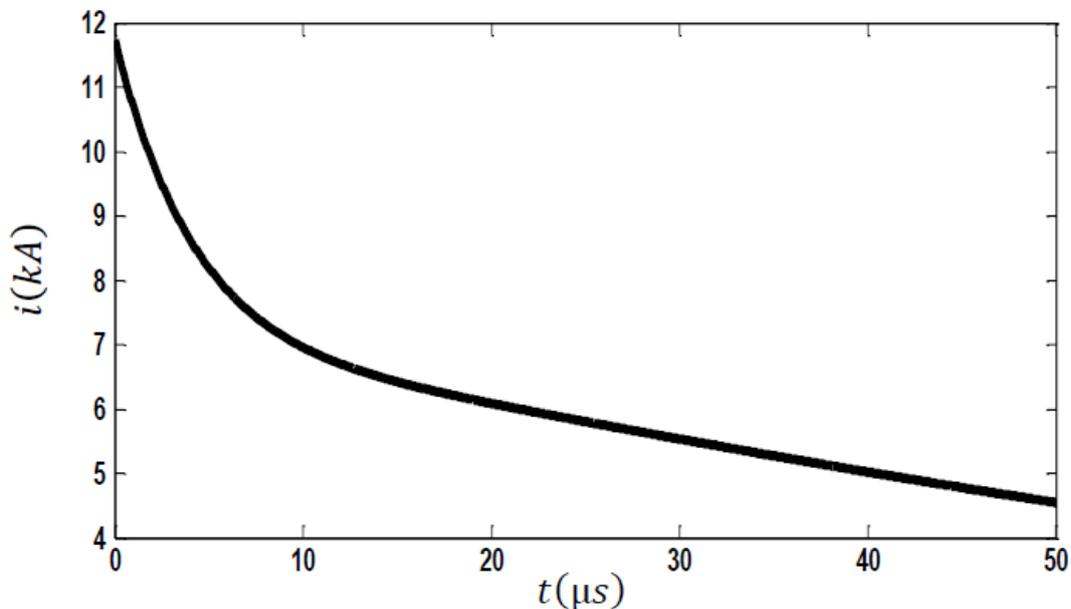


Figure II. 3: Courant à la base du canal de foudre modélisé par le modèle hybride. [23]

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

II.3. Présentation des modèles de la distribution spatiotemporelle du courant de l'arc en retour initié au sol :

II.3.1. Modèle RLC :

Les modèles 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. [8]

II.3.2. Modèle électromagnétiques:

Est basé généralement sur une approximation d'une antenne à fil mince avec perte par rapport au canal de la foudre. Ce modèle implique une solution numérique des équations de Maxwell pour trouver la distribution du courant le long du canal à partir duquel les champs électriques et magnétiques distants peuvent être calculés. [24]

II.3.3. Modèles d'ingénieur:

Dans ces modèles, la physique du coup de foudre est délibérément minimisée et l'effort mis sur la recherche d'un accord entre les champs électromagnétiques prédits par le modèle et ceux observés à des distances de quelques dizaines de mètres à des centaines de kilomètres. L'avantage des modèles « d'ingénierie » est le petit nombre de paramètres ajustables, généralement un ou deux en plus du courant de base de canal mesuré ou supposé. [24]

II.3.3.1. Modèle de Bruce et Gold (BG):

Il s'agit d'un des premiers modèles dans le genre est probablement le plus simple. Dans le modèle de Bruce et Gold, le courant à des hauteurs inférieures au front de l'arc en retour est égal au courant à la base du canal, à des hauteurs supérieures au front de l'arc en retour, comme dans tous les autres modèles, le courant est nul [2]. Mathématiquement:

$$I(z', t) = i(0, t) \quad z' \leq vt \quad \text{II.7}$$

$$I(z', t) = 0 \quad z' > vt \quad \text{II.8}$$

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

Avec:

v : est la vitesse de l'onde de courant.

La distribution du courant le long du canal de l'arc en retour dans ce modèle montre une discontinuité sur le front d'onde de l'arc en retour. Une telle discontinuité implique que la charge à chaque hauteur est déplacée du canal instantanément par le front d'onde d'arc en retour (voir figure II.4).

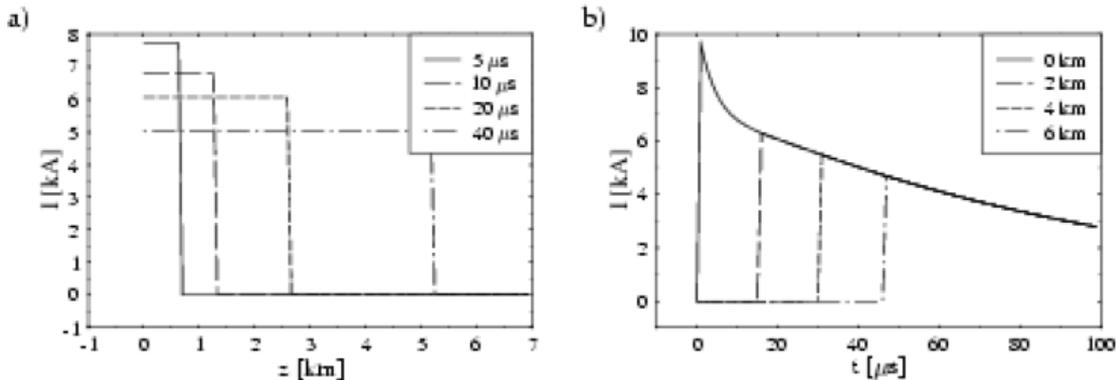


Figure II. 4: Distribution spatiale et temporelle du courant d'arc en retour pour le modèle BG. [25]

II.3.3.2. Modèle "Ligne de Transmission" (Transmission Line, TL) :

Ce modèle assimile le canal de foudre à une ligne de transmission sans pertes où une impulsion de courant se propage à partir du sol à la vitesse de l'arc en retour v [26].

Ce modèle fut proposé par *Uman* et *McLain* en 1969 et est largement utilisé jusqu'à ce jour.

La distribution du courant est définie par :

$$I(z',t)=i(0,t-\frac{z'}{v}) \quad z' \leq vt \quad \text{II.9}$$

$$I(z',t)=0 \quad z' > vt \quad \text{II.10}$$

Dans le model TL, il est supposé que le courant de foudre mesuré au niveau du sol s'écoule sans distorsion et sans atténuation sur toute la hauteur du canal de la décharge à une vitesse constant v .

Etant donné que l'intensité du courant le long du canal de foudre reste constante cela empêche tout transfert de charge entre le traceur et l'arc en retour. Or, des résultats obtenus à partir d'observations optiques ont montré que l'amplitude et la forme du courant changent en fonction de la hauteur et les mesures des variations du champ électrique associé au traceur ont mis en évidence que le traceur est bel et bien porteur d'une certaine densité de charge [12] (voir figure II.5).

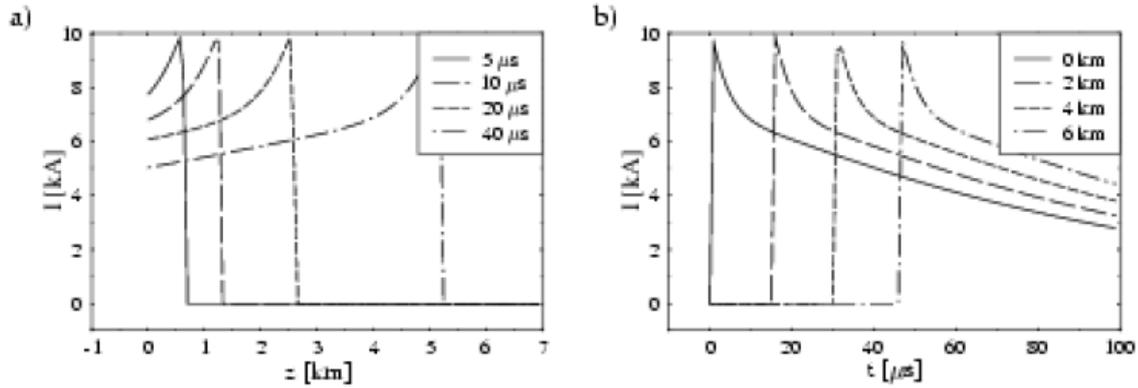


Figure II. 5: Distribution spatiale et temporelle du courant d'arc en retour pour le modèle TL. [25]

II.3.3.3. Modèle de "ligne de transmission modifié" (Modified Transmission Line, MTL model) :

Une modification au modèle de TL a été proposée par (Nucci et al), (Rachidi et Nucci), et (Rakov et Dulzon) par l'ajout d'une décroissance en exponentiel " (Modified Transmission Line with Exponential decay, MTLE) Dans ce modèle la distribution spatio-temporelle du courant $i(z', t)$ est définie par :

$$I(z', t) = I(0, t - (z'/vf)) \exp(-z'/\lambda) \quad z' \leq vf t \quad \text{II.11}$$

$$I(z', t) = 0 \quad z' > vf t \quad \text{II.12}$$

Le paramètre λ représente le taux de décroissance de l'intensité du courant le long du canal; sa valeur égale à 2km environ, a été déterminée par (Nucci et Rachidi) et par (Lin et al) en utilisant des enregistrements simultanés des champs électromagnétiques à plusieurs distances. Le modèle MTLE est le plus utilisé.

Le modèle des "ligne de transmission modifié par une décroissance linéaire" (Modified Transmission Line with Linear decay, MTLL).

Dans le modèle de MTLL qui est proposé par (Rakov et Dulzon), l'amplitude du courant décroît linéairement, tandis que le courant se propage vers le haut du canal, il est décrit par: [24]

$$I(z', t) = I(0, t - (z'/vf))(1 - (z'/H)) \quad z' \leq vf t \quad \text{II.13}$$

$$I(z', t) = 0 \quad z' > vf t \quad \text{II.14}$$

II.3.3.4. Modèle « Source de Courant Mobile » (Travelling Current Source, TCS):

D'après le modèle TCS, proposé par Heidler, une source de courant est supposée se déplacée à une vitesse v à partir du sol vers le nuage. Le courant injecté à une hauteur z' est

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

supposé se propage vers le bas du canal à la vitesse de la lumière c . Dans ce modèle les charges du traceur sont instantanément neutralisées à l'arrivée du front de l'arc en retour.

De ce fait, le courant à une hauteur z' est égale au courant à la terre à un instant précédent z'/c , exprimé comme suit :

$$i(z', t) = i\left(0, t + \frac{z'}{c}\right) \quad z' \leq vt \quad \text{II.15}$$

$$i(z', t) = 0 \quad z' > vt \quad \text{II.16}$$

Il faut noter que, bien que les modèles BG et TCS aient été conçus indépendamment à partir de différentes considérations physiques, pour le cas où dans le modèle TCS, le courant de foudre à une vitesse infinie, alors ce modèle se réduit au modèle BG.

Tout comme pour le modèle BG, la distribution du courant le long du canal TCS montre une discontinuité sur le front d'onde de l'arc en retour, ce qui n'est pas physiquement réel (voir figure II.6). [25]

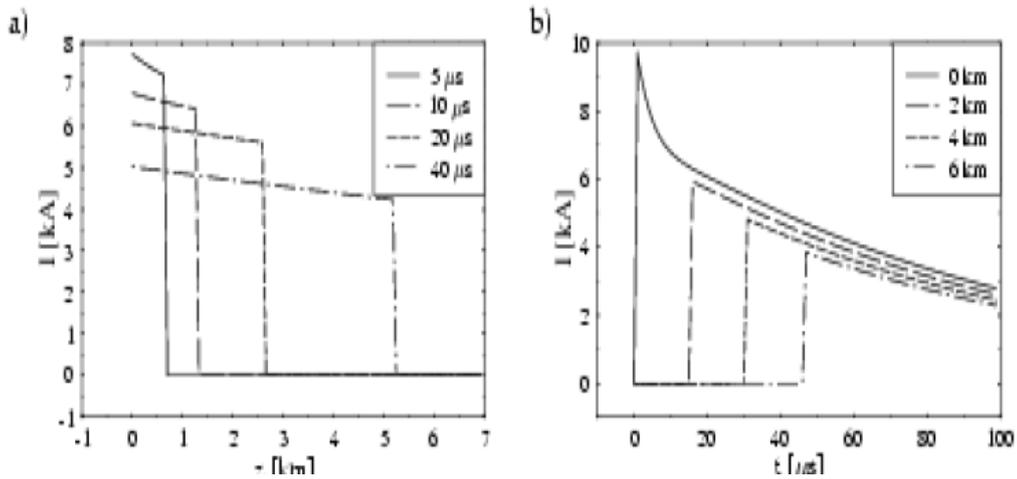


Figure II. 6: Distribution spatiale et temporelle du courant d'arc en retour pour le modèle TCS. [25]

II.3.4. Généralisation des modèles ingénieurs :

Plusieurs études montrent que ces modèles peuvent être mis sous la forme mathématique généralisée (II.17) : [27]

$$i(z', t) = i\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) \cdot P(z') \cdot u(t - z'/vf) \quad \text{II.17}$$

Où

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

$U(x)$: La fonction de Heaviside égale a l'unité pour $t \geq z'/vf$ et zéro ailleurs.

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

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

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

c : La vitesse de la lumière.

v_f : La vitesse du front.

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

On donne dans le tableau II.3 les paramètres v et $P(z')$ pour les cinq modèles d'ingénieur.

Tableau II. 3: $P(z')$ et v pour les cinq modèles d'ingénieur [4].

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

II.4. Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal et le long de l'objet élevé :

II.4.1. Modèle de Rachidi et al :

Les modèles d'ingénieur initialement proposés dans le cas d'un arc en retour initié du sol [27] ont été modifiés en 2002 par Rachidi et al [28].

Les formules de la distribution spatio-temporelle du courant de foudre pour ce modèle [28] sont données par les expressions suivantes :

$$h \leq z' \leq H$$

$$I(z', t) = \left[P(z' - h)I_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{v'} \right) - \rho_t I_0 \left(h, t - \frac{z' - h}{c} \right) + (1 - \rho_t)(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n I_0 \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \mu \left(t - \frac{z' - h}{v} \right)$$

II.19

$$0 \leq z' \leq h$$

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

$$I(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{m=0}^{\infty} \left[\rho_g^n \rho_t^n I_0 \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_g^n \rho_t^{n+1} I_0 \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right]$$

II.20

$$\rho_{\text{top}} = \frac{z_{\text{tour}} - z_{\text{canal}}}{z_{\text{tour}} + z_{\text{canal}}}$$

II.21

$$\rho_{\text{bot}} = \frac{z_{\text{tour}} - z_{\text{gr}}}{z_{\text{tour}} + z_{\text{gr}}}$$

II.22

ρ_{top} et ρ_{bot} étant les coefficients de réflexion au sommet et à la base de la tour.

H : la hauteur de la tour,

H_0 : la hauteur du canal de foudre,

$\mu(t)$: fonction de Heaviside,

P (z'): fonction d'atténuation,

v : vitesse de l'arc en retour,

v' : vitesse de l'onde de courant,

z_{tour} : impédance de la tour,

z_{canal} : impédance du canal de foudre,

z_{gr} : impédance de la terre,

c : la vitesse de la lumière.

Les équations (II.19) et (II.20) sont basées sur le concept du courant 'non contaminé' $I_0(t)$, qui représente le courant idéal qui serait mesuré au sommet de la tour si les coefficients de réflexion à ses deux extrémités sont nuls.

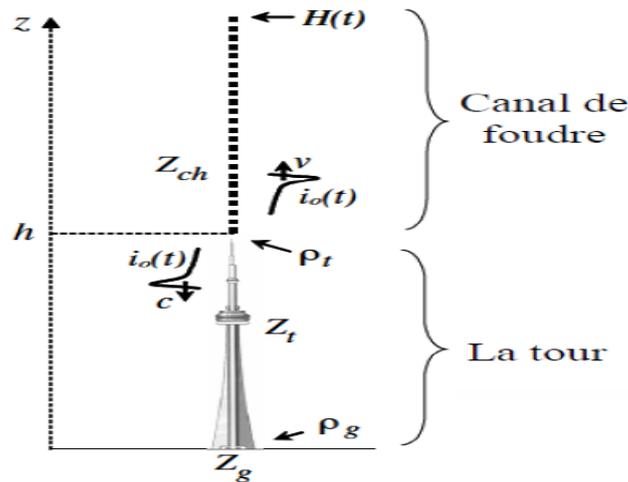


Figure II. 7: Propagation du courant le long de la tour et le long du canal de foudre [12].

II.4.2. Modèle de Baba et Rakov :

En 2005, Baba et Rakov [29] 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:

$$I_{sc}(t) = 2I_0(t) \tag{II.23}$$

La distribution spatio-temporelle du courant de foudre, selon le modèle de Baba et Rakov [29], est donnée par les expressions suivantes :

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

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{top}}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_{bot}^n \rho_{top}^n I_{sc} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho^{n+1} I_{sc} \left(h, t - \frac{h + z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right]$$

II.24

$$z' \geq h$$

$$I(z', t) = \frac{1 - \rho_{top}}{2} \left[I_{sc} \left(h, t - \frac{z - h'}{v} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \rho_{bot}^n \rho_{top}^{n-1} \text{topp} (1 + \rho_{top}) I_{sc} \left(h, t - \frac{z - h'}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right]$$

II.25

II.4.3. Comparaison entre les deux modèles :

a. Modèle de Rachidi et al :

- Elaborer en 2002 par les chercheurs Rachid et al. [28]
- Ce modèle utilise comme paramètre le courant non contaminé $i_0(t)$.
- Ce modèle utilise la vitesse de la lumière (c) dans la jonction sommet de la tour-canal de foudre [30].
- Les coefficients de réflexion au sommet et à la base de la tour.

En première lieu, il a pris cas d'un coup de foudre initié au sol avec la distribution spatio-temporelle du courant du canal qui s'accorde au modèle d'ingénieur MTLE qu'il a développé avec [Nucci -1989].

$$i(z, t) = e^{-z'/\lambda_i}(0, t - z/v)u(t - z/v) \quad \text{II.26}$$

- Il a utilisé une fonction arbitraire, il est parti de cette simple fonction, pour en sortir son modèle mathématique en introduisant le coefficient de réflexion distribué le long du canal, il a présenté le canal par une source distribuée.

- Il a utilisé l'extension des autres modèles généralisés par Rakov.

- Il a introduit dans le modèle (v^*) qui 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.

b. Modèle de Baba et Rakov :

- Présente en 2005 par les deux chercheurs Baba et Rakov [29].
- Ce modèle utilisé une approche basée sur l'utilisation d'une série de sources de tension dans la jonction tour-canal. [31]
- Baba et Rakov ont débuté par l'idée d'un coup de foudre qui tombe sur un terrain plat pour ainsi dérivé une expression du courant, en utilisant ligne de transmission uniforme sans pertes (Z_{ch}) et une impédance du sol, (Z_{gr}) l'impédance de la tour et $V_0(0, t)$ la tension arbitraire.
- Ils ont utilisé dans l'expression mathématique du modèle la vitesse de l'arc en retour (v) dans la jonction sommet de la tour-canal de foudre.
- Ils ont exprimé la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre en termes de courant de court-circuit ($i(t) = 2I_0(t)$).

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

II.4.4. Les inconvénients des deux modèles :

Rachidi est tombé dans un problème de discontinuité, où il se trouve qu'un même point possède deux vitesses de propagation différentes en même temps dans l'espace, une à la vitesse de la lumière (c) et une autre à la vitesse (v), et c'est ne pas logique en physique.

Baba et Rakov ont proposé que l'onde de courant de la jonction sommet de la tour vers le canal se propage avec la même vitesse égale à la vitesse de l'arc en retour, ceci a pu éviter le problème de discontinuité mais il n'y a pas de crédibilité pour prouver cette théorie.

Dans l'article de la référence [32] quelques problèmes liés aux choix de la vitesse de propagation de la jonction sommet tour ont été résolus.

II.5. Calcul du champ électromagnétique par la méthode des différences finies FDTD :

La méthode la plus populaire est, sans doute, celle des différences finies dans le domaine temporel, appelée FDTD (Finite Difference Time Domain). Cette dernière, initialement, élaborée par Yee, est actuellement une technique puissante pour la résolution numérique des équations de Maxwell.

Elle a été introduite dans le domaine de l'électromagnétisme en 1966, elle a été ensuite raffinée et employée par beaucoup de chercheurs dans différents secteurs comportant des phénomènes de dispersion d'ondes électromagnétiques, et d'interaction électromagnétique avec les tissus biologiques.

La méthode (FDTD) a été utilisée en 2007, par Mimouni et al pour le calcul du champ électromagnétique au-dessus et en dessous d'un sol caractérisé par une conductivité finie. Cette méthode est basée sur la résolution des équations de Maxwell. L'approximation par cette méthode permet l'obtention d'un bon accord avec la solution exacte pour différentes valeurs de la conductivité.

La validation expérimentale du code de calcul développé par Mimouni et al, sur la base de la FDTD, a été réalisée à travers une comparaison entre les résultats de simulation et des mesures effectuées sur site. [29]

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

II.5.1. Principes de base de la méthode FDTD :

La méthode FDTD est basée sur la formulation standard des équations de Maxwell (II.26, II.27)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{II.27}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{II.28}$$

-Où \vec{E} est le champ électrique, \vec{H} le champ magnétique, μ , σ et ε sont respectivement, la perméabilité magnétique, la conductivité électrique et la permittivité diélectrique du milieu considéré (l'air ou le sol). La double discrétisation spatiale et temporelle par les différences finies, appliquée aux équations de Maxwell, a été décrite de manière originale par Yee

La discrétisation des opérateurs de dérivation utilise un schéma centré des différences finies, avec une formulation dont l'erreur est du second ordre pour chaque pas de discrétisation (en d'autres termes : la diminution de moitié du pas de discrétisation réduit de 25% les erreurs d'évaluation des opérateurs de dérivation).

Les figures II.10 et II.11 présentent respectivement la discrétisation temporelle dont le modèle utilisé est dit « Leap Frog » et la discrétisation spatiale appliquée à une seule grille d'un domaine en trois dimensions.

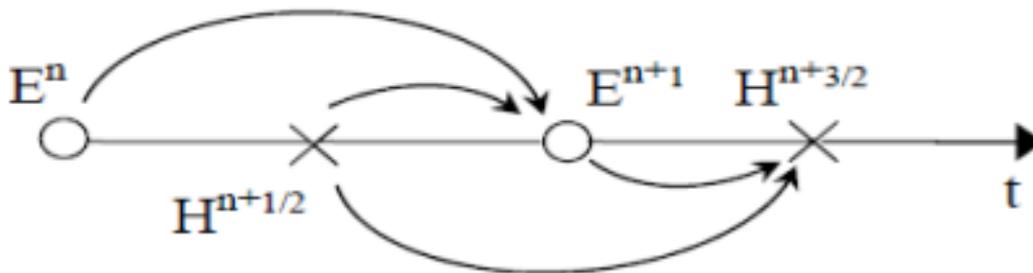
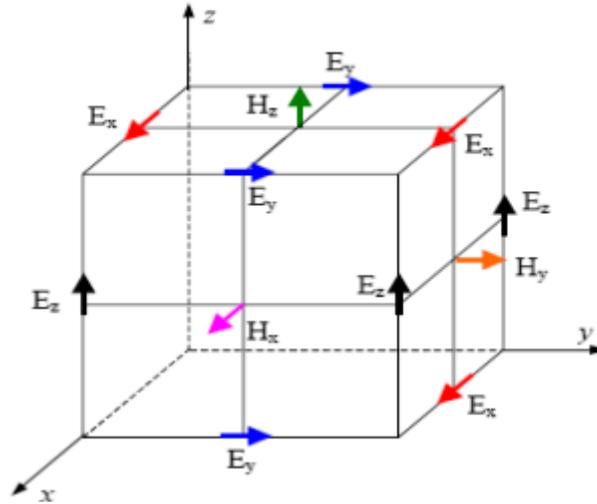
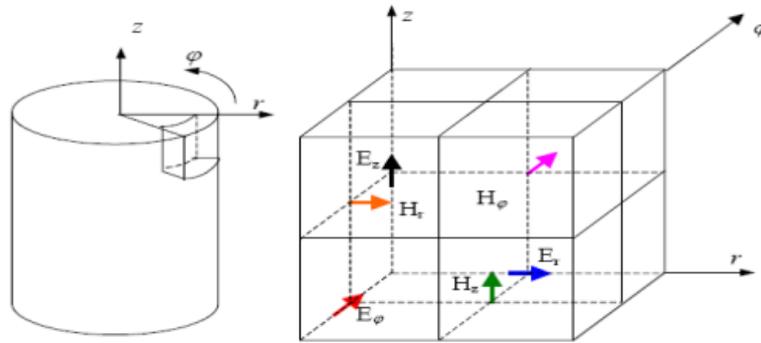


Figure II. 8: Principe de discrétisation temporelle en différences finies [30].



(a) Coordonnées cartésiennes [31]



(b) Coordonnées cylindriques [13]

Figure II. 9: Maillage spatial 3D en différences finies- modèle de Yee [13]

On remarque dans les figures II.10 et II.11 le décalage d'un demi-pas spatial et temporel, entre les composantes du champ électrique E et celles du champ magnétique H , inhérent à l'approximation des opérateurs de dérivation par le schéma centré des différences finies. Le champ électrique à l'instant " $n+1$ " est calculé en fonction du champ électrique à l'instant " n ", c'est à dire, la valeur obtenue dans le pas temporel précédent, et la valeur du champ magnétique à l'instant " $n+1/2$ " (voir figure II.10). Pour l'analyse du champ électromagnétique rayonné par la foudre, on peut adopter un domaine de calcul à deux dimensions (2D) avec un système à coordonnées cylindriques (Figure II.12).

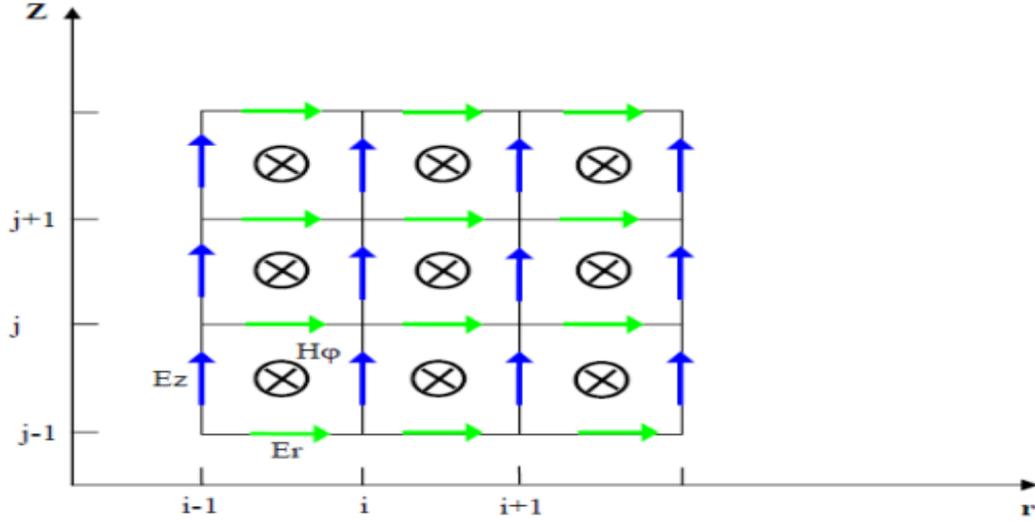


Figure II. 10: Domaine de calcul à deux dimensions (2D) avec un système à coordonnées cylindriques [13].

-Les équations (II.26) et (II.27) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_\varphi}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right] \\ \partial E_r + \varepsilon \frac{\partial E_r}{\partial t} = -\frac{\partial H_\varphi}{\partial z} \\ \partial E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\varphi) \end{cases} \quad \text{II.29}$$

La résolution de ce système d'équations est obtenue en mettant en œuvre l'approche FDTD. Tout d'abord, on définit chaque fonction spatio-temporelle f évaluée en chaque point de l'espace et à chaque instant comme : $f(i\Delta r, \Delta z, \Delta t) = f^n(i, j)$ Ou Δr et Δz représentent les pas spatiaux, respectivement dans les deux directions : radiale et verticale. Δt est le pas temporel de propagation, i , j , et n sont les incréments dans l'espace et dans le temps. Les approximations du premier ordre des équations aux dérivées partielles s'écrivent :

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial r} \right|_{r=i\Delta r} = \frac{f^n\left(i + \frac{1}{2}, j\right) - f^n\left(i - \frac{1}{2}, j\right)}{\Delta r} \quad \text{II.30}$$

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=i\Delta z} = \frac{f^n\left(i, j + \frac{1}{2}\right) - f^n\left(i, j - \frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \quad \text{II.31}$$

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial t} \right|_{t=i\Delta t} = \frac{f^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - f^{n-\frac{1}{2}}(i, j)}{\Delta t} \quad \text{II.32}$$

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

À partir des équations aux dérivées partielles du système (II.21) et en utilisant les équations (II.22) - (II.23) on obtient les composantes du champ électromagnétique rayonné par la foudre qui s'écrivent :

$$\begin{aligned}
 E_z^{n+1} \left(i, j + \frac{1}{2} \right) &= \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n \left(i, j + \frac{1}{2} \right) \\
 &+ \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)r_i\Delta_r} \left[r_{i+(i/2)} H_\varphi^{n+(1/2)} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \right. \\
 &\left. r_{i-(i/2)} H_\varphi^{n+(1/2)} \left(i - \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) \right]
 \end{aligned}$$

II.33

$$E_r^{n+1} \left(i + \frac{1}{2}, j \right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_r^n \left(i + \frac{1}{2}, i \right) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} \left[H^{n+(1/2)} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) - \right. \\
 \left. H^{n+(1/2)} \left(i + \frac{1}{2}, j - \frac{1}{2} \right) \right]$$

II.34

$$\begin{aligned}
 H_\varphi^{n+(1/2)} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) &= H_\varphi^{n-(1/2)} \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2} \right) + \frac{\Delta t}{\mu\Delta r} [E_z^n(i + 1, j + 1/2) - E_z^n(i, j + 1/2)] \\
 &- \frac{\Delta t}{\mu\Delta z} \left[E_r^n \left(i + \frac{1}{2}, j + 1 \right) - E_r^n \left(i + \frac{1}{2}, j \right) \right]
 \end{aligned}$$

II.35

Il est à noter que le choix des pas spatiaux Δr et Δz , et le pas temporel Δt , doivent remplir une condition de stabilité de calcul qui est exprimée par l'équation:

$$\Delta t < \frac{\min(\Delta r, \Delta z)}{2c}$$

II.36

II.5.2. Conditions aux limites absorbantes :

Lorsque les équations du champ électromagnétique sont résolues dans le domaine temporel en utilisant des méthodes aux différences finies dans un espace non borné, il doit y avoir une méthode limitant le domaine dans lequel le champ est calculé. Ceci est réalisé en employant des conditions aux limites absorbantes (Absorbing Boundary Conditions : ABC) aux frontières artificielles du domaine pour simuler l'espace non borné.

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du courant d'arc en retour et le champ électromagnétique associé. Nous avons aussi décrit le concept théorique et l'outil

Chapitre II : Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre.

mathématique nécessaire à la caractérisation du rayonnement de la foudre par la méthode des différences finies, en expliquant les différents modèles existants dans la littérature qui modélisent le courant de l'arc en retour que ça soit à la base du canal ou le long de sa distribution spatiotemporelle de la tour vers le canal. Le chapitre suivant mettra en vue le maillage spatial temporel pour implémenter la méthode FDTD en 2D pour le calcul du champ électromagnétique de la foudre en présence de la tour Skytree à Tokyo.

Chapitre III Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

III.1. introduction:

Dans ce chapitre nous présentons une analyse du comportement du champ électromagnétique à proximité de la tour Skytree de hauteur 634 m située à Tokyo frappée par une foudre. Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à des distances proches de la tour pour deux points d'observation, à savoir au-dessus et en-dessous de la surface du sol, en utilisant la méthode FDTD 2D (Finite Difference Time Domain). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par l'interaction de la foudre sur la tour CN au Canada.

Le choix de la tour Skytree a été motivé par le fait que cette dernière est devenue la plus haute structure au monde après la tour CN Canada.

III.2.Géométrie du problème:

Dans notre étude, nous avons considéré la géométrie du problème illustrée dans la figure III.1. La hauteur de la tour est fixée à 634 m, la taille de la cellule dans notre modèle FDTD est de $4000 \text{ m} \times 4000 \text{ m}$, la hauteur du canal de foudre est de 8000 m, le canal est supposé vertical, et la distance radiale du point d'impact par rapport à la tour Tokyo Skytree est de 50 m, et à une profondeur de 50m en dessous du sol et 10m au-dessus du sol caractérisé par une conductivité finie (0.01S/m et 0.001S/m).

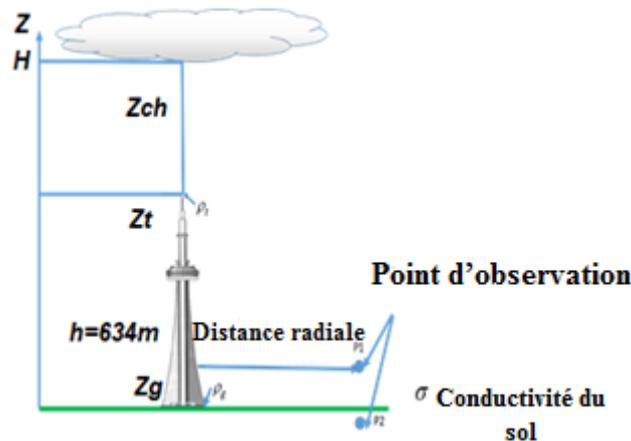


Figure III. 1: Géométrie du problème.

Le pas temporel a été fixé à 1 ns. La vitesse du front de l'arc en retour 'v' est fixée à la moitié de la vitesse de la lumière 'c'. La permittivité relative du sol a été fixée à 10.

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

III.3. Distribution spatio-temporelle du courant de foudre :

Dans cette étude, nous utilisons le modèle d'ingénieur basé sur une source de tension série localisée (modèle de Baba et Rakov [29]). Ce choix est motivé par le fait que ce modèle reproduit expérimentalement les formes d'ondes du champ électromagnétique mesuré [33]. L'expression de la distribution du courant de foudre le long du canal est donnée par l'équation III.1

$h \leq z < H$, [29]

$$i(z', t) = \frac{(1 - \rho_t)}{2} \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \rho_t^n \rho_g^n i_{SC} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \\ \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_{SC} \left(h, t - \frac{h - z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right]$$

III.1

L'équation III.2 représente la distribution du courant le long de l'objet frappé.

$0 < z < h$, [29]

$$i(z', t) = \frac{1 - \rho_t}{2} \left[\begin{array}{l} i_{SC} \left(h, t - \frac{z' - h}{v} \right) + \\ \sum_{n=0}^{\infty} \rho_t^n \rho_g^{n-1} (1 + \rho_t) i_{SC} \left(h, t - \frac{h - z'}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right]$$

III.2

h : la hauteur de la tour, c : la vitesse de la lumière, v est la vitesse du front de l'arc en retour.

$i_0(t)$: représente le courant "idéal" qui serait mesuré au sommet de la tour si les coefficients de réflexion du courant à ses deux extrémités étaient égaux à zéro.

Le courant de court-circuit, qui est relié au courant non perturbé $i_0(t)$ est donnée par l'équation II.23 (chapitre II).

Le courant de court-circuit est représenté par une somme de deux fonctions d'Heidler [20] (voir équation II.5 chapitre II) et correspond à l'arc en retour subséquent typique (valeur de crête de 12 kA, et pente maximale de 40 kA/ μ s), selon les données expérimentales de Berger et al. [6].

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

Les équations III.1 et III.2 montrent que des ondes de courant d'une même amplitude, $\frac{1-\rho t}{2} i_{sc}(h,t)$ sont initialement injectées, simultanément, dans le canal de foudre et dans la tour [34].

L'impédance caractéristique Z_t de la tour est calculée en utilisant l'expression théorique pour un conducteur conique développée par Marcuviz [35].

$$Z_t = 60 \ln [\cot (\alpha / 2)] = 60 \ln (2h/a) \quad \text{III.3}$$

Où " α " représente l'angle de demi-cône, " h " la hauteur du cône, et " a " le rayon de la base du cône.

A partir de l'équation III.3 on trouve $Z_t = 250 \Omega$ pour $h = 634$ m et $a = 19,6$ m [17].

En 1984, Gorin et Shkilev [36], ont montré que l'impédance équivalente du canal de la foudre Z_{ch} est connue pour être supérieure à l'impédance caractéristique de la tour, allant de plusieurs centaines d'Ohms à quelques kilos ohms.

Nous avons fixé $Z_{ch} = 4\Omega$, $Z_t = 1000 \Omega$. L'impédance de mise à la terre Z_{gr} a été fixée à 80Ω , afin de reproduire le deuxième pic ou le pic global du courant mesuré près du sommet de la tour. Cette impédance de mise à la terre relativement élevée simule l'atténuation significative (non prise en compte dans le modèle de tour) de l'impulsion de courant qui se propage de la base de la tour vers le sommet, montré dans [34].

Les valeurs d'impédance données ci-dessus ont été utilisées pour calculer le coefficient de réflexion du courant au sommet de la tour pour les ondes de courant se propageant vers le haut et vers le bas, correspondant respectivement aux équations II.21 et II.22 (chapitre II): $\rho_t = -0,60$; $\rho_g = 0,52$ [34].

Les coefficients de réflexion du courant au sommet de la tour CN (553 m) : $\rho_t = -0.366$; $\rho_g = 0.8$ [33].

III.4. Résultats et discussion :

Les résultats de simulation, à savoir les allures des champs électriques et magnétiques, sont présentées dans les figures ci-dessous (III.2-III.7) calculées par la FDTD 2D.

III.4.1. Champ électromagnétique de la foudre au-dessus du sol en présence de la tour Skytree :

Dans cette section nous allons observer l'effet de la conductivité sur le comportement du champ électromagnétique de la foudre en présence de la tour Skytree et la tour CN.

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

Les figures III.2, III.3 et III.4 représentent les composantes du champ électromagnétique au-dessus du sol.

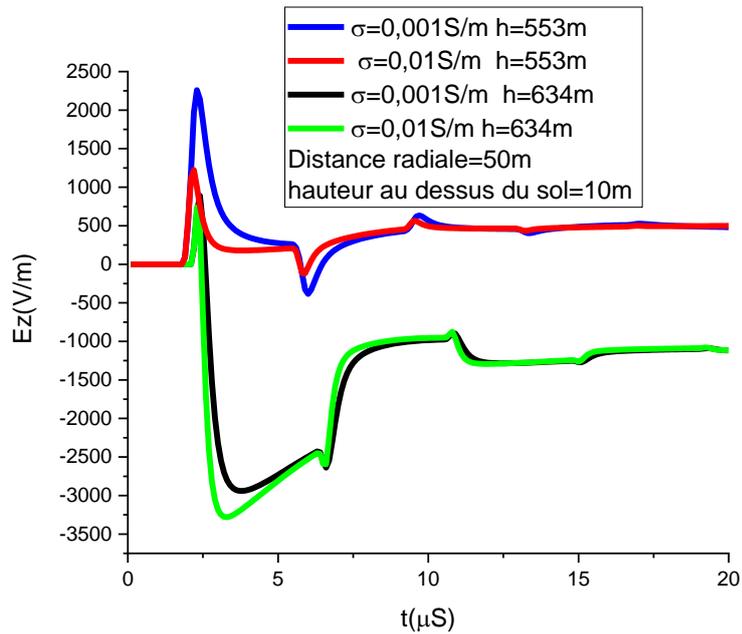


Figure III. 2: Formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre au-dessus du sol.

D'après la figure III.2 les formes d'ondes du champ électrique vertical ont un pic positif inférieur à celui obtenu pour le cas de la tour CN pour la conductivité du sol égale à 0.01 puis on remarque la même forme d'onde pour la queue du champ pour les deux tours avec une diminution presque de 500 (V/m) par rapport aux deux premiers pics.

Pour le cas de $\sigma=0.001$ (S/m) on remarque que les formes d'ondes ont une polarité bipolaire pour les deux tours.

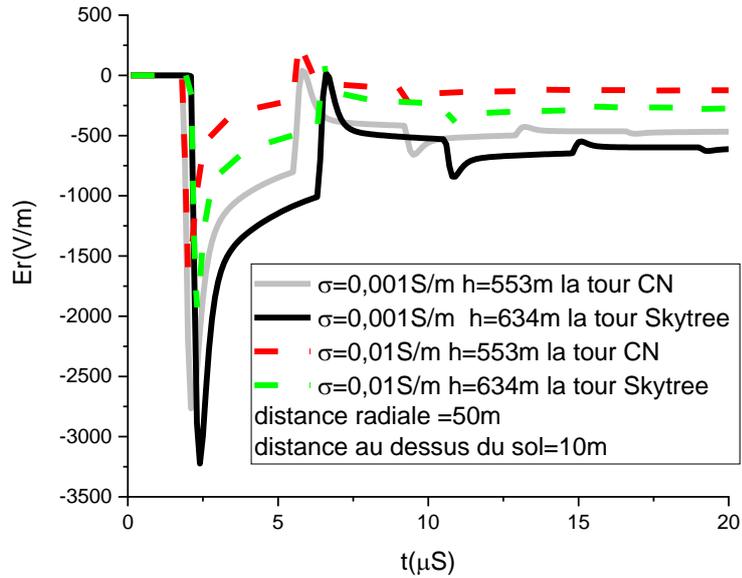


Figure III. 3: Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre au-dessus du sol.

D'après la figure III.3 les formes d'ondes du champ électrique radial ont même comportement mais avec différentes amplitudes et polarités négatives pour le cas de la conductivité du sol égale à 0,001S/m et bipolaire pour $\sigma=0.01\text{S/m}$.

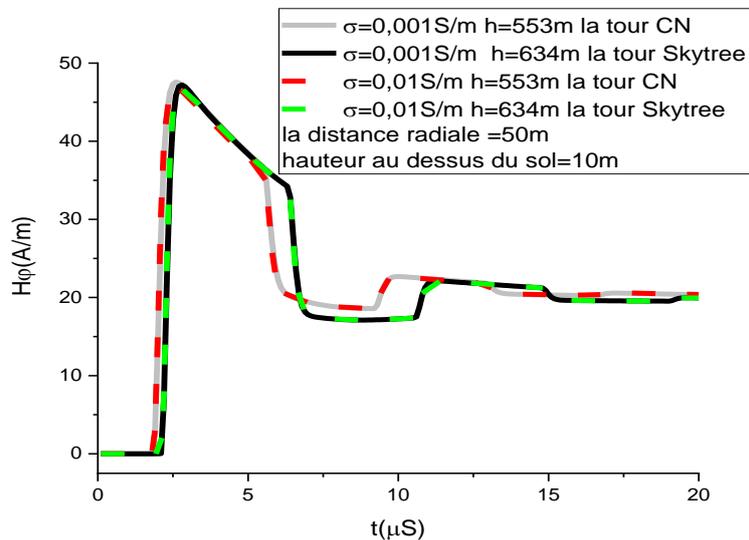


Figure III. 4: Formes d'ondes du champ magnétique de la foudre au-dessus du sol.

Le comportement des formes d'ondes du champ magnétique est insensible à la conductivité du sol et identique pour les deux cas de tour.

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

Les composantes du champ électrique au-dessus du sol sont affectées par la conductivité du sol. Alors que le champ magnétique de la foudre n'est pas affecté par la conductivité du sol, de même que les remarques observées et données par Mimouni et al [37], nous avons observé l'effet de la tour qu'est visible dans la forme du champ électromagnétique par rapport à celui initié au sol donnés par Mimouni et al [37].

III.4.2. Champ électromagnétique souterrain :

Les figures III.5, III.6 et III.7 présentent les formes d'ondes du champ électromagnétique en-dessous du sol.

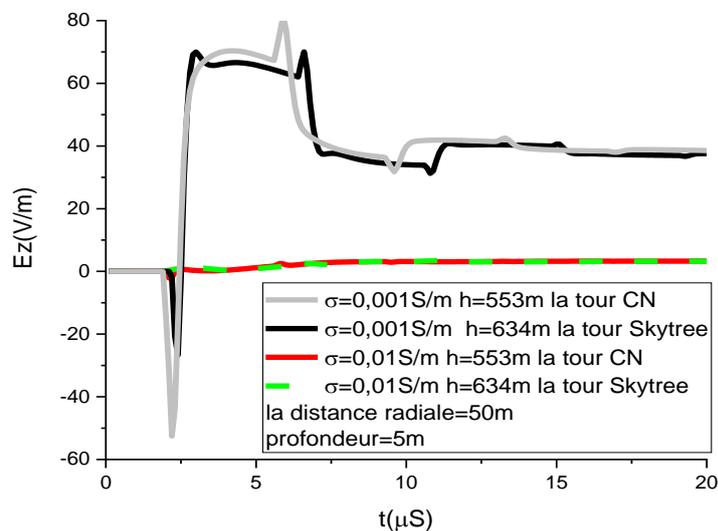


Figure III. 5:Formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre en-dessous du sol.

Le premier pic du champ électrique de foudre vertical (voir figure III.5), en présence d'un sol de conductivité fixée à 0,001 S/m, est inférieur à celui de la tour de 553 m ($E_z=80\text{ V/m}$) puis diminue jusqu'à 40V/m), pour le deuxième cas ($\rho=0.01\text{ S/m}$) les formes d'ondes sont en parfaite concordance.

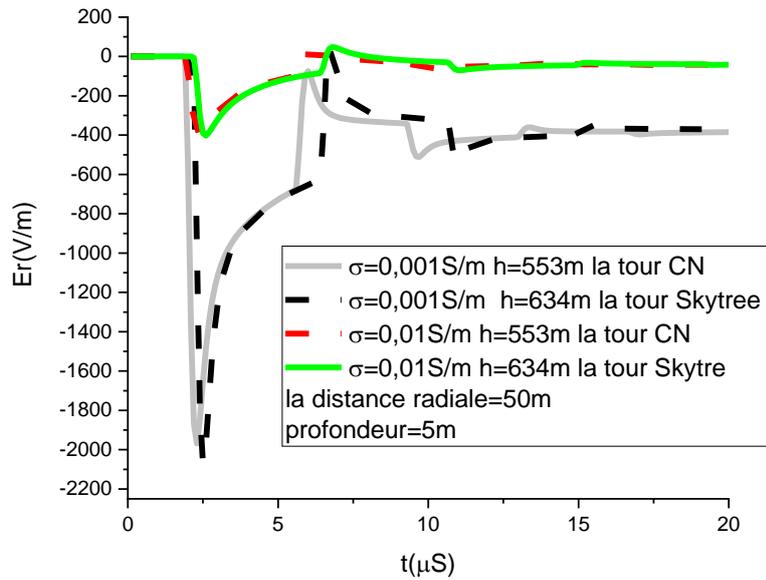


Figure III. 6: Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre sous le sol.

La figure III.6 montre que la forme du champ électrique horizontal est approximativement la même pour les deux tours, avec différence dans la valeur du pic (-2000 V/m pour la conductivité du sol 0.001 (S/m) et -400V/m pour la deuxième conductivité 0.01 S/m) et une atténuation vers le zéro.

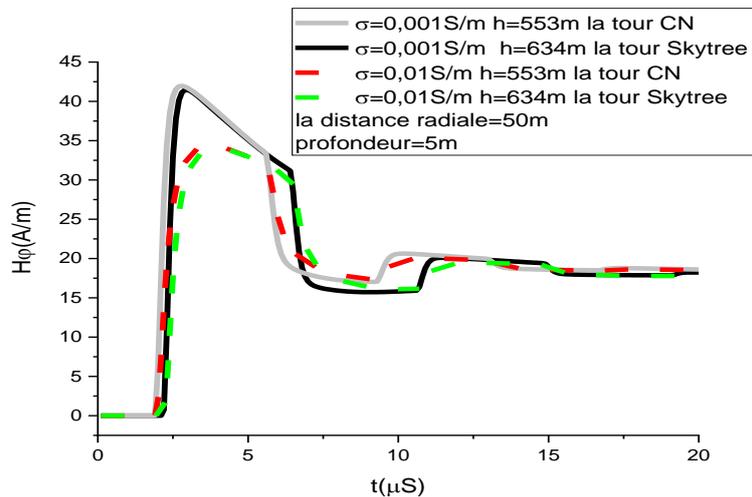


Figure III. 7 : Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre sous le sol.

Le comportement des formes d'ondes du champ magnétique est sensible à la conductivité finie en-dessous du sol ou on a observé une diminution dans l'amplitude du champ au-dessus du sol (voir figure III.7).

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

Le comportement général des composantes du champ de foudre électrique est affecté par la conductivité finie du sol, comme dans le cas d'un impact au sol [37]. Cependant, les formes d'ondes du champ présentent des structures fines causées par les réflexions multiples le long de la tour. Le temps de montée du comportement du champ de la foudre généré par la tour Skytree est plus tardif que la tour CN.

La figure III.8 présente les formes d'ondes du champ électrique vertical calculé pour différentes valeurs de conductivité du sol à une distance de 27 km par Araki et al [17].

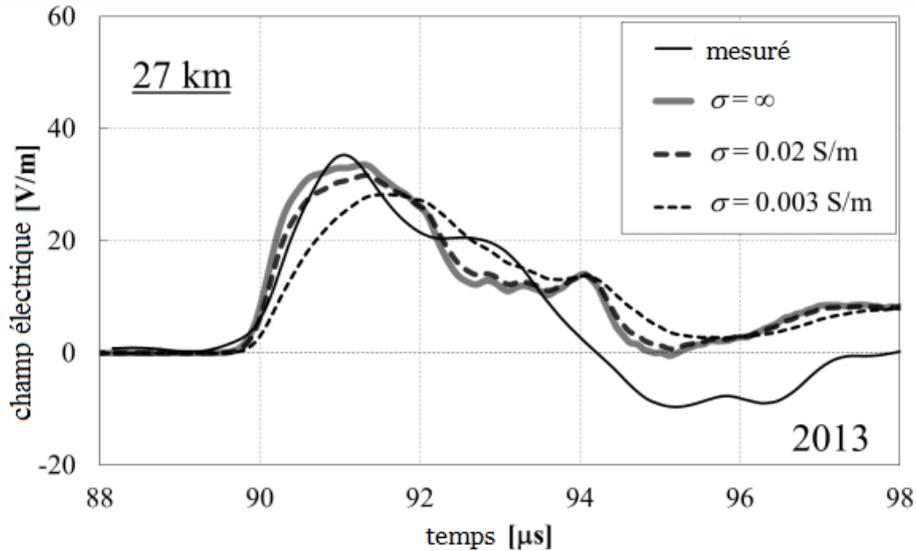


Figure III. 8: Formes d'ondes du champ électrique vertical calculées pour différentes valeurs de conductivité du sol à une distance de 27 km par Araki. [17]

Le résultat dans la figure III.8 montre le champ électrique vertical calculé par Araki [17], pour différentes valeurs de conductivité du sol, pour une distance lointaine de la tour Skytree, ceci nous a rendu la tâche difficile pour permettre la comparaison entre nos résultats et ceux de cette référence [17], dans le besoin d'avoir un calculateur puissant pour réaliser ce genre de calcul.

III.4.3. Effet de la hauteur de l'objet élevé sur le rayonnement EM de la foudre:

Dans cette section nous allons observer l'effet de la hauteur et les coefficients de réflexion sur le comportement du champ électromagnétique de la foudre en présence de la tour Skytree et la tour CN.

On a changé les coefficients de réflexions de la tour Skytree en les choisissant égaux à ceux de la tour CN.

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

Les figures III.9, III.10 et III.11 représentent les composantes du champ électromagnétique au-dessus du sol.

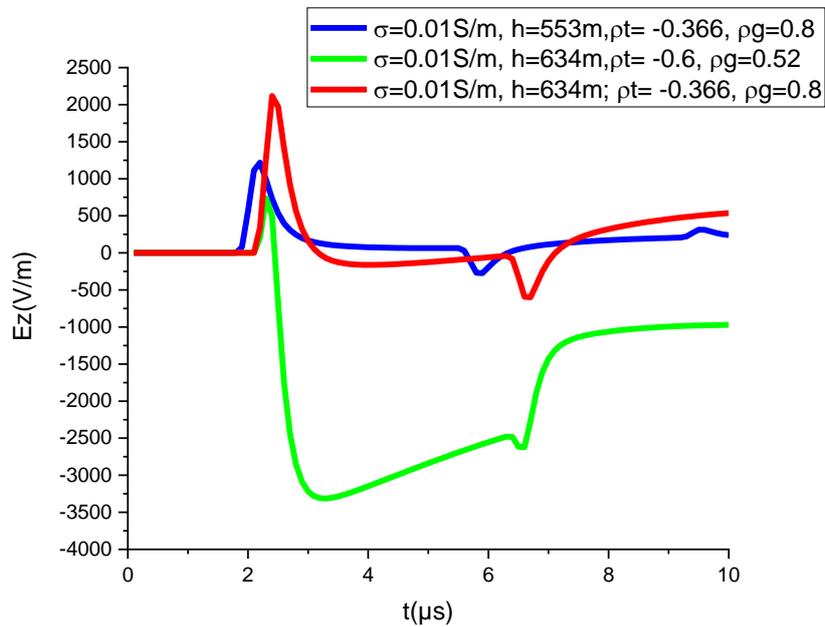


Figure III. 9:Formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre au-dessus du sol.

D'après la figure III.9 on remarque que la forme d'onde du champ électrique vertical généré par l'interaction avec la tour Skytree est sensible aux changements des coefficients de réflexion de la tour et ça induit à un comportement identique avec la tour CN avec une augmentation d'amplitude visible.

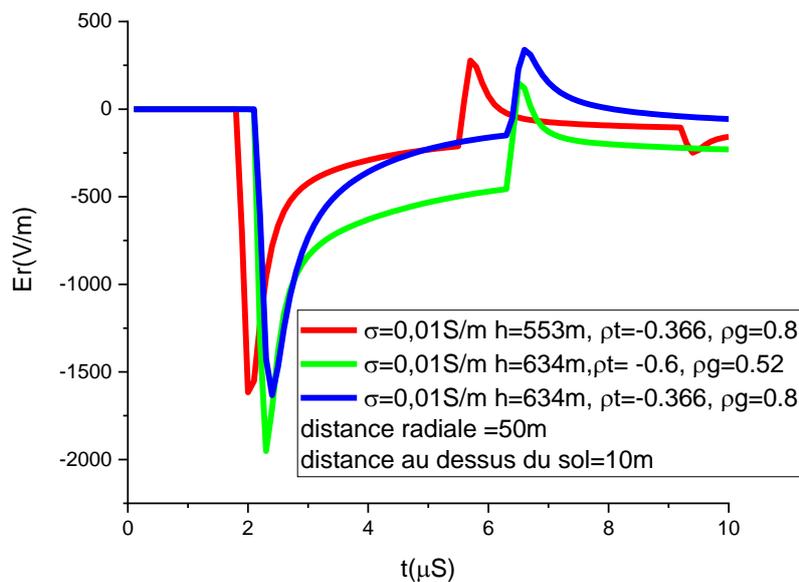


Figure III. 10: Formes d'ondes du champ électrique radial de la foudre au-dessus du sol.

D'après la figure III.10 on remarque un effet visible des coefficients de réflexion et de la hauteur sur le comportement du champ électrique radial.

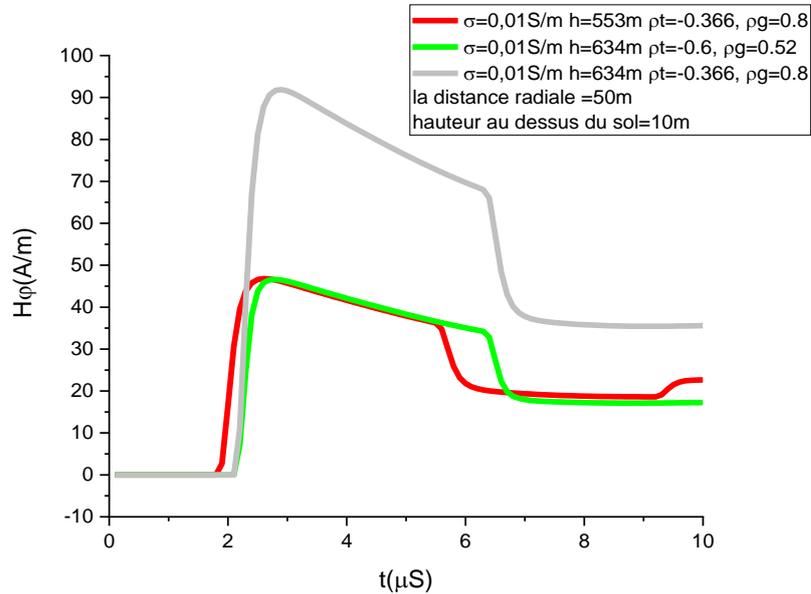


Figure III. 11: Formes d'ondes du champ magnétique de la foudre au-dessus du sol.

D'après la figure III.11 on remarque un grand pic dans la forme d'onde du champ magnétique généré par l'interaction avec la tour Skytree lors du changement des coefficients de réflexions en gardant le même comportement mais différentes amplitudes.

III.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse des résultats obtenus par la méthode de différences finies dans le domaine temporel des champs électromagnétiques à proximité de la tour Skytree de 634 m à Tokyo avec une comparaison avec ceux de la tour CN. Les composantes du champ de foudre sont évaluées à (50 m) de distance de la tour pour deux points d'observation au-dessus et au-dessous du sol caractérisé par une conductivité finie, nous avons utilisé le modèle de Baba et Rakov pour la présentation du courant de foudre le long de la tour et du canal de foudre.

Les principales conclusions de l'analyse présentée dans cette étude sont les suivantes :

Chapitre III :Modélisation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Skytree.

- Le champ électrique vertical de la foudre au-dessus du sol qui est généré par l'interaction avec la tour Skytree a un pic positif inférieur à celui obtenu pour le cas de la tour CN pour un coup de foudre avec la tour Skytree, lorsque la conductivité du sol est égale à 0.01S/m
- On observe un décalage temporel pour les formes d'ondes du champ électrique vertical obtenues pour les deux tours.
- La raison de décalage du temps dans les courbes est due à la différence entre les hauteurs des deux tours (environ 80 mètres).
- On remarque que les formes d'ondes du champ électrique vertical ont une polarité bipolaire pour les deux tours dans la cas de $\sigma=0.001$ (S/m), ainsi il se trouve être sensible aux changements des coefficients de réflexion de la tour ceci a induit à un comportement identique avec la tour CN avec une augmentation d'amplitude visible.
- Sous le sol caractérisé par une conductivité fixée à 0.001S/m, le premier pic des formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre généré par l'interaction avec la tour Skytree Tokyo est moins important que dans le cas de la tour CN($E_z=80$ V/m puis diminue jusqu'à 40V/m).
- La forme d'onde du champ électrique radial au-dessus du sol est affectée par la conductivité du sol, avec un premier pic négatif significatif observé dans le cas de la tour Skytree, qui diminue avec l'augmentation de la conductivité du sol. Cependant, en dessous du sol son effet sur le champ est moins visible, la forme du champ électrique horizontal est approximativement la même pour les deux tours,
- Le comportement des formes d'ondes du champ magnétique au-dessus du sol est insensible à la conductivité du sol et identique pour les deux cas de tours.
- Lors du changement des coefficients de réflexions du tour Skytree il va se produire un grand pic dans la forme d'onde du champ magnétique ($H_\phi=92$ A/m) généré par l'interaction avec la tour Skytree.

Conclusion
générale

Conclusion générale.

Conclusion générale:

La foudre est un phénomène qui présente des problèmes divers pour la discipline de l'électricité. Les perturbations électromagnétiques produites par un coup de foudre constituent un danger permanent pour tout système électrique ou électronique, c'est pour cette raison qu'il est nécessaire de connaître précisément les caractéristiques du rayonnement EM pour pouvoir protéger efficacement ces systèmes. Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude du champ électromagnétique rayonné par la foudre en présence de la tour (Skytree à Tokyo au Japan).

La description physique de la foudre et sa caractérisation électrique était un atout important au dénouement du chapitre I. La suite du travail a été consacrée à la modélisation du champ électromagnétique de la foudre où les deux modèles d'arc en retour cités dans la littérature qui prennent en compte la présence de l'objet élevé ont été présentés à savoir le modèle de Rachidi et al et le modèle de Baba et Rakov. L'élaboration du programme de simulation du rayonnement électromagnétique à l'aide d'une méthode numérique intéressante à savoir la méthode FDTD-2D qui nous a facilité la tâche de calcul afin de présenter une analyse plus avancée sur le champ électromagnétique rayonné par la foudre, cette analyse s'est faite pour deux points d'observations différents situés à des niveaux de sol, et une comparaison entre les résultats des calculs de la tour CN, nous avons utilisé le modèle de Baba et Rakov pour la distribution du courant de foudre le long de la tour et du canal de foudre.

Les principales conclusions de cette analyse se résument comme suit :

- Le champ électrique vertical de la foudre au-dessus du sol qui est généré par l'interaction avec la tour Skytree a un pic positif inférieur à celui obtenu pour le cas de la tour CN pour un coup de foudre avec la tour Skytree, lorsque la conductivité du sol est égale à 0.01S/m.
- On observe un décalage temporel pour les formes d'ondes du champ électrique vertical obtenues pour les deux tours.
- La raison de décalage du temps dans les courbes est due à la différence entre les hauteurs des deux tours (environ 80 mètres).
- On remarque que les formes d'ondes du champ électrique vertical ont une polarité bipolaire pour les deux tours dans le cas de $\sigma=0.001$ (S/m), ainsi il se trouve être sensible aux changements des coefficients de réflexion de la tour ceci a induit à un comportement identique avec la tour CN avec une augmentation d'amplitude visible.
- Sous le sol caractérisé par une conductivité fixée à 0.001S/m, le premier pic des formes d'ondes du champ électrique vertical de la foudre généré par l'interaction avec la tour Skytree

Conclusion générale.

Tokyo est moins important que dans le cas de la tour CN($E_z=80$ V/m puis diminue jusqu'à 40V/m).

-La forme d'onde du champ électrique radial au-dessus du sol est affectée par la conductivité du sol, avec un premier pic négatif significatif observé dans le cas de la tour Skytree, qui diminue avec l'augmentation de la conductivité du sol. Cependant, en dessous du sol son effet sur le champ est moins visible, la forme du champ électrique horizontal est approximativement la même pour les deux tours,

- Le comportement des formes d'ondes du champ magnétique au-dessus du sol est insensible à la conductivité du sol et identique pour les deux cas de tours.

-Lors du changement des coefficients de réflexions du tour Skytree il va se produire un grand pic dans la forme d'onde du champ magnétique ($H_\phi=92$ A/m) généré par l'interaction avec la tour Skytree.

Dans ce type de domaine de recherche et à cause de la complexité du phénomène de la foudre et les effets qui l'accompagnent, la situation reste toujours fertile et demande plus de travaux pour une protection plus rassurante des systèmes électriques, électronique et de l'homme.

Comme perspective :

La continuité de ce travail en élaborant une analyse du comportement du champ EM rayonné à des distances lointaines au-delà de 20 km.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] Alexandre Oparine, œuvre « sur l'origine de la vie », 1924.
- [2] M.A. Uman « The lightning discharge », Dover Publications, INC, Mineola, New York, 2001.
- [3] HABRI Khaled (Etude du rayonnement électromagnétique de la foudre en présence d'un sol stratifié) mémoire magister 2010 univ d'Oran.
- [4] CHEKHMOUM Saliha (Modélisation et calcul du champ électromagnétique rayonné par un coup de foudre) MEMOIRE DE MASTER 2015 univ de Constantine.
- [5] AUDJA Mustapha, AZZOUG Ali et BELHOUCINE Merzouk (Etude de protection du poste de souce Ferha 60/30kv contre la surtension atmosphérique) mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [6] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger (Parameters of lightning flashes), Electra N° 41, pp. 23-37, 1975.
- [7] MOUZAZ Mohamed et DRIBAT Mohamed (Intégration des conditions aux limites absorbantes de MUR du second ordre dans un code de calcul du champ électromagnétique rayonne par la foudre appliquant la méthode FDTD) mémoire master, Université Ibn Khaldoun Tiaret 2016.
- [8] ABDELLI Djamel (Application de la méthode FDTD-2D dans le calcul du champ électromagnétique de la foudre initiée au sol caractérisé par une conductivité finie) mémoire master univ Ibn Khaldoun Tiaret 2021.
- [9] ATAOUA Mohamed et MEHAMDIA Oualid (Comparaison des Modèles d'Arc en Retour de Foudreen Présence d'une Tour). Mémoire de master, juin2010.
- [10] Yannick BOURGEOIS." Modélisation des perturbations électromagnétiques générées sur un réseau de télécommunications par une agression de type foudre" Thèse N° 4-2009, XLIM-Département OSA.
- [11] BOUSSADIA REGUIA (Étude d'une tour instrumentée et de son impact sur le champ électromagnétique de la foudre) Mémoire master, univ Ibn Khaldoun Tiaret 2019.
- [12] MIMOUNI Abdenbi « Analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre » thèse de doctorat, USTO 2007.
- [13] Rakov, V. A., & Uman, M. A. (1998). Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 40(4), 403–426. doi:10.1109/15.736202

- [14] V. A. Rakov (Transient response of a tall object to lightning), *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43 (4), pp. 654-661, 2001.
- [15] Podgorski A. S. and Landt J. A., (1985). Numerical Analysis of the Lightning-CN Tower Interaction, *Proc. 1984 EMC Symposium*, March 5-7, Zurich, Switzerland, pp. 52-60
- [16] Heidler, F.H., Paul, C. (2017). Some Return Stroke Characteristics of Negative Lightning Flashes Recorded at the Peissenberg Tower, *IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility*, 59(5): 1490-1497. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2688587>.
- [17] S. Araki, Y. Nasu, Y. Baba, V. A. Rakov, M. Saito, and T. Miki, "FDTD Simulation of Lightning Strikes to the 634-m Tokyo Skytree", *doi: 10.1029/2018GL078214*, Kyoto 610-0321, Japan, 26-07-2018.
- [18] Diendorfer, G., OVE-ALDIS., Lightning Location Systems (LLS), IX International Symposium on Lightning Protection, 26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.
- [19] Nucci, C. A., Mazzetti C., Rachidi F., and Ianoz, M. Analyse du champ électromagnétique dû à une décharge de foudre dans les domaines temporel et fréquentiel, *Annales de télécommunication*, Vol. 43, n° 11-12, pp. 625-637, 1988.
- [20] F. Heidler "Traveling current source model for LEMP calculation", 6th International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, pp. 157- 162, Zurich, Switzerland, 1985.
- [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] Nucci C., Diendorfer G., Uman M., Rachidi., F. "Lightning return stroke current models with specified channel based current". *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, pp.811-828, 1990.
- [23] Bidi Manel «CEM et réseaux de transport d'énergie : estimation des perturbations sur les réseaux» *Mémoire de Magister*, 2006.
- [24] LARIBI Abdelaziz et MANSOUR Aymen, (Analyse du comportement du champ électromagnétique de la foudre initié au sol caractérisé par une conductivité finie), *mémoire master 2*, Université Ibn Khaldoun Tiaret 2020.
- [25] BOUKHORS Seif Eddine (Modélisation de la foudre comme onde électromagnétique) *diplôme master*, univ Larbi Ben M'Hidi Oum el Bouaghi 2013.
- [26] Uman, M.A., McLain, D.K., Krider, E.P. (1975). The electromagnetic radiation from a finite antenna, *American Journal Of Physics*, 43(1):33-38. <https://doi.org/10.1119/1.10027>

- [27] Rakov V. A. (2003). Engineering Models of the lightning return stroke”, International symposium on lightning protection (VII SIPDA), Curitiba, Brazil
- [28] F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J.L. Bermudez, “Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel,” J. Geophys.Res, 107 (D23) (2002) 4699.
- [29] Y. Baba, V. A. Rakov, “On The use of lumped sources in lightning returns stroke models”. Journal Of Geophysical research, Vol.110, D03101, doi:10.1029/2004JD005202, Florida, USA, 2005.
- [30] HATI Ilyes et MAMOUN Hakim (Application des modèles d’ingénieurs cités dans la littérature pour la modélisation d’un coup de foudre tombant sur un objet élevé), mémoire master, univ Ibn Khaldoun Tiaret 2016.
- [31] CHEIKH Marouane et CHEKARI Khaled (Etude comparative entre les modèles du courant d’arc en retour frappant une tour élevée) mémoire de master, univ Ibn Khaldoun Tiaret 2021.
- [32] Lakhdar, A., Mimouni, A., Azzouz, Z. E., (2022). New Approach to Revise the Spatiotemporal Lightning Current Distribution Models Intended for Tall Objects. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, pp.1-8, <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3169429>.
- [33] Lakhdar, A., Mimouni, A., Azzouz, Z. (2021). Parameters affecting the polarity inversion of the vertical electric lightning field to the CN-Tower. Mathematical Modelling of Engineering Problems, Vol. 8, No. 1, pp. 117-124.
- [34] LAKHDAR.A; MIMOUNI.A; Z.AZZOUZ, Electromagnetic Field Behavior in The Vicinity of a Tower Struck by Lightning - Tokyo Skytree Tower Case; 13^{eme} conférence nationale CNHT, 2019, Oran.
- [35] Marcuvitz, N. (1951), Waveguide Handbook. McGraw-Hill, New York, 89-96.
- [36] Gorin, B. N., and Shkilev, A. V. (1984), Measurements of lightning currents at the Ostankino tower. Elektrichestvo, 8, 64-65 (in Russian).
- [37] A.Mimouni, F.Rachidi and Zin-eddine Azzouz, “a finite-difference time domain approach for the evaluation of electromagnetic fields radiated by lightning strikes to tall structures,” Journal Of Electrostatics 66(2008) 504-513, Tiaret, Algérie, 2008.

ملخص:

في هذه الأطروحة ، نقدم تحليلاً لسلوك المجال الكهرومغناطيسي بالقرب من برج سكاى تريبوكيو الذي يبلغ ارتفاعه 634 مترًا والذي ضربته الصاعقة. يتم تقييم مركبات المجال الكهرومغناطيسي على مسافات قريبة من البرج لنقطتي مراقبة، بالتحديد على سطح الأرض وفوقه ، باستخدام طريقة FDTD-2D (المجال الزمني للفرق المحدود). تمت مقارنة النتائج مع تلك التي تم الحصول عليها على برج CN في كندا. المجال الكهرومغناطيسي له نفس السلوك بالنسبة للبرجين ، والفرق الوحيد يكون عند مستوى قيمة الذروة الأولى ووقت الصعود لمكونات المجال الكهرومغناطيسي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الحقول الكهرومغناطيسية فوق وتحت الأرض تتأثر بشكل واضح بوجود البرج.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous présentons une analyse du comportement du champ électromagnétique à proximité de la tour Tokyo Skytree de 634 m de hauteur frappée par la foudre. Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à des distances proches de la tour pour deux points d'observation, à savoir au-dessus et en-dessous de la surface du sol, en utilisant la méthode FDTD-2D (Finite Difference Time Domain). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par la foudre sur la tour CN au Canada. Le champ électromagnétique a le même comportement pour les deux tours, la seule différence se situe au niveau de la valeur du pic initial et du temps de montée des composantes du champ électromagnétique. Les résultats obtenus montrent que les champs électromagnétiques au-dessus et en-dessous du sol sont nettement affectés par la présence de la tour.

Abstract:

In this paper, we present an analysis of the electromagnetic field behavior in the vicinity of the 634 m high of the Skytree tower in Tokyo struck by lightning. The electromagnetic field components are evaluated at deferent distances close to the tower for two observation points, namely above and below the ground surface, using the Finite Difference Time Domain (FDTD-2D) method. The results are compared with those obtained from lightning on the CN Tower in Canada. The electromagnetic field has the same behavior for both towers, the only difference being the value of the initial peak and the rise time of the electromagnetic field components. The results show that the electromagnetic fields above and below ground are clearly affected by the presence of the tower.