

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'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

**« Étude d'une tour instrumentée et de son impact
sur le champ électromagnétique de la foudre »**

Préparé par :

LOUDI MOHAMED AMINE

BOUSSADIA REGUIA

Devant du jury

Grade

Mr. MIMOUNI Abdenbi

Pr

Président

Mr. K. HABRI

MAA

Examineur

Mme. A. LAKHDAR

MAA

Encadreur

PROMOTION : 2018/2019

Remerciements

À l'issue de cette fin d'étude, nous adressons nos sincères remerciements
premièrement à « Allah » tout puissant qui nous a donné la santé, la patience.

Ensuite, on tient à adresser nos plus vifs remerciements à notre promoteur

M^{me} : Lakhdar Asmaa pour nous avoir encadré, suivi et encouragé.

Nous remercions sincèrement Monsieur Mimouni Abdenbi, pour le grand honneur

D'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Nos vifs remerciements vont également à Monsieur Habri Khaled,

D'avoir accepté d'examiner notre travail et d'être membre du jury de soutenance.

On remercie également, tous nos enseignants du département de GE.

On n'exclue pas de ces remerciements toutes les personnes qui ont aidé de près ou de
loin dans la réalisation de cet PFE.

Enfin, on remercie tout particulièrement nos parents, pour leur soutien
inconditionnel tout au long de nos longues années d'études.

On veut également remercier nos familles et nos amis pour leur soutien moral.

Les discussions, les remarques et les commentaires de nos collègues ont été
sources d'idées et ont contribué au développement et à
L'amélioration de cette étude.

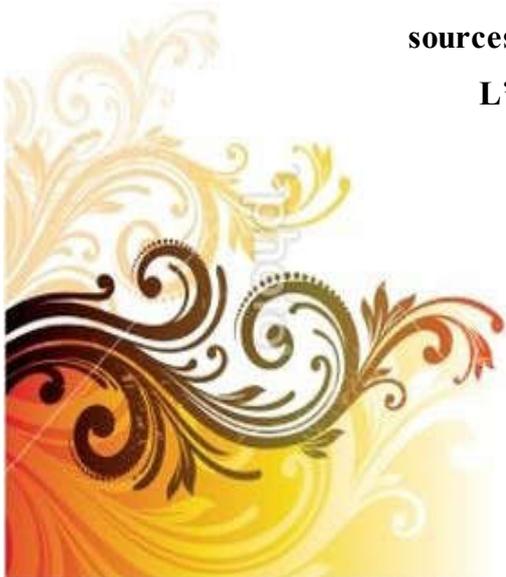


Table des matières

Sommaire

Introduction générale	14
-----------------------------	----

Chapitre I Généralités sur le phénomène de la foudre

I.1 Introduction	4
I.2. Historique	4
I.2.1 Époque des croyances.....	4
I.2.2 Nature du phénomène de foudre.....	4
I.3 Électricité atmosphérique (Le condensateur terrestre)	6
I.4 Phénomène de foudre	7
I.4.1 La foudre.....	7
I.4.2 Formation de la foudre	7
I.4.3 Électrisation du nuage	8
I.4.4 Différents types de décharges.....	9
I.4.4.1 Décharges intra – nuages.....	9
I.4.4.2 Décharges inter nuages	10
I.4.4.3 Décharges nuage – sol.....	10
I.5 Classification et description des coups de foudre.....	10
I.5.1 Classification des coups de foudre	10
I.5.2 Déroulement d'un coup de foudre	11
I.5.2.1 Coup de foudre descendant négatif	11
I.5.2.2 Coup de foudre descendant positif	11

I.5.2.3 Coup de foudre ascendant (négatif et positif).....	12
I.6 Le traceur.....	12
I.7 Étude expérimentale du phénomène de foudre.....	13
I.7.1 Déclenchement artificiel de la foudre.....	13
I.7.2 Utilisation des tours instrumentées de la foudre.....	14
I.7.3 Utilisation des systèmes de détection de la foudre.....	24
I.8 L'arc en retour.....	25
I.9 Courant de foudre.....	26
I.10 Effets de la foudre.....	27
I.10.1 Effets électriques.....	28
I.10.2 Effets thermiques.....	28
I.10.3 Effets électrodynamiques.....	29
I.10.4 Effets électrochimiques.....	30
I.10.5 Effets liés aux champs électromagnétiques.....	30
I.11 Systèmes de protection contre la foudre.....	31
I.11.1 Les systèmes de protection contre les effets directs.....	31
I.11.1.1 Les paratonnerres à tige simple.....	31
I.11.1.2 Les cages maillées.....	32
I.11.1.3 Le fil de garde ou fil tendu.....	33
I.11.2 Les systèmes de protection contre les effets indirects.....	35
I.12 Conclusion.....	36

Chapitre II Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre

II.1 Introduction	38
II.2 Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal de foudre initié au sol.....	38
II.2.1 Classification des modèles de l'arc en retour.....	38
II.2.2 Modèles d'ingénieurs	39
II.2.2.1 Modèle de Bruce et Golde (BG)	39
II.2.2.2 Modèle de ligne de transmission (Transmission Line, TL)	41
II.2.2.3 Modèle de ligne de transmission modifiée (MTL).....	42
A- modèle de ligne de transmission modifié avec une atténuation exponentielle.....	42
"Modified Transmission Line with Exponential decay" (MTLE) [35]	42
B- modèle de ligne de transmission modifié avec une décroissance linéaire MTLL	42
II.2.2.4 Modèle de la source de courant progressive (TCS)	42
II.3 Généralisation des modèles d'ingénieur	43
II.4 Représentation analytique du courant d'arc en retour à la base du canal	44
II.4.1 Modèle bi-exponentiel.....	44
II.4.2 Modèle de Heidler.....	46
II.5 Distribution du courant dans la tour et dans le canal de foudre	47
II.6 Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal et le long de l'objet élevé..	49
II.6.1 Modèle de Rachidi et al.....	49
II.6.2 Modèle de Baba et Rakov	50
II.6.3 Différence entre le modèle de Rachidi et le modèle de Baba	51

II.7 Notions de courant contaminé et de courant non contaminé	51
II.8 Calcul du champ électromagnétique par la méthode des différences finies FDTD ...	52
II.8.1 Principes de base de la méthode FDTD	53
II.8.1.1 Équations de base	53
II.8.1.2 Conditions aux limites absorbantes.....	57
II.8 Conclusion.....	57

Chapitre III Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

III.1 Introduction.....	60
III.2 Étude et simulation	60
III.2.1 Tour Gaisberg	60
III.2.2 Géométrie du problème.....	62
III.2.3 Formulation du champ électromagnétique.....	63
III.2.4 Conditions aux limites	64
III.2.5 Paramètres de la simulation	65
III.2.6 Paramètres du courant de court-circuit	65
III.3 Résultats de simulation	66
III.3.1 Champ électrique vertical	66
III.3.2 Champ électrique radial	67
III.3.2 Champ magnétique azimutal.....	58
III.4 Conclusion	69
Conclusion générale.....	71

Liste des Figures

Chapitre I Généralités sur le phénomène de la foudre

Figure I.1 : Condensateur terrestre.....	6
Figure I.2 : Séparation des charges dans un nuage orageux	7
Figure I.3 : Différents types de décharges	9
Figure I.4 : Descendant négatif	11
Figure I.5 : Descendant positif	11
Figure I.6 : Ascendant négatif	12
Figure I.7 : Ascendant positif	12
Figure I.8 : Développement du traceur par bonds	13
Figure I.9 : Le système de déclenchement artificiel de la foudre	14
Figure I.10 : Forme moyenne normalisée du courant des arcs en retour premier	15
Figure I.11 : Distribution statistique des coups de foudre	16
Figure I.12 : Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour	19
Figure I.13 : Exemple de mesure de courant de foudre.	20
Figure I.14 : Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m	20
Figure I.15 : (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet.....	21
Figure I.16 : La tour Gaisberg	22
Figure I.17 : Les formes d'ondes mesurées du courant de foudre (Gaisberg).....	22
Figure I.18 : La tour Säntis, (a) Une forme d'onde typique mesurée à la tour.....	23
Figure I.19 : La tour Tokyo Skytree	24
Figure I.19 : Développement de l'arc en retour	26

Figure I.20 : Évolution du courant à la base du canal de foudre	26
Figure I-21 : Exemple de protection par tige simple	32
Figure I.22 : Exemple de protection par cage maillée	33
Figure I.23 : Exemple de protection par fil tendu	34
Figure I.24 : Exemple de protection par fil de garde sur un réseau électrique HT	34
Figure I.25 : Exemple de parafoudre à gaz	35
Figure I.26 : Exemple de réseau de varistances	36

Chapitre II Modélisation d'un champ électromagnétique de la foudre

Figure II.1 : Distribution spatio-temporelle selon le modèle de BG.....	40
Figure II.2 : Distribution spatio-temporelle selon le modèle de ligne	41
Figure II.3 : Courant à la base du canal de foudre.....	45
Figure II.4 : Courants à la base du canal d'un arc subséquent typique	47
Figure II.5 : Propagation du courant le long de la tour	48
Figure II.6 : Courant contaminé.....	51
Figure II.7 : Courant non contaminé	52
Figure II.8 : Principe de discrétisation temporelle en différences finies	54
Figure II.9 : Maillage spatial 3D en différences finies- modèle de Yee.....	54
Figure II.10 : Domaine de calcul à deux dimensions 2D.....	55

Chapitre III Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

Figure III.1 : Position du capteur de courant de foudre sur la tour Gaisberg.	61
--	----

Figure III.2 : Résistance parallèle installé au soujets de la tour Gaisberg	61
Figure III.3 : Configuration proposée, tour 100m . $\sigma = 0.0025$	62
Figure III.4 : Le domaine d'étude.	63
Figure III.5 : Champ électrique vertical calculé à la distance de 50	66
Figure III.6 : Champ électrique radial calculé à la distance de 50 m.....	67
Figure III.7 : Champ magnétique calculé à la distance de 50 m.....	68

« ----- »

Liste des Tableaux

Chapitre I Généralités sur le phénomène de la foudre

Tableau I.1 : Paramètres du courant d'un coup de foudre descendant négatif. 17

Chapitre III Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

Tableau II.1 P (z) et v pour les cinq modèles d'ingénieur 44

Tableau II.2 Paramètres des fonctions exponentielles. 45

Tableau II.3 Paramètres des fonctions bi-exponentielles 47

« ----- »

Introduction générale

Introduction Générale

Toutes installations électriques, lignes de transmission aériennes ou appareillages électriques/électroniques sont soumis aux phénomènes de perturbations naturelles. Parmi ces phénomènes on précise la foudre. Cette dernière influe directement sur les réseaux électriques par l'impact direct sur les lignes ou indirectement par un rayonnement électromagnétique.

L'interaction de la foudre avec des objets élevés a attiré une attention considérable de beaucoup de chercheurs, principalement parce que les données du courant de foudre sont souvent rassemblées au moyen d'instruments installés sur des tours. Des études basées sur l'observation de la foudre ont montré que la présence de l'objet élevé foudroyé, « contamine » la mesure du courant de la foudre et affecte aussi les champs électromagnétiques associés. Cette « contamination », dépend de la géométrie de la structure elle-même.

Ce travail a pour but l'étude d'une tour instrumentée, où la tour Gaisberg de 100m a été prise comme exemple puis faire montrer son impact sur le champ électromagnétique rayonné par la foudre, en présence d'un sol de conductivité finie, les résultats de simulation sont obtenus grâce au code en Fortran développé dans le laboratoire de Génie électrique et Plasma et seront comparés avec ceux obtenus par un coup de foudre initié au sol.

Notre travail sera réparti sur un enchaînement logique de trois chapitres :

- Le chapitre I entame des généralités sur le phénomène de la foudre, les mécanismes de génération d'une décharge de foudre notamment ceux de la phase de l'arc en retour et leur principe de déclenchement, nous avons aussi présenté les formes d'ondes des courants de foudre.
- Le deuxième chapitre est réservé à la modélisation du champ électromagnétique de la foudre. En premier lieu, nous écrivons les différentes classes des modèles de l'arc en retour et 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.

Introduction Générale

- Le chapitre III présente l'étude de la construction d'une tour instrumentée et les résultats de simulation de la caractérisation du champ électromagnétique pour deux cas, ceux en présence d'une tour élevée (tour Gaisberg) et ceux sans tour (initié ou sol) pour trois points d'observation : en dessous, au niveau et au-dessus d'un sol caractérisé par une conductivité finie, et on terminera par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur le phénomène de la foudre

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.1 Introduction

Ce chapitre a pour but la connaissance de l'origine et les effets de la décharge naturelle nommée foudre, cette dernière constitue une source de perturbation majeure pour le bon fonctionnement des réseaux. En effet, on distingue deux types d'agressions de la décharge orageuse, directe et indirecte. La foudre génère de très fortes décharges, qui induisent des champs électromagnétiques intenses, pouvant endommager les installations électriques, notamment, les appareils et les commandes électroniques. De plus lors d'un impacte de foudre, des surtensions transitoires d'amplitudes importantes (plusieurs milliers de volt) et de courtes durées (de la microseconde à la milliseconde) sont créés. Celles-ci concourent avec les effets nocifs du champ magnétique sur les installations électriques. Pour cela, une protection des personnes et des installations contre la foudre est requise. Cette protection a pour rôle d'écouler ces forts courants de décharge dans la terre.

I.2. Historique

I.2.1 Époque des croyances

Les historiens situent la première représentation de la foudre durant la première époque de Babylone. Pour les Grecs, la foudre était la manifestation de la colère de Zeus (Roi des dieux dans la mythologie grecque) [1]. Il en était de même pour les romains avec leur Dieu Jupiter. D'autres croyances sont beaucoup plus poétiques. Ainsi le peuple Basutos en Afrique pense que la foudre est un oiseau magique, nommé Umpudolo qui plonge des nuages vers le sol [2]. Plus tard, au Moyen Age, l'église et son idéologie vont s'emparer de ce phénomène naturel : être victime de la foudre était alors considéré comme un châtement. De nombreux saints sont invoqués pour se protéger contre cette punition divine.

I.2.2 Nature du phénomène de foudre

L'histoire de la foudre et celle de l'électricité se rejoignent au XVIII^e siècle. En 1745 [2], l'invention de la bouteille de Leyde va faire progresser les études théoriques sur l'électricité. Cet ancêtre du condensateur permet en effet de provoquer des étincelles

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

beaucoup plus violentes que les machines électrostatiques utilisées jusque-là. Ces décharges électriques, s'accompagnent également de détonations relativement intenses.

Le rapprochement avec le phénomène foudre est alors très vite envisagé par un bon nombre de scientifique. En 1748 [2], l'abbé Nallet dresse une liste de similitudes entre la foudre et les décharges électriques.

D'autres études du même type sont publiées à la même époque. Le 07 novembre 1749 [2], une étude comparative et très complète a été publiée par un scientifique américain dont le nom restera lié à la foudre : Benjamin Franklin. Ses travaux vont se poursuivre et il décrira, dans un mémoire datant de l'été 1750, une expérience permettant de démontrer la nature électrique du nuage orageux. L'idée de l'expérience de cerf-volant était née. C'est en 1752 que Benjamin Franklin réalise sa fameuse expérience. Son objectif était de déterminer si les éclairs étaient un phénomène électrique, ce cerf-volant, formé de deux bandes légères de cèdre, en croix attachées à un mouchoir en soie. Ils attachent un long fil métallique en haut du cerf-volant pour attirer l'électricité. Ils fixent également une ficelle au cerf-volant afin de le tenir, et Franklin noue un ruban de soie sur la ficelle, près de la région qu'il tient à la main. Une clé, en fin, est rattachée au ruban, ainsi qu'une bouteille de Leyde. Benjamin Franklin réalise son expérience sous le pas d'une porte, de façon que le ruban de soie attaché à la clé et à la bouteille de Leyde ne soit pas mouillé par la pluie.

Une fois le protocole de l'expérience élaboré, il attendait l'arrivée d'un orage. Comme Franklin l'avait prédit lorsque des nuages passent au-dessus du cerf-volant, des charges négatives traversent le fil métallique du cerf-volant et parviennent jusqu'à la clé. La charge rentre dans la bouteille de Leyde, ce qui démontre clairement la présence d'électricité.

Franklin tenait le cerf-volant par le tissu de soie isolant : il était ainsi protégé de l'électricité. Mais quand il tend son doigt pour toucher la clé, il reçoit un choc dû aux charges négatives de la clé ; elles sont assez fortes pour qu'une étincelle saute de la clé à sa main. Par miracle, cette charge n'était pas assez forte pour être mortelle. Dans d'autres

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

circonstances, le coup d'éclair aurait pu le tuer instantanément. L'expérience Franklin a montré avec succès que les éclairs étaient en fait de l'électricité statique.

I.3 Électricité atmosphérique (Le condensateur terrestre)

La terre et l'électrosphère (couche de la haute atmosphère ionisée et située à environ 100 km d'altitude) peuvent être considérées comme les armatures d'un gigantesque condensateur sphérique la Figure I.1 . Entre les deux, la troposphère et la stratosphère constituent le diélectrique [3]. On peut donc assimiler le système électrosphère – globe terrestre à un condensateur sphérique dont la capacité est donnée par la relation suivante [4] :

$$C = 4\pi\epsilon_0 \frac{R_t \cdot R_e}{R_e - R_t} \quad \text{I.1}$$

Où

$R_t = 6367$ km rayon de la terre [5].

$R_e = (6367 + 100)$ km = 6467 km est le rayon de l'électrosphère [5].

Dans ce cas, nous trouvons

$C = 46$ mF [5]

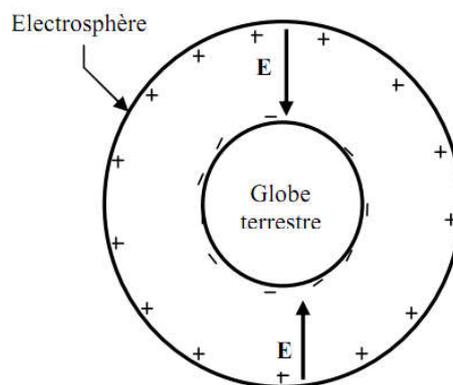


Figure I.1 : Condensateur terrestre [5].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.4 Phénomène de la foudre

I.4.1 La foudre

La foudre est définie comme une décharge électrique associée à une impulsion de courant transitoire de très forte amplitude. La source la plus commune de la foudre est la séparation des charges dans les nuages d'orage, les cumulo-nimbus. [6]

La foudre est un phénomène naturel mettant en jeu une décharge électrostatique qui se produit lorsque de l'électricité (statique) s'accumule entre des nuages d'orages ou entre les nuages d'orages et la terre.

La différence de potentiel électrique entre ces deux points (nuages, sol...) peut aller jusqu'à 100 millions de volts et produit une dilatation de l'air par dégagement de chaleur. Les mécanismes à l'origine de l'électrisation du nuage donnant naissance aux éclairs ne sont pas encore bien connus. Les recherches se poursuivent encore de nos jours pour essayer de les connaître et de les caractériser.

I.4.2 Formation de la foudre

La foudre se forme lors de l'orage, ce dernier commence par la formation d'un ou de plusieurs nuages fortement électrisés, la formation du nuage orageux de type cumulonimbus est un phénomène thermodynamique très complexe qui dépend de la chaleur, l'humidité et les turbulences électromagnétiques. La distribution des charges dans un nuage d'orage est présentée dans la figure I.2

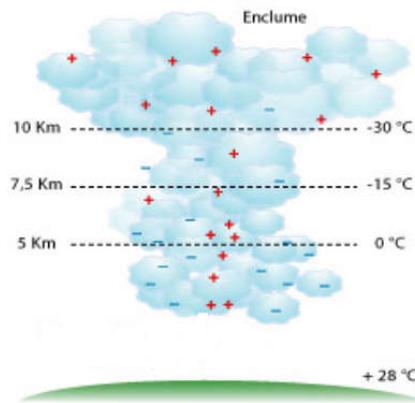


Figure I.2 : Séparation des charges dans un nuage orageux [7].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.4.3 Électrisation du nuage

À l'intérieur du nuage, une différence de température importante entre le bas et le haut du nuage, induisant de violent déplacement d'air ascendants et descendants entraînent des collisions entre les molécules d'eau ce qui crée des charges positives, qui s'accumulent au sommet du nuage, et des charges négatives, qui s'accumulent à la base. La dissociation des charges dans le nuage orageux génère un champ électrique intense dans l'espace nuage-sol.

Lorsque le nuage atteint, au niveau d'un sol plan, une intensité de 4 à 10 kilovolts par mètre, une décharge au sol est imminente. Une gigantesque étincelle se produit alors. Les nuages d'orage créent les conditions météorologiques favorables à l'accumulation de charges et, par conséquent, à la création d'un condensateur géant. L'électrisation du nuage d'orage est basée sur deux phénomènes : la gravitation et la convection.

- **La gravitation**

Les gouttes de pluie, les grêlons et les particules de grésil (de petits grains de glace) tombent par gravité vers le bas du nuage, au-dessous des gouttes d'eau et des cristaux de glace de taille inférieure qui restent en suspension. Lorsque les grosses particules entrent en collision avec les cristaux de glace à une température inférieure à une limite critique, autour de -15 °C , les grains de grésil se chargent négativement, et positivement si cette température est supérieure à ladite limite.

Comme les grains tombent plus rapidement que les cristaux, ils transportent depuis les zones supérieures du nuage, où les températures sont inférieures à -15 °C , des charges négatives vers le bas. Le seuil des -15 °C dépassé, celles-ci deviennent positives. On obtient alors une structure tripolaire du nuage avec une couche médiane chargée négativement entourée de deux couches positives. Cependant, les chocs entre particules ne sont pas seuls à l'origine de l'électrisation du nuage.

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

• La convection

Il y a convection quand les ions libres dans l'atmosphère sont captés par les gouttelettes dans le nuage et ensuite transportés dans le nuage, produisant ainsi les régions chargées. Des éléments dans le ciel et sur terre entrent en jeu.

- Dans le ciel, une couche écran est formée quand les ions négatifs se fixent aux cristaux, en haut du nuage.
- Sur la terre, au voisinage d'objets pointus, un champ électrique intense produit une décharge d'ions positifs.

Une réaction en chaîne se produit par l'excitation et la collision des électrons proches. Ensuite, les ions positifs sont entraînés par l'air chaud et s'élèvent par convection. Ils participent ainsi à l'électrisation du nuage.

I.4.4 Différents types de décharges

Il existe trois types de décharges :

Les décharges entre nuage (Figure.I.3.a).

Les décharges à l'intérieur du nuage ou intra-nuages (Figure.I.3.b).

Les décharges entre nuage et terre, sont les coups de foudre (Fig.I.3.c).

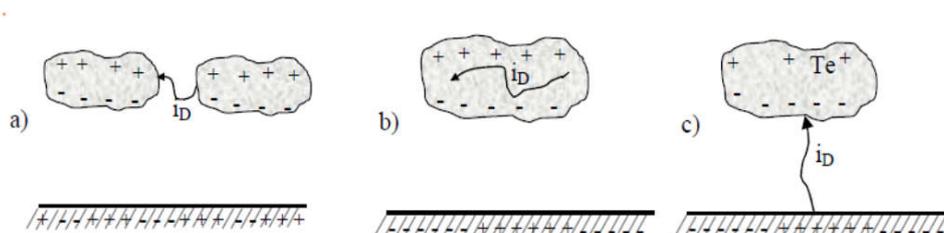


Figure I.3 : Différents types de décharges [8].

I.4.4.1 Décharges intra – nuages

Contrairement aux décharges nuage - sol, la décharge intra - nuages (Figure.I.3.a) est de loin la plus fréquente mais la moins étudiée. Elle se présente sous la forme d'une succession d'arcs électriques qui se tendent entre une ou plusieurs poches de charges

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

opposées contenues dans un même nuage. En règle générale, ces arcs sont fortement ramifiés et se produisent à l'intérieur du nuage. Mais il arrive parfois qu'ils sortent du nuage pour y revenir en passant par l'extérieur, formant ainsi une espèce de pont très lumineux et visible de la terre. La durée de ces décharges est de l'ordre de plusieurs centaines de millisecondes et leurs effets sont plutôt minimes [1].

I.4.4.2 Décharges inter nuages

Ces décharges se développent entre deux ou plusieurs nuages orageux différemment chargés se trouvant à une distance telle que l'ionisation de l'air qui les sépare devient possible (Figure.I.3.b).. Elles se produisent généralement à de très grandes altitudes, et elles sont d'autant plus fréquentes que la densité de l'air est faible. Ces décharges inquiètent surtout les engins aéronautiques et les systèmes de transmission par satellite.

I.4.4.3 Décharges nuage – sol

Parmi toutes les formes de décharges atmosphériques, la décharge nuage - sol (Figure.I.3.c) est la moins fréquente mais certainement la plus contraignante et la mieux étudiée. Elle représente à peu près le tiers de la totalité des décharges atmosphériques que connaît le globe terrestre. Ce pourcentage est fonction des conditions météorologiques et physiques (humidité, température, localisation des charges dans le nuage, ...), et enfin de l'altitude. Elle se présente sous la forme d'une succession de décharges "nuage - sol - nuage" appelées coups de foudre [9].

I.5 Classification et description des coups de foudre

I.5.1 Classification des coups de foudre

On définit quatre grandes catégories de coup de foudre, en fonction de la polarité de la base de nuage déchargé, positive ou négative et en fonction du sens de propagation du traceur ascendant ou descendant.

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.5.2 Déroulement d'un coup de foudre

I.5.2.1 Coup de foudre descendant négatif

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

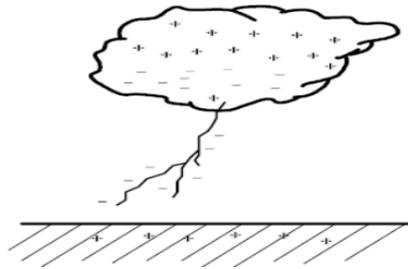


Figure I.4 : Descendant négatif [10].

I.5.2.2 Coup de foudre descendant positif

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

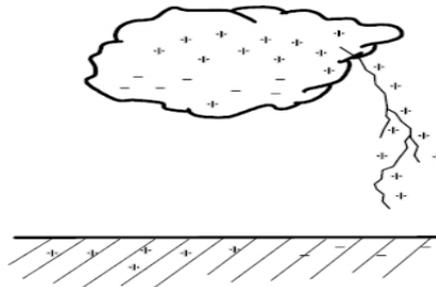


Figure I.5 : Descendant positif [10].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.5.2.3 Coup de foudre ascendant (négatif et positif)

Les décharges des catégories (Ascendant négatif ou positif) figure (I.6) et (I.7) qui sont déclenchées par des traceurs ascendants, sont relativement rares et apparaissent généralement aux sommets des montagnes ou des longues structures.

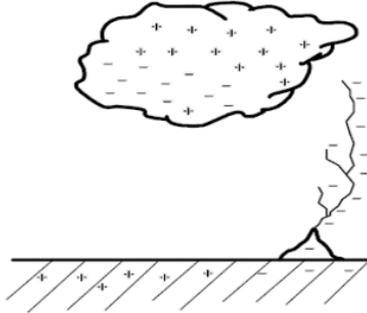


Figure I.6 : Ascendant négatif [10].

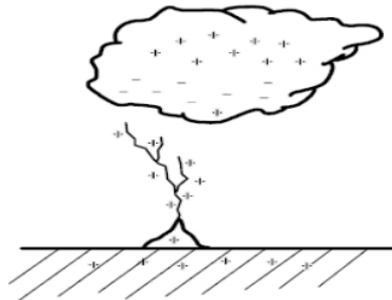


Figure I.7 : Ascendant positif [10].

I.6 Le traceur

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

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

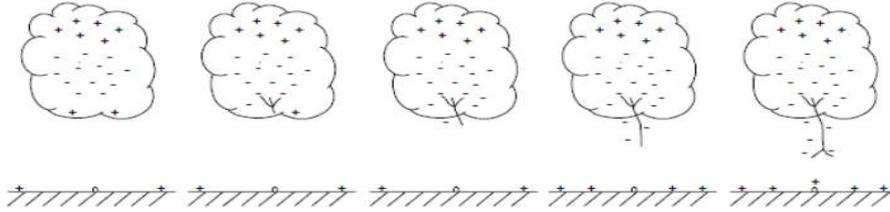


Figure I.8 : Développement du traceur par bonds [10].

I.7 Étude expérimentale du phénomène de foudre

La connaissance précise des paramètres du courant de foudre est essentielle pour la protection des systèmes électriques et de télécommunication contre la foudre. 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 classées en trois catégories :

- Déclenchement artificiel de la foudre.
- L'utilisation des tours instrumentées
- L'utilisation des systèmes de détection de la foudre.

I.7.1 Déclenchement artificiel de la foudre

Dès les années 1970, de manière à pouvoir étudier plus précisément les caractéristiques des décharges orageuses nuage sol, le déclenchement artificiel de la foudre a été utilisé afin de maîtriser le point d'impact.

La méthode la plus couramment utilisée pour déclencher artificiellement la foudre s'appuie sur la technique fusée –fil. On utilise une fusée connectée à un filin totalement ou partiellement métallique. Cette méthode, facile à mettre en œuvre, présente également l'avantage d'avoir un coût relativement faible (Figure I.9).

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

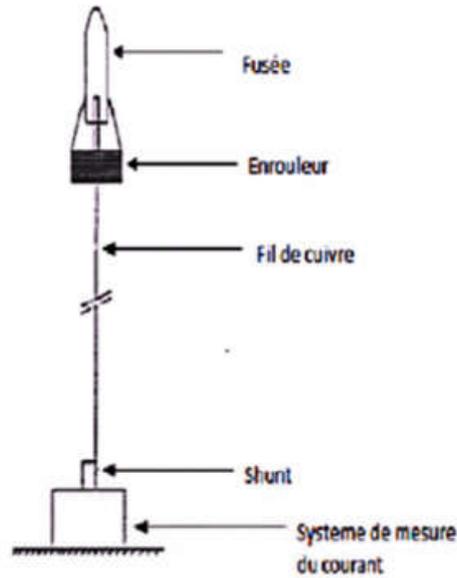


Figure I.9: le système de déclenchement artificiel de la foudre [11].

Le principe de fonctionnement de cette méthode est assez simple. Lors d'un épisode orageux, le champ électrique au niveau du sol augmente et peu de temps avant que ne se produise le premier arc en retour, on note une augmentation significative et rapide de ce champ. En se basant donc sur cette élévation locale du champ électrique, on lance alors une fusée connectée au sol par un filin métallique. De ce fait, on crée un effluve au niveau de la tête de la fusée et on favorise ainsi la création de l'arc en retour, en offrant par l'intermédiaire du filin un chemin de moindre résistivité. La connexion avec le traceur descendant entraîne la fusion du filin et provoque un arc en retour dont les caractéristiques sont proches de celles d'un éclair naturel.

I.7.2 Utilisation des tours instrumentées de la foudre

La description la plus complète à ce jour du courant de l'arc en retour à la base du canal de foudre a été présentée par Berger et ses collaborateurs en Suisse (rapporté par Uman [12]) à l'aide de quelques tours instrumentés. Les mesures des courants ont été effectuées au sommet de deux tours de 70 et 90 m de haut, du Mont San Salvatore à Lugano [13].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

Les courants mesurés ont été enregistrés à l'aide des oscilloscopes cathodiques à haute vitesse (installés en 1958) avec quatre poutres d'enregistrer les courants dans les deux tours et deux fléchissements de temps avec une résolution de $0,5 \mu\text{s}$.

Environ 15 % des mesures rapportées par l'équipe du Prof. Berger sont dues à des traceurs descendants. La plupart des décharges sont initiées par des traceurs ascendants positifs et négatifs.

La figure (I.10) illustre les formes moyennes des courants typiques correspondant aux arcs en retour premier et subséquent d'une décharge négative. Dans cette figure, il est possible de voir un temps de montée rapide du courant correspondant à l'arc en retour subséquent.

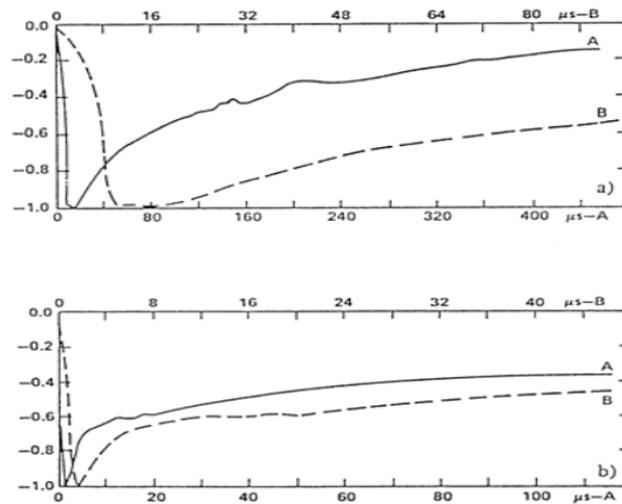


Figure I.10 : Forme moyenne normalisée du courant des arcs en retour premier et subséquent (a) premier arc en retour, (b) arc en retour subséquent [11].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

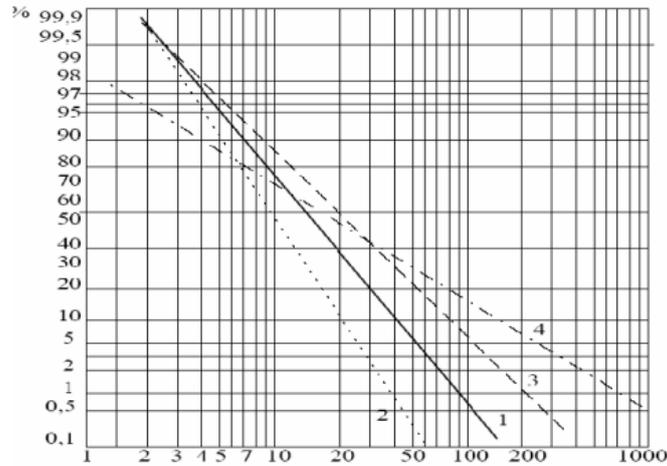


Figure I.11 : Distribution statistique des coups de foudre [11].

Avec :

- (1) Coups de foudre négatifs : première décharge.
- (2) Coups de foudre négatifs : décharge secondaire.
- (3) Moyenne.
- (4) Coups de foudre positifs.

La lecture de la courbe (moyenne) indique que l'intensité d'un coup de foudre négatif atteindra des valeurs supérieures à 2 kA dans 99,7 % des cas. La valeur moyenne de l'intensité se situe vers 25 kA.

La distribution statistique des principaux paramètres du courant est présentée dans le tableau

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

Tableau I.1 : Paramètres du courant d'un coup de foudre descendant négatif [13].

Paramètre	Unité	Nombre d'événement	Pourcentage de cas dépassant la valeur indiquée		
			95%	50%	5%
Courant de crête					
Premier arc en retour négatif	KA	101	14	30	80
Arc en retour subséquent négatif	KA	135	4.6	12	30
Charge totale					
Premier arc en retour négatif	C	93	1.2	5.2	24
Arc en retour subséquent négatif	C	122	0.2	1.4	11
Temps de montée (2 kA-crête)					
Premier arc en retour négatif	μs	89	1.8	5.5	18
Arc en retour subséquent négatif	μs	118	0.22	1.1	4.5
di/dt maximal					
Premier arc en retour négatif	KA/ μs	92	5.5	12	32
Arc en retour subséquent négatif	KA/ μs	122	12	40	120
Durée de l'impulsion (2 kA-mi-amplitude)					
Premier arc en retour négatif	μs	90	30	75	200
Arc en retour subséquent négatif	μs	115	6.5	32	140
Intervalle de temps entre deux décharges négatives	Ms	133	7	33	150

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

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

- Les amplitudes du courant du premier arc en retour sont supérieures à celles des arcs en retour subséquents.
- La valeur maximale de la variation du courant dans le cas d'un arc subséquent est supérieure à celle du premier arc en retour.
- Le temps de montée du courant de l'arc en retour subséquent est plus rapide que celui d'un courant du premier arc en retour.
- La durée de l'impulsion du courant de l'arc en retour subséquent est inférieure à celle du premier arc en retour.

Il y a d'autres campagnes expérimentales de mesure du courant d'arc en retour, on cite par exemple durant les années 70 :

- les mesures faites par l'équipe du Professeur Garbagnatiau sommet de deux tours de 40 m, situées au sommet de deux montagnes une au nord et l'autre au centre de l'Italie [12]. Le courant mesuré correspond aux deux types de décharges de foudre : ascendante et descendante.

- Les mesures de l'équipe du Professeur Eriksson sur une tour de hauteur 60 m installées sur une terre plate en Afrique du sud, la tour a été isolée du sol et le courant de foudre a été mesuré à la base à travers un transformateur de courant et une sonde Rogowski. Plus de 50% des décharges observées étaient initiées par des traceurs descendants négatifs et aucun enregistrement des traceurs positifs n'a été fait. Le temps de montée du courant très rapide n'a jamais été observé dans d'autres études [14].

On peut trouver dans la littérature d'autres mesures du courant de foudre obtenues en utilisant de petites tours (par exemple : les résultats de Narita et al. [15] en 2000 au Japon, et les résultats de Torres et al. [16] en 1999 en Colombie).

- **La tour d'Ostankino à Moscow [14]**

Cette tour est de 540 m de hauteur, le courant est mesuré dans trois endroits de la tour : 47 m, 272 m et 533 m (Figure I.12).

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

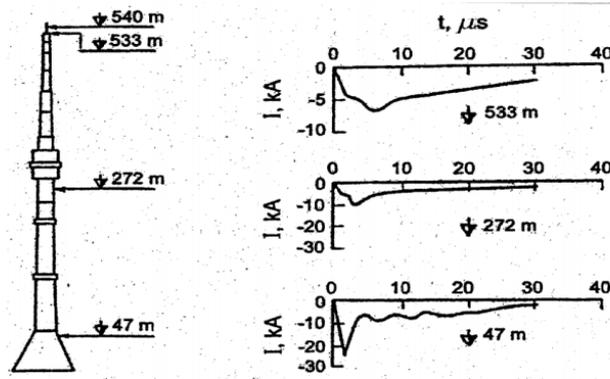


Figure I.12 : Formes du courant mesuré à 533m, 272m et 47m sur la tour d'Ostankino, Moscow [14]

On remarque que la forme du courant mesuré change d'un endroit à un autre, la valeur du pic de ce courant augmente en allant du sommet de la tour vers le sol, Bermudez [14] rapporte que ceci est dû aux réflexions multiples de l'onde de courant au sommet avec un coefficient négatif et les réflexions multiples à la base de la tour avec un coefficient positif.

- **La tour CN à Toronto au Canada**

La tour CN est parmi les tours les plus élevées au monde, elle est de 553 m de hauteur la figure (I.13).

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre



Figure I.13 : Exemple de mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée.
Tour CN à Toronto au Canada [11].

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.14). 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.

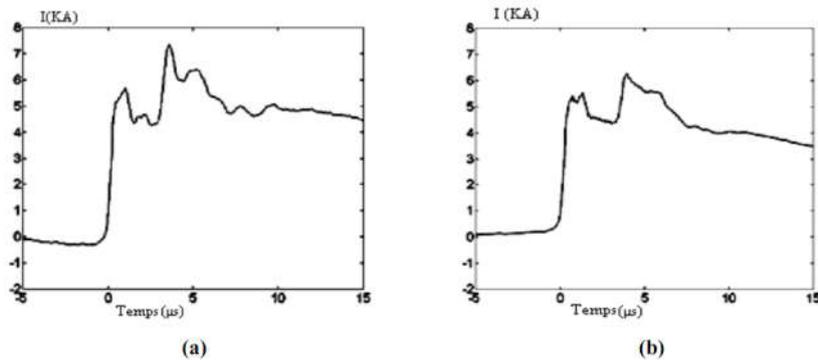


Figure I.14 : Courant de l'arc en retour : (a) 509 m et (b) 474 m [17].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

- **La 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.15.a) montré une photographie de la tour Peissenberg et (La figure I.15.b) décrit les variations temporelles du courant d'arc en retour mesuré simultanément, au sommet et à la base de la tour. La contamination du courant par les réflexions multiples est bien mise en évidence.

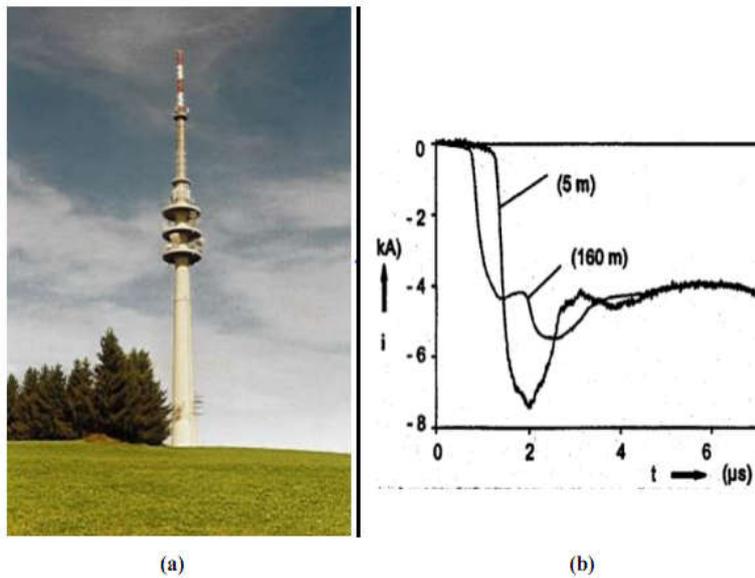


Figure I.15 : (a) La tour Peissenberg, (b) Courant mesuré au sommet et à la base de la tour [14].

- **La tour Gaisberg en Autriche**

Le 22 Août 1956 le premier grand émetteur nommé le Gaisberg émetteur, c'est une tour émettrice de télévision sur le mont Gaisberg près de Salzbourg, en Autriche. Durant les années 1980, une UHF antenne a été installée sur le dessus de la tour qui porte sa hauteur à 100 mètres. Structure en treillis d'acier de métal acier. [18].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre



Figure I.16 : La tour Gaisberg [19].

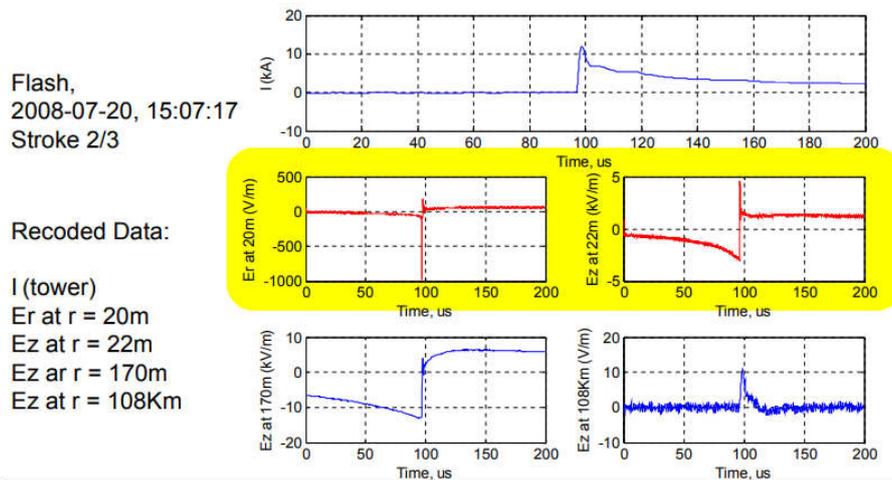


Figure I.17 : Les formes d'ondes mesurées du courant de foudre, du champ électrique radial et du champ électrique vertical. [19]

Sur la figure (I.17), on peut voir la forme du courant d'arc en retour caractérisée par une amplitude dépassant 10 kA et un temps de montée rapide, la forme du champ électrique radial à 20m, la forme du champ électrique vertical à 22 m, 170 m et 108 Km.

- **La tour Fukui au Japon**

La tour Fukui de hauteur de 200 m au Japon a également été utilisé pour mesurer le courant de l'arc en retour et leurs champs électromagnétiques associés, deux coaxial résistances shunt de (2 m Ω , 10 m Ω) ont été installés au sommet de la tour [20]. Il a été

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

constaté que le courant mesuré est affecté par les ondes réfléchies au sol et au sommet de la tour.

- **La tour Säntis**

La tour Säntis de 125m de hauteur est construite au sommet du mont du même nom à une altitude de 2505m. Une analyse pluriannuelle des données du système de détection de la foudre EUCLIDE a révélé que cette tour est une des structures les plus foudroyées en Suisse [21]. En juin 2010, la tour a été équipée d'un système de mesure sophistiqué. Quatre capteurs ont été installés à 20 m et 67 m [22] le long de la tour : deux de type Rogowski dont la sortie est intégrée pour obtenir une reproduction du courant dans la tour, et deux capteurs « B-dot » conçus dans le cadre du projet pour mesurer sa dérivée temporelle. Le système est contrôlé par internet depuis l'EPFL et la HEIG-VD. La tour a une structure métallique interne de 2,5 m de rayon moyen, d'une structure en plexiglas externe de 6 m de diamètre moyen. Cette structure sert comme une tour de télécommunications et une station climatique. Il la maintenir contre les vents.

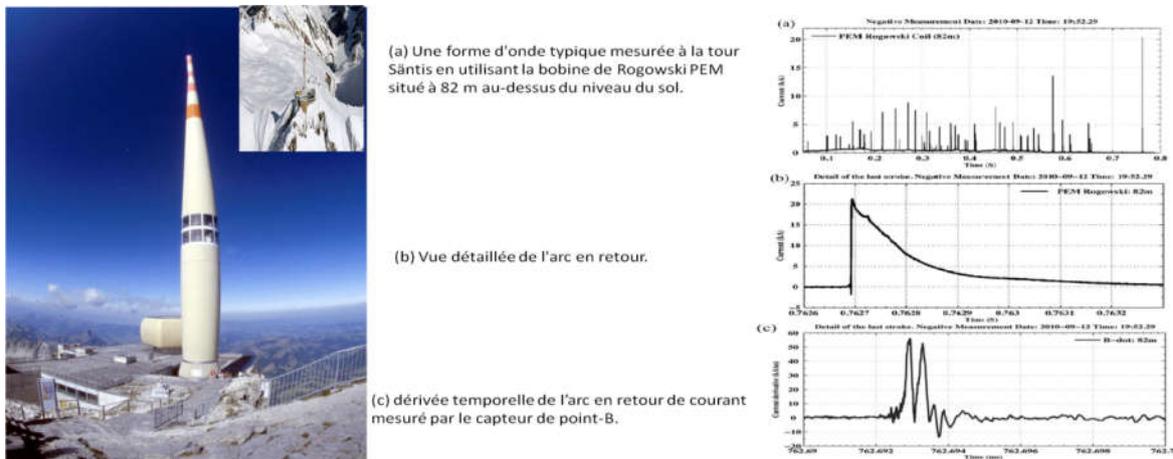


Figure I.18 : La tour Säntis, (a) Une forme d'onde typique mesurée à la tour Säntis en utilisant la bobine de Rogowski PEM situé à 82 m au-dessus du niveau du sol. (b) Vue détaillée de l'arc en retour Produit le 12 Octobre 2010, 19h52. (c) dérivée temporelle de l'arc en retour de courant mesuré par le capteur de point-B. [21]

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

- **La tour Tokyo 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. Ses deux observatoires ainsi que le centre commercial à son pied font, depuis son ouverture, partie des principales attractions de Tokyo [23].



Figure I.19 : La tour Tokyo Skytree [23].

I.7.3 Utilisation des systèmes de détection de la foudre

Les systèmes de détection de la foudre (Lightning Location Systems : LLS) constituent une référence pour le développement des normes liées à la protection des réseaux électriques et des systèmes de télécommunication contre la foudre [24]. La méthode la plus utilisée dans les LLS, consiste en la déduction du courant d'arc en retour à partir du champ électrique ou magnétique mesuré à grande distance du point d'impact de la foudre. Les estimations des paramètres de ce courant à partir des mesures du champ électromagnétique lointain, sont obtenues de manière empirique par exp. [25] ou théorique [24]. En général, l'obtention de la forme précise du courant d'arc en retour, à partir du champ électromagnétique rayonné, est difficile. En revanche le pic du courant est estimé avec une erreur d'environ 20% en fonction du pic du champ, en supposant que

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

la vitesse de l'arc en retour est connue [14]. Les études empiriques [25] développées dans le cas d'un déclenchement artificiel de la foudre, montrent une relation linéaire entre le pic du courant et le pic du champ électrique pour une vitesse constante. La vitesse change d'un arc à un autre, ce qui donne une dispersion statistique significative [26]. Rachidi et al. [27] ont suggéré qu'une estimation statistique est nécessaire, vu qu'avec la grande variation des principaux paramètres tels que la vitesse de l'arc en retour, il est impossible de déduire un courant exact à partir des mesures du champ électromagnétique rayonné effectuées sur un seul événement.

Ces auteurs ont proposé une équation qui relie la valeur moyenne du pic du courant de l'arc en retour avec celle du champ électrique, tout en considérant une valeur moyenne de la vitesse de l'arc en retour.

I.8 L'arc en retour

La rencontre entre les traceurs descendant et le traceur ascendant établit un canal conducteur le nuage et le sol, à travers lequel un intense courant électrique circule de la terre vers le nuage. Ce courant est appelé arc en retour. Il est la cause de la violente illumination du canal de foudre ; il est responsable du tonnerre et des dégâts produits par un foudroiement ainsi que du champ électromagnétique rayonné. Pour un coup de foudre violent le nombre d'arcs en retour peut atteindre douze arcs [7].

Autrement dit la jonction entre un traceur ascendant et un traceur descendant, nous permet d'avoir le développement d'un arc en retour (figure I.19). Ce dernier se propage du sol vers le ciel. La circulation du courant ionise le canal ce qui permet d'avoir l'éclair et par la suite le tonnerre.

On parle de deux types d'arc en retour :

- L'arc en retour premier,
- L'arc en retour subséquent.

Le second type est aussi violent que le premier.

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

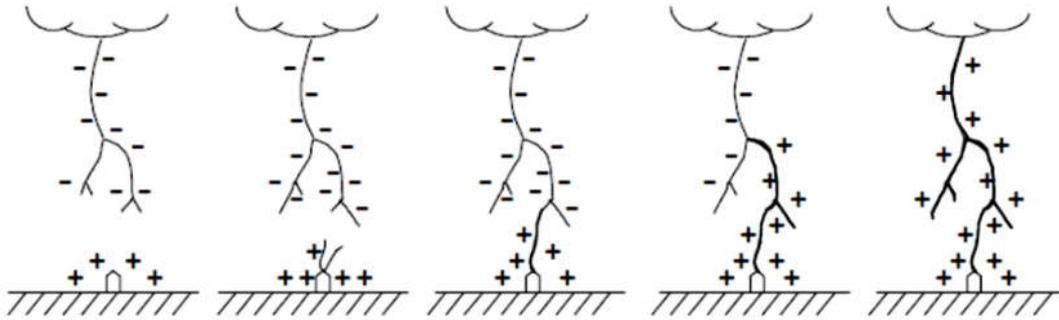


Figure I.19 : Développement de l'arc en retour [10].

I.9 Courant de foudre

Le coup de foudre est équivalent à un générateur de courant. Le courant est en fait constitué par les Charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur : on observe alors un fait fortement Lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, Avec une vitesse estimée à 108 m/s. c'est « l'arc en retour » ou « return storke ». Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le Même canal ionisé. Lorsque la décharge principale est terminée, après une durée environ De 100 ms apparaît une ou plusieurs décharges secondaires [5].

L'amplitude des courants des coup de foudre positifs peut être considérable, supérieure à 150 kA dans 10% des cas. Dans 50% des cas, l'intensité du courant est de 25 kA. 9 L'amplitude des coups de foudre négatifs est moins grande. Dans 10% des cas, elle est de l'ordre de 50 kA. Dans 50% des cas, l'intensité des de foudre négatifs est de 18 kA [5].

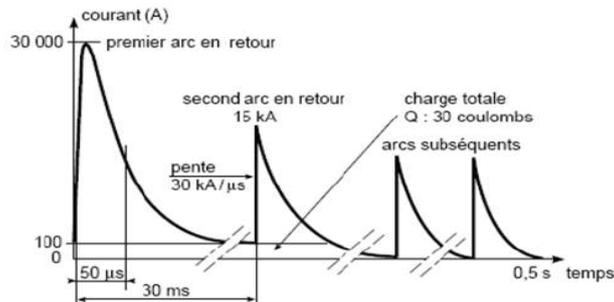


Figure I.20 : Évolution du courant à la base du canal de foudre [26].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.10 Effets de la foudre

Les effets de la foudre, de par leur origine, peuvent être identifiés suivant deux catégories :

- les effets directs liés à la circulation du courant de foudre [28].
- les effets indirects se traduisant par des surtensions dans les éléments conducteurs et causés par le rayonnement électromagnétique de la décharge orageuse et les variations très importantes du potentiel de la terre locale.

Les types de dangers que représente la foudre sont assez variés car ses effets sont multiples :

- les problèmes de surtensions et les problèmes d'efforts mécaniques engendrés par les chocs de foudre sont liés à l'amplitude de courant.
- le traitement de problème des surtensions lorsqu'interviennent des inductances dans les circuits foudre ou des couplages inductifs entre circuits est relié aux temps de front ;
- Les efforts mécaniques sont liés au temps de queue, en ce sens qu'il sert à déterminer la durée d'application de la force électromagnétique ; il est principalement représentatif de l'énergie du coup de foudre en liaison avec l'amplitude. L'écoulement du courant de foudre à la terre et les champs électriques et magnétiques rayonnés entraînent à des degrés variables [28].
- Des effets électriques ;
- Des effets thermiques ;
- Des effets électrodynamiques ;
- Des effets électrochimiques ;
- Des effets liés aux champs électromagnétiques.

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

I.10.1 Effets électriques

La très forte intensité du courant de foudre qui s'écoule dans un sol ayant une certaine résistivité va engendrer une montée en tension de la terre à proximité du point d'impact (loi d'Ohm). Une telle modification du potentiel local n'est pas en soi dangereuse pour un être vivant dans la mesure où aucune circulation de courant ne se produit (un être vivant peut être porté à un potentiel électrique de plusieurs centaines de milliers de volts, par rapport à une terre de référence éloignée, sans que pour autant un préjudice ou une gêne ne se produise). Cependant, si la dispersion du courant de foudre dans le sol crée entre deux points proches des différences de potentiels pouvant occasionner des claquages, ces derniers peuvent alors endommager les matériels connectés à ces points. Par exemple, ce type de problème peut se produire sur un équipement connecté simultanément à des réseaux entrants et à la prise de terre locale du bâtiment frappé par la foudre. Les effets électriques indirects liés au couplage galvanique ou couplage par conduction peuvent ainsi provoquer des surtensions sur des lignes d'énergie ou de communications ainsi que sur des réseaux de masse [28].

I.10.2 Effets thermiques

Ces effets, liés à la quantité de charge Q , dépendent donc des paramètres amplitude et durée du courant de foudre. D'une manière générale, il y a production de chaleur au point où le courant de foudre pénètre dans un conducteur, cette quantité de chaleur pouvant suffire à provoquer la fusion du conducteur et/ou l'inflammation de matériaux non conducteurs voisins.

Un coup de foudre exceptionnel est capable de percer des tôles jusqu'à une épaisseur de 2 à 3 mm. Les effets thermiques sont également liés à l'énergie spécifique du courant de foudre. Quand le courant de foudre traverse un conducteur, il se produit un dégagement de chaleur qui obéit à la loi de Joule où interviennent le carré de l'intensité I , le temps t de passage du courant et la résistance ohmique R . Des échauffements allant jusqu'à la température de fusion ne se produisent que dans des sections faibles de conducteurs ou pour de forte résistivité [28].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

Dans le cas de matériaux mauvais conducteurs, de très grandes quantités de chaleur sont produites lorsque le courant de foudre passe à travers un matériau tel que le bois ou la maçonnerie. L'eau contenue dans le matériau s'évapore instantanément et la pression très élevée qui en résulte provoque une explosion. Cet effet est susceptible de se manifester aux endroits où peut se produire une accumulation d'humidité (fissures dans la maçonnerie, cavités, sève des arbres, etc.) et là où le courant de foudre se concentre (jonction entre un mauvais et un bon conducteur, tel qu'un fer à béton).

Dans les sols mauvais conducteurs (sable siliceux), il arrive qu'il y ait fusion-vitrification du sable au passage de la foudre (création de fulgurites).

Là où le courant de foudre dispose de grandes sections de bonne conductivité, il ne peut pas se produire d'échauffements dangereux ni, par conséquent, de mise à feu. Un coup de foudre dont le courant est capté et conduit au sol par un conducteur métallique ininterrompu et de section suffisante reste ainsi un coup de foudre qui n'engendrera pas d'effets thermiques destructeurs [28].

I.10.3 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 [28].

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 [28].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

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 [28].

I.10.4 Effets électrochimiques

Ces effets sont essentiellement dus à la corrosion accélérée subie, sous l'influence des courants de fuite, par des objets métalliques enterrés, tels que les câbles et les canalisations, ainsi que les conducteurs de mise à la terre. Cependant, compte tenu de la très faible durée du coup de foudre, ces effets demeurent négligeables comparés à ceux qui ont pour origine les courants telluriques vagabonds [28].

I.10.5 Effets liés aux champs 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 [27]. Lorsqu'un coup de foudre tombe à proximité d'une ligne, le champ électromagnétique intense généré par l'arc en retour induit des surtensions, qui peuvent dans certains cas provoquer un amorçage. Les coups de foudre indirects représentent un danger plus important du fait que ce mécanisme de production de surtensions est bien plus fréquent que celui qui résulte des impacts directs.

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. Une particularité des coups de foudre est leur polarisation : Ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif). Environ 10 % sont de polarité inverse, mais ce sont les plus violents. À noter que le front de montée des chocs de foudre retenu par les normes, est de 1,2 ms pour la tension et 8 ms pour le courant. Une distinction est souvent établie entre :

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

- Le coup de foudre « direct » touchant une ligne,
- Le coup de foudre « indirect » tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône métallique, ou, ce qui revient au même, sur le câble de garde, (mis à la terre, ce câble
- Relie les sommets des pylônes, il est destiné à protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs) [28].

I.11 Systèmes de protection contre la foudre

Les systèmes de protection doivent répondre à deux objectifs :

En cas d'impact direct sur la structure, le système de protection doit évacuer 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 [29].

I.11.1 Systèmes de protection contre les effets directs

Ce type de protection doit assurer la maîtrise de la connexion de la foudre sur les structures afin d'évacuer une partie du courant de foudre à la terre. Elle peut être réalisée à partir de différents systèmes de captage selon le type de structure à protéger [29].

I.11.1.1 Paratonnerres à tige simple

Le paratonnerre à tige simple (ou tige de Franklin du nom de son inventeur en 1753) 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'évacuer 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

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

type de protection est plus particulièrement réservé aux petites structures de type, pylône, cheminée industrielle, mat ou cuve [29].

Comme indiqué sur la Figure I-21, l'installation d'une tige simple comporte

- une tige simple (biseautée à son extrémité) ;
- un ou plusieurs conducteurs de descente ;
- un réseau de terre.

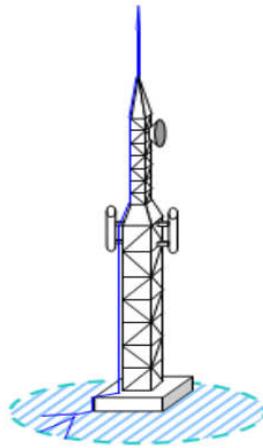


Figure I-21 : Exemple de protection par tige simple [29].

I.11.1.2 Cages maillées

Le principe d'une protection par cage maillée, présenté sur la Figure I.22, 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 [29].

Une installation de cage maillée doit inclure :

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

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.

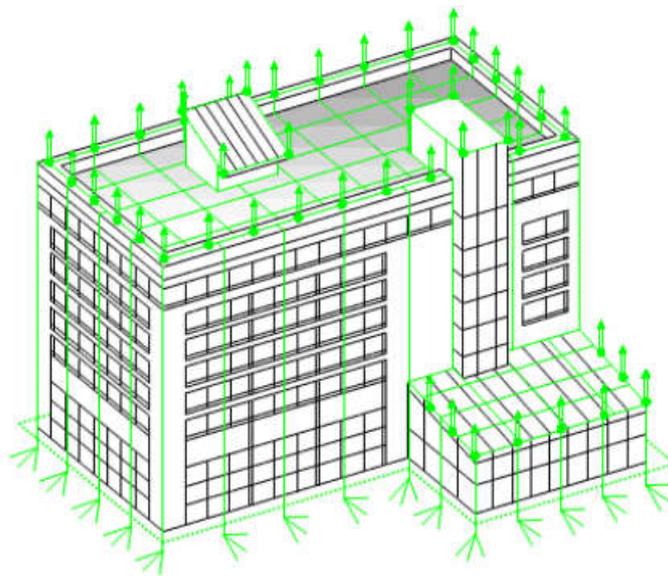


Figure I.22 : Exemple de protection par cage maillée [29].

I.11.1.3 Fil de garde ou fil tendu

Les protections réalisées à l'aide de fils de garde ou fils tendus sont principalement utilisées pour protéger des sites dont la structure ne peut pas recevoir de protection par cage maillée. On retrouve, par exemple, ce type de protection sur l'aire de lancement de la fusée Ariane, les zones de stockage, les champs de panneaux solaires, ou encore sur le réseau électrique Haute Tension. La protection est assurée à l'aide d'un conducteur nu placé au-dessus de la zone à protéger et connecté à des mats, mis à la terre comme le montre la Figure I.23 [29].

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

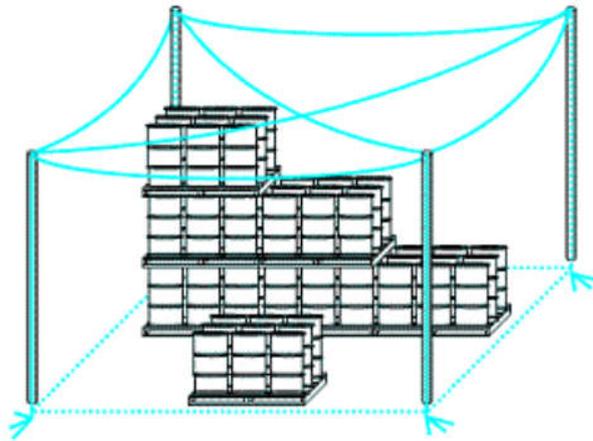


Figure I.23 : Exemple de protection par fil tendu [29].

Dans le cas particulier de la protection du réseau électrique Haute Tension, un fil de garde est placé sur le haut de chaque pylône, comme le montre la Figure I.24. Le but de ce fil est de capter la foudre et de dissiper le courant de foudre vers le réseau de terre par l'intermédiaire des pylônes.

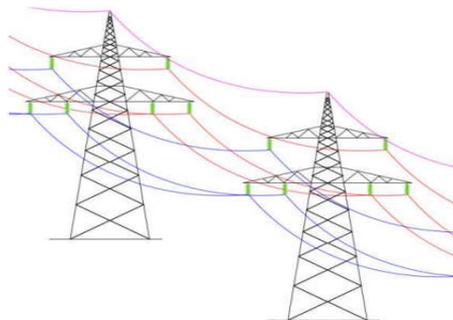


Figure I.24 : Exemple de protection par fil de garde sur un réseau électrique HT [29]

Ce type de protection par fil de garde est également utilisé parfois sur des réseaux de télécommunications souterrains. Dans ce cas, un ou plusieurs fils nus sont placés au-dessus des câbles signaux afin d'améliorer leur immunité vis à vis des agressions de la foudre.

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

L'utilisation d'une protection de type paratonnerre ou fil de garde est toujours complétée par la mise en place de dispositifs de protection contre les surtensions (parafoudres) dont le rôle est de protéger les équipements connectés aux réseaux filaires.

I.11.2 Systèmes de protection contre les effets indirects

Ces dispositifs de protection sont destinés à limiter les surtensions transitoires provoquées par la foudre sur les accès filaires. On retrouve deux types de protection pouvant être utilisées séparément ou en complément l'une de l'autre :

les éclateurs à gaz (Figure I.25) : ils disposent d'un fort pouvoir d'écoulement et sont généralement placés en tête de câble, en entrée d'installation, et connectés entre chaque fil et la terre. Ils ont pour principal objectif d'évacuer à la terre les perturbations électromagnétiques afin de protéger les équipements connectés aux câbles et situés à l'intérieur des bâtiments. Le principal inconvénient de ce type de composant est lié à son temps de réponse et à la disparité des tensions d'amorçage qui dépendent des conditions atmosphériques environnantes.



Figure I.25 : Exemple de parafoudre à gaz [29].

Les réseaux de varistances : un exemple de réseau de varistances est représenté sur la Figure I.26, il est composé de trois varistances à oxyde de zinc (ZnO). Les deux varistances, en bleu, assurent une protection de mode commun alors que celle représentée en rouge assure la protection de mode différentiel. Le principe de base d'une varistance est de présenter une résistance variable entre ses deux bornes afin de limiter la tension à une valeur U_p pouvant être supportée par les équipements.

Chapitre I : Généralités sur le phénomène de la foudre

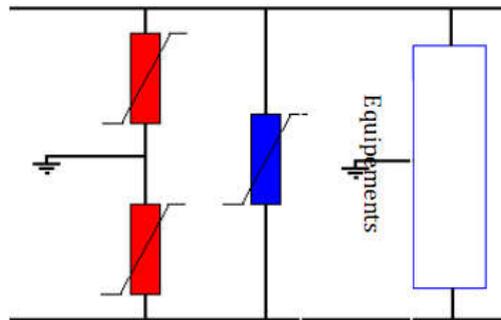


Figure I.26 : Exemple de réseau de varistances [29].

I.12 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, la phénoménologie de la foudre ainsi qu'à ces caractéristiques, les mécanismes de génération d'une décharge de foudre notamment ceux de la phase de l'arc en retour et le principe de déclenchement artificiel de cette dernière. Nous avons également présenté les formes d'ondes expérimentales des courants de foudre et en dernier nous avons cité les effets de la foudre et la protection contre ses dangers. 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 permettent une meilleure protection des systèmes électriques et électroniques contre les perturbations engendrées par la foudre. Les variations les plus brutales et de grandes amplitudes du champ émis ont lieu lors de la phase de l'arc en retour. Plusieurs modèles de l'arc en retour, avec différents degrés de complexité, ont été développés par plusieurs chercheurs afin de permettre l'évaluation de son rayonnement électromagnétique. Nous avons abordé dans ce chapitre par la modélisation du courant d'arc en retour et le champ électromagnétique associé de la foudre initiée au sol et en présence d'un objet élevé.

II.2 Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal de foudre initié au sol

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

Durant les dernières décennies, plusieurs modèles de l'arc en retour avec différents degrés de complexité ont été développés. Ces modèles ont fait l'objet de plusieurs revues ces dernières années (voir par exemple : (1997), (1998), (2000), (2002), (2003), (2004), (2005)). Ainsi, les modèles de l'arc en retour sont classés en quatre catégories [11]

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

Nous pouvons décrire ces modèles comme suit :

1. La première catégorie définit la classe des modèles à gaz dynamique ou modèles physiques", considère principalement l'évolution radiale d'une décharge électrique dans un plasma [30].
2. Dans les modèles électromagnétiques, la théorie des Antennes est adoptée pour simuler le canal de foudre. La distribution spatio-temporelle du courant le long

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

du canal est obtenue par le biais de la résolution numérique des équations de Maxwell. Le calcul du champ électromagnétique s'effectue, en général, par l'utilisation de la méthode des moments [31],

3. Les modèles de la troisième catégorie sont connus sous le nom « modèles RLC » ou « modèles des lignes de transmission ». La décharge de foudre est représentée comme un processus transitoire sur une ligne de transmission caractérisée par une résistance, une inductance et une capacité, tous par unité de longueur. Ce type de modèles est utilisé pour déterminer le courant de foudre en fonction du temps et de la hauteur et par la suite le calcul du champ électromagnétique rayonné [32], [33].
4. La dernière classe est celle des modèles d'ingénieur, dans lesquels la distribution spatiale et temporelle du courant du canal de foudre (ou la densité des charges du canal) est spécifiquement basée sur certaines observations des caractéristiques de l'arc en retour comme le courant à la base du canal, la vitesse de propagation ascendante du front d'onde et le profil de luminosité du canal de foudre [34], [35] et [36].

Dans ce chapitre, nous aborderons la modélisation du champ électromagnétique de la foudre, en commençant par classer les modèles de l'arc en retour sans la présence de l'objet élevé, ensuite, nous présenterons les modèles de la distribution du courant le long de la tour et le long du canal de foudre, et la méthode FDTD et nous terminerons par une conclusion.

II.2.2 Modèles d'ingénieurs

Les modèles d'ingénieurs se basent sur la description de la distribution spatio-temporelle du courant le long du canal de foudre en fonction du courant mesuré à la base du canal, ceci a donné une certaine simplicité analytique. Les modèles les plus populaires dans cette classe sont [37] :

II.2.2.1 Modèle de Bruce et Golde (BG)

Il s'agit de l'un des premiers modèles dans le genre et probablement le plus simple [37]. Il a été développé par Bruce et Golde en 1945. Selon ce modèle, le courant $i(z', t)$, à

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

des hauteurs inférieures au front de l'arc en retour, est égalé au courant à la base du canal, à des hauteurs supérieures au front de l'arc en retour, le courant est nul. Mathématiquement, il est décrit comme suit :

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

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

II.1

Où :

v : la vitesse de l'arc en retour.

Z' : un point du canal de foudre.

t : le temps

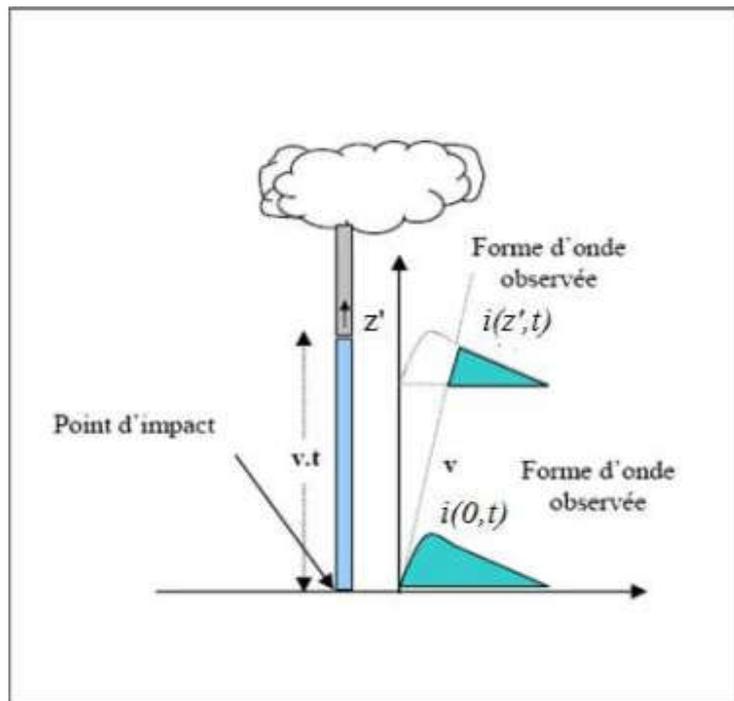


Figure II.1 : Distribution spatio-temporelle selon le modèle de BG [37].

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

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

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

Le modèle assimile le canal de foudre à une ligne de transmission sans pertes ou une impulsion de courant se propage à partir du sol à la vitesse de l'arc en retour. En introduisant l'effet du retard, ce modèle fut présenté par Uman et Maclai en 1969, il est largement utilisé [37]. La distribution du courant est définie par les relations suivantes :

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

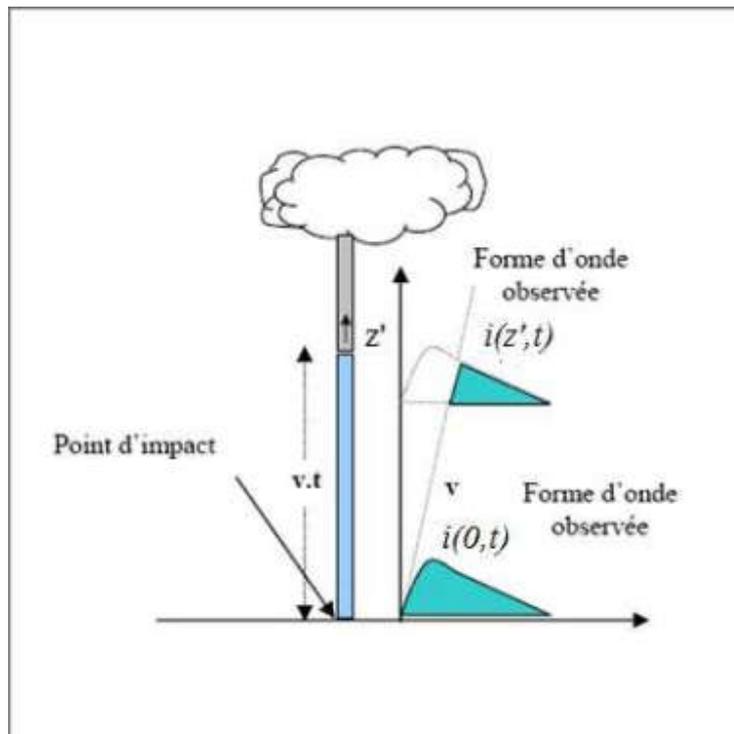


Figure II.2 : Distribution spatio-temporelle selon le modèle de ligne de transmission [37].

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

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

Le modèle de ligne de transmission TL a été modifié par Nucci et al. [34] et par Rakov et Dulzon, [38], tout en introduisant le facteur d'atténuation de l'amplitude du courant avec la hauteur. Les deux modèles sont décrits comme suit :

A- modèle de ligne de transmission modifié avec une atténuation exponentielle

"Modified Transmission Line with Exponential decay" (MTLE) [34]

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

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

B- modèle de ligne de transmission modifié avec une décroissance linéaire MTL

Dans le modèle MTL proposé par Rakov et Dulzon [38], l'amplitude du courant décroît linéairement lors de sa propagation dans le canal il est décrit par :

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

Où :

H : la longueur totale du canal de foudre.

II.2.2.4 Modèle de la source de courant progressive (TCS)

Selon ce modèle, proposé par Heidler en 1985, les charges du traceur sont instantanément neutralisées à l'arrivée du front de l'arc en retour. Une source de courant est associée au front de l'arc-en-retour et parcourt le canal à la vitesse v de celui-ci. Le courant résultant

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

se propage jusqu'au sol à la vitesse de la lumière. Le courant injecté par la source mobile à une hauteur « z' » atteint la base du canal avec un retard

$$\left\{ \begin{array}{ll} Z' / c : i(z', t) = i(0, t + z'/c) & z' \leq v.t \\ I(z', t) = 0 & z' > v.t \end{array} \right. \quad \text{II.5}$$

C : la vitesse de la lumière.

Les résultats obtenus grâce à ce modèle semblent en très bon accord avec les enregistrements, notamment en ce qui concerne le premier pic du champ rayonné à faible distance et ce qui concerne l'inversion de la polarité du champ lointain. [38,39]

II.3 Généralisation des modèles d'ingénieur

Rakov dans [33] a présenté les modèles d'ingénieur décrit précédemment suivant une équation généralisée de la distribution de courant dans le canal, elle est définie comme suit :

$$i(z',t) = u(t - z'/V_f) p(z') i(0, t - z'/v)$$

Où :

$$U(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & \text{ailleurs.} \end{cases} \quad \text{II.6}$$

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

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

V_f : la vitesse du front.

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

C : la vitesse de la lumière.

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

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

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

Tableau II.1 P (z) et v pour les cinq modèles d'ingénieur [37].

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

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

Pour modéliser les courants d'arc en retour nous faisons recours au courant à la base du canal de foudre qui est la seule grandeur mesurable. Différentes expressions analytiques sont utilisées dans la littérature afin de simuler l'allure du courant à la base du canal de foudre. Parmi ces modèles, on cite [37] :

II.4.1 Modèle bi-exponentiel

Ce modèle est souvent utilisé en raison de sa simplicité. Par ailleurs, il s'adapte à l'analyse fréquentielle du champ électromagnétique, puisque sa transformée de Fourier s'exprime analytiquement. L'expression du courant [40] est :

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

Quant à l'arc en retour subséquent, l'expression du courant est exprimée comme suit [40]

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

$$I(0, t) = I_{01}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{02}(e^{-\alpha t} - e^{-\gamma t})$$

II.8

Avec :

I_0 , I_{01} et I_{02} représentent l'amplitude du courant à la base du canal α , β , γ , et δ sont des constantes de temps. Le tableau II.2 présente les paramètres de ces deux fonctions.

Tableau II.2 Paramètres des fonctions exponentielles [40].

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

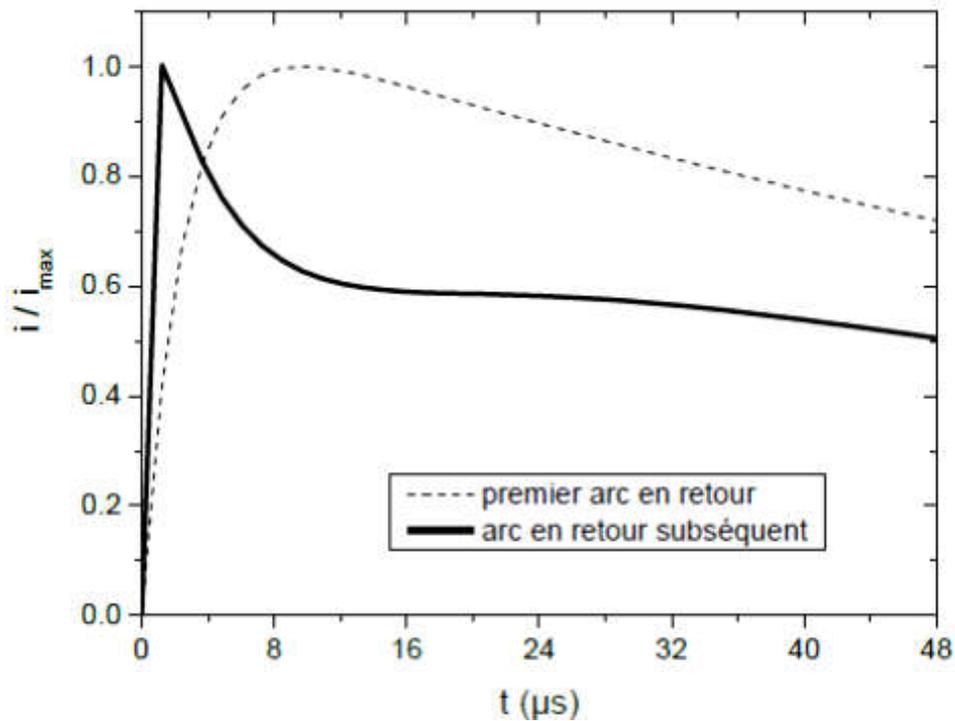


Figure II.3 : Courant à la base du canal de foudre, correspondant au premier arc en retour et à l'arc en retour subséquent, calculés à l'aide du modèle bi-exponentiel [11].

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

II.4.2 Modèle de Heidler

L'expression analytique du courant à la base du canal était proposée par Heidler en 1985, elle est référée par la fonction de Heidler [30] :

$$i(0, t) = \left(\frac{i_0}{\eta}\right) \frac{(t/\tau_2)^n}{1+(t/\tau_2)^n} e^{-(t/\tau_2)} \quad \text{II.9}$$

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

i_0 : amplitude du courant à la base du canal ;

τ_1 : constante du temps du front ;

τ_2 : constante du temps de décroissance ;

η : facteur de correction de l'amplitude ;

n : un exposant variable entre 2 et 10.

La somme de deux fonctions d'Heidler de type (II.15) représente mieux le premier pic typique du courant d'arc en retour subséquent :

$$i(0, t) = \frac{i_{01}}{\eta_1} \frac{(t/\tau_{11})^{n_1}}{1+(t/\tau_{11})^{n_1}} e^{-(t/\tau_{11})} + \frac{i_{02}}{\eta_2} \frac{(t/\tau_{21})^{n_2}}{1+(t/\tau_{21})^{n_2}} e^{-(t/\tau_{21})} \quad \text{II.11}$$

Le tableau (II.3) représente les paramètres de la fonction de Heidler pour l'arc en retour (premier et subséquent) accordés aux données expérimentales de Berger et al. [41]

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

Tableau II.3 Paramètres des fonctions bi-exponentielles

	I_{01} (kA)	τ_{11} (μ s)	τ_{21} (μ s)	n_1	I_{02} (kA)	τ_{12} (μ s)	τ_{22} (μ 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.4 donne à titre d'exemple la courbe du courant à la base du canal de foudre d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (Heidler et la bi-exponentielle).

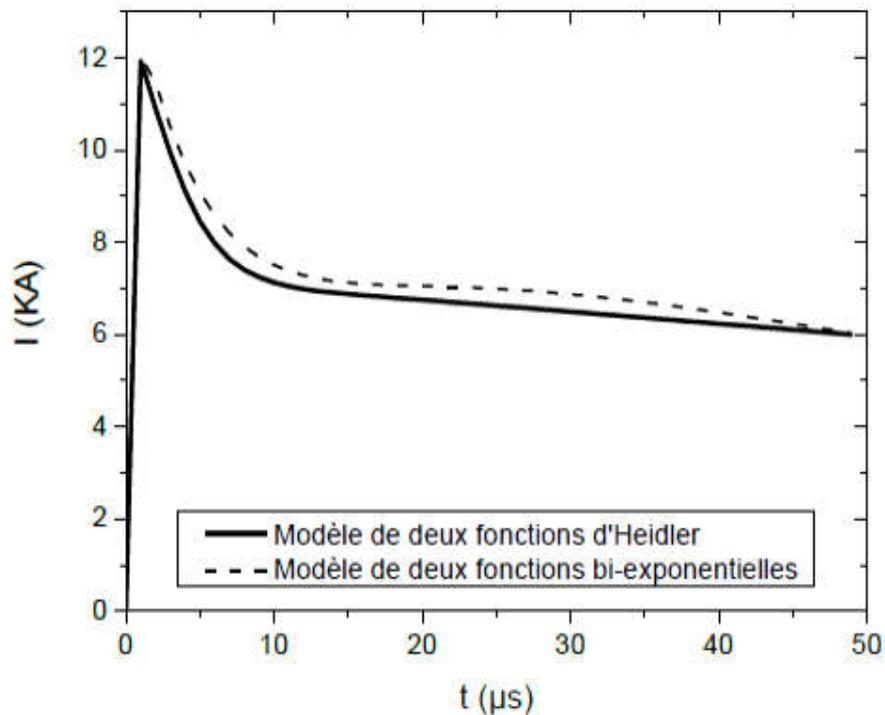


Figure II.4 : Courants à la base du canal d'un arc subséquent typique correspondant aux deux modèles (modèle d'Heidler et modèle bi-exponentiel) [11]

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

Pour analyser l'interaction de la foudre avec les objets élevés (la tour), les modèles d'ingénieur utilisés pour la modélisation du courant de l'arc en retour initié du sol ont été modifiés pour tenir compte de la présence des objets élevés. Dans ces modèles, il est

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

supposé que l'impulsion du courant $i_0(t)$ est injectée dans le canal de la foudre et la tour au même instant. Lorsque le point de connexion de la foudre avec la tour : une onde ascendante se propage le long de la foudre avec une vitesse v , du courant de l'arc en retour, et l'autre onde descendante se propage avec la vitesse c de la lumière figure (II.1) le long de la tour. Cette dernière est considérée comme étant une ligne de transmission homogène sans pertes et de longueur h . Elle est caractérisée par son impédance caractéristique Z et possède deux coefficients de réflexion du courant d'aux deux extrémités de la tour, (ρ_e au sommet de la tour, ρ_g au bas de la tour). Il existe deux représentations du courant de l'arc en retour pour les modèles d'ingénieurs avec la présence de la tour [30].

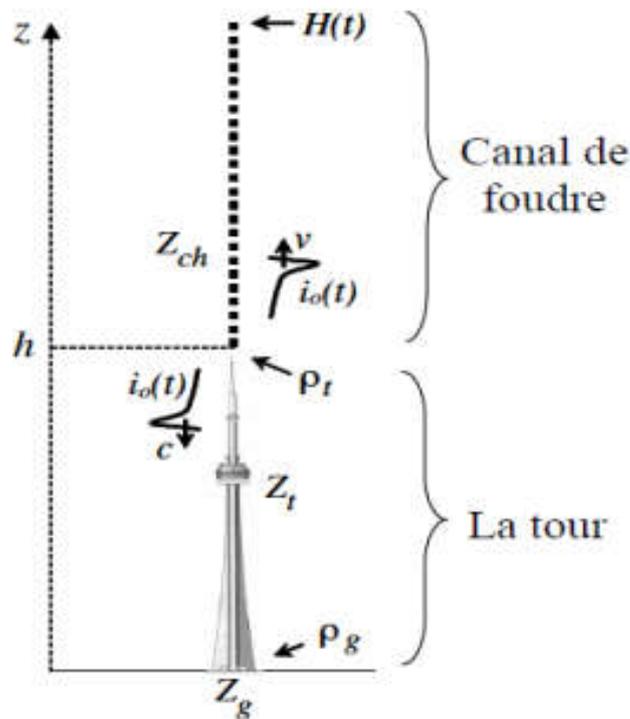


Figure II.5 : Propagation du courant le long de la tour et le long du canal de foudre [30]

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

II.6 Modélisation du courant de l'arc en retour dans le canal et le long de l'objet élevé

II.6.1 Modèle de Rachidi et al.

Les modèles d'ingénieur initialement proposés dans le cas d'un arc en retour initié du sol ont été récemment modifiés par Rachidi et al, pour prendre en compte le cas d'un arc en retour initié à partir du sommet d'une tour. Rachidi et al, ont représenté le canal par une source distribuée. La distribution du courant le long de la tour ($0 \leq z' \leq h$) et le long du canal de foudre ($z' \geq h$) (Figure II.) est représentée par les équations suivantes [42] :

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

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \rho_t^n \rho_g^n i_0 \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} + \right) \\ \rho_t^n \rho_g^{n+1} i_0 \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right] u \left(t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \quad \text{II.12}$$

Et pour ($z' \geq h$)

$$i(z', t) = \left[\begin{array}{l} P(z' - h) i_0 \left(h, t - \frac{z'-h}{v^*} \right) - \rho_t i_0 \left(h, t - \frac{z'-h}{c} \right) \\ +(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_0 \left(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right] u \left(t - \frac{z'-h}{v} \right) \quad \text{II.13}$$

h : est la hauteur de la tour

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

$$\rho_g = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t + Z_g} \qquad \rho_t = \frac{Z_t - Z_c h}{Z_t + Z_c h}$$

C : est la vitesse de la lumière.

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

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

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

$P(z')$: 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

II.6.2 Modèle de Baba et Rakov

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

II.14

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

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

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

$$i(z', t) = (1 - \frac{\rho_t}{2}) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \rho_t \rho_g^n i_{sc} \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \\ + \rho_t \rho_g^{n+1} i_{sc} \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \end{array} \right] \quad \text{II.15}$$

Pour $z' \geq h$:

$$i(z', t) = (1 - \frac{\rho_t}{2}) \left[i_{sc} \left(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho_t^n \rho_g^{n-1} (1 + \rho_t) i_{sc}}{v} \left(h, t - \frac{h-z'}{v} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \quad \text{II.16}$$

Les équations (II.15) et (II.16) montrent que des ondes de courant d'une même amplitude $(1 - \rho_t) i_{sc}(h, t) / 2$ sont initialement injectées, simultanément, dans le canal de foudre

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

et dans la tour. On note que les équations (II.15) et (II.16) sont identiques aux équations (II.12) et (II.17) écrites en termes de courant « non contaminé ».

II.6.3 Différence entre le modèle de Rachidi et le modèle de Baba

Le courant injecté au sommet de la tour se divise en deux, un premier courant qui se propage le long du canal de foudre avec la vitesse de l'arc en retour v et un deuxième courant qui se propage vers le sol, le long de la tour, avec la vitesse de la lumière c . Après les réflexions à la base et au sommet de la tour, une partie du deuxième courant va être transmise au canal de foudre ; cette onde transmise, qui est supposée se propager avec la vitesse de la lumière, trouve sur son chemin le front de l'arc en retour (premier courant) se propageant à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière, ce qui est physiquement inconcevable (l'onde transmise n'est pas autorisée à être au-devant du front de l'arc en retour). Cette observation a été soulevée en 2004 par Pava Nello et al [43]. Pour cela, Rachidi et al ont ajouté un terme additionnel dans les équations du champ électromagnétique, appelé « turn-on terme » dans les équations du champ électromagnétique. Baba propose que la propagation du courant de l'arc en retour se fera avec la vitesse de l'arc en retour, qui n'a pas été prouvé réellement.

II.7 Notions de courant contaminé et de courant non contaminé

Le courant contaminé correspond au courant à la base du canal de foudre dans le cas d'un coup de foudre frappant une tour élevée (figure II.6)

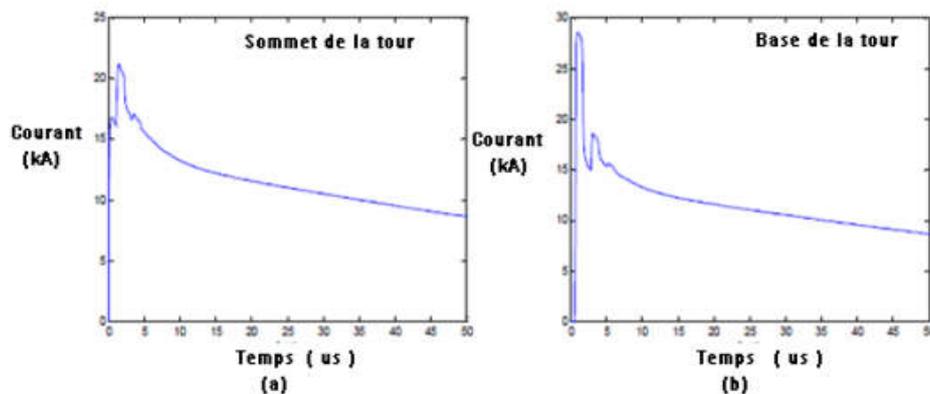


Figure II.6 : Courant contaminé [11]. - (a) courant contaminé au sommet de la tour, - (b) courant contaminé à la base de la tour

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

Le courant non contaminé correspond au courant à la base du canal de foudre dans le cas d'un coup de foudre frappant le sol directement (figure II.7)

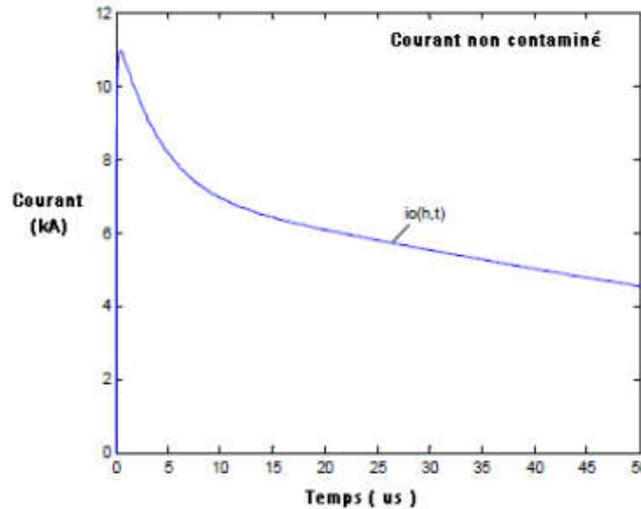


Figure II.7 : Courant non contaminé correspondant à l'expression (II.17) [44].

$$i_{01}=9,9\text{KA}, \eta=0,845, \tau_1=0,072\mu s, \tau_2=5,0 \mu s =7,5\text{KA}, \tau_3=100,0 \mu s, \tau_4=6,0 \mu s$$

$$i_0(h,t) = \frac{i_{01}}{\eta} \frac{(\tau/\tau_1)^2}{1+(\tau/\tau_1)^2} e^{(-\tau/\tau_1)} + I_{02} (e^{-\tau/\tau_3} - e^{-\tau/\tau_4}) \quad \text{II.17}$$

II.8 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 (Finîtes Différence Time Domain). Cette dernière, initialement, élaborée par Yee [45], est actuellement une technique puissante pour la résolution numérique des équations de Maxwell [46].

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 [47].

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.

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

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 [48]

II.8.1 Principes de base de la méthode FDTD

II.8.1.1 Équations de base

La méthode FDTD est basée sur la formulation standard des équations de Maxwell (II.18,II.19)

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{II.18}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{II.19}$$

Où E est le champ électrique, 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 [45] 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.8 et II.9 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.

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

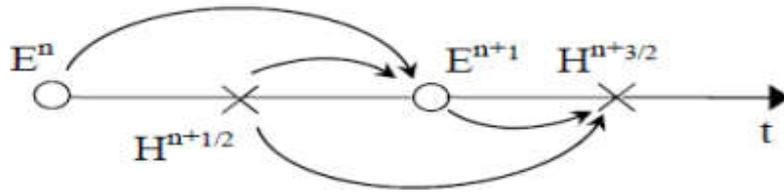
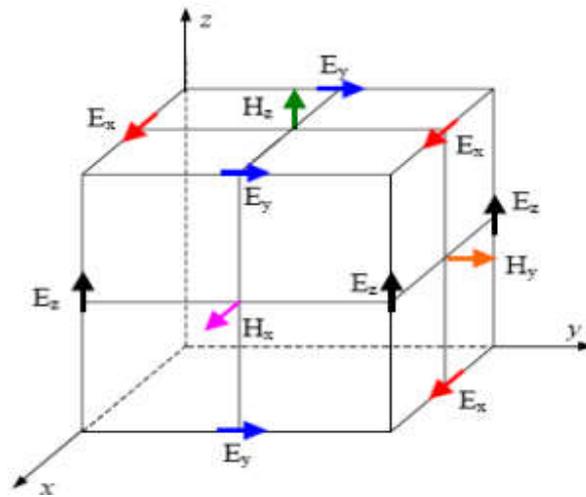
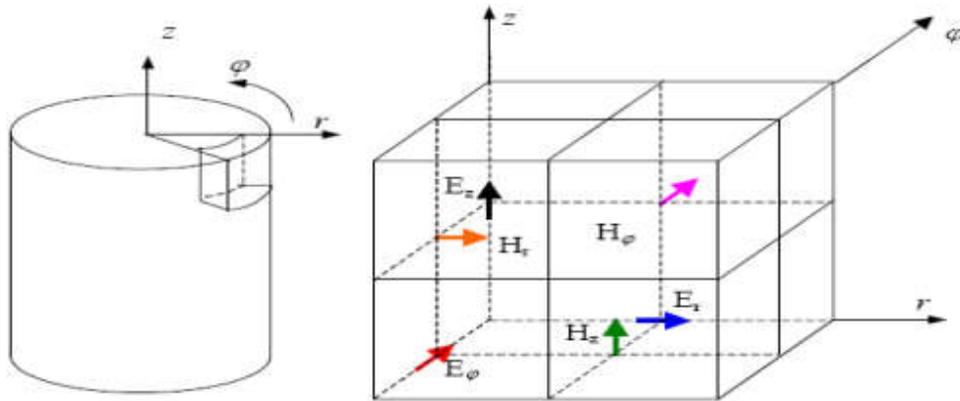


Figure II.8 : Principe de discrétisation temporelle en différences finies [49].



(a) Coordonnées cartésiennes [50]



(b) Coordonnées cylindriques [11]

Figure II.9 : Maillage spatial 3D en différences finies- modèle de Yee [11].

On remarque dans les figures II.8 et II.9 le décalage d'un demi pas spatial et temporel, entre les composantes du champ électrique E et celles du champ magnétique H , inhérent

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

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.8). 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.10).

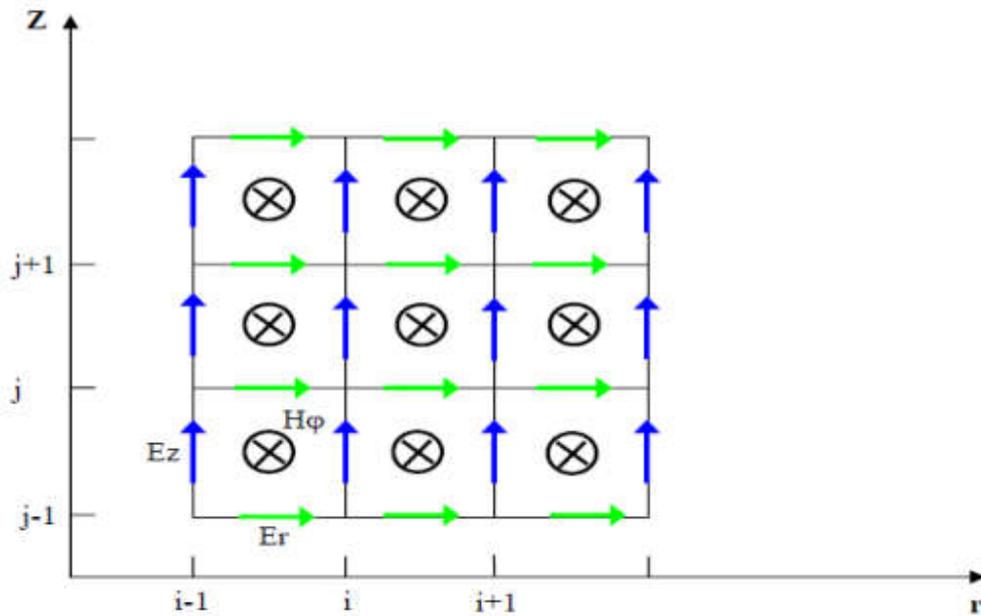


Figure II.10 : Domaine de calcul à deux dimensions (2D) avec un système à coordonnées cylindriques [11].

Les équations (II.18) et (II.19) peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right] \\ \partial E_r + \varepsilon \frac{\partial E_r}{\partial t} = - \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial z} \\ \partial E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_{\varphi}) \end{array} \right. \quad \text{II.20}$$

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 \mathbf{f} évaluée en chaque

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

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 :

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial r} \right|_{r=i\Delta_r} = \frac{f^n\left(i+\frac{1}{2}, j\right) - f^n\left(i-\frac{1}{2}, j\right)}{\Delta r} \quad \text{II.23}$$

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial z} \right|_{z=i\Delta_z} = \frac{f^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right) - f^n\left(i, j-\frac{1}{2}\right)}{\Delta z} \quad \text{II.21}$$

$$\left. \frac{\partial f(r, z, t)}{\partial t} \right|_{t=i\Delta_t} = \frac{f^{n+\frac{1}{2}}(i, j) - f^{n-\frac{1}{2}}(i, j)}{\Delta t} \quad \text{II.22}$$

À partir des équations aux dérivées partielles du système (II.21) et en utilisant les équations (II.22) - (II.33) on obtient les composantes du champ électromagnétique rayonné par la foudre qui s'écrivent :

$$E_z^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}\right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_z^n\left(i, j+\frac{1}{2}\right) + \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)r_i\Delta_r} \left[\begin{array}{l} r_{i+(1/2)} H_\varphi^{n+(1/2)}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) - \\ r_{i-(1/2)} H_\varphi^{n+(1/2)}\left(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) \end{array} \right] \quad \text{II.24}$$

$$E_r^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j\right) = \frac{2\varepsilon - \sigma\Delta t}{2\varepsilon + \sigma\Delta t} E_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j\right) - \frac{2\Delta t}{(2\varepsilon + \sigma\Delta t)\Delta z} \left[\begin{array}{l} H_\varphi^{n+(1/2)}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) - \\ H_\varphi^{n+(1/2)}\left(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}\right) \end{array} \right] \quad \text{II.25}$$

$$H_\varphi^{n+(1/2)}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) = H_\varphi^{n-(1/2)}\left(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu\Delta r} \left[E_z^n(i+1, j+1/2) - E_z^n(i, j+1/2) \right] - \frac{\Delta t}{\mu\Delta z} \left[E_r^n(i+1/2, j+1) - E_r^n(i+1/2, j) \right] \quad \text{II.26}$$

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

II.8.1.2 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 (Figure II.12).

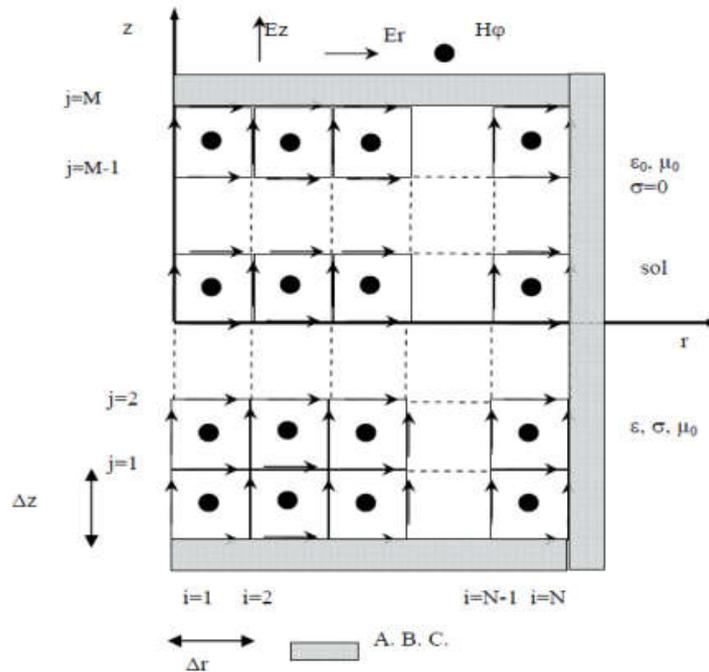


Figure II.11 : Maillage 2D-FDTD (coordonnées cylindriques) [11]

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du courant d'arc en retour et le calcul du champ électromagnétique associé. La conclusion qu'on peut tirer est que le calcul du champ électromagnétique initié au sol nécessite une expression analytique de la forme du courant de foudre mesuré à la base du canal et une modélisation spatio-

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

temporelle de la distribution du courant dans le canal de foudre. Tous les modèles d'ingénieurs développés pour la foudre initiée au sol ont été modifiés pour prendre en compte la structure foudroyée.

Chapitre III

Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

III.1 Introduction

La connaissance et la caractérisation du champ électromagnétique rayonné par la foudre permettent une meilleure protection des systèmes électriques et électroniques contre les perturbations engendrées par la foudre.

Dans cette partie du travail, nous présenterons les résultats de simulation que nous avons obtenue à l'aide d'un code de calcul développé au sein du laboratoire Génie Electrique et du Plasma, basé sur la méthode numérique FDTD -2D- élaboré en FORTRAN.

En premier lieu, une présentation de la structure de la tour Gaisberg de 100m sera donné, afin de comprendre le processus de mesure expérimental du courant et du champ électromagnétique associé, puis caractérisé la géométrie du problème pour la simulation, les conditions aux limites, dimensions des cellules, le pas temporel, les paramètres du courant de la foudre. En second, appliquer le modèle de baba et rakov pour la distribution du courant le long du canal et le long de la tour. Les composantes du champ électromagnétique seront évaluées en dessous, au niveau et au-dessus d'un sol caractérisé par une conductivité finie.

III.2 Étude et simulation

III.2.1 Tour Gaisberg

La tour Gaisberg montrée dans la figure III.1 de hauteur égale à 100m, est une tour radio localisée à 1287 m au-dessus du niveau de la mer, dans le sommet d'un mont de 5km situé à l'est de la cité Salzburg, en Autriche.

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg



Figure III.1 : Position du capteur de courant de foudre sur la tour Gaisberg.[19]



Figure III.2 : Résistance parallèle installé au sommets de la tour Gaisberg. [19]

La tour Gaisberg est constituée de :

- Capteur de Champ électrique radial (TSN 245-E30, Thomson CSF, 1 kHz – 150 MHz)
- Capteur de Champ électrique vertical (TSN 245-H31, Thomson CSF, 1 kHz – 150 MHz)
- Capteur de champ magnétique (TSN 245 □ H31, Thomson CSF, 4 kHz à 150 MHz)

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

a. Système de mesure du courant

Le courant au sommet de la tour est mesuré avec une résistance shunt de $0,25 \text{ m}\Omega$ et une largeur de bande totale de 0 Hz à $3,2 \text{ MHz}$. Le signal électrique est divisé en deux canaux avec une plage de mesure de $\pm 2 \text{ kA}$ et $\pm 40 \text{ kA}$, respectivement. Les signaux de ces deux canaux sont acheminés vers le bas de la tour via des liaisons à fibres optiques (Isobe 3000, bande passante $0 \text{ Hz} - 15 \text{ MHz}$) vers le système d'enregistrement, composé d'un convertisseur numérique à deux canaux, 20 MS et 8 bits . La durée d'enregistrement pour chaque événement est de 800 ms avec un pré-déclenchement de 15 ms [52].

b. Système de mesure du champ électrique

Le champ électrique radial est mesuré à une distance de 20 m de l'axe central de la tour à l'aide d'un capteur de champ électrique sphérique actif. (TSN 245 □ E30, Thomson CSF, 1 kHz to 150 MHz).

Un capteur similaire mais avec une sensibilité différente est utilisé pour mesurer le champ électrique vertical a une distance de 22 m .

Le champ magnétique azimutal est mesuré à 20 m à l'aide d'un capteur de champ magnétique avec une antenne cadre (TSN 245 □ H31, Thomson CSF, 4 kHz à 150 MHz). [53].

III.2.2 Géométrie du problème

Nous présentons la géométrie adoptée lors de la simulation. Ainsi, la conductivité du sol sera supposée finie. Les figures III.3 et III.4 représente la structure géométrique et le domaine d'étude.

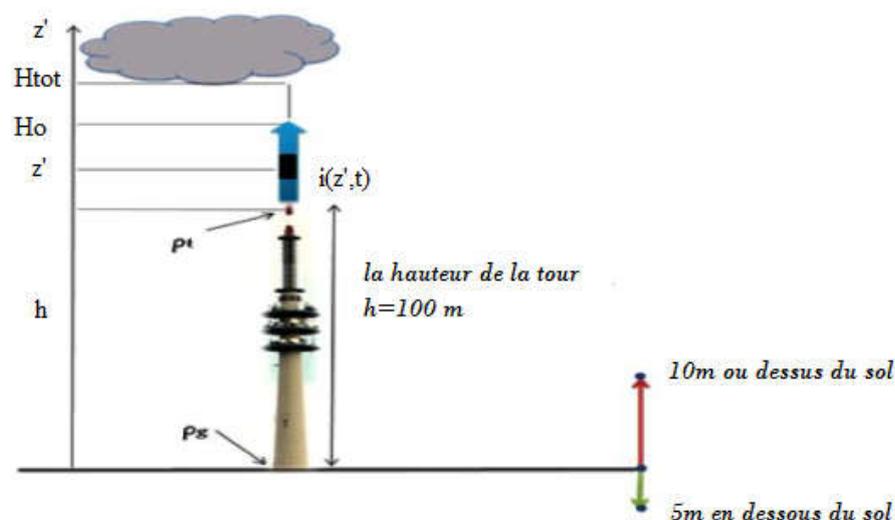


Figure III.3 : Configuration proposée, tour 100 m . $\sigma = 0.0025$

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

Dans la figure III.4, on présente le domaine d'étude discrétisé par la méthode FDTD 2 D, Les équations de Maxwell gouvernent tous les phénomènes électromagnétiques. Ainsi, l'utilisation de la méthode FDTD consiste à ramener la solution de ces équations dans le domaine de calcul compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution spatio-temporelle du champ. Un maillage carré de 2000 m*2000 m.

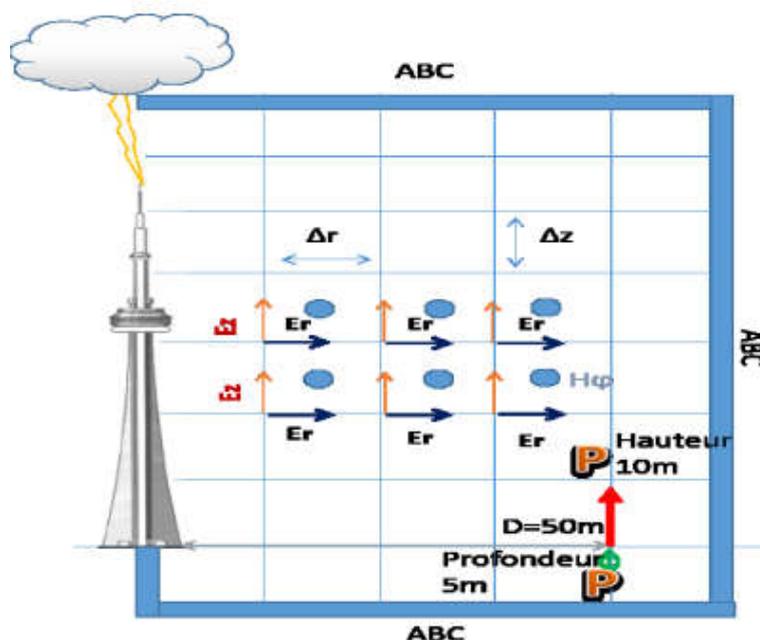


Figure III.4 : Le domaine d'étude.

- Le pas spatial utilisé dans la discrétisation pour la configuration choisie est $\Delta_r = \Delta_z = 1\text{m}$
- Le temps maximal de calcul est $T_{max} = 10\mu\text{S}$.

III.2.3 Formulation du champ électromagnétique

La formulation standard des équations de Maxwell s'écrit comme suit :

$$\text{rot } \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad \text{III.1}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad \text{III.2}$$

Avec : \vec{E} est le champ électrique.

\vec{H} : Champ magnétique.

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

μ : Perméabilité magnétique.

ε : Permittivité diélectrique.

σ : Conductivité électrique.

Le développement mathématique des équations (III.1) et (III.2) en utilisant une représentation spatiale basée sur des coordonnées cylindriques conduit à un système d'équations aux dérivées partielles exprimées sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}\frac{\partial H_{\varphi}}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{\partial E_r}{\partial z} \right] \\ \sigma E_r + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} &= - \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial z}; \\ \sigma E_z + \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} &= \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial r} (r H_{\varphi})\end{aligned}\tag{III.3}$$

E_r : Champ électrique radial.

E_z : Champ électrique vertical.

H_{φ} : Champ magnétique azimuthal.

r : Distance radiale entre le point d'observation et la base du canal de foudre.

III.2.4 Conditions aux limites

La modélisation d'un problème électromagnétique en milieu ouvert par une méthode finie, utilisant une discrétisation de la région d'analyse, nécessite la troncature du domaine infini par une frontière fictive. Pour respecter l'aspect non borné du problème, il est essentiel d'imposer sur les frontières du domaine d'étude, des conditions aux limites dites « conditions aux limites absorbantes » (Absorbing Boundary Conditions : ABC) (Fig. III.4).

Dans ce travail, on a utilisé les conditions aux limites absorbantes, premier ordre développées par Mur. La condition de stabilité utilisée : $\frac{\Delta r}{\lambda} < \frac{1}{10}$; $\frac{\Delta z}{\lambda} < \frac{1}{10}$

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

III.2.5 Paramètres de la simulation

H : hauteur du canal de foudre, $H=8000\text{m}$ [54]

λ : Constante de décroissance dans le modèle MTLE, $\lambda=2000\text{ m}$. [55]

C : La vitesse de la lumière, $c=3.10^8\text{ m/S}$.

v_{fi} La vitesse de l'arc en retour, $v_{fi}=150\text{m}/\mu\text{s}$

$\Delta_t=1\text{ns}$ Le pas temporel.

$$\mu_0 = 1.256.10^{-6}$$

$$\varepsilon_0 = 8.85.10^{-12}$$

$$\sigma = 0.0025\text{ S/m}$$

$$\varepsilon_r = 15\text{ [56]}$$

Paramètre de la tour Gaisberg

La hauteur $h=100\text{m}$

Coefficient de réflexion a la base et au sommet de la tour respectivement

$$\rho_g = 0.8\text{ et } \rho_t = -0.45\text{ [57].}$$

III.2.6 Paramètres du courant de court-circuit

Nous utilisons le même courant non contaminé donnée par la fonction d'Heidler pour simuler l'arc en retour typique (l'arc en retour subséquent), accordé aux données expérimentales de Berger et al. [17]

$I_{01}(KA)$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	n_1	$I_{02}(KA)$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	n_2
10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

III.3 Résultats de simulation

III.3.1 Champ électrique vertical

Les figures ((III.5.a), (III.5.b), (III.5.c)) présentent les résultats de simulation du champ électrique vertical calculé à la distance de 50 m pour deux cas avec l'objet élevé (tour 100m) et initier au sol, au-dessous du sol, au niveau du sol et en-dessus du sol caractérisé par une conductivité finie.

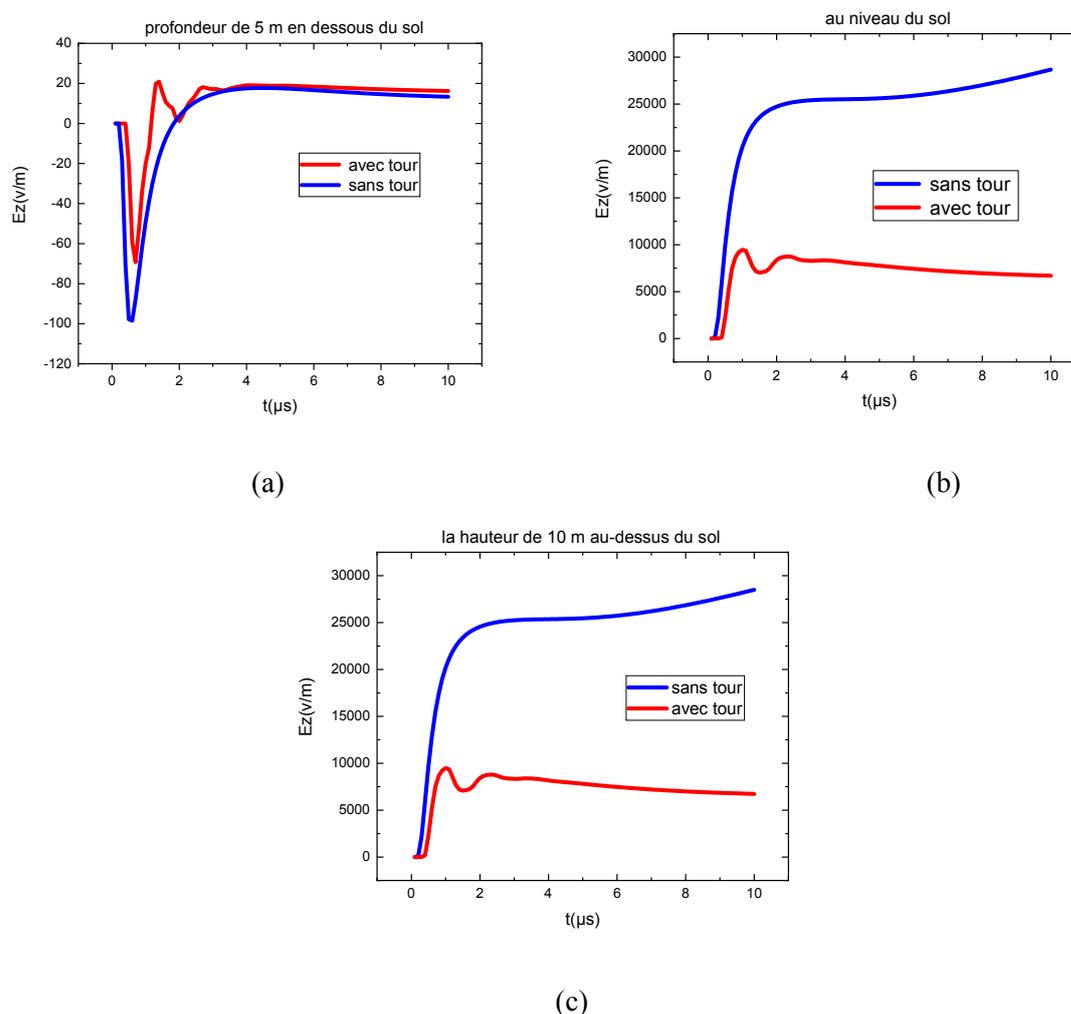


Figure III.5 : Champ électrique vertical calculé à la distance de 50 m de la tour Gaisberg (100m) a différent niveau du sol ($\sigma=0.0025$ S/m).

On observe dans le premier graphe (a) que la polarité est négative pour les deux cas « sans\avec tour », cependant, la valeur du pic de la composante du champ électrique correspondante à la présence de la tour est supérieure à celle sans tour. Pour les deux graphes (b) et (c) on remarque que les deux champs pour les deux cas « sans\avec tour », ont une

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

polarité positive mais n'ont pas la même amplitude. Pour les trois graphes, on remarque que le temps de montée des composantes du champ est plus rapide en absence de tour.

III.3.2 Champ électrique radial

Les figures ((III.6.a), (III.6.b), (III.6.c)) présentent les résultats de simulation du champ électrique radial calculé à la distance de 50 m pour deux cas avec l'objet élevé (tour 100m) et initié au sol, au-dessous du sol au niveau du sol et en-dessus du sol caractérisé par une conductivité finie.

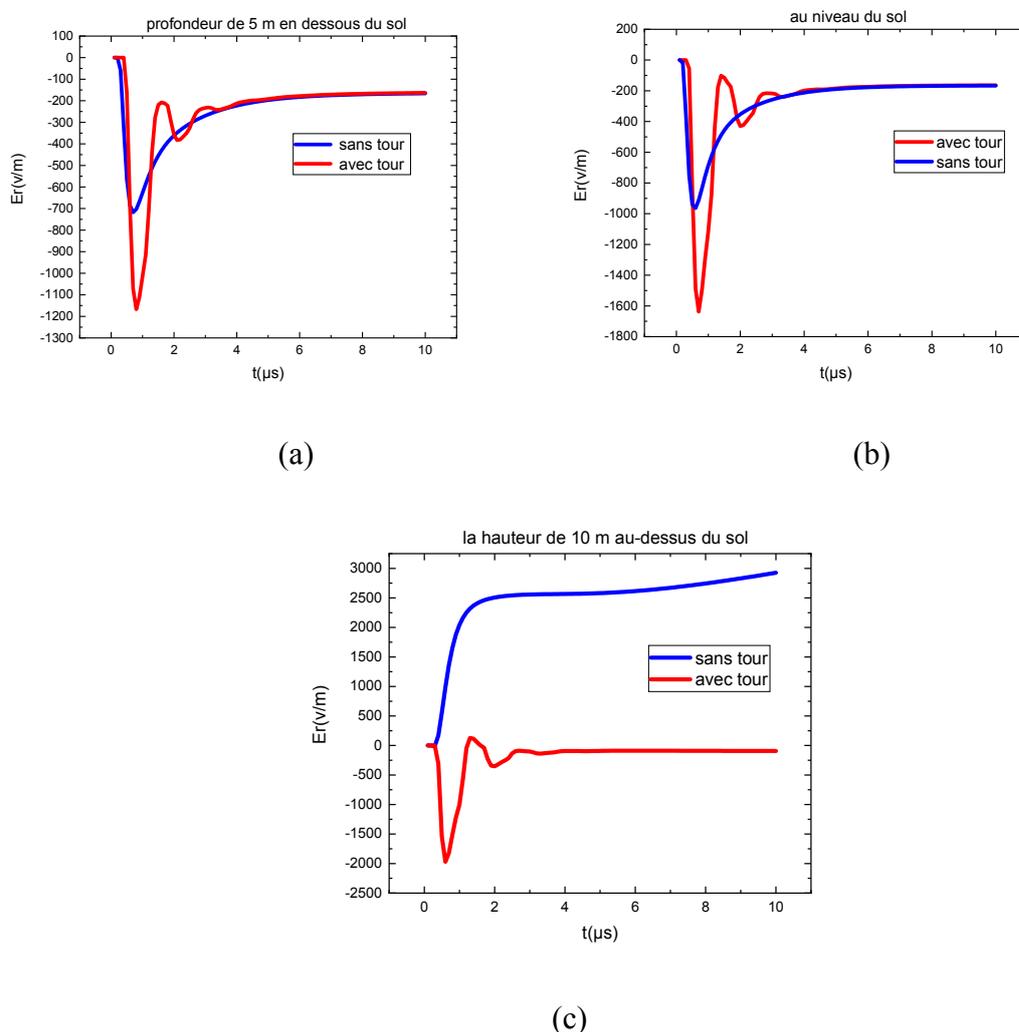


Figure III.6 : Champ électrique radial calculé à la distance de 50 m de la tour Gaisberg (100m) à différents niveaux du sol ($\sigma=0.0025$ S/m).

On observe dans les graphes (a) (b) que la polarité est négative et l'amplitude pour les deux cas « sans\avec tour » ne sont pas identiques pour les premières microsecondes, au-delà de

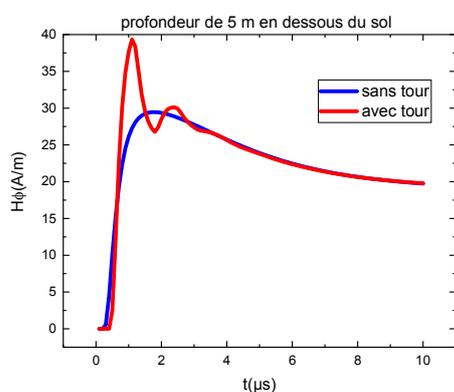
Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

4 μ s, la valeur de l'amplitude du champ électrique radiale se stabilise à la valeur 200v/m, pour les deux cas,

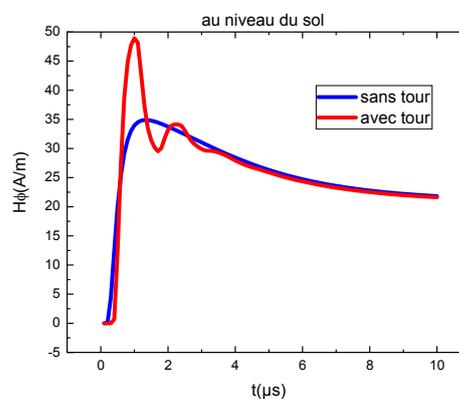
On remarque aussi que la valeur du pic du champ « avec tour » est inférieure à celle « sans tour », et pour le troisième graphes (c) la polarité du champ « avec tour » est négative et « sans tour » est positive et n'ont pas la même amplitude.

III.3.3 Champ magnétique azimuthal

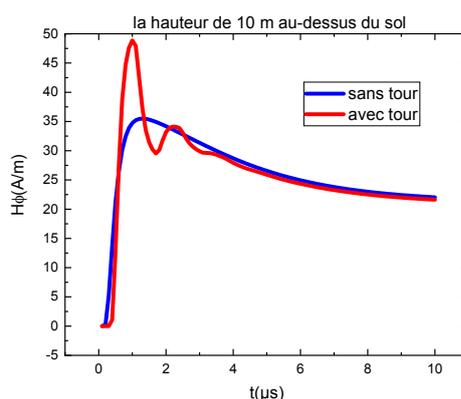
Les figures ((III.7.a),(III.7.b),(III.7.c)) présentent les résultats de simulation du champ magnétique calculé à la distance de 50 m pour de cas avec l'objet élevé (tour 100m) et initié au sol , au-dessous du sol au niveau du sol et en-dessus du sol caractérisé par une conductivité finie.



(a)



(b)



(c)

Figure III.7 : Champ magnétique calculé à la distance de 50 m de la tour Gaisberg (100m) a différent niveau du sol ($\sigma=0.0025$ S/m)

Chapitre III : Simulation du champ EM généré par l'interaction d'un coup de foudre avec la tour Gaisberg

On observe dans les trois graphes (a), (b), (c) que la polarité est positive et l'amplitude pour les deux cas « sans\avec tour » n'est pas identique, elle atteint une valeur de l'ordre de 50 v/m au niveau et au-dessus du sol en présence de la tour, et 35 v/m pour le cas sans tour, la présence de la tour se traduit par une augmentation d'amplitude de l'ordre de 15 v, par rapport à la valeur de l'amplitude du champ électrique généré par un coup de foudre initié au sol.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une analyse des champs électromagnétiques générés par une décharge de foudre à des distances très proches du canal de foudre (~50m). Les composantes du champ électromagnétique sont calculées au-dessus, au niveau et en dessous d'un sol caractérisé par une conductivité finie. Les calculs sont basés sur la résolution des équations de Maxwell en utilisant une méthode aux différences finies dite la « FDTD », dans laquelle, l'arc en retour est correctement inclus et représenté par les modèles d'ingénieur. Les résultats de simulation obtenus ont été examinés et testés par des comparaisons avec les résultats obtenus pour le cas d'un coup de foudre initié au sol.

Les principales conclusions de cette analyse se résument comme suit :

- Le champ magnétique a toujours une polarité positive, la présence de la tour se traduit par une augmentation de l'amplitude par rapport à la valeur de l'amplitude du champ électrique généré par un coup de foudre initié au sol.
- La présence de la tour se traduit par une diminution de l'amplitude du champ électrique radial, la polarité est négative pour les trois niveaux du sol, contrairement au comportement du champ électrique radial au-dessus du sol qui a une polarité positive.
- Le champ électrique vertical diffère selon la présence de tour et la polarité change selon le niveau du sol, en-dessous du sol elle est négative, cependant au-dessus et au niveau elle est positive.
- Le temps de montée des composantes du champ est plus rapide en absence de tour.
- L'impact de la présence de la tour se traduit par des réflexions multiples clairement observées dans les multiples pics dans l'allure du champ électromagnétique de la foudre, surtout dans les premiers micro secondes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

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 de la perturbation (mécanismes physiques, grandeurs caractéristiques) pour pouvoir protéger efficacement ces systèmes. Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude d'une tour instrumentée et faire monter son impact sur le champ électromagnétique rayonné par la foudre en présence de la tour (Gaisberg).

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 consacré à la modélisation du champ électromagnétique de la foudre. Ensuite nous avons présenté les deux modèles d'arc en retour cités dans la littérature qui prennent en compte la présence de l'objet élevé ; 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 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 trois points d'observations différents situés à des niveaux de sol (en dessous, sur et au-dessus d'un sol caractérisé par une conductivité finie).

- Le champ magnétique a toujours une polarité positive, la présence de la tour se traduit par une augmentation de l'amplitude par rapport à la valeur de l'amplitude du champ électrique généré par un coup de foudre initié au sol.
- La présence de la tour se traduit par une diminution de l'amplitude du champ électrique radial, la polarité est négative pour les trois niveaux du sol, contrairement au comportement du champ électrique radial au-dessus du sol qui a une polarité positive.
- Le champ électrique vertical diffère selon la présence de tour et la polarité change selon le niveau du sol, en-dessous du sol elle est négative, cependant au-dessus et au niveau elle est positive.
- Le temps de montée des composantes du champ est plus rapide en absence de tour.

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.

Conclusion générale

Nos efforts restent toujours motivés pour arriver à un développement complet et générale des nouvelles formulations des champs électromagnétiques qui traduisent la réalité du phénomène physique.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] C. GARY, « La Foudre : des méthodologies antiques à la recherche moderne », Masson, 1994.
- [2] Philippe Dunand, « Protection des installations électriques contre la foudre », Dunod, Paris, 2003.
- [3] G. Le Roy, C. Gary, B. Hutzler, J. Lacot, C. Ducaton ; « Les propriétés diélectrique de l'air et les très hautes tensions (la foudre) », Ed Eyrolles,1984, Paris. pp.92-251
- [4] M. Aguet :« Haute Tension », Vol. XXII, Presses Polytechniques et Universitaire Romandes,1987.
- [5] Cahier technique 168 : « la foudre et les installations électriques HT ». Juillet 1993
- [6] M.A. Uman « the lightning discharge », Dover publications, INC, Mineola, New York, 2001.
- [7] BENADJI Djahid. " Protection Contre la Foudre dans les Installations Basse Tension » thèse, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia.2012
- [8] T. Horvath: « Computation of lightning protection », Research studies press LTD, England; 1ère Ed; 1991. pp: 1-76.
- [9] C. GARY, « La Foudre : nature, histoire risques et protection », Dunod, Paris, 2004.
- [10] F. Rachidi " La foudre et ses effets électromagnétiques". Eté 2004.
- [11] A. Mimouni, “Analyse des problèmes de compatibilité électromagnétique par modélisation et simulation du rayonnement électromagnétique de la foudre,” thèse, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran, 2007.
- [12] A. UMAN "The lightning discharge" - International geophysics series - volume 39 - 1987.
- [13] BERGER (K.), ANDERSON (R.B.) et KRONIN- GER (H.). – Parameters of lightning flashes. Electra, vol. 41, p. 23-37 (1975).
- [14] J. L. Bermudez “Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects”, Thèse N° 2741 (2003), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [15] T. Narita, T. Yamada, A. Mochizuki, E. Zaima, and M. Ishii “Observation of current waveshapes of lightning strokes on transmission towers”, 2000.
- [16] H. Torres, O. Trujillo, F. Amortegui, F. Herrera, G. Pinzon, C. Quintana, D. Gonzalez, D. Rondon, M. Salgado, and D. Avila “Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone”, London, UK, 1999.

Bibliographie

- [17] Y. T. Lin, M. A. Uman, J. A. Tiller, R. D. Brantley, W. H. Beasley, E. P. Krider, and C. D. eidman "Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two station measurements", *Journal of Geophysical Research*, 1979.
- [18] G. Diendorfer, M. Mair, and W. Schulz "Detailed brightness versus lightning current amplitude correlation of flashes to the Gaisberg tower", 26th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 8-13, Cracow, Poland, 2002.
- [19] S. A. Mosaddeghi, A. Mimouni, F. Rachidi, M. Rubinstein, G. Diendorfer, H. Pichler, D. Pavanello. «Vertical and Horizontal Components of the Electric Field Associated with Lightning Strikes to the Gaisberg Tower», COST P18: The Physics of Lightning Flash and Effects. Vienna, May 25-27, 2009.
- [20] H. Goshima, A. Asakawa, T. Shindo, H. Motoyama, A. Wada, and S. Yokoyama, "Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack," *Trans. of the Inst. of Electrical Eng. of Japan, Part B*, vol. 120, pp. 44-9, 2000.
- [21] A. Rubinstein, C. Romero, M. Paolone, F. Rachidi, M. Rubinstein, P. Zweiacker, B. Daout, "Lightning measurement station on Mount Säntis in Switzerland", 10th International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brazil, November 9-13, 2009
- [22] Carlos Romero, Mario Paolone, Marcos Rubinstein, Farhad Rachidi, Abraham Rubinstein, Gerhard Diendorfer, Wolfgang Schulz, Bertrand Daout, Armin Kälin, Pierre Zweiacker *Electric Power Systems Research*, Volume 82, Issue 1, January 2012, Pages 34-43
- [23] S. Araki¹, 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
- [24] F. Rachidi, J. L. Bermudez, and M. Rubinstein "Statistical evaluation of lightning current parameters from remote electromagnetic field measurements", Poland, 2002.
- [25] V. A. Rakov, R. Thottappillil, and M. A. Uman "On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return stroke peak current and peak electric field", 1992.
- [26] Xiao, X. H. Tang, X.J. Zhang « Comparison of Taylor finite difference and window finite difference and their application in FDTD », *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol 193, 2006, pp 516–534.
- [27] Rachidi, and R. Thottappillil " Determination of lightning currents from far electromagnetic fields" *Journal of geophysical research*, 1993

Bibliographie

- [28] ARTICLE TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR : d1335 Protection contre la foudre – Principes généraux et normes en vigueur, 2015.
- [29] 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
- [30] M'ziou Nassima « Modélisation de la Décharge de Foudre en Vue d'une Application en Compatibilité Electromagnétique ». Thèse de doctorat, juillet 2009
- [31] A. Dar chérif, « Contribution à la modélisation des phénomènes d'interférences électromagnétiques dans les réseaux électriques », Thèse de Doctorat de L'INPG de Grenoble, 1990.
- [32] N. Theethayi, and V. Cooray "On the representation of the lightning return stroke process as a current pulse propagating along a transmission line", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20 (2), pp. 823-837, 2005.
- [33] N. Theethayi, and V. Cooray "Transmission line model – an idealisation or reality", Power tech Conference, June 23-26, Bologna, Italy, 2003.
- [34] C.A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel base current: A review and comparison", Journal of Geophysical Research, Vol. 95, n°. D12, pp. 20395 -20408, 1990.
- [35] V. Rakov and M.A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 40 (4), 403-26, 1998.
- [36] C. Gomes and V. Cooray, "Concepts of lightning return stroke models", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 42 (1), pp. 82-96, 2000.
- [37] C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti
"Lightning return stroke current models with specified channel base current: A review and comparaison", Journal Of Geophysical research, Vol. 95, n°. D12, pp.20395-20408, 1990
- [38] V. Rakov and A. Dulzon, "A modified transmission line model for lightning return stroke field calculations", 9th International Zurich Symposium on electromagnetic compatibility, Zurich, Switzerland, pp. 229-235, 1991.
- [39] C.E.R. Bruce and R.H. Golde, "The lightning discharge", The journal of the institution of electrical engineers, 88 (6), 487-520, 1941.

Bibliographie

- [40] 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.
- [41] K. Berger, B. Anderson, and H. Kroninger, " Parameters of lightning flashes", *Electra*. no., 41, 23-37, 1975. .
- [42] A. A.Mimouni, F. Rachidi and Zin-eddine Azzouz, “afinite-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.
- [43] D. Pavanello, F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J. L. Bermudez “Return stroke current profiles and electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall towers: Comparison of engineering models”, *J. Electrostat.*, 65 (2007) 316-321.
- [44] F. Rachidi "Modeling Lightning Return Strokes to Tall Structures: Recent Developments. VIII International Symposium on Lightning Protection", 21-25 November 2005 –Sao Paulo, Brazil
- [45] K. S. Yee “Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media,” *IEEE Trans. Antennas Propogat.*, vol. 14, 1966, pp. 302–307.
- [46] M. A. Uman, « Naturel lightning », *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 30, No3, May/Juin 1994
- [47] P. A. Tirkas, C. A. Balanis, M. P. Purchine, and G. C. Barber “Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Radiation, Interference, and Interaction with Complex Structures,” *IEEE Transactions on electromagnetic Compatibility*, vol.35, 1993, N° 2, pp 192-203.
- [48] Y. Baba and V. A. Rakov, “Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object”, *J. Geophys. Res.* 110 (D09108) (2005).
- [49] Fayçal Rejiba “Modélisation de la propagation des ondes électromagnétiques en milieux hétérogènes –Application au radar sol”, Thèse de Doctorat 2002, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- [50] A. Taflove, *Computational electromagnetic, the finite difference time domain method*, Artech House, Norwood, MA, 1995.
- [51].A. Mosaddeghi, A. Shoory, F. Rachidi, G. Diendorfer, H. Pichler, D. Pavanello, M. Rubinstein, P. Zweiacker, and M. Nyffeler, « Lightning electromagnetic fields at very close distances associated with lightning strikes to the Gaisberg tower » *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 115, D17101, doi:10.1029/2009JD013754, 2010.

Bibliographie

- [52] A. Mosaddeghi, A. Shoory, F. Rachidi, G. Diendorfer, H. Pichler, D. Pavanello, M. Rubinstein, P. Zweiacker, and M. Nyffeler, « Lightning electromagnetic fields at very close distances associated with lightning strikes to the Gaisberg tower » *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 115, D17101, doi:10.1029/2009JD013754, 2010
- [53] E. A. Jacobson and E. P. Krider, “Electrostatic field changes produced by Florida lightning,” *J. Atmos. Sci.*, 33, pp. 103-107, 1976.
- [54] C. A. Nucci, and F. Rachidi “Experimental validation of a Modification to the Transmission Line model for LEMP calculations”, 8th International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, pp. 6, Zurich, Switzerland, 1989
- [55] Abdolhamid Shoory, Farhad Rachidi, Marcos Rubinstein, and Rajeev Thottappillil, “On the Measurement and Calculation of Horizontal Electric Fields From Lightning”, *IEEE*. doi: 10.1109/TEMPC.2010.2093602
- [56] A.Mimouni, A. Mosaddeghi, F. Rachidi, M. Rubinstein “Electromagnetic Fields Very Near to a Tall Tower Struck by Lightning: Influence of the Ground Conductivity” Presented at the EUROEM 2008, Lausanne, Switzerland, 21- 25 July 2008.

Résumé

À cause de la complexité du phénomène de la foudre et les effets néfastes 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.

L'objectif de ce thème est l'étude d'une tour instrumentée et de son impact sur le champ électromagnétique, pour cela, nous avons abordé en premier une brève description de la constitution d'une tour instrumentée nommée Gaisberg de 100m de haut, en suite on a effectué une simulation du rayonnement électromagnétique généré par la foudre à l'aide de la méthode numérique FDTD en 2D. Afin de déterminer l'impact de cette tour instrumentée sur le comportement du champ électromagnétique rayonné, on a fait la comparaison de nos résultats avec ceux obtenus sans la présence de la tour, Les composantes du champ électromagnétique sont évaluées à trois niveaux d'un sol caractérisé par une conductivité finie (0.0025S/m). Les résultats ont montré que la présence d'une tour affect le comportement du champ électromagnétique, cet impact se traduit par les multiples pics clairement observés dans l'allure du champ électromagnétique de la foudre, surtout dans les premiers micro secondes, dus à la complexité de la structure de la tour et les réflexions multiples qui se produisent à l'intérieure de cette dernière.

summary

Cause off the complexity of the phenomenon of lightning and the adverse effects that accompanied it, the situation remains always fertile and requires more work for a more reassuring protection of electrical, electronic and human systems

The objective of this theme is to study an instrumented tower and its impact on the electromagnetic field, for this, we first addressed a brief description of the constitution of any instrumented tower (Gaisberg 100m from high, as an example), a simulation of the electromagnetic radiation generated by lightning was then carried out using the 2D FDTD numerical method. In order to determine the impact of this instrumented tower on the behavior of the radiated electromagnetic field, we made the comparison of our results with those obtained without the presence of the tower, the components of the electromagnetic field are evaluated at three levels of a ground characterized by a finite conductivity (0.0025S / m). The results showed that the presence of a tower affects the behavior of the electromagnetic field, this impact is reflected by the multiple reflections clearly observed in the pace of the electromagnetic field of the lightning, especially in the first microseconds.

ملخص

بسبب تعقيد ظاهرة الصواعق والآثار الضارة التي تصاحبها ، لا يزال الوضع خصباً ويتطلب المزيد من العمل من أجل حماية مطمئنة للأنظمة الكهربائية والإلكترونية والبشرية

- الهدف من هذا الموضوع هو دراسة البرج المجهز بآثره على المجال الكهرومغناطيسي ، ولهذا قمنا أولاً بمعالجة وصف موجز لبرج مُجهز (Gaisberg 100m، على سبيل المثال) ، ثم تم إجراء محاكاة للإشعاع الكهرومغناطيسي المتولد من الصاعقة باستخدام الطريقة الرقمية -FDTD 2D. من أجل تحديد تأثير هذا البرج الميكانيكي على سلوك الحقل الكهرومغناطيسي المشع ، قمنا بمقارنة نتائجنا بالنتائج التي تم الحصول عليها دون وجود البرج ، وتم تقييم مكونات المجال الكهرومغناطيسي على ثلاثة مستويات من الأرض تتميز الموصلية المحدودة (0.0025 S / m). أظهرت النتائج أن وجود البرج يؤثر على سلوك المجال الكهرومغناطيسي ، وهذا التأثير يسبب الانعكاسات المتعددة التي لوحظت بوضوح في سلوك المجال الكهرومغناطيسي للصاعقة ، خاصةً في أجزاء الثواني الأولى.