

الجمهورية الجزائرية
الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL
Faculté des sciences et de la technologie
Département d'électrotechnique
Mémoire de Master

N° :/2024

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Thème

**Protection des bâtiments contre l'impact direct des coups
de foudre.**

Présenté Par : Zadi Loumia
Djerdir Amal

Encadré Par : Pr. Mohammed Melit

Jury de Soutenance Président :

Président : B. Harrat

Encadreur : M. Mellit

Examineur : S. Kaouche

Grade

Grade

Grade

MCA Univ MSB jijel

Prof Univ MSB jijel

MCB Univ MSB jijel

Promotion : 2023 /2024

Remerciements

Je remercie avant tout « ALLAH », tout puissant, de m'avoir donné la force pour suivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

On tient aussi à remercier **Pr : Mohammed Melit**, d'avoir nous encadrer tout au long de la réalisation de ce projet.il a été toujours disponible, a l'écoute de nos nombreuses questions, et toujours intéressé par l'avancement de nos travaux

Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les Professeurs de la spécialité Réseaux Electriques qui m'ont a été toujours présent pour assurer la bonne formation

Dédicace

A ma très chère mère

Quoi que je fasse au que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit.

A mon très cher père

Tu as toujours été a mes cotes pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon très cher frère **Rida** et ma très cher sœurs **Sonia**.

A toute ma famille

A ma binôme **Amal** et tous mes amis et collègues

A tous ceux qui me sont chers.

Zadi loumia

Je dédie ce projet

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler
pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

A mes chères frères, zine eddine et soufiane.

A mes chères sœurs, kawther, karima, samia, samiha et noura.

Pour son soutien moral et leurs conseils précieux tout au long de études.

A ma chère binôme, loumia.

Pour sa entente et sa sympathie.

A mes chères amies,

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

Amal djerdir

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur la protection des installations électriques	
I. Introduction	3
II. Réseaux électriques.....	3
II.1. Définition	3
II.2. Architecture des réseaux électriques.....	3
II.3. Constitution d'un réseau électrique	4
II.3.1. Les lignes électriques.....	4
II.3.1.1. Les lignes aériennes	5
II.3.1.2. Les lignes souterraines.....	5
II.3.2. Les postes électriques	6
II.3.2.1. Définition	6
II.3.2.2. Types des postes	7
III. Les surtensions	8
III.1. Classification et origines des surtensions	9
III.1.1. Surtensions d'origines externes	9
III.1.2. Surtensions de foudre	9
IV. Définition de la foudre	10
IV.1. Formation de la foudre	10
IV.2. Types de coups de foudre.....	11
IV.3. Énergie de la foudre... ..	12
IV.4. Mécanisme de la décharge orageuse.	12
IV.5. Observations expérimentales.....	13
IV.5.1. Courant de l'arc en retour.....	13
IV.6. Effets de la foudre	14

Sommaire

IV.6.1. Effets électriques	14
IV.6.2. Effets thermiques.....	14
IV.6.3. Effets électromagnétiques	15
IV.6.4. Effets électrodynamiques	15
IV.7. Conséquences d'un coup de foudre sur le réseau.....	16
V. Protection du réseau électrique contre la foudre	16
V.1. Système de protection contre l'impact indirect	17
V.2. Système de protection contre l'impact direct	17
V.2.1. Les paratonnerres à tige simple	17
V.2.2. Cages maillées	18
V.2.3. Câble de garde	19
V.2.4. Les éclateurs	20
V.2.5. Les parafoudres.....	21
VI. Principes de la protection des réseaux électriques par des systèmes de mise à la terre .	22
VI.1. Définition d'un système de mise à la terre	22
VI.2. Principe de fonctionnement d'une prise de terre.....	22
VI.3. Rôle d'un réseau de terre.....	23
VI.4. Différents types de prise de terre.....	23
Références chapitre I	24

Chapitre II: Modélisation de la protection des bâtiments / installations électriques

I.Introduction	26
II.Calcul d'impédance et d'admittance linéiques du bâtiment	26
II.1. Méthode de A. Ametani et al.	26
II.1.1. Impédance et admittance linéiques des bras verticaux	26
II.1.2. Impédance et admittance linéiques des bras horizontaux	28
II.2. Paramètres linéiques des mises à la terre des bâtiments électriques.....	30
II.2.1. Electrode entrée horizontalement	30

Sommaire

II.2.2. Electrode enterrée verticalement	31
III. Modélisation de coup de foudre	32
III.1. Modèle bi-exponentiel.....	32
III.2. Modèle Heidler.....	33
IV. Equation matricielle nodale en régime temporel.....	33
IV.1. Modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD.....	34
IV.2. Equations des lignes en temporel	35
IV.3. Discrétisation par FDTD des équations des lignes a constantes réparties	35
IV.3.1. Echantillonnage spatial	36
IV.3.2. Echantillonnage spatio-temporel.....	36
IV.4. Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel	38
IV.5. Définition du vecteur inconnu [X]	39
V. Système $[A][X]=[B]$ pour une structure complexe : Cage.....	39
V.1.Construction de la sous matrice des segments [A1]	40
V.1.1. Construction de la sous matrice des segments [A2]	40
Références chapitre II.....	42

Chapitre III : Applications et discussion des résultats

I. Introduction.....	44
II. Validation.....	44
II. 1. Validation des paramètres linéiques	44
II.2. Paramètres linéiques d'un conducteur horizontale	45
II. 3. Validation du concept proposé	46
III. Cas D'une tige simple	48
III.1. Effet de la résistivité du sol	49
III.2. Effet de la taille de piquet de terre.....	49
III.3. Effet de front d'onde	49
IV. Cas d'une cage de protection	50

Sommaire

IV.1. Effet de la résistivité du sol	52
IV.2. Effet de la taille des piquets de terre	52
IV.3. Effet de la configuration de la cage.....	53
IV.3.1. Injection a la corne de la cage	53
IV.3.2. Injection au milieu de la cage.....	54
Reference chapitre III	56
Conclusion générale	57

Introduction générale

Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures plus au moins complexes destinés à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique tout en assurant une meilleure qualité de cette énergie, notamment une alimentation sans interruption avec des signaux dans les plages contractuelles.

Les réseaux électriques sont soumis à des contraintes de plus en plus sévères afin d'assurer la bonne qualité en plus de la continuité de service, la protection des réseaux est alors primordiale et l'utilisation des capteurs et des moyens de communication électronique très sensible aux perturbations et alors indispensable.

Par ailleurs vu l'étendue des réseaux électriques, la foudre qui est un phénomène naturel présente des dégâts matériels sur les équipements électriques/électronique qui sont malheureusement importantes en plus de danger sur le personnel technique et les utilisateurs finaux d'énergie électriques.

A chaque instant dans le monde, plusieurs milliers d'orages ont lieu simultanément ce qui représente jusqu'à trois cents éclairs par seconde, la foudre est l'un des phénomènes naturels les plus destructeurs. Il est donc essentiel de protéger les personnes, l'environnement et les infrastructures de ses effets, mais aussi de garantir la continuité des services et de sauvegarder les biens matériels.

Un système de protection contre la foudre a pour l'objectif de capturer la foudre, de conduire son courant en toute sécurité jusqu'à la terre, de le dissiper dans le sol et de protéger contre les effets secondaires de la foudre.

La foudre constitue le principal phénomène naturel générateur de perturbations électromagnétiques. Son impact est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Malheureusement, la foudre reste scientifiquement assez mal connue car étant brève et imprévisible, son étude en laboratoire est donc difficile. Dans les grands laboratoires on provoque le coup de foudre par le lancement d'une fusée reliée par un fil à la terre.

Ce travail est consacré à l'étude de la protection contre les coups de foudre et son influence sur les réseaux électriques ainsi la modélisation des protections des bâtiments et/ou des installations électriques

Notre mémoire de fin d'études est subdivisé en trois parties sous forme de chapitres.

Dont le premier est consacré aux généralités sur la foudre, nous commençons par un rappel sur les différents composants du réseau électrique, à savoir l'architecture des réseaux électriques, lignes électriques, postes électriques ainsi que les surtensions, la formation des

orges, les catégories des coups de foudre, les effets dues à la foudre et l'influence du coup de foudre sur les réseaux électriques. Ainsi qu'une brève présentation sur les différents modes de protection de ce phénomène.

Dans le deuxième chapitre nous nous intéressons à la modélisation des lignes électriques par le calcul des paramètres linéiques d'une ligne et la modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD en procédant par résolution d'un système d'équations $[A].[X]= [B]$. Nous complétons cet exposé théorique par la modélisation de l'équation matricielle nodale afin de valider nos résultats de calcul avec le logiciel SIMULINK.

Le troisième et dernier chapitre de notre mémoire est consacré aux applications afin de valider les concepts théoriques que nous avons exposés. Ce chapitre sera organisé en différentes parties. Nous débutons par une validation par comparaison de nos résultats avec ceux de la littérature pour les paramètres linéiques des lignes verticales et horizontales puis nous proposons une étude paramétrique sur l'effet de la résistivité du sol, la hauteur, Nous terminons notre rapport par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur la protection des installations électriques.

I. Introduction

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

La protection des installations électriques contre les coups de foudre est une préoccupation majeure dans la conception et la maintenance des infrastructures électriques. Les coups de foudre représentent une menace sérieuse, susceptible de causer des dommages importants aux équipements électriques, ainsi que des risques d'incendie et de sécurité pour les personnes.

II. Réseaux électriques

II.1. Définition

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension.

L'énergie électrique étant alors et jusque dans les années 1990 produite de manière presque exclusivement centralisée et consommée de manière totalement décentralisée.

Un réseau électrique est généralement hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

II.2. Architecture des réseaux électriques

L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution :

- **Le grand transport** : la capacité à véhiculer l'énergie électrique depuis les sources de production vers les centres de consommation, sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres.
- **L'interconnexion** : la capacité de faire transiter l'énergie électrique par des voies différentes afin de pouvoir faire face à l'avarie de l'une d'elle.

- **La transformation** : c'est-à-dire la possibilité de passer d'un niveau de tension à un autre niveau de tension permettant progressivement d'abaisser la tension pour alimenter le client final.
- **La répartition** : la capacité d'alimenter les postes sources du réseau de distribution à 15 ou 20 kV. Les fonctions de grand transport et d'interconnexion sont généralement assurés par les niveaux de tension les plus élevés (400 kV et 225 kV). La fonction de répartition est assurée par les niveaux de tension intermédiaire (225, 90 et 63 kV en France).

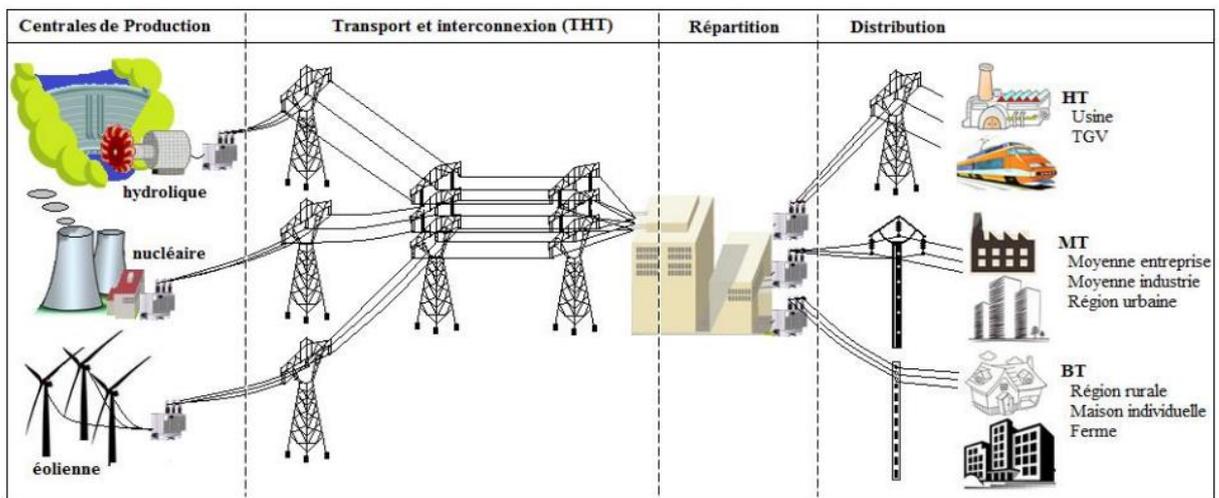


Figure I.1. Différents étages d'un réseau électrique.

II.3. Constitution d'un réseau électrique

II.3.1. Les lignes électriques

Nous distinguons quatre types de lignes :

- Ligne de distribution à basse tension ;
 - Ligne de distribution à moyenne tension ;
 - Ligne de transport à haute tension ;
 - Ligne de transport à très haute tension.
- **Lignes de distribution BT** : Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.
 - **Lignes de distribution MT** : Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformations principales de la compagnie d'électricité.
 - **Lignes de transport HT** : Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération.

- **Lignes de transport THT** : Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV [I.1].

II.3.1.1. Les lignes aériennes

Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électrique, ainsi qu'à l'interconnexion des postes électriques [I.2].



Figure I.2. Les lignes aériennes.

II.3.1.2. Les lignes souterraines

Il est composé de différentes parties assemblées de manière concentrique, les principaux composants sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une protection extérieure qui assure de bonnes propriétés mécaniques et le protège des agressions extérieures (figure I.3.) [I.3].



Figure I.3. Lignes souterraines

II.3.2. Les postes électriques

II.3.2.1. Définition

Selon la définition de la Commission électrotechnique internationale CEI : un poste électrique est la partie d'un réseau électrique, située en un même lieu, comprenant principalement les extrémités des lignes de transport ou de distribution, de l'appareillage électrique, des bâtiments, et éventuellement des transformateurs.



Figure I.4. Vue d'un poste électrique

II.3.2.2. Types des postes

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, trois grandes catégories de postes électriques :

- **Les postes à fonction d'interconnexion** : Qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés.



Figure I.5. Postes d'interconnexion.

- **Les postes mixtes** : Les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation [I.4].



Figure I.6. Postes mixtes.

- **Les postes de transformation** : Dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs [I.4].



Figure I.7. Poste de tranformation.

III. Les surtensions

Les surtensions sont dues à des perturbations qui se superposent à la tension nominale d'un circuit. Elles peuvent apparaître :

- entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel,
- entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun.

Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets.

Le tableau I-1 représente les principales caractéristiques de ces surtensions [I.5].

Types de surtension (cause)	Coefficient de surtension MT -HT	Durée	Raideur du front fréquence	amortissement
A fréquence industrielle (défaut d'isolement)	$\geq \sqrt{3}$	Longue > 1s	Fréquence industrielle	Faible
De manœuvre interruption de court-circuit	2 à 4	Courte 1ms	Moyenne 1 à 200 kHz	Moyenne
Atmosphérique (coup de foudre directe)	> 4	Très courte 1 à 10 μ s	Très élevée 1000Kv/ μ s	Fort

Tableau I.1 Caractéristiques des différents types de surtensions.

III.1. Classification et origines des surtensions

La surtension peut être classée selon la durée (ou la gamme de fréquence) ou en fonction de la nature du phénomène comme sur la figure (1.8) ,[1.6].

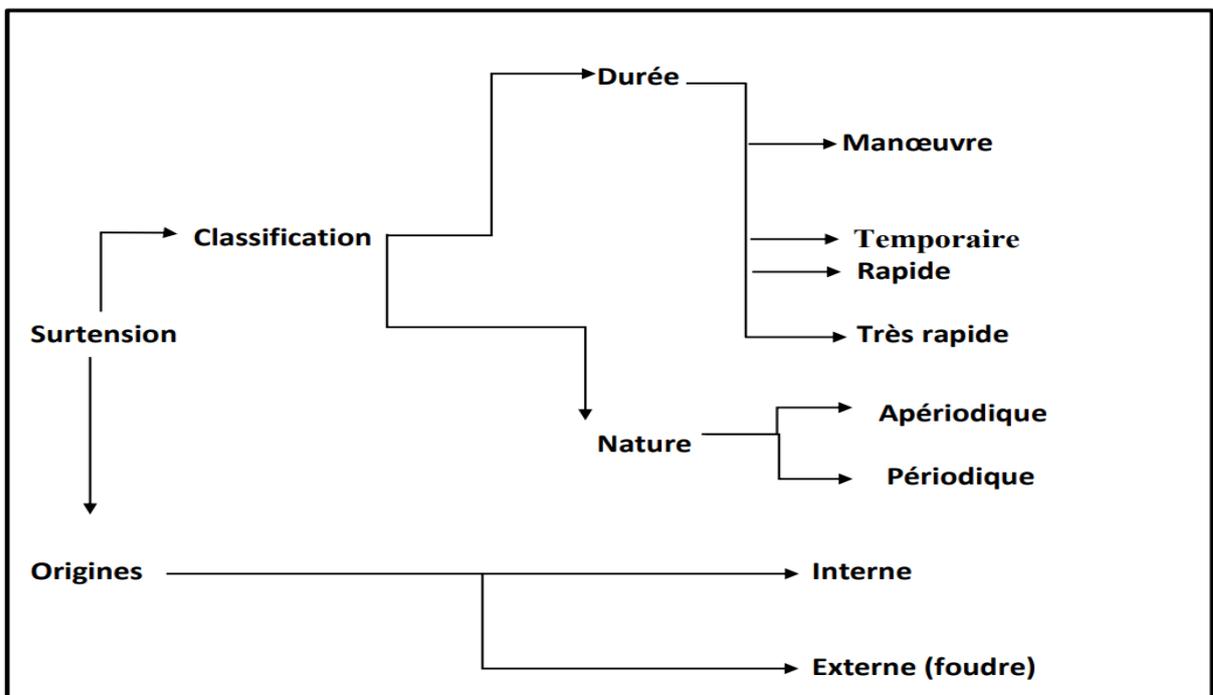


Figure I.8. Classification et origines des surtensions.

III.1.1. Surtensions d'origines externes

Ces surtensions sont indépendantes de la tension de service du réseau. Elles sont dues à plusieurs perturbations qui sont :

- La décharge électrostatique.
- L'impulsion électromagnétique et la foudre [I.7].

III.1.2. Surtensions de foudre

Les surtensions de foudre sont plus souvent induites par des coups de foudre indirects proche de la ligne et les coups de foudre directs qui sont presque toujours destructifs. Ces surtensions ont la forme représentée sur la figure I.9 ; la durée du front montant t_1 est de quelques microsecondes, alors que la durée de décroissance jusqu'à la demi-amplitude varie de 1.5 à 50 microsecondes [I.8].

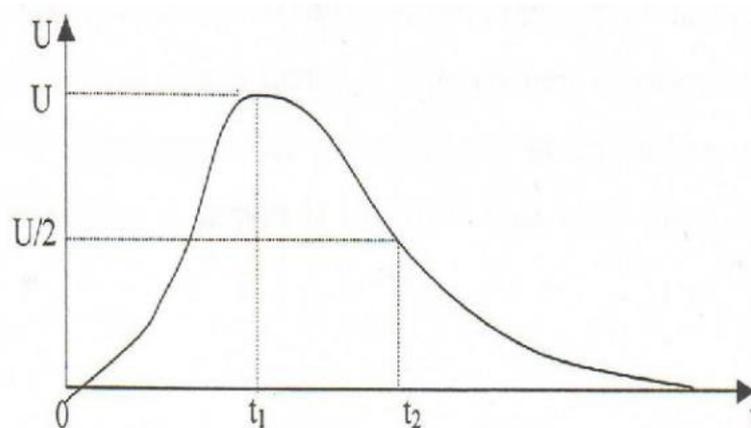


Figure I.9. Forme d'onde de choc de foudre

IV. Définition de la foudre

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrique (figure I.10) qui se produit à partir des orages de nuages (cumulonimbus), à l'intérieur d'un nuage, entre nuages ou entre le nuage et le sol. Elle peut occasionner des sérieux dégâts lorsqu'elle frappe des constructions ou des êtres vivants.

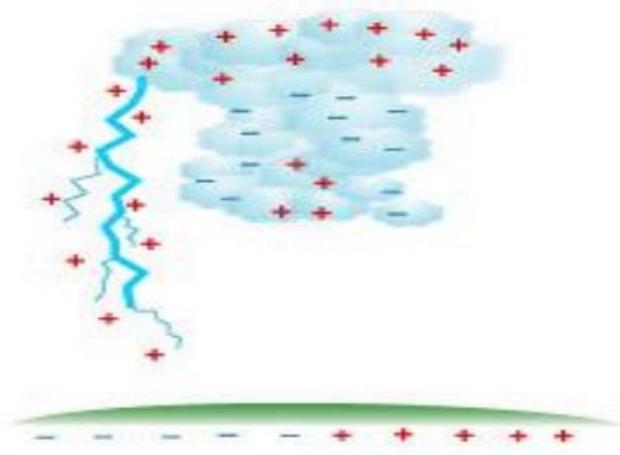


Figure I.10. Décharge électrique.

L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il produit une surtension considérable [I.8].

IV.1. Formation de la foudre

Lorsqu'un front froid rencontre un front chaud, cette première passe sous le second, créant des vents ascendants et descendants dans les cumulonimbus, pouvant être épais de plusieurs kilomètres. Les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace en suspension se percutent tandis que le frottement génère l'électrisation du nuage, tandis que les cristaux de glace, chargés positivement, occupent les plus hautes altitudes. Cette différence de potentiel peut générer des éclairs à l'intérieure du cumulonimbus ou entre deux nuages (figure I.11).

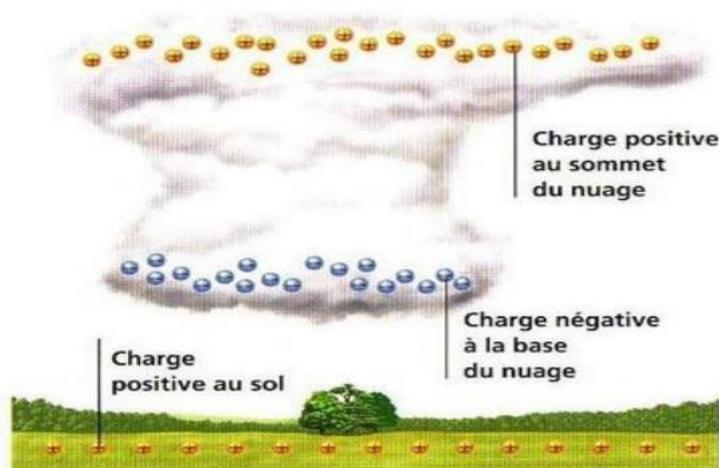


Figure I.11. Formation de la foudre.

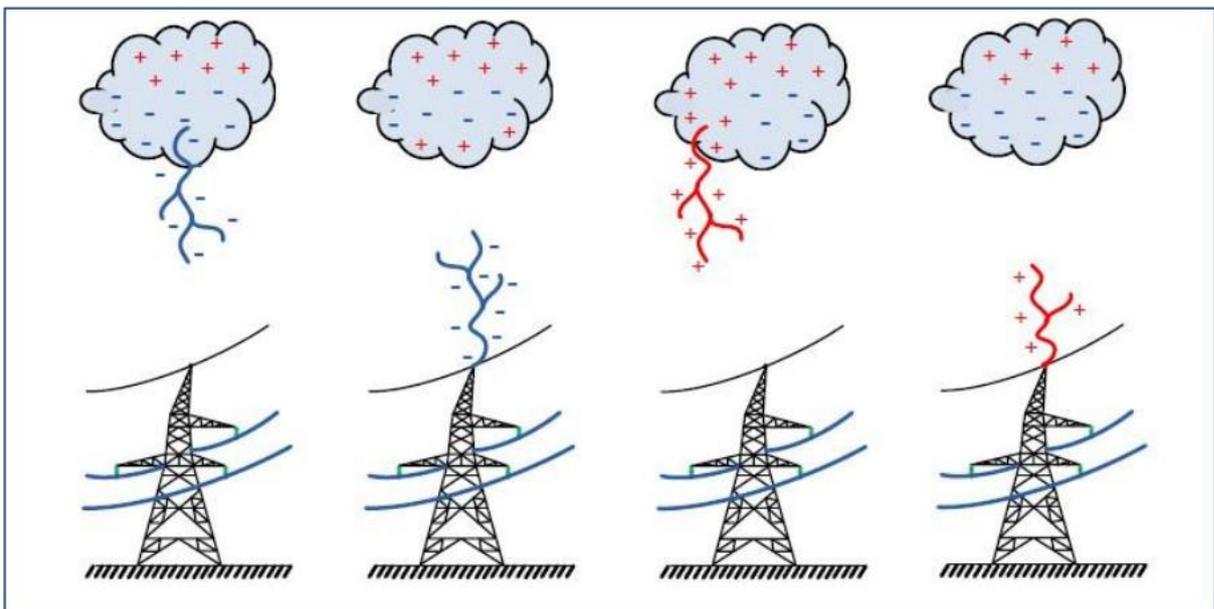
Ces modifications altèrent également la charge électrique au sol, qui devient négative. Lorsque la différence de potentiel est très importante, il y a une violente décharge électrique entre le nuage et le sol, le plus souvent, ou entre les nuages [I.9].

IV.2. Types de coups de foudre

Bien que les décharges inter-nuages (entre les nuages) et intra-nuages (à l'intérieur du nuage) constituent plus de la moitié des décharges atmosphériques, ce sont surtout les coups de foudre (décharges nuage-sol) qui ont été l'objet des études les plus poussées.

Ceci est dû essentiellement à des raisons d'ordre pratique (cause de blessure et mort, incendies de forêts, et perturbations des systèmes de télécommunication et de transport), et aussi au fait qu'il est plus facile de mesurer les caractéristiques optiques et électriques des décharges nuage sol [I.9].

Les décharges de foudre nuage-sol ont été subdivisées par Berger et al [I.10]. En quatre catégories, les critères sont d'une part la direction (ascendante ou descendante) du traceur principal, et d'autre part le signe (positif ou négatif) des charges portées par le traceur principal. La figure illustre les quatre catégories des charges nuage-sol [I.11].



a-Négatif descendant. b- Négatif ascendant. c- Positif descendant. d- Positif ascendant.

Figure I.12. Types de coups de foudre.

IV.3. Énergie de la foudre

Est-il intéressant de capter l'énergie de la foudre ? C'est une question souvent posée. On pourrait croire en effet que l'énergie électrique dissipée par les orages est importante. En réalité, s'il est exact que la puissance instantanée de la foudre est énorme (106 à 107 MW), la puissance moyenne reste relativement modeste. Pour s'en convaincre, il suffit d'intégrer l'énergie dissipée annuellement par l'ensemble des coups de foudre. En se basant sur une

Différence de potentiel nuage-sol de 100 MV et une charge moyenne par éclair de 20 C, on arrive à une puissance permanente de moins de 100 MW, soit moins du dixième d'une tranche nucléaire moderne. De plus, on imagine les difficultés techniques qu'il faudrait résoudre pour capter une énergie aussi diffuse et aléatoire que celle de la foudre.

IV.4. Mécanisme de la décharge orageuse

Le déclenchement des coups de foudre trouve son origine, en suivant quatre phases à savoir :

- Phase de variation du champ électrique au sol
- Phase d'émission d'un précurseur.
- Phase de Formation d'un contre précurseur.
- Phase de Production de la foudre.
- Champ électromagnétique
-

IV.5. Observations expérimentales

IV.5.1. Courant de l'arc en retour

L'amplitude du courant (valeur crête) et son évolution temporelle (forme) représentent les plus importantes grandeurs électriques caractérisant la foudre.

Les courants des coups de foudre (négatif) sont de forte amplitude et de nature impulsionnelle [I.12].

Depuis les années 50, plusieurs campagnes expérimentales ont été réalisées afin de caractériser les décharges orageuses et plus particulièrement le courant de foudre. La description la plus complète du courant de l'arc en retour est donnée par l'équipe du professeur Berger, qui durant les années 1950-1970 a exploité une station expérimentale au Mont San Salvatore près de Lugano.



Figure I.13. Un déclenchement artificiel de la foudre en Floride.



Figure I.14. Mesure de courant de foudre en utilisant une tour instrumentée. Tour CN à Toronto au Canada [I.13].

IV.6. Effets de la foudre

La foudre est un courant électrique de haute fréquence qui entraîne les mêmes effets que tout autre courant circulant dans un conducteur électrique notamment. Dans ce paragraphe sont pris en considération les principaux effets, directs et indirects [I.13].

IV.6.1. Effets électriques

Dans le chemin varié et complexe emprunté par la foudre pour s'écouler dans le sol apparaissent des différences de potentiel importantes sur de faibles distances provoquant des

Claquages locaux qui endommagent les conducteurs présents dans le sol. Ces tensions présentent un grave danger pour les êtres vivants en surface (tension de pas) [I.14].

IV.6.2. Effets thermiques

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

Les décharges de longue durée entraînent facilement une mise à feu. Il faut prendre garde aux mauvais contacts [I.14].

IV.6.3. Effets électromagnétiques

Les effets électromagnétiques se manifestent par différents processus de couplage sur une structure : le couplage résistif (conduction, résistance de blindage des câbles, ...), le couplage par champ magnétique (boucles d'induction dans l'installation, inductances de liaison...), le couplage capacitif par champ électrique (antenne tiges isolées du sol).

Les couplages sont influencés par les mises à la terre, les liaisons d'équipotentialité, les blindages, le cheminement et la disposition des conducteurs métalliques [I.15].

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

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. Une particularité des coups de foudre est leur polarisation : ils sont généralement négatifs (nuage négatif et sol positif). Environ 10 % sont de polarité inverse, mais ce sont les plus violents. A noter que le front de montée des chocs de foudre retenu par les normes, est de 1,2 μ s pour la tension et 8 μ s pour le courant [I.15]. Une distinction est souvent établie entre :

- Le coup de foudre « direct » touchant une ligne,
- Le coup de foudre « indirect » tombant à proximité d'une ligne, sur un pylône métallique, ou, ce qui revient au même, sur le câble de garde, (mis à la terre, ce câble

relie les sommets des pylônes, il est destiné à protéger les conducteurs actifs des coups de foudre directs) [I.15].

IV.6.4. Effets électrodynamiques

Les courants électriques ayant la propriété d'exercer des forces sur les conducteurs qu'ils traversent (loi de Laplace), les effets engendrés sont dus à ces forces qui dépendent de l'intensité du courant et de la distance entre les conducteurs. Outre les forces de répulsion qui, dans de rares cas peuvent causer des déformations de conducteurs, il y a aussi des puissances efforts d'attraction entre conducteurs traversés par le courant de foudre et dont l'écartement est assez faible. C'est ainsi que des antennes tubulaires minces s'écrasent et que des conducteurs parallèles s'entrechoquent. Si le courant de foudre parcourt des conducteurs électriques isolés très rapprochés, l'isolant qui les sépare est aplati.

Pendant un très violent coup de foudre (100 kA), ces forces atteignent 105 N par mètre de conducteur pour un écartement de 5 mm, et 103 N par mètre pour 50 cm d'écartement. Pour des écartements plus grands, les efforts devraient presque toujours être sans conséquence [I.16].

Les conséquences de ces efforts électrodynamiques se traduisent par la déformation des structures métalliques, l'explosion d'ouvrages en béton armé, le déplacement ou l'arrachement de connexions électriques, l'écrasement de tubes métalliques ainsi que les blindages des câbles électriques, ..., etc. [I.16].

IV.7. Conséquences d'un coup de foudre sur le réseau

La foudre perturbe les systèmes électriques (et électroniques) de deux façons :

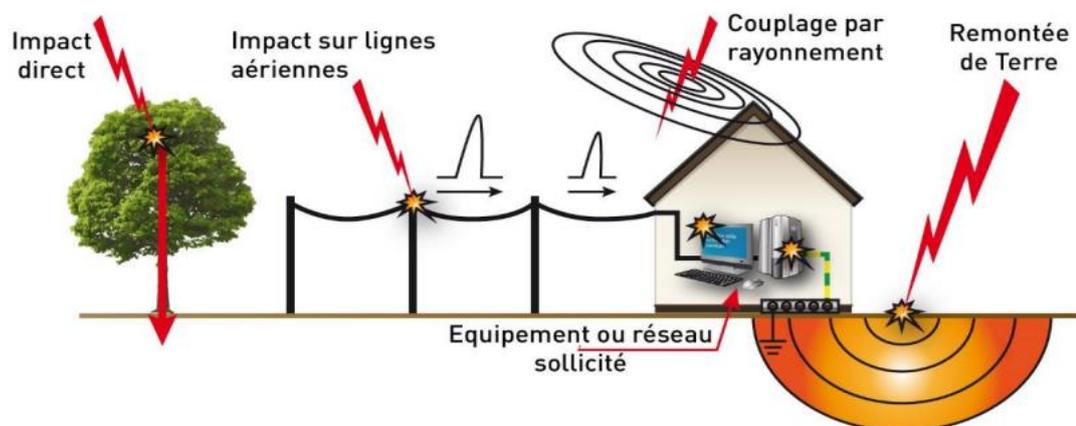


Figure I.15. Différents impacts de la foudre sur le réseau électrique.

- **Le coup de foudre direct** : le canal foudre se forme avec un attachement direct à la structure ou l'équipement contenant des systèmes électriques. Elle génère des courants importants sur les parties plus ou moins conductrices de la structure et sur les câbles. Ce courant peut atteindre 200kA ;
- **Le coup de foudre indirect** : il s'agit de regarder les effets produits par le rayonnement du canal foudre.

V. Protection du réseau électrique 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.16].

V.1. Système de protection contre l'impact indirect

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.
- Le réseau de varistances est composé de trois varistances à oxyde de zinc (ZnO)

V.2. Système de protection contre l'impact direct

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.

V.2.1. Les paratonnerres à tige simple

Le paratonnerre à tige simple est constitué d'une tige simple effilée à son extrémité de manière à favoriser l'effet de pointe.

Le but est de capter la foudre sur une zone donnée afin d'écouler le courant de foudre vers la terre par l'intermédiaire de conducteurs de descente.

La zone de protection assurée par un paratonnerre est directement liée à sa hauteur et peut être déterminée à l'aide du modèle de la sphère fictive proposée dans les normes 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.16. L'installation d'une tige simple comporte :

- Une tige simple (biseautée à son extrémité).
- Un ou plusieurs conducteurs de descente.
- Un réseau de terre [I.17].

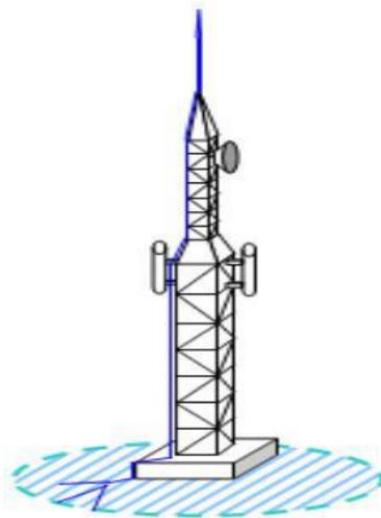


Figure I.16. Exemple de protection par tige simple.

La zone de capture est définie comme un volume bien déterminé pour lequel l'entrée en contact d'un canal ionisé, provoquera à coup sûr l'amorçage du coup de foudre sur le sommet de la tige [I.18].

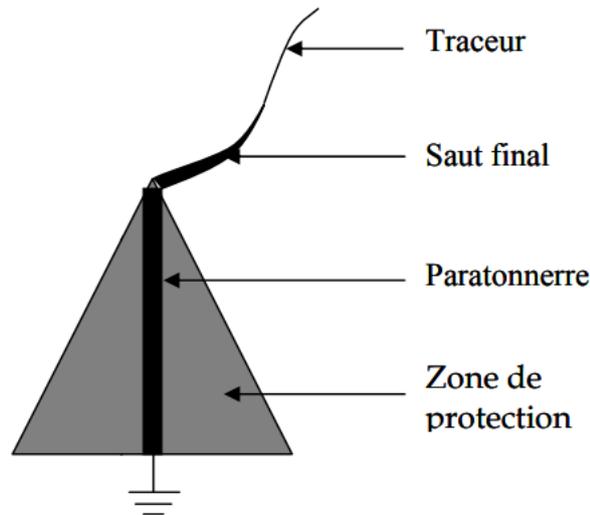


Figure I.17. Zone de protection d'un paratonnerre à tige simple.

V.2.2. Cages maillées

Le principe d'une protection par cage maillée, présenté sur la figure I.18. 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 Kirchhoff, et la faible valeur du courant circulant dans les mailles permet de diminuer le couplage de type inductif [I.15].

Une installation de cage maillée doit inclure :

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

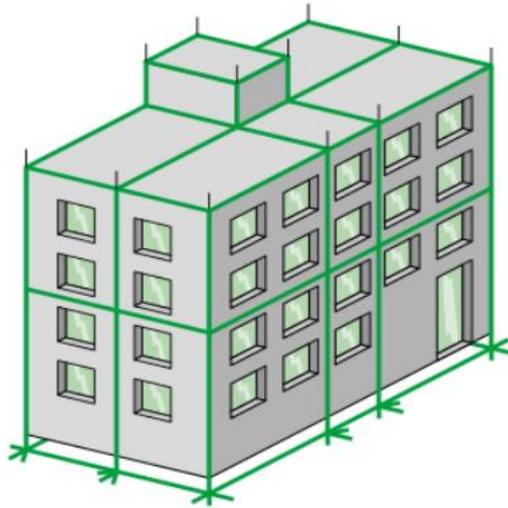


Figure I.18. Exemple de protection par cage maillée.

V.2.3. Câble de garde

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

Il est situé parallèlement aux conducteurs de phases à niveau supérieur à ceux-ci et relié à la terre par l'intermédiaire de chaque pylône (figure I.19). Le câble protecteur (câble de garde),

dont le but initial est de protéger les conducteurs de phases d'une ligne ou d'un poste contre les impacts directs de la foudre [I.19].

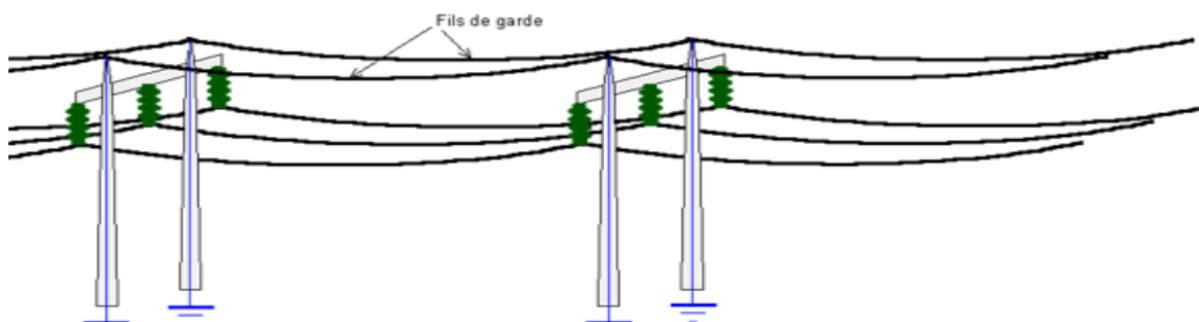


Figure I.19. Les fils de garde.

V.2.4. Les éclateurs

Les éclateurs constituent un moyen de protection contre les surtensions, utilisés depuis très longtemps en raison de leur simplicité. On distingue deux types d'éclateurs [I.20].

- Eclateur à cornes
- Eclateur à tige



Figure I.20. Types d'éclateurs.

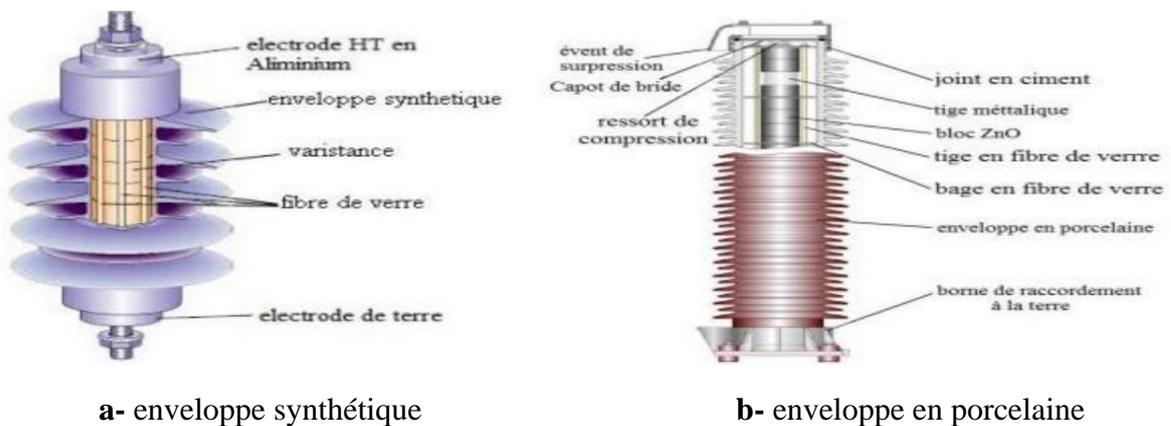
V.2.5. Les parafoudres

Les parafoudres sont des appareils de protections pour les équipements de haute et moyenne tension contre les sollicitations dues à des surtensions inacceptables. Ces surtensions peuvent être provoquées par des décharges de foudre ou des manœuvres de couplage dans l'installation. Le parafoudre assure la protection contre les surtensions, en réduisant leur Amplitudes, par écoulement de courant à la terre. Dès que l'on veut réduire l'isolement des matériels ou améliorer la qualité de service, il est nécessaire d'utiliser des parafoudres.

Ces dispositifs présentent de meilleures caractéristiques de protection par rapport aux éclateurs, moyennant toutefois un prix élevé.

Grace à leur pouvoir élevé d'absorption d'énergie et leur grande rigidité mécanique, les parafoudres se prêtent particulièrement bien à la protection contre les surtensions des transformateurs, des câbles, des moteurs et des autres appareils et installations à haute et moyenne tension. Il existe aujourd'hui des [I.21] :

- ◆ Parafoudres au carbure de silicium et éclateurs (*SiC*) ;
- ◆ Parafoudres à oxyde de zinc ;
- ◆ Parafoudres à oxyde de zinc et enveloppe synthétique ;



a- enveloppe synthétique

b- enveloppe en porcelaine

Figure I.21. Structure des parafoudres ZnO

VI. Protection des réseaux électriques par des systèmes de mise à la terre

VI.1. Définition d'un système de mise à la terre

La mise à la terre, parfois simplement appelée « la terre », est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour relier une partie métallique conductrice à la terre. La mise à la terre est un élément important d'un réseau électrique, que ce soit en haute ou basse tension.

Il constitue en outre un moyen de dérivation efficace des courants de défaut, des coups de foudre, des décharges électriques, des perturbations électromagnétiques et des interférences hautes fréquence [I.22].

Une mise à la terre est caractérisée par sa résistance ou son impédance. Pour une installation ou une structure de faible étendue, on emploie l'expression « prise de terre », en réservant celle de « réseau de terre » aux installations importantes telles que celles des postes [I.22].

VI.2. Principe de fonctionnement d'une prise de terre

La basse impédance est la clé de la protection contre la foudre. Toutes les connexions de mise à la terre devraient être aussi courtes et directes que possible afin de minimiser l'inductance et de réduire les pics de tensions induits dans les connexions.

Le système de mise à la terre doit permettre la dissipation efficace des courants de foudre dans le sol. La résistance de la terre elle-même doit également être réduite.

La protection maximale contre la foudre ne sera complète qu'une fois que tous ces facteurs auront été pris en compte [I.23].

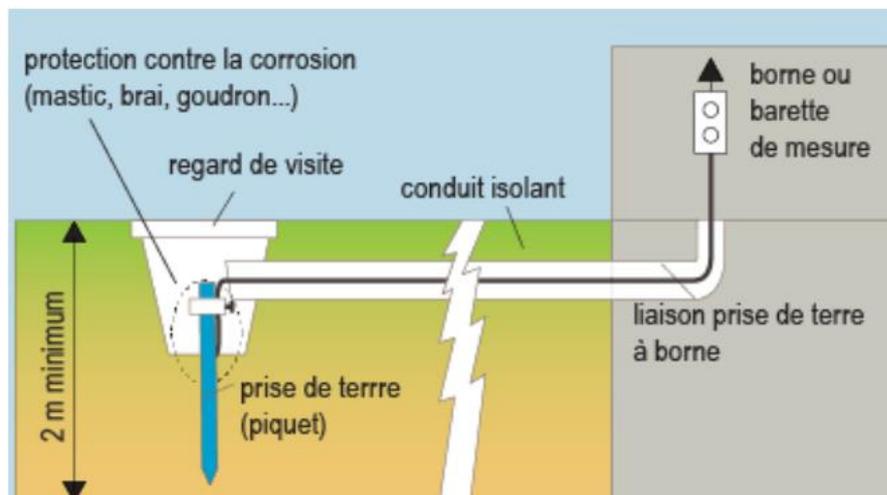


Figure I.22. Une installation typique de mise à la terre.

VI.3. Rôle d'un réseau de terre

Le rôle du réseau de terre d'une installation électrique est de permettre l'écoulement à l'intérieur du sol des courants de défauts. Il peut s'agir, de courants hautes fréquences, dus à des coups de foudre, ou bien de courants de défaut à 50 Hz [I.24].

Lors de l'écoulement de tels courants par une prise de terre, les différences de potentiel peuvent apparaître entre certains points, par exemple entre la prise de terre et le sol qui l'entoure, ou entre deux points du sol [I.22].

La conception des prises et réseaux de terre doit permettre, même dans ces conditions, d'assurer le maintien de :

- La sécurité des personnes ;
- La protection des installations de puissance ;
- La protection des équipements sensibles ;
- Un potentiel de référence ;

VI.4. Différents types de prise de terre

L'efficacité des mises à la terre dépend des conditions du terrain et la valeur de la résistance de prise de terre [I.25], [I.26]. La prise de terre peut être constituée :

- Soit par des conducteurs nus horizontaux ;
- Soit par des piquets verticaux ;
- Soit par des plaques verticales ;
- Soit par une grille ;
- Soit par un ceinturage à fond de fouille, enfouis dans le sol, de dimensions suffisantes et de nature choisie pour résister à l'action destructive de ce milieu.

Références Chapitre I

- [I.1] **S. KHEMRI et B. MAOUEL** « Protection numérique et mise en service d'une installation électrique et son réseau de distribution » Projet de fin d'étude (ingénieur). Université de TIZI-OUZOU .
- [I.2] Wikipédia (réseau électrique, transformateur électrique, jeu de barre).
- [I.3] **L.Haddad et H.Khodir** «Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes Électriques triphasées. » thèse Université Abderrahmane mira – BEJAÏA 2015
- [I.4] **N. Hayet et SADI OUFELLA** Tarik, « Etude et dimensionnement d'un poste de Transformation HTB / HTA (60 / 30kV) d'Ouled Moussa » Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Spécialité : Réseaux électriques, 2014.
- [I.5] **M, GERIN** ; Cahier Technique n°151, P4 ;1992.
- [I.6] paratonnerre pour pylone, in <https://www.google.com/search>. 2019.
- [I.7] **A. Brahim, H. Lariane, H. Hallalel**, « Etude des protections contre les surtensions de foudre », Mémoire de (D.E.U.A) en électrotechnique, UMMTO, 2002.
- [I.8] **A. Tilmatine**, « Techniques de la haute tension (chapitre 5 : la foudre) », Université Djilali LIABES.
- [I.9] **S. BEDOUI**, « Contribution à l'étude de la coordination des isolements des postes de transformation haute tension basée sur l'emploi de parafoudres ZnO », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, Département d'Electrotechnique, Option : Réseaux Electriques,.
- [I.10] **K. Berger, R.B. Anderson and H. Kroninger**, « Parameters of lightning flashes », Electra, 1975.
- [I.11] **M. A. Uman**, «The Lightning Discharge », Academic Press, 1987.
- [I.12] **F. Rachidi**, "Effets électromagnétiques de la foudre sur les lignes de transmission aériennes : modélisation et simulation", Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 1991.
- [I.13] **J. L. Bermudez**, « Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects », Thèse N° 2741 (2003), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [I.14] **A. TAOUA et MEHAMDIA** « Comparaison des Modèles d'Arc en Retour de Foudreen Présence d'une Tour ». Mémoire de master, 2010.

- [I.15] **Y. BOURGEOI**. «Modélisation des perturbations électromagnétiques générées sur un réseau de télécommunications par une agression de type foudre » Thèse N° 4-2009, XLIM-Département OSA.
- [I.16] **R. BOUSSADIA**, Étude d'une tour instrumentée et de son impact sur le champ électromagnétique de la foudre Mémoire master, univ Ibn Khaldoun Tiaret
- [I.17] **Schneider Electric** : « La protection des récepteurs contre les surtensions d'origine atmosphérique »
- [I.18] Documentation.
- [I.19] **D. ABDELLI** Application de la méthode FDTD-2D dans le calcul du champ électromagnétique de la foudre initiée au sol caractérisé par une conductivité finie mémoire master Univ Ibn Khaldoun Tiaret 2021
- [I.20] **A. CROGUENOC**, « Protection des réseaux à moyenne tension de distribution publique : Analyse des défauts affectant les réseaux MT », Techniques de l'ingénieur, Réf : D4810 v1, 1991
- [I.21] **AHOVI. K. & DJANDJA S.**, « les réseaux de neurones artificiels (RNA) et les supports Vector machines (SVM) pour la prédiction de la résistivité électrique du sol », Mémoire de Master, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs (E.N.S.I), Université de LOME, Département de Génie Electrique, 2018.
- [I.22] **A. ZIDAN**, « Modélisation et simulation des prises de terre dans les systèmes électrique », Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif, Département d'Electrotechnique, Option : Réseaux Electriques, 2012.
- [I.23] **D. SEKKI**, « Modélisation d'une mise à la terre à topologie complexe par la théorie des lignes », Thèse de Doctorat, Université Mohammed Sedik Ben Yahia, Jijel, 2016.
- [I.24] **A. Schmitt et T. Deflandre**, « Les surtensions et les transitoires rapides de tension en milieux industriel et tertiaire », Editions Eyrolles - EDF, 1997.
- [I.25] **B. AITMOHAMMED, Dj. MANSOURI**, « Etude d'une mise à la terre d'une installation électrique », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Département d'Electrotechnique, 2012.
- [I.26] **B. Hayet**, « Mise à la terre », Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 2017.

Chapitre II

Modélisation de la protection des bâtiments/installations électriques

I. Introduction

La foudre est un phénomène électrique à haute fréquence qui produit des surtensions sur tous les éléments conducteurs, Lorsque la foudre frappe directement un bâtiment ou une structure cela entraîne des détériorations, un vieillissement prématuré et/ou un dysfonctionnement des équipements, une interruption ou une perte de production.

Nous rappelons brièvement dans ce deuxième chapitre quelques formalismes numériques pour calculer les paramètres linéiques des prises de terre ainsi que barres horizontaux et verticaux constituant les cages de protection, le concept que nous proposons est basé sur la théorie des lignes de transmission et les lois des Kirchhoff et puis la résolution du système $[A]. [X]=[B]$ directement en temporel par FDTD. Ce formalisme qui a fait ses preuves pour les problèmes à structures filaires est utilisé pour calculer les courants et les tensions et voir l'élévation de potentiel de terre dans chaque nœud.

II. Calcul d'impédance et d'admittance linéiques

Les paragraphes suivants exposent les principes théoriques essentiels pour calculer l'impédance et l'admittance linéiques d'une installation électrique.

II.1. Méthode de A. Ametani et al.

II.1.1. Impédance et admittance linéiques des bras verticaux

Considérons un système multiconducteur vertical représenté en figure II.1. En appliquant la profondeur de pénétration complexe h_e de **Deri [II.1]** à figure ci-dessous, la formule de Neumann **[II.2]** est réécrite sous la forme suivante proposée par Rogers et al **[II. 3]**, l'équation d'impédance mutuelle entre deux conducteurs verticaux de forme cylindrique s'écrit comme de suit :

$$Z_{ij} = j\omega(\mu_0/2\pi)P_{ij} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$P_{ij} = (M + M')/2X_{ij} \quad (\text{II.2})$$

$$M = \int_{h_m}^{h_n} \int_{h_r}^{h_s} \frac{dx_i dx_j}{s} \quad \text{et} \quad M' = \int_{h_m}^{h_n} \int_{-h'_r}^{-h'_s} \frac{dx_i dx'_j}{s} \quad (\text{II.3})$$

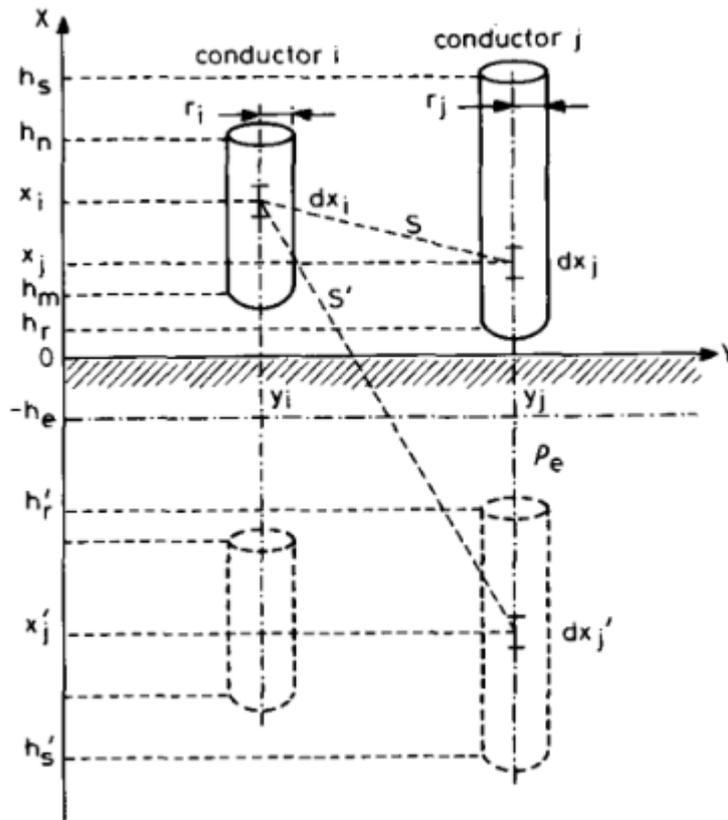


Figure II.1. Système vertical multiconducteur.

Selon la figure II.1, nous observons les relations suivantes :

$$S = \sqrt{((y_i - y_j)^2 + (x_i - x_j)^2)} = \sqrt{(d^2 + (x_i - x_j)^2)} \quad (\text{II.4})$$

$$S' = \sqrt{(d^2 + (x_i - x'_j)^2)} \quad (\text{II.5})$$

$$X_{ii} = h_n - h_m ; X_{jj} = h_s - h_r ; X_{ij} = (X_{ii} - X_{jj})/2 \quad (\text{II.6})$$

$$h'_r = h_r + 2h_e ; h'_s = h_s + 2h_e ; h_e = \sqrt{(\rho_s / j\omega\mu)} \quad (\text{II.7})$$

En résolvant les équations (II.3), nous obtenons l'impédance mutuelle entre les conducteurs i et j [II.4] à travers les variables h_5 jusqu'à h_8 , qui expriment la distance entre un conducteur et l'image du conducteur adjacent :

$$P_{ij} = (1 - 2X_{ij})[-h_1 \ln A_1 + h_2 \ln A_2 + h_3 \ln A_3 - h_4 \ln A_4 + a_1 - a_2 - a_3 + a_4 - (h_5 \ln A_5 - h_6 \ln A_6 - h_7 \ln A_7 + h_8 \ln A_8 - a_5 + a_6 + a_7 - a_8)] \quad (\text{II.8})$$

Où :

$$h_1 = h_n - h_s, h_2 = h_m - h_s, h_3 = h_n - h_r, h_4 = h_n - h_r, h_5 = h_n + h_s + 2h_e, h_6 = h_m + h_s + 2h_e, h_7 = h_n + h_r + 2h_e, h_8 = h_m + h_r + 2h_e \quad (\text{II.9})$$

$$a_k = \sqrt{(h_k^2 + d^2)}; A_k = a_k + h_k, k = 1, 2, \dots, 8) \quad (\text{II.10})$$

- **L'impédance propre** du conducteur i est obtenu en réalisant les remplacements suivants dans l'expression de P_{ij} : $d = r_i$, $h_s = h_n$, $h_r = h_m$. Tel que:

$$Z_{ii} = j\omega(\mu_0/2\pi)P_{ii} \quad (\text{II.11})$$

- **Les paramètres linéiques propres R et L** sont exprimés comme suit :

$$R = \text{Reel}(Z_{ii}) \quad L = \text{Imag}(Z_{ii})/\omega \quad (\text{II.12})$$

- Pour déterminer le coefficient P_{0ii} dans le cas d'un sol parfaitement conducteur, en mettant l'épaisseur de pénétration $h_e = 0$ dans l'expression de P_{ii} . Cela permet de déterminer **la capacité linéique propre** de la manière suivante [II.4] :

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot P_{0ii}^{-1} \quad (\text{II.13})$$

II.1.2. Impédance et admittance linéiques des bras horizontaux

L'impédance mutuelle et propre du circuit de retour à la terre du système multiconducteur de longueur finie représenté en figure II.2, peut être déterminée à l'aide de la formule de Neumann [II.2]. En appliquant la profondeur de pénétration complexe $h_e = h_s$ de Deri[II.1].

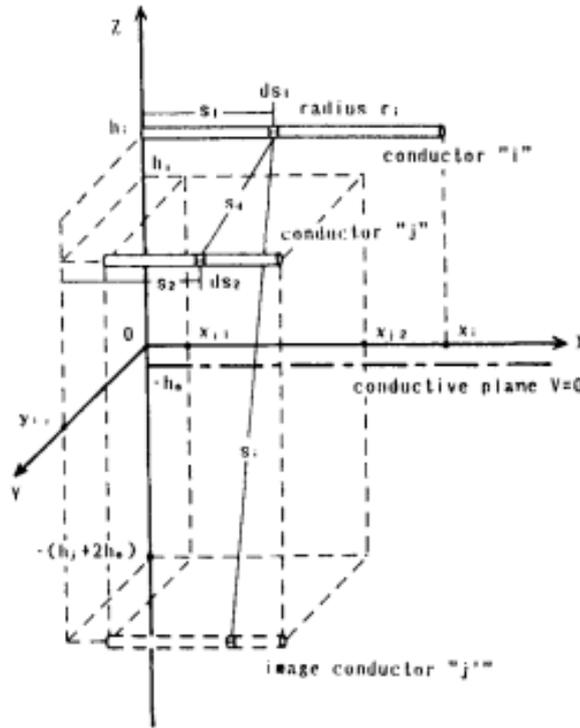


Figure II.2. Système multiconducteur de longueurs finies.

L'impédance mutuelle ainsi obtenue est donnée comme suit :

$$Z_{ij} = j\omega(\mu_0/2\pi)P'_{ij} \tag{II.14}$$

$$P'_{ij} = (M_d - M_i)/2 \tag{II.15}$$

M_d : représente l'inductance mutuelle directe entre les conducteurs i et j [II.5].

M_i : représente l'inductance mutuelle entre le conducteur i et l'image j du conducteur j par rapport à la surface de potentiel zéro [II.5].

Les impédances obtenues à partir des équations précédentes sont en accord avec celles d'un système de conducteurs parallèles de longueur finie, comme indiqué dans parallèle de longueur finie telles que données dans [II.6] si la position terminale du conducteur j est fixé à $x_i = 0$ du conducteur j est fixé à $x_{j1} = 0$, Si $x_i = x_{j2} = x$ et $x_{j1} = 0$, nous obtenons [II.5] :

$$P'_{ij} = x \ln \frac{1 + \sqrt{1 + (d_{ij}/x)^2}}{1 + \sqrt{1 + (s_{ij}/x)^2}} + x \ln \frac{s_{ij}}{d_{ij}} - \sqrt{x^2 + d_{ij}^2} + \sqrt{x^2 + s_{ij}^2} + d_{ij} + s_{ij} \tag{II.16}$$

Avec :

$$d_{ij} = \sqrt{(h_i - h_j)^2 + y^2} \quad (\text{II.17})$$

$$S_{ij} = \sqrt{(h_i + h_j + 2h_s)^2 + y^2} \quad (y = y_{ij}) \quad (\text{I.18})$$

$$h_s = \sqrt{\rho_s / (j\omega\mu_s)} \quad (\text{II.19})$$

L'impédance propre $Z_{ij} = j\omega(\mu_0/2\pi) \cdot P'_{ii}$ peut également être obtenue en mettant : $j = i$,

$$d_{ij} = r_i, S_{ij} = 2(h_i + h_s) \quad (\text{II.20})$$

Dans le cas de sol parfaitement conducteur ($\rho_s = 0$), l'épaisseur de peau $h_s = 0$:

$$P'_{0ij} = x \ln \frac{1 + \sqrt{1 + (d_{ij}/x)^2}}{1 + \sqrt{1 + (D_{ij}/x)^2}} + x \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} - \sqrt{x^2 + d_{ij}^2} + \sqrt{x^2 + D_{ij}^2} + d_{ij} + D_{ij} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

$$D_{ij} = \sqrt{(h_i + h_j)^2 + y_{ij}^2} \quad (\text{II.22})$$

- L'impédance propre : $Z_{0ii} = j\omega(\mu_0/2\pi) \cdot P'_{0ii}$ sont obtenues en définissant : $j = i$,
 $d_{ij} = r_i$, $D = 2h_i$ dans P'_{0ij}
- La capacité linéique propre d'un système multiconducteur sont données par :

$$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot P'_{0ii}^{-1} \quad (\text{II.23})$$

II.2. Paramètres linéiques des mises à la terre de système d'un bâtiment

La méthode la plus couramment utilisée pour la protection des bâtiments électriques contre la foudre consiste à mettre à la terre les pieds des bâtiments à l'aide de piquets horizontaux, verticaux, ou d'une combinaison des deux. Cette méthode permet de dériver rapidement vers la terre les courants de défaut qui traversent le bâtiment.

Dans le paragraphe suivant, nous exposons les expressions des paramètres linéiques des prises de terre utilisant des électrodes horizontales ainsi que des piquets verticaux.

II.2.1. Electrode enterrée horizontalement

Pour une électrode enfouie horizontalement dans un sol de conductivité finie, de longueur l à une profondeur h . Figure II.3.

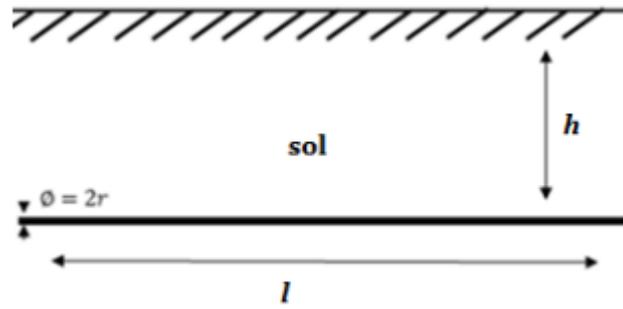


Figure II.3. Electrode enterrée horizontalement.

Nous utilisons les expressions analytiques de **E. D. Sunde** [II.7] pour les expressions des constantes réparties (**G**, **C** et **L**) suivantes :

$$G = \frac{\pi}{\rho_{sol} \cdot [\ln\left(\frac{2L}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}}\right) - 1]} \quad (\text{II.24})$$

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_{sol}}{[\ln\left(\frac{2L}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}}\right) - 1]} \quad (\text{II.25})$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot [\ln\left(\frac{2L}{\sqrt{2 \cdot h \cdot r}}\right) - 1] \quad (\text{II.26})$$

La résistance linéique interne R_i de l'électrode donnée par :

$$R_i = \frac{\rho_c}{S} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

ρ_s et ϵ_s : respectivement, la résistivité et la permittivité électrique du sol.

l : la longueur de l'électrode.

r : son rayon.

h : la profondeur d'enfouissement dans le sol.

ρ_c : la résistivité de l'électrode.

S : la section de l'électrode.

II.2.2. Electrode enterrée verticalement

Pour un conducteur enterré verticalement de longueur l (Figure II.4), **E. D. Sunde** utilise la théorie des images, pour trouver les expressions des constantes réparties (**G**, **C** et **L**) [II.7].

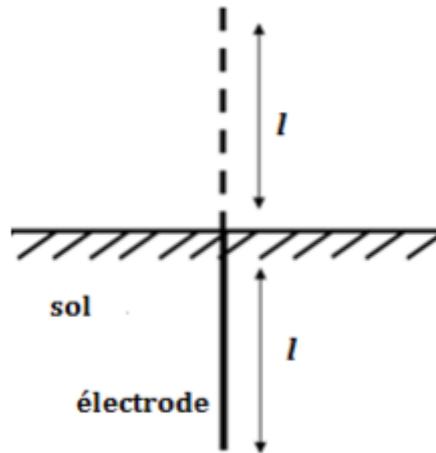


Figure II.4. Electrode enterrée verticalement.

Les paramètres linéiques sont donnés par les expressions suivantes (II.28) - (II. 30) :

$$G = \frac{2\pi}{\rho_{sol} \cdot [\ln\left(\frac{4L}{R}\right) - 1]} \quad (\text{II.28})$$

$$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_{sol}}{[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1]} \quad (\text{II.29})$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \cdot [\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1] \quad (\text{II.30})$$

La résistance linéique interne R_i de l'électrode verticale est donnée par l'équation (II.27) précédente.

III. Modélisation de coup de foudre

La décharge de la foudre atteignant directement un conducteur ou un élément quelconque d'une ligne ou d'une installation électrique. L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100 kA et plus). Il existe différentes expressions analytiques qui peuvent être utilisées afin de simuler l'allure temporelle du courant d'un coup de foudre, Il peut être représenté par une source de courant de forme exponentielle ou bien la forme de Heidler.

III.1. Modèle bi-exponentiel

La fonction bi-exponentielle présente l'avantage d'avoir une transformée de Fourier puisque s'exprime analytiquement, ce qui simplifie l'analyse dans le domaine fréquentiel [II.8].

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (\text{II.31})$$

Avec :

I_0 : Amplitude du courant.

α : Inverse du temps de montée de l'impulsion du courant.

β : Inverse de la durée de l'impulsion du courant.

t : le temps.

III.2. Modèle Heidler

Heidler en 1985[II.9], a proposé une notre expression analytique, qui permet d'obtenir une forme du courant de foudre à la base du canal de l'intérêt d'obtenir une allure plus proche à la réalité. L'expression de courant à la base de canal est exprimée comme suite :

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (\text{II.32})$$

Avec

I_0 : est l'amplitude du courant à la base du canal.

τ_1 : est le temps de montée de l'impulsion du courant.

τ_2 : est la durée de l'impulsion du courant.

n : est un exposant ayant des valeurs comprises entre 2 et 10 [II.10].

η : est le facteur de correction d'amplitude du courant, obtenu par :

$$\eta = \exp\left(-\left(\tau_1/\tau_2\right)^n \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) \quad (\text{II.33})$$

IV. Equation matricielle nodale en régime temporel

A partir du principe retenu pour la modélisation des lignes en temporel. Mise sous la forme d'une équation nodale avec une source de courant fictive, et en procédant d'une façon similaire par intégration numérique (méthode des trapèzes) pour les éléments localisés, tout réseau peut être à chaque instant ramené à l'étude d'un circuit à constants localisées en courant continu, cette étude est alors faite à l'aide de l'équation matricielle nodale [II.11].

$$[Y_{bus}][U(t)] = [i(t)] - [I(t - \Delta t)] \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$[Y_{bus}]$: Matrice des admittances nodales.

$[U(t)]$: Vecteur des tensions nodales (inconnu).

$[i(t)]$: Vecteur des courants injectés aux nœuds sources.

$[I(t - \Delta t)]$: Vecteur des sources fictives de courants (courant a l'instant $t - \tau$ pour les lignes à constantes réparties et a l'instant $t - \Delta t$ pour les éléments localisés).

La liaison entre un nœud i et un nœud v est supposée représentée par un quadripôle en π (figure II.5), d'admittance longitudinale y_{iv}^0 et d'admittance transversale y_{iv}^i et y_{iv}^v .

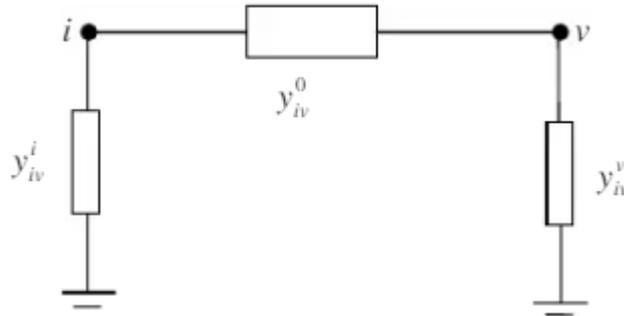


Figure II.5. Schéma de base pour le calcul de Y_{bus} .

La formule s'explique :

$$Y_{ij} = -y_{iv}^0 \quad \text{Si} \quad j = v \quad (II.35)$$

$$Y_{ij} = 0 \quad \text{Si} \quad j \neq v \quad (\text{pas de liaison entre } i \text{ et } j) \quad (II.36)$$

$$Y_{ii} = \sum_v y_{iv}^0 + \sum_v y_{iv}^i \quad (II.37)$$

IV.1. Modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD

Pour modéliser l'impact direct d'une onde de foudre sur un bâtiment/installations électrique, nous construisons le système d'équations $[A].[X]=[B]$, comme expliqué en détail dans la figure II.6.

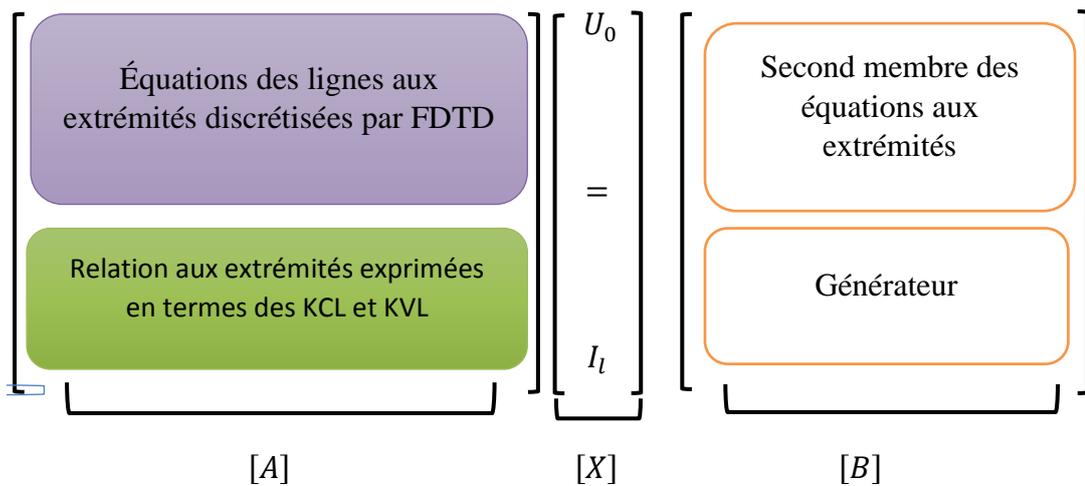


Figure II.6. Forme générale du système matriciel.

IV.2. Equations des lignes en temporel

Les équations des lignes à paramètres linéiques constants s'expriment par (II. 38) et (II.39) :

$$\frac{\partial[v(x,t)]}{\partial x} + [R][i(x, t)] + [L] \frac{\partial[i(x,t)]}{\partial t} = [0] \quad (\text{II.38})$$

$$\frac{\partial[i(x,t)]}{\partial x} + [G][v(x, t)] + [C] \frac{\partial[v(x,t)]}{\partial t} = [0] \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$[v(x, t)]$ et $[i(x, t)]$ sont respectivement la valeur de tension et le courant distribués et inconnus le long de la ligne.

$[R]$: La matrice de résistance linéique.

$[G]$: La matrice de conductance linéique.

$[L]$: La matrice d'inductance linéique.

$[C]$: la matrice capacité linéique.

IV.3. Discrétisation par FDTD des équations des lignes a constantes réparties

L'objectif est d'approcher les dérivées spatiales et temporelles ponctuelles présentes dans les équations des lignes à l'aide de différences finies centrées. En utilisant la méthode des différences finies, on peut discrétiser les équations des lignes après avoir converti les dérivées partielles en différences finies. La première étape consiste à diviser le conducteur en nœuds alternativement pour le courant et la tension, afin de dériver des équations récurrentes pour la tension et le courant à chaque nœud.

IV.3.1. Echantillonnage spatial

Le schéma en figure II.7 illustre l'application de la méthode des différences finies à points centrées (FDTD), chaque conducteur est subdivisé alternativement en des nœuds de courant et de tension, pour écrire les équations de récurrences de tension et de courant en chaque nœud [II.12].

- Deux nœuds consécutifs d'un même type sont séparés par un intervalle Δx .
- Les deux extrémités de conducteur sont définies comme des nœuds de tension.

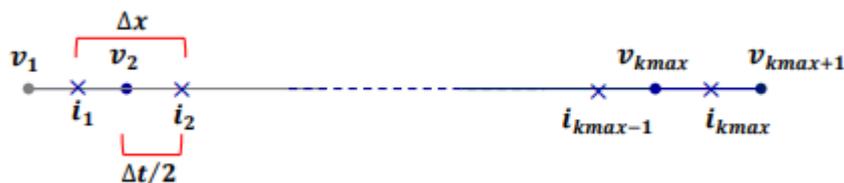


Figure II.7. Découpage de la branche.

Pour une écriture discrète des équations des lignes, il est nécessaire de définir un pas temporel Δt et un pas spatial Δx .

Le choix du pas de discrétisation spatiale ainsi que le pas temporel est géré par la condition de stabilité (II.40) :

$$v_p \leq \Delta x / \Delta t \tag{II.40}$$

Où :

v_p : vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

Une démonstration présentée dans [II.12] prouve que si l'on a $v_p = \Delta x / \Delta t$, la méthode des différences finies à points centrés donne la solution avec le minimum d'erreur.

IV.3.2. Echantillonnage spatio-temporel

Comme dans l'espace, le courant et la tension sont décalés d'un demi-pas temporel. Plus précisément, les échantillons de courant sont en retard de $\Delta t/2$ sur la tension. La figure II.8 illustre l'entrelacement des tensions et des courants dans l'espace et dans le temps.

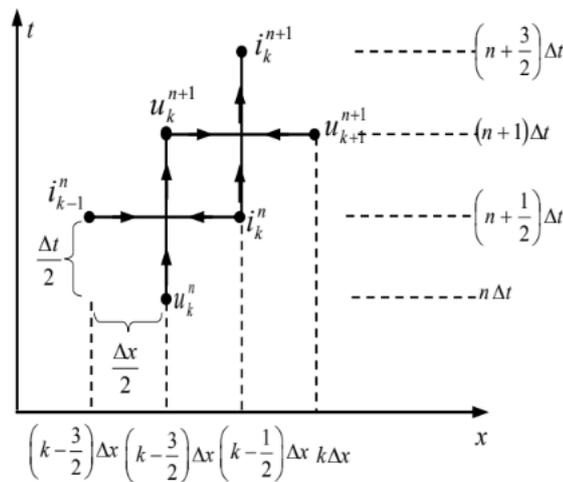


Figure II.8. Entrelacement spatial et temporel.

- Mise en équations

Les échantillonnages spatial et temporel définis plus haut conduisent à considérer les grandeurs suivantes :

- La tension sous forme discrète aux nœuds de tension et aux instants $n\Delta t$

$$[v_k^n] \equiv [v[(k-1)\Delta x, n\Delta t]] \tag{II.41}$$

- Le courant, sous forme discrète aux nœuds de courant et aux instants $n\Delta t$:

$$[i_k^n] \equiv [i[(k-1/2)\Delta x, (n+1/2)\Delta t]] \tag{II.42}$$

Avec :

$$l \equiv k_{max}\Delta x$$

$$t_{max} \equiv n_{max}\Delta t$$

En exprimant par FDTD les dérivées spatiales et temporelles, les équations du système (11.38), (11.39) s'écrivent :

$$\frac{[v_{k+1}^n] - [v_k^n]}{\Delta x} + [L] \frac{[i_k^{n+1/2}] - [i_k^{n-1/2}]}{\Delta t} + [R] \frac{[i_k^{n+1/2}] + [i_k^{n-1/2}]}{2} = [0] \quad (II.43)$$

$$\frac{[i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]}{\Delta x} + [C] \frac{[v_k^n] - [v_{k-1}^n]}{\Delta t} + [G] \frac{[v_k^n] + [v_{k-1}^n]}{2} = [0] \quad (II.44)$$

Ce qui nous permet de déduire les équations de récurrences pour une branche :

$$K=1, \dots, k_{max}$$

$$[i_k^{n+1/2}] = \left([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([L] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [R] \frac{\Delta x}{2} \right) ([i_k^{n-1/2}]) - ([v_{k+1}^n] - [v_k^n]) \right] \quad (II.45)$$

$$K=2, \dots, k_{max}$$

$$[v_k^n] = \left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} + [R] \frac{\Delta x}{2} \right)^{-1} \left[\left([C] \frac{\Delta x}{\Delta t} - [G] \frac{\Delta x}{2} \right) ([v_k^{n-1}]) - ([i_k^{n-1/2}] - [i_{k-1}^{n-1/2}]) \right] \quad (II.46)$$

En imposant les conditions aux extrémités, les équations de récurrences (II.45) et (II.46) nous permettent de calculer la distribution des courants et des tensions le long de la ligne de transmission.

IV.4. Représentation quadripolaire d'une ligne dans le domaine temporel

Comme nous l'avons vu sur la figure II.7, lors de la discrétisation des équations des lignes par **FDTD**, les nœuds courants et tensions ne coexistent ni dans le temps ni dans l'espace. Afin de déduire les équations nodales en courant ($[i_0^{n+1}]$, $[i_{k_{max}+1}^{n+1}]$) et en tension ($[v_0^{n+1}]$, $[v_{k_{max}+1}^{n+1}]$) au même instant, deux nœuds fictifs sont générés ; ces nœuds fictifs sont obtenus en remplaçant Δx par $\Delta x 2$ à l'instant $t = n\Delta t$ respectivement pour $k = 1$ et $k = k_{max}+1$ dans (II.46) et notant :

$$[v_1^n] = [v(0)]^n \quad \text{et} \quad [i_0^{n-1/2}] = [i(0)]^{n-1/2} \quad \text{pour} \quad x=0$$

$$[v_{k_{max}+1}^n] = [v(l)]^n \quad \text{et} \quad [i_{k_{max}+1}^{n-1/2}] = [i(l)]^{n-1/2} \quad \text{pour} \quad x=l$$

En considérant la moyenne temporelle suivante :

$$[i(0)]^{n-1/2} = \frac{[i(0)]^n + [i(0)]^{n-1}}{2} \quad (II.47)$$

$$[i(l)]^{n-1/2} = \frac{[i(l)]^n + [i(l)]^{n-1}}{2} \quad (II.48)$$

L'équation nodale en tension :

- Pour la première extrémité ($x = 0$) :

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2}\right) ([v(0)]^n) - \frac{[i(0)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (\text{II.49})$$

- Pour la deuxième extrémité ($x = l$) :

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2}\right) ([v(l)]^n) + \frac{[i(l)]^n}{\Delta x} = \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} + \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} - \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \quad (\text{II.50})$$

Les deux équations (49) et (50) aux extrémités nous permettent d'écrire alors la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} & -\frac{[1_{2N}]}{\Delta x} & [0] \\ [0] & [0] & \frac{[C]}{\Delta t} + \frac{[G]}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ \frac{[1_{2N}]}{\Delta x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [v^n(0)] \\ [i^n(0)] \\ [v^n(l)] \\ [i^n(l)] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(0)]^{n-1} - \frac{[i_1^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(0)]^{n-1}}{\Delta x} \\ \left(\frac{[C]}{\Delta t} - \frac{[G]}{2}\right) [v(l)]^{n-1} - \frac{[i_{kmax}^{n-1/2}]}{\Delta x/2} + \frac{[i(l)]^{n-1}}{\Delta x} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

IV.5. Définition du vecteur inconnu [X]

Dans le système $[A].[X] = [B]$, le vecteur inconnu [X] comprend les courants et les tensions aux nœuds des extrémités de la ligne.

L'utilisation du formalisme topologique $[A].[X] = [B]$ que nous venons de présenter pour la déduction des courants et tensions sur les deux nœuds des extrémités de la ligne à l'instant $tn = n\Delta t$ nécessite la connaissance de ces mêmes grandeurs électriques à l'instant qui précède ($tn-1 = (n-1)\Delta t$). Pour cet objectif nous utilisons les équations de récurrences (II.45) et (II.46) obtenues après discrétisation par **FDTD** des équations des lignes.

V. Système $[A][X] = [B]$ pour une structure complexe : Cage

Dans notre travail, la structure complexe (cage de protection) est représentée par un réseau constitué de segments (barres verticales et horizontales ainsi que des piquets de terre) et de nœuds. Afin d'effectuer le modèle théorique définissant notre problématique, nous exposons dans ce qui suit le montage du système $[A][X] = [B]$ à résoudre [II.13].

La matrice topologique [A] est déduite après numérotation de l'ensemble des segments et des nœuds (figure II.9), elle est composée de deux sous matrices $[A_1]$ et $[A_2]$, tel que :

$$[A] = \begin{bmatrix} [A_1] \\ [A_2] \end{bmatrix} \tag{II.52}$$

$[A_1]$:tient compte de la propagation sur l'ensemble des segments, et est construite à partir du premier membre des équations (II.49) et (II.50), pour chaque segment i , et $[A_2]$ est soustraite des lois de Kirchhoff sur l'ensemble des nœuds.

Le vecteur $[B]$ est également composé de deux sous vecteurs $[B_1]$ et $[B_2]$.

$$[B] = \begin{bmatrix} [B_1] \\ [B_2] \end{bmatrix} \tag{II.53}$$

$[B_1]$ est construit à partir du second membre des équations (II.49) et (II.50) pour chaque segment i et $[B_2]$ contient des zéros sauf sur le nœud d'injection du courant de foudre ;

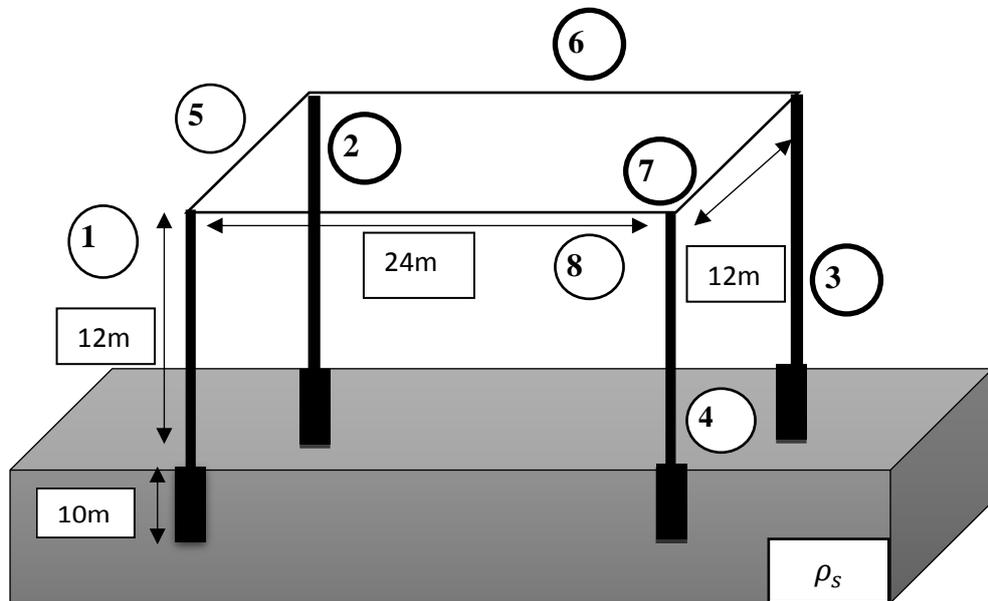


Figure II. 9. Configuration simplifiée d'une cage de protection.

V.1.Construction de la sous matrice des nœuds $[A_1]$

La sous matrice $[A_1]$ est obtenue en utilisant le membre gauche des équations (II.49) et (II.50). La contribution du i^{eme} segment dans cette sous matrice sera comme suit :

$$[A_1] = \begin{pmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & \left(\frac{C_i}{\Delta t} + \frac{G_i}{2} \right) - \frac{1}{\Delta x} & 0 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & 0 & \left(\frac{C_i}{\Delta t} + \frac{G_i}{2} \right) \frac{1}{\Delta x} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \tag{II.54}$$

V.2. Construction de la sous matrice des nœuds [A₂]

La sous matrice [A₂] est déduite de l'application des lois de Kirchhoff (KCL et KVL) pour tous les nœuds du système électrique.

Pour un nœud **m** interconnectant **N** segments : les courants et les tensions en ce nœud sont liés par la combinaison des deux lois de Kirchhoff « KCL » et « KVL » suivantes :

$$\sum_{k=1}^N (Y_k^m U_k^m) + (Z_k^m I_k^m) = P^m \quad (\text{II.55})$$

Où :

k : tout segment aboutissant au nœud **m** ;

Z_k^m et **Y_k^m** : sont respectivement les impédances et les admittances résultantes de l'application des lois de Kirchhoff au nœud **m** et qui peuvent contenir des impédances, des admittances, des **0**, des **1** ou des **-1** suivant la connectique du nœud **m** ;

P^m : représente le vecteur qui comprend les générateurs localisés du courant et/ou de tension

References chapitre II

- [II.1] **A. Deri et al**, « The complex ground return plane: a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return », IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 8, pp. 3686-3693, 1981.
- [II.2] **F. GARDIOL**, « Traité d'électricité, Volume III : Électromagnétisme », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2002.
- [II.3] **E. J. ROGERS**, and J. F. WHITE, « Mutual impedance between horizontal earth return conductors using actual routing parameters », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1266-1274, 1990.
- [II.4] **A. AMETANI et al**, « Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model », in Pro. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist., Vol. 141, No. 4, pp. 339-345, 1994.
- [II.5] **A. AMETANI and A. ISHIHARA**, « Investigation of impedance and line parameters of a finite length multiconductor system », Electrical Engineering in Japan, Vol. 114, No. 4, pp. 83-93, 1994.
- [II.6] **E. J. Rogers and J. F. White**, «Mutual coupling between finite length of parallel or angled horizontal earth return conductors». IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 4, No. I, 103, 1989.
- [II.7] **E. D. SUNDE**, « Earth Conduction Effects in Transmission Systems », Dover publications, New York, 1968.
- [II.8] **C. A. Nucci, C. Mazzetti, F. Rachidi, M. Ianoz**, « Analyse du champ électromagnétique dû à une décharge de foudre dans les domaines temporel et fréquentiel », Annales de Télécommunications, Vol. 43, n° 11-12, pp. 625-637, 1988.
- [II.9] **F. Heidler**, "Analytic lightning current functions for LEMP calculation ",18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Munich, Germany, 1985.
- [II.10] **F. Heidler**, 'Travelling current source model for LEMP calculation', Proceedings of 6th international symposium on EMC, Zurich, Switzerland, 29F2, 157–162, 1985.
- [II.11] **M. AGUET, M. IANOZ** « Traité d'électricité, Volume XXII : Haute Tension », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2002.
- [II.12] **C. R. Paul**, "Analysis of Multiconductor Transmission Lines". John Wiley and Sons, 1989.

[II.13] **S. Kaouche**, Analyse de Défauts dans un Réseau de Lignes ou de Câbles. Thèse de doctorat, Université de Jijel, Algérie. 2007.

Chapitre III

Application et Discussion des Résultats

I. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré aux applications dans lequel nous allons mettre en exergue les différents concepts théoriques que nous avons exposé dans le chapitre précédent. Afin de conforter notre analyse nous proposons en premier lieu une validation de nos simulations par comparaison avec ceux publié ainsi qu'avec des logiciels de simulation SIMULINK, nous complétons notre étude par quelques applications que nous jugeons utiles.

II. Validation

II. 1. Validation des paramètres linéiques

Dans cette première validation, nous nous intéressons à la validation des paramètres linéiques longitudinaux (Résistance et inductance linéiques) d'un segment vertical de rayon $r=1$ cm et de longueur égale à $h=60$ m représenté en figure III.1. Les paramètres géométriques et physiques sont également exposés sur la figure III.1. Le sol est caractérisé par une conductivité de 0.01 S/m et une permittivité de 10 [III-1].

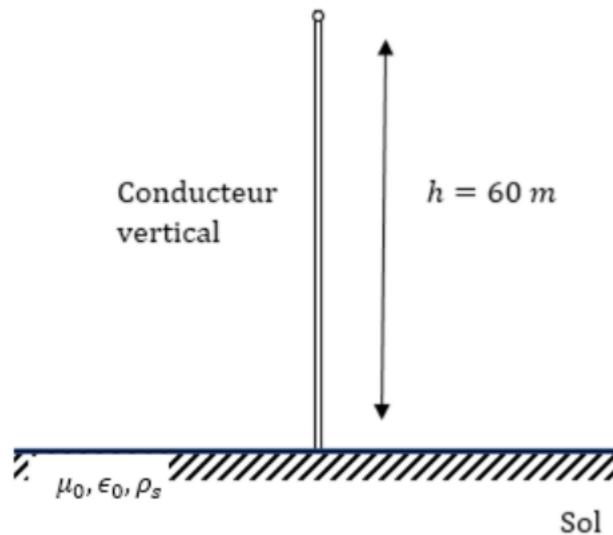
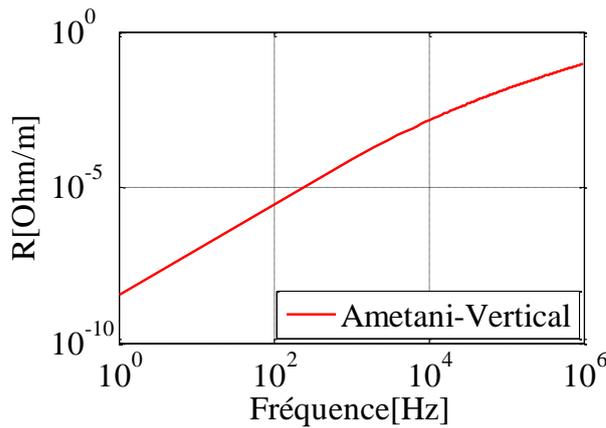
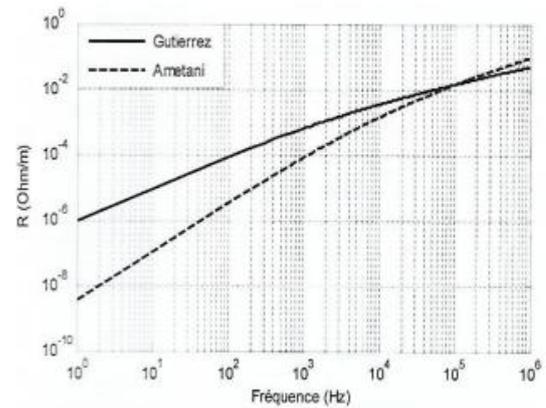


Figure III.1. Géométrie étudiée.

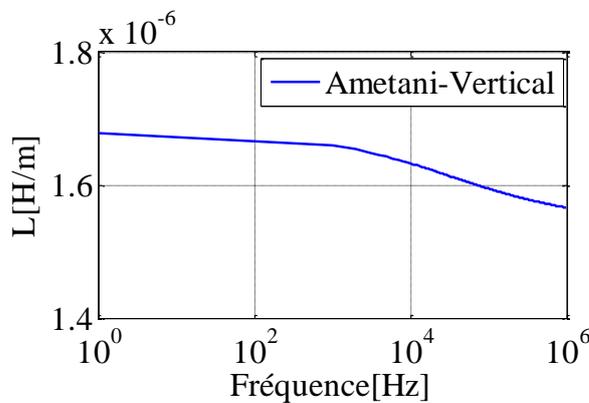


(a) Nos résultats de calcul.

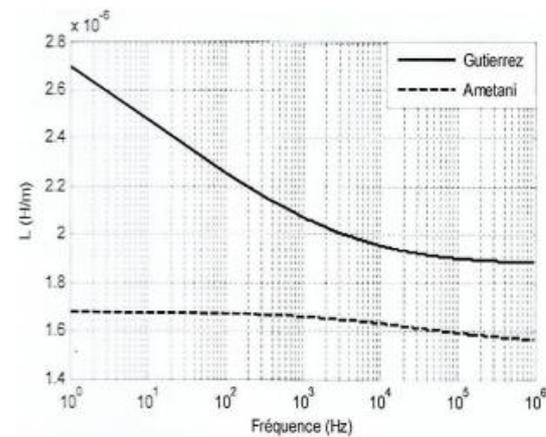


(b) Résultats réalisés en [III.1]

Figure III.2. Résistance linéique du conducteur vertical.



(a) Nos résultats de calcul.



(b) Résultats réalisés en [III.1]

Figure III.3. Inductance linéique du conducteur vertical.

Nous remarquons bien que nos résultats issus par simulations pour **la résistance linéique** et pour **l'inductance linéique** du segment vertical sont en parfaite concordance avec ceux publiés en [III.1]. Nous notons bien que les allures sont accord avec la théorie générale, En effet, **la résistance** présente une augmentation avec la fréquence contrairement à **l'inductance linéique** qui diminue avec la montée de la fréquence.

II.2. Paramètres linéiques d'un conducteur horizontale

Dans cette application nous nous intéressons à l'étude des paramètres linéique d'un conducteur horizontal, la configuration étudiée est illustrée en figure III.4.

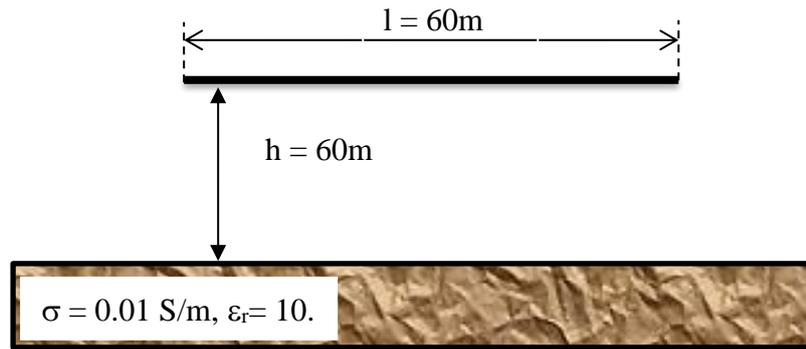


Figure III.4. Configuration étudiée.

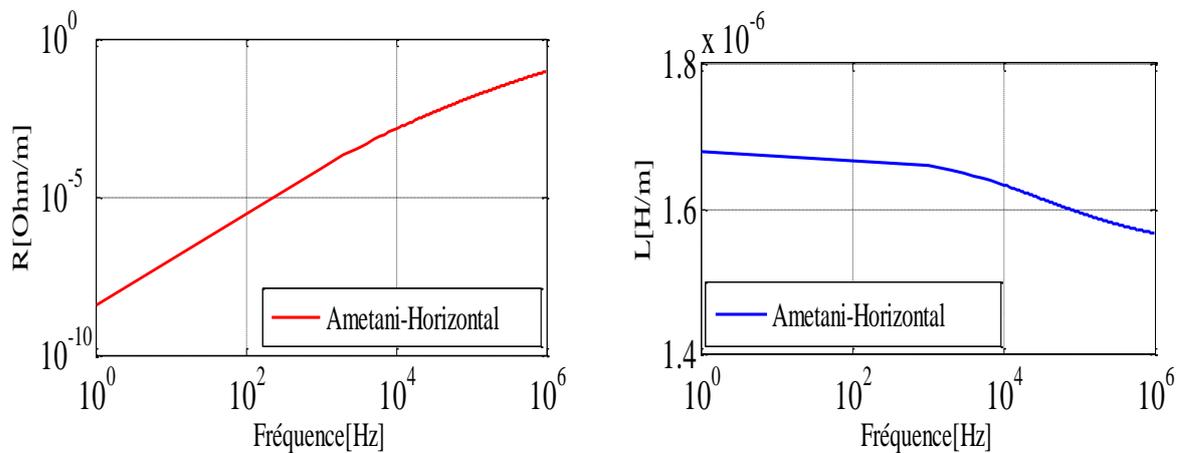


Figure III.5. Résistance et inductance linéiques du conducteur horizontal.

La figure III.5 illustre nos résultats de simulation pour **la résistance** et pour **l'inductance linéique** du segment horizontal en utilisant le formalisme de A. Amitani en [III.2]. La figure III.5 confirme l'allure générale en présentant une résistance qui augmente avec la fréquence et l'inductance qui décroît avec la fréquence.

II. 3. Validation du concept proposé

Afin de valider le concept théorique que nous avons utilisé dans notre travail qui est basé sur la résolution d'un système $[A].[X]=[B]$ en temporel (inspéré de la résolution des équations des lignes par FDTD et les lois de Kirchhoff), nous considérons une configuration de structure a cage des bâtiments/installations électriques. La structure est constituée de conducteurs en acier horizontaux et verticaux et des prises de terre également représentées par une simple impédance. Les dimensions de la structure sont indiquées sur la figure III.6.

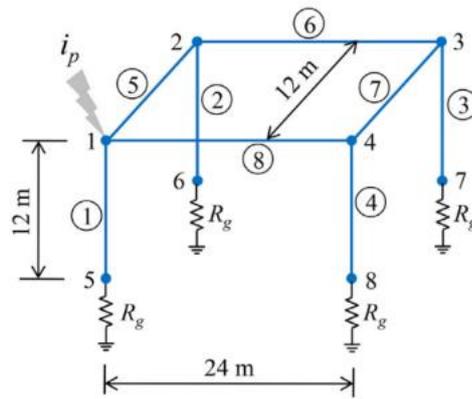


Figure III.6. Structures considérées pour la validation du modèle proposé.

La résistivité de sol $\rho_{sol} = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (typique pour la plupart des cas) et un rayon de **1 cm** (en gardant à l'esprit qu'il s'agit d'un test à échelle réduite) sont supposés. Le courant de foudre (figure III.7) utilisé pour la validation est de forme bi-exponentielle donnée par l'expression (III.1) :

$$I(t) = I_0(\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)) \tag{III.1}$$

Avec :

- Générateur 1 : $I_0 = 1.06537 \text{ kA}$, $\alpha = 1.88 \cdot 10^6 \text{ S}^{-1}$ et $\beta = 1.6 \cdot 10^7 \text{ S}^{-1}$

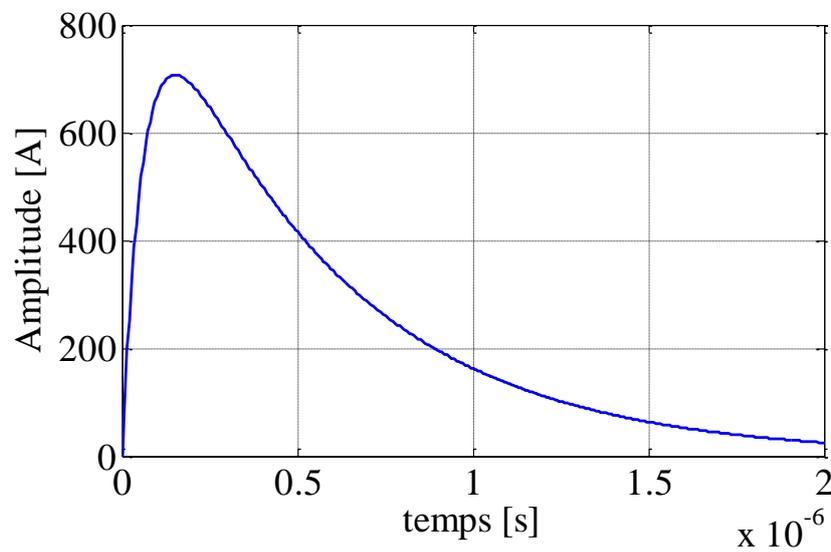


Figure III.7. Courant de foudre injecté.

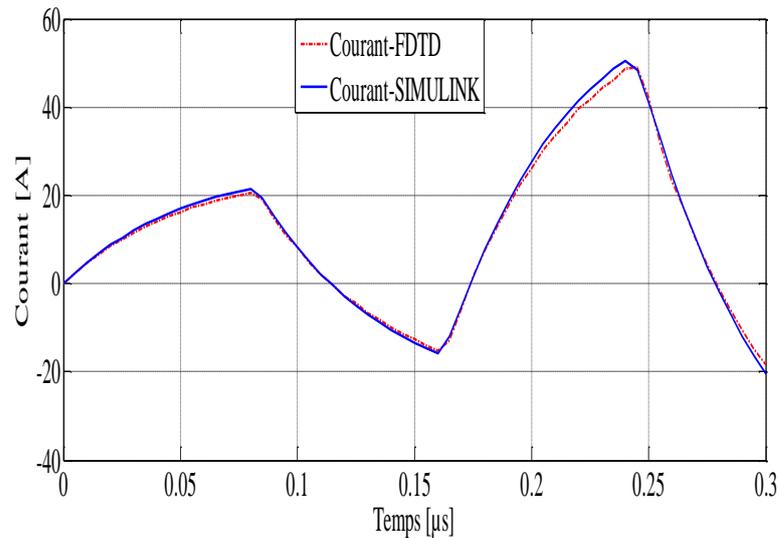


Figure III.8. Courant dans le conducteur vertical (branche 1).

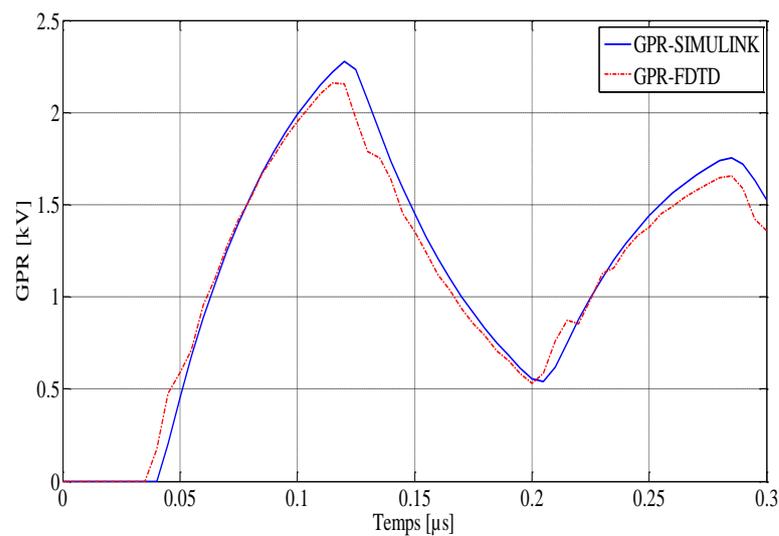


Figure III.9. GPR.

Nous remarquons une très bonne concordance entre nos résultats issues pour simulation (système $[A].[X]=[B]$). Et le logiciel SIMULINK qui basé sur la résolution de l'équation matricielle nodale (modèle de H .W Donnel) .

III. Cas d'une tige simple

Nous examinons dans cette partie le cas d'une simple tige verticale de 60 m de hauteur qui est reliée à un piquet de terre de 10 m, la configuration géométrique et les paramètres du sol sont illustrées dans la figure III.10.

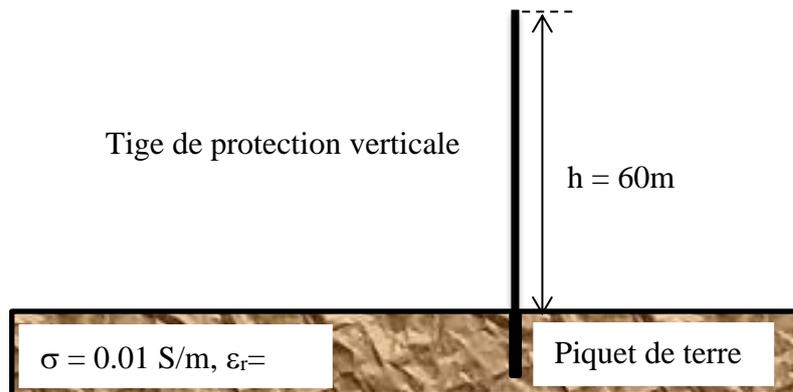


Figure III.10. Tige de protection verticale.

III.1. Effet de la résistivité du sol

La figure III.11 montre le GPR de la tige pour trois valeurs différentes de la résistivité du sol ($\rho_{\text{sol}} = 100\ \Omega\cdot\text{m}$, $500\ \Omega\cdot\text{m}$ et $1000\ \Omega\cdot\text{m}$) :

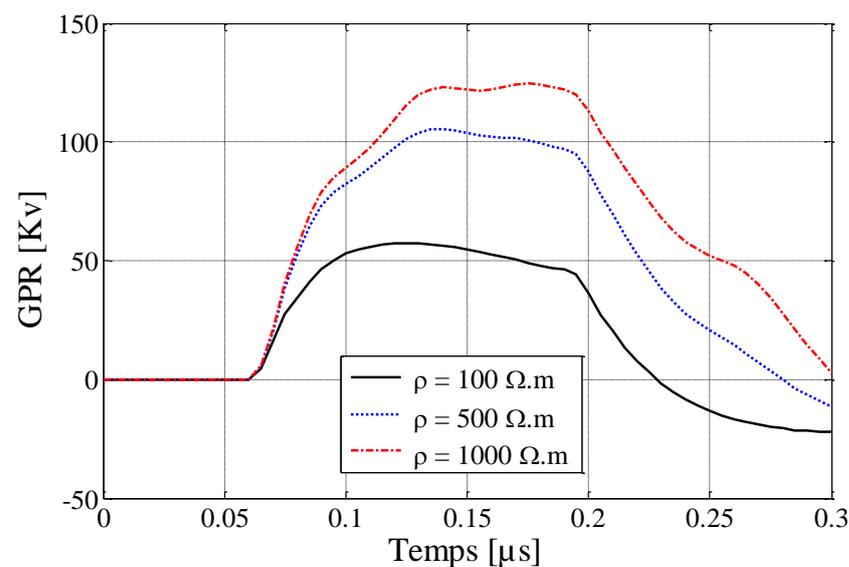


Figure III.11. GPR dans la tige pour trois valeurs différentes de la résistivité ρ_{sol} .

Nous remarquons que cette dernière (la conductivité du sol) joue un rôle important dans le GPR et l'écoulement des courants. En effet, une bonne conductivité du sol améliore l'évacuation des courants de foudre.

III.2. Effet de la taille de piquet de terre

Nous nous intéressons dans cette application à l'effet de la taille de piquet de terre verticale, nous proposons trois valeurs de la taille de piquet ($h = 2, 5$ et 10m), la figure III.12 illustre la variation du GPR pour différentes tailles du piquet de terre.

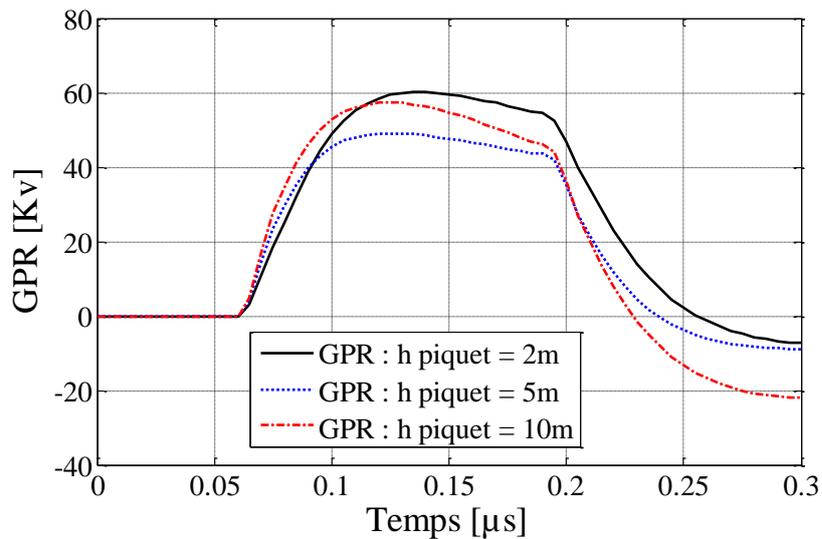


Figure III.12. GPR dans la tige pour différentes valeurs de la taille de piquet.

Nous remarquons en Figure III.12. Que la qualité de cuivre (longueur) a un effet certain sur le GPR. Une longueur plus importante donne des meilleures performances.

III.3. Effet de front d'onde

Dans cette application nous nous intéressons à l'effet du front d'onde (temps de montée de signal injecté) en figure III.13, nous proposons trois valeurs du Temps de montée ($t_m = 0,2, 0,5$ et $1 \mu\text{s}$), la figure III.13 illustre la variation du GPR pour différentes valeurs de temps de montée.

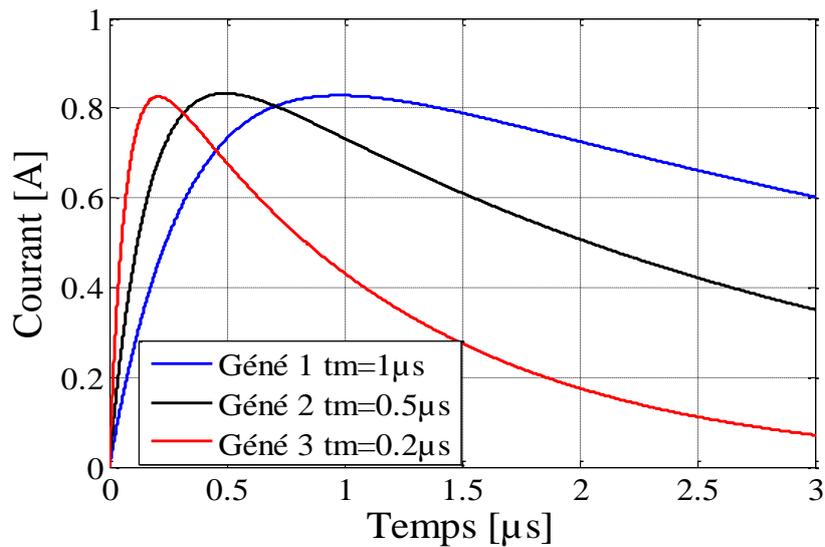


Figure III.13. Signaux injectés ($t_m = 0.2, 0.5$ et $1 \mu s$).

Les résultats en figure III.14 montrent la variation du GPR en fonction de temps de montée des courants injecté, en effet un signal plus rapide est plus riches en hautes fréquences et inversement, cependant, notre modélisation par FDTD ne permet pas de bien cerner le phénomène car nous travaillons avec des paramètres constants.

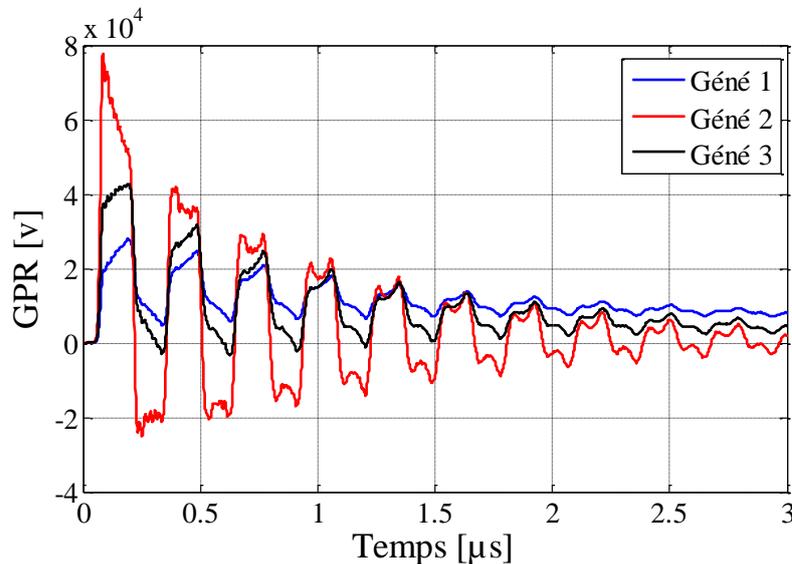


Figure III.14. GPR pour différents signaux injectés ($t_m = 0.2, 0.5$ et $1 \mu s$).

IV. Cas d'une cage de protection

Dans cette application nous intéressons à la simulation d'une cage de protection 3D (figure III.15), cette configuration est généralement utilisée pour la protection externe des

installations électriques et des bâtiments de contrôle/commande du réseaux électriques ou autres :

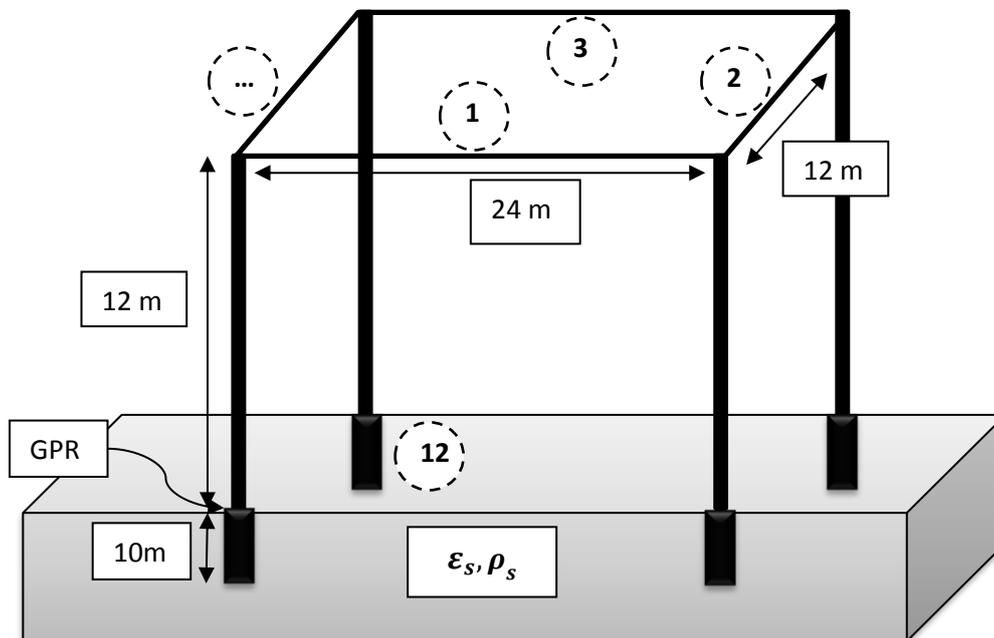


Figure III.15. Cage de protection 3D.

IV.1. Effet de la résistivité du sol

La figure III.16 présente une étude paramétrique sur le GPR en temporel qui porte sur la variation de la résistivité du sol ($\rho_{sol} = 100 \Omega.m, 500 \Omega.m$ et $1000 \Omega.m$), le point de calcul du GPR est indiqué sur la figure III.16 :

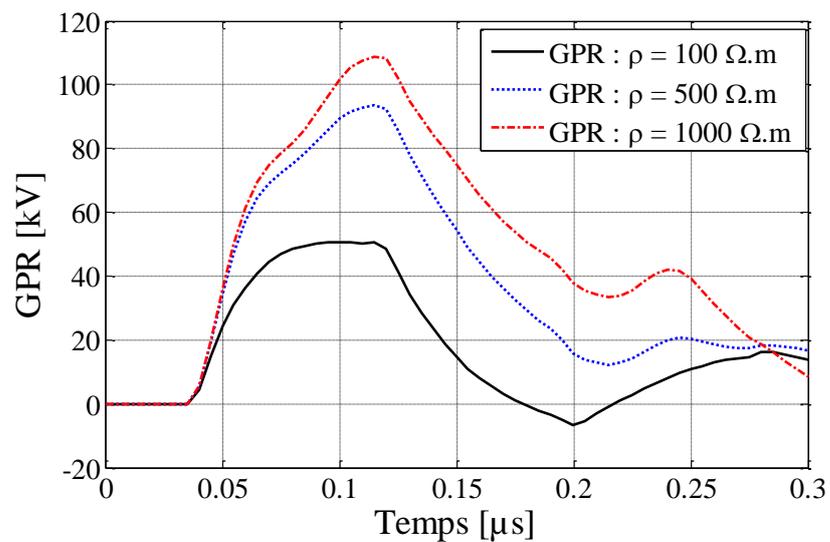


Figure III.16. GPR pour trois valeurs différentes de la résistivité ρ_{sol} .

Les résultats en figure III.16 confirment bien les prévisions théoriques, en effet plus la résistivité est élevée plus le GPR est plus important, le retard à la propagation est bien présent et conforte la validité de notre résultat.

IV.2. Effet de la taille des piquets de terre

Nous nous intéressons dans cette application à la taille du piquet de terre (quantité de cuivre) en bas des descentes de la cage (figure III.15) :

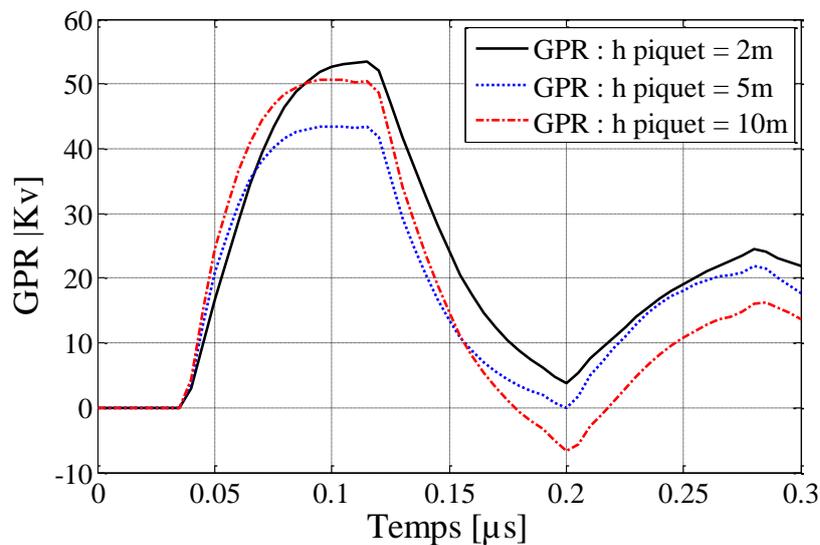
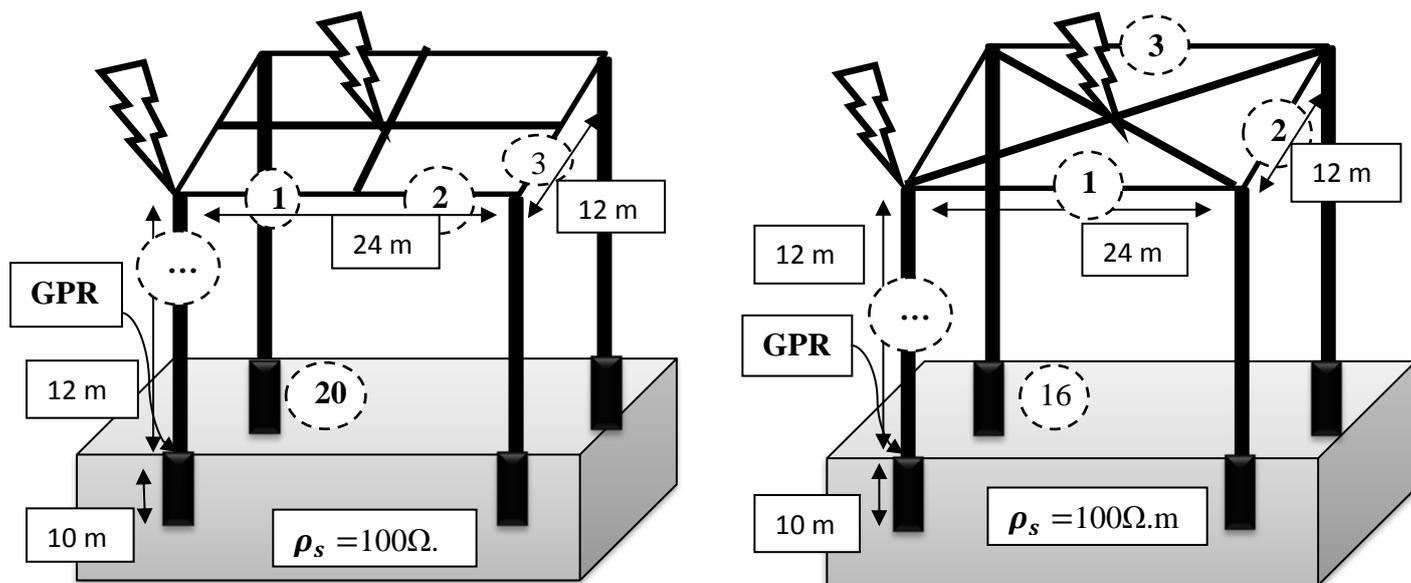


Figure III.17. GPR pour différentes tailles de piquet de terre.

Nous remarquons en Figure III.17. Que la quantité de cuivre (longueur) a un effet certain sur le GPR. Une longueur plus importante donne de meilleures performances.

IV.3. Effet de la configuration de la cage

Afin de compléter nos applications, nous proposons une étude sur la configuration de la cage (figure III.18) tout en gardant pratiquement la même quantité de la matière (longueur totale des barres horizontales et verticales de la cage).



Configuration (a)

Configuration (b)

Figure III.18. Configurations des cages de protection.

IV.3.1. Injection a la corne de la cage

Les résultats en figure III.19 illustrent le GPR pour les deux configurations de la cage :

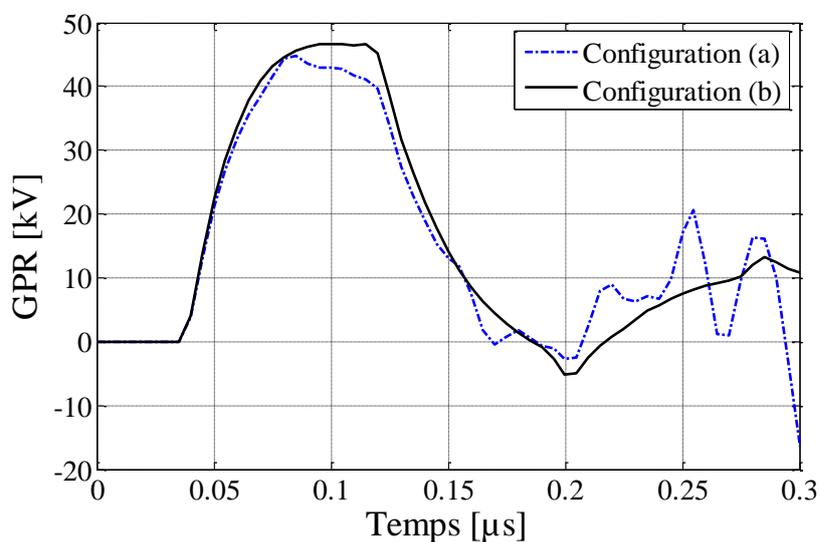


Figure III.19. GPR pour les deux configurations.

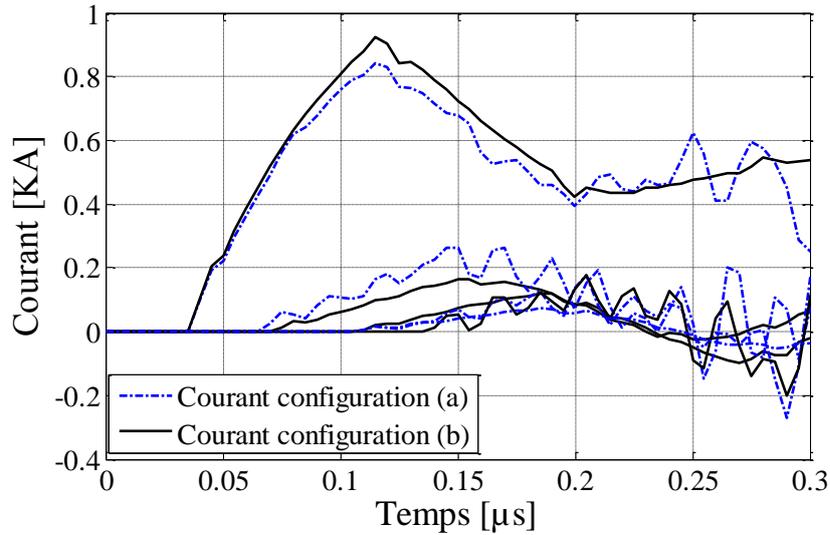


Figure III.20. Courants aux barres de descentes de la cage.

La figures III.19 et III.20 illustrent le GPR et les courants pour les deux configurations de la cage sachant que nous avons gardé pratiquement la même longueur totale des barres, le point d'injection se trouve sur la corne de la cage comme illustré en figure III.18. Nous notons bien que la disposition géométrique des barres dans la cage influe sur la circulation des courants en offrant des chemins plus ou moins faciles (nombres des barres aux points des interconnexions), cela peut constituer une première étape pour l'optimisation de la cage de protection.

IV.3.2. Injection au milieu de la cage

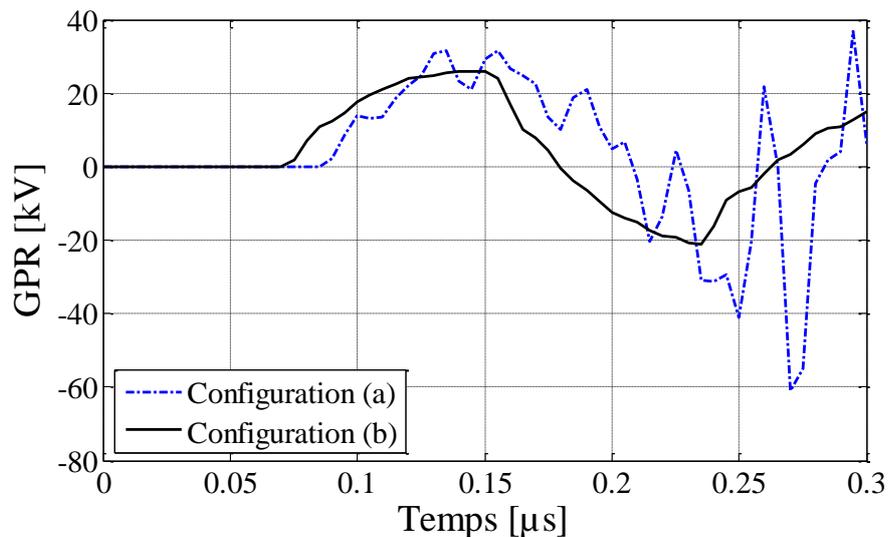


Figure III.21. GPR pour une injection au milieu de la cage.

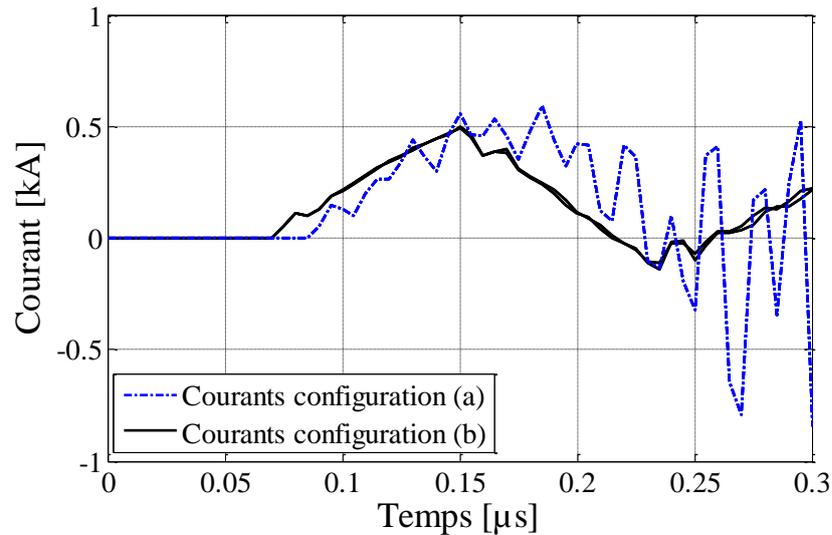


Figure III.23. Courants pour une injection au milieu de la cage.

Les résultats en figures III.22 et III.23 illustrent la variation du GPR et des courants dans les descentes de la cage respectivement, sachant que dans cette application nous avons injecté le courant de foudre dans le milieu de la cage ce qui est visible sur le retard à la propagation des signaux, cependant l'effet de la configuration est toujours présent aussi bien sur le GPR et les courants. Nous signalons que la configuration (b) avec des barres en diagonales produit un meilleur comportement des courants (moins de réflexions) ce qui est généralement favorable pour une telle protection.

Références chapitre 3

[III.1] **A. AMETANI et al**, « Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model », in Pro. Inst. Elect. Eng., Gen. Transm. Dist., Vol. 141, No. 4, pp. 339-345, 1994.

[III.2] **A. AMETANI and A. ISHIHARA**, « Investigation of impedance and line parameters of a finite length multiconductor system », Electrical Engineering in Japan, Vol. 114, No. 4, pp. 83-93, 1994.

Conclusion générale

Conclusion Générale

La foudre, en tant que phénomène naturel très puissant, transitoire et imprévisible, constitue un réel et non négligeable danger pour les réseaux et ses infrastructures. En effet, la foudre peut atteindre le réseau électrique directement par coup de foudre direct ce qui se manifeste par un très puissant générateur de courant qui s'injecte directement sur les câbles de garde et même avec le réseau, ce qui peut provoquer des incendies, des destructions structurelles, des défaillances d'équipements voir l'interruptions de service, posant ainsi des risques considérables tant sur le plan matériel que sur le plan humain. Face à ces dangers, la protection des réseaux et ses installations contre les coups de foudre directs est devenue une nécessité incontournable.

Les systèmes de protection contre la foudre ont pour objectif de prévenir ou de minimiser les dommages causés par les coups de foudre en canalisant la perturbation électrique vers la terre de manière sûre et contrôlée. Cette protection repose sur plusieurs dispositifs et techniques, tels que les paratonnerres, les conducteurs de descente, les prises de terre et les parasurtenseurs, chacun jouant un rôle crucial dans la dissipation de l'énergie de la foudre et la protection des infrastructures.

La protection des installations électriques contre l'impact direct de la foudre repose sur une combinaison de technologies de protection externe, de mise à la terre, de dispositifs de protection contre les surtensions, et de bonnes pratiques de conception et de maintenance. En respectant les normes en vigueur et en adoptant une approche préventive, il est possible de minimiser les risques et d'assurer la continuité et la sécurité des installations électriques.

Dans notre travail de fin d'études nous avons examiné l'étude d'un impact direct de foudre sur un système de protection externe (tige de protection ou cage de sa prise de terre), en premier lieu nous avons confirmé qu'une simple protection par tige peut constituer une protection efficace toute en choisissons les paramètres optimales (type de prise de terre, dimensionnement et emplacement de tige sont des paramètre a choisir avec précautions. Les différents modèles des configurations des cages électriques utilisés donnent des résultats en bonne concordance avec ceux basés sur les logiciels de simulation (SIMULINK) sachant que notre modélisation est relativement complexe et plus rigoureuse par le formalisme topologique $[A][X]=[B]$. cela confirme que la théorie des lignes de transmission constitue une solution bien adapté a ce type de problèmes a structures filiforme, la résistivité du sol et la configuration de la prise de terre sont des paramètres qu'on peut pas les exclure lors d'une étude et réalisation d'un tel système de protection.

Notre travail de fin d'études nécessite certainement plus de perfectionnement et d'enrichissement à l'avenir, ce qui ouvre les chemins pour beaucoup de perspectives. La prise en compte de la variation des paramètres du sol avec la fréquence est certainement le premier chemin à suivre, d'autres configurations des cages avec leurs prises de terre plus ou moins complexes peuvent être aussi des pistes prometteuses.

Résumé

L'objectif des systèmes de protection contre la foudre des installations électriques est de dissiper les courants de foudre vers la terre avec le moins d'impact possible sur l'équipement, le matériel, les installations et les personnes à l'intérieur du bâtiment. Ce mémoire de fin d'étude de master, elle faire une étude porte sur le thème : « protection des bâtiments contre l'impact direct des coups de foudre ». A travers cette étude, nous sommes parvenus à connaître, quelques généralités introductives sur le réseau de transport d'énergie électrique ainsi qu'une brève présentation sur le phénomène de foudre et ses caractéristiques, en suite la modélisation des ligne électrique par le calcul de paramétré linéique d'une ligne et la modélisation de la réponse temporelle d'un réseau électrique par FDTD, afin nous avons analysé l'impact direct de la foudre sur un système de protection externe, tel qu'une tige de protection ou une cage de prise de terre. Nous avons d'abord vérifié qu'une simple tige de protection. Les différents modèles de configurations de cages électriques testés montrent des résultats cohérents avec ceux obtenus via des logiciels de simulation (SIMULINK), malgré la complexité et la rigueur de notre modélisation topologique $[A][X]=[B]$. Cette étude confirme que la théorie des lignes de transmission est bien adaptée à ce type de problèmes structuraux filiformes. De plus, la résistivité du sol et la configuration de la prise de terre sont des facteurs cruciaux à considérer dans l'étude et la mise en place d'un tel système de protection.

Mots clé: Foudre, Réseaux électriques, installations électriques, FDTD, lignes de transmission.

Abstract

The aim of lightning protection systems for electrical installations is to dissipate lightning currents to earth with the least possible impact on equipment, material, installations and people inside the building. In this Master's thesis, we are carrying out a study on the theme of “protecting buildings against the direct impact of lightning strikes”. Through this study, we managed to get to know, some introductory generalities on the electrical power transmission network as well as a brief presentation on the lightning phenomenon and its characteristics, then the modeling of power lines by calculating the linear parameter of a line and the modeling of the temporal response of a power network by FDTD, then we analyzed the direct impact of lightning on an external protection system, such as a protection rod or an earth cage. We first verified that a simple protection rod. The various models of electrical cage configurations tested show results consistent with those obtained via simulation software (SIMULINK), despite the complexity and rigor of our topological modeling $[A][X]=[B]$. This study confirms that transmission line theory is well suited to this type of filiform structural problem. In addition, soil resistivity and grounding configuration are crucial factors to be considered in the design and implementation of such a protection system.

Key words: Lightning, electrical networks, electrical installations, FDTD, transmission lines.

ملخص

إن الهدف من أنظمة الحماية من الصواعق للمنشآت الكهربائية هو تبديد تيارات الصواعق إلى الأرض بأقل تأثير ممكن على المعدات والمنشآت والأشخاص داخل المبنى. رسالة الماجستير هذه عبارة عن دراسة حول موضوع "حماية المباني من التأثير المباشر للصواعق". وقد تمكنا من خلال هذه الدراسة من معرفة بعض العموميات التمهيدية حول شبكة نقل الطاقة الكهربائية، بالإضافة إلى عرض موجز لظاهرة الصواعق وخصائصها، ثم قمنا بنمذجة الخطوط الكهربائية من خلال حساب المعلمات الخطية للخط ونمذجة الاستجابة الزمنية للشبكة الكهربائية بواسطة FDTD، وذلك لتحليل التأثير المباشر للصواعق على نظام حماية خارجي مثل قضيب الحماية أو قفص التأسيس. قمنا أولاً بفحص قضيب حماية بسيط. تُظهر النماذج المختلفة لتكوينات الأقفاس الكهربائية التي تم اختبارها نتائج متسقة مع تلك التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج المحاكاة (SIMULINK)، على الرغم من تعقيد ودقة النمذجة الطوبولوجية $[A][X]=[B]$. تؤكد هذه الدراسة أن نظرية خط النقل مناسبة تماماً لهذا النوع من المشاكل الهيكلية الخطية. بالإضافة إلى ذلك، تعتبر مقاومة التربة وتكوين نظام التأسيس من العوامل الحاسمة التي يجب مراعاتها في تصميم وتنفيذ نظام الحماية هذا.

الكلمات المفتاحية: البرق، الشبكات الكهربائية، التركيبات الكهربائية، خطوط النقل، FDTD.