

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Électrotechnique
Option : Génie des systèmes électriques

Présentée et soutenue publiquement
le

par :

DJABORREBI Amina

THEME

**Étude du comportement dynamique d'un système de mise à la terre
soumis à une perturbation de foudre –Application à la coordination
d'isolement et la CEM**

Mr.SEGHIER TAHAR	Président du jury, Professeur, Université UAT Laghouat
Mr. ZEGNINI Boubakeur	Rapporteur, Professeur, Université UAT Laghouat
Mr. MAHI DJILALI	Co Rapporteur, Professeur, Université UAT Laghouat
Mr. YOUSFI BELKACEM	Examineur, Maitre de conférences, Université UAT Laghouat.
Mr. HAMID AZZEDDINE	Examineur, Professeur, Centre Universitaire El Bayadh
Mr. BOUKEZZI LARBI	Examineur, Professeur, Université Ziane Achour Djalfa.

Février 2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers Parents.

Mon chère Mon marie.

Ma fille yasmie

Mes Sœurs.

Mon Frère.

Ma Famille et tous mes Proches.

Tous mes Amis.

Amina

Remerciements

En préambule à ce mémoire

*Je remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces
Je souhaite adresser remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté
leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.*

*Je tenant à remercier sincèrement le professeur ZEGNINI Boubakeur, en tant que
Directeur, s'est montré toujours à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation
de ce mémoire. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon Co-directeur monsieur le
professeur MAHI DJILALI*

*Je tiens sincèrement à exprimer mes plus vifs remerciements à l'ensemble des membres du
jury: Monsieur le professeur SEGHIER TAHAR; Professeur à l'UATL, pour l'honneur
qu'il m'accorde en acceptant d'examiner ce travail et de présider le jury.*

*Monsieur Dr.YOUSFI BELKACEM , Maitre de conférences A à l' UATL ,pour avoir
accepté d'examiner et de juger ce travail. Monsieur HAMID AZZEDDINE , Professeur au
Centre Universitaire El Bayadh ,pour avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.
Monsieur . BOUKEZZI LARBI , Professeur à Université Ziane Achour Djalfa ,pour
avoir accepté d'examiner et de juger ce travail.*

*Enfin, j'adresse plus sincères remerciements à proche et amis,
qui je ont toujours soutenue et courage
Au cours de la réalisation de ce mémoire.*

Résumé

La foudre par ses effets directs ou indirects peut engendrer des dégâts importants dans un réseau de transport d'énergie et, par conséquent, nécessitent une protection électromagnétique très complète. Dans ce contexte on doit maîtriser les problèmes liés à l'environnement électromagnétique, en abaissant à un niveau suffisamment bas la probabilité de dégâts matériels et humains tout en offrant une qualité de service satisfaisante. Dans ce travail nous étudions le comportement dynamique d'un système de mise à la terre complexe connecté en plusieurs points au réseau soumis à une perturbation de foudre.

On caractérisera les différents paramètres qui influencent le comportement des systèmes de mise à la terre, lorsqu'ils diffusent un courant de la foudre, et on insistera sur le calcul des courants induits dans un câble par un système de mise à la terre situé à proximité ainsi que la contrainte diélectrique imposée à son isolant externe en prenant en compte ce comportement pour les études de transitoire de foudre sur le réseau.

Cette étude sera validée et orientée vers l'analyse de CEM et pour proposer des pistes de solutions concrètes pour une meilleure étude de coordination des isolements.

Mots clés : Systèmes Mise a La Terre , Foudre , Réseau électrique, Phénomènes transitoires , Câble de transport d'énergie , CEM, Coordination d'isolement , modèle électromagnétique.

ملخص

يمكن للصاعقة أن يتسبب ، من خلال آثاره المباشرة أو غير المباشرة ، في أضرار جسيمة لشبكة نقل الطاقة ، وبالتالي يتطلب حماية كهرومغناطيسية كاملة. في هذا السياق ، يجب السيطرة على المشاكل المرتبطة بالبيئة الكهرومغناطيسية ، عن طريق تقليل احتمالية الضرر المادي والبشري إلى مستوى منخفض بما فيه الكفاية مع تقديم جودة خدمة مرضية. في هذا العمل ، ندرس السلوك الديناميكي لنظام التأسيس المعقد المتصل في عدة نقاط بالشبكة المعرضة لاضطراب البرق.

سنقوم بتمييز المعاملات المختلفة التي تؤثر على سلوك أنظمة التأسيس ، عندما تنتشر تيار البرق ، وسنصر على حساب التيارات المستحثة في الكابل بواسطة نظام تأسيس يقع في مكان قريب. وكذلك الإجهاد العازل المفروض على عازلها الخارجي ، مع مراعاة هذا السلوك في دراسات البرق العابر على الشبكة. سيتم التحقق من صحة هذه الدراسة وتوجيهها نحو تحليل CEM واقتراح طرق لحلول ملموسة لدراسة أفضل لتنسيق العزل.

الكلمات الأساسية: أنظمة MALT ، البرق ، الشبكة الكهربائية ، الظواهر العابرة ، كابل نقل الطاقة ، CEM ، تنسيق العزل ، النموذج الكهرومغناطيسي .

Abstract

Lightning by its direct or indirect effects can cause significant damage in an energy transport network and, therefore, requires a very complete electromagnetic protection. In this context, the problems related to the electromagnetic environment must be controlled, lowering to a sufficiently low level the probability of material and human damage while offering a satisfactory quality of service. In this work we study the dynamic behaviour of a complex earthing system connected at several points to the network subject to a lightning disturbance.

We will characterize the different parameters that influence the behavior of grounding systems, when they diffuse a lightning current, and we will insist on the calculation of the currents induced in a cable by a nearby grounding system as well as the dielectric stress

Résumé

imposed on its external insulation, taking into account this behavior for lightning transient studies on the network.

This study will be validated and oriented towards EMC analysis and to propose concrete solutions for a better study of insulation coordination.

Keywords : MALT systems, Lightning, Electrical network, Transient phenomena, Power transmission cable, EMC, Isolation coordination, electromagnetic model.

Nomenclature

Liste des Abréviations

CEM	la compatibilité électromagnétique
MALT	mise à la terre
TLM	Le modèle de ligne de transmission
FDTD	domaine de temps de différence finie
FEM	la méthode des éléments finis
MoM	la méthode des moments
HEM	Hybrid Electromagnetic Method
HT	Haut Tension
SiC	silicium
ZnO	d'oxyde de zinc
FFT	La transformée de Fourier
IFFT	La transformée de Fourier inverse
TDR	Time Domain Reflectometry
SCIP	Surface Capacitance Insertion Probe

Liste des Symboles

η	Le facteur de correction d'amplitude
I_0	L'amplitude du courant à la base du canal (KA)
τ_1	La constante de temps de montée
τ_2	La constante de temps de descente
r_s	distance d'amorçage (m)
I	courant de foudre (KA)
S	la surface protégée par la tige
g	constante qui dépend de la géométrie de l'installation
ϵ_0	la permittivité du vide (F/m)
C	La capacité du condensateur (F)
a	La distance entre les électrodes de terre (m)
h	La profondeur (m)
K^n	Coefficient de réflexion
ρ_1	La résistivité de la couche supérieure du sol ($\Omega.m$)
ρ_2	La résistivité de la couche profonde du sol ($\Omega.m$)
$\rho_a(n)$	les résistivités de n différentes couches ($\Omega.m$)
l_c	la longueur d'électrode de terre (m)
G	la conductance (Ω)
L	de l'inductance (H)
l_t	l'inductance de l'électrode (H)
G_t	la conductance de sol (Ω)
α, β	Nombres constants
A, B	des constantes pour le courant injecté
Z	l'impédance (Ω)
Y	l'admittance

Nomenclature

Γ	le constante de propagation.
Z_s	l'impédance interne (Ω)
$[V]$	le vecteur nodal de tension
$[I_s]$	le vecteur nodal de courant d'injection
$[G]$	est la matrice de conductance nodale
$[L]$	la matrice d'inductance nodale
E^s	le champ électrique le long de la surface du conducteur
$t' . I_l(r')$	le courant le long de conducteur (KA)
ϵ	la permittivité au milieu complexe
γ^2	la constante de propagation
k_1	coefficient de propagation dans le sol
ϵ_{eff}	désigne la permittivité complexe du sol
ϵ_r	la permittivité relative
σ	la conductivité du sol (S/m)
ω	désigne la fréquence de fonctionnement.
$\vec{A}$	le potentiel vecteur magnétique
$\vec{W}$	le vecteur de potentiel
W	le potentiel scalaire (V)
Z_{sk}	l'impédance série interne (Ω)
Z_R	L'impédance de l'électrode de terre (Ω)
λ	constante de propagation est donnée par la relation
ρ_s	la résistivité du sol ($\Omega.m$)
μ	la perméabilité du sol (H/m)
I_{50Hz}	le courant total injecté (A)
V_{50Hz}	le potentiel (V)
V_p	le pic potentiel (V)
I_p	le pic actuel (A)
E^i	le champ électrique incident (N/C)
Z_s	l'impédance interne (Ω)
G_m	conductance mutuelle (Ω)
L_m	de l'inductance mutuelle (H)
C_m	La capacité mutuelle (F)
$G_1(r, r')$	Fonction dyadique de Green pour un espace libre
$G(r, r')$	Fonction de Green prenant en compte l'interface 'sol/air'
$G_i(r, r')$	Terme dû à l'image du conducteur
$G_s(r, r')$	Terme correctif pour $G(r, r')$

Liste des Figures

Figure I.1	Courants atmosphériques.....	6
Figure I.2	Mécanisme de courant de foudre.....	6
Figure I.3	Formes d'ondes de tension et de courant de foudre	7
Figure I.4	Effets de la foudre sur les équipements.....	9
Figure I.5	Risques engendrés par la foudre sur l'homme.....	9
Figure I.6	Méthode de sphère roulante appliquée à une tige.....	10
Figure I.7	Application de méthode de sphère roulante.....	11
Figure I.8	Ligne HT protégée par des conducteurs de garde.....	12
Figure I.9	Paratonnerre à dispositif d'amorçage.....	12
Figure I.10	Renforcement des Paratonnerres par des fils tendus.....	13
Figure I.11	Schéma d'un Eclateur	14
Figure I.12	Parafoudre au carbure de silicium et à éclateur.....	15
Figure I.13	Parafoudre à oxyde de zinc reliée à un transformateur HT.....	16
Figure II.1	systèmes de mise à la terre pour un poste et pour des pylônes HT.....	18
Figure II.2	Sol en deux couches de résistivités différentes.....	21
Figure II.3	Circuit équivalent d'une maille carrée de la grille.....	25
Figure II.4	Circuit équivalent du système mise à la terre par Otero.....	26
Figure II.5	Modèle des lignes de transmission.....	29
Figure III.1	Tension obtenue lors d'injection de courant impulsionnel dans un système de mise à la terre.....	33
Figure III.2	Grille de mise à la terre.....	34
Figure III.3	Couplage mutuel entre conducteurs parallèles.....	34
Figure III.4	Tension transitoire, courant et impédance du système de mise à la terre	35
Figure III.5	L'algorithm utilisé pour calculer le potentiel transitoire de la grille de mise à la terre.....	36
Figure III.6	Signal périodique (a) et son spectre harmonique (b).....	37
Figure III.7	les configurations étudiées.....	38
Figure III.8	Potentiel obtenu au point d'injection pour les grilles 1x1 et 2x2.....	38
Figure III.9	Impédance transitoire au point d'injection pour les grilles 1x1 et 2x2.....	39
Figure III.10	Spectre harmonique pour le courant injecté.....	40
Figure III.11	Spectre harmonique pour le potentiel transitoire de 1x1 grille..	40
Figure III.12	Spectre harmonique pour le potentiel transitoire de 2 x 2 grilles.....	40
Figure III.13	La configuration étudiée.....	41
Figure III.14	Potentiel transitoire de la grille de mise à la terre 1x1 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.....	41

Liste des Figures

Figure III.15	L'impédance transitoire de la grille de mise à la terre 1x1 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.....	42
Figure III.16	Spectre harmonique pour le potentiel de 1x 1 grille enfouie dans un sol hétérogène au point d'injection A.....	43
Figure III.17	Spectre harmonique pour le potentiel de 1x1 grille enterrée dans le sol avec le point d'injection B.....	43
figure III.18	Potentiel transitoire de la grille 2x2 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.....	44
Figure III.19	L'impédance transitoire de la grille 2x2 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.....	44
Figure III.20	Spectre harmonique du potentiel de 2x2 grilles enfouies dans un sol hétérogène au point d'injection A.....	45
Figure III.21	Spectre harmonique pour le potentiel de 2x 2 grilles enfouies dans le sol avec le point d'injection B.....	46
Figure III.22	Spectre harmonique pour le potentiel de grilles 2x2 enfouies dans le sol avec le point d'injection C.....	46
Figure IV.1	La simulation et les résultats mesurés obtenus par (a) Résultat pour un sol de 300 Ω .m.(b) Résultat pour 4 k Ω . m de sol.....	51
Figure IV.2	les résultats de simulation obtenus TLM résolus par Euler (a) Résultat pour un sol de 300 Ω .m (b) Résultat pour 4 k Ω . m de sol.....	52
Figure IV.3	Électrode de mise à la terre de l'éolienne.....	53
Figure IV.4	Potentiel transitoire au point d'injection sans ionisation du sol.	53
Figure IV.5	Potentiel transitoire au point d'injection avec incorporation de l'ionisation du sol.....	54
Figure IV.6	Configuration B étudiée par Sunjerga et al.....	55
Figure IV.7	Comparaison entre les potentiels transitoires obtenus pour les configurations A et B pour un sol homogène de : (a) 0 Ω m/80, (b) 100 Ω m/40, (c) 1000 Ω m/9.....	57
Figure IV.8	Potentiel transitoire obtenu pour le système de mise à la terre enfoui dans un sol stratifié (a) couche supérieure de 10 Ω m/80, (b) couche supérieure de 50 Ω m/60, (c) couche supérieure de 100 Ω m/40.....	59
Figure IV.9	Courant transitoire le long des anneaux de mise à la terre de la configuration B enfouis dans le sol de (a) 10 Ω m/80, (b) 100 Ω m/40, (c) couche supérieure de 1000 Ω m/9.....	62
Figure IV.10	Potentiel transitoire le long des anneaux de mise à la terre de la configuration B enfouis dans le sol de (a) 10 Ω m/80, (b) 100 Ω m/40, (c) couche supérieure de 1000 Ω m/9.....	64
Figure IV.11	Courant transitoire le long des anneaux de mise à la terre enfouis dans un sol stratifié avec une couche supérieure de (a) 10 Ω m/80, (b) 50 Ω m/60, (c) une couche supérieure de 100 Ω m/40.....	66
Figure IV.12	Potentiel transitoire le long des anneaux de mise à la terre enfouis dans un sol stratifié avec une couche supérieure de (a) 10 Ω m/80, (b) 50 Ω m/60, (c) une couche supérieure de 100 Ω m/40.....	67

Liste des tableaux

Tableau II.1	Résistivité moyenne de quelques types de sols.....	20
Tableau III.1	Paramètres d'impulsion pour les grilles 1x1 et 2x2.....	39
Tableau III.2	Paramètres d'impulsions pour les grilles 1x1	42
Tableau III.3	Paramètres d'impulsions pour les grilles 2x2.....	45
Tableau IV.1	Géométrie du système de mise à la terre de l'éolienne B.....	55
Tableau IV. 2	Valeurs d'impédance d'impulsion pour chaque configuration.....	58
Tableau IV.3	Composante DC des valeurs d'impédance transitoire pour chaque configuration.....	58
Tableau IV.4	Les valeurs d'impédance d'impulsion pour chaque configuration.....	60
Tableau IV.5	Composante DC des valeurs d'impédance transitoire pour chaque configuration.....	60

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	1
 Chapitre I GENERALITES SUR LA FOUDRE ET SYSTEME DE PROTECTION	
I-1 Introduction.....	5
I-2 La compatibilité électromagnétique.....	5
I-2-1 La perturbation électromagnétique.....	5
I-2-2 La protection contre les perturbations.....	5
I-3 La foudre.....	5
I-3-1 Origine et mécanisme de la foudre.....	5
I-3-2 Le courant de foudre.....	7
I-3-3 Représentation mathématique du courant de foudre.....	7
a. Le modèle bi-exponentiel.....	7
b. Modèle de heidler.....	8
I-3-4 Effets de la foudre.....	8
a. Les effets thermiques	8
b. Les effets mécaniques.....	8
c. Les effets électriques	8
I-4 Protection contre la foudre.....	9
I-4-1 Principe de protection.....	10
I-4-2 Les points d'impact de la foudre	10
I-4-3 Composants des systèmes de protection.....	11
a. La protection contre l'impact direct de la foudre.....	11
b. La protection contre les effets indirects de la foudre.....	13
L'éclateur	13
Le parafoudre	14
I-5 Conclusion.....	16
 Chapitre II REVUE DE LITTERATURE SUR LES SYSTEMES DE MISE A LA TERRE	
II-1 Introduction	18
II-2 Système de mise a la terre.....	18
II-2-1 Définition.....	18
II-2-2 Configurations de système de mise à la terre.....	19
a- Electrode verticale ou horizontale.....	19
b- b-Grille de mise à la terre.....	19
II-2-3 Caractéristiques de sol.....	19
a- Résistivité	19
b- Permittivité	20

c- Perméabilité.....	20
II-3 Mise a la terre dans le sol non homogène.....	21
II-3-1 Sol en deux couches de résistivités différentes.....	21
II-3-2 Sol en plusieurs couches de résistivités différentes.....	21
II-4 les Méthodes de mise a la terre pour les études des transitoires.....	22
II-5 Développements récents dans la modélisation des systèmes de mise à la terre ..	23
II-5-1 Méthode des circuits équivalents.....	24
II-5-2 Modèle électromagnétique	26
II-5-2-1 Théorie des antennes.....	27
II-5-2-2 Résolution numérique del'équation intégrale.....	27
II-5-2-3 Méthode des moments.....	28
II-5-3 Approche hybride.....	28
II-5-4 Modèle des lignes de transmission (TL).....	29
II-6 Conclusion.....	30

CHAPITRE III MODELISATION DE LA REPONSE TRANSITOIRE DE SYSTEME MISE A LA TERRE

III-1 Introduction.....	32
III-2 Modélisation de système de mise à la terre.....	32
a- Modélisation des systèmes de mise à la terre en fréquence industrielle.....	32
b- Modélisation des systèmes de mise à la terre en hautes fréquences.....	33
III-3 Effet de couplage mutuel entre les conducteurs de grilles de mise à la terre.....	33
III-4 Paramètres d'analyse du comportement transitoire du système de mise à la terre	35
III-5 Analyse harmonique des phénomènes transitoires.....	37
III-6 Validation et simulation	37
III-6 -1 Grilles de mise à la terre enfouies dans un sol hétérogène.....	41
a- Grille 1x1	41
b- Grille 2x2.....	43
III-7 Discussion des résultats.....	46
III-8 Conclusion.....	47

Chapitre IV APPLICATION A LA PERFORMANCE DE SYSTEME DE MISE A LA TERRE DES INSTALLATIONS EOLIENNES

IV-1 Introduction	49
IV-2 Mise à la terre des éoliennes.....	49
IV-3 Configuration des systèmes de mises à la terre des éoliennes.....	49
IV-4 Comparaison et validation.....	50
IV-4-1 Comparaison avec les résultats expérimentaux.....	50
IV-4-2 Comparaison avec les résultats du FDTD.....	52
IV-5 Application.....	54
IV-5-1 Comparaison entre différentes configurations de systèmes de mise à la terre d'éoliennes.....	54
IV-5-2 Différentes configurations enfouies dans un sol stratifié.....	58
IV-5-3 Participation des anneaux de configuration B dans la réponse transitoire.....	61
a - Sol homogène.....	61
b- Sol stratifié.....	64

Sommaire

IV-6 Conclusion.....	66
CONCLUSION GENERALE.....	69

Bibliographie

Annexes

Blocs des simulations
Les publications et les conférences

Introduction Générale

L'analyse de la CEM et de la protection contre la foudre des systèmes électriques de puissance nécessitent la connaissance du comportement dynamique des systèmes de mise à la terre. Ils ne peuvent pas être considérés comme des équipotentielles planes, mais doivent être traités comme des voies de couplage pour les surtensions transitoires. Les systèmes de mise à la terre ont deux objectifs: premièrement, leur tâche est de répandre le courant de défaut à la terre, qui peut être causé par des défauts internes, des défauts déséquilibrés ou des sources externes (comme la foudre). Deuxièmement, l'expansion du système de mise à la terre crée un potentiel de référence pour tous les appareils électroniques qui composent le système électrique. La d.d p référence locale et les interférences conduites à travers le système de mise à la terre seront la source de défauts et d'endommagement des composants connectés électriquement au système de mise à la terre. Ces systèmes de mise à la terre à compatibilité électromagnétique (CEM) sont considérés comme un chemin de couplage entre les sources d'interférences et les conséquences des surtensions généralement causées par des défauts ou des courants de foudre. Une contrainte transitoire ou de champ se produit à l'emplacement de l'objet perturbé.

Les systèmes de mise à la terre font référence à un ou plusieurs fils métalliques de structures géométriques différentes, qui sont enfouis dans le sol. Ces structures de mise à la terre, à savoir un seul fil de terre horizontal, une tige verticale, un conducteur annulaire et une grille de mise à la terre de grande surface, ou une combinaison appropriée de ces structures. Si un système à protéger est totalement isolé ou protégé de tous couplage, il n'est pas nécessaire d'avoir un système de mise à la terre pour Compatibilité électromagnétique (CEM). Cependant, en pratique de nombreux systèmes ne sont pas toujours isolé. En général, il existe des liens avec l'environnement extérieur par le biais de l'alimentation électrique, des conduites d'eau ou de gaz et des câbles de communication. Par conséquent, lorsqu'un événement de surtension atmosphérique (foudre) se produit à proximité du système ou se termine sur le système, il y aura une hausse de différence de potentiel et le transfert transitoire d'énergie entre le système et l'extérieur, qui est la première cause des détériorations et endommagements des équipements et composants du système électrique.

Afin de réduire les risques mentionnés ci-dessus, il faut avoir une conception efficace du système de mise à la terre pour divers objets du domaine de la protection contre la foudre et de la CEM. Il s'agit d'un système de mise à la terre efficace capable de dissiper les courants de choc en toute sécurité dans le sol autant que possible et réduire les risques susmentionnés.

Compte tenu des faits susmentionnés, il est certain que le système de mise à la terre forme une partie essentielle du système de protection contre la foudre pour tout système d'alimentation les composants (comme les sous-stations, les centrales électriques, les lignes de transmission, les systèmes ferroviaires électrifiés, les tours de communication, les grands bâtiments, etc), il est également important pour la protection du personnel travaillant sur le site. Il y a de très nombreux endommagements, qui sont causés par la propagation de l'onde de choc de foudre sur les mises à la terre des structures.

La démarche classique pour estimer l'effet de cette onde électromagnétique sur le réseau et son environnement est de calculer l'évolution temporelle et fréquentielle de plusieurs grandeurs électriques. Chaque élément du réseau à étudier est représenté par un modèle numérique, basé sur la connaissance de son comportement. Une attention particulière doit être portée à la définition du modèle des systèmes de mise à la terre, car ceux-ci jouent un rôle crucial dans la réponse du système électrique foudroyé.

Afin d'étudier ces phénomènes électromagnétiques, de nombreuses études théoriques et campagnes expérimentales ont toujours été menées. Cependant, devant le coût de certaines expérimentations et la complexité de certains cas, les simulations numériques ont pris une place de plus en plus importante lors des dernières décennies. Ainsi, la modélisation et l'étude de problèmes complexes sont désormais possible via la simulation numérique. Les méthodes numériques sont devenues incontournables pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes des prises de terre et la résolution des équations de Maxwell. Dans de nombreuses applications (calcul du courant, champ électromagnétique et impédance transitoire) les quantités électromagnétiques doivent être déterminées sur une large bande de fréquences et le système linéaire doit être résolu pour chaque fréquence d'intérêt. Ceci entraîne un coût de calcul important.

Notre projet s'inscrit dans la problématique globale de la protection régulière et sécuritaire par les systèmes de mise à la terre des installations électriques. L'une des questions posées sur ce système est de savoir comment procéder continuellement à la protection du système de mise à la terre pour une production d'énergie électrique sans interruption majeure du service ?

Dans ce travail de recherche, notre intérêt est porté sur la réponse transitoire d'une grille de mise à la terre soumise à une transitoire de foudre, en se focalisant à l'analyse de l'augmentation du potentiel de la terre ainsi qu'à la variation de l'impédance transitoire de la mise à la terre en utilisant l'approche modifiée de la ligne de transmission TLM résolue par la méthode d'Euler en y introduisant l'ionisation du sol, afin d'étudier l'influence des dimensions de la grille, le type de sol et le point d'injection actuel sur la réponse du système de mise à la terre. Les turbines éoliennes et les pylônes de transport sont sujets à des phénomènes de la foudre qui ne cessent de leur causer un problème majeur à cause de leur hauteur et de leur position géographique. Deux types différents de système de mise à la terre seront étudiés dans des conditions de foudre : la première configuration simple avec de longues électrodes verticales, et la seconde configuration contient plusieurs anneaux enterrés à plusieurs profondeurs et reliés à des électrodes courtes lorsque le sol est homogène et stratifié.

L'objectif de notre sujet de recherche est de modéliser, d'identifier les paramètres des différents composants du système de mise à la terre et de calculer les différents paramètres des systèmes de mise à la terre : courants, tensions et impédances transitoire afin d'élaborer un modèle décrivant le comportement dynamique des systèmes de mise à la terre pour les études de transitoires des éoliennes en temporel. Enfin, proposer des alternatives pour assurer une bonne continuité optimale du système de protection des installations éoliennes.

Le présent travail de recherche est structuré en quatre chapitres : Dans le premier chapitre, nous passerons tout d'abord à un bref aperçu sur le phénomène de foudre et les moyens préconisés pour la protection contre les différentes natures de surtension, ainsi que les notions de base indispensables à l'analyse des mises à la terre des systèmes électriques.

Au chapitre 2 nous présenterons les différents modèles mathématiques existants pour la l'analyse transitoire des systèmes de mise à la terre. Les avantages et les inconvénients de chaque modèle sont résumés. La modélisation du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre est abordée. Basé sur ces discussions, un modèle de ligne de transmission non uniforme est décrit dans détail.

Le chapitre 3 décrit le modèle amélioré pour les sols l'ionisation, qui sont mis en œuvre en liaison avec la ligne de transmission les approches présentées au chapitre 2. Le modèle amélioré d'ionisation des sols est basée sur l'équation TLM résolue par la méthode Euler en y introduisant le concept de résistivité résiduelle dans la région d'ionisation afin d'étudier le comportement transitoire des grilles de mise à la terre enfouies dans des sols homogènes et hétérogènes. Ce chapitre attire également l'attention sur les points suivants : analyse de sensibilité des paramètres du sol , circuit équivalent d'une grille de mise à la terre dans des conditions de foudre et l'influence des dimensions de la grille, le type de sol et le point d'injection actuel sur la réponse du système de mise à la terre (potentiel transitoire et impédance).

Nous nous intéresserons dans ce chapitre 4 aux systèmes de mise à la terre du réseau électriques des installations éoliennes et nous insisterons sur la nécessité de développer un modèle représentant leur comportement pour les études de transitoire de foudre. Différentes configurations avec plusieurs degrés de complexité seront simulées. Pour valider les résultats obtenus, nous comparons les résultats du modèle modifié TLM aux résultats des mesures et des simulations du modèle FDTD. Enfin une comparaison entre différentes configurations de mise à la terre des éoliennes est faite pour des systèmes de mise à la terre dans un sol homogène et stratifié.

Chapitre I :

Généralités sur la foudre et système de protection

I-1 Introduction

La protection des équipements électriques contre les perturbations électromagnétiques est devenue aujourd'hui un problème de plus en plus préoccupant. Pour cela nous présentons dans ce chapitre la foudre comme générateur de perturbation, et nous présentons les équipements de protection contre ce genre de défauts. Et nous nous intéressons des systèmes de mise à la terre.

I-2 La compatibilité électromagnétique

Le principe de la compatibilité électromagnétique (CEM) consiste à assurer le fonctionnement satisfait de tout dispositif électrique en présence d'autres. Autrement dit, l'aptitude d'un équipement électrique à fonctionner dans un milieu sans perturbe les autres équipements ni être perturbé. De cette définition, on s'intéresse à trois choses : l'étude des sources de perturbations, l'étude des couplages (le milieu de propagation de perturbation), et l'étude de l'impact des perturbations sur une « victime ». [1]

I-2-1 La perturbation électromagnétique

De nos jours, les perturbations électromagnétiques sont devenues de plus en plus gênantes pour tous les éléments d'un réseau électrique.

Ces perturbations sont classées en deux familles suivant leur origine :

- les perturbations d'origine artificielle telles que celles dues aux radiocommunications, aux radars, ...,
- les perturbations d'origine naturelle telles que les décharges électrostatiques et les rayonnements cosmiques. [2]

I-2-2 La protection contre les perturbations

Pour la première famille, on peut réduire la perturbation en limitant les émissions électromagnétiques indésirables, ou en augmentant l'immunité de système victime aux perturbations extérieures.

Malheureusement, pour les perturbations d'origine naturelle, il est impossible d'avoir une quelconque influence sur la source. C'est pourquoi il est indispensable de connaître précisément les caractéristiques de la perturbation pour pouvoir réaliser une protection efficace pour le système victime. [2]

I-3 La foudre

La foudre est un phénomène perturbateur d'origine naturel important et dangereux. Il s'agit d'une décharge électrique entre nuages ou entre nuage et sol.

La foudre demeure imprévisible et l'une des premières causes de dysfonctionnement et de destructions d'équipements électriques. [2]

I-3-1 Origine et mécanisme de la foudre

Les charges déplacées par ce courant sont compensées par divers transferts de charges vers le sol dont le plus important est le coup de foudre [3].

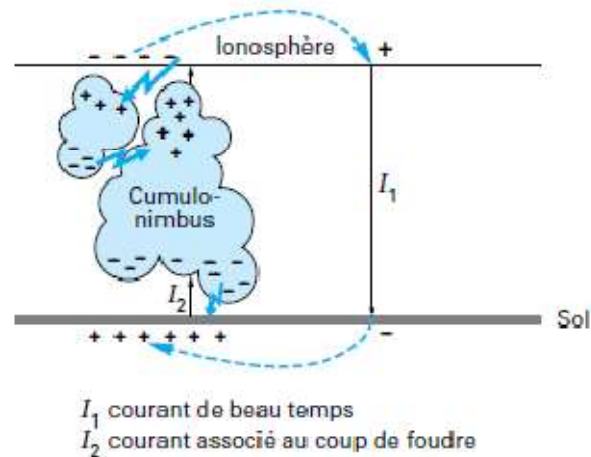


Figure I.1 : Courants atmosphériques [3]

Les coups de foudre peuvent être entre nuage et sol ; entre deux nuages ou entre nuage et ionosphère.

Ils peuvent se classer selon la direction (ascendante ou descendante) et la polarités (positive ou négative).

Les coups de foudre descendants négatifs sont les plus fréquents dans nos régions, alors que les positifs sont rares, mais de plus forte intensité [3].

Le déroulement d'un coup de foudre négatif est représenté sur la figure I.2.

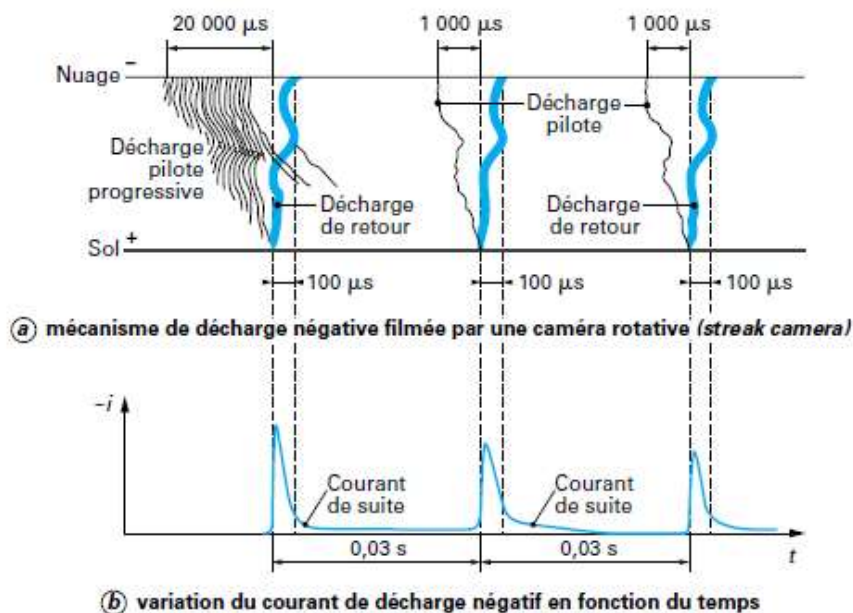


Figure I.2 : Mécanisme de courant de foudre [3]

La première impulsion démarre par une série de prédécharges, qui trace un chemin préférentiel, du nuage vers le sol pour un coup de foudre descendant, sous la forme d'un canal ionisé. Après que le chemin sera continu entre le nuage et le sol, la décharge principale va s'effectuer du sol vers le nuage (arc en retour) [3].

Le premier arc en retour produit un courant au niveau du sol et d'un temps de montée de l'ordre de quelques microsecondes. La durée de l'impulsion du courant (à la mi-hauteur) est de l'ordre de 50 microsecondes. Durant cette phase, la température du canal s'élève rapidement

pour atteindre des valeurs jusqu'à 30'000 °K qui génère un canal de haute pression provoquant une onde de choc appelée tonnerre. Après la phase de l'arc en retour, l'éclair peut disparaître.

Entre la fin du premier arc en retour et le début du traceur obscur, une activité électrique, se manifeste; il existe cependant un doute quant à l'influence de cette activité et le déclenchement du traceur obscur. Le traceur obscur déclenche enfin l'arc en retour subséquent. Le courant des arcs en retour subséquents mesurés à la base du canal ont généralement un temps de montée plus rapide que le courant du premier arc en retour. De nouvelles séquences traceur-arc peuvent ensuite se produire, donnant parfois jusqu'à 15 arcs en retour [4].

I-3-2 Le courant de foudre

Ce courant est de nature impulsionnelle, et sa forme se caractérise par une valeur de crête, un front de montée jusqu'à la crête (ou temps de montée), un temps de décroissance [4].

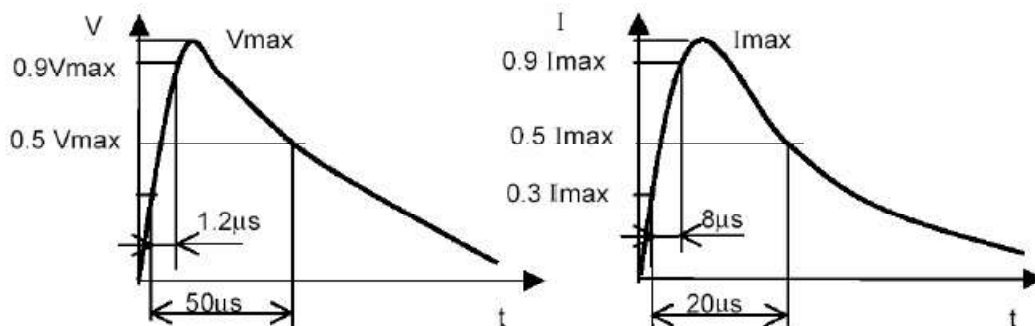


Figure I.3: Formes d'ondes de tension et de courant de foudre [4]

Le courant de foudre est caractérisé par plusieurs paramètres [4]:

- **Valeur de crête:** C'est la valeur maximale atteinte par l'intensité d'une impulsion de courant. Elle varie d'un coup de foudre à l'autre. Les valeurs de crête sont entre 2 et 200 kA pour les coups négatifs, et de 5 à 300 kA pour les positifs.
- **Temps de montée :** Durée entre l'instant de début de courant et l'instant où ce courant atteint sa valeur maximale. Cette durée est de 2 à 20 µs pour le courant de premier coup, de 0,1 à 1 µs pour les coups subséquents des coups de foudre négatifs. Et pour les coups de foudre positifs de 100 à 200 µs.
- **Temps de décroissance :** Durée entre le début de courant et l'instant où la valeur de l'onde est retombée à 50 % de la valeur de crête. Pour les courants de foudre négatifs elle est de l'ordre de 100 µs, et 1000 µs pour les coups de foudre positifs.

I-3-3 Représentation mathématique du courant de foudre

La mesure a 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 [I-7]. La propagation du courant d'arc en retour le long du canal ionisé est à l'origine d'un rayonnement électromagnétique.

a. Le modèle bi-exponentiel

Le modèle bi-exponentiel est le premier modèle adopté et le plus utilisé dans la littérature. Les fonctions exponentielles, fréquemment utilisées par un certain nombre d'auteurs, présentent l'avantage d'avoir des transformées de Fourier analytiques, ce qui permet de faire une analyse directe dans le domaine fréquentiel.

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 :

$$I(t) = I_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.1)$$

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

b. Modèle de heidler

En 1985, Heidler a présenté une nouvelle expression analytique montrant le courant à la base du canal de foudre. L'utilisation de cette dernière a donné des résultats correspondant mieux aux observations expérimentales.

La forme analytique du courant de foudre d'Heidler, se compose de sommes de fonctions exponentielles. Ce type de fonction présente l'intérêt d'avoir une transformée de Fourier pouvant être calculée de manière analytique, ce qui facilite l'analyse dans le domaine fréquentiel.

L'expression du courant de foudre dite de forme de Heidler est de la forme:

$$i(t) = \frac{I_0}{n} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (1.2)$$

Avec la valeur de η qui est de :

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^n\right) \sqrt{n \frac{\tau_2}{\tau_1}} \quad (1.3)$$

n = Exposant ayant des valeurs comprises entre 2 à 10.

η = Le facteur de correction d'amplitude

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

τ_1 et τ_2 représentent respectivement la constante de temps de front et la constante de décroissance

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

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{n_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n_1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right) + \frac{I_{02}}{n_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n_2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad (1.4)$$

I-3-4 Effets de la foudre

Les effets de foudres sont classés en trois classes principales [3]:

a- Les effets thermiques : comme la température à l'intérieur du canal de foudre est élevée, la foudre dissipe une partie de son énergie sous forme de chaleur. Ces effets ne sont importants que pour des matériaux mauvais conducteurs ou humides. Mais en particulier, si cette chaleur provoque la vaporisation de l'eau dans un sol humide, cela peut provoquer l'écrasement d'un câble souterrain.

b- Les effets mécaniques sont :

- coup de tonnerre résultant de la détente brusque de l'air porté à 30 000°K dans le canal ionisé ;
- la force électromagnétique due au champ magnétique créé par la circulation du courant de foudre dans le canal ionisé, et ce qui engendre des forces d'attraction ou de répulsion entre les conducteurs.

c- Les effets électriques :

- La circulation du courant de foudre, de loin la plus importante qui pourra dépasser les limites d'échauffement des conducteurs;

- L'induction électrique correspondant au champ électrique ; qui peut engendrer par exemple des surtensions entre un équipement mis à la masse et son boîtier qui ne l'est pas.

Les effets électriques de la foudre sur les équipements et l'homme sont respectivement représentés sur les figures I.4 et I.5.

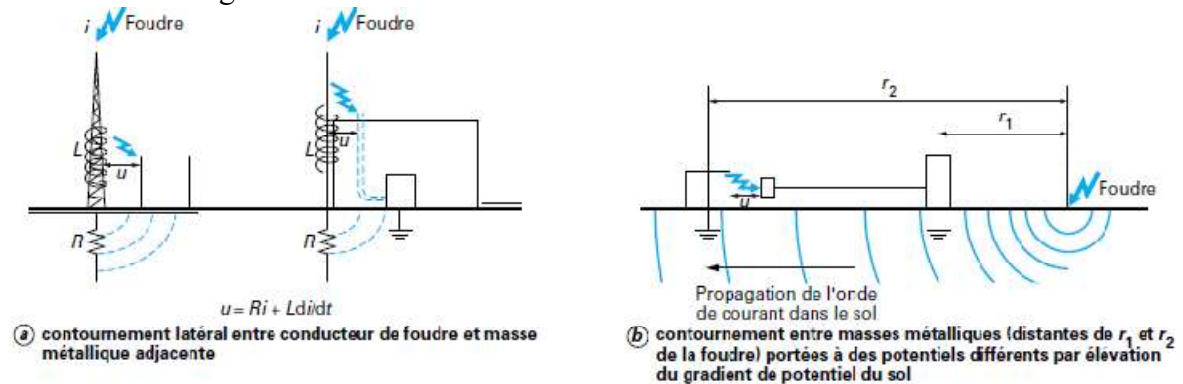


Figure I.4 : Effets de la foudre sur les équipements [3]

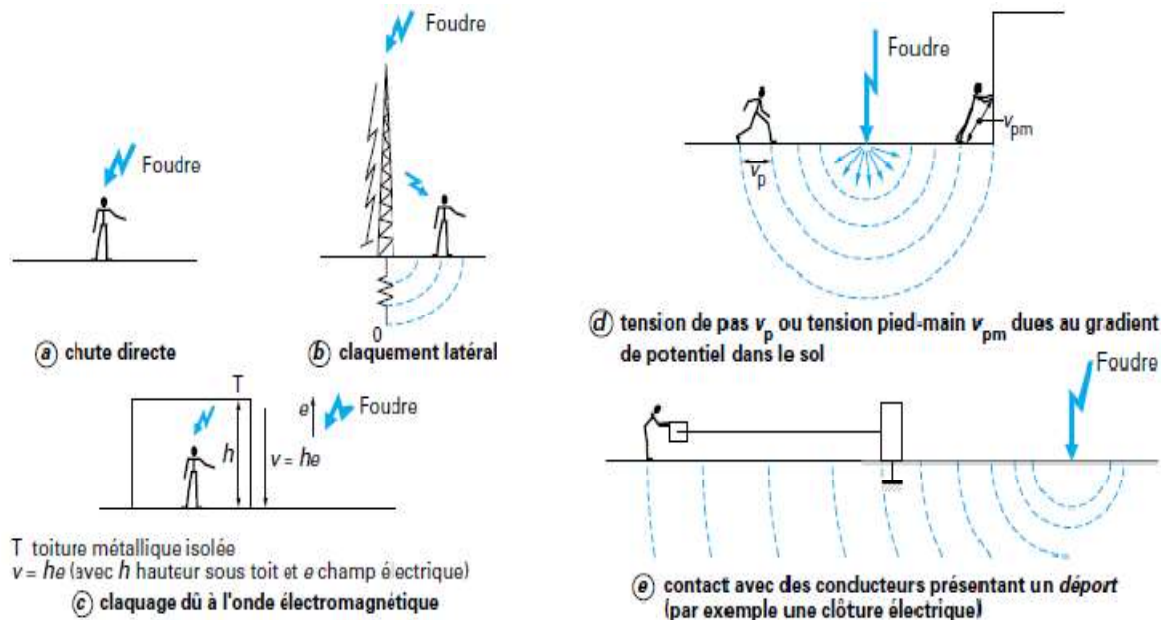


Figure I.5 : Risques engendrés par la foudre sur l'homme [3]

Les effets électriques de la foudre sur les câbles enterrés ou aériens sont aussi considérables, car ces câbles sont de très bons capteurs de la foudre, peuvent la transmettre son courant aux équipements électriques connectés au réseau.

I-4 Protection contre la foudre

La protection contre la foudre en général se base sur l'écoulement de courant de foudre vers la terre. Alors pour que la protection soit efficace, est donc indispensable d'assurer des impédances de terre minimales, en créant des maillages et des interconnexions de prise de terre chaque fois que possible.

En pratique, dans les postes de haute tension une impédance de terre inférieure à 1Ω à fréquence industrielle est habituellement demandée, et pour les pylônes une impédance de 10 à 15Ω est recherchée [5].

I-4-1 Principe de protection

Depuis l'invention du paratonnerre par Benjamin Franklin et Jacques de Romas en 1753, différents dispositifs de capture de la foudre ont vu le jour et la protection contre la foudre n'a cessé d'évoluer pour améliorer son efficacité. [6]

En général, il existe deux types de protection contre la foudre : La protection contre l'impact direct de foudre, et la protection contre l'effet indirect de la foudre (les surtensions induites).

La protection de contre l'impact direct de foudre consiste à capter le courant de foudre et de l'acheminer vers la terre. Mais d'abord pour le capter il faut déterminer les points d'impact de la foudre.

I-4-2 Les points d'impact de la foudre

Afin de mieux protéger les équipements électriques contre la foudre, il fallait connaître deux paramètres : la distance d'amorçage et le courant que peut supporter le conducteur sans qu'il y ait panne.

En 1973, sous la direction scientifique de Whitehead, Love a aussi modélisé la distance d'amorçage en fonction du courant de l'arc en retour et a abouti à l'expression suivante [6]:

$$r_s = 2 I + 30 \left(1 - e^{\frac{I}{6.25}} \right) \quad (1.5)$$

qui a été approximée pour donner la célèbre relation utilisée actuellement par toutes les normes internationales [6]:

$$r_s = 10 I^{0.65} \quad (1.6)$$

avec r_s (m) distance d'amorçage, I (kA) courant de foudre.

Lee[7, 8] a décrit En 1978le modèle électro-géométrique et le modèle de la sphère roulante, ce modèle électro-géométrique fournit la loi empirique reliant le rayon de la sphère r_s , qui correspond à la distance d'amorçage, à la valeur crête du pic de courant I du premier arc en retour. Le centre de la sphère correspond à la tête du leader descendant [6].

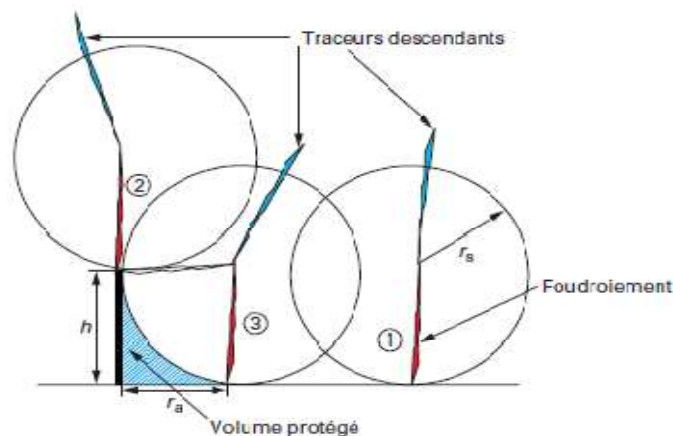


Figure I.6: Méthode de sphère roulante appliquée à une tige [6]

La figure I.6 montre l'application de la sphère roulante à une tige de paratonnerre de hauteur h . Suivant la position de la sphère, trois scénarios existent [6]:

1. la sphère (1) rencontre le sol. L'éclair va toucher le sol en cet endroit ;
2. la sphère (2) entre en contact avec le paratonnerre. Donc le paratonnerre va capter le courant de foudre ;
3. la sphère (3) se connecte au paratonnerre et au sol simultanément ; l'un des deux recevra le coup de foudre.

La sphère (3) forme avec le paratonnerre un volume qui ne pourra jamais être foudroyé, il est protégé par la présence de cette tige, et son volume dépend de sa hauteur et du rayon r_s de la sphère (cette dernière est en fonction du courant de foudre). En effet, la surface protégée de rayon r_a autour de cette tige croît avec r_s de la façon suivante :

$$\text{pour } r_s < h \quad r_a = r_s \quad (1.7)$$

$$\text{pour } r_s > h \quad r_a = \sqrt{2hr_s - h^2} \quad (1.8)$$

Par conséquent, au sol, la surface protégée par la tige est :

$$S = \pi r_a^2 \quad (1.9)$$

Afin d'appliquer cette méthode pour déterminer les points d'impact potentiel de la foudre sur une structure, il suffit de rouler une sphère imaginaire de rayon r_s au-dessus de la structure à protéger comme montre la figure I.7.

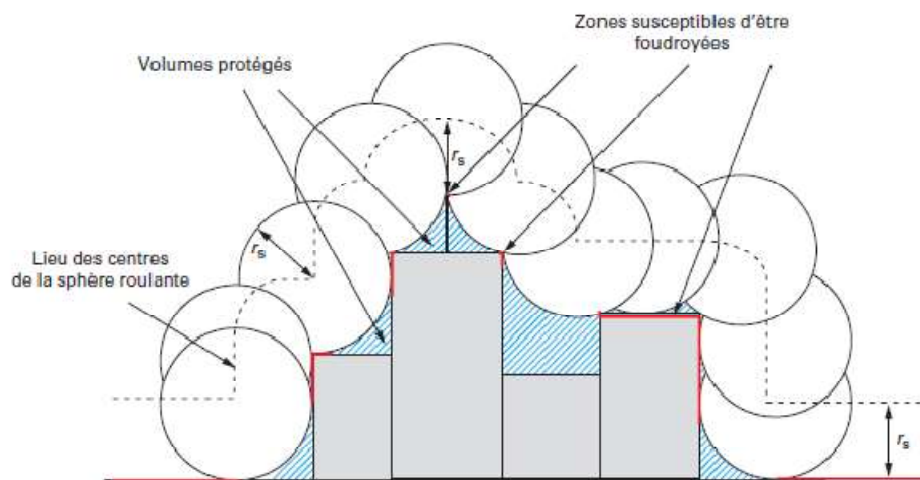


Figure I.7: Application de méthode de sphère roulante [6]

I-4-3 Composants des systèmes de protection

a – La protection contre l'impact direct de la foudre

Son principe est de capter et canaliser la foudre. Tous ces dispositifs de protection sont conçus pour recevoir la foudre et sont destinés à :

- attirer la foudre,
- être rigides pour supporter ses effets thermiques et mécaniques,
- canaliser et dissiper le courant dans le sol.

Différents dispositifs sont utilisés pour atteindre le but recherché (cage maillée, fils tendus, paratonnerres).

Les organes de capture dépendent de la géométrie de système à protéger. Par exemple pour les lignes aériennes, on installe des câbles de garde au-dessus des conducteurs de lignes avec un rayon plus faible pour capter les courants de foudre et les acheminer à la terre à travers la charpente des pylônes qui sont mises à la terre

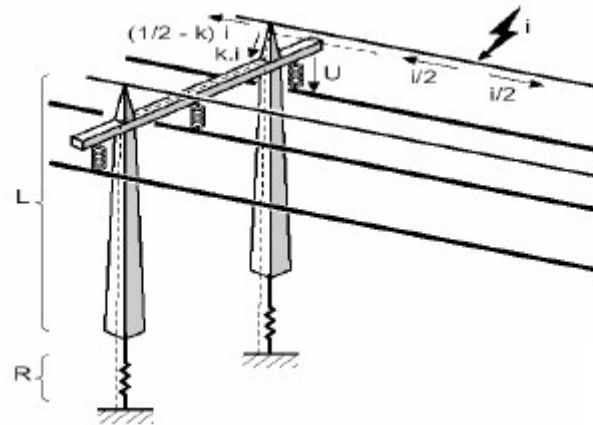


Figure I.8 : Ligne HT protégée par des conducteurs de garde [4].

Pour les postes de Haute Tension, et certains constructions énergétiques ou des hautes tours, on installe des paratonnerres qui sont destinés à capter le courant de foudre. Et pour améliorer leur fonctionnement, il existe actuellement des paratonnerres actifs équipés par des dispositifs d'amorçage, qui peuvent augmenter le rayon d'attraction de la foudre.

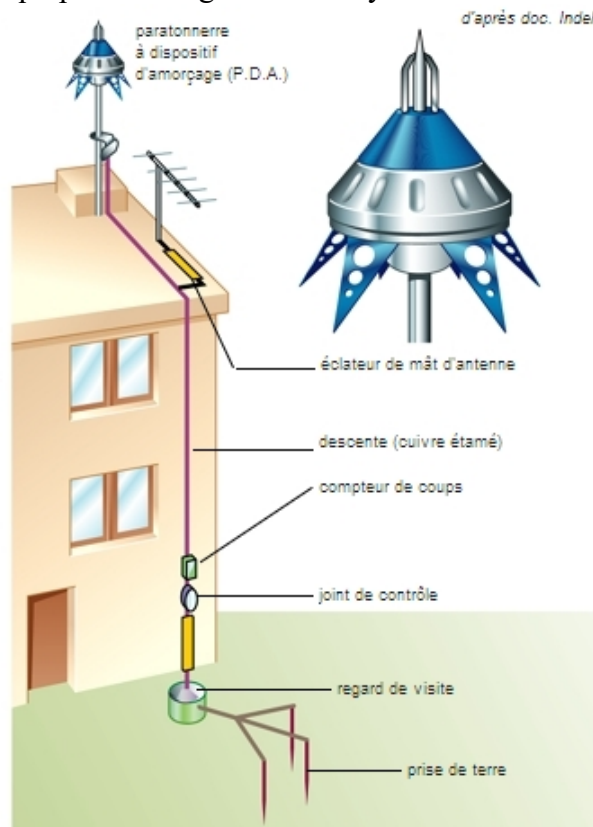


Figure I.9 : Paratonnerre à dispositif d'amorçage [5]

Pour certains systèmes, les paratonnerres sont insuffisants pour assurer une protection adéquate contre la foudre, c'est pourquoi on lie les paratonnerres qui entourent l'espace à protéger par des fils conducteurs tendus, et ses fils ainsi que les paratonnerres sont reliés à la terre, c'est le même principe de cage de Faraday.



Figure I.10 : Renforcement des Paratonnerres par des fils tendus

Le câble d'acheminement de courant de foudre doit assurer la conduction de courant de foudre sans être détruit par ses effets thermiques et il doit être bien fixé pour éviter les efforts électrodynamiques de courant de foudre.

Le système de mise à la terre est destiné à dissiper le courant de foudre dans le sol. En générale, on cherche à avoir un système de mise à la terre à la moindre résistance possible (moins de $1\ \Omega$ pour les postes HT, et moins de $10\ \Omega$ pour les pylônes HT).

b – La protection contre les effets indirects de la foudre

La protection contre les effets indirectes de la foudre consiste à protéger les éléments d'un réseau électrique contre les surtensions transitoires induites dans le réseau électrique. Pour cela, il existe deux principaux dispositifs de protection contre les surtensions transitoires : l'éclateur et le parafoudre.

L'éclateur [9]

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger, l'autre à la terre. C'est le plus simple et robuste et le moins cher des moyens de protection.

La forme et la nature des électrodes dépendent de la tension d'exploitation et des conditions météorologiques. La distance entre ces deux électrodes est réglable et détermine la tension d'amorçage.

Ses avantages sont le coût réduit et la robustesse. Mais ses inconvénients sont nombreux, on cite parmi autres :

- Une fois amorcé entre les deux électrodes, l'arc ne s'éteint pas spontanément. Donc un court-circuit artificiel est créé qui doit être éliminé par l'action des protections et du ou des disjoncteurs associés.
- Le niveau d'amorçage est très fluctuant. Il dépend de plusieurs paramètres comme les conditions atmosphériques, l'état d'ionisation de l'air, ...
- Ils sont sensibles aux agressions extérieures (neige, animaux, ...) surtout pour les tensions qui ne sont pas assez élevées (comme 20 kV) où les distances entre les électrodes des éclateurs sont faibles.

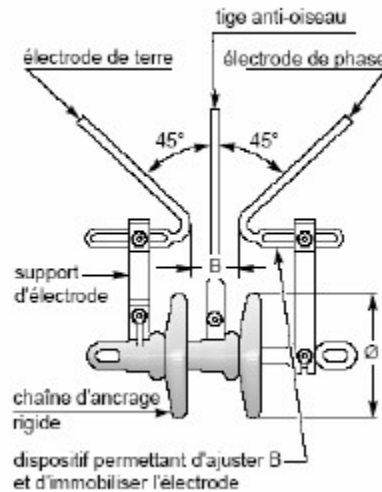


Figure I.11 : Schéma d'un Eclateur [4]

Le parafoudre

Le parafoudre est un dispositif installé dans les réseaux électriques pour la protection contre les surtensions transitoires et la limitation de la durée et de l'amplitude des courants de suite dus à l'amorçage d'arc électrique. Dans sa version classique, un parafoudre est constitué d'un éclateur sous atmosphère contrôlée, mis en série avec une ou plusieurs résistances non linéaires [4].

Les avantages de parafoudre par rapport à l'éclateur sont:

- il travaille en atmosphère contrôlée, donc la tension d'amorçage n'est pratiquement pas influencée par les conditions atmosphériques.
- contrairement aux éclateurs, il ne produit pas de front raide lors de son amorçage, grâce à la présence de la résistance non linéaire.
- la résistance non linéaire placée en série avec l'éclateur limite le courant de suite, qui est coupé lors du prochain passage par zéro de la tension.

Il existe aujourd'hui deux types de parafoudres sur le marché [9]:

-Le premier type dont la partie active est constituée d'éclateurs et de varistances au carbure de silicium (SiC), est appelé parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs. Elle fonctionne comme suit :

- En régime permanent (Sans défauts), le parafoudre est parcouru par un très faible courant (de l'ordre du milliampère) drainé par le système de répartition de tension.
- Lors d'une surtension supérieure au niveau d'amorçage, les éclateurs s'amorcent et le courant augmente alors rapidement. La bobine présente vis-à-vis de ce courant une impédance élevée et le courant s'écoule par l'intermédiaire des résistances non linéaires placées en parallèle sur la bobine de soufflage.
- Après le passage de la surtension les éclateurs fortement ionisés ne se désamorcent pas. Le courant traversant le parafoudre est alors issu du réseau. Son amplitude et ses variations sont beaucoup plus faibles, si bien que l'impédance de la bobine diminue considérablement et celle-ci va être, à son tour, parcourue par le courant. Sous l'effet du champ magnétique créé par cette bobine, l'arc est étiré dans la chambre en céramique. La tension d'arc augmente.
- Lorsque la tension d'arc atteint la tension appliquée au parafoudre, celui-ci se désamorce et retrouve le régime permanent.

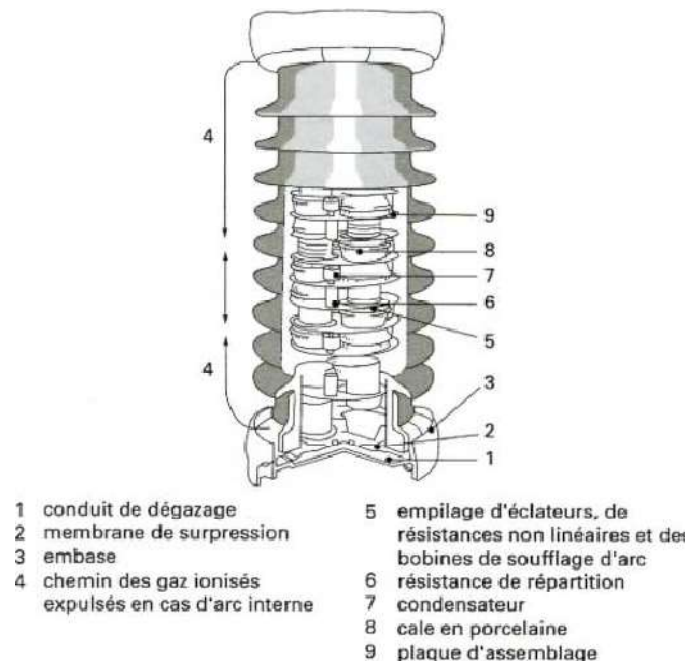


Figure I.12: Parafoudre au carbure de silicium et à éclateur [9]

-Le deuxième type de parafoudres dont la partie active est constituée uniquement de varistances à base d'oxyde de zinc (ZnO), est appelée parafoudre à oxyde de zinc. Ce dernier, apparu au début des années soixante-dix, est devenu très séduisant, dans un premier temps, en haute tension, puis, assez rapidement, en moyenne tension.

Tout l'intérêt de la varistance à base d'oxyde de zinc réside dans sa caractéristique courant-tension.

Sous la tension de service permanent, son impédance est très élevée et la varistance est parcourue par un courant très faible (inférieur à 1 mA). Lorsqu'une surtension apparaît, la résistance diminue rapidement ; la varistance écrête la surtension en lui livrant un chemin préférentiel pour écouler l'énergie correspondante vers la terre. La non-linéarité est telle que lorsque le courant traversant la varistance passe de 0,1 mA à 10 kA, la tension à ses bornes n'est multipliée que par deux environ, ce qui fait de cet élément un dispositif de protection presque idéal.



Le parafoudre, au premier plan, est surmonté d'un anneau de répartition de champ

Figure I.13: Parafoudre à oxyde de zinc reliée à un transformateur HT.

I-5 Conclusion

La compatibilité électromagnétique est l'aptitude d'un équipement de fonction sans générer des perturbations ni être perturbé. Elle s'intéresse aussi à la protection des équipements contre les perturbations. Dans ce chapitre nous avons présenté la foudre comme un générateur de perturbation. Nous avons présenté aussi la protection contre l'impact direct de foudre ainsi que la protection contre les impacts indirectes. Pour les deux cas, le système de mise à la terre joue un rôle important dans la protection, car il est responsable de la dissipation de courant de foudre dans le sol.

Chapitre II :

Revue de littérature sur les systèmes de mise à la terre

II-1 Introduction

Les fréquences élevées (telles que les fréquences de l'onde d'un courant de foudre), il faut tenir compte de tous ces éléments (résistance, inductance et capacité). Plusieurs modèles simples d'une électrode verticale ou horizontale ont été développés pour évaluer les caractéristiques impulsionnelles des mises à la terre [10-11] ; donc il est nécessaire d'avoir aussi un aperçu historique des différents modèles mathématiques pour l'analyse transitoire de systèmes de mise à la terre. Ces modèles existants sont le premier pas pour cette présente recherche. Ce chapitre est consacré à la présentation des systèmes de mise à la terre, ainsi que leurs caractéristiques et la modélisation des systèmes de mise à la terre. et des différents modèles existants depuis 1934. La modélisation des systèmes de terre sera développée au cours de ce chapitre, en utilisant les méthodes analogiques et numériques.

II-2 Système de mise à la terre

II-2-1 Définition

Un système de mise à la terre est constitué d'un ensemble de conducteurs de différentes dispositions (verticaux ou horizontaux) enterrés au sol et reliés entre eux [12]. Elle a comme fonction principale de dissiper les courants de défaut dans le sol.

Une bonne mise à la terre doit assurer [13]:

- la sécurité des personnes à proximité des installations ;
- la protection des équipements ou des installations de tiers, reliés, ou à proximité (canalisations de transport de fluide, installations de télécommunication,...).

Le courant dissipé dans le sol peut être de différente nature [13]:

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

A fréquence industrielle, l'étude du comportement d'un réseau de terre nécessite l'analyse préalable de la répartition du potentiel dans le sol qui l'entoure. Cette répartition est fonction des caractéristiques électriques du terrain, c'est-à-dire de sa résistivité (dans une moindre mesure sa permittivité aussi), des 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 [12].

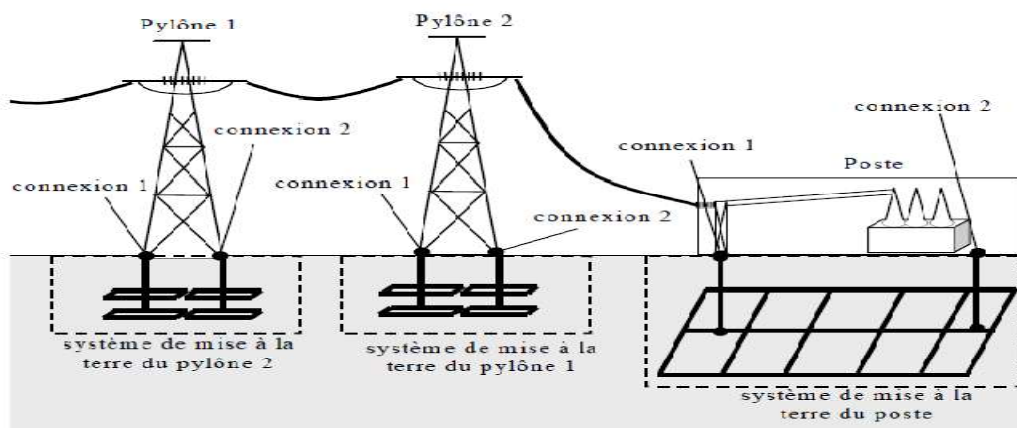


Figure II.1 : systèmes de mise à la terre pour un poste et pour des pylônes HT.

II-2-2 Configurations de système de mise à la terre

Le choix de configuration d'un système de mise à la terre dépend de nature de la structure protégée, de l'environnement d'installation, et des performances recherchées.

a-Electrode verticale ou horizontale

La configuration des électrodes est fréquente dans les installations domestiques où l'installation électrique est déjà existante. L'avantage de cette configuration est qu'elle est facile à installer ou la changer, mais elles engendrent des fortes élévations de potentiel au niveau du sol, ce qui provoque des tensions de pas et de contact plus élevés [14].

b-Grille de mise à la terre

Une grille de mise à la terre est constituée d'un ensemble de conducteurs verticales ou horizontales connectés entre eux, et cela afin d'assurer plusieurs liaisons de terre sur dans espace bien déterminé comme pour les postes de HT ou pour les bâtiments. Cette configuration de type 'grille' permet de limiter les tensions de pas en maîtrisant la décroissance de potentiel autour de la structure (en 50Hz) et d'obtenir une valeur de résistance de terre R_{50Hz} inférieure à 1Ω [13].

II-2-3 Caractéristiques de sol

Le sol est constitué d'un ensemble de composants solides possédant des quelques composants organiques, le tout est immergés dans un milieu contenant des solutions aqueuses et des interfaces d'air [12]. Il est caractérisé par les trois grandeurs suivantes : sa résistivité ; sa permittivité et sa perméabilité.

a) Résistivité

La résistivité électrique du sol, notée ρ , dépend de la densité de porteurs libres (ions) et est donc liée à la pression, la température, et, plus que tout, au degré d'humidité. En général, le sol humide est un meilleur conducteur d'électricité [13].

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la résistivité d'un terrain. Nous citons la méthode de Wenner [15] comme la méthode la plus utilisée. Notons qu'il existe également des méthodes de mesure indirectes comme par exemple la mesure de la résistivité thermique du sol [16]. Le tableau suivant donne la résistivité de quelques types du sol [17].

Nature du sol	Résistivité [Ωm]
Terrains marécageux	De quelques unités à 30
Limon	20 à 30
Humus	10 à 20
Tourbe humide	5 à 10
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	100 à 200
Sol pierreux nu	1500 à 3000
Sol pierreux recouvert de gazon	300 à 500
Calcaires tendres	100 à 500
Calcaires compacts	1000 à 5000
Calcaires fissurés	500 à 1000
Granits et grès suivant altération	1500 à 10000
Granits et grès très altérés	100 à 600

Tableau II.1 : Résistivité moyenne de quelques types de sols [17]

b) Permittivité

La permittivité d'un matériau ϵ , caractérise la polarisation des ions lors de sa mise sous un champ électrique. Autrement dit le comportement diélectrique de matériau. Pour le cas de sol, elle est fonction de la permittivité propre des différents composants et de leur proportion.

Dans la nature, le liquide polarisé le plus répandu est l'eau, dont la permittivité relative à 50Hz est d'environ 80, contre environ 5 pour le quartz, constituant majeur des sols sableux. La permittivité apparente d'un sol poreux est largement influencée par son taux d'humidité [18].

On dispose de plusieurs méthodes pour mesurer la permittivité apparente du sol, parmi lesquelles les deux plus utilisées sont [13]:

- la méthode TDR (Time Domain Reflectometry). Qui mesure la vitesse de propagation d'onde électromagnétique dans le sol pour déduire la permittivité du milieu;
- la méthode SCIP (Surface Capacitance Insertion Probe). Deux plaques identiques parallèles plongées dans le milieu. La capacité C du condensateur ainsi créé est mesurée et permet d'estimer la permittivité du milieu à partir de la relation:

$$C = \epsilon g \epsilon_0 \quad (2.1)$$

Avec : g constante qui dépend de la géométrie de l'installation, ϵ la permittivité relative du milieu, et ϵ_0 la permittivité du vide.

c) Perméabilité

On considère que le sol est constitué de matériaux amagnétiques (pratiquement relevé par plusieurs mesures, sauf dans le cas de quelques roches riches en oxyde de fer comme la magnétite). La perméabilité relative du sol μ est égale à l'unité et nous ne considérerons plus ce paramètre dans la suite.

II-3 Mise a la terre dans le sol non homogène

En pratique, la résistivité du sol n'est pas homogène, le sol est constitué de plusieurs couches de résistivités différentes. Ce paragraphe a pour but de donner la modélisation des sols en couches dans le but d'évaluer la résistance et les autres paramètres des mises à la terre. En général, les modèles du sol uniforme et à deux couches de résistivités différentes, sont les plus utilisés [19] mais pour plus de précision dans les calculs des mises à la terre, il est judicieux d'adopter le modèle de sol à plusieurs couches de résistivités différentes.

II-3-1 Sol en deux couches de résistivités différentes

La modélisation du sol en deux couches de résistivités différentes est la plus utilisée dans les calculs de mise à la terre comme le montre la figure II.2

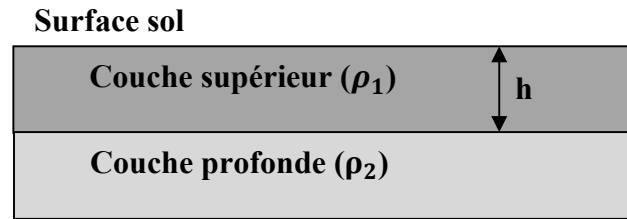


Figure II.2: Sol en deux couches de résistivités différentes.

Depuis plusieurs dizaines d'années, des formules simples ont été développées pour calculer la résistance d'une mise à la terre en modélisant le sol en deux couches. La référence [20] établira une relation de la résistivité apparente du sol, donnée par la relation suivante:

$$\rho(a) = \rho_1 \left(1 + 4 \sum \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right) \quad (2.2)$$

Avec la valeur de K qui est de :

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.3)$$

a: La distance entre les électrodes de terre lors de la mesure;

h: La profondeur de la couche supérieure de résistivité ρ_1 ;

K^n : Coefficient de réflexion;

ρ_1 : La résistivité de la couche supérieure du sol;

ρ_2 : La résistivité de la couche profonde du sol .

Une autre méthode est proposée par [21]. Cette méthode basée sur la méthode des expressions finis de résistivité de Wenner. L'expression de série infinie de résistivité apparente est donnée par l'équation suivante :

$$\rho(a) = \rho_1 \left(1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{nh}{a}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{nh}{a}\right)^2}} \right) \right) \quad (2.4)$$

II-3-2 Sol en plusieurs couches de résistivités différentes

Cette modélisation de sol en différentes couches (elles peuvent être verticales ou horizontales) requiert des méthodes numériques ou graphiques car les méthodes analytiques sont limitées. On peut aussi considérer le sol comme uniforme en lieu et place du sol en plusieurs couches de résistivités différentes.

La résistivité apparente du sol supposé homogène peut, dans ce cas, être trouvée par les deux relations suivantes [19].

$$\rho_a = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)}{n} \quad (2.5)$$

où $\rho_a(1)$, $\rho_a(2)$, $\rho_a(3)$, $\rho_a(n)$ sont les résistivités de n différentes couches du sol mesurées avec la méthode de quatre électrodes.

$$\rho_a = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} \quad (2.6)$$

II-4 Les méthodes de mise a la terre pour les études des transitoires

Premiers développements dans la modélisation des systèmes de mise à la terre Plusieurs méthodes expérimentales et théoriques du comportement transitoire des systèmes de terre sous les coups de foudre ont fleuri pour la première fois en 1934 des travaux de Bewley. Son travail a été une partie de la recherche pour la protection des systèmes électriques contre la foudre, où il a tiré l'impédance d'entrée au point d'injection pour une tension appliquée (échelon unité). Cette impédance, comme indiqué dans l'équation (2.7) a été dérivée en se basant sur l'hypothèse que l'électrode de terre est une ligne de transmission à long perte [22].

$$Z_c(t) = \frac{1}{Gl_c \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8e^{-\delta}}{(2k-1)^2 2\pi^2} \left[\cos \omega_k t + \left(\frac{G}{4\omega_k C} - \frac{\omega_k C}{G} \right) \sin \omega_k t \right] \right\}} \quad (2.7)$$

$$\omega_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2k-1)2\pi^2}{LCl_c^2} - \frac{G^2}{C^2}} \quad (2.8)$$

$$\delta = \frac{G}{2C} \quad (2.9)$$

l_c est la longueur d'électrode de terre. G, L et C sont les valeurs par unité de longueur de la conductance, de l'inductance et de la capacitance d'électrode respectivement. L'impédance transitoire de la prise de terre commence avec un effet d'impédance initial $\frac{L}{C}$ et se termine avec l'effet de résistance de fuite finale $\frac{1}{Gl_c}$, et le temps de transition entre ces deux effets dépend de la résistivité du sol et de la surtension. Tout ce qui précède a été déclaré est résumées ensuite dans son livre de "Travelling waves in transmission systems" [23].

En 1943, Bellaschi et Armingtom ont calculés 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 [24]. Ils ont donnés les expressions de la tension développée au point d'injection par une série lentement convergentes. Pour une impulsion échelon ($I = 1$), la tension de choc au point d'injection est donnée par la relation suivante [25]:

$$e(t) = \frac{I}{G_t} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t}} \right] \quad (2.10)$$

Pour un courant de foudre de forme bi exponentielle $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, la tension au point d'injection est :

$$e(t) = I_0 \left[\frac{\sqrt{\frac{L_t \alpha}{G_t}} e^{-\alpha t}}{\tan \sqrt{G_t L_t \alpha}} - \frac{\sqrt{\frac{L_t \beta}{G_t}} e^{-\beta t}}{\tan \sqrt{G_t L_t \beta}} + \frac{\alpha + \beta}{G_t^2 L_t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2 \pi^2 e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t}}}{\left(\alpha - \frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} \right) \left(\beta - \frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} \right)} \right] \quad (2.11)$$

Pour un courant de forme sinusoïdal $I(t) = A(1 - \cos Bt)$ la tension au point d'injection est :

$$e(t) = \frac{A}{G_t} - A \sqrt{\frac{L_t B}{G_t}} \frac{\cos \left[Bt + .783 - \tan^{-1} \left(\frac{\sin \sqrt{2G_t L_t B}}{\sinh \sqrt{2G_t L_t B}} \right) \right]}{\sqrt{\sinh^2 \sqrt{2G_t L_t B} + \sin^2 \sqrt{2G_t L_t B}}} - \frac{AG_t B^2 L_t^2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t}}}{n^4 + \frac{B^2 G_t^2 L_t^2}{\pi^4}} \quad (2.12)$$

l_t est l'inductance de l'électrode, G_t est la conductance de sol, I_0 est la valeur crête du courant d'injection. α , β , A et B sont des constantes pour le courant injecté pour des différentes formes d'onde.

En comparant les équations (2.7), (2.11) et (2.12), on peut constater que Bellaschi a négligé l'effet capacitif dans leur modèle.

L'un des manuels le plus important et classique des systèmes de terre a été écrit par Sunde [24] qui est aujourd'hui encore largement utilisé par de nombreux ingénieurs praticiens à résoudre les problèmes de terre. Son approche de décrire le système de mise à la terre est basé sur la théorie du champ électromagnétique à partir des équations de Maxwell. Il a présenté non seulement le calcul de la résistance des différentes structures de mise à la terre, 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 dépendent de la fréquence la modélisation du comportement transitoire des électrodes horizontales de mise à terre avec l'utilisation les équations du télégraphiste suivants.

$$\frac{dl(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad (2.13)$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad (2.14)$$

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

$$Y(\Gamma) = \left[Y_i^{-1} + \frac{1}{\pi(\rho_{sol} + j\omega\epsilon_{sol})} \log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right) \right]^{-1} \quad (2.15)$$

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1.85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{0.5}} \quad (II.16)$$

Sachant que $\gamma^2 = j\omega\mu_0(\sigma_{sol} + i\omega\epsilon_{sol})$, 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, a est le diamètre d'électrode et Γ est le constante de propagation.

Il est clair pour tout ce qui précède que la modélisation du comportement transitoire du système de mise à la terre a commencé à partir du principe de la théorie de la ligne de transmission, et a été dérivé analytiquement sous certaines approximations de solutions rapides à cause de l'absence d'ordinateur puissant. Par conséquent, ces modèles ont été limitées à des systèmes de mise à la terre simple, à savoir l'électrode simple. Pour les systèmes de mise à la terre complexes, telles que les grilles de terre importantes, seule l'analyse empirique de la réflexion pourrait être exploité dont Gupta et Thapar ont tenté en 1980 [25]. Ils ont trouvé à travers des expériences que la réponse de grilles de terre pour injection de courant unitaire pourrait être représentée par l'équation (2.11); L_t et G_t est sont les paramètres de l'électrode de mise à la terre, pour les quels donna la méthode empirique de leur détermination pour le cas d'une grille basée sur des résultats expérimentaux.

II-5 Développements récents dans la modélisation des systèmes de mise à la terre

Depuis des années, la puissance de l'ordinateur a considérablement augmenté, ce qui a accéléré presque toutes les recherches scientifiques et techniques dans des domaines complexes de résolution des problèmes pratiques fondées sur diverses méthodes numériques puissantes.

Par conséquent, la modélisation du comportement transitoire complexe du système de terre soumis à un courant de foudre a eu un meilleur avenir en raison précisément des raisons suivantes.

- Les modèles antérieurs décrits dans la section précédente ont pris plusieurs reprises afin d'aboutir à des équations simples, mais avec l'utilisation des méthodes numériques, la plupart des équations complexes peuvent être résolues.
- des systèmes complexes pratiques peuvent être modélisés facilement à cause de la grande mémoire et la vitesse de l'ordinateur.

Les différentes méthodes de modélisation numérique pour les systèmes de mise à la terre soumis à un courant de foudre sont développées depuis 1980 jusqu'à maintenant, peuvent être classés comme suit.

1. Modèle des circuits équivalents
2. Modèle électromagnétique
 - 2.1. Méthode des moments.
 - 2.2. Méthode des éléments finis.
3. Modèle hybride.
4. Modèle des lignes de transmission.

II-5-1 Méthode des circuits équivalents

Un des modèles numériques souvent utilisé pour la modélisation du comportement transitoire de mise à la terre des systèmes à géométrie complexe est l'approche par circuit. Les étapes principales de cette méthode sont les suivantes :

- 1- Diviser le système de mise à la terre en des plusieurs segments.
- 2- Créer le circuit équivalent regroupé pour chaque segment et calculer ses paramètres, tels que self et mutuelle (L), la capacitance (C), la conductance (G) et la résistance interne
- 3- 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.

L'approche par circuit pour l'analyse transitoire du système de mise à la terre a été développée pour la première fois par Meliopoulos et Moharam en 1983 [26], ils ont utilisés les paramètres indépendantes de la fréquence pour chaque segment, qui sont calculés sur la base de l'équation de Laplace $\Delta^2 V = 0$ dans le milieu semi-infini de la terre.

Plus tard, Meliopoulos et al ont amélioré leur approche de circuit de mise à la terre pour les études de la foudre en calculant la réponse de chaque segment [27], de sorte que ses paramètres et le courant dépendent de la fréquence. Une technique de convolution récursive a été utilisée à cet effet.

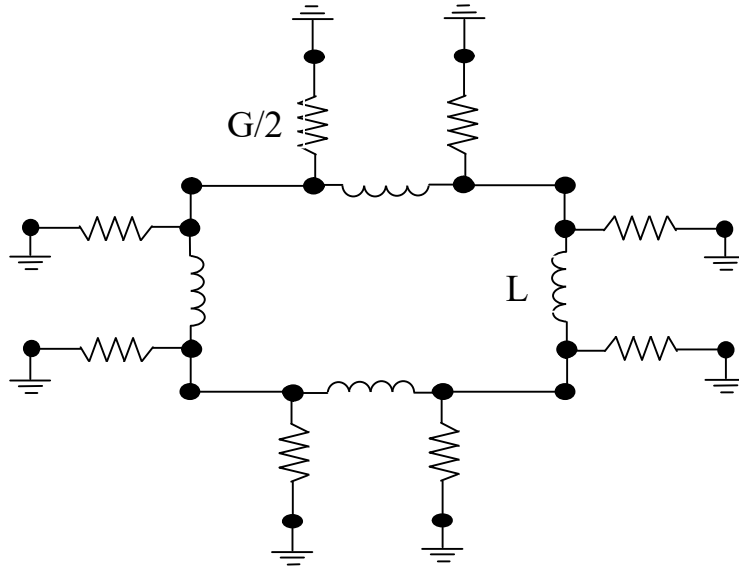


Figure II.3 : Circuit équivalent d'une maille carrée de la grille.

En 1989, Ramamoory et Narayanan [28] ont développés un circuit simplifié pour la grille de la terre (figure II.3) Dans leur approche, après avoir divisé le système à la terre entier en n segments, chaque segment a été seulement représenté par un circuit regroupant les inductances propres et mutuelles (L) et la conductance de fuite à la terre (G). Par conséquent, l'équation nodale des leurs circuit équivalent du système de mise à la terre est donnée par (2.17).

$$\frac{d[V]}{dt} = [G]^{-1} \left\{ \frac{dI_s}{dt} - [L]^{-1}[V] \right\} \quad (2.17)$$

$[V]$ est le vecteur nodal de tension, $[I_s]$ est le vecteur nodal de courant d'injection. $[G]$ est la matrice de conductance nodale. $[L]$ est la matrice d'inductance nodale. Ce modèle néglige le couplage capacitif aussi.

En 1999, deux modifications sur le circuit basé sur les travaux de Meliopoulos [26,27] ont été publiés par Geri [29] et Otero [30], respectivement, et les deux ont inclus les phénomènes d'ionisation des sols dans leurs modèles.

Le circuit équivalent du système de mise à la terre par Otero [30] est montré dans la Figure III.4. L'équation (2.18) représente l'équation nodale pour ce circuit. Elle a été résolue dans le domaine fréquentiel, ce qui fut probablement la première tentative pour l'analyse transitoire du système de terre.

$$[I_s] = [K]^t \cdot [G] \cdot [K] \cdot [V] + [Y] \cdot [V] \quad (2.18)$$

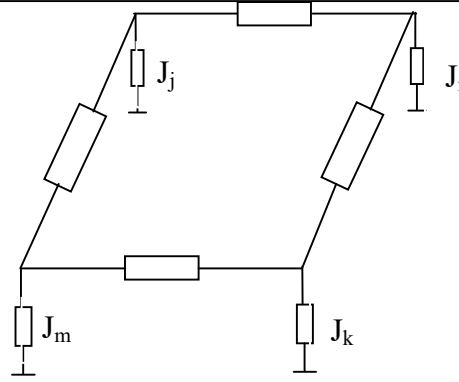


Figure II.4: Circuit équivalent du système mise à la terre par Otero [30].

Le circuit est facile à comprendre dans le sens que le comportement complexe des systèmes transitoires de terre est transformé en une simple analyse transitoire des circuits équivalents. Cette transformation rend le problème plus observable. Il peut facilement intégrer les phénomènes non linéaires d'ionisation du sol. En outre, les circuits équivalents peuvent inclure tous le couplage mutuel entre les électrodes de terre.

Cette théorie n'est néanmoins pas la mieux adaptée à tous les besoins. En effet :

- Les formules de décomposition ne sont en général validés que pour des configurations de terre simples (électrode, grille,...) ;
- Les phénomènes de propagation sur chaque élément sont négligés : on se trouve dans le cas d'une approximation quasi statique, ce que n'est pas nécessairement rigoureux en haute fréquence pour des systèmes étendus.

II-5-2 Modèle électromagnétique

L'Approche de champ électromagnétique est la méthode la plus rigoureuse pour la modélisation du comportement transitoire du système de mise à la terre, car il résout les équations de Maxwell avec un minimum d'approximation. Cette approche peut être mise en œuvre soit par la méthode des moments (MoM) ou par la méthode des éléments finis (FEM). Le modèle pour le comportement transitoire du système de mise à la terre basée sur MOM a été développé par Grcev [31]. Cette méthode commence à partir de l'équation d'intégrale de champ électrique de Maxwell comme indiqué dans (2.19) et (2.20).

$$E^s = \frac{1}{4\pi\omega\epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int t' \cdot I_l(r') G_n(r, r') dl \quad (2.19)$$

$$G_n(r, r') = G_l(r, r') G_i(r, r') + G_s(r, r') \quad (2.20)$$

E^s est le champ électrique le long de la surface du conducteur, $t' \cdot I_l(r')$ est le courant le long de conducteur.

$\epsilon = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$ est la permittivité au milieu complexe et $\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)$, est la constante de propagation des ondes dans le milieu.

La condition aux limites est que l'ensemble du champ électrique longitudinal à la surface du conducteur de terre doit satisfaire l'équation (2.21) :

$$t \cdot (E^i + E^s) = I Z_s \Delta l \quad (2.21)$$

E^i est le champ électrique incident. Z_s est l'impédance interne du conducteur par unité de longueur, compris l'effet de peau. Le traitement numérique de l'équation (2.21) est appelée la méthode des Moments (MoM), qui n'est autre que de transformer l'équation d'un système d'équations algébriques linéaires à N inconnues, où les N inconnues représentent généralement les coefficients de courant qui sont basées sur quelques extensions appropriées.

Si les sources de courant dans tous les segments du conducteur de terre sont connues, le champ électrique autour du système de mise à la terre et le courant de fuite de segment à la terre peut être facilement calculé en utilisant les équations fondamentales.

Le potentiel à différents points sur la surface du conducteur de terre peut être calculé par l'intégration du champ électrique à partir du point sur la surface du conducteur à la terre. Enfin, pour obtenir la réponse dans le domaine temporel, on peut utiliser IFFT.

Une autre approche du champ électromagnétique pour l'analyse transitoire du système de mise à la terre [32,33] est développée en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) et qui est basée sur le principe de minimiser l'énergie dans le système. Les fonctions finales sont données dans (2.22) et (2.23) pour le champ dans le sol, (2.24) pour le champ dans l'air.

$$\int \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W}) \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) + (\sigma_{sol} + j\omega\epsilon_{sol})(j\omega\vec{W} \cdot \vec{A} + \vec{W} \cdot \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (2.22)$$

$$\int \left((\sigma_{sol} + j\omega\epsilon_{sol}) \nabla \vec{W} (j\omega\vec{A} + \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (2.23)$$

$$\int \left(\frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) \cdot (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \cdot \vec{W}) \cdot (\nabla \cdot \vec{A}) \right) d\Omega = 0 \quad (2.24)$$

$\vec{W}$ et W pour le vecteur de potentiel et le potentiel scalaire, respectivement. A fin de résoudre les problèmes numériquement, les équations précédentes ont été transformées en équations linéaires en divisant l'ensemble du système en N petits segments ou d'éléments. La difficulté de cette approche [34] est de transformer les frontières ouvertes de l'air et l'environnement terrestre en un problème de frontière fermée en utilisant une transformation spatiale, ce qui va réduire la taille du problème. Le avantage principal de cette approche basée sur les champs électromagnétiques FEM est que la discrétisation du domaine (géométrie ou le milieu) du problème peut être très flexible non-uniforme des correctifs ou des éléments qui peuvent facilement décrire des formes complexes. C'est la raison pour laquelle les ionisations des sols peuvent facilement être incluses. Cependant, cette méthode est encore plus compliquée à comprendre que celui qui est basé sur la méthode des moments.

II-5-2-1 Théorie des antennes

La théorie des antennes [35] est le formalisme le plus rigoureux pour étudier les phénomènes de rayonnement électromagnétique. Elle est basée sur une formulation intégrale de domaine fréquentiel, et sur le traitement des équations par la méthode des moments, le passage en temporel se fait à l'aide de la transformée de Fourier inverse.

II-5-2-2 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 supposé 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 vertical 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 tangentielles sur la surface de l'électrode. Le champ électrique induit dans le voisinage de l'électrode enterré dans un demi-espace imparfaitement conducteur peut être exprimée en terme de vecteur potentiel de Hertz noté $\vec{\Pi}$:

$$\vec{E} = \nabla(\nabla \cdot \vec{\Pi}) + k_1^2 \vec{\Pi} \quad (2.25)$$

où k_1 est coefficient de propagation dans le sol:

$$k_1^2 = -\omega^2 \mu \epsilon_{eff} \quad (2.26)$$

Et ϵ_{eff} désigne la permittivité complexe du sol:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_r \epsilon_0 - j \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.27)$$

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 de plus en plus courant des méthodes matricielles plus connues sous le nom de méthode des moments sont utilisées.

II-5-2-3 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.

II-5-3 Approche hybride

Cette méthode pour l'analyse transitoire de mise à la terre a été initiée par Dawalibi en 1986 [36], et plus tard modifiée par Andolfato [37]. en 2000. Le mot «hybride» signifie que cette approche est une combinaison des deux approches celle de champ électromagnétique et celle des circuits équivalents. 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 (2.28), qui ont été dérivé à partir des équations de Maxwell complète.

$$E = -gradV - j\omega \vec{A} \quad (2.28)$$

$\vec{A}$ est le potentiel vecteur magnétique et V est le potentiel scalaire le long de chaque segment k . L'équation (2.28) peut être transformée comme suit :

$$Z_{sk} I_k + \sum_{i=1}^n (V_k - V_i) + j\omega \sum_{i=1}^n \int \vec{A}_{ik} dl = 0 \quad (2.29)$$

Z_{sk} est l'impédance série interne du segment k , V_k et V_i sont les potentiels des segments k et i . L'équation (2.29) peut être réécrite sous la forme :

$$Z_{sk} I_k + \sum_{i=1}^n (C - G)_{ik} I_{ik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik} I_i = 0 \quad (2.30)$$

Le mérite de l'approche hybride vient du fait de l'influence de fréquence sur les impédances internes, les composants inductifs et capacitifs de conducteur sont inclus, ce qui rend que cette approche plus précise que l'approche de circuit classique, surtout lorsque la fréquence de la source d'injection est élevée.

II-5-4 Modèle des lignes de transmission (TL)

Comme nous l'avons décrit dans la section 2.2 que le modèle de la ligne de transmission a été le premier utilisé pour simuler le comportement transitoire des mises à la terre du système. Cependant, le développement de cette approche n'a pas été aussi rapide que celle des autres modèles. Verma et Mukhedkar [38] ont appliqué le concept des lignes de transmission (figure III.5) sur l'électrode horizontale de terre, ce qui a été décrit par les équations du télégraphiste [39] :

$$\frac{dV}{dx} + L \frac{dI}{dx} + RI = 0 \quad (2.31)$$

$$\frac{dI}{dx} + C \frac{dV}{dx} + GV = 0 \quad (2.32)$$

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 III.5.

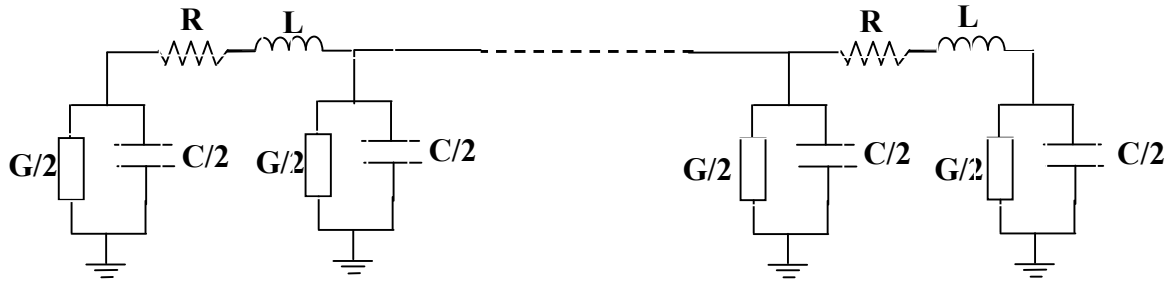


Figure II.5 : Modèle des lignes de transmission.

R est la résistance interne linéique de l'électrode, elle vaut

$$R = \frac{\rho}{S} \quad (2.33)$$

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

La constante de propagation est donnée par la relation :

$$\lambda = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + jC\omega)} \quad (2.34)$$

L'impédance de propagation est donnée par la relation :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{(R + j\omega L)}{(G + jC\omega)}} \quad (2.35)$$

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 :

$$Z_R = Z_{in} = Z_0 \frac{(Z_R + Z_0 \tanh(\gamma l))}{Z_R \tanh(\gamma l) + Z_0} \quad (2.36)$$

L'électrode est alors modélisée comme une ligne de transmission ouverte à l'extrémité L'impédance de charge tend alors vers l'infini $Z_R \rightarrow \infty$ La relation (2.36) devient :

$$Z_{in} = Z_0 \coth(\gamma l) \quad (2.37)$$

Ces paramètres sont calculés pour chaque segment de grille de mise à la terre selon [40] par les formules :

$$R = \rho_s \frac{4 \Delta l}{\pi D^2} \quad (2.38)$$

$$L = \frac{\mu \Delta l}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{hD}} \right) - 1 \right) \quad (2.39)$$

$$C = 2\pi(\epsilon_0 \epsilon_r) \frac{\Delta l}{\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{hD}} \right) - 1} \quad (2.40)$$

$$G = \frac{2\pi}{\rho_s} \frac{\Delta l}{\left(\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{hD}} \right) - 1 \right)} \quad (2.41)$$

Où ρ_s est la résistivité du sol, l est la longueur de l'électrode, h est le rayon de l'électrode, D est la profondeur d'enfouissement, μ est la perméabilité du sol ($4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)), ϵ_r est la permittivité relative, et ϵ_0 est la permittivité du vide (8.859×10^{-12} F/m).

Cette approche n'est pas la mieux adaptée à une structure complexe, pour laquelle 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. On préférera alors les modèles de type électromagnétique, qui sont les plus rigoureux au niveau théorique.

II-6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les systèmes de mise à la terre, ainsi que leurs caractéristiques et la modélisation des systèmes de mise à la terre. Nous avons présenté les différents modèles existants pour la modélisation des systèmes des mises à la terre des installations électriques.

Les modèles de mise à la terre pour les études des transitoires La nécessité de disposer d'outils de simulation du comportement des systèmes de mise à la terre valide en haute fréquence, notamment pour l'étude des phénomènes de foudre, a débouché sur le développement de plusieurs types de modèles. la théorie des antennes est principalement basée sur la résolution des équations de champ électromagnétique de Maxwell soit par méthode des moments (MoM) ou par domaine de temps de différence finie (FDTD) ; Son principal inconvénient consiste dans le temps de calcul long. et une autre approche de la méthode Antenna, à savoir HEM (Hybrid Electromagnetic Method) pour étudier le comportement transitoire du système de mise à la terre en présentant le potentiel transitoire et la variation de l'impédance du système de mise à la terre en fonction de la fréquence.

La méthode d'éléments finis consiste à résoudre les équations de Maxwell , Cette méthode nécessite un long temps de calcul avec un calcul de processus puissant. La méthode de la ligne transmission est la plus simple méthode d'étude du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre, qui repose sur l'approche de la ligne de transport du réseau de mise à la terre et qui pourrait être traitée de même que les modèles de circuit. Certains de ces modèles sont adaptés à la solution directement dans le domaine du temps, tandis que d'autres pourraient être résolus dans le domaine de la fréquence.

Chapitre III :

Modélisation de la réponse transitoire de système mise à la terre

III-1 Introduction

Dans le domaine de la conception des systèmes de mise à la terre, l'optimisation consiste à trouver un système capable de protéger les personnes dans les environs des installations mises à la terre et, d'autre part, à un coût minimal [14]. Les récepteurs industrielles sont protégées contre les défauts et les courants de foudre par des systèmes qui captent ces courants et les dispersent au sol à travers des systèmes de mise à la terre. La réponse des systèmes de mise à la terre sous courant de fréquence de puissance est bien comprise [14]. Sous l'impulsion du courant de foudre, le comportement de ces systèmes devient différent [41]. Ceci fait du comportement des systèmes de mise à la terre sous des courants impulsifs un objectif pour plusieurs études.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser le comportement transitoire de simples grilles de mise à la terre sous un courant de foudre. La méthode de la ligne de transport (TLM) impliquant un couplage mutuel entre conducteurs a été utilisée. Le comportement transitoire des grilles de mise à la terre enfouies dans des sols homogènes et hétérogènes a été évalué en une solution temporelle complète. Différentes simulations ont été effectuées sur la modification, l'influence des dimensions de la grille, le type de sol et le point d'injection de courant sur la tension et l'impédance de la grille sont présentés.

III-2 Modélisation de système de mise à la terre

La modélisation des systèmes de mise à la terre a fait l'objectif de plusieurs expériences et simulation. En générale cette modélisation dépend principalement de la fréquence de courant injecté. Donc on peut classer la modélisation en deux types différents :

a-Modélisation des systèmes de mise à la terre en fréquence industrielle

On caractérise souvent la capacité d'une mise à la terre à écouler un courant de fréquence 50Hz par la « résistance de terre ».

Il s'agit du rapport entre le courant total injecté I_{50Hz} dans le système de mise à la terre et le potentiel V_{50Hz} obtenu. Les éléments connectés du système de mise à la terre peuvent raisonnablement être considérés comme étant équipotentiels à 50Hz [13].

$$R = \frac{V_{50Hz}}{I_{50Hz}} \quad (3.1)$$

Cette caractéristique est appliquée lors d'injection d'un courant de fréquence industrielle.

On note que la résistance de mise à la terre n'est pas la caractéristique unique pour l'étude des systèmes de mise à la terre en bases fréquences, on cite par exemple [12, 13]:

- Le potentiel du sol : L'élévation du potentiel de terre peut induire des risques en présence de lignes de transport de l'énergie électrique et de lignes de télécommunications.
- La tension de pas : la différence de potentiel entre deux points à la surface du sol, séparés par une distance d'un pas, que l'on considère un mètre, dans la direction du gradient de potentiel maximum.
- La tension de contact : est la tension entre les mains en contact avec un objet et les pieds. Elle est égale à la différence de tension entre l'objet et le point d'appui des pieds.

b-Modélisation des systèmes de mise à la terre en hautes fréquences

La réponse des systèmes de mise à la terre lors d'injection de courant de foudre est différente de celle obtenue sous un courant de défaut à fréquence industrielle. La Figure III.1 montre cette remarque : elle reprend les résultats d'une mesure de la montée en potentiel de l'extrémité supérieure d'un pieu vertical enterré (de longueur 8m) dans laquelle une impulsion de courant est injectée (valeur crête : 190A) [42]. On peut voir que le courant et la tension n'ont pas la même forme : ils ne sont pas proportionnels. Donc la notion de résistance de terre R ne sera pas suffisante pour calculer la montée en potentiel de la prise de terre en fonction du courant injecté [13].

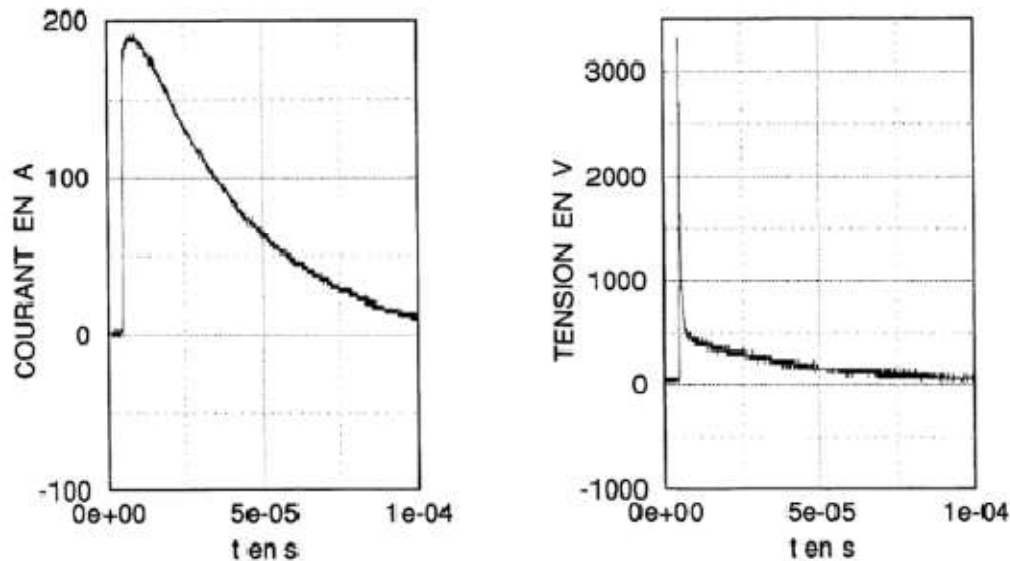


Figure III.1 : Tension obtenue lors d'injection de courant impulsionnel dans un système de mise à la terre [42].

Donc pour les courants de hautes fréquences (comme celles de la foudre), on ne parle plus de résistance de mise à la terre, on parle d'impédance de mise à la terre, car la propagation d'onde électromagnétique doit être prise en considération lors de modélisation de système de mise à la terre, et le modèle de résistance R ne prends pas en compte de ce phénomène.

III-3 Effet de couplage mutuel entre les conducteurs de grilles de mise à la terre

Les grilles de mise à la terre contiennent plusieurs conducteurs de cuivre interconnectés, comme présenté sur la figure III.2. Pour deux conducteurs parallèles, le premier conduit un courant I générant des champs magnétiques et électriques atteint l'autre conducteur, ce qui induit un potentiel dans le second conducteur et un courant de déplacement et de conduction existe entre eux respectivement. On dit que ces deux conducteurs sont couplés d'un couplage inductif et capacitif, avec l'existence d'une conductance mutuelle comme montré sur la Figure III.3.

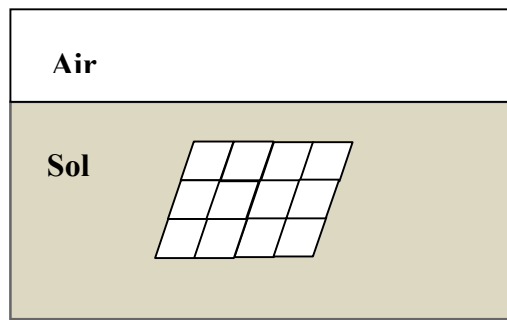


Figure III.2 : Grille de mise à la terre.

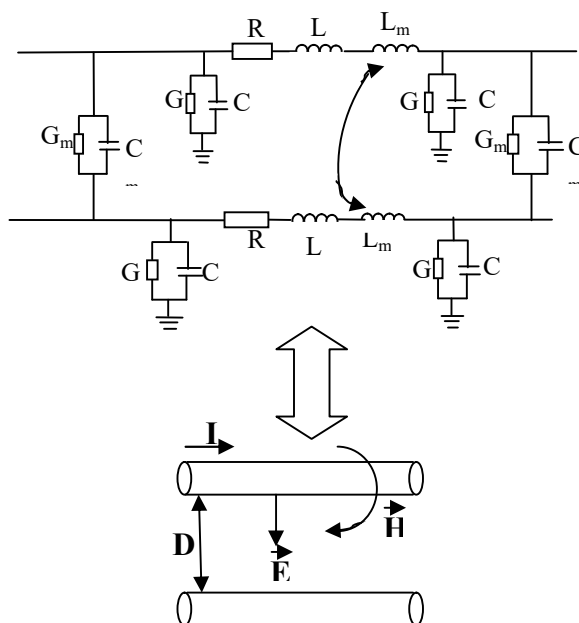


Figure III.3. Couplage mutuel entre conducteurs parallèles.

Les paramètres C_m , G_m , L_m sont définis comme suit [43 ,44] :

$$C_m = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(1/D)} \quad (3.2)$$

$$G_m = \frac{C_m}{\rho_s\epsilon} \quad (3.3)$$

$$L_m = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{D}\right) \quad (3.4)$$

Où ρ_s est la résistivité du sol, D est la profondeur d'enfouissement, μ est la perméabilité du sol ($4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)), ϵ_r est la perméabilité relative, et ϵ_0 est la perméabilité au vide 8.859×10^{-12} F/m).

III-4 Paramètres d'analyse du comportement transitoire du système de mise à la terre

Divers indices sont utilisés pour évaluer la performance des impulsions des systèmes de mise à la terre. Ces paramètres consistent généralement en rapport du potentiel de l'électrode avec le courant injecté aux instants déterminés. Figure III.4 présente le courant transitoire injecté, le potentiel et l'impédance d'entrée pour un système de mise à la terre.

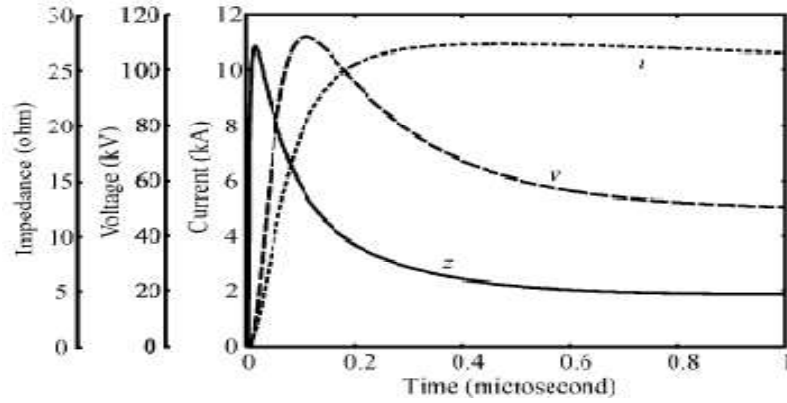


Figure III.4 : Tension transitoire, courant et impédance du système de mise à la terre [45].

L'« impédance impulsionnelle » est le paramètre le plus fréquemment utilisé dans le système de protection contre la foudre, qui est défini par le rapport entre le pic potentiel V_p et le pic actuel I_p .

$$Z_1(t) = \frac{V_p}{I_p} \quad (3.5)$$

L'impédance d'impulsion est utilisée pour estimer le potentiel du système de mise à la terre soumis à un courant d'impulsion. Le second paramètre consiste en le rapport du potentiel obtenu au moment où le courant atteint la valeur de crête $v(t_{I_p})$ par rapport à la valeur de crête actuelle I_p .

$$Z_2 = \frac{v(t_{I_p})}{I_p} \quad (3.6)$$

Ce paramètre montre la prédominance des effets résistifs sur le comportement transitoire du système de mise à la terre. Le dernier paramètre est le rapport du pic potentiel V_p à la valeur courante lorsque le potentiel obtient la valeur la plus élevée $i(t_{V_p})$.

$$Z_3 = \frac{V_p}{i(t_{V_p})} \quad (3.7)$$

Ce paramètre peut estimer le potentiel maximal puisqu'il a une valeur plus élevée que les impédances ci-dessus [46].

Dans notre simulation, nous avons traité la méthode de la ligne de transmission dans le domaine temporel. Pour le courant injecté I_e dans la ligne de transmission entre les points i et j du conducteur de mise à la terre, les équations différentielles des potentiels (U_i) et des courants (I_{ij}) (qui présentent les potentiels et les courants le long de l'électrode) comme présenté ci-dessous:

$$\frac{dU_i}{dt} = \frac{2}{c} I_e - \frac{G}{c} U_i - \frac{2}{c} I_{ij} \quad (3.8)$$

$$\frac{dI_{ij}}{dt} = \frac{1}{L} U_i - \frac{R}{L} I_{ij} - \frac{1}{L} U_j \quad (3.9)$$

$$\frac{dU_j}{dt} = \frac{2}{c} I_{ij} - \frac{G}{c} U_j \quad (3.10)$$

Ces équations et les autres de l'électrode de mise à la terre sont résolues en utilisant des méthodes itératives selon l'algorithme suivant:

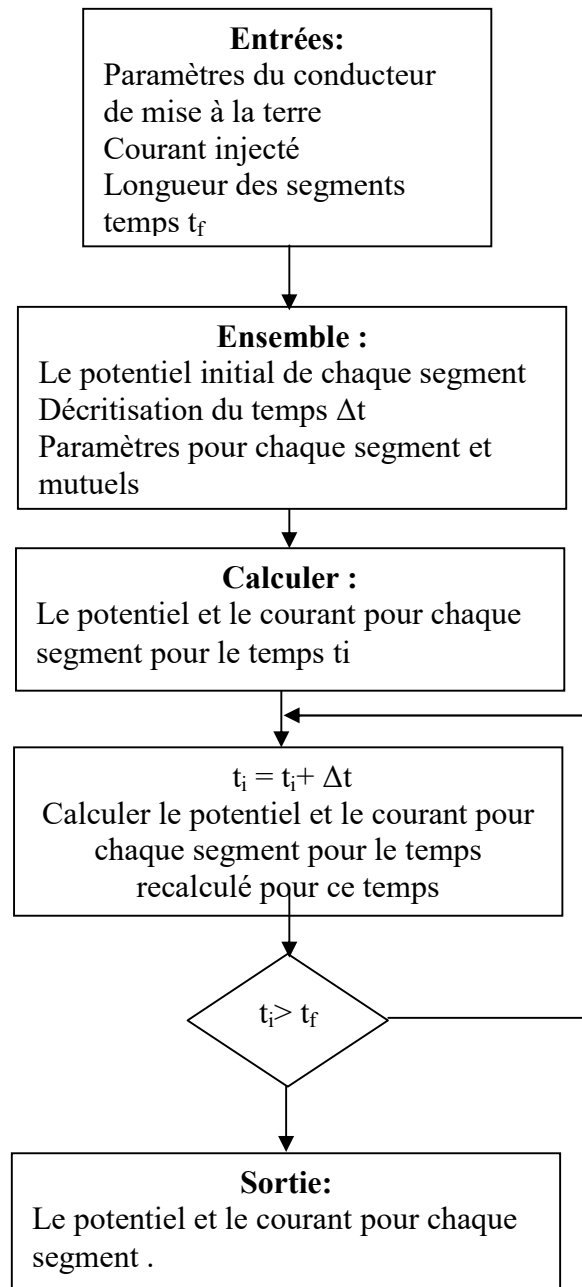


Figure III.5 : L'algorithme utilisé pour calculer le potentiel transitoire de la grille de mise à la terre.

III-5 Analyse harmonique des phénomènes transitoires

L'analyse harmonique est généralement utilisée dans les systèmes d'alimentation pour analyser la réponse non linéaire de certains équipements. Le composant harmonique est déterminé en utilisant l'analyse par décomposition des séries de Fourier FFT du signal. Pour montrer clairement les harmoniques présentes et leur impact, le spectre harmonique est toujours utilisé, il consiste en la représentation des magnitudes des signaux harmoniques en fonction de l'ordre harmonique comme le montre la figure III.6 [46].

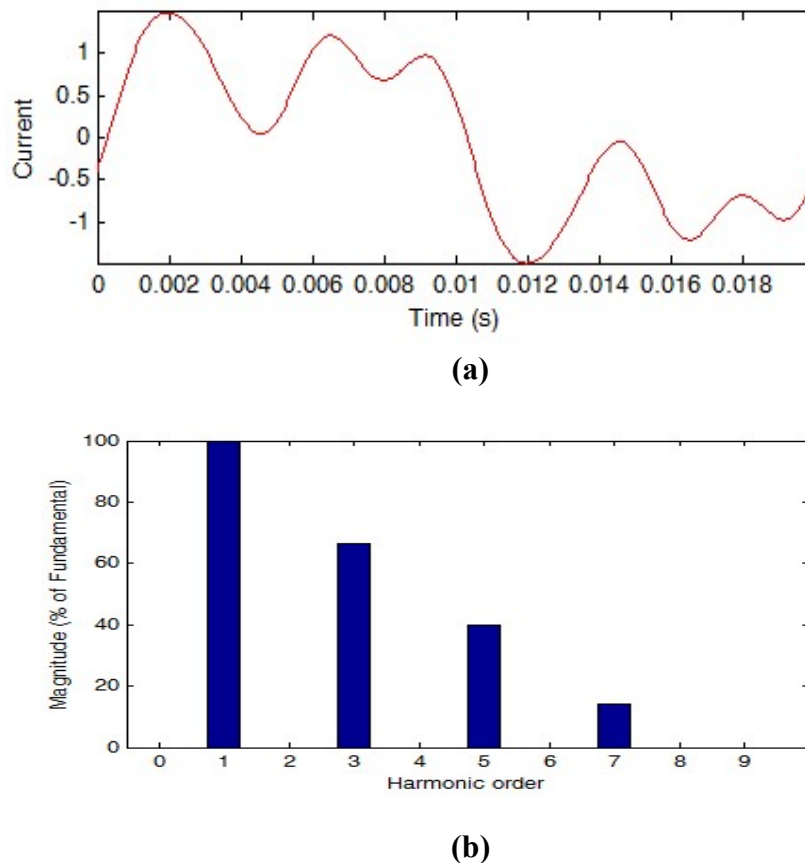


Figure III.6 : Signal périodique (a) et son spectre harmonique (b) [46]

Afin de montrer l'impact de la réponse transitoire de mise à la terre, nous présentons dans ce chapitre le spectre harmonique du courant injecté et le potentiel transitoire obtenu. Nous considérons que l'harmonique fondamental est 1 MHz, le même que celui utilisé pour déterminer la longueur des segments de ligne de transmission. On remarque qu'ici pour le courant d'impulsion, une composante continue (d'ordre 0 sur le spectre) existe puisque la forme d'onde ne contient pas une partie négative identique à la partie positive.

III-6 Validation et simulation

Afin de valider notre simulation, deux configurations ont été simulées à l'aide de notre modèle TLM. La première grille de mise à la terre est la grille 1x1 et l'autre est la grille 2x2 comme indiqué sur la figure III.7.

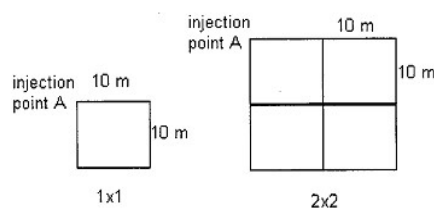


Figure III.7 : les configurations étudiées [41].

Les mêmes paramètres de [41] ont été pris en compte : le rayon conducteur est de 7 mm, les deux grilles de mise à la terre sont enterrées à 0,5 m de profondeur dans un sol homogène de résistivité $\rho_s = 1000 \Omega m$ et de perméabilité relative $\varepsilon_r = 9$. Un courant double exponentiel $i(t) = 1(e^{-27000 t} - e^{-5600000 t})$ a été injecté dans les deux grilles de mise à la terre au point A de la figure III.7. Les résultats obtenus sont présentés à la figure III.8.

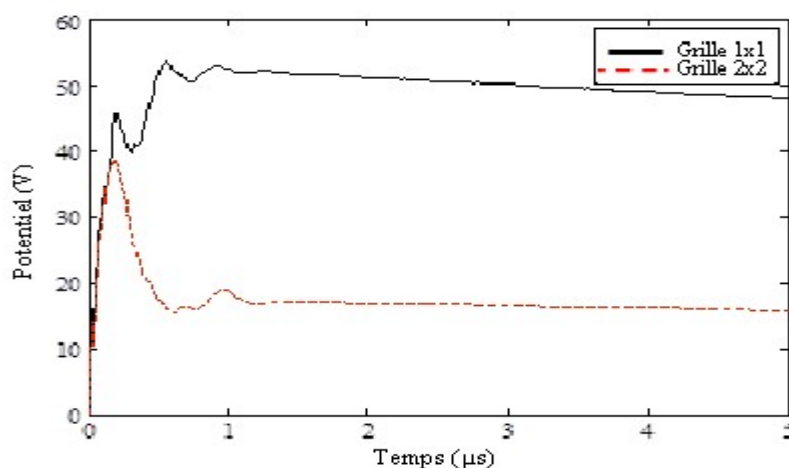


Figure III.8 : Potentiel obtenu au point d'injection pour les grilles 1x1 et 2x2.

Comme le montre la figure III.8, les potentiels transitoires obtenus pour les grilles 1x1 et 2x2 sont conformes à ceux obtenus par [41] en utilisant ATP-EMTP. Une légère différence a pu être obtenue grâce à la procédure de calcul. Le potentiel transitoire de la grille 2x2 est caractérisé par des valeurs inférieures et la forme de l'impulsion est plus accentuée que le potentiel obtenu dans la grille 1x1. La figure III.9 présente l'impédance transitoire pour les grilles 1x1 et 2x2 obtenue lorsqu'elles sont soumises aux conditions ci-dessus courant.

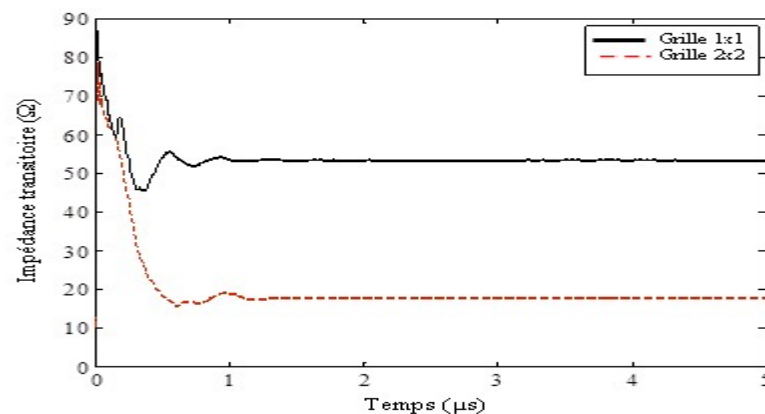


Figure III.9 : Impédance transitoire au point d'injection pour les grilles 1x1 et 2x2.

A partir de la figure III.9, et avant $3\mu s$, l'impédance augmente significativement jusqu'à atteindre la valeur maximale ($80\ \Omega$) puis diminue, notez que les oscillations dans l'impédance transitoire de la grille 2x2 sont supérieures à celles de la grille 1x1. Après $3\ \mu s$, l'impédance obtient une valeur constante ($54\ \Omega$ pour la grille 1x1 et $17\ \Omega$ pour la grille 2x2) qui à la connaissance des auteurs représente la résistance à basse fréquence. Nous représentons dans le tableau III.1 les paramètres d'impulsions Z_1 , Z_2 et Z_3 calculés selon (3.5, 3.6 et 3.7) à partir des résultats obtenus figurant à la figure III.8.

	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$Z_3(\Omega)$
Grille 1x1	53.59	52.92	56.41
Grille 2x2	38.56	18.27	55.08

Tableau III.1. Paramètres d'impulsion pour les grilles 1x1 et 2x2.

Les résultats montrent que Z_1 , Z_2 et Z_3 sont approximativement dans le même niveau pour la grille 1x1, et pour la grille 2x2, la différence entre ces trois paramètres est claire. Ainsi, le comportement de la grille 1x1 converge vers le comportement résistif. Pour la grille 2x2, le comportement inductif apparaît puisque les variations de l'impédance transitoire sont accentuées mais une diminution observable a été obtenue pour Z_1 et Z_2 .

La figure III.10 présente le spectre harmonique pour le courant injecté, et les figures III.11 et III.12 sont le spectre harmonique pour les potentiels transitoires obtenus dans les grilles 1 et 2 respectivement.

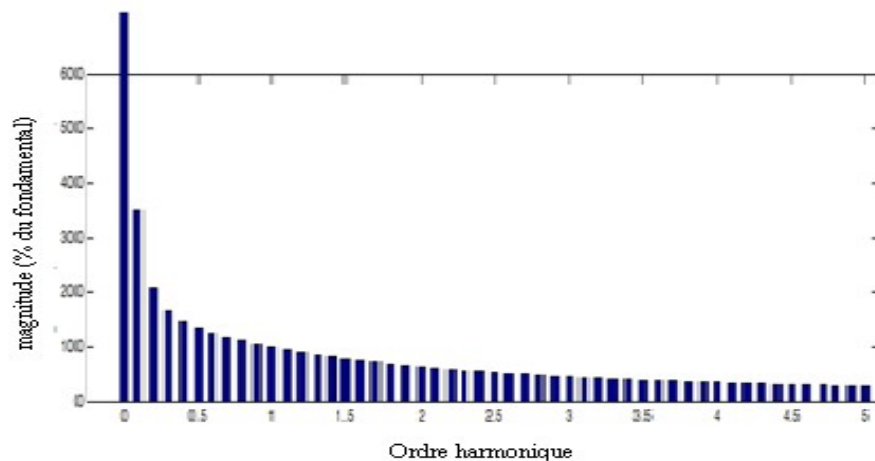


Figure III.10 : Spectre harmonique pour le courant injecté.

On observe à partir de la figure III.10 que le courant injecté contient des harmoniques d'ordre 0 (dus au composante continue) qui présente une magnitude dépassant les harmoniques et interharmoniques fondamentales entre l'ordre 0 et le fondamental, et toutes les autres harmoniques et inter harmoniques excédant l'ordre 1 sont caractérisées par une magnitude inférieure à la fondamentale et par une diminution avec augmentation de l'ordre.

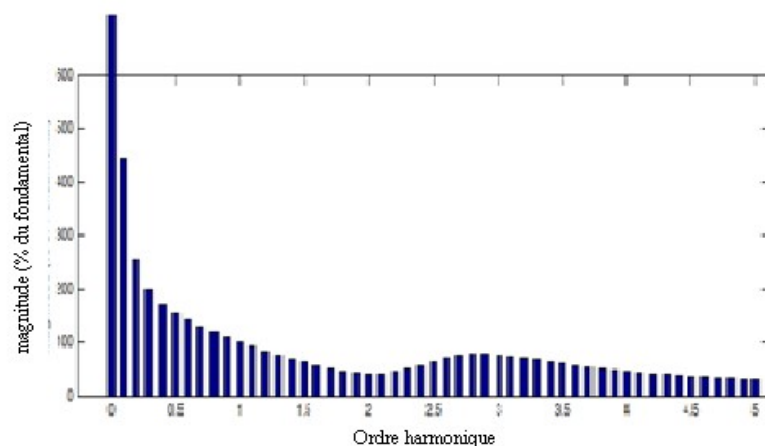


Figure III.11 : Spectre harmonique pour le potentiel transitoire de 1x1 grille.

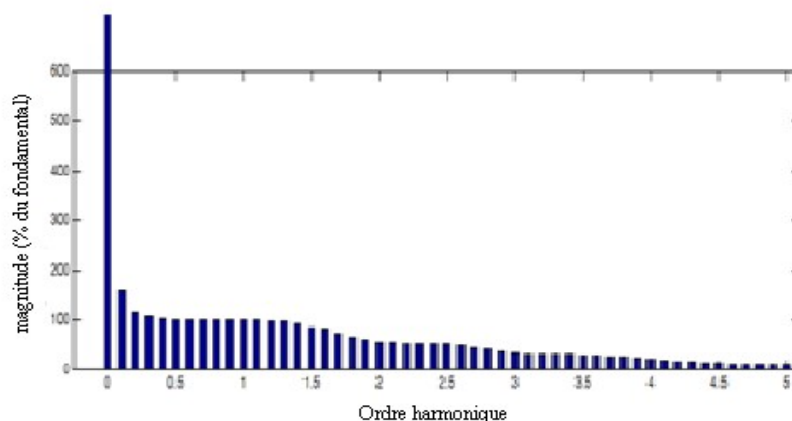


Figure III.12 : Spectre harmonique pour le potentiel transitoire de 2 x 2 grilles.

La figure III.11 montre que pour la configuration grille 1x1, les amplitudes d'interharmoniques entre 0 et 1 (et surtout ceci d'ordre 0,1) sont augmentées. Contrairement au spectre harmonique actuel, l'amplitude des harmoniques et des interharmoniques augmente entre les harmoniques des ordres 2 et 3 respectivement, et après cela diminue avec l'augmentation de la fréquence. Pour la grille 2x2, une diminution considérable de l'amplitude des interharmoniques entre 0 et 1 (comme le montre la figure III.12). Dans le reste du spectre, la magnitude des harmoniques et des interharmoniques diminue régulièrement.

III-6 -1 Grilles de mise à la terre enfouies dans un sol hétérogène

Après validation de notre simulation TLM pour la grille de mise à la terre, nous proposons d'évaluer le potentiel transitoire des grilles de mise à la terre enfouies dans un sol stratifié verticalement comme le montre la figure III.13.

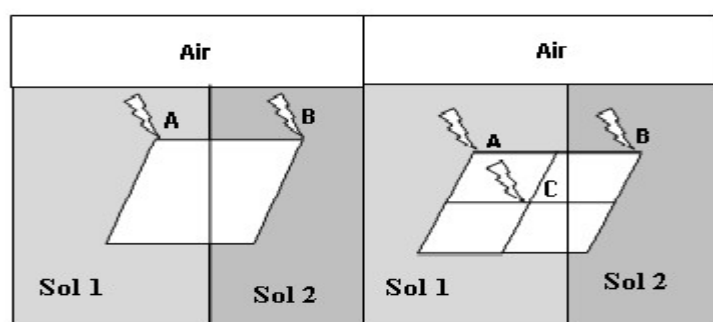


Figure III.13 : La configuration étudiée.

a- Grille 1x1

La configuration de la grille 1x1 a été enterrée dans un sol hétérogène, comme le montre la figure 13. Le premier sol est caractérisé par la résistivité $\rho_s = 1000\Omega m$ et la permittivité relative $\epsilon_r = 9$, et l'autre sol est caractérisé par $\rho_s = 200\Omega m$ et $\epsilon_r = 40$. Le même courant d'impulsion a été injecté en deux points A et B du système de mise à la terre illustré à la figure III.13.

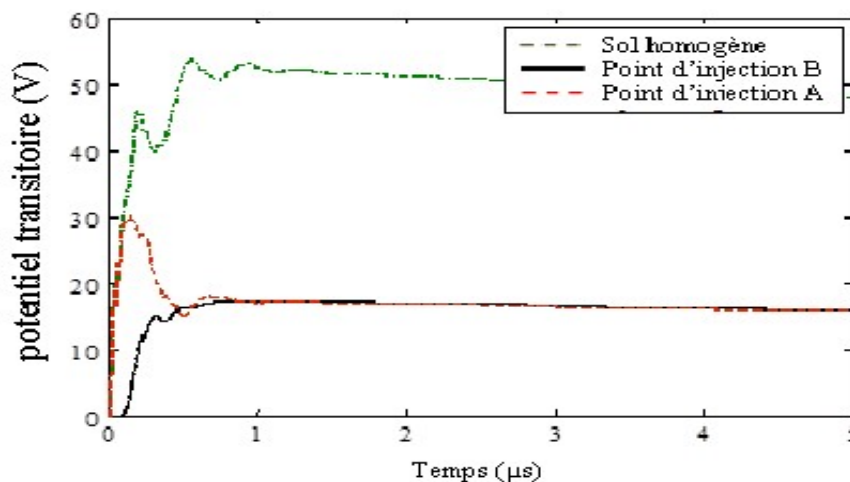


Figure III.14 : Potentiel transitoire de la grille de mise à la terre 1x1 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.

Les résultats obtenus à la figure III.14 montrent que l'injection du côté de la résistivité inférieure donne la valeur de crête la plus basse du potentiel transitoire, ce qui signifie que l'injection du côté de la résistivité inférieure sera meilleure lorsque le potentiel le plus faible est souhaité.

La figure III.15 présente l'impédance transitoire pour la grille 1x1 enfouie dans un sol homogène et stratifié.

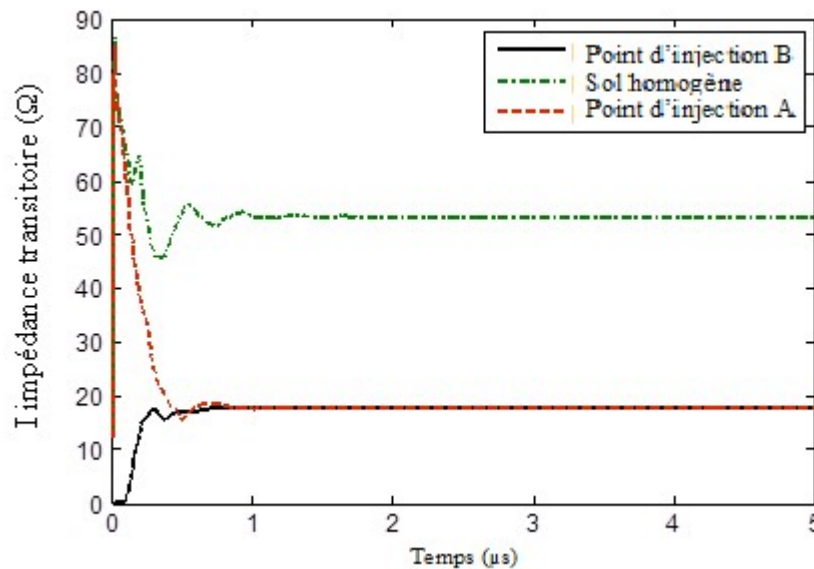


Figure III.15 : L'impédance transitoire de la grille de mise à la terre 1x1 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.

L'impédance transitoire du sol homogène a déjà été discutée, l'impédance transitoire obtenue par l'injection au point A (côté haute résistivité du sol) augmente jusqu'à atteindre la même valeur maximale du sol homogène puis diminue à valeur constante). Lors de l'injection au point B, (côté faible résistivité du sol), l'impédance transitoire a une forme similaire à celle du point actuel, puis se stabilise à la même valeur que celle obtenue lors de l'injection côté haute résistivité.

Les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 pour les trois configurations étudiées (sol homogène et hétérogène) sont présentés dans le tableau III.2.

	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$Z_3(\Omega)$
Sol homogène	53.59	52.92	56.41
Point d'injection A	30.35	17.77	49.75
Point d'injection B	17.47	17.5	18.01

Tableau III.2 : Paramètres d'impulsions pour les grilles 1x1 évalués à la figure III.14.

Pour le point d'injection A ; une différence assez importante entre les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 en raison de la forme impulsionnelle du potentiel transitoire. Pour le point d'injection B, les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 sont à peu près au même niveau, ce qui montre le comportement résistif de cette configuration.

Les résultats présentés dans le tableau III.2 montrent que l'injection du côté de la faible résistivité du sol donne les valeurs des paramètres d'impulsion les plus faibles.

Le spectre harmonique des potentiels transitoires obtenus lors de l'injection dans les points A et B est présenté dans les figures III.16 et III.17 respectivement.

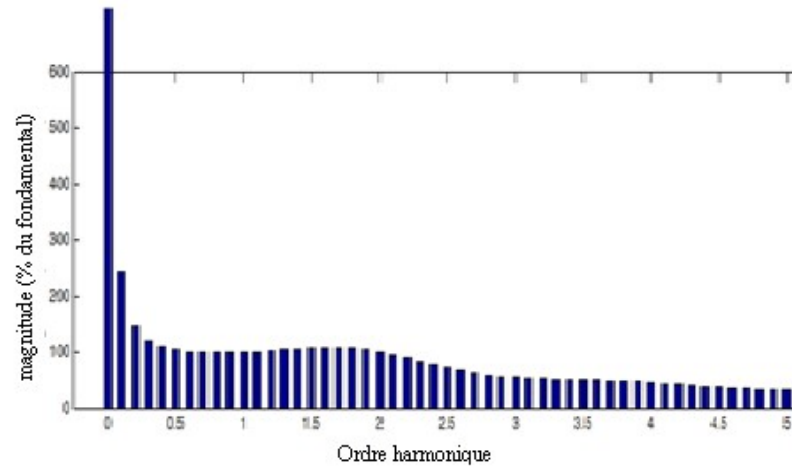


Figure III.16 : Spectre harmonique pour le potentiel de 1x 1 grille enfouie dans un sol hétérogène au point d'injection A.

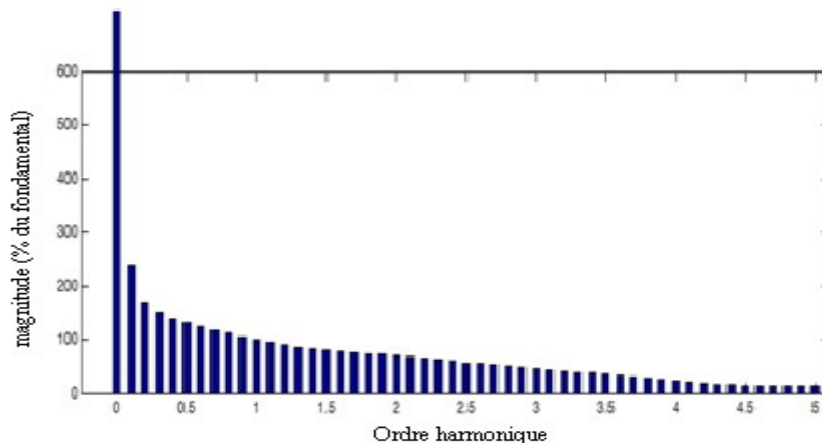


Figure III.17 : Spectre harmonique pour le potentiel de 1x1 grille enterrée dans le sol avec le point d'injection B.

En comparant les spectres obtenus avec la même configuration enfouie dans un sol homogène (figure III.16), on constate que les magnitudes d'interharmoniques entre les ordres 0 et 1 sont diminuées. Lors de l'injection au point A, les interharmoniques augmentent légèrement après le fondamental et diminuent après l'harmonique d'ordre 2. Lors de l'injection au point B, la magnitude des harmoniques et des interharmoniques diminue avec l'augmentation de l'ordre harmonique.

b- Grille 2x2

La grille 2 x2 enfouie dans un sol hétérogène, comme le montre la figure 13, a été évaluée lorsqu'elle est soumise à un courant d'impulsion. Le premier sol est caractérisé par la

résistivité $\rho_s = 1000 \Omega m$ et la permittivité relative $\epsilon_r = 9$, et l'autre sol est caractérisé par $\rho_s = 200 \Omega m$ et $\epsilon_r = 40$. Le courant d'impulsion a été injecté en trois points différents A, B et C. Les résultats obtenus au point d'injection sont présentés à la figure III.18.

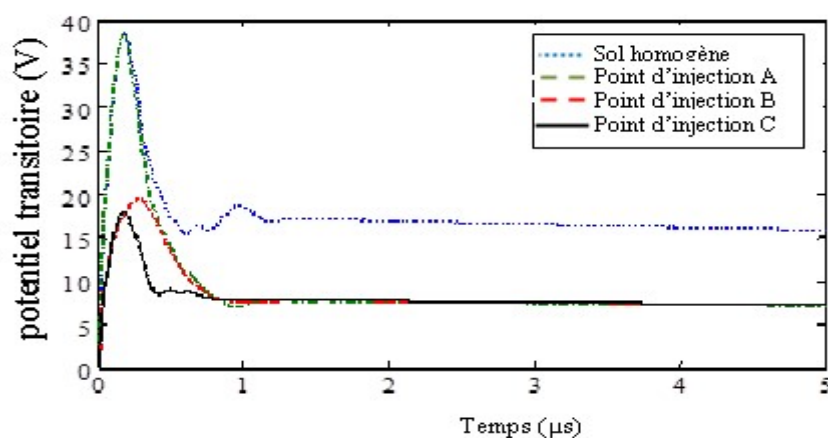


figure III.18 : Potentiel transitoire de la grille 2x2 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.

Le potentiel transitoire de la grille 2x2 enfouie dans un sol homogène et hétérogène. Les résultats obtenus à la figure III.18 montrent que pour tous les cas, une oscillation est observée. Le plus accentué est le potentiel obtenu lors de l'injection au point A (sol à haute résistivité), puis le potentiel obtenu lors de l'injection au point B (sol à faible résistivité). Les valeurs les plus faibles ont été obtenues pour les résultats de potentiel transitoire lors de l'injection au point C (centre de la grille de mise à la terre). Après ces oscillations, tout le potentiel est stabilisé et donne la même réponse. Conséquent, l'injection au centre de la grille de mise à la terre donne la valeur la plus basse de crête du potentiel transitoire. La figure III.19 montre l'impédance transitoire de la grille de mise à la terre 2x2 enfouie dans un sol stratifié pour plusieurs points d'injection.

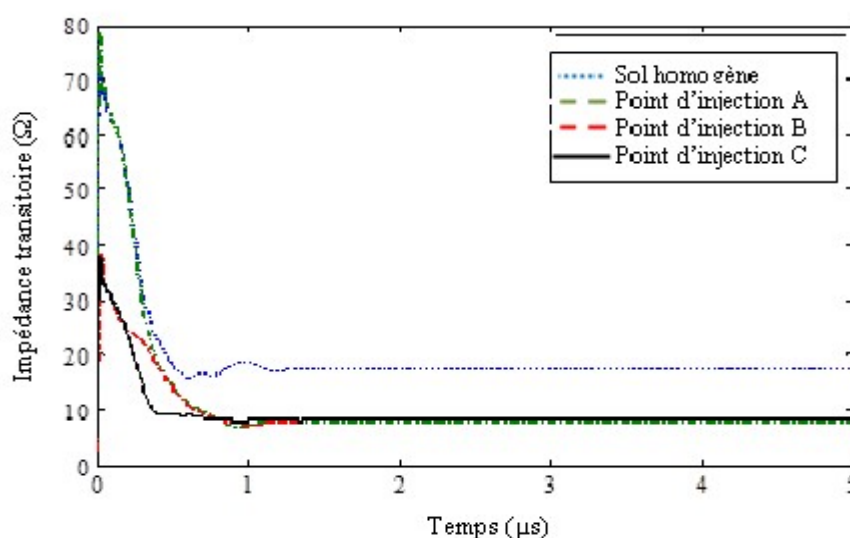


Figure III.19 : L'impédance transitoire de la grille 2x2 enfouie dans un sol homogène et hétérogène.

Les résultats obtenus à la figure III.19 montrent que l'impédance transitoire maximale a été obtenue lors de l'injection au point A où elle atteint la valeur maximale de la grille de mise à la terre enfouie dans un sol homogène. L'injection au point B donne une impédance transitoire avec des valeurs inférieures. Les valeurs d'impédance d'impulsion les plus faibles ont été obtenues lors de l'injection au centre de la grille de mise à la terre. Les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 pour les trois configurations étudiées pour la grille 2x2 (sol homogène et hétérogène) sont présentés dans le tableau III.3.

	$Z_1(\Omega)$	$Z_2(\Omega)$	$Z_3(\Omega)$
Sol homogène	38.56	18.27	55.08
point d' injection A	38.48	8.1	56.58
point d' injection B	19.61	8.1	23.62
point d' injection t C	18	7.9	25.71

Tableau III.3. Paramètres d'impulsions pour les grilles 2x2 évalués à la figure III.19.

Pour le point d'injection A; une différence notable entre tous les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 , noter que les valeurs de Z_1 et Z_3 sont proches de celles obtenues pour un sol homogène. Pour le point d'injection B, une diminution de la valeur de Z_1 et Z_3 a été observée, mais la différence entre Z_1 et Z_2 et Z_3 reste significative.

Pour le point d'injection C, une légère diminution de la valeur de Z_1 et Z_2 a été notée, mais elle donne des valeurs faibles pour tous les paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 . Les résultats présentés dans le tableau III.3 montrent que l'injection au centre de la grille 2x2 donne les valeurs des paramètres d'impulsion les plus faibles.

Nous présentons le spectre harmonique des potentiels obtenus aux points d'injection A, B et C dans les figures III.20, III.21 et III.22 respectivement.

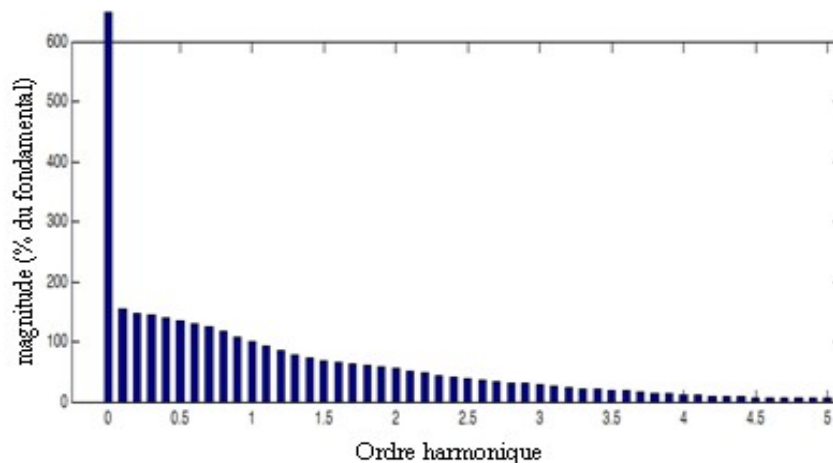


Figure III.20 : Spectre harmonique du potentiel de 2x2 grilles enfouies dans un sol hétérogène au point d'injection A.

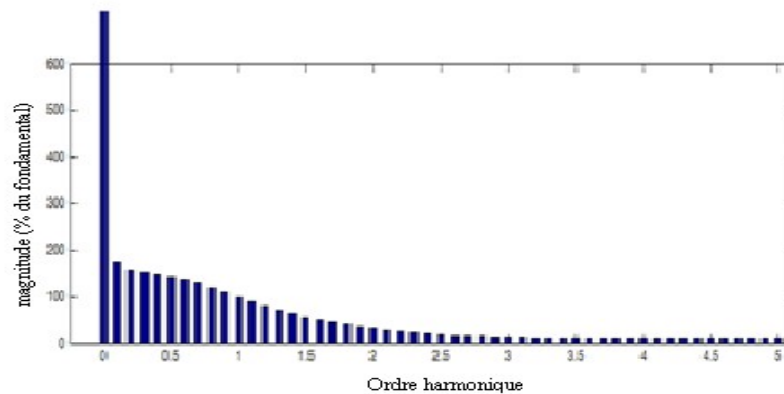


Figure III.21 : Spectre harmonique pour le potentiel de 2x2 grilles enfouies dans le sol avec le point d'injection B

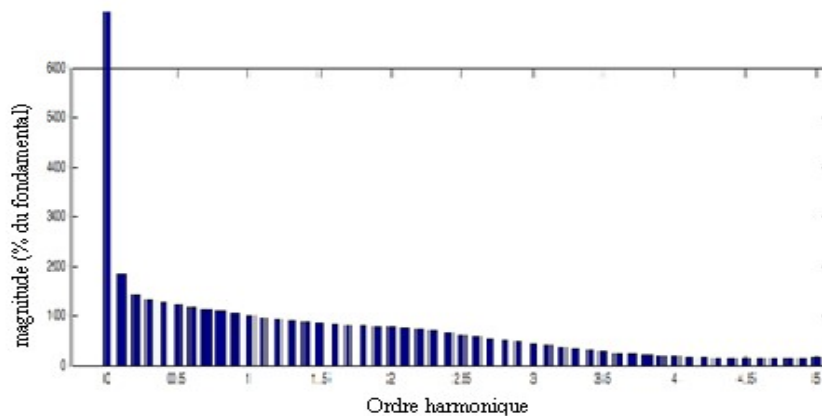


Figure III.22 : Spectre harmonique pour le potentiel de grilles 2x2 enfouies dans le sol avec le point d'injection C.

L'analyse du spectre harmonique obtenu pour les trois cas avec comparaison avec le spectre obtenu avec un sol homogène, nous observons que les magnitudes des harmoniques et des interharmoniques entre les pour A et C diminuent lentement de manière similaire, tandis que pour le cas B les magnitudes diminuent rapidement avec l'augmentation de l'ordre surtout après le fondamental.

III-7 Discussion des résultats

Lors de l'analyse du courant injecté, beaucoup d'harmoniques et d'interharmoniques ont été observés. C'est logique puisque le courant d'impulsion est apériodique et le fondamental a été estimé à 1 MHz pour avoir de telles harmoniques avec diminution observée de la magnitude simultanément à l'augmentation d'ordre. Le contenu harmonique observé pour le potentiel transitoire est complètement différent de celui du courant, ce qui signifie que chaque réponse reflète le comportement de la totalité de la grille de mise à la terre avec les composants de courant injectés en changeant ses magnitudes.

L'analyse du spectre harmonique du courant transitoire et des potentiels a permis que la configuration du système de mise à la terre et la résistivité du sol aient un impact sur le contenu harmonique du potentiel. Nous avons observé que la configuration utilisant plus de conducteurs réduit les magnitudes des interharmoniques.

D'autre part, l'injection sur le côté situé dans le sol de résistivité plus élevée augmente la magnitude des harmoniques et des interharmoniques.

Cette analyse confirme que le comportement non linéaire du conducteur de mise à la terre apparaît même pour les courants faibles, puisque le contenu harmonique du potentiel est différent de celui du courant. Mais on constate qu'avec l'augmentation des conducteurs, le comportement devient similaire à celui de la résistance, puisque les harmoniques de grande amplitude diminuent de façon significative.

III-8 Conclusion

Le comportement transitoire des grilles de mise à la terre a été évalué dans le présent chapitre. La méthode des lignes de transmission incorporant le couplage mutuel entre les conducteurs de mise à la terre a été utilisée. Afin de simuler les paramètres d'analyse des grilles de mise à la terre enfouies dans des sols hétérogènes tels que l'influence des dimensions de la grille, le type de terre et le point d'injection de courant sur la tension et l'impédance de la grille. Pour toutes les simulations ci-dessus, le potentiel transitoire et l'impédance transitoire ont été présentés. Certains paramètres d'impulsions ont été déterminés pour chaque simulation.

Les résultats obtenus expliquent que la grille 1x1; le potentiel transitoire le plus faible est obtenu lorsque le point d'injection est situé du côté de la résistivité inférieure. Pour la grille 2x2, les valeurs de potentiel transitoire les plus faibles sont obtenues lors de l'injection au point central.

La validité de nos résultats a été confirmée en comparant le comportement des grilles de mise à la terre avec d'autres calculs effectués à l'aide du progiciel ATP-EMTP, et s'est révélée satisfaisante.

Le contenu harmonique du courant et potentiel transitoires obtenus a été analysé en présentant le spectre harmonique pour chaque cas. Nous avons noté l'existence de composants harmoniques et interharmoniques dans le courant transitoire et le potentiel. L'amplitude de ces harmoniques dépend de la configuration du système de mise à la terre et de la résistivité du sol. Avec la diminution de la résistivité du sol et l'augmentation des conducteurs de mise à la terre, nous remarquons que les harmoniques d'ordre supérieur deviennent plus faibles, et le comportement devient plus résistif.

L'étude harmonique du courant transitoire et du potentiel permet de déterminer plus de caractéristiques de ces signaux et d'identifier plus d'impacts de la grille de mise à la terre sur le courant transitoire. Selon cette étude, et même en l'absence d'ionisation du sol, le système de mise à la terre sous un courant transitoire sera défini comme un élément non linéaire qui modifie uniquement les magnitudes harmoniques et maintient leur ordre inchangé.

Chapitre IV :

Application à la performance de système de mise à la terre des installations éoliennes

IV-1 Introduction

Certains éléments électriques sont caractérisés par des hauteurs élevées comme les pylônes de haute tension et les éoliennes. Étant donné que les coups de foudre sont attirés par les immeubles de grande hauteur [47], de nombreuses études récentes ont été présentées pour montrer le comportement transitoire des pylônes de ligne à haute tension [48, 49, 50] et des systèmes de mise à la terre des éoliennes [51, 52] lorsqu'ils sont soumis au courant de foudre.

Nous nous intéressons à la protection des éoliennes contre les coups de foudre, parce que de nombreuses éoliennes ont été placées dans des régions caractérisées par une forte activité de la foudre [53], et que les turbines contiennent des composants électroniques très sensibles qui contrôlent plusieurs systèmes comme les convertisseurs et le contrôleur d'angle de pas.

L'objectif de chapitre exposé dans ce rapport est consacré à comparaison entre différentes configurations de mise à la terre d'éoliennes, et cette comparaison est faite pour les systèmes de mise à la terre enfouis dans des sols homogènes et hétérogènes. Après avoir choisi la meilleure configuration, nous étudions le courant et le potentiel le long de la configuration de mise à la terre choisie lorsqu'ils sont enfouis dans un sol homogène et stratifié, pour évaluer la participation des composants dans la réponse transitoire.

IV-2 Mise à la terre des éoliennes

La protection par les systèmes de mise à la terre des installations éoliennes contre la foudre et les surtensions revêt une importance particulière dans la mesure où celles-ci, en raison de leur complexité, de leur hauteur et de leur position exposée, risquent d'être frappées par la foudre. Nous présentons ici ce que nous entendons désigner par l'expression, système de mise à la terre. Les configurations classiques de systèmes de mise à la terre équipant les fermes éoliennes, qui seront considérées tout au long de ce mémoire, seront décrites. On s'intéresse tout d'abord à la nature de leur environnement immédiat, c'est-à-dire le sol et les fondations de la structure.

IV-3 Configuration des systèmes de mises à la terre des éoliennes

La configuration d'un système de mise à la terre dépend de la nature de la structure connectée, de l'environnement, et des performances recherchées. Nous nous intéresserons ici aux prises de terre des pylônes d'énergie éolienne et des postes de transformation qui composent le réseau. Le système de mise à la terre d'une éolienne unique est normalement réalisé en plaçant une électrode annulaire autour de la fondation et en la liant à la tour à travers la structure de la fondation. Conformément aux normes correspondantes [54], le diamètre minimal des électrodes de terre incorporées dans le béton est de dizaines de millimètres (acier rond plein). Des tiges verticales ou des électrodes en bande sont souvent utilisées avec l'électrode en anneau pour obtenir la valeur de résistance 10Ω pour un système de mise à la terre individuel d'une turbine. L'interconnexion des systèmes de mise à la terre est souvent réalisée entre des éoliennes en reliant les systèmes entre eux. Une telle interconnexion forme un système d'électrodes de terre étendu occupant une grande surface et fournit une impédance beaucoup plus faible. Différents chercheurs [55] ont étudié les systèmes de mise à la terre d'éoliennes, y compris l'électrode étendue interconnectée dans des conditions de fréquence d'alimentation et de transitoire. La référence [55] a effectué des mesures sur site de la résistivité du sol et du système d'électrodes de terre prolongées d'un parc éolien en utilisant la méthode de la pente [20]. Les valeurs mesurées de résistance à la terre étaient supérieures aux valeurs calculées obtenues à l'aide d'un circuit équivalent à paramètre local. Cette différence a été attribuée au remblayage des tranchées non

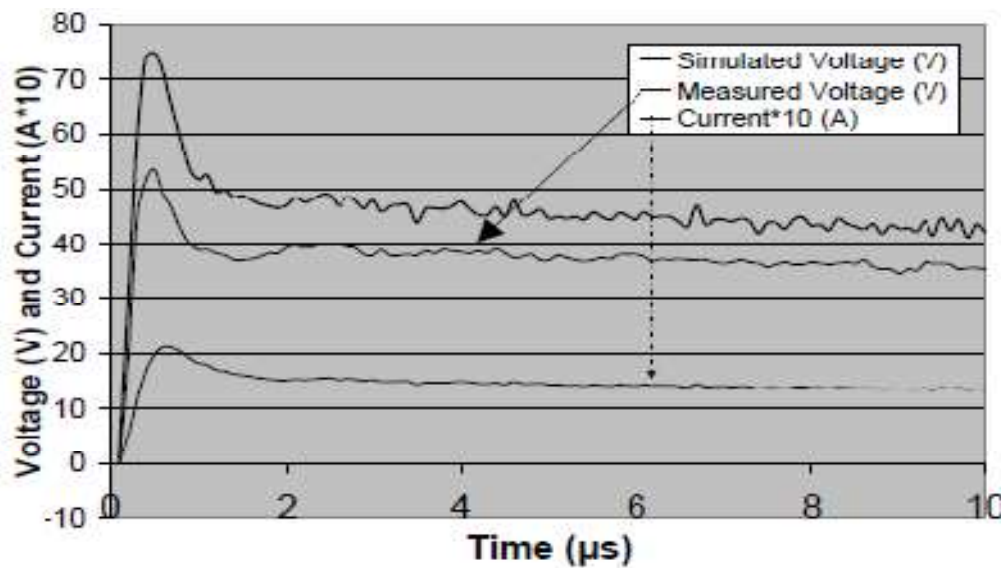
compactées. Il a également été signalé que les conditions de résistivité du sol variaient considérablement d'un site à l'autre. Voici en quelques sortes les différents systèmes de mise à la terre des éoliens.

IV-4 Comparaison et validation

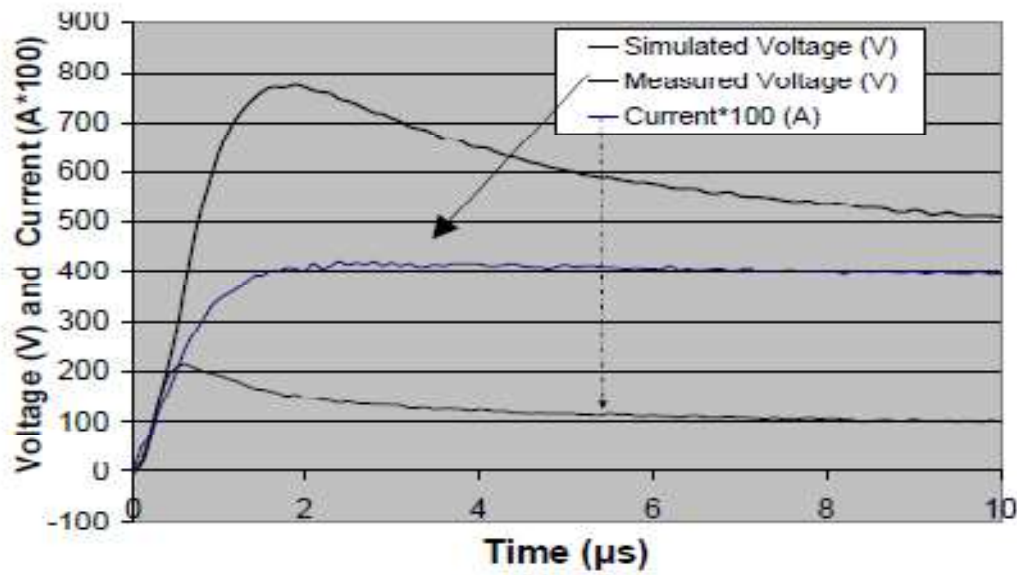
Le modèle proposé a déjà été validé en comparant les résultats de l'enquête précédente avec ceux de l'ATP-EMTP [56, 57].

IV-4-1 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Dans [58], Visacro et al. ont fait des expériences sur des électrodes horizontales enfouies dans un sol homogène et soumises à un courant d'impulsion. L'électrode choisie a une longueur de 12 m et un rayon de 7 mm enterré à une profondeur de 0,5 m. L'électrode est enterrée dans deux types de sol différents : le premier est un sol à haute résistivité ($4 \text{ k}\Omega\cdot\text{m}$) et le second est un sol à faible résistivité ($300 \Omega\cdot\text{m}$). La perméabilité du sol a été considérée comme 20. Le courant injecté est de 2 A la valeur maximale. Les auteurs de [58] ont simulé les mêmes configurations en utilisant leur modèle électromagnétique hybride développé basé sur la théorie des antennes. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure IV.1



(a)

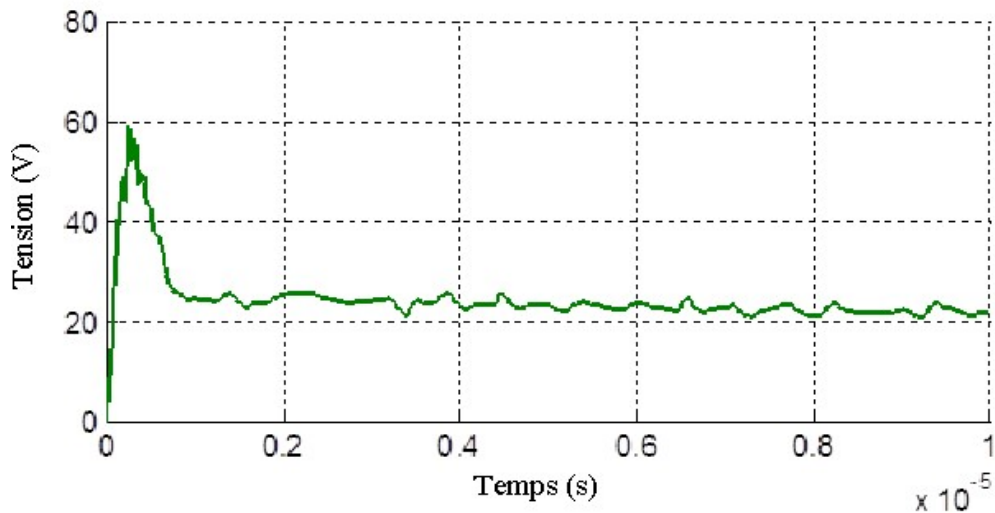


(b)

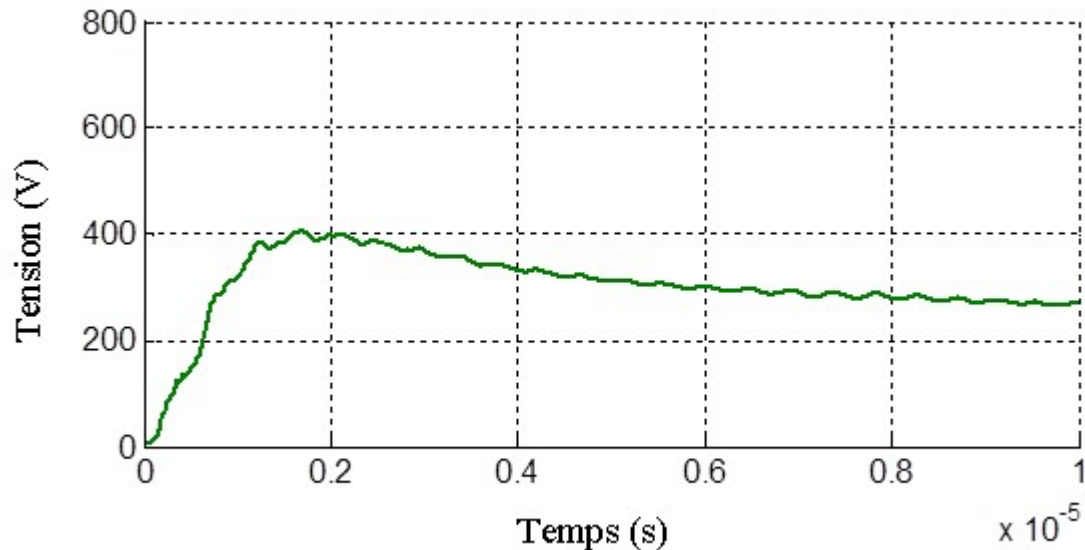
Figure IV.1 : La simulation et les résultats mesurés obtenus par [58](a) Résultat pour un sol de 300 Ω .m.(b) Résultat pour 4 k Ω . m de sol.

Nous avons estimé le courant injecté, et nous avons utilisé ce courant pour simuler la même configuration avec les mêmes paramètres de sol et de conducteur.

Les résultats obtenus pour cette simulation sont illustrés à la figure IV.2



(a)



(b)

Figure IV.2 : les résultats de simulation obtenus TLM résolus par Euler

(a) Résultat pour un sol de $300 \Omega.m$

(b) Résultat pour $4 \text{ k}\Omega.m$ de sol.

En comparant nos résultats TLM et ceux obtenus par le modèle électromagnétique hybride [58] avec les résultats expérimentaux, nous observons que les tensions calculées à l'aide de notre TLM montrent clairement une meilleure concordance avec les tensions expérimentales par rapport à celles obtenues à l'aide de la proposition [58]. Nous notons que l'existence d'une différence ne dépasse pas 10%.

IV-4-2 Comparaison avec les résultats du FDTD

Nous validons notre méthode TLM pour une autre configuration en étudiant la réponse du système de mise à la terre des éoliennes.

Nous étudions le comportement transitoire du système de mise à la terre composé de deux carrés de $12\text{m} \times 12\text{m}$ (terre annulaire) et de $6\text{m} \times 6\text{m}$ (renforcement des fondations) co-centrés enterrés à 2 m de profondeur. Les carrés sont reliés par deux conducteurs placés en croix (barre de liaison). Les extrémités du carré externe sont reliées à des électrodes verticales de 10 m (points 1, 2, 3 et 4) comme le montre la figure IV.3. Le rayon du conducteur a été considéré comme

10

mm.

Le courant injecté dans le centre a été considéré de 50 kA magnitude et $0,25 \mu\text{s}$ temps avant.

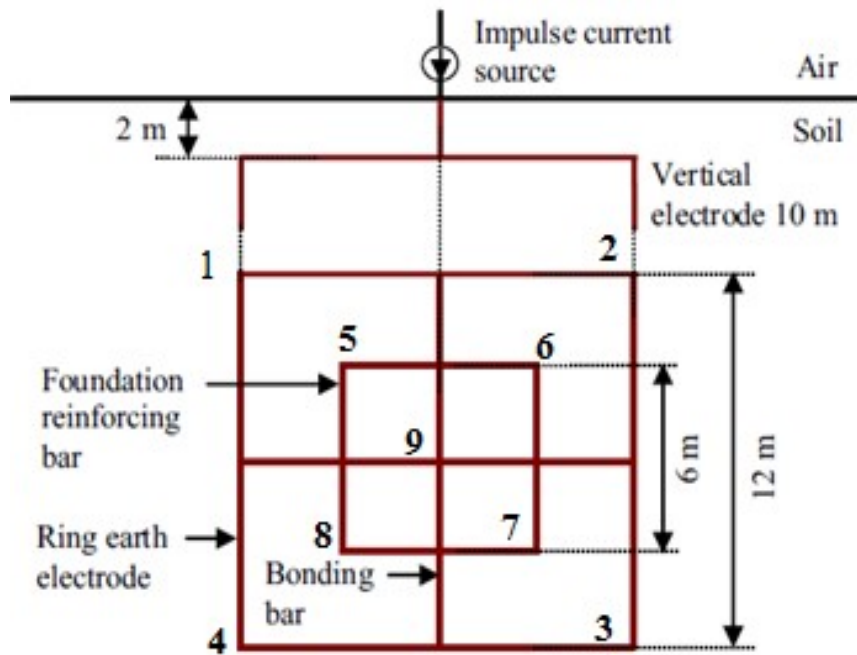


Figure IV.3 : Électrode de mise à la terre de l'éolienne [59].

Cette configuration a été étudiée par [59] en utilisant la méthode FDTD. Pour notre étude, nous allons simuler cette configuration dans deux cas : le premier avec l'ionisation ignorante du sol, et le second avec l'examen de l'ionisation du sol. La configuration a été évaluée pour deux valeurs de résistivité du sol, à savoir $1000 \Omega\text{m}$ et $2000 \Omega\text{m}$, et la permittivité relative a été prise en compte 9. Les résultats obtenus pour la TLM sans tenir compte du phénomène d'ionisation du sol sont présentés à la figure IV.4, tandis que les potentiels obtenus avec l'incorporation de l'ionisation du sol sont présentés à la figure IV.5.

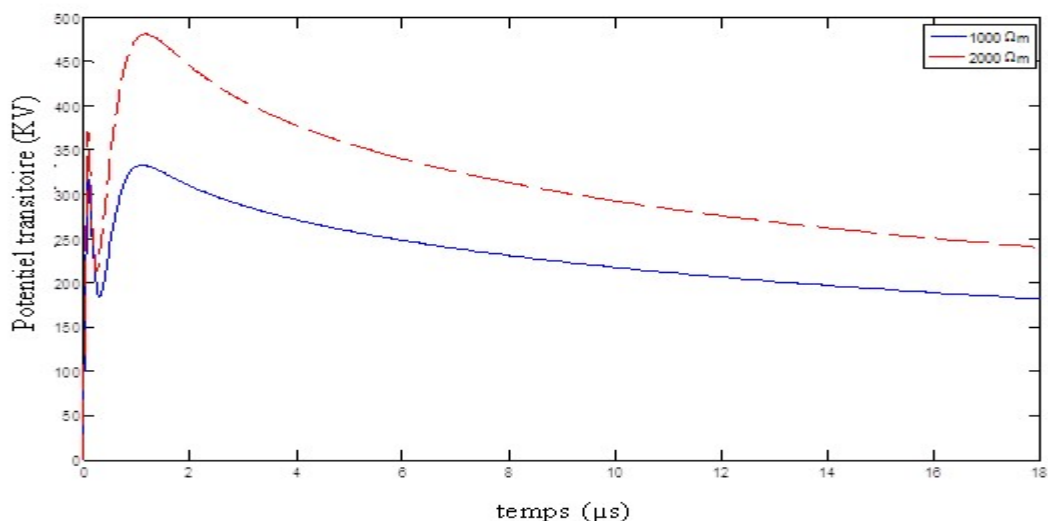


Figure IV.4 : Potentiel transitoire au point d'injection sans ionisation du sol.

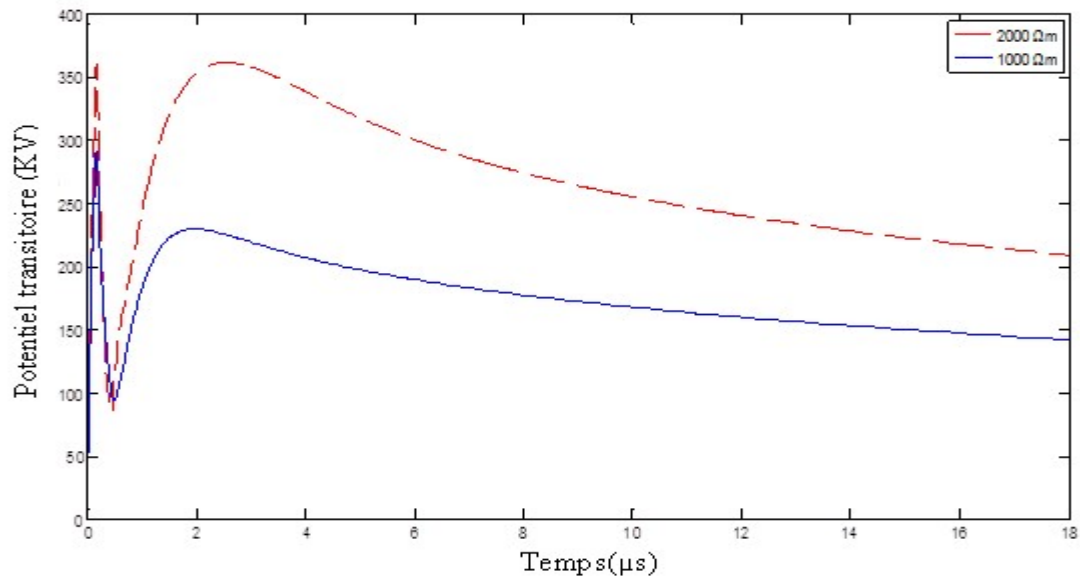


Figure IV.5 : Potentiel transitoire au point d'injection avec incorporation de l'ionisation du sol.

En confrontant nos potentiels de TLM présentés à la figure IV-4 à ceux obtenus par [59], on note une bonne adéquation avec les potentiels obtenus à l'aide de la méthode FDTD [59], et cette conformité valide notre simulation de TLM.

Lors de l'incorporation des phénomènes d'ionisation du sol, on note une forte diminution du potentiel transitoire (environ 25% pour 2000 Ωm et 10% pour 1000 Ωm), alors que la forme d'onde a été conservée pour les deux cas.

Ainsi, l'incorporation de l'ionisation du sol dans la simulation TLM entraîne une diminution potentielle significative. Lorsque le sol est plus résistif, le potentiel sera considérablement réduit, ce qui signifie que les phénomènes d'ionisation du sol doivent être pris en compte pour les systèmes de mise à la terre enfouis dans le sol résistif.

IV-5 Application

IV-5-1 Comparaison entre différentes configurations de systèmes de mise à la terre d'éoliennes

Après validation de la simulation du système de mise à la terre présentée à la figure IV.3, nous simulons ici une autre configuration du système de mise à la terre des éoliennes. Nous nommons la configuration présentée à la figure IV.3 par la configuration A, et la deuxième configuration que nous étudierons par la configuration B qui est présentée à la figure IV.6.

Notons que la configuration B a été étudiée par Sunjerga et al [52]. Dans leur enquête, Sunjerga et al. se sont intéressés à la présentation de la dépendance de fréquence de l'impédance de mise à la terre.

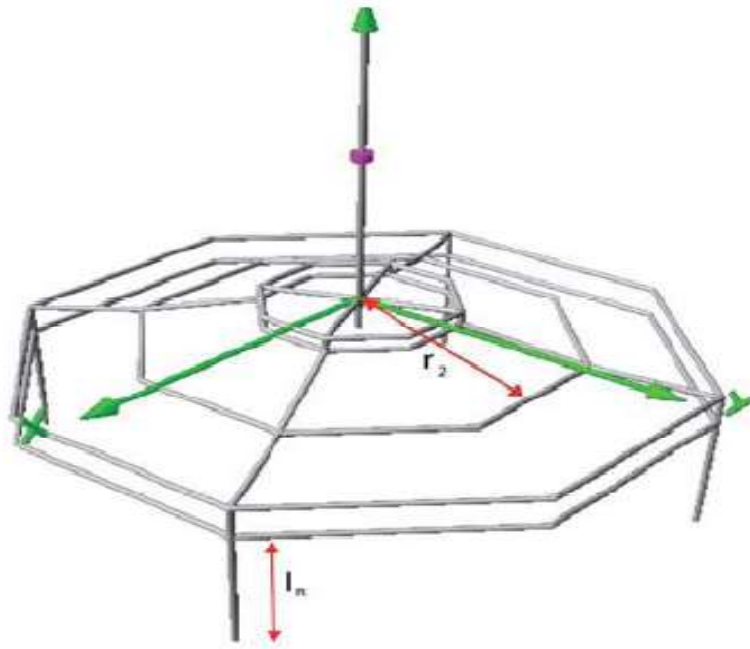


Figure IV.6 : Configuration B étudiée par Sunjerga et al [51].

Le système de mise à la terre de la configuration B se compose de plusieurs anneaux reliés par plusieurs tiges. Les paramètres géométriques sont présentés dans le tableau 1 où les anneaux (comme r_2 illustré à la figure IV.6) et la profondeur de chaque anneau sont notés.

	Ring radius (m)	Profondeur (m)
Rayon 1	2.6	0.05
Rayon 2	2.6	0.5
Rayon 3	5.8	1.5
Rayon 4	9	2
Rayon 5	9	3
	Longueur (m)	Profondeur (m)
Tiges verticales	4	3

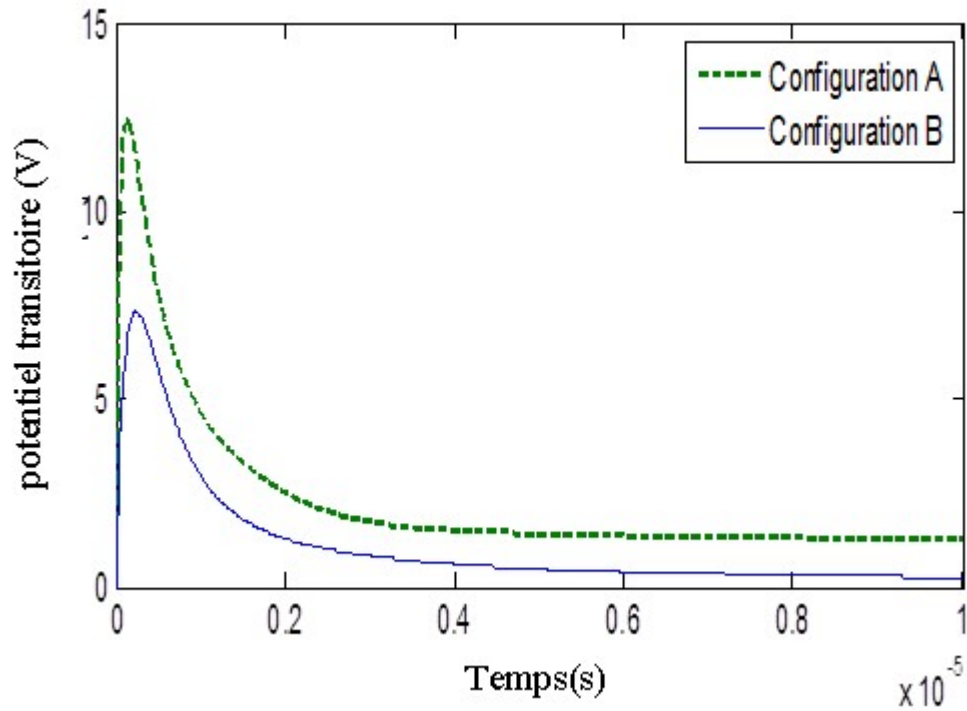
Tableau IV.1 : Géométrie du système de mise à la terre de l'éolienne B [51].

Dans cette partie, nous injecterons le même courant d'impulsion dans les deux configurations. La formule actuelle est donnée par $i(t) = 10 (e^{-27000 t} - e^{-5600000 t})$. Trois paramètres du sol ont été considérés comme des valeurs de résistivité/de permittivité relative : $10\Omega\text{m}/80$, $100\Omega\text{m}/40$ et $1000\Omega\text{m}/9$.

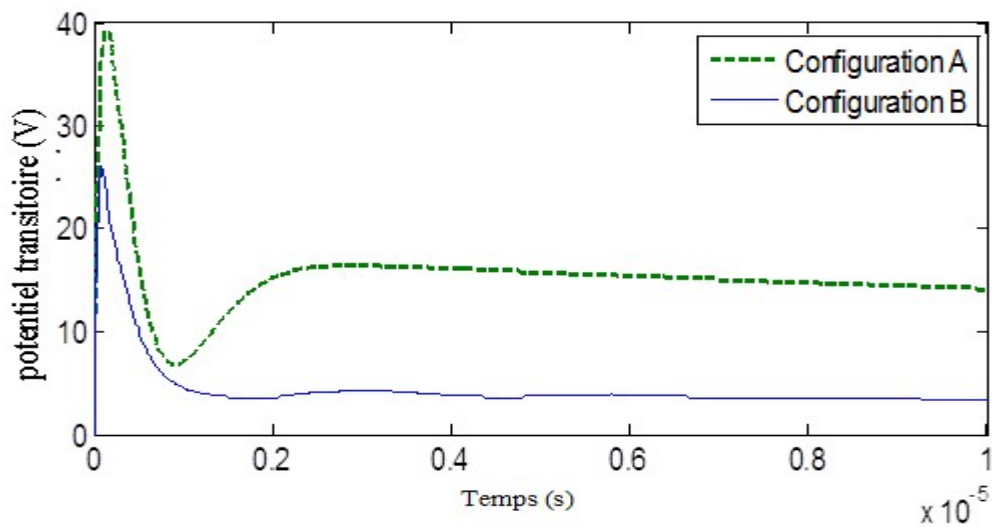
Nous notons que pour les configurations A et B, la valeur du rayon du conducteur a été considérée comme étant de 7 mm. Les résultats obtenus pour les configurations A et B sont présentés à la figure IV.7 :

- (a) pour les systèmes de mise à la terre enfouis dans un sol de résistivité $10\Omega\text{m}$ et de permittivité relative 80.
- (b) pour les sols de résistivité $100\Omega\text{m}$ et de permittivité relative 40.
- (c) pour les systèmes de mise à la terre enfouis dans un sol de résistivité $1000\Omega\text{m}$ et de permittivité relative 9.

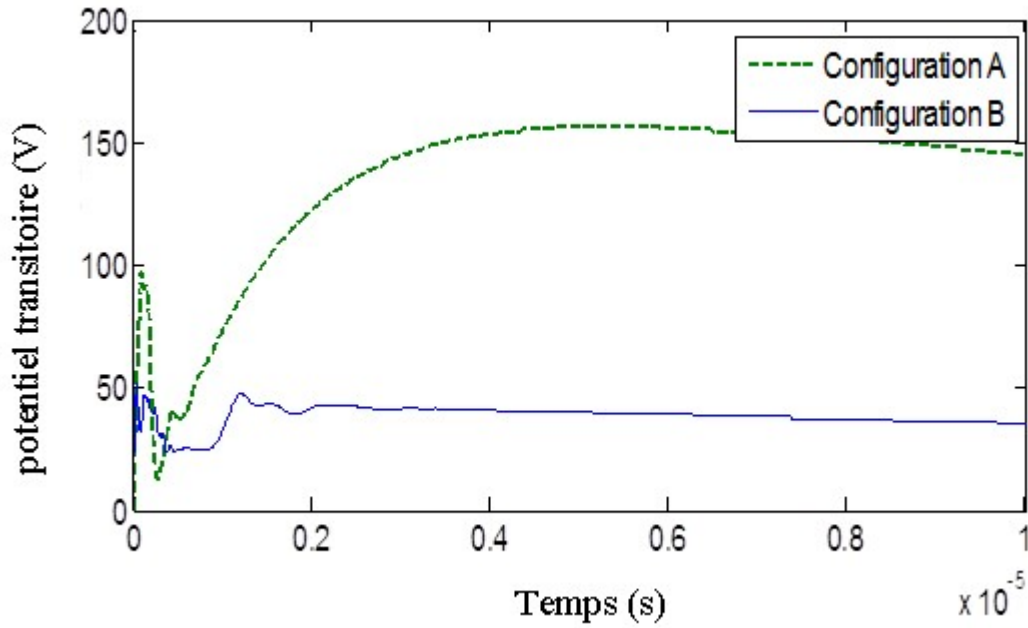
Nous notons que pour toutes les configurations et pour tous les paramètres du sol, les principales variations sont observées entre 0 et 4 μ s. Après cela, le potentiel devient approximativement constant, ce qui signifie qu'après 4 μ s l'impédance devient constante.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.7 : Comparaison entre les potentiels transitoires obtenus pour les configurations A et B pour un sol homogène de : (a) $10\Omega\text{m}/80$, (b) $100\Omega\text{m}/40$, (c) $1000\Omega\text{m}/9$.

Dans les trois essais, nous observons sur les figures IV.7 (a), (b) et (c) que la configuration B donne les valeurs inférieures du potentiel transitoire toutes les valeurs de résistivité du sol:

- Pour la résistivité/permittivité du sol $10\Omega\text{m}/80$, la valeur de crête de la configuration B présente 58 % par rapport à celle obtenue pour la configuration A.
- Lorsque la résistivité/perméabilité du sol est de $100\Omega\text{m}/40$, la valeur de crête de la configuration B est de 62,5 % par rapport à la valeur de crête du potentiel obtenu pour la configuration A.

• Et quand les systèmes de mise à la terre sont enterrés dans un sol de résistivité/permittivité $1000\Omega\text{m}/9$, la forme d'onde potentielle transitoire a été modifiée, et de nombreuses oscillations sont apparues pour les deux potentiels. Dans ce cas aussi, la configuration B donne un potentiel transitoire plus faible en comparant à la configuration A avec une différence de 70% notée entre les pics potentiels. Nous notons que pour la configuration A, lorsqu'on augmente la résistivité du sol, la forme de vague du potentiel devient différente de celle du potentiel actuel. Pour les valeurs de résistivité élevée ($1000\Omega\text{m}/9$), le potentiel contient des oscillations significatives.

Nous définissons l'impédance d'impulsion Z_p par le rapport de la tension de crête V_p au courant de crête I_p .

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (4.1)$$

Nous définissons la composante continue de l'impédance transitoire par le rapport de la valeur constante du potentiel (dans ce cas, la valeur du potentiel après $4\mu\text{s}$) au pic actuel.

Nous présentons l'impédance d'impulsion de chaque configuration (A et B) et pour toute la résistivité du sol sur le tableau IV.2, et la composante continue de l'impédance transitoire sur le tableau IV.3.

résistivité/permittivité de sol	Z_p pour configuration A [Ω]	Z_p pour configuration B [Ω]
10 Ω m/80	1.2	0.7
100 Ω m/40	3.9	2.2
1000 Ω m/9	15	5

Tableau IV. 2 : Valeurs d'impédance d'impulsion pour chaque configuration.

Le tableau IV.2 présente la configuration B donne l'impédance d'impulsion la plus basse en comparant les valeurs obtenues pour la configuration A. Ainsi, nous pouvons adopter cette configuration B qui contient plus d'anneaux répartis sur plusieurs niveaux peut réduire l'impédance transitoire.

résistivité/permittivité de sol	Composant continue de l'impédance de la configuration A [Ω]	composant continue d'impédance de la configuration B [Ω]
10 Ω m/80	0.15	0.05
100 Ω m/40	1.5	0.5
1000 Ω m/9	15	4.8

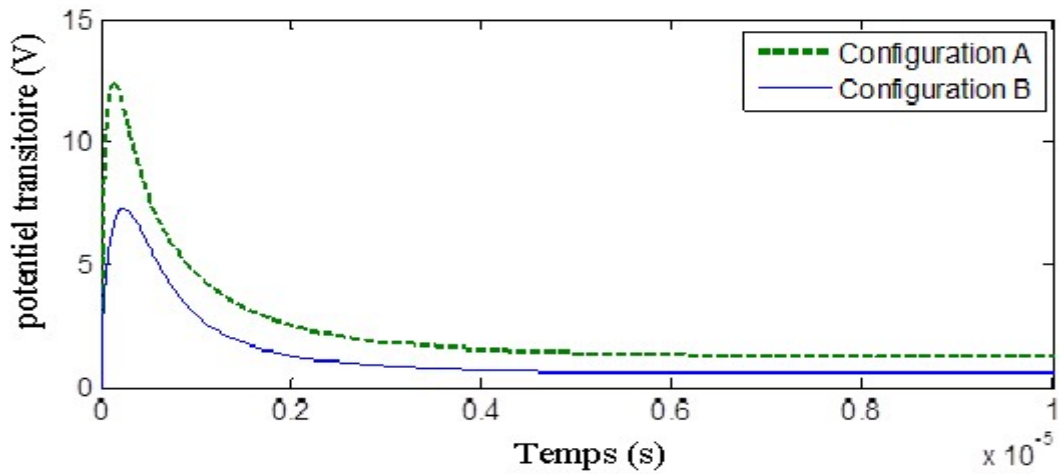
Tableau IV.3 : Composante DC des valeurs d'impédance transitoire pour chaque configuration.

Dans le tableau IV.3, nous pouvons voir que la composante continue de chaque configuration augmente de façon linéaire avec l'augmentation de la résistivité du sol, de sorte que cette composante continue dépend constamment de la géométrie du système de mise à la terre multipliée par la résistivité du sol. En comparant les composants DC des configurations A avec B, on observe que le composant continue de A est le triple de celui de B. Ainsi, la configuration B donne le composant continue le plus bas de l'impédance transitoire. Nous notons que pour un sol à haute résistivité, l'impédance d'impulsion devient égale à la composante continue de l'impédance transitoire.

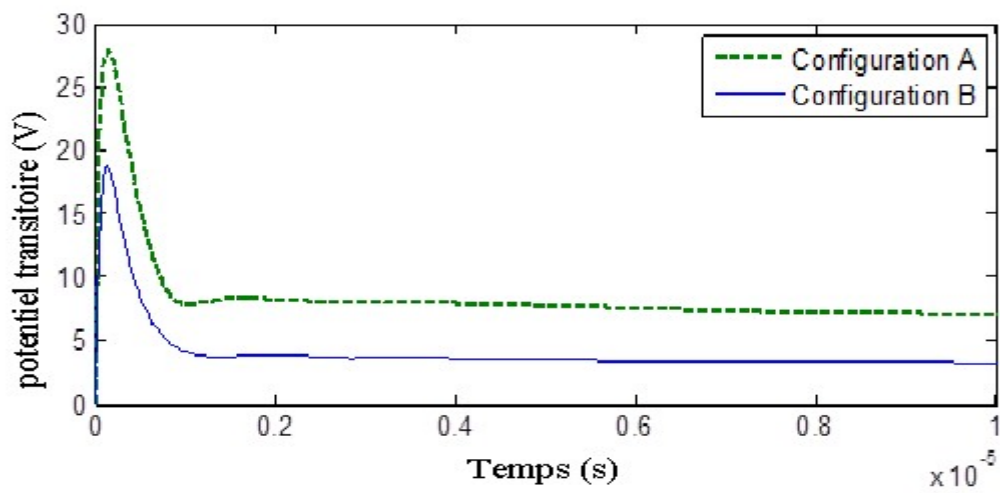
IV-5-2 Différentes configurations enfouies dans un sol stratifié

Après avoir simulé ces configurations avec un sol homogène, nous évaluons dans cette partie leur réponse transitoire lorsqu'ils sont enfouis dans le sol stratifié. Puisque le sol à haute résistivité a donné l'impédance d'impulsion la plus élevée, nous essayons d'évaluer l'impact de l'ajout de la couche supérieure avec une résistivité inférieure avec une épaisseur de 2 m, et l'autre couche est un milieu semi-infini caractérisé par résistivité/permittivité 1000 Ω m/9. Le même courant a été injecté. Pour la couche supérieure, trois valeurs ont été considérées, à savoir : 10 Ω m/80, 50 Ω m/60 et

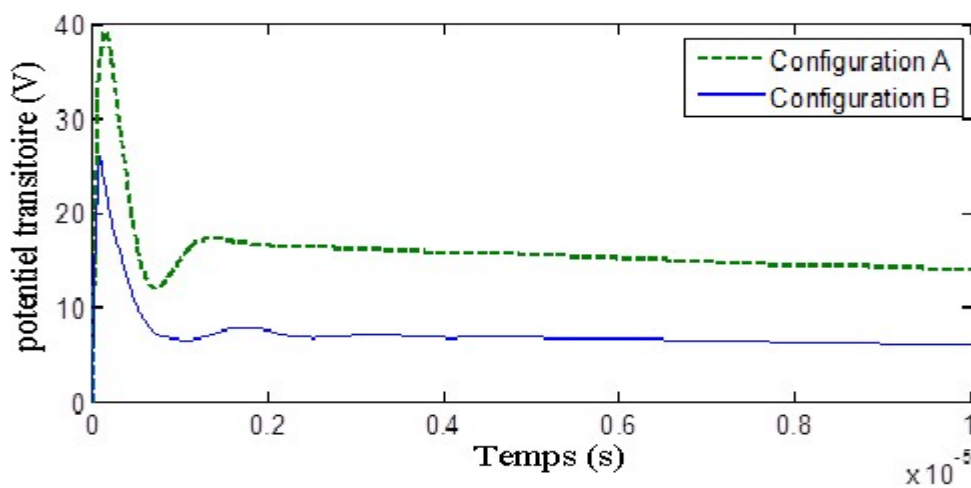
100Ωm/40, et les potentiels transitoires obtenus sont présentés respectivement dans la figure IV.8 (a), (b) et (c).



(a)



(b)



(c)

Figure IV.8 : Potentiel transitoire obtenu pour le système de mise à la terre enfoui dans un sol stratifié (a) couche supérieure de 10Ωm/80, (b) couche supérieure de 50Ωm/60, (c) couche supérieure de 100Ωm/40.

Nous notons ici que les variations significatives du potentiel transitoire sont observées entre 0 et 2 μ s. Après cela, le potentiel devient à peu près inchangé. L'utilisation de sols stratifiés a donc réduit le temps transitoire du potentiel. En comparant les figures IV.7 (a) et IV.8 (a), on remarque que pour chaque configuration (A ou B), le potentiel transitoire a pratiquement la même forme d'onde avec les mêmes valeurs (même les valeurs de crête). Cela signifie que l'existence de la couche inférieure n'a pas suscité de changement sur le potentiel transitoire. Notons que la configuration A donne toujours une valeur de pic supérieure à celle obtenue pour la configuration B.

À partir de la figure IV.8 (b), le potentiel transitoire de la configuration A donne une valeur de crête plus élevée lorsqu'on la compare à celle obtenue pour la configuration B (30 % plus élevée). Le potentiel transitoire des deux configurations est supérieur aux potentiels présentés à la figure IV.8(a).

La figure IV.8 (c) a montré que l'existence de la couche supérieure modifie la forme et les valeurs de l'onde le potentiel transitoire obtenu pour les deux configurations lors de la comparaison avec la figure IV.7 (c), et nous notons que les oscillations observées à la figure IV.7 (c) pour les deux configurations ont disparu.

Pour cette partie, nous présentons l'impédance d'impulsion de chaque configuration (A et B) et pour toute la résistivité du sol sur le tableau IV.4, et la composante continue de l'impédance transitoire sur le tableau IV.5.

résistivité/permittivité de la couche supérieure	Z_p pour configuration A [Ω]	Z_p pour configuration B [Ω]
10 Ω m/80	1.2	0.7
50 Ω m/60	2.7	1.8
100 Ω m/40	3.9	2.5

Tableau IV.4 : Les valeurs d'impédance d'impulsion pour chaque configuration.

Le tableau IV.4 présente les deux configurations A et B donnant l'impédance d'impulsion la plus faible lorsqu'elles sont enfouies dans un sol stratifié. Nous notons que la configuration B est caractérisée par une impédance d'impulsion plus faible lors de la comparaison avec les valeurs obtenues pour la configuration A. Cela peut être dû à cette partie importante des conducteurs du système de mise à la terre sont dans la couche supérieure.

résistivité/permittivité de la couche supérieure	Composante continue de l'impédance de la configuration A [Ω]	Composante continue de l'impédance de la configuration B [Ω]
10 Ω m/80	0.15	0.05
50 Ω m/60	0.7	0.4
100 Ω m/40	1.5	0.7

Tableau IV.5 : Composante continue des valeurs d'impédance transitoire pour chaque configuration.

Le tableau IV.5 montre que la composante continue de chaque configuration augmente avec l'augmentation de la résistivité du sol supérieur. Mais nous notons que les valeurs obtenues du composant continue sont réduites lors de l'utilisation du sol multicouche. Et le composant continue obtenu avec la configuration A est toujours supérieur à celui obtenu avec la configuration B.

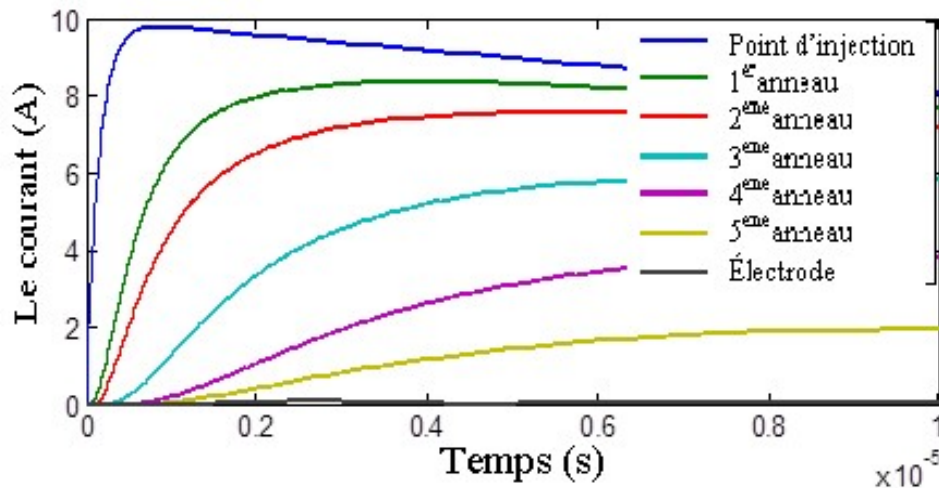
IV-5-3 Participation des anneaux de configuration B dans la réponse transitoire

a- Sol homogène

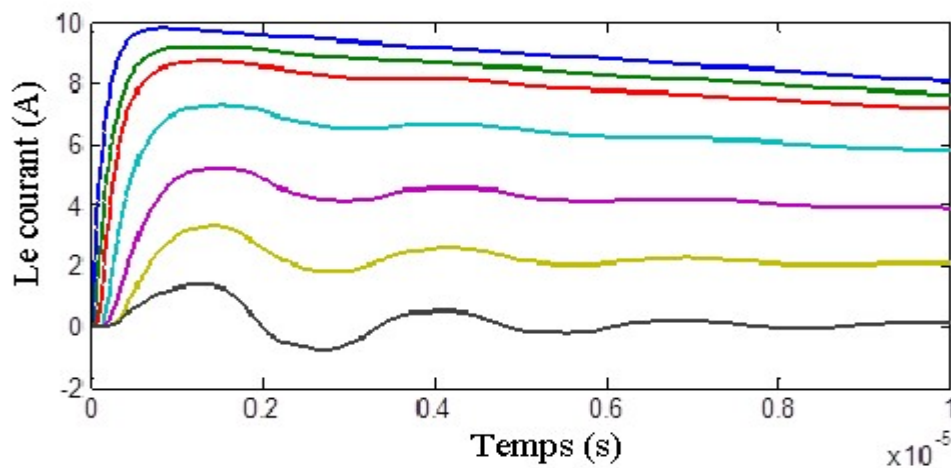
Après avoir confirmé que la configuration B donne la meilleure réponse transitoire avec une impédance transitoire inférieure. Cette configuration est composée de cinq anneaux de rayon différent disposés à différentes profondeurs et reliés à quatre tiges verticales (les détails sont présentés dans le tableau IV.1).

Pour mieux analyser la participation de chaque anneau à la réponse transitoire, nous étudions le courant transitoire à l'entrée de chaque anneau et les tiges verticales, et nous étudions la tension de chaque anneau pour évaluer quel anneau participe efficacement à la forme d'onde potentielle de mise à la terre.

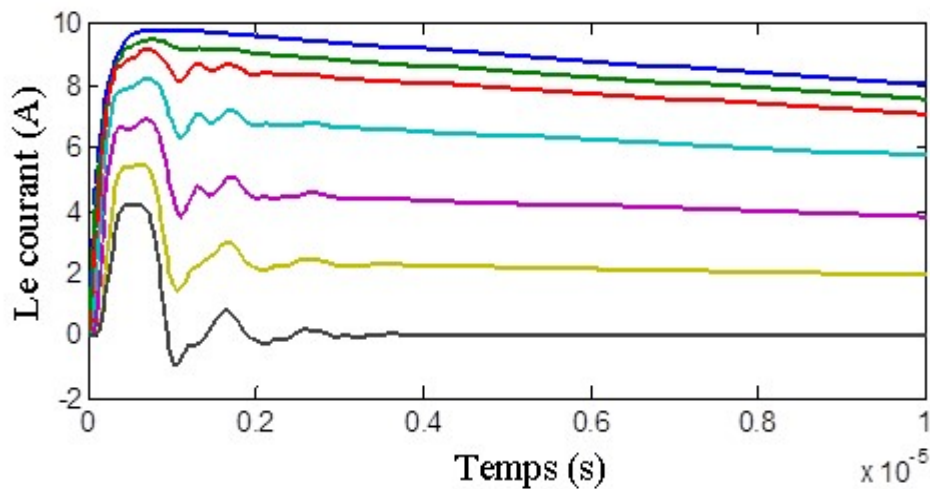
Le courant transitoire obtenu pour chaque anneau est présenté dans la figure IV.9, et les potentiels transitoires obtenus sont dans la figure IV.10. Pour les deux figures, les résultats obtenus avec le sol de résistivité/permittivité $10\Omega\text{m}/80$, $100\Omega\text{m}/40$ et $1000\Omega\text{m}/9$ sont présentés respectivement en (a), (b) et (c).



(a)



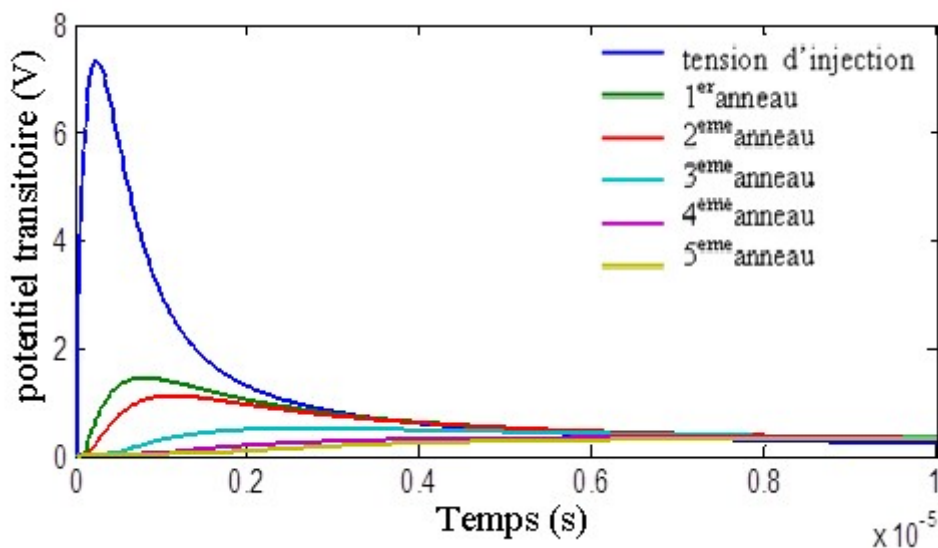
(b)



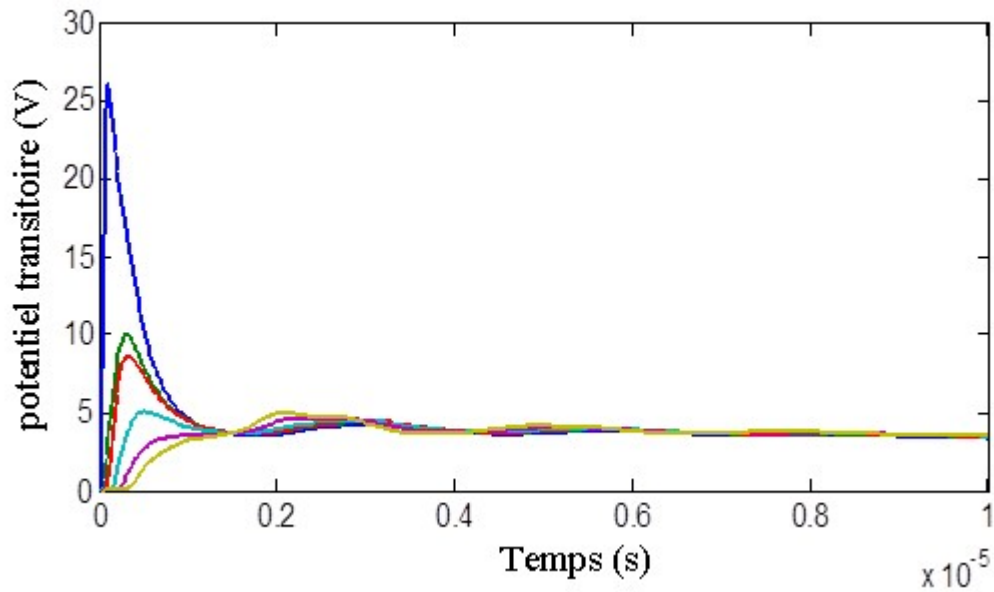
(C)

Figure IV.9 : Courant transitoire le long des anneaux de mise à la terre de la configuration B enfouis dans le sol de (a) $10\Omega\text{m}/80$, (b) $100\Omega\text{m}/40$, (c) couche supérieure de $1000\Omega\text{m}/9$.

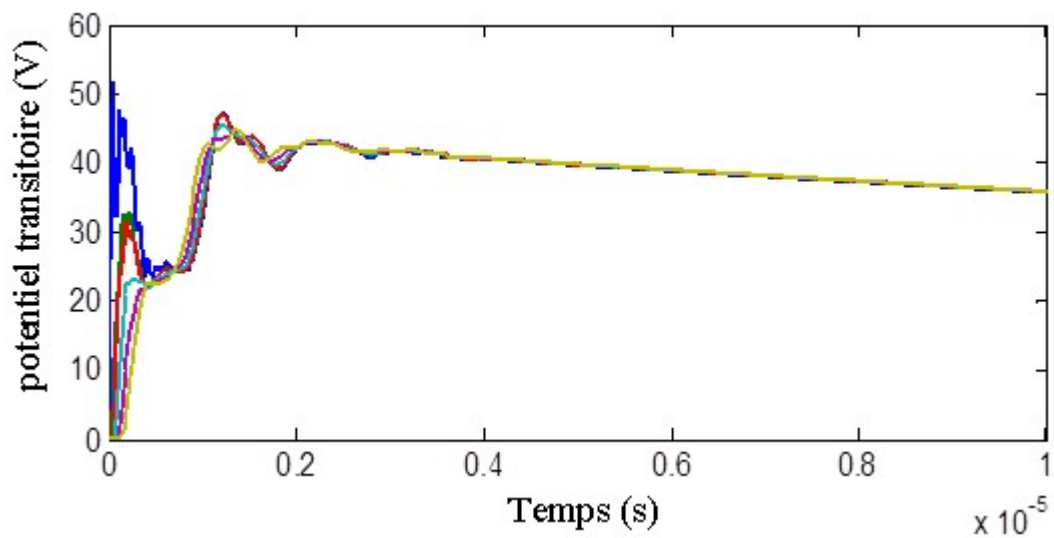
Nous observons que pour le système de mise à la terre enfoui dans la résistivité $10\Omega\text{m}/80$, une diminution considérable du courant entre les anneaux 2 et 3, et 3 et 4, tandis que son équitable entre les autres anneaux. Et le courant d'entrée des électrodes est très faible. D'après la figure IV.9 (b), le courant dans les anneaux 1 et 2 a la même forme de courant d'entrée, tandis que pour les anneaux 3, 4 et 5 certaines oscillations apparaissent dans la forme d'onde actuelle. Alors que le courant dans l'électrode est amorti en alternative. Pour la figure IV.9 (c), on note des oscillations apparaissant dans la forme d'onde actuelle de l'anneau 2, et cela devient plus observable pour les autres anneaux avec la magnitude du courant diminuant.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.10 : Potentiel transitoire le long des anneaux de mise à la terre de la configuration B enfouis dans le sol de (a) $10\Omega\text{m}/80$, (b) $100\Omega\text{m}/40$, (c) couche supérieure de $1000\Omega\text{m}/9$.

Pour le système de mise à la terre enfoui dans la résistivité $10\Omega\text{m}/80$, une grande différence (environ 80%) entre le potentiel du point d'injection et le potentiel obtenu aux anneaux 2 et 3, et 3 et 4. En particulier pour le point d'injection, la forme d'impulsion du potentiel est remarquable lorsqu'on la compare aux autres.

D'après la figure IV.10 (b), le potentiel au niveau des anneaux contient quelques oscillations et devient parfois plus grand que le point d'injection un. Après $4\mu\text{s}$, le potentiel devient égal pour tous les anneaux et le point d'injection (comportement résistif). Les résultats présentés dans la figure IV.10 (c) montrent que les oscillations de courant observées dans la figure IV.9 (c) ont induit des oscillations remarquables sur les potentiels. On note une différence entre les potentiels le long de l'anneau entre 0 et $2\mu\text{s}$, après quoi le potentiel devient le même tout au long du système de mise à la terre (comportement résistif).

b- Sol stratifié

Nous évaluons ici la réponse transitoire de la configuration B enfouie dans un sol stratifié : la couche inférieure de résistivité/permittivité $1000\Omega\text{m}/9$ (sol résistif), tandis que la couche supérieure de 2m d'épaisseur est caractérisée par une résistivité inférieure. Nous étudions le courant transitoire dans chaque anneau et les tiges verticales, et la tension de tous les anneaux pour évaluer quel anneau participe efficacement à la forme d'onde potentielle de mise à la terre.

Le courant transitoire obtenu pour chaque anneau est présenté dans la figure IV.11, et les potentiels transitoires obtenus sont dans la figure IV.12. Pour chaque figure, les résultats obtenus avec la couche supérieure de résistivité/permittivité $10\Omega\text{m}/80$, $50\Omega\text{m}/60$ et $100\Omega\text{m}/40$ sont respectivement (a), (b) et (c).

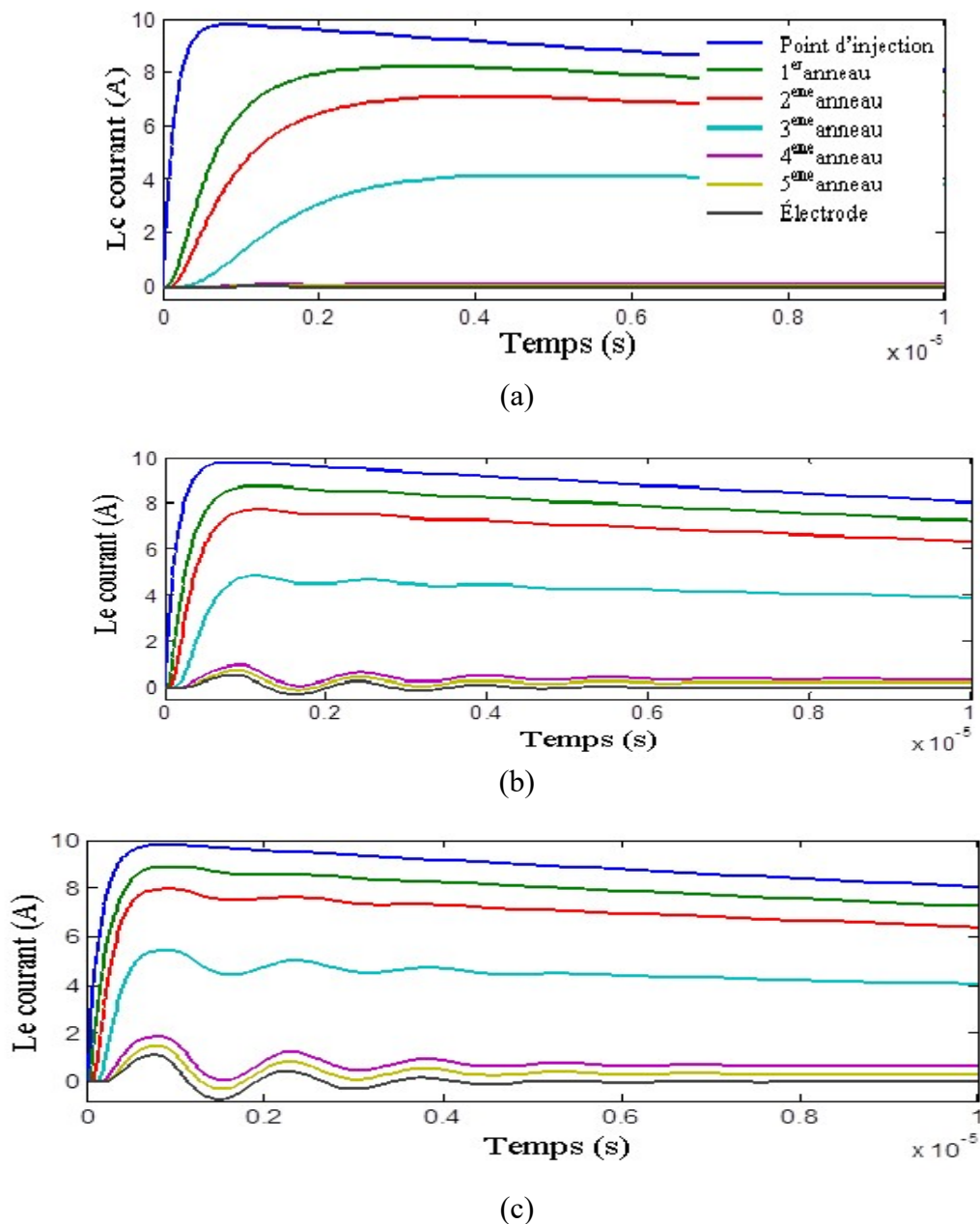
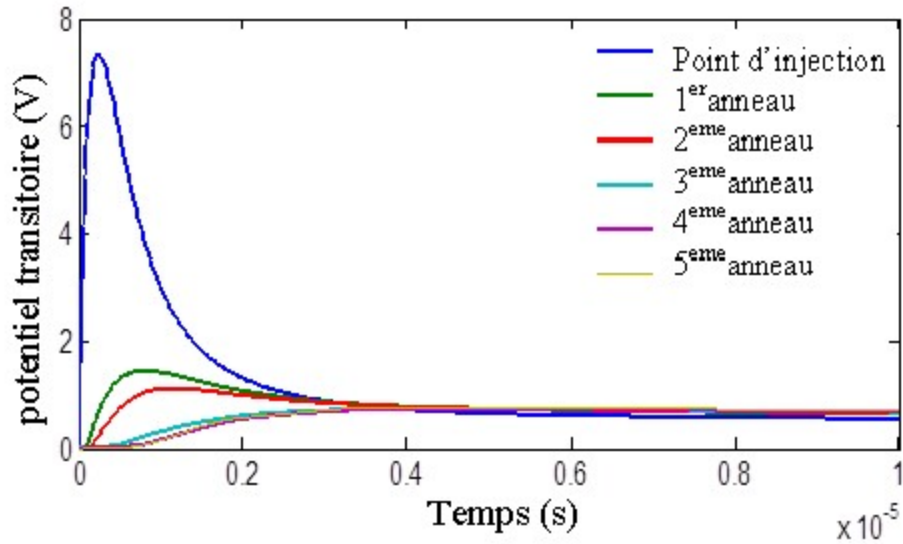
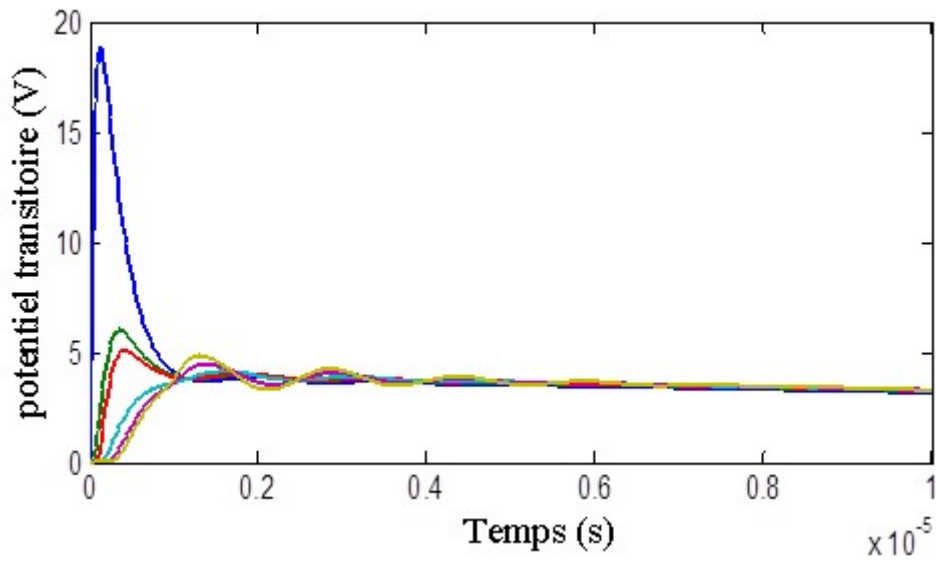


Figure IV.11 : Courant transitoire le long des anneaux de mise à la terre enfouis dans un sol stratifié avec une couche supérieure de (a) $10\Omega\text{m}/80$, (b) $50\Omega\text{m}/60$, (c) une couche supérieure de $100\Omega\text{m}/40$.

On observe que lorsque la résistivité/permittivité de la couche supérieure est de $10\Omega\text{m}/80$, la totalité du courant est dissipée entre le point d'injection et le 4ème anneau, et le courant dans le 5ème anneau et l'électrode est nul. D'après la figure IV.11 (b), le courant dans les anneaux 1 et 2 a la même forme de courant d'entrée, tandis qu'une légère oscillation apparaît pour le courant du cycle 3. Les courants dans les 4e et 5e anneaux et l'électrode sont amortis de façon alternative. Les mêmes remarques pour la figure IV.11 (b) sont observées pour la figure IV.11 (c).



(a)



(b)

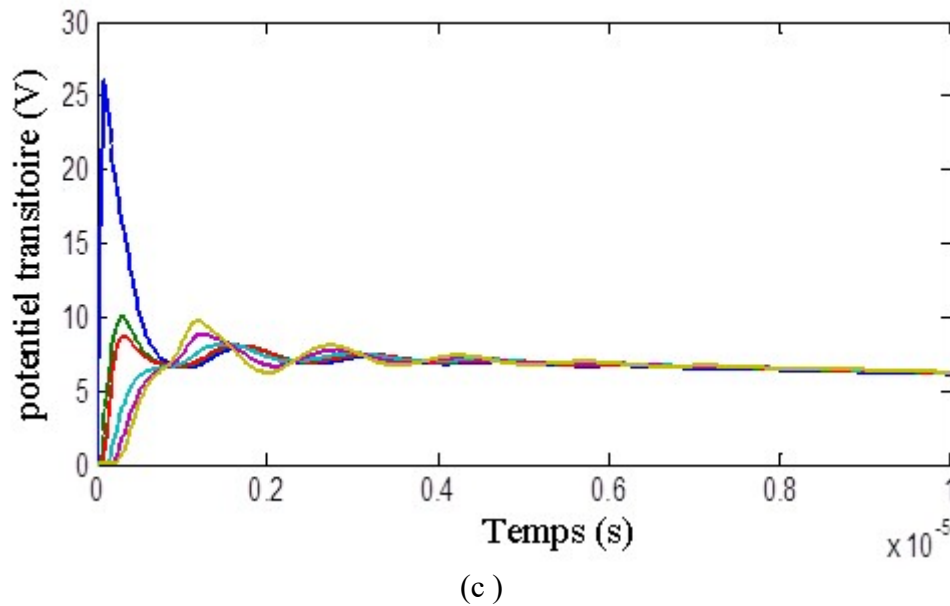


Figure IV.12 : Potentiel transitoire le long des anneaux de mise à la terre enfouis dans un sol stratifié avec une couche supérieure de (a) $10\Omega\text{m}/80$, (b) $50\Omega\text{m}/60$, (c) une couche supérieure de $100\Omega\text{m}/40$.

Pour le système de mise à la terre couche supérieure de $10\Omega\text{m}/80$, une différence remarquable (de 80%) entre le potentiel du point d'injection et le potentiel obtenu au niveau du ring 2. D'autre part, nous observons que le potentiel est presque le même pour tous les rings.

D'après les figures IV.12 (b) et (c), le potentiel au point d'injection est caractérisé par une grande valeur de pic lors de la comparaison avec les valeurs de pic des cinq anneaux. Mais nous remarquons que certaines oscillations apparaissent sur le potentiel transitoire des anneaux, et ces oscillations sont amorties lentement. Les oscillations deviennent plus importantes lorsque la résistivité de la couche supérieure augmente. Pour toutes les configurations, après $0,2 \mu\text{s}$ le potentiel devient le même tout au long du système de mise à la terre (comportement résistif).

IV-6 Conclusion

En utilisant notre modèle TLM et en incorporant l'ionisation du sol, nous avons simulé dans ce chapitre différentes configurations de système de mise à la terre. Le modèle proposé a été validé par comparaison des résultats obtenus avec certains résultats expérimentaux pour les électrodes horizontales simples et les résultats obtenus par simulation FDTD pour le système de mise à la terre des éoliennes. Un bon accord a été noté entre nos résultats de TLM et ceux de simulation et de FDTD. La première application a été l'incorporation de l'ionisation du sol dans le modèle des systèmes de mise à la terre des éoliennes. Une diminution potentielle est notée lors de l'incorporation des phénomènes d'ionisation du sol, mais la forme d'onde a été conservée. La deuxième demande était une comparaison entre deux systèmes de mise à la terre d'éoliennes; la première est celle qui a été validée avec la simulation FDTD composée de deux carrés co-centrés enfouis à même profondeur, et liée à de longues électrodes verticales, et la seconde est une autre configuration composée de cinq anneaux (octogones) disposés sur plusieurs profondeurs et reliés à de courtes électrodes verticales. Pour le sol homogène et stratifié, la deuxième configuration a donné le potentiel transitoire inférieur et, par

conséquent, l'impédance transitoire inférieure. On remarque que pour un sol à haute résistivité, une remarquable oscillation de tension apparaît sur le potentiel transitoire, et sa forme d'onde devient différente de celle du courant.

Nous avons évalué la composante continue de l'impédance transitoire; elle consiste en un rapport entre la valeur stabilisée de tension et la valeur de crête actuelle. Ce composant peut être déterminé par une constante qui dépend de la géométrie du système multipliée par la résistivité du sol.

Pour les sols stratifiés, l'utilisation de la couche supérieure de faible résistivité ont diminué l'impédance transitoire et ont éliminé les oscillations apparaissant sur la forme d'onde potentielle. Et le composant continue a été réduit pour les deux configurations.

Après avoir confirmé que la deuxième configuration avec des électrodes courtes donne la meilleure réponse transitoire, nous avons étudié le courant transitoire et le potentiel le long du système de mise à la terre. Nous nous sommes intéressés au courant transitoire et au potentiel de chaque anneau. Comme principaux résultats, pour le sol homogène, pour les systèmes de mise à la terre enfouis dans un sol à faible résistivité, le courant est dissipé équitablement entre les anneaux du système de mise à la terre et les électrodes ne participent pas à la dissipation. Et pour les systèmes enfouis dans un sol à haute résistivité, certaines oscillations apparaissent dans le courant des anneaux et des électrodes inférieurs, et ces oscillations provoquent des oscillations remarquables sur le potentiel transitoire. D'autre part, le potentiel devient presque le même le long des électrodes, ce qui reflète le comportement résistif de l'électrode de mise à la terre enfouie dans un sol à haute résistivité. Lorsque le système est enterré dans un sol stratifié, le courant est dissipé dans les anneaux placés du côté à faible résistivité. Même la différence de résistivité du sol entre les couches est plus grande, le courant sera dissipé dans la résistivité inférieure avec de faibles oscillations. Et quand la résistivité du sol se rapproche de celle de la deuxième couche, les oscillations de courant apparaissent clairement et le courant dans les anneaux inférieurs augmentent, et le comportement de tout le système de mise à la terre devient résistif.

Conclusion Générale

La protection contre la foudre et l'analyse CEM des systèmes électriques et d'alimentation, avec une attention particulière aux conditions de mise à la terre, doivent comprendre les caractéristiques dynamiques des conducteurs de mise à la terre et des systèmes de mise à la terre étendus. Pour cette raison, une méthode d'accès à la ligne de transmission basée sur un conducteur mis à la terre a été développée. Par conséquent la vérification de la méthode développée être comparée aux résultats de la mesure de champ, et aux résultats obtenus à partir de la méthode rigoureuse du champ électromagnétique. Par exemple, certains aspects de la recherche sur la protection contre la foudre ont été sélectionnés pour souligner la polyvalence et la flexibilité de la méthode proposée, capable de modéliser non seulement le système de mise à la terre lui-même, mais également les appareils électriques qui y sont connectés.

Les travaux de recherche présentés dans cette thèse contribuent à l'analyse de la réponse électromagnétique transitoire des systèmes de mise à la terre en régime perturbé, particulièrement à la suite d'une décharge de foudre sur les installations éoliennes.

Nous avons tout d'abord identifié et caractérisé les différents paramètres qui influencent le comportement des systèmes de mise à la terre, en particulier lorsqu'ils diffusent un courant de foudre. 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 devient important. Une synthèse des méthodes disponibles pour l'analyse du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre a été aussi décrite. Ensuite un modèle a été décrit pour représenter le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre. En se basant sur l'approche TLM avec incorporation de l'ionisation du sol, nous avons simulé différentes configurations de système de mise à la terre. Le modèle proposé a été validé par comparaison des résultats obtenus avec certains résultats expérimentaux pour une électrode horizontale simple et des résultats obtenus par simulation FDTD pour un système de mise à la terre d'une éolienne. Une bonne concordance a été constatée entre les résultats de notre TLM et ceux de la simulation et de la FDTD.

La première configuration est composée de deux carrés co-centrés enterrés à la même profondeur, et reliés à de longues électrodes verticales, et la seconde configuration composée de cinq anneaux (octogones) disposés sur plusieurs profondeurs et reliés à de courtes électrodes verticales. Pour le sol homogène et stratifié, la deuxième configuration a donné le potentiel transitoire le plus faible et par conséquent une impédance transitoire plus faible. On note que pour les sols à haute résistivité, une remarquable oscillation de tension apparaît sur le potentiel transitoire, et sa forme d'onde devient différente de celle du courant.

La deuxième configuration avec des électrodes courtes donne la meilleure réponse transitoire, nous avons étudié le courant et le potentiel transitoires le long du système de mise à la terre. Nous nous sommes intéressés au courant et au potentiel transitoire à chaque anneau. Pour le sol homogène, le système de mise à la terre enterré dans un sol à faible résistivité, le courant est dissipé équitablement entre les anneaux du système de mise à la terre et les électrodes ne participent pas à la dissipation. Et pour les systèmes enterrés dans un sol à haute résistivité, certaines oscillations apparaissent dans le courant des anneaux et des électrodes inférieures, et ces oscillations provoquent des oscillations remarquables sur le potentiel transitoire. D'autre part, le potentiel devient presque le même le long des électrodes, ce qui reflète le comportement résistif de l'électrode de mise à la terre enterrée dans un sol à haute résistivité. Lorsque le système est enterré sur un sol stratifié, le courant est dissipé dans les anneaux placés du côté de la faible résistivité. Même si la différence de résistivité du sol entre les couches est plus importante, le courant sera dissipé dans la résistivité inférieure avec de faibles oscillations. Et lorsque la résistivité du sol se rapproche de celle de la deuxième couche, les oscillations du courant apparaissent clairement et le courant dans les anneaux inférieurs augmente, et le comportement de tout le système de mise à la terre devient résistif.

En regardant l'approche proposée pour modéliser le système de mise à la terre, il est évident qu'il y aura des doutes, des questions et des critiques, car ils sont la source d'inspiration pour les travaux futurs. Les questions suivantes méritent d'être mentionnées.

Y a-t-il des inconvénients à la méthode de ligne de transmission non uniforme proposée dans cette thèse ? Le modèle d'ionisation uniforme du sol représente-t-il la réalité d'une manière ou d'une autre ?

Pour répondre à la première question, nous pouvons nous référer à la ligne de transmission non uniforme, la comparaison entre la théorie des circuits et la méthode des champs électromagnétique. Évidemment, ces approches prévoient différentes distributions de tension en fonction du conducteur de mise à la terre.

La différence est plus petite au point d'injection et augmente à mesure que nous nous éloignons du point d'injection. Plusieurs paramètres peuvent être liés à ce phénomène complexe. L'un des paramètres intéressants peut être que l'influence de la fréquence dépend du nombre d'unités de longueur. Il peut être intéressant de combiner cet effet avec l'analyse transitoire des systèmes de mises à la terre basée sur la méthode de la ligne de transmission non uniforme. Il s'agit sans aucun doute d'une étude importante pour l'avenir.

La deuxième question est liée au phénomène d'ionisation du sol. Dans cette thèse, on suppose que l'ionisation du sol autour du conducteur de mise à la terre est uniforme. Cela peut être raisonnable si le conducteur de terre est en sol de faible résistivité. Le vrai sol contient de la matière organique et des roches, il y aura donc quelques irrégularités dans la zone d'ionisation. En outre, à partir des coups de foudre déclenchés et des expériences en laboratoire, il a été constaté que les conducteurs de terre dans le sol et l'air-sol (en particulier dans les sols à résistivités élevés) formeront des canaux de décharge distincts. Ces canaux de décharge transportent une partie du courant de foudre. La simulation présentée ici n'inclut pas l'existence de canaux de décharge discrets en surface ou au sol. Des expériences et des analyses théoriques doivent résoudre ces problèmes, tels que la définition des conditions de canaux discrets, les pourcentages du courant est acheminé par ces chaînes, quelle est la direction et la vitesse de progression de ces chaînes, et enfin quelles sont les positions sur le conducteur à partir duquel ces canaux sont initiés. Chacune de ces questions constitue une étude approfondie de l'avenir.

Tout modèle, qu'il soit simple, complexe, précis, etc., n'est valable que s'il est en accord avec les mesures expérimentales. Il est vrai qu'une mesure expérimentale appropriée représente bien la réalité. En tenant compte de cela dans l'esprit, les travaux futurs devraient être axés non seulement sur le développement et l'amélioration des modèles mais aussi de valider ces modèles par des mesures.

Toutefois, ces travaux peuvent encore être améliorés dans certains aspects en incluant les éléments suivants :

- étude des prises de terre de sol hétérogène;
- étude des prises de terre des éoliennes avec la prise en charge de tous ces composants;
- calculer les contraintes électromagnétiques imposées aux câbles de connexion enterrés;
- disposer d'une alternative aux formules approchées pour les configurations où celles-ci se montreraient inapplicables.

Références Bibliographiques

- [1] François COSTA et Gérard ROJAT. CEM en électronique de puissance Sources de perturbations, couplages, SEM. Techniques de l'ingénieur. D 3290
- [2] Ali Jazzar. Modélisation électromagnétique d'un choc de foudre en aéronautique. Thèse de doctorat en Génie Electrique. Université de Grenoble, 2012.
- [3] Michel GRACIET, Joseph PINEL. Protection contre les perturbations : Origines des perturbations. Techniques de l'ingénieur. D 5 170
- [4] D. Dib. L'Impact de La Foudre Sur les Réseaux Electriques : Etude , Analyse et Modélisation Option. Thèse De Doctorat en Electrotechnique. Université Badji Mokhtar Annaba. 2007.
- [5] DAAS Abdelhakim. Contribution à l'amélioration d'une protection contre les surtensions atmosphériques. Université Annaba. 2004
- [6] Sonia AIT-AMAR DJENNAD, Ahmed ZEDDAM. Protection contre la foudre : Principes généraux et normes en vigueur . Techniques de l'ingénieur. D 1 335 -
- [7] LEE (R.H.). – Lightning protection of buildings. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1A-15, no 3, p. 236-240 (1979).
- [8] LEE (R.H.). – Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 1A-14, no 6, p. 465-470 (1978).
- [9] Frédéric MACIELA. Parafoudres. Techniques de l'ingénieur. D4755.
- [10] A.D. Papalexopoulos et A.P.Meliopulos , " Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol 2,pp.1073-1081, Octobre.1987.
- [11] M.Ramamoory,M.M.Babu Narayanan,S.Parameswaran , " Transient Performance of Grounding Grids, " IEEE Trans Power Delivery ,Vol.4,pp.2053-2059,October 1989.
- [12] Jean-Pierre NZURU NSEKERE. Contribution à l'analyse et à la réalisation des mises à la terre des installations électriques dans les régions tropicales. Université de Liège. 2009.
- [13] Xavier LEGRAND. Modélisation des systèmes de mise à la terre des lignes électriques soumis à des transitoires de foudre. L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON. 2007.
- [14] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80-2000
- [15] IEEE Standard 81.2-1991, "IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, " IEEE Power Engineering Society, No.8, Decembre 1991.

Références Bibliographiques

- [16] S. Sreedeeep, A.C. Reshma, D.N. Singh, "Generalized relationship for determining soil electrical resistivity from thermal resistivity", Elsevier, *Experimental Thermal and Fluid Science* 29, pp 217-226, 2005.
- [17] Electricité de France. Direction des Etudes et Recherche EDF.DER.RA.1984.2.Paris
- [18] R. Johnson, K. Kreiter, J. Zhu, B. Russo, T. Saarenketo, "Electrical properties of water in clay and silty soils", Elsevier, *Journal of Applied Physics* 40, pp 73- 88, 1998.
- [19] Y. El-Tous and S. A. Alkhawaldeh, "An efficient method for earth resistance reduction using the Dead Sea water," *Energy and Power Engineering*, vol. 6, p. 47, 2014.
- [20] G. Tagg, "Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1970, pp. 2185-2190.
- [21] C.-N. Chang and C.-H. Lee, "Computation of ground resistances and assessment of ground grid safety at 161/23.9-kV indoor-type substation," *IEEE transactions on power de li very*, vol. 21, pp. 1250-1260, 2006.
- [22] Y. Ma and G. G. Karady, "Investigating grounding grid integrity based on the current injection method," in *41st North American Power Symposium*, 2009, pp. 1-5.
- [23] C. Portela, "Frequency and transient behavior of grounding systems. I. Physical and methodological aspects," in *IEEE 1997, EMC, Austin Style. IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 97CH36113)*, 1997, pp. 379-384.
- [24] E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*: Dover Publications Inc., 1949.
- [25] G. Le_Roy and C. Gary, *Les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*: Eyrolles, 1984.
- [26] B. FRANCOIS, B. ROBYNS, E. DE JAEGER, and F. MINN, "Technologies d'éolienne de forte puissance connectée au réseau de moyenne tension: L'Energie éolienne," *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, pp. 65-74, 2005.
- [27] C. SC, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," *CIGRE Technical Brochure*, vol. 63, 1991.
- [28] J. E. T. Villas and C. M. Portela, "Soil heating around the ground electrode of an HVDC system by interaction of electrical, thermal, and electroosmotic
- [29] R. F. Harrington, *Field computation by moment methods*: Wiley-IEEE Press, 1993.
- [30] J. M. Ortega, "The newton-kantorovich theorem," *The American Mathematical Monthly*, vol. 75, pp. 658-660, 1968.

- [31] L. D. Grcev and M. Heimbach, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, pp. 172-178, 1997.
- [32] T. Saarenketo, "Electrical properties of water in clay and silty soils," *Journal of applied geophysics*, vol. 40, pp. 73-88, 1998.
- [33] S. C. Lim, C. Gomes, M. Kadir, and 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.
- [34] E. J. Fagan and R. H. Lee, "The use of concrete-enclosed reinforcing rods as grounding electrodes," *IEEE Transactions on Industry and general applications*, pp. 337-348, 1970.
- [35] K. Switzer, "Achieving an acceptable ground in poor soil," *Primedia Business Magazines & Media Inc.*, USA, 2003.
- [36] F. Dawalibi "Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors Part 2 - Ground Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery* (Volume: 1, Issue: 4, Oct. 1986).
- [37] R. Andolfato, L. Bernardi and L. Fellin, "Aerial and Grounding System Analysis by the Shifting Complex Images Method", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 3, pp. 1001-1009, July 2000.
- [38] R. Verma , D. Mukhedkar, "Impulse to Impedance of Buried Ground Wires," vol. PAS-99, No. 5, pp. 2003-2007, Septembre 1980.
- [39] N. Harid, H. Griffiths, S. Mousa, D. Clark, S. Robson, and A. Haddad , "On the Analysis of Impulse Test Results on Grounding Systems," *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. 51, no.16, 5324-5334, November/December 2015.
- [40] Yaqing Liu, Mihael Zitnik, and Rajeev Thottappillil, "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 3, 348-355, august 2001.
- [41] S. Bourg, "Comportement en hautes fréquences des prises de terre profondes dans un sol à résistivité faible : bilan des essais réalisés aux Renardières", note HM-25/94/021, 1993.
- [42] Sunde ED, "Earth Conducting Effects in Transmission Systems," New York, N. Y.: Dover publications, Inc.; 1968.
- [43] A. P. Sakis Meliopoulos, "Power grounding systems and transients: An introduction," Library of congress. Electrical and Computer Engineering series. New York. Marcel Dekker. Inc . 1988.

- [44] M. Mokhtari, Z. Abdul-Malek and Z. Salam. An Improved Circuit-Based Model of a Grounding Electrode by Considering the Current Rate of Rise and Soil Ionization Factors. *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol.30, no. 1, pp: 211-219. February 2015.
- [45] N. Harid, H. Griffiths, S. Mousa, D. Clark, S. Robson, and A. Haddad , “On the Analysis of Impulse Test Results on Grounding Systems,” *IEEE Transactions On Industry Applications*, vol. 51, No.16, 5324-5334, November/December 2015.
- [46] IEC. Protection Against Lightning Part 1: General Principles. IEC 62305-1, Ed. 1.0b, 2006.
- [47] Javad Gholinezhad, and Reza Shariatinasab .Time Domain Modeling of Tower-Footing Grounding Systems based on Impedance Matrix. *IEEE Transactions on Power Delivery*.Volume: 34, Issue: 3.2019 PP : 910 - 918
- [48] W. R. SI, C. Z. FU, T. Y. WU, S. J. Wang, P. YUAN. Measurement and Analysis of Impulse Grounding Impedance for UHV Transmission Tower. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) 2016*
- [49] Amauri G. Martins-Britto, Sébastien R. M. J. Rondineau and Felipe V. Lopes. Transient Response of the Grounding Grid of a Power Line Tower Subject to a Lightning Discharge. *Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*. 2018
- [50] R. Araneo, G. Lovat, S. Celozzi and P. Burghignoli. Numerical Analysis of Mutual Transient Voltages in Grounding Systems of Offshore Wind Farms. *International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES)*. 2018
- [51] Antonio Sunjerga , Quanxin Li , Dragan Poljak , Marcos Rubinstein , Farhad Rachidi. Transient Impedance of Interconnected Wind Turbine Grounding Systems *26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) 2018*
- [52] D. Cavka, D. Poljak, V. Doric, and R. Goic, “Transient analysis of grounding systems for wind turbines,” *Renew. Energy*, vol. 43, pp. 284–291, 2012
- [53] Y. Yasuda, N. Uno, H. Kobayashi, and T. Funabashi, "Surge analysis on wind farm when winter lightning strikes," *IEEE Transactions onEnergy Conversion*, vol. 23, pp. 257-262, 2008.
- [54] N. Jenkins and A. Vaudin, "Earthing of wind farms," *Wind Engineering*, vol. 18, pp. 37-43, 1994.
- [55] Djaborebbi Amina, Boubakeur Zegnini, Tahar Seghier ,Hamza Gueffaf, Djillali Mahi. Economic optimization of copper conductor for transient response of grounding system. *5TH International Conference On Advances In Mechanical Engineering*

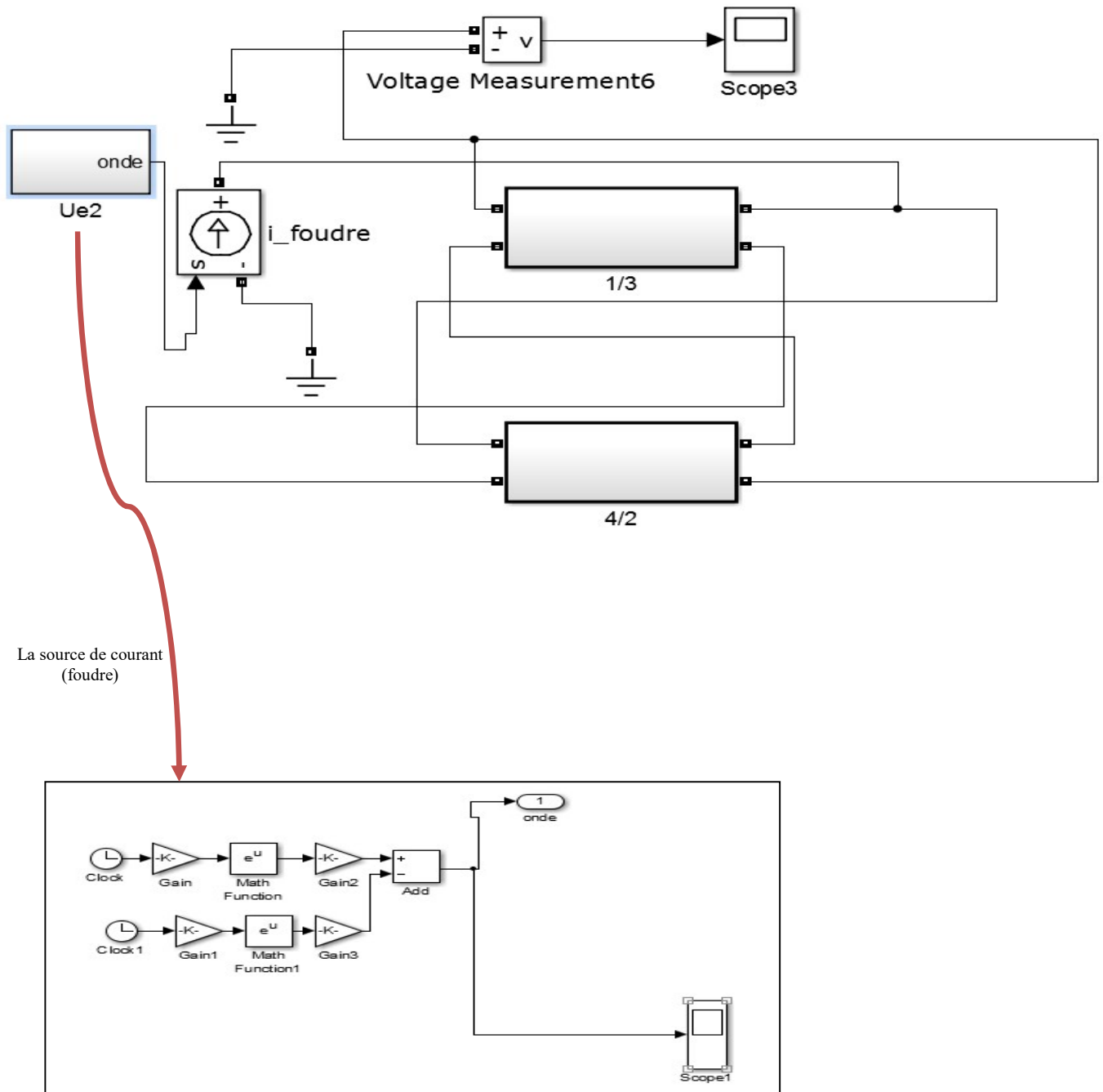
Istanbul 2019, 17-19 DECEMBER 2019.

- [56] DJABOREBBI Amina, ZEGNINI Boubakeur, SEGHER Tahar, Mahi Djillali. Evaluation and Performance of Grounding Grids Buried in Soil Under Impulse lightning Current. The First International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing. 16-17 March 2020 El-Oued, Algeria
- [57] Silvério Visacro, Wyllian L.F. Pinto, Fuad S. Almeida, M.H. Murta Vale, Gláucio Rosado. Experimental Evaluation Of Soil Parameter Behavior In The Frequency Range Associated To Lightning Currents. 29th International Conference on Lightning Protection 23rd – 26th June 2008 – Uppsala, Sweden
- [58] Md. Raju Ahmed and Masaru Ishii. Electromagnetic Analysis of Lightning Surge Response of Interconnected Wind Turbine Grounding System. 011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, October 3-7, 2011.

Annexe

Blocs des simulations

Schéma bloc de simulation de la grille 1x1



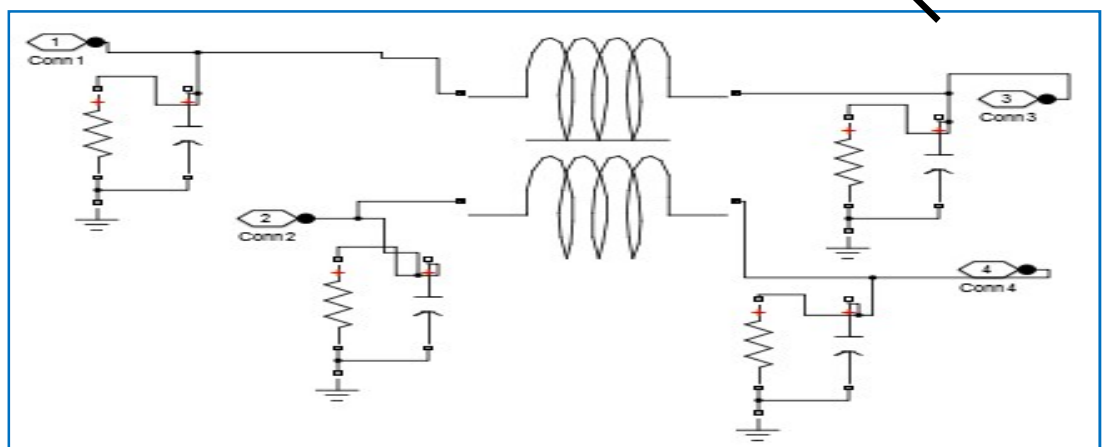
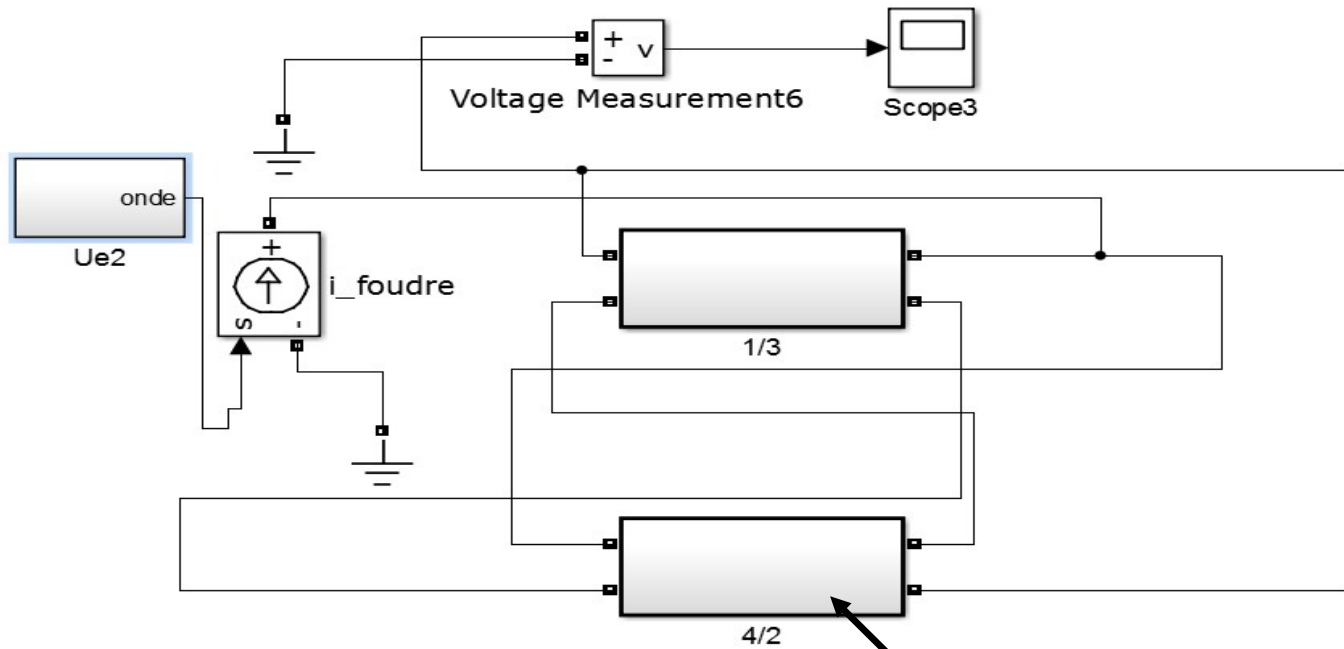


Schéma bloc de simulation de la grille 2x2

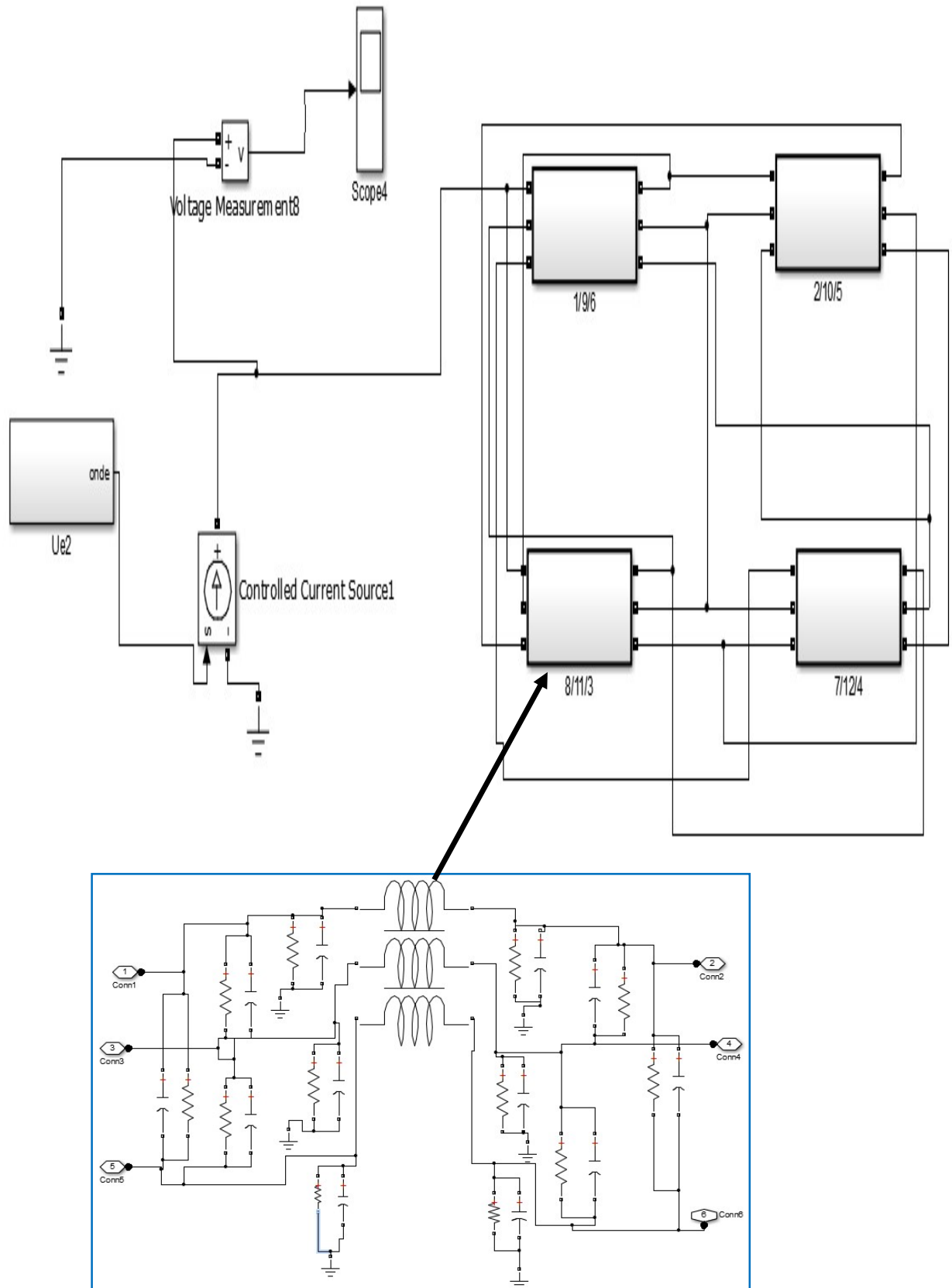
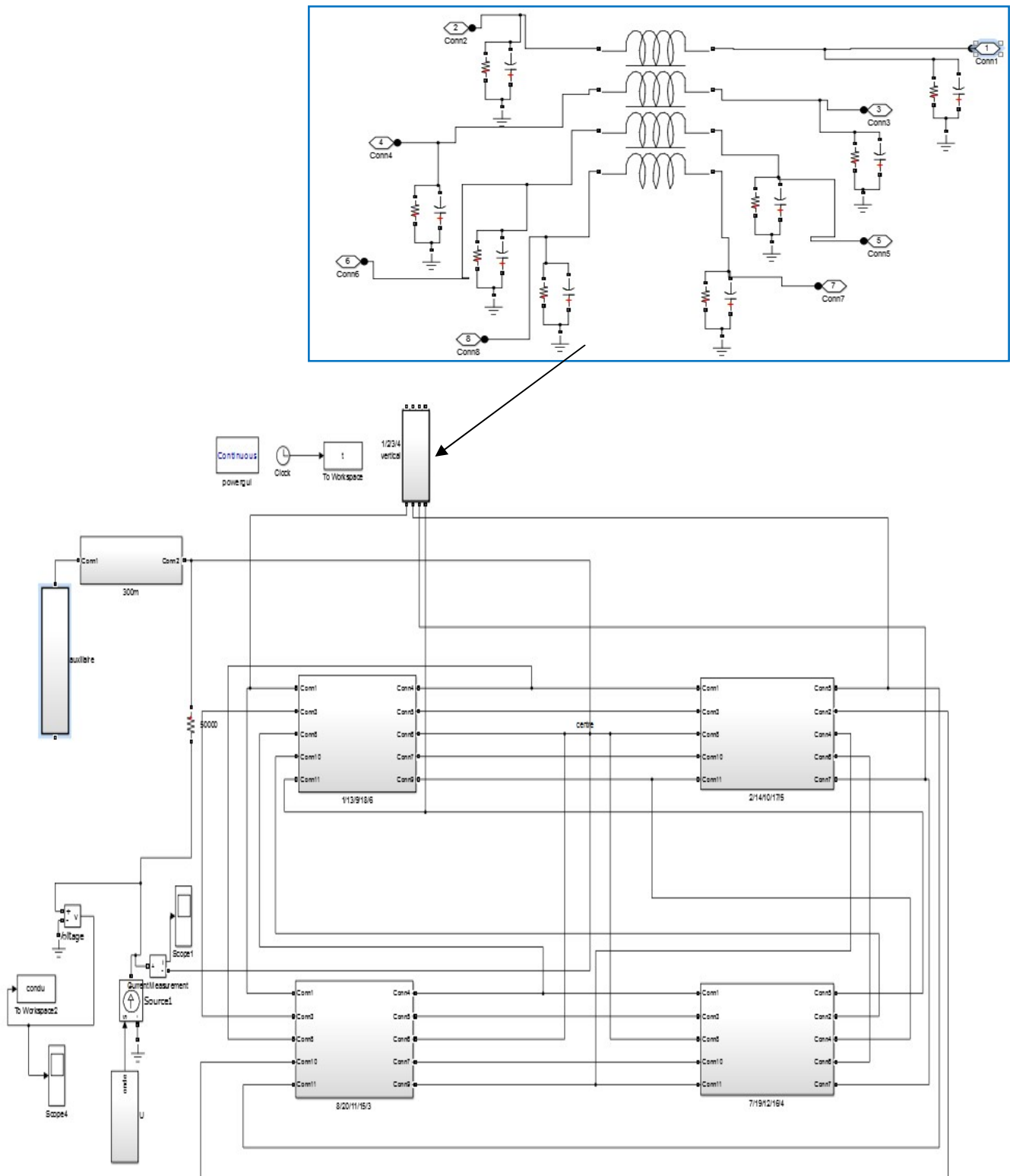
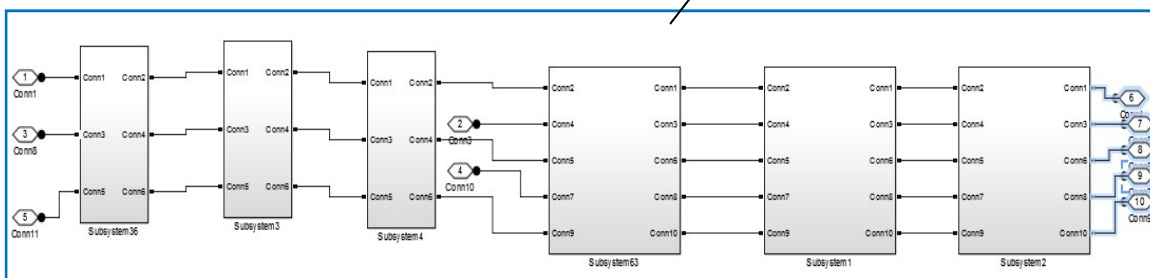
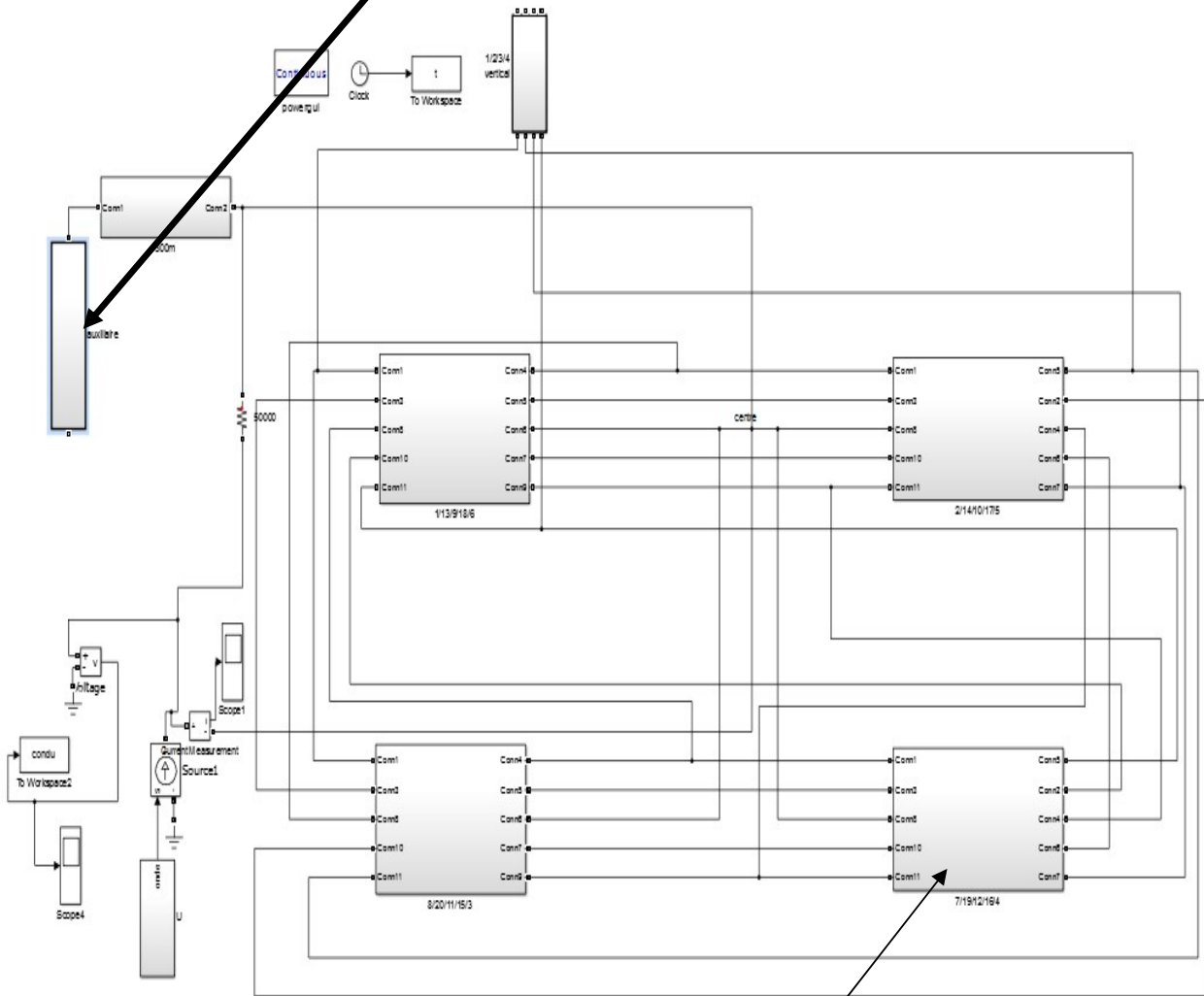
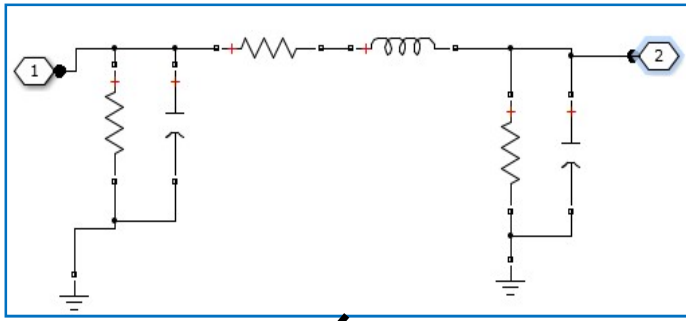


Schéma bloc de simulation de la configuration A





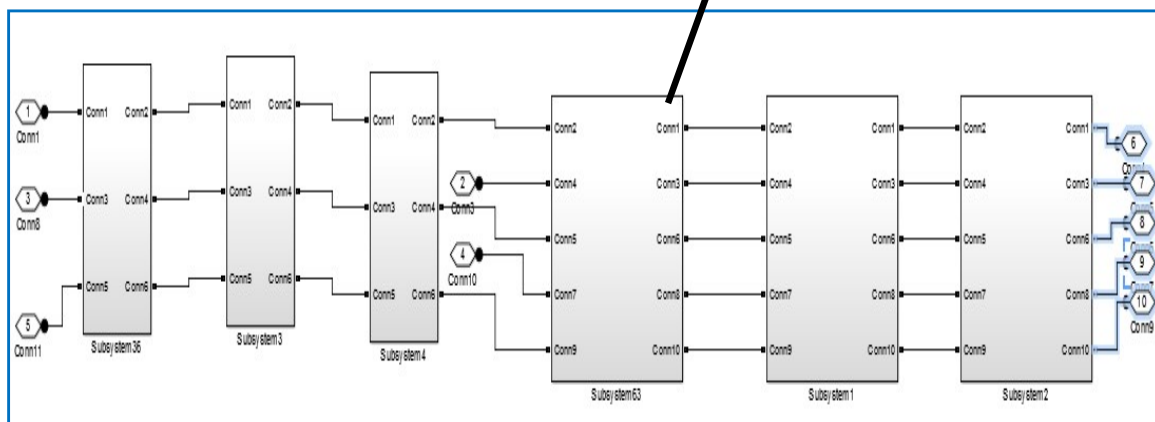
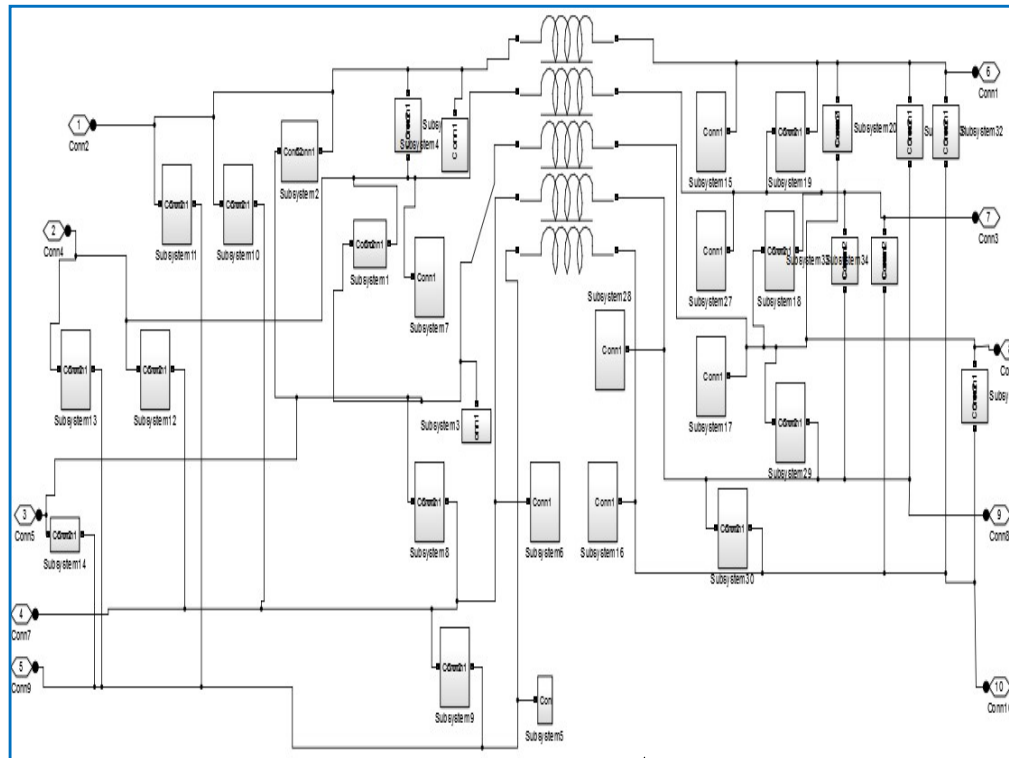
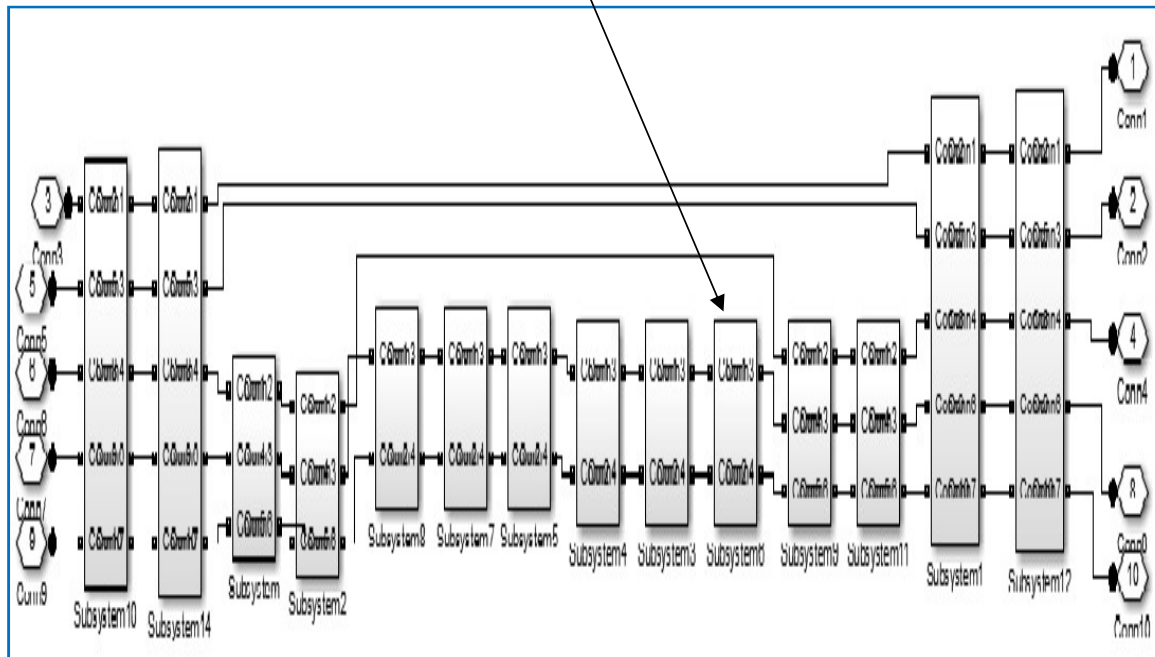
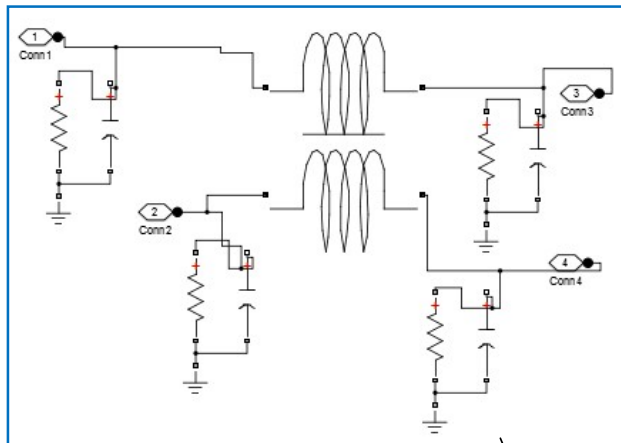
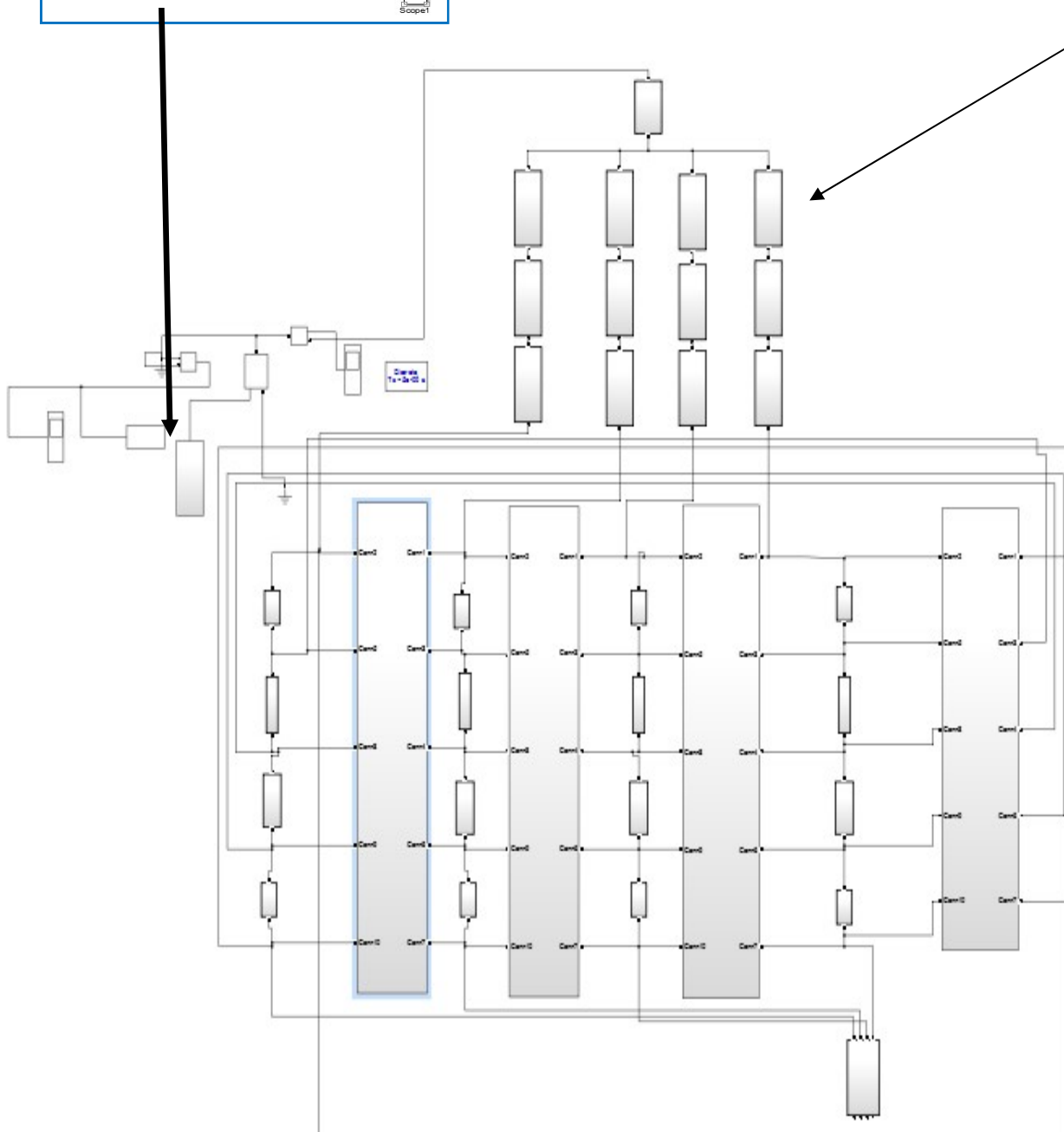
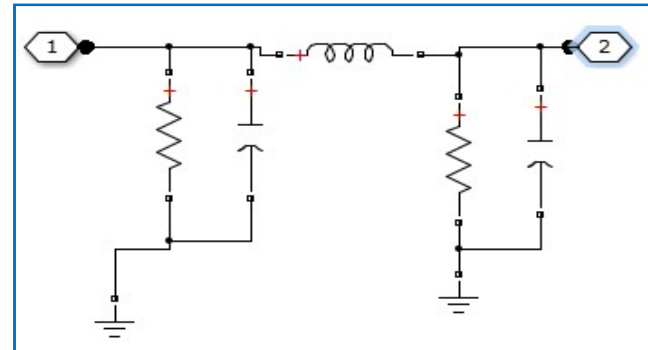
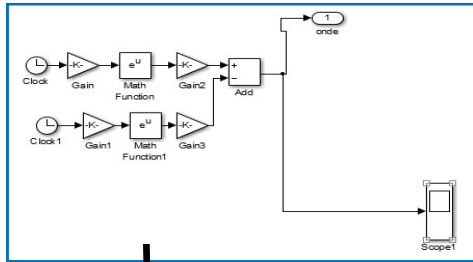


Schéma bloc de simulation de la configuration B





Liste des Conférences et Publication

Amina djaborebbi, Boubakeur zagnini, djillali Mahi, “ Modeling the transient response of lightning current on grounding systems wind turbines”. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 2/2021.

Amina djaborebbi, Boubakeur zagnini, tahar seghir ,djillali Mahi , “Evaluation and Performance Of Geounding Grid Buried in soil under impulse Current” ,the 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP 2020), El-Oued, Algeria.

Amina djaborebbi, Boubakeur zagnini, tahar seghir , Hamza Gueffaf, djillali Mahi , “Economic optimization of copper conductor for transient response of grounding system”, 5TH international conference on advances in mechanical engineering istanbul 2019, 17-19 december 2019at: Istanbul.

Amina djaborebbi, Boubakeur zagnini, djillali Mahi, “ Etude dynamique d’un comportement de système de mise à la terre soumis deperturbation de foudre application de coordination d’isolement et CEM”. National Conference, Second Doctoral Day of the Faculty of Technology - 2JDFT2015. 21st May, 2015, Laghouat, Algeria.

Amina djaborebbi, Boubakeur zagnini, djillali Mahi”Modélisation et silulation lr modèle de ligne de transmission en de système de mise à la terre” National conference, Third Doctoral Day of the Faculty of Technology - 3JDFT2016. 10th March, 2016, Laghouat, Algeria.

Amina djaborebbi, Boubakeur zagnini, djillali Mahi.”Réponse transitoire des systèmes de mise à la terre sous Impulse courant de foudre” National Conference, Fourth Doctoral Day of the Faculty of Technology - 4JDFT2017, 12 April 2017, Laghouat, Algeria.

Modeling the transient response of lightning current on grounding systems wind turbines

Abstract. The paper deals with transient analysis of grounding systems wind turbines. To improve the accuracy of lightning impact studies on wind power grid generation, it is necessary to develop faster, more accurate simulation tools and to use increasingly sophisticated models. First, we identify and characterize the different parameters that influence the behaviour of grounding systems, particularly when they broadcast a lightning current. To do this, an electromagnetic model from the theory of antennas equation's by – Euler method with incorporating soil ionization allows to represent the behavior of an earthing system in the frequency domain. Different configurations with several complexity degrees have been simulated. To validate the obtained results, we compare our TLM results to the measurement results and FDTD simulation. A comparison between two different configurations of wind turbine grounding systems with comparing the transient potential, impulse impedance, and DC component of transient impedance between the two configurations when buried in soil. A number of illustrative computational examples are presented in the paper.

Streszczenie. W celu poprawy dokładności badań wpływu wyładowań atmosferycznych na produkcję energii wiatrowej konieczne jest opracowanie szybszych i dokładniejszych narzędzi symulacyjnych oraz wykorzystanie coraz bardziej wyrafinowanych modeli. W pierwszej kolejności identyfikujemy i opisujemy różne parametry wpływające na zachowanie się systemów uziemienia, zwłaszcza gdy przekazują one prąd piorunowy. W tym celu opracowany został model elektromagnetyczny z teorii równań Eulera z wykorzystaniem jonizacji gruntu, który pozwala na przedstawienie zachowania się systemu uziemienia w dziedzinie częstotliwości. Symulowane są różne konfiguracje o kilku stopniach złożoności. W celu walidacji uzyskanych wyników, porównujemy nasze wyniki TLM z wynikami pomiarów i symulacji FDTD. Porównanie dwóch różnych konfiguracji uziemienia turbiny wiatrowej z porównaniem potencjału przemijającego, impedancji impulsowej i składowej stałej impedancji przemijającej pomiędzy tymi dwiema konfiguracjami, gdy są one zakopane w gruncie. (Modelowanie odpowiedzi na prąd piorunowy w uziemionym systemie turbiny wiatrowej)

Keywords: Grounding system, Transmission line method, Finite difference time domain, Soil ionization, Transient behaviour,

Słowa kluczowe: System uziemienia, metoda linii transmisyjnej, domena czasowa różnic skończonych, jonizacja gleby.

Introduction

The grounding systems transient behavior was the object of several investigations, specifically their transient response when subjected to lightning current, either by experiments [1] or by numerical simulations. The numerical simulations are based principally on three main theories: Field calculation using Finite Element Method [2], Field calculation using Antenna Theory Methods [3,4,5] or by using Transmission Line Modeling (TLM) [6, 7, 8, 9]. Some electrical elements are characterized by their high length like high voltage towers and wind turbines. Since the lightning strokes are attracted by high-rise buildings [10], many recent studies have been presented to show the transient behaviour of high voltage line towers [5, 11, 12] and Wind turbine grounding systems [4, 13] when subjected to lightning current.

In our case, we are interested to the protection of wind turbines against the lightning strokes, and this by evaluating the transient response of their grounding systems, because that numerous wind turbines have been placed in regions characterized by high activity of lightning [14], and that turbines contains a very sensitive electronic components which control several systems like the converters and pitch angles controller. So, their grounding systems are designated to avoid the lightning current to the ground without damaging its components [15]. In many investigations, the grounding systems are modeled using TLM theory because of its simplicity and effectiveness with giving results in good accordance with the other theories and the experimental results [6, 7, 16, 17, 18]. And this method has been implemented in several simulation programs like MATLAB and EMTF.

Zalhaf et al. [19, 20] have simulated the transient behavior of the whole wind turbine connected to grounding system using MATLAB. The investigation has been continued by another one [21], in which the simulations by MATLAB have been compared with some experimental results and other simulations results obtained by PSCAD/EMTDC software. A good accordance has been

obtained. Several studies in the same subject have been published which using ATP-EMTP code. Sekioka et al. [22] have used ATP-EMTP to study the perturbations generated by the grounding systems subjected to lightning current, where they have studied the induced overvoltages in the surrounding of wind turbines grounding systems. Using the same code, Pastromas et al. [23] have simulated the wind turbine grounding system to present the current distribution in different segments. The grounding system of offshore wind turbine farms have been studied too by ATP-EMTP code, Heng et al. [24] have simulated the proposed tower model to evaluate the transient voltage obtained when injecting lightning current.

The TLM has been solved by FDTD method in [15]. In their investigation Raju et al. have studied the impact of soil parameters and distance between wind turbines on the transient response of grounding systems installed in homogeneous soil. In their simulation, the soil ionization haven't been considered. For another configuration of wind turbine grounding system, the frequency variation of impedance has been studied by Sunjerga et al [13] with Antenna Theory by using NEC-4 Code. In this investigation, the transient response and soil ionization haven't been evoked.

Senthilkumar et al [25] have used CDEGS software to study the grounding potential rise in ground grid buried in multilayer soil when subjected to power frequency current. In precedent investigation [17] we have used TLM to simulate several grounding system configurations and to study the optimal configuration for grounding system. The results have shown that the grid configuration always gives the lowest transient impedance. In another investigation [18] we have used the same model based on TLM to study the transient behavior of grounding grids buried in homogeneous and in heterogeneous soil. In the investigation we have studied the influence of the grid dimensions, the kind of the ground and the current injection point on the grounding system response (transient potential and impedance). The obtained results show that the grid

containing the greater number of conductors permits to obtain the lowest transient potential and impedance.

This investigation treats the modeling of grounding system using TLM equation solved by – Euler method with incorporating soil ionization. Different configurations with several complexity degrees have been simulated. To validate the obtained results, we compare our TLM results to the measurement results and FDTD simulation ones. The novelty of our paper consists in a comparison between different wind turbine grounding configurations, and this comparison is made for grounding systems buried in homogenous and heterogeneous soil. After choose the best configuration, we study the current and the potential along the chosen grounding configuration when buried in homogeneous and stratified soil, to evaluate the components participation in the transient response, and this to authors' knowledge haven't been studied before. A comparison between two different configurations of wind turbine grounding systems with comparing the transient potential, impulse impedance, and DC component of transient impedance between the two configurations when buried in homogeneous and stratified soil. Finally, we choose the best configuration and we study the transient current and potential along this configuration when buried in homogeneous and stratified soil, and we give some discussions in the conclusion.

Transmission line method and soil ionization

The transient currents are characterized by high frequency components, for this the study of the systems subjected to lightning currents requires the use of some methods takes into configuration the electromagnetic wave propagation in the studied systems [8, 18]. Since it has improved its effectiveness for the modeling of such phenomena, the transmission line has been adopted to be used in this investigation for simulating the transient response of grounding system [17, 18]. It consists of divide every grounding conductor into several segments. Each segment is modeled by transmission line as shown in Fig. 1. The longitudinal part represents heat losses and magnetic effect of the conductor, and the transversal parts are modeling the heat losses and the polarization in the soil surrounding the electrode.

For a grounding conductor buried in soil of resistivity ρ_s and permittivity ϵ_s and permeability μ_s and subjected to current of frequency f , the current wavelength λ can be determined by the formula [6]:

$$(1) \quad h = \frac{1}{f \mu_s \epsilon_s \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{(2Gf)^2 \rho_s^2 \epsilon_s} + 1 \right)}$$

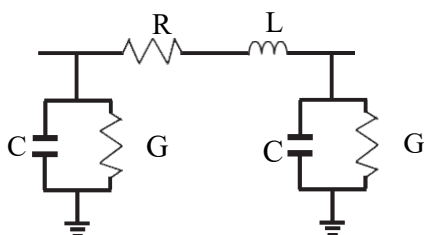


Fig.1. Transmission Line Model of grounding conductor segment.

These parameters are calculated for each segment of grounding grid according to [26] by the formulas for the horizontal conductors:

$$(2) \quad R = q_c \frac{4 \Delta S}{4 \pi r^2}$$

$$(3) \quad L = \frac{\mu \Delta S}{2 \pi} \left(\ln \left(\frac{2S}{\sqrt{2hr}} \right) - 1 \right)$$

$$(4) \quad C = 2 \pi \left(\frac{s}{r} \right) \frac{\Delta S}{\text{Sn} \left(\frac{2l}{r} \right) - 1}$$

$$(5) \quad G = \frac{2 \pi}{q_c} \frac{\Delta S}{\left(\text{Sn} \left(\frac{2l}{r} \right) - 1 \right)}$$

And for the vertical conductor the parameters become [26]:

$$(6) \quad R = q_c \frac{4 \Delta S}{\pi D^2}$$

$$(7) \quad L = \frac{\mu \Delta S}{2 \pi} \left(\ln \left(\frac{2S}{r} \right) - 1 \right)$$

$$(8) \quad C = 2 \pi \left(\frac{s}{r} \right) \frac{\Delta S}{\text{Sn} \left(\frac{4l}{r} \right) - 1}$$

$$(9) \quad G = \frac{2 \pi}{q_c} \frac{\Delta S}{\left(\text{Sn} \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right)}$$

where ρ_c is the soil resistivity, ρ_s is the soil resistivity, l is the length of the electrode, h is the radius of the electrode, h is the burial depth, r is conductor radius, μ is the soil permeability ($4\pi \times 10^{-7} \text{ (H/m)}$), s_r is relative permittivity, and ϵ_0 is the vacuum permittivity ($8.859 \times 10^{-12} \text{ F/m}$).

When the current I_e is injected, we determine in each segment of grounding system: The input voltage U_i , the branch current I_{ij} , the output voltage U_j and the output current I_s . These parameters are shown in Fig.2.

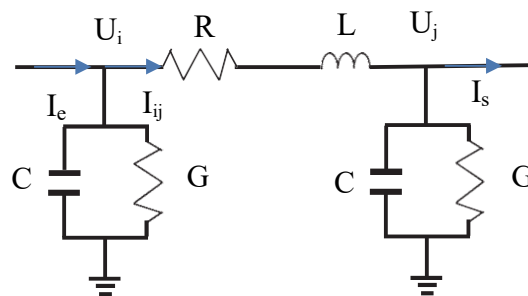


Fig.2. The voltages and currents in each studied segment

By applying Kirchhoff laws, we determine the next differential equations:

$$(10) \quad \frac{dU_i}{dt} = \frac{1}{C} I_e - \frac{G}{L} U_i - \frac{1}{L} I_{ij}$$

$$(11) \quad \frac{dU_j}{dt} = \frac{1}{C} U_i - \frac{R}{L} U_i - \frac{1}{L} U_j$$

$$(12) \quad \frac{dI_{ij}}{dt} = \frac{1}{C} I_{ij} - \frac{U_j}{L}$$

$$(13) \quad \mathbf{I} = \mathbf{I} - \mathbf{G} \mathbf{U} - \mathbf{C} \frac{d\mathbf{U}}{dt}$$

These equations are valid only for one segment, and the output current and voltage of this segment will be the inputs of the next segment.

These equations and the other ones of rest of grounding electrode segments are solved by using iterative methods. In our simulation we have used Euler one.

To incorporate soil ionization, the transversal conductance is considered time dependent parameter $G(t)$ determined from G and calculated by [7]:

$$(14) \quad G(t) = G \left(1 + \frac{I(t)}{I_g} \right)$$

With $I(t)$ is the injected current and I_g is current is the current from which the soil ionization initiates in the soil

which determined from soil electrical critical field. This later has been determined by [27]:

$$(15) \quad E_c = 843.2 q_c^{0.124} [\text{kV}/\text{cm}]$$

For this; the equations (10) and (12) become:

$$(16) \quad \frac{dU_i}{dt} = \frac{2}{c} I_e - \frac{G(t)}{c} U_i - \frac{2}{c} I_{ij}$$

$$(17) \quad \frac{dI_{ij}}{dt} = \frac{2}{c} I_{ij} - \frac{G(t)}{c} U$$

The TLM simulation is validated if every conductor segment length will be smaller than one tenth of wavelength ($\Delta l \ll \lambda/10$) [6].

Simulation Results and validation

The proposed model has been already validated by comparing with ATP-EMTP results in previous investigation [17, 18].

In [28], Visacro et al. have make some experiments on horizontal electrode buried in homogeneous soil and subjected to impulse current. The chosen electrode is of 12 m length and 7 mm radius buried at 0.5 m depth. The electrode is buried in two different kinds of soil: the first is high resistivity soil (4 kΩ.m) and the second is low resistivity soil (300 Ω.m).

The soil permittivity has been considered 20. The current injected is of 2 A peak value. The authors of [28] have simulated the same configurations using their developed Hybrid Electromagnetic Model based on Antenna Theory. Their obtained results are presented on the Fig. 3.

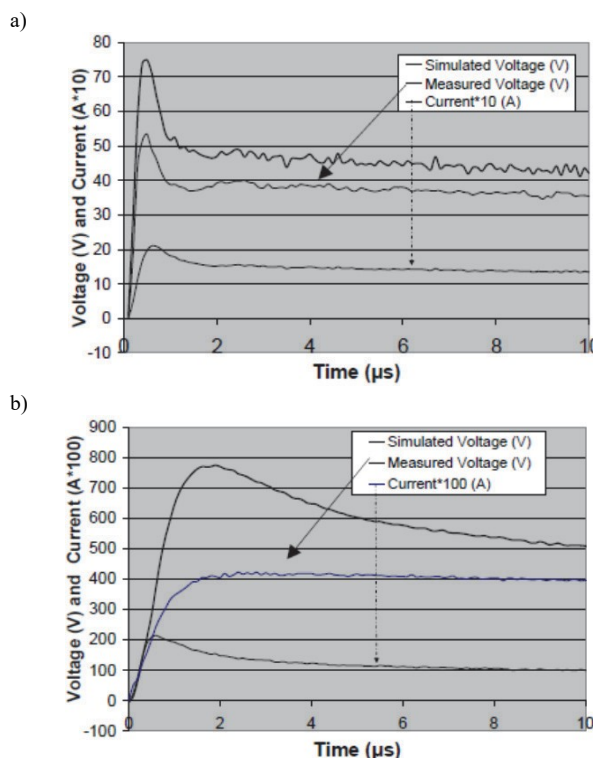


Fig.3. The simulation and measured results obtained by [ICLP]
a) Result for 300 Ω.m soil, b) Result for 4 kΩ.m soil

We have estimated the injected current, and we have used this current to simulate the same configuration with same soil and conductor parameters. Our obtained results for this simulation are shown in Fig. 4.

When comparing our TLM results and those obtained by Hybrid Electromagnetic Model [28] with the experimental results, we observe that the voltages computed using our TLM are clearly show better agreement with the

experimental voltages compared to those obtained using the proposed [28]. We note the existence of a difference doesn't exceed 10%.

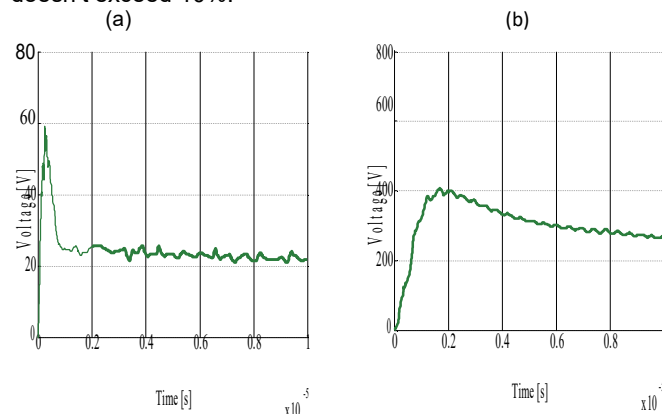


Fig.4. Our simulation results obtained TLM solved by Euler
a) Result for 300 Ω.m soil, b) Result for 4 kΩ.m soil

After validating our TLM calculation with comparing with experimental result, we validate our method for more complicated configuration of grounding system. We study the response of wind turbine grounding system.

We study the transient behavior of the grounding system composed of two squares of 12m x12 m (ring earth) and 6m x 6m (foundation reinforcing) co-centered buried at 2 m depth. The squares are related by two conductors placed as cross (bonding bar). The extremities of extern square are related to 10 m vertical electrodes (points 1, 2, 3 and 4) as shown in figure 5. The conductor radius has been considered 10 mm.

The current injected in the center has been considered of 50 kA magnitude and 0,25 μs front time.

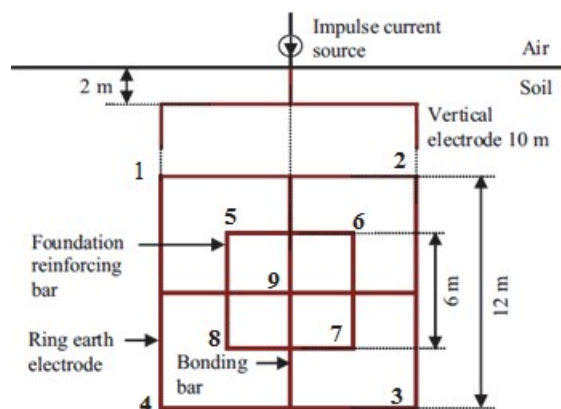


Fig.5. The wind turbine grounding electrode (Configuration A) [15]

This configuration has been studied by [15] using FDTD method.

For our study, we will simulate this configuration in two cases: the first one with ignoring soil ionization, and the second with considering the soil ionization. The configuration has been evaluated for two soil resistivity values namely 1000 Ωm and 2000 Ωm and the relative permittivity has been considered 9. Our obtained results for TLM with ignoring soil ionization phenomenon are presented in figure 6 while the potentials obtained with incorporating of soil ionization are shown in Fig. 7.

When confronting our TLM potentials presented in Fig. 6. to those obtained by [15], we note a good accordance with the potentials obtained using FDTD method [15], and this accordance validates our TLM simulation. When incorporating soil ionization phenomena, we note a great decrease on the transient potential (about 25% for 2000

$\Omega.m$ and 10% for 1000 $\Omega.m$), while the waveform has been kept for the two cases. So, the incorporation of soil ionization in TLM simulation causes a significant potential decrease. When the soil is more resistive, the potential will be significantly reduced which means that the soil ionization phenomena must be considered for the grounding systems buried in resistive soil.

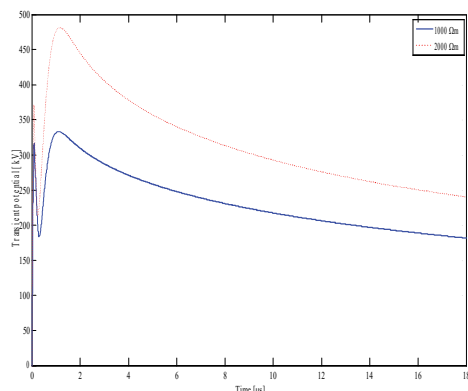


Fig.6. Transient potential at injection point without incorporating soil ionization

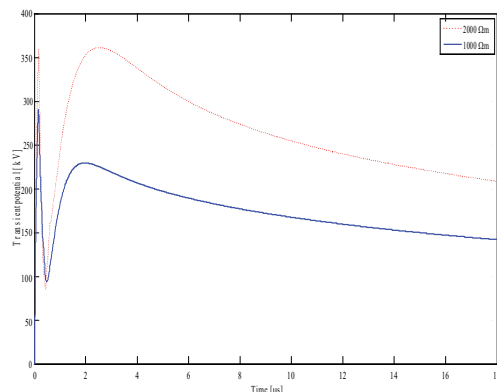


Fig.7. Transient potential at injection point with incorporating of soil ionization.

After validation of the simulation of grounding system presented in Fig.5., we simulate here another configuration of wind turbine grounding system. We name the configuration presented in Fig. 5. by Configuration A, and the second configuration that we will study by configuration B which is presented in the Fig. 8.

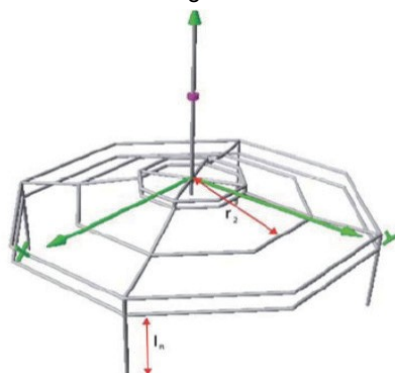


Fig. 8. Configuration B studied by Sunjerga et al [13]

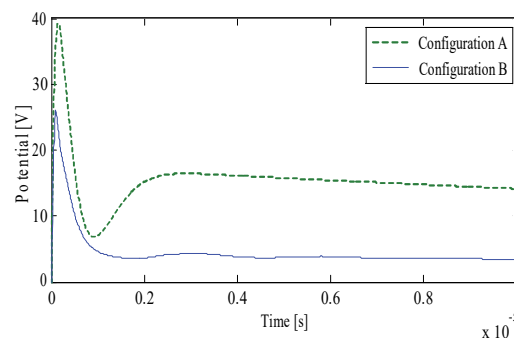
The grounding system of configuration B consists of several rings connected with several rods. The geometrical parameters are presented in Table 1 where the rings (such like r_2 shown in figure 8) and the depth of each ring are noted..

Table 1. The Geometry of the wind turbine grounding system B

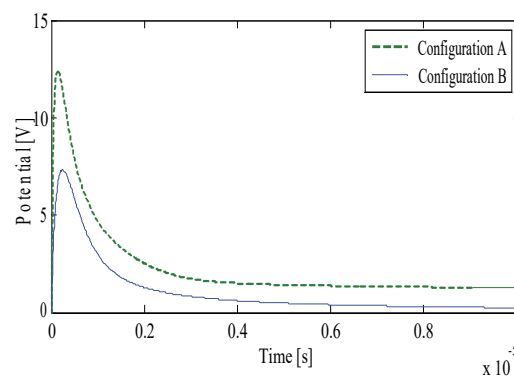
Ring number	Ring radius [m]	Depth [m]
Ring1	2.6	0.05
Ring2	2.6	0.50
Ring3	5.8	1.50
Ring4	9	2
Ring5	9	3
Vertical rods		Depth [m]
Length [m]		3

In this part, we will inject the same impulse current into the two configurations. The current formula is given by $i(t) = 10 (e^{-27000 t} - e^{-5600000 t})$. Three soil parameters have been considered of resistivity/relative permittivity values: 10 Ωm /80, 100 Ωm /40 and 1000 Ωm /9.

(a)



(b)



(c)

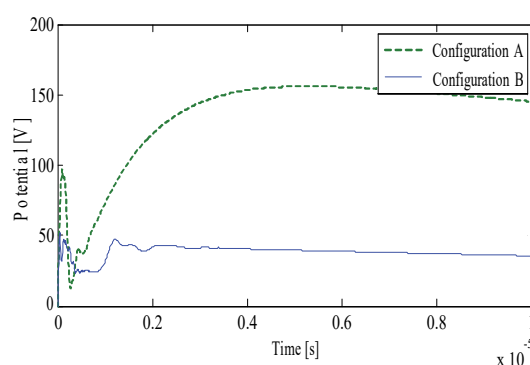


Fig. 9. Comparison between the transient potentials obtained for the configurations A and B for homogeneous soil of: (a) 10 Ωm /80, (b) 100 Ωm /40, (c) 1000 Ωm /9

We note that for both configurations A and B, the conductor radius value has been considered 7 mm. The obtained results for the configurations A and B are shown in Fig. 9: (a) for grounding systems buried in soil of resistivity 10 Ωm and relative permittivity 80, (b) for soil of resistivity 100 Ωm and permittivity 40 and (c) for the grounding systems buried in soil of resistivity 1000 Ωm and permittivity 9. We note that for all of the configurations and for any soil

parameters, the principal variations are observed between 0 and 4 μ s. After that, the potential becomes approximately constant, that means that after 4 μ s the impedance becomes constant.

Discussions

In the three tests, we observe on the figures 9 (a), (b) and (c) that the configuration B gives the lower values of transient potential all of the soil resistivity values:

- For the soil resistivity/permittivity 10 Ω m/80 the peak value of configuration B present 58% comparing to the one obtained for the configuration A.

- When the soil resistivity/permittivity are 100 Ω m/40 the peak value of configuration B present 62.5% comparing to the peak value of the potential obtained for the configuration A.

- When the grounding systems are buried in soil of resistivity/permittivity 1000 Ω m/9, the transient potential waveshape has been changed, and many oscillations have appeared for the both potentials.

In this case the configuration B gives lower transient potential when comparing to the configuration A with a difference of 70% noted between the potential peaks.

We note that for the configuration A, when increasing soil resistivity, the wave shape of the potential becomes different to the current one. For high resistivity values (1000 Ω m/9), the potential contains significant oscillations.

We define the impulse impedance Z_p by the ratio of peak voltage V_p to peak current I_p .

$$(18) \quad Z_p = \frac{\bar{V}_p}{I_p}$$

We define the DC component of the transient impedance by the ratio of the constant value of potential (In this case, the potential value after 4 μ s) to the current peak.

We present the impulse impedance of each configuration (A and B) and for the all of soil resistivity on the Table 2, and the DC component of the transient impedance on the Table 3.

Table.2. The impulse impedance values for each configuration

Soil resistivity/permittivity	For configuration A [Ω]	For configuration B [Ω]
10 Ω m/80	1.2	0.7
100 Ω m/40	3.9	2.2
1000 Ω m/9	15	5

The Table 2 presents show the configuration B gives the lowest impulse impedance when comparing to the values obtained for the configuration A. So, we can adopt that the configuration B which contains more rings distributed on several levels can reduce the transient impedance.

Table.3. The DC component of transient impedance values for each configuration

Soil resistivity/permittivity	DC component of the impedance of configuration A [Ω]	DC component of the impedance of configuration B [Ω]
10 Ω m/80	0.15	0.05
100 Ω m/40	1.5	0.5
1000 Ω m/9	15	4.8

From the Table 3, we can see that the DC component of each configuration increase linearly with the increasing of soil resistivity, so this DC component is a constant depend to the grounding system geometry multiplied by the soil resistivity.

When comparing DC components of configurations A with B, we observe that the DC component of A is the triple of the one of B. So, the configuration B gives the lowest DC

component of transient impedance. We note that for high resistivity soil, the impulse impedance becomes equal to the DC component of transient impedance.

Conclusion

We first identified and characterized the different parameters that influence the behaviour of earthing systems, especially when they diffuse a lightning current. The resistivity is the most important element in the design of grounding systems. When its value is very high, the potential generated by an atmospheric discharge becomes important. Next, a model was described to represent the transient behaviour of the grounding systems in the frequency domain. To do this, we are based on the electromagnetic model. This model based on the antennas, uses the numerical method known as Euler by using two applications. The first application was the incorporating soil ionization in the model of wind turbine grounding systems. A potential decrease is noted when incorporating soil ionization phenomena, however the waveform has been kept. The second application was a comparison between two wind turbine grounding systems; the first is the one which has been validated with FDTD simulation composed by two squares co-centered buried at same depth, and related to long vertical electrodes, and the second is another configuration composed of five rings disposed on several depths and connected to short vertical electrodes.

We note that for high resistivity soil, a remarkable voltage oscillation appears on the transient potential, and its waveform becomes different to the current one.

We have evaluated the DC component of the transient impedance; it consists of ratio between voltage stabilized

value and the current peak one. This component may be determined by a constant which depend to the system geometry multiplied by soil resistivity

Finally, our model also allowed us to estimate the temporal responses of the wave electromagnetic created by the grounding system on its material environment and propose optimization solutions for more resistive flooring.

Acknowledgments: This work was financially supported by Directorate General for Scientific Research and Technological Development (DGRST) Ministry of Higher Education and Scientific Research Algeria, under the Scientific Programme /PRFU. Contract /, No A01L07UN030120180002. The authors gratefully thank the Laboratory of studies and development of the Semiconducting and Dielectric Materials, (LeDMaScD) Amar Telidji University of Laghouat, Algeria for their assistance in providing the high voltage equipment, and excellent discussion with member's Lab.

Authors: Amina Djaborebbi, Laboratoire d'études et développement des matériaux semi-conducteurs et diélectriques (LeDMaScD), Amar Telidji University of Laghouat, PoBox 37 G, Mkam Laghouat 03000, Algeria E-mail: a.djaborebbi@lagh-univ.dz, prof dr Boubakeur Zegnini, LeDMaScD, Amar Telidji University of Laghouat, PoBox 37 G, Mkam Laghouat 03000, Algeria, E-mail: b.zegnini@lagh-univ.dz, prof dr Djillali Mahi, LeDMaScD, Amar Telidji University of Laghouat, PoBox 37 G, Mkam Laghouat 03000, Algeria, E-mail: d.mahi@lagh-univ.dz

REFERENCES

- [1] H. Rochereau, Response of earth electrodes when fast fronted currents are flowing out. EDF: Buletin de la Direction des Etudes et Recherches B, (2), 1988, pp. 13–22
- [2] M. Akbari, K. Sheshyekani and M. R. Alemi, "The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems," in IEEE Transactions on Electromagnetic Comptibility, vol.55, no.4, pp. 739–746, Aug.2013.

- [3] D. Poljak, S. Sesnic, S. V. Tkachenko, K. El Khamlichi Drissi, K. Kerroum, "Time Domain Analysis of the Horizontal Grounding Electrode: Antenna theory approach versus transmission line approximation," Proc. of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014), Gothenburg, Sweden, 181-185, September 1-4, 2014.
- [4] R. Araneo, G. Lovat, S. Celozzi and P. Burghignoli. Numerical Analysis of Mutual Transient Voltages in Grounding Systems of Offshore Wind Farms. International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). 2018.
- [5] Javad Gholinezhad, and Reza Shariatinasab .Time Domain Modeling of Tower-Footing Grounding Systems based on Impedance Matrix. IEEE Transactions on Power Delivery. Volume: 34, Issue: 3. 2019 PP : 910 – 918.
- [6] Yang L, Wu G N, Cao X B, "An optimized transmission line model of grounding electrodes under lightning currents," Sci China Tech Sci, Vol. 56, 335-341, 2013.
- [7] Daniel S. Gazzana, Arturo S. Bretas, Guilherme A. D. Dias, Marcos Telló, Dave W. P. Thomas and Christos Christopoulos. The Transmission Line Modeling Method to Represent the Soil Ionization Phenomenon in Grounding Systems. IEEE transactions on magnetics, vol. 50, no. 2, february 2014.
- [8] Daniel S. Gazzana, Guilherme A. D. Dias, Roberto C. Leborgne, Arturo S. Bretas, Marcos Telló, Dave W. P. Thomas, Christos Christopoulos. Novel Formulation to Determine the Potential on the Soil Surface Generated by a Lightning Surge. IEEE transactions on magnetics, vol. 52, no. 3. march 2016
- [9] M. Mokhtari, Z. Abdul-Malek and Z. Salam. An Improved Circuit-Based Model of a Grounding Electrode by Considering the Current Rate of Rise and Soil Ionization Factors. IEEE Transactions On Power delivery, vol.30, no. 1, pp:211-219. February 2015
- [10] IEC. Protection Against Lightning Part 1: General Principles. IEC 62305-1, Ed. 1.0b, 2006
- [11] W. R. Si, C. Z. FU, T. Y. WU, S. J. Wang, P. YUAN. Measurement and Analysis of Impulse Grounding Impedance for UHV Transmission Tower. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) 2016
- [12] Amauri G. Martins-Britto, Sébastien R. M. J. Rondineau and Felipe V. Lopes. Transient Response of the Grounding Grid of a Power Line Tower Subject to a Lightning Discharge. Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). 2018
- [13] Antonio Sunjerga , Quanxin Li , Dragan Poljak , Marcos Rubinstein , Farhad Rachidi. Transient Impedance of Interconnected Wind Turbine Grounding Systems 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) 2018
- [14] D. Cavka, D. Poljak, V. Doric, and R. Goic, "Transient analysis of grounding systems for wind turbines," Renew. Energy, vol. 43, pp. 284–291, 2012.
- [15] Md. Raju Ahmed and Masaru Ishii. Electromagnetic Analysis of Lightning Surge Response of Interconnected Wind Turbine Grounding System. 011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, October 3-7, 2011.
- [16] Yaqing Liu, Mihael Zitnik, and Rajeev Thottappillil, "An Improved Transmission-Line Model of Grounding System," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, VOL. 43, No. 3, 348-355, AUGUST 2001.
- [17] Djaborebbi Amina, Boubakeur Zegnini, Tahar Seghier ,Hamza Gueffaf, Djillali Mahi. Economic optimization of copper conductor for transient response of grounding system. 5TH International Conference On Advances In Mechanical Engineering Istanbul 2019, 17-19 DECEMBER 2019.
- [18] DJABOREBBI Amina, ZEGNINI Boubakeur, SEGHIER Tahar, Mahi Djillali. Evaluation and Performance of Grounding Grids Buried in Soil Under Impulse lightning Current. The First International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing. 16-17 March 2020 El-Oued, Algeria
- [19] A. S. Zalhaf, Mahmoud Ahmed, S. Ookawara and Mazen Abdel-Salam. Computation of Transient Induced Voltages along a Wind Turbine Struck by Lightning. 2nd International Conference on Power and Renewable Energy 2017.
- [20] A. S. Zalhaf, Mahmoud Ahmed, S. Ookawara and Mazen Abdel-Salam. A Simplified Model of Wind Turbine for Lightning Transient Analysis as Influenced by Structure of Grounding System. 5th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS) 2018.
- [21] Amr S. Zalhaf, Mazen Abdel-Salam, Diaa-Eldin A. Mansour, Shinichi Ookawara, Mahmoud Ahmed. Assessment of wind turbine transient overvoltages when struck by lightning: experimental and analytical study. IET Renewable Power Generation Volume: 13, Issue: 8 .Year: 2019 . PP 1360 – 1368
- [22] Shozo Sekioka, Hitomi Otoguro, and Toshihisa Funabashi. A Study on Overvoltages in Windfarm Caused by Direct Lightning Stroke. IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 34 , Issue: 2 , April 2019)pp : 671 – 679.
- [23] S. A. Pastromas, K. Maimaris, I. K. Stasinou, I. A. Naxakis, E. C. Pyrgioti. Assessment of Wind Turbine Grounding System. IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) 2018
- [24] Lu Heng, Xia Nenghong, Qian Chao and Tian Jianlin. Modeling of Offshore Wind Turbine Under Lightning Stroke and Analysis of Impact Factors on Transient Overvoltage. 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL) 2019.
- [25] R.T.Senthilkumar, K.Selvakumar and K.Nagarajan. Optimization of Multilayer Earth Structure by using Steepest Descent Method and Estimation of Transient Ground Potential Rise in Substation. 2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)
- [26] Sunde ED, "Earth Conducting Effects in Transmission Systems," New York, N. Y.: Dover publications, Inc.; 1968.
- [27] T.K. Manna, P. Chowdhury. Generalized equation of soil critical electric field E_c based on impulse tests and measured soil electrical parameters, IET Generation, Transmission and Distribution. 1 (5) (2007) 811-817.
- [28] Silvério Visacro, Wyllian L.F. Pinto, Fuad S. Almeida, M.H. Murta Vale, Gláucio Rosado. Experimental Evaluation Of Soil Parameter Behavior In The Frequency Range Associated To Lightning Currents. 29th International Conference on Lightning Protection 23rd – 26th June 2008 – Uppsala, Sweden

[29]

Scheduled System Maintenance - On Wednesday, December 16, IEEE Xplore will undergo scheduled maintenance from 12:30-3:30 PM ET. During this time, account management and purchase functions will be unavailable. We apologize for the inconvenience.

IEEE.org | IEEE Xplore | IEEE-SA | IEEE Spectrum | More Sites

SUBSCRIBE | Cart 0 | Create Account | Personal Sign In

IEEE Xplore®

Browse ▾ | My Settings ▾ | Help ▾

Institutional Sign In

IEEE

All ▾

Q

ADVANCED SEARCH

Conferences ▾ 020 1st International Confere...

Evaluation and Performance of Grounding Grids Buried in Soil Under Impulse lightning Current

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

DJABOREBBI Amina ; ZEGNINI Boubskeur ; BEGHIER Tahar ; MAHI Djilali

All Authors

30 Full Text Views

Abstract

Document Sections

I. Introduction

II. The Transmission Line Model

III. Mutual Effect in Grounding Grids

IV. Validation of Tim Simulation

V. Conclusion

Authors

Figures

References

Keywords

Abstract:

This paper is devoted to analyses the transient behaviour of simple grounding grids under impulse lightning current. The Transmission Line Method (TLM) involving mutual coupling between conductors has been used. The transient behaviour of grounding grids buried in homogeneous and in heterogeneous soil has been evaluated into a complete time domain solution. Several simulations were carried out to study the influence of the electrical energy transport network, the nature of the soil and the location of the current injection point on the voltage level and Impedance of the electrical network. Two configurations were presented in this study: in the first the current is in the center of the grid and in the second it is injected into a corner of the two grids. The obtained results show that the grid 1x1 gives the lowest transient potential when the injection point is in lower resistivity side, and the grid 2x2 presents better behavior when the current is injected at center point. Simulation results obtained show good agreement with those of previous work.

Published In: 020 1st International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing (CCSSP)

Date of Conference: 16-17 May 2020

IN SPEC Accession Number: 19867533

Date Added to IEEE Xplore: 29 July 2020

DOI: 10.1109/CCSSP49278.2020.9151549

► ISBN Information:

Publisher: IEEE

Conference Location: EL OUED, Algeria, Algeria

88



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Amar Telidji de Laghouat
Faculté de Technologie

**Deuxième Journée Doctorale de la Faculté
de Technologie - 2JDFT2015**



ATTESTATION DE PARTICIPATION

Le doyen de la Faculté de Technologie, Pr ALI CHEKNANE

atteste par la présente que :

DJABOREBBI Amina

*A participé à la 2ème Journée Doctorale de la Faculté de
Technologie - 2JDFT'2015, qui s'est tenue le 21 Mai 2015,
et y a présenté un exposé de ses travaux.*

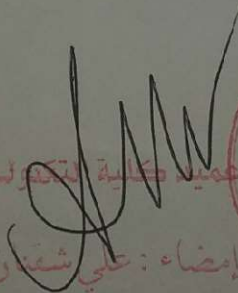
Intitulé :

Etude dynamique d'un comportement de système de mise
à la terre soumis de perturbation de foudre application de
coordination d'isolement et CEM

Co-Auteur(s) :

B. ZEGNINI, T. SEGHER

Le doyen



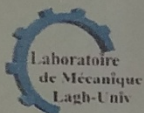
امضاء : علي شفيق



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Amar Telidji de Laghouat
Faculté de Technologie



Troisième Journée Doctorale de la Faculté de Technologie - 3JDFT2016



ATTESTATION DE PARTICIPATION

Le vice doyen de la Faculté de Technologie, chargé de la
post graduation, Dr. SEGHER Tahar atteste par la présente
que :

DJABOREBBI Amina

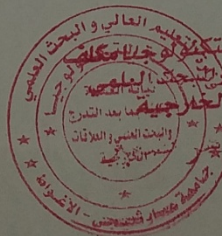
A participé à la Troisième Journée Doctorale de la
Faculté de Technologie - 3JDFT'2016, qui s'est tenue
le 10 Mars 2016, et y a présenté un exposé de ses travaux.

Intitulé :

Modélisation et simulation le modèle de ligne de
transmission en de système de mise à la terre

Co-Auteur(s) : Zegnini Boubakeur,

Mahi Djillali



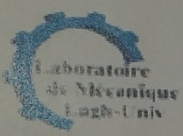
Le vice doyen



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique
Université Amar Telidji de Laghouat
Faculté de Technologie



Quatrième Journée Doctorale de Faculté de Technologie 4JDFT17






ATTESTATION DE PARTICIPATION

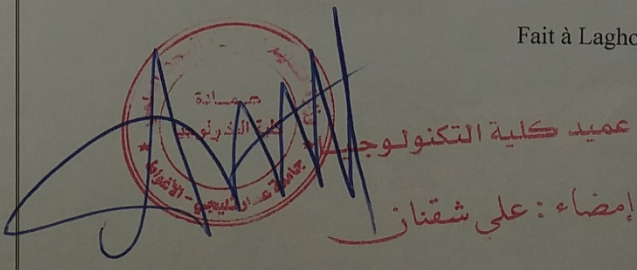
Le doyen de la Faculté de Technologie Pr. **ALI CHAKNANE** atteste, que la doctorante :

Amina DJABOREBBI

A présenté, dans le cadre de la quatrième journée Doctorale de la Faculté de Technologie 4JDFT17, qui s'est tenue le 12 Avril 2017, une communication intitulée :

**Réponse transitoire des systèmes de mise à la terre
Sous Impulse courant de foudre.**

Fait à Laghouat le, 12/04/2017



عميد كلية التكنولوجيا
إمضاء : علي شقناز











