

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Science – Technologie – Santé

FACULTE des Sciences et Techniques
XLIM- Département OSA

Thèse N° 4-2009

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Discipline : Electroniques des Hautes fréquences, Optoélectronique
Spécialité : Télécommunications

Présentée et soutenue par

Yannick BOURGEOIS

Le 13 février 2009

**Modélisation des perturbations électromagnétiques générées sur
un réseau de télécommunications par une agression de type foudre**

Thèse dirigée par Alain REINEIX et Ahmed ZEDDAM

JURY:

Président:

Mr Thierry MONEDIERE

Professeur

Université de Limoges, XLIM, Dépt. « O.S.A. », Limoges

Rapporteurs :

Mr Pierre DEGAUQUE

Professeur

*Université des Sciences et Technologies de Lille 1, IEMN,
Villeneuve d'Ascq*

Melle Françoise PALADIAN

Professeur

Université Blaise Pascal Clermont II, LASMEA, Aubière

Examineurs :

Mr Philippe BARATON

Ingénieur

*EDF R & D – Laboratoires des Matériels Electriques, Moret
sur Loing*

Mr Alain REINEIX

Directeur de Recherche C.N.R.S.

Université de Limoges, XLIM, Dépt. « O.S.A. », Limoges

Mr Ahmed ZEDDAM

Ingénieur

France Télécom Division R & D, RESA/SAFE/EMC, Lannion

*A mes parents,
Ma sœur,
Ma famille.*

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire EMC (ElectroMagnetic Compatibility) de la division « Recherche et Développement » de France Telecom à Lannion en collaboration avec le Laboratoire OSA de L'université de Limoges.

Ces trois années de doctorat ont été jalonnées par de nombreuses rencontres, toutes plus enrichissantes les unes que les autres.

Aussi, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont soutenu, et tout particulièrement :

Mr Ahmed ZEDDAM, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe, et pour son appui de tous les instants durant ce travail de thèse. Ce fut un honneur et une joie de travailler avec toi.

Mr Alain REINEIX, pour avoir assuré la direction de ma thèse, avec une grande disponibilité malgré la distance.

Un merci tout particulier à Mr Sylvain PERSON, pour avoir répondu à un grand nombre de mes questions sur la protection des bâtiments, et pour sa convivialité. J'espère que l'on retravaillera ensemble « Padre »...

Un immense merci à l'équipe CPQD (Bresil) et à l'entreprise Australienne TELSTRA, et plus particulièrement à Celio BARBOSA et Philip DAY, pour la mise en place et la réalisation des expérimentations au Brésil.

Je tiens également à remercier, Mr Rolland BESCOND, pour sa grande disponibilité et son soutien logistique durant ces trois ans.

Ces remerciements ne seraient pas complets, si je ne remerciais pas :

- Mon ancien collègue de bureau, Mr Fahd HASSOUN, pour m'avoir supporté pendant trois ans
- Toute l'équipe EMC de FTRD Lannion : Rabah, Fabienne, Alain, Benjamin, Gautier, Yann, Pascal, Pascal P., Francis, Fred et tous les autres, pour leurs accueils.
- Toute l'équipe ECD de FTRD Lannion
- Toute l'équipe OSA de Limoges, et plus spécifiquement Mr Christophe GUIFFAULT, et Mme Nadine AYMARD.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	I
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : MECANISMES D'AGRESSION DE LA Foudre SUR UN RESEAU DE TELECOMMUNICATIONS	5
I.1 INTRODUCTION:	5
I.2 PHENOMENOLOGIE DE LA Foudre:	6
<i>I.2.1 La formation des nuages orageux.....</i>	<i>6</i>
<i>I.2.2 La répartition des charges à l'intérieur d'un nuage</i>	<i>7</i>
<i>I.2.3 L'effet de pointe</i>	<i>8</i>
<i>I.2.4 La foudre :</i>	<i>10</i>
I.2.4.1 Les différents coups de foudre	10
I.2.4.2 Exemple : L'éclair descendant négatif	11
<i>I.2.5 Déclenchement artificiel de la foudre</i>	<i>13</i>
I.3 DESCRIPTION D'UN RESEAU DE TELECOMMUNICATIONS	13
I.4 MECANISMES D'AGRESSION DE LA Foudre SUR LES RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS	15
<i>I.4.1 Impact direct sur le réseau</i>	<i>15</i>
<i>I.4.2 Impact direct sur un bâtiment.....</i>	<i>17</i>
<i>I.4.3 Les effets indirects :</i>	<i>18</i>
I.5 SYSTEMES DE PROTECTION CONTRE LA Foudre	20
<i>I.5.1 Les systèmes de protection contre les effets directs</i>	<i>20</i>
I.5.1.1 Les paratonnerres à tige simple.....	20
I.5.1.2 Les cages maillées.....	21
I.5.1.3 Le fil de garde ou fil tendu	22
<i>I.5.2 Les systèmes de protection contre les effets indirects</i>	<i>23</i>
<i>I.5.3 Normes relatives à la protection foudre</i>	<i>24</i>
I.6 CONCLUSION	28
CHAPITRE II : METHODES DE MODELISATION DU COUPLAGE D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE DE TYPE Foudre SUR UN RESEAU DE TELECOMMUNICATIONS COMPLEXE	29
II.1 INTRODUCTION	29
II.2 MODELISATION DU COUPLAGE D'UNE ONDE Foudre SUR UN RESEAU FILAIRE :	30
<i>II.2.1 Détermination du courant de foudre à la base du canal.....</i>	<i>30</i>
II.2.1.1 Forme analytique du courant de foudre.....	30
II.2.1.2 Exemple de modélisation du courant à la base du canal.....	31
<i>II.2.2 Arc en retour: les différents modèles existants.</i>	<i>33</i>
II.2.2.1 Modèle de Bruce et Golde (BG).....	33
II.2.2.2 Modèle : Ligne de transmission (TL)	34

II.2.2.3	Modèle : Ligne de Transmission Modifiée (MTL)	35
II.2.2.4	Généralisation : Les modèles ingénieurs.....	36
II.2.2.5	Les autres modèles existants	36
II.2.2.6	Calcul des sources dipolaires lors d'un impact sur une tour.....	37
II.2.3	<i>Calculs des champs électromagnétiques rayonnés par une décharge orageuse.</i>	38
II.2.3.1	Calcul du champ au dessus du sol	39
II.2.3.1.1	Cas d'un sol de conductivité infinie (sol parfait)	39
II.2.3.1.2	Prise en compte de la conductivité finie du sol.....	41
II.2.3.2	Expression du champ rayonné dans un sol de conductivité finie.....	43
II.2.4	<i>Calcul du couplage avec une ligne de transmission</i>	44
II.2.4.1	Résolution des équations de couplage dans le domaine temporel.....	46
II.2.4.2	Résolution des équations de couplage dans le domaine fréquentiel.....	50
II.2.5	<i>Synthèse</i>	54
II.3	MODELISATION DES EFFETS ELECTROMAGNETIQUES D'UNE ONDE Foudre SUR UNE STRUCTURE COMPLEXE PAR LA METHODE	
« FDTD »	54
II.3.1	<i>Les équations de Maxwell</i>	55
II.3.2	<i>Synthèse</i>	56
II.4	CONCLUSION.....	57
CHAPITRE III : ETUDE DE LA PROTECTION D'UN CABLE DE TELECOMMUNICATIONS SOUTERRAIN FACE A UNE		
AGRESSION DE TYPE Foudre PAR UN CABLE DE GARDE EFFET DIRECT ET INDIRECT		
59		
III.1	INTRODUCTION:.....	59
III.2	ETUDE EXPERIMENTALE	61
III.2.1	<i>Description de la configuration expérimentale</i>	61
III.2.1.1	Description du réseau de télécommunications.....	61
III.2.1.2	Description des terminaisons du réseau	63
III.2.1.3	Méthode d'injection du courant de foudre.....	63
III.2.1.4	Description de l'instrumentation de mesure	64
III.2.2	<i>Présentation des résultats de mesure</i>	66
III.2.2.1	Courant de foudre	66
III.2.2.2	Conducteur de protection	67
III.2.2.3	Câble de télécommunications	69
III.3	ETUDE THEORIQUE	71
III.3.1	<i>Présentation de la méthode de modélisation</i>	71
III.3.2	<i>Validation de la méthode de modélisation par comparaison avec les résultats expérimentaux</i>	73
III.3.3	<i>Etude paramétrique</i>	76
III.3.3.1	Etude de la répartition du courant le long du réseau enterré.....	77
III.3.3.2	Influence de la résistivité du sol	78
III.3.3.3	Influence de la permittivité relative de la gaine diélectrique.....	80
III.3.3.4	Influence de l'épaisseur de la gaine diélectrique	81
III.3.3.5	Influence de l'épaisseur de l'écran du câble.....	82

III.3.3.6 Synthèse	83
III.4 ETUDE DE LA PROTECTION D'UN RESEAU DE DESSERTE AERO-SOUTERRAINE DANS LE CAS D'UN IMPACT INDIRECT DE Foudre	83
III.4.1 Cas d'une desserte aéro-souterraine non protégée	84
III.4.2 Cas d'une desserte aéro-souterraine protégée par conducteur de protection	86
III.4.3 Synthèse	87
III.5 ETUDE DE LA PROTECTION D'UN SITE RADIOELECTRIQUE PAR CONDUCTEUR DE PROTECTION LORS D'UN IMPACT DIRECT. [71]....	88
III.5.1 Cas d'un seul conducteur de protection	89
III.5.1.1 Configuration modélisée.....	89
III.5.1.2 Calcul du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications.....	90
III.5.1.3 Calcul du courant circulant sur le conducteur écran	90
III.5.1.4 Synthèse	91
III.5.2 Cas de deux conducteurs de protection	93
III.5.2.1 Configuration modélisée.....	93
III.5.2.2 Calcul du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications.....	93
III.5.2.3 Calcul du courant circulant sur les conducteurs de protection	94
III.5.2.4 Synthèse	95
III.5.3 Cas de trois conducteurs de protection.....	96
III.5.3.1 Configuration modélisée.....	96
III.5.3.2 Calcul du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications.....	97
III.5.3.3 Calcul du courant circulant sur les conducteurs de protection	98
III.5.3.4 Synthèse	98
III.5.4 Synthèse générale.....	100
III.6 CONCLUSION :	102
CHAPITRE IV : ETUDE DES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES DUES A UN IMPACT Foudre SUR UNE STRUCTURE COMPLEXE COMPOSEE D'UN BATIMENT ET D'ADDUCTIONS.	105
IV.1 INTRODUCTION	105
IV.2 METHODE DE MODELISATION D'UNE STRUCTURE COMPLEXE PAR LA METHODE DES DIFFERENCES FINIES.....	107
IV.2.1 Le logiciel Open TEMSI-FD	107
IV.2.2 Présentation de l'infrastructure modélisée :.....	107
IV.2.3 Représentation du canal foudre.....	109
IV.3 ETUDE THEORIQUE DE LA REPARTITION DES COURANTS DANS UNE STRUCTURE COMPLEXE SOUMISE A UN IMPACT DE Foudre DIRECTE.....	110
IV.3.1 Etude des courants circulant sur le Pylône.....	110
IV.3.1.1 Courant circulant sur la ceinture de terre	110
IV.3.1.2 Courant circulant sur la patte d'oise	111
IV.3.1.3 Etude des courants induits sur l'interconnexion entre les réseaux de terre	113
IV.3.2 Etude des courants circulant dans le bâtiment.....	114
IV.3.3 Etude des courants circulant sur les adductions	115
IV.3.4 Synthèse et bilan.....	117

IV.4 ETUDE PARAMETRIQUE	120
<i>IV.4.1 Influence de la conductivité du sol</i>	120
IV.4.1.1 Méthode	120
IV.4.1.2 Synthèse.....	125
<i>IV.4.2 Influence de la longueur des brins constituant la patte d'oie</i>	126
IV.4.2.1 Méthode	126
IV.4.2.2 Synthèse.....	129
<i>IV.4.3 Influence d'une deuxième patte d'oie connectée au pied du pylône</i>	131
IV.4.3.1 Méthode	131
IV.4.3.2 Synthèse.....	133
<i>IV.4.4 Influence des connections entre bâtiment et pylône.....</i>	134
IV.4.4.1 Méthode	134
IV.4.4.2 Synthèse.....	136
<i>IV.4.5 Influence de l'utilisation d'une grille de terre sous le bâtiment</i>	137
IV.4.5.1 Méthode	137
IV.4.5.2 Synthèse.....	139
<i>IV.4.6 Influence du nombre de conducteurs de protection sur le courant induit sur les adductions.....</i>	141
IV.4.6.1 Méthode	141
IV.4.6.2 Synthèse.....	143
IV.5 SCHEMA EQUIVALENT PERMETTANT L'HYBRIDATION ENTRE UN CODE 3D ET UN CODE THEORIE DES LIGNES.	143
<i>IV.5.1 Principe et problématique lié à l'hybridation des différents modes de calcul.....</i>	144
<i>IV.5.2 Effet induit par rayonnement d'une structure foudroyé sur les adductions y étant rattachées.</i>	146
<i>IV.5.3 Modèle équivalent circuit et lignes de transmission de l'ensemble canal foudre / pylône. [79] [80]147</i>	
IV.5.3.1 Modèle équivalent	148
IV.5.3.2 Obtention du coefficient de réflexion du pylône	149
IV.6 CONCLUSION	152
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	155
BIBLIOGRAPHIE.....	159
CHAPITRE I : ANNEXE I : RESOLUTION PAR LA METHODE FDTD DES EQUATIONS DE MAXWELL.....	167
AI.1 LES EQUATIONS DE MAXWELL :	167
AI.2 LA METHODE FDTD : PRINCIPES GENERAUX	168
AI.3 APPLICATION A LA DISCRETISATION SPATIO – TEMPORELLE DES EQUATIONS DE MAXWELL	169
AI.4 CRITERE DE STABILITE	171
AI.5 LES CONDITIONS AUX FRONTIERES : PML	172
AI.6 IMPLEMENTATION DES FILS	173

Introduction

L'émergence de nouveaux services de téléphonie mobile, tels que la visiophonie, la télévision, ou les services internet mobile, ont entraîné une augmentation du nombre d'émetteur radioélectriques. De plus, l'implantation de nouveaux standard, permettant la fourniture de ces services, comme la 3G ou l'UMTS, on amené à un déploiement de nouveaux équipements électroniques avec une convergence de plus en plus grande entre les réseaux mobiles et fixes.

Par son étendue, le réseau de télécommunications est soumis à diverses sources de perturbations électromagnétiques d'origine artificielle (réseaux électriques, émetteurs radio, ...) ou naturelle telle que la foudre. La structure métallique du réseau de télécommunications fait que ces perturbations sont généralement véhiculées vers les extrémités des lignes où elles peuvent entraîner des dégâts ou des dysfonctionnements plus ou moins importants.

Parmi les perturbateurs possibles nous nous intéressons à la foudre, qui par ses effets indirects ou directs, peut entraîner de nombreux dérangements et des destructions d'équipements au sein même du réseau. Dans ce contexte, France Telecom est intéressée par l'estimation des courants et des tensions induits aux extrémités du réseau afin de pouvoir optimiser les systèmes de protection et améliorer la qualité de service.

Les travaux réalisés dans ce mémoire se concentrent plus particulièrement sur la protection des émetteurs de téléphonie mobile, desservis par une desserte aéro-souterraine, qui par leur positions géographiques et leurs hauteurs sont des cibles privilégiées en cas d'épisodes orageux. Les perturbations électromagnétiques générées par la foudre induite sur ce type de site peuvent être produites par un impact direct sur la structure ou encore par un impact sur les réseaux filaires alimentant le site.

De manière à pouvoir estimer les surintensités et surtensions induites par une onde électromagnétique de type foudre pour ces deux types d'agression et de proposer une optimisation des systèmes de protections, notre étude a été divisée en quatre parties.

La première est consacrée à la description, du phénomène foudre, des principales caractéristiques d'un réseau de télécommunications et des effets induits par la foudre sur le réseau.

La deuxième partie traite des méthodes de modélisation, connues à ce jour, permettant de mener à bien cette étude, en rappelant les différents formalismes et les équations associées régissant le couplage entre une onde foudre et un réseau de télécommunications complexe. Dans un premier temps, on présente les méthodes de calcul du couplage entre une onde foudre et un réseau filaire aéro-souterrain en décomposant l'étude en deux phases. Après avoir caractérisé l'onde foudre et établi les équations régissant le calcul du rayonnement du canal foudre constitué par l'arc en retour, on aborde ensuite, à l'aide de la théorie des lignes de transmission, l'étude du couplage d'une onde de type foudre avec un réseau filaire. La seconde partie du chapitre est consacrée à la description des équations permettant le traitement du réseau de manière globale par la résolution des équations de Maxwell grâce à la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD).

Le troisième partie présente les résultats obtenus expérimentalement et par simulation numérique, lors d'un impact direct ou indirect sur un réseau de distribution aéro-souterrain. Au sein de ce chapitre, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à l'évaluation des courants induits par la foudre sur un réseau souterrain protégé par un dispositif de protection constitué d'un conducteur nu posé au dessus du câble enterré. L'originalité de notre étude, réside dans la prise en compte du conducteur de protection dans le calcul du couplage de l'onde foudre avec le câble de télécommunications souterrain. Nous avons en particulier étudié l'influence

des différents paramètres physiques constituant le réseau et proposé une méthode d'optimisation permettant une protection optimale du réseau.

Le chapitre quatre est consacré au traitement d'une structure impactée par la foudre afin de prendre en compte simultanément les effets directs et indirects pouvant se produire sur le bâtiment et sur le réseau de télécommunications connecté à ce dernier. On présente, en particulier, les résultats de calcul de la répartition du courant au sein de la structure foudroyée ainsi que l'évaluation des niveaux et formes d'onde des courants induits sur les adductions desservant la structure. Une étude paramétrique est ensuite effectuée afin d'analyser l'influence de paramètres, tels que la longueur des conducteurs, la résistivité du sol, ou encore la topologie du réseau de terre, sur la réponse des structures modélisées. Enfin, dans la dernière partie du chapitre, on s'attache à déterminer un schéma équivalent de la structure étudiée afin d'aboutir à une estimation des perturbations induites et conduites sur les adductions lors d'un impact direct sur la structure.

Chapitre I : Mécanismes d'agression de la foudre sur un réseau de télécommunications

I.1 Introduction:

La foudre est l'un des phénomènes naturels le plus fréquent et le plus spectaculaire. Depuis que Benjamin Franklin a démontré, il y a deux cents ans, qu'il s'agissait d'une gigantesque décharge électrique, nombreux sont les chercheurs qui ont étudié les nuages et les éclairs. Pourtant, malgré la mise au point de nouveaux appareillages et de nouvelles techniques de recherche, certains mécanisme d'électrisation des nuages pluvieux nous échappent encore.

Benjamin Franklin avait mis le doigt sur l'une des difficultés fondamentales du problème. En 1752, il observa que " *les nuages d'une ondée orageuse sont le plus souvent dans un état d'électricité négative, mais parfois dans un état d'électricité positive* ".

Depuis, on admet que la foudre est un transfert de charges électriques, soit positives soit négatives, d'une région d'un nuage à une autre, ou entre le nuage et le sol.

Aujourd'hui, les scientifiques s'accordent sur le fait que la foudre participe à l'équilibrage des charges entre l'atmosphère et la terre [1] comme le montre la Figure I-1

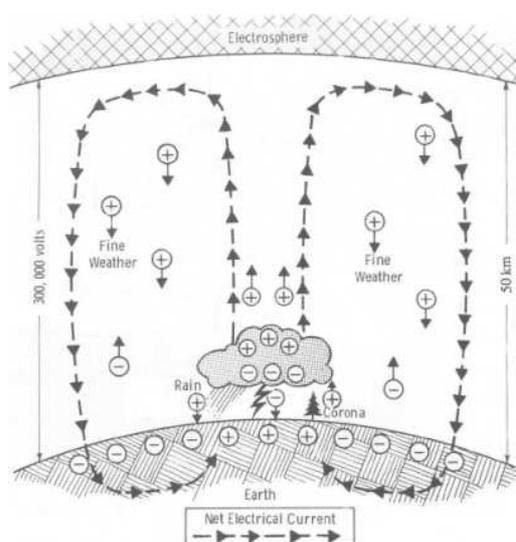


Figure I-1 : Equilibre électrique entre la terre et l'atmosphère (adapté par Uman 1987 [1])

I.2 Phénoménologie de la foudre:

D'un point de vue mystique, la foudre était considérée comme un message des divinités au sein de différentes cultures religieuses ou mythologiques. Certains en viennent même à penser que la foudre pourrait être à l'origine de la vie: ainsi en 1987, Uman écrivait: ***"Lightning has likely been present for the period of time during which life has evolved on earth, and, in fact, lightning has been suggested as a source for generating the necessary molecules from which life could evolve."***

Dans cette partie, nous présenterons de manière succincte la phénoménologie de la foudre comprenant les différentes étapes du développement des nuages aboutissant à un épisode orageux ainsi que le mécanisme d'un impact foudre au sol. La technique de déclenchement artificiel de la foudre, bien éprouvée de nos jours, sera également abordée. Enfin, les effets engendrés par un décharge de type foudre sur un réseau de télécommunications seront décrits en même temps que les moyens mis en œuvre pour assurer la protection des équipements et des installations.

I.2 Phénoménologie de la foudre:

I.2.1 La formation des nuages orageux

La formation des nuages orageux résulte de la rencontre entre un flux d'air anormalement froid issu de l'électrosphère et un flux d'air anormalement chaud venant du sol, comme le montre la Figure I-2.

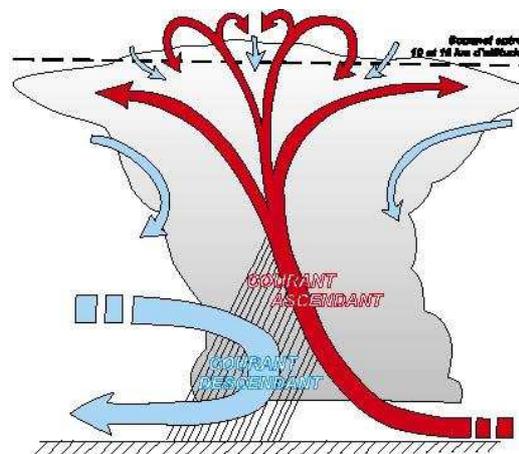


Figure I-2: Représentation des flux d'air entraînant un épisode orageux (meteo-world.com)

A l'origine les nuages orageux sont des cumulus. À ce stade, un courant ascendant, d'air chaud prédomine au sein du nuage. Ce courant vertical atteint habituellement sa vitesse maximale dans la partie supérieure (de l'ordre de 25m/s). Durant son ascension, l'eau contenue dans le courant d'air chaud se condense au contact de l'air ambiant plus froid et provoque la création de gouttes d'eau et de glace dans la partie haute du nuage ainsi qu'un courant descendant constitué d'air froid. On parle alors de cumulonimbus. Ce type de nuage est facilement reconnaissable grâce à sa forme en enclume provoquée par la rencontre entre le courant ascendant et les couches hautes de l'atmosphère, la stratosphère.

1.2.2 La répartition des charges à l'intérieur d'un nuage

Le processus par lequel les nuages d'orage acquièrent une charge n'est pas complètement bien compris. A l'heure actuelle, Il existe deux théories fondamentales qui expliquent la répartition des charges électriques au sein d'un nuage :

D'une part, la théorie de la convection qui considère que les ions libres dans l'atmosphère sont captés par les gouttelettes contenues dans le nuage. Les gouttelettes ainsi chargées sont ensuite transportées par les courants convectifs dans le nuage, produisant ainsi des zones de charges.

D'autre part, la théorie de gravitation, qui repose sur l'hypothèse que les particules chargées négativement sont plus lourdes que les particules chargées positivement. Dans ce cas, la séparation entre les charges négatives et positives se fait par gravité.

Néanmoins, aucune de ces deux théories ne permet d'obtenir une bonne corrélation avec les observations effectuées sur le terrain ou en laboratoire. Cependant, la majorité du monde scientifique s'accorde aujourd'hui sur le fait que le haut du nuage est chargé positivement et que le bas du nuage se compose de particules négatives mais peut aussi contenir des « poches de particules positives, comme le montre la Figure I-3

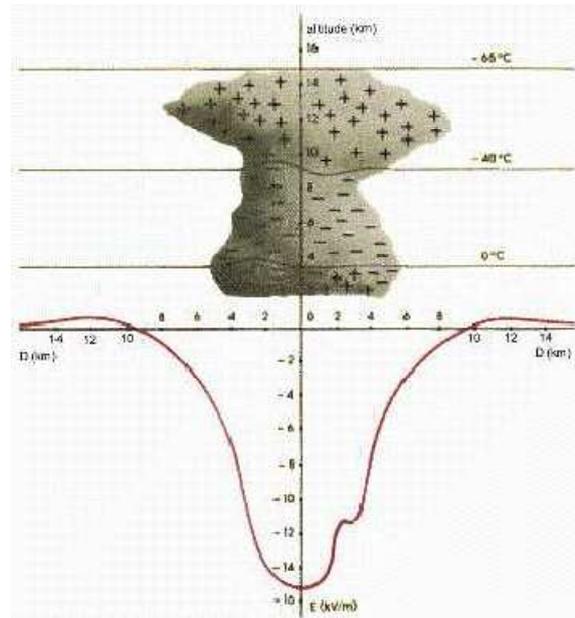


Figure I-3 : Distribution des charges électriques dans la masse d'un cumulo-nimbus et la répartition du champ électrique au sol, au moment où va se produire la foudre [2]

Que le nuage soit chargé positivement ou négativement, l'accumulation des charges à sa base est assez importante pour créer une différence de potentiel pouvant atteindre plusieurs kilovolts. Cette différence de potentiel engendre de manière locale un champ électrique pouvant aller de 10 à 50 kV/cm. Or pour pouvoir observer une décharge électrique, le champ électrique doit dépasser la valeur critique du champ de rupture de l'air estimée à 30 kV/cm.

Il faut noter, cependant, que le champ électrique peut devenir beaucoup plus intense à cause des aspérités du terrain, arbres, sommets montagneux, constructions, qui sont le siège d'effets de pointe ou de couronne.

I.2.3 L'effet de pointe

L'effet de pointe peut être mis en évidence de manière simple comme indiqué sur les Figures I-4 et I-5. La Figure I-4, présente un claquage dans l'air entre deux sphères de même diamètre, on peut alors noter que le claquage s'effectue sur la plus courte distance séparant les deux boules. Dans le cas de la Figure I-5, représentant un phénomène de claquage entre deux pointes, on constate que le claquage se produit entre les deux pointes et ce malgré que la distance soit plus grande.

1.2 Phénoménologie de la foudre:

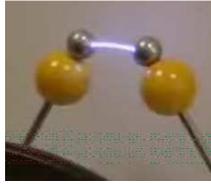


Figure 1-4 : claquage dans l'air entre deux sphères



Figure 1-5 : claquage dans l'air entre deux pointes

De manière générale, le potentiel électrique V , et le champ électrique en son voisinage E , d'un conducteur de charge Q et de rayon de courbure R sont donnés selon le théorème de Gauss par les équations I-1 et I-2

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} \quad \text{I-1}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^2} \quad \text{I-2}$$

Si nous prenons l'exemple de deux conducteurs soumis au même potentiel électrique V mais possédant un rayon de courbure R_1 et R_2 différent. On obtient les valeurs de champs E_1 et E_2 suivantes:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R_1^2} \text{ et } E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R_2^2} \quad \text{I-3}$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} \quad \text{I-4}$$

Ainsi, entre un objet possédant un rayon de courbure $R_1 = 10$ cm et un autre de rayon $R_2 = 1$ mm soumis au même potentiel, il existera un rapport 100 ($E_2 = 100 E_1$) entre les champs électriques développés en leurs voisinages. Cela explique pourquoi la foudre tombe préférentiellement sur les objets pointus (à faible rayon de courbure), puisqu'en leur voisinage le champ électrique dépasse le champ de rupture diélectrique de l'air.

De plus, si les pointes sont portées à un potentiel important, le champ électrique peut entraîner l'ionisation de l'air environnant, accompagné de crépitements et d'effluves lumineux bleutés : c'est l'effet de couronne. Un exemple typique est le feu de Saint-Elme au sommet des mâts de navires.

I.2 Phénoménologie de la foudre:

Lorsque la valeur du champ électrique dépasse la valeur critique de rupture diélectrique, la décharge se produit selon un mécanisme complexe, c'est le coup de foudre.

I.2.4 La foudre :

I.2.4.1 Les différents coups de foudre

La foudre est la manifestation lumineuse de la décharge électrique entre le sol et le nuage. De nombreuses études menées par Berger [3], Golde, Mason et Uman [1], ont permis de mieux comprendre le principe de déclenchement des coups de foudre.

Ces diverses études ont permis de classer les coups de foudre en différentes catégories qui sont fonction de deux critères importants : Le premier est lié à l'origine de la décharge et le second à la polarité des charges véhiculées. On obtient alors quatre types de coups de foudre indiqués sur la Figure I-6.

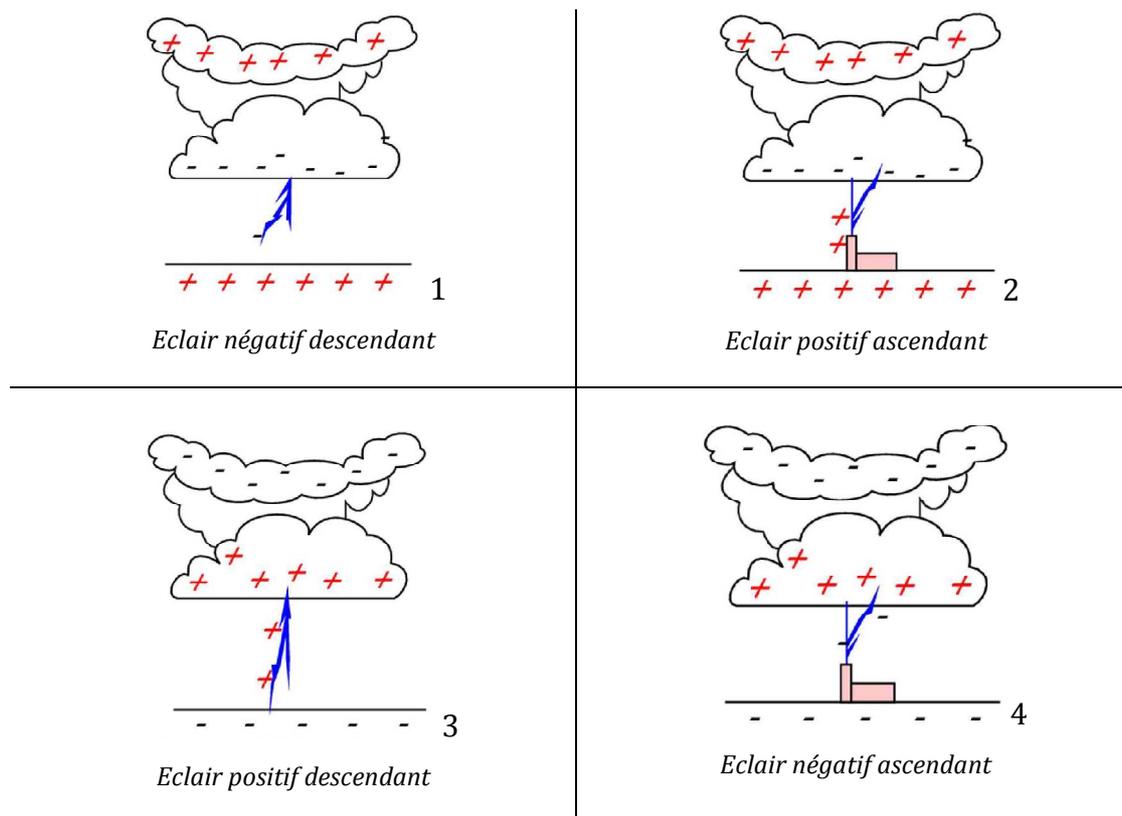


Figure I-6 : Classification des coups de foudre

Dans les pays tempérés, 90% des décharges orageuses sont de type 1. Ce type de décharge, appelée décharge négative, peut par conséquent être considérée comme la forme la plus

I.2 Phénoménologie de la foudre:

commune des décharges nuage-sol. Ce type d'éclair est déclenché par un traceur descendant chargé négativement.

Les coups de foudre appartenant à la 3^{ème} catégorie sont eux aussi déclenchés par un traceur descendant, mais chargé positivement (décharge dite positive). Cette catégorie regroupe moins de 10% des décharges nuage-sol.

Enfin, les décharges des catégories 2 et 4 sont déclenchées par des traceurs ascendants et sont relativement rares car elles se produisent généralement aux sommets de montagnes ou de hautes structures.

I.2.4.2 Exemple : L'éclair descendant négatif

Une décharge négative (nuage-sol) apporte une quantité de charges négatives de quelques dizaines de Coulomb à la terre. L'éclair représentant le phénomène le plus lumineux a une durée de l'ordre de 0.5 secondes et peut être constitué de plusieurs décharges appelées arcs en retour. Un arc en retour dure environ quelques millisecondes, et la séparation entre deux arcs en retour successifs est de l'ordre de plusieurs dizaines de millisecondes. La Figure I-7 illustre le processus de déclenchement d'un éclair négatif.

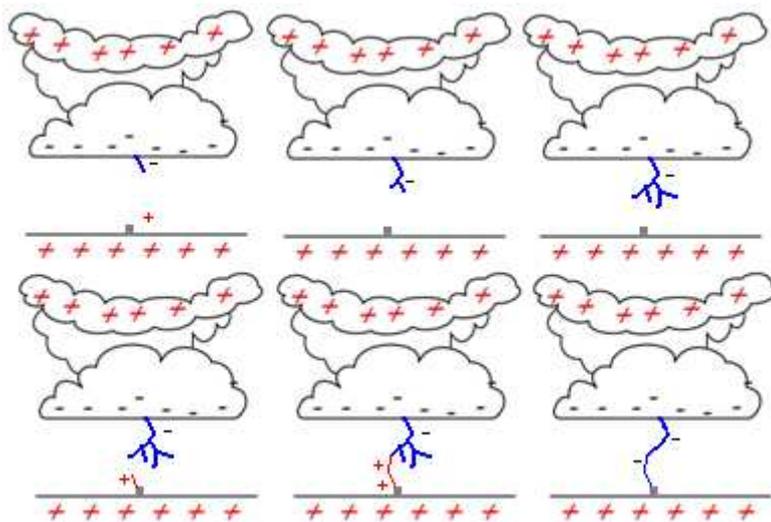


Figure I-7 : Processus de déclenchement d'un éclair descendant négatif

De manière générale, ce processus peut être décomposé en 4 étapes :

- Une première décharge (*preliminary breakdown*) se produisant à l'intérieur du nuage, entraîne la création d'un canal chargé négativement vers le bas (étape 1) appelé traceur par bon. Le canal ionisé ainsi créé permet l'écoulement des charges contenues dans le nuage. Sa progression s'arrête au bout d'une dizaine de mètres parcourus. Le canal contient de l'air fortement ionisé, et favorise l'écoulement de nouvelles charges négatives issues du nuage vers le sol. De nouveaux canaux ionisés sont alors créés (étapes 2 et 3).
- Ce processus se répète jusqu'à créer un champ suffisamment intense pour faire apparaître, par l'effet de pouvoir des pointes, une ou plusieurs décharges partant du sol, on parle alors d'effluve. (étape 4)
- Dans l'étape 5, relative au processus d'attachement, la « connexion » entre le traceur par bon et l'effluve se crée à une dizaine de mètres au dessus du sol et permet la création d'un canal ionisé permettant l'échange de charges entre le sol et le nuage. On observe alors un éclair de forte luminosité et l'extinction des autres traceurs par bons (étape 6).
- Durant la phase d'éclair, de nombreux échanges de charges ont lieu. Dans un premiers temps, le canal du traceur est déchargé par une onde de potentiel de sol constituant le premier arc en retour (*first return stroke*) qui se propage vers le nuage à une vitesse de l'ordre de du tiers de la vitesse de la lumière en neutralisant le canal chargé par le traceur. Après la phase de l'arc en retour, l'éclair peut disparaître, mais une quantité résiduelle de charges encore présente au sommet du canal permet le développement d'un traceur obscur (*dart leader*) à une vitesse de l'ordre de $3 \cdot 10^6$ m/s. Le traceur obscur déclenche un arc en retour subséquent (*subsequent return stroke*). Ce mécanisme se reproduit tant que les charges sont encore présentes au sommet du canal et peut donc donner naissance à plusieurs arcs en retour subséquents. Le dernier arc en retour généré est souvent l'arc présentant la plus forte amplitude, car il draine les charges résiduelles de la cellule orageuse. De plus, il est intéressant de noter que les arcs

1.3 Description d'un réseau de télécommunications

en retour subséquents présentent un temps de montée plus rapide que celui de du premier arc en retour.

Durant ce travail de thèse nous ne traiterons que l'étude de l'arc en retour. La phase de traceur par bond a quant à elle été étudiée, en particulier, par Hutzler [4] et Fofana [5]

I.2.5 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.

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.3 Description d'un réseau de télécommunications

La fourniture de services de plus en plus complexes, et l'avènement de différentes technologies ont abouti aujourd'hui à une architecture de réseau de plus en plus dense. En effet, l'avènement des communications à haut débit et de la téléphonie mobile a engendré

1.3 Description d'un réseau de télécommunications

l'intégration dans le réseau d'équipements de plus en plus complexes et, de ce fait, plus sensibles aux perturbations électromagnétiques.

Dans ce paragraphe, nous présentons un exemple d'architecture à la fois pour un réseau fixe mais également pour un réseau mobile. On aborde également les différents mécanismes d'agression de ces réseaux par la foudre et on décrit pour finir les méthodes et dispositifs de protection utilisés par France Télécom pour assurer la fiabilité des équipements et une qualité suffisante des services offerts.

De manière simplifiée, le réseau de télécommunications peut-être divisé en 4 parties comme indiqué sur la Figure I-8:

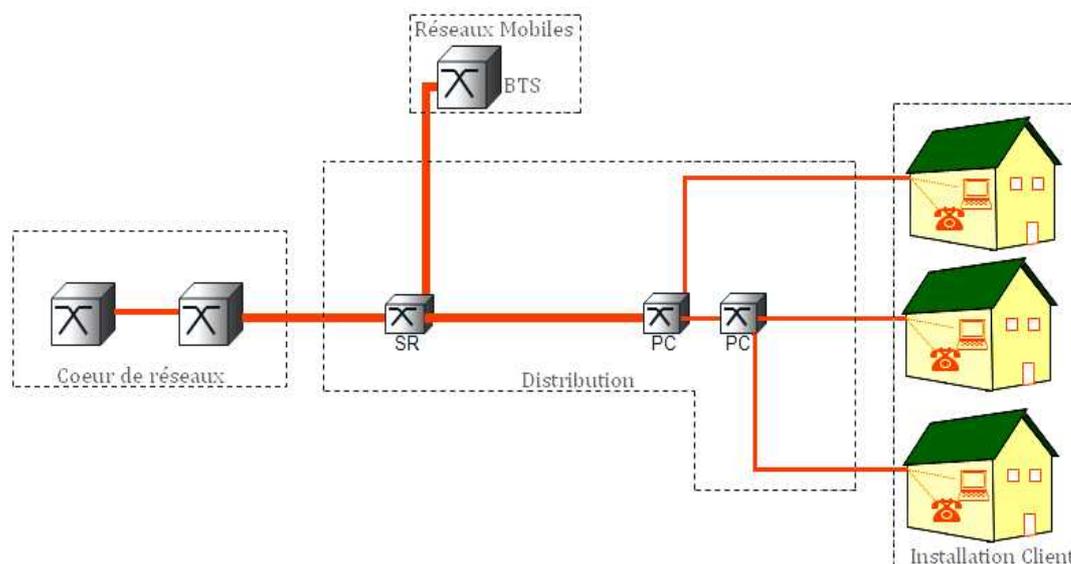


Figure I-8 : Réseau de télécommunications

Le cœur de réseau : effectue la collecte et le multiplexage des services de téléphonie fixe et mobile, ainsi que des services hauts débits. Le transport entre les différents éléments du cœur est assuré par fibre optique, ce qui lui procure une certaine immunité face aux agressions de type foudre et de ce fait ne sera donc pas abordé dans le cadre de notre travail de thèse.

Un réseau de distribution : il est constitué en majorité de câbles multi-paires en cuivre, permettant la création d'un lien physique et unique entre le réseau cœur et le client. Le réseau de distribution peut contenir ou non des équipements actifs "outdoor" sensibles aux perturbations électromagnétique, mais il est surtout constitué d'un réseau filaire

I.4 Mécanismes d'agression de la foudre sur les réseaux de télécommunications

véhiculant les perturbations électromagnétiques vers les équipements d'extrémités localisés dans les centres de télécommunications ou chez les clients.

L'installation client : elle représente l'ensemble des câbles de télécommunications installés à l'intérieur d'une maison ou d'un immeuble.

Le réseau mobile : Les stations de base du réseau mobile (BTS) utilisent le réseau filaire pour communiquer avec le cœur de réseau qui est composé des BSC (*Base Station Control*) permettant le contrôle des flux et des MSC (*Mobile-services Switching Center*) qui assurent, entre autre, la connexion entre le réseau mobile et le réseau fixe. Les stations de base peuvent être considérées comme des clients du réseau, mais elles présentent des caractéristiques particulières face aux agressions de type foudre. En effet, les stations de base sont souvent situées en hauteur, et surplombent généralement les infrastructures environnantes, ce qui en fait des cibles privilégiées durant un épisode orageux. De plus, la connexion avec le réseau de distribution peut être effectuée à l'aide d'un lien haut débit cuivré, ce qui provoque la propagation des perturbations électromagnétiques vers le réseau de distribution général.

Afin de minimiser les dégâts pouvant être occasionnés par la foudre, France Télécom met en place différents systèmes de protection dans son réseau.

I.4 Mécanismes d'agression de la foudre sur les réseaux de télécommunications

Les agressions subies par les réseaux de télécommunications lors d'un impact foudre peuvent être liées aux effets directs et indirects de la foudre.

I.4.1 Impact direct sur le réseau

Les effets directs sont liés à un foudroiement en un point particulier du réseau de télécommunications pouvant être sur une partie du réseau filaire ou sur une structure (pylône ou bâtiment).

I.4 Mécanismes d'agression de la foudre sur les réseaux de télécommunications

Dans le cas d'un impact direct sur un câble du réseau, la totalité du courant de foudre se répartit de chaque côté du point d'impact et la perturbation se propage ainsi vers les deux extrémités du réseau où elle peut provoquer la destruction ou le dysfonctionnement des équipements connectés au câble foudroyé (Figure I-9).

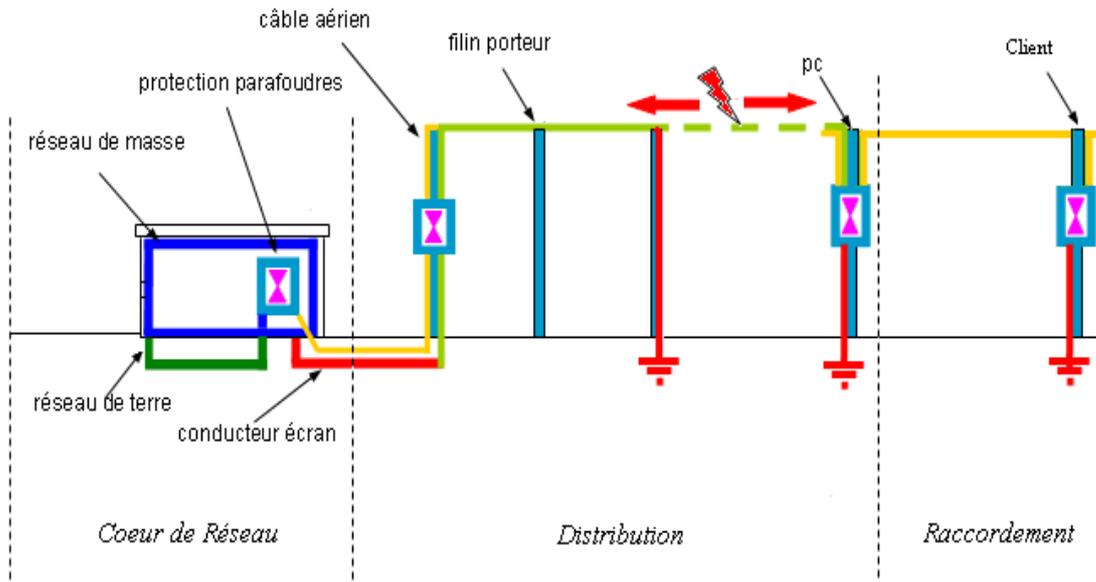


Figure I-9 : Exemple d'impact direct sur un réseau de distribution.

Ce type d'agression se produit essentiellement sur les parties aériennes du réseau de distribution, mais il peut également survenir sur les parties souterraines du réseau. Afin de limiter les effets dus à un impact direct sur la partie souterraine du réseau, la mise en place d'un conducteur de protection au dessus du câble de télécommunications est préconisée. Dans ce cas, l'utilisation du conducteur de protection a pour but de diminuer les surtensions et surintensités induites sur les extrémités du réseau, notamment du côté cœur de réseau. Des mesures de protection complémentaires sont prescrites et consistent généralement à effectuer une mise à la terre, à intervalle régulier des écrans de câbles et des conducteurs de protection (filins porteurs ou câbles de protection), ainsi que l'installation sur les conducteurs internes de parafoudres à gaz placés le long du réseau et à l'entrée des structures.

L'efficacité de la protection de ce type de site sera étudiée dans le chapitre 3.

I.4.2 Impact direct sur un bâtiment

Lorsque l'impact de foudre se produit sur une structure, par exemple un site de téléphonie mobile, le courant de foudre se propage le long des armatures métalliques du bâtiment et/ou du pylône. La circulation de ce courant engendre un champ électromagnétique à l'intérieur de la structure, pouvant entraîner des dysfonctionnements, voire des destructions d'équipements. De plus, suite à l'élévation de potentiel du sol engendrée par le coup de foudre, une partie du courant de foudre se retrouve réinjectée sur les adductions et ainsi véhiculée dans les réseaux connectés à la structure.

Afin de diminuer les risques de défaillances et de destructions d'équipements, les sites de téléphonie mobile de France Télécom sont protégés selon le schéma de la Figure I-10.

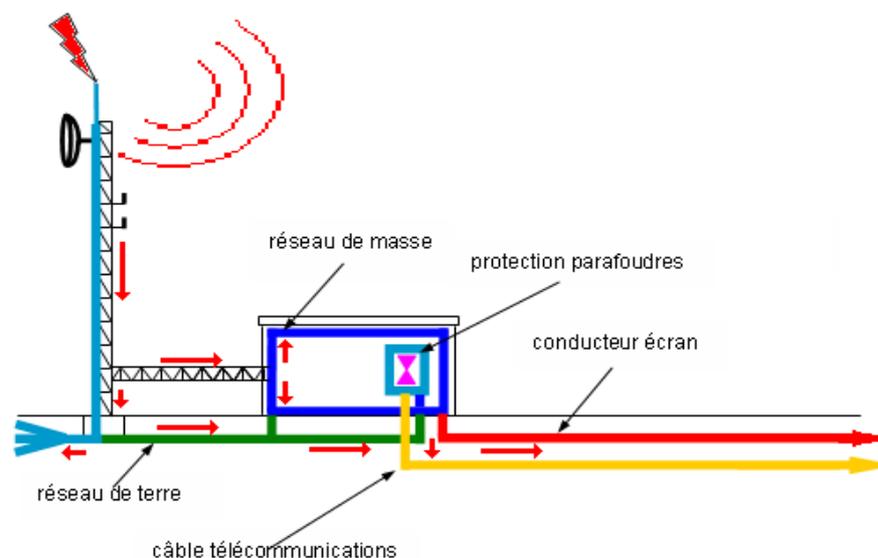


Figure I-10 : Exemple d'impact direct sur un site de téléphonie mobile

Le système de protection d'un site radiofréquence se compose :

- d'un réseau de terre, constitué d'une ceinture de terre et d'une patte d'oie pour le pylône et d'une grille pour le bâtiment;
- de la mise en place de parafoudres à gaz sur les conducteurs internes des câbles de télécommunications, permettant de supprimer les surtensions;
- un ou plusieurs conducteurs de protection ayant pour rôle de diminuer l'intensité du courant induit sur le câble de télécommunication.

I.4 Mécanismes d'agression de la foudre sur les réseaux de télécommunications

L'étude de ce type de site sera abordée dans le chapitre 4 afin d'optimiser le dimensionnement des différents dispositifs de protection.

I.4.3 Les effets indirects :

Contrairement au cas de l'impact direct, le coup de foudre indirect ne touche pas directement le réseau. Dans ces conditions, le couplage du champ électromagnétique rayonné par l'arc en retour avec le réseau génère des courants et tensions induits sur les différents conducteurs filaires. Les signaux induits sont fonction de la position du point d'impact, des paramètres du courant de foudre ainsi que de caractéristiques du sol et du réseau. Les perturbations électromagnétiques ainsi générées peuvent atteindre plusieurs kA et kV et se propagent le long des conducteurs en direction des équipements d'extrémités. Les effets de ce type d'impact peuvent se traduire également par des destructions ou des dysfonctionnements d'équipements.

Afin de pouvoir estimer, la valeur des surtensions et surintensités induites par un impact indirect sur les réseaux de télécommunications, L'Union Internationale des Télécommunications (UIT-T) a publié en 2006, la recommandation K67 [6] qui évalue les perturbations électromagnétiques induites par la foudre en différents points d'un réseau de télécommunications.

Cette recommandation propose, notamment, un mode de calcul simplifié permettant une estimation des tensions induites pouvant se produire aux extrémités d'une ligne de longueur L lors d'un impact situé au centre de la ligne, et à une distance d de celle-ci (Figure I-11).

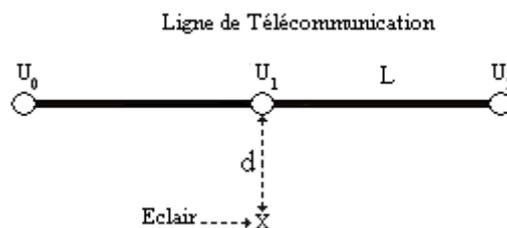


Figure I-11 : Configuration de référence de la recommandation K67 [6]

La tension crête au centre de la ligne peut être estimée par la formule I-5:

I.4 Mécanismes d'agression de la foudre sur les réseaux de télécommunications

$$U_1 = \frac{30.I_p.h}{d} \left(1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}}\right) \quad \text{I-5}$$

Et les tensions aux extrémités par la formule I-6

$$U_0 = U_2 = \frac{30.I_p.h}{d} \quad \text{I-6}$$

Avec :

- I_p : la valeur crête de l'intensité de la décharge (en kA)
- v : le rapport de la vitesse de la décharge en retour tel que définie dans la recommandation par :

$$1 + \frac{v}{\sqrt{2-v^2}} = \frac{v_{onde}}{10e^8} \quad \text{I-7}$$

v_{onde} : représentant la vitesse de l'arc en retour

La recommandation K67 fournit également une méthode d'estimation des courants induits, par un impact indirect, sur les câbles de télécommunications situés à l'intérieur d'un bâtiment.

Le Tableau I-1 indique la valeur des surtensions et surintensités pouvant se produire aux différents points du réseau. On note, U_e la tension à vide au niveau du commutateur entre un fil et le blindage du câble de télécommunications (I_{sce} l'intensité associée), et U_s la tension à vide coté client entre un conducteur et la terre client (I_{scs} l'intensité associée).

Probabilité	Extrémité commutateur		Extrémité client	
	U_e (V)	I_{sce} (A)	U_s (V)	I_{scs} (A)
0.01	860	17	2300	23
0.02	680	13	1640	16
0.05	480	5	1020	10

Tableau I-1 : Surtensions à vide et intensités de court-circuit mesurées aux extrémités commutateur et client

Dans le chapitre 3, nous aborderons le calcul du couplage d'un réseau de télécommunications avec une onde foudre à l'aide d'un code reposant sur la théorie des lignes de transmission.

I.5 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 écouler le courant de foudre vers la terre en évitant des amorçages avec les différentes parties de l'installation. Ce type de protection est assuré par des paratonnerres constitués par des tiges simples, des fils tendus ou encore une cage maillée.
- Limiter ou supprimer les contraintes des surtensions dans les installations. Cette protection est généralement assurée par des dispositifs composés de parafoudres à gaz, et/ou varistances.

I.5.1 Les 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.

I.5.1.1 Les 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'écouler le courant de foudre vers la terre par l'intermédiaire de conducteurs de descente. La zone de protection assurée par un paratonnerre est directement liée à sa hauteur et peut être déterminée à l'aide du modèle de la sphère fictive proposée dans la norme française NF EN 62305. Ce type de protection est plus particulièrement réservé aux petites structures de type, pylône, cheminée industrielle, mat ou cuve.

Comme indiqué sur la Figure I-12, l'installation d'une tige simple comporte :

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

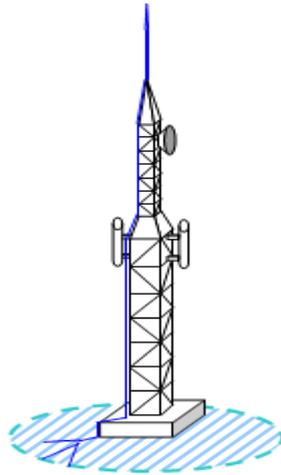


Figure I-12 : Exemple de protection par tige simple [paratonnerre-pda.com]

1.5.1.2 Les cages maillées

Le principe d'une protection par cage maillée, présenté sur la Figure I-13, 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.

Une installation de cage maillée doit inclure :

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

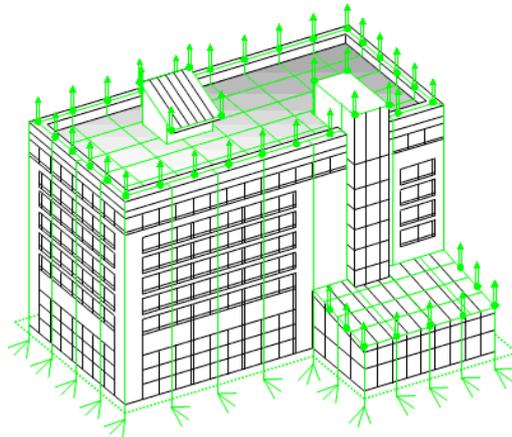


Figure I-13 : Exemple de protection par cage maillée [paratonnerre-pda.com]

1.5.1.3 Le 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 la terre comme le montre la Figure I-14.

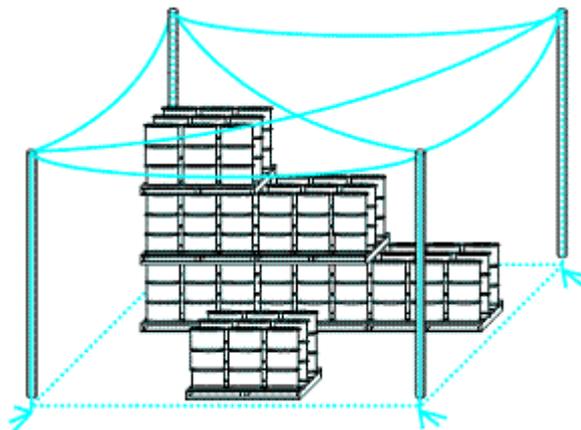


Figure I-14 : Exemple de protection par fil tendu [paratonnerre-pda.com]

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-15. 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.

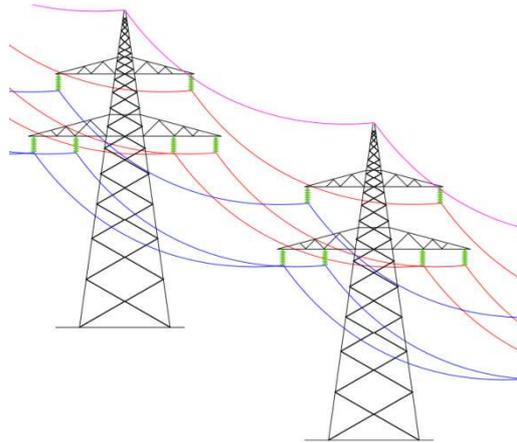


Figure I-15 : Exemple de protection par fil de garde sur un réseau électrique HT [wikipédia.fr]

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.

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.

1.5.2 Les 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-16) : 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-16 : Exemple de parafoudre à gaz [Epcos.com]

- Les réseaux de varistances : un exemple de réseau de varistances est représenté sur la Figure I-17, 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.

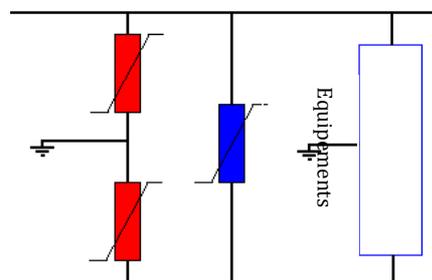


Figure I-17 : Exemple de réseau de varistances

I.5.3 Normes relatives à la protection foudre

Cette partie présente, de manière succincte, les principales normes en vigueur et relatives à la protection contre la foudre des biens et des personnes. [7]

L'intérêt des normes est de fournir un cadre commun aux concepteurs d'installations dans les besoins de protection par :

1.5 Systèmes de protection contre la foudre

- une évaluation du risque foudre;
- le choix des dispositifs de protection;
- le calcul du bénéfice résultant de la mise en place de protection.

Une norme peut être définie comme [8]: "Un document établi par consensus, qui fournit, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné"

Le comité 81 de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) est considéré comme le comité leader dans l'établissement des normes relatives à la protection foudre des installations au sol. Les normes issues de la CEI sont ensuite reprises par le Cenelec au niveau européen et par l'UTE (Union Technique de l'Electricité) au niveau français.

La parution récente des normes européennes de la série NF EN 62305 et l'annulation début 2009 de la norme NF C17-100 vont avoir pour conséquence une profonde évolution dans la manière d'aborder le problème de l'installation de protections foudre tant pour ce qui est de la conception que de la mise en œuvre.

De plus l'arrêté du 15 janvier 2008 relatif à la protection contre la foudre de certaines installations classées paru au JORF du 24 avril 2008 impose une analyse du risque selon la norme NF EN 62305-2 [9] et des vérifications périodiques selon la norme NF EN 62305-3 [10].

En 2006, La CEI a restructuré l'ensemble de ses publications, et mis à jour certaines parties de normes, au travers de la série CEI-62305-x.

Cette série comporte 4 normes relatives à la « Protection contre la foudre » selon la décomposition suivante :

- CEI-62305-1 [11] : Cette norme regroupe les principes généraux de la protection contre la foudre des bâtiments, en tenant compte d'une part, des équipements et des personnes à l'intérieur, et d'autre part des adductions de la structure. La méthode de protection à adopter est établie en fonction de divers paramètres prédéfinis du courant de foudre pour lequel la protection est recherchée;

- CEI-62305-2 [9] : Cette norme traite de l'évaluation des risques. La méthode proposée permet de choisir les mesures de protection appropriées afin d'obtenir un niveau de risque acceptable d'un point de vue économique et technique. Elle donne une procédure de détermination du niveau de risque, basé, entre autres, sur la probabilité des dommages dus à la foudre et l'estimation du coût annuel moyen des pertes consécutives à une agression de type foudre;
- CEI-62305-3 [10] : Cette partie traite de la protection, à l'intérieur d'une structure, contre les dommages physiques dus à la foudre, et contre les lésions d'êtres vivants. (tension de contact/ tension de pas). Cette norme traite essentiellement des systèmes de capture de la foudre, du dimensionnement du réseau de terre, et de l'équipotentialité à l'intérieur du bâtiment. La norme CEI-62305-3 traite des mesures de protection pour la diminution du risque de dommage physique dans la structure mais elle ne traite pas la protection des réseaux d'énergie ou de télécommunications.
- CEI-62305-4 [12]: La partie 4 de la série de norme NF EN 62305 fournit les informations relatives à une installation de protection contre l'impulsion électromagnétique de foudre (IEMF), au niveau :
 - de la conception,
 - de l'installation,
 - de l'inspection,
 - de la maintenance
 - des essais

Le but est de réduire le risque de défaillances, dû aux effets secondaires de la foudre, des équipements internes d'une installation, reliés aux réseaux de puissance et de communication.

Au niveau national, en 2005, L'UTE a publié le guide UTE C 17-100-2, qui est l'application française de la norme internationale CEI62305-2 [9]. Ce guide est applicable dans

1.5 Systèmes de protection contre la foudre

l'évaluation du risque pour une structure ou un service impacté de manière directe ou indirecte par la foudre.

Le tableau I-2 dresse une liste des normes, nationales et internationales, applicables à la protection contre la foudre des infrastructures.

Référence Internationale	Référence Nationale	Domaine d'application « protection contre la foudre »
CEI-62305-1	NF C 17-100-1	Principes Généraux
CEI-62305-2	Guide UTE C 17-100-2	Evaluation des risques
CEI-62305-3	NF C 17-100-3	Dommages physiques sur les structures et risques humains
CEI-62305-4	NF C 17-100-4	Réseaux de puissance et de communication dans les structures

Tableau I-2 : Normes relatives à la protection contre la foudre des installations au sol

De plus, la Commission d'Etudes 5 de L'UIT-T (Union Internationale des Télécommunications) produit un grand nombre de recommandations sur la protection des infrastructures contre la foudre (série K) dont les principales sont reportées dans le tableau I-3.

Référence UIT-T	Domaine d'application
	Evaluation du risque et protection des infrastructures de télécommunications (bâtiments et réseaux)
K.39	Evaluation des risques pour les installations de télécommunications
K.20, K21, K44, K45	Robustesse des équipements de télécommunications localisés dans les centres, dans les locaux clients et dans le réseau d'accès vis-à-vis des surtensions et surintensités
K.27	Configurations des réseaux de terre et de masse dans les bâtiments de télécommunications
K.46	Protection contre les effets indirects de la foudre des réseaux de télécommunications
K.47	Protection contre les effets directs de la foudre des réseaux de télécommunications
K.56	Protection des stations de base radioélectriques
K.57	Protection des stations de base radioélectrique installés sur pylône
K.67	Evaluation des surtensions induites par la foudre sur le réseau de télécommunications lors d'un impact direct ou indirect.
K.66	Protection des locaux clients

Tableau I-3 : Recommandations relative à l'évaluation du risque, et à la protection des infrastructures

I.6 Conclusion

Après un bref rappel de la phénoménologie de la foudre, les mécanismes d'agression de la foudre sur un réseau de télécommunications ont été présentés en distinguant les effets directs et indirects. Les méthodes et dispositifs de protection mis en place pour réduire les risques de destruction des infrastructures ou des équipements qui y sont connectés ont également été décrits à la lumière des normes en vigueur.

Nous avons notamment décrit la méthode de protection contre les effets directs basée sur l'utilisation de conducteurs écrans placés au dessus des câbles enterrés pénétrant dans une structure exposée à la foudre.

Afin de pouvoir optimiser la mise en place de ces protections, d'en améliorer le fonctionnement ou d'en réduire les coûts d'implantation, il est nécessaire de disposer de codes de calcul permettant de modéliser de manière globale le couplage entre la foudre et un réseau de télécommunications complexe. C'est ce type d'étude que nous allons aborder dans les autres parties de la thèse en décrivant en tout premier lieu dans le prochain chapitre les formalismes et les méthodes de calcul permettant d'évaluer les tensions et courants induits par la foudre sur un réseau de télécommunications complexe.

Chapitre II : Méthodes de modélisation du couplage d'une onde électromagnétique de type foudre sur un réseau de télécommunications complexe

II.1 Introduction

Afin de pouvoir estimer de manière efficace les courants et tensions induits par une onde foudre sur un réseau de télécommunications complexe, il convient en premier lieu de recenser les différentes méthodes de modélisation disponibles dans la littérature. En second lieu, on indiquera la méthode retenue ainsi que les modifications que nous serons amenés à effectuer pour tenir compte des spécificités de notre étude.

Les méthodes de calcul existantes peuvent être classées en deux catégories :

- Les codes « filaires » qui permettent de traiter un réseau composé d'une ou plusieurs lignes situées au dessus ou en dessous d'un sol de conductivité finie ou non.
- Les codes 3D, quand à eux, permettent de traiter un réseau dans sa globalité. Ils permettent la modélisation de structures, ainsi que de structures filaires en tenant compte ou non de la conductivité du sol. De manière générale, les codes 3D sont utilisés dans le but de modéliser des structures complexes mais peu étendues telles que des voitures, des avions ou dans le cadre de cette thèse un bâtiment.

Dans ce chapitre, on présente de manière succincte les différents codes de calcul nécessaires à la modélisation du couplage d'une onde foudre avec un réseau de télécommunications complexe.

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

Dans ce cas, le couplage d'une onde électromagnétique sur un réseau filaire peut être décomposé en plusieurs étapes indépendantes représentées par la synoptique de la figure II.1.

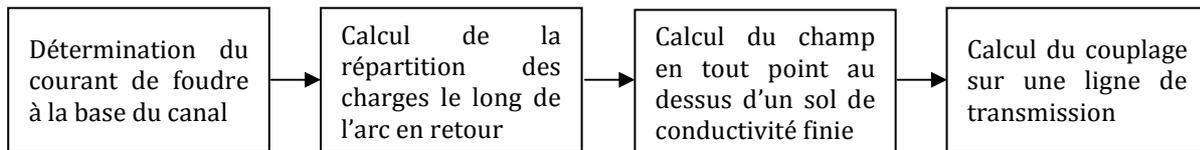


Figure II-1 : synoptique du calcul du couplage d'une onde électromagnétique sur une structure filaire

Nous allons maintenant décrire les différentes étapes de ce synoptique.

II.2.1 Détermination du courant de foudre à la base du canal

Afin de pouvoir calculer le champ rayonné par l'arc en retour d'une décharge orageuse, il importe de connaître en premier lieu le courant situé à la base du canal, ainsi que sa vitesse de propagation le long de l'arc en retour [13]. Afin de pouvoir le modéliser facilement, en négligeant la tortuosité du canal, l'arc en retour est assimilé à une antenne verticale, excitée à sa base par un générateur de courant symbolisant le rattachement de l'arc au sol.

II.2.1.1 Forme analytique du courant de foudre

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

La formule II-1 est l'expression analytique d'une bi-exponentielle, où I_0 représente la valeur crête du courant, α est l'inverse du temps de descente et β est l'inverse du temps de montée. Cette fonction est la plus utilisée dans la littérature.

$$I(0,t)=I_0*(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t))$$

II-1

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

Cette formule peut être normalisée par l'expression II-3 afin d'obtenir une amplitude maximale égale à I_0 selon la formule suivante II-2:

$$I(0, t)_{Norm} = Norm * I_0 * (\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \quad \text{II-2}$$

$$\text{Avec } Norm = \left(\left(\exp\left(\frac{-\alpha \log\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)}{\alpha - \beta}\right) - \exp\left(\frac{-\beta \log\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)}{\alpha - \beta}\right) \right) \right)^{-1} \quad \text{II-3}$$

Cependant on retrouve dans la littérature une deuxième forme d'onde proposée par Heidler [14] et composée de la somme de deux fonctions :

$$I(0, t) = i_1(t) + i_2(t) \quad \text{II-4}$$

$$i_1(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_1}} \exp\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right) \text{ et } i_2(t) = \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{\eta_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{\eta_2}} \exp\left(\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad \text{II-5}$$

- τ_{11} Temps de montée, τ_{12} Durée de l'impulsion
- η_1 : Paramètre défini de telle sorte que le maximum d' $i_1(t)$ soit I_{01} :

$$\eta_1 = \exp\left[\frac{-\tau_{11}}{\tau_{12}} \times \left(\frac{\eta_1 \tau_{12}}{\tau_{11}} \right)^{1/\eta_1} \right] \quad \text{II-6}$$

Cette fonction présente l'intérêt d'obtenir une allure plus proche de la réalité, contrairement à la forme bi-exponentielle, et permet également l'ajustement de l'amplitude et de la dérivée maximale du courant de foudre par l'intermédiaire des paramètres I_{0x} et τ_{11} .

II.2.1.2 Exemple de modélisation du courant à la base du canal

- Forme Bi-exponentielle

La Figure II-2 montre un exemple de courant de foudre de forme bi-exponentielle.

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

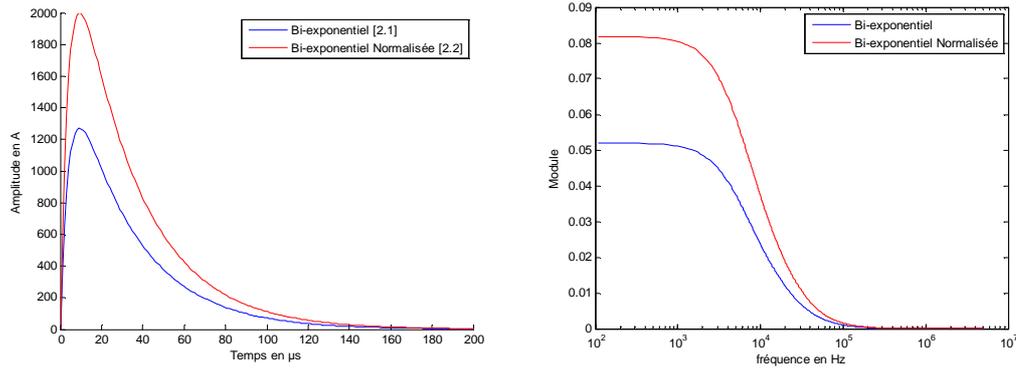


Figure II-2 : Forme d'onde d'une bi-exponentielle

– Forme d'Heidler

La Figure II-3 montre que la fonction de Heidler permet la représentation de la forme d'onde typique des arcs en retour pour les valeurs données dans le Tableau II-1. En effet, cette représentation permet d'obtenir un pic de courant suivi d'une décroissance lente. La transformée de Fourier de l'onde représentée sur la figure II-3, montre la concentration de l'énergie dans les basses fréquences dans le cas de l'onde foudre.

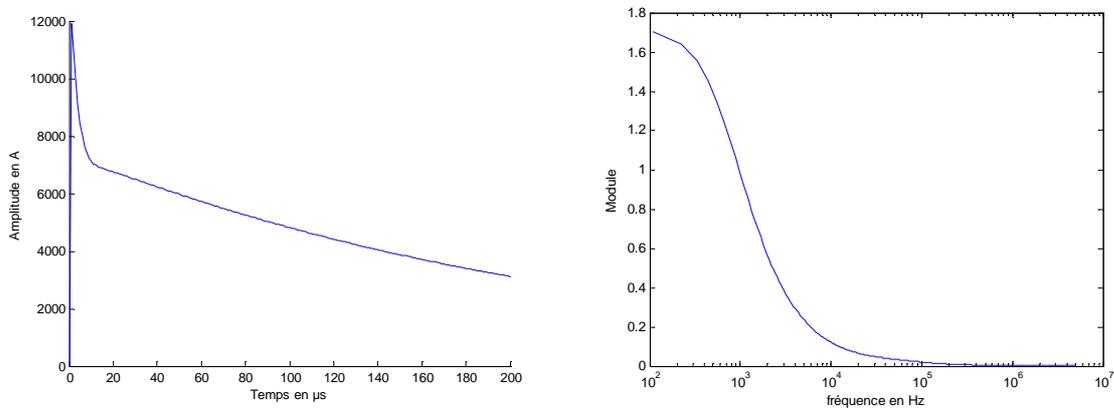


Figure II-3 : Forme d'onde type Heidler

I_1	τ_{11}	τ_{12}	n_1	I_2	τ_{21}	τ_{22}	n_2
10.7kA	0.25µs	2.5 µs	2	6.5kA	2.1 µs	230 µs	2

Tableau II-1 : Paramètre de la fonction de Heidler

La fonction de Heidler permet aussi d'obtenir deux « pics », comme le montre la Figure II-4 avec l'application des valeurs données dans le Tableau II-2, ce qui permet ainsi de pouvoir modéliser le premier arc en retour ainsi que les arcs subséquents.

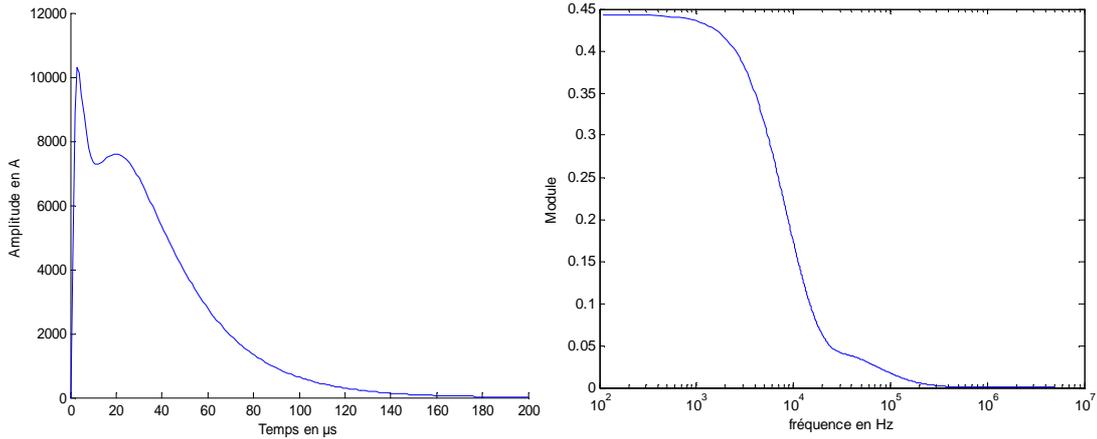


Figure II-4 : Fonction de Heidler

I_1	τ_{11}	τ_{12}	n_1	I_2	τ_{21}	τ_{22}	n_2
10.5kA	2.0µs	4.8 µs	2	9.0kA	20 µs	26 µs	2

Tableau II-2 : Paramètre de la fonction de Heidler

II.2.2 Arc en retour: les différents modèles existants.

Afin de pouvoir effectuer le calcul des champs rayonnés par l'arc en retour, il est nécessaire de diviser le canal en une somme de dipôles élémentaires alimentés par une source de courant. Le calcul de ces sources a été longuement étudié et a permis l'élaboration des différents modèles présentés dans cette partie.

II.2.2.1 Modèle de Bruce et Golde (BG)

Le modèle de Bruce et Golde [15] considère que le courant de base $I(0,t)$ circule de bas en haut dans l'arc en retour à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière. Ainsi qu'une valeur nulle du courant au dessus du front d'onde. Mathématiquement, ces hypothèses peuvent se traduire par les expressions II-7et II-8.

$$I(z',t)=I(0,t) \text{ si } z' \leq v_f \quad \text{II-7}$$

$$I(z',t)=0 \text{ si } z' > v_f \quad \text{II-8}$$

- z' : altitude le long du canal
- v_f : vitesse de propagation de l'onde dans l'arc en retour.

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

La discontinuité qui apparaît au front d'onde de l'arc en retour implique une neutralisation instantanée des charges avant l'arrivée du courant. De plus le modèle présente une autre limitation. En effet Bruce et Golde proposent que le courant en tout point du canal soit identique à celui situé à la base du canal à ce même instant (Figure II-5). Ceci exigerait une vitesse de propagation des charges infinie, résultats contraires à la recherche présentée par Nucci [16] presque 50 ans plus tard, en 1988.

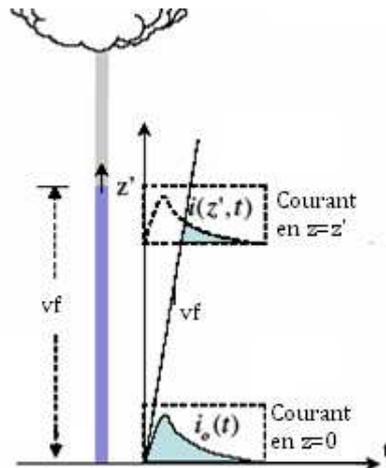


Figure II-5 : Propagation dans l'arc en retour par le modèle de BG [17]

II.2.2.2 Modèle : Ligne de transmission (TL)

Ce modèle proposé par Uman et McLain [18], assimile le canal foudre à une ligne de transmission verticale sans pertes. Le courant de foudre se propage donc vers le haut du canal avec une vitesse constante v sans subir de déformation (Figure II-6).

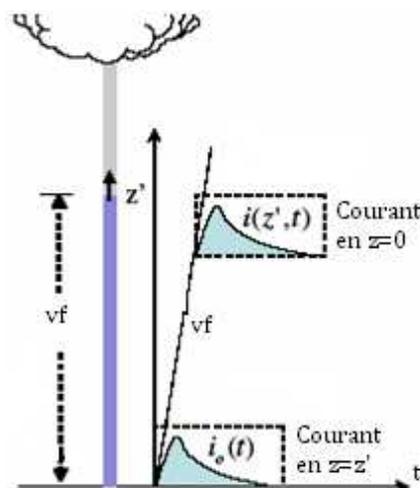


Figure II-6 : Modèle de propagation selon la méthode TL [17]

Mathématiquement, le courant à une altitude z' est décrit par les relations II-9 et II-10.

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

$$\begin{aligned} I(z',t) &= I(0,t-z'/v) \text{ si } z' \leq vt && \text{II-9} \\ I(z',t) &= 0 \text{ si } z' > vt && \text{II-10} \end{aligned}$$

Le modèle TL n'est pas en accord avec les observations expérimentales. En effet, il ne prend pas en compte les distorsions et affaiblissements du courant de foudre le long du canal. De plus, ce modèle ne permet pas l'intégration des variations de la vitesse de propagation le long du canal [19].

II.2.2.3 Modèle : Ligne de Transmission Modifiée (MTL)

Différents auteurs ont proposé deux modèles complémentaires basés sur le modèle TL, permettant de prendre en compte les pertes le long du canal.

– Décroissance exponentiel (MTL E)

Proposé d'abord par Nucci et Mazzetti en 1988 [16], puis repris par Rachidi et Nucci en 1990 [20], ce modèle rajoute au modèle TL existant, une décroissance du courant de foudre de forme exponentielle inverse en fonction de la hauteur du canal. D'où les expressions mathématiques du courant de foudre dans l'arc en retour en fonction de l'altitude donnée par les expressions II-11 et II-12.

$$\begin{aligned} I(z',t) &= I(0,t-z'/v) * \exp(-z'/\lambda) \text{ si } z' \leq vt && \text{II-11} \\ I(z',t) &= 0 \text{ si } z' > vt && \text{II-12} \end{aligned}$$

λ est la constante d'affaiblissement du courant et a été estimée par Nucci et Rachidi à 2km [20], d'après les publications et mesures expérimentales de Lin et Uman [21] en 1979 et 1980.

– Décroissance linéaire (MTL L)

De même que la méthode MTLE, le MTL L, proposée par Rakov and Dulzon [22], suggère une décroissance du courant le long de l'arc en retour. Dans le cadre de la méthode MTL L, la décroissance est de forme linéaire et peut être traduite par la relation mathématique II-13 et II-14:

$$I(z',t) = I(0,t-z'/v) * (1-z'/H) \text{ si } z' \leq vt \quad \text{II-13}$$

$$I(z',t) = 0 \text{ si } z' > vt \quad \text{II-14}$$

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

Avec H la hauteur total du canal

II.2.2.4 Généralisation : Les modèles ingénieurs.

Plusieurs études de Rakov [23] [24] montrent que ces modèles peuvent être mis sous la forme mathématique généraliste II-15

$$i(z'; t) = i(0; t - z'/vf) * P(z') * U(t - z'/vf) \quad \text{II-15}$$

Ou U est la fonction de Heaviside ($U=0$ tant que $t \leq z/v$), $P(z)$ est une fonction d'atténuation dont les paramètres sont rappelés dans le Tableau II-3, et vf est la vitesse de propagation de l'onde le long du canal.

Modèle	$P(z')$	vf
BG	1	∞
TL	1	v
MTLL	$1+z'/H$	v
MTLE	$\exp(-\lambda/z')$	v

Tableau II-3 : Bilan sur les modèles ingénieurs

II.2.2.5 Les autres modèles existants

- The travelling current Source model (TCS)

Proposé par Heilder en 1985 [25], ce modèle considère que les charges provoquées par le *leader* sont neutralisées par l'arc en retour. Un courant de source, associé à l'arc en retour, circule à la vitesse v de la terre vers le sommet. Le courant injecté par une telle source à l'altitude z' se propage vers le bas à la vitesse de la lumière c . C'est alors après un temps égal à z'/c qu'il atteint le sol. L'expression mathématique d'un tel courant est donnée par les expressions II-16 et II-17

$$I(z', t) = I\left(0, t - \frac{z'}{c}\right) \text{ si } z' \leq vt \quad \text{II-16}$$

$$I(z', t) = 0 \quad \text{si } z' > vt \quad \text{II-17}$$

- The Diendorfer Uman model (DU)

Présenté par Diendorfer et Uman en 1990 [26], il ajoute un terme au modèle TCS permettant de prendre en compte une décroissance exponentielle inverse du courant de front ascendant grâce aux expressions II-18 et II-19;

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

$$I(z', t) = I\left(0, t + \frac{z'}{c}\right) - \exp^{-\left(t - \frac{z'}{vf}\right)\tau_d^{-1}} * I\left(0, \frac{z'}{vf}\right) \text{ si } z' \leq vf * t \quad \text{II-18}$$

$$I(z', t) = 0 \quad \text{si } z' > vf * t \quad \text{II-19}$$

Avec $v^* = vf / (1 + vf/c)$

Ce modèle permet une modélisation plus précise de la propagation du courant de foudre dans l'arc en retour. En effet, c'est le seul modèle prenant en compte une décroissance du courant de base et une prise en compte du *leader*.

II.2.2.6 Calcul des sources dipolaires lors d'un impact sur une tour.

Proposé par, J.L Bermudez, F.Rachidi et M. Rubinsten, entre autres, en 2005 [27], ce modèle permet de modéliser la propagation des courants de foudre le long de la tour et du canal. Ce modèle permet la prise en compte d'une décroissance du courant d'arc en retour ainsi que les diverses réflexions dues aux désadaptations à l'interface tour - sol et tour - canal foudre. Le calcul des sources de courant est basé sur le modèle TL. Dans ce cas la source de courant est localisée au point d'impact au sommet de la tour, à la hauteur h , selon la Figure II-7.

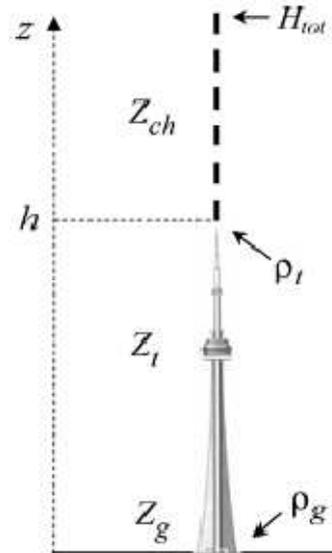


Figure II-7 : Schématisation d'un impact foudre sur une tour. [27]

La tour peut alors être décomposée en plusieurs dipôles dont la source est calculée par l'intermédiaire de la formule II-20:

$$I_{tour}(z', t) = (1 - \rho_t) * \sum_{n=0}^{\infty} \left[\begin{array}{l} \rho_t^n \rho_g^n I_0\left(h, t - \frac{2nh+h-z'}{c}\right) U\left(t - \frac{2nh+h-z'}{c}\right) \\ + \rho_t^n \rho_g^{n+1} I_0\left(h, t - \frac{2nh+h+z'}{c}\right) U\left(t - \frac{2nh+h+z'}{c}\right) \end{array} \right] \quad \text{II-20}$$

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

De même, les sources localisées permettant la représentation de l'arc peuvent être calculées par l'intermédiaire de la formule II-21

$$I_{\text{arc}}(z',t) = \left[\begin{array}{l} I_0 \left(h, t - \frac{z'-h}{v} \right) \\ -\rho_t I_0 \left(h, t - \frac{z'-h}{c} \right) \\ + (1 - \rho_t)(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_t^n \rho_g^{n+1} I_0 \left(h, t - \frac{2nh+h+z'}{c} \right) U \left(t - \frac{2nh+h+z'}{c} \right) \end{array} \right] U \left(t - \frac{z'-h}{v} \right) \quad \text{II-21}$$

Avec

$c=3e8$ vitesse de propagation dans la tour.

$v=1.1e8$ vitesse de propagation dans le canal foudre

$$\rho_g = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t + Z_g} \quad \text{II-22}$$

$$\rho_t = \frac{Z_t - Z_{ch}}{Z_t + Z_{ch}} \quad \text{II-23}$$

II.2.3 Calculs des champs électromagnétiques rayonnés par une décharge orageuse.

Le calcul du champ électromagnétique rayonné par un dipôle situé au dessus d'un sol de conductivité finie a été présenté par Sommerfeld en 1909 [28]. Ces équations sont écrites dans le domaine fréquentiel et contiennent des intégrales dites de Sommerfeld qui présentent l'inconvénient d'être gourmandes en temps de calcul. De plus, la nécessité d'effectuer une transformée de Fourier inverse afin de revenir dans le domaine temporel, n'est pas sans poser des problèmes numériques.

Ainsi, afin d'effectuer le calcul du champ électromagnétique rayonné par le canal foudre nous utiliserons comme point de départ la méthode proposée par Rachidi en 1991 [29]. Cette méthode comporte deux étapes :

- Calcul du champ rayonné par un dipôle au dessus d'un plan de conductivité infinie (cas d'un sol parfait).
- Correction du champ calculé pour un sol parfait afin de prendre en compte l'effet de la conductivité du sol.

II.2.3.1 Calcul du champ au dessus du sol

II.2.3.1.1 Cas d'un sol de conductivité infinie (sol parfait)

Les formules temporelles pour le calcul du champ au dessus d'un sol parfait peuvent être obtenues de deux manières différentes : D'une part, grâce à l'utilisation des équations de Maxwell et de la théorie des images comme démontré par Uman, et d'autre part en faisant tendre la conductivité du sol vers l'infini dans les intégrales de Sommerfeld comme présenté par Leteinturier [30]

On suppose que le courant de foudre se propage de la base vers le sommet du canal et répond au modèle de propagation présenté en I.2.2. Le champ total rayonné en un point de l'espace s'obtient donc par sommation des contributions de chaque dipôle et de son image de longueur δz , situé à la hauteur z_d , comme représenté sur la Figure II-8 :

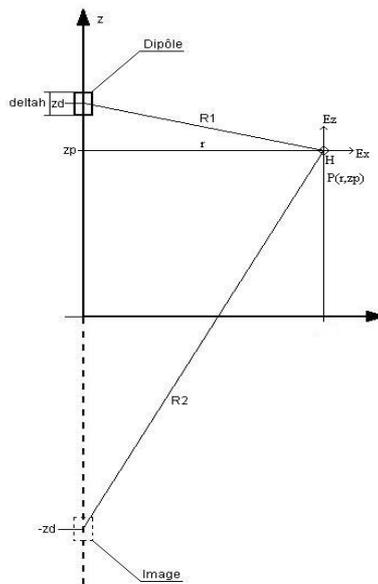


Figure II-8 : discrétisation en dipôle du canal foudre et de son image

En approximant le canal foudre à une antenne filaire rectiligne perpendiculaire à un plan infini parfaitement conducteur, on peut alors exprimer le rayonnement de chaque dipôle et de son image en un point P situé à une distance r et une altitude par les formules II-24 II-25 et II-26 issues de [29] et [31].

$$Ez_p(r, zp, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^H \left[\begin{array}{l} \frac{2*(zp-zd)^2-r^2}{R_1^5} \int_0^t i\left(\tau-\frac{R_1}{c}\right) d\tau \quad \text{Electrostatique} \\ + \frac{2*(zp-zd)^2-r^2}{cR_1^4} i\left(t-\frac{R_1}{c}\right) \quad \text{Induit} \\ + \frac{r^2}{c^2R_1^3} \frac{di(t-R_1/c)}{dt} \quad \text{Rayonné} \\ \hline \frac{2*(zp+zd)^2-r^2}{R_2^5} \int_0^t i\left(\tau-\frac{R_2}{c}\right) d\tau \quad \text{Electrostatique} \\ + \frac{2*(zp+zd)^2-r^2}{cR_2^4} i\left(t-\frac{R_2}{c}\right) \quad \text{Induit} \\ + \frac{r^2}{c^2R_2^3} \frac{di(t-R_2/c)}{dt} \quad \text{Rayonné} \end{array} \right] \quad \text{II-24}$$

$$Ex_p(r, zp, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^H \left[\begin{array}{l} \frac{3r*(zp-zd)}{R_1^5} \int_0^t i\left(\tau-\frac{R_1}{c}\right) d\tau \quad \text{Electrostatique} \\ + \frac{3r*(zp-zd)}{cR_1^4} i\left(t-\frac{R_1}{c}\right) \quad \text{Induit} \\ + \frac{r(zp-zd)}{c^2R_1^3} \frac{di(t-R_1/c)}{dt} \quad \text{Rayonné} \\ \hline \frac{3r*(zp-zd)}{R_2^5} \int_0^t i\left(\tau-\frac{R_2}{c}\right) d\tau \quad \text{Electrostatique} \\ + \frac{3r*(zp-zd)}{cR_2^4} i\left(t-\frac{R_2}{c}\right) \quad \text{Induit} \\ + \frac{r(zp-zd)}{c^2R_2^3} \frac{di(t-R_2/c)}{dt} \quad \text{Rayonné} \end{array} \right] \quad \text{II-25}$$

On peut noter que les champs électriques verticaux (Ez_p) et radiaux (Ex_p) sont la somme de trois contributions :

- Une contribution *électrostatique* ayant pour source l'intégrale du courant et représentant la charge du canal
- Une contribution *rayonnée* ayant pour source la dérivée du courant de foudre.
- Une contribution *induite* ayant pour source le courant de foudre.

Le champ magnétique azimuthal est, quand à lui, composé par une composante rayonnée (ayant pour source la dérivée du courant de foudre) et une composante induite (ayant pour source le courant de foudre).

$$H_p(r, zp, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_0^H \left[\begin{array}{l} \frac{r}{R_1^3} i\left(t-\frac{R_1}{c}\right) \quad \text{Induit} \\ + \frac{r}{cR_1^2} \frac{di(t-R_1/c)}{dt} \quad \text{Rayonné} \\ \hline \frac{r}{R_2^3} i\left(t-\frac{R_2}{c}\right) \quad \text{Induit} \\ + \frac{r}{cR_2^2} \frac{di(t-R_2/c)}{dt} \quad \text{Rayonné} \end{array} \right] \quad \text{II-26}$$

II.2.3.1.2 Prise en compte de la conductivité finie du sol

La prise en compte rigoureuse de la conductivité du sol nécessite l'utilisation des Intégrales de Sommerfeld [28] qui présentent l'inconvénient d'être lentement convergentes. Ainsi différents auteurs ont proposé des formules simplificatrices permettant de calculer le champ horizontal en tenant compte de la conductivité du sol [69]. Nous utiliserons la formule de Rubinstein qui permet d'obtenir un bon compromis en temps de calcul et en précision. La formulation proposée considère que le champ électrique vertical et le champ magnétique azimuthal sont indépendants de la conductivité du sol. L'approximation s'effectue de la manière suivante :

$$E_x(r, z_p, j\omega) = E_{x_p}(r, z_p, j\omega) - H_p(r, 0, j\omega) \cdot \frac{1+j}{\sigma_s \delta} \quad \text{II-27}$$

- $E_{x_p}(r, z_p, j\omega)$: Champ électrique horizontal calculé dans le cas d'un sol parfait à l'altitude z_p (équation :I-25)
- $H_p(r, z_p, j\omega)$: Champ azimuthal calculé avec un sol parfait à l'altitude $z=0$ (équation I-27)
- $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_s \mu_s}}$: Épaisseur de peau
- μ_s et σ_s : perméabilité magnétique et permittivité électrique du sol

Cette approximation est réalisée dans le domaine fréquentiel mais présente l'avantage de pouvoir être facilement transposée dans le domaine temporel [31]. En effet la fonction H peut être considérée comme une fonction linéaire par morceau (Figure II-9) et peut être décomposée en une somme de pôles tels que :

$$H_p(r, 0, t) = p_0 \cdot (t - t_0) \cdot U(t - t_0) + (p_1 - p_0) \cdot (t - t_1) \cdot U(t - t_1) + \dots + (p_{\text{Nbr_temps}} - p_{\text{Nbr_temps}-1}) \cdot (t - t_{\text{Nbr_temps}}) \cdot U(t - t_{\text{Nbr_temps}}) \quad \text{II-28}$$

$$\text{Avec } p_k = \frac{H_p(r, 0, t_{k-1}) - H_p(r, 0, t_k)}{t_{k-1} - t_k}$$

$$\text{Et } U(t - t_{\text{Nbr_temps}}) = 1 \text{ si } t > t_k \text{ et } U(t - t_{\text{Nbr_temps}}) = 0 \text{ si } t < t_k$$

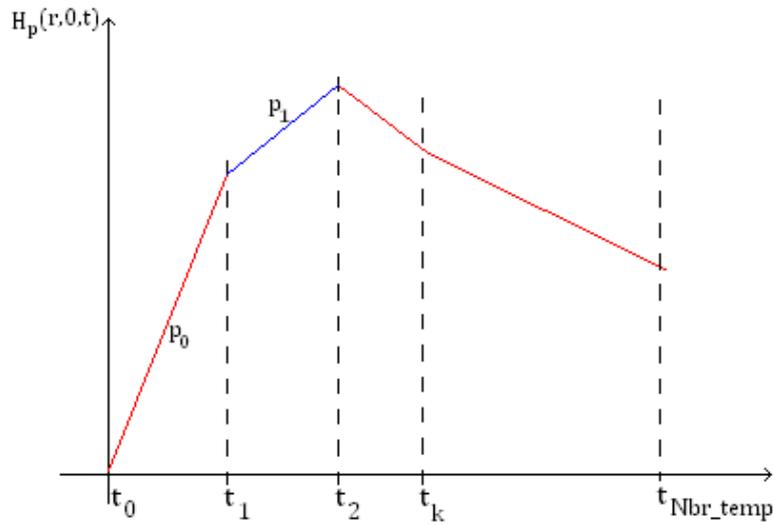


Figure II-9 : Exemple de fonction linéaire par morceau

Or si une fonction de la forme $f(t) = p_0 \cdot (t - t_0) \cdot U(t - t_0) \dots$ a une transformée de Fourier égale à $F(w)$ la transformée de Fourier inverse de $\frac{1+j}{\sigma_s \delta} F(w)$ peut s'écrire :

$$\frac{p}{\sqrt{\epsilon_{rs}}} \cdot (t - t_0) \{I_0(a \cdot (t - t_0)) + I_1(a \cdot (t - t_0))\} \cdot \exp^{-a \cdot (t - t_0)} \cdot U(t - t_0) \quad \text{II-29}$$

Avec :

- I_0 et I_1 les fonctions de Bessel modifiées de première espèce d'ordre 0 et 1
- et $a = \frac{\sigma_s}{2\epsilon_0 \epsilon_{rs}}$

Soit en posant :

$$Y(t) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{rs}}} \cdot (t) \{I_0(a \cdot t) + I_1(a \cdot t)\} \cdot \exp^{-a \cdot t} \cdot U(t) \quad \text{II-30}$$

On obtient dans le domaine temporel l'équation

$$Ex(r, zp, t) = Exp(r, zp, t) - p_0 Y(t) - \sum_{k=1}^{Nbr_temps} (p_k - p_{k-1}) \cdot Y(t - t_k) \quad \text{II-31}$$

II.2.3.2 Expression du champ rayonné dans un sol de conductivité finie.

Afin de déterminer le courant induit sur les câbles de télécommunications enterrés, il est nécessaire de pouvoir modéliser le champ rayonné dans un sol de conductivité finie [32][33]

. Pour cela, on trouve dans la littérature trois méthodes classiquement appliquées:

- La méthode FDTD [34]

Cette méthode consiste à résoudre les équations de Maxwell par l'utilisation des différences finies et sera abordée plus largement dans la suite du chapitre.

- L'Algorithme de Delfino [35]

Proposée par Delfino et al en 2006, cette solution se base sur la résolution des intégrales de Sommerfeld, en suivant une méthode d'intégration innovante.

- La formule de Cooray [36]

En 2001, Cooray propose des expressions simplifiées permettant le calcul des champs électriques pénétrant dans le sol et générés par une onde de type foudre. Ces expressions du champ se basent sur la connaissance du champ électrique dans le cas d'un sol de conductivité finie, au niveau de l'interface sol-air.

Ainsi dans le domaine fréquentiel elles sont données par :

$$E_z(r, j\omega, -z) = E_z(r, j\omega, 0) \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot e^{-(k_g z)}}{\sigma_g + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_{rg}} \quad \text{II-32}$$

$$E_r(r, j\omega, -z) = E_r(r, j\omega, 0) \cdot e^{-(k_g z)} \quad \text{II-33}$$

$$H_\varphi(r, j\omega, -z) = H_\varphi(r, j\omega, 0) \cdot e^{-(k_g z)} \quad \text{II-34}$$

$$\text{Avec } k_g = \sqrt{\omega^2 \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon_{rg} + j\omega \mu_0 \varepsilon_{rg}}$$

Dans le domaine temporel on obtient :

$$E_z(t, r, -z) = \int_0^t E_z(t - \tau, r, 0) * \Psi(\tau) d\tau \quad \text{II-35}$$

$$E_r(t, r, -z) = \int_0^t E_r(t - \tau, r, 0) * Y(\tau) d\tau \quad \text{II-36}$$

$$H_{\varphi}(t, r, -z) = \int_0^t H_{\varphi}(t - \tau, r, 0) * Y(\tau) d\tau \quad \text{II-37}$$

Avec

$$\psi(t) = \int_0^t \psi_1(t - \tau) * Y(\tau) d\tau \quad \text{II-38}$$

$$\psi_1(t) = \frac{1}{\varepsilon_{rg}} e^{-at} \quad \text{II-39}$$

$$\text{Et } Y(t) = \frac{e^{-a\frac{t}{2}} at_z}{2\sqrt{t^2 - t_z^2}} * I \left(\frac{a\sqrt{t^2 - t_z^2}}{2} \right) * \Gamma(t - t_z) + e^{-a\frac{t}{2}} * \delta(t - t_z) \quad \text{II-40}$$

$$a = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_{rg} * \varepsilon_0} \text{ et } t_z = z \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_0 \varepsilon_{rg}} \quad \text{II-41}$$

II.2.4 Calcul du couplage avec une ligne de transmission

La modélisation du couplage entre une onde électromagnétique et une structure filaire peut être effectuée par l'intermédiaire de trois modèles [37] :

- Le modèle de Taylor :

Ce modèle proposé par Taylor en 1886 [38] propose de prendre en compte le couplage du champ électromagnétique par l'intermédiaire de générateur de tensions et de courants localisés comme le montre la Figure II-10. Le générateur de tension est lié au champ magnétique transverse (II-42) alors que le générateur de courant (II-43) traduit l'effet du champ électrique vertical (E_z) dans le plan de la ligne.

$$\frac{\partial V}{\partial x} + ZI = j\omega \int_0^h B_y dz \quad \text{II-42}$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + YV = j\omega \int_0^h E_z dz \quad \text{II-43}$$

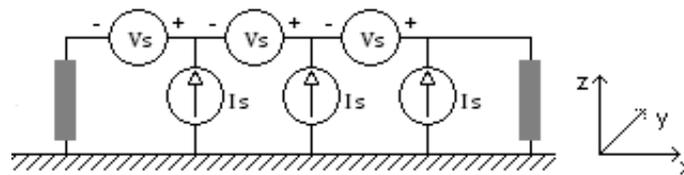


Figure II-10 : Modèle de Taylor

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

– Le modèle d'Agrawal :

Ce modèle a été proposé par Agrawal en 1980 [39] et traduit le couplage d'une onde électromagnétique par l'implantation de sources localisées le long de la ligne comme le montre la Figure II-11. Les générateurs de tension localisés traduisent l'effet du champ électrique tangentiel le long de la ligne (II-44). Et les générateurs de tension placés aux extrémités (V_s^p) représentent le couplage du champ électrique vertical sur les conducteurs de descente (II-45, II-46) tels que :

$$V_s = E_x(x, h)dx \quad \text{II-44}$$

$$V_s^{p1} = \int_0^h E_z(x_1, z) dz \approx h \cdot E_z(x_1, z) \quad \text{II-45}$$

$$V_s^{p2} = \int_0^h E_z(x_2, z) dz \approx h \cdot E_z(x_2, z) \quad \text{II-46}$$

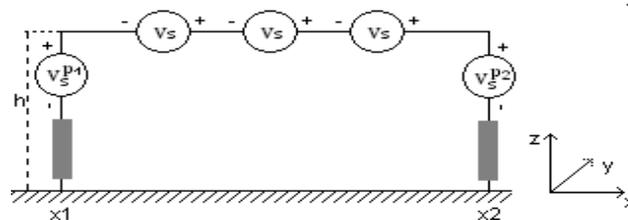


Figure II-11 : Modèle d'Agrawal

Dans la suite de ce chapitre nous utiliserons le modèle d'Agrawal qui présente l'avantage de n'utiliser que le champ électrique vertical et tangentiel à la ligne.

– Le modèle de Rachidi

Le modèle proposé par Rachidi [40] [41], est le pendant du modèle d'Agrawal. En effet il repose sur la détermination de sources de courant réparties selon la Figure II-12 et calculées à l'aide de la formule II-47, contrairement au modèle d'Agrawal utilisant des sources de tensions réparties le long de la ligne.

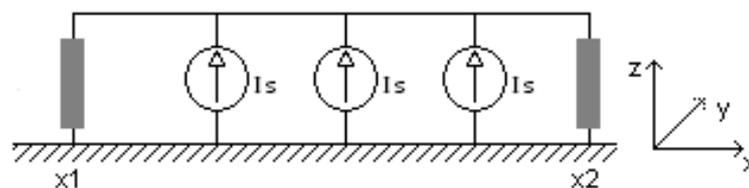


Figure II-12 : Modèle de Rachidi

$$I_s = \frac{1}{L_e} \int_0^h \frac{\partial B_z^i}{\partial y} \partial x \quad \text{II-47}$$

Où L_e représente l'inductance de ligne de transmission, on suppose que les pertes peuvent être négligées selon l'approximation haute fréquence, ou qu'elles peuvent être ramenées aux extrémités de la ligne et ajoutées aux charges terminales. Il repose également sur la connaissance de la dérivée, par rapport à la direction transverse de la ligne, de la composante tangentielle du champ magnétique incident.

II.2.4.1 Résolution des équations de couplage dans le domaine temporel

Cas d'un sol parfaitement conducteur

En prenant le schéma électrique équivalent du modèle d'Agrawal, présenté Figure II-13, on obtient :

Dans le domaine fréquentiel

$$\frac{dU(x)}{dx} + Z(w).I(x) = E_x(x) \quad \text{II-48}$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + Y(w).U(x) = 0 \quad \text{II-49}$$

Tels que :

$$Z(w) = R + jLw \quad \text{II-50}$$

$$Y(w) = G + jCw \quad \text{II-51}$$

R L C et G sont les paramètres linéiques de la ligne calculés au dessus d'un sol parfaitement conducteur et supposés indépendants de la fréquence. On obtient alors dans le domaine temporel :

$$\frac{dU(x,t)}{dx} + R I(x,t) + L \frac{dI(x,t)}{dt} = E_x(x,t) \quad \text{II-52}$$

$$\frac{dI(x,t)}{dx} + G U(x,t) + C \frac{dU(x,t)}{dt} = J(x,t) \quad \text{II-53}$$

Où

$U(x,t)$ représente la tension diffractée entre la ligne et le sol et

$$U_{réelle}(x,t) = U(x,t) - \int_0^h E_z(x,t) dz \quad \text{II-54}$$

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

$E_z(x,t)$ et $E_x(x,t)$ représentent respectivement le champ électrique normale et tangentiel en x à la hauteur z calculée en l'absence de la ligne

$I(x,t)$ représente le courant circulant sur la ligne

$J(x,t)$ représente les sources de courant réparties le long de la ligne, il sera considéré $J=0$ le long de la ligne sauf aux extrémités

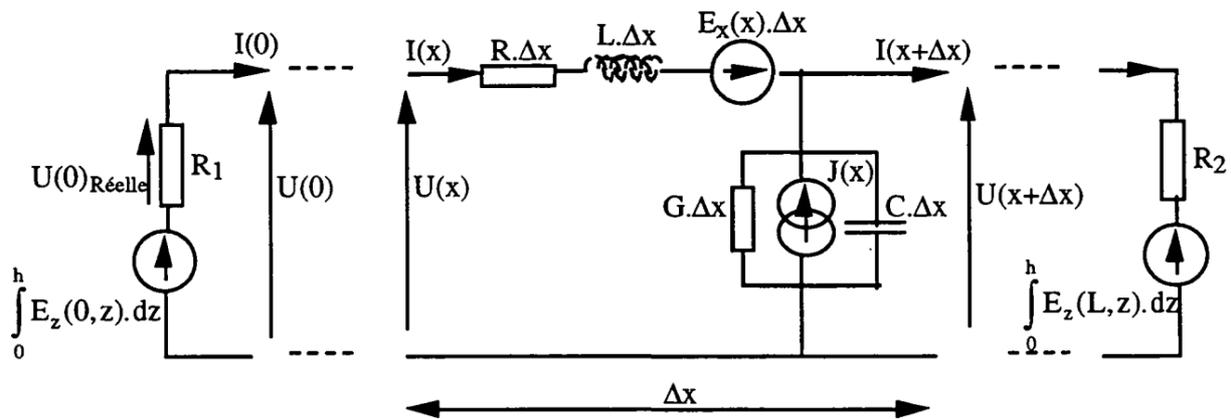


Figure II-13 : Schéma électrique du modèle d'Agrawal

En utilisant la méthode des différences finies qui est présentée plus loin, les équations II-52 et II-53 deviennent :

pour $k=1$ à $k_{\max}-1$

$$i_{k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \left[\frac{L}{\Delta t} + \frac{R}{2} \right]^{-1} * \left[E_{x_{k+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} \frac{v_{k+\frac{1}{2}}^n + v_k^n}{\Delta x} + \left[\frac{L}{\Delta t} - \frac{R}{2} \right] i_{k+\frac{1}{2}}^{n-\frac{1}{2}} \right] \quad \text{II-55}$$

Et pour $k=2$ à $k_{\max}-1$

$$v_k^{n+1} = \left[\frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} * \left[\frac{i_{k-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + i_{k+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \left[\frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right] v_k^n \right] \quad \text{II-56}$$

Où k_{\max} représente le nombre total de segments de discrétisation composant la ligne.

Le facteur $\frac{1}{2}$ ne fait que signaler que le calcul du courant est effectué un demi-pas de temps ou d'espace avant le calcul de la tension. En effet, la valeur du courant à un instant sur le

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

segment k dépend de la tension calculée au demi-pas de temps précédent ($t-1/2$) sur le segment k et le précédent (k-1). Il est alors obtenu un entrelacement entre tension et courant selon le schéma de la Figure II-14

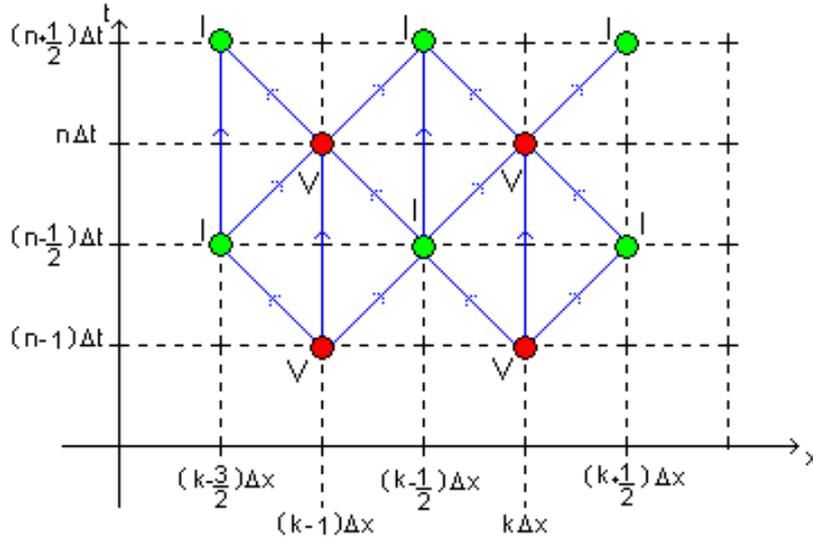


Figure II-14 : Entrelacement Spatio-temporel

D'où après réorganisation de II-55 et II-55:

pour $k=1$ à $k_{max}-1$

$$i_k^n = \left[\frac{L}{\Delta t} + \frac{R}{2} \right]^{-1} * \left[E_{xk}^n - \frac{v_k^{n-1} + v_{k-1}^{n-1}}{\Delta x} + \left[\frac{L}{\Delta t} - \frac{R}{2} \right] i_k^{n-1} \right] \quad \text{II-57}$$

pour $k=2$ à $k_{max}-1$

$$v_k^n = \left[\frac{C}{\Delta t} + \frac{G}{2} \right]^{-1} * \left[\frac{i_k^{n-1} + i_{k-1}^{n-1}}{\Delta x} + \left[\frac{C}{\Delta t} - \frac{G}{2} \right] v_k^{n-1} \right] \quad \text{II-58}$$

Pour des terminaisons résistives R_a et R_b constantes, les conditions aux limites aux deux extrémités de la ligne sont données par:

-En entrée de ligne, soit $k=1$

$$v_1^n = \left[\frac{C}{\Delta t} + \frac{2\Delta x}{R_a} \right]^{-1} * \left[\frac{-i_1^n}{\Delta x} + \left[\frac{C}{\Delta t} - \frac{2\Delta x}{R_a} \right] v_1^{n-1} \right] \quad \text{II-59}$$

-En sortie de ligne, soit pour $k=k_{max}$

$$v_{k_{max}}^n = \left[\frac{C}{\Delta t} + \frac{2\Delta x}{R_b} \right]^{-1} * \left[\frac{-i_{k_{max}-1}^n}{\Delta x} + \left[\frac{C}{\Delta t} - \frac{2\Delta x}{R_b} \right] v_{k_{max}}^{n-1} \right] \quad \text{II-60}$$

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

Les conditions de stabilité de cette méthode exigent que la condition suivante soit respectée:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{v_p} \quad \text{II-61}$$

Où v_p est la vitesse de propagation dans le milieu.

Cas d'un sol de conductivité finie

La prise en compte de l'influence de la conductivité du sol se traduit par le rajout d'un terme d'impédance dans l'équation II-52 qui devient :

$$\frac{dU(x,t)}{dx} + R I(x,t) + L \frac{dI(x,t)}{dt} + \xi_* \frac{dI(x,t)}{dt} = E_x(x,t) \quad \text{II-62}$$

$$\xi = \text{FFT}^{-1}[Z_s/j\omega]$$

$$\text{Avec } Z_s(j\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2hu}}{\sqrt{u^2 + j\omega\mu_0\sigma_s + u}} du$$

Où ξ est la transformée de Fourier inverse de Z_s qui est l'impédance du sol donnée par Carson [42] dans le domaine fréquentiel et supposant que $\omega \ll \sigma_s/\epsilon_0 \epsilon_{rs}$.

Plusieurs formules analytiques ont été mises au point afin de calculer la transformée de Fourier inverse de $Z_s/j\omega$, tout d'abord par Timotin [43] et plus récemment par Rachidi [44], qui propose une approximation numérique raisonnable de ξ .

$$\xi(t) = \min \left\{ \frac{1}{2\pi h} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_{rg}}}, \frac{\mu_0}{\pi \tau_g} \left[\frac{1}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\tau_g}{t}} + \frac{1}{4} e^{\frac{\tau_g}{t}} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tau_g}{t}} \right) - \frac{1}{4} \right] \right\} \quad \text{II-63}$$

$$\tau_g = h^2 \mu_0 \sigma_s$$

L'utilisation des différences finies points centrée à permis à Orzan [31] d'approximée $\xi_* \frac{dI(x,t)}{dt}$ et ainsi de pouvoir prendre en compte la conductivité du sol en remplaçant l'équation II-57 par :

$$i_k^n = \left[\frac{L}{\Delta t} + \frac{R}{2} \right]^{-1} * \left[E_{xk}^n - \frac{v_k^{n-1} + v_{k-1}^{n-1}}{\Delta x} + \left[\frac{L}{\Delta t} - \frac{R}{2} \right] i_k^{n-1} - v_s^n \right] \quad \text{II-64}$$

Tels que

$$v_{s_k}^n = \frac{1}{2} \xi^1 [i_k^{n-1} - i_k^{n-2}] + \sum_{m=1}^{n-2} \xi^{n-m} [i_k^m - i_k^{m-1}] \quad \text{II-65}$$

Il est à noter que les conditions aux limites restent identiques aux équations II-59 et II-60 dans le cadre de la prise en compte de la conductivité du sol.

II.2.4.2 Résolution des équations de couplage dans le domaine fréquentiel

Les équations de couplage (formulation d'Agrawal) pour le cas d'une ligne formée d'un conducteur situé à une hauteur h par rapport au sol sont données par les équations II-48 et II-49. La solution de ces équations dans le domaine fréquentiel pour les courants et tensions aux deux extrémités est donnée par :

$$\begin{bmatrix} I(0) \\ I(L) \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} 1 - \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 - \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma \xi} E_x(\xi, h) d\xi + \frac{\int_0^h E_z(0, z) dz}{2} - \frac{\int_0^h E_z(L, z) dz}{2} e^{\gamma L} \\ -\frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma(L-\xi)} E_x(\xi, h) d\xi - \frac{\int_0^h E_z(0, z) dz}{2} e^{\gamma L} + \frac{\int_0^h E_z(L, z) dz}{2} \end{bmatrix}$$

II-66

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ V(L) \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} 1 + \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 + \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 & e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} & -\rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma \xi} E_x(\xi, h) d\xi + \frac{\int_0^h E_z(0, z) dz}{2} - \frac{\int_0^h E_z(L, z) dz}{2} e^{\gamma L} \\ -\frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma(L-\xi)} E_x(\xi, h) d\xi - \frac{\int_0^h E_z(0, z) dz}{2} e^{\gamma L} + \frac{\int_0^h E_z(L, z) dz}{2} \end{bmatrix}$$

II-67

Avec $\gamma = \sqrt{ZY}$, $Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$, et $\rho_i = \frac{Z_i - Z_c}{Z_i + Z_c}$ ($i=1,2$)

Dans le cas d'une ligne multifilaire composée de deux conducteurs i et j , et d'un plan de référence constituant le conducteur de retour commun, dont une représentation est donnée par la Figure II-15 [45]

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

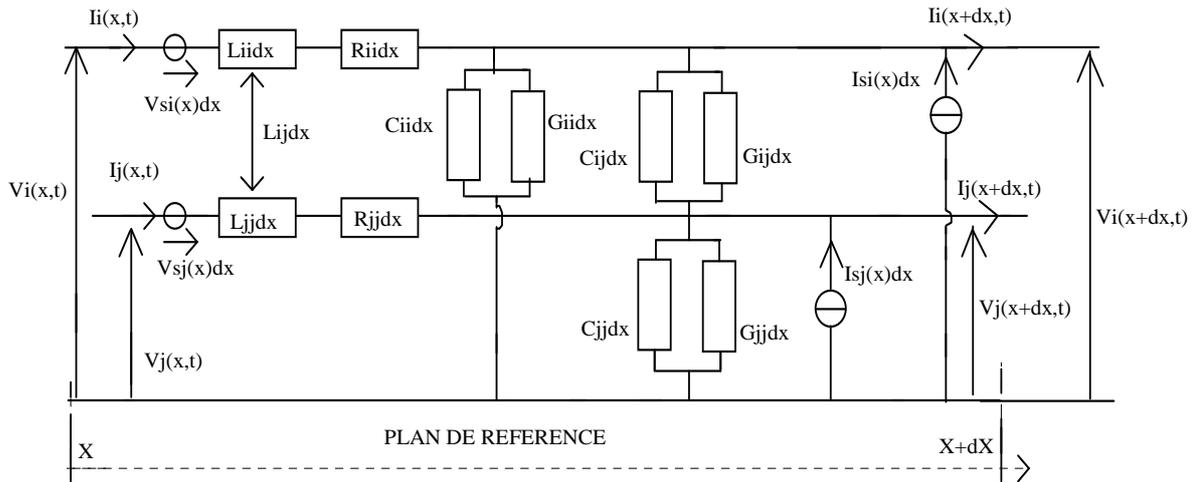


Figure II-15 : Schéma d'une cellule élémentaire (Exemple à deux conducteurs)

Les grandeurs définies sur la Figure II-15 sont telles que :

- R_{ij} , C_{ij} , L_{ij} , et G_{ij} représentent les paramètres linéiques de la ligne
- V_{si} et I_{si} représente les générateur de tension et de courant de l'ième conducteur de l'élément de ligne (termes sources).

L'application de la loi des nœuds et de la loi des mailles permet d'obtenir les équations des télégraphistes:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} V_i(x, t) = -\sum_{j=1}^N \left(R_{ij} + \frac{d}{dt} L_{ij} \right) \cdot I_j(x, t) + V_{si}(x, t) \\ \frac{d}{dx} I_i(x, t) = -\sum_{j=1}^N \left(G_{ij} + \frac{d}{dt} C_{ij} \right) \cdot V_j(x, t) + I_{si}(x, t) \end{cases} \quad \text{II-68}$$

En généralisant à une ligne de N conducteurs, le système II-66 peut s'écrire :

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} [V] = -[Z] \cdot [I] + [V_s] \\ \frac{d}{dx} [I] = -[Y] \cdot [V] + [I_s] \end{cases} \quad \text{II-69}$$

Où $[V]$ et $[I]$ représentent les vecteurs complexes d'ordre N des tensions et courants de la ligne alors que $[Z]$ et $[Y]$ représentent les matrices des impédances et des admittances complexes d'ordre $(N \cdot N)$ par unité de longueur.

Les matrices $[Z]$ et $[Y]$ peuvent être décomposés de la manière suivante [46], dans le cas général d'un câble de télécommunications blindé :

$$[Z] = [R] + j\omega[L] \text{ ou } [Z] = [Z_{interne}] + [Z_{Blindage}] + [Z_{sol}] \quad \text{II-70}$$

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

et $[Y] = [G] + jw[C]$ ou $[Y] = jw[P]^{-1}$ avec $[P] = [P_{interne}] + [P_{Blindage}] + [P_{sol}]$ II-71

Avec :

- $[P]$, la matrice potentiel
 - $[Z_{interne}]$ et $[P_{interne}]$, les matrices des paramètres propres des conducteurs internes d'un câble par rapport au blindage qui les entoure
 - $[Z_{blindage}]$ et $[P_{blindage}]$, les matrices des impédances de connexion entre les surfaces internes ou externes de chaque blindage,
 - $[Z_{sol}]$ et $[P_{sol}]$, les matrices relatives à l'influence du milieu extérieur aux câbles, dont la prise en compte est réalisée en utilisant les intégrales de Carson pour les lignes aériennes et les intégrales de Pollaczek pour les lignes souterraines.
- Ces termes sont explicités dans [46] pour une ligne multifilaire aérienne ou un
- câble multifilaire enterré.

Le système d'équations II-67 peut être résolu dans le domaine fréquentiel, à l'aide du formalisme des variables d'état qui permet d'exprimer les tensions et les courants sur la ligne en fonction de leur valeur à l'origine et d'introduire ensuite les conditions aux limites pour obtenir la solution du problème [47].

Dans le cas général, pour une ligne multifilaire comportant N conducteurs et donc N modes de propagation, les solutions quasi-TEM sont obtenues à partir du système suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{22}(L) & 1 \\ \Phi_{12}(L) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(0) \\ -I(L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_{21}(L) & 0 \\ \Phi_{11}(L) & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ -V(L) \end{bmatrix} = - \int \begin{bmatrix} \Phi_{21}(L-x) & \Phi_{22}(L-x) \\ \Phi_{11}(L-x) & \Phi_{12}(L-x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s(x_i) \\ I_s(x_i) \end{bmatrix} dx_i$$

II-72

Dans lequel la matrice de transition d'état est définie par :

$$\Phi(L) = \begin{bmatrix} Y^1 T \operatorname{ch}(\gamma L) T^{-1} Y_i & -Y^{-1} T \gamma \operatorname{ch}(\gamma L) T^{-1} \\ -T \gamma \operatorname{sh}(\gamma L) \gamma^{-1} T^{-1} Y & T \operatorname{sh}(\gamma L) T^{-1} \end{bmatrix}$$

II-73

V_s et I_s représentent les sources de tension et de courant induites par l'onde perturbatrice sur la ligne multifilaire. T est la matrice de dimensions (N·N) telle que $\gamma^2 = T^{-1} \cdot Y \cdot Z \cdot T$ est diagonale, γ étant la matrice de propagation.

II.2 Modélisation du couplage d'une onde foudre sur un réseau filaire :

Les vecteurs $V(L)$, $V(0)$, $I(L)$, $I(0)$, de dimension (N) , représentent les tensions et les courants induits aux extrémités de la ligne et sont les inconnues du problème.

Le système matriciel II-70, constitué de $2N$ équations et $4N$ inconnues, doit être complété par un second système de $2N$ équations qui traduit les conditions aux limites de chaque conducteur afin d'obtenir un système de $4N_i$ équations à $4N_i$ inconnues. La définition des conditions aux limites est obtenue par application du théorème de Thévenin:

$$\begin{aligned} V(0) &= V_s - Z_s I(0) \\ V(L) &= V_L - Z_L I(L) \end{aligned} \quad \text{II-74}$$

Avec

V_s et V_L sont les vecteurs colonnes de taille N des générateurs de tensions équivalents de Thévenin aux extrémités de la ligne, en $x = 0$ et $x = L$.

Z_s et Z_L sont les matrices (de taille $N \times N$) impédances de charges caractérisant les terminaisons des lignes.

La combinaison des $2N$ équations données par la formule II-72, relative à la propagation sur les conducteurs et les $2N$ équations données par la formule II-74 permet d'obtenir un système de $4N$ équations à $4N$ inconnues pouvant être mis sous la forme

$$[A] \cdot [X] = [B] \quad \text{II-75}$$

Où

X contient les inconnues du système ($V(0)$, $V(L)$, $I(0)$, $I(L)$)

A contient les éléments relatifs à la transmission sur les conducteurs et aux conditions aux limites.

B contient toutes les informations relatives à une éventuelle perturbation extérieure d'une part, et aux générateurs localisés sur la ligne multifilaire d'autre part.

II.2.5 Synthèse

Cette première partie du chapitre II, a présenté un bref rappel des différentes équations dans le domaine temporel et fréquentiel permettant le calcul des tensions et des courants induits par une onde électromagnétique sur une structure monofilaire. Afin de tenir compte de l'aspect multifilaire des câbles de télécommunications, on utilise les mêmes équations que précédemment, mais sous forme matricielle. Pour cela, il suffit de remplacer les variables R, L, C, et G, par des matrices ($N \times N$) correspondantes, où N est le nombre de conducteurs de la ligne, et les tensions V et les courants I par des vecteurs associés de dimension $1 \times N$ [48].

Cependant, l'étude d'un réseau de télécommunications complet ne peut se limiter à un réseau filaire et il convient de tenir compte également du rôle joué par les structures dans les mécanismes de couplage avec la foudre [49], [50], [51]. En effet, l'avènement de la téléphonie mobile a engendré la mise en place d'infrastructures sensibles et exposées à la foudre.

Afin de pouvoir tenir compte de cette particularité, il est alors nécessaire d'utiliser un code 3D permettant la prise en compte des bâtiments.

II.3 Modélisation des effets électromagnétiques d'une onde foudre sur une structure complexe par la méthode « FDTD »

Afin de modéliser l'effet induit par une onde foudre sur un bâtiment, il est nécessaire d'utiliser un code 3D. A l'heure actuelle, la méthode de modélisation la plus répandue est la méthode des différences finies dans le domaine temporel ou encore «Finite Differences Time Domain» (FDTD). Introduite pour la première fois par Yee en 1966 [52], cette méthode en trois dimensions permet de définir de manière simple et rigoureuse des structures à géométrie variable, composées de différents matériaux à perte ou non et de conducteurs. Ainsi cette méthode de modélisation permet de prendre en compte des structures de plus en plus complexes et surtout de plus en plus proche de structures réelles. Néanmoins, le facteur limitant de cette méthode est le temps de calcul et les ressources informatiques nécessaires.

II.3 Modélisation des effets électromagnétiques d'une onde foudre sur une structure complexe par la méthode « FDTD »

II.3.1 Les équations de Maxwell

A la base de cette méthode on retrouve les équations de Maxwell exprimées dans le domaine temporel selon les formules :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad \text{II-76}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad \text{II-77}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{J}_c(\vec{r}, t) \quad \text{II-78}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad \text{II-79}$$

Avec

\vec{E} le vecteur champ électrique, \vec{D} le vecteur induction électrique,

\vec{H} le vecteur champ magnétique, et \vec{B} le vecteur induction magnétique

et \vec{J}_c le vecteur densité de courant électrique de conduction.

\vec{r} est le vecteur de l'espace considéré à un instant t

Dans le cas d'un milieu linéaire, isotropes, homogènes non magnétiques et non dispersifs, les vecteurs électriques et magnétiques et la densité de courant électrique sont donnés par les relations par l'équation:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \text{II-80}$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) \quad \text{II-81}$$

$$\vec{J}_c(\vec{r}, t) = \sigma \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \text{II-82}$$

Avec

ε : Permittivité électrique du milieu

μ_0 : Perméabilité magnétique du vide

II.3 Modélisation des effets électromagnétiques d'une onde foudre sur une structure complexe par la méthode « FDTD »

σ : Conductivité électrique du milieu.

Dans ce cas les équations II-76 et II-78 deviennent :

$$\frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \text{II-83}$$

$$\sigma \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) + \varepsilon \cdot \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) \quad \text{II-84}$$

La projection des équations II-83 et II-84 dans un repère cartésien permettent d'obtenir les six équations scalaires suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_x(r,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{\partial E_z(r,t)}{\partial y} - \frac{\partial E_y(r,t)}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial E_y(r,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{\partial E_x(r,t)}{\partial z} - \frac{\partial E_z(r,t)}{\partial x} \right) \\ \frac{\partial H_z(r,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{\partial E_y(r,t)}{\partial x} - \frac{\partial E_x(r,t)}{\partial y} \right) \end{cases} \quad \text{II-85}$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E_x(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z(r,t)}{\partial y} - \frac{\partial H_y(r,t)}{\partial z} - \sigma \cdot E_x(r, t) \right) \\ \frac{\partial E_y(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x(r,t)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(r,t)}{\partial x} - \sigma \cdot E_y(r, t) \right) \\ \frac{\partial E_z(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y(r,t)}{\partial x} - \frac{\partial H_x(r,t)}{\partial y} - \sigma \cdot E_z(r, t) \right) \end{cases} \quad \text{II-86}$$

On peut constater que ces relations font apparaître des dérivées spatiales et temporelles du premier ordre. La méthode FDTD consiste à approximer ces dérivées partielles en utilisant un développement de Taylor. La méthode de résolution est rappelée en Annexe 1.

II.3.2 Synthèse

Dans cette seconde partie du chapitre, nous avons rappelé les équations nécessaires à la mise en place d'un code de calcul permettant la modélisation des effets électromagnétiques induits et conduits sur une infrastructure complète composant un réseau de télécommunications par la méthode des différences finies. L'un des avantages de cette méthode est de permettre la modélisation du réseau dans sa globalité, afin de pouvoir estimer les interactions pouvant avoir lieu entre les différents constituants. L'utilisation

d'un tel code temporel itératif présente aussi l'avantage de permettre la prise en compte, de manière simple, d'éléments non linéaires, tels que les parafoudres à gaz.

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes pouvant être utilisées afin de modéliser les courants induits et conduits par une onde électromagnétique de type foudre sur un réseau de télécommunications complexe. Chacune de ces méthodes possède des avantages et des inconvénients selon le type de calculs à réaliser. Le tableau ci-dessous résume les éléments différenciateurs entre les codes de type "1D" et "3D".

	Code « 1D »	Code « 3D »
Prise en compte des paires	Oui	Oui
Différenciation de l'induit et du conduit	Oui	Non
Calcul du couplage foudre	Tous les conducteurs	Tous les conducteurs du volume
Calcul du couplage entre conducteur	Tous les conducteurs suivant le même chemin géométrique	Tous les conducteur du volume
Prise en compte des bâtiments	non	oui

Au vu de ces résultats, il semble plus approprié de privilégier l'utilisation d'un code de calcul «1D » pour l'étude du couplage avec un réseau filaire, afin de diminuer les temps de calculs, et de pouvoir tenir compte de manière précise des caractéristiques des câbles de télécommunications. De plus, l'approche fréquentielle sera privilégiée car elle permet de traité de manière plus simple la présence d'un sol de conductivité fini. Cette approche sera donc utilisée pour l'étude de la protection par câble de garde des réseaux souterrains abordée dans le Chapitre trois.

L'utilisation des codes « 3D », sera par ailleurs, à favoriser pour la modélisation des bâtiments et de leurs adductions afin de permettre l'étude des interactions de la foudre avec les différents éléments. Une application pratique de cette méthode sera présentée au chapitre 4 afin de modéliser l'impact de la foudre sur un site de radio télécommunications.

Chapitre III : Etude de la protection d'un câble de télécommunications souterrain face à une agression de type foudre par un câble de garde effet direct et indirect

III.1 Introduction:

Le réseau de télécommunications enterré est fréquemment soumis aux impacts de foudre. De manière générale, les dommages engendrés sur les câbles de télécommunications enterrés sont dus au phénomène de claquage ayant lieu entre l'écran du câble et les paires intérieures. En effet, si une tension importante se développe entre l'écran et les paires torsadées et dépasse la rigidité diélectrique du câble, il se produit alors un arc électrique (claquage diélectrique) qui peut entraîner la destruction du câble et la génération d'un défaut permanent qui exige le remplacement du câble. Une autre forme de dommage pouvant être rencontrée est la destruction du câble au point d'impact due aux contraintes thermiques et mécaniques développées dans la région du point d'impact. De plus, sous certaines conditions, la vaporisation soudaine de l'humidité présente dans le sol peut endommager le câble par écrasement que celui-ci soit composé de paires torsadées, ou de fibres optiques.

La modélisation des courants circulant sur l'écran d'un câble de télécommunications enterré a été largement étudiée. Tout d'abord par Sunde en 1968 [53] Sunde a supposé que la gaine isolante entourant l'écran serait perforée en plusieurs points, de sorte que l'on puisse assimiler l'écran du câble de télécommunications à un conducteur nu placé en pleine terre. Cependant, des expériences effectuées par Douglass en 1971 [54] ont prouvé qu'il est nécessaire d'appliquer une valeur de courant minimum afin de provoquer une perforation de l'isolant du câble. Plus tard, Ungar [55] a démontré que la tension développée entre les paires et l'écran du câble enterré peut atteindre des valeurs sensiblement plus hautes que celles précédemment calculées par Sunde. Ainsi, les résultats proposés par Ungar montrent que l'on ne peut pas considérer les câbles de télécommunications enterrés comme des câbles nus, et qu'il est nécessaire de tenir compte de l'enveloppe plastique entourant ce dernier. Néanmoins les travaux menés par Ungar ne tiennent pas compte de la présence

d'un conducteur de protection placé au-dessus du câble. On notera également les travaux de Babu [56], Zong [57], et Petrache [58], [59], plus récents et traitants la même configuration que les travaux de Ungar [55].

De plus, l'évaluation de la protection fournie par la présence d'un conducteur de protection a été effectuée à l'aide de l'hypothèse de Sunde, c'est-à-dire en considérant que l'écran du câble est en contact direct avec le sol. Sunde a également supposé que lors d'un impact de foudre direct sur le sol, il y avait ionisation du sol et que l'arc de foudre touchait le conducteur de protection et le câble de télécommunications. Ainsi le courant de foudre serait réparti entre le câble de télécommunications et le conducteur de protection. L'utilisation de ce modèle conduit à une diminution de 1/3 du courant de foudre circulant sur le câble de télécommunications, ce qui entraîne une amélioration de la protection. Ce modèle a été employé dans la réalisation des normes pour la protection contre la foudre [60] [61], mais aussi dans le manuel de protection édité par l'ITU [62].

Cependant, l'expérience a prouvé que les fils de garde sont souvent beaucoup plus efficaces dans la pratique que dans la théorie et que dans certains cas ces dispositifs de protections empêchent l'apparition de défauts, généralement constatés en leur absence.

Ainsi, l'intérêt de ce chapitre est d'évaluer de manière plus précise le gain apporté par l'utilisation d'un ou plusieurs conducteurs écrans dans la protection des câbles de télécommunications enterrés.

Le point de départ de cette étude se base sur les résultats expérimentaux obtenus lors d'une campagne de tests menée sur le site de déclenchement artificiel de la foudre de Cachoera Paulista au Brésil [63] en 2006.

Ce chapitre comporte quatre parties :

Dans la première partie, on effectue une présentation du site de test et des configurations expérimentales étudiées ainsi que les principaux résultats obtenus lors de la campagne de mesure.

III.2 Etude expérimentale

La seconde partie est consacrée à la validation du code de calcul utilisé pour modéliser la configuration expérimentale. Il sera ensuite utilisé afin d'effectuer une étude paramétrique sur l'influence de différentes grandeurs physiques.

La troisième partie, évalue l'effet d'une protection assurée par un conducteur écran dans le cas d'un impact indirect de la foudre sur un réseau enterré servant d'adduction à un bâtiment. L'objectif étant de quantifier la protection apportée par le conducteur écran dans le cas où la perturbation électromagnétique induite se propage vers le bâtiment connecté au réseau.

Enfin, dans la dernière partie on s'attache à étudier, dans le cas d'un impact direct sur un bâtiment, l'influence de la longueur du ou des conducteurs écrans en fonction de la résistivité du sol sur le gain de la protection apportée.

III.2 Etude expérimentale

Afin de pouvoir valider les outils de simulation et les méthodes de protection, il est parfois nécessaire de recourir à des mesures expérimentales. Dans ce contexte, l'utilisation de la technique de déclenchement artificiel de la foudre peut répondre de manière efficace à cet objectif. Ainsi en février 2006, France Télécom en collaboration avec le centre CPQD (Brésil) et l'opérateur Telstra (Australie) a participé à une campagne de mesure sur le site expérimental de Cachoëra Paulista au Brésil [64].

L'objectif principal de cette expérimentation était de démontrer l'efficacité de l'utilisation d'un conducteur écran pour assurer la protection de câbles de télécommunications enterrés contre des impacts directs de foudre.

III.2.1 Description de la configuration expérimentale

III.2.1.1 Description du réseau de télécommunications

Ce réseau expérimental a été réalisé sur le site de l'INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) à Cachoeira Paulista.

III.2 Etude expérimentale

La configuration de test est constituée d'un réseau souterrain de 1000 m connecté à un réseau aérien de 2000m comme présenté sur la Figure III-1.



Figure III-1: Vue arienne du site expérimental

Le tronçon aérien (ligne jaune) est composé d'un câble de télécommunications de 50 paires écrantés situé à 6m au dessus du sol. La résistance de l'écran du câble aérien est de 2.9 Ohms/km

Le tronçon souterrain (ligne rouge) est composé d'un câble de télécommunications (enterré à 1.20 m) de 30 paires et d'un conducteur de protection (conducteur écran enterré à 0.8 m) de 2.5 mm de diamètre, selon le schéma de la Figure III-2. La résistance de l'écran du câble de télécommunications est de 3.9 Ohms/km et la résistance du conducteur de protection est de 160 Ohms/km

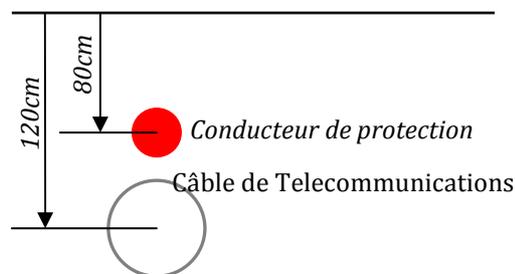


Figure III-2 : Nomenclature du réseau souterrain

III.2 Etude expérimentale

La résistivité moyenne du sol sur le parcours du câble est de 2000 Ω .m

III.2.1.2 Description des terminaisons du réseau

Le réseau de télécommunications expérimental utilisé durant la campagne de mesure peut être représenté sous la forme du synoptique de la Figure III-3, où la ligne rouge représente le conducteur de protection et la ligne grise le câble de télécommunications.

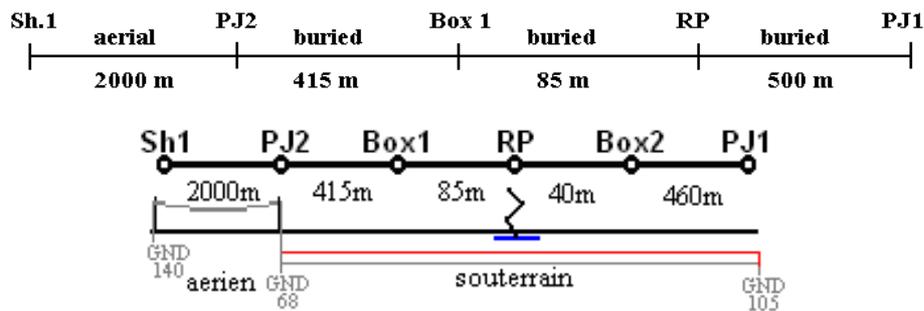


Figure III-3 : Synoptique du site expérimental

Les interconnexions utilisées entre les différents constituants du réseau sont présentées dans le Tableau III-1.

Sh. 1 <i>Terminaison du réseau Aérien</i>	<ul style="list-style-type: none"> > Protection des paires par parafoudre à gaz (Gaz Discharge Tube) > Mise à la terre de l'écran du câble de télécommunications (140 Ohms)
PJ2 <i>Transition Aéro-souterraine</i>	<ul style="list-style-type: none"> > Connexion des paires 1-30 entre le câble de télécommunications aérien et souterrain > Protection des connexions aéro-souterraine par GDT > Mise à la terre de l'écran du câble de télécommunications et du conducteur de protection (68 Ohms)
PJ1 <i>Terminaison du réseau souterrain</i>	<ul style="list-style-type: none"> > Protection des paires par GDT > Mise à la terre de l'écran du câble de télécommunications et du conducteur de protection (105 Ohms)

Tableau III-1 : Configuration du réseau expérimental

III.2.1.3 Méthode d'injection du courant de foudre

La plateforme de tir (RP), représentée sur la Figure III-4 et placée au centre du réseau, est composée de quatre fusées montées sur un isolateur céramique afin que la totalité du courant de foudre passe par l'instrumentation de mesure.

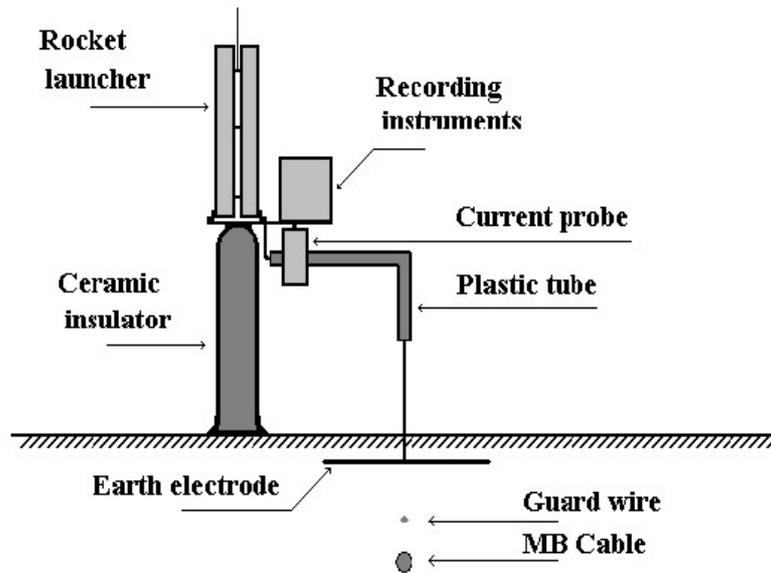


Figure III-4 : Principe d'injection du courant de foudre

Chaque fusée est raccordée par un filin en cuivre gainé de kevlar, au centre du réseau souterrain, sur une électrode en cuivre de 1m de long. La fonction de cette électrode est de favoriser l'écoulement des charges dans le sol et ainsi de forcer le point d'impact au centre du réseau. L'électrode est positionnée au point RP selon le schéma de la Figure III-5 .

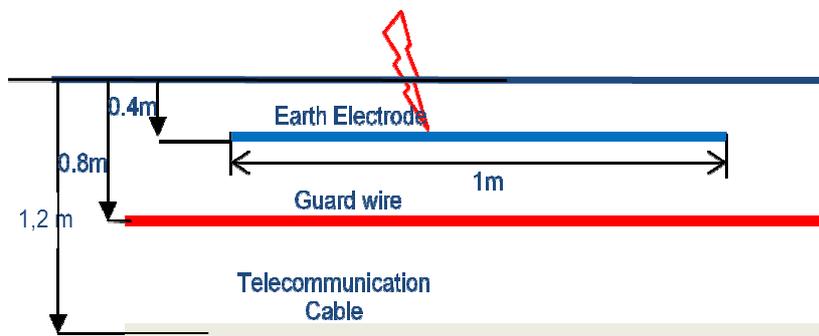


Figure III-5 : Implantation de l'électrode d'injection

III.2.1.4 Description de l'instrumentation de mesure

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'oscilloscopes numériques de bande passante 400MHz, de type LeCroy et Tektronix. Les capteurs utilisés pour la mesure du courant sont des tores "Pearson", de type "1809" ou "5191" (Figure III-6).

III.2 Etude expérimentale

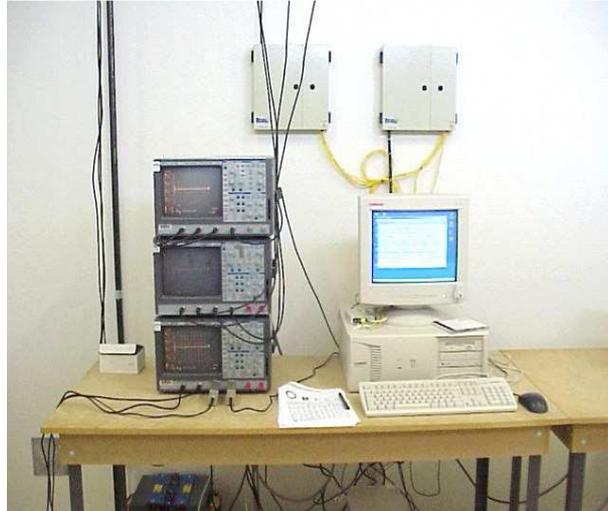


Figure III-6 : Poste de mesure

Les points de mesures sont positionnés le long du réseau souterrain aux points PJ2, Box1, et RP de la Figure III-3, respectivement placés à une distance de 500m, 85m et 0m du point d'impact.

Au niveau du point de mesure, les câbles sont placés dans un regard selon la topologie de la Figure III-7. Afin de limiter les risques de claquage dans l'air, les câbles sont placés à travers des tubes PVC.

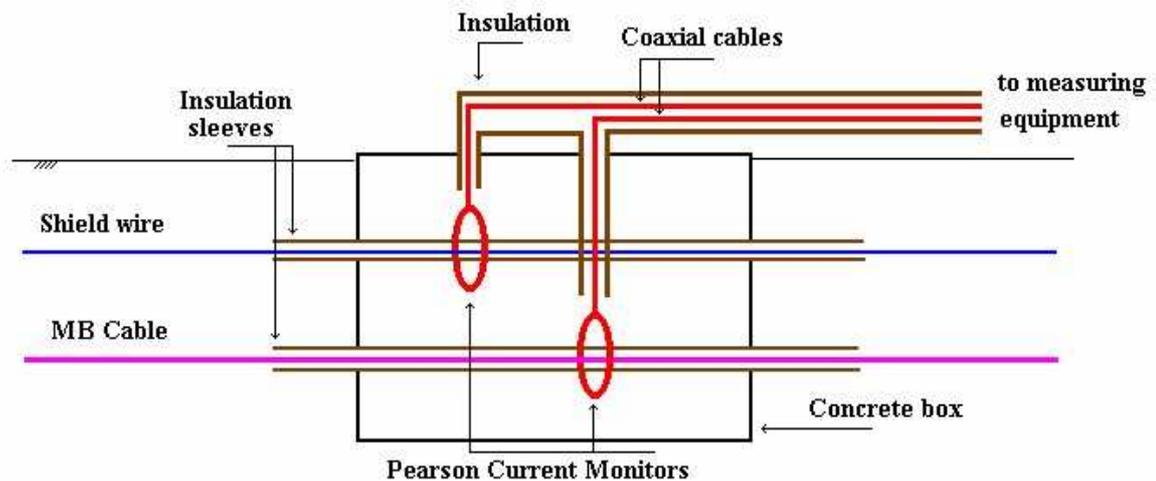


Figure III-7 : Configuration des regards de mesure

Le Tableau III-2 présente la configuration des différents points de mesure

III.2 Etude expérimentale

PJ2 Terminaison aérien	Courant sur le câble de télécommunications
	Courant sur le conducteur de protection
Box1 Réseau souterrain 85m du point d'impact	Courant sur le câble de télécommunications
	Courant sur le conducteur de protection
RL Point d'impact	Mesure du courant de foudre

Tableau III-2: Points de mesure

III.2.2 Présentation des résultats de mesure

III.2.2.1 Courant de foudre

Durant cette campagne, il a été réalisé 5 tirs, dont les valeurs crêtes du courant de foudre enregistré au point d'impact selon l'ordre chronologique de déclenchement des tirs sont reportées dans le Tableau III-3.

Arc	#1	#2	#3	#4	#5
Valeur crête	13 kA	14 kA	8 kA	19 kA	35 kA

Tableau III-3 : Valeur crête des différents tirs

Les Figure III-8 et la Figure III-9 représentent, respectivement, les formes d'ondes des arcs 1 et 5.

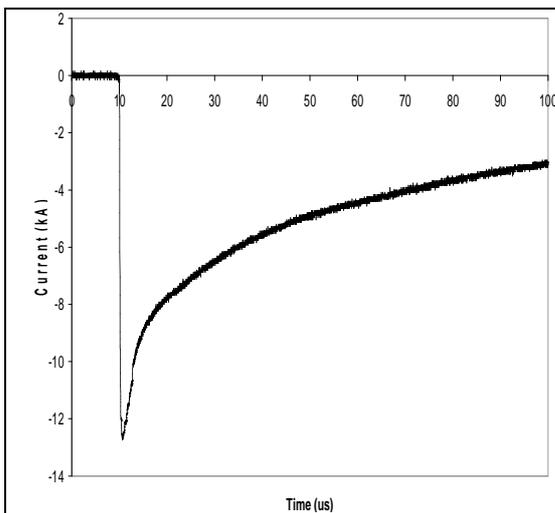


Figure III-8 : Forme d'onde de l'arc N°1

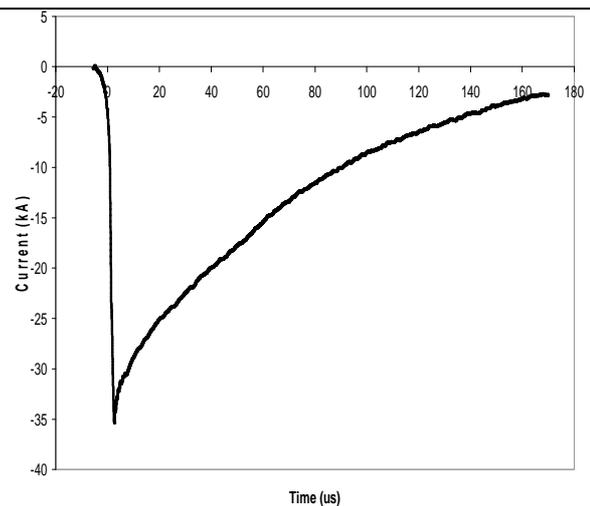


Figure III-9 : Forme d'onde de l'arc N°5

III.2 Etude expérimentale

De manière générale, on peut constater que le courant de foudre présente des temps de montée de l'ordre de quelque μs , ce qui est représentatif des formes d'ondes observées pour éclairs naturels. Ces oscillogrammes présentent une polarité négative ce qui suppose un écoulement des charges du sol vers le nuage.

III.2.2.2 Conducteur de protection

Des mesures semblables, effectuées par Bejleri et al [65] entre 1997 et 1998 sur le site de l'ICLRT (Center for Lightning Research and Testing) en Floride montrent que la majorité du courant de foudre circule sur le conducteur de protection. L'analyse de ces données, par Bejleri, a permis de mettre en évidence une atténuation de 1% par mètre du courant circulant sur le conducteur de protection.

L'application de ce modèle empirique, aux conditions de l'expérimentation permet d'estimer que le courant circulant à 85m du point d'impact sur le conducteur de protection devrait représenter environ 7.5% du courant de foudre.

Les valeurs crêtes des courants mesurés sur le conducteur de protection à 85 m (Box1) sont indiquées dans le Tableau III-4. On peut noter que dans la configuration de l'expérimentation, le courant circulant sur le conducteur de protection représente 7 à 8.5% du courant de foudre. Ces résultats sont donc en adéquation avec ceux obtenus par Bejleri.

Arc	#1	#2	#3	#4	#5
Courant pic	1.0 kA	1.2 kA	0.6 kA	1.5 kA	2.4 kA
Pourcentage du courant de foudre	7.7%	8.6%	7.5%	7.9%	6.9%

Tableau III-4 : Courant mesuré sur le conducteur de protection

La forme d'onde du courant mesurée sur le conducteur de protection pour les trois premiers arcs est identique à celle du courant de foudre comme le montre la Figure III-10.

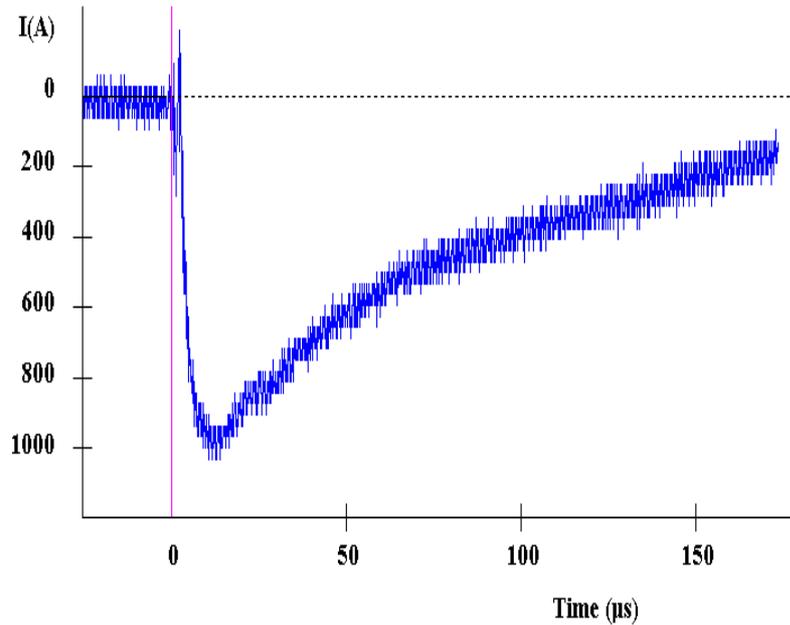


Figure III-10 : Courant sur le conducteur de protection à 85m (Stroke N°1)

En revanche, les mesures réalisées sur les arcs 4 et 5 présentent une discontinuité.

Le courant circulant sur le conducteur de protection durant l'impact numéro 5 est représenté sur la Figure III-11. Le courant présente un temps de descente de l'ordre de 50µs, contrairement à celui du courant de foudre (Figure III-9) qui est de l'ordre de 190µs.

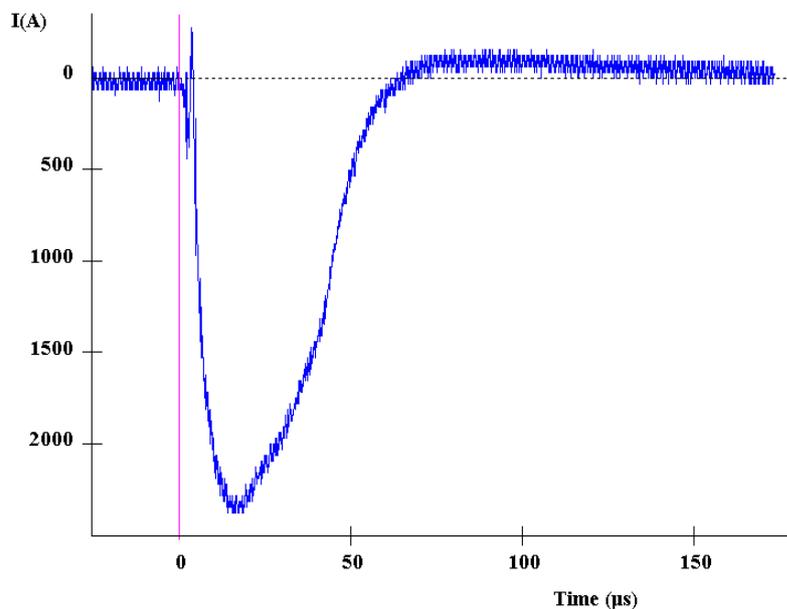


Figure III-11 : Courant sur le conducteur de protection à 85m durant l'arc N°5

A la fin de la campagne de mesure, une excavation du conducteur de protection au pied de la plateforme de tir a permis de mettre en évidence la fusion du conducteur de protection,

III.2 Etude expérimentale

comme le montre la Figure III-12. Une étude des différentes mesures a permis de déterminer que la destruction du conducteur de protection a eu lieu durant l'impact numéro 4 dont la valeur de courant de foudre a atteint 19kA. Ainsi, la discontinuité du courant après 50 μ s est probablement due à l'extinction du claquage ayant eu lieu au niveau de la rupture du conducteur de protection.



Figure III-12 : Fusion du conducteur de protection

III.2.2.3 Câble de télécommunications

Les courants mesurés, à 85m du point d'impact, sur le câble de télécommunications sont indiqués dans le Tableau III-5.

Arc en retour	#1	#2	#3
Courant pic	650 A	750A	340 A
Pourcentage du courant de foudre	5%	5.3%	4.25%

Tableau III-5 : Courant mesuré sur le câble de télécommunications

Ces résultats montrent que le courant circulant sur le câble de télécommunications représente environ 5% du courant de foudre. La Figure III-13 représente la forme d'onde du courant mesuré sur le câble de télécommunications durant l'impact numéro 1. Le courant induit sur le câble de télécommunications peut être décomposé en deux parties :

- une impulsion de courte durée due au rayonnement du canal foudre (composante induite)
- une impulsion plus large probablement due au couplage entre le conducteur de protection et le câble de télécommunications (composante conduite).

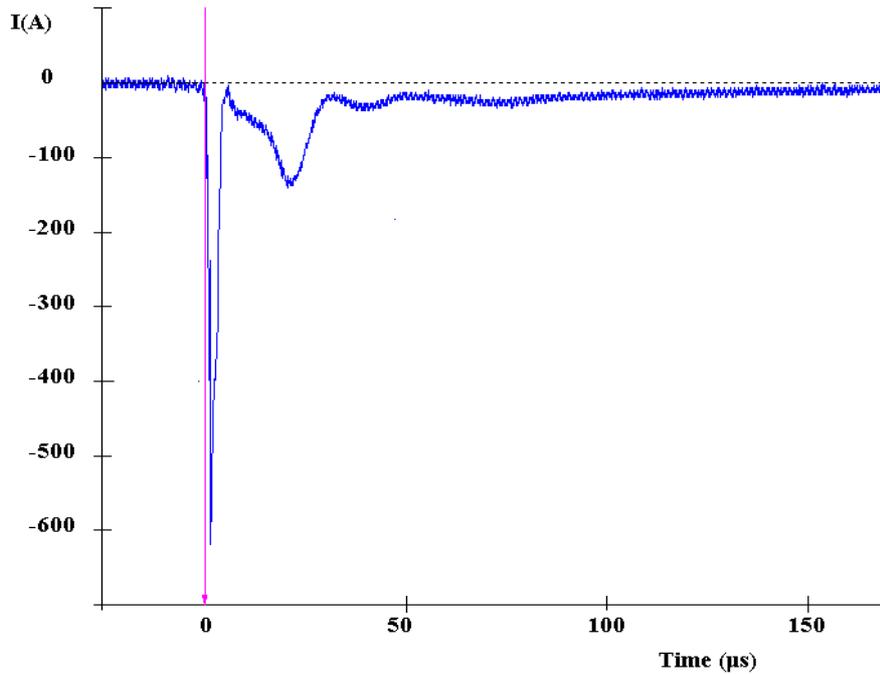


Figure III-13 : Courant mesuré sur le câble de télécommunications à 85m (impact 1)

La Figure III-14 représente, quant à elle, le courant mesuré sur le câble de télécommunications durant l'impact numéro 5. On peut alors constater que l'on retrouve la composante induite due au rayonnement de l'arc et une composante conduite certainement due à un claquage entre le conducteur de protection et le câble de télécommunications.

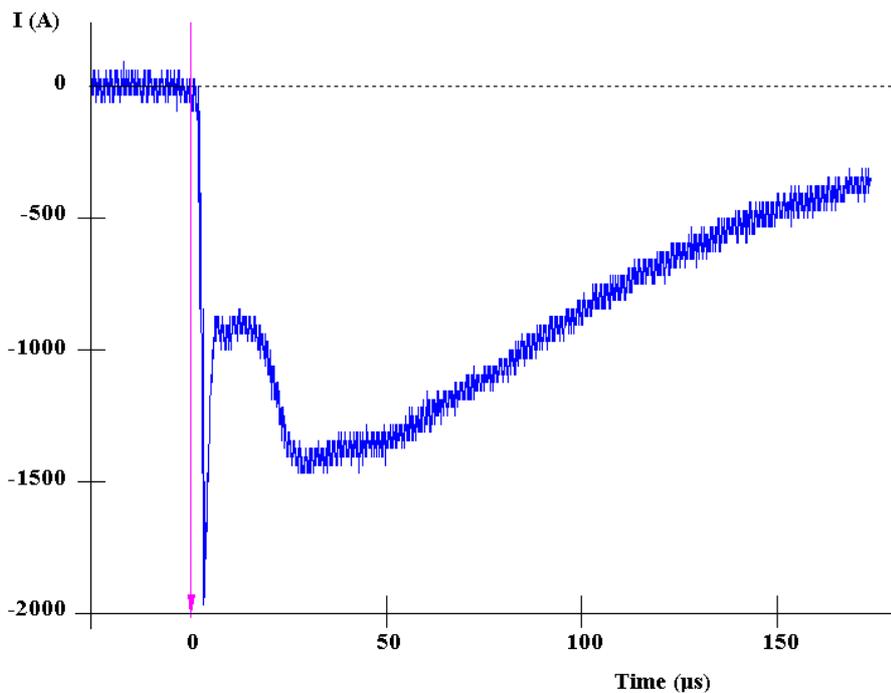


Figure III-14 Courant mesuré sur le câble de télécommunications à 85m (impact5)

III.3 Etude Théorique

III.3.1 Présentation de la méthode de modélisation

Les résultats présentés dans cette section, ont été obtenus à l'aide d'un code de calcul, basé sur la théorie des lignes de transmission multifilaires associée à une approche topologique, développé lors d'une collaboration précédente avec L'université Blaise Pascal (Clermont Ferrand) sous le nom de RESLINE. Il permet l'évaluation des courants et tensions induits ou conduits, par une onde extérieure et / ou des sources localisées, sur un réseau complexe constitué de lignes multifilaires interconnectées par des charges linéaires, successivement dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel à l'aide d'une transformé de Fourier inverse [66] [67].

Le formalisme de la théorie des lignes de transmission peut s'appliquer dans le cas où les champs électriques et magnétiques se propagent selon le mode Transverse Electromagnétique (TEM). Cela suppose le respect des hypothèses suivantes :

- la hauteur de la ligne est faible devant la longueur d'onde de la perturbation, ce qui est le cas lors d'un impact foudre
- seuls les modes TEM sont pris en compte, les modes quasi-TEM sont négligés.
- les pertes diélectriques sont très faibles.

Les équations des télégraphistes peuvent s'obtenir de deux façons. D'une part, en utilisant les équations intégral-différentielles du courant, et d'autre part, à partir des équations de Maxwell en choisissant un contour d'intégration entre la ligne et le sol. Dans le cas de l'approximation quasi-TEM, et en généralisant à tous les conducteurs d'une même ligne, on

peut les mettre sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{dV}{dx} = -Z \cdot I + V_s \\ -\frac{dI}{dx} = -Y \cdot V + I_s \end{cases} \quad \text{III-1}$$

Où V et I représentent respectivement la tension et le courant de chaque conducteur par rapport au conducteur de référence (vecteur de dimension N), Z et Y sont les matrices impédances et admittances complexes par unité de longueur d'ordre ($N \times N$). Chacune

III.3 Etude Théorique

d'elles est composée de deux matrices : $Z = R + j\omega L$ et $Y = G + j\omega C$ ou R, L, C et G sont des matrices de dimension $N \times N$ contenant les paramètres linéiques primaires de la ligne.

D'autre part, V_s et I_s sont des générateurs de tension et de courant équivalents permettant la prise en compte des sources d'excitations, comme le montre la Figure III-15

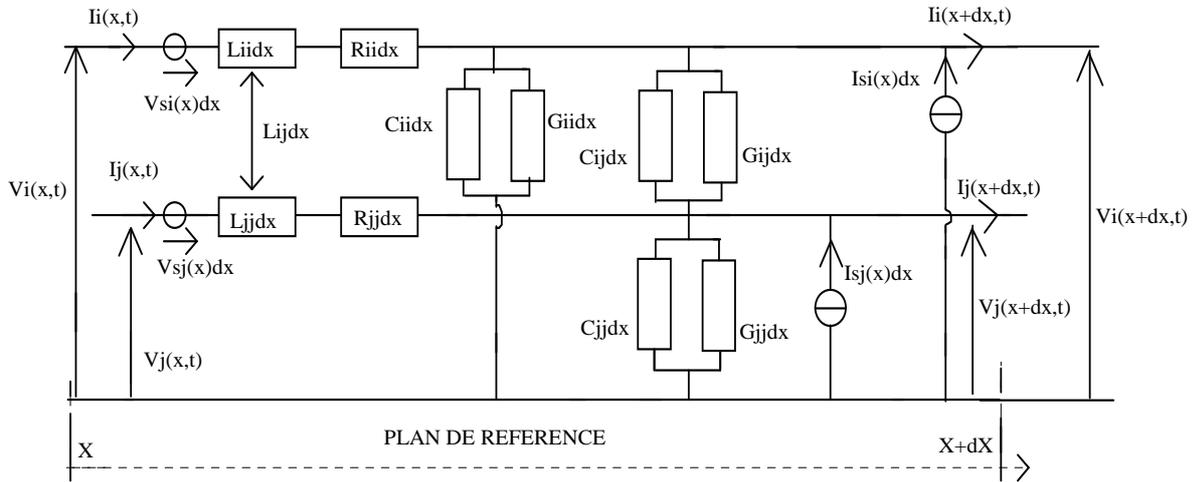


Figure III-15 : Schéma d'une cellule élémentaire (Exemple à deux conducteurs)

Le système III-1 est complété par une seconde matrice représentant les conditions aux limites de chaque ligne. Ce système permet l'interconnexion des lignes entre elles ainsi que la prise en compte de charge linéaire.

La solution générale donnant tous les courants et tensions aux extrémités de chaque ligne multifilaire est obtenue en résolvant un système matriciel de la forme $A * X = B$. Où A est une matrice contenant deux sous matrices $A1$ et $A2$. $A1$ contient toutes les données relatives aux N lignes et $A2$, celles des M réseaux.

De même, la matrice B se décompose en deux sous matrices dont l'une, $B1$, contient toutes les informations liées à la perturbation extérieure et l'autre, $B2$, les générateurs localisés.

La résolution du système différentiel est basée sur le formalisme des variables d'états, en utilisant la méthode de la variation de la constante afin de déterminer la solution générale, et par la suite en déduire la matrice de transition d'état.

En premier lieu, Il convient de caractériser les câbles. Pour cela, il est nécessaire de définir leurs positions géographiques et leurs caractéristiques internes afin d'effectuer le calcul de la matrice contenant les paramètres linéiques primaire RLCG. Cette matrice peut aussi être

mesurée selon la méthode décrite dans [68], en utilisant un conducteur équivalent afin de diminuer la taille de la matrice. Cette caractérisation permet de créer un modèle de câble représentatif tenant compte en particulier de l'effet des torsades.

Afin de prendre en compte l'effet de l'onde foudre, un calcul de champs est réalisé à différentes fréquences et distances (tenant compte de la conductivité du sol). Ce fichier permet au code de calcul de déterminer les sources localisées réparties le long de chaque conducteur, en appliquant une décroissance exponentielle pour le calcul du champ dans le sol [69].

Dans un deuxième temps, la résolution des équations des télégraphistes dans le domaine fréquentiel, dont la méthode est rappelée au Chapitre 2, permet la détermination des tensions et courants en tout point de la ligne.

III.3.2 Validation de la méthode de modélisation par comparaison avec les résultats expérimentaux

Lors d'un impact foudre direct, il est nécessaire de prendre en compte deux phénomènes distincts. D'une part, les courants induits par le rayonnement du canal foudre (EM coupling), et d'autre part les courants et tensions induits par couplages entre les différentes lignes de transmissions (conducteur de protection et câble de télécommunications).

Le couplage de l'onde sur le réseau est pris en compte par l'implémentation de sources localisées le long des lignes déterminées à partir d'un fichier champ, contenant la valeur du champ en $z=0$ pour différentes distances et fréquences.

Les courants induits par couplage entre les différentes lignes (Coupling contribution) sont pris en compte par l'intermédiaire des paramètres linéiques et l'implémentation d'une source localisée au point d'impact permettant de modéliser la connexion de l'arc en retour au réseau.

Ainsi, cette méthode de calcul permet de différencier les composantes induite et conduite [70].

III.3 Etude Théorique

Afin de modéliser la configuration expérimentale nous avons utilisé le synoptique de la Figure III-16 avec les caractéristiques suivantes :

- un conducteur de protection modélisé par un fil nu de 2.5mm de diamètre enterré à 80cm de profondeur entre $x=-500$ m et $x=500$ m dans un sol de résistivité égal à 2000 Ohms .m
- un câble de télécommunications modélisé par un fil isolé enterré à 1.20m de profondeur entre $x=-500$ m et $x=500$ m
- un câble de télécommunications aérien modélisé par un fil isolé, placé à une hauteur de 6m, entre $x=500$ m et $x=2500$ m
- une électrode d'injection modélisé par un fil isolé de 2.5 mm de diamètre placé à 40 cm de profondeur entre $x=-0.5$ m et $x=0.5$ m
- Une source de courant localisé E, permettant la modélisation de l'attachement de l'arc en retour au centre du réseau souterrain en $x=0$ m (composante conduite), représentant le courant de foudre mesuré durant l'arc en retour N°1 (Figure III-8)
- Un fichier champ permettant la prise en compte du rayonnement de l'arc en retour, dont le point d'impact est situé en $x=0$ m (composante induite). Le courant de base du canal étant le même que pour la source localisée E, mais de signe opposé.
- Des résistances représentatives des valeurs de mise à la terre mesurées lors de l'expérimentation

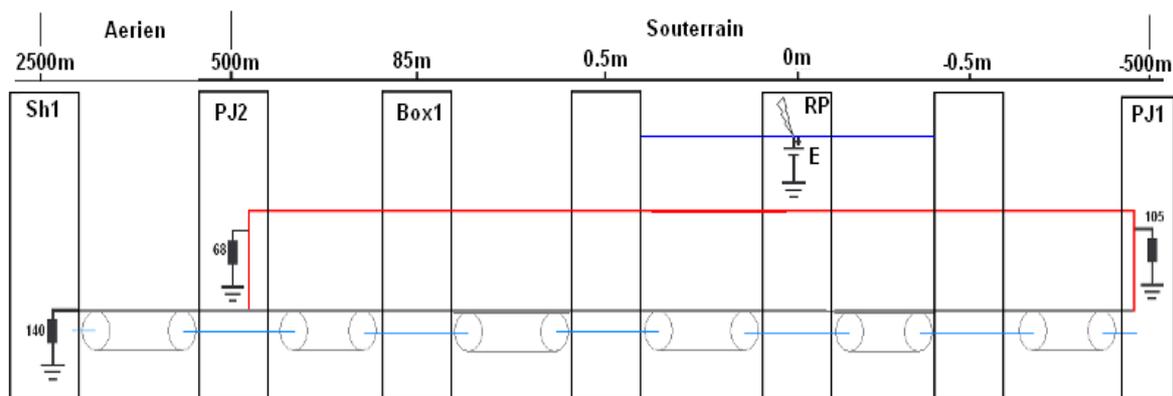


Figure III-16 : Synoptique de modélisation

La Figure III-17 présente les valeurs du courant circulant sur le conducteur de protection à 85m, obtenues par modélisation. On peut alors distinguer l'influence des deux sources de couplage.

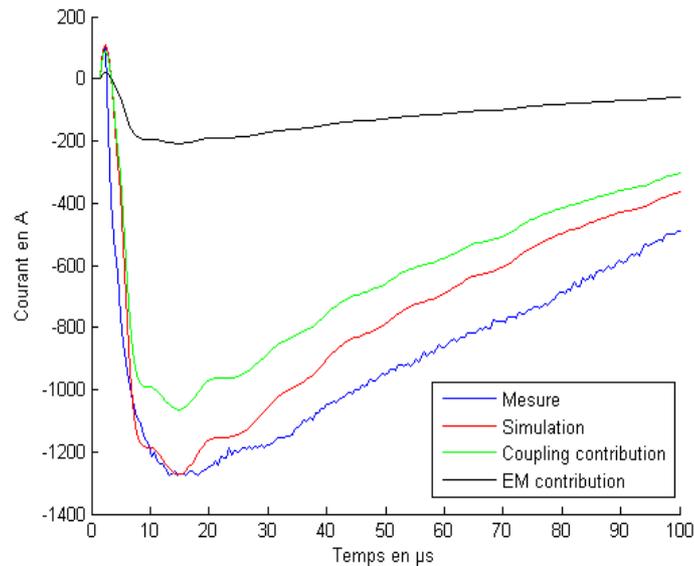


Figure III-17 : Courant circulant sur le conducteur de protection à 85 m de l'impact

L'étude de l'influence de chaque source de couplage a permis de mettre en évidence la contribution importante de la composante induite (Courbe noire) du courant généré sur le conducteur de protection. En effet, malgré une décroissance exponentielle du champ dans le sol, 15% du courant circulant sur le conducteur de protection sont dus au rayonnement du canal foudre. Cependant, la composante induite reste faible vis-à-vis de la composante conduite (courbe verte).

S'agissant du courant circulant sur le câble de télécommunications, dont les résultats sont représentés sur la Figure III-18, on peut constater que la composante induite (Courbe noire) représente environ 30% du courant total.

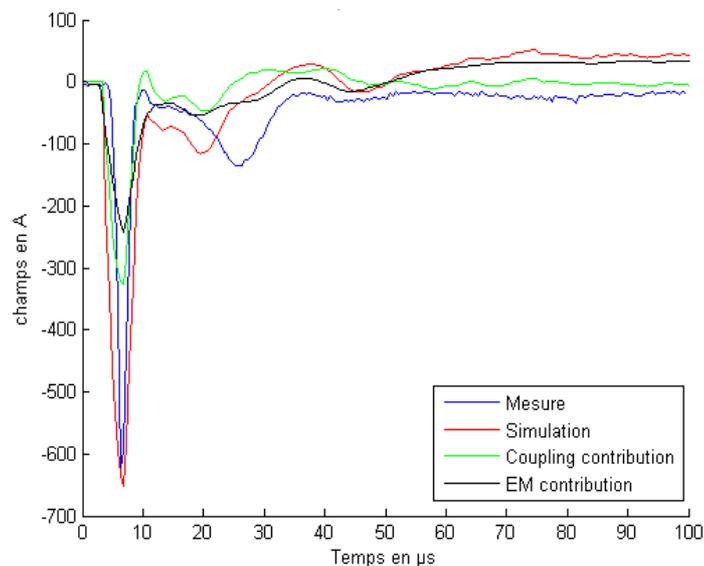


Figure III-18 : Courant sur l'écran du câble à 85 m de l'impact

La Figure III-18 permet de mieux comprendre la contribution de chaque composante au courant total circulant sur le câble de télécommunications. On peut ainsi en déduire que le premier pic, avec un temps de montée et un temps de descente relativement courts, est dû au couplage entre les deux conducteurs, contrairement au second pic qui est essentiellement dû à la composante conduite.

Les résultats de simulation donnés sur les Figure III-17 et Figure III-18 présentent une bonne corrélation respectivement avec les résultats expérimentaux relatifs aux Figures III-13 et III-14 et permettent ainsi de valider le code de calcul utilisé dans le cas d'une configuration filaire enterrée.

Les résultats de simulation ont ainsi permis d'aboutir aux constatations suivantes :

- Le courant circulant sur le conducteur de protection est essentiellement dû à la composante conduite.
- Le courant circulant sur le câble de télécommunications est dû à la somme des composantes induite et conduite .
- Le rayonnement de l'arc ne peut pas être négligé dans le cadre de la modélisation d'un réseau de distribution souterrain.

III.3.3 Etude paramétrique

Dans cette partie, nous nous intéressons à l'évolution de la forme d'onde des courants induits en fonction de la variation de différents paramètres physiques tels que la résistivité du sol, la permittivité relative de la gaine ou encore l'épaisseur du blindage du câble de télécommunications [70].

De nombreuses simulations numériques ont été réalisées à l'aide du code Resline en prenant comme référence la configuration expérimentale présenté au III-3-2. La variation de chaque paramètre physique a été effectuée de manière indépendante afin de ne tenir compte que des variations engendrées par chaque paramètre étudié.

A titre d'exemple, lors de l'analyse de l'influence de la conductivité du sol, la permittivité de gaine et le diamètre du conducteur de protection ont été maintenus constants et égaux aux valeurs de l'expérimentation.

III.3.3.1 Etude de la répartition du courant le long du réseau enterré

La répartition du courant le long du conducteur de protection est représentée sur la Figure III-19. Ces résultats permettent de constater que plus on s'éloigne du point d'impact, plus le courant circulant sur le conducteur de protection diminue, ce phénomène est dû à la dissipation des charges dans le sol.

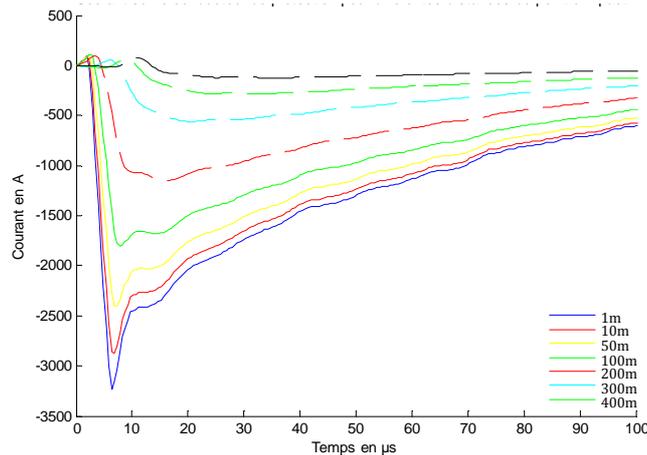


Figure III-19 : Courant sur le conducteur de protection pour différentes distances du point d'impact

En normalisant les valeurs crêtes du courant par rapport à la valeur maximale, il est alors possible de déterminer le pouvoir de dissipation d'un conducteur nu placé en pleine terre. Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur la Figure III-20 (courbe rouge). Sur la même figure nous avons également reporté les résultats obtenus par Bejleri et al [65] basés sur une estimation proposant une décroissance du courant de 1% par mètre (courbe bleue). Il convient, cependant, de mentionner que ces résultats ne sont valables que dans le cadre d'une résistivité de sol égale à 2000 Ohms.m.

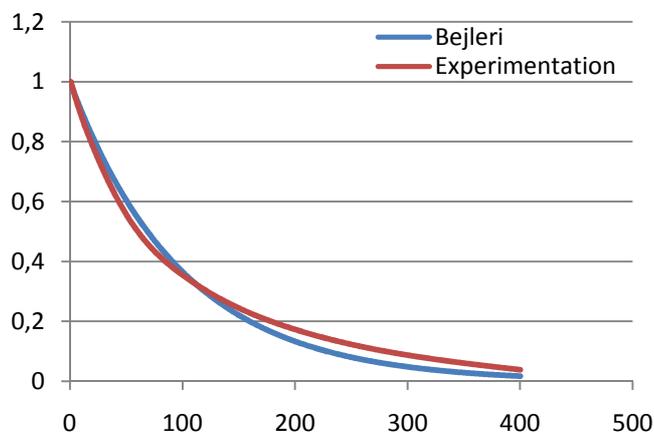


Figure III-20 : Evolution de la valeur crête du courant normalisé en fonction de la position sur le conducteur de protection

III.3 Etude Théorique

En effet, la résistivité du sol joue un rôle important dans le pouvoir de dissipation des charges. Ainsi, lorsque la résistivité du sol augmente le pouvoir de dissipation diminue comme le montre la Figure III-21

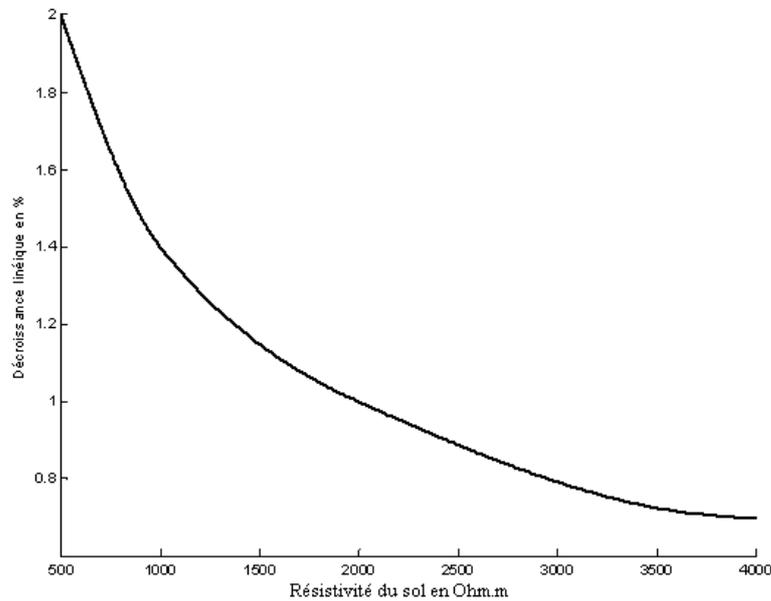


Figure III-21 : Estimation de la décroissance linéique d'un conducteur de protection en fonction de la résistivité du sol

La Figure III-21 représente la décroissance du courant par mètre en fonction de la conductivité du sol et permet d'obtenir de manière simple le pouvoir de dissipation d'un conducteur nu en fonction de la résistivité du sol. Ainsi, un conducteur nu placé dans un sol dont la résistivité vaut 500 Ohms.m aura un pouvoir de dissipation de 2% par mètre, contre 1% par mètre dans le cadre d'un sol de résistivité de 2000 Ohms.m.

III.3.3.2 Influence de la résistivité du sol

La résistivité du sol est l'un des facteurs importants dans la protection des infrastructures contre la foudre. En effet plus la résistivité du sol sera faible (ou sa conductivité élevée), meilleur sera l'écoulement des charges.

Malheureusement, la résistivité du sol est un paramètre que l'on ne peut pas modifier, mais avec lequel on doit s'accommoder.

III.3 Etude Théorique

La Figure III-22 représente la valeur du courant crête et la largeur à mi-hauteur normalisée par rapport au maximum du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications à 85m du point d'impact selon les formules III-2 et III-3.

$$I_{max} = \frac{I}{Max(I)} \quad \text{III-2}$$

$$delta t = \frac{delta t}{Max(delta t)} \quad \text{III-3}$$

Avec I la valeur crête du courant mesuré sur le câble de télécommunications pour différentes résistivités du sol et $delta t_t$ la largeur à mi-hauteur du courant mesuré sur le câble de télécommunications pour différentes résistivités du sol.

La Figure III-22 montre que la résistivité du sol joue un rôle important sur la valeur du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications. En effet, l'amplitude diminue de 80% lorsque la résistivité passe de 4000 $\Omega.m$ à 500 $\Omega.m$.

Par ailleurs, plus la résistivité du sol augmente, plus l'impulsion est courte. Ce phénomène est essentiellement dû à l'effet capacitif du sol qui se traduit par une largeur à mi-hauteur plus courte des champs rayonnés.

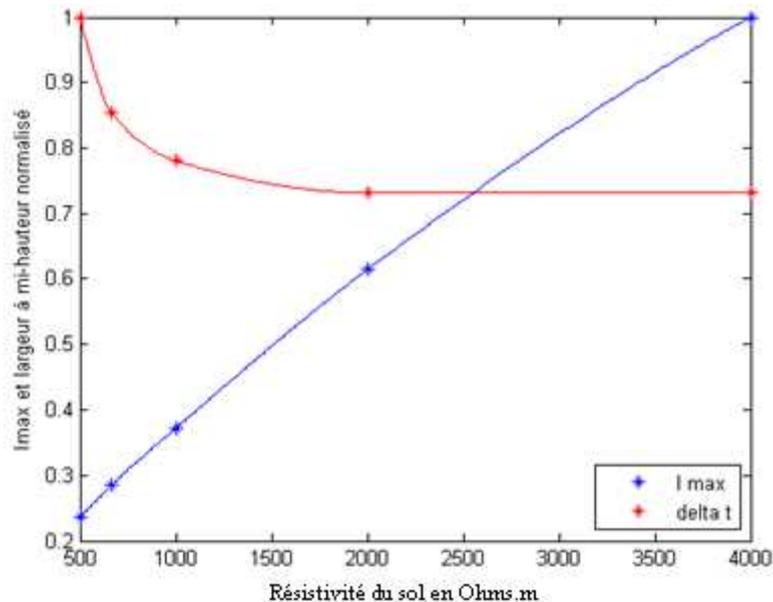


Figure III-22 : I_max et largeur à mi-hauteur normalisé en fonction de la résistivité du sol

III.3.3.3 Influence de la permittivité relative de la gaine diélectrique

La permittivité relative de la gaine diélectrique entourant l'écran du câble joue un rôle important sur la forme d'onde du courant induit sur le câble de télécommunications, dont les variations sont calculées à partir des formules III-2 et III-3 présentées précédemment et ce pour différentes permittivités relatives de la gaine diélectrique.

Comme le montre la Figure III-23, une augmentation de la permittivité de la gaine entraîne une augmentation importante de la valeur maximale du courant induit par la foudre. A titre d'exemple, l'utilisation de matériaux possédant une permittivité relative proche de 2 (Caoutchouc), permet d'obtenir une diminution du courant induit de 60% par rapport une gaine présentant une permittivité relative de 9 (Néoprène).

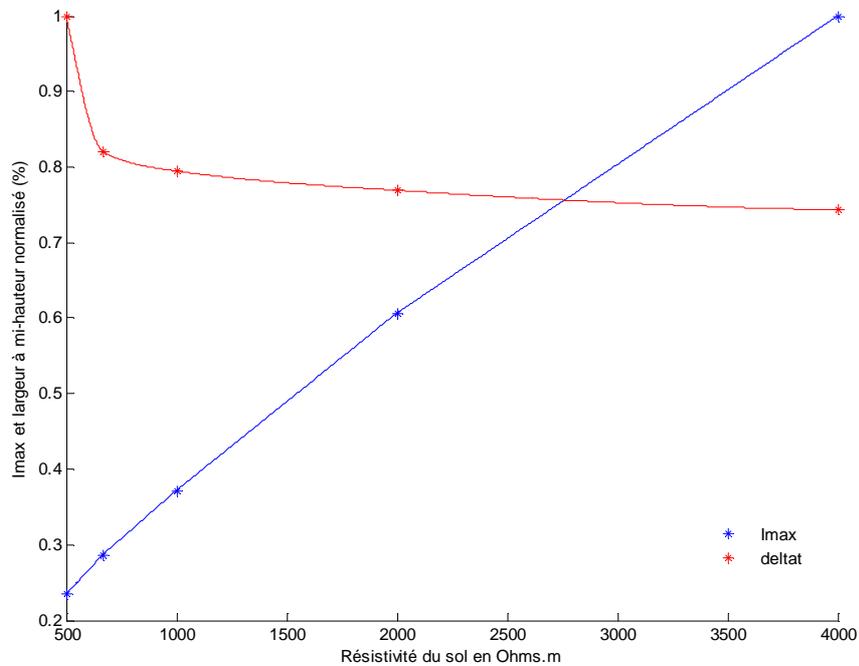


Figure III-23 : I_{max} et largeur à mi-hauteur en fonction de la permittivité relative de la gaine

Ainsi l'utilisation d'un matériau de permittivité relative faible de type mousse permettrait d'accroître l'immunité des câbles face aux agressions de type foudre. Cependant pour d'autres contraintes, l'utilisation de ce type de matériaux ne peut être recommandée dans le cas d'un câblage souterrain.

III.3.3.4 Influence de l'épaisseur de la gaine diélectrique

Il a été vu précédemment que l'utilisation d'une permittivité de gaine plus faible permettait d'obtenir une diminution du courant induit sur le câble de télécommunications, mais cela implique l'utilisation de matériaux poreux du type néoprène peu adaptés. Un autre paramètre de la gaine sur lequel on peut intervenir est son épaisseur.

Ainsi l'étude de la variation de l'amplitude du courant I_{max} normalisée selon la formule III-2 et de la largeur à mi-hauteur normalisée selon la formule III-3, permet d'évaluer l'influence de l'épaisseur de la gaine diélectrique sur la forme d'onde du courant induit sur le câble de télécommunications.

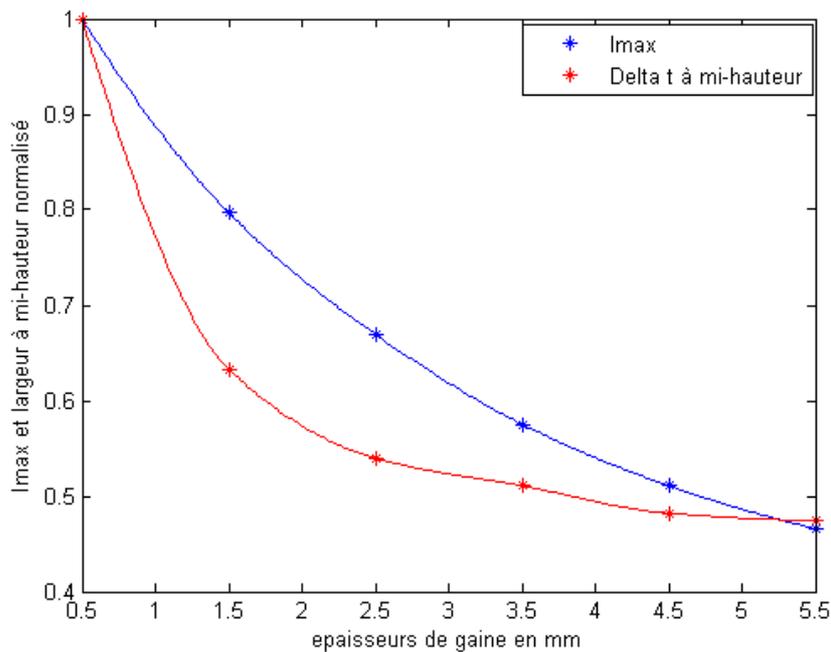


Figure III-24 : Influence de l'épaisseur de gaine

La Figure III-24 représente l'évolution de la forme d'onde normalisée en fonction de l'épaisseur de gaine. Les courbes montrent qu'une augmentation de l'épaisseur de la gaine conduit à une diminution à la fois de la valeur crête du courant et de la largeur d'impulsion.

Ces résultats mettent en évidence le rôle joué par la gaine lors d'un impact foudre. Ainsi une gaine plus épaisse permet de diminuer de manière importante le courant circulant sur le câble de télécommunications et ainsi de diminuer les risques de claquage.

III.3.3.5 Influence de l'épaisseur de l'écran du câble

L'écran du câble de télécommunications est en "alupe" généralement constituée d'une fine couche d'aluminium dont le rôle principal est de véhiculer les courants induits, mais aussi d'offrir une meilleure résistance mécanique. L'étude menée a donc porté sur l'évolution du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications en fonction d'une épaisseur d'alupe allant de 0.01mm à 1.4mm.

Afin de visualiser les variations engendrées, le courant crête, ainsi que la largeur à mi-hauteur, ont été normalisés par leurs maximums selon les formules III-2 et III-3 :

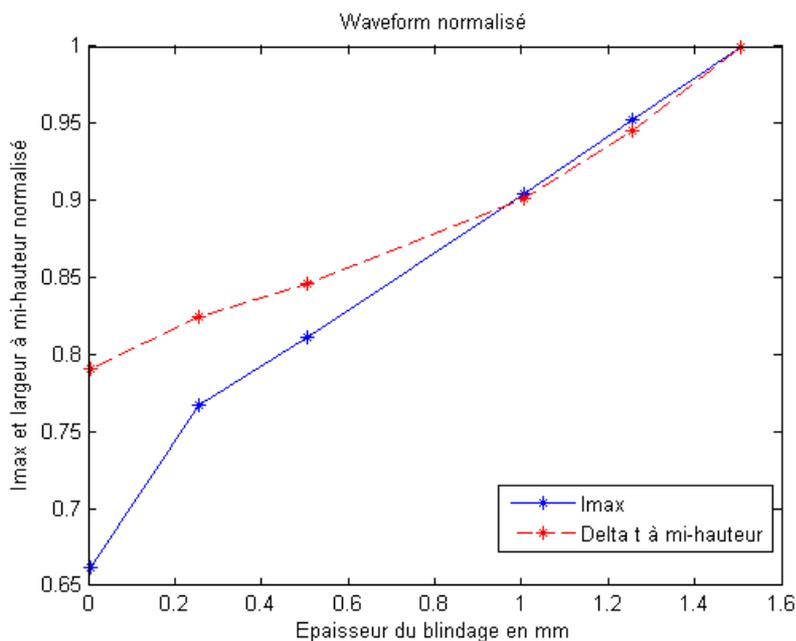


Figure III-25 : Influence de l'épaisseur du blindage

Les résultats obtenus, présentés sur la Figure III-25, mettent en évidence une augmentation du courant circulant sur le câble de télécommunications lorsque l'épaisseur de l'alupe augmente. Ce phénomène est lié à la diminution de la résistance intrinsèque de l'alupe due à l'augmentation de son épaisseur. Ce constat milite donc pour une diminution de l'épaisseur de l'alupe afin d'améliorer la protection. Il faut néanmoins relativiser ce constat car une épaisseur d'alupe plus importante facilite également la circulation des charges et permet ainsi d'éviter la fusion de l'écran. Il importe donc, de rechercher un compromis entre l'épaisseur et la résistance de l'alupe.

III.4 Etude de la protection d'un réseau de desserte aéro-souterraine dans le cas d'un impact indirect de foudre

III.3.3.6 Synthèse

L'étude paramétrique menée sur différentes grandeurs électriques ou géométriques des constituants du réseau, a permis de mettre en évidence les phénomènes physiques permettant de conduire à une diminution des courants induits sur un câble de télécommunications enterré. Le Tableau III.6 synthétise l'impact de ces paramètres sur le courant induit sur le câble de télécommunications protégé par un conducteur de protection

	Evolution permettant une diminution de l'amplitude du courant	Evolution permettant une augmentation de la largeur à mi-hauteur du courant
Permittivité du sol	↘	↘
Permittivité relative de la gaine	↘	↗
Epaisseur de la gaine	↗	↘
Epaisseur de l'écran du câble de télécommunications	↘	↗

Tableau III-6 : Impact des différents paramètres sur le courant induit

Ces résultats mettent aussi en évidence le soin particulier à apporter dans la déclaration des paramètres géométriques de la ligne lors de sa modélisation. En effet, une variation de l'épaisseur de gaine de quelques millimètres entraîne une variation importante du courant induit.

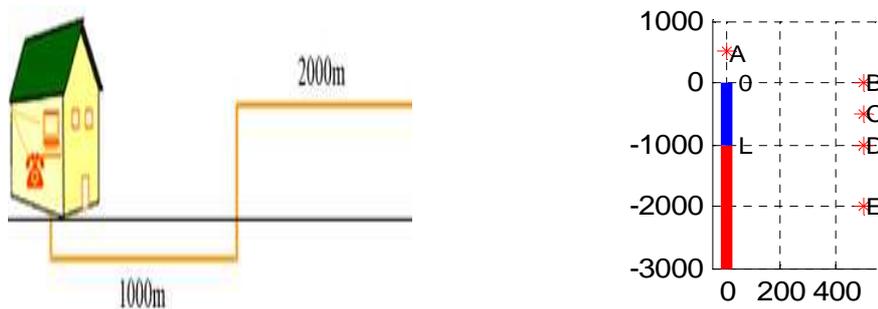
III.4 Etude de la protection d'un réseau de desserte aéro-souterraine dans le cas d'un impact indirect de foudre

La desserte des sites radiofréquences pouvant être assurée de manière aéro-souterraine, il est donc important de pouvoir estimer les courants induits pouvant être véhiculés par le réseau filaire vers le site relais lors d'un impact indirect de foudre. Afin de pouvoir évaluer le gain apporté par la présence d'un conducteur de protection (fil écran), l'étude est menée en deux étapes successives. En premier lieu, on effectue l'évaluation des courants induits sur un réseau non protégé et dans un deuxième temps on calcule les courants induits en présence du conducteur de protection.

III.4 Etude de la protection d'un réseau de desserte aéro-souterraine dans le cas d'un impact indirect de foudre

III.4.1 Cas d'une desserte aéro-souterraine non protégée

Le réseau étudié est composé d'un câble de télécommunications de 1000 m de longueur enfoui à une profondeur de 80 cm (trait rouge) et connecté à un câble de télécommunications aérien (trait bleu) d'une longueur de 2000 m, placé à 6 m au dessus d'un sol de résistivité égale à $2000 \Omega.m$, selon le synoptique de la Figure III-26. L'écran du câble de télécommunications est également mis à la terre à chaque extrémité et au niveau de la transition aéro-souterraine par l'intermédiaire d'une résistance de 40Ω .



Le réseau est illuminé par une onde foudre dont le courant à la base de l'arc en retour est représenté sur la Figure III-8 ($I_{\text{crête}}=12 \text{ kA}$) et dont les points d'impacts sont signalés par les points A, B, C, D et E sur la Figure III-26 et placés selon les coordonnées suivantes :

- Le point A est situé à 500m du début du réseau dans son axe au point de coordonnées $x=500 \text{ m}$ et $y=0$
- Le point B est situé au début du réseau au point de coordonnées $x=0$ et $y=500 \text{ m}$
- Le point C est situé au centre du réseau au point de coordonnées $x=-500 \text{ m}$ et $y=500 \text{ m}$
- Le point D est situé dans l'axe de la transition aéro-souterraine au point de coordonnées $x=-1000 \text{ m}$ et $y=500 \text{ m}$
- Le point E est situé à 500 m du centre du réseau aérien au point de coordonnées $x=-2000 \text{ m}$ et $y=500 \text{ m}$

Les points 0 et L du schéma représentent respectivement, le point de connexion du site radioélectriques, et le point d'interconnexion entre le réseau aérien et le réseau souterrain.

III.4 Etude de la protection d'un réseau de desserte aéro-souterraine dans le cas d'un impact indirect de foudre

Dans ces conditions, les courants induits sur l'écran du câble de télécommunications pour les différents points d'impact sont représentés sur les courbes de la Figure III-27.

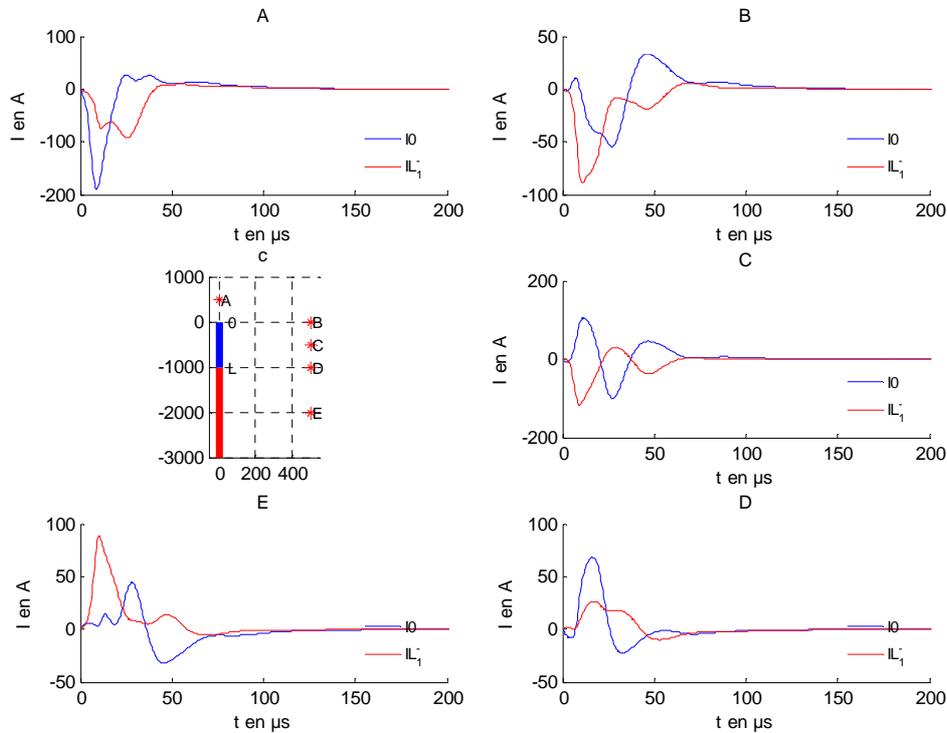


Figure III-27 : Courant induit sur le câble de télécommunications en $x=0$ et $X=L$ dans le cas d'une desserte aéro-souterraine non protégée

Les valeurs crêtes des courants induits en fonction de la position des points d'impact sont données dans le Tableau III-7

		A	B	C	D	E
Non Protégé	I0	184A	51A	100	66A	44A
	IL	88A	85A	112	25A	88A

Tableau III-7 : Courants sur le câble de télécommunications

Ces résultats permettent de mettre en évidence le niveau important du courant induit sur le câble de télécommunications enterré lors d'un impact proche. Néanmoins, le courant induit sur l'écran ne représente que 1.5% du courant de foudre dans le pire des cas (Position A).

Dans le cas d'une desserte de site radiofréquence, le point de connexion entre le site et le réseau se situe au point 0. On constate ainsi que les courants véhiculés vers le site par les adductions sont importants lorsque l'impact foudre est localisé dans l'axe du réseau et sont

III.4 Etude de la protection d'un réseau de desserte aéro-souterraine dans le cas d'un impact indirect de foudre

relativement plus faible dans le cas d'un impact situé à la même distance du réseau dans un plan parallèle à celui-ci (points B, C, D, E)

III.4.2 Cas d'une desserte aéro-souterraine protégée par conducteur de protection

De manière à quantifier le gain apporté par la présence du conducteur de protection, on modélise dans ce paragraphe la même topologie de réseau que celle du paragraphe III.4.1, mais en ajoutant un conducteur de protection au dessus du réseau souterrain. Le fil écran est constitué d'un conducteur nu connecté à ses deux extrémités à l'écran du câble de télécommunications mis à la terre par l'intermédiaire d'une résistance de 40Ω .

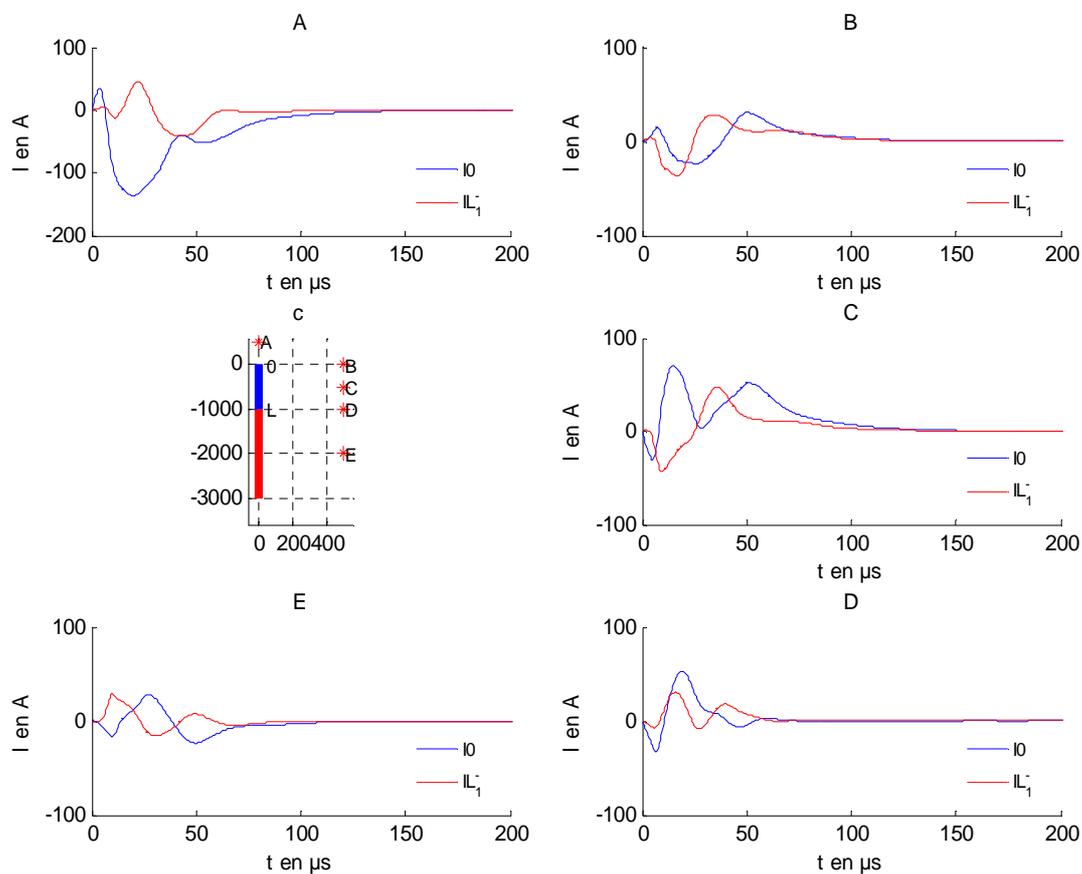


Figure III-28 : Courants induits sur le câble de télécommunications en $x=0$ et $X=L$ dans le cas d'une desserte aéro-souterraine protégée par conducteur de protection

Les valeurs crêtes des courants induits en fonction de la position des points d'impacts dans le cas d'une desserte protégée par conducteur de protection sont données dans le Tableau III-8

III.4 Etude de la protection d'un réseau de desserte aéro-souterraine dans le cas d'un impact indirect de foudre

		A	B	C	D	E
Protégé	I0	130A	23A	70	50A	27A
	IL	43A	34A	47	30A	28A

Tableau III-8 : Courant mesuré sur le câble de télécommunications

On note que malgré la présence du conducteur de protection, la répartition des courants le long du réseau souterrain reste identique au cas précédent. En effet, le cas le plus défavorable est celui pour lequel l'impact est situé dans l'axe du réseau, alors que le cas le moins défavorable est celui pour lequel l'impact est situé dans le plan perpendiculaire à l'entrée du réseau (point B).

III.4.3 Synthèse

Les valeurs crêtes des courants induits en $x=0$ et $x=L$ pour les différentes positions du point d'impact dans le cas d'une desserte protégée ou non sont rappelées dans le tableau III-9. Le calcul du gain obtenu est effectué selon la formule III-4

$$\text{Gain} = \frac{I_{L_{\text{non protégé}}} - I_{L_{\text{protégé}}}}{I_{L_{\text{non protégé}}}} \quad \text{III-4}$$

		A	B	C	D	E
Non Protégé	I0	184A	51A	100	66A	44A
	IL	88A	85A	112	25A	88A
Protégé	I0	130A	23A	70	50A	27A
	IL	43A	34A	47	30A	28A
Gain	I0	29,3%	54,9%	30,0%	24,2%	38,6%
	IL	51,1%	60,0%	58,0%	-20,0%	68,2%

Tableau III-9 : Courants sur le câble de télécommunications avec et sans protection

Ces résultats permettent de quantifier le gain obtenu en terme de protection par la mise en place d'un conducteur de protection dans le cadre d'une agression indirecte de type foudre. On note ainsi que le conducteur de protection permet de diminuer le courant induit sur l'écran du câble de télécommunications d'environ 30% en $x=0$ et de 51% en $x=L$ dans le cas le plus défavorable (point A). Le maximum d'efficacité est quant à lui obtenu dans le cas d'un impact foudre situé à 500m du centre du câble aérien.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

Dans le paragraphe précédent nous avons étudié la protection d'une desserte aéro-souterraine d'un site lors d'un impact indirect de foudre. Dans cette section nous allons étudier le cas où l'impact de foudre se produit sur le bâtiment du site radioélectrique. Dans cette situation, la remontée de potentiel du réseau de terre du site engendre des courants sur les conducteurs qui pénètrent dans le bâtiment. Afin de diminuer l'amplitude des courants générés sur le réseau d'adduction, on installe un ou plusieurs conducteurs de protection, selon la configuration de la Figure III-29

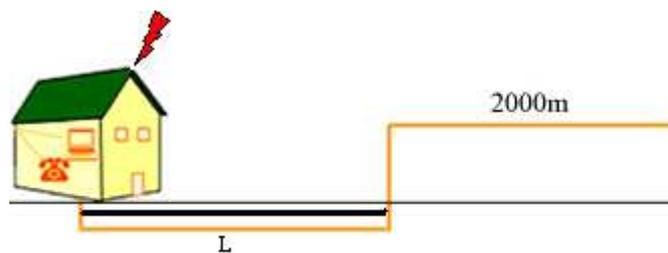


Figure III-29: Configuration avec conducteur de protection dans le cadre d'un impact direct sur un bâtiment

Le ou les conducteurs de protection sont installés sur une longueur L pouvant aller de 500 à 1000m et sont mis à la terre avec l'écran du câble de télécommunications à la distance L. Le conducteur écran est un câble multibrin pouvant être modélisé par un conducteur unique de 6.5mm de diamètre.

Afin de diminuer les coûts de génie civil liés à l'implantation du / des conducteurs de protection sur une grande longueur, nous proposons dans ce paragraphe, une étude permettant la détermination de la longueur minimale (optimale) permettant la protection du réseau et ce en fonction du nombre de conducteurs de protection et de la résistivité du sol.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

III.5.1 Cas d'un seul conducteur de protection

III.5.1.1 Configuration modélisée

Afin de déterminer la répartition des courants sur les différents conducteurs de l'adduction, nous étudions la configuration représentée sur la Figure III-30 en considérant comme résistivité du sol la valeur de $2000 \Omega.m$. Le conducteur écran étant placé à une profondeur de 40 cm.

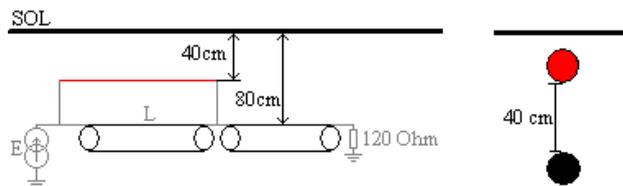


Figure III-30: Schéma de principe

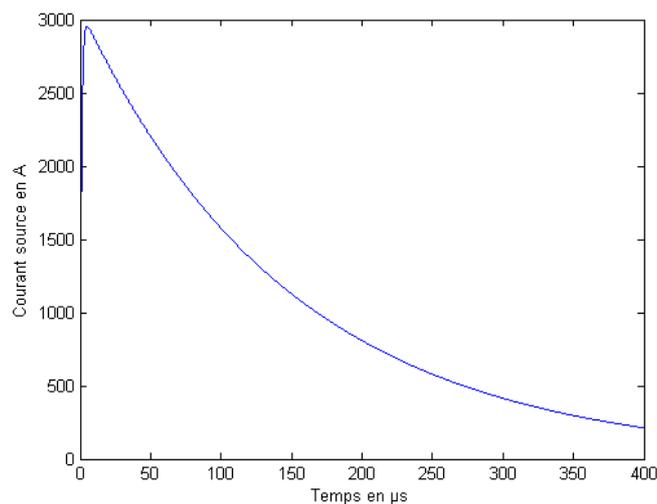


Figure III-31: Source de Courant

La source de courant utilisée, pour les différentes configurations, est représentée par la Figure III-31. Cette source, de type 10/350 et d'amplitude 3kA, représente la partie du courant de foudre qui est injectée sur les différents conducteurs enterrés lors du foudroiement direct du bâtiment. De manière empirique, on estime que 50% du courant de foudre ayant impacté la structure s'écoule dans le réseau de terre, le reste se partage entre tous les conducteurs métalliques pénétrants dans le site (télécom, énergie, eau, etc....).

Dans cette partie de l'étude, l'influence des adductions sur la répartition du courant au sein du bâtiment, ainsi que le rayonnement de ce dernier sont négligés. L'étude complète du foudroiement d'un bâtiment sera traitée dans le chapitre IV.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

III.5.1.2 Calcul du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications

Les courbes de la Figure III-32, représentent respectivement, pour différentes valeurs de la longueur L , le courant circulant sur le câble de télécommunications en $x=0$, $x=L^-$ (en amont de la mise à la terre), et $x=L^+$ (en aval de la mise à la terre).

On peut noter que pour des longueurs L inférieures à 200 m, on retrouve sur le blindage du câble de télécommunications un courant qui représente entre 35% et 50% de la valeur du courant source. Pour des longueurs L supérieures à 200m, le courant ne représente plus que 25% du courant source.

De plus, il apparaît que le courant sur le blindage du câble de télécommunications est plus élevé au point $x=L^-$ qu'au point $x=0$. Cette augmentation s'explique par la contribution du couplage entre le câble de télécommunications et le conducteur de protection.

La troisième courbe relative au courant calculé au point $x=L^+$, permet de mettre en évidence l'importance de la connexion entre le conducteur de protection et le blindage du câble de télécommunications. En effet, dans ce cas, la connexion entre les conducteurs de protection et le blindage du câble de télécommunications permet d'évacuer entre 40 et 50% du courant.

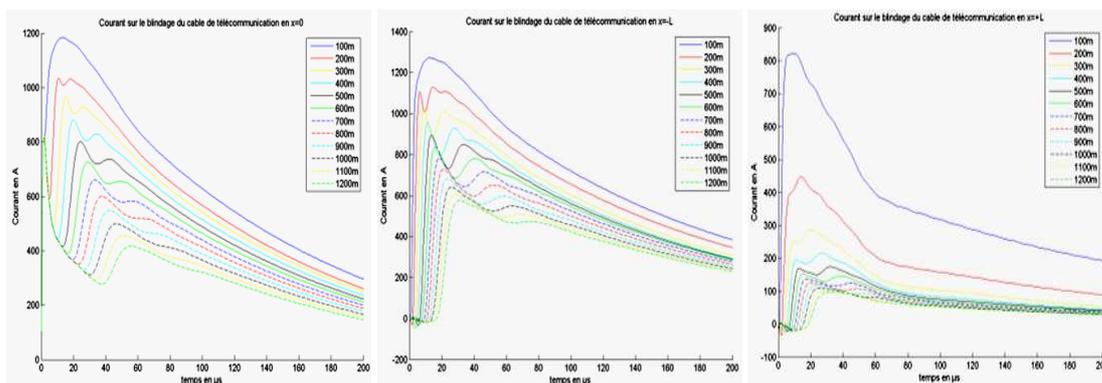


Figure III-32 : Représentation des courants sur le blindage du câble de télécommunications pour différentes valeurs de L

III.5.1.3 Calcul du courant circulant sur le conducteur écran

Les courbes de la Figure III-33 représentent respectivement, pour différentes longueur L , le courant circulant sur le conducteur de protection en $x=0$ et $x=L$.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

Les résultats de la première courbe montrent qu'environ 50% à 75% du courant source est drainé par le conducteur de protection.

La seconde courbe met en évidence une inversion de signe du courant ce qui traduit bien le rôle joué par le conducteur écran dans la dissipation du courant circulant sur le câble de télécommunications en $x=L$.

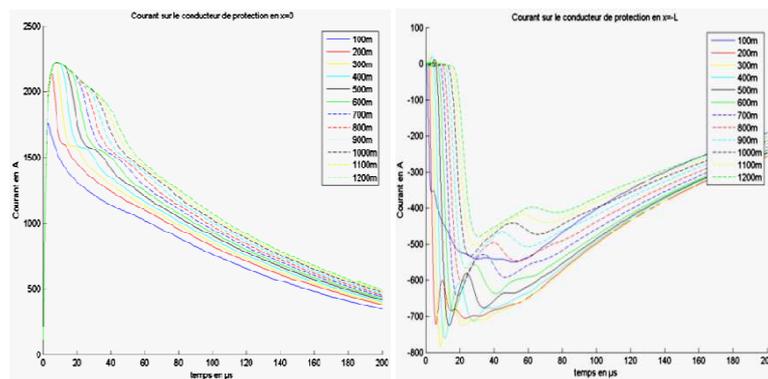


Figure III-33 : Représentation des courants circulant sur le conducteur écran en $x=0$ et $x=L$

III.5.1.4 Synthèse

Sur la base des résultats précédents, on peut conclure sur l'importance du rôle joué par le conducteur écran dans la protection contre la foudre des câbles enterrés assurant l'adduction des bâtiments. Les résultats font apparaître que la protection est d'autant plus efficace que la longueur du conducteur écran est importante. Néanmoins, d'un point de vue exploitation, il peut s'avérer difficile et coûteux de mettre un conducteur de protection sur une grande longueur, aussi convient-il de rechercher en fonction de la conductivité du sol, une optimisation de la protection en déterminant la longueur minimale pour laquelle une protection est encore assurée.

On fera l'hypothèse que la protection est optimale lorsqu'un maximum de courant source circule sur le conducteur de protection, et de part ce fait un minimum de courant sur les adductions du site.

Sur la Figure III-34, nous avons donc calculé le rapport entre le courant circulant sur le conducteur écran et le courant source en fonction de la longueur L et pour différentes valeurs de résistivité du sol.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

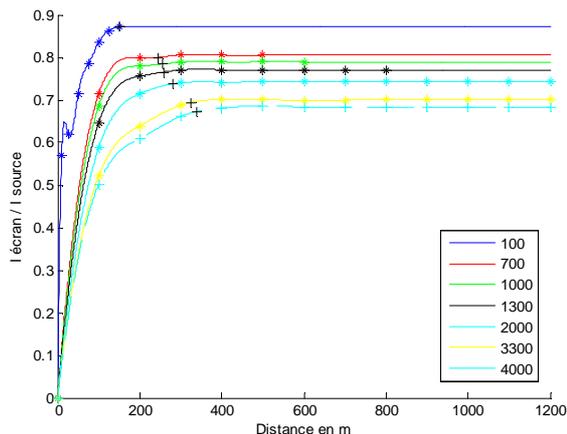


Figure III-34 : Rapport I conducteur de protection / I source pour différentes valeurs de résistivités du sol

On note, qu'à partir d'une certaine longueur L , le courant qui circule dans le conducteur de protection tend vers une valeur asymptotique d'autant plus élevée que la conductivité du sol est faible.

A titre d'exemple, pour une résistivité de $2000 \Omega.m$, la protection optimale est obtenue pour une longueur L voisine de 300 m, mais on ne pourra écouler, dans ce cas, que 70% du courant source.

Ainsi, il est plus intéressant de représenter la longueur permettant d'obtenir un drainage maximum du courant source par le conducteur écran en fonction de la résistivité du sol. C'est ce qui est fait sur la Figure III-35.

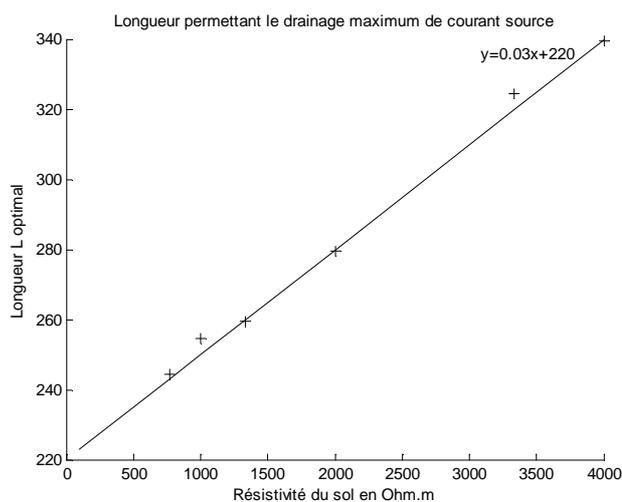


Figure III-35 : Longueur optimale du conducteur de protection

La Figure III-35 met en évidence, une relation linéaire permettant de lier la longueur optimale et la résistivité du sol pouvant être traduit par la fonction suivante:

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

$$L_{optimale} = 0.03 * \rho_{sol} + 220$$

III-5

Avec $L_{optimale}$: longueur du conducteur de protection permettant d'obtenir un maximum de courant sur le conducteur de protection

ρ_{sol} : Résistivité du sol en Ohms mètre

III.5.2 Cas de deux conducteurs de protection

III.5.2.1 Configuration modélisée

L'intérêt de cette étude est d'évaluer le gain apporté par l'ajout d'un conducteur de protection supplémentaire. Afin de modéliser cela, nous utiliserons le schéma de la Figure III-36. Les conducteurs de protection sont positionnés de part et d'autre du conducteur de télécommunications, à une profondeur de 40 cm dans un sol présentant une résistivité de 2000 Ω .m.

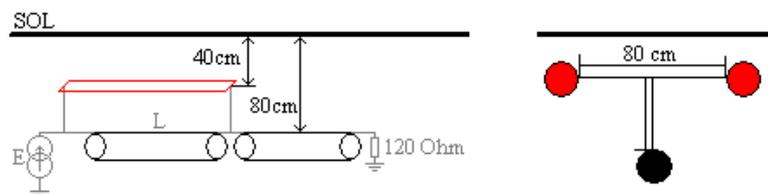


Figure III-36 : Schéma de principe pour l'implantation de deux conducteurs de protection

La source de courant E utilisée dans cette configuration est prise identique à celle de la Figure III-31 afin de pouvoir effectuer une comparaison entre les différentes configurations.

III.5.2.2 Calcul du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications

Les courbes de la Figure III-37 représentent, respectivement, les courants circulant sur le blindage du câble de télécommunications en $x=0$, $x=L-$, et $x=L+$ pour différentes valeurs de la longueur L.

Les résultats relatifs à la première courbe, représentant le courant en $x=0$, montrent que 16 à 33% du courant source circule sur le blindage de câble pour des longueurs L allant de 100 à 1200m. La comparaison avec les résultats obtenus dans le cas de la simulation d'un seul câble de garde, où on retrouvait 25% à 50% du courant source dans le blindage du

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

câble de télécommunications, permet de montrer l'intérêt d'un second conducteur de protection.

De plus, il apparaît que les courants en $x=L$, présentés sur la deuxième courbe, sont plus importants que ceux injectés en $x=0$, ce qui traduit un couplage entre les conducteurs de protection et le blindage du câble de télécommunications.

La troisième courbe représentant le courant sur le blindage du câble de télécommunications en aval de la connexion avec les conducteurs écran, permet de montrer l'importance de l'interconnexion entre les différents conducteurs, car elle permet l'évacuation de 40 à 50% des courants circulant en amont.

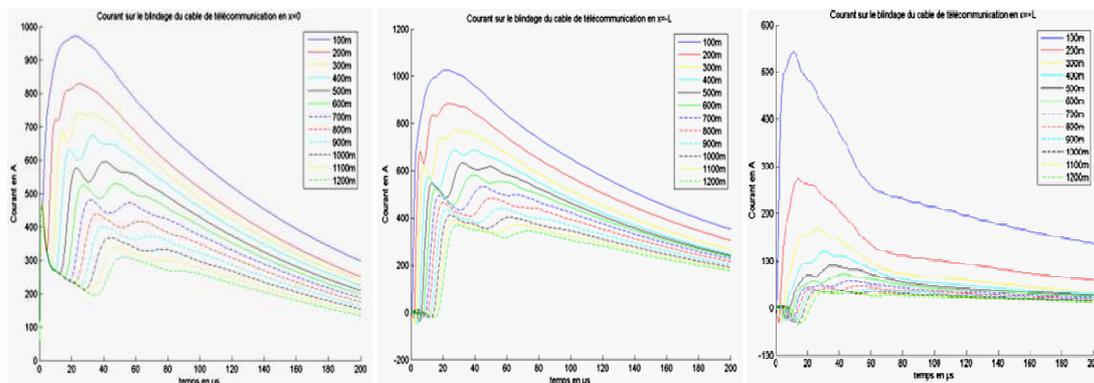


Figure III-37 : Représentation des courants circulant sur le câble de télécommunications pour différentes longueurs L

III.5.2.3 Calcul du courant circulant sur les conducteurs de protection

Les courbes de la Figure III-38, sont représentatives de la somme des courants circulant sur les deux conducteurs de protection en $x=0$ et en $x=L$ pour un sol ayant une résistivité de $2000 \Omega.m$.

Les résultats de la première courbe montrent que 66% à 84% du courant généré sur les adductions est capté par les conducteurs de protection contre 50 à 75% dans le cas de deux conducteurs écran.

De plus, la seconde courbe montre, que suite à l'inversion du signe du courant, les conducteurs écrans jouent un rôle important dans le drainage du courant en $X=L$.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

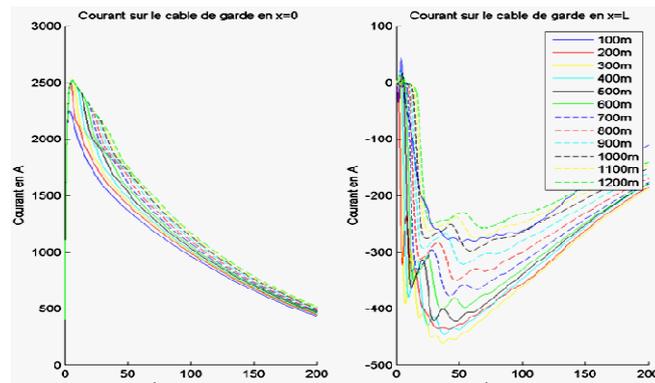


Figure III-38 : Représentation de la somme des courants circulant sur les conducteurs écrans pour différentes longueur L

III.5.2.4 Synthèse

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure sur l'intérêt d'utiliser un second conducteur de protection. En effet, ce dernier permet d'augmenter la valeur du courant capté par le dispositif de protection dans les cas où la résistivité du sol est importante.

Les courbes de la Figure III-39 représentent le rapport entre la somme des courants captés par les conducteurs de protection et le courant source pour différentes valeurs de la résistivité du sol. On note, par exemple, que pour une résistivité de $4000 \Omega.m$, 75% du courant source sera capté par la protection, contre 68% dans le cas d'un seul conducteur de protection.

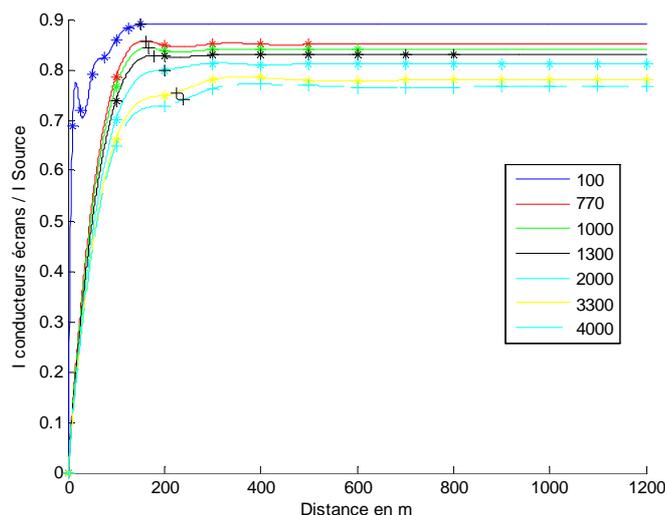


Figure III-39 : Rapport I conducteur de protection équivalent / I source pour différentes valeurs de résistivités

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

On notera, qu'au delà d'une longueur L, le rapport entre le courant circulant sur les conducteurs écran et le courant source reste constant et tend vers une valeur maximale d'autant plus grande que la résistivité du sol est faible.

Il est alors possible de déterminer la longueur optimale permettant d'obtenir un maximum de courant sur les conducteurs de protections. Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur la Figure III-40.

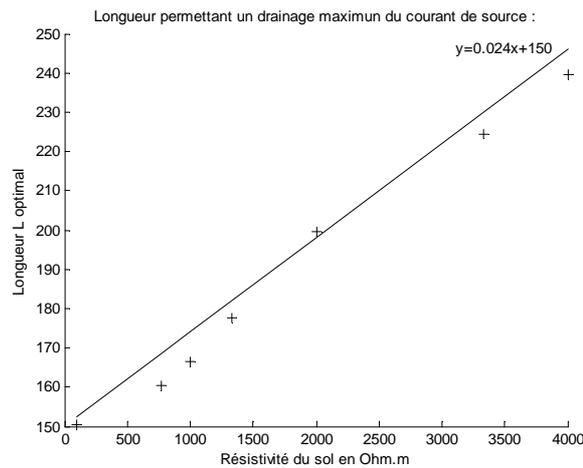


Figure III-40 : Longueur optimale des conducteurs écrans

On constate que la fonction, représentant les variations de la longueur optimale en fonction de la résistivité du sol, est de type affine et peut donc être définie par la relation suivante:

$$L_{optimale} = 0.024 * \rho_{sol} + 150 \quad \text{III-6}$$

Avec $L_{optimale}$: longueur du conducteur de protection permettant d'obtenir un maximum de courant sur le conducteur de protection

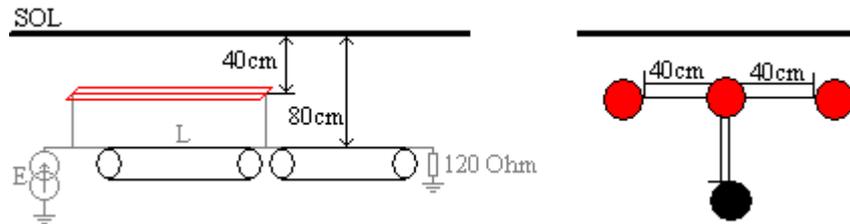
ρ_{sol} : Résistivité du sol en Ohms.mètre

III.5.3 Cas de trois conducteurs de protection

III.5.3.1 Configuration modélisée

Dans cette étude, nous chercherons à évaluer le gain apporté par l'ajout d'un troisième conducteur de protection enterré à 40cm de profondeur à l'aplomb des adductions du site point haut, comme le présente la Figure III-41.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]



Afin de pouvoir évaluer l'apport d'un conducteur supplémentaire, on utilise la même source E (Figure III-31) que celle des paragraphes précédents en considérant une conductivité de sol homogène de $2000 \Omega.m$

III.5.3.2 Calcul du courant circulant sur le blindage du câble de télécommunications

Les courbes de la Figure III-42, représentent les courants circulant sur le blindage du câble de télécommunications en $x=0$, $x=L-$ et $x=L+$, lorsque que celui-ci est protégé par trois conducteurs de protection.

Les courbes de la première figure montrent que 15% à 30% du courant de source circule sur le blindage du câble de télécommunications.

Comme dans les paragraphes précédents, les graphiques deux et trois montrent, respectivement, une augmentation du courant entre $x=0$ et $x=L-$ traduisant le couplage entre les différents conducteurs composant le réseau d'adduction, et une diminution de 40 à 50 % du courant due à la connexion des conducteurs de protection à l'écran du câble de télécommunications en $x=L$.

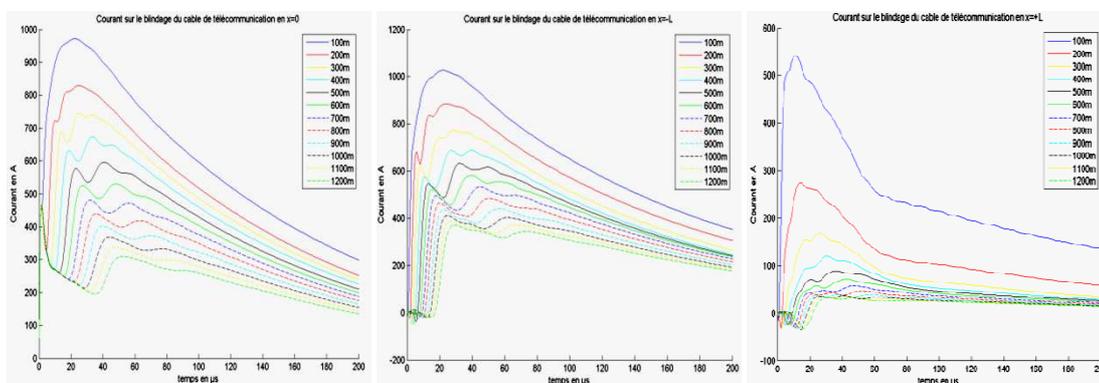


Figure III-42 : Répartition des courants sur le câble de télécommunications

III.5.3.3 Calcul du courant circulant sur les conducteurs de protection

Les courbes de la Figure III-43, représentent la somme des courants circulant sur les deux conducteurs de protection en $x=0$ et en $x=L$ pour un sol ayant une résistivité de $2000 \Omega.m$.

Les résultats du premier graphique montrent que 70% à 85% du courant généré sur les adductions est capté par les conducteurs de protection contre 68 à 84% dans le cas d'un seul conducteur de protection [III.5.1.3].

De plus, le deuxième graphique montre, que suite à l'inversion de signe du courant, les conducteurs écrans jouent un rôle important dans le drainage du courant en $X=L$ -

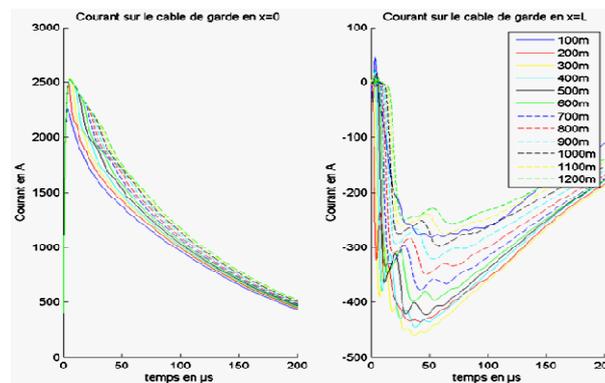


Figure III-43 : Représentation de la somme des courants circulant sur les conducteurs écrans pour différentes longueurs L

III.5.3.4 Synthèse

Sur la base des résultats obtenus, on peut conclure sur l'intérêt d'utiliser un troisième conducteur de protection. En effet, ce dernier permet d'augmenter la valeur du courant capté par le dispositif de protection dans les cas où la résistivité du sol est importante.

Les courbes de la Figure III-44 représentent le rapport entre la somme des courants captés par les conducteurs de protection et le courant de source pour différentes valeurs de résistivité du sol. Ainsi, pour une résistivité de $4000 \Omega.m$, 78%, du courant source sera capté par la protection, contre 68% dans le cas d'un seul conducteur de protection.

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

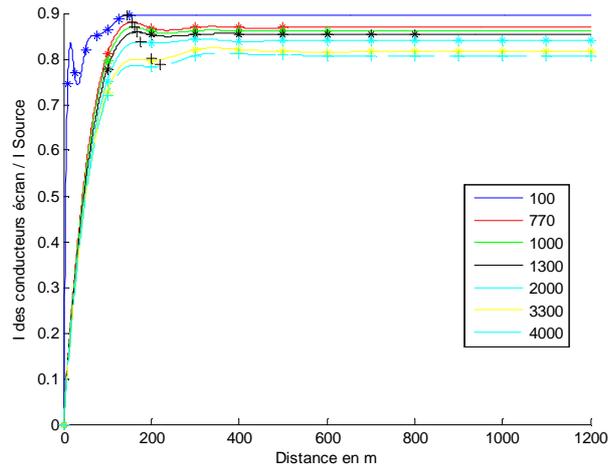


Figure III-44 : Rapport I conducteur de protection / I source pour différentes valeurs de résistivités

On peut voir sur la Figure III-44, qu'il existe une longueur optimale permettant d'obtenir le maximum de circulation sur les conducteurs de protection. Cette longueur optimale est représentée sur la Figure III-45 en fonction de la résistivité du sol.

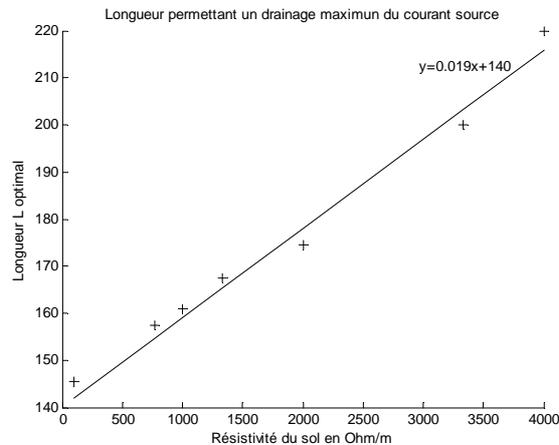


Figure III-45 : Longueur optimale du conducteur de garde

la longueur optimale peut donc être définie par le relation suivante :

$$L_{optimale} = 0.019 * \rho_{sol} + 140 \quad \text{III-7}$$

Avec $L_{optimale}$: longueur du conducteur de protection permettant d'obtenir un maximum de courant sur le conducteur de protection

ρ_{sol} : Résistivité du sol en Ohms mètre

III.5.4 Synthèse générale

L'objectif de ce paragraphe était de déterminer une règle d'ingénierie permettant l'optimisation de la protection des sites point haut, et de mettre en évidence l'intérêt de la protection par conducteur de protection. Pour cela, nous avons simplifié la problématique, par l'utilisation d'un générateur localisé représentant la proportion du courant de foudre arrivant sur les adductions lors d'un impact direct sur un bâtiment. Il est donc supposé que le rayonnement du bâtiment est négligeable pour cette configuration.

Pour cela, une étude de la répartition des courants sur les différents conducteurs composant l'adduction a été menée, afin de déterminer une longueur optimale basée sur l'hypothèse suivante : La protection est optimale quand les conducteurs de protection véhiculent le maximum de courant.

Nous avons ainsi montré qu'en fonction du nombre de conducteurs écrans et de leurs configurations d'installation (rappelées, en Figure III-46), il existe une longueur minimale permettant d'obtenir une protection efficace du câble de télécommunications placé en dessous.

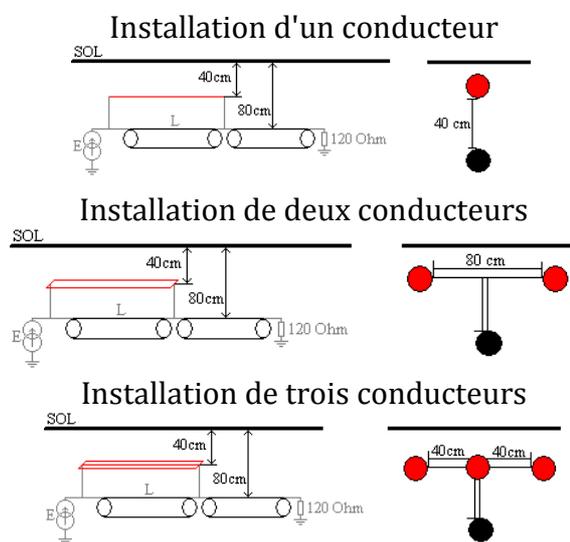


Figure III-46: Règles d'installation

III.5 Etude de la protection d'un site radioélectrique par conducteur de protection lors d'un impact direct. [71]

Cette longueur pouvant être déterminée à l'aide des droites de la Figure III-47 représentant la longueur permettant d'obtenir un minimum de courant sur le câble de télécommunications, pour une résistivité du sol donnée.

Cette longueur optimale peut également être déterminée à partir des relations suivantes :

$$L_{optimale} = 0.03 * \rho_{sol} + 220 \text{ pour 1 conducteur écran} \quad \text{III-8}$$

$$L_{optimale} = 0.024 * \rho_{sol} + 150 \text{ pour 2 conducteurs écran} \quad \text{III-9}$$

$$L_{optimale} = 0.019 * \rho_{sol} + 140 \text{ pour 3 conducteurs écran.} \quad \text{III-10}$$

Avec $L_{optimale}$: longueur du conducteur de protection permettant d'obtenir un maximum de courant sur le conducteur de protection

ρ_{sol} : Résistivité du sol en Ohms.mètre

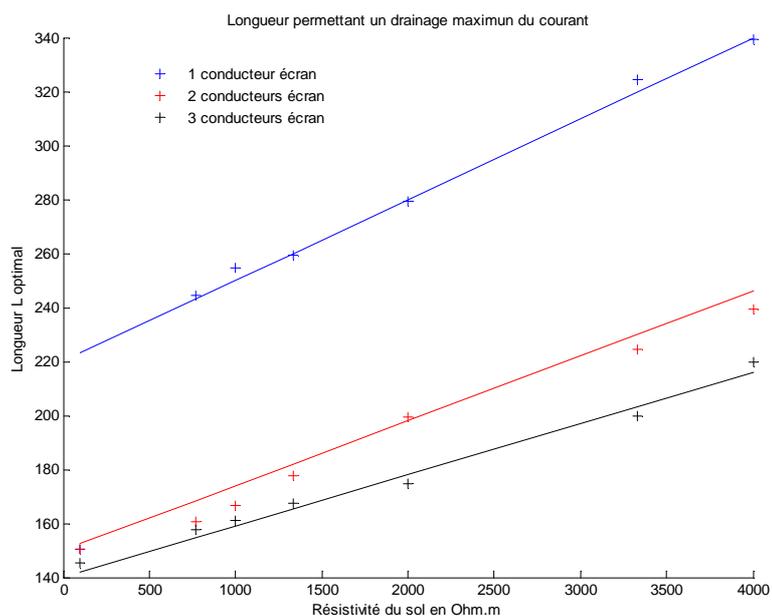


Figure III-47 : Longueur optimale du/des conducteur(s) de protection

Il convient de remarquer que cette distance optimale est une distance permettant d'obtenir un compromis entre la longueur des conducteurs de protection et leur efficacité d'écoulement. En effet, lorsque la configuration du site le permet, une longueur L plus importante ne sera que bénéfique. Dans les cas où une telle distance L optimale ne peut être respectée, il conviendra alors d'utiliser une autre architecture de protection. Dans le

cadre d'une desserte comprenant plusieurs câbles de télécommunications il convient d'appliquer cette méthode de protection sur chacun d'eux.

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'influence de l'installation d'un ou plusieurs conducteurs de protection sur les courants induits par une onde de type foudre sur un réseau de télécommunications enterré. Cette étude a été réalisée à l'aide d'une méthode de calcul basée sur la théorie des lignes de transmission dans le domaine fréquentiel couplée à une approche topologique.

En tout premier lieu, nous avons utilisé les résultats expérimentaux obtenus lors d'une campagne de mesure réalisée à l'aide d'éclairs déclenchés sur le site de Cachoëra Paulista (Brésil). Les tests réalisés visaient à mettre en évidence le gain induit par la présence d'un conducteur de protection lors d'un impact direct de type foudre. L'analyse de ces résultats, nous a permis de valider le principe de protection des câbles enterrés basé sur l'utilisation d'un conducteur de protection.

Les résultats expérimentaux nous ont également permis de valider la manière de modéliser le problème et de mener une étude théorique complémentaire pour analyser et comprendre les mécanismes d'agression de la foudre sur le réseau expérimental. Cette analyse nous a permis d'aboutir aux constatations suivantes :

- Lors d'un impact de foudre direct sur un réseau souterrain protégé par un conducteur de protection, le câble de télécommunications n'est pas systématiquement impacté. Le conducteur de protection offre donc une protection physique au câble situé à son aplomb
- Le courant induit sur le conducteur de protection est essentiellement dû à la composante conduite.
- Le courant induit sur le câble de télécommunications est dû à la somme des deux composantes induite et conduite.
- Le rayonnement de l'arc ne peut pas être négligé dans le cadre de la modélisation d'un réseau de distribution souterrain, y compris dans le cas d'un impact direct.

III.6 Conclusion :

Nous avons ensuite effectué une étude paramétrique dont la première partie a permis d'élaborer un abaque permettant la détermination du pouvoir de dissipation linéique d'un conducteur nu enterré en fonction de la conductivité du sol. La seconde partie, quant à elle, a permis de mettre en lumière l'influence des différents paramètres physiques et géométriques sur la valeur des courants induits.

Une fois démontré le gain de protection dans le cas d'un impact direct, nous nous sommes ensuite intéressés à l'évaluation des courants induits aux extrémités du réseau souterrain dans le cas d'un impact à proximité du réseau. Les résultats de l'étude ont ainsi permis de mettre en évidence une diminution moyenne de 60% de l'amplitude des courants induits et véhiculés par le réseau vers un bâtiment grâce à la présence d'un conducteur de protection.

La dernière partie de ce chapitre a abordé le cas de la protection par fil nu appliquée à la protection des adductions lors du foudroiement d'un bâtiment. Les résultats des nombreuses simulations numériques, nous ont permis de proposer des règles d'optimisation de la protection afin de réduire les coûts de génie civil, et ce notamment grâce à l'introduction de formules simples permettant le calcul de la longueur optimale des conducteurs de protection en fonction de la résistivité du sol et de la topologie de protection employée.

Dans le prochain chapitre, nous allons aborder l'étude d'un site radiofréquence impacté par un cout de foudre direct afin de d'évaluer la répartition du courant de foudre sur les différentes parties de la structure foudroyée en y incluant les câbles constituant les adductions.

Chapitre IV : Etude des perturbations Electromagnétiques dues à un impact foudre sur une structure complexe composée d'un bâtiment et d'adductions.

IV.1 Introduction

L'amélioration de la couverture du réseau mobile et l'avènement de nouvelles technologies a provoqué une augmentation du nombre de stations radioélectriques. Un certain nombre de ces stations de bases sont dites « sensibles », car elles sont implantées au dessus de leur environnement afin d'améliorer la zone de couverture radio. Cela en fait donc une cible privilégiée en cas d'orage.

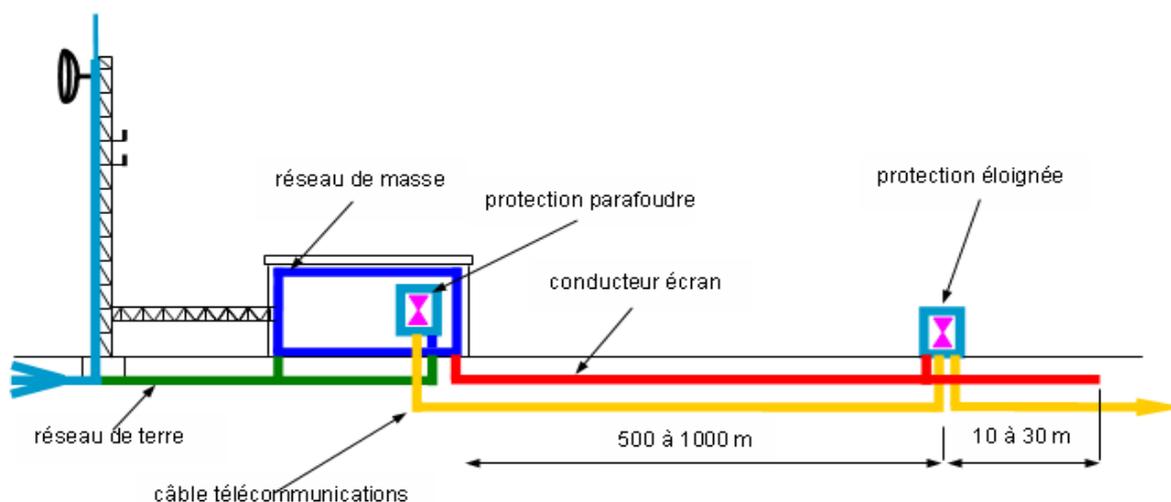


Figure IV-1 : Synoptique de la protection des adductions d'un site point haut

Comme indiqué sur la Figure IV-1, une station de base est constituée de manière générale de trois éléments :

- Un pylône

Le pylône est constitué d'un mât d'une hauteur de 20 à 40 cm constitué d'un ou plusieurs étages, pouvant accueillir des antennes radios. Les antennes sont reliées au bâtiment par un câble coaxial, ou feeder, dont l'écran est connecté au pylône à intervalles réguliers.

Son réseau de terre est formé par une ceinture connectée aux quatre pieds du pylône, enfouie à une profondeur de 40 cm. La dissipation des charges par le réseau de terre du pylône est renforcée par la mise en place d'une patte d'oie constituée de trois fils nus placés en pleine terre et connectés au réseau en un point.

Afin d'assurer l'équi-potentialité du site, le pylône et le bâtiment sont interconnectés par l'intermédiaire d'un chemin de câble, et d'un conducteur nu reliant les deux ceintures de terre

- Un bâtiment technique :

Le bâtiment technique a pour rôle d'abriter tous les équipements électroniques nécessaire au transfert de données entre la station de base et le reste du réseau. L'équi-potentialité du bâtiment est assurée par la mise en place d'une ceinture de masse sur laquelle seront reliées les masses et terres des équipements. La ceinture de masse est, quand à elle, connectée au réseau de terre du bâtiment en un ou plusieurs points.

Le réseau de terre du bâtiment est formé d'une grille ou d'une ceinture placée en dessous du bâtiment et connecté au bâtiment en un ou plusieurs points.

- Les adductions

Les adductions représentent le seul lien physique entre le site de radio-télécommunications et le réseau. Elles offrent donc, un chemin privilégié à la perturbation vers le reste du réseau. Leurs protections est assurées par la mise en place de parafoudre à gaz en entrée de site et en protection éloignée afin de diminuer les courants se propageant vers le reste du réseau. En sortie de site les adductions sont également protégées par l'implantation de conducteurs nus placés en pleine terre.

Au cours de ce chapitre, il sera réalisé l'étude de la structure complète selon différentes configurations afin d'évaluer le pouvoir de dissipation de chaque élément, permettant une diminution du courant induit sur les conducteurs composants les adductions, et par là même le reste du réseau.

IV.2 Méthode de modélisation d'une structure complexe par la méthode des différences finies

IV.2.1 Le logiciel Open TEMSI-FD

La modélisation d'une station de base demande l'utilisation d'un code de modélisation en 3 dimensions dont la présentation théorique est rappelée dans le chapitre 2.

Le solveur OPEN-TEMSI-FD [72] [73], développé par le laboratoire XLIM, présente de nombreuses possibilités permettant la modélisation fidèle de l'infrastructure notamment par l'utilisation des fonctionnalités suivantes :

- Des conditions absorbantes de type PML aux frontières permettant la modélisation en espace libre.
- Un formalisme des fils minces suivant les arêtes du maillage permettant la prise en compte de fil nu ou isolé.
- Matériaux volumiques à pertes électriques ou sans pertes, permettant de modéliser des milieux de conductivités différents (sol à perte, béton)

IV.2.2 Présentation de l'infrastructure modélisée :

Afin de pouvoir rester le plus proche d'une structure réelle tout en restant dans des temps de calcul raisonnable, la structure modélisée est composée des éléments décrits ci-dessous.

- Un pylône de 30m de hauteur constitué de deux étages de 15m.
- Etage inférieur : 4m/4m/15m
- Etage supérieur : 1m/1m/15m
- Un bâtiment de 4m/4m/2m
- Un chemin de câble entre le bâtiment et le pylône
- Un réseau de terre sous le bâtiment constitué d'une grille de 4.4 m (axe x) / 5 m (axe y) ayant un pas de 40cm selon x et 1m selon y placé à 40 cm de profondeur.

IV.2 Méthode de modélisation d'une structure complexe par la méthode des différences finies

- Un réseau de terre sous le pylône constitué d'une ceinture en fond de fouille de 4m/4m enterrée à 40 cm de profondeur. La ceinture est constituée de 4 conducteurs nus de 6.5 mm de rayon.
- Une interconnexion entre le réseau de terre du pylône et celui du bâtiment réalisée à l'aide d'un conducteur nu de 6.5 mm de rayon et de 4m de longueur.
- Une patte d'oie composée de 3 brins de 10 m, connectés à un angle du réseau de terre du pylône, modélisée par un fil nu de 6.5 mm de rayon.
- Un réseau d'adduction composé d'un conducteur isolé modélisant le câble de télécommunication et d'un conducteur nu sur une longueur de 300 m. Ce réseau est connecté au réseau de terre du bâtiment d'une part et aux PML d'autre part, afin de modéliser un conducteur semi-infini. Il est important de choisir une longueur assez importante afin d'obtenir l'impédance caractéristique de la ligne.

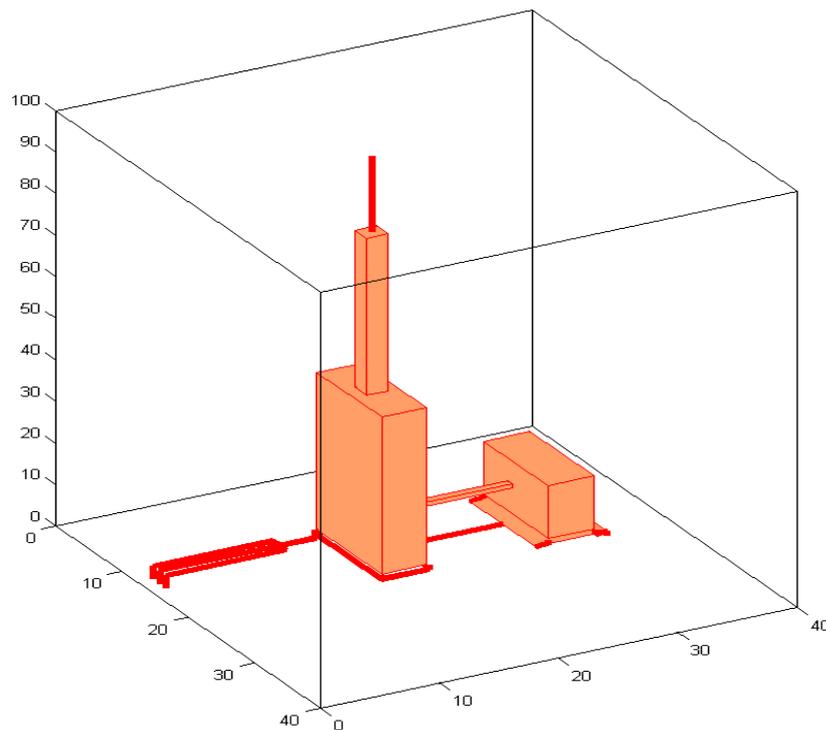


Figure IV-2 : Schématisation de la structure modélisée

La structure obtenue est représentée par la Figure IV-2, et est posée sur un sol de conductivité finie présentant une résistivité de $2000 \Omega.m$ et une permittivité de 10. L'interconnexion entre les différents éléments est réalisée selon les indications du Tableau IV-10.

IV.2 Méthode de modélisation d'une structure complexe par la méthode des différences finies

Elements	Connexion	Parametres
Paratonnerre	Connexion au centre de la partie supérieur du deuxième étage	L=1 m
Patte d'oie	Connexion en 1 point sur le réseau de terre du pylône Terminaison en CO aux extrémités	L=10 m H=-0.8 m
Terre Pylône	Connexion en 4 points au Pylône	H=-0.8 m
Terre bâtiment	Connexion en 4 points au réseau de terre du bâtiment	H=-0.8 m
Adduction	Conducteur de protection : Extrémité 1 : Connexion au réseau de terre du bâtiment Extrémité 2 : Adapter	H=-0.8 m L=1200 m
	Conducteur de Télécommunications: Extrémité 1 : Connexion au réseau de terre du bâtiment Extrémité 2 : Adapter	H=-1.2 m L=1200 m

Tableau IV-10 : Détail des points d'interconnexions

IV.2.3 Représentation du canal foudre

Le canal foudre est représenté par un fil sans pertes dont la partie inférieure est connectée à la structure par l'intermédiaire du paratonnerre et connecté dans sa partie supérieure au PML afin d'éviter toute réflexion à son extrémité. La source de courant est une onde normalisée de type 1.2/50 avec une amplitude de 200 kA comme représenté sur la Figure IV-3.

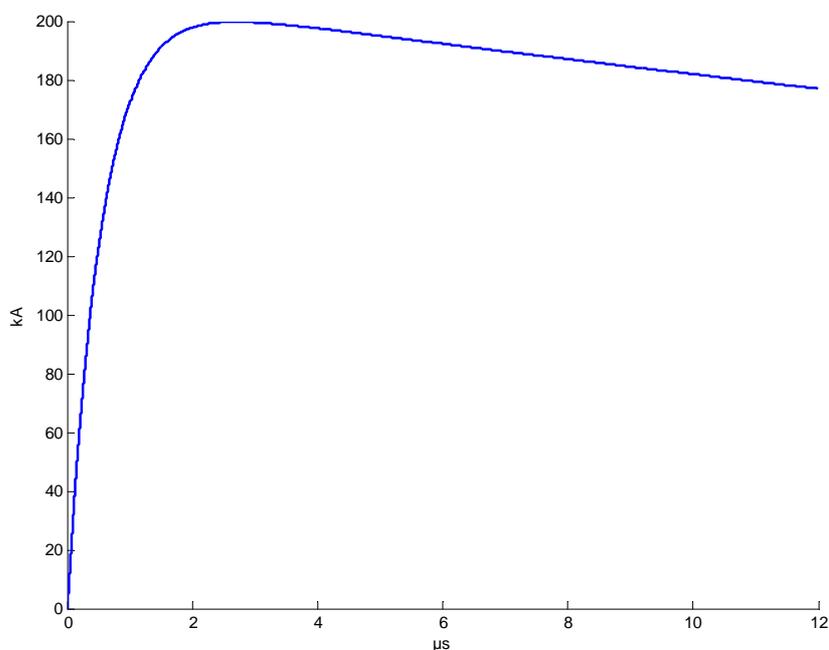


Figure IV-3 : Forme d'onde de la source de courant

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

Afin de simplifier la compréhension des résultats obtenus, la structure, définie au IV.2 , est divisée en trois parties: le pylône et son réseau de terre, le bâtiment et son réseau de terre, et les adductions.

IV.3.1 Etude des courants circulant sur le Pylône

IV.3.1.1 Courant circulant sur la ceinture de terre

Le pylône est connecté à son réseau de terre en 4 points selon le schéma de la Figure IV-4

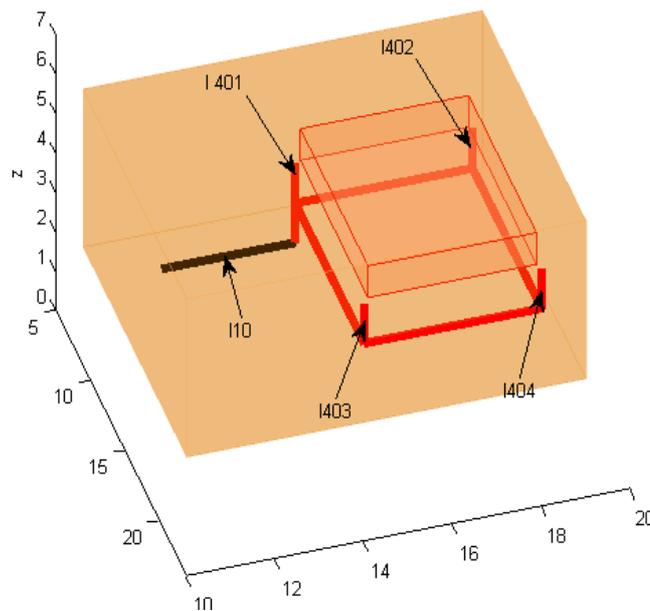


Figure IV-4 : Schéma de principe de connexion du pylône à la ceinture de terre

Les courants induits sur chaque brin reliant le pylône à la ceinture de fond fouille sont représentés sur la Figure IV-5

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

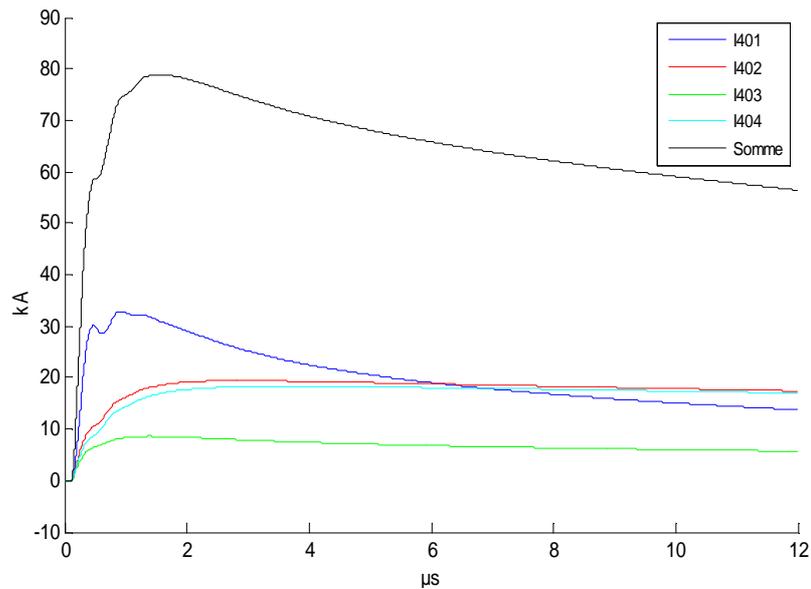


Figure IV-5 : Courant circulant sur les connexions du pylône

La somme des courants circulant sur chaque brin de connexion est représentée par la courbe noire. Le courant de foudre arrivant sur la ceinture du pylône atteint 40% (80 kA) du courant de foudre. Ceci sous entend qu'environ 60% du courant de foudre est directement conduit vers le bâtiment par l'intermédiaire du chemin de câble.

La Figure IV-5 montre également la répartition des courants dans chacun des brins de connexion, et permet de montrer que le brin conduisant la plus grande partie du courant est le brin supportant la connexion avec la patte d'oie.

Le courant circulant sur le brin de connexion au niveau de la patte d'oie présente une oscillation et une décroissance plus rapide que le courant de foudre, contrairement aux autres brins. Ceci s'explique par une remontée du courant issue de la patte d'oie vers le pylône

IV.3.1.2 Courant circulant sur la patte d'oie

Afin de diminuer le courant transmis vers le bâtiment, une patte d'oie placée au pied du pylône est communément utilisée. Le rôle de ce système est de drainer une partie du courant de foudre vers l'extérieur de la structure. L'implantation de la patte d'oie est effectuée selon le schéma de la Figure IV-6.

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

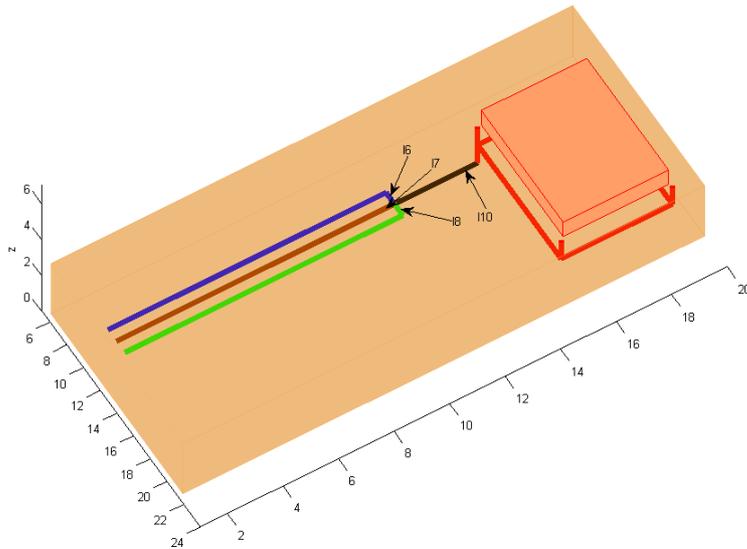


Figure IV-6 : Implantation d'une patte d'oie sous le pylône

Dans la configuration que nous avons choisie les courants circulant sur les conducteurs composant la patte d'oie sont représentés par la Figure IV-7

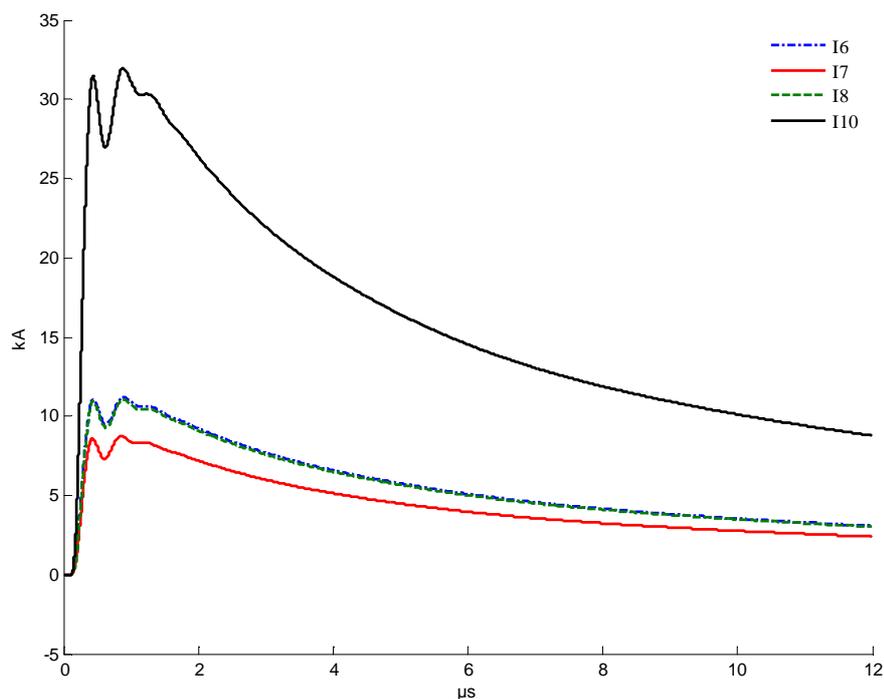


Figure IV-7 : Courant circulant sur la patte d'oie

On peut noter que les courants circulant sur les brins extérieurs de la patte d'oie (I6 et I8) sont plus importants que les courants conduits sur le brin central. Ceci est essentiellement dû au fait que les brins extérieurs ont une impédance plus faible que le brin central. Mais aussi au phénomène de couplage entre les fils mis en évidence par Meixner en 1972 [74].

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

De plus la présence de réflexions montre que la longueur de la patte d'oie n'est pas suffisante pour dissiper la totalité du courant de foudre capté. Ceci entraînant une remontée du courant vers le pylône comme vu précédemment. Ainsi le rapport entre le courant circulant sur la patte d'oie et le courant de foudre total n'est pas linéaire comme le montre la Figure IV-8.

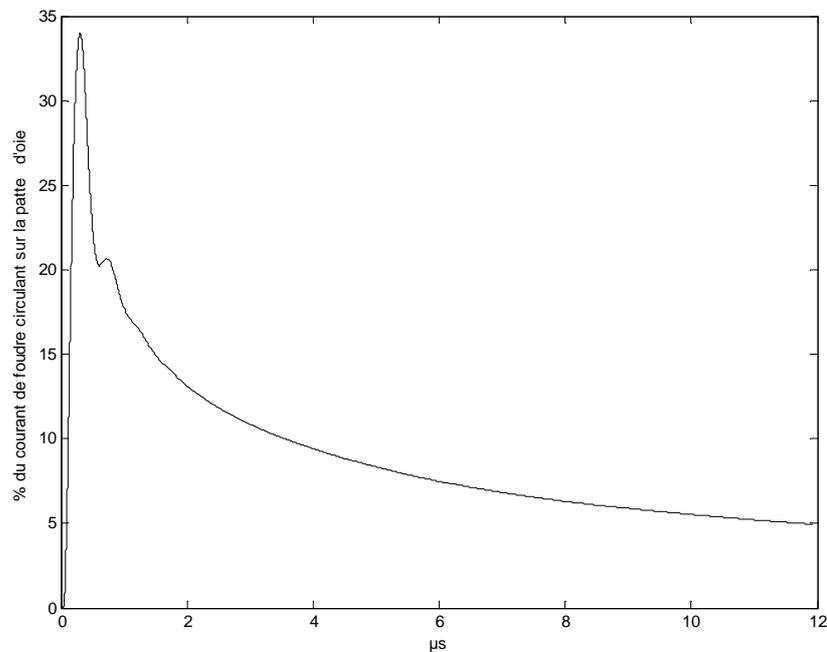


Figure IV-8 : pourcentage du courant de foudre circulant sur la patte d'oie

IV.3.1.3 Etude des courants induits sur l'interconnexion entre les réseaux de terre

La Figure IV-9 représente le courant n'ayant pu être dissipé par la ceinture de terre du pylône ou la patte d'oie. Celui-ci est alors transmis vers le bâtiment par l'intermédiaire du conducteur de connexion I19.

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

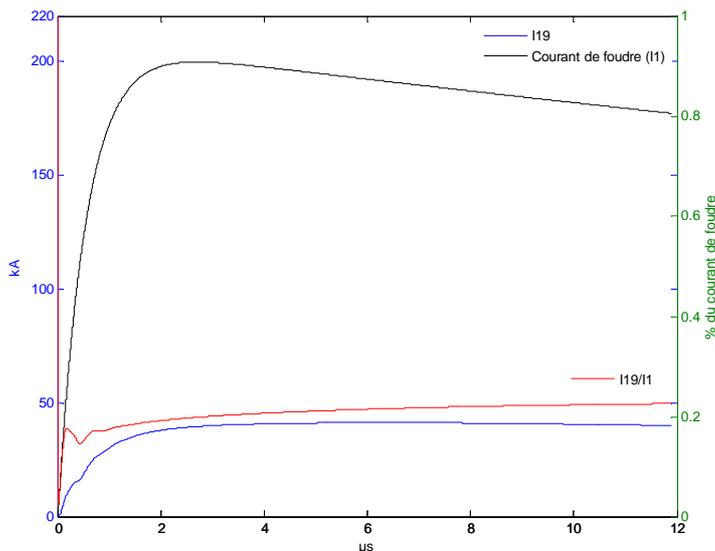


Figure IV-9 : Courant circulant sur l'interconnexion des réseaux de terre

Le courant transmis du réseau de terre du pylône vers celui du bâtiment est représenté par la courbe bleue et correspond à 20.25% du courant de foudre total (Courbe rouge).

Il a été vu précédemment que 60% du courant de foudre est transmis par le chemin de câble vers le bâtiment. Ainsi l'efficacité du système de terre du pylône, correspondant à la différence entre le courant induit sur le bas du pylône (40%) et la proportion de courant transmis entre les réseaux de terre, peut être estimée à 19.75% du courant de foudre.

IV.3.2 Etude des courants circulant dans le bâtiment

La partie du courant de foudre arrivant sur le bâtiment peut être décomposée en deux parties. D'une part le courant conduit par le chemin de câble (60% du courant de foudre) et d'autre part le courant circulant du réseau de terre du pylône vers le réseau de terre du bâtiment dont une représentation est donnée sur la Figure IV-10. Ces résultats tiennent également compte de la composante rayonnée par le canal sur les différents éléments constituant le bâtiment.

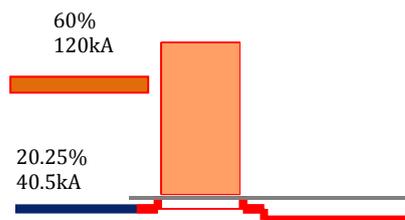


Figure IV-10 : Courant circulant sur les interconnexions

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

Le courant se diffuse dans le bâtiment en direction des connexions vers le réseau de terre constitué par une grille. La répartition du courant entre les différentes connexions est représentée par la Figure IV-11.

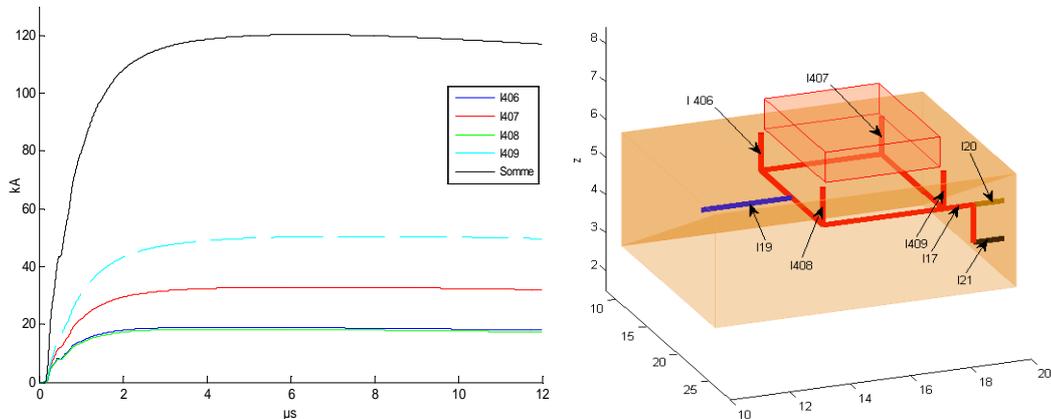


Figure IV-11 : Schéma de principe de connexion du bâtiment à la grille de terre

Cette partie de l'étude permet de mettre en évidence une dissymétrie dans la répartition des courants entrant sur la grille de terre. En effet 40% du courant issu du chemin de câble est transmis vers le réseau de terre via le fil I409. Les courbes de la Figure IV-11 ne présentent pas d'oscillation ce qui permet d'en déduire que le courant issu de la ceinture de terre du pylône ne remonte pas dans le bâtiment et est en partie dissipée par le réseau de terre du bâtiment avant d'être conduit vers les adductions.

IV.3.3 Etude des courants circulant sur les adductions

Les adductions représentant le seul lien avec le reste du réseau, il est important de pouvoir estimer le courant véhiculé par celles-ci, afin de pouvoir protéger le reste du réseau.

Dans le cas étudié ici, le câble de télécommunications est représenté par un conducteur isolé, de 65 mm de rayon interne et 9.2 mm de rayon externe, enfoui à une profondeur de 80 cm, protégé par un conducteur nu de 65 mm de rayon enfoui à une profondeur de 40 cm. La connexion du réseau d'adduction au bâtiment est réalisée en un point selon le schéma de la Figure IV-12.

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

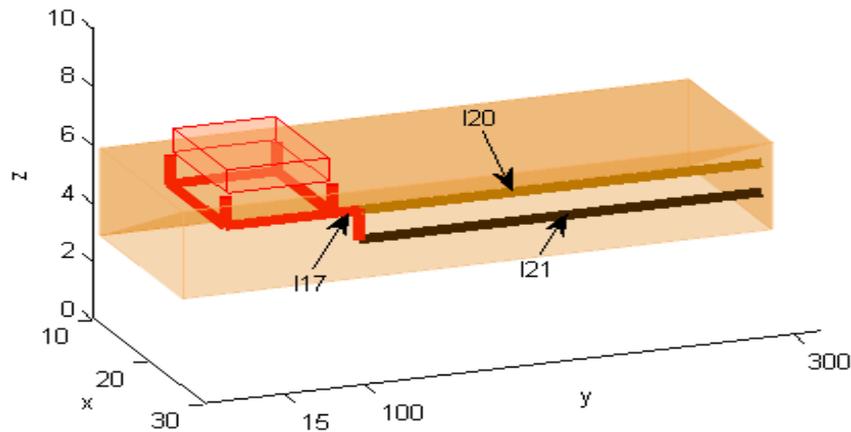


Figure IV-12 : Schéma de principe de connexion des adductions

Dans cette configuration, le courant circulant sur les adductions représente 71% du courant de foudre comme le montre la Figure IV-13. Ainsi, cette configuration de réseau de terre permet de dissiper 29% du courant de foudre

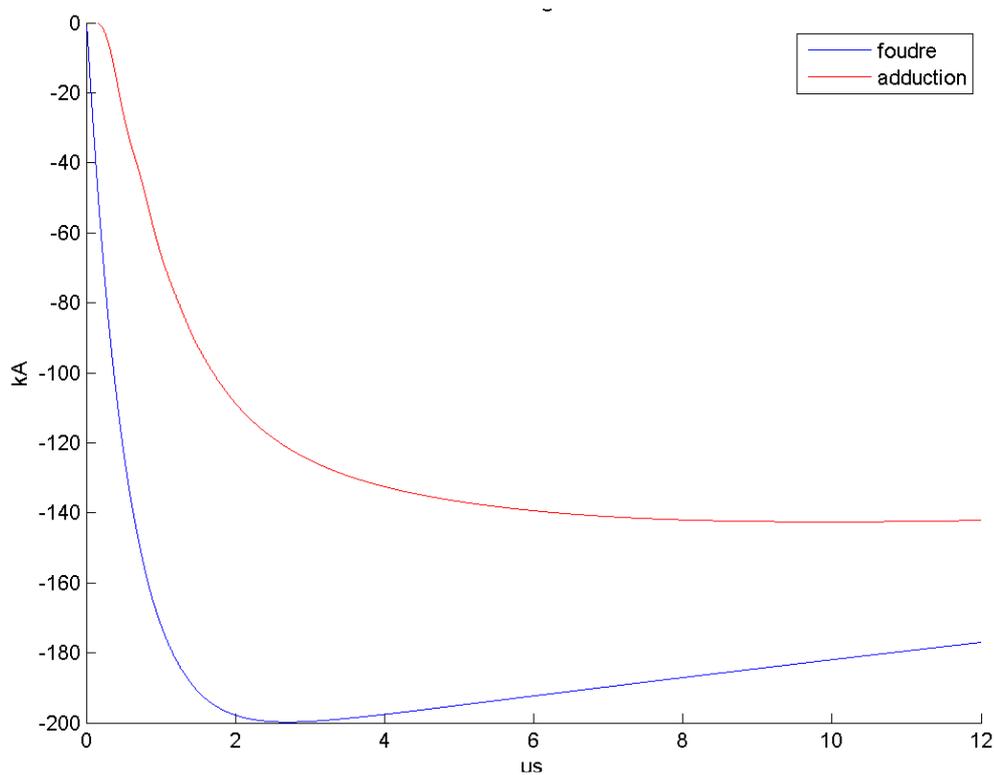


Figure IV-13 : Courant circulant sur les adductions

La répartition des courants entre les conducteurs composant l'adduction est présentée sur la Figure IV-14. L'étude de ces résultats permet de mettre en évidence l'importance de l'utilisation d'un conducteur de protection, permettant de diminuer de manière significative le courant circulant sur les câbles de télécommunications.

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

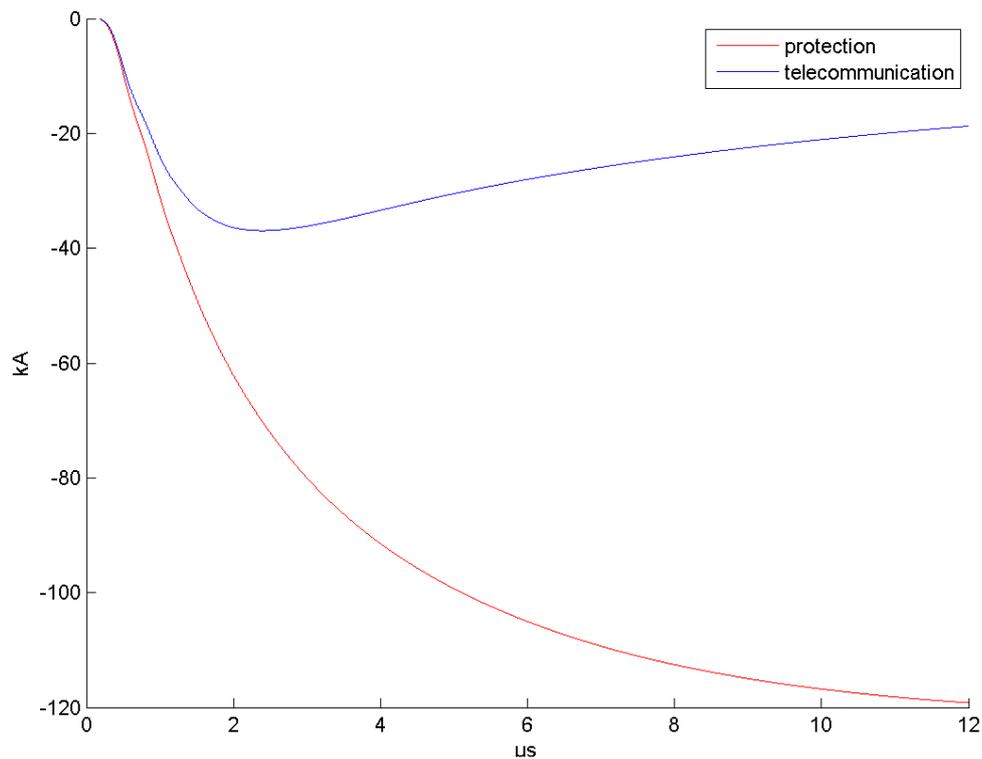


Figure IV-14 : Courant circulant sur le conducteur de protection et le câble de télécommunication

Dans le cas étudié ici, le courant induit sur le câble de télécommunications représente 17% du courant de foudre induit sur la structure.

IV.3.4 Synthèse et bilan

Sur la base des résultats précédents, nous proposons d'établir une cartographie de la répartition du courant au sein d'une structure complexe soumise à un impact de foudre direct.

Afin de simplifier la compréhension des calculs, et la suite de l'étude, il sera utilisé la notation suivante sera utilisée:

- I_{foudre} : Valeur maximale du courant de foudre.
- I_{pyl} : Somme des courants circulant sur les brins de connexion du pylône à son réseau de terre
- $I_{\text{bât}}$: Somme des courants circulant sur les brins de connexion du bâtiment à son réseau de terre

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

- I_{inter} : Courants circulant sur le ou les fils permettant l'interconnexion du réseau de terre du pylône à celui du bâtiment
- I_{add} : Courant induit sur les adductions.

Il est alors défini les valeurs P_{pyl} , $P_{bât}$, P_{inter} , et P_{add} représentant le pourcentage du courant induit, respectivement, sur le réseau de terre du pylône, le réseau de terre du bâtiment, les fils d'interconnexions et les adductions tels que :

$$P_{pyl} = \frac{I_{pyl}}{I_{foudre}} * 100 \quad \text{IV-11}$$

$$P_{bât} = \frac{I_{bât}}{I_{foudre}} * 100 \quad \text{IV-12}$$

$$P_{inter} = \frac{I_{inter}}{I_{foudre}} * 100 \quad \text{IV-13}$$

$$P_{add} = \frac{I_{add}}{I_{foudre}} * 100 \quad \text{IV-14}$$

Et les valeurs P_{pyl}' et $P_{bât}'$ représentant le pourcentage de courant dissipé respectivement par le réseau de terre du pylône et le réseau de terre du bâtiment tel que :

$$P_{pyl}' = \frac{I_{foudre} - (I_{bât} + I_{inter})}{I_{foudre}} * 100 \quad \text{IV-15}$$

$$P_{bât}' = \frac{(I_{bât} + I_{inter}) - I_{add}}{I_{foudre}} * 100 \quad \text{IV-16}$$

On obtient alors une répartition des courants selon le schéma de la Figure IV-15

IV.3 Etude théorique de la répartition des courants dans une structure complexe soumise à un impact de foudre directe

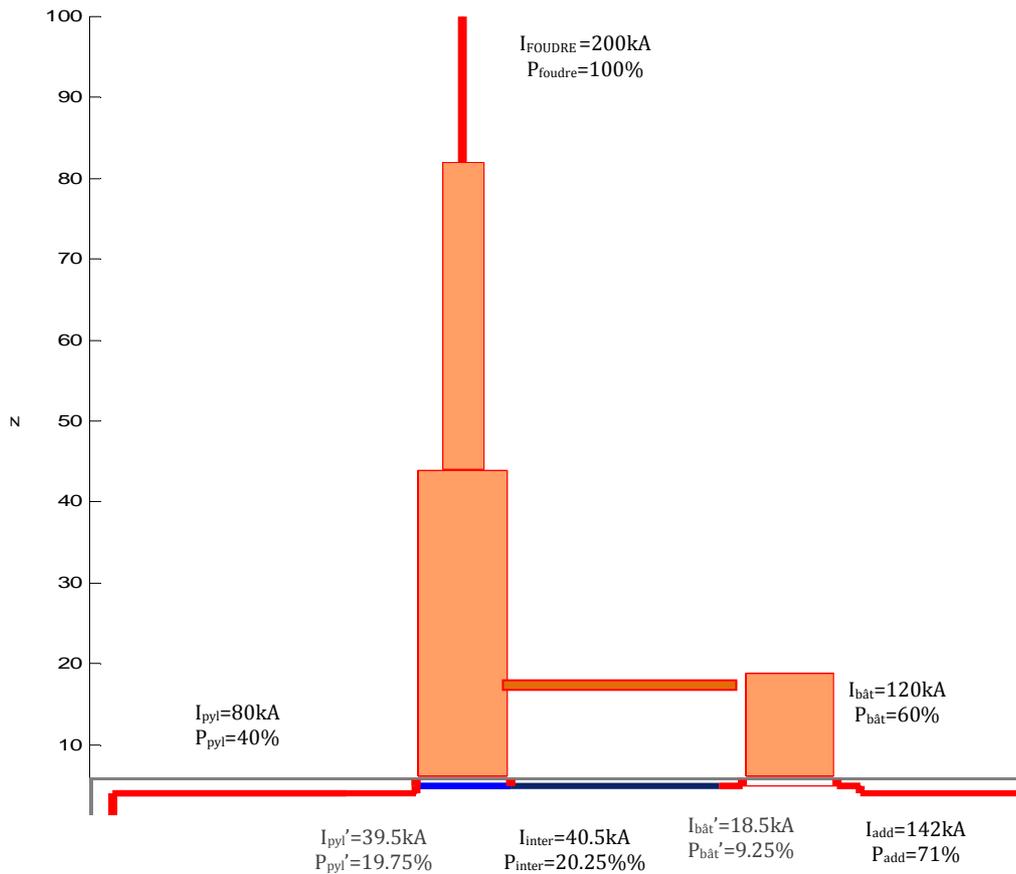


Figure IV-15 : Répartition du courant sur une structure complexe

Cette étude permet aussi d'établir le pouvoir de dissipation de chaque élément constituant le réseau de terre selon les formules IV-15 et IV-16, dont les valeurs sont rappelées dans le tableau ci dessous.

Eléments	Pouvoir de dissipation global (par rapport au courant de foudre)	
Ceinture Pylone	~3.75%	19.75%
Patte d'oie	~16%	
Grille de terre	9.25%	

Tableau IV-11 : Estimation de la dissipation des éléments constituant le réseau de terre

Les résultats obtenus au long de cette partie ne peuvent être utilisés que pour l'estimation des courants circulant sur une structure complexe similaire à celle de l'étude. Par exemple une variation de la conductivité du sol, ou de la longueur des brins constituant la patte d'oie, peuvent entrainer une divergence entre les résultats obtenus et ceux donnés durant cette première phase.

Ainsi il s'avère nécessaire de réaliser une étude paramétrique, afin d'estimer l'influence de différents facteurs comme la conductivité du sol, les points de connexion ou le nombre de conducteurs.

IV.4 Etude Paramétrique

Dans cette partie, nous traiterons l'évolution de la répartition du courant en fonction de la variation de paramètres physiques, comme la résistivité du sol, ou structurel, comme la longueur des brins constituant la patte d'oie

Afin de mener cette étude, nous avons gardé comme référence la structure utilisée dans la partie précédente. La variation de chaque paramètre physique a été effectuée de manière indépendante afin de ne tenir compte que des variations engendrées par le paramètre étudié.

IV.4.1 Influence de la conductivité du sol

IV.4.1.1 Méthode

Afin d'étudier l'influence de la conductivité du sol sur la répartition des courants, la structure a successivement été placée sur un sol de résistivité égal à 4000, 2000, 1000 et 500 Ohms.m.

La somme des courants sur le brin de connexion du pylône à son réseau de terre (I_{pyl}), ainsi que la somme des courants circulant sur les connexions entre le bâtiment et son réseau de terre ($I_{bât}$), permettent de déterminer la répartition du courant entre le pylône (P_{pyl}) et le bâtiment ($P_{bât}$) en fonction de la résistivité du sol. Ces résultats sont donnés sur la figure I_16.

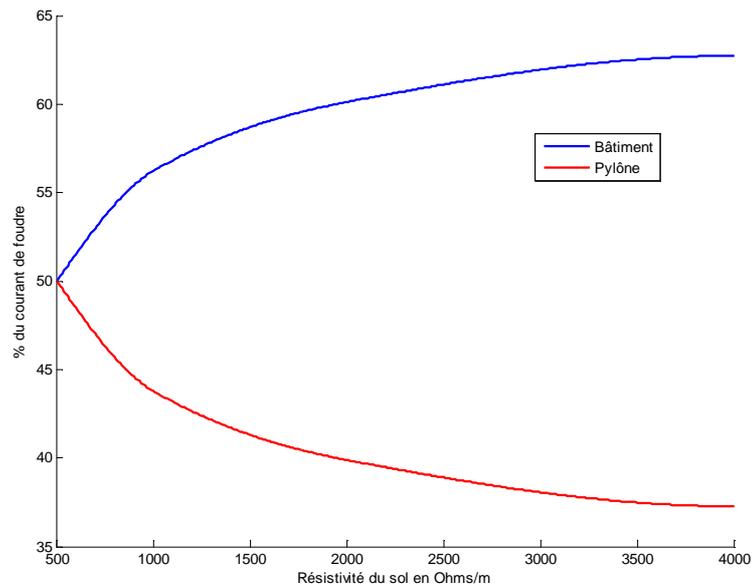


Figure IV-16 : Répartition du courant de foudre entre le pylône et le bâtiment

La Figure IV-16, représente la part du courant de foudre allant directement vers le bâtiment par l'intermédiaire du chemin de câble (courbe bleu), et la part du courant capté par le réseau de terre du pylône (courbe rouge). Ces résultats montrent que plus la résistivité du sol augmente, et intrinsèquement la résistance de terre du pylône, plus le courant circulera de manière directe vers le bâtiment par le chemin de câble.

A cela vient s'ajouter, une diminution du courant de foudre capté par la patte d'oie, dont les résultats sont donnés sur Figure IV-17.

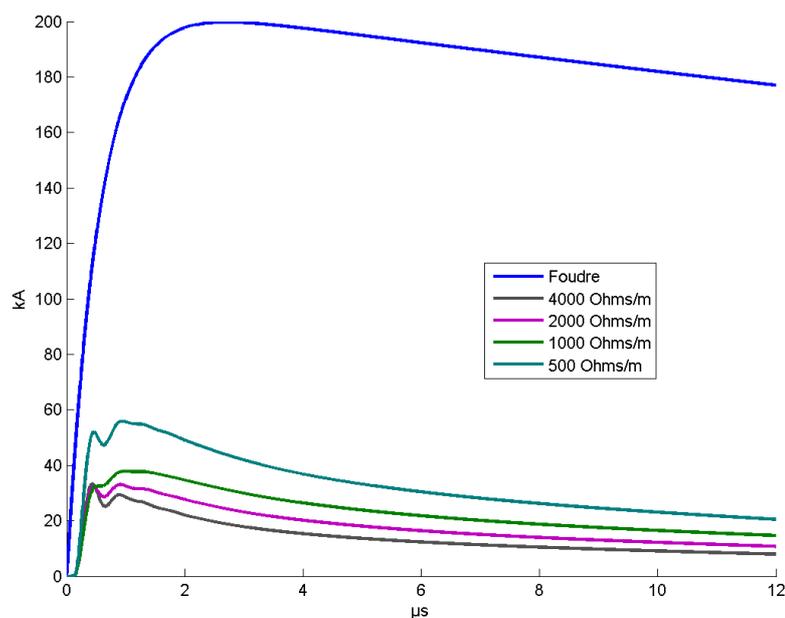


Figure IV-17 : Courant sur la patte d'oie (10m) pour différentes résistivité du sol

IV.4 Etude Paramétrique

Une augmentation de la conductivité du sol entraîne une diminution du courant capté par le réseau de terre du pylône comme vu précédemment, mais entraîne également une augmentation du courant induit sur le réseau de terre par l'intermédiaire de l'interconnexion entre les réseaux (P_{inter}), comme le montre la Figure IV-18

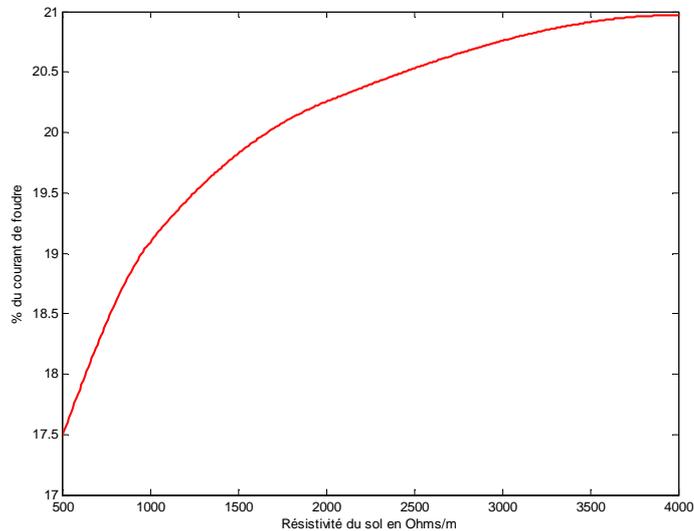


Figure IV-18 : % de courant de foudre sur l'interconnexion entre le pylône et le bâtiment pour différentes résistivités du sol

Ceci entraîne donc une diminution du pouvoir de dissipation (P_{pyl}) du réseau de terre du pylône comme le montre la Figure IV-19

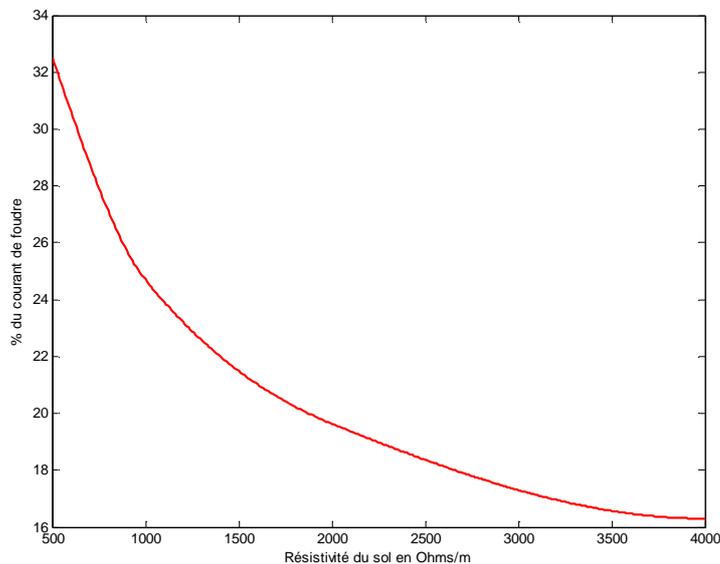


Figure IV-19 : Pouvoir de dissipation du réseau de terre du pylône pour différentes résistivités du sol

L'augmentation du courant induit sur les entrées du bâtiment, ainsi que la diminution du pouvoir de dissipation des réseaux de terre entraînent une augmentation des courants

induits sur les adductions, dont les valeurs pour différentes résistivités du sol sont données par la Figure IV-20.

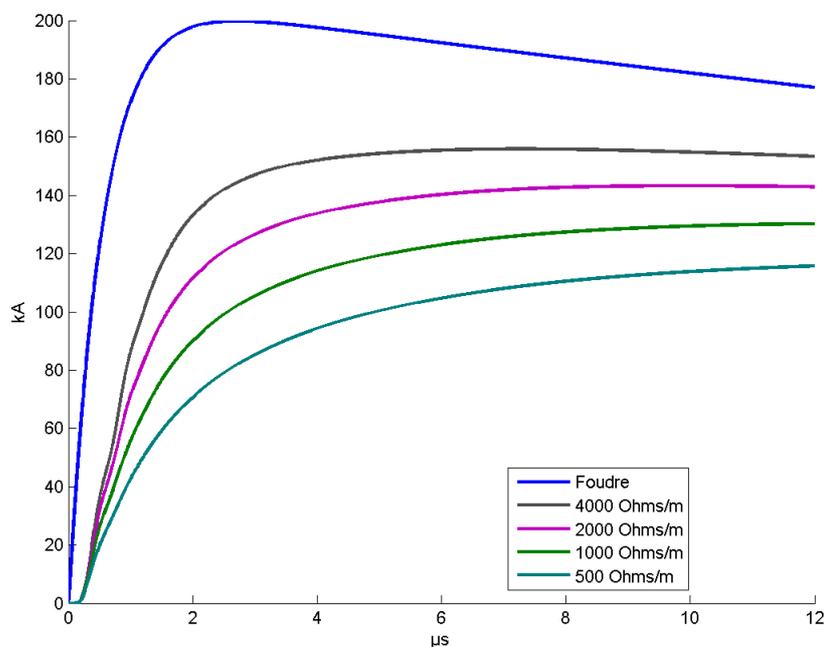


Figure IV-20 : Courant sur les adductions pour différentes résistivités du sol

Soit en pourcentage du courant de foudre (P_{add}) (Figure IV-21)

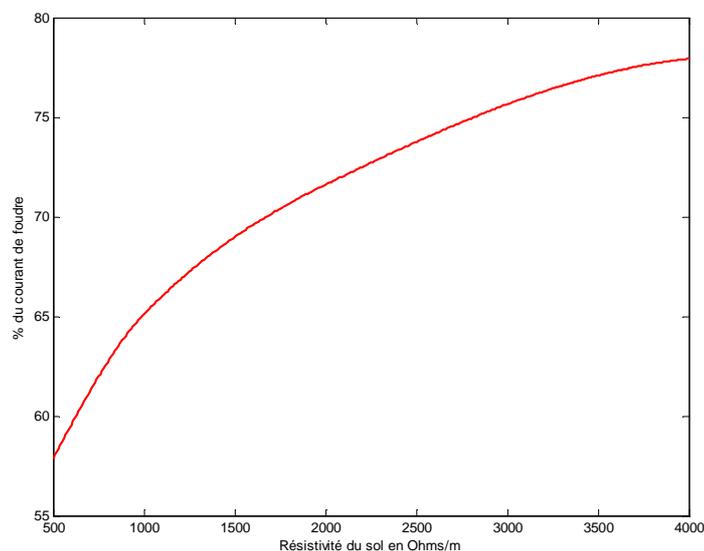


Figure IV-21 : % du courant de foudre induit sur les adductions pour différentes résistivités du sol

La proportion de courant de foudre induite sur les adductions augmentant avec la résistivité du sol, il est normal de retrouver une augmentation du courant de foudre induit sur le câble de télécommunication, dont les résultats sont donnés par la Figure IV-22

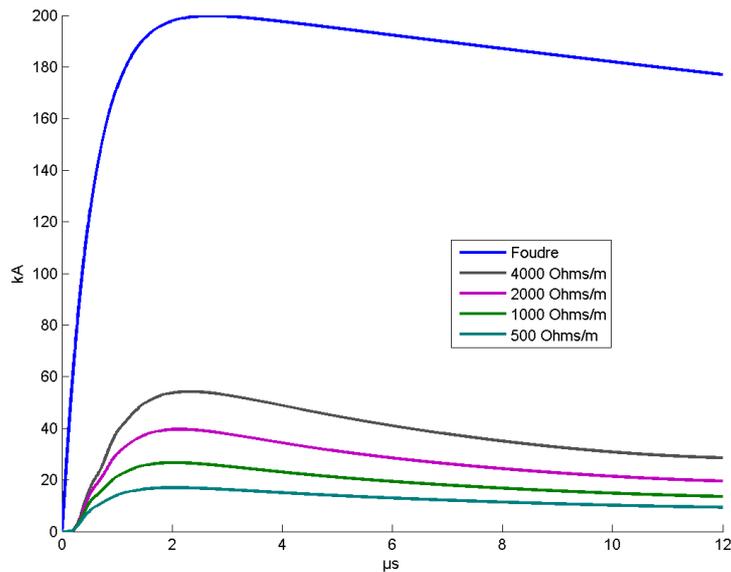


Figure IV-22 : Courant sur le câble de Télécommunications pour différentes résistivité du sol

La Figure IV-23 donnant le pourcentage du courant de foudre induit sur le conducteur de télécommunications en fonction de la résistivité du sol permet de voir que celui-ci peut être approché par une fonction, racine carré, de la forme: $y = a\sqrt{x}$.

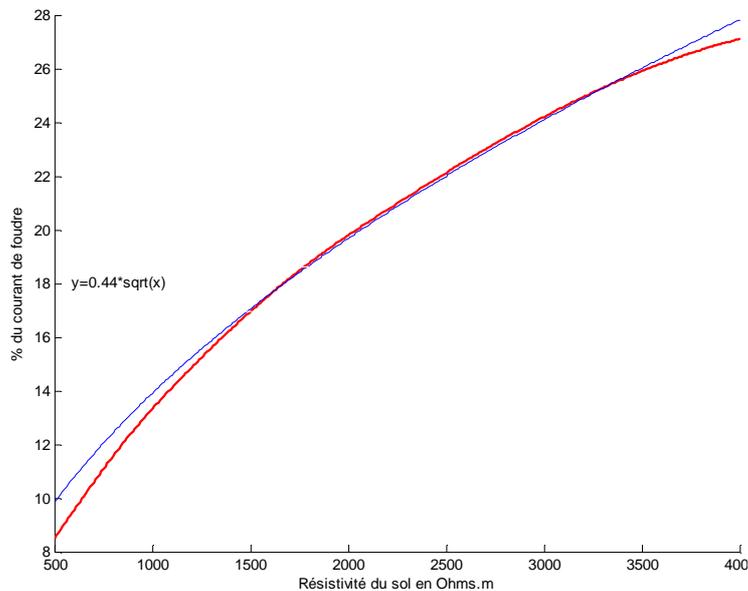


Figure IV-23 : % du courant de foudre induit sur le câble de télécommunications pour différentes résistivité du sol

L'étude de la répartition du courant entre les différents conducteurs constituant les adductions, montre que le pourcentage du courant de foudre capté par le conducteur de protection peut être représenté par la Figure IV-24.

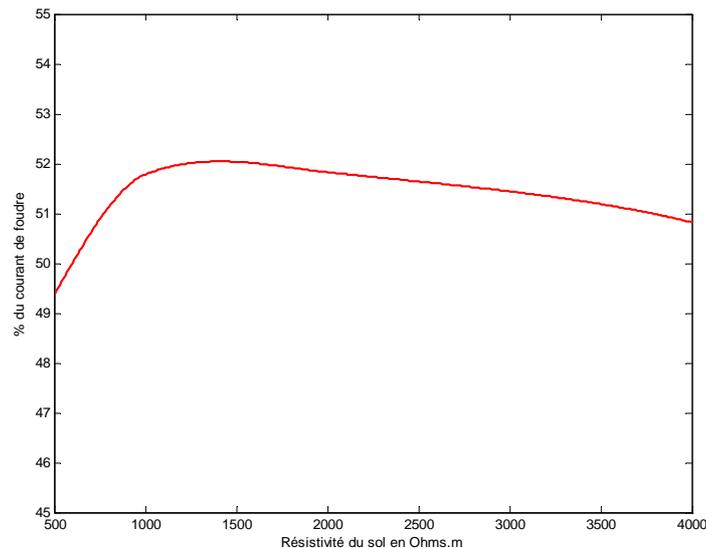


Figure IV-24 : % du courant de foudre induit sur le câble de protection pour différentes résistivités du sol

La Figure IV-24 représente la proportion de courant de foudre capté par le conducteur de protection en fonction de la résistivité du sol. La courbe présente un maximum pour une résistivité aux alentours de 1500 Ohms.m. Ainsi pour une longueur de 300m le conducteur de protection captera plus de courant s'il est placé dans un sol de résistivité proche de 1500 Ohms.m que dans un sol de résistivité plus élevée. Ces résultats mettent en évidence la notion de longueur optimale ou longueur minimum du conducteur de protection qui a été étudiée au sein du chapitre III.

IV.4.1.2 Synthèse

L'étude paramétrique portant sur l'influence de la conductivité du sol sur la répartition des courants au sein de la structure permet de montrer pour cette configuration :

- Une augmentation des courants induits sur le câble de télécommunications suivant une loi affine
- L'introduction d'une notion de longueur optimale du conducteur de protection en fonction de la conductivité du sol.

IV.4.2 Influence de la longueur des brins constituant la patte d'oie

IV.4.2.1 Méthode

L'étude précédente d'une structure complexe a permis de montrer l'influence de la mise en place d'une patte d'oie dans la diminution des courants induits sur les adductions d'un site de radio-télécommunication.

L'intérêt de cette partie est d'étudier l'influence de la longueur des brins d'une patte d'oie sur les courants induits sur les adductions. Une approche par le formalisme de la théorie des lignes, permet de déterminer les paramètres linéiques d'une électrode de longueur l et de rayon r à l'aide des expressions ci-dessous issues de [75] et [76]

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rd}} \right) - 1 \right) \quad \text{IV-17}$$

$$C = \frac{\pi \epsilon_{soil}}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rd}} \right) - 1} \quad \text{IV-18}$$

$$G = \frac{\pi}{\rho_{soil} \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rd}} \right) - 1 \right)} \quad \text{IV-19}$$

L'impédance de l'électrode est alors donnée par : $Z = \sqrt{L/C}$ en fonction de la longueur de l'électrode et permet de tracer la courbe de la Figure IV-25.

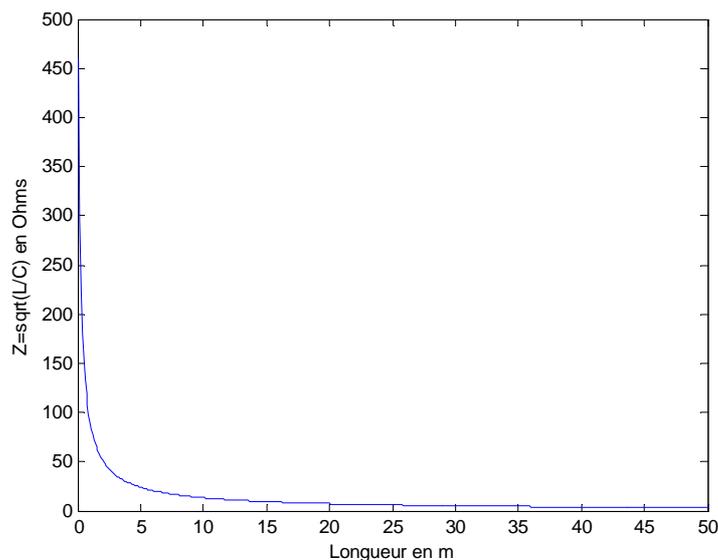


Figure IV-25 : Variation de l'impédance d'une électrode en fonction de la longueur

IV.4 Etude Paramétrique

La Figure IV-25 représente l'évolution de l'impédance d'un conducteur nu dans un sol homogène pour une résistivité de 2000 Ohms.m et une permittivité relative de 10. Ces résultats permettent de mettre en évidence que, pour des longueurs inférieures à une quinzaine de mètres, l'impédance est fortement dépendante de la longueur de brin. Il en résulte des différences de valeurs de courants induits sur les brins extérieurs et intérieurs constituant la patte d'oie. Ainsi une patte d'oie constituée de brins plus longs présentera une impédance plus faible et permettra donc de capter plus de courant.

Les résultats de simulation numérique présentés sur la Figure IV-26 représentent le courant capté par la patte d'oie pour différentes longueurs de brin. Ces résultats, en adéquation avec la théorie, montrent que plus la longueur du brin est grande, plus l'impédance de la patte d'oie est faible, et plus le courant capté par la patte d'oie est important.

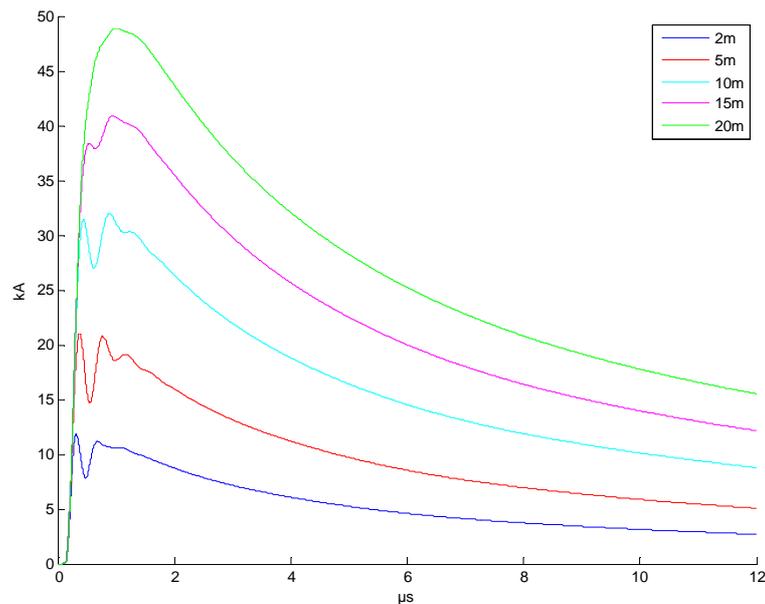


Figure IV-26 : Courant circulant sur la patte d'oie pour des longueurs de brins différents.

L'évaluation de la proportion de courant capté, (calculée selon l'équation de P_{pyl}), et le pouvoir de dissipation du réseau de terre du bâtiment, (calculé selon la formule P_{pyl}'), sont représentées sur la Figure IV-27.

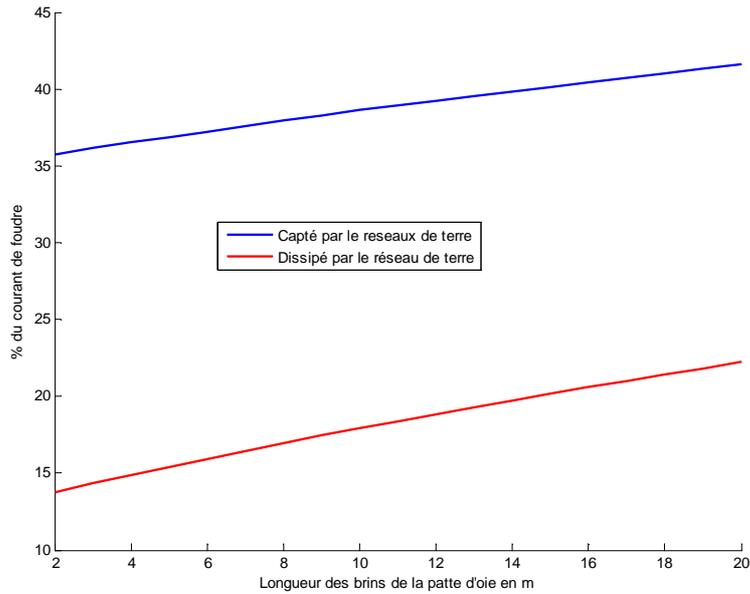


Figure IV-27 : Proportion de courant capté et dissipé par le réseau de terre du pylône pour différentes longueur de la patte d'oise.

Ces résultats montrent que les proportions des courants conduits et dissipés suivent une loi linéaire :

$$P_{\text{pyl}}(\text{longueur brin}) = 0.32 * \text{Longueur brin} + 35 \quad \text{IV-20}$$

$$\text{Et } P_{\text{pyl}'}(\text{longueur brin}) = 0.47 * \text{Longueur brin} + 13 \quad \text{IV-21}$$

Les résultats obtenus pour les adductions sont présentés par la Figure IV-28.

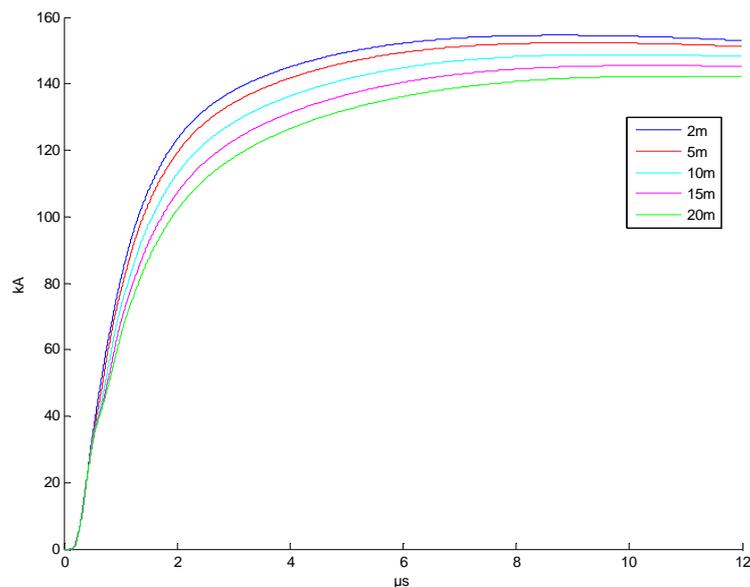


Figure IV-28 : Courant induits sur les adductions pour différentes longueurs de la patte d'oise

IV.4 Etude Paramétrique

Lorsque l'on ramène la valeur du courant induit sur les adductions à une proportion du courant de foudre totale selon la formule P_{add} , on obtient une fonction linéaire de pente opposée à celle du pouvoir de dissipation du courant de foudre par le réseau de terre du pylône (Figure IV-27), comme le montre la Figure IV-29.

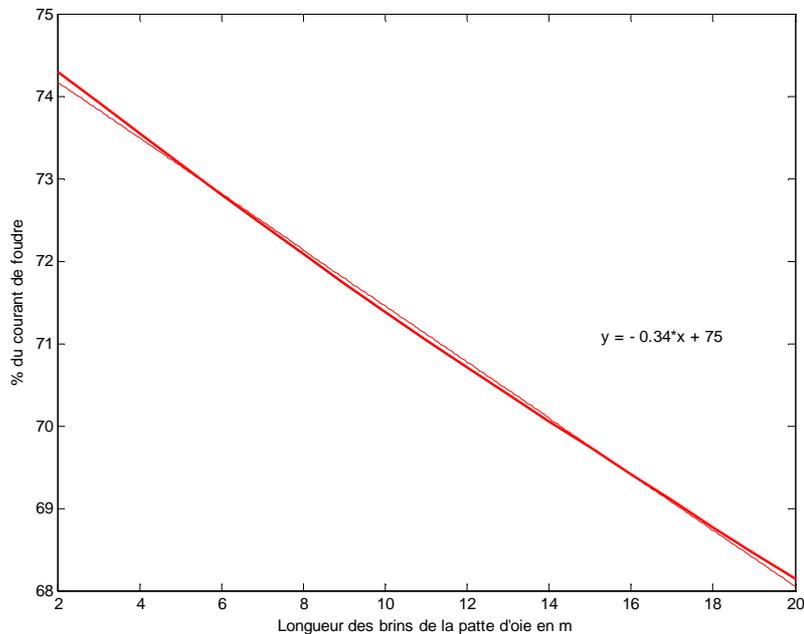


Figure IV-29 : Proportion du courant induit sur les adductions par rapport au courant de foudre pour différentes longueurs de patte d'oie

L'étude de la répartition des courants entre les différents conducteurs constituant l'adduction montre que la longueur des brins de la patte d'oie n'influe pas sur la répartition entre les différents conducteurs composant l'adduction.

IV.4.2.2 Synthèse

L'étude de la longueur des brins constituant la patte d'oie sur la répartition du courant de foudre sur une infrastructure a permis de mettre en évidence :

- La différence entre le courant pouvant être capté et le courant pouvant être dissipé par la patte d'oie
- La mise en place de formules simples permettant la détermination du courant induit sur les adductions en fonction de la longueur des brins constituant la patte d'oie et pour une conductivité moyenne.

IV.4 Etude Paramétrique

La mise en parallèle avec les résultats obtenus lors de l'étude de l'influence de la conductivité du sol, permettent de proposer l'abaque de la Figure IV-30, permettant de déterminer la proportion de courant induit sur les adductions en fonction de la résistivité du sol et de la longueur des brins constituant la patte d'oise.

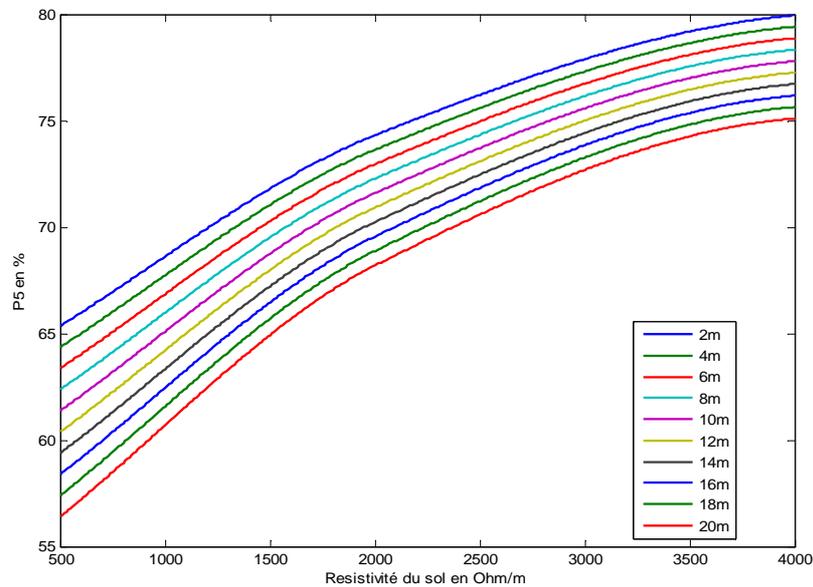


Figure IV-30 : Abaque de la proportion de courant induit sur les adductions en fonction de la résistivité du sol et de la longueur de brin constituant la patte d'oise.

L'abaque proposé en Figure IV-31 permet quand à, lui l'estimation de la proportion de courant de foudre dissipé par le réseau de terre du pylône en fonction de la résistivité du sol et de la longueur des brins constituant la patte d'oise.

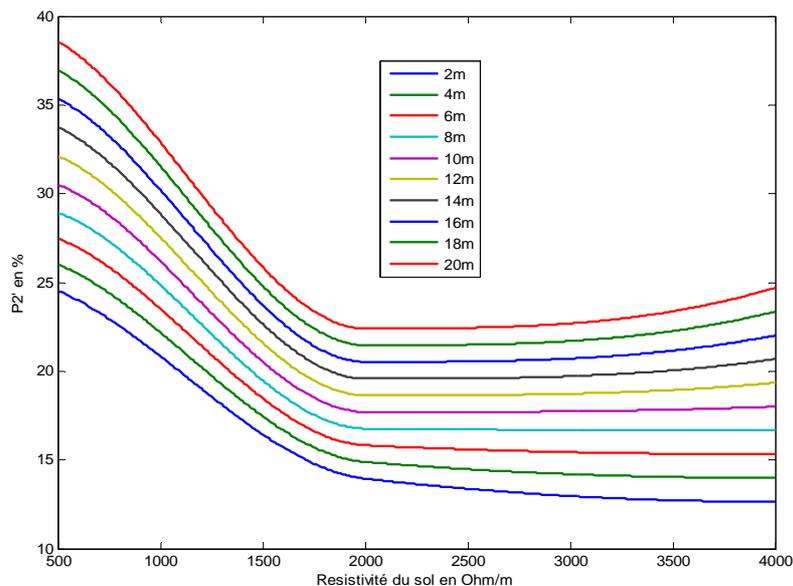


Figure IV-31 : Abaque de la proportion de courant dissipé par le réseau de terre du pylône en fonction de la résistivité du sol et de la longueur de brin constituant la patte d'oise.

IV.4.3 Influence d'une deuxième patte d'oie connectée au pied du pylône

IV.4.3.1 Méthode

La norme 62305-3 [10], traitant de la protection des structures et des personnes contre la foudre, préconise l'installation d'un minimum de deux électrodes supplémentaires dans le cas où la surface du réseau de terre ne pourra être respectée. Afin de déterminer l'influence de l'implantation d'une seconde patte d'oie sur la ceinture de terre du pylône, nous avons utilisé la configuration de base, à laquelle il a été rajouté une deuxième patte d'oie, identique à la première, située dans l'angle opposé selon la Figure IV-32

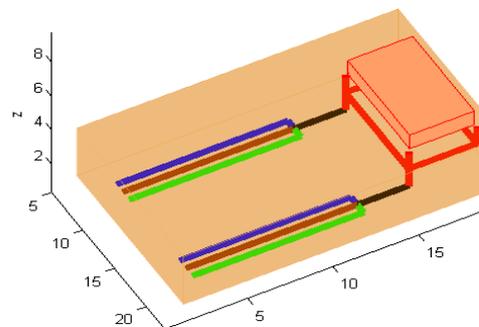


Figure IV-32 : Schéma d'implantation de la deuxième patte d'oie

L'observation des courants circulant sur la ou les pattes d'oie dans les différentes configurations sont représentées sur la Figure IV-35. Nous pouvons alors voir que le courant capté par les deux pattes d'oie est supérieur de 50% au courant capté lors de l'utilisation d'une seule patte d'oie.

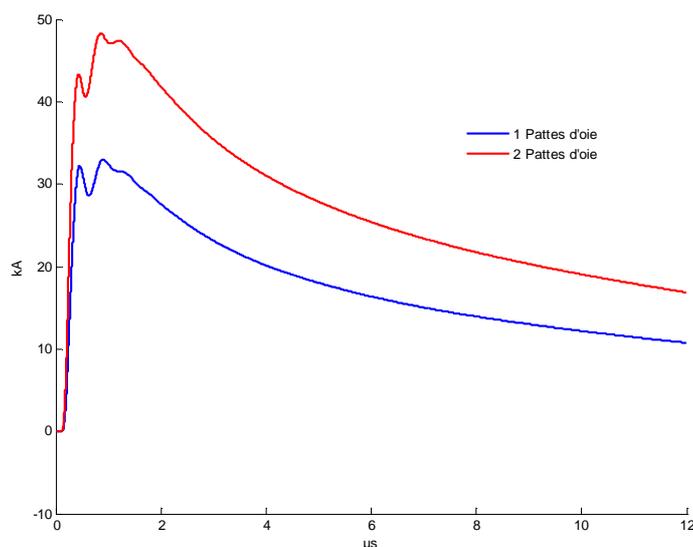


Figure IV-33 : Courant induit sur la ou les pattes d'oie

Cependant cette implantation n'entraîne pas de diminution du courant conduit par le chemin de câble vers le bâtiment, dont les résultats sont présentés sur la Figure IV-34

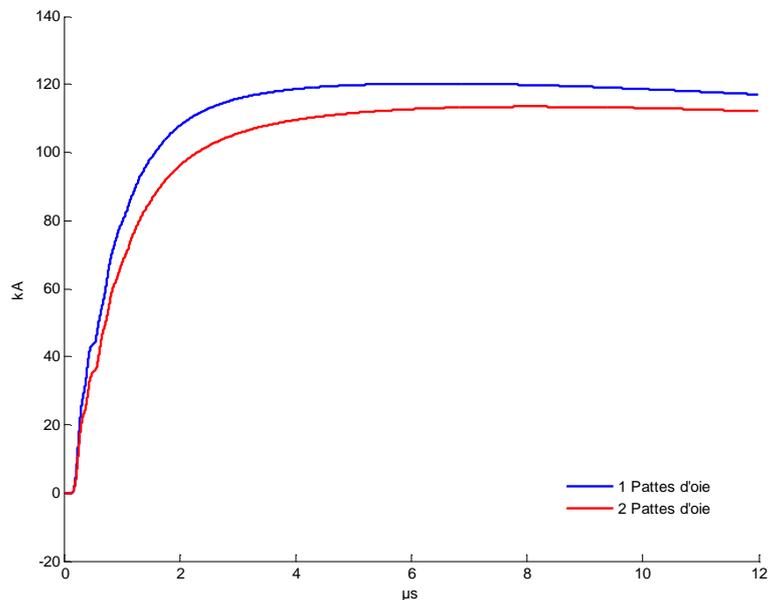


Figure IV-34 : Courant conduit sur le bâtiment par le chemin de câble

La Figure IV-34 représente le courant induit sur le bâtiment par le chemin de câble dans les deux configurations. Au vu des résultats, nous pouvons noter une diminution de 6% du courant lors de l'implantation d'une deuxième patte d'oise.

La Figure IV-35 présente les résultats obtenus sur le conducteur d'interconnexion reliant les deux réseaux de terre. Dans ce cas l'implantation permet une diminution de 8.7% du courant transmis par l'interconnexion

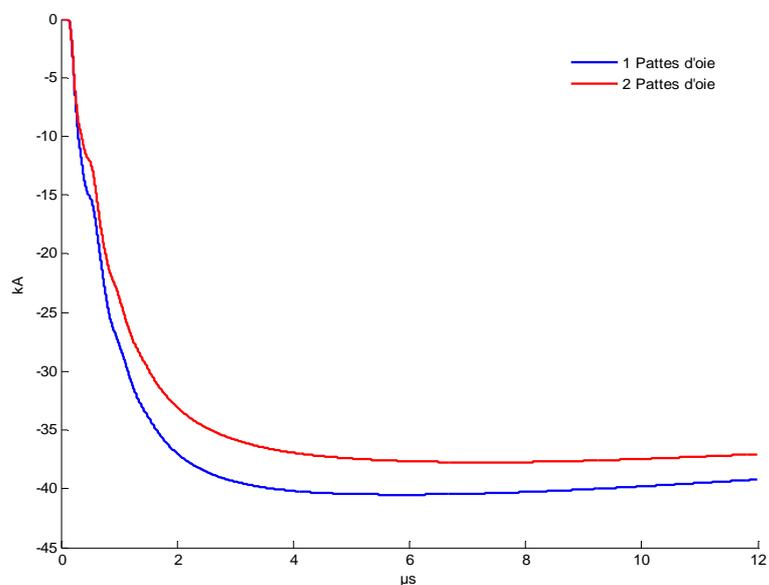
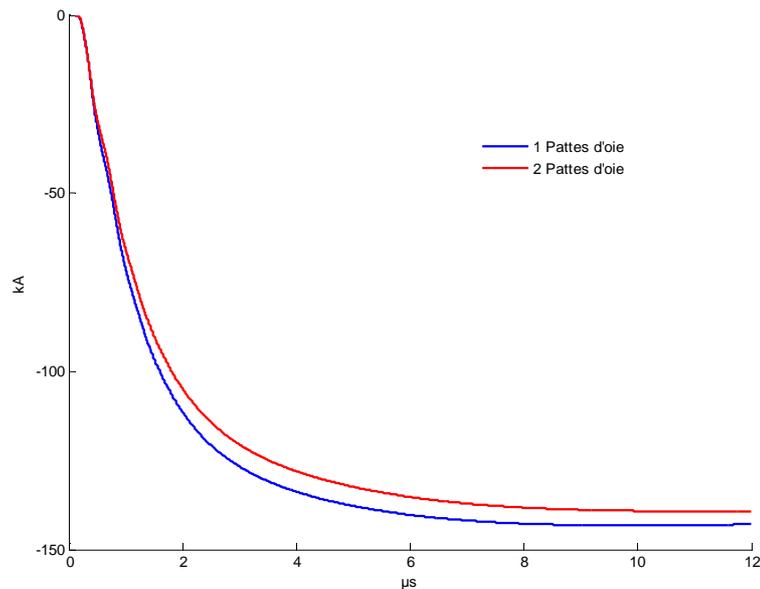


Figure IV-35 : Courant conduit sur les interconnexions

IV.4 Etude Paramétrique

Le calcul de pouvoir de dissipation du réseau de terre du pylône, P_{pyl} , donne un pouvoir de dissipation égal à 25% du courant de foudre dans les cas d'une double implantation contre 18.75% dans le cas d'une simple implantation.

Les résultats obtenus pour le courant induit sur les adductions sont représentés sur la Figure IV-36, et ne mettent pas en évidence une diminution du courant induit sur les adductions.



IV.4.3.2 Synthèse

L'analyse des résultats obtenus, nous permet de conclure, que l'implantation d'une seconde patte d'oie autorise un meilleur drainage des charges vers l'extérieur du bâtiment. Cependant elle ne permet pas une diminution significative du courant conduit par le chemin de câble, qui reste le chemin privilégié du courant, comme le montre la Figure IV-37.

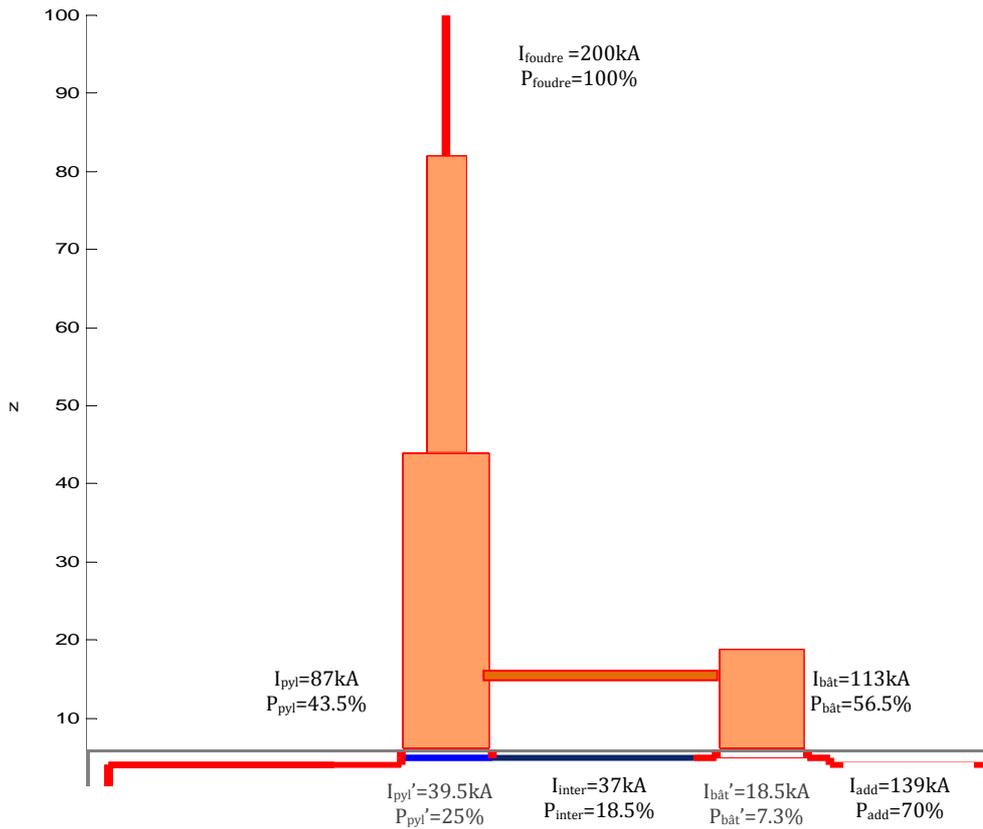


Figure IV-37 : Répartition du courant sur une structure complexe, dans le cadre de l'implantation de deux pattes d'oies

IV.4.4 Influence des connections entre bâtiment et pylône

IV.4.4.1 Méthode

L'étude complète de la structure montre une circulation importante de courant sur le chemin de câble reliant le bâtiment au pylône, ceci entraînant une forte circulation de courant sur les armatures métalliques du bâtiment. La circulation de courant étant à l'origine du champ rayonné à l'intérieur du bâtiment, et pouvant engendrer de nombreux dégâts, il est intéressant d'étudier la répartition du courant lors de l'implantation de deux conducteurs supplémentaires entre le bâtiment et le pylône selon le schéma de la Figure IV-38. Le rôle de ces conducteurs étant de favoriser une circulation de courant entre les réseaux de terre afin de diminuer le courant circulant sur le bâtiment.

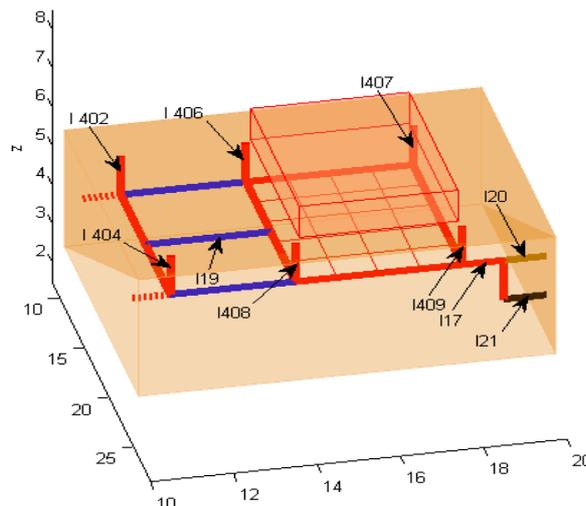


Figure IV-38 : Implantation des conducteurs d'interconnexions

La valeur des courants, circulants sur le chemin de câble, est représentée sur la Figure IV-39 et montre une diminution de 38 % du courant induit sur le bâtiment par le chemin de câble.

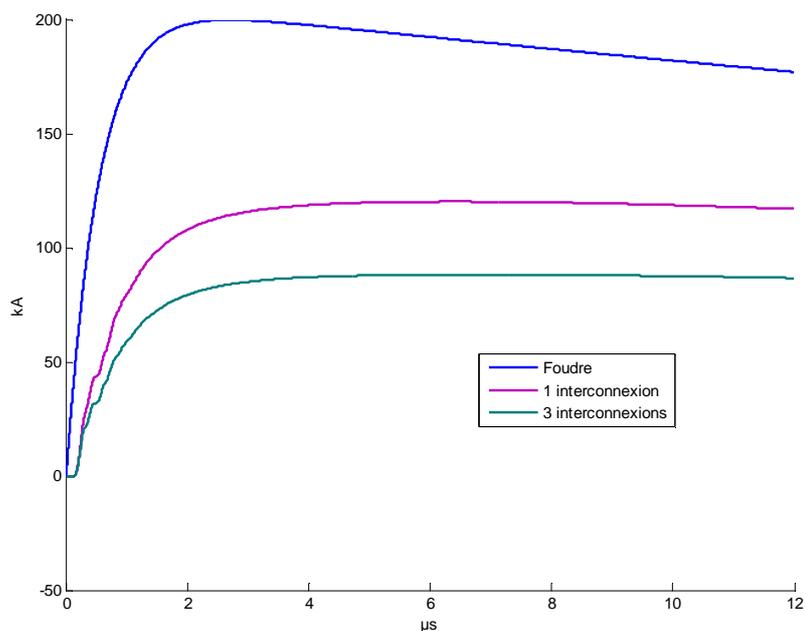


Figure IV-39 : Courant sur le chemin de câble pour deux types d'interconnexions

Le courant ne pouvant être dissipé par le réseau de terre du pylône est conduit vers le réseau de terre du bâtiment par l'intermédiaire des différents brins de connexion dont la somme est donnée par la Figure IV-40. Il est à noter une augmentation du courant circulant sur les interconnexions en fonction de l'augmentation du nombre de connexions.

Néanmoins cela n'influence pas le pouvoir de dissipation $P_{pyl'}$ du réseau de terre du pylône qui reste identique dans les deux cas et proche de 18%.

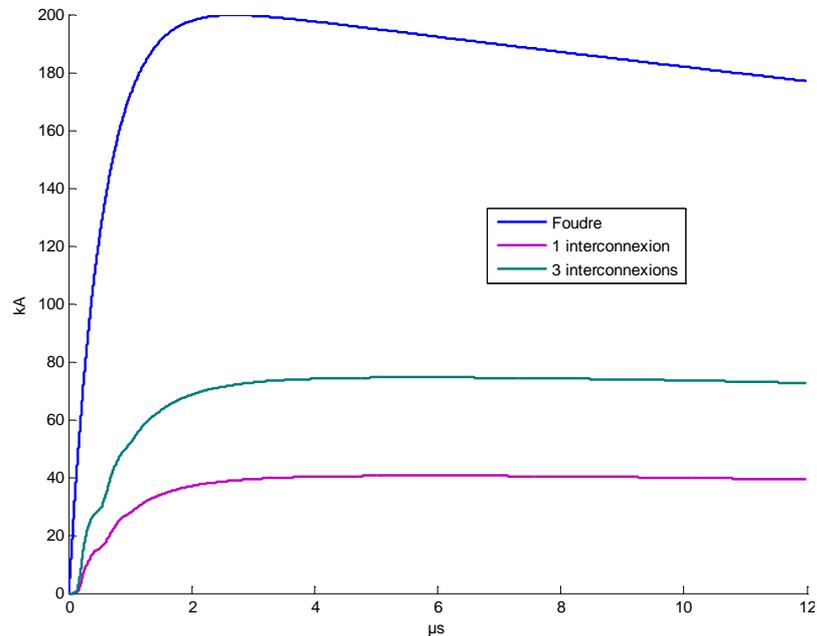


Figure IV-40 : Courant sur l'interconnexion des réseaux de terre pour deux types d'interconnexions

IV.4.4.2 Synthèse

L'amélioration de la circulation du courant entre les réseaux de terre par l'ajout de connexions permet :

- Une diminution du courant de foudre circulant dans les armatures du bâtiment.
- Une diminution du champ rayonné au sein du bâtiment.
- Cependant cela n'entraîne pas de diminution du courant induit sur les adductions

Ainsi l'amélioration de l'interconnexion entre les réseaux de terre entraîne une répartition des courants au sein de la structure selon la Figure IV-41

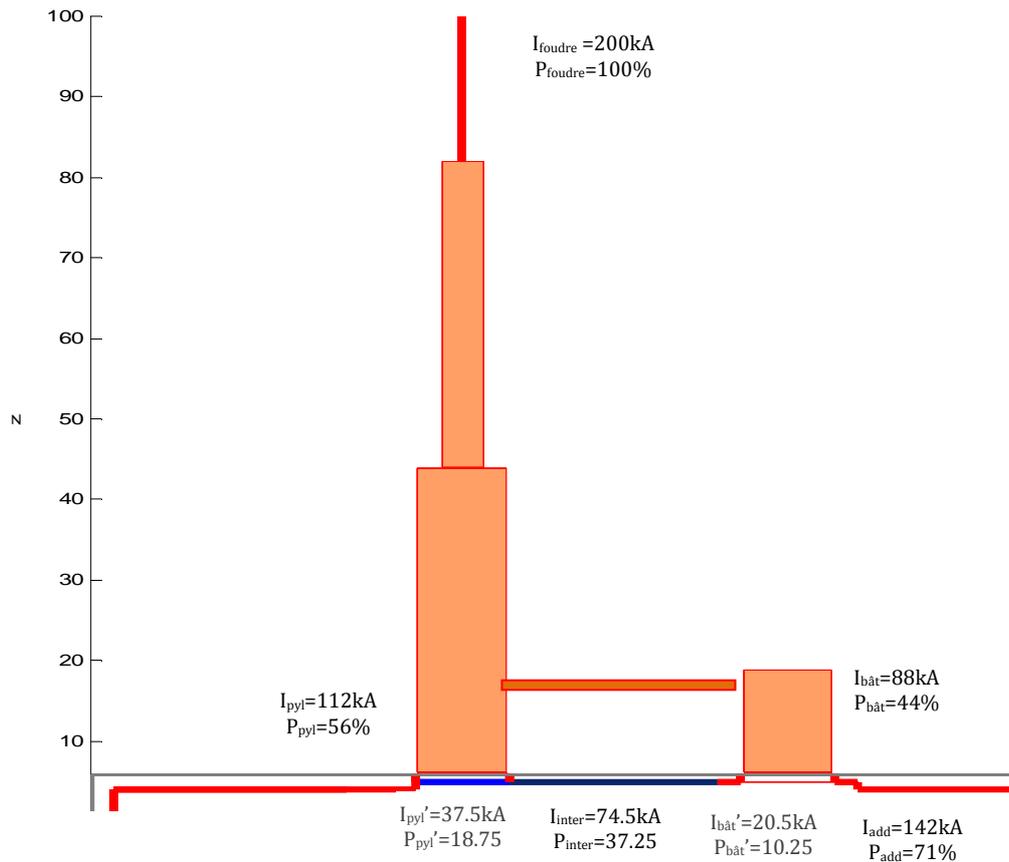


Figure IV-41 : Répartition du courant sur une structure complexe, suite à l'implantation de trois interconnexions entre les réseaux de terre

IV.4.5 Influence de l'utilisation d'une grille de terre sous le bâtiment

IV.4.5.1 Méthode

De manière pratique, il existe différentes manières d'effectuer la mise à la terre d'une infrastructure. Par exemple, l'utilisation de pieux est généralement utilisée pour les installations domestiques, les ceintures de terre sont particulièrement adaptées pour la réfection de mise à la terre, ou encore l'utilisation de grille. Ces deux dernières étant placées sous le bâtiment selon la Figure IV-42.

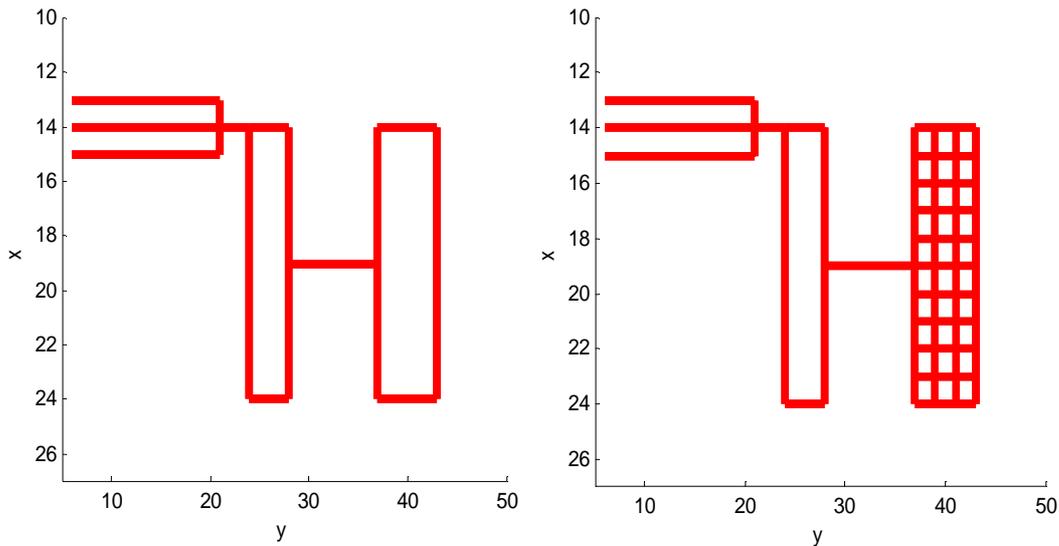


Figure IV-42 : Schématique d'un réseau de terre de type ceinture ou grille sous un bâtiment

Dans le cadre des sites points haut et compte tenu des courants circulant sur la structure, il ne sera traité que l'influence de l'utilisation d'une grille ou d'une ceinture de terre.

Afin de ne prendre en compte que l'influence de l'utilisation de l'une ou l'autre des solutions, le réseau de terre est placé à 40cm en dessous du bâtiment, sur une surface de 22 m² (5 m*4.4 m). Dans le cadre de la grille il est utilisé un pas de 0.4m selon x et de 1m selon y, soit une surface de maille égale à 0.4 m².

Figure IV-43, présente les résultats obtenus par simulation, pour les courants induits sur les adductions. Ces résultats montrent que malgré une surface de contact et donc un pouvoir de dissipation plus important, l'apport de protection fourni par l'utilisation d'une grille n'est pas notable.

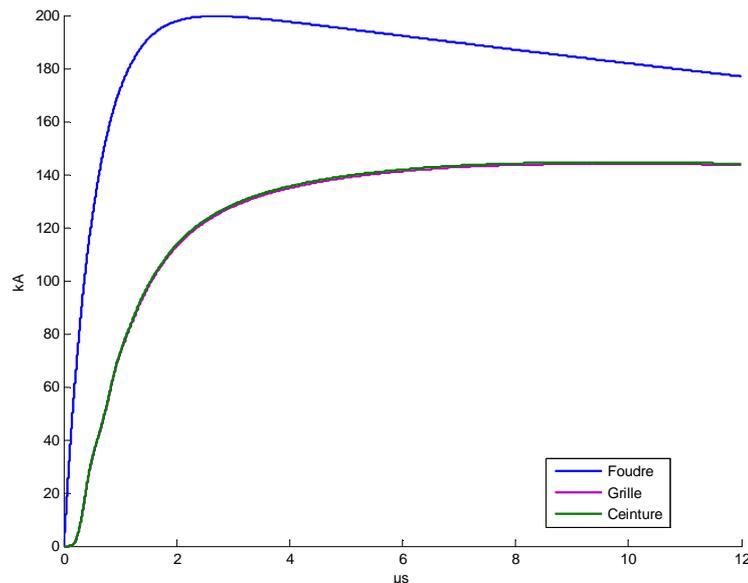


Figure IV-43 : Courant sur les adductions pour différentes configuration de réseau de terre

IV.4.5.2 Synthèse

Les Figure IV-44, Figure IV-45 et Figure IV-46 représentent l'évolution du courant au sein du réseau de terre dans les deux configurations retenues. Les figures de gauche présentent les résultats obtenus dans le cas de l'implantation d'une ceinture, tandis que celle de droite présentent les résultats obtenus dans le cas d'une grille.

Ces résultats permettent de mettre en évidence le chemin privilégié par le courant sur le réseau de terre. En effet que l'on se trouve dans le cas d'une grille ou d'une ceinture le courant circule majoritairement sur les conducteurs de périphérie.

Ainsi dans le cas d'une grille reliée en périphérie à un bâtiment, le gain est négligeable face à l'utilisation d'une ceinture en fond de fouille.

Une analyse plus complète de la grille de terre à été menée au cours de travaux précédents, et permet notamment de mettre en évidence l'importance du point d'entrée du courant sur la grille.[77][78]

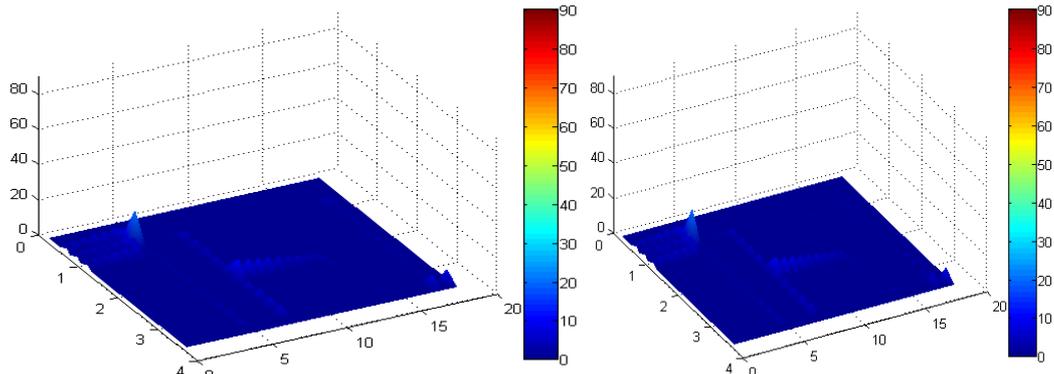


Figure IV-44 : Répartition du courant sur le réseau de terre à $t=0.3\mu s$

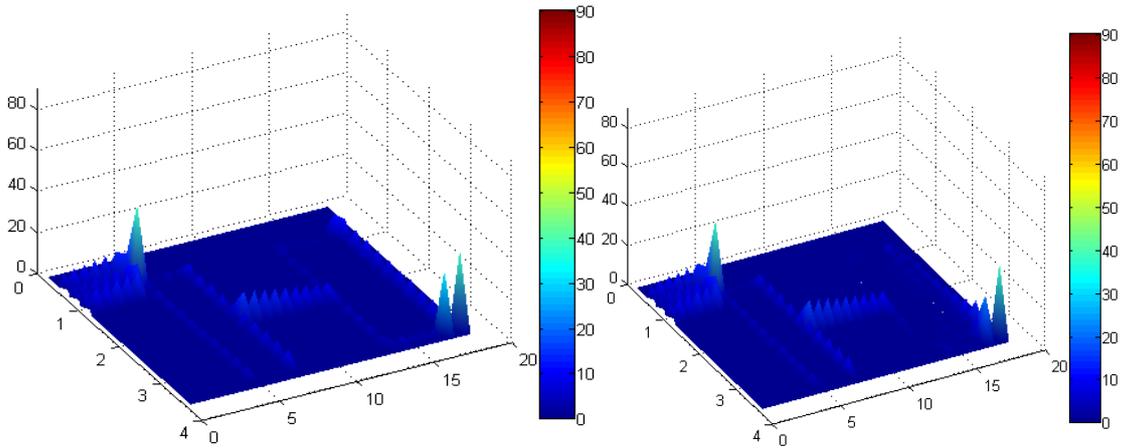


Figure IV-45 : Répartition du courant sur le réseau de terre à $t=0.6\mu s$

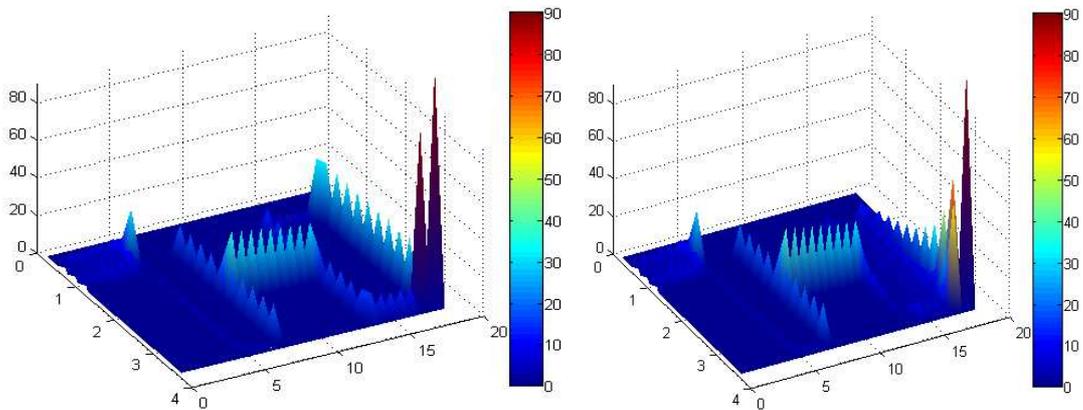


Figure IV-46 : Répartition du courant sur le réseau de terre à $t=3\mu s$

IV.4.6 Influence du nombre de conducteurs de protection sur le courant induit sur les adductions

IV.4.6.1 Méthode

La diminution des courants véhiculés sur les adductions est un des critères importants dans la protection du réseau. En effet les surintensités, induites sur les câbles de télécommunications, peuvent engendrer de nombreux dégâts, comme la destruction d'équipement ou la destruction de câble par claquage.

Afin de limiter la valeur des courants induits sur le câble de télécommunications un conducteur de protection placé au dessus des câbles de télécommunications est couramment utilisé. Le rôle, de ce conducteur est de véhiculer une partie du courant conduit vers les adductions.

Cette étude permet de déterminer l'influence de ce conducteur de protection, ainsi que l'apport engendré par la mise en place d'un deuxième conducteur de protection.

L'étude de la somme des courants sur les adductions, représentée sur la Figure IV-47, montre une augmentation de la part de courant induit sur les adductions lorsque que le nombre de conducteurs de protection augmente. En effet, le courant induit sur les adductions en l'absence de protection représente 46% du courant de foudre, alors qu'il atteint respectivement 71% et 72% du courant de foudre dans le cas d'une implantation de un et de deux conducteurs de protection. Ceci s'explique de manière théorique par la diminution de l'impédance ramenée au point de connexion des adductions, lorsque l'on implante un ou deux conducteurs de protections.

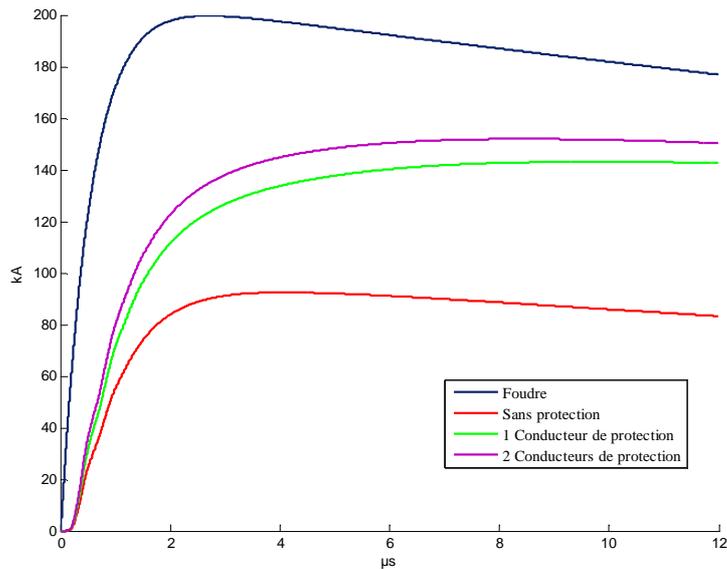


Figure IV-47 : Courant sur les adductions pour différentes configuration de conducteurs de protection

Les résultats obtenus, pour le courant induit sur le câble de télécommunications sont représentés sur la Figure IV-48, et mettent en évidence l'intérêt de l'utilisation de conducteurs de protection. L'utilisation d'un seul conducteur de protection permet de diviser par deux la valeur du courant induit sur le câble de télécommunication, tandis que l'utilisation d'un deuxième conducteur de protection permet de le diviser par 3.

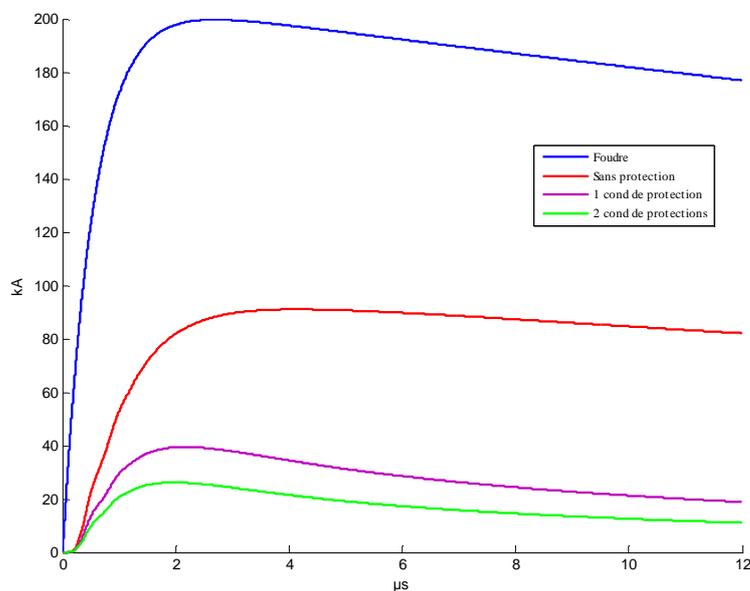


Figure IV-48 : Courant induit sur le câble de télécommunications pour 3 configurations de conducteurs de protection

IV.4.6.2 Synthèse

Cette étude paramétrique sur le nombre de conducteurs de protection a permis de mettre en évidence l'efficacité de cette méthode dans la protection des dessertes souterraines. En effet, l'utilisation d'un ou deux conducteurs de protection permet de diviser par deux l'amplitude du courant sur le câble de télécommunications et donc de réduire les phénomènes de couplage et de claquages.

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.

L'un des principaux inconvénients des codes de modélisation 3D par la méthode des différences finies réside dans le temps de calcul nécessaire lors de la modélisation de structure de taille importante, et nécessitant la modélisation d'éléments de petite taille. Par exemple la modélisation d'un réseau complet, constitué d'un central, d'un réseau de plusieurs kilomètres, et un bâtiment client

Le temps de calcul est dépendant de deux critères :

- Le nombre de maille du volume, le temps de calcul étant proportionnel du nombre de cellules au cube.
- Le pas de temps imposé par le critère de stabilité donné par l'équation IV-22 qui est proportionnel à l'inverse de la racine des dimensions de chaque maille au carré.

$$- dt \leq \frac{1}{v} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dy^2} + \frac{1}{dz^2}}} \quad \text{IV-22}$$

Où v est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu

Lors de la modélisation d'une structure de télécommunications complète, il est indispensable de modéliser les adductions reliées au bâtiment de manière réaliste afin que l'impédance ramenée en sortie du bâtiment soit conservée. Le pas spatial étant fixé par le plus petit élément constituant le bâtiment, les adductions représentent alors un nombre de maille important et donc un temps de calcul long. Les adductions représentant, en

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.

moyenne, 90% du volume total, il paraît donc intéressant de déterminer une méthode permettant de diminuer le nombre de mailles, représentant les adductions, et ainsi la « taille temporelle » des adductions. Pour cela, différentes méthodes existent :

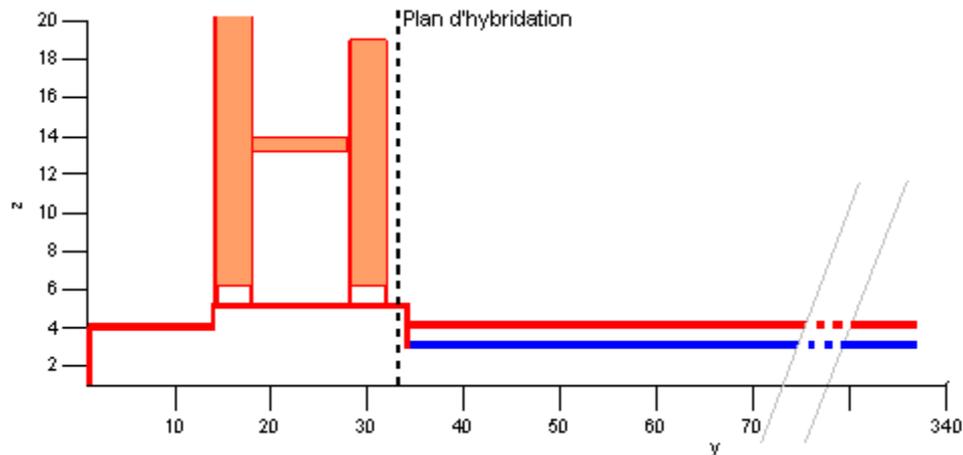
- La méthode du pas adaptatif reposant sur l'utilisation d'un pas spatial variable permettant un maillage serré de l'infrastructure et un maillage lâche des adductions. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir modéliser l'ensemble du réseau par l'utilisation d'une seule méthode de calcul. Cela implique donc la nécessité de re-modéliser l'ensemble du volume lors de modification mineur sur les adductions. De plus, le pas de temps de cette méthode étant basé sur la plus petite taille de maille, les temps de calculs restent importants.
- La méthode de l'hybridation, reposant sur l'utilisation d'un code de calcul de type 3D (méthode des différences finie) pour la modélisation du bâtiment et le passage à un code de type circuit afin de modéliser les adductions. L'utilisation d'un code théorie des lignes dans le cadre de la modélisation du réseau de télécommunications permet la prise en compte de lignes multifilaires torsadées par l'intermédiaire de leurs paramètres linéiques de manière simple.

Une méthode permettant l'hybridation entre les deux modes de calcul permettant une meilleure prise en compte du réseau sera étudiée au sein de cette partie ainsi que les problématiques y étant inhérentes.

IV.5.1 Principe et problématique lié à l'hybridation des différents modes de calcul.

Le principe de l'hybridation consiste à utiliser le code de calcul le mieux adapté à chaque élément afin de diminuer les temps de calcul, et de rester le plus proche des conditions réelles. Dans le cas d'un site de radio télécommunications la séparation est faite en deux parties selon le plan de la Figure IV-49. La première partie est composée de la structure qui sera donc traitée de manière globale par l'intermédiaire d'une méthode 3D. La seconde partie se compose des adductions pouvant être traitées par un code de type théorie des lignes.

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.



L'interconnexion entre les codes peut être envisagée de deux manières différentes. D'une part par un traitement en simultané, avec un passage de variable dynamique à chaque pas de temps, et d'autre part par le traitement de manière disjointe des deux parties l'une après l'autre. Cette deuxième méthode faisant l'hypothèse que les différents éléments n'ont pas d'influence les uns sur les autres.

Le bon fonctionnement de l'hybridation entre deux codes de calcul est essentiellement lié aux conditions aux limites applicables au niveau des points de jonctions.

Dans le cadre d'un site de radio télécommunications il faut :

- Déterminer l'impédance équivalente des adductions à présenter au bâtiment afin de ne pas modifier la répartition des courants au sein même de la structure et par cela son rayonnement. Ainsi on détermine l'équivalent FDTD de l'ensemble voulant être modélisé par la théorie des lignes
- Déterminer l'impédance de l'ensemble pylône.\ bâtiment \ réseau de terre a présenter en entrée des adductions, par détermination d'un modèle équivalent circuit de l'ensemble FDTD
- Déterminer le champ rayonné par la structure.

IV.5.2 Effet induit par rayonnement d'une structure foudroyé sur les adductions y étant rattachées.

Il a été vu dans le chapitre précédent la répartition du courant de foudre sur une station de radio télécommunications foudroyée. Les courants obtenus en différents points sont liés à deux phénomènes combinés, d'une part le courant induit de manière conduite, et d'autre part le courant induit de manière rayonnée.

Afin de pouvoir déterminer l'influence de l'un et de l'autre il est nécessaire d'effectuer deux modélisations. D'un part une simulation globale reprenant la configuration de base du chapitre précédent. Et d'autre part, une simulation où les adductions sont déconnectées de la structure afin de supprimer la composante conduite selon le schéma de la Figure IV-50. Afin de ne pas modifier le comportement des courants au sein du bâtiment, et par de là son rayonnement, le point de connexion des adductions est chargé par une inductance L et une résistance R en série, de manière à obtenir le même comportement que lors de la simulation d'origine. Les adductions sont, quand à elles, adaptées aux deux extrémités.

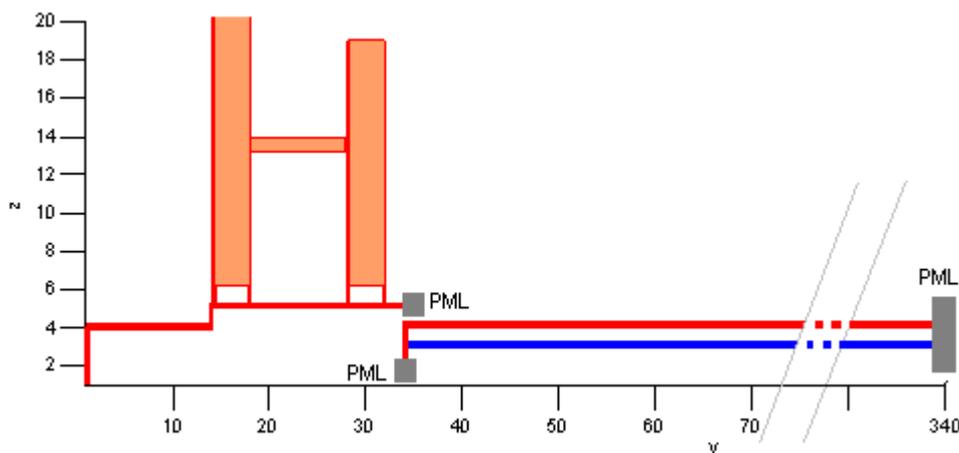


Figure IV-50 : Schéma de modélisation du courant induit sur les adductions

Les résultats obtenus sont présentés sur Figure IV-51, où le courant induit est représenté par la courbe grise tandis que le courant induit par la somme des contributions, induite et conduite, est représenté par la courbe rouge, cela permet de déterminer l'influence de chaque composante.

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.

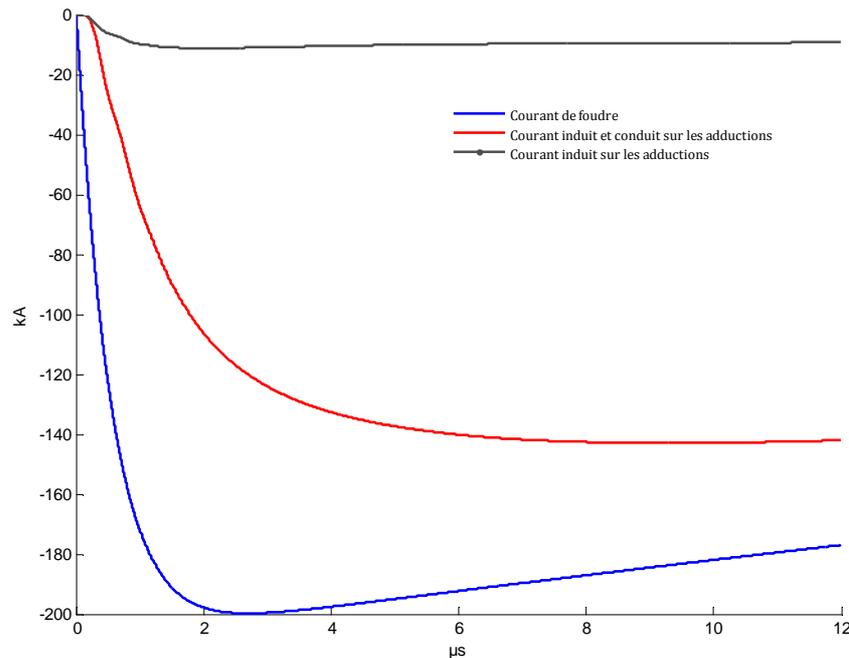


Figure IV-51 : Courants induits ou/et conduit sur les adductions

A la vu des résultats de la Figure IV-51, nous pouvons en conclure que le courant induit sur les adductions est composé de la somme des deux composantes induite et conduite. La répartition entre le deux composantes s'effectuant de la manière suivante :

- 8% du courant sur les adductions sont induits par le rayonnement du canal et de la structure
- 92% du courant sur les adductions sont dus à la composante conduite.

Nous pouvons donc conclure sur l'influence de la composante induite sur les adductions, et il est donc indispensable, dans le cadre d'une hybridation, de tenir compte de cette composante.

Pour cela nous proposons la détermination d'un modèle équivalent circuit et ligne de transmission de l'ensemble canal foudre / pylône.

IV.5.3 Modèle équivalent circuit et lignes de transmission de l'ensemble canal foudre / pylône. [79] [80]

Afin de simplifier l'étude et ainsi de limiter les temps de calcul, nous proposons un modèle équivalent circuit et ligne de transmission de l'ensemble canal foudre / pylône. Ce modèle

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.

sera alors utilisé comme port d'entrée, dans le cadre d'une modélisation par la théorie des lignes de transmission.

Pour cette étude nous avons choisi d'utiliser une structure simple représentée par la Figure IV-52.

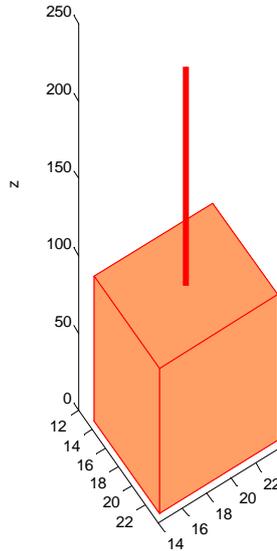


Figure IV-52 : Exemple de structure étudié

IV.5.3.1 Modèle équivalent

Il est important de bien définir le modèle équivalent de l'ensemble de la structure. La Figure IV-53 donne un modèle possible qui peut être décomposé en trois parties.

- Une source de courant pour le canal foudre
- Une matrice impédance pour le pylône foudroyé
- Une impédance de charge pour le réseau de terre et le sol

De plus, il existe deux désadaptations à prendre en compte dans le modèle :

- une entre le pylône et le canal foudre : ρ_b
- une entre le pylône et le sol : ρ_g

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.

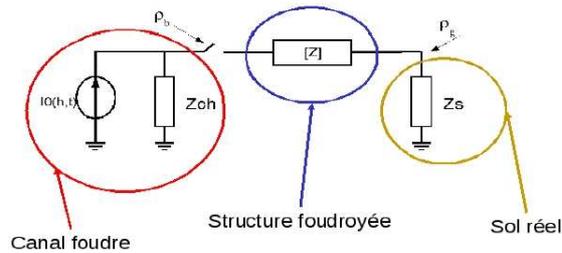


Figure IV-53 : Modèle équivalent circuit de l'ensemble canal foudre / pylône

Les inconnues de ce modèle sont les désadaptations et la matrice impédance de la structure foudroyée. Afin de les déterminer, nous utilisons les coefficients de transmission S_{21} et de réflexion S_{11} de la structure

IV.5.3.2 Obtention du coefficient de réflexion du pylône

Pour obtenir le coefficient de réflexion du pylône, il est nécessaire de réaliser trois études. La première consiste à étudier un canal foudre infini de façon à obtenir le champ incident E^{inc} . Dans la deuxième, on ajoute le pylône que l'on rend infini au moyen de PML. On met alors en évidence la désadaptation ρ_b . Enfin, la dernière consiste à ajouter un sol réel à la précédente de façon à mettre en évidence la désadaptation ρ_s . On connaît ainsi le champ total E^{tot} . Pour obtenir le coefficient de réflexion il suffit ensuite de faire le rapport entre le champ incident E^{inc} et le champ réfléchi E^{tot} selon la formule suivante :

$$S_{11} = \frac{\int (E^{tot} - E^{inc}) ds}{\int E^{inc} ds} \quad \text{IV-23}$$

Etude du canal foudre : Estimation du champ incident

Afin de ne prendre en compte que le champ incident dû au canal foudre, le canal foudre pénètre dans des PML à ses deux extrémités. Nous choisissons arbitrairement, un plan de référence à une distance $L=3$ m de la source de courant selon la Figure IV-54. Nous obtenons ainsi la valeur de E_{inc} .

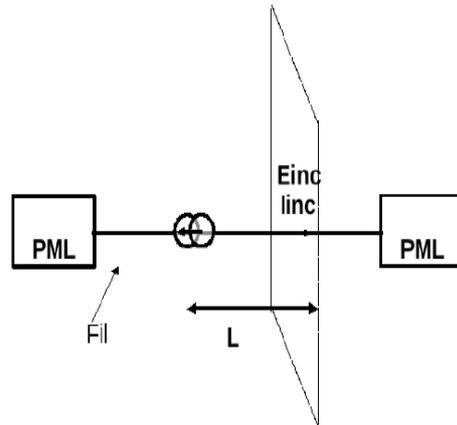


Figure IV-54 : Schéma de l'étude du canal foudre

Etude du canal foudre et du pylône : Evaluation du champ total

Suite à l'implantation du pylône, lorsque l'on se place à la même distance L de la source de courant, on est en présence du champ incident mais également du champ réfléchi. Les deux cas d'étude présentés sur la Figure IV-55 permettent d'obtenir le champ total dans les deux configurations nécessaires à la détermination des différents coefficients de réflexions.

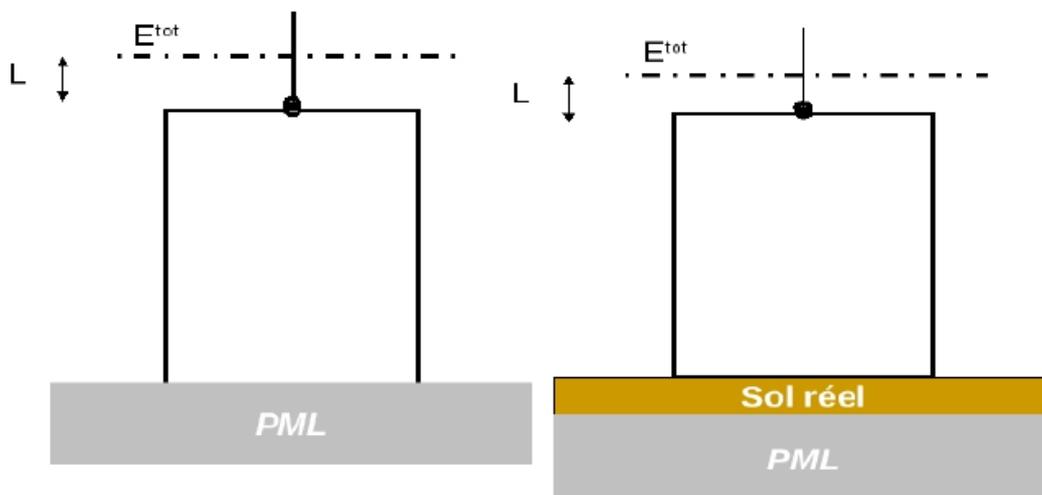


Figure IV-55 : Schéma de principe permettant l'obtention de E^{tot}

Détermination des coefficients de réflexion et de l'impédance Z du pylône

Connaissant le champ incident et le champ total, il est donc possible de déterminer le coefficient de réflexion S_{11} à l'interface canal foudre / pylône (ρ_b), et pylône / sol (ρ_g) par l'intermédiaire de la formule IV-23, dont le résultat est donné sur la

Figure IV-56

IV.5 Schéma équivalent permettant l'hybridation entre un code 3D et un code théorie des lignes.

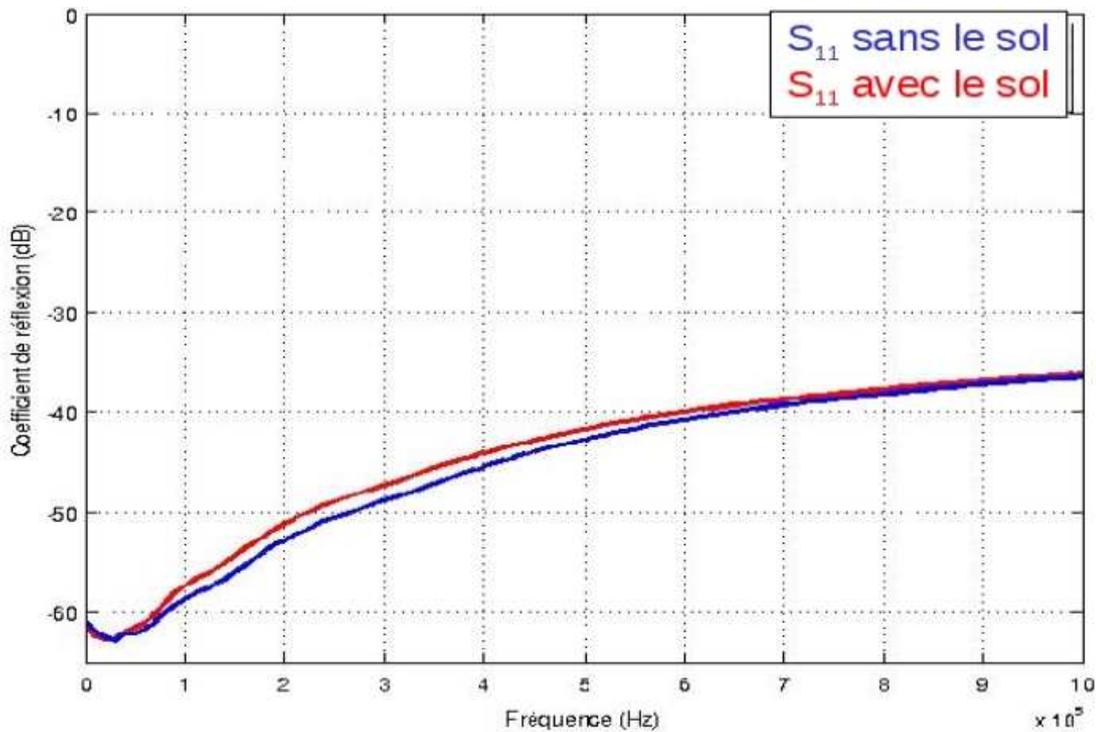


Figure IV-56 : Calcul du coefficient de réflexion

Nous constatons que très peu de champ est réfléchi par le pylône. Tout le courant foudre est bien conduit par les armatures métalliques du pylône puis dissipé soit directement dans le sol soit via le réseau et la prise de terre.

Dans cette étude, le pylône se comporte donc comme un conducteur sans perte. A partir de la matrice [S] du pylône, on peut en déduire sa matrice impédance [Z] par le système d'équations IV-24.

$$\begin{cases}
 Z_{11} = \frac{(1+S_{11})(1-S_{22})*(S_{12}*S_{21})}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}*S_{21}} \\
 Z_{12} = \frac{2*S_{12}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}*S_{21}} \\
 Z_{21} = \frac{2*S_{21}}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}*S_{21}} \\
 Z_{22} = \frac{(1-S_{11})(1+S_{22})*(S_{12}*S_{21})}{(1-S_{11})(1-S_{22})-S_{12}*S_{21}}
 \end{cases}
 \quad \text{IV-24}$$

Il est alors possible de remplacer cette matrice [Z] par le modèle linéique donné Figure IV-57, afin d'implanter l'ensemble de la structure dans un code circuit.

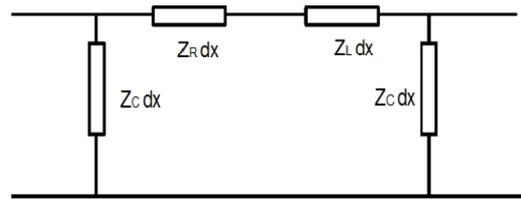


Figure IV-57 : Modèle circuit de l'ensemble canal foudre / pylône / réseau de terre

IV.6 Conclusion

Une recherche sur la répartition des courants, véhiculés par une structure impactée de manière direct par une onde de type foudre, a été réalisée au cours de ce chapitre. Cela, dans l'intérêt de diminuer les courants ramenés sur le réseau par les adductions.

La première phase de l'étude, dédiée à l'étude de la répartition des courants au sein de la structure, permet de montrer que, dans le cadre de notre étude et pour une résistivité du sol de 2000 $\Omega.m$:

- 71% du courant de foudre arrive sur les adductions
- 60% du courant de foudre est véhiculé par le chemin de câble reliant le bâtiment au pylône.
- La dissipation des charges est effectuée à 19.75% par la ceinture de terre du pylône et la patte d'oeie. La grille du bâtiment permet quand à elle, une dissipation de 9.25% du courant de foudre.

La seconde partie, traitant de l'influence de différents paramètres sur la répartition du courant au sein de la structure, nous a montré :

- Les variations engendrées par la modification de la résistivité du sol, ce qui nous a permis de mettre en place une loi racine carré permettant la détermination du pourcentage du courant de foudre induit sur le câble de télécommunications tels que :

$$I_{\text{câble telecom}} = 0.44 * \sqrt{\rho_{\text{sol}}} * I_{\text{foudre}} \quad \text{IV-25}$$

Avec $I_{\text{câble telecom}}$, la valeur crête du courant sur le câble de télécommunication, ρ_{sol} la résistivité du sol en Ohms.m et I_{foudre} le courant crête de l'impact foudre.

- L'influence de la longueur des brins constituant la patte d'oie, sur le pouvoir de dissipation du réseau de terre du pylône et sur le courant induit sur les adductions. Cela, nous permet de proposer deux abaques, l'un permettant la détermination du courant induit sur les adductions en fonction de la longueur des brins et de la résistivité du sol (Figure IV-30), et l'autre permettant l'estimation du pouvoir de dissipation du réseau de terre du pylône en fonction de la longueur des brins et de la résistivité du sol (Figure IV-31).
- L'influence de l'implantation d'une seconde patte d'oie, nous permettant de conclure sur le gain apporté par un tel dispositif, et de confirmer la recommandation de la norme 62305-3 [10].

Ces études montrent également que :

- le gain de protection apporté par la patte d'oie ainsi que l'importance de la longueur des brins
- L'apport bénéfique de la protection des adductions par conducteur de protection
- La majorité du courant de foudre est véhiculée par le chemin de câble, c'est pourquoi nous recommandons le remplacement du chemin de câble aérien par un passage de câble souterrain connecté au réseau de terre.

La dernière partie de ce chapitre consacré à l'étude de l'hybridation entre un code de type différence finie et un code circuit ou théorie des lignes a offert un aperçu des problématiques pouvant être rencontrées ainsi qu'une méthode permettant le calcul du schéma équivalent d'une structure simple. Il sera retenu de cette recherche :

- La présentation des différentes méthodes permettant la modélisation de structures complexes, ainsi que les moyens permettant d'obtenir une diminution des temps de calcul
- La proposition d'une méthode permettant le calcul de l'équivalent circuit d'une structure FDTD simple.

Conclusion et Perspectives

Le travail effectué dans cette thèse, s'inscrit dans le cadre général de la protection des réseaux de télécommunications contre la foudre. Nous nous sommes intéressés, en premier lieu, aux différents mécanismes d'agression de la foudre d'un bâtiment muni de ses réseaux d'adduction. Après avoir rappelé les effets de la foudre, nous avons ensuite indiqué dans le chapitre 1, les moyens de protection et les normes actuelles permettant de réaliser la protection de ce type d'installations.

Notre travail de recherche a été plus particulièrement orienté vers l'optimisation de la protection des réseaux souterrains réalisée au moyen d'un ou plusieurs conducteurs de protection. Cela, nous a amené à modéliser, de manière efficace, ce réseau complexe de télécommunications, afin de pouvoir évaluer l'efficacité et de quantifier le gain de ce type de protection. Ainsi dans le chapitre 2, nous avons choisi de modéliser la partie filaire du réseau à l'aide d'un code de calcul basé sur la théorie des lignes, et la partie bâtiment par un code 3D utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel.

Le chapitre 3 a été consacré à l'étude des courants générés sur une desserte aéro-souterraine protégée par un conducteur de protection lors d'un impact direct ou indirect. Les résultats obtenus aussi bien de manière expérimentale que par simulation numérique, ont mis en évidence et permis de quantifier l'efficacité de la protection des câbles enterrés assurée au moyen de dispositifs constitués de fils nus lors d'impacts directs ou indirects. Cette étude exhaustive nous a permis d'analyser l'influence de différents paramètres physiques sur la répartition des courants et de proposer plusieurs abaques d'application pratique ayant pour objectifs :

- l'estimation du pouvoir de dissipation linéique d'une électrode de terre en fonction de la résistivité du sol ;
- la détermination de la longueur optimale du conducteur écran permettant d'obtenir un minimum de courant sur le câble de télécommunications lors d'un impact direct, en fonction du nombre de conducteurs de protection et de la résistivité du sol.

Dans le dernier chapitre, nous nous sommes intéressés aux courants réinjectés sur les réseaux d'adduction desservant un bâtiment impacté directement par la foudre. Le calcul ainsi développé nous a permis d'établir une cartographie de la répartition des courants sur la structure modélisée et de leur évolution en fonction de plusieurs paramètres physiques. Ainsi, parmi les résultats majeurs obtenus, nous pouvons noter :

- La proposition d'une formule simple permettant la détermination de la valeur crête du courant induit sur un câble de télécommunications connecté à un bâtiment impacté et ce en fonction de la conductivité du sol et du courant à la base du canal ;
- La proposition d'abaques permettant l'estimation du pouvoir de dissipation d'une ceinture de terre équipée d'une patte d'oie en fonction de la résistivité du sol et de la longueur des brins constituant la patte d'oie ;
- Le gain apporté dans la protection par l'installation d'une deuxième patte d'oie et de l'amélioration de l'interconnexion entre les réseaux de terre ;
- La quantification de la protection engendrée par la mise en place d'un ou plusieurs conducteurs de protection sur les adductions d'un bâtiment.

Cependant, il convient de signaler que ces résultats ont été obtenus dans le cadre de l'étude de la protection des sites de radio-télécommunications et ne peuvent donc pas être transposés tels quels à un bâtiment d'architecture différente. Il serait donc intéressant de poursuivre ce travail en étudiant l'influence de la taille du bâtiment et de son réseau de terre sur les courants induits sur les adductions.

La fin de cette thèse a également été consacrée à la recherche d'une méthode d'hybridation permettant une diminution des temps de calcul et l'utilisation du code de calcul le plus approprié en fonction du système à modéliser. Ainsi dans le cadre d'un réseau de télécommunications, on privilégiera un code circuit ou théorie des lignes pour les parties filaires et un code 3D pour les structures de type bâtiment. La méthode présentée dans le chapitre 4 a permis de donner une première approche pour implémenter une telle méthode, en déterminant un modèle de type circuit pour une structure simple. On s'est également attaché à montrer les limites de cette approche, en mettant en évidence plusieurs problèmes qui mériteraient une étude plus approfondie. On peut ainsi citer :

-
- La détermination d'un modèle équivalent du réseau de terre, avec notamment la prise en compte des multiples connexions possibles ;
 - La détermination du champ rayonné par une structure et la prise en compte du retard de propagation ;
 - La prise en compte des dispositifs de protection non linéaires tels que des parafoudres à gaz.

Un autre axe d'amélioration prometteur peut également être envisagé, sur la base d'une parallélisation des codes de calcul et par l'ajout de nouveaux modèles dans la méthode des différences finies permettant :

- L'implémentation de dispositifs de protection non linéaires par l'utilisation d'un algorithme de Runge-Kutta ;
- L'implémentation de câbles de télécommunications de type multifilaires avec leur pas de torsadage.

In fine, de telles améliorations devraient permettre, au moyen d'un maillage adaptatif, un relâchement du maillage sur les fils et ainsi rendre possible la modélisation d'un réseau de télécommunications en partant du central jusqu'au client.

Bibliographie

- [1]. **M.A. Uman.**
The lightning discharge. Florida. Academic Press, pp 377. 1987
- [2] **C. Gary.**
La foudre : des mythologie antiques à la recherche moderne. Edition Masson. 1995
- [3] **K. Berger , R.B. Anderson.**
Parameters of lightning flashes. Electra, pp. 23-27. 1975
- [4] **B. Hultzer, D. Hutzler.**
A model of the breakdown in large air gaps. Bulletin de D.E.R. d'EDF, Vol. 4. 1982
- [5] **I. Fofana.**
Modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air. Thèse de l'école centrale de Lyon. 1996.
- [6] **UIT-T**
K67-Evaluation des surtensions induites par la foudre sur le réseau de télécommunications lors d'un impact direct ou indirect. Norme IUT-T. 2006.
- [7] **P. Degauque, A. Zeddani**
Compatibilité électromagnétique : des concepts de base aux applications. Edition Lavoisier Vol II. 2007.
- [8] **Organisation Internationale de Normalisation**
ISO/IEC Guide 2. 2004.
- [9] **CEI**
Norme CEI-62305-2:"Evaluation des risques". 2006.
- [10] **CEI**
*Norme CEI-62305-3:"Dommages physiques sur les structures et risques humains.*2006.
- [11] **CEI**
Norme CEI-62305-1 : "Principes Généraux". 2006.
- [12] **CEI**
Norme CEI-62305-4:"Réseaux de puissance et de communication dans les structures" 2006.
- [13] **P. Chowdhuri, J.G. Anderson**
Parameters of Lightning Strokes : A Review IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 20. 2005
- [14] **F. Heidler, J.M. Cvetič, B.V. Stanić**
Calculation of lightning Current Parameters. IEEE transaction on Power delivery, Vol. 14, pp. 399-404. 1999

-
- [15] **C.E.R. Bruce, R.H. Golde**
The lightning discharge Vol. 88, pp. 487-520. 1941
- [16] **C.A. Nucci, C. Mazzetti, F. Rachidi, M. Ianoz**
On lightning return stroke models for LEMP calculation. 1988.
- [17] **J.L. Bermudez-Arboleda.**
Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects. Thèse de l'école polytechnique fédérale de Lausanne. 2003.
- [18] **M.A. Uman, D.K. McLain**
Magnetic field of lightning return stroke. IEEE.Trans., vol. 88, pp. 646, 1969.
- [19] **V. Rakov**
Lightning return stroke speed. Journal of Lightning Research, Vol. 1, pp. 80-89.2007
- [20] **C. Nucci, G. Diendorf, M. Uman, F.Rachidi**
Lightning return stroke current models with specified channel based current : a review and comparaison. Journal of Geophysical Research, vol. 95, pp.811-828, 1990
- [21] **Y.T. Lin, M.A. Uman, R.B. Standler**
Lightning return stroke models. Journal of Geophysical Research Vol. 3, pp. 1571-1583. 1980
- [22] **V.A. Rakov, A.A. Dulzon**
Calculated Electromagnetic fields of lightning return stroke current, Tekh. Elektrodinam Vol. 1, pp. 87-89. 1987
- [23] **V.A. Rakov**
Engeneering models of the lighthning return stroke. Proceeding of international symposium on Lightning protection. Curitiba. 2003.
- [24] **V.A. Rakov**
Return Stroke Modeling : Recent Developements. International Conference on Grounding and Earthing. Rio de Janeiro. 2002
- [25] **F Heidler,**
Travelling current souce model for LEMP calculation. 6th Symposium and technical exhibition on electromagnetic Compatibility. Zurich pp. 157-162. 1985
- [26] **G. Diendorfer M.A. Uman**
An improved return stroke model with specified channel-base current. Journal Geophysics Research Vol. 95. 1990
- [27] **J.L. Bermudez, F. Rachidi, C.A. Nucci.**
Far-field Current relationship Based on the TL model for lightning return stroke to elevated strike objects. IEEE Transaction on EMC, Vol. 47. 2005
- [28] **A. Sommerfeld**
Über die Ausbreitung des wellen in der drahtlosen Telegraphie. Annal Physics Vol. 28. 1909
- [29] **F.Rachidi**
Effets électromagnétique de la foudre sur les lignes de transmission aériennes : Modélisation et simulation. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne 1991.

-
- [30] **C. Leteinturier**
Champ électromagnétique émis par une décharge orageuse : Modèle théorique intégrant les variations de la résistivité du sol. Edition CNET :Centre National d'Etude des Télécommunications.1980.
- [31] **D. Orzan**
Couplage externe et interne entre un champ électromagnétique et un réseau de ligne multifilaire. Thèse de l'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne , Thèse N°1768. 1998
- [32] **A. Minoumi, F. Delphino, F. Rachidi**
On the computation of underground Electromagnetic fields generated by lightning : A comparison between different approaches. IEEE. 2007.
- [33] **V. Cooray**
Underground Electromagnetic fields generated by the return strokes of lightning Flashes. IEEE, 2001.
- [34] **A. Mimouni, F. Rachidi**
Electromagnetic environment in the immediate vicinity of a lightning return stroke. Journal of lightning Research, 2006.
- [35] **F. Delfino, R. Procopio, M. Rossi, F. Rachidi, C.A. Nucci**
Evaluation of underground lightning electromagnetic fields. EMC Europe 2006. Barcelona 2006.
- [36] **V. Cooray**
Horizontal fields generated by return strokes. Radio Science Vol. 27, pp. 529-537. 1992
- [37] **P. Degauque, A. Zeddani**
Compatibilité électromagnétique : des concepts de base aux applications. Edition Lavoisier, Vol. I, 2007.
- [38] **C.D. Taylor, R.S Satterwhite, C.W Harrison**
The response of a terminated two wire transmission line Excited by a Non-uniform Electromagnetic field. IEEE Vol. 13, pp. 887-889. 1986
- [39] **A.K Agrawal, H.J Price, S.H Gurbaxani.**
*Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field*Vol. EMC-22, pp. 119-129. 1980
- [40] **F. Rachidi**
Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes : modélisation et simulation. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 1991.
- [41] **F. Rachidi**
Formulation of field to transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field. IEEE Transmission on EMC. 1993
- [42] **J.R Carson**
Wave propagation in overhead wires with ground return. Bell System Technical Journal, Vol.5, pp. 539-554.1926

-
- [43] **A. Timotin**
Longitudinal transient parameters of a unifilar line with ground return. Revue Roumaine des Sciences et Techniques, Vol. 12, pp. 523-535.1967
- [44] **F. Rachidi, S.L. Loyka, C.A. Nucci, M. Ianoz,**
A new expression for the ground transient resistance matrix elements of multiconductor overhead transmission lines. Electrical Power Systems Research, Vol. 65, pp 41-46.2003
- [45] **K. Kerroum, F. Paladian.**
Extension du code de calcul LINEF.LASMEA-URA CNRS N°1793 - Equipe Electromagnétisme, 1993.
- [46] **O. Daguillon,**
Prise en compte de la complexité des installations du réseau de France Télécom dans le cadre de l'étude théorique et expérimentale des phénomènes de couplage électromagnétique. Thèse de l'université de Clermont-Ferrand, 1995.
- [47] **F. Vedel.**
Etude théorique et expérimentale des perturbations électromagnétiques sur des câbles coaxiaux ou multipaires induites par des lignes d'énergie. Mémoire du CNAM de Montluçon. 1992.
- [48] **F. Rachidi, C.A. Nucci, M. Ianoz , C. Mazzetti**
Response of multiconductor power lines to nearby lightning return stroke electromagnetic fields. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, pp. 1404-1411. 1997
- [49] **Y. Baba, V.A. Rakov.**
Voltage induced on an overhead wire by lightning strikes to a nearby tall ground object. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 48.2006
- [50] **Y. Baba, V.A. Rakov**
On the interpretation of ground reflexions observed in small-scale experiments simulating lightning stikes to towers. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 47, pp. 533-542.2005
- [51] **J.L. Bermudez, F. Rachidi, M. Rubinstein**
Far field current relationship based on the TL model for Lightning return strokes to elevated strike Objects. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 47, pp. 146-158.2005
- [52] **J.L. YEE**
Numerical solution of inital boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. Antennas and Propagation, IEEE, Vol. 14, pp. 302-307. May 1966
- [53] **E.D. Sunde**
Earth conduction Effects in transmission systems, pp. 317-321. 1968
- [54] **D.A. Douglas**
Ligthning current surges. Proc. of the Wire and Cable Synopsium. 1971.
- [55] **S.G Ungar**
*Effects of lightning punctures on the core-shield voltage of buried cable.*The Bell System Tech. Journa, Vol. 59, pp. 333-366.1980

-
- [56] **R. S. Babu, M. J. Thomas**
Lightning induced voltage on buried shielded cables. Incemic. 2003.
- [57] **Z. Song, M.R. Raghuveer**
Complete Assessment of impact of lightning strikes on buried cables. IEEE Canadian Conference on electrical and computer Engineering. 2002.
- [58] **E. Petrache, F. Rachidi, M. Paolone**
Lightning induced Disturbances in buried Cables Part I : Theory. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 47. 2005
- [59] **E. Petrache, F. Rachidi, M. Paolone**
Lightning induced Disturbances in buried Cables Part II : Experiment and model validation. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, Vol. 47. 2005
- [60] **EN-61633-1**
Lightning protection, Telecommunications lines, Fibre optic installations. 2000.
- [61] **ITU-T**
Protection of Optical Fibre cables. Recommendation K25 Feb 2000.
- [62] **ITU-T**
Lightning Handbook. Geneva The Protection of Telecommunications Lines and Equipment Against Lightning Discharges. 1974.
- [63] **C.F. Barbosa, F.E. Nallin, S. Person, A. Zeddami**
The effect of protection procedures applied to telecommunication lines on the lightning induced surges. ICLP 2004. Versailles. 2004.
- [64] **C.F., Zeddami A., Day P et Y., Bourgeois Barbosa**
Effect of guard wire in protecting a Telecommunication buried cable struck by rocket-triggered lightning. 29 International Conference on Lightning protection. June 2008.
- [65] **M. Bejleri, V. A. Rakov, M. A. Uman, J. Rambo, C. T. Mata, M. I. Fernandez**
Triggered lightning testing of an airport runway lighting system. IEEE Trans. EMC, Vol. 46, pp. 96-101. Feb 2004
- [66] **K. Kerroum,**
Approche globale du couplage d'une onde EM avec un système de câbles multifilaires
CEM 94 pp. 247-252,1994
- [67] **J.A Straton, McGraw-Hill**
Electromagnetic Theory. 1961.
- [68] **F. Paladian, K. Kerroum, M. Klingler**
Détermination des paramètres linéiques de lignes multifilaires à partir de mesures de matrices
S. 10ème Colloque International de la Compatibilité Electromagnétique CEM 2000, 2000.
- [69] **A. Zeddami**
Couplage d'une onde électromagnétique rayonnée par une décharge orageuse à un câble de télécommunications. Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois. 1988.

-
- [70] **Y. Bourgeois, A. Zeddou, A. Reineix**
Optimisation de la protection d'un câble de télécommunications enterré contre les effets directs et indirects de la foudre. CEM 2008. 2008.
- [71] **Y. Bourgeois, A. Zeddou, A. Reineix**
Optimization of the protection of a buried telecommunications cable against lightning effects. EUROEM 2008. 2008.
- [72] **C. Guiffaut, A. Reineix**
Improvement of FDTD codes for EMC applications. Piers , Session 41. 2004
- [73] **C. Guiffaut, A. Reineix.**
Résolution de problèmes de Compatibilité Electromagnétique par des méthode temporelles 3D. 2006. CANUM 2006.
- [74] **J. Meixner**
Constitutive equations of the differential type as approximations. Rheologica Acta , pp. 398–399. 1982
- [75] **E.D. Sunde**
Earth conduction Effects in transmission systems. New-York, pp. 317-321. 1968
- [76] **M.I. Lorenzou**
Time domain of analysis of grounding electrodes transient behavior. IEEE Transaction on power delivery, Vol. 18, pp. 517-524.2003
- [77] **J. Ribeiro, Y. Bourgeois, R. Tarafi, A. Zeddou, P. Bonnet**
Modélisation du couplage entre une décharge atmosphérique et un réseau de télécommunications lors d'un impact direct. Saint Malo : CEM 2006. 2006.
- [78] **J. Ribeiro**
Etude des risques de défaillance d'un réseau de télécommunications soumis aux effets directs et indirects de la foudre. Thèse de l'université de Clermont-Ferrand. 2005.
- [79] **M. Troubat, E. Perrin, F. Guiffaut, A. Reineix, A. Zeddou**
Modélisation équivalente circuit et ligne de transmission d'un ensemble canal foudre-bâtiment-sol. CEM2008. 2008.
- [80] **M. Troubat, Y. Bourgeois, A. Reineix, A. Zeddou**
Modeling of the coupling mechanisms between lightning and a complex Telecommunications network. Cambridge : Piers 2008. 2008.
- [81] **A. Taflov**
The Finite-Difference Time-Domain Method. Computational Electrodynamics. 2000
- [82] **R. Holland, L. Simpson**
A free field EMP coupling and scattering code. IEEE, Transaction on Nuclear Sciences, Vol. 6, pp. 2416-2421. 1997
- [83] **A. Bayliss, E. Turkel**
Radiation boundary conditions for wave-like equations. Comm.Pur. Appl. Math., Vol. 23, pp. 707-725. 1980

-
- [84] **L. Halpern, L. Trefethen**
Well-posedness of one way wave equations and Absorbing boundary conditions. Mathematics of computation, vol. 47, pp. 421-435. 1986
- [85] **J-P. Berenger**
A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics, Vol. 144, pp. 195-200. 1994
- [86] **J-P. Bérenger**
A perfectly matched layer for the FDTD solution of wave-structure interaction problems. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 44, pp. 1-8. 1996
- [87] **R. Holland, L. Simpson**
Finite difference analysis of EMP coupling to thin struts and wires. Transaction on electromagnetic compatibility, Vol. 23, pp. 88-97. 1981

Annexe I : Résolution par la Méthode FDTD des équations de Maxwell

AI.1 Les équations de Maxwell :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad \text{AI-26}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B}(\vec{r}, t) = 0 \quad \text{AI-27}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{J}_c(\vec{r}, t) \quad \text{AI-28}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) = 0 \quad \text{AI-29}$$

Avec

\vec{E} le vecteur électrique, \vec{D} le vecteur induction électrique,

\vec{H} le vecteur magnétique, et \vec{B} le vecteur induction magnétique

et \vec{J}_c le vecteur densité de courant électrique de conduction.

\vec{r} est le vecteur de l'espace considéré à un instant t

Dans le cas d'un milieu linéaire, isotropes, homogènes non magnétiques et non dispersifs, les vecteurs électriques et magnétiques et la densité de courant électrique sont donnés par les relations par l'équation:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \varepsilon \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \text{AI-30}$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \cdot \vec{H}(\vec{r}, t) \quad \text{AI-31}$$

$$\vec{J}_c(\vec{r}, t) = \sigma \cdot \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \text{AI-32}$$

AI.2 La méthode FDTD : Principes généraux

Si l'on suppose une fonction $f(x)$ de variable x , continue et dérivable, connue en $(x_0 + \frac{dx}{2})$ et $(x_0 - \frac{dx}{2})$ comme définie par la Figure A1-58

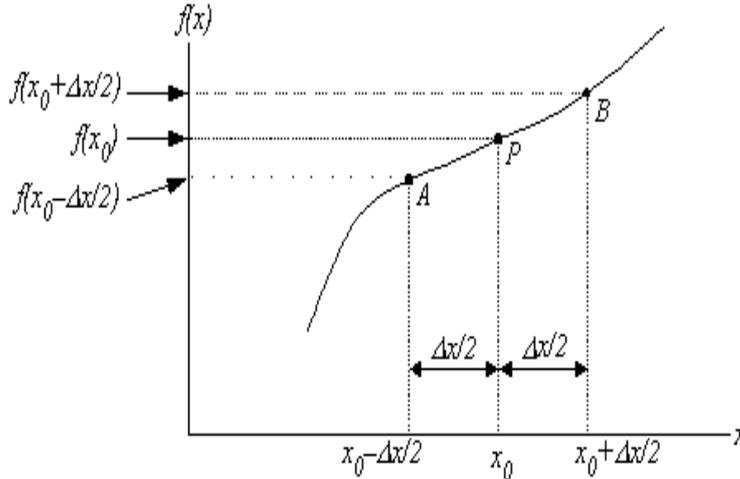


Figure A1-58 : Approximation par la méthode FDTD de la dérivée première de f en x_0

La fonction f peut alors être développée en série de Taylor tel que

$$f(x_0 + \frac{dx}{2}) = f(x_0) + \frac{dx}{2} \cdot \frac{\partial f(x_0)}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{dx}{2}\right)^2 \cdot \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial^2 x} + \frac{1}{6} \left(\frac{dx}{2}\right)^3 \cdot \frac{\partial^3 f(x_0)}{\partial^3 x} + \dots \quad \text{AI-33}$$

$$f(x_0 - \frac{dx}{2}) = f(x_0) - \frac{dx}{2} \cdot \frac{\partial f(x_0)}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{dx}{2}\right)^2 \cdot \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial^2 x} - \frac{1}{6} \left(\frac{dx}{2}\right)^3 \cdot \frac{\partial^3 f(x_0)}{\partial^3 x} + \dots \quad \text{AI-34}$$

D'où par soustraction d'AAI-33 et AAI-34 :

$$\frac{\partial f(x_0)}{\partial x} \approx \frac{f(x_0 + \frac{dx}{2}) - f(x_0 - \frac{dx}{2})}{dx} + O(dx^2) \quad \text{AI-35}$$

Cette formule permet l'évaluation de la dérivée d'ordre 1 d'une fonction f selon x en x_0 à partir de ses points en $(x_0 - \frac{dx}{2})$ et $(x_0 + \frac{dx}{2})$ ou dx représente le pas de discrétisation selon x . On notera l'existence de schéma de différence finie d'ordre 4, mais le niveau de complexité rajouté par ce type de schéma n'est pas justifié dans le cadre de cette étude.

AI.3 Application à la discrétisation spatio - temporelle des équations de Maxwell

Dans un premier temps, la méthode des différences finies a été appliquée afin d'estimer les dérivées partielles spatiales des équations de Maxwell. Par exemple, si l'on ne tient compte que des composantes du champ magnétique données par l'équation II-85 on obtient :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_x(x,y,z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_z(x,y+\frac{dy}{2},z,t) - E_z(x,y-\frac{dy}{2},z,t)}{dy} - \frac{E_y(x,y,z+\frac{dz}{2},t) - E_y(x,y,z-\frac{dz}{2},t)}{dz} \right) \\ \frac{\partial H_y(x,y,z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_x(x,y,z+\frac{dz}{2},t) - E_x(x,y,z-\frac{dz}{2},t)}{dz} - \frac{E_z(x+\frac{dx}{2},y,z,t) - E_z(x-\frac{dx}{2},y,z,t)}{dx} \right) \\ \frac{\partial H_z(x,y,z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_y(x+\frac{dx}{2},y,z,t) - E_y(x-\frac{dx}{2},y,z,t)}{dx} - \frac{E_x(x,y+\frac{dy}{2},z,t) - E_x(x,y-\frac{dy}{2},z,t)}{dy} \right) \end{cases} \quad \text{AI-36}$$

Afin d'effectuer une discrétisation du volume de calcul, les variables continues x, y, z sont remplacées par des variables discrètes x_i, y_j, z_k , tels que $x_i = i\Delta x, y_j = j\Delta y, z_k = k\Delta z$. On obtient alors un volume de calcul constitué d'un ensemble de parallélépipède, appelé cellule de Yee. L'équation AI-36 peut alors s'écrire :

$$\begin{cases} \frac{\partial H_x(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2},t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_z(i,j+1,k+\frac{1}{2},t) - E_z(i,j,k+\frac{1}{2},t)}{dy} - \frac{E_y(i,j+\frac{1}{2},k+1,t) - E_y(i,j+\frac{1}{2},k,t)}{dz} \right) \\ \frac{\partial H_y(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2},t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_x(i+\frac{1}{2},j,k+1,t) - E_x(i+\frac{1}{2},j,k,t)}{dz} - \frac{E_z(i+1,j,k+\frac{1}{2},t) - E_z(i,j,k+\frac{1}{2},t)}{dx} \right) \\ \frac{\partial H_z(i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2},t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_y(i+1,j+\frac{1}{2},k,t) - E_y(i,j+\frac{1}{2},k,t)}{dx} - \frac{E_x(i+\frac{1}{2},j+1,k,t) - E_x(i+\frac{1}{2},j,k,t)}{dy} \right) \end{cases} \quad \text{AI-37}$$

La Figure AI-59 donne une représentation de la cellule de Yee dans un repère cartésien et permet de montrer le lien entre les différentes composantes. En effet, chaque composante est dépendante de la dérivée des composantes qui l'entourent, ainsi les dérivées sont évoluées en un seul point correspondant à la localisation du champ calculé. Par exemple, l'évaluation des dérivées des champs électriques E_y et E_z est effectué au centre de la maille et permet la détermination du champ magnétique selon $x (H_x)$ se situant en ce même points

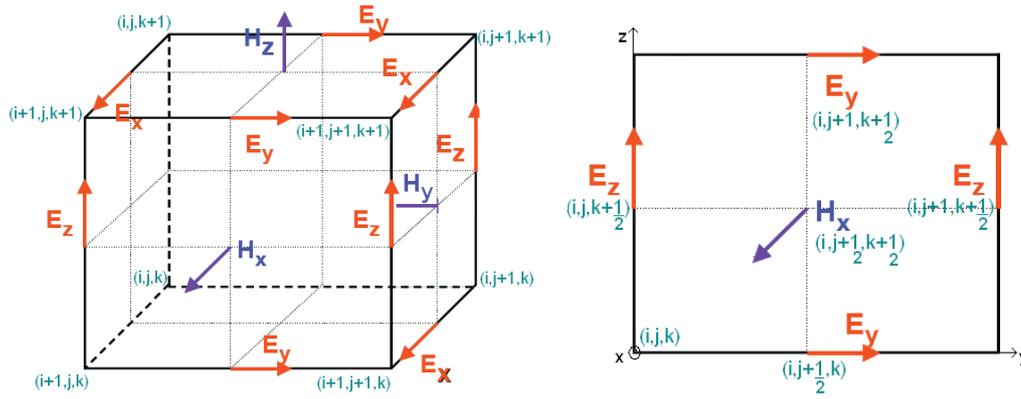


Figure AI-59 : Représentation de la cellule de YEE

Dans un second temps, on effectue l'approximation des dérivées temporelles de l'équation II-74. Comme dans le cadre de la dérivée spatiale, la dérivée temporelle est approchée par la méthode des différences finies. On constate alors que le champ électrique et le champ magnétique sont décalés d'un demi pas temporel, on parle alors de schéma saute mouton comme représenté sur la Figure AI-60

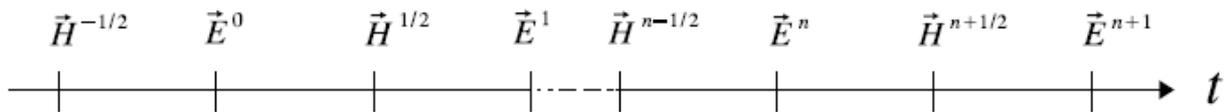


Figure AI-60 : Schéma saute mouton

Les discrétisation spatio-temporelles des équations de Maxwell permettent d'estimer de manière itérative la valeur des champs électriques et magnétiques au sein d'un volume de calcul fini de taille $i \cdot dx / j \cdot dy / k \cdot dz$ et pendant un temps égal à $n \cdot dt$ selon les équations suivantes :

$$H_x \left(i, j + \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2} \right) = H_x \left(i, j, k, n - \frac{1}{2} \right) - \frac{dt}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_z \left(i, j + 1, k + \frac{1}{2}, n \right) - E_z \left(i, j, k + \frac{1}{2}, n \right)}{dy} - \frac{E_y \left(i, j + \frac{1}{2}, k + 1, n \right) - E_y \left(i, j + \frac{1}{2}, k, n \right)}{dz} \right) \quad \text{AI-38}$$

$$H_y \left(i + \frac{1}{2}, j, k + \frac{1}{2}, n + \frac{1}{2} \right) = H_y \left(i, j, k, n - \frac{1}{2} \right) - \frac{dt}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_x \left(i + \frac{1}{2}, j, k + 1, n \right) - E_x \left(i + \frac{1}{2}, j, k, n \right)}{dz} - \frac{E_z \left(i + 1, j, k + \frac{1}{2}, n \right) - E_z \left(i, j, k + \frac{1}{2}, n \right)}{dx} \right) \quad \text{AI-39}$$

$$H_z \left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}, k, n + \frac{1}{2} \right) = H_z \left(i, j, k, n - \frac{1}{2} \right) - \frac{dt}{\mu_0} \cdot \left(\frac{E_y \left(i+1, j+\frac{1}{2}, k, n \right) - E_y \left(i, j+\frac{1}{2}, k, n \right)}{dx} - \frac{E_x \left(i+\frac{1}{2}, j+1, k, n \right) - E_x \left(i+\frac{1}{2}, j, k, n \right)}{dy} \right) \quad \text{AI-40}$$

$$E_x \left(i + \frac{1}{2}, j, k, n + 1 \right) = \frac{2\varepsilon - \sigma dt}{2\varepsilon + \sigma dt} E_x \left(i + \frac{1}{2}, j, k, n \right) - \frac{2dt}{2\varepsilon + \sigma dt} \cdot \left(\frac{H_z \left(i, j+\frac{1}{2}, k, n+\frac{1}{2} \right) - H_z \left(i, j-\frac{1}{2}, k, n-\frac{1}{2} \right)}{dy} - \frac{H_y \left(i, j, k+\frac{1}{2}, n+\frac{1}{2} \right) - H_y \left(i, j, k-\frac{1}{2}, n-\frac{1}{2} \right)}{dz} \right) \quad \text{AI-41}$$

$$E_y \left(i, j + \frac{1}{2}, k, n + 1 \right) = \frac{2\varepsilon - \sigma dt}{2\varepsilon + \sigma dt} E_y \left(i, j + \frac{1}{2}, k, n \right) - \frac{2dt}{2\varepsilon + \sigma dt} \cdot \left(\frac{H_x \left(i, j, k+\frac{1}{2}, n+\frac{1}{2} \right) - H_x \left(i, j, k-\frac{1}{2}, n-\frac{1}{2} \right)}{dz} - \frac{H_z \left(i+1, j, k, n+\frac{1}{2} \right) - H_z \left(i, j, k, n-\frac{1}{2} \right)}{dx} \right) \quad \text{AI-42}$$

$$E_z \left(i, j, k + \frac{1}{2}, n + 1 \right) = \frac{2\varepsilon - \sigma dt}{2\varepsilon + \sigma dt} E_z \left(i, j, k + \frac{1}{2}, n \right) - \frac{2dt}{2\varepsilon + \sigma dt} \cdot \left(\frac{H_y \left(i+\frac{1}{2}, j, k, n+\frac{1}{2} \right) - H_y \left(i-\frac{1}{2}, j, k, n-\frac{1}{2} \right)}{dx} - \frac{H_x \left(i+\frac{1}{2}, j, k, n+\frac{1}{2} \right) - H_x \left(i+\frac{1}{2}, j, k, n-\frac{1}{2} \right)}{dy} \right) \quad \text{AI-43}$$

Il est à noter que dans les équations AI-38 à AI-43, la conductivité et la permittivité du milieu peuvent être elles aussi discrétisées, afin de pouvoir modéliser un sol inhomogène en affectant une valeur particulière de la conductivité et de la permittivité à chaque cellule. Cette discrétisation permet également de modéliser les murs des bâtiments.

AI.4 Critère de stabilité

La stabilité de l'algorithme des différences finies est assurée par l'application du critère de « Courant Friedrichs Lewy » ou CFL [81] qui est défini par :

$$dt \leq \frac{1}{v} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dy^2} + \frac{1}{dz^2}}} \quad \text{AI-44}$$

Où v est la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu

Les conditions CFL dans des espaces à deux dimensions et à une dimension se déduisent immédiatement de l'équation AI-44:

$$\text{Pour un espace 2D } dt \leq \frac{1}{v} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dy^2}}} \quad \text{I-45}$$

Pour un espace 1D $dt \leq \frac{1}{v} \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{dx^2}}} = \frac{dx}{v}$

I-46

AI.5 Les conditions aux frontières : PML

Comme nous l'avons vu précédemment le volume de calcul de la méthode FDTD doit être borné. Alors se pose la problématique des conditions à appliquer aux frontières. En effet, les conditions aux limites jouent un rôle déterminant car elles influencent la totalité du volume. Ainsi afin de se placer en condition d'espace libre (volume vu comme infini), il est nécessaire d'appliquer aux frontières des conditions absorbantes empêchant toute réflexion sur les faces du volume quelque soit leurs angles d'incidences. Dans ce domaine, on notera tous d'abord le travail de Holland (82), qui proposé une méthode d'adaptation permettant la seule atténuation des champs normaux aux faces du volume, par un empilement de cellules de conductivité électrique et magnétique différentes. Ensuite est apparue tous les modèles basés sur la résolution de l'équation d'Helmotz par l'utilisation des dérivées partielles [83] [84]. Les PMLs de Bérenger [85] ont quasiment mit fin à toutes les autres recherches sur les couches absorbantes, car elles permettent théoriquement l'atténuation parfaite de toute les ondes incidentes sur les faces du volume. Cette méthode peut être vue comme une généralisation des couches absorbantes de Holland à toutes les directions. Néanmoins, leur efficacité et leur simplicité de mise en œuvre, se paye toutefois par un coût mémoire et un temps de calcul doublé vu que chaque composante de champ est subdivisée en deux sous-composantes sur lesquelles des conductivités spécifiques sont appliquées. Par exemple la composante E_z est décomposé selon:

$$E_z = E_{zx} + E_{zy} \tag{AI-47}$$

Où est associée à une conductivité permettant une absorption suivant l'axe Ox et est associée à une conductivité permettant une absorption suivant l'axe Oy. L'application de cette subdivision aux 6 autres variables donne un nouveau système à 12 équations. Cependant la variation des conductivités magnétiques et électriques implanté dans les PML doivent respecter les règles suivantes [86] :

- Adaptation d'impédance

$$- \frac{\sigma_{ex}}{\varepsilon_x} = \frac{\sigma_{mx}}{\mu_x}, \frac{\sigma_{ey}}{\varepsilon_y} = \frac{\sigma_{my}}{\mu_y}, \text{ et } \frac{\sigma_{ez}}{\varepsilon_z} = \frac{\sigma_{mz}}{\mu_z} \quad \text{AI-48}$$

- Adaptation transverse entre deux milieux diélectriques d'une même couche PML

$$- \frac{\sigma_{ex1}}{\varepsilon_{x1}} = \frac{\sigma_{ex2}}{\varepsilon_{x2}} = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_0} \quad \text{AI-49}$$

A l'heure actuelle, l'utilisation des PML de Bérenger reste la solution privilégiée pour effectuer des calculs en espace libre.

AI.6 Implémentation des fils

Afin de modéliser un réseau de télécommunications, il est nécessaire de pouvoir modéliser les fils isolés ou non composant le réseau. Le formalisme des fils minces proposé par Holland est basé sur l'implémentation d'un modèle de type ligne dont la référence de potentiel est constitué par une cellule fictive. Le principe de cette méthode repose sur l'introduction de deux grandeurs supplémentaires dans le schéma de la cellule de Yee: le courant I circulant dans le fil et la densité de charge Q le long du fil.

Les relations qui régissent la propagation de I et de Q sont obtenues à partir des équations de Maxwell suivantes :

$$\frac{\partial \vec{H}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{E}(\vec{r}, t) \quad \text{AI-50}$$

$$\sigma \vec{E}(\vec{r}, t) + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) \quad \text{AI-51}$$

Les expressions du rayonnement d'un fil en coordonnées cylindriques (r, θ, z) , selon les hypothèses de l'électrostatique et de la magnétostatique, du champ magnétique azimutal H_θ et du champ électrique radial E_r sont données par:

$$H_\theta(r) = \frac{I}{2\pi r} \quad \text{AI-52}$$

$$E_r(r) = \frac{Q}{\varepsilon 2\pi r} \quad \text{AI-53}$$

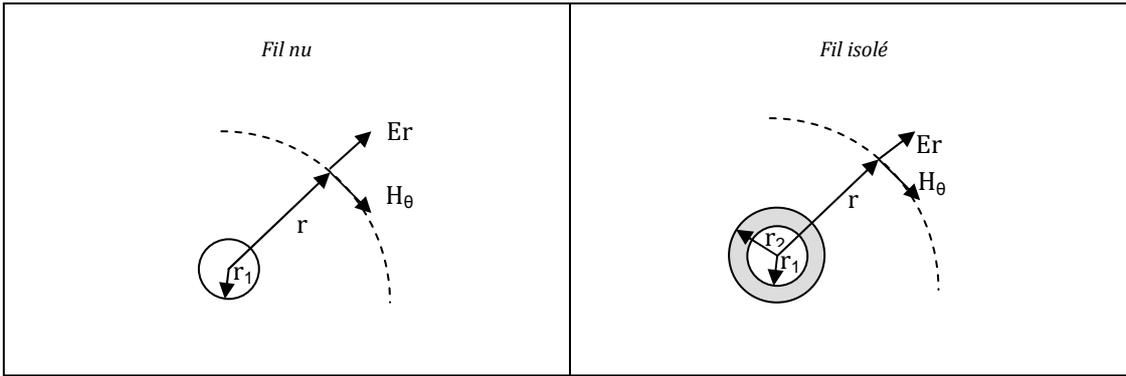


Figure I-61 : Schéma du rayonnement des champs en coordonnée cylindrique

La projection de l'équation AI-50 sur l'axe θ et l'implantation des relations AI-52 et AI-54 donne:

$$\frac{1}{2\pi r \epsilon} \frac{\partial Q}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial z} = -\frac{\mu_0}{2\pi r} \frac{\partial I}{\partial t} \quad \text{AI-54}$$

Dans le cas d'un fil non isolé on intègre ensuite l'équation de 0 à r :

$$\begin{cases} E_z(r) - E_z(r_1) = -\frac{\mu_0}{2} \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) \left(\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{c^2}{\epsilon_r} \frac{\partial Q}{\partial z}\right) & r > r_1 \\ E_z(r) = 0 & r < r_1 \end{cases} \quad \text{AI-55}$$

où r_1 est le rayon du fil et $E_z(r_1)$ est la composante du champ électrique vertical à la périphérie du fil. Cette composante est nulle si le fil est considéré comme parfaitement conducteur, et elle s'exprime pour un fil chargé d'une résistance linéique (R_s) de la manière suivante:

$$E_z(r_1) = r_{fil} I = \frac{R_s}{d_z} I \quad \text{AI-56}$$

Pour s'affranchir de la dépendance en r dans l'équation AI-61 l'idée consiste à exprimer la valeur moyenne du champ $E_z(r)$ en réalisant une moyenne arithmétique sur la section perpendiculaire au fil.

Pour des cellules de formes parallélépipédiques l'expression pour un fil non isolé devient:

$$E_z(r) - E_z(r_1) = L \left[\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{c^2}{\epsilon_r} \frac{\partial Q}{\partial z} \right] \quad \text{AI-57}$$

Où E_z est le champ électrique moyen dans le rectangle défini par dx et dy et L est l'inductance de maille défini par:

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{dx^2 + dy^2}{4r_1^2} \right) + \frac{dy}{dx} \arctan \left(\frac{dx}{dy} \right) + \frac{dx}{dy} \arctan \left(\frac{dy}{dx} \right) - \frac{\pi r_1^2}{dxdy} - 3 \right] \quad \text{AI-58}$$

Et pouvant être représenté selon la Figure I-62

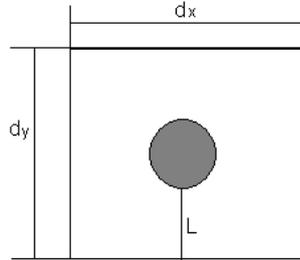


Figure I-62 : Schéma représentatif de l'inductance calculé dans le cadre d'un fil nu

Pour le cas d'un fil isolé, l'intégrale est découpée en deux parties :

- une première intégration de r_1 à r_2 est associée à la charge Q_d , représentant les charges sur le contour du conducteur.
- une seconde de r_1 à r_2 est associée à la charge Q_e représentant les charges sur le contour de la gaine.

On obtient alors:

$$E_{z(r)} - E_{z(r_1)} = L \frac{\partial I}{\partial t} + L_e \frac{c^2}{\epsilon_r} \frac{\partial Q_e}{\partial z} + L_d \frac{c^2}{\epsilon_r} \frac{\partial Q_d}{\partial z} \quad \text{AI-59}$$

Où L_d représente l'inductance de la gaine diélectrique et L l'inductance de maille équivalente du milieu environnant (Figure AI-63) tels que :

$$L_d = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad \text{AI-60}$$

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{dx^2 + dy^2}{4r_1^2} \right) + \frac{dy}{dx} \arctan \left(\frac{dx}{dy} \right) + \frac{dx}{dy} \arctan \left(\frac{dy}{dx} \right) + - \frac{\pi r_2^2}{dxdy} - 3 \right] \quad \text{AI-61}$$

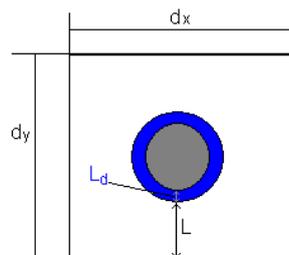


Figure AI-63 : Schéma représentatif des inductances calculées dans le cadre d'un fil isolé

L'expression du courant après différentiation exponentielle devient:

Pour un fil non isolé:

$$I_k^{n+\frac{1}{2}} = I_k^{n-\frac{1}{2}} e^{\frac{r_{fil}d}{L}} + \frac{1-e^{\frac{r_{fil}d}{L}}}{r_{fil}} \left[E_{z\ k}^n(i, j, k) - \frac{Lc^2}{\varepsilon_r dz} (Q_{k+1}^n - Q_k^n) \right] \quad \text{AI-62}$$

Pour un fil isolé:

$$I_k^{n+\frac{1}{2}} = I_k^{n-\frac{1}{2}} e^{\frac{r_{fil}d}{L}} + \frac{1-e^{\frac{r_{fil}d}{L}}}{r_{fil}} \left[\begin{array}{c} E_{z\ k}^n(i, j, k) \\ -\frac{Lc^2}{\varepsilon_r dz} (Q_{e\ k+1}^n - Q_{e\ k}^n) \\ -\frac{L_d c^2}{\varepsilon_r dz} (Q_{d\ k+1}^n - Q_{d\ k}^n) \end{array} \right] \quad \text{AI-63}$$

En partant de la seconde équation de Maxwell (AI-51), en introduisant les expressions (AI-52) et (AI-53) et en considérant une symétrie de révolution, on obtient alors l'équation de l'évolution de la charge soit:

Pour un fil non isolé:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\sigma}{\varepsilon} Q + \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad \text{AI-64}$$

Pour un fil isolé:

$$\frac{\partial Q_d}{\partial t} + \frac{\sigma_d}{\varepsilon_d} Q_d + \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad \text{AI-65}$$

$$\frac{\partial Q_e}{\partial t} + \frac{\sigma}{\varepsilon} Q_e + \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad \text{AI-66}$$

Les formules de mises à jour des charges s'obtiennent par différentiations linéaires:

Pour un fil non isolé:

$$Q_k^{n+1} = \frac{2\varepsilon - \sigma dt}{2\varepsilon - \sigma dt} Q_k^n - \frac{(2\varepsilon dt)}{dz(2\varepsilon - \sigma dt)} \left(I_k^{n+\frac{1}{2}} - I_{k-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad \text{AI-67}$$

Pour un fil isolé:

$$Q_{e_k}^{n+1} = \frac{2\varepsilon - \sigma dt}{2\varepsilon - \sigma dt} Q_{e_k}^n - \frac{(2\varepsilon dt)}{dz(2\varepsilon - \sigma dt)} \left(I_k^{n+\frac{1}{2}} - I_{k-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad \text{AI-68}$$

$$Q_{d_k}^{n+1} = \frac{2\varepsilon_d - \sigma_d dt}{2\varepsilon_d - \sigma_d dt} Q_{d_k}^n - \frac{(2\varepsilon_d dt)}{dz(2\varepsilon_d - \sigma_d dt)} \left(I_k^{n+\frac{1}{2}} - I_{k-1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad \text{AI-69}$$

Où ε_d et σ_d sont respectivement la permittivité et la conductivité de la gaine diélectrique.

Les équations AI-62 et AI-63 régissent la propagation du courant et les équations AI-67, AI-68, et AI-69 ceux de la charge, sur un fil conducteur en fonction des composantes longitudinales des champs électriques les plus proches du fil. Cependant il convient de tenir compte de l'influence, sur le champ électrique, du courant I circulant sur le fil. Pour cela on considère que le courant sur le fil se répartit uniformément dans la section de la maille équivalente où on définit la densité de courant j par:

$$j = \frac{I}{dxdy} \quad \text{AI-70}$$

Cette densité correspond au terme source de courant électrique introduit dans l'équation de Maxwell–Ampère qui devient:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}, t) = \sigma \vec{E}(\vec{r}, t) + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t} + \vec{j} \quad \text{AI-71}$$

Les conditions aux limites applicables au fil jouent un rôle très important sur la propagation du courant. Les équations régissant les terminaisons pouvant être rencontrées lors de la modélisation d'un réseau de télécommunications sont données par les formules AI-72, AI-73, AI-74 et AI-75.

$$\text{Condition de Cour circuit : } I=0 \quad \text{AI-72}$$

$$\text{Condition de circuit ouvert : } Q=0 \quad \text{AI-73}$$

$$\text{Condition d'adaptation : } Q(0) = -\frac{I(0)}{c_0} \quad \text{Extrémité initiale} \quad \text{AI-74}$$

$$Q(l) = \frac{I(l)}{c_0} \quad \text{Extrémité final} \quad \text{AI-75}$$

Cependant, les pylônes et bâtiments constituant le réseau de télécommunications sont des structures métalliques complexes nécessitant la prise en compte de jonction entre les fils. Une méthode basée sur une transposition des lois de Kirchoff a été proposée par Holland et Simpson [87] et permet d'imposer à un nœud la continuité du courant et l'égalité des charges.

Résumé

La foudre par ses effets directs et indirects peut engendrer des dégâts importants sur un réseau de télécommunications. Cette thèse aborde la modélisation des mécanismes de couplage d'une décharge orageuse sur une structure constituée d'un réseau filaire et d'un bâtiment. A l'aide d'un code de calcul basé sur la théorie des lignes de transmission et associé à une approche topologique, l'étude de l'efficacité d'une protection contre la foudre, réalisée grâce à un conducteur nu placé au dessus d'un câble enterré, est effectuée de manière exhaustive en s'appuyant sur des résultats expérimentaux obtenus à l'aide d'éclairs déclenchés. De plus, la thèse aborde, à l'aide de la théorie des antennes dans le domaine temporel (FDTD), le calcul des courants induits simultanément sur un bâtiment et son réseau d'adduction lors d'un impact direct sur un pylône. L'application pratique visée par l'ensemble de ces travaux est l'amélioration de la protection contre la foudre des sites de radiodiffusions.

Mots clés : foudre, protection, bâtiment, câble enterré, conducteur écran, ligne de transmission, FDTD, électromagnétisme

Abstract

Lightning by its direct and indirect effects may engender important damages on a telecommunications network. This thesis approaches the modeling of the coupling of a lightning stroke with a structure composed of a building associated to a wired network. By means of a formalism based on the transmission line theory associated to a topological approach, a study of the efficiency of a lightning protection device, composed of a shielding wire installed in the ground above the underground cable, is made in a exhaustive way by using experimental data obtained by means of triggered lightning. Furthermore, thanks to the antenna theory in the time domain (FDTD), the thesis also approaches the calculation of the currents generated simultaneously on a building and its wired network when the lightning stroke occurs on the considered structure. The practical application aimed by all these works being the improvement of the lightning protection of the radio-sites.

Keywords: lightning, protection, buried cable, shielding wire, Transmission line, FDTD, electromagnetism