

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	III
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS.....	XIV
CHAPITRE I.....	1
INTRODUCTION	1
1.1 Contexte et problématique	2
1.2 Objectifs	3
1.3 Méthodologie et démarche scientifique	4
CHAPITRE 2	6
GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉCANISMES D'AGRESSION DE LA FOUDRE ET LES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE	6
2.1 Introduction.....	6
2.2 Phénoménologie de la décharge atmosphérique	6
2.2.1 La formation des nuages orageux.....	6
2.2.2 L'électrification et la répartition des charges électriques au sein d'un nuage..	7
2.2.3 La foudre et les éclaires.....	9
2.3 Classification des coups de foudre.....	10
2.3.1 La formation de la décharge négative nuage - sol.....	11
2.3.2 Traceur par bond	12

2.3.3 Le processus d'attachement.....	12
2.3.4 L'arc en retour	13
2.4 Principales caractéristiques des foudres	14
2.4.1 Forme d'onde	14
2.4.2 Amplitude des coups de foudre	14
2.4.3 Raideur de front.....	15
2.5 Conséquence de la décharge atmosphérique.....	16
2.5.1 Foudroiement direct d'une ligne (sur conducteurs de phase).....	16
2.5.2 Foudroiement indirect d'une ligne (sur conducteurs de garde ou pylône).....	18
2.5.3 La distribution du courant de foudre le long de la structure.....	19
2.6 Effets dus à la foudre.....	23
2.7 Les systèmes de mise à la terre (systèmes de MALT).....	24
2.7.1 Définition d'un réseau de terre	24
2.7.2 Composantes du système de mise à la terre	25
2.8 Rôle des systèmes de MALT	26
2.8.1 Sécurité des personnes et des animaux (Tension de contact et tension de pas)	26
2.8.1.1 La tension de pas.....	27
2.8.1.2 Tension de toucher (ou de contact).....	28
2.9 Protection des installations de puissance	29
2.9.1 Protection des équipements sensibles.....	30
2.9.2 Maintien d'un potentiel de référence.....	30
2.10 Conclusion	30

CHAPITRE 3	31
FACTEURS INFLUENÇANT LE COMPORTEMENT DES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE	31
3.1 Introduction	31
3.2 Environnement des prises de terre	32
3.2.1 Nature des sols.....	32
3.2.1.1 La résistivité.....	32
3.2.1.2 Permittivité.....	33
3.2.1.3 Perméabilité	33
3.2.2 L'inductance des systèmes de MALT	34
3.2.3 La capacité et la conductance	34
3.3 Le phénomène de décharge dans le sol (le phénomène d'ionisation).....	35
3.4 Évaluation du seuil d'ionisation (E_{crit}).....	37
3.5 Résistivité de la terre et résistance de mise à la terre	37
3.6 Mesures des résistivités des sols et des résistances des mises à la terre	39
3.6.1 Mesure des résistivités des sols	39
3.6.2 Mesure de la résistance de système de mise à la terre.....	41
3.6.2.1 Méthode de chute de potentiel	41
3.6.2.2 Méthode des trois points (triangle)	42
3.7 Techniques d'amélioration de la résistance du sol.....	44
3.8 Comportement typique d'une mise à la terre	48
3.9 Conclusion	51

CHAPITRE 4	52
MODELES ET MODÉLISATION DES SYSTÈMES DE MALT SOUMIS A UNE DÉCHARGE ATMOSPHERIQUE (FOUDRE)	52
4.1 Introduction	52
4.2 Les différentes configurations des systèmes de MALT	52
4.3 Les méthodes analytiques et empiriques dans la modélisation des câbles de mise à la terre	53
4.4 Méthodes numériques dans la modélisation des systèmes de mise à la terre	57
4.4.1 Méthode des circuits équivalents.....	57
4.4.2 La théorie des lignes de transmission (TLT).....	60
4.4.3 Modèle électromagnétique d'une mise à la terre.....	63
4.4.3.1 Théorie des antennes.....	63
4.4.3.2 Résolution numérique de l'équation intégrale	64
4.4.3.3 Méthode des moments	65
4.5 Modélisation des systèmes de MALT en utilisant la méthode des circuits équivalents sous Matlab SIMULINK (SimPowersystems)	65
4.5.1 Paramètres de modélisation d'une MALT	66
4.5.2 Modélisation de la source (courant de foudre).....	70
4.6 Modélisation de l'influence de l'ionisation du sol.....	75
4.7 Conclusion	77
CHAPITRE 5	78
LES RÉSULTATS DES SIMULATIONS ET LES CALCULS D'IONISATION RÉALISÉS	78

5.1 Introduction.....	78
5.2 Comportement transitoire des électrodes horizontales et verticales et validation du modèle	78
5.3 Grille de mise à la terre	83
5.3.1 Grille de mise à la terre 1 * 1	83
5.3.2 Grille de mise à la terre 2 * 2	85
5.3.3 Grille de mise à la terre 3 * 3	87
5.4 Comparaison entre la réponse des trois grilles.....	88
5.5 Effet du point d'injection	90
5.6 Calcul de l'influence de l'ionisation du sol	91
5.7 L'évaluation en 3D du potentiel d'un réseau de terre	97
5.8 Conclusion	101
CONCLUSION GÉNÉRALE	103
RECOMMANDATION	104
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	105
ANNEXES	111
Annexe 1 Blocs des simulations	111
Annexe 2 Calculs analytiques des résistances de terre	115

LISTE DES FIGURES

Figure 1- 1 : Claquages diélectriques.....	3
Figure 2- 1 : Représentation des flux d'air entraînant un épisode orageux (meteo-world.com)	7
Figure 2- 2: Distribution des charges électriques dans la masse d'un cumulo- nimbus (Chasseurs-orages.com)	8
Figure 2- 3 : L'éclair	9
Figure 2- 4 : Classification des coups de foudre	11
Figure 2- 5 : Processus de déclenchement d'un éclair descendant négatif	12
Figure 2- 6 : L'effet couronne	13
Figure 2- 7 : Évolution du courant à la base de canal de foudre [4]	14
Figure 2- 8 : Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, selon IEEE.....	15
Figure 2- 9 : Distribution statistique expérimentale, en raideur de front des courants de foudre, positifs et négatifs, suivant IEEE	16
Figure 2-10 : Chute de la foudre sur un conducteur de phase.....	18
Figure 2-11 : Chute de la foudre sur un câble de garde	19
Figure 2-12 : Tour électrique et sa représentation équivalente	20
Figure 2-13 : Décharge électrique au sommet d'un pylône d'une ligne aérienne	21
Figure 2-14 : Composantes d'électrodes de mise à la terre	25
Figure 2-15 : La tension de pas	27
Figure 2-16 : Tension de pas en fonction de la distance	28
Figure 2-17 : Tension de toucher	29
Figure 3- 1 : Profils de résistivité en modèle de résistance dynamique [16].....	36
Figure 3- 2 : Modèle simplifié de la résistance d'une électrode enterrée [16].....	36
Figure 3- 3 : Schéma de mesure de la méthode de quatre électrodes	39
Figure 3- 4 : Sol en deux couches de résistivités différentes	40

Figure 3- 5 : Méthode de chute de potentiel	42
Figure 3- 6 : Méthode des trois points	43
Figure 3- 7 : Méthode de chute de tension utilisant des sondes capacitives	43
Figure 3- 8 : Méthode de mesure sans électrodes auxiliaires.....	44
Figure 3- 9 : Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode	45
Figure 3-10 : Caractéristiques $R=f(l)$ sans et avec la couche de bentonite	46
Figure 3-11 : Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité [28]	47
Figure 3-12 : Prise de terre avec trous profonds [30].....	48
Figure 3-13 : Modélisation d'un piquet de terre écouant un courant transitoire.....	49
Figure 3-14 : Courant, tension et l'impédance transitoire le long de la mise à la terre	50
Figure 4- 1 : Configuration des structures de mise à la terre courantes.....	53
Figure 4- 2 : Combinaison grille et électrodes verticales.....	53
Figure 4- 3 : A-Circuit équivalent d'une maille carrée de la grille, B-circuit équivalent d'un côté de la maille	58
Figure 4- 4 : Circuit équivalent du système de mise à la terre [42]	59
Figure 4- 5 : Modèle des lignes de transmission.....	60
Figure 4- 6 : Ligne de transmission	66
Figure 4- 7 : a) Grille de mise à la terre avec une maille avec les trois modèles de l'élément (kl) ; b) modèle en T; c) modèle de Γ ; d) modèle en Π	67
Figure 4- 8 : Modèle du circuit RLC.....	68
Figure 4- 9 : L'allure d'un courant de foudre bi-exponentiel	72
Figure 4-10 : Courant de Heidler	74
Figure 4-11 : Profil du rayon de l'électrode dans la région ionisée.....	76
Figure 5- 1 : Électrode de mise à la terre horizontale enterrée dans le sol.....	79
Figure 5- 2 : Électrode verticale enterrée dans le sol.....	79
Figure 5- 3 : Modèle RLC pour l'électrode horizontale sous Matlab SIMULINK ...	80
Figure 5- 4 : Forme d'onde de courant au point d'injection	80
Figure 5- 5 : La tension transitoire a deux résistivités différentes au point	

d'injection A, modèle proposé	81
Figure 5- 6 : La tension transitoire a deux résistivités différentes au point d'injection A, modèle analytique	81
Figure 5- 7 : Comparaison des deux modèles analytique et proposé	82
Figure 5- 8 : Grille 1 * 1 enterré dans le sol.....	83
Figure 5- 9 : Circuit d'une maille carré de la grille sous Matlab Simulink	84
Figure 5-10 : Tension transitoire au point d'injection A, avec des résistivités différentes.....	84
Figure 5-11 : Impédance transitoire au point A, avec des résistivités différentes	85
Figure 5-12 : Grille 2 * 2 enterré dans le sol.....	85
Figure 5-13 : Tension transitoire au point d'injection A, avec quatre résistivités différentes	86
Figure 5-14 : L'impédance transitoire au point d'injection A, avec différentes résistivités	86
Figure 5-15 : Grille 3 * 3 enfouis dans le sol.....	87
Figure 5-16 : Tension transitoire au point A, avec différentes résistivités	87
Figure 5-17 : Impédance transitoire au point A, avec différentes résistivités.....	88
Figure 5-18 : La tension transitoire de chaque grille	89
Figure 5-19 : L'impédance transitoire de chaque grille.....	89
Figure 5-20 : Courant injecté dans différents sites de la grille	90
Figure 5-21 : Impédance transitoire dans différents points d'injection	90
Figure 5-22 : Grille à une seule maille.....	91
Figure 5-23 : Grille de mise à la terre, le circuit équivaut d'une maille carrée de la grille, modélisée dans Simulink, en utilisant le modèle en T.....	92
Figure 5-24 : Impédance transitoire en fonction de la résistivité du sol et l'amplitude du courant de foudre, $\rho = 300\Omega\text{m}$, modèle avec ou sans l'ionisation du sol	93

Figure 5-25 : L'impédance transitoire en fonction de la résistivité du sol et l'amplitude du courant de foudre, $\rho = 1000\Omega\text{m}$, modèle avec ou sans ionisation du sol	93
Figure 5-26 : Grille de mise à la terre	97
Figure 5-27 : Le potentiel transitoire à quatre points différents de la grille avec une injection du courant de foudre au point A.....	98
Figure 5-28 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=0.5\mu\text{s}$ avec une injection du courant au point A	98
Figure 5-29 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=2\mu\text{s}$ avec une injection de courant au point A.	99
Figure 5-30 : Le potentiel transitoire à quatre points différents de la grille avec une injection du courant de foudre au point D (milieu de la grille)....	100
Figure 5-31 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=0.5\mu\text{s}$ avec une injection de courant au point D	100
Figure 5-32 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=2\mu\text{s}$ avec une injection de courant au point D	101

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3- 1 : Résistivités des différents types de sols.....	38
Tableau 4- 1 : Paramètres du courant à la base du canal (fonction de Heidler).....	73
Tableau 5- 1 : Données d'une électrode horizontale et verticale.....	79
Tableau 5- 2 : La valeur maximale du courant de drainage des éléments individuels (chaque segment) et le rayon équivalent	94
Tableau 5- 3 : Les résultats du calcul des valeurs du rayon équivalent	95
Tableau 5- 4 : La valeur maximale de l'intensité du champ électrique sur la surface de la grille de MALT.....	96

LISTES DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

Alphabet latin

Symbole	Grandeur physique	Unité
E^s	Le champ électrique le long de la surface du conducteur	V/m
l_{eq}	La longueur effective d'électrode de terre	m
r	Le rayon de l'électrode	m
r_m	Le rayon de la matière autour de l'électrode	m
l	La longueur de l'électrode	m
l_u	Longueur totale de la mise à la terre	m
h	Profondeur d'enfouissement de l'électrode dans le sol	m
h_1	La profondeur de la couche supérieure	m
S	Section du conducteur	mm ²
t	La durée d'écoulement	s
Z_0	L'impédance de propagation	Ω
K	Coefficient de réflexion	-
Z_s	L'impédance interne de l'électrode	Ω/m
Z_{in}	L'impédance d'entrée	Ω
Z_0	L'impédance de propagation	Ω
Z_{zk}	L'impédance série interne du segment k	Ω
V_i	Potentiels des segments i	V

V_k	Potentiels des segments k	V
Y_i	L'admittance par unité de longueur	(A.V ⁻¹ /m)
E_{crit}	L'intensité du champ critique	V/m
A	Le vecteur potentiel magnétique	-
W	Le potentiel scalaire	V
U_p	Tension de pas	V
U_a	Tension d'amorçage	V
u_c	Tension critique	V
i_c	Courant critique	A
K_1	Le coefficient de propagation dans le sol	-
$\vec{E}$	Le vecteur potentiel du champ électrique	Hertz
I_c	Le courant critique	A
I_{max}	La valeur maximale du courant	A
I_{mi}	La valeur maximale du courant de drainage	A
J	Densité de courant	A.m ⁻²
R'	La résistance interne linéique de l'électrode	Ω/m
R	Résistance de mise à la terre	Ω
R_c	La résistance de choc	Ω
G	Conductance de mise à la terre	Ω ⁻¹
C	La capacité d'une électrode	F
L	L'inductance d'une électrode	H
G_i	Conductance élémentaire	Ω ⁻¹ /m
C_i	Capacité élémentaire	F/m
L_s	L'inductance élémentaire	H/m

I_0	L'amplitude du courant du canal de base	A
n	Un exposant variant entre 2 et 10	-
h	La profondeur d'enfouissement	m

Alphabet grec

Symbole	Grandeur physique	Unité
Γ	La constante de propagation	-
Π	Le vecteur potentiel de Hertz	-
ϵ_{eff}	La permittivité complexe	F/m
ϵ_r	La permittivité relative	F/m
σ	La conductivité du sol	S/m
f	La fréquence de fonctionnement	Hz
ω	La pulsation de l'onde	Hz
τ_1	La constante de temps de montée	s
τ_2	La constante de temps de descente	s
η	Le facteur de correction de l'amplitude de l'onde	-
μ	La perméabilité magnétique	H/m
τ_C	Constante de temps capacitive	s
τ_L	Constante de temps inductive	s
λ	La longueur d'onde dans le sol	C/m
ρ_m	La résistivité de la matière	$\Omega.m$
ρ_s	La résistivité du sol	$\Omega.m$
ρ_s	Résistivité de couche supérieure	$\Omega.m$

ρ_2	La résistivité de la couche profonde du sol	$\Omega.m$
α, β	Nombres constants	s^{-1}
β_s	Le facteur de réflexion	-

Abréviation

E	Électrode de terre
E1	Électrode auxiliaire 1
E2	Électrode auxiliaire 2
MALT	Mise à la terre
FDTD	Méthode de Calcul de Différences Finies

CHAPITRE I

INTRODUCTION

De part son étendu, le réseau de transport d'énergie reste parmi les cibles privilégiées de l'onde de foudre.

L'onde de foudre, qui est un phénomène naturel peut se présenter avec des intensités de courant pouvant atteindre la centaine de KA. Un impact direct sur un réseau de transport peut engendrer de forts dommages. En plus de l'isolation des équipements électriques propres au réseau de transport d'énergie, par propagation conduite les surintensités peuvent atteindre même les consommateurs basse tension.

Afin de se protéger contre cette perturbation extérieure, nous rencontrons dans le réseau les câbles de garde, les parasurtenseurs ainsi que les mises à la terre. Les mises à la terre des installations électriques jouent un rôle important en périodes perturbées, dans le comportement des réseaux et dans la sécurité du personnel et du public.

En très hautes fréquences, les comportements des mises à la terre sont fort différents de ceux à fréquence industrielle. Plusieurs études (théoriques et expérimentales) ont été effectuées à ce sujet, mais des zones d'ombre persistent encore à ce jour. Les hypothèses simplificatrices viennent encore s'ajouter à ces zones d'ombre et compliquent davantage la précision dans l'analyse. [1]

La décharge par la foudre (inévitables dans les régions à niveau kéraunique élevé), avec des niveaux énergétiques importants, couplés aux mauvaises caractéristiques du sol (résistivité élevée), conduit à des difficultés d'exploitation et à une mise en œuvre minutieuse des mises à la terre, faute de quoi les perturbations dans les installations électriques sont répétitives ; en plus, la sécurité du matériel et des personnes n'est plus garantie.

Dans l'intention d'écouler rapidement les énergies supplémentaires introduites lors d'un défaut, la prise de terre reste le moyen de protection le plus utilisé.

Malheureusement, le comportement de cette dernière est tributaire de plusieurs facteurs (résistivité du sol, la longueur et la géométrie de la mise à la terre, l'ionisation du sol...etc.).

1.1 Contexte et problématique

De longue date, des recherches se sont intensifiées dans le domaine des MALT des installations électriques. Ces recherches visaient, dans leur grande majorité, les comportements des systèmes de mise à la terre à fréquence industrielle et en régime établi ; de part, la résistivité du sol considérée, était généralement proche de 100 Ω -m ce qui n'est pas le cas en région tropicale, dans certains types de sol (les résistivités des terrains peuvent atteindre plusieurs milliers de Ohm-mètre).

Lors du dimensionnement des différents éléments d'un réseau, les entreprises d'électricité font recours à des outils numériques pour simuler la réponse du système à un impact de foudre, ainsi que les contraintes qui peuvent être appliquées sur l'environnement extérieur (personnes ou matériels).

La foudre est un phénomène perturbateur pour le fonctionnement de toutes les installations électriques ;

- Toute la gamme de puissance et tous les niveaux de tension sont concernés, depuis le transport d'énergie THT jusqu'aux circuits intégrés en passant par les alimentations BT et les transmissions de données.

- Elle peut être à l'origine de perturbations momentanées dans la continuité de service, donc de dégradations de la qualité des alimentations.

- Elle peut causer des destructions de matériel, et en conséquence de longues interruptions de service des installations.

- Dégradation et détérioration des systèmes de MALT, de façon brutale comme claquages diélectriques par surtension figure 1-1.

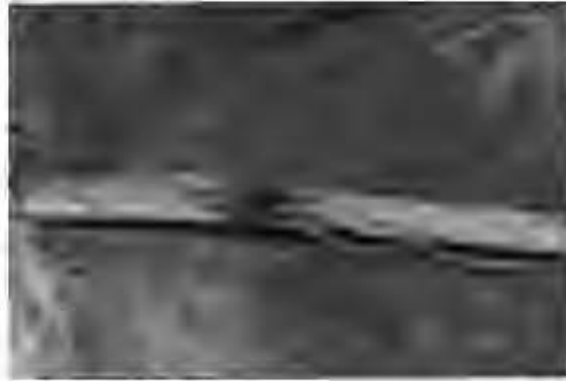


Figure 1- 1 : Claquages diélectriques

Dans cette optique, il est nécessaire de prendre en compte plus ou moins finement le comportement de tous les constituants des mises à la terre, aussi bien les caractéristiques du sol (résistivité, permittivité, ... etc.) qu'en sous-sols (systèmes de mise à la terre, câbles enterrés ...).

Le calcul des caractéristiques de mise à la terre est un problème complexe en raison du grand nombre de facteurs qui le concerne. L'influence la plus importante sur ces caractéristiques est les paramètres constructifs de la terre, les caractéristiques électriques du sol, ainsi que la forme, l'amplitude et le lieu de l'injection des impulsions de courant.

Lors de l'injection d'un courant de foudre élevé, elle peut apparaître l'ionisation de sol au tour de la mise à la terre

1.2 Objectifs

L'objectif principal de ce travail, est de contribuer en utilisant la méthode de l'approche par circuit sous la plateforme MATLAB/Simulink, pour faire l'investigation de la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre (électrodes simples et complexes)

soumise à des décharges électromagnétiques (la foudre). Ultimement, les modèles proposés devraient également être appropriés à l'étude de l'influence des différents facteurs sur la réponse transitoire des réseaux de terre. Prenant en considération l'influence du phénomène d'ionisation du sol sur le comportement transitoire des mises à la terre et évaluant les performances des mises à la terre en intégrant plusieurs cas et configurations possibles dans un sol homogène de résistivité, dans le souci de se rapprocher des réalités physiques. Des solutions concrètes pour la meilleure réalisation des mises à la terre en minimisant les différents dommages causés par la foudre seront proposées.

1.3 Méthodologie et démarche scientifique

L'élaboration de l'objectif va nous conduire à passer par une première phase de recherche bibliographique intensive, où on va présenter la phénoménologie de la décharge électrique dans le sol et le mécanisme d'agression de la foudre en général, d'autre part, la définition de la mise à la terre et les des différents éléments du réseau de terre.

Le troisième chapitre présentera et identifiera les paramètres qui peuvent influencer le comportement des systèmes de mise à la terre, en particulier la nature du sol environnant et le phénomène d'ionisation du sol.

Les travaux d'autres chercheurs dans la modélisation des systèmes de MALT, ainsi qu'une analyse et une synthèse de ces travaux seront présentés dans le chapitre quatre. Dans la seconde phase de ce dernier, on va procéder à la modélisation des systèmes de mise à la terre, en se basant sur la théorie des circuits équivalents et la ligne de transmission. La dernière phase de ce chapitre présentera la modélisation du phénomène d'ionisation du sol, et afin de pouvoir étudier le comportement transitoire des systèmes de MALT parcouru par une décharge orageuse et sa dissipation à travers un réseau de terre, on identifiera les caractéristiques du courant de foudre.

Dans le quatrième chapitre, le modèle mathématique basé sur l'approche par circuit est incorporé sous la plateforme MATLAB/Simulink (SimPowerSystems), après une comparaison et validation du modèle proposé avec le modèle analytique, on procède à l'étude du comportement transitoire des systèmes de MALT en appuyant sur l'influence des différentes géométries des grilles et les paramètres du sol, l'évaluation de la tension transitoire en chaque point d'un réseau simple et complexe et l'étude de l'influence de l'ionisation du sol.

CHAPITRE 2

GÉNÉRALITÉS SUR LES MÉCANISMES D'AGRESSION DE LA FOUDRE ET LES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE

2.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre le phénomène de la foudre et les systèmes de mise à la terre ou réseaux de terre et nous insisterons sur la nécessité de développer un modèle représentant leur comportement pour les études transitoires de la foudre.

Nous allons tout d'abord présenter un bref rappel des origines et des conséquences du phénomène de foudre, qui nous permettra ensuite d'aborder la question du comportement des systèmes de mise à la terre écoulant un courant de foudre et les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre des installations électriques à fréquence industrielle, en mettant un accent particulier sur les propriétés des sols.

2.2 Phénoménologie de la décharge atmosphérique

L'atmosphère est en permanence le siège de phénomènes électriques, du fait en particulier, du frottement et du télescopage des molécules d'eau entre elles.

2.2.1 La formation des nuages orageux

La formation des nuages orageux résulte de la rencontre entre un flux d'air anormalement froid issu de l'électrophore et un flux d'air anormalement chaud venant du sol, comme le montre la Figure 2-1.

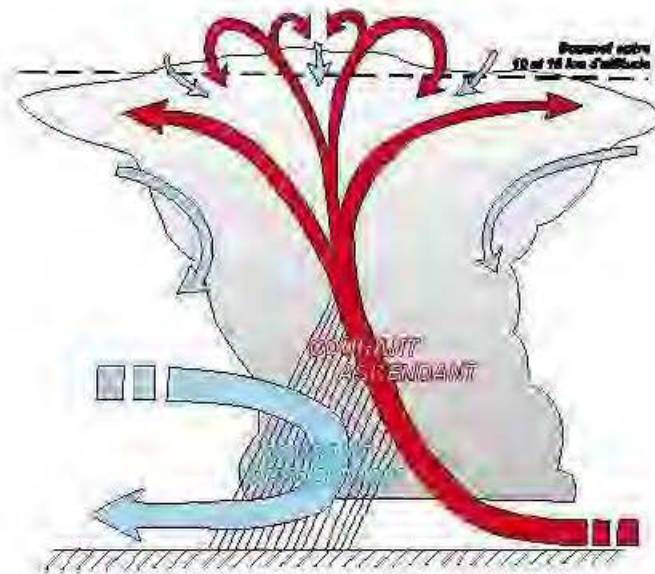


Figure 2-1 : Représentation des flux d'air entraînant un épisode orageux (meteo-world.com)

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

2.2.2 L'électrification et la répartition des charges électriques au sein d'un nuage

A l'heure actuelle, plusieurs théories fondamentales basant sur les principes fondamentaux de la gravitation ou de la convection qui expliquent la répartition des charges électriques au sein d'un nuage :

La théorie de la convection : Cette théorie considère que les ions libres dans l'atmosphère sont captés par les gouttelettes contenues dans le nuage. Les gouttelettes

ainsi chargées sont ensuite transportées par les courants convectifs dans le nuage, produisant ainsi des zones de charges.

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

Ces théories ne permettent pas d'obtenir une bonne corrélation avec les observations effectuées sur le terrain ou en laboratoire. Cependant, les scientifiques s'accordent aujourd'hui sur le fait que le haut du nuage est chargé positivement et que le bas du nuage se compose de particules négatives, mais peut aussi contenir des poches de particules positives, comme le montre la Figure 2-2

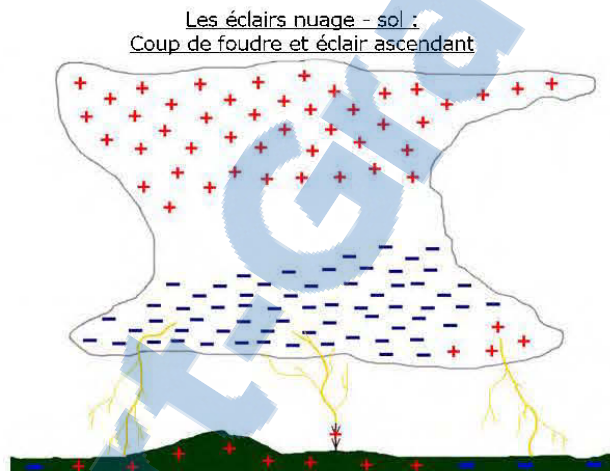


Figure 2-2: Distribution des charges électriques dans la masse d'un cumulonimbus (Chasseurs-orages.com)

Cette distribution et l'accumulation des charges au sein du nuage sont assez importantes pour créer une différence de potentiel pouvant atteindre plusieurs kilovolts. Cette dernière engendre de manière locale un champ électrique qui peut aller de 10 à 50 kV/cm. Or pour pouvoir observer une décharge électrique, le champ électrique doit dépasser la valeur critique du champ de rupture de l'air estimée à 30 kV/cm. [2, 3]

2.2.3 La foudre et les éclaires

La foudre est une décharge électrique qui chauffe l'air à plus de 30 000°C, d'une manière générale, l'origine de la foudre est un nuage orageux volumineux dont la base est chargée de façon opposée au sol.

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. Lorsque le champ électrique résultant est suffisant, une pré-décharge peu lumineuse progresse en direction du sol (coup de foudre descendant) ou du sol vers le nuage (coup de foudre ascendant). Cette pré-décharge, appelée traceur, se déplace par bonds à une vitesse variant de 2 à 4610m/s. Au moment où le traceur atteint le sol ou le nuage, un intense courant électrique s'engouffre dans le canal ionisé (c'est l'arc en retour). L'éclair est la manifestation lumineuse de la foudre, dont le tonnerre est la manifestation sonore des décharges électriques qui sont à l'origine des perturbations électromagnétiques (Figure 2-3), de nombreuses études menées par des chercheurs; ont permis de mieux comprendre le principe de déclenchement des coups de foudre.



Figure 2-3 : L'éclair

2.3 Classification des coups de foudre

Un coup de foudre, entre nuage et sol, est toujours précédé d'une première-décharge peu lumineuse (pré décharge), appelée traceur, canal ionisé, qui provoque le coup de foudre proprement dit, décharge d'arc visible de courant intense.

Les coups de foudre se distinguent selon deux critères principaux qui sont leur sens de déplacement et leur polarité (Figure 2-4) :

- La direction ascendante ou descendante du traceur.
- Le signe des charges portées à l'extrémité du traceur.

Les coups de foudre déclenchés par traceurs ascendants développent du traceur depuis le sol vers les nuages (cas de terrains montagneux), sont relativement rares. Les coups de foudre descendants positifs, développent du traceur depuis les nuages vers la terre (cas sur les terrains assez plats), représentent environ 8% de l'ensemble des décharges nuage-sol. [2, 4]

Dans les régions tempérées, 80% des coups de foudre sont de types négatifs descendants.

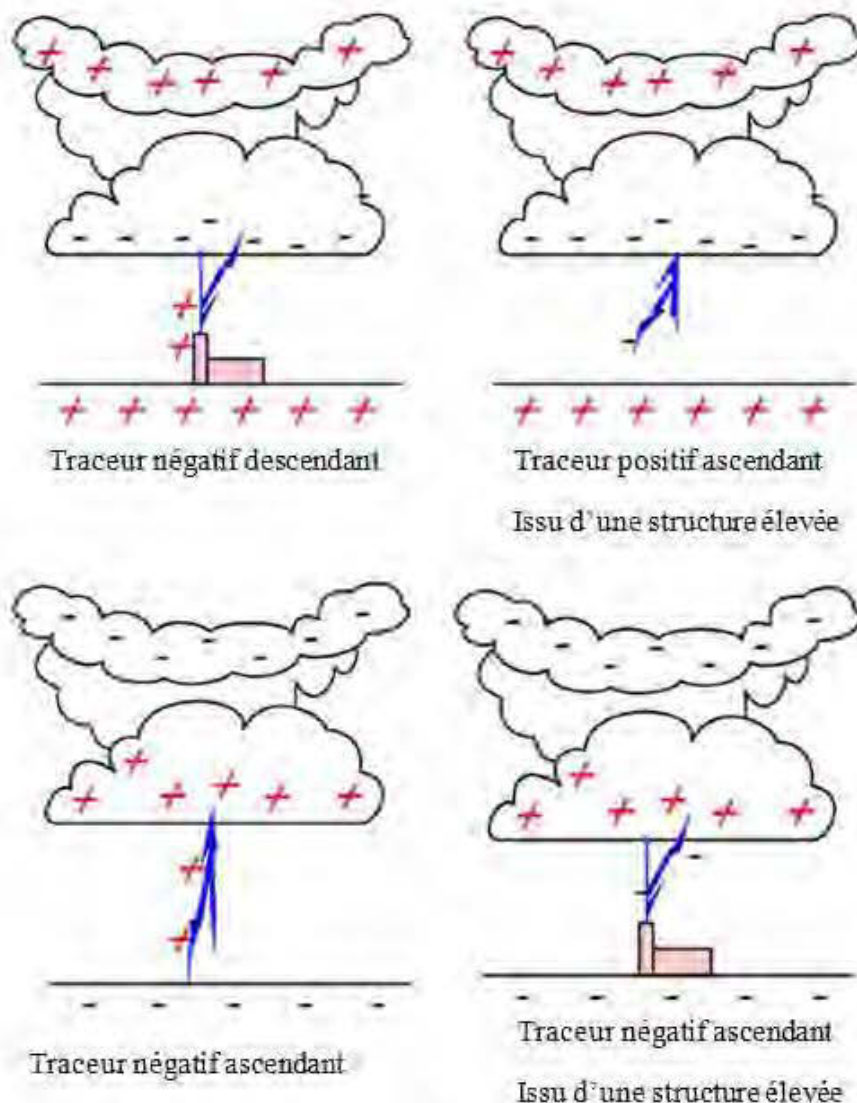


Figure 2-4 : Classification des coups de foudre

2.3.1 La formation de la décharge négative nuage - sol

Ce phénomène est connu comme un traceur par bonds. Le traceur par bonds se rend jusqu'au sol par une série de bonds d'une longueur variant approximativement entre 50 et 100 mètres chacun, en réponse à la décharge négative en provenance de la base d'un nuage, les courants de charge positive commencent à se déplacer vers le haut à partir du sol, il s'agit là des traceurs ascendants.

Le processus de la décharge négative nuage - sol peut être décomposé en plusieurs étapes, représentées sur la figure 2-5.

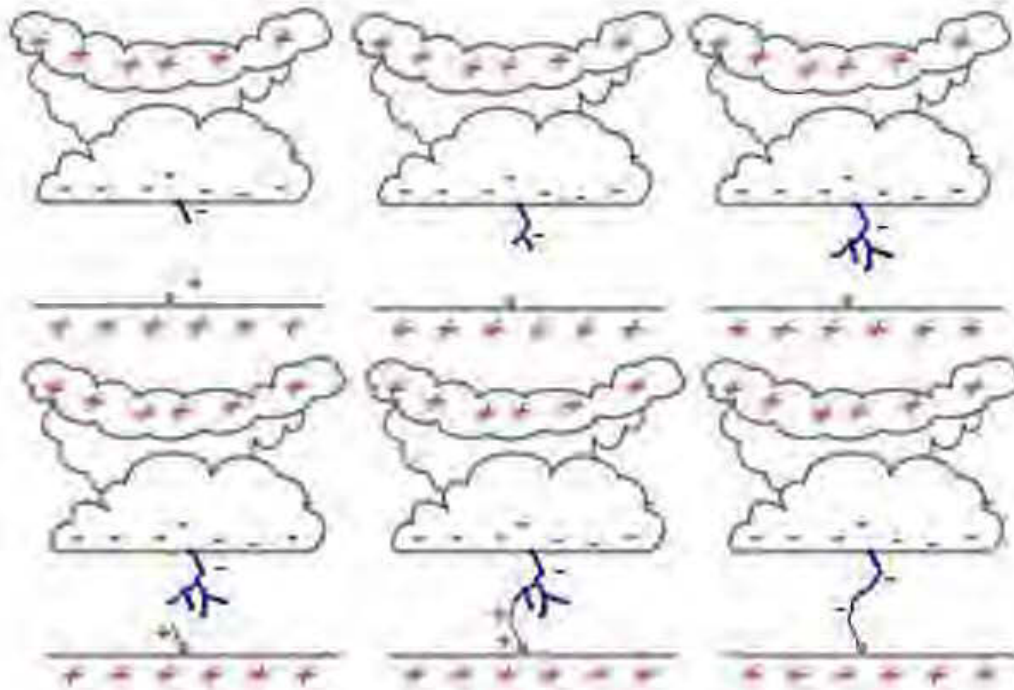


Figure 2-5 : Processus de déclenchement d'un éclair descendant négatif

2.3.2 Traceur par bond

Ce phénomène débute à l'intérieur du nuage orageux avec une première décharge, entraîne la création d'un canal chargé négativement vers le bas, appelé traceur par bonds. Le canal ionisé ainsi créé permet l'écoulement des charges contenues dans le nuage. La progression de cette décharge s'effectue par une série de bonds lumineux successifs et de nouveaux canaux ionisés sont alors créés.

2.3.3 Le processus d'attachement

La connexion entre le traceur et les décharges ascendantes s'effectue à quelques dizaines de mètres au-dessus du sol, à une telle distance, le traceur dont le potentiel est très élevé provoque une intensification du champ de l'ordre de 500 kV/m, et provoque une ou plusieurs décharges ascendantes. L'effet de pointe créé par les aspérités du relief

(végétation, constructions, relief) favorise l'apparition des coups de foudre à cet endroit. Ce phénomène s'appelle l'effet couronne.

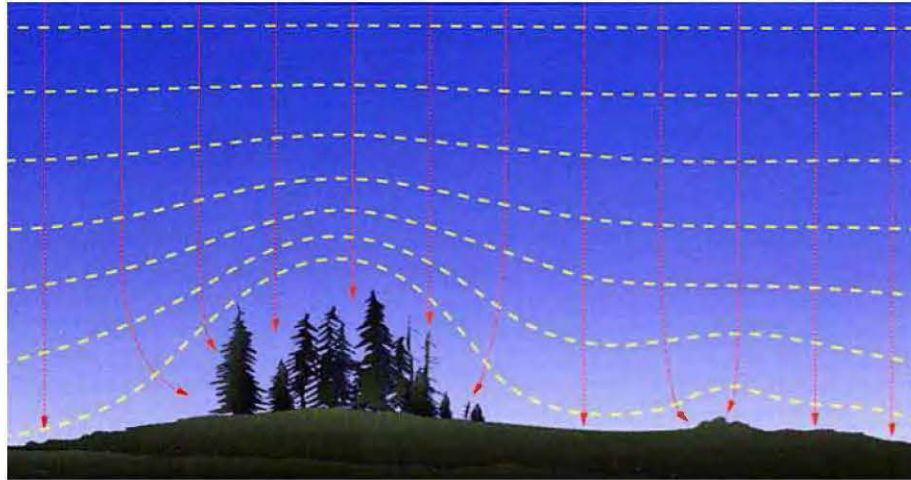


Figure 2-6 : L'effet couronne

2.3.4 L'arc en retour

Dans un premier temps, le canal du traceur par bonds est déchargé par une onde de potentiel de sol constituant le premier arc en retour, qui se propage vers le nuage à une vitesse de l'ordre d'un tiers de la vitesse de la lumière en neutralisant le canal chargé par le traceur. Le premier arc en retour se traduit au niveau du sol par un courant de valeur crête typique 15 à 30KA et d'un temps de montée de l'ordre de quelques microsecondes. Par conséquent, la température du canal s'élève rapidement pour atteindre des valeurs de milliers de degrés kelvin, générant un canal de haute pression qui provoque une onde de choc appelée tonnerre.

Plusieurs séquences peuvent ensuite se produire (voir Figure 2-7), il s'agit des arcs en retour subséquents provenant d'une quantité éventuelle de charges résiduelles au sommet du canal. Le dernier arc en retour est souvent à l'origine d'un fort courant de l'ordre de 100A qui draine la charge résiduelle du nuage.

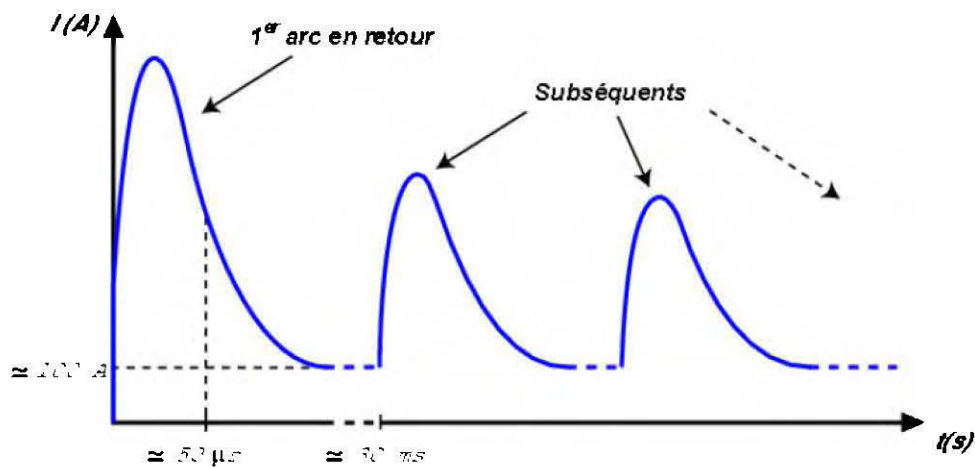


Figure 2-7 : Évolution du courant à la base de canal de foudre [4]

2.4 Principales caractéristiques des foudres

2.4.1 Forme d'onde

Le phénomène physique de la foudre correspond à une source de courant impulsionnel, à savoir une suite de décharges d'une quantité d'électricité sur un court intervalle de temps.

La forme d'onde réelle est très variable : elle consiste en un front de montée jusqu'à l'amplitude maximale (de quelques microsecondes à 20 microsecondes) suivie d'une queue de décroissance de quelques dizaines de microsecondes.

Le domaine spectral associé s'étend dans une bande de 10 kHz à plusieurs MHz.

2.4.2 Amplitude des coups de foudre

La distribution statistique expérimentale des coups de foudre en amplitude répond à une loi normale donnée dans la figure 2-8. [5]

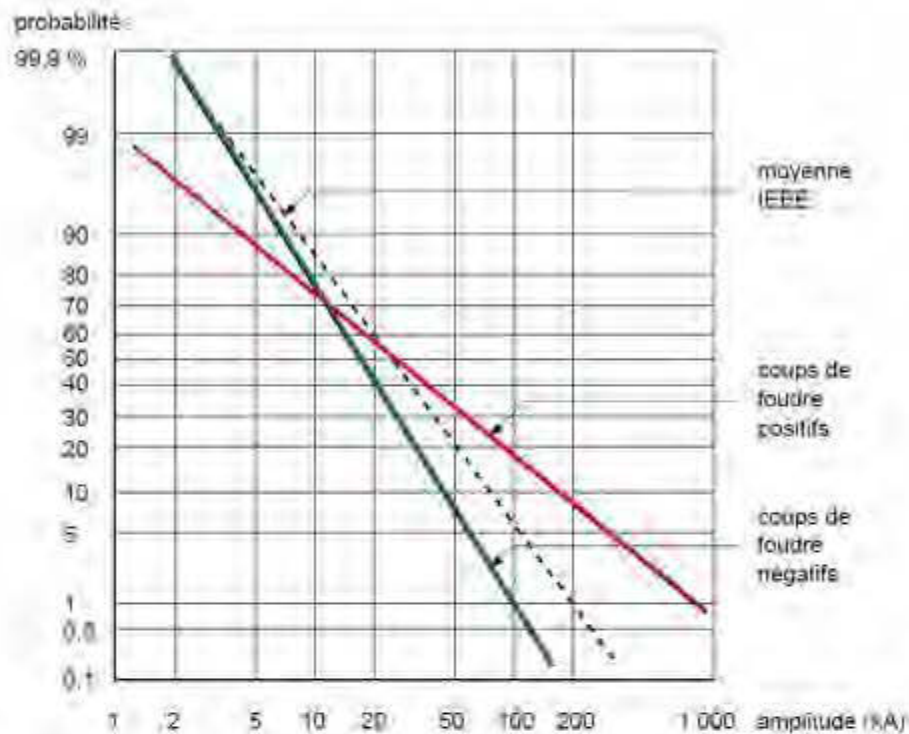


Figure 2-8 : Distribution statistique expérimentale, en amplitude, des coups de foudre positifs et négatifs, selon IEEE

2.4.3 Raideur de front

La distribution en raideur de front des coups de foudre est donnée dans la figure 2-9.

Pour les études de foudre, les valeurs suivantes sont en général choisies : [5]

- Amplitudes 100 kA ou 200 kA auxquelles sont associées respectivement une probabilité de dépassement de 5 % et 1 %.
- Forme d'onde triangulaire : le temps de montée 2 ms et le temps de descente à mi-queue 50 ms, d'où un front de 50 ou 100 kA / ms.

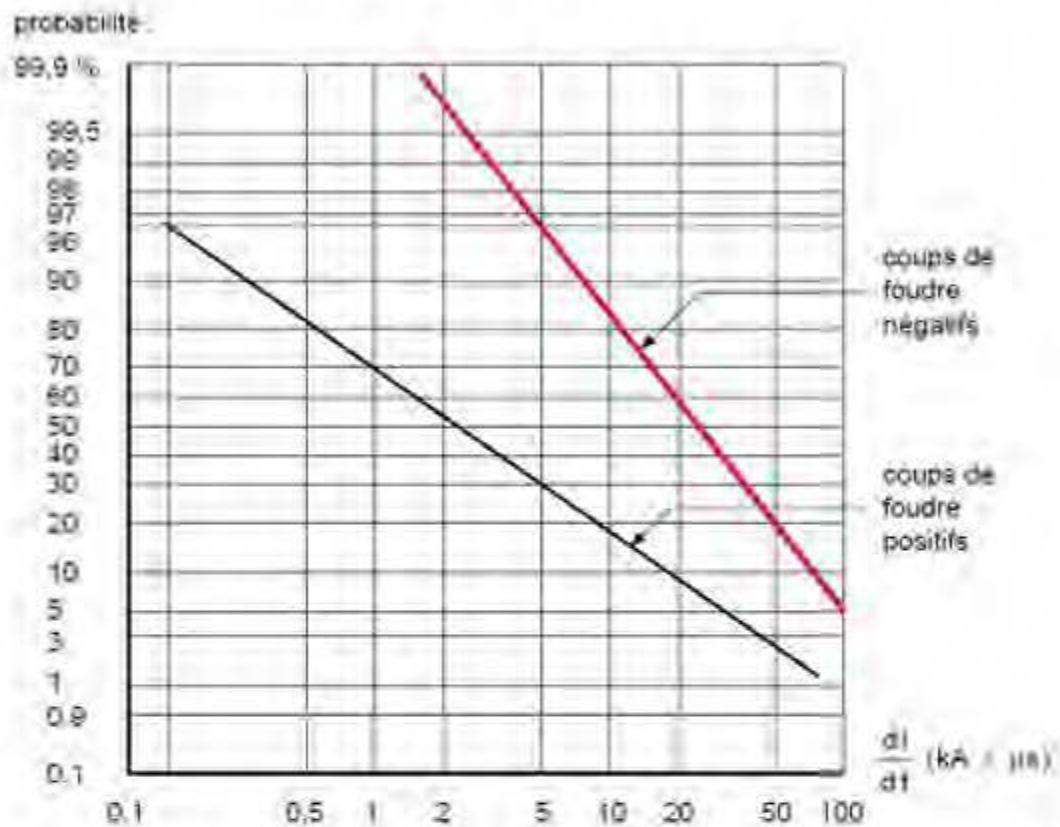


Figure 2- 9 : Distribution statistique expérimentale, en raideur de front des courants de foudre, positifs et négatifs, suivant IEEE

2.5 Conséquence de la décharge atmosphérique

2.5.1 Foudroiement direct d'une ligne (sur conducteurs de phase)

Lorsque la foudre tombe sur un conducteur de phase d'une ligne, le courant $i(t)$ se répartit par moitié de chaque côté du point d'impact et se propage le long des conducteurs qui présentent une impédance d'onde Z de valeur comprise entre 300 et 500 Ω (figure 2-10). Il s'en suit une onde de tension associée :

$$U(t) = Z \frac{i(t)}{2} \quad (2.1)$$

Au niveau des pylônes, la tension croît et se propage :

➤ En onde pleine en atteignant sa valeur maximale

$$U_{Max} = Z \frac{I_{Max}}{2} \quad (2.2)$$

Lorsque

$$Z \frac{I_{Max}}{2} < U_a \quad (2.3)$$

Avec U_a est la tension d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs ou des éventuels éclateurs de protection, elle est sensiblement proportionnelle à la longueur de la distance dans l'air (≈ 550 kV / m), et doit tenir compte d'un retard à l'amorçage pour les fronts très raides.

➤ En onde coupée à la tension d'amorçage lorsque

$$Z \frac{I_{Max}}{2} \geq U_a \quad (2.4)$$

La valeur limite du courant de foudre au-delà de laquelle il y a amorçage, donc interruption de service, est appelée courant critique I_c :

$$I_c = \frac{2U_a}{Z} \quad (2.5)$$

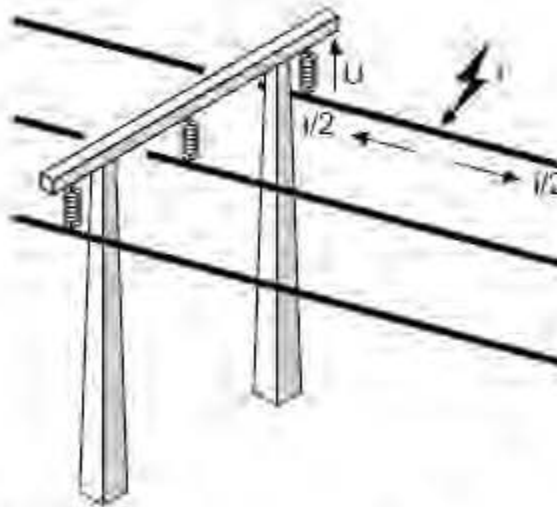


Figure 2- 10 : Chute de la foudre sur un conducteur de phase

2.5.2 Foudroïement indirect d'une ligne (sur conducteurs de garde ou pylône)

Dans ce cas, l'écoulement du courant de foudre vers la terre provoque une élévation du potentiel des structures métalliques.

La tête du pylône atteint un potentiel dépendant de son inductance propre L et de la résistance de terre R au choc (figure 2-11).

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.6)$$

La tension peut atteindre la limite d'amorçage à l'onde de choc de la chaîne d'isolateurs. Il s'agit de l'amorçage en retour. Une partie du courant se propage alors sur la ou les phases amorcées, vers les utilisateurs ; ce courant est en général supérieur à celui d'un coup de foudre direct.

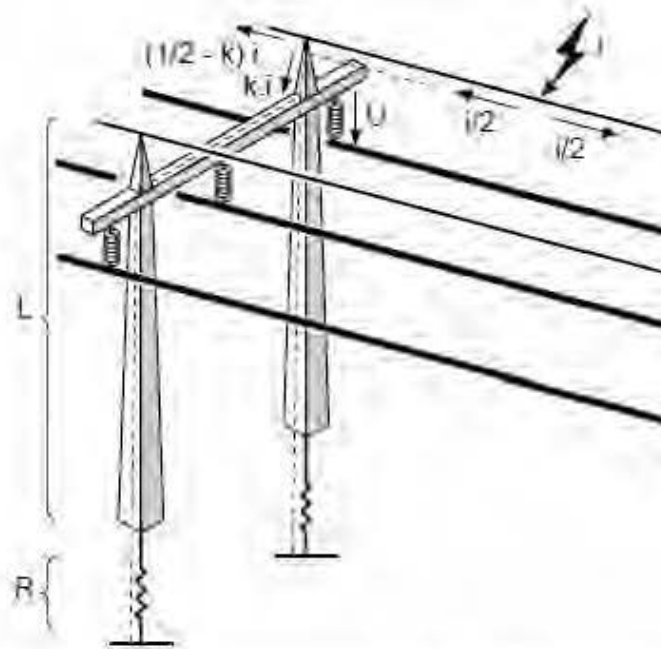


Figure 2-11 : Chute de la foudre sur un câble de garde

2.5.3 La distribution du courant de foudre le long de la structure

Plusieurs modèles de tour ont été développés au cours des dernières années, dans le cas particulier de la protection du réseau électrique HT. Un fil de garde est placé sur le haut de chaque pylône, l'intérêt de ce dernier est de recevoir les coups de foudre et de les écouler vers les réseaux de terre.

La figure 2-12(a), représente le modèle de la tour qui peut être modélisé par un certain nombre de fils droits interconnectés figure 2-12(b).

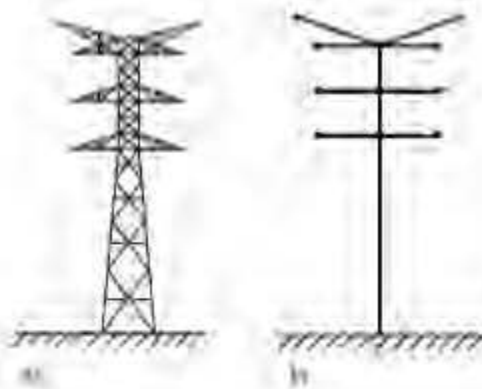


Figure 2-12 : Tour électrique et sa représentation équivalente

La modélisation de l'interaction entre une onde électromagnétique et une structure de fil métallique peut être analysée dans le domaine temporelle, en utilisant l'approche de la ligne de transmission avec le modèle simplifié de Taylor suivant

$$\begin{cases} \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + Ri(x,t) + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = v_s(x,t) \\ \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = i_s(x,t) \end{cases} \quad (2.7)$$

$i_s(x,t)$ et $v_s(x,t)$ sont la source de courant et de tension respectivement.

L , R et C sont les paramètres par unité de longueur des conducteurs horizontaux et verticaux, calculés et développés dans [6] et [7].

Nous allons donner dans les paragraphes qui suivent, la distribution du courant et le formalisme de la tension le long de la structure [1].

➤ Tension au sommet du pylône

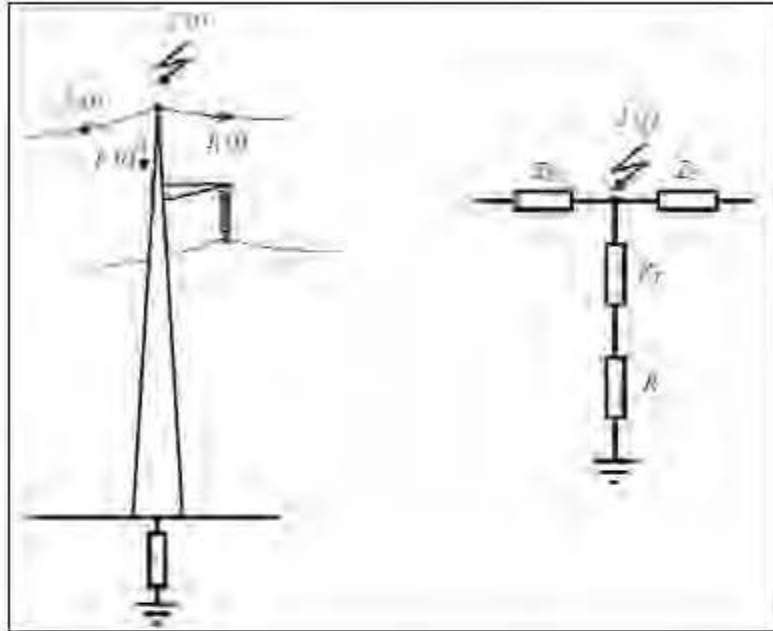


Figure 2-13 : Décharge électrique au sommet d'un pylône d'une ligne aérienne

La tension au sommet du pylône est donnée par l'équation (2-8)

$$V_r(t) = V_1(t) + V_2(t) \quad (2.8)$$

Où

$$V_1(t) = Z_p I(t) \quad (2.9)$$

Z_r est l'impédance équivalente au sommet du pylône, elle est donnée par la relation

$$Z_s = \frac{Z_p Z_r}{Z_s + 2Z_r} \quad (2.10)$$

Z_s et Z_r sont les impédances d'onde du pylône et du câble de garde respectivement

$V_2(t)$ est la tension due au courant réfléchi à travers le pylône, elle donnée par

$$V_2(t) = -Z_w \sum_{n=1}^N [I(t - 2n\tau_T) \psi^{n-1}] \quad (2.11)$$

Z_w est l'impédance d'onde constante donnée par

$$Z_w = \frac{2Z_s^2 Z_T}{(Z_s + 2Z_T)} \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (2.12)$$

R étant l'impédance de mise à la terre du pylône

Et

$$\psi = \frac{2Z_T - Z_s}{(Z_s + 2Z_T)} \left(\frac{Z_T - R}{Z_T + R} \right) \quad (2.13)$$

N est le plus grand nombre entier inférieur ou égal à $1/2\tau_T$

τ_T est le temps de propagation de l'onde du sommet à la base du pylône, il vaut (h_T/c)

h_T étant la hauteur du pylône et c la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 \times 10^8$ m/s)

ψ est le facteur d'amortissement des ondes réfléchies

➤ L'onde de courant de la foudre réfléchi à travers les pylônes adjacents

Cette onde est donnée par la relation

$$V'_T = \beta_s V_T (t - 2\tau_s) \quad (2.14)$$

$$\beta_s = \frac{Z_s - 2Z_T}{2Z_T + Z_s} \quad (2.15)$$

β_s est le facteur de réflexion

Le temps de propagation de l'onde de foudre sur le câble de garde, entre deux pylônes est donné par

$$\tau_s = \frac{p}{0.9c} \quad (2.16)$$

p étant la portée de la ligne et c la vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

➤ Tension au pied du pylône

La tension au pied du pylône à un temps $t + \tau_T$ est donnée par

$$V_R(t + \tau_T) = \alpha_R Z_I I(t) + \alpha_R Z_I \sum_{n=1}^N I(t - 2n\tau_T) \psi^n \quad (2.17)$$

α_R : Le coefficient de réfraction de l'onde à travers la résistance de terre du pylône

$$\alpha_R = \frac{2R}{Z_T + R} \quad (2.18)$$

2.6 Effets dus à la foudre

En considérant les principaux effets, directs et indirects, consécutifs à la propagation du courant de foudre et même si ce courant arrive par la haute tension, il peut atteindre tous les circuits électriques (perturbations conduites et rayonnées).

Ces effets, qui concernent donc tous les niveaux de tension, sont :

- Les effets thermiques (fusion d'éléments, incendies, explosions).
- Les effets mécaniques, dus aux efforts électrodynamiques des conducteurs parallèles proches.
- L'effet de choc diélectrique, suite aux montées en potentiel lors de la propagation d'onde à travers les impédances présentées par les conducteurs.
- Perte d'isolement par contournement de l'isolateur d'une phase entraînant « un courant de fuite » à la terre à fréquence industrielle.
- Élévation de potentiel de terre : il est usuel d'atteindre des potentiels de plusieurs centaines de kV au puits de terre de l'équipement HT concerné. La loi de variation, fonction de la distance à la prise de terre, est approximativement hyperbolique, d'où des potentiels et leurs gradients associés, très grands à proximité des puits de terre, même à plusieurs dizaines de mètres.
- Les effets électromagnétiques à haute fréquence (spectre très large) : rayonnement parasite, induction et couplage de circuits.

Également électrochimiques, acoustiques et physiologiques.

Tous ces phénomènes sont source de :

Dégradation de matériel, de façon brutale comme les claquages diélectriques par surtension, ou par vieillissement prématuré à cause de contraintes non destructrices immédiatement, mais répétées.

Dysfonctionnement des installations particulièrement au travers des circuits à courants faibles, exemple : perturbations parasites des équipements de contrôle-commande et de communication.

Réduction de la continuité de service par des interruptions longues (cas de destruction de matériel) ou courtes (dysfonctionnement des automatismes de réseaux).

Danger pour l'homme et les animaux, notamment par l'apparition de la tension de pas pouvant entraîner une électrisation.

2.7 Les systèmes de mise à la terre (systèmes de MALT)

Les systèmes de mises à la terre ont été introduits par Benjamin Franklin. Célèbre inventeur des parafoudres. Plusieurs références détaillent depuis plusieurs dizaines d'années les mises à la terre des installations électriques.

2.7.1 Définition d'un réseau de terre

Un réseau de terre, parfois simplement appelé « la terre », est constitué d'un ensemble de conducteurs enterrés, en contact direct avec le sol sont reliés électriquement entre eux, afin de permettre aux courants permanents et aux courants de défaut de s'y écouler vers la terre, ils sont caractérisés par leurs résistances ou impédances.

L'étude du comportement d'un système de MALT, en fréquence industrielle nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol qui l'entoure. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du sol, c'est-à-dire de sa résistivité, permittivité et sa perméabilité, aussi les caractéristiques géométriques du réseau de terre et de la source. La conception d'un réseau de terre doit donc être précédée d'une étude géologique du sol.

2.7.2 Composantes du système de mise à la terre

Une connexion conductrice, qu'elle soit intentionnelle ou accidentelle, entre un circuit électrique ou l'équipement et la terre, ou un corps conducteur qui remplace la terre.

La figure 2-14 représente un système d'électrodes de mise à la terre.

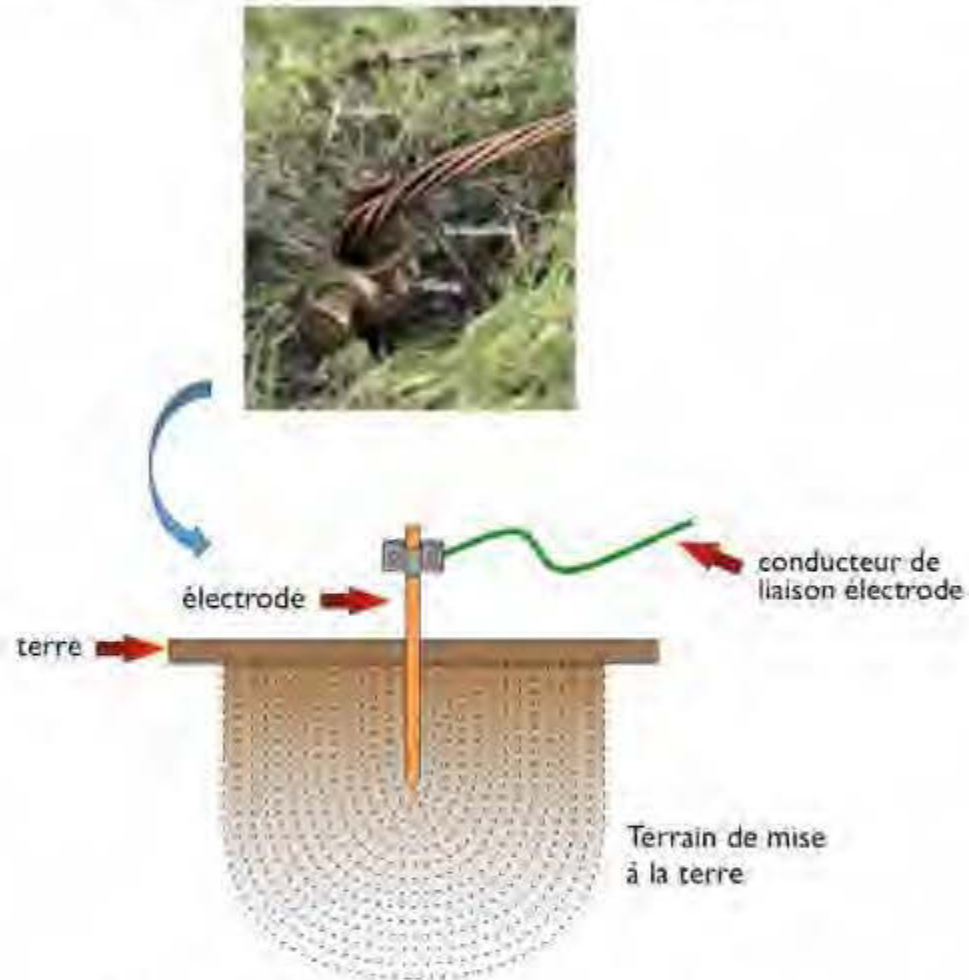


Figure 2-14 : Composantes d'électrodes de mise à la terre

2.8 Rôle des systèmes de MALT

Que ce soit en haute ou basse tension, une bonne mise à la terre doit être capable d'assurer l'écoulement du courant de défaut ou de courant de foudre sans se détruire par échauffement. Le courant à écouler dans le sol peut être de différente nature :

- Courant à fréquence industrielle (par exemple suite à un court-circuit phase/pylône) ;
- Courant harmonique ;
- Courant transitoire d'origines diverses (foudre, manœuvre...etc.).

Une bonne mise à la terre doit assurer la sécurité des personnes à proximité des installations, notamment dans les zones fréquentées (abords de piscines, terrains de camping ...etc.) et la protection des équipements (qualité de service) ou des installations de tiers, reliés, ou à proximité (canalisations de transport de fluide, installations de télécommunication ...etc.)

2.8.1 Sécurité des personnes et des animaux (Tension de contact et tension de pas)

Lors de l'écoulement dans le sol de courant élevé, la sécurité doit être assurée à l'intérieur de l'installation électrique et ses abords immédiats par une limitation de la tension de pas et de la tension de toucher à des valeurs non dangereuses pour l'homme ou les animaux. Cette limitation est obtenue grâce à la connaissance et au contrôle de la répartition idéale dont on doit chercher à se rapprocher, est l'équipotentialité de l'ensemble des prises de terre.

1.8.1.1 La tension de pas

Représentée à la figure 2-15, la tension de pas est la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à un mètre, dans la direction du gradient de potentiel maximum. [8]

La tension de pas dépend de la distribution de potentiel dans le sol. Si le sol est homogène, elle est directement proportionnelle à sa résistivité.

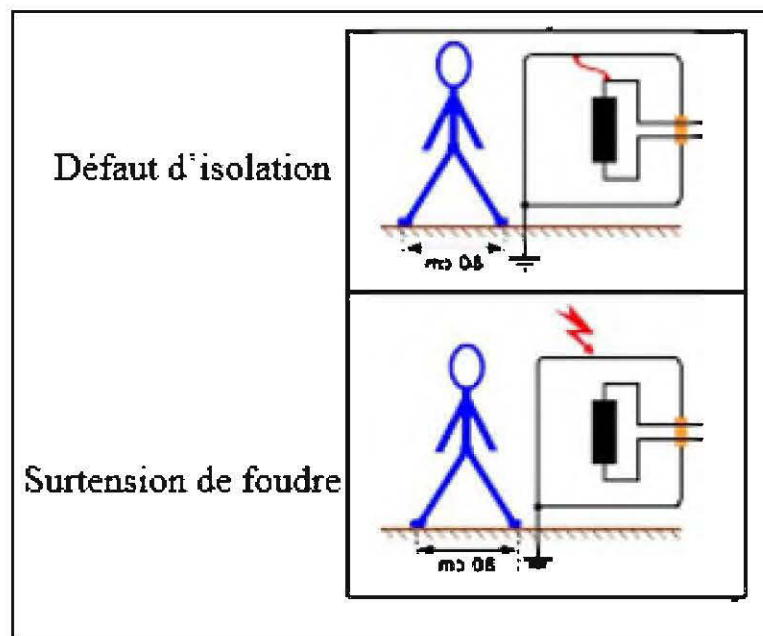


Figure 2-15 : La tension de pas

Considérant un sol homogène de résistivité ρ et une répartition purement résistive de potentiel. À une distance d de l'impact de foudre pour un courant de foudre de valeur de crête I et la tension de pas est donnée par la relation.

$$U_p = \frac{\rho I}{2\pi d} \frac{\rho}{(d + \rho)} \quad (2.19)$$

La courbe de la figure 2-16 donne la tension de pas en fonction de la distance pour une résistivité typique de 100 $\Omega \cdot m$ à l'impact de courant $I=50$ kA.

Cette courbe qualifie bien la diminution de la tension de pas avec l'éloignement du point d'écoulement du courant à la terre. Dans ce cas, la tension de pas qui valait 398 kV à 1 m du point d'impact, tombe à 856 V à une distance de 30 m et à 312 V à 50 m.

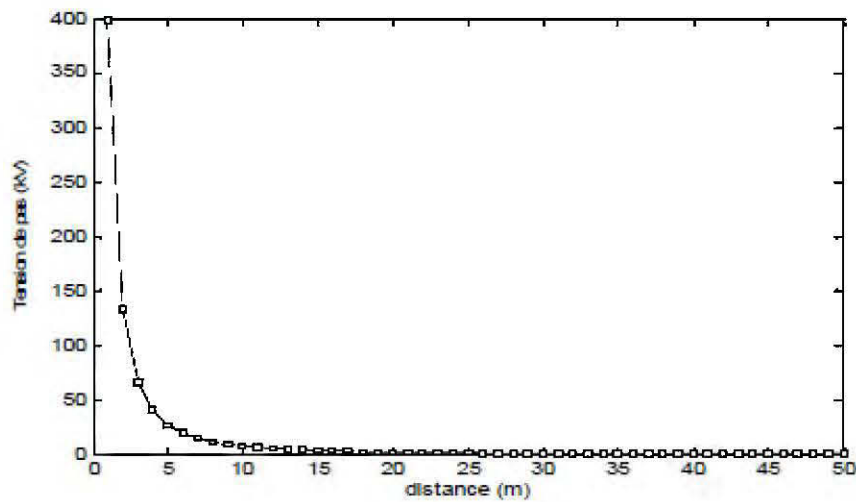


Figure 2-16 : Tension de pas en fonction de la distance

Cette tension cessera totalement dangereuse pour un être humain à 126 m du point d'impact, tandis que pour une résistivité de 3000 $\Omega \cdot m$, cette distance sera de 690 m dans un sol sec.

2.8.1.2 Tension de toucher (ou de contact)

La tension de toucher (figure 2-17) est la différence de potentiels entre une structure métallique de mise à la terre et un point situé à la surface du sol, à une distance égale à 1 m.

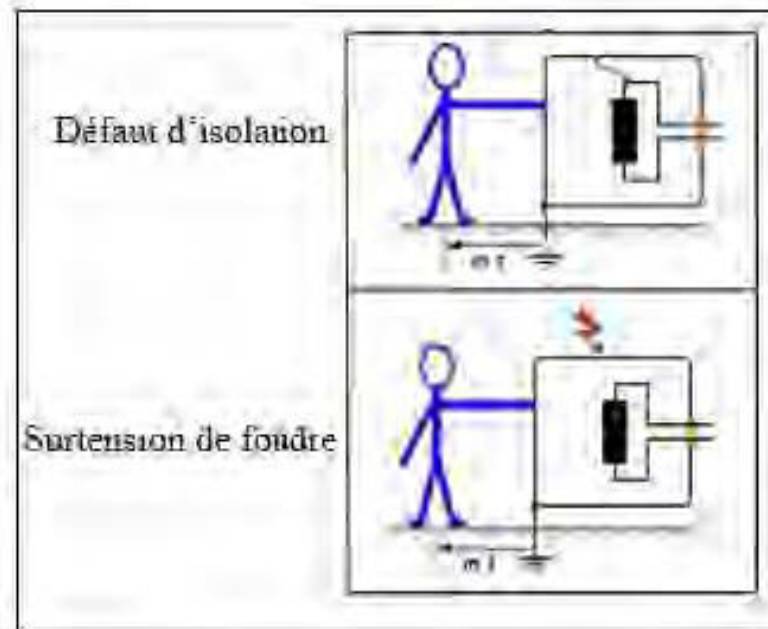


Figure 2-17 : Tension de toucher

2.9 Protection des installations de puissance

Le réseau de terre des installations électriques, la prise de terre des supports de lignes, limite les effets des surtensions provoquées par :

- Les défauts à 50 Hz,
- Les manœuvres d'appareillage dans les postes,
- Les surtensions d'origine atmosphérique.

Cette limitation est d'autant plus efficace que ces prises de terre facilitent l'écoulement du courant dans le sol, c'est-à-dire qu'ils présentent une impédance de terre faible, aussi bien pour les phénomènes lents (défauts à 50 Hz) que pour les phénomènes rapides tels que ceux engendrés par la foudre et par les manœuvres des disjoncteurs.

2.9.1 Protection des équipements sensibles

Dans les postes, à proximité des installations de puissance, on trouve des équipements fonctionnant à des niveaux de tension beaucoup plus faibles, équipements électroniques ou électromécaniques. Ces équipements sont également exposés aux effets liés par couplage galvanique, inductif, capacitif ou plus généralement, électromagnétique.

2.9.2 Maintien d'un potentiel de référence

Les différents équipements placés dans une même installation doivent, lorsqu'ils sont reliés électriquement, rester fixes à un potentiel identique même pendant la durée des perturbations mentionnées précédemment.

2.10 Conclusion

Ce chapitre est basé sur la présentation de la phénoménologie de la foudre avec une attention sur les aspects de la décharge orageuse. Par la suite les différents effets de la foudre et les moyens permettant de les réduire, ont été décrits d'une manière générale, une attention précise sur la réalisation et l'utilité en protection de la mise à la terre sur le corps humain et les installations de puissances et équipements sensibles.

CHAPITRE 3

FACTEURS INFLUENÇANT LE COMPORTEMENT DES SYSTÈMES DE MISE À LA TERRE

3.1 Introduction

À la fréquence industrielle (50 - 60 Hz) et pour un faible courant, la résistance ou l'impédance de MALT d'une prise de terre dépend de la résistivité du sol et des dimensions géométriques de la prise de terre.

Un courant de choc, tel celui engendré par un coup de foudre, circulant dans une prise de terre, peut en altérer considérablement les propriétés du système.

Le comportement d'une MALT soumise à la circulation d'un courant de foudre dépend principalement des facteurs suivants :

- La nature du sol
- La conductance de terre G
- L'inductance L
- La capacité C
- La résistance longitudinale de la prise de terre R_c
- Le phénomène de décharge dans le sol (le phénomène d'ionisation)

Le développement des décharges dans le sol dépend principalement de la structure physique du sol et de son contenu en humidité. Les dimensions géométriques de la prise de terre, son inductance et sa capacité déterminant l'intensité du champ électrique E ont aussi une influence.

Ces facteurs contribuent aux non-linéarités de l'impédance de terre lors de l'application d'un courant généré par un coup de foudre. Cette impédance est :

$$Z(t) = \frac{u(t)}{i(t)} \quad (3.1)$$

Où u et i sont les valeurs instantanées de la tension et du courant de foudre.

3.2 Environnement des prises de terre

Le comportement d'un système de mise à la terre dépend beaucoup des caractéristiques électriques de son environnement immédiat, c'est-à-dire du sol et des fondations.

3.2.1 Nature des sols

Il existe de nombreux types de sols et les caractéristiques électriques correspondantes ne sont pas évidentes à déterminer.

De plus, pour des raisons financières, il n'est pas raisonnable d'envisager de réaliser un forage avant chaque installation d'un réseau de terre. Pour le dimensionnement d'un système de mise à la terre, on se contente donc en pratique de mesurer localement les paramètres électriques du sol.

On caractérise le comportement des sols par les grandeurs suivantes

3.2.1.1 La résistivité

Les propriétés de conduction de sol sont importantes, en particulier sa résistivité spécifique qui est l'un des principaux facteurs qui déterminent la résistance d'une électrode de terre. La résistivité électrique du sol, notée ρ , dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc très étroitement liée à plusieurs facteurs. [9, 10]

Ces principaux facteurs sont :

- Le type du sol (par exemple : l'argile, limon, grès et de granit) : la compaction du sol aura une incidence sur la résistivité, car un sol meuble est moins conducteur par rapport à un sol compacté avec le même contenu. [11]
- La dimension des grains.
- La porosité.
- Le pourcentage d'eau contenu dans le sol : L'augmentation de l'humidité relative du sol de quelques pour cent à quelques dizaines de pour cent amène une réduction de la résistivité par un facteur de dix.

- Le pourcentage d'acide et de bases : la présence de produits chimiques, est également importante d'un point de vue corrosif, ils peuvent augmenter la corrosion de l'électrode métallique. [12]

- La température : une augmentation de la température à 100°C cause l'évaporation de l'eau du sol et ainsi une diminution de la résistivité du sol. Par contre une diminution de la température au-dessous de 0°C, comme le cas des régions froides, la conductivité du sol diminue et ainsi un accroissement rapide de la résistivité se produit.

En général, plus le sol n'est humide et mieux il conduira l'électricité. [13]

Un autre facteur dont il faudra tenir compte est la caractéristique de l'électrode de mise à la terre : la matière, la forme, la profondeur dans le sol, le nombre d'électrodes et la structure.

3.2.1.2 Permittivité

La permittivité d'un matériau, notée ϵ , caractérise son comportement diélectrique. Elle est en fonction de la permittivité propre des différents composants du sol et de leur proportion.

3.2.1.3 Perméabilité

On considère que le sol est constitué de matériaux amagnétiques (ce qui se vérifie toujours en pratique, sauf dans le cas de quelques roches riches en oxyde de fer comme la magnétite). Sa perméabilité relative μ est donc égale à 1.

3.2.2 L'inductance des systèmes de MALT

L'inductance des conducteurs de terre et celle des prises de terre engendrent une augmentation de la tension proportionnelle à la raideur du front d'onde des courants selon l'équation suivante :

$$du = L \frac{di}{dt} \quad (3.2)$$

Cette inductance, le long de la prise de terre, provoque une diminution non uniforme du potentiel. Cette chute du potentiel est habituellement beaucoup plus grande que celle générée par la résistance longitudinale R_C . La distribution du courant vers le sol est donc plus concentrée près du point d'injection d'un courant à haute fréquence que pour un courant à basse fréquence d'où l'impédance de terre est plus élevée que la résistance de terre stationnaire.

3.2.3 La capacité et la conductance

La capacité et la conductance de la prise de terre sont responsables du passage du courant au sol.

Le courant capacitif (aussi appelé courant de déplacement) circule vers le sol parallèlement au courant conduit par les éléments G (aussi appelé courant de conduction). La capacité C engendre une augmentation du courant proportionnelle à la raideur du front d'ondes de la tension selon l'équation suivante :

$$di = C \frac{du}{dt} \quad (3.3)$$

L'inductance L et la capacité C sont distribuées le long des installations de MALT. Le courant de choc et la tension engendrée se déplacent donc sous la forme d'ondes.

Dans les conditions stationnaires c'est-à-dire à une faible fréquence par exemple à la fréquence industrielle de 50-60 Hz, l'influence de l'inductance et de la capacité est négligeable. Cela s'explique par la faible raideur des ondes du courant et de la tension.

3.3 Le phénomène de décharge dans le sol (le phénomène d'ionisation)

Un autre facteur qui régit le comportement des prises de terre, lors de la circulation d'un courant de foudre, concerne les décharges électriques dans le sol.

Ces décharges, en forme d'étincelles, se développent à la surface des électrodes de terre dans la direction du champ électrique.

La formation et le développement des canaux de plasma dans le sol ont été décrits partiellement dans [14, 15]. Les étincelles apparaissent lorsque l'intensité du champ électrique à la surface de la prise de terre dépasse une valeur critique E_{crit} . Le champ électrique diminue avec la distance à la prise. À une certaine distance, il devient inférieur à E_{en} , et ne peut plus engendrer d'étincelles.

Dans la zone où il y a plusieurs étincelles radiales, l'intensité moyenne de la chute de tension diminue. Cela est dû au fait que le gradient du potentiel le long des canaux de plasma est beaucoup plus faible que celui engendré par le courant de conduction électrolytique en conduction stationnaire. Ainsi la prise de terre se comporte comme une électrode métallique de plus grande dimension. L'accroissement apparent des dimensions d'une prise de terre entraîne une réduction de sa résistance de MALT, une augmentation de sa capacité ainsi qu'une diminution de son inductance.

Le développement des canaux de plasma est un processus énergétique étroitement lié aux caractéristiques du courant de choc telles que :

- L'amplitude du courant
- Le temps de front et le temps de queue
- La raideur ou la pente du front d'onde de courant

Deux chercheurs [16] ont proposé un modèle dynamique des caractéristiques d'impulsion de terre pour expliquer le comportement de l'électrode de terre soumis à une forte impulsion de courant. Le modèle, composé de trois zones "non ionisation, ionisation et zones d'ionisation". La zone de non-ionisation représente un état de résistivité constante avec l'augmentation de la densité de courant, la zone d'ionisation représente la situation lorsque le courant dépasse la densité de courant critique, où la

rupture se produit vers le bas en même temps que la résistivité décroît de façon exponentielle et la zone d'ionisation correspond à l'augmentation de la résistivité du sol vers sa valeur à l'état stable de façon exponentielle comme illustrée dans la Figure 3-1.

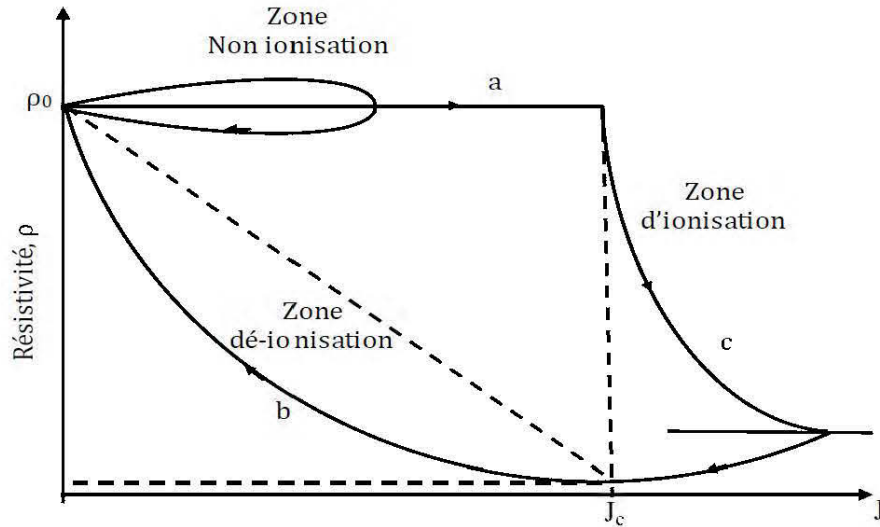


Figure 3-1 : Profils de résistivité en modèle de résistance dynamique [16]

Un modèle en couches constitué des couches élémentaires a été utilisé pour simuler les trois zones pour une électrode, comme le montre la Figure 3-2. Dans ce modèle, les paramètres de la résistivité du sol non linéaire sont représentés en fonction du temps et le rayon de l'électrode.

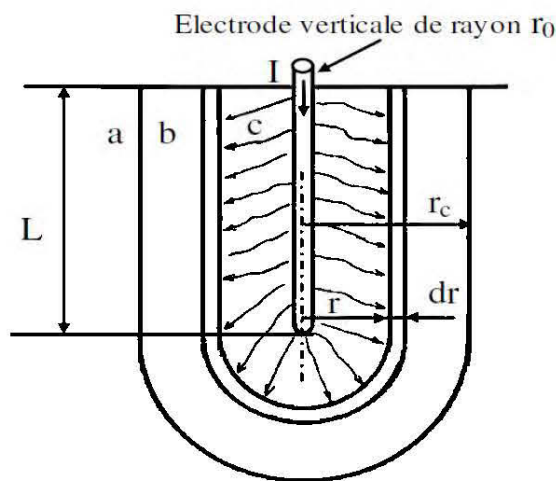


Figure 3-2 : Modèle simplifié de la résistance d'une électrode enterrée [16]

3.4 Évaluation du seuil d'ionisation (E_{crit})

Le seuil d'ionisation ou l'intensité critique du champ électrique est le produit de la résistivité du sol mesurée ρ et la densité de courant J à la surface de l'électrode.

La distribution du courant uniforme, donnée par cette relation $E_{crit} = J \rho$.

Des études [11-18] ont été menées pour déterminer la valeur limite du champ électrique dans le sol au-delà de laquelle il y a ionisation. Ces études ont donné des valeurs de l'ordre de 1,3 à 18,5 kV/cm. [16, 17]

L'intensité du champ électrique critique est généralement considérée comme l'amplitude à l'instant où la caractéristique électrique $I = f(V)$ commence à devenir non linéaire.

Des expériences de laboratoire ont été menées en haute tension, afin de déterminer la valeur critique du champ électrique dans le sol.

La cellule de test se compose d'un récipient hémisphérique rempli de grain du sol moyen de différents teneurs en eau du sol et l'électrode hémisphérique actif placé au milieu.

La valeur du champ électrique critique était 5.6 KV/cm. Cette valeur a été prise lors du deuxième pic de courant produit. Ce pic est dû à l'ionisation du sol.

3.5 Résistivité de la terre et résistance de mise à la terre

➤ Le sol est constitué de matériaux à faible conductivité. Celle-ci est due aux sels et aux impuretés entre les isolants (oxyde de silice et oxyde d'aluminium). À cause de la faible conductivité de la terre, tout courant qui passe à travers elle, crée une grande chute de tension, ce qui revient à affirmer que le potentiel de la terre n'est pas uniforme. La résistivité du sol est une quantité variable et la seule manière de la connaître avec précision est de la mesurer. Elle varie en fonction de plusieurs facteurs :

- La nature des sols.
- Composition chimique des sels.
- Concentration des sels dissous dans l'eau contenue.
- Le taux d'humidité, la température.

Le tableau ci-dessous donne une indication sur les résistivités des différents types de sols. [12]

Tableau 3-1 : Résistivités des différents types de sols

Type de sol	Résistivité ($\Omega.m$)
Terrain marécageux	De quelques unités à 30
Limon	20 à 100
Humus	100 à 150
Tourbe humide	5 à 100
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sable argileux	50 à 500
Sable siliceux	200 à 3000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Schistes	50 à 300
Calcaire tendre	100 à 500
Calcaires compacts	1000 à 5000
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Micaschistes	800
Granits et Grès	100 à 10000

La résistance d'une mise à la terre est directement proportionnelle à la résistivité du sol, si celle-ci peut être considérée comme homogène. Un autre facteur dont il faudra tenir compte est la caractéristique de l'électrode de mise à la terre : la matière, la forme, la profondeur dans le sol, le nombre et la structure.

3.6 Mesures des résistivités des sols et des résistances des mises à la terre

3.6.1 Mesure des résistivités des sols

La méthode qui convient est celle de quatre électrodes (la méthode de WENNER) décrite ci-dessous [18] :

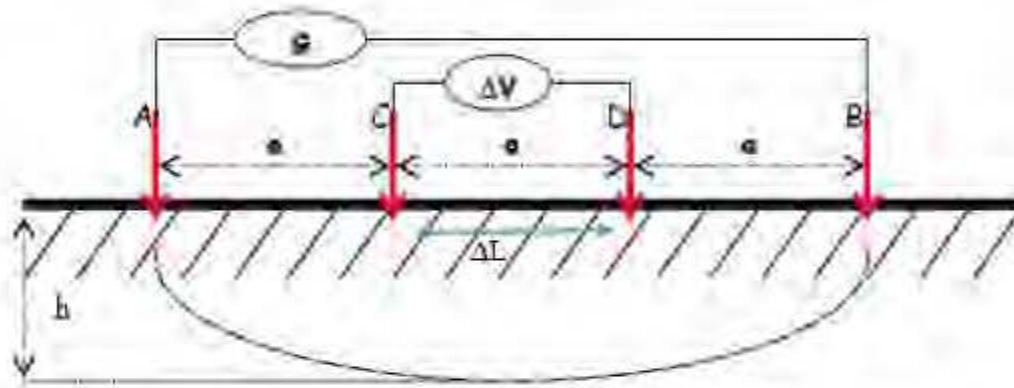


Figure 3-3 : Schéma de mesure de la méthode de quatre électrodes

La formule générale pour la mesure de la résistivité apparente des sols à partir de la méthode de WENNER pour un sol homogène (une seule couche de résistivité ρ) est :

$$\rho = 2\pi a R \quad (3.4)$$

ρ : Résistivité apparente en $\Omega \cdot m$

a : Distance entre électrodes en m

R : Valeur en Ω lue sur le telluromètre

La résistance R qui est mesurée avec un telluromètre à quatre bornes dont le circuit (le circuit voltmétrique est relié aux prises C et D et le circuit ampérométrique aux prises A et B).

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.5)$$

Pour les sols multicouches, on utilise généralement un sol équivalent à deux couches (figure 3-4)



Figure 3-4 : Sol en deux couches de résistivités différentes

Des formules simples ont été développées pour calculer la résistance d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. La résistivité apparente du sol est alors donnée par la relation suivante,

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h_1}{a} \right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h_1}{a} \right)^2}} \right] \quad (3.6)$$

Avec h_1 , la profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1
 K , coefficient de réflexion, donné par la relation

$$R = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.7)$$

ρ_2 est la résistivité de la couche profonde du sol

Et pour le cas d'un sol à plusieurs couches de résistivités différentes, on peut aussi considérer le sol comme uniforme. Dans ce cas, la résistivité apparente $\rho(a)$ du sol supposé homogène peut être trouvée par la relation suivante :

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} \quad (3.8)$$

ρ_{a1} , ρ_{a2} et ρ_{an} sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de 4 électrodes

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(max)} - \rho_{a(min)}}{2} \quad (3.9)$$

$\rho_{a(max)}$ et $\rho_{a(min)}$ sont les n valeurs respectivement maximale et minimale de la résistivité des différentes couches du sol.

3.6.2 Mesure de la résistance de système de mise à la terre

La détermination de la résistance d'un réseau de terre est extrêmement complexe. À part les méthodes de calculs analytiques et numériques.

3.6.2.1 Méthode de chute de potentiel

Il est nécessaire dans la pratique d'utiliser des électrodes auxiliaires d'une part pour injecter du courant dans la prise de terre étudiée et d'autre part pour mesurer l'élévation de potentiel de cette dernière. C'est la méthode de chute de potentiel dont le schéma de principe est donné à la figure 3-5 ci-dessous.

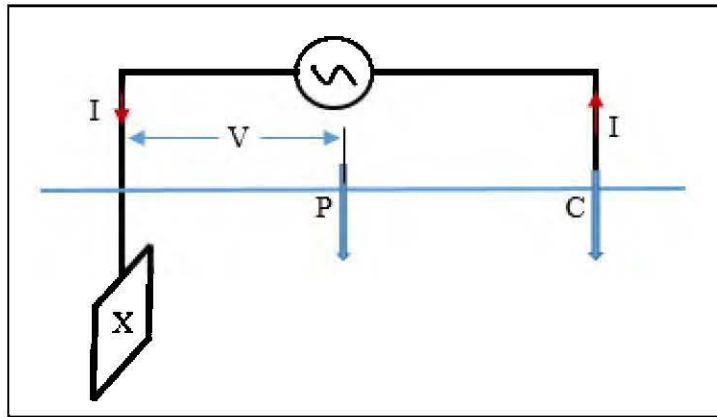


Figure 3-5 : Méthode de chute de potentiel

Un courant I est injecté entre les électrodes X et C et on mesure la différence de potentiel V entre X et P.

Sous certaines conditions, la valeur du quotient V/I fournit la résistance de terre de l'électrode X. Grâce au déplacement des électrodes auxiliaires P et C, une vérification simple de résultat de mesure peut être effectuée.

Des statistiques de terrain ont montré que la méthode idéale pour garantir la plus grande précision de mesure consiste à placer le piquet P à 62 % de X sur la droite PC. [19]

3.6.2.2 Méthode des trois points (triangle)

C'est une méthode peu recommandée à cause de son manque de précision. Elle nécessite, par ailleurs, la déconnexion de la barrette de terre avant la mesure. [20]

Le système triangulaire est composé de (figure1.7) :

- Deux électrodes auxiliaires E_1 et E_2 associées à l'électrode de mesure E
- Injection du courant électrique I entre les électrodes E et E_2
- Mesure la différence de potentiel entre E et E_1 (figure1.7).

Les mesures se font plusieurs fois, en éloignant les électrodes jusqu'à ce que les valeurs des résistances mesurées soient constantes.

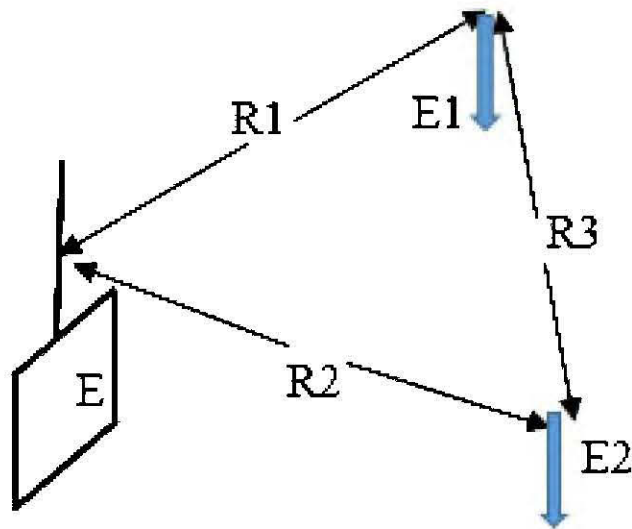


Figure 3-6 : Méthode des trois points

D'autres méthodes pour la mesure de la résistance du sol sont présentées dans la littérature comme ;

La méthode des sondes capacitives, une méthode très pratique [20, 21] pour mesurer la résistance de la mise à la terre en utilisant des sondes capacitives au lieu des électrodes dans les districts urbanisés où il est difficile d'appliquer les électrodes figure 3-7.

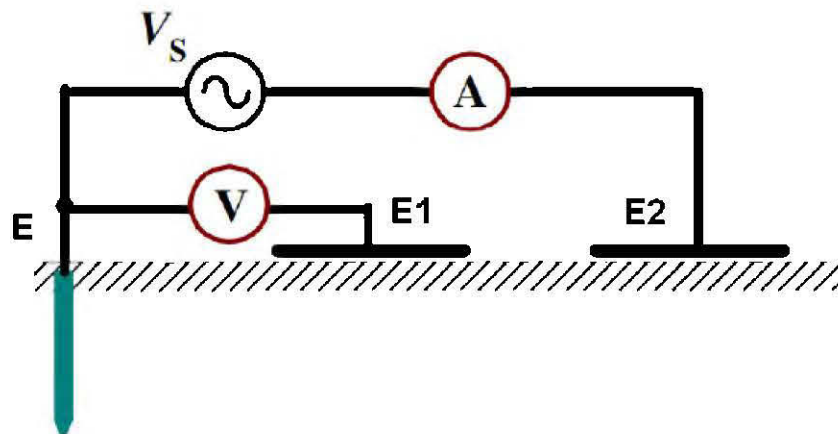


Figure 3-7 : Méthode de chute de tension utilisant des sondes capacitive

Une autre méthode de mesure est proposée sans l'utilisation des électrodes auxiliaires lorsque la surface du sol est couverte par des chaussées ou des pierres (difficulté de l'utilisation d'électrodes auxiliaires), montrée dans la figure 3-8. [22]

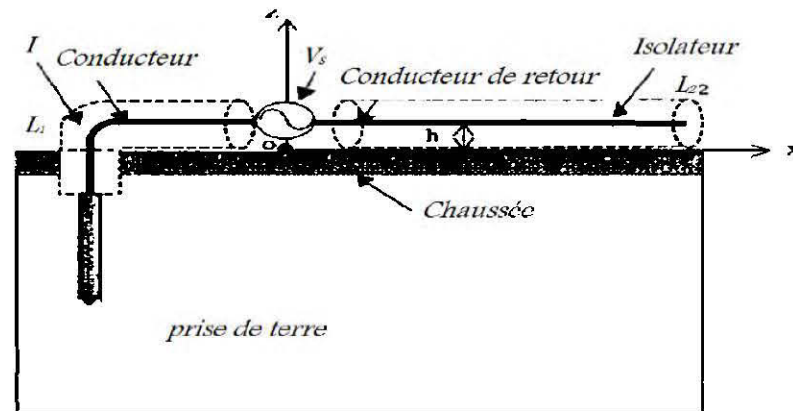


Figure 3-8 : Méthode de mesure sans électrodes auxiliaires

3.7 Techniques d'amélioration de la résistance du sol

La sécurité des installations électriques et des personnes qui les utilisent dépend en grande partie des prises de terre auxquelles elles sont reliées.

De nombreuses prises de terre sont défectueuses du fait de la forte résistivité du sol ou de l'insuffisance de développement des électrodes de terre en surface ou en profondeur.

Il y a plusieurs méthodes pour résoudre ce problème, comme augmenter le nombre des électrodes de terre, implanter des électrodes en profondeur ou augmenter le diamètre des électrodes. Mais ce sont des solutions onéreuses.

Dans certains sols, la résistivité est parfois si élevée qu'il est presque impossible d'obtenir une résistance satisfaisante et les configurations des mises à la terre ne permettent pas d'obtenir des résistances et des impédances relativement faibles.

Plusieurs chercheurs présentés dans [19, 23, 24], proposent des techniques pour améliorer la résistivité des sols.

Une méthode qui permet d'entourer l'électrode de terre d'une couche de matière peu résistive (Figure 3-9).

Plusieurs produits ou matières de faible résistivité qui ne devraient pas causer des corrosions aux piquets métalliques sont utilisés (la bentonite, le charbon de bois et le sel).

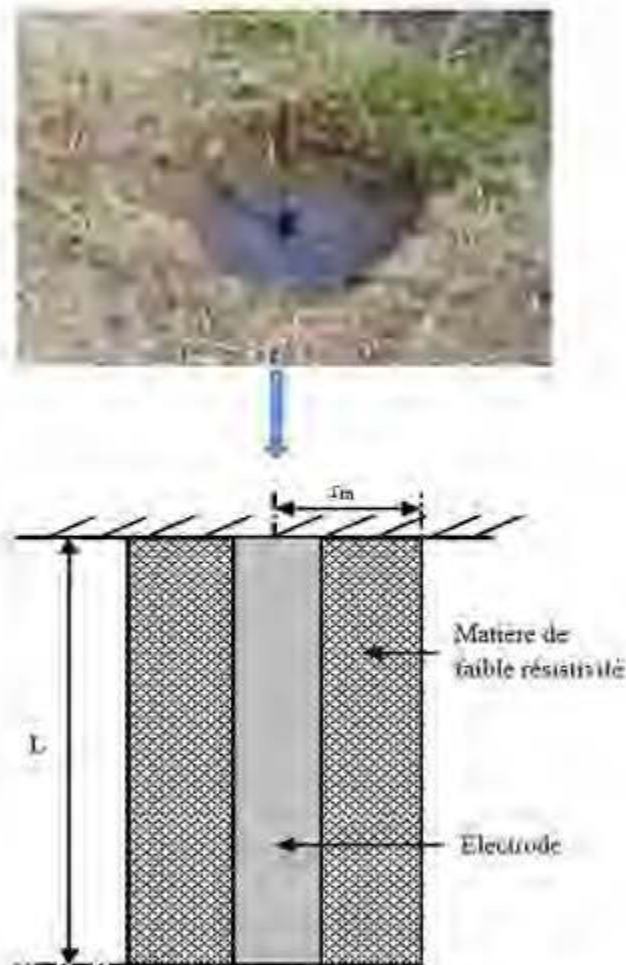


Figure 3-9 : Ajout d'une matière de faible résistivité autour de l'électrode

Une relation analytique a été développée (3.10) pour évaluer la résistance d'une électrode verticale. [25]

$$R_m = \frac{1}{2\pi l} \left\{ \rho_m \left[\ln \left(\frac{r_m}{r} \right) \right] + \rho \left[\ln \left(\frac{4l}{r_m} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3.10)$$

Où l , est la longueur du piquet, ρ la résistivité du sol, ρ_m est la résistivité de la matière autour de l'électrode, r le rayon de l'électrode et r_m le rayon de la matière autour de l'électrode.

La variation de la résistance de terre en fonction de la longueur de l'électrode de terre sans et avec la couche de bentonite est représentée par la figure 3-10. [26]

Cette courbe est tracée pour une électrode verticale en cuivre de rayon 4 mm, enfouie dans un sol de résistivité 1300 $\Omega.m$.

La résistivité de la matière entourant l'électrode étant de 10 $\Omega.m$.

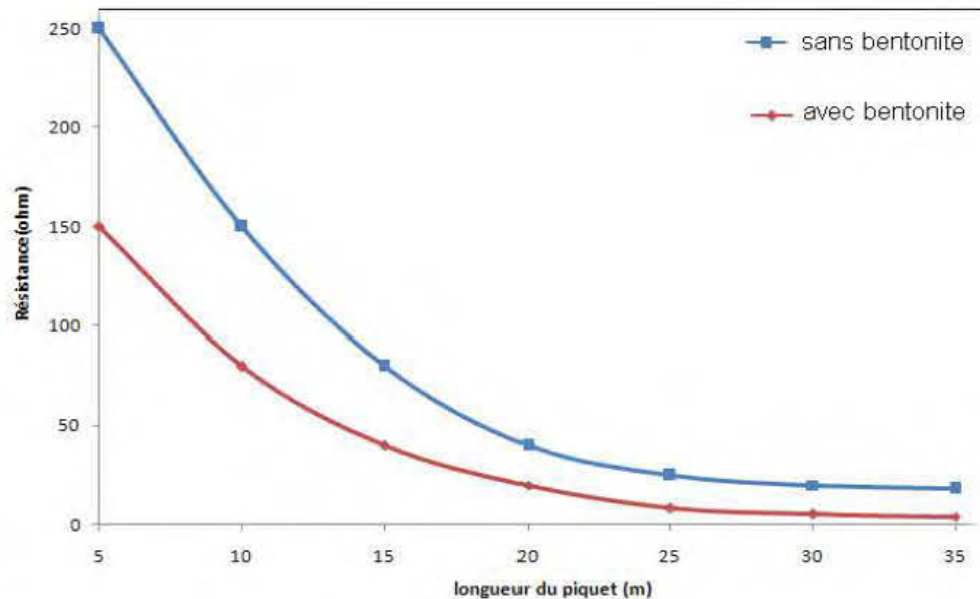


Figure 3-10 : Caractéristiques $R=f(l)$ sans et avec la couche de bentonite

D'autres méthodes proposées dans [27], basées sur l'augmentation de la teneur en humidité du sol (augmentation de la teneur en humidité de 5 à 10% abaisse la résistivité de façon significative) et le traitement de sol avec du sel infiltré (sulfate de cuivre, le magnésium le sulfate ou chlorure de sodium). Cette dernière implique beaucoup moins de travaux d'entretien, car elle est durable et plus pratique.

Une nouvelle technique pour réduire la résistance de sol. Cette méthode nécessite trois étapes [28] :

- Faire des trous profonds dans le sol
- Faire des fissures dans le sol à l'aide des explosifs dans les trous
- Remplir les trous avec des matériaux de faible résistivité sous pression

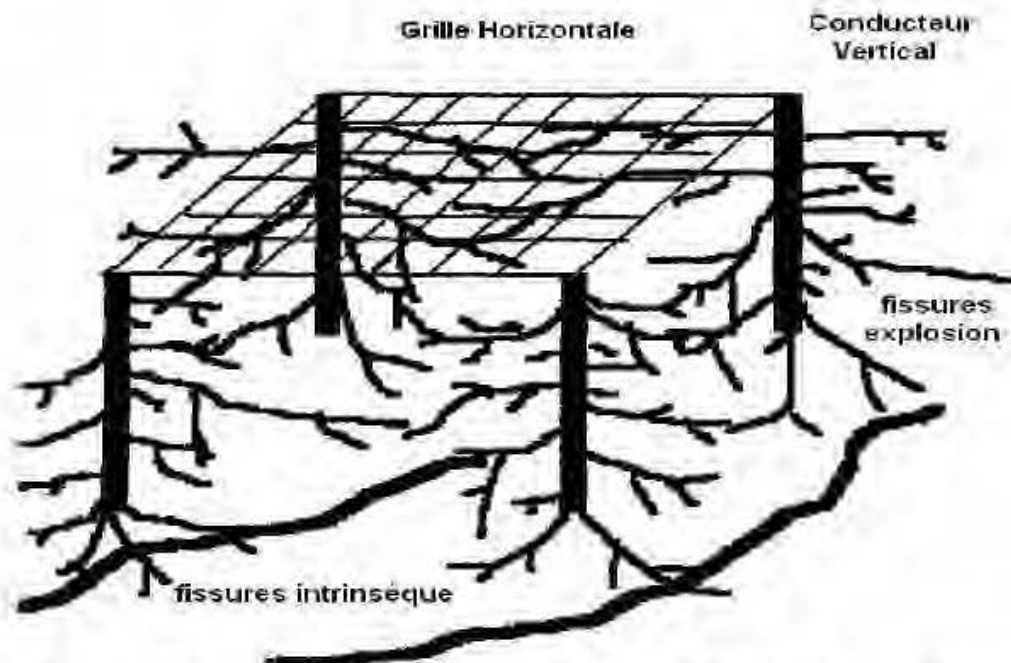


Figure 3-11 : Réseau de terre avec des fissures de faible résistivité [28]

Une nouvelle technique basée sur les trous profonds dans le sol (Figure 3-12). Cette technique a été appliquée dans les zones où la terre contient beaucoup d'eaux souterraines. [29]

Le puits de sol est formé par un tube métallique avec des ouvertures latérales qui permettent la pénétration d'eau souterraine. Ces derniers se déplacent sur le sol profond sous pression dans le but de diminuer la résistivité de la région du sol entourant la mise à la terre, et donc de diminuer la résistance de mise à la terre.

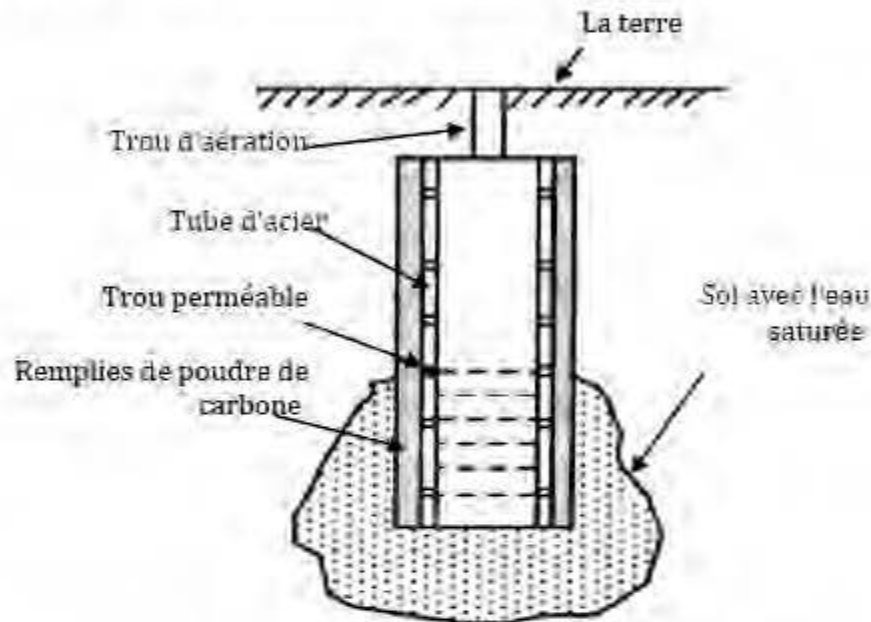


Figure 3-12 : Prise de terre avec trous profonds [30]

3.8 Comportement typique d'une mise à la terre

L'influence de l'inductance, de la capacité et de décharge électrique dans le sol peuvent se manifester de diverses manières selon le type d'installation.

La figure 3-13 présente le schéma global d'un système de protection contre la foudre parcourue par un courant de foudre, représenté ici par un générateur de courant.

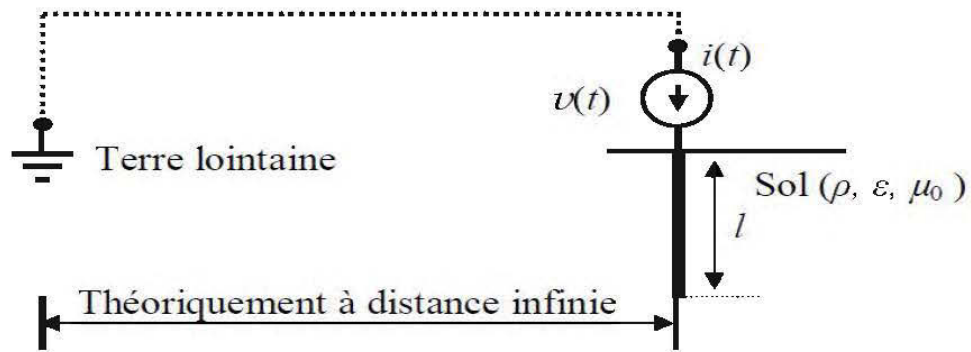


Figure 3-13 : Modélisation d'un piquet de terre écouant un courant transitoire

La notion d'impédance transitoire permet de caractériser quantitativement le comportement d'une prise de terre en régime transitoire d'une manière très commode [30]. On définit l'impédance transitoire d'une prise de terre comme suite :

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (3.11)$$

Ou $v(t)$ est la tension transitoire au niveau du site d'injection

$i(t)$ - Courant de foudre

$z(t)$ - Impédance transitoire de mise à la terre à l'instant t .

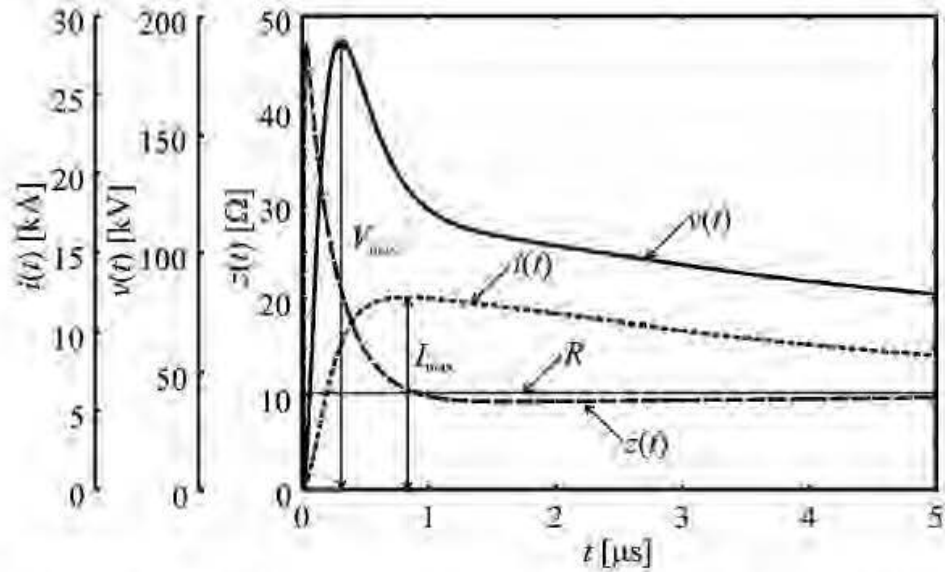


Figure 3-14 : Courant, tension et l'impédance transitoire le long de la mise à la terre

Lors du passage d'un courant de foudre dans une telle prise de terre, son comportement est déterminé par l'apparition de décharges dans le sol. Le passage du courant i engendre une augmentation de la tension $v(t)$ tel qu'illustré à la figure 3-13. Au début, le courant est faible et la tension développée est proportionnelle à la résistance stationnaire R . Lors de l'apparition de canaux de plasma, l'accroissement de la tension devient plus faible que celle du courant. Ainsi, la tension atteint sa valeur crête, avant que le courant n'atteigne la sienne, puis commence à diminuer même si le courant augmente encore. Après le courant atteint sa valeur crête et plus tard le courant et la tension diminuent presque en même temps.

L'impédance de terre transitoire $z(t)$ en fonction du temps est inférieur ou égal à la résistance de terre stationnaire R . La résistance de choc définie à l'équation (3.12) est donc aussi inférieure à R .

$$R_c = \frac{u_{cr}}{i_{cr}} \leq R \quad (3.12)$$

3.9 Conclusion

Une description des facteurs influençant le comportement des systèmes de mise à la terre a été présentée dans ce chapitre.

Vu l'importance de l'ionisation, l'étude du phénomène de la décharge atmosphérique généré par un impact de foudre dans le sol est un problème complexe qui doit être traité dans sa globalité.

Dans une seconde phase, les différentes méthodes d'évaluation de la résistivité et la résistance de mise à la terre ont été présentées, en terminant avec le comportement typique d'une électrode de terre.

CHAPITRE 4

MODÈLES ET MODÉLISATION DES SYSTÈMES DE MALT SOUMIS A UNE DÉCHARGE ATMOSPHERIQUE (FOUDRE)

4.1 Introduction

Les différents systèmes de mise à la terre, telles que, les électrodes horizontales, verticales et de grandes grilles de mise à la terre, font souvent partie du système de protection contre la foudre dans les installations industrielles et de puissance.

L'étude du comportement transitoire d'un système de mise à la terre est basée soit sur la théorie des circuits [31,32] ou la théorie électromagnétique [33], dont elles peuvent être utilisées pour calculer l'impédance transitoire de ce système. Dans le modèle à base de circuits, l'impédance du système de MALT est représentée soit en tant que constante localisée ou sous forme d'un circuit distribué. Les éléments des circuits sont essentiellement R, L, C et G ; leurs valeurs sont calculées en utilisant des formules pertinentes proposées par E. D Sunde [9] et H Dwight [34].

Ces dernières années, des méthodes numériques ont été développées et optimisées pour l'analyse transitoire des systèmes de MALT. La FEM, la méthode des moments, la méthode de calcul de différences finies FDTD (Finite Difference Time Domain), et le modèle des lignes de transmission sont une partie de l'état de l'art des techniques. [16]

4.2 Les différentes configurations des systèmes de MALT

Les systèmes de mise à la terre se réfèrent à un fil métallique de différentes structures géométriques, qui sont enterrées dans le sol. La figure 4-1 montre les structures de mise à la terre couramment utilisées, un seul fil de mise à la terre horizontale, tige verticale, conducteur sous forme d'anneau et la grille de mise à la terre avec une grande surface, ou une combinaison appropriée aux différentes structures Figure4-2.

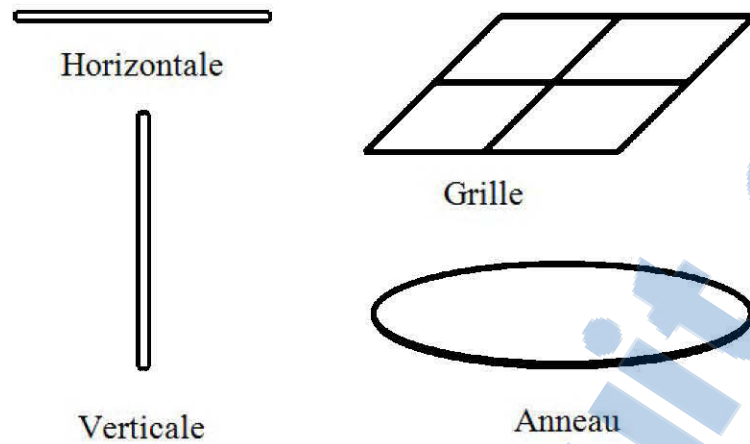


Figure 4- 1 : Configuration des structures de mise à la terre courantes

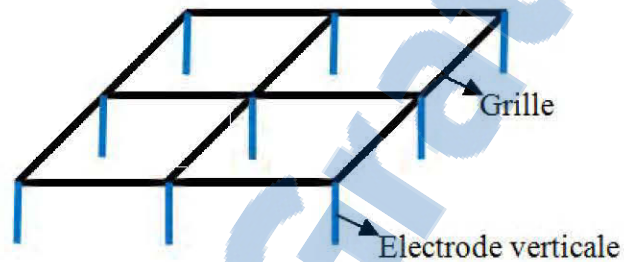


Figure 4-2 : Combinaison grille et électrodes verticales

4.3 Les méthodes analytiques et empiriques dans la modélisation des câbles de mise à la terre

Dans le cadre de la protection contre les décharges atmosphériques, des méthodes expérimentales et théoriques sur le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre ont été réalisées pour la première fois par Bewley, où il a tiré l'impédance d'entrée au point d'injection pour une tension appliquée (échelon unité). [19]

$$Z_c(t) = \frac{1}{Gl_c \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8e^{-\delta t}}{(2k-1)^2 2\pi^2} \left[\cos \omega_k t + \left(\frac{G}{4\omega_k C} - \frac{\omega_k C}{G} \right) \sin \omega_k t \right] \right\}} \quad (4.1)$$

$$\omega_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2k-1)^2 2\pi^2}{LCl_c^2} - \frac{G^2}{C^2}} \quad (4.2)$$

$$\delta = \frac{G}{2C} \quad (4.3)$$

Tel que G, L et C sont les valeurs par unité de longueur de la conductance, l'inductance et la capacitance de l'électrode respectivement.

l_c : Est la longueur de l'électrode de terre.

L'équation (4-1) indique que l'impédance transitoire d'un système commence avec un effet initial d'impédance de surtension $\sqrt{\frac{L}{C}}$ et se termine avec l'effet de résistance de fuite finale $\frac{1}{Gl_c}$.

Le temps de transition entre ces deux effets dépend de la résistivité du sol et de la surtension. Des détails ont été décelés dans son livre "Travelling waves in transmission systems". [35]

Bellaschi et Armington [36] ont calculé analytiquement la tension de réponse des électrodes de mise à la terre au point d'injection pour des impulsions de courant avec des formes d'ondes différentes. Ils ont donné les expressions de la tension développée au point d'injection par une série lentement convergente.

➤ Pour une impulsion échelon ($I=1$), la tension de choc au point d'injection est donnée par la relation suivante :

$$e(t) = \frac{I}{G_t} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t}} \right] \quad (4.4)$$

➤ La tension au point d'injection $e(t)$, pour un courant de foudre bi-exponentielle donné par l'équation, $I(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ est donnée par la relation

$$e(t) = I_0 \left[\frac{\sqrt{\frac{L\alpha}{G}} e^{-\alpha t}}{\tan \sqrt{GL}\alpha} - \frac{\sqrt{\frac{L\beta}{G}} e^{-\beta t}}{\tan \sqrt{GL}\beta} + \frac{\alpha - \beta}{G^2 L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2 \pi^2 e^{-\frac{n^2 \pi^2 t}{GL}}}{\left(\alpha - \frac{n^2 \pi^2}{GL}\right) \left(\beta - \frac{n^2 \pi^2}{GL}\right)} \right] \quad (4.5)$$

L est l'inductance de l'électrode, G est la conductance du système, I_0 est la valeur crête du courant d'injection, α et β sont des constantes de temps du courant injecté pour des différentes formes d'ondes.

Ces modèles ont été limités à des systèmes de mise à la terre simple, à savoir l'électrode simple. Pour les systèmes de mise à la terre complexes, tels que les grilles de terre importantes, seule l'analyse empirique de la réflexion pourrait être exploitée. [37]

Des chercheurs ont trouvé, à travers des expériences que la réponse des grilles de terre pour une injection de courant unitaire pourrait être représentée par l'équation (4.5) ; L et G sont les paramètres de l'électrode de mise à la terre, pour lesquels donna la méthode empirique de leur détermination pour le cas d'une grille basée sur des résultats expérimentaux.

Une autre approche plus intéressante et surtout plus puissante est l'utilisation du système de Sunde. [9]

L'approche de Sunde est l'un des manuels les plus importants et classiques des systèmes de terre. Un manuel largement utilisé par de nombreux ingénieurs praticiens pour résoudre les problèmes de terre. Son approche de décrire le système de mise à la terre est basée sur la théorie du champ électromagnétique et les équations de Maxwell. Il a présenté non seulement le calcul de la résistance des différentes structures de mise à la terre, mais il donne aussi une théorie extensive du comportement à haute fréquence

par induction des électrodes de terre. Peut-être Sunde a été le premier à introduire le concept de ligne de transmission avec des paramètres linéiques dépendent de la fréquence pour la modélisation du comportement transitoire des électrodes horizontales avec l'utilisation des équations du télégraphiste :

$$\begin{aligned}\frac{dI(x, j\omega)}{dx} &= -YV(x, j\omega) \\ \frac{dV(x, j\omega)}{dx} &= -ZI(x, j\omega)\end{aligned}\tag{4.6}$$

Z et Y sont l'impédance et l'admittance par unité de longueur de l'électrode de terre, exprimées comme suit :

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})} \log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right) \right]^{-1}\tag{4.7}$$

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1.85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}}\tag{4.8}$$

Tel que ;

$$\gamma^2 = i\omega\mu_0(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})\tag{4.9}$$

- Z_s est l'impédance interne de l'électrode de terre par unité de longueur.
- Y_i est l'admittance par unité de longueur de l'électrode, $Y_i=0$ lorsque l'électrode est en contact parfait avec le sol.
- Γ est la constante de propagation et a est le diamètre d'électrode.

4.4 Méthodes numériques dans la modélisation des systèmes de mise à la terre

La modélisation du comportement transitoire complexe du système de terre soumis à un courant de foudre s'est améliorée au cours de ces dernières années.

Des méthodologies numériques ont été développées et optimisées pour l'analyse transitoire des systèmes de MALT.

Différentes approches présentées dans la littérature pour modéliser l'impact d'une décharge atmosphérique sur une structure filaire comportant une partie enterrée. Les spécificités liées à la modélisation d'une décharge orageuse sur un réseau de terre peuvent être classées comme suit.

1. Modèle des circuits équivalents.
2. Modèle hybride.
3. Modèle des lignes de transmission (Transmission Line Method).
4. Modèle électromagnétique
 - 4.1 Théorie des antennes
 - 4.1.1 Résolution numérique de l'équation intégrale
 - 4.2. Méthode des moments (Method of Moments)

4.4.1 Méthode des circuits équivalents

Afin de déterminer par la théorie des réseaux la répartition des potentiels et des courants, l'électrode de terre (électrode enterrée horizontalement ou verticalement, grille...) est assimilée à des cellules R , L , C et G équivalentes.

Les étapes principales de l'approche par circuit sont les suivantes :

- Diviser le système de mise à la terre en plusieurs segments.
- Créer le circuit équivalent regroupé pour chaque segment et calculer ses paramètres.
- Résoudre les équations nodales du circuit équivalent qui représente le système entier de terre basée sur les lois de Kirchhoff. L'équation nodale peut être présentée sous des formes différentes en fonction du circuit équivalent du système adopté à la

terre [38], les paramètres R , L , C et G caractérisant la cellule sont alors considérés comme étant indépendants de la fréquence. Puis, le développement des formules basées sur les équations quasi-statiques de Maxwell ont été présentée dans [39], où chaque cellule et courant antérieur dépendent de la fréquence. Ensuite, ce modèle d'un réseau de terre a été simplifié et représenté par des cellules L et G (figure 4-3). [40]

Par conséquent, ce modèle néglige le couplage capacitif aussi.

L'équation nodale de son circuit équivalent est donnée par (4.10)

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{d[I_s]}{dt} - [L]^{-1}[V] \right\} \quad (4.10)$$

$[V]$: Le vecteur nodal de tension

$[I_s]$: Le vecteur nodal de courant d'injection.

$[G]$: La matrice de conductance nodale

$[L]$: La matrice d'inductance nodale

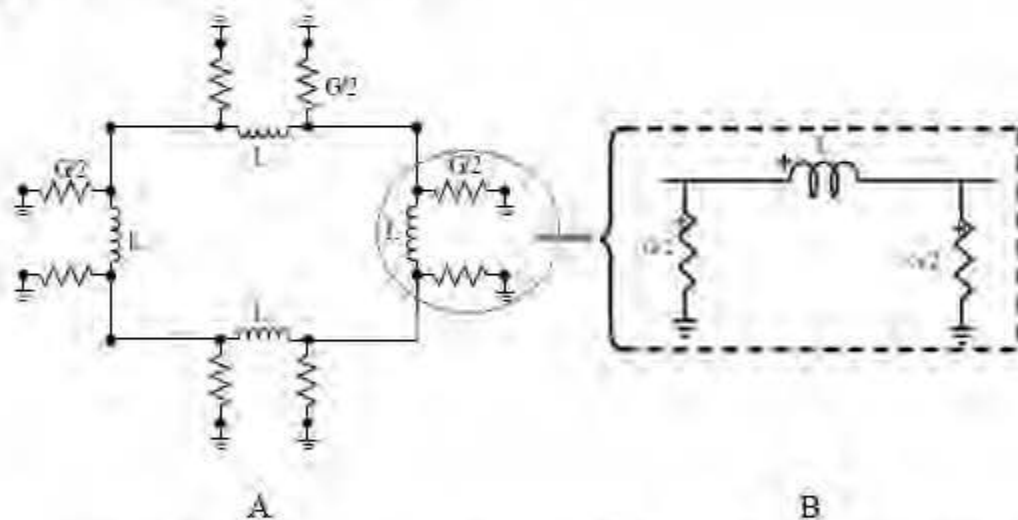


Figure 4-3 : A-Circuit équivalent d'une maille carrée de la grille, B-circuit équivalent d'un côté de la maille

Dans la méthode du circuit équivalent, deux modifications dans le circuit basé sur les travaux présenté dans [38] ont été publiées dans [41] et [42], et les deux ont inclus le

phénomène d'ionisation des sols dans leurs modèles, ce qui fut probablement la première tentative pour l'analyse transitoire du système de mise à la terre.

L'équation nodale du circuit équivalent de la figure 4-4 du système de mise à la terre a été résolue dans le domaine fréquentiel.

$$[I_s] = [K]^T [G] \cdot [K][V] + [Y][V] \quad (4.11)$$

$[I_s]$ est le vecteur nodal de courant de source

$[K]$ est une matrice constante qui est liée aux vecteurs colonnes de la branche $[K]$ $[V]$ et vecteur colonne des tensions nœuds $[V]$

$[G]$ est la matrice qui comprend des effets conducteurs et $[Y]$ est la matrice d'admittance du circuit comprenant des effets résistifs et inductifs.

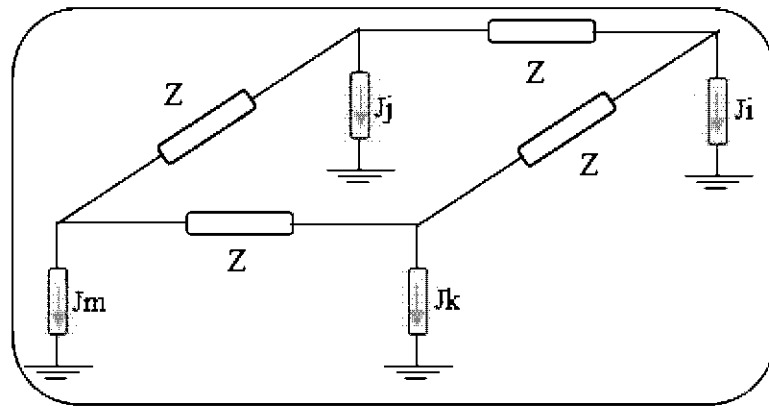


Figure 4-4 : Circuit équivalent du système de mise à la terre [42]

L'approche 'théorie des circuits' est la plus simple et la plus facile à mettre en œuvre, notamment puisque l'analogie avec des circuits électriques permet une intégration aisée aux logiciels tels que EMTP et Matlab. De plus, ces modèles permettent la prise en compte des phénomènes non linéaires (ionisation et/ou vitrification du sol).

4.4.2 La théorie des lignes de transmission (TLT)

Souvent utilisée pour l'étude des phénomènes transitoires dans les structures filaires situées au-dessus d'un sol ou d'un plan de masse en général. La première étape de cette approche est liée à la détermination des paramètres linéiques de la structure.

Le concept des lignes de transmission a été appliqué sur l'électrode horizontale de terre, ce qui a été décrit par les équations du télégraphiste suivantes [43]

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dx} + RI = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{dI}{dx} + C \frac{dV}{dx} + GI = 0 \quad (4.13)$$

Dans ce modèle, l'électrode est considérée comme une ligne électrique ouverte à l'une des extrémités, chaque segment de l'électrode est modélisé par un circuit équivalent π comme illustre la figure 4-5.

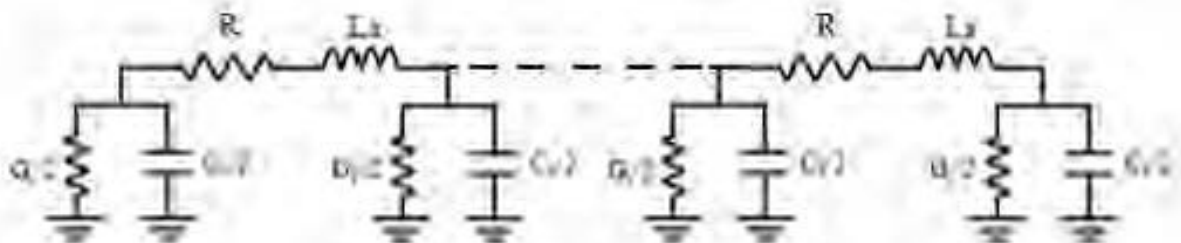


Figure 4-5 : Modèle des lignes de transmission

R : La résistance interne linéique de l'électrode, elle vaut

$$R = \frac{\rho}{S} \quad (4.14)$$

S étant sa section, L est l'inductance mutuelle, C et G sont la capacité et la conductance de terre respectivement

Les étapes principales de la modélisation par la théorie des lignes de transmission sont;

- Segmentation du réseau de terre en éléments linéaires.
- Description par la théorie des lignes.
- Évaluation des éléments constituant le circuit équivalent.
- Résolution par la méthode (FDTD).

Dans le cas d'une électrode enterrée horizontalement, des formules pour le calcul des paramètres impédances et admittances issues de la théorie des antennes, ont été proposées par Sunde. La variation du courant en fonction de l'abscisse x du conducteur est donnée par :

$$I(x) = I_0 e^{-\Gamma x} \quad (4.15)$$

Où Γ est l'exposant linéique de propagation. Les termes ϵ_{sol} et σ_{sol} correspondent respectivement à la permittivité et à la conductivité du sol.

$$\Gamma = \sqrt{i\omega\mu_0 (\sigma_{sol} + i\omega\epsilon_{sol})} \quad (4.16)$$

De plus, la constante de propagation λ , peut s'exprimer en fonction des paramètres impédance Z et admittance Y comme suit :

$$\lambda = \sqrt{ZY} \quad (4.17)$$

$$Z = Z_i + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \log \left[\frac{1.85}{\sqrt{\gamma^2 + \Gamma^2} \cdot \sqrt{2ad}} \right] \quad (4.18)$$

$$Y = Y_i^{-1} + \frac{1}{2\pi(\rho_{sol} + i\omega\epsilon_{sol})} \log \left[\frac{1.12}{\sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{2ad}} \right] \quad (4.19)$$

Où d , a , Z_i et Y_i représentent respectivement la profondeur, le rayon, l'impédance et l'admittance interne du conducteur.

L'impédance de propagation est donnée par la relation

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + jC\omega)}} \quad (4.20)$$

L'impédance de l'électrode de terre Z_R est dans ce cas égale à l'impédance d'entrée Z_{in} , donnée par la relation

$$Z_R = Z_{in} = Z_0 \frac{(Z_R + Z_0 \tanh(y l))}{Z_R \tanh(y l) + Z_0} \quad (4.21)$$

L'électrode est alors modélisée comme une ligne de transmission ouverte à l'extrémité

L'impédance de charge tend alors vers l'infini $Z_R = \infty$

La relation (4.21) devient :

$$Z_{in} = Z_0 \coth(\lambda l) \quad (4.22)$$

Pour une structure complexe, le nombre de lignes devient important et les paramètres R , L , C et G devient difficiles à évaluer sans passer par une modélisation par éléments finis.

L'approche hybride est une combinaison de l'approche de champ électromagnétique et celle des circuits équivalents.

Une approche basée sur le concept de ligne de transmission et la méthode des éléments finis a été présentée dans [39]. Le système de mise à la terre entière devrait être divisé en n segments de petite taille.

Le champ électrique en tout point est donné par (4.23), qui ont été dérivés à partir des équations de Maxwell.

$$\vec{E} = -\text{grad}V - j\omega \vec{A} \quad (4.23)$$

$\vec{A}$: Est le vecteur potentiel magnétique et V est le potentiel scalaire le long de chaque segment k. L'équation (4.23) peut être transformée comme suit :

$$Z_{zk}L_k + \sum_{i=1}^n (V_k - V_i) + j\omega \sum_{i=1}^n \int_{I_k} \vec{A}_{ik} di = 0 \quad (4.24)$$

Z_{zk} Est l'impédance série interne du segment k, V_k et V_i sont les potentiels des segments k et i.

L'équation (4.24) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$Z_{zk}L_k + \sum_{i=1}^n (C - G)_{ik} I_{ik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik} I_i = 0 \quad (4.25)$$

Dans cette approche, les composants inductifs et capacitifs de conducteur sont inclus, ce qui rend cette approche plus précise.

4.4.3 Modèle électromagnétique d'une mise à la terre

Généralement, c'est un modèle développé en utilisant le NEC-4, qui se base dans son concept sur la théorie des antennes.

4.4.3.1 Théorie des antennes

La théorie des antennes représente une méthode plus rigoureuse pour l'étude des phénomènes transitoires sur les réseaux de terre.

Elle est basée sur une formulation intégrale de domaine fréquentiel, et sur le traitement des équations de Maxwell par la méthode des moments, le passage en temporel se fait à l'aide de la transformée de Fourier inverse.

4.4.3.2 Résolution numérique de l'équation intégrale

Depuis l'évolution des techniques numériques et informatiques, l'équation intégrale en champ électrique (EFIE) est résolue par la méthode des moments.

Pour une électrode verticale droite de longueur l et de rayon a , enterré dans une profondeur d (l'électrode est supposée un fil mince parfaitement conducteur), le point de départ dans le modèle mathématique est l'évaluation de la distribution de courant induit sur l'électrode verticale due à une excitation temporelle et pour un certain nombre de fréquences dans une bande de fréquence d'intérêt. Cette distribution de courant est obtenue par la résolution d'équation intégral-différentielles de Pocklington.

Cette équation peut être obtenue en exprimant le champ électrique en fonction du potentiel vecteur d'Hertz et en satisfaisant les conditions aux limites des composantes du champ tangentiel sur la surface de l'électrode.

Le champ électrique induit dans le voisinage de l'électrode enterrée dans un demi-espace imparfaitement conducteur peut être exprimée en terme de vecteur potentiel de Hertz noté Π .

$$\vec{E} = \nabla \left(\nabla \cdot \vec{\Pi} \right) + K_1^2 \vec{\Pi} \quad (4.26)$$

K_1 est le coefficient de propagation dans le sol

$$K_1^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_{eff} \quad (4.27)$$

Et ϵ_{eff} désigne la permittivité complexe du sol

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (4.28)$$

Où ϵ_r et σ sont la permittivité relative et la conductivité du sol, respectivement, et ω désigne la fréquence de fonctionnement.

Le développement des ressources informatiques a largement contribué à l'usage des méthodes matricielles, connues sous le nom de méthode des moments.

4.4.3.3 Méthode des moments

La méthode des moments est une technique très générale de résolution d'équations fonctionnelles, développée par Harrington pour des équations intégral-différentielles de l'électromagnétisme, cette technique numérique permet de résoudre efficacement les équations intégrales en les transformant à un système matriciel résolu par des calculateurs.

4.5 Modélisation des systèmes de MALT en utilisant la méthode des circuits équivalents sous Matlab SIMULINK (SimPowersystems)

L'étude des réseaux passe inévitablement par la modélisation des lignes (aériennes ou souterraines). Il est donc nécessaire de disposer d'équations permettant de relier les tensions en extrémité des lignes ainsi que les courants y circulant avec les grandeurs électriques du reste du réseau.

De nombreux travaux permettent l'étude de la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre sous EMTP, d'autres peuvent être réalisées par des programmes de simulation standard, tels que PSCAD et de l'ATP. [44, 45]

Dans notre travail on utilise le modèle RLC et on considère le système comme une ligne, ou un ensemble de lignes.

Notre étude a été réalisée sur une électrode horizontale, électrode verticale et sur des électrodes en forme de grille, nous élaborons alors un modèle décrivant son comportement dynamique pour les études de régime transitoire en temporel, pour ce faire, un modèle mathématique efficace basé sur l'approche par circuit est incorporé sous la plateforme MATLAB/Simulink (SimPowerSystems), en passant par une

validation du modèle avec le modèle analytique de Bellaschi et Arrington donne précédemment.

Les paramètres R , L , C et G sont calculés à partir des formules analytiques pertinentes proposées par Sunde, les résultats des simulations seront présentés dans le chapitre 5.

4.5.1 Paramètres de modélisation d'une MALT

Après avoir estimé les paramètres des conducteurs de terre par unité longueur, le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre peut être simulé sur la base de l'approche de la ligne de transmission. Depuis, un circuit localisé (voir figure 4-6), peut être utilisé pour représenter une ligne de transmission divisée en plusieurs sections [19]

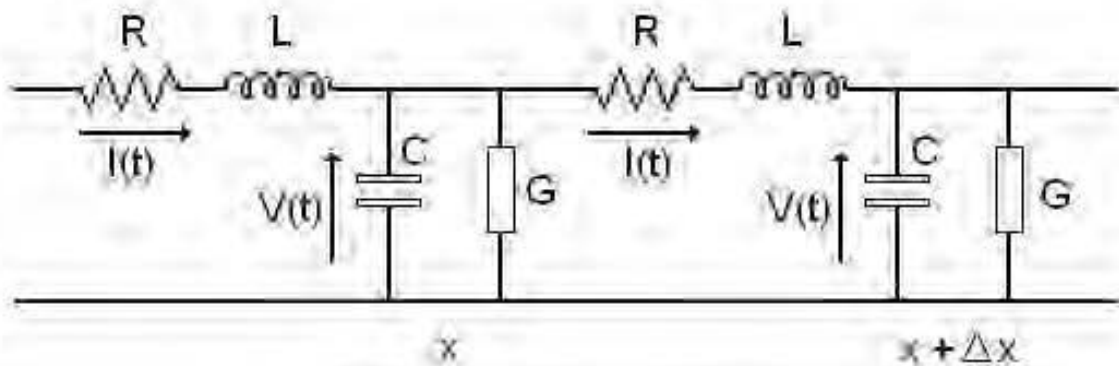


Figure 4-6 : Ligne de transmission

Chaque élément linéaire peut être modélisé avec le schéma de remplacement approprié (Γ , Π , T). La figure 4-7 montre le système de mise à la terre avec un élément linéaire accentué par :

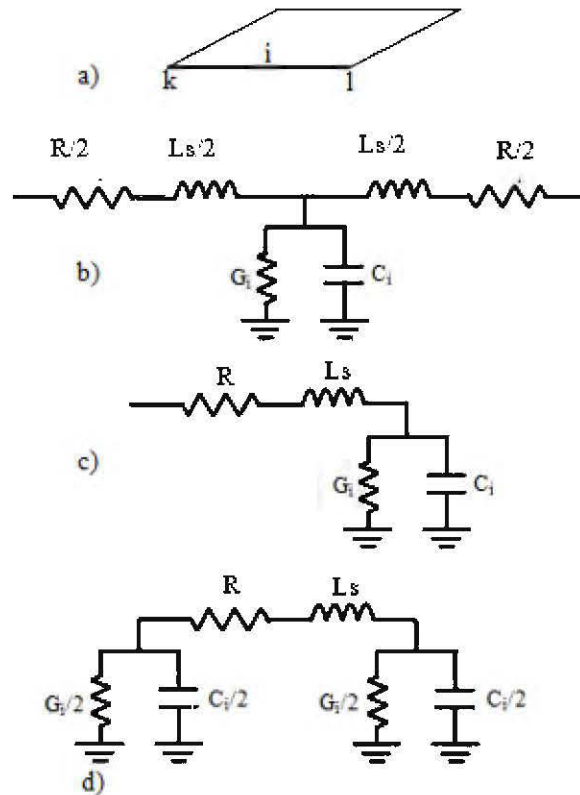


Figure 4-7 : a) Grille de mise à la terre avec une maille avec les trois modèles de l'élément (kl) ; b) modèle en T; c) modèle de Γ ; d) modèle en II.

R : Résistance interne élémentaire

L_s : L'inductance élémentaire

G_i : Conductance élémentaire et C_i - Capacité élémentaire

Un modèle de circuit équivalent a été proposé pour simuler l'électrode de mise à la terre dans des conditions transitoires. Ce modèle comprend des éléments et peut facilement être simulé dans les programmes transitoires.

La figure 4-8 montre un schéma de principe et le modèle de circuit équivalent RLC d'une typique électrode de mise à la terre, comme indiqué à la figure suivante.

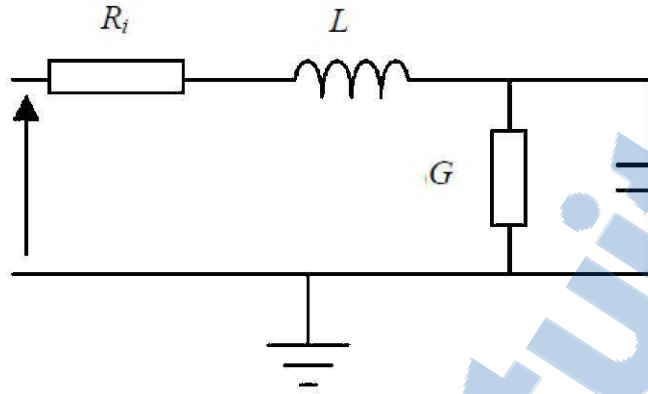


Figure 4-8 : Modèle du circuit RLC

Ce modèle est utilisé avec l'hypothèse d'approximation quasi-statique, ce qui signifie que l'effet du retard dans la propagation des ondes est négligé. Cela revient au même de dire que l'on néglige la dimension du dispositif devant la longueur d'onde de l'onde électromagnétique (régime harmonique). [46]

Cette hypothèse n'est valable que pour des longueurs de l'électrode de l'ordre,

$$l = \frac{\lambda}{10} \quad (4.29)$$

λ : est la longueur d'onde dans le sol. Elle dépend des paramètres électriques du sol, donné par la relation (4.30). [47]

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\epsilon\mu_0}} \left\{ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (4.30)$$

ω : est la pulsation de l'onde (liée à la fréquence par la relation $\omega = 2\pi f$), ϵ , μ_0 et σ sont respectivement la permittivité diélectrique, la perméabilité magnétique et la conductivité électrique du sol.

Les paramètres du modèle global sont déterminés par les formules pertinentes de Sunde [9] et Dwight [34].

Pour une électrode horizontale et verticale dans un sol uniforme, la résistance du système est donnée par les équations (4.31) et (4.32) respectivement.

La résistance interne du conducteur est donnée par l'équation (4.33).

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (4.31)$$

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{l}{r} \right) \quad (4.32)$$

$$R_i = \frac{l}{\sigma_i S} \quad (4.33)$$

Où

ρ : Est la résistivité du sol (en ohms-mètres)

l : La longueur de l'électrode (en mètres)

r : Le rayon de l'électrode (en mètres) et h est la profondeur d'enfouissement (en mètres).

L'inductance d'une électrode horizontale et verticale dans un sol uniforme donnée respectivement en (4.34) et (4.35).

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right) \quad (4.34)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{4l}{r} \right) \quad (4.35)$$

Où

μ_0 est la perméabilité du vide

La capacité d'une électrode horizontale et verticale dans un sol uniforme donnée respectivement en (4.36) et (4.37).

$$C = \frac{2\pi\epsilon.l}{\left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2rh}} - 1 \right)} \quad (4.36)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon.l}{\left(\ln \frac{2l}{r} \right)} \quad (4.37)$$

Où ρ est la résistivité du sol (en ohm-mètre) et ϵ est la permittivité du sol (en farads /mètre). La permittivité relative $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ varie en fonction de la teneur en eau et en fréquence.

4.5.2 Modélisation de la source (courant de foudre)

Afin de pouvoir étudier le comportement transitoire des systèmes de MALT parcouru par une décharge orageuse et sa dissipation à travers un réseau de terre, il est important de connaître en premier lieu les caractéristiques du courant de foudre, ainsi que sa vitesse de propagation le long de l'arc en retour.

Les études ont permis de représenter mathématiquement le coup de foudre par un générateur de courant à la base du canal dont l'amplitude peut varier de quelques KA à quelques centaines de KA .

Deux expressions analytiques sont les plus souvent utilisées pour représenter le courant à la base du canal.

La forme d'onde bi-exponentielle est définie mathématiquement par la différence entre les deux exponentielles de décomposition :

$$I(t) = I_m (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.38)$$

Les paramètres α et β sont deux nombres constants en s^{-1} et I_m est un nombre constant défini en KA .

Le temps de montée T_r , définie comme étant la différence de temps qui existe lorsque le signal monte de 10% à 90% de son amplitude maximale :

$$T_r = \frac{2.746}{\beta} \quad (4.39)$$

T_d est définie comme la différence de temps pour laquelle la forme d'onde montante et la forme d'onde de descente sont égales pour être à 50 % de la valeur maximale.

$$T_d = \frac{0.396}{\alpha} \quad (4.40)$$

La figure 4-9 illustre l'allure d'un courant de foudre bi-exponentiel défini par un courant d'injection de forme 2/12.5 $\mu s/\mu s$, pour les deux valeurs $I_m = 12.5KA$ et $10KA$

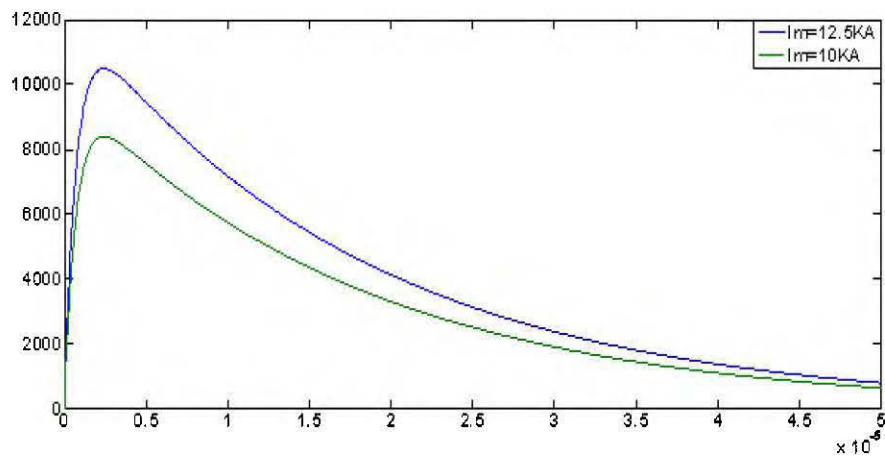


Figure 4-9 : L'allure d'un courant de foudre bi-exponentiel

La nouvelle expression du courant de foudre dite forme de Heidler

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (4.41)$$

Où

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n \cdot \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}}\right) \quad (4.42)$$

η : Le facteur de correction d'amplitude

I_0 : L'amplitude du courant à la base du canal

τ_1 et τ_2 : La constante de temps de front et la constante de décroissance respectivement

n : Un exposant ayant des valeurs comprises entre 2 à 10.

Une autre expression généralement utilisée pour décrire la forme d'onde à la base du canal proposé par Heidler dans le cas d'arcs subséquents est la somme de deux fonctions d'Heidler

$$I(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{\eta_1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right) + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{\eta_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{\eta_2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad (4.43)$$

La Figure 4-10 représente le courant à la base du canal en utilisant l'expression de F. Heidler pour les paramètres suivants. [48]

Tableau 4-1 : Paramètres du courant à la base du canal (fonction de Heidler)

I_{01} (KA)	10.7
τ_{11}	0.25
τ_{21}	2.5
η_1	2

I_{02} (KA)	6.5
τ_{12}	2.1
τ_{22}	230
η_2	2

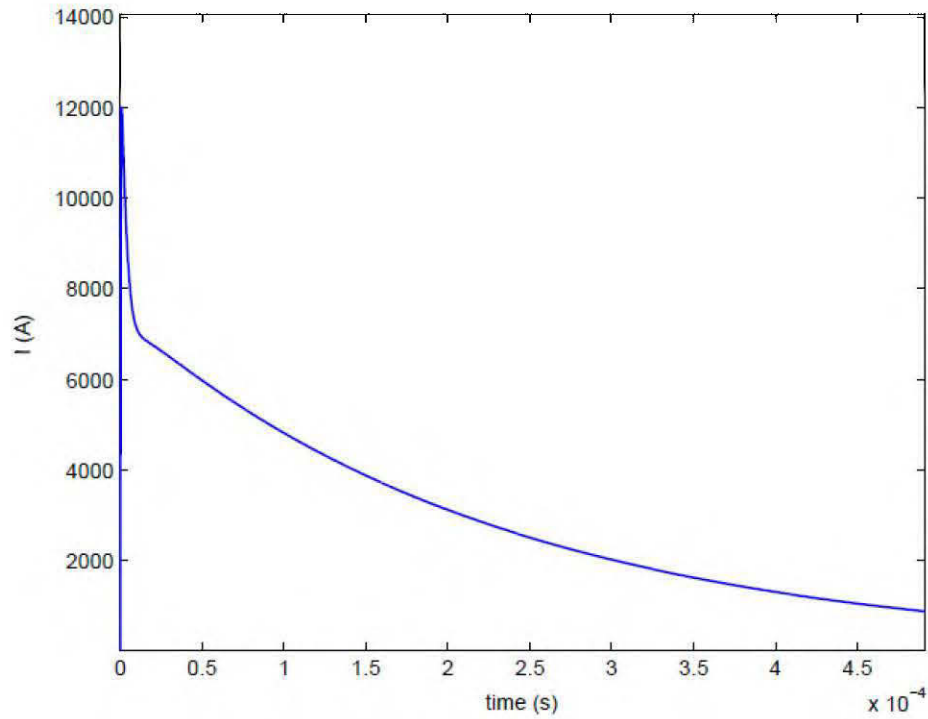


Figure 4-10 : Courant de Heidler

Une autre forme du courant de foudre a été proposée par Nucci et Al [49] pour le cas d'arc subséquent. Ce modèle a été récemment adopté comme une forme standard de nombreux travaux de recherche.

Ce courant est exprimé comme la somme d'une fonction Heidler et une fonction double exponentielle selon l'équation (4.44).

$$i(0,t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + I_{02} \left(\exp\left(-\frac{t}{\tau_3}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_4}\right) \right) \quad (4.44)$$

4.6 Modélisation de l'influence de l'ionisation du sol

En raison de la nature du phénomène étudié, une analyse dans le domaine temporel est plus appropriée pour analyser le système de mise à la terre étant donné l'ionisation du sol.

Plusieurs auteurs ont étudié l'ionisation du sol en utilisant l'approche de ligne de transmission [50], mais les couplages mutuels entre les conducteurs ne sont pas pris en compte.

Lorsque l'intensité du champ électrique dépasse une valeur critique conduit à la formation d'un canal hautement conducteur autour de la terre. L'influence de la zone ionisée peut être modélisée en utilisant une augmentation fictive au niveau du rayon de la mise à la terre. Selon les résultats de la recherche théorique et expérimentale, l'ionisation du sol autour de la mise à la terre conduit à une réduction d'impédance. [19]

La densité du courant de surface est déterminée par l'équation :

$$J_i = \frac{I_{mi}}{2\pi a_i l_i} \quad (4.45)$$

J_i : La densité du courant

I_{mi} : Valeur maximale du courant de drainage

a_i : Rayon équivalent de l'élément

l_i : La longueur de l'élément

Le critère d'ionisation est défini par l'équation :

$$E_i = \frac{\rho I_{mi}}{2\pi a_i l_i} \geq E_{crit} \quad (4.46)$$

E_{crit} : L'intensité du champ électrique critique.

Si le courant de dissipation est suffisamment élevé pour un segment, l'intensité du champ électrique à la surface de ce segment dépasse la valeur d'intensité du champ électrique critique pour l'ionisation du sol, et ensuite, l'ionisation du sol est engagée sur ce segment.

Cette région, appelée ionisée, peut être interprétée comme un type de conductivité irrégulière enroulée autour des conducteurs de mise à la terre. Ce procédé aboutit à une réduction de la résistivité électrique dans la région ionisée. Ce phénomène peut être interprété comme si l'électrode suppose un diamètre supérieur à sa valeur d'origine (figure 4-11).

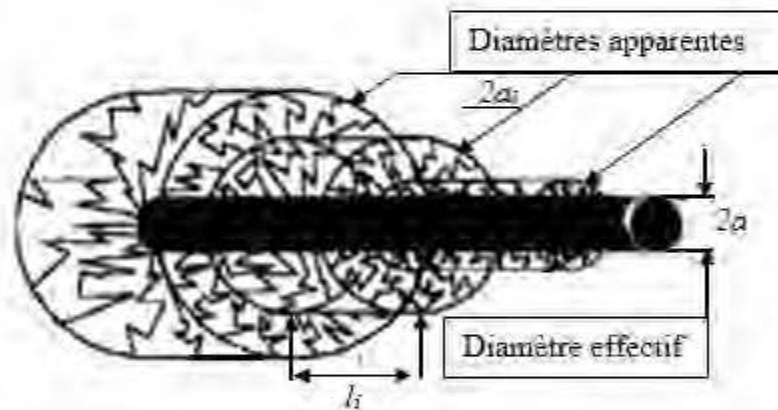


Figure 4-11 : Profil du rayon de l'électrode dans la région ionisée

Le rayon de la zone d'ionisation est augmenté dans une certaine distance, où l'intensité du champ électrique tombe enfin à la valeur critique E_{crit} . Ce rayon est calculé dans l'équation (4.47). [51]

$$a_e = \frac{\rho I_m}{2\pi E_{crit} l_u} \quad (4.47)$$

a_e : Rayon équivalent de tous les éléments de mise à la terre.

l_u : Longueur totale de la mise à la terre.

I_m : La valeur maximale du courant de foudre injecté.

Le rayon a_{ei} de chaque segment est déterminé par l'équation (15), I_{mi} est le courant de dissipation du segment de conducteur à la terre et l_i est la longueur de chaque segment.

$$a_{ei} = \frac{\rho I_{mi}}{2\pi E_k l_i} \quad (4.48)$$

4.7 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre a été consacrée au comportement transitoire des différentes topologies de mises à la terre, tel que des systèmes simples et complexes. Par la suite, on a décrit les différentes approches utilisées dans la littérature pour la modélisation de ces systèmes. Une attention particulière a été portée sur le modèle de ligne de transmission, l'approche par circuit et l'incorporation du modèle dans une plateforme dite SymPowerSysteme.

Dans le chapitre qui suit, nous allons aborder cette technique et on présentera l'étude du comportement transitoire des systèmes de MALT en s'appuyant sur l'influence des différentes géométries des réseaux de terre et les paramètres du sol.

CHAPITRE 5

LES RÉSULTATS DES SIMULATIONS ET LES CALCULS D'IONISATION RÉALISÉS

5.1 Introduction

Dans le présent chapitre, nous commençons par confronter nos modélisations sous Matlab Simulink avec les résultats obtenus par le modèle analytique de Bellaschi et Armington.

Nous présentons les résultats en tenant compte des différents facteurs qui influencent sur la réponse transitoire des mises à la terre horizontale, verticale et grilles, par la suite de différentes formes de grilles sont choisies pour les calculs du phénomène d'ionisation du sol.

5.2 Comportement transitoire des électrodes horizontales et verticales et validation du modèle

L'application concerne une électrode de terre horizontale et verticale en cuivre (figure 5-1 et figure 5-2) de rayon $r = 7 \text{ mm}$, de longueur 10 m, le sol est considéré comme homogène de résistivité, permittivité $\epsilon_r = 15$ et perméabilité $\mu_r = 1$.

Les deux électrodes sont parcourues par le même courant de foudre.

Un courant bi-exponentiel défini par $T_r/T_d = 2/12.5 \text{ } \mu\text{s}/\mu\text{s}$, et $I_m = 12.5 \text{ kA}$, montrée à la figure 5-4.

Tableau 5-1 : Données d'une électrode horizontale et verticale

Électrode horizontale et verticale	Paramètres du sol
$l=10\text{m}$	$\rho=100\Omega.m$
$r=7\text{mm}$	$\epsilon_r=15$
$\rho_{Cu} = 0.0178\Omega mm^2/m.$	$\mu_r=1$

L'électrode horizontale est enterrée à 0,6 m de profondeur dans un sol homogène, les deux électrodes sont représentées dans les figures (5-1) et (5-2).

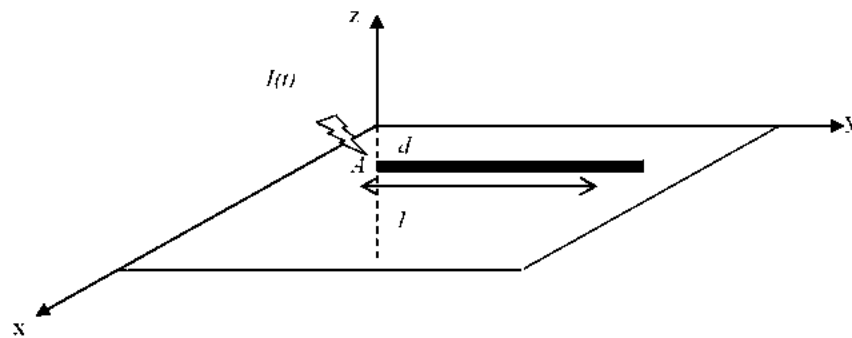


Figure 5-1 : Électrode de mise à la terre horizontale enterrée dans le sol

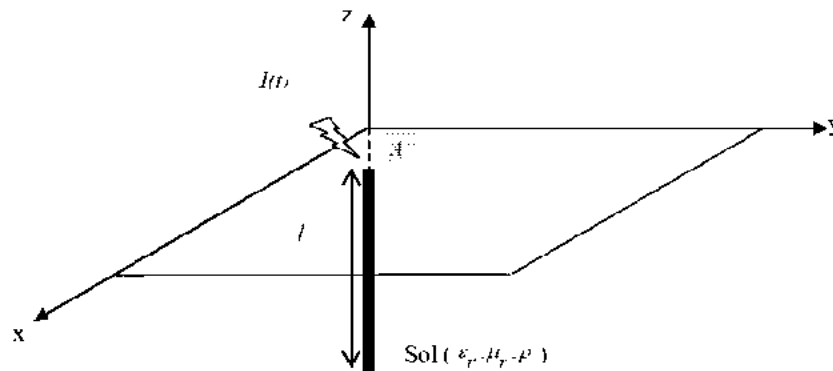


Figure 5-2 : Électrode verticale enterrée dans le sol

La figure 5-3 illustre le modèle d'une électrode horizontale sous Matlab SIMULINK

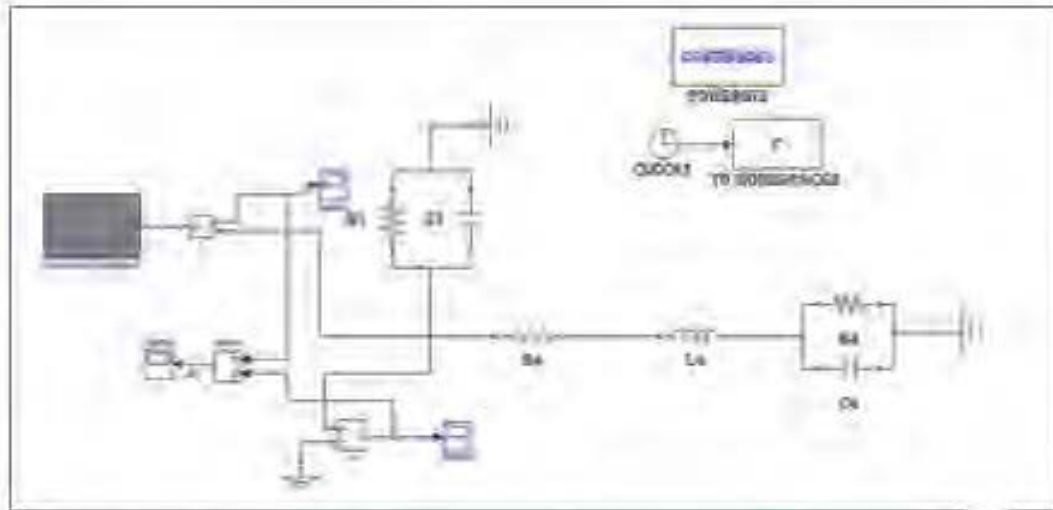


Figure 5-3 : Modèle RLC pour l'électrode horizontale sous Matlab SIMULINK

Les résultats obtenus par le modèle analytique de Bellaschi et Armington et le modèle proposé de l'approche par circuit sont représentés par les figures 5-5 et 5-6.

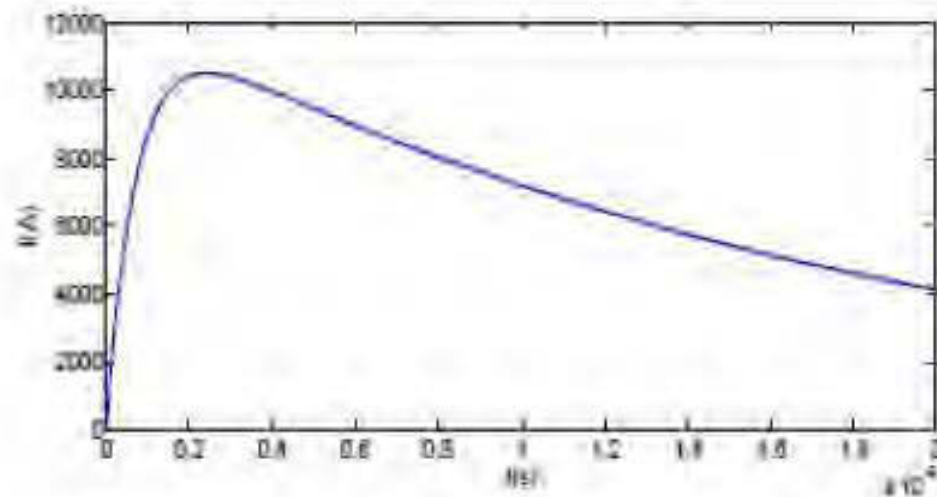


Figure 5-4 : Forme d'onde de courant au point d'injection

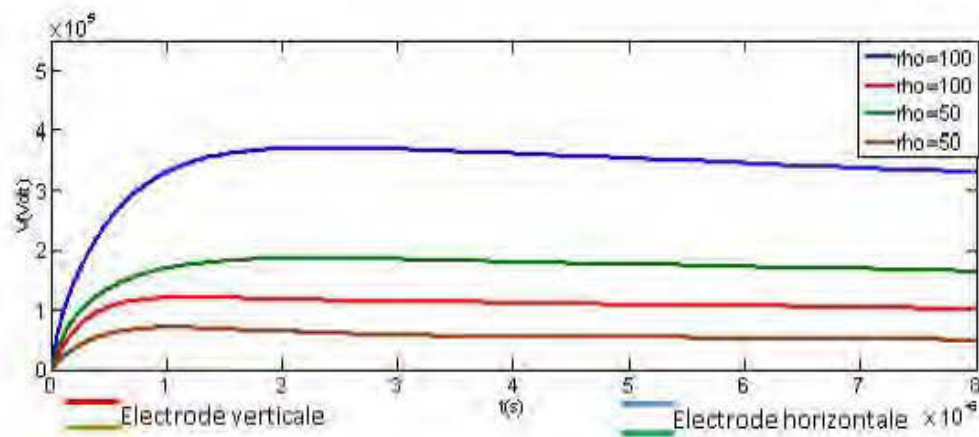


Figure 5-5 : La tension transitoire a deux résistivités différentes au point d'injection A, modèle proposé

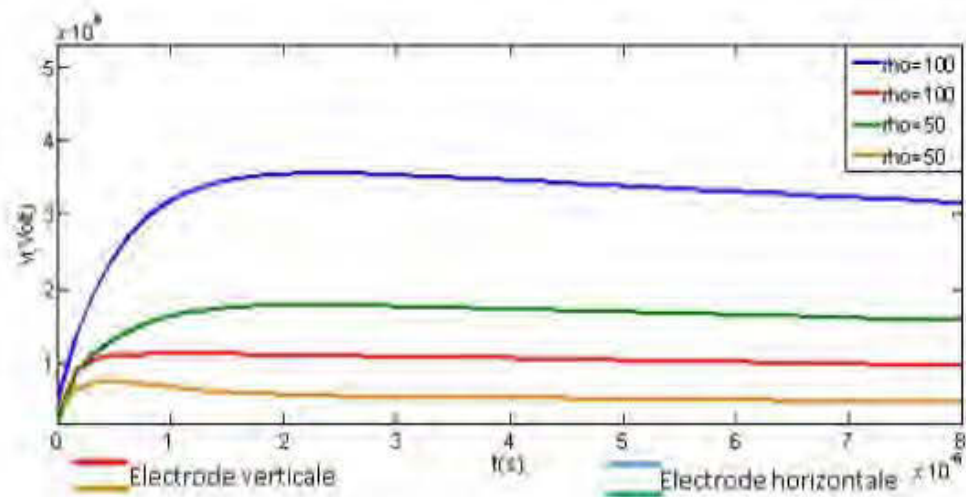


Figure 5-6 : La tension transitoire a deux résistivités différentes au point d'injection A, modèle analytique

L'allure des deux modèles montre l'influence de la résistivité sur le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre. L'augmentation de la résistivité de terre conduit à l'augmentation du potentiel au point d'injection.

Les résultats obtenus (figure 5-5) en utilisant le modèle proposé ainsi que les mesures effectuées par le modèle analytique (figure 5-6) sont introduites pour but de comparaison (figure 5-7)

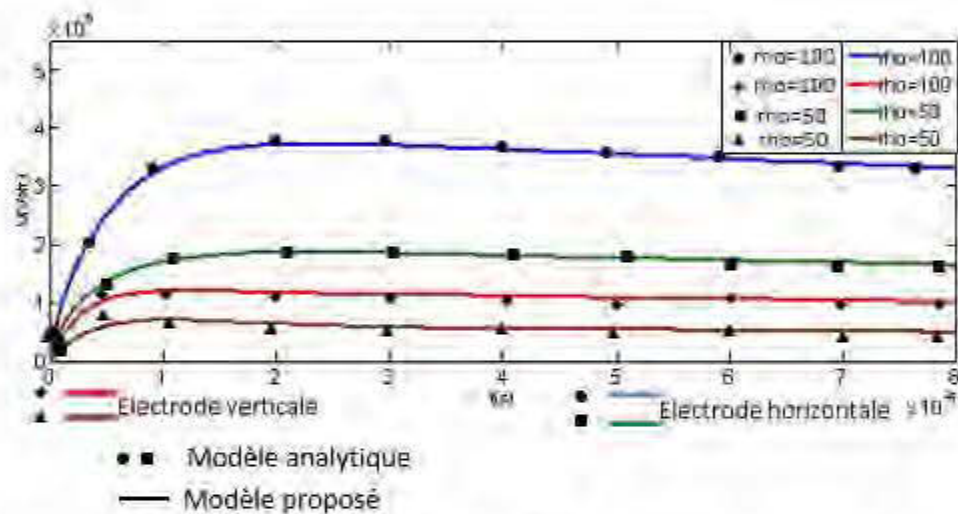


Figure 5-7 : Comparaison des deux modèles analytique et proposé

La même remarque pour l'électrode horizontale que pour l'électrode verticale avec un petit décalage temporel intervient entre les différents résultats.

Les deux figures montrent un bon accord dans les résultats obtenus par les deux modèles (proposé et analytique) pour les deux électrodes de terre horizontale et verticale.

5.3 Grille de mise à la terre

Deux grilles de mises à la terre, 1*1 et 2*2 avec des dimensions de 12m par 12m et 6m par 6m pour chaque maille respectivement [voir Figure 5-8 et Figure 5-12] et 3*3 avec des dimensions 4m par 4m pour chaque maille [voir figure 5-15].

Le diamètre des conducteurs est de 14mm. Toutes les grilles sont enterrées à 0,6 m de profondeur dans un sol homogène, $\epsilon_r = 15$ et l'impulsion de courant est injecté au point A, la forme d'onde du courant est caractérisée par $T_r / T_d = 2 / 12,5 \mu s / \mu s$ et $I_m = 12,5 \text{ KA}$, $\rho_{cu} = 0,0178 \Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$.

L'analyse a été effectuée pour différentes valeurs de la résistivité du sol, $\rho (\Omega \cdot \text{m}) = \{100, 300, 600, 1000\}$.

5.3.1 Grille de mise à la terre 1*1

Les Figures 5-8 et 5-9 représentent respectivement une grille à une seule maille dans le sol et le circuit équivalent d'une maille carrée de cette grille sous MATLAB Simulink.

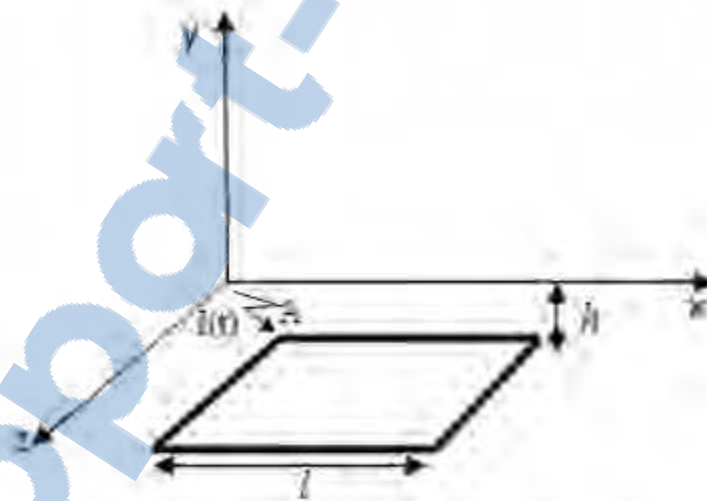


Figure 5-8 : grille 1 * 1 enterré dans le sol

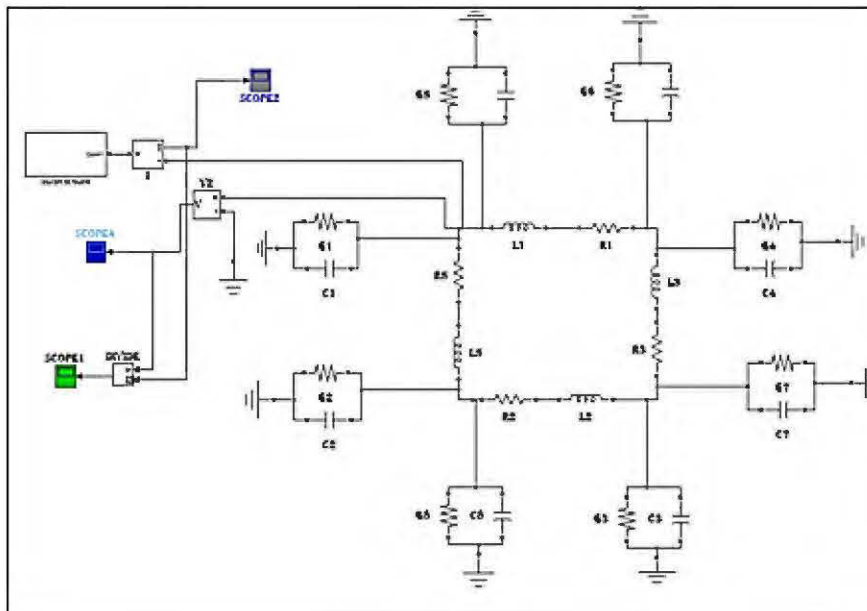


Figure 5-9 : Circuit d'une maille carré de la grille sous Matlab Simulink

La tension transitoire et de l'impédance sont illustrées sur les figures 5-10 et 5-11, pour différentes résistivités de terre.

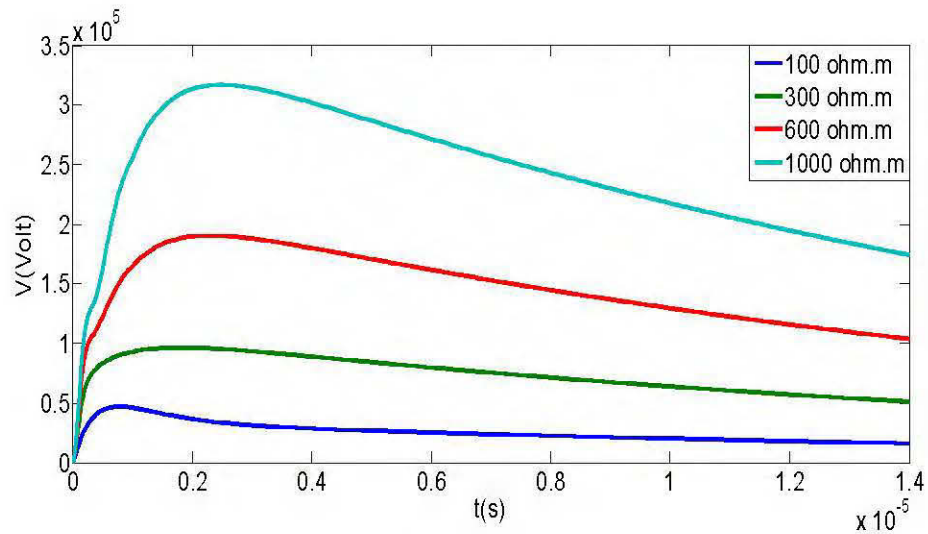


Figure 5-10 : Tension transitoire au point d'injection A, avec des résistivités différentes

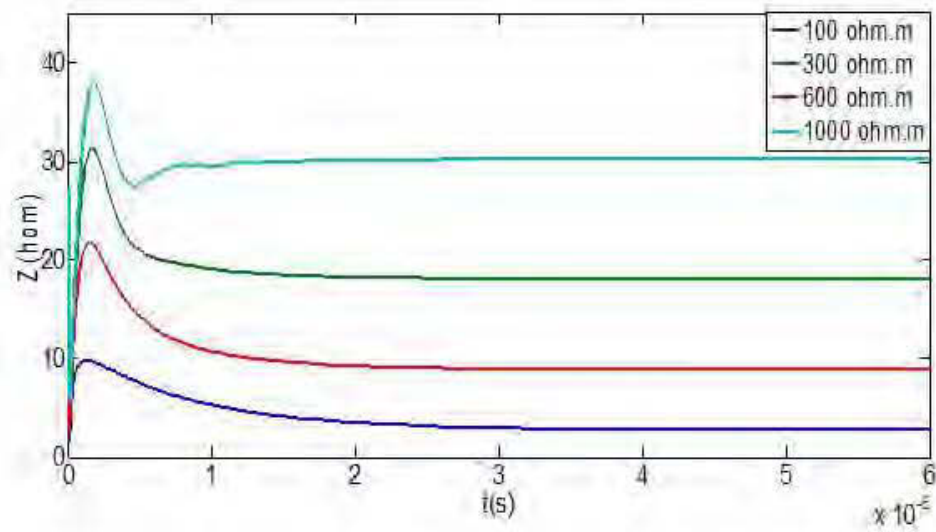


Figure 5-11 : Impédance transitoire au point A, avec des résistivités différentes

5.3.2 Grille de mise à la terre 2 * 2

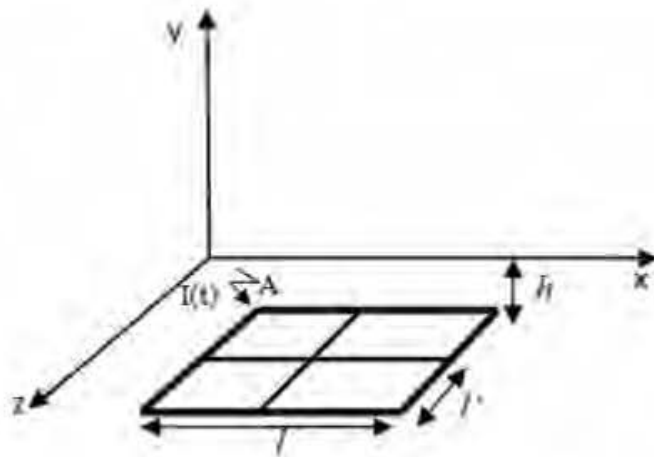


Figure 5-12 : Grille 2 * 2 enterré dans le sol

Résultats de simulation :

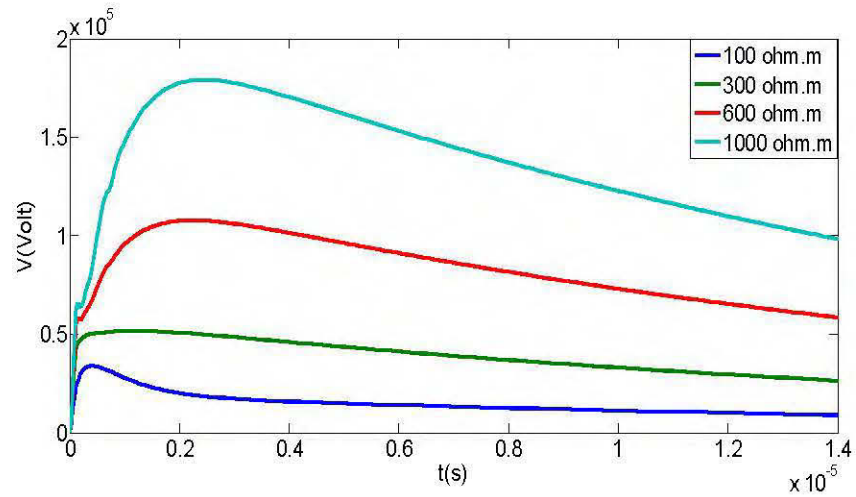


Figure 5-13 : Tension transitoire au point d'injection A, avec quatre résistivités différentes

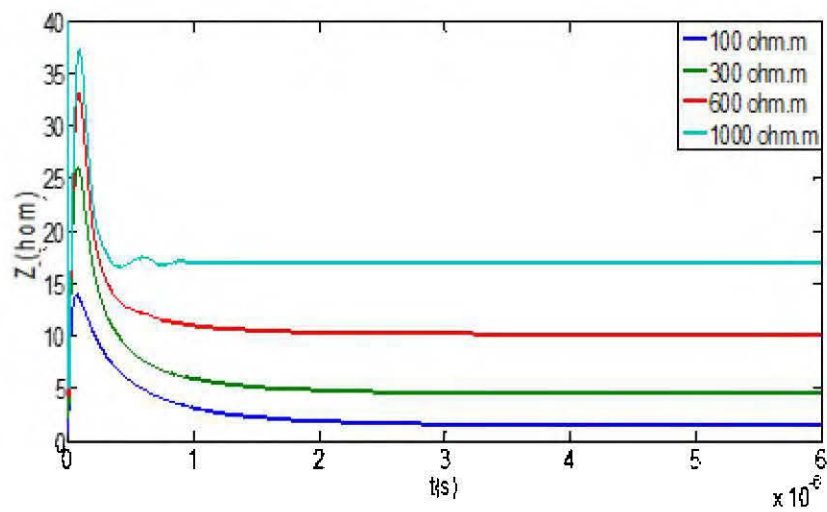


Figure 5-14 : L'impédance transitoire au point d'injection A, avec différentes résistivités

5.3.3 Grille de mise à la terre 3 * 3

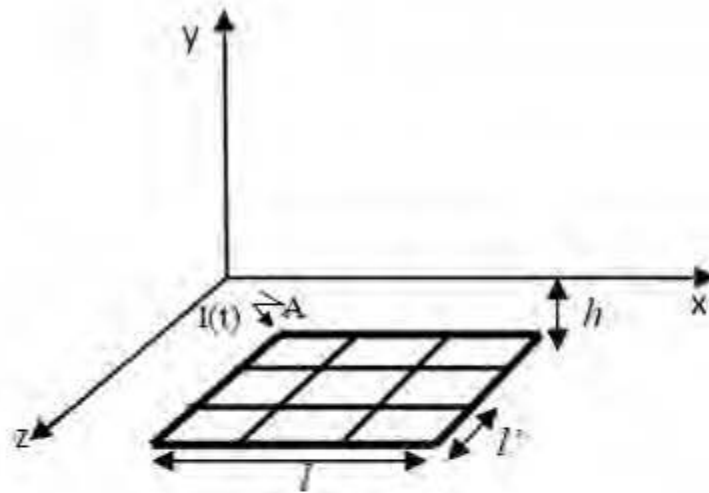


Figure 5-15 : Grille 3 * 3 enfouis dans le sol

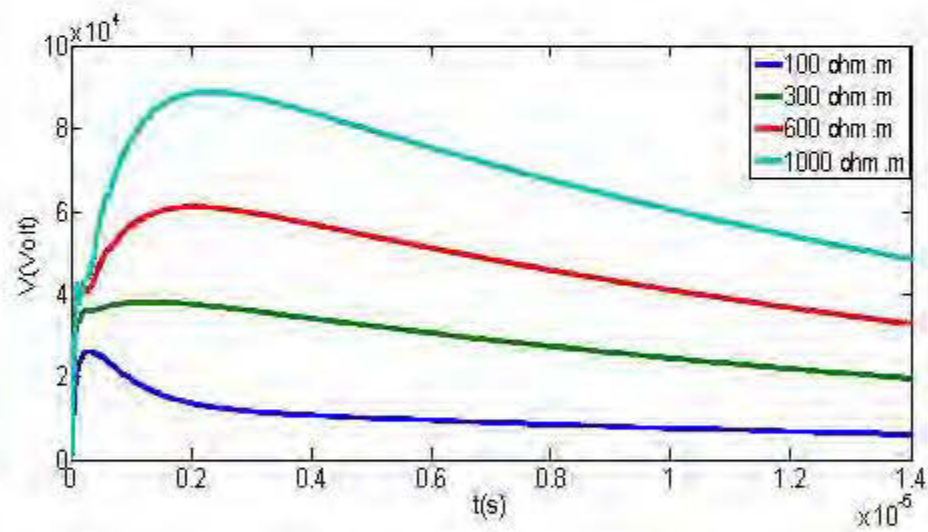


Figure 5-16 : Tension transitoire au point A, avec différentes résistivités

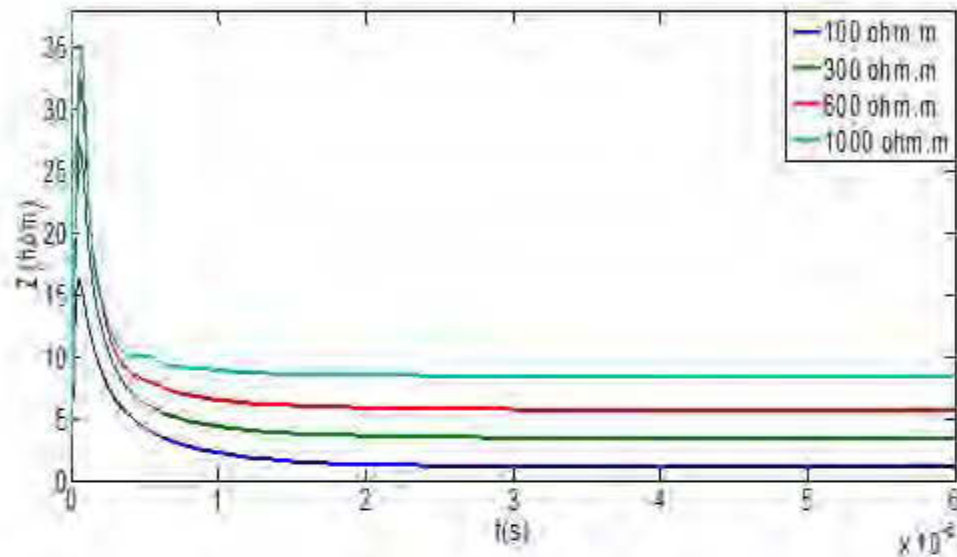


Figure 5-17 : Impédance transitoire au point A, avec différentes résistivités

Ces figures montrent l'impédance transitoire et la tension au niveau du point d'injection A de la grille avec des résistivités différentes. Les pics de tension et d'impédance transitoire augmentent avec l'augmentation de la résistivité, ce qui montre l'influence notable de cette dernière sur la réponse transitoire des MALT.

5.4 Comparaison entre la réponse des trois grilles

Trois grilles de mise à la terre sont simulées à titre de comparaison, avec la même surface (12 par 12m) et les mêmes paramètres, enfouis dans le sol avec $\epsilon_r = 15$, $\rho = 100\Omega.m$, le rayon du conducteur est 14mm et enterrée à une profondeur de 0.6m. Le même courant est injecté, avec $I_m = 12.5KA$.

Pour la grille 1 * 1, la longueur de chaque côté $L = 12m$.

Grille 2 * 2, $l = 12m$ et $l' = 6m$.

Grille 3 * 3, $l = 12m$ et $l' = 4m$.

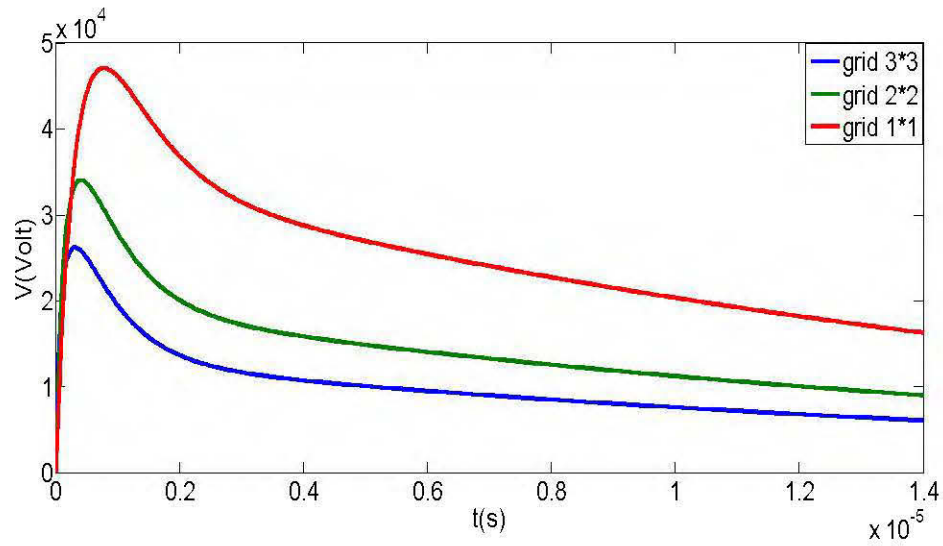


Figure 5-18 : La tension transitoire de chaque grille

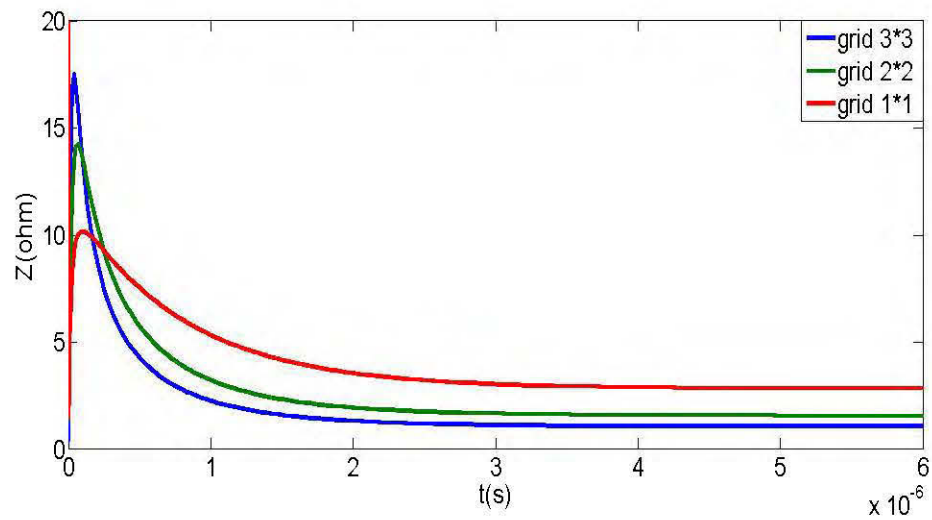


Figure 5-19 : L'impédance transitoire de chaque grille

À partir de ces résultats, on peut remarquer la diminution de l'impédance transitoire et la tension transitoire à chaque augmentation du maillage, la limitation de courant de défaut est plus rapide lors de l'augmentation de voies conductrices

5.5 Effet du point d'injection

Pour la grille représentée sur la figure 5-20, trois applications qui ne diffèrent que par le point d'injection (A, B et C) sont exécutées avec le même courant de foudre précédent, avec $I_m = 25 \text{ kA}$. La grille enterrée dans le sol avec $\epsilon_r = 15$, $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$, le rayon du conducteur est de 14mm et la profondeur $h=0.6\text{m}$.

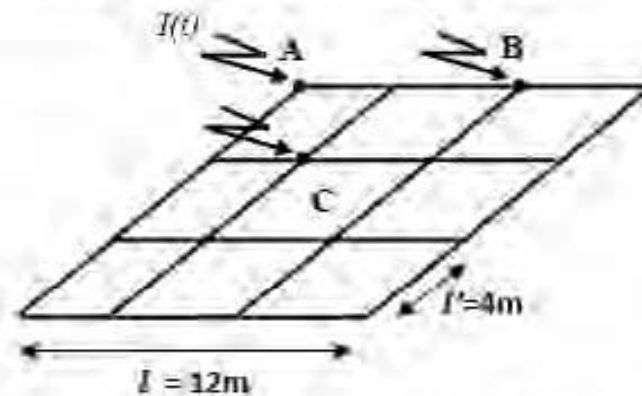


Figure 5-20 : courant injecté dans différents sites de la grille

Les résultats de simulation sont illustrés à la figure 5-21

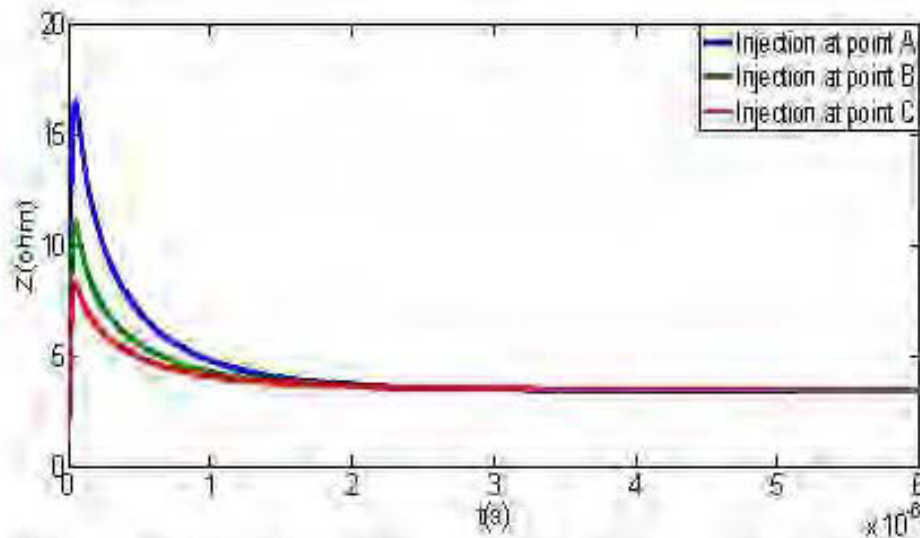


Figure 5-21 : Impédance transitoire dans différents points d'injection

Les résultats de la figure montrent bien l'effet du point d'injection par une diminution importante des pics de l'impédance transitoire au point C, ce qui conduit à l'épanouissement des courants de défaut plus rapidement lorsque le point d'injection offre plus de chemins conducteurs.

5.6 Calcul de l'influence de l'ionisation du sol

Sur la base du procédé décrit, nous avons effectué une analyse systématique de l'influence d'ionisation sur le comportement des MALT.

On présume que la profondeur de la grille est de 0,6 m, tandis que le diamètre est de 14 mm et $\epsilon = 15$.

Les résultats des calculs sont présentés dans les tableaux (5-2, 5-3, 5-4)

Le modèle étudié est une grille à une seule maille enfouie dans un sol homogène de résistivité figure 5-22.

Les courants de drainage sont montrés au quatre points de la maille par I_{m0i} et $i(t)$ le courant injecté au point I_{m01} .

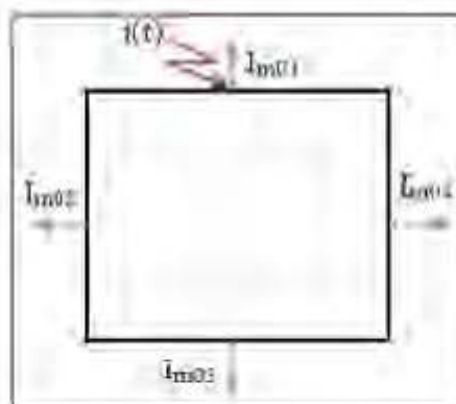


Figure 5-22 : Grille à une seule maille

Le modèle en T sous MATLAB / Simulink est représenté dans la Figure 5-23, en indiquant le courant de drainage I_{m1}

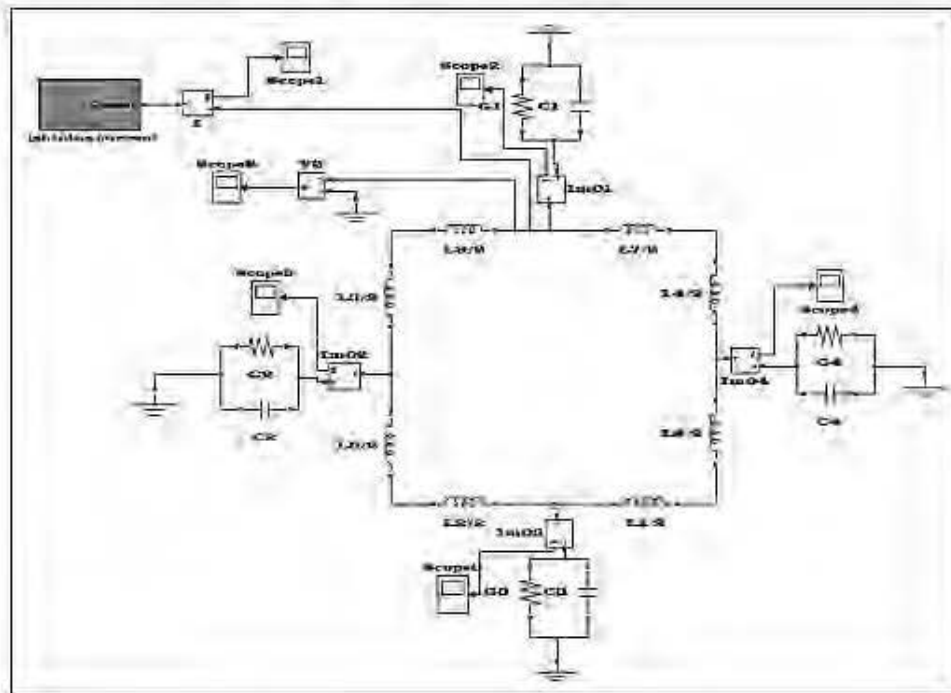


Figure 5-23 : Grille de mise à la terre, le circuit équivalent d'une maille carrée de la grille, modélisée dans Simulink, en utilisant le modèle en T

Les deux figures (Figure 5-24 et 5-25) montrent l'impédance transitoire de la grille de mise à la terre, le modèle avec et sans l'ionisation du sol.

$I = 10 \text{ kA}$ et $I = 100 \text{ kA}$

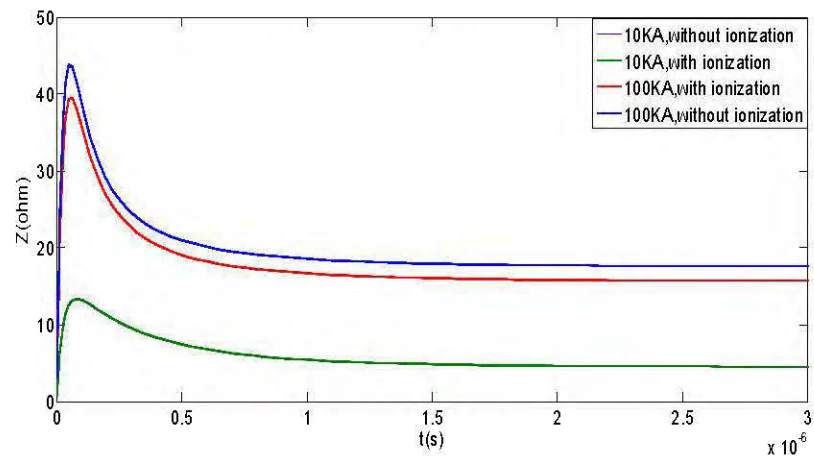


Figure 5-24 : Impédance transitoire en fonction de la résistivité du sol et l'amplitude du courant de foudre, $\rho = 300\Omega\text{m}$, modèle avec ou sans l'ionisation du sol

$I = 10 \text{ kA}$ et $I = 100\text{kA}$.

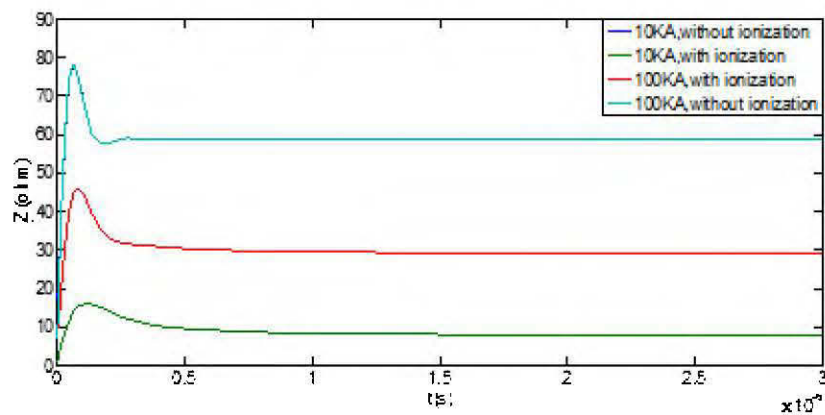


Figure 5-25 : L'impédance transitoire en fonction de la résistivité du sol et l'amplitude du courant de foudre, $\rho = 1000\Omega\text{m}$, modèle avec ou sans ionisation du sol

Dans les deux essais présentés ici, pour la même résistivité et un courant de 100 kA et 10kA dans un sol sans ionisation, l'impédance transitoire des deux cas étant donné la

même forme, mais une différence remarquable en tenant compte du phénomène d'ionisation dans le sol. L'augmentation du rayon de l'électrode provoquée par l'influence de ce phénomène (l'ionisation du sol, voir les tableaux 3, 4 et 5) conduit à la diminution de la tension et par conséquent une diminution de l'impédance.

Le tableau 5-2 représente les résultats de calculs de la valeur maximale du courant de drainage des éléments individuels (chaque segment) et le rayon équivalent, en fonction de résistivité du sol et l'amplitude du courant de foudre.

Tableau 5-2 : La valeur maximale du courant de drainage des éléments individuels (chaque segment) et le rayon équivalent

ρ ($\Omega.m$)	I_m (KA)	T_{cn}/T_{zn} ($\mu s/\mu s$)	I_{m01} (KA)	I_{m02} (KA)	I_{m03} (KA)	I_{m04} (KA)	a_e (mm)	E_k (KV/m)
50	10	1.5/30	4.37	2.325	2.281	2.486	2.4868	800
50	100	1.5/30	43.77	23.24	22.82	23.24	24.868	800
300	10	1.5/30	2.348	2.348	2.348	2.348	9.9472	1200
300	100	1.5/30	23.48	23.48	23.48	23.48	99.4718	1200
1000	10	1.5/30	2.371	2.370	2.371	2.370	30.6067	1300
1000	100	1.5/30	23.72	23.72	23.72	23.72	306.0672	1300

Tableau 5-3 : Les résultats du calcul des valeurs du rayon équivalent

ρ ($\Omega.m$)	I_m (KA)	T_{cn}/T_{zn} $\mu s/\mu s$	$ae1$ (mm)	$ae2$ (mm)	$ae3$ (mm)	$ae4$ (mm)	E_k (KV/m)
50	10	1.5/30	4.35	2.323	2.3237	2.3237	800
50	100	1.5/30	43.53	23.21	23.212	23.217	800
300	10	1.5/30	9.342	9.342	9.342	9.342	1200
300	100	1.5/30	93.42	93.42	93.42	93.42	1200
1000	10	1.5/30	2.902	2.9015	2.902	2.9015	1300
1000	100	1.5/30	29.04	29.04	29.04	29.04	1300

Le tableau 5-4 représente les résultats de calculs de la valeur maximale de l'intensité du champ électrique sur la surface de la grille de mise à la terre, en fonction de résistivité du sol et l'amplitude du courant de foudre.

Tableau 5-4 : La valeur maximale de l'intensité du champ électrique sur la surface de la grille de MALT

ρ ($\Omega.m$)	$I_m(KA)$	T_{cn}/T_{zn} $\mu s/\mu s$	E_1 (KV/m)	E_2 (KV/m)	E_3 (KV/m)	E_4 (KV/m)	E_k (KV/m)
50	10	1.5/30	872.4	464.73	464.73	464.73	800
50	100	1.5/30	8730.1	4643.3	4642.2	4643.3	800
300	10	1.5/30	2808.7	2808.7	2808.7	2808.7	1200
300	100	1.5/30	28087	28087	28087	28087	1200
1000	10	1.5/30	9433	9429.9	9433.3	9429.9	1300
1000	100	1.5/30	94379	94379	94379	94379	1300

Selon les calculs effectués, les résultats présentés dans les tableaux (2, 3 et 4) et les figures (Figure 5-24 et Figure 5-25), on a observé l'influence de l'ionisation du sol sur les dimensions de l'électrode (rayon de l'électrode). On obtient ainsi une diminution de l'impédance transitoire. L'augmentation de l'intensité du courant et la résistivité implique la diminution de l'impédance.

Si le champ électrique critique est dépassé, l'augmentation du rayon du conducteur autour de la région ionisée est établie.

5.7 L'évaluation en 3D du potentiel d'un réseau de terre

Le réseau de terre représenté sur la figure (Figure 5-26) est constitué de 36 électrodes horizontales, de diamètre 1.4 cm enterrées à une profondeur de 60 cm dans un sol caractérisé par $\rho = 100 \Omega.m$ et $\epsilon_{sol} = 15$. Le courant de foudre de type 2/12.5 μs d'amplitude 12.5 kA est injecté sur une arête du réseau de terre.

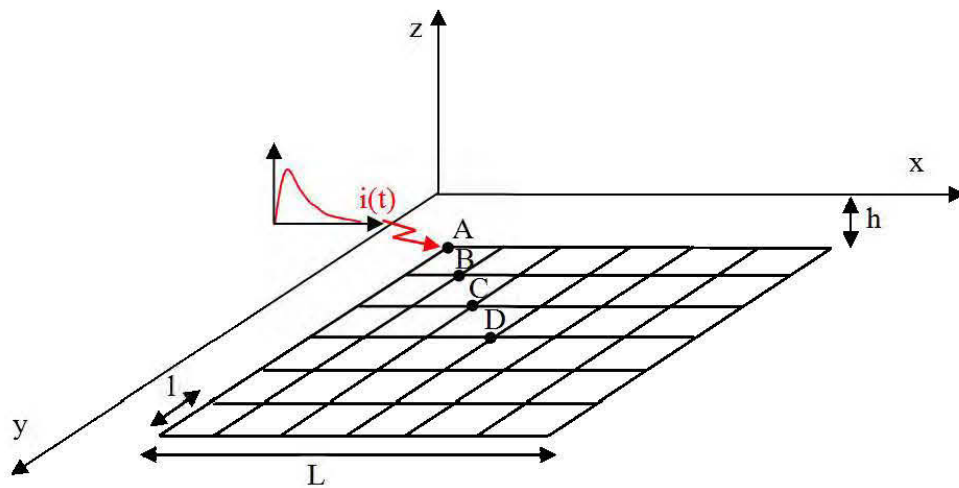


Figure 5-26 : Grille de mise à la terre

Les résultats correspondant à l'évolution du potentiel en fonction du temps à quatre points différents sont représentés dans la figure 5-27 et les résultats de l'évolution de la tension dans cette grille à un instant donné ($t=0.5\mu s$ et $t=2\mu s$) sont donnés par les figures 5-28 et 5-29 pour un courant de foudre injecté au point A.

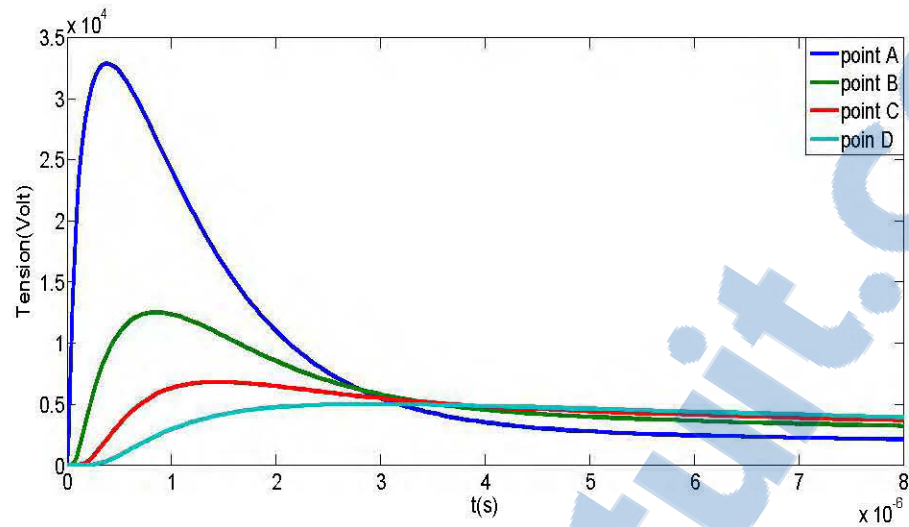


Figure 5-27 : Le potentiel transitoire à quatre points différents de la grille avec une injection du courant de foudre au point A

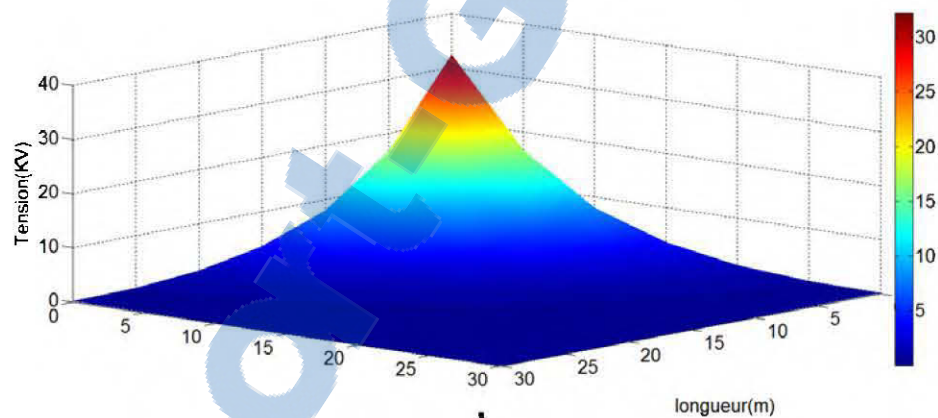


Figure 5-28 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=0.5\mu s$ avec une injection de courant au point A



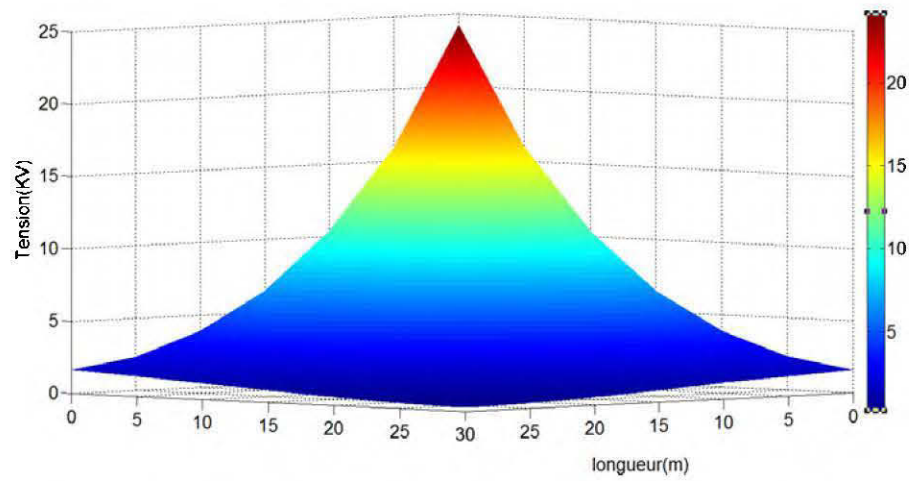


Figure 5-29 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=2\mu s$ avec une injection de courant au point A.

Les résultats correspondant à l'évolution du potentiel en fonction du temps à quatre points différents sont représentés dans la figure 5-30 et les résultats de l'évolution de la tension dans cette grille à un instant donné ($t=0.5\mu s$ et $t=2\mu s$) sont donnés par les figures 5-31 et 5-32 pour un courant de foudre injecté au point D, milieu de la grille

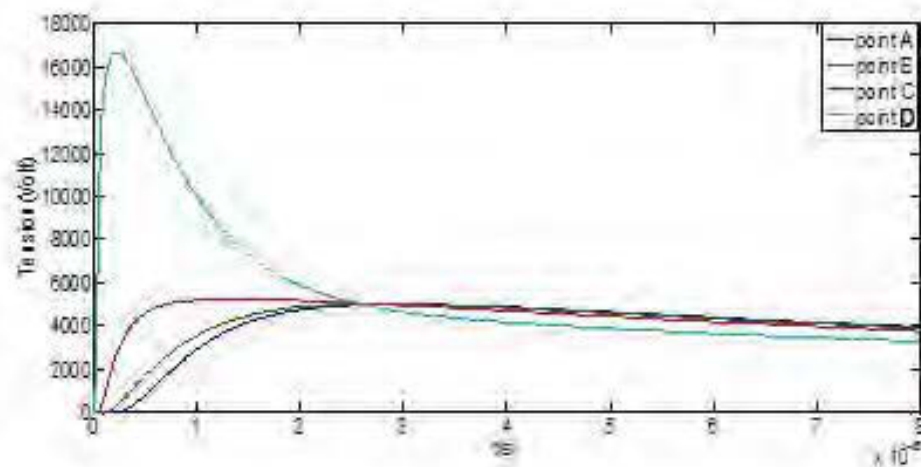


Figure 5-30 : Le potentiel transitoire à quatre points différents de la grille avec une injection du courant de foudre au point D (milieu de la grille)

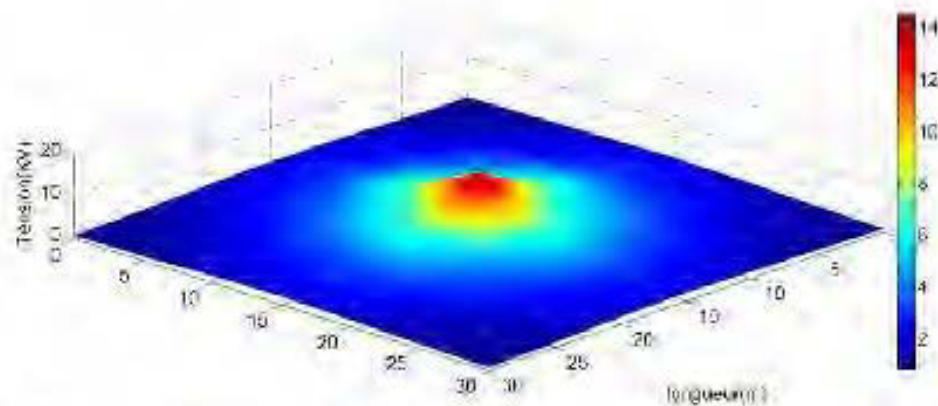


Figure 5-31 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=0.5\mu s$ avec une injection de courant au point D

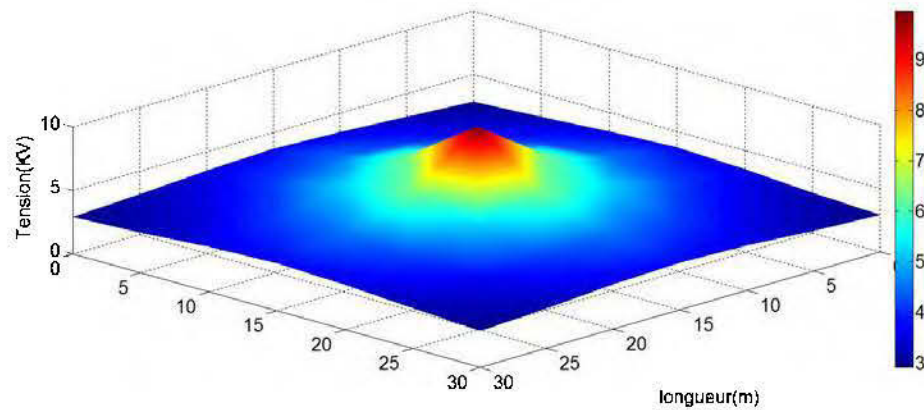


Figure 5-32 : L'évolution de la tension de la grille à l'instant $t=2\mu s$ avec une injection de courant au point D

D'après les figures, on remarque que les valeurs des pics du potentiel diminuent avec la distance du point d'injection suite au grand chemin parcouru par le courant de foudre dans cette grille, donc la disparition des défauts en approchant des extrémités, aussi bien, l'influence de l'emplacement du point d'injection, montre que les valeurs des pics du potentiel diminuent au centre de la grille, causée par le nombre important de chemins conducteurs par rapport aux extrémités de la grille.

Par conséquent, la limitation et la dissipation des courants de défaut sont plus rapides lorsqu'on a plus de chemins conducteurs.

5.8 Conclusion

L'utilisation de la plateforme Simulink nous a permis d'appliquer le modèle choisi se basant sur la méthode du circuit RLC pour l'étude de la réponse transitoire de système de mise à la terre suite à un courant de foudre.

Nous avons présenté les applications des différents modèles et une comparaison a été faite entre les résultats obtenus à l'aide de ce dernier et les résultats obtenus à l'aide du modèle analytique de Bellaschi et Armington. L'étude des effets des différents facteurs sur la réponse des réseaux de terre nous a permis de conclure que la

performance impulsionnelle des prises de terre dépend essentiellement de trois facteurs, la géométrie de la mise à la terre, les propriétés électriques du sol et du courant de foudre (forme d'onde), c'est-à-dire l'intensité du courant, le temps de montée d'onde et le point d'excitation.

L'apparition du phénomène d'ionisation dans certaines conditions au tour d'une prise de terre introduit un changement important dans les dimensions de cette dernière (rayon de l'électrode), par conséquent dans les paramètres des systèmes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce travail on a présenté les différents modèles existants pour la modélisation des systèmes de mise à la terre des installations électriques. On a présenté aussi la modélisation des systèmes de terre. Pour faciliter l'utilisation de ce dernier on a développé une interface sous l'environnement MATLAB/Simulink pour l'étude et l'analyse de la repense transitoire des systèmes de MALT.

La résistivité est l'élément le plus important dans la conception des systèmes de mise à la terre. Lorsque sa valeur est très élevée, le potentiel engendré par une décharge atmosphérique (foudre) drainée au sol par une prise de terre peut dépasser les limites sécuritaires d'où l'importance de la présence d'un système de malt dont l'impédance de mise à la terre est très petite.

Le modèle étudié, nous a permis non seulement d'étudier le comportement transitoire des systèmes de MALT en appuyant sur l'influence des différentes géométries des grilles et les paramètres du sol, mais encore il nous a permis de :

- Calculer l'influence de l'ionisation du sol, qui est en quelque sorte l'augmentation du rayon des conducteurs des systèmes de mise à la terre et qui conduit à la diminution de l'impédance du système.

Le fait que l'ionisation du sol est un phénomène important est renforcé. Il devrait être considéré dans la représentation numérique et dans les calculs des caractéristiques (R , L , C et G) des systèmes de mise à la terre.

- Montrer le comportement transitoire et l'évaluation de la tension transitoire en chaque point du système complexe (chaque point de la grille) et l'importance de choisir le point d'injection du courant de foudre (diminution du pic du potentiel en approchant du centre de la grille).

- Visualiser le comportement transitoire, $U(x, t)$ en 3D (trois dimensions) d'un système complexe (36 mailles) à un instant $t (\mu s)$ donnée et aux différents points d'injection (coté et centre de la grille).

La contribution donnée dans ce travail, grâce à des simulations, peut-être l'application des pratiques d'ingénierie afin d'évaluer les changements temporels dans les caractéristiques de protection contre les décharges atmosphériques.

RECOMMANDATION

Nous avons abordé dans ce mémoire une partie du domaine de mise à la terre, d'après les exemples numériques présentés dans ce travail, il a été démontré que l'approche proposée permet de réduire considérablement les besoins en mémoire.

En perspective, un travail plus élaboré devra prendre en compte des points suivants :

- Étude des prises de terre des pylônes des lignes de transmission sous les décharges électromagnétiques.
- Étude des prises de terre complexes et de géométrie différentes parcourus par un courant de foudre (**Hémisphère, combinaison grille et électrodes verticales, boucle enterrée...etc.**)
- Étude des prises de terre dans un sol à plusieurs couches (**Non homogène de résistivité**) en tenant compte de l'ionisation du sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. Deno et L. Zaffanella, "Transmission line reference book–345 kV and above," *EPRI: California*, pp. 383-388, 1982.
- [2] M. A. Uman, *The lightning discharge*: Courier Corporation, 2001.
- [3] A. Zeddani, "Couplage d'une onde électromagnétique rayonnée par une décharge orageuse à un câble de télécommunications," Lille 1, 1988.
- [4] K. Berger, "RB Anderson-Parameters of Lightning Flashes-Electra n0 41," ed: July, 1975.
- [5] R. Gomba et A. Omboua, "Calculation of lightning surges on the high voltage lines. Case of 220 kV line: Ngo-Brazzaville in Congo," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 6, p. 13, 2017.
- [6] A. Ametani, Y. Kasai, J. Sawada, A. Mochizuki et T. Yamada, "Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model," *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, pp. 339-345, 1994.
- [7] J. Gutierrez, J. Bermudez, F. Rachidi, M. Paolone, C. Nucci, W. Chisholm, P. Moreno et J. Naredom, "A Reduced-Scale Model to Evaluate the Response of Nonuniform Towers to a Lightning Strike," dans *International Conference on Lightning Protection*, 2002.
- [8] T. Mitton et R. Watson, "Practical Testing of Grounding Systems by Current Injection," dans *CDEGS User Meeting*, 2005, pp. 1-8.
- [9] E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*: Dover Publications Inc., 1949.
- [10] G. Tagg, "Earth Resistance (1964) London," *George Newnes Limited*.
- [11] I. I. A. S. P. S. T. Committee, *IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems* vol. 142: IEEE, 1982.

- [12] G. Vijayaraghavan, M. Brown et M. Barnes, *Practical grounding, bonding, shielding and surge protection*: Butterworth-Heinemann, 2004.
- [13] T. Saarenketo, "Electrical properties of water in clay and silty soils," *Journal of Applied Geophysics*, vol. 40, pp. 73-88, 1998.
- [14] R. Leadon, T. Flanagan, C. Mallon et R. Denson, "Effect of ambient gas on arc initiation characteristics in soil," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 30, pp. 4572-4576, 1983.
- [15] D. Snowden, G. Morris et V. Van Lint, "Measurement of the dielectric constant of soil," *IEEE Transactions on Nuclear science*, vol. 32, pp. 4312-4314, 1985.
- [16] A. Liew et M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," dans *Proceedings of the Institution of electrical Engineers*, 1974, pp. 123-135.
- [17] J. Wang, A. C. Liew et M. Darveniza, "Extension of dynamic model of impulse behavior of concentrated grounds at high currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 2160-2165, 2005.
- [18] F. Slaoui Hasnaoui, "Estimation des paramètres par la méthode de régression rigide combinée avec l'analyse des paramètres statistiques pour l'interprétation des mesures de résistivités apparentes des modèles de sol à n-couches," École de technologie supérieure, 2003.
- [19] Y. Liu, "Transient response of grounding systems caused by lightning: modelling and experiments," *Acta Universitatis Upsaliensis*, 2004.
- [20] C. Korasli, "Ground resistance measurement with alternative fall-of-potential method," dans *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, 2005, pp. 2498-2502.
- [21] C. Korasli, "Ground resistance measurement with fall-of-potential method using capacitive test probes," dans *Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE 11th International Conference on*, 2006.

- [22] K. Murakawa et H. Yamane, "Earthing resistance measurement technique without using auxiliary electrodes," dans *Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC'03. 2003 IEEE International Symposium on*, 2003, pp. 213-216.
- [23] S. C. Lim, C. Gomes, M. Kadir et M. Abidin, "Characterizing of bentonite with chemical, physical and electrical perspectives for improvement of electrical grounding systems," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 8, pp. 11429-11447, 2013.
- [24] M. Kostic, Z. Radakovic, N. Radovanovic et M. Tomasevic-Canovic, "Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud," *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, pp. 1-6, 1999.
- [25] E. J. Fagan et R. H. Lee, "The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, pp. 337-348, 1970.
- [26] B. Nekhoul, P. Labie, F. Zgainski, G. Meunier, F. Morillon et S. Bourg, "Calculating the impedance of a grounding system," *IEEE transactions on magnetics*, vol. 32, pp. 1509-1512, 1996.
- [27] K. Switzer, "Achieving an Acceptable Ground in Poor Soil," *Primedia Business Magazines & Media Inc., USA*, 2003.
- [28] Q. Meng, J. He, F. Dawalibi et J. Ma, "A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, pp. 911-916, 1999.
- [29] J. He, G. Yu, J. Yuan, R. Zeng, B. Zhang, J. Zou et Z. Guan, "Decreasing grounding resistance of substation by deep-ground-well method," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 20, pp. 738-744, 2005.
- [30] L. Greev, "Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements," dans *Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on*, 2007, pp. 325-328.

- [31] A. Ametani, T. Chikaraa, H. Morii et T. Kubo, "Impedance characteristics of grounding electrodes on earth surface," *Electric Power Systems Research*, vol. 85, pp. 38-43, 2012.
- [32] S. Okabe, J. Takami et K. Nojima, "Grounding system transient characteristics of underground GIS substations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 1494-1500, 2012.
- [33] R. Alipio, M. Schroeder, M. Afonso, T. Oliveira et S. Assis, "Electric fields of grounding electrodes with frequency dependent soil parameters," *Electric Power Systems Research*, vol. 83, pp. 220-226, 2012.
- [34] H. Dwight, "Calculation of resistances to ground," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 55, pp. 1319-1328, 1936.
- [35] L. V. Bewley, *Traveling waves on transmission systems*: Dover, 1963.
- [36] P. Belaschi et R. ARMINGTON, "Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds: III-effect of lead in ground installation," *AIEE Transactions, Piscataway*, vol. 62, pp. 334-345, 1943.
- [37] B. Gupta et B. Thapar, "Impulse impedance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2357-2362, 1980.
- [38] A. Meliopoulos et M. Moharam, "Transient analysis of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 389-399, 1983.
- [39] A. Papalexopoulos et A. Meliopoulos, "Frequency dependent characteristics of grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, pp. 1073-1081, 1987.
- [40] M. Ramamoorthy, M. B. Narayanan, S. Parameswaran et D. Mukhedkar, "Transient performance of grounding grids," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, pp. 2053-2059, 1989.
- [41] A. Geri, "Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: The model and its validation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, pp. 1008-1017, 1999.

- [42] A. Otero, J. Cidras et J. Del Alamo, "Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 14, pp. 873-878, 1999.
- [43] R. Verma et D. Mukhedkar, "Impulse impedance of buried ground wire," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2003-2007, 1980.
- [44] F. Mentre et L. Grcev, "EMTP-based model for grounding system analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 1838-1849, 1994.
- [45] X. Legrand, "Modélisation des systèmes de mise à la terre des lignes électriques soumis à des transitoires de foudre," Ecully, Ecole centrale de Lyon, 2007.
- [46] R. Olsen et M. Willis, "A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 1071-1081, 1996.
- [47] V. Cecconi, A. Matranga et A. Ragusa, "New circuital models of grounding systems and PDS for EMI analysis during a lightning strike," dans *Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE*, 2005, p. 6 pp.
- [48] F. Heidler, J. Cvetic et B. Stanic, "Calculation of lightning current parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, pp. 399-404, 1999.
- [49] C. A. Nucci, G. Diendorfer, M. A. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz et C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel-base current: A review and comparison," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 95, pp. 20395-20408, 1990.
- [50] R. Velazquez et D. Mukhedkar, "Analytical modelling of grounding electrodes transient behavior," *IEEE transactions on power apparatus and systems*, pp. 1314-1322, 1984.

Articles publiés

- 1- Idir Djamel, F. H. Slaoui et S. Georges, "**Transient Response of Grounding Systems Under Impulse Lightning Current,**" dans *Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, 2016, 2016, pp. 71-75.
- 2- Idir Djamel, Fouad H. Slaoui, Semaan Georges, " Idir Djamel, F. H. Slaoui et S. Georges, "**Transient Response of Grounding Systems Under Impulse Lightning Current,**" dans *Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ)*, 2016, 2016, pp. 71-75.

ANNEXES

Annexe 1 Blocs des simulations

Schéma bloc de simulation des trois grilles a quatre mailles (1*1)

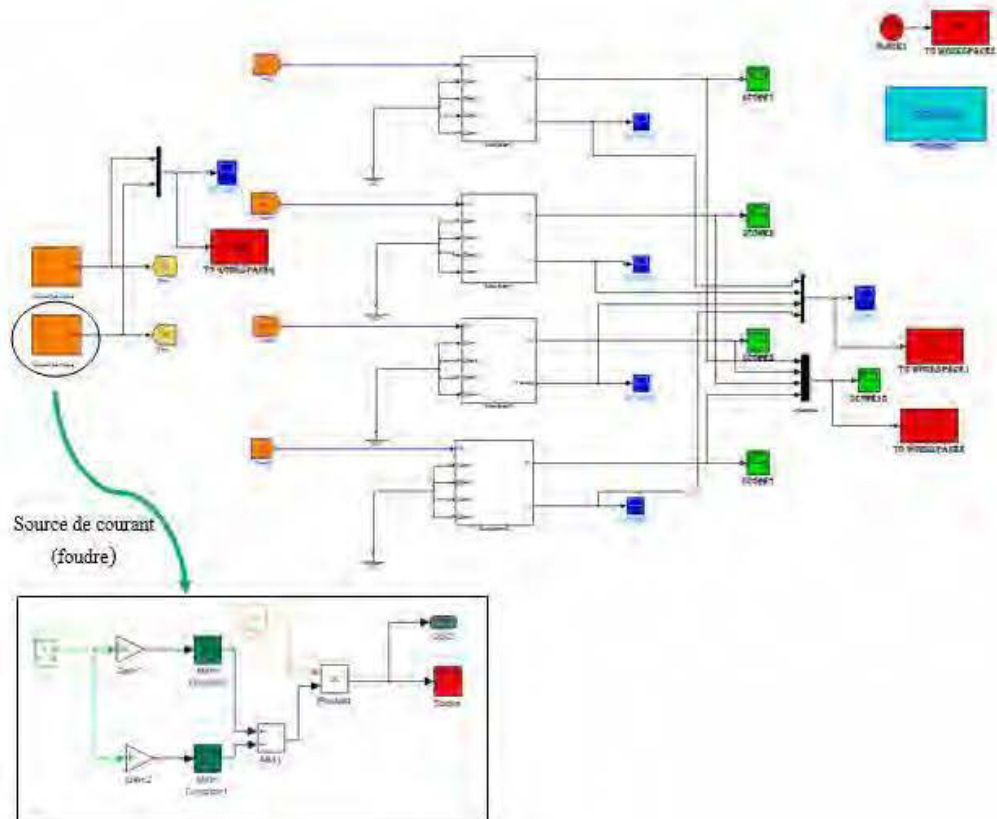


Schéma bloc de simulation de la grille a neuf mailles (2*2)

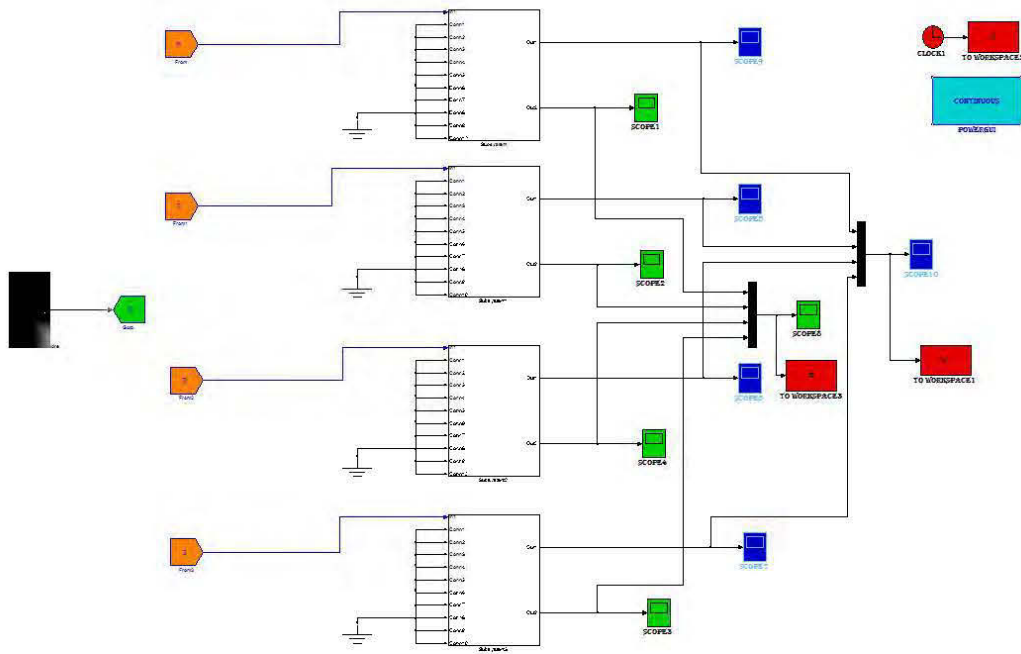
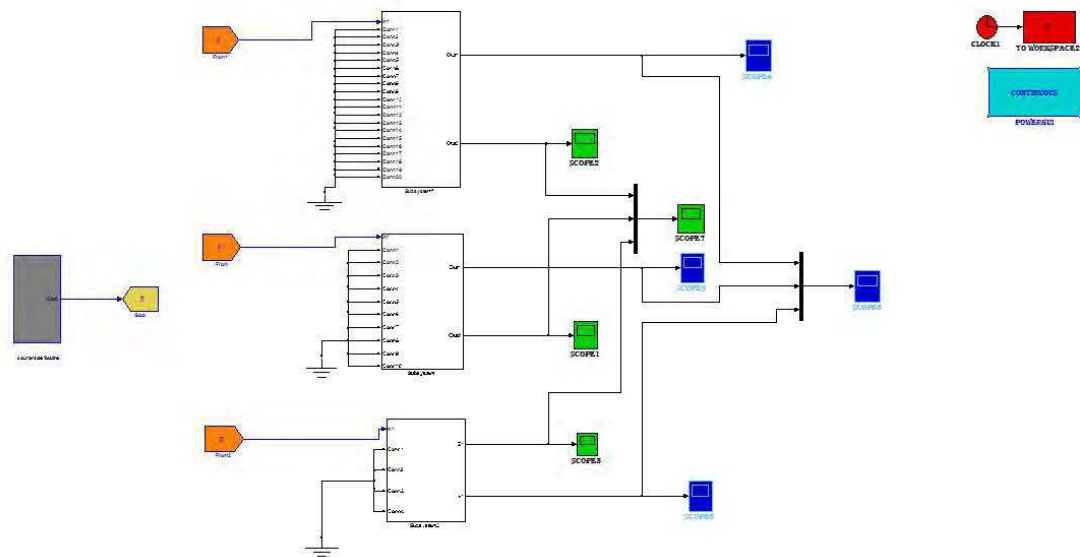


Schéma bloc de simulation de la grille a neuf mailles (3*3)

The diagram illustrates a 3x3 grid simulation architecture. It consists of three main input sections, each receiving signals from an external source (orange boxes) through a multi-pin connector ('Entrée'). These inputs feed into a central processing area containing nine green blocks labeled 'ZONES'. Each zone's output is processed by a series of logic gates, including AND gates (blue squares) and OR gates (red rectangles). The final outputs are directed to various system interfaces: 'TO VLSI/SPIRAL', 'TO VLSI/SPIN', and 'TO VLSI/MAGNET'. A separate 'MAGNET' component (yellow box) is shown on the left, and a 'TO VLSI/SPIN' interface (blue box) is located on the right.

Schéma bloc de simulation des trois grilles de terre en comparaison (1*1, 2*2 et 3*3)



Annexe 2 Calculs analytiques des résistances de terre

A1.1 Introduction

Beaucoup d'auteurs ont mis en évidence les méthodes analytiques pour évaluer la résistance de mise à la terre pour différentes configurations d'électrodes dont Tagg, Rudenberg, Dwight-Sunde.

La résistance de terre peut être calculée et mesurée. Le calcul a été simplifié en grande partie par les formules développées et présentées ici.

A1.2 Piquet de terre de forme cylindrique et vertical

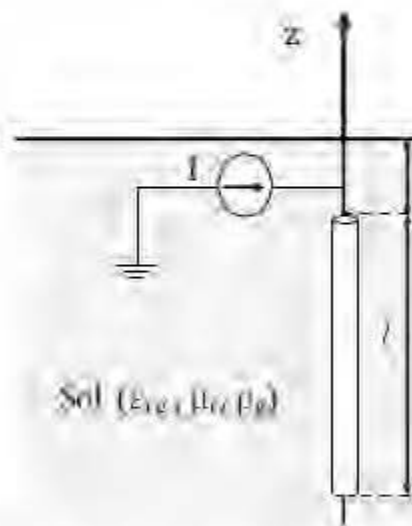


Figure A2 : Électrode cylindrique verticale

Considérons une électrode verticale de rayon r et de longueur l , supposons que le courant circule vers l'extérieur à partir de la section verticale soit horizontal et que l'extrémité hémisphérique inférieure soit radiale vers l'extérieur, considérons une zone élémentaire à distance x .

La résistance de la zone élémentaire est donnée par

$$dR = \frac{\rho dx}{2\pi xl - 2\pi x^2}$$

La résistance totale s'exprime par

$$\begin{aligned} R &= \int_r^\infty \frac{\rho}{2\pi l} \left(\frac{1}{x(x+l)} \right) dx \\ &= \left[\frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{x}{x+l} \right]_r^\infty \\ R &= \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{r+l}{r} \end{aligned}$$

Généralement $l \gg r$ donc

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r}$$

L'équation ci-dessus de la résistance de l'électrode verticale peut être réécrite comme suit ;

Relation de Dwight-Sunde

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{8l}{d} - 1 \right]$$

Relation de Tagg

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{a} - 1 \right)$$

Relation de Laurent

$$R = 0.366 \frac{\rho}{l} \ln \frac{3l}{d}$$

Relation de Liew-Darveniza

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\frac{r+l}{r} \right)$$

Relation de Rudenberg

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$$

l est la longueur de l'électrode, r et d sont le rayon et le diamètre de l'électrode respectivement.