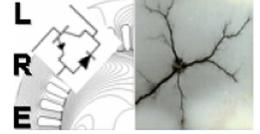


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
Ecole Nationale Polytechnique

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique



Thèse de Doctorat en Electrotechnique Option : Techniques de la Haute Tension

Présentée par :

Sofiane CHIHEB

Master en Electrotechnique

*Pour l'obtention du titre de
Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Électrotechnique*

INTITULÉE :

Comportement des systèmes de mise à la terre en hautes fréquences

Soutenue publiquement le 04/11/2018 devant le jury composé de :

Président :	<i>Ahmed</i>	<i>BOUBAKEUR</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
Rapporteurs :	<i>Madjid</i>	<i>TEGUAR</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
	<i>Abdelouahab</i>	<i>MEKHALDI</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
Examineurs :	<i>Redouane</i>	<i>TAHMI</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
	<i>El Hadj</i>	<i>AILAM</i>	<i>Professeur à l'UKM</i>
	<i>Azzedine</i>	<i>NACER</i>	<i>Professeur à l'USTHB</i>

ENP 2018

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) - École Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

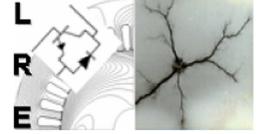
www.lre.enp.edu.dz

www.enp.edu.dz

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département d'Électrotechnique
Laboratoire de Recherche en Électrotechnique



Thèse de Doctorat en Electrotechnique Option : Techniques de la Haute Tension

Présentée par :

Sofiane CHIHEB

Master en Electrotechnique

Pour l'obtention du titre de
Docteur Troisième Cycle (D/LMD) en Électrotechnique

INTITULÉE :

Comportement des systèmes de mise à la terre en hautes fréquences

Soutenue publiquement le 04/11/2018 devant le jury composé de :

Président :	<i>Ahmed</i>	<i>BOUBAKEUR</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
Rapporteurs :	<i>Madjid</i>	<i>TEGUAR</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
	<i>Abdelouahab</i>	<i>MEKHALDI</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
Examineurs :	<i>Redouane</i>	<i>TAHMI</i>	<i>Professeur à l'ENP</i>
	<i>El Hadj</i>	<i>AILAM</i>	<i>Professeur à l'UKM</i>
	<i>Azzedine</i>	<i>NACER</i>	<i>Professeur à l'USTHB</i>

ENP 2018

Laboratoire de Recherche en Électrotechnique (LRE) - École Nationale Polytechnique (ENP)
10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie

www.lre.enp.edu.dz

www.enp.edu.dz

ملخص - يتعلق هذا العمل بدراسة السلوك الإنتقالي لأنظمة التأسيس مدفونة في أرض متجانسة أو متكونة من طبقتين أو غير متجانسة غير ممغنطة (يتكون من البنتونيت و تربة عالية المقاومة). تم تحليل تغيرات ممانعة التأسيس لكل قضيب مدفونة في أرض متجانسة أو غير متجانسة و ذلك بدلالة التواتر من أجل أطوال و وضعيات مختلفة للقضيب، وكذا من أجل عدة قيم للمقاومية و للسماحية النسبية للتربة. تم فحص الإستجابة الإنتقالية لأنظمة التأسيس (قضبان و شبكات) عند تعريضه لتيار نبضي ذي ساعات مختلفة. من أجل هذا، تم تطوير نموذج مبني على خطوط النقل باستخدام تمثيل الحالة أين تم إدراج تأين التربة و الإقتران المتبادل بين أجزاء النواقل. أخيراً، تم تقديم الخاصية توتر - تيار كأداة لتحليل فعالية نظام التأسيس.

كلمات مفتاحية - نظام التأسيس، الإستجابة الإنتقالية، تيار البرق، تمثيل الحالة، تأين التربة، الإقتران المتبادل، ممانعة التأسيس.

Abstract - This work deals with the study of the transient behaviour of grounding systems buried in homogeneous soil, stratified into two layers and heterogenous non-magnetic soil (constituted by the bentonite and high resistivity soil). The variation of impedance of electrodes buried in homogeneous and heterogeneous soil in function of frequency has been analyzed for different lengths and configurations of electrode and various values of resistivity and relative permittivity of soil. The transient response of grounding systems (electrodes and grids) has been examined when subjected to impulse current of different magnitudes. For this, a model based on transmission line represented by state space representation has been developed. Soil ionization and mutual coupling between conductors segments have been incorporated. Finally, the characteristic potential-current has been presented as tool to analyze the effectiveness of grounding system.

Key-words : Grounding system, transient response, lightning current, state space representation, soil ionization, mutual coupling, grounding system impedance.

Résumé - Ce travail porte sur l'étude du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre enterrés dans un sol amagnétique homogène, stratifié en deux couches ou hétérogène (constitué de la bentonite et un sol fortement résistif). La variation de l'impédance des électrodes enterrés dans un sol homogène en fonction de la fréquence a été analysée, pour différentes longueurs et dispositions des électrodes et diverses résistivités et permittivités relatives du sol homogène et stratifié. La réponse transitoire des systèmes (électrodes et grilles) de mise à la terre a été également examinée suite à l'injection d'un courant impulsionnel de différentes amplitudes. Pour cela, un modèle basé sur les lignes de transmission sous sa représentation d'état a été développé. L'ionisation du sol et le couplage mutuel entre les segments des conducteurs ont été incorporés. Enfin, la caractéristique tension-courant a été présentée comme outil d'analyse de l'efficacité du système de mise à la terre.

Mots-clés : Système de mise à la terre, réponse transitoire, courant de foudre, représentation d'état, ionisation du sol, couplage mutuel, impédance de mise à la terre.

Dédicaces

*A ma chère mère, pour tous ses sacrifices, son soutien tout au long de mes études,
A mes chers frères et sœurs pour leur appui et leur encouragement,
A la mémoire de mon père et celle de mon frère,
A toute ma famille pour son soutien,
A mes chers amis,
A la mémoire du Professeur S. MEKHTOUB.*

Sofiane CHIHEB



Remerciements

En tout premier lieu, je remercie Allah, tout puissant, de m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Le Professeur M. Teguar, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité, ses précieux conseils et son encouragement pendant toutes les étapes de réalisation de ce travail.

Je remercie aussi Monsieur Le Professeur A. Mekhaldi, pour sa précieux conseils directifs et son suivi continu pendant ces années. Cette thèse est le fruit d'une collaboration avec lui. C'est à ses côtés que j'ai compris ce que rigueur et précision voulaient dire.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à Monsieur A. BOUBAKEUR, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, de me faire l'honneur de présider le jury de cette thèse.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur R. TAHMI, Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, ainsi qu'à Monsieur E. AILAM, Professeur à l'Université Djilali Bounaama Khemis Miliana, et Monsieur A. NACER, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumedién, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être examinateurs de cette thèse.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur O. KHERIF et à Monsieur N. HARID pour leur collaboration pendant la réalisation de ce modeste travail, ainsi qu'à Monsieur B. NEKHOUL et Madame B. HARRAT, pour leur amabilité et leurs conseils.

Mes sincères remerciements aussi aux personnes qui ont m'aidé beaucoup pendant mon parcours professionnel. Je cite, entre autres, Monsieur M. LOUAFI, Monsieur T. HADJ MOHAND, Madame B. AKLIOUAT et à Monsieur H. BENYAHYA pour leurs encouragements et le soutien moral.

Table des matières

Résumé

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction Générale	15
1 Généralités	18
1.1 Introduction	18
1.2 Phénoménologie de la foudre	18
1.2.1 Décharge électrostatique	18
1.2.2 Origine de la foudre	19
1.2.2.1 Nuage orageux « cumulo-nimbus »	19
1.2.2.2 Développement de la foudre	20
1.2.2.3 Types des coups de foudre selon la polarité et le développement	23
1.2.3 Effets de la foudre	23
1.2.3.1 Effets acoustiques	23
1.2.3.2 Effets thermiques	24
1.2.3.3 Effets mécaniques	24
1.2.3.4 Effets électrochimiques	25
1.2.3.5 Effets électriques	25
1.2.4 Courant de foudre	26
1.3 Protection contre la foudre	29
1.3.1 Niveaux de protection contre la foudre	30
1.3.2 Détermination des points d'impact de la foudre	31
1.3.2.1 Méthode de sphère roulante	31
1.3.2.2 Méthode de maillage	32
1.3.2.3 Méthode de l'angle de protection	32
1.3.3 Système de protection contre la foudre	33
1.3.3.1 Protection des lignes et des postes électriques	33
1.3.3.2 Protection des immeubles	34
1.4 Système de mise à la terre	36
1.4.1 Conducteur de terre	37
1.4.2 Caractéristiques du sol	37
1.4.2.1 Résistivité ρ_s	37

1.4.2.2	Permittivité ϵ_s	38
1.4.2.3	Perméabilité μ_s	40
1.4.2.4	Caractérisation électromagnétique du sol	40
1.4.3	Modélisation des systèmes de mise à la terre	40
1.4.3.1	Méthode des éléments finis	41
1.4.3.2	Méthode des antennes	42
1.4.3.3	Méthode des circuits équivalents aux éléments partiels (PEEC)	42
1.4.3.4	Méthode des lignes de transmission	43
1.5	Conclusion	43
2	Impédance des électrodes de mise à la terre en fonction de la fréquence	45
2.1	Introduction	45
2.2	Théorie des lignes de transmission. Module de l'impédance de mise à la terre	45
2.3	Etude du module de l'impédance d'une électrode verticale enfouie dans un sol homogène	48
2.3.1	Cas d'une électrode verticale de terre	48
2.3.2	Cas d'une électrode verticale enterrée avec profondeur	52
2.4	Etude du module de l'impédance d'une longue électrode horizontale en fonction de la fréquence	54
2.4.1	Analyse des composantes de l'impédance	54
2.4.2	Module de l'impédance le long du conducteur	56
2.4.3	Impact de l'injection au point milieu de l'électrode horizontale	58
2.5	Etude d'une électrode horizontale enfouie dans un sol stratifié	59
2.5.1	Mise en équations	60
2.5.2	Variation du module de l'impédance	61
2.6	Conclusion	62
3	Modélisation d'un système de mise à la terre en utilisant TLM sous sa représentation d'état	64
3.1	Introduction	64
3.2	Mise en équations	64
3.2.1	Modélisation d'un système physique	64
3.2.1.1	Méthode 1 : Représentation par équations différentielles	65
3.2.1.2	Méthode 2 : Représentation par fonction de transfert	65
3.2.1.3	Méthode 3 : Représentation d'état	66
3.2.2	Représentation d'état d'une électrode de mise à la terre	67
3.3	Phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel	70
3.3.1	Ionisation du sol	70
3.3.2	Couplage mutuel entre les segments	73
3.3.3	Incorporation de l'ionisation du sol et du couplage mutuel dans la représentation d'état	74
3.4	Validation	75
3.4.1	Electrodes enterrées verticalement dans un sol de faible résistivité	75
3.4.2	Electrodes enterrées horizontalement dans un sol de faible résistivité	76

3.4.3	Calcul des impédances	77
3.4.4	Longue électrode enterrée horizontalement dans un sol de faible résistivité	78
3.4.5	Longue électrode enterrée horizontalement dans un sol fortement résistif	80
3.4.6	Réponse transitoire d'une grille de mise à la terre	81
3.5	Conclusion	83
4	Réponses transitoires des électrodes de terre	84
4.1	Introduction	84
4.2	Etude paramétrique du potentiel suite à l'utilisation d'une électrode en- terrée dans un sol résistif	84
4.2.1	Impact de l'amplitude du courant	85
4.2.2	Impact de la longueur de l'électrode	86
4.2.3	Impact des paramètres électriques du sol	87
4.2.4	Impact de l'injection du courant au point milieu de l'électrode	88
4.3	Réponses transitoires de l'électrode soumise aux courant du premier coup ou au courant et au courant subséquent de foudre	89
4.3.1	Réponse transitoire de l'électrode soumise au courant de premier coup de foudre	89
4.3.2	Réponse transitoire de l'électrode soumise au courant du coup de foudre subséquent	90
4.3.3	Comportement longitudinal d'une électrode de mise à la terre	92
4.3.3.1	Impact du type de coup du courant de foudre	92
4.3.3.2	Impact de la disposition de l'électrode	93
4.4	Etude de la réponse transitoire des électrodes enfouies dans un sol verti- calement stratifié	94
4.4.1	Potentiel transitoire au point d'injection et impédance impulsionnelle	95
4.4.2	Répartition du potentiel le long de l'électrode	96
4.4.3	Répartition du courant le long de l'électrode	98
4.5	Diagramme potentiel-courant pour une électrode horizontale	100
4.5.1	Principaux travaux antérieurs	100
4.5.2	Diagramme potentiel-courant (V-I) au point d'injection	102
4.5.3	Diagramme V-I le long de l'électrode de mise à la terre	104
4.6	Conclusion	106
5	Comportement des électrodes verticales de terre couvertes de bentonite et en- fouies dans un sol fortement résistif	107
5.1	Introduction	107
5.2	Etude de l'impédance d'une électrode verticale entourée de la bentonite	108
5.2.1	Proposition du modèle	108
5.2.2	Validation	111
5.3	Exploitation. Etude paramétrique	113
5.3.1	Réponse fréquentielle	113
5.3.2	Réponse transitoire d'une électrode verticale couverte de bentonite	116
5.3.2.1	Potentiel transitoire	116

5.3.2.2	Impédance impulsionnelle	116
5.3.3	Incorporation de l'ionisation du sol et du couplage inter segments .	118
5.3.3.1	Réponses transitoires	119
5.3.3.2	Impédance impulsionnelle	122
5.4	Conclusion	126
Conclusion Générale		127
Bibliographie		130
Principaux travaux effectués dans le cadre de cette thèse de Doctorat D/LMD		138

Liste des Figures

1.1	Forme et dimensions du cumulo-nimbus [28]	19
1.2	Schéma explicatif du circuit atmosphérique [27]	20
1.3	Divers types de foudres : (1) décharge intra-nuage , (2) décharge dans l'air , (3) décharge inter-nuages et (4) décharge nuage-sol [28]	20
1.4	Représentation sous forme de diagramme du mécanisme de foudre et du courant de terre [29]	21
1.5	Représentation schématique des étapes de foudre nuage-sol [29]	22
1.6	Catégories du coup de foudre selon la polarité et le sens de développement [32]	23
1.7	Risques provoqués par impact direct ou indirect de la foudre [35]	24
1.8	Forme d'onde et paramètres du courant de foudre [36]	27
1.9	Formes des courants du premier coup de foudre et du coup de foudre subséquent	29
1.10	Méthode de la sphère roulante [36]	31
1.11	Zones protégées contre la foudre d'après les méthodes de la sphère roulante et de l'angle de protection [36]	33
1.12	Composants du système de protection contre la foudre [34]	35
1.13	Structure du sol [3]	37
1.14	Variation de la conductivité du sol (en lignes continue) et de la permittivité relative (en ligne discontinue) en fonction de la teneur en eau du sol [38]	39
1.15	Configuration de mise à la terre étudiée par Nekhoul <i>et al.</i> [10]	41
1.16	Géométrie du problème selon la méthode de PEEC [18]	43
1.17	Circuit équivalent de la cellule de PEEC [18]	43
2.1	Modèle de ligne de transmission	46
2.2	Electrode de mise à la terre étudiée	48
2.3	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de longueur 2 m et pour différentes résistivités du sol	49
2.4	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de longueur 10 m et pour différentes résistivités du sol	50
2.5	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de longueur 30 m et pour différentes résistivités du sol	51
2.6	Configuration de l'électrode étudiée [14]	52
2.7	Variation du module de l'impédance d'une électrode verticale enterrée avec profondeur dans un sol homogène, (a) pour différentes résistivités du sol, (b) pour différentes permittivités du sol	53

2.8	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents types du sol	54
2.9	Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence pour les différents types du sol	55
2.10	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité de $10 \Omega m$ et de permittivité de 80	56
2.11	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité $100 \Omega m$ et de permittivité 40	57
2.12	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité $1000 \Omega m$ et de permittivité 20	57
2.13	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité $10000 \Omega m$ et de permittivité 5	57
2.14	Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence en injectant à l'extrémité et au point milieu d'une électrode horizontale	58
2.15	Electrode horizontale de mise à la terre enterrée dans un sol stratifié verticalement	59
2.16	Module de l'impédance de l'électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié verticalement	61
3.1	Courants et potentiels dans la ligne de transmission	67
3.2	Ionisation du sol et régions de décharge autour l'électrode [3]	71
3.3	Arc électrique apparaissant sur la surface du sol [3]	71
3.4	Champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol selon les formules d'Oettle [84] et de Manna et Chowdhuri [85]	72
3.5	Augmentation du rayon par effet d'ionisation du sol [7]	73
3.6	Paramètres affectant le couplage mutuel [25]	73
3.7	Potentiel au point d'injection obtenu par la représentation d'état, (a) en négligeant le couplage mutuel et l'ionisation du sol, (b) en considérant uniquement l'ionisation du sol, (c) en considérant seulement le couplage mutuel, et (d) en tenant compte les deux phénomènes simultanément	76
3.8	Potentils au point d'injection (0 m) et à 7 m de point d'injection obtenu par la représentation d'état, (a) au point d'injection, (b) à 7 m de point d'injection, (c) résultats de [8, 12, 18] au point d'injection, et (d) résultats de [8, 12, 18] à 7 m de point d'injection	77
3.9	Résultats présentés par Lorentzou <i>et al.</i> [70] et Cattaneo <i>et al.</i> [7]	79
3.10	Potentils obtenus par la représentation d'état (a) sans et (b) avec incorporation de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	79
3.11	Potentiel et courant obtenus par [16] (a) potentiel à 0,10 et 20 m, (b) courant à 5 et 25 m	80
3.12	Nos résultats, (a) potentiel à 0, 10, 20 et 100 m sans couplage et ionisation, (b) potentiel à 0, 10, 20 et 100 m avec couplage et ionisation, (c) courant à 5 et 25 m sans couplage et ionisation, (d) courant à 5 et 25 m avec couplage et ionisation	81
3.13	Configurations simulées par Lui <i>et al.</i> [21]	82

3.14	Potentiel au point d'injection des grilles de mise à la terre 1×1 et 2×2 obtenus par [21]	82
3.15	Potentiel au point d'injection des grilles de mise à la terre 1×1 et 2×2 obtenus par la représentation d'état	82
4.1	Potentiel obtenu en utilisant la représentation d'état pour un courant injecté d'amplitude de : (a) 1 A et (b) 50 A	85
4.2	Potentiels au point d'injection et à l'autre extrémité de l'électrode	86
4.3	Potentiels au point d'injection et à l'autre extrémité de l'électrode pour différentes longueurs considérées	87
4.4	Potentiels obtenus lors de l'injection à l'extrémité et au point milieu de l'électrode	88
4.5	Potentiel transitoire le long de l'électrode soumise au courant du premier coup de foudre pour différentes résistivités/permittivités du sol	89
4.6	Evolution du courant du premier coup de foudre le long de l'électrode pour différentes résistivités/permittivités du sol	90
4.7	Potentiel transitoire le long de l'électrode soumise au courant de coup de foudre subséquent pour différentes résistivités/permittivités du sol	91
4.8	Evolution du courant du coup de foudre subséquent le long de l'électrode pour différentes résistivités/permittivités du sol	91
4.9	Evolution du paramètre F_n le long d'une électrode horizontale soumise au courant de premier coup de foudre	93
4.10	Comportement longitudinal lors de l'injection du courant de coup de foudre subséquent	94
4.11	Potentiel transitoire d'une électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié verticalement dans le cas de l'injection du courant dans l'extrémité se trouvant dans la couche 1	95
4.12	Répartition du potentiel le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 40$	96
4.13	Répartition du potentiel le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 500 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 25$	97
4.14	Courant le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 40$	98
4.15	Courant le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 500 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 25$	99
4.16	Formes de courbes VI présentées par Visacro [6] pour (a) faibles courants et (b) forts courants	100
4.17	Courbes V-I obtenues par Asimakopoulou <i>et al.</i> [90]	101
4.18	Diagramme potentiel-densité du courant [91]	101
4.19	Diagramme V-I au point d'injection pour une électrode de 100 m enterrée dans un sol de différentes résistivités en absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	102
4.20	Diagramme V-I au point d'injection en incorporant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	103

4.21	Diagrammes V-I au point d'injection obtenues lors de l'injection du courant d'amplitude 10 A	103
4.22	Evolution temporelle des diagrammes V-I obtenus pour une électrode de 100 m	104
4.23	Potentiel transitoire obtenu au point d'injection de l'électrode pour différentes valeurs de résistivité	104
4.24	Diagramme V-I pour une électrode horizontale enterrée dans un sol faiblement résistif	105
4.25	Diagramme V-I obtenu pour une électrode de 100 m enfouie dans un sol fortement résistif	105
5.1	Configuration à étudier [9]	108
5.2	Modèle de ligne de transmission de l'électrode couverte par la bentonite .	110
5.3	Modules et arguments des impédances mesurées en fonction de la fréquence par Bourg <i>et al.</i> [68]	112
5.4	Nos modules et arguments des impédances en fonction de la fréquence . .	112
5.5	Module de l'impédance obtenu par Nekhoul <i>et al.</i> [9]	113
5.6	Module de l'impédance obtenu par notre modèle	113
5.7	Module et parties réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents rayons de la bentonite	114
5.8	Module et parties réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents résistivités/permittivités du sol	115
5.9	Variation temporelle du potentiel pour différentes longueurs de l'électrode	116
5.10	Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode	117
5.11	Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode pour différentes valeurs de résistivités/permittivités relatives .	117
5.12	Variation de l'impédance en fonction de la longueur pour différentes rayons de la bentonite	118
5.13	Variation temporelle du potentiel transitoire au point d'injection en présence et en absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	119
5.14	Evolution du rayon du conducteur et celui de la bentonite le long de l'électrode, en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	120
5.15	Evolution du potentiel transitoire le long de l'électrode de mise à la terre couverte de bentonite, en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	121
5.16	Evolution du courant le long de l'électrode couverte de bentonite, en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel	122
5.17	Impédance impulsionnelle en fonction de la longueur, en présence et en absence de l'ionisation et du couplage mutuel	123
5.18	Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur d'électrode pour différentes amplitudes du courant injecté, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel	123
5.19	Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur d'électrode pour différentes rayons du volume de la bentonite, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel	124

5.20	Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur d'électrode pour différentes résistivités/permittivités relatives du sol, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel	125
5.21	Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode lors de l'injection de deux types des courants de foudre, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel	125

Liste des Tableaux

1.1	Paramètres statistiques du coup de foudre [27]	28
1.2	Paramètres du courant de foudre pour la fonction de Heidler selon le niveau de protection [36]	29
1.3	Valeurs minimales et maximales du courant de foudre selon les niveaux de protection [42]	30
1.4	Rayons de la sphère roulante et les pics de courant associés pour les différents niveaux de protection contre la foudre [36]	32
1.5	Valeurs de la taille du maillage correspondants aux chaque niveaux de protection contre la foudre [36]	32
1.6	Résistivité de différents types du sol [3]	38
1.7	Permittivité relative pour différents types du sol [3]	39
2.1	Paramètres de la ligne de transmission	46
2.2	Impédances en module et plages de variation de la fréquence obtenues dans le cas 1	62
2.3	Impédances en module et plages de variation de la fréquence obtenues dans le cas 2	62
3.1	Paramètres d'impédance de l'électrode verticale	78
3.2	Paramètres d'impédance de l'électrode horizontale	78
4.1	Impédance impulsionnelle (en Ω) pour différentes valeurs de l'indice de pénétration	95

Introduction Générale

Le développement technologique des équipements électriques nécessite un niveau de protection plus élevée contre les courants de défaut et de foudre. Ces derniers sont écoulés vers la terre à travers les systèmes de mise à la terre [1] consistant en un conducteur ou un ensemble de conducteurs en contact intime avec le sol assurant une liaison électrique avec celle - ci [2].

Les systèmes de mise à la terre permettent, entre autres, de réduire le niveau d'isolation de l'équipement électrique, d'assurer la sécurité des équipements et des personnes autour de ces derniers (les équipements), d'éliminer les accidents électrostatiques en évacuant la charge accumulée au sol et de réduire les interférences électromagnétiques [3, 4].

Sous un courant à basse fréquence, le système de mise à la terre est modélisé par une résistance [5]. Cependant, ce modèle n'est plus valable en hautes fréquences [6]. Le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre a fait l'objet d'une multitude de travaux aussi bien expérimentaux [6–9] que de simulation en utilisant principalement quatre méthodes à savoir, les éléments finis (Finit Element Method, FEM) [9–11], la théorie des antennes (Antenna Theory Method, ATM) [12–16], les circuits électriques équivalents aux éléments partiels (Partial Element Equivalent Circuit, PEEC) [17, 18] et les lignes de transmission (Transmission Line Method, TLM) [7, 16, 19–21].

Etant donné que nous avons utilisé, dans la présente investigation, la méthode des lignes de transmission, nous nous contentons à présenter les principaux travaux utilisant cette méthode. Cette dernière a été initiée par Sunde pour évaluer le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre [22]. Elle consiste en la division des conducteurs en plusieurs éléments. La longueur de chaque segment doit être inférieure au dixième (1/10) de la longueur d'onde du courant injecté [19].

En utilisant la théorie des lignes de transmission, Geri *et al.* [23] ont étudié le comportement des électrodes verticale et horizontale soumises à un courant de foudre et enterrées dans un sol uniforme. Seule l'ionisation du sol qui a été prise en considération. Les résultats obtenus sont en bonne accordance avec ceux expérimentaux.

En utilisant les codes EMTP (Electro Magnetic Transient Program) et GSSP (Grounding System Simulation Program) basées sur la théorie des lignes de transmission, Cattaneo *et al.* [7] ont simulé un long conducteur horizontal soumis à un courant impulsionnel de faible, haute et très haute amplitudes. L'ionisation a été prise en compte et simulée par le biais des résistances non-linéaires contenues dans la bibliothèque du code EMTP.

Nekhoul *et al.* [16] ont développé un modèle basé sur les lignes de transmission dans le domaine temporel. L'ionisation du sol ainsi que le couplage mutuel entre les segments n'ont pas été incorporés. Les résultats obtenus pour une électrode horizontale ont été confrontés à ceux trouvés en employant les équations de propagation, les équations des télégraphistes, la matrice des nœuds, les lignes de transmission par les différences finies et la théorie des antennes.

En utilisant le logiciel *Ace* combiné avec ATP-EMTP (Alternative Transients Program/Electro-Magnetic Transients Program), Lui *et al.* [21] ont analysé le comportement transitoire d'une électrode horizontale et des simples grilles considérant seulement le couplage mutuel entre les segments. Ces chercheurs se sont intéressés à déterminer les potentiels en différents points de l'électrode. Les résultats obtenus sont proches à ceux trouvés en résolvant les équations de Maxwell [24].

En utilisant EMTP, Celli *et al.* [25] ont présenté un circuit équivalent pour examiner le comportement des différents systèmes de mise à la terre suite à l'injection d'un courant de foudre. Le couplage mutuel entre les segments a été modélisé conformément aux formules citées dans [26]. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux rapportés dans la référence [24].

Notre travail porte sur l'étude du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre dans les domaines temporel et fréquentiel en utilisant la théorie des lignes de transmission. Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'évolution fréquentielle de l'impédance des électrodes de mise à la terre de différentes longueurs enterrées verticalement ou horizontalement dans un sol homogène ou stratifié en deux couches. En utilisant un modèle des lignes de transmission sous sa représentation d'état, la réponse transitoire des systèmes de terre (électrodes et grilles) a été analysée lors de l'injection d'un courant impulsionnel, et ce en incorporant l'ionisation du sol et le couplage mutuel. Les résultats obtenus ont été exploités pour étudier le comportement longitudinal des électrodes et analyser les diagrammes V-I. Finalement, la variation, en fonction de la fréquence, de l'impédance des électrodes verticales plongées dans la bentonite ainsi que leur réponse transitoire ont été discutées.

La présente thèse a été structurée en cinq chapitres distincts. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur le phénomène de la foudre et ses caractéristiques ainsi que les systèmes de protection contre ce phénomène. Nous nous sommes intéressés beaucoup plus aux systèmes de mise à la terre, ses caractéristiques et les principales théories/méthodes permettant d'analyser leur comportement transitoire.

Le deuxième chapitre porte sur l'étude de la variation fréquentielle des impédances pour des électrodes verticale ou horizontale de mise à la terre enterrées dans un sol homogène. Les composantes réelle et imaginaire de l'impédance de l'électrode de terre ainsi que la variation du module le long de l'électrode sont présentées. L'impact de l'injection du courant au point milieu de l'électrode sur l'impédance de celle-ci sera également examiné. Nous nous sommes intéressés à la fin à analyser l'impédance d'une électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié verticalement.

La réponse transitoire lors de l'injection d'un courant impulsionnel a été étudiée dans le troisième chapitre. Pour cela, nous avons utilisé la méthode des lignes de transmission sous sa représentation d'état. Différentes configurations, à savoir électrodes verticales,

électrodes horizontales et grilles, ont été étudiées. Les phénomènes relatifs à l'ionisation et le couplage mutuel intersegments ont été incorporés.

Dans le quatrième chapitre, nous étudions le potentiel transitoire en faisant varier les paramètres électriques du sol, la longueur de l'électrode et le point d'injection du courant. Le comportement longitudinal de l'électrode a été également étudié. Par ailleurs, le potentiel transitoire d'une électrode horizontale enfouie dans un sol stratifié verticalement a été discuté. Enfin, nous présentons le diagramme potentiel-courant (V-I) obtenu lors de l'injection d'un courant impulsionnel dans des électrodes de terre horizontales.

Le dernier chapitre porte sur le comportement des électrodes entourées de bentonite. Un modèle basé sur la théorie des lignes de transmission est présenté. Nous confrontons les résultats ainsi obtenus à ceux rapportés dans la littérature. Le modèle proposé est exploité pour l'étude de la réponse transitoire des électrodes plongées dans la bentonite. Différentes applications ont été faites en variant les caractéristiques électriques du sol, le rayon de la bentonite ainsi que l'amplitude et la forme du courant injecté dans l'électrode.

Nous terminons par une conclusion générale représentant une synthèse globale de notre étude.

Chapitre 1

Généralités

1.1 Introduction

La foudre est une décharge électrostatique de longueur pouvant atteindre quelques kilo-mètres et de très fortes amplitudes. Cette décharge de caractère destructif a plusieurs effets acoustiques, chimiques, mécaniques, électriques et thermiques [7]. En outre, la foudre provoque l'apparition des surtensions dans les réseaux électriques suite à un impact direct ou par effet d'induction électromagnétique. Ces surtensions provoquent la dégradation de l'isolement des équipements électriques et le déclenchement des protections. Pour cela, des études ont été effectuées pour mettre un plan de protection efficace contre la foudre, en installant des dispositifs aptes à capter la foudre et l'évacuer vers la terre à travers un système de mise à la terre.

Ce chapitre présente des généralités sur le comportement de la foudre en présentant les différents paramètres et les systèmes de protection contre la foudre. Nous nous intéressons plus particulièrement aux systèmes de mise à la terre. Les méthodes utilisés pour étudier le comportement transitoire de ces systèmes y sont également présentées.

1.2 Phénoménologie de la foudre

1.2.1 Décharge électrostatique

Les décharges électrostatiques sont des transferts de charges électrostatiques entre deux éléments caractérisés par des potentiels électrostatiques différents. Le transfert se déclenche par contact direct ou par influence [27].

1.2.2 Origine de la foudre

1.2.2.1 Nuage orageux « cumulo-nimbus »

Le nuage orageux ou le cumulo-nimbus est le plus volumineux des nuages. Il se présente en agrégats et rarement sous forme isolé. Le nuage orageux diffère des autres nuages d'averses à la fois par l'échelle de leur extension tant verticale qu'horizontale et par leur aptitude à donner naissance à des décharges électriques [28]. La figure 1.1 montre les dimensions d'un cumulo-nimbus.

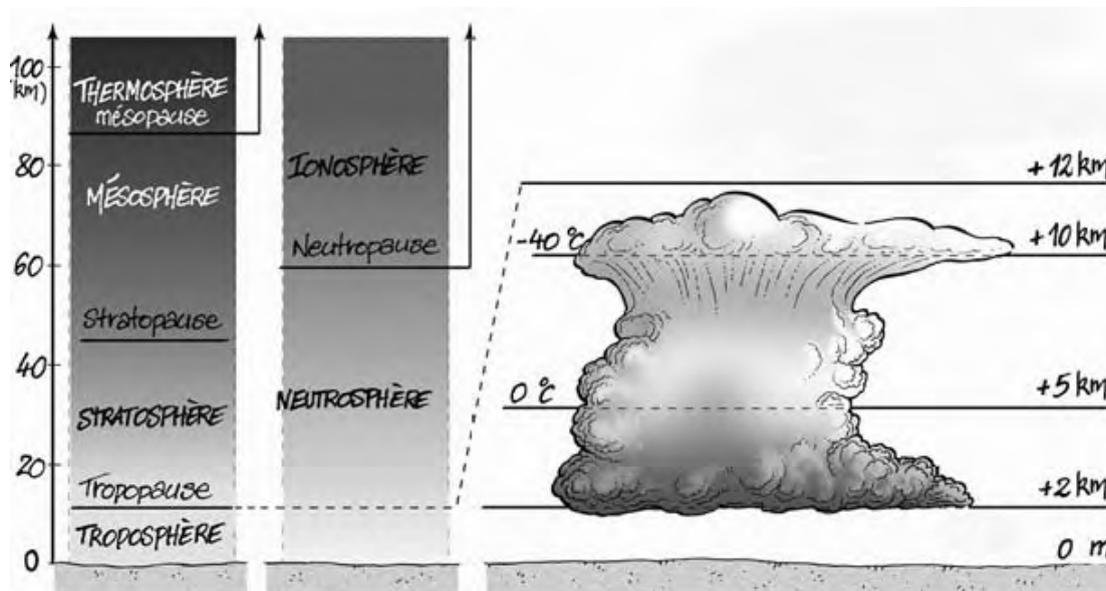


FIGURE 1.1: Forme et dimensions du cumulo-nimbus [28]

Dans un cumulo-nimbus, la partie inférieure porte généralement une charge négative et la partie supérieure porte une charge positive ; le tout étant électriquement neutre [29].

Sous l'effet d'une différence de potentiel (de l'ordre de 300 kV) entre l'ionosphère et le sol, l'atmosphère est parcourue par un courant permanent I_1 (comme montré sur la figure 1.2), dit courant de beau temps [27].

A l'intérieur des nuages orageux, des vents turbulents entraînent des chutes d'eau chargées électriquement produisant de nombreuses courtes décharges. Ces décharges ne se développent généralement pas sur de grandes distances. Néanmoins, l'une de ces décharges pourrait se développer hors du nuage constituant la première phase de la foudre de courant I_2 [30]. Les types de décharges électriques représentés sur la figure 1.3 consistent en [28] :

- ❑ la décharge intra-nuage s'effectuant à l'intérieur du cumulo-nimbus ;
- ❑ la décharge dans l'air ;
- ❑ la décharge inter-nuages entre deux cumulo-nimbus de signes opposés ;
- ❑ la décharge nuage-sol.

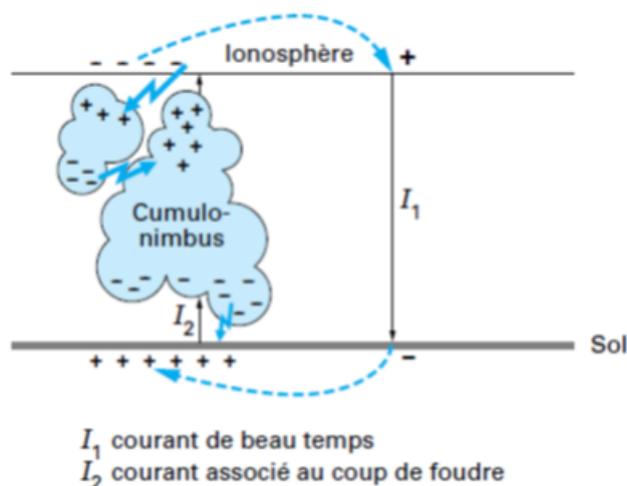


FIGURE 1.2: Schéma explicatif du circuit atmosphérique [27]

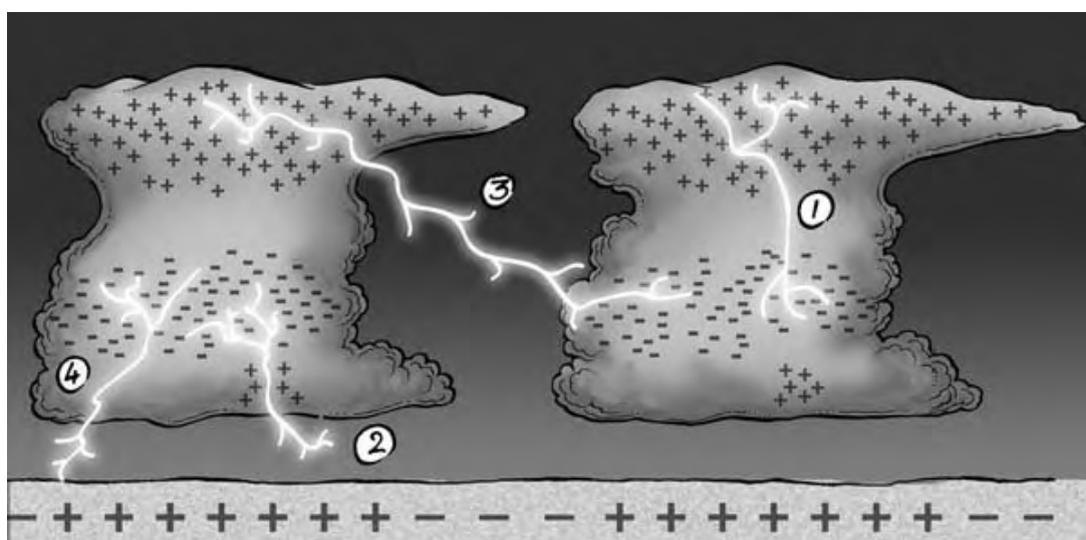


FIGURE 1.3: Divers types de foudres : (1) décharge intra-nuage , (2) décharge dans l'air , (3) décharge inter-nuages et (4) décharge nuage-sol [28]

1.2.2.2 Développement de la foudre

La foudre est une décharge électrique d'origine atmosphérique, caractérisée par une longueur pouvant atteindre plusieurs kilomètres et d'un courant de caractère impulsif ayant une très forte amplitude [31, 32].

Les différents étapes de développement de cette décharge, ainsi que le courant de terre tels qu'observés par la photographie à grande vitesse sont montrés schématiquement sur la figure 1.4 .

Ces coups de foudre (du nuage au sol) ne représentent qu'environ 10 % des décharges de foudre ; la majorité des décharges durant les orages se produisent entre les nuages [30].

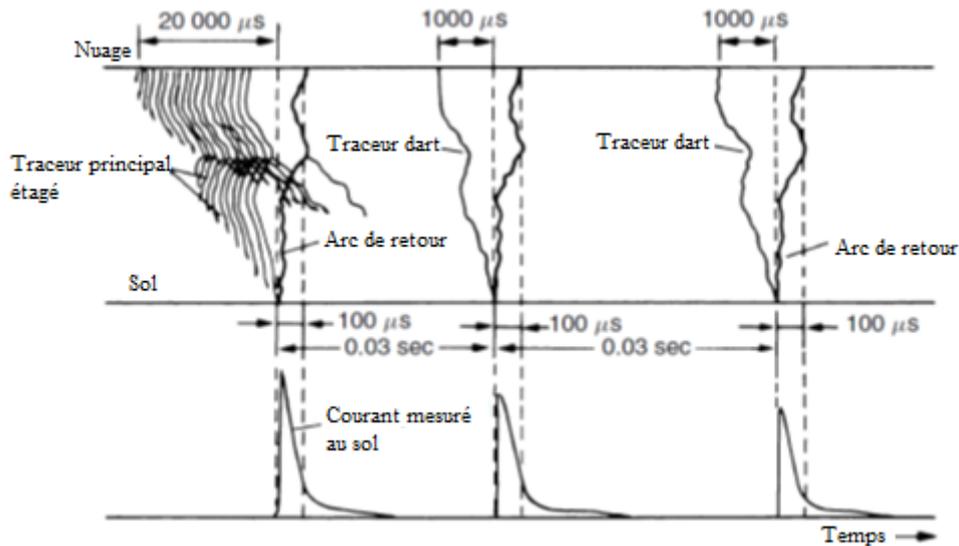


FIGURE 1.4: Représentation sous forme de diagramme du mécanisme de foudre et du courant de terre [29]

Au cours de la première étape, la décharge connue sous le nom de traceur principal étagé (Stepped leader), se déplace rapidement vers le bas, et s'arrête après chaque pas pendant quelques dizaines de microsecondes et ne continue pas dans le même chemin ; c'est pourquoi on l'appelle traceur étagé. A partir de l'extrémité de la décharge, un canal ionisé dite «streamer pilote» ou « éclair » [33] caractérisé par une faible luminosité et un courant de quelques ampères, se propage dans l'air avec une vitesse d'environ $1 \times 10^5 m/s$. Le pilote streamer est suivi d'un traceur étagé avec une vitesse moyenne d'environ $5 \times 10^5 m/s$ et un courant autour de 100 A [30].

Lorsque le traceur s'approche du sol, le champ électrique entre le traceur et la terre augmente et provoque des décharges avec des objets terrestres tels que bâtiments élevés, arbres, etc. Au moment où les deux traceurs se rencontrent, le coup de foudre (soit principal ou de retour) commence de la terre vers le nuage, se déplaçant beaucoup plus rapide (environs $50 \times 10^6 m/s$) le long du canal ionisé précédemment établi. Dans le canal ionisé de l'arc de retour (coup de foudre subséquent), les températures dans le canal allant de 15 000 à 20 000 ° C, et le courant varie de quelques kA à 250 kA. Ces phénomènes sont responsables des effets destructifs de la foudre [29].

Le coup de retour est suivi de plusieurs coups dites coups subséquents [29, 34]. Le traceur des coups de foudre subséquents est connu comme le «traceur dart» en raison de son allure de fléchettes. Le traceur du coup de foudre subséquent suit le chemin du traceur principal avec une vitesse d'environ dix « 10 » fois plus grande ; le milieu étant déjà ionisé ce qui permet d'avoir une vitesse plus rapide. Le chemin n'est généralement pas ramifié et est brillamment éclairé [36].

Une représentation schématique des différentes étapes du développement du coup de foudre du nuage au sol sur la figure 1.5 (a à f) donne une appréciation plus claire du processus impliqué. Dans un nuage, plusieurs centres de charges de forte concentration peuvent exister. Sur la figure 1.5, seuls deux centres de charges négatifs sont représentés. En (a), le traceur principal étagé a été initié. Ce traceur et le canal ionisé se propagent à

la terre, diminuant les charges négatives dans le nuage. Dans ce cas, le point d'impact n'est pas encore connu. En (b), le pilote streamer est sur le point d'entrer en contact avec le streamer positive ascendant de la terre. En (c), le premier coup de foudre étant fait, un lent coup de foudre de retour (subséquent) se dérive vers les nuages et la charge négative des nuages commence à se décharger. En (d), les charges existantes dans le premier pôle sont complètement déchargées et l'arc commence à se développer dans le deuxième pôle de charges. En (e), le second centre de charges se décharge vers le sol via le premier centre de charges et le traceur dart, distribuant une charge négative le long du canal. Des streamers positifs montent du sol pour rencontrer le traceur dart. En (f) le contact électrique nuage-sol est fait à travers les canaux ionisés de la terre. Le coup de foudre subséquent continue vers le haut et commence à décharger l'espace chargé négativement sous le nuage [29].

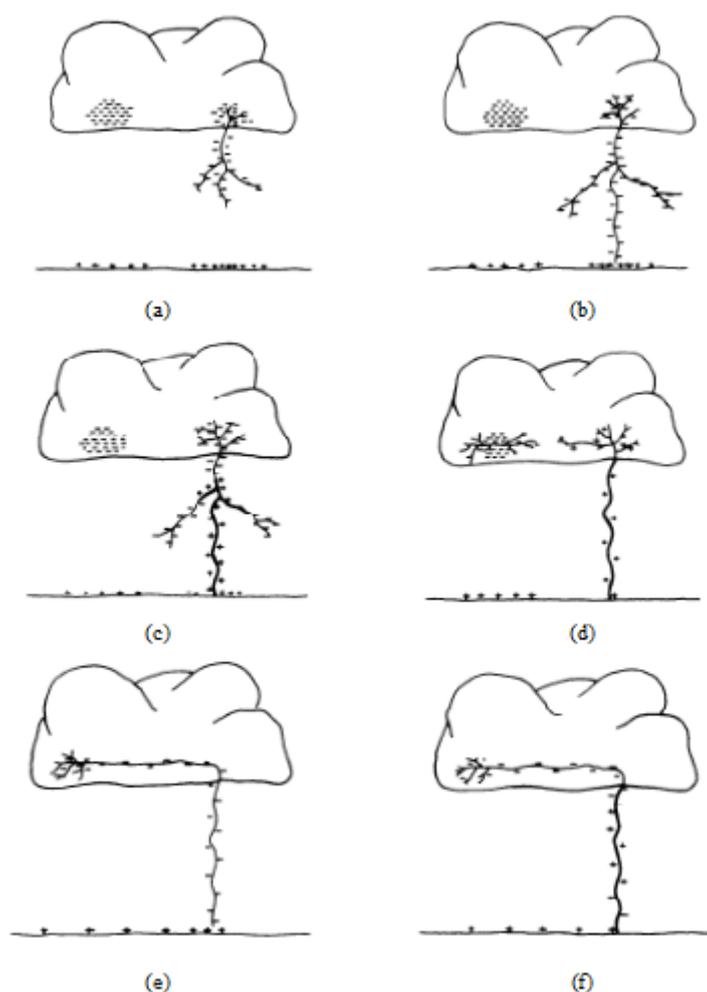


FIGURE 1.5: Représentation schématique des étapes de foudre nuage-sol [29]

L'éclair (pilote streamer ou canal ionisé) participe à décharger les cumulo-nimbus, afin d'avoir un état d'équilibre (électrique) entre les nuages. Pour cela, généralement l'éclair n'est pas unique, et se réamorç plusieurs fois jusqu'à atteindre l'équilibre entre les charges des nuages [33].

1.2.2.3 Types des coups de foudre selon la polarité et le développement

Les décharges de foudre nuage-sol sont classées selon la polarité et le sens de développement en quatre catégories [32] :

- ❑ Un coup de foudre descendant négatif ;
- ❑ Un coup de foudre descendant positif ;
- ❑ Un coup de foudre ascendant négatif ;
- ❑ Un coup de foudre ascendant positif.

La figure 1.6 illustre les quatre catégories des décharges nuage-sol [32].

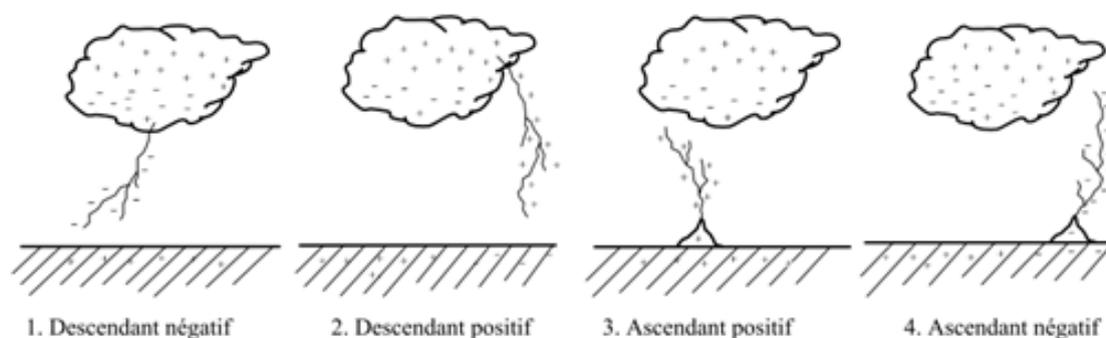


FIGURE 1.6: Catégories du coup de foudre selon la polarité et le sens de développement [32]

Les coups de foudre négatifs descendants et ascendants sont les plus fréquents ; leur fréquence d'apparition est de l'ordre de 80 à 90 % en régions tempérées [28, 34].

1.2.3 Effets de la foudre

La figure 1.7 présente les différents effets engendrés par la foudre par impact direct ou indirect.

1.2.3.1 Effets acoustiques

Le tonnerre est une onde de choc violente qui génère des pressions importantes à courtes distances (pressions de centaines d'atmosphères dans le plasma du canal de foudre). La propagation du tonnerre ne dépasse pas 10 kilomètres dans les régions tempérées à forte urbanisation. Cependant, il peut atteindre 30 à 40 kilomètres dans les régions tropicales naturelles, notamment lorsque les ondes acoustiques ne rencontrent pas d'obstacles absorbants ou diffractants [28].

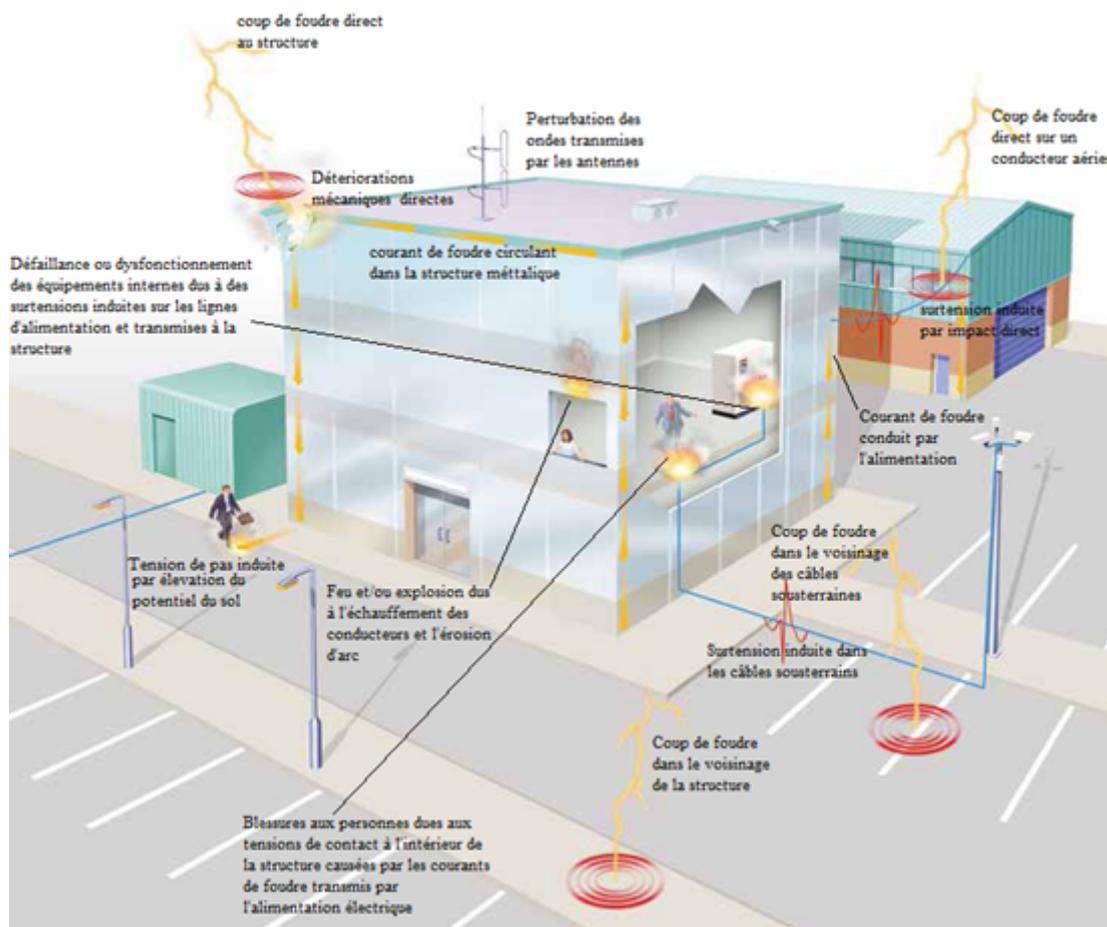


FIGURE 1.7: Risques provoqués par impact direct ou indirect de la foudre [35]

1.2.3.2 Effets thermiques

La température du plasma peut atteindre $30\,000^{\circ}\text{C}$. Hormis au point d'impact, la foudre ne peut faire fondre que des fils métalliques assez fins. Les décharges de longue durée entraînent facilement une mise à feu. En effet, il faut prévoir des conducteurs de section suffisante sans qu'elle ne soit excessive, puisque le courant de foudre de grande raideur circule en surface, par effet pelliculaire ou effet de peau [27, 28].

Par ailleurs, l'eau contenue dans le bois ou les maçonneries (en particulier dans les fissures, les jointures, les cavités, la sève des arbres, etc.) s'évapore instantanément, et la pression qui en résulte provoque une explosion.

1.2.3.3 Effets mécaniques

Entre deux conducteurs parallèles parcourus par des courants de même sens, il existe des forces d'attraction qui entraînent des contraintes mécaniques et déforment ces conducteurs qui s'entrechoquent ou même s'écrasent.

Ces effets peuvent être négligeables si la distance entre les conducteurs parallèles (Exemple : antennes tubulaires minces, descentes de paratonnerre et descentes de gouttière, etc.) dépasse 50 cm. En effet pour un courant de foudre intense de 100 kA, les forces d'attraction atteignent 400 kN/m, pour un écartement de 5 mm, mais seulement 400 N/m pour un écartement de 50 cm [28].

1.2.3.4 Effets électrochimiques

Même sur des descentes de paratonnerres fréquemment foudroyés, il n'y a pas lieu de s'attendre à des décompositions électrochimiques. La corrosion accélérée due à des courants circulant dans le sol est importante sur les conducteurs enterrés (câbles, canalisations, installations de mise à la terre, etc.). Toutefois, compte tenu de la courte durée des coups de foudre, ces effets sont généralement négligeables par rapport à ceux provoqués par les courants telluriques appelés aussi courants vagabonds. Il s'agit de courants électriques qui circulent naturellement dans la terre, surtout dans les couches sous-jacentes, contenant ou non des parties métalliques, au niveau du sol. Ces courants résultent des champs électriques induits par les variations du champ magnétique terrestre, dès que le sol est légèrement conducteur [28].

1.2.3.5 Effets électriques

a- Effets du coup de foudre direct sur un équipement : Les effets du coup de foudre direct se produisent par conduction du courant de foudre dans les éléments plus ou moins conducteurs en provoquant l'électrocution de personnes ou d'animaux soit par contact direct avec les équipements ou par élévation du potentiel au sol. En outre, le courant de foudre de nature destructive se propage et atteint les équipements et les installations par conduction électrique avec l'ouvrage soumis au courant de foudre [27].

b- Effets du coup de foudre indirects sur un équipement : Les effets du coup de foudre indirect sont provoqués par les surtensions transitoires engendrés par la conduction du courant de foudre dans un équipement électrique ou dans une structure métallique. Cependant, les effets sont observés dans d'autres équipements classés comme suit :

Surtensions par induction : Les éléments métalliques et les câbles de conduction situés dans un endroit proche du point d'impact de la foudre sont considérés comme des antennes qui captent, par "induction", les rayonnements électromagnétiques induits par la foudre. De ce fait, des surtensions transitoires apparaissent sur tous les équipements reliés dont l'amplitude est proportionnelle à la puissance et à la proximité du coup de foudre [34].

Surtensions par rayonnement électromagnétique : Dans le cas où le point d'impact est lointain, le courant de foudre émet une onde électromagnétique pouvant atteindre une installation de mise à la terre par effet de couplage électromagnétique. En zone dite lointaine, les caractéristiques du champ électromagnétique rayonné ne dépendent que des propriétés du milieu dans lequel le champ se propage. Les tensions induites par rayonnement électromagnétique seront calculées en utilisant les équations de Maxwell. Ces surtensions peuvent perturber le fonctionnement des équipements électriques et de télécommunication, comme ils peuvent engendrer le claquage du diélectrique utilisé dans l'isolation des équipements [27].

c- Elévation de potentiel du sol : Le courant de foudre est de nature impulsionnelle de très hautes fréquences [29], ce qui provoque une montée de potentiel très importante. Un tel potentiel peut être très important à plusieurs dizaines de mètres, et peut encore atteindre plusieurs centaines de kilovolts. En outre, cette différence de potentiel peut être affectée par les systèmes de mise à la terre ou d'autres infrastructures (tuyaux, des structures métalliques, etc.) existant à proximité. Ces différences de potentiel provoquent des destructions d'équipements électriques ou électroniques, ainsi que des claquages entre le conducteur de descente du paratonnerre et les objets métalliques proches reliés au sol [27].

Lors du dimensionnement des systèmes de protection contre la foudre, seuls les effets thermiques et électriques sont pris en considération ; les autres effets n'ont pas d'influence importante sur la conception d'un système de protection contre la foudre [2].

1.2.4 Courant de foudre

Le courant de foudre est la principale cause des endommagements, des perturbations électromagnétiques et des dysfonctionnements des équipements électriques.

Les courants de foudre sont classés en trois principales catégories : le courant du premier coup de foudre, le courant de coup de foudre subséquent (de retour) et le courant de coup long (qui simule le courant continu). Ce dernier n'est pas défini par une formule mathématique. Cependant il peut être représenté par une forme d'onde rectangulaire ayant un courant moyen I et une durée environs 0,5 s [36].

La fréquence du courant pourrait être estimée soit par l'inverse du temps de montée [39], soit en appliquant la transformée de Fourier (FFT) pour obtenir le spectre de fréquence, ce qui permet d'obtenir une fréquence représentative moyenne dans la plage correspondant au temps de montée.

Le courant de foudre est associé à quatre principaux paramètres [40] :

- Le courant de crête I_m est utilisé pour concevoir la configuration du système de mise à la terre et permettre d'estimer la tension transitoire maximale.
- La raideur du courant maximale $\frac{di}{dt}$ est utilisée pour estimer la tension induite dans les structures métalliques installées à proximité du point d'impact.
- La charge Q est responsable des effets de fusion au point d'impact de la foudre.

- L'énergie spécifique $\frac{W}{R}$ qui provoque l'échauffement lorsque le courant de foudre traverse un conducteur métallique de résistance R .

Le système de protection contre la foudre doit être conçu en considérant ces quatre paramètres du courant de foudre. Ce courant est de forme impulsionnelle caractérisé par une très courte durée et une forte amplitude.

Le courant de foudre est défini par le temps de montée T_1 et le temps de descente ou de décroissance de 50 % nommé T_2 illustrés sur les figures 1.8 (a) et (b) respectivement. Il est à noter que dans certains investigations [12, 21, 41], le courant de foudre est défini par la valeur de crête ainsi que les temps de montée et de descente T_1/T_2 .

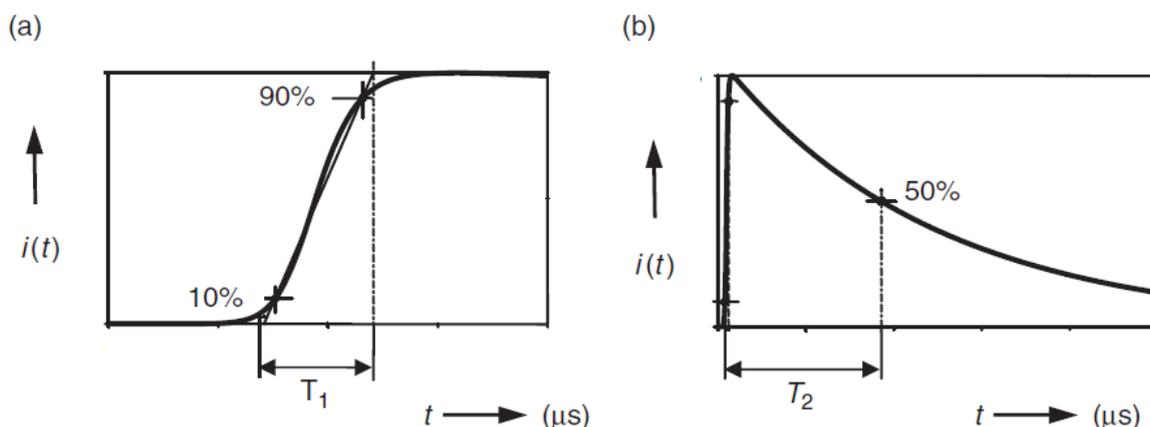


FIGURE 1.8: Forme d'onde et paramètres du courant de foudre [36]

Le tableau 1.1 présente les paramètres statistiques du coup de foudre.

Pour les simulations des courants de foudre, deux fonctions peuvent être utilisées pour définir le courant de foudre [36] :

a. Fonction de Heidler : La fonction Heidler est définie comme suit [36] :

$$i(t) = \frac{I_m}{k} \left[\frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \right] e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)} [A] \quad (1.1)$$

t [s] est le temps ; I [A] est la valeur de crête du courant ; τ_1 [s] est le temps de front , τ_2 [s] est le temps de descente et k est le facteur correctif de l'amplitude.

En fonction du niveau de protection contre la foudre, les paramètres du courant de premier coup de foudre et du coup de foudre subséquent sont présentés dans le Tableau 1.2 .

En utilisant les paramètres du niveau de protection contre la foudre IV (c'est-à-dire le courant le plus élevé), le premier coup de foudre et celui subséquent sont présentés sur la figure 1.9.

Il est à noter que les temps T_1/T_2 pour le premier coup de foudre sont $10/350 \mu s$ et $0,25/100 \mu s$ pour le coup de foudre subséquent [36]. Ces temps sont inchangés selon le

TABLE 1.1: Paramètres statistiques du coup de foudre [27]

Symbole	Paramètre	Unité	90 %	50 %	10 %	Valeur maximale	Nombre d'observations
I	Courant de crête	kA	2 à 8	10 à 25	40 à 60	230	4150
$\frac{di}{dt}$	Pente du front de courant mesuré entre 0,1 et 0,9 de la valeur de crête	$\frac{kA}{\mu s}$	2	8	25	50	40
	Durée totale des coups de foudre	s	0,01 à 0,1	0,1 à 0,3	0,5 à 0,7	1,5	100
	Durée d'un seul coup	ms	0,1 à 0,6	0,5 à 3	20 à 100	400	150
	Intervalle de temps entre deux coups successifs	ms	5 à 10	30 à 40	80 à 130	500	525
t_2	Intervalle de temps entre début et mi-valeur en retombée du courant de crête	μs	10 à 25	28 à 42	52 à 100	>120	425
t_1	Temps de montée	μs	0,3 à 2	1 à 4	5 à 7	10	45
n_p	Nombre d'impulsions par coup de foudre	/	1 à 2	2 à 4	5 à 11	34	500

TABLE 1.2: Paramètres du courant de foudre pour la fonction de Heidler selon le niveau de protection [36]

Niveau de protection	Premier coup de foudre			Coup de foudre subséquent		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV
I [kA]	200	150	100	50	37,5	25
k	0,93			0,993		
τ_1 [μs]	19			0,454		
τ_2 [μs]	485			143		

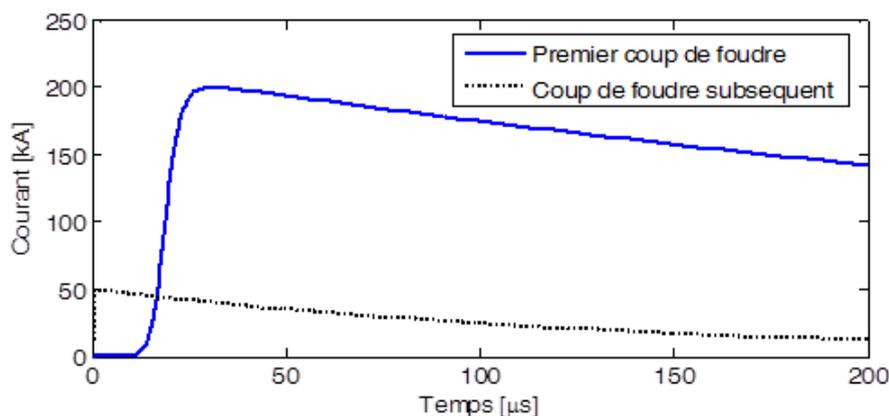


FIGURE 1.9: Formes des courants du premier coup de foudre et du coup de foudre subséquent

niveau de protection contre la foudre, et uniquement la valeur de crête du courant qui change.

b. Fonction bi-exponentielle : L'onde du courant peut se présenter aussi, pour des raisons de simplification, par la superposition de deux fonctions exponentielles [7]. Ce courant $i(t)$ est donc défini comme suit :

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})[A] \quad (1.2)$$

I_0 est le courant de crête [A]; α est la constante de montée du courant [1/s] et β est la constante de descente du courant [1/s].

1.3 Protection contre la foudre

La conception des systèmes de protection contre la foudre est basée sur l'acheminement du courant de foudre vers la terre. L'efficacité de tels systèmes repose sur leur capacité à [34] :

- capter la foudre ;

- être rigide par rapport au courant de foudre (ne soit pas influencé par les effets thermiques et mécaniques) ;
- acheminer le maximum d'énergie (pour que le courant ne se propage pas vers la zone protégée) ;
- dissiper le courant de foudre dans la terre.

1.3.1 Niveaux de protection contre la foudre

Le niveau de protection contre la foudre est un nombre lié à un ensemble de paramètres de courant de foudre correspondant aux valeurs maximale et minimale du courant de foudres. Ce niveau est utilisé pour la conception des systèmes de protection contre la foudre. Pour chaque niveau un courant minimal et un autre maximal sont définis [42].

Les valeurs des crêtes des courants de foudre relatives au niveau de protection *I* ne dépassent pas les valeurs maximales avec une probabilité de 99 % de la valeur de crête du courant de foudre. Cette valeur de crête est inférieure à la valeur maximale qui est de 200 kA. La valeur de crête est réduite à 75 % et la probabilité est de 98 % pour le niveau de protection *II* et à 50 % pour les niveaux *III* et *IV* et la probabilité est de 97 %. Avec ces valeurs, il est possible de concevoir différents composants du système de protection comme la section des conducteurs, l'épaisseur des tôles, la capacité de courant des parafoudres et la distance de séparation pour éviter les étincelles dangereuses.

Les valeurs minimales de l'amplitude du courant de foudre pour les différents niveaux de protection contre la foudre sont utilisées pour déterminer le rayon de la sphère roulante.

Le Tableau 1.3 présente les valeurs maximales et minimales du courant de foudre.

TABLE 1.3: Valeurs minimales et maximales du courant de foudre selon les niveaux de protection [42]

Niveau de protection	Valeur critique maximale du courant de foudre [kA]	Probabilité que le courant de foudre sera inférieur que la valeur maximale du niveau [en %]	Valeur critique minimale du courant de foudre [kA]	Probabilité que le courant de foudre est supérieur au courant minimal [en %]
I	200	99	3	99
II	150	98	5	97
III	100	97	10	91
IV	100	97	16	84

1.3.2 Détermination des points d'impact de la foudre

1.3.2.1 Méthode de sphère roulante

La méthode de la sphère roulante est suggérée par la CEI 62305-3 [37] pour être utilisée dans la détection des points d'impact éventuels. Cette méthode est universelle et ne nécessite pas des restrictions sur la structure à protéger. La figure 1.10 montre un exemple d'application de cette méthode. Une sphère d'un certain rayon r est enroulée autour de la structure à protéger dans toutes les directions possibles. Tout point touché par cette sphère est susceptible d'être un point d'impact. Les zones ombrées sont exposées à l'interception de la foudre et nécessitent ainsi une protection contre celle-ci. De cette manière, le volume protégé est délimité par des zones non ombragées.

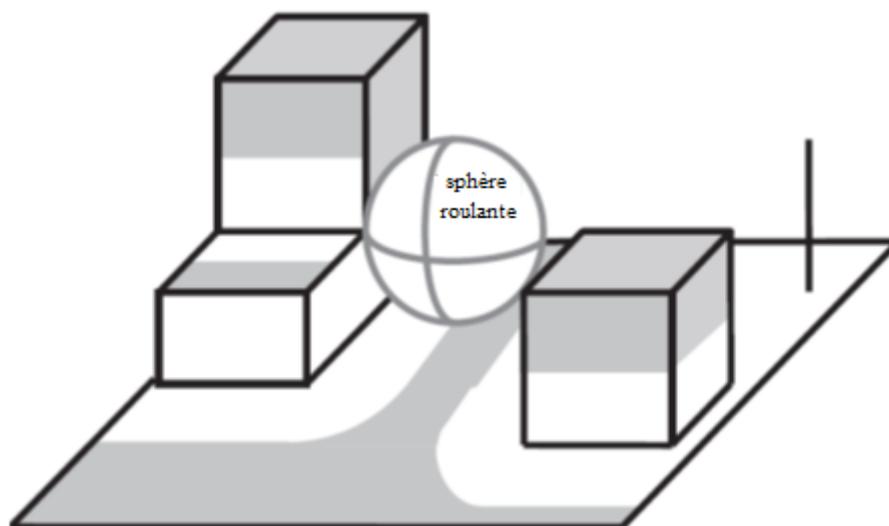


FIGURE 1.10: Méthode de la sphère roulante [36]

Suivant le modèle électro-géométrique, le rayon de la sphère roulante r est identique à la distance de frappe. Le rayon r [m] est corrélé au courant de crête I [kA] du premier coup de foudre et est donné par la relation suivante [36] :

$$r = I^{0,65} \text{ [m]} \quad (1.3)$$

Le tableau 1.4 contient les rayons de la sphère roulante et les courants de crête associés pour les différents niveaux de protection contre la foudre fixés dans la CEI 62305-1 [35]. Les valeurs minimales du rayon de la sphère roulante r définissent l'efficacité d'interception du système de protection contre la foudre.

Par conséquent, le rayon de la sphère roulante augmente avec le niveau de protection ; ce rayon est le plus petit pour le niveau I et est le plus grand pour le niveau IV. La probabilité P désigne le pourcentage de décharge nuage-sol avec un courant de crête inférieur à celui défini par le niveau de protection contre la foudre. Les décharges n'atteignant pas le point d'impact sont ignorées [36].

TABLE 1.4: Rayons de la sphère roulante et les pics de courant associés pour les différents niveaux de protection contre la foudre [36]

Niveau de protection contre la foudre	I	II	III	IV
La valeur de crête du courant I [kA]	3	5	10	16
Le rayon de la sphère roulante r [m]	20	30	45	60
La probabilité de décharge P [%]	1	3	9	16

1.3.2.2 Méthode de maillage

La méthode de maillage ne peut être appliquée qu'aux structures qui possèdent des conducteurs aériens (nus) maillés verticalement et/ou horizontalement appelés terminaisons aériennes [36]. La structure doit être couverte par un système de terminaison aérienne conformément à la CEI 62305-3 [37]. La méthode est basée sur celle de la sphère roulante, qui donne l'affaissement entre les fils maillés. L'espacement est réduit à une si petite distance que l'affaissement est négligeable.

Les tailles de maillage pour chaque niveau de protection contre la foudre sont présentés dans le tableau 1.5.

TABLE 1.5: Valeurs de la taille du maillage correspondants aux chaque niveaux de protection contre la foudre [36]

Niveau de protection contre la foudre	Taille de la maille [m × m]
I	5 × 5
II	10 × 10
III	15 × 15
IV	20 × 20

1.3.2.3 Méthode de l'angle de protection

La figure 1.11 montre les hypothèses fondamentales de la méthode de l'angle de protection en considérant une tige dite électrode de Franklin. Selon le modèle de la sphère roulante, la limite du volume protégé est donnée par un arc d'un cercle. L'angle de protection α est choisi de telle sorte que l'aire $A1$ et l'aire $A2$ sont égales. Le volume protégé résultant prends la forme d'un cône. Pour une tige de hauteur h [m], et pour une sphère roulante de rayon r [m], l'angle de protection α [rad] est donné par la formule suivante [36] :

$$\alpha = \arctan\left\{\frac{\sqrt{2rh - h^2}}{h} + \frac{h\sqrt{2rh - h^2}}{h^2} - \frac{r^2}{h^2} \arccos\left(1 - \frac{h}{r}\right)\right\} [\text{rad}] \quad (1.4)$$

L'angle de protection α dépend de la hauteur h au-dessus d'un plan de référence. Seulement pour les structures simples, le plan de référence est égal à la surface de la

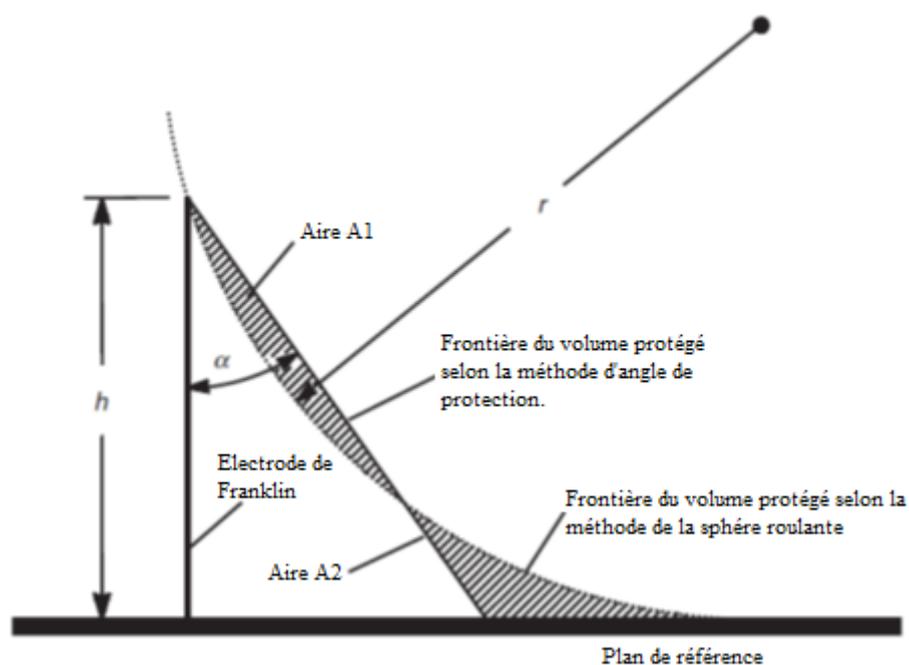


FIGURE 1.11: Zones protégées contre la foudre d'après les méthodes de la sphère roulante et de l'angle de protection [36]

terre. Pour les structures plus complexes, des plans de référence supplémentaires doivent être définis. La méthode des angles de protection est donc limitée aux structures simples. Cette méthode ne peut pas être appliquée si la hauteur h est supérieure au rayon r de la sphère roulante [30, 36].

1.3.3 Système de protection contre la foudre

La protection contre la foudre est une nécessité pour éviter les effets engendrés par ce phénomène. Pour cela, différents systèmes sont dimensionnés et installés par rapport à la taille et aux caractéristiques du système à protéger.

1.3.3.1 Protection des lignes et des postes électriques

Pour le réseau de transport d'énergie électrique, deux types de protection sont généralement prévus :

La protection primaire : constituée d'un câble de garde pour les lignes de transport d'énergie et une cage maillée (cage de Faraday) pour les postes aériens THT et HT.

Paratonnerre : Le paratonnerre est un dispositif de capture de foudre fabriqué et installé de telle sorte qu'il résiste aux intempéries. Certains paratonnerres sont équipés d'un dispositif d'amorçage pour augmenter la possibilité de capter la foudre [38].

Fils tendus de protection : Certains constructions sont équipés des fils tendus permettant d'augmenter la protection contre la foudre. Ces fils constituent un ensemble de conducteurs tendus au dessus des installations à protéger. Avant d'installer ces conducteurs, une étude doit être effectuée tenant en compte notamment de la tenue mécanique, de la nature de l'installation, des distances d'isolement, ... etc [34].

Câbles de garde : Le câble de garde est un conducteur de protection installé dans les lignes de haute tension avec une hauteur supérieure à celle des conducteurs de la ligne afin de créer une zone de protection pour les conducteurs de la ligne de haute tension. Pour capter la foudre, le rayon du conducteur de garde doit être faible par rapport à celui des conducteurs de phase [34].

La protection secondaire : Il s'agit d'un dispositif destiné à protéger les récepteurs électriques contre les surtensions d'origine atmosphérique comme les parafoudres et les éclateurs.

Les éclateurs sont des systèmes de protection placés aux bornes de l'isolateur de la ligne ou aux bornes de l'entrée des transformateurs. Il s'agit de deux conducteurs l'un est relié au conducteur de phase et l'autre est relié à la terre, séparés d'une distance bien étudiée pour créer un arc entre les deux bornes en cas des surtensions transitoires. Une fois l'arc amorcé, le courant de foudre sera écoulé vers la terre. Par ailleurs, le courant de court-circuit entre la phase et la terre sera coupé par le disjoncteur.

Les parafoudres sont des dispositifs statiques chargés de limiter, en un point donné du réseau, l'amplitude des surtensions susceptibles d'y apparaître. Le parafoudre possède le même principe de fonctionnement que l'éclateur, sauf que l'air est remplacé par des matériaux créant un chemin pour l'arc dite partie active de parafoudre. Il existe aujourd'hui deux types de parafoudres sur le marché.

Le premier est parafoudre au carbure de silicium et à éclateurs dont la partie active est constituée d'éclateurs et de varistances au carbure de silicium (SiC).

Dans le deuxième dénommé parafoudre à oxyde de zinc, la partie active est constituée uniquement de varistances à base d'oxyde de zinc (ZnO) [43].

1.3.3.2 Protection des immeubles

Les immeubles sensibles à la foudre sont protégés par une cage maillée dotée de paratonnerres pour capter la foudre. La figure 1.12 présente un exemple détaillant les composants d'un système de protection des immeubles contre la foudre [1]. Un tel système est composé principalement de trois composants : le dispositif captant le courant de foudre ; le conducteur de descente et le système de mise à la terre.

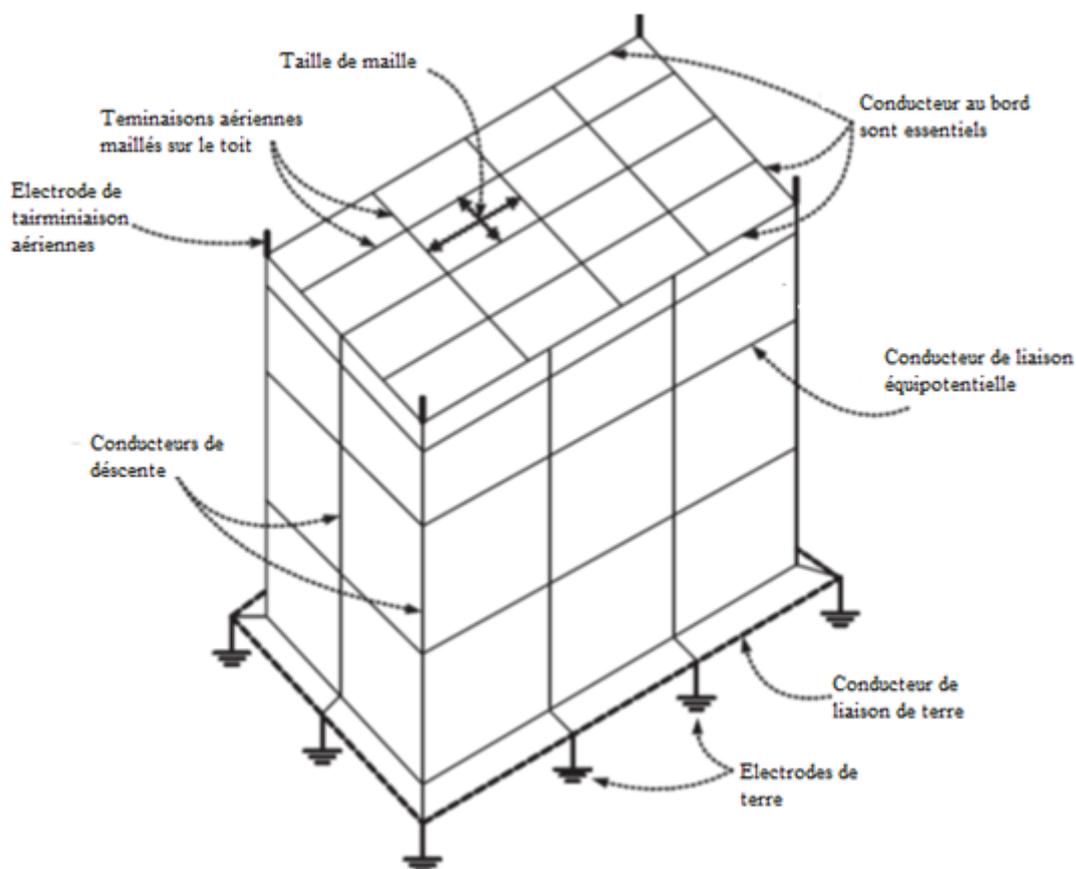


FIGURE 1.12: Composants du système de protection contre la foudre [34]

Dispositif de capture de foudre : Cette partie du système de protection comporte des terminaisons aériennes permettant d'intercepter la foudre. Pour les constructions, telles terminaisons sont constituées de conducteurs verticaux (paratonnerres) et/ou horizontaux (fils étendus) de faibles rayons et positionnés de manière à assurer l'interception de la foudre avec une probabilité élevée. La norme CEI 61024-1-2 [40] ne fournit aucun critère pour la sélection de tels conducteurs, car elle inclut les barres, les fils étirés et les conducteurs maillés.

La sélection d'un maillage approprié dépend du degré ou du niveau de protection requis. Les documents BS 6651 [44] et SS CP33 [45] proposent un maillage de $10\text{ m} \times 20\text{ m}$ pour une protection normale.

Conducteurs de descente : Une fois capté, le courant de foudre est dirigé, avec un maximum de sécurité, vers la terre via le conducteur de descente. Des précautions spéciales doivent être prises pour éviter les décharges latérales entre ce conducteur et les objets métalliques mis à la terre. Ces conducteurs doivent avoir une impédance aussi faible que possible pour faciliter la conduction.

Il est souhaitable d'avoir plusieurs conducteurs de descente autour d'un même bâtiment et sur les bords pour réduire le risque de claquage latéral pouvant créer des perturbations électromagnétiques sur les équipements électroniques installés à l'intérieur du bâtiment [36].

L'acier de construction du bâtiment et les barres d'armature sont de plus en plus conçus pour faire partie du système de conducteurs de descente par une liaison appropriée aux terminaisons aériennes et mise à la terre [1].

La mise à la terre : La mise à la terre s'effectue avec une ou de plusieurs électrodes de terre interconnectées entre elles. L'objectif est d'évacuer le courant de foudre dans le sol. Les semelles de grands bâtiments ou structures en béton armé fourniront généralement une meilleure mise à la terre que celle qui peut être fournie par des électrodes installés autour de la périphérie [1].

Des gradients de potentiel dangereux peuvent être produits au point d'injection du courant de foudre. La densité de courant décroît rapidement en éloignant de ce point d'impact. Pour diminuer le danger de l'élévation du potentiel à proximité d'un bâtiment, on place des électrodes de terre réparties symétriquement autour de la circonférence d'une structure et on les lie ensemble [27].

Pour un courant de décharge de foudre donné, l'amplitude de la surtension augmente avec l'impédance de terre. Dans le but de minimiser la surtension, l'impédance de terre doit être maintenue aussi faible que possible. Les normes et codes internationaux [44, 45] recommandent généralement 10Ω comme valeur de référence.

Il est à noter que les systèmes de protections secondaire comme les parafoudres et les éclateurs sont aussi utilisés.

1.4 Système de mise à la terre

Pour que le courant de foudre soit évacué vers la terre, sans provoquer des surtensions dangereuses, on doit relier les systèmes de protection extérieures (dispositif de capture du courant et conducteur de descente) de la foudre au système de mise à la terre. La forme ainsi que les dimensions seront choisies de sorte que le système de mise à la terre ne génère pas des surtensions dans son voisinage [46].

Dans la protection contre la foudre, le système de mise à la terre est composé de trois (03) éléments [36] :

- Le conducteur d'évacuation ;
- L'électrode enterrée dans le sol ;
- Le sol entourant l'électrode.

Etant donné que le sol entourant l'électrode fait partie du système de mise à la terre, ces paramètres électriques doivent être pris en considération lors de l'étude du comportement d'un tel système.

1.4.1 Conducteur de terre

Une prise de terre est habituellement composée d'une ou de plusieurs électrodes verticales, horizontales et/ou une grille pour établir un chemin de faible résistance [5] (un chemin de faible impédance [6]) vers le sol.

La forme des conducteurs de terre dépend de l'emplacement physique des appareils et des structures métalliques en voisinage du système de terre. Par exemple, la prise de terre d'un poste de transformation ou de distribution est généralement constituée d'un réseau maillé de conducteurs enfouis dans le sol et formant le treillis du poste. Les éléments des systèmes de mise à la terre doivent être interconnectés pour une participation de tous les éléments dans la dissipation du courant au sol [47].

1.4.2 Caractéristiques du sol

Le sol est constitué des composants solides possédant des substances organiques immergés dans un milieu contenant des solutions aqueuses et des interfaces d'air comme présenté sur la figure 1.13 .

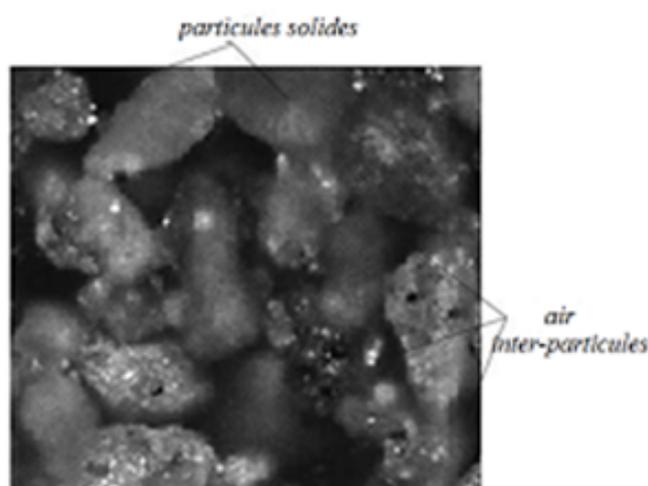


FIGURE 1.13: Structure du sol [3]

Electriquement, le sol se caractérise par trois paramètres [38, 48] : la Résistivité ρ_s , la Permittivité ϵ_s et la Perméabilité μ_s .

1.4.2.1 Résistivité ρ_s

La résistivité est un paramètre représente la cappacité du matéiaux à s'opposer par rapport à l'opposition du courant. La résistivité des matériaux ne dépend pas de leur géométrie. Cependant le sol, nous n'est pas composé d'un matériau unique. Il est constitué d'un ensemble de grains séparés soit par des interfaces d'air ou des solutions aqueuses [1].

La résistivité du sol dépend de plusieurs facteurs à savoir [48] :

- Le type du sol (l'argile, limon, grès et de granit);
- Les dimensions des grains constituant le sol;
- La porosité de la structure du sol;
- Le pourcentage d'eau contenu dans le sol;
- Le contenu chimique des grains constituant le sol (acide/base);
- La température.

Le Tableau 1.6 suivant présente certains valeurs de la résistivité pour quelques types du sol.

TABLE 1.6: Résistivité de différents types du sol [3]

Type du sol	Valeur de la résistivité [Ωm]
Alluvium	5
Poterie	10
Tourbe, tourbe, marais	20
Terre rurale noire, argile	50
Sol crétacé, argile	60
Argile sable	100
Loess	200
Argile avec du sable	300
Sol pierreux	400
Sable gravier	1000
Tchad, gravier	5000
Terre rocheuse	5000
Granite	200000
Béton dans l'eau	40-55
Béton en sol humide	100-200
Béton en sol sec	500-1300
Béton à l'air sec	12 000-18 000

1.4.2.2 Permittivité ϵ_s

La permittivité relative du sol modélise l'effet de la polarisation du sol dans lequel le système de terre est installé. La permittivité du sol dépend de la composition chimique du sol, de l'humidité, de la pression et de la température [3].

Dans le Tableau 1.7 nous présentons les valeurs des permittivités relatives pour différents types du sol.

TABLE 1.7: Permittivité relative pour différents types du sol [3]

Type du sol	Permittivité relative du sol
sol	2 – 20
Argile	9,5 – 10
Roche de carbone	8 – 8,6
Roche de sable	4,9
Amphibolite	7,9 – 8,9
Gneiss	8 – 15
Roche de quartz	4,4
Marbre	7
Roche de schiste	8,9 – 9
Basalte	15,6
Gabbro	8,8 – 10
Granite	5,4
Diabase	11,8
Diorite	5 – 6,3

Conformément au rapport 229-6 [38], établie par l'assemblée des radiocommunications de l'Union Internationale des Télécommunications présentant les caractéristiques électriques du sol, la conductivité du sol (l'inverse de la résistivité) ainsi que la permittivité relative du sol augmentent avec l'augmentation de la teneur en eau du sol comme illustré sur la figure 1.14. Alors, la diminution de la résistivité du sol engendre une augmentation de la permittivité relative.

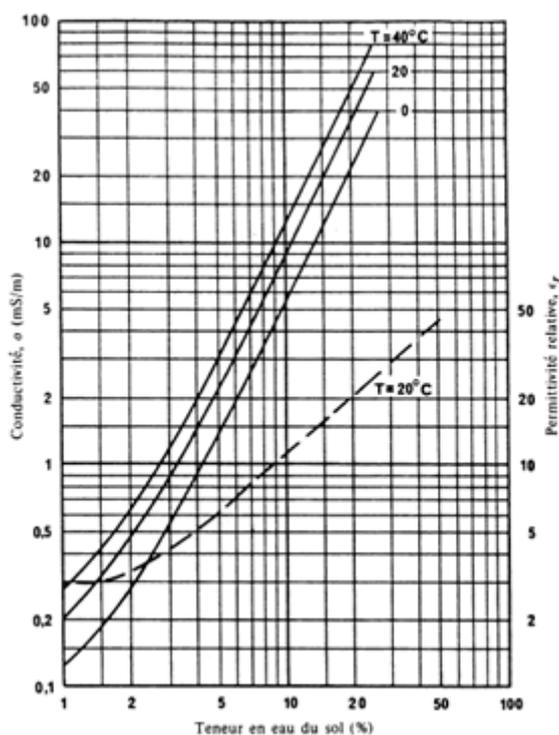


FIGURE 1.14: Variation de la conductivité du sol (en lignes continues) et de la permittivité relative (en ligne discontinue) en fonction de la teneur en eau du sol [38]

1.4.2.3 Perméabilité μ_s

La perméabilité caractérise le comportement magnétique du sol. En général, le sol est considéré non magnétique [1, 3, 10, 22] sauf dans le cas où il contient quelques roches riches en oxyde de fer ou magnétite.

1.4.2.4 Caractérisation électromagnétique du sol

Pour un courant donné de fréquence f [Hz], injecté dans un conducteur aérien, la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique est définie par la relation suivante [49] :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}} [m/s] \quad (1.5)$$

La longueur d'onde est définie [49] :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{f \sqrt{\mu \varepsilon}} [m] \quad (1.6)$$

Pour le cas d'une électrode de mise à la terre, des pertes d'énergie transmises dans l'électrode seront engendrées par effet de la conduction du sol. Pour cela, la vitesse de propagation de l'onde v_s sera donnée par [49] :

$$v_s = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu \varepsilon_s}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f)^2 \rho_s^2 \varepsilon_s^2}} + 1 \right)}} [m/s] \quad (1.7)$$

De ce fait, la longueur d'onde électromagnétique λ_s de fréquence donnée f devient [19] :

$$\lambda_s = \frac{1}{f \sqrt{\frac{\mu \varepsilon_s}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f)^2 \rho_s^2 \varepsilon_s^2}} + 1 \right)}} [m] \quad (1.8)$$

1.4.3 Modélisation des systèmes de mise à la terre

Le courant de foudre est caractérisé par une amplitude et une fréquence élevées. Sa longueur d'onde, qui est inversement proportionnelle à sa fréquence est faible. Les dimensions du système de mise à la terre seront comparables avec la longueur d'onde du courant injecté [10]. Dans ces conditions, le système de mise la terre ne peut en aucun cas être modélisé par une résistance. Pour ce faire, plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature dont les plus populaires sont : la méthode des éléments

finis, la méthode des antennes, la méthode des circuits équivalents aux éléments partiels et la méthode des lignes de transmission.

1.4.3.1 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est basée sur l'application systématique des formulations intégrales pour résoudre les équations de Maxwell [50]. Cette résolution permet d'obtenir le potentiel vectoriel magnétique (A) et le potentiel scalaire électrique (V). Ces deux paramètres (A et V) décrivent des phénomènes physiques mis en jeu en variant la fréquence de quelques Hz à plusieurs MHz .

Nekhoul *et al.* [10] ont développé un premier travail basé sur celui de Biro *et al.* [51]. L'objectif était de modéliser le comportement des systèmes de mise à la terre en basse fréquence en utilisant la MEF. Le courant de déplacement a été pris en compte. Les formulations A et/ou V adoptées sont illustrées sur la figure 1.15. Elles dépendent de l'environnement en question (air ou sol), considéré isotrope, homogène et linéaire.

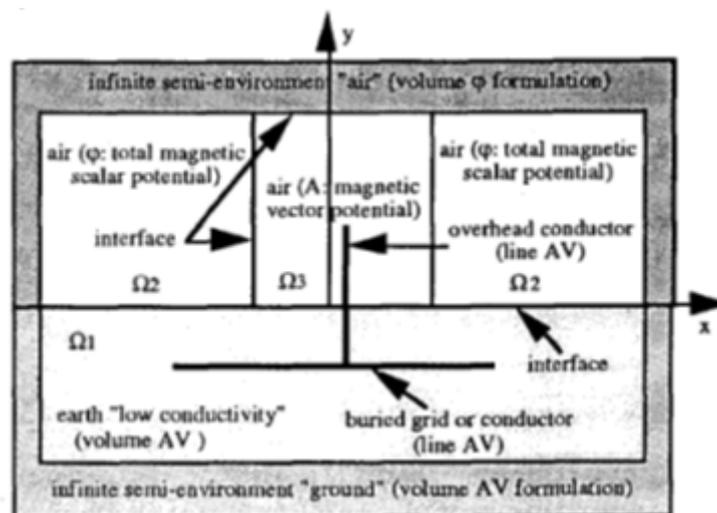


FIGURE 1.15: Configuration de mise à la terre étudiée par Nekhoul *et al.* [10]

Ces auteurs ont estimé le champ électromagnétique généré par une grille de mise à la terre soumise au courant de court-circuit ou un courant de foudre. Les résultats obtenus ont été confrontés avec succès à ceux trouvés par Dawalibi *et al.* [52].

Dans une autre investigation [9], Nekhoul *et al.* ont utilisé la méthode des éléments finis pour étudier le comportement d'une électrode verticale couverte par un sol de faible résistivité à base de bentonite. Les auteurs se sont intéressés à la variation de l'impédance en fonction de la fréquence. Les courants de Foucault dans les conducteurs enterrés et l'ionisation du sol autour de ces conducteurs ont été pris en compte. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux expérimentaux manœuvrés par les mêmes auteurs. Le comportement de l'électrode de terre étant inductif.

La MEF a été également exploitée par Akbari *et al.* [11] en utilisant une approche pleine onde. Le comportement transitoire des électrodes (verticales et horizontales) et des grilles de mise à la terre a été analysé. Le courant du premier coup foudre ou de

coup de foudre subséquent a été injecté. La variation de l'impédance des systèmes de mise à la terre a été étudiée en fonction de la fréquence ainsi que le potentiel transitoire, en présence et en absence la dépendance en fréquence des paramètres électriques du sol.

1.4.3.2 Méthode des antennes

Le calcul du champ électromagnétique rayonné (émis) par une antenne ou le calcul des courants (ou potentiel) induits (reçus) par excitation se fait par résolution d'une équation intégrale en champ électrique ou en champ magnétique dans une large gamme de fréquence. Ce formalisme fréquentiel, nommé "des antennes", englobe aussi bien les antennes aériennes qu'enterrées avec prise en compte de l'interface sol-air. Le principe de cette méthode consiste en la résolution des équations de Maxwell sous leurs formes différentielle en utilisant la méthode des différences finies (FDTD) ou intégrale en employant la méthode des moments (MoM).

La FDTD est basée sur la résolution des équations de Maxwell sous leur forme différentielle discrétisée dans le domaine temporel. Cette méthode offre une grande simplicité pour effectuer des algorithmes d'intégration numérique. Cette méthode permet aussi de traiter les phénomènes non-linéaires dans des milieux hétérogènes [53]. Pour cela, plusieurs travaux ont utilisé cette méthode pour étudier la réponse transitoire des systèmes de mise à la terre [54–56].

La MoM est basée sur la résolution des équations de Maxwell sous leurs formes intégrales. Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Grcev [57] pour analyser le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre. De nombreuses investigations ont étudié la réponse transitoire des électrodes de mise à la terre en utilisant la méthode des moments [58–60].

1.4.3.3 Méthode des circuits équivalents aux éléments partiels (PEEC)

La méthode de PEEC est basée sur l'utilisation des formes intégrales des équations de Maxwell [17, 61]. Dans ces investigations, le champ à la surface d'électrode mince a été estimé. Tous les charges et les courants électriques dans le conducteur sont considérés distribués le long de l'axe du contour $C(\vec{r})$ comme illustré sur la figure 1.16. Ce contour est divisé en petits segments comme le montre la même figure [18].

Les conducteurs sont représentés par une série de cellules. Chaque cellule est modélisée par le circuit équivalent de la figure 1.17 dont r est la distance entre le point d'origine (point d'observation) et le point d'évaluation.

L'objectif de la méthode de PEEC est de déterminer, à partir de la formulation du champ électrique, l'impédance série $Z_{L\ mn}$ et celle transversale $Z_{T\ ki}$ pour chaque segment.

Yutthagowith *et al.* [18] ont utilisé la méthode de PEEC en considérant ou non l'image du courant de conduction le long de l'électrode. Les auteurs se sont intéressés aux répartitions du courant et du potentiel transitoires dans le cas des électrodes verticales,

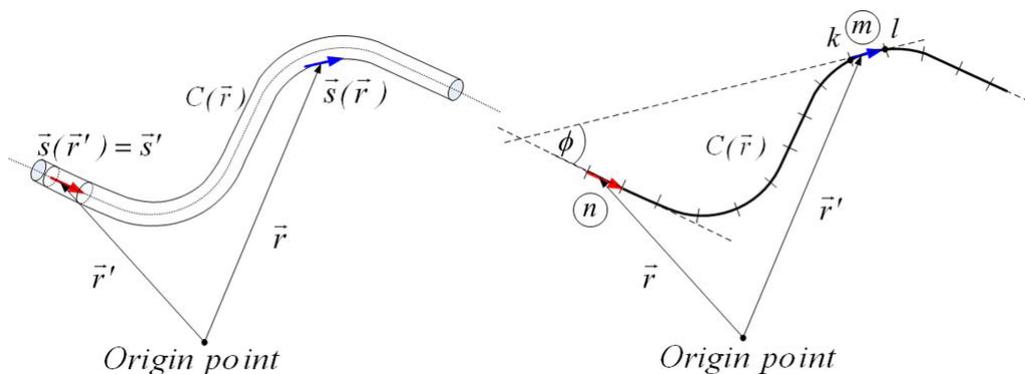


FIGURE 1.16: Géométrie du problème selon la méthode de PEEC [18]

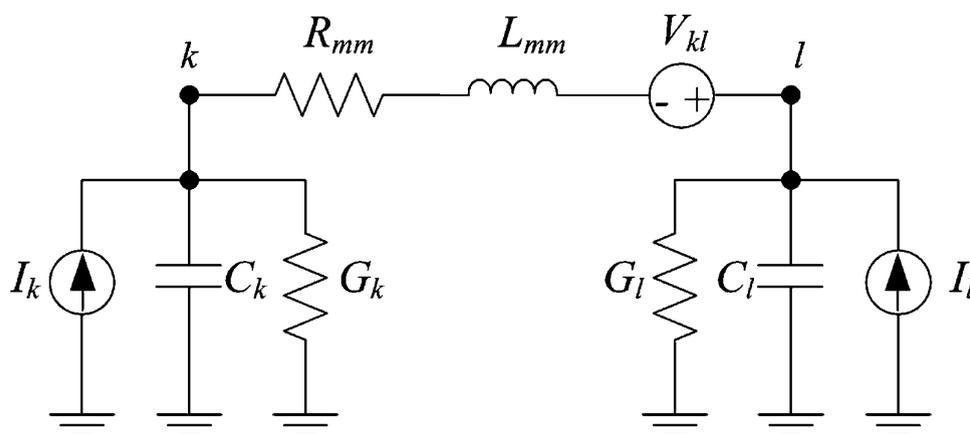


FIGURE 1.17: Circuit équivalent de la cellule de PEEC [18]

horizontales et des grilles de mise à la terre soumises à un courant impulsionnel. Les résultats obtenus sont en bonne concordance avec ceux expérimentaux de EDF [8] et de Theethayi *et al.* [62], ainsi qu'avec des résultats numériques utilisant MoM [12] et FDTD [62].

1.4.3.4 Méthode des lignes de transmission

La modélisation des systèmes de mise à la terre par des lignes de transmission a été proposée pour la première fois par Sunde [22]. Le principe de cette méthode consiste à diviser le conducteur de mise à la terre de longueur ℓ en plusieurs segments $\Delta\ell$. La longueur du segment doit vérifier la condition $\Delta\ell \ll \lambda_s/10$, où λ_s est la longueur d'onde du courant injecté [19]. La modélisation de l'électrode par une ligne de transmission se fait aussi bien dans le domaine fréquentiel, que dans domaine temporel. Cette méthode sera détaillée dans les chapitres 2 et 3.

1.5 Conclusion

Etant donné le caractère destructif de la foudre, l'installation des systèmes de protection s'avère indispensable. De tels systèmes doivent être aptes à capter le courant de

foudre et l'évacuer vers la terre à travers un système de mise à la terre. Le comportement transitoire de ce dernier doit être soigneusement modélisé et étudié en utilisant notamment la méthode : (1) des éléments finis (FEM), (2) des Antennes (ATM), (3) des circuits équivalents aux éléments partiels (PEEC) et (4) des lignes de transmission (TLM). Les principaux travaux rapportés dans la littérature se sont surtout focalisés sur la détermination de l'impédance du système de mise à la terre en faisant varier la fréquence du courant impulsionnel injecté, ou alors sur l'estimation du potentiel transitoire même l'impédance transitoire dans le domaine temporel.

Chapitre 2

Impédance des électrodes de mise à la terre en fonction de la fréquence

2.1 Introduction

L'étude du comportement des électrodes de mise à la terre en fonction de la fréquence a fait l'objet d'une multitude d'investigations. Une électrode de terre est modélisée en basse fréquence par une résistance [5]. Ce comportement pourrait devenir capacitif ou inductif lorsque la fréquence augmente indéfiniment [6]. En effet, plusieurs travaux ont été effectués dans le but d'étudier la variation du module de l'impédance des systèmes de terre en fonction de la fréquence [9–11, 13, 14].

Ce chapitre porte sur l'étude des impédances des électrodes de terre en fonction de la fréquence. Nous nous sommes intéressés, en premier lieu, à l'étude du comportement des électrodes verticales et horizontales installées dans un sol homogène. La variation du module de l'impédance d'une électrode verticale ou horizontale de mise à la terre a été étudiée ainsi que les composantes réelle et imaginaire de cette impédance. La variation du module de l'impédance le long de l'électrode y sera également présentée. Nous présentons aussi l'impact de l'injection du courant au point milieu sur l'impédance de l'électrode. A la fin, nous présentons l'évolution du module de l'impédance des électrodes de terre enterrés dans sol stratifié verticalement en deux couches.

2.2 Théorie des lignes de transmission. Module de l'impédance de mise à la terre

De fait que la longueur de l'onde injectée λ est très inférieure à la longueur de l'électrode de terre ℓ ($\lambda \ll \ell$), les lois classiques de l'électricité ne s'appliquent plus [63, 64, 67]. Sunde [22] a modélisé des conducteurs de mise à la terre par des lignes de transmission (TLM). Il a étudié le comportement des systèmes de mise à la terre dans les domaines fréquentiel et temporel.

Le principe de cette méthode (TLM) consiste à diviser le conducteur de mise à la terre de longueur ℓ en plusieurs segments de longueur $\Delta\ell$. Pour tenir compte de l'effet des ondes incidentes et réfléchies et masquer la propagation [34], la longueur du segment doit vérifier la condition suivante : $\Delta\ell \ll \lambda/10$ où λ est la longueur d'onde du courant injecté [19].

Chaque segment du conducteur de mise à la terre est modélisé par une ligne de transmission comme le montre la figure 2.1. La résistance linéique longitudinale d'un segment R [Ω/m] modélise les pertes par effet joule dans le conducteur. L'inductance linéique longitudinale d'un segment L [H/m] simule l'effet du champ magnétique généré par l'électrode. La conductance linéique transversale d'un segment G [S/m] représente les pertes par effet joule dans le sol. Finalement, la capacitance linéique transversale d'un segment C [F/m] correspond à l'effet du champ électrique généré par l'électrode.

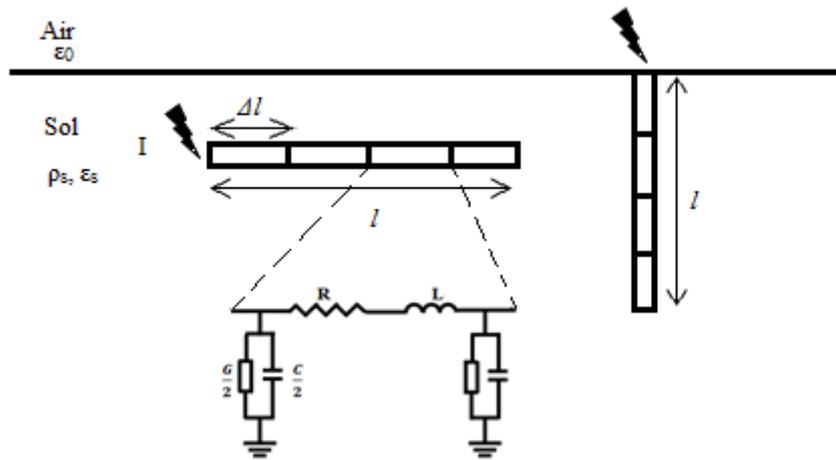


FIGURE 2.1: Modèle de ligne de transmission

Les expressions des différents paramètres R , L , G et C sont représentées dans le Tableau 2.1 pour des électrodes verticale et horizontale [7, 13].

TABLE 2.1: Paramètres de la ligne de transmission

	Electrode horizontale [7]	Electrode verticale [13]
R	$\rho_c \frac{\Delta\ell}{\pi r^2}$	$\rho_c \frac{\Delta\ell}{\pi r^2}$
L	$\frac{\mu\Delta\ell}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{2\ell}{d}\right) + \ln\left(\frac{\ell}{2h}\right) \right\}$	$\frac{\mu\Delta\ell}{2\pi} \left\{ \ln\left(\frac{2\ell}{r}\right) - 1 \right\}$
$\frac{G}{2}$	$\frac{\pi}{\rho_s} \frac{\Delta\ell}{\ln\left(\frac{2\ell}{d}\right) + \ln\left(\frac{\ell}{2h}\right)}$	$\frac{\pi}{\rho_s} \frac{\Delta\ell}{\left\{ \ln\left(\frac{4\ell}{r}\right) - 1 \right\}}$
$\frac{C}{2}$	$\pi\epsilon_0\epsilon_s \frac{\Delta\ell}{\ln\left(\frac{2\ell}{d}\right) + \ln\left(\frac{\ell}{2h}\right)}$	$\pi\epsilon_0\epsilon_s \frac{\Delta\ell}{\left\{ \ln\left(\frac{4\ell}{r}\right) - 1 \right\}}$

ρ_c [Ωm] : résistivité du conducteur ; $\Delta\ell$ [m] : longueur du segment ; r [m] : rayon du conducteur ; d [m] : diamètre du conducteur ; ℓ [m] : longueur totale du conducteur ; h [m] : profondeur d'enterrement du conducteur horizontal ; ρ_s [Ωm] : résistivité électrique du sol ; ϵ_0 [F/m] permittivité diélectrique du vide ; ϵ_s : permittivité diélectrique relative du sol et μ [H/m] : perméabilité magnétique du sol.

Partant de ce modèle, et pour une fréquence f donnée, deux paramètres caractérisant la propagation des ondes électromagnétiques dans le système de mise à la terre sont à définir : l'impédance caractéristique Z_c (qui consiste en le rapport de la tension sur le courant au cours de la propagation progressive) [66, 67] et la constante de propagation γ . Ces deux paramètres sont définis comme suit [68] :

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.1)$$

$$Y = \sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.2)$$

Les paramètres R , L , G et C ont été déjà présentés dans le Tableau 2.1 et ω est la pulsation du courant définie par $\omega = 2\pi f$.

Pour une électrode de terre de longueur l modélisée par une ligne de transmission, V_e et I_e sont respectivement la tension et le courant d'entrée de la ligne de transmission (donc de l'électrode) et V_s et I_s désignent la tension et le courant de sortie de la même ligne.

Le système matriciel relatif à la représentation des lignes de transmission peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_e \\ I_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La matrice $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch(\gamma l) & Z_c sh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} sh(\gamma l) & ch(\gamma l) \end{bmatrix}$ contient les paramètres de la ligne de transmission [69].

Une électrode de mise à la terre est modélisée par une la ligne de transmission à extrémité ouverte ; le courant de sortie est nul soit $I_s = 0$ [70]. Dans ces conditions :

$$V_e = A V_s = ch(\gamma l) V_s \quad (2.4)$$

$$I_e = C V_s = \frac{1}{Z_c} sh(\gamma l) V_s \quad (2.5)$$

Etant donné que l'impédance du système de mise à la terre consiste en le rapport entre la tension et le courant à l'entrée de l'électrode (V_e et I_e respectivement), l'expression correspondante se met sous la forme suivante [68] :

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{ch(\gamma l) V_s}{\frac{1}{Z_c} sh(\gamma l) V_s} = Z_c coth(\gamma l) \quad (2.6)$$

2.3 Etude du module de l'impédance d'une électrode verticale enfouie dans un sol homogène

2.3.1 Cas d'une électrode verticale de terre

La variation du module de l'impédance d'entrée d'une électrode verticale a été examinée dans l'intervalle [10 Hz-10 MHz], et ce en utilisant de la relation 2.6. Pour cela, trois différentes longueurs de l'électrode ont été choisies à savoir 2, 10 et 30 m. Pour chaque longueur, trois résistivités (100, 1000 et 4000 Ωm) et trois permittivités relatives (40, 20 et 8) du sol homogène ont été considérées.

Cette électrode est enterrée de manière à ce que l'extrémité supérieure est au même niveau que le sol, formant ainsi une interface air-conducteur-sol tandis que l'extrémité inférieure est plongée complètement dans le sol comme illustrée sur la figure 2.2. L'injection du courant de foudre se fait donc au niveau de l'interface air-conducteur-sol.

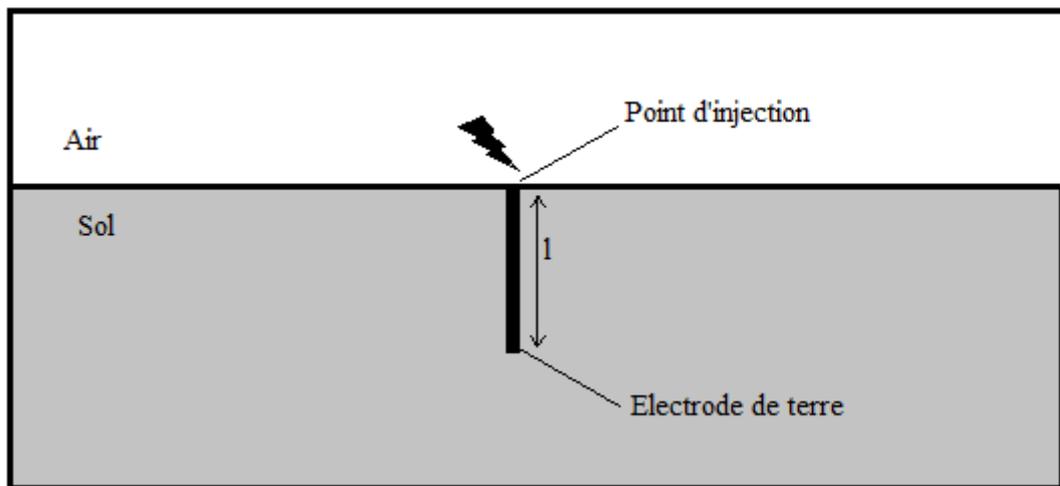


FIGURE 2.2: Electrode de mise à la terre étudiée

Les résultats pour les longueurs 2, 10 et 30 m sont présentés sur les figures 2.3, 2.4 et 2.5 respectivement. Pour ces trois figures, la désignation (a) est réservée pour la résistivité $\rho_s=100 \Omega m$, (b) pour $\rho_s=1000 \Omega m$ et (c) pour $\rho_s=4000 \Omega m$.

Dans le cas de l'utilisation d'un sol de résistivité de 100 Ωm , l'impédance en module reste constante pour les fréquences inférieures à 0,5 MHz. Elle correspond à la valeur de la résistance de mise à la terre (56,2 Ω). A partir de la fréquence de 0,5 MHz, l'impédance commence à diminuer jusqu'à atteindre une valeur minimale de 15,64 Ω obtenue pour 4,2 MHz. Cette diminution traduit le comportement capacitif que possède l'électrode. Au-delà de 4,2 MHz, l'impédance commence à augmenter jusqu'à atteindre 117,4 Ω suite au comportement cette fois-ci inductif du système de mise à la terre. La diminution observée pour les fréquences dépassant 8,8 MHz reflète, en fait, l'effet capacitif apparaissant de nouveau.

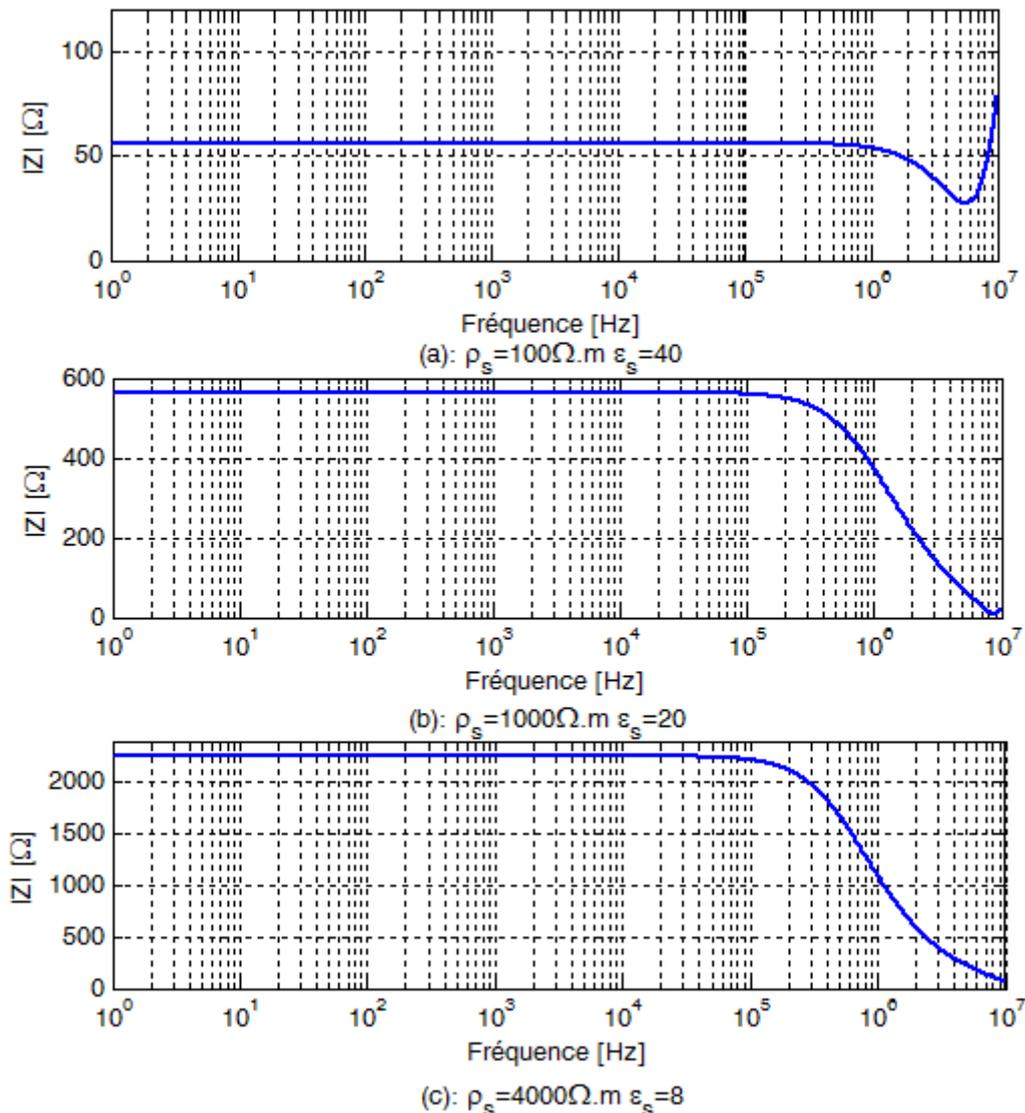


FIGURE 2.3: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de longueur 2 m et pour différentes résistivités du sol

La même figure 2.3 montre que l'électrode en question possède un comportement capacitif lorsqu'elle est enterrée dans un sol très résistif (1000 et 4000 Ωm). La résistance (l'impédance à base fréquence) est de 567,7 Ω et 2251 Ω respectivement pour 1000 et 4000 Ωm . A partir de 0,2 MHz et 0,1 MHz respectivement pour 1000 et 4000 Ωm , le comportement capacitif commence à apparaître du fait que l'impédance commence à diminuer. Cette diminution s'accroît en fonction de l'accroissement de la fréquence.

Avec l'augmentation de la fréquence du courant injecté, l'électrode de mise à la terre de longueur 10 m (figure 2.4) installée dans un sol de 100 Ωm , possède d'abord un comportement purement résistif (résistance égale à 13,86 Ω) pour des fréquences inférieures à 0,1 MHz. Au-delà de cette fréquence, le comportement de l'électrode devient inductif suite à l'augmentation de l'impédance. Pour des fréquences dépassant 1,8 MHz, des ondulations apparaissent par effet de résonance, tout en gardant l'aspect inductif dans son comportement (impédance est toujours supérieure à la résistance de bases fréquences).

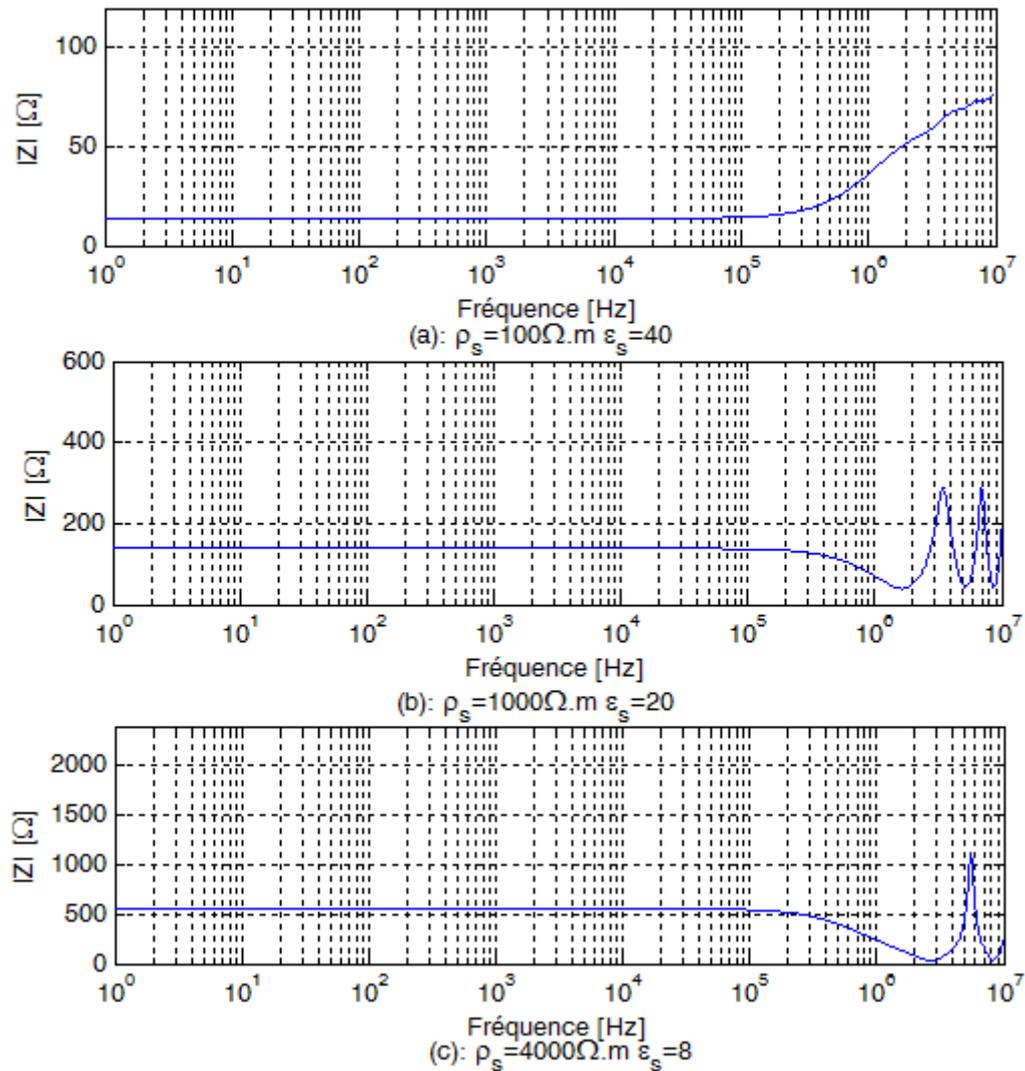


FIGURE 2.4: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de longueur 10 m et pour différentes résistivités du sol

Dans le cas où l'électrode est enterrée dans un sol de résistivité de $1000 \Omega m$, son comportement est purement résistif ($138,2 \Omega$), capacitif (impédance minimale de $47,25 \Omega$) puis inductif (impédance maximale de 288Ω) pour des fréquences appartenant à $[0-0,35 \text{ MHz}]$, $[0,35-1,8 \text{ MHz}]$ et $[1,8-3,4 \text{ MHz}]$ respectivement. Au-delà de ce dernier intervalle, le comportement de l'électrode devient oscillatoire entre les valeurs maximale et minimale susmentionnées.

L'électrode possède pratiquement un même comportement lorsqu'elle est enterrée dans un sol de $4000 \Omega m$ par rapport à celle enfouie dans le sol de $1000 \Omega m$. La différence est dans les intervalles de fréquences qui sont $[0-0,1 \text{ MHz}]$, $[0,1-2 \text{ MHz}]$ et $[2-5,5 \text{ MHz}]$ respectivement et dans les valeurs de l'impédance (résistance de basse fréquence est de $552,6 \Omega$, impédances minimale et maximale de $27,61 \Omega$ et 1094Ω respectivement).

L'électrode de longueur 30 m (figure 2.5) enterrée dans un sol de résistivité $100 \Omega m$ présente deux comportements distincts à savoir résistif (dont la résistance est de $5,3 \Omega$) pour les fréquences dans la gamme $[0-10 \text{ kHz}]$ et inductif ailleurs. Avec l'augmentation de la résistivité du sol ($1000 \Omega m$), le même comportement est observé. L'intervalle de

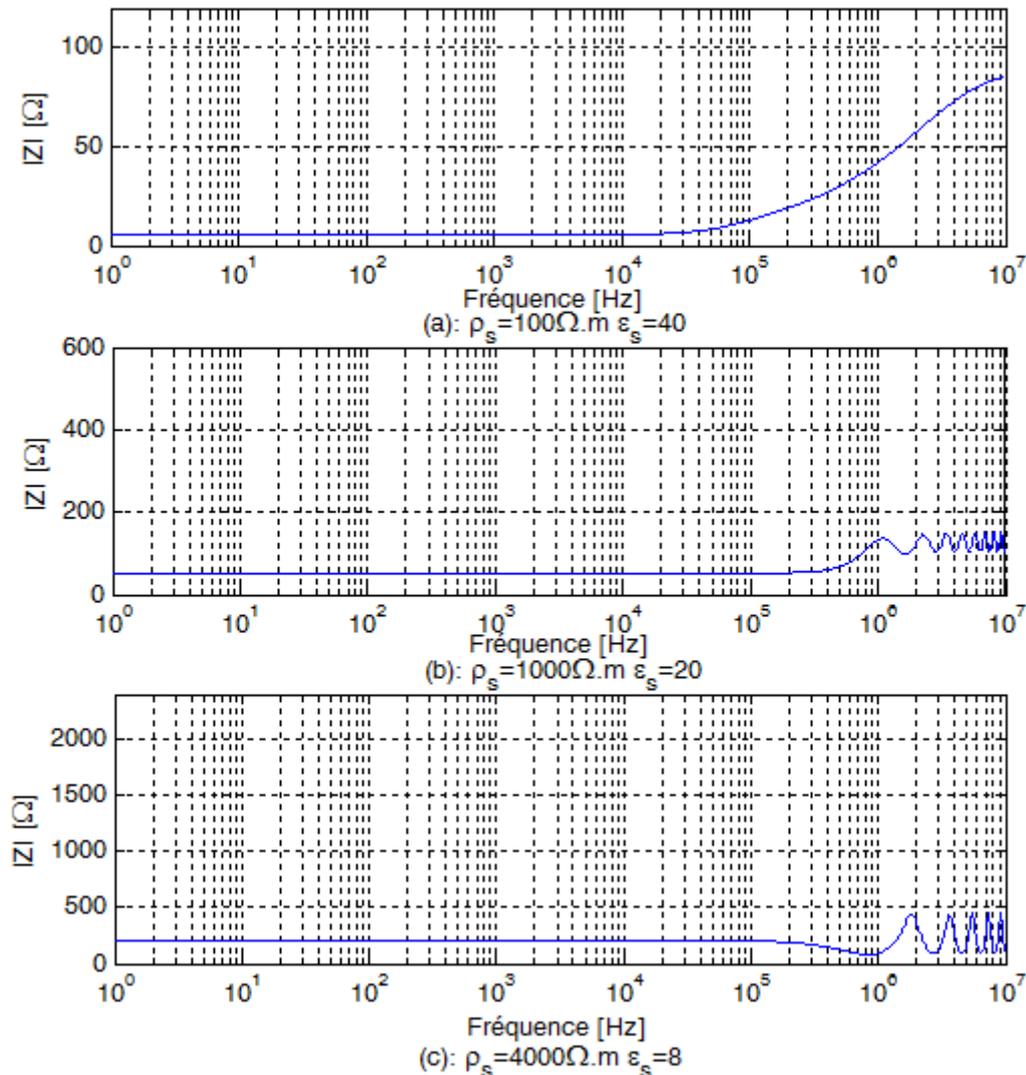


FIGURE 2.5: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour une électrode verticale de longueur 30 m et pour différentes résistivités du sol

fréquence pour lequel l'impédance est purement résistive (dont la résistance est de 53,5 Ω) est [0-0,16 MHz]. Au-delà de cet intervalle, le comportement de l'électrode devient inductif. Par ailleurs, des ondulations apparaissent par effet de résonance lorsque la fréquence dépasse 1,2 MHz. Le comportement général reste inductif du fait que l'impédance reste toujours supérieure à la résistance de bases fréquences.

Trois phases ont été observées quant au comportement de l'électrode enterrée dans un sol de résistivité de 4000 Ωm . Il est résistif (résistance égale à 203,6 Ω) pour les fréquences allant de 0 à 0,1 MHz, capacitif (impédance minimale équivaut à 78,8 Ω) entre 0,1 et 0,8 MHz et finalement inductif (impédance maximale de 422,2 Ω) entre 0,8 et 1,9 MHz. Au-delà de cette dernière fréquence, le comportement de l'électrode en question devient oscillatoire.

Il ressort des analyses des résultats présentés sur les figures 2.3 à 2.5, qu'une longue électrode enterrée dans un sol de faible résistivité est caractérisée par un comportement inductif dans les hautes fréquences. Par contre, une courte électrode de terre possède un

comportement capacitif si elle est enfouie dans un sol de forte résistivité. Le phénomène de résonance apparaît dans les hautes fréquences lorsqu'il s'agit d'une longue électrode enterrée dans un sol très résistif ou une très courte électrode enfouie dans un sol de faible résistivité.

2.3.2 Cas d'une électrode verticale enterrée avec profondeur

La variation saisonnière des paramètres électriques du sol a un impact sur les caractéristiques électriques des systèmes de mise à la terre. Pour cette raison, une conception d'un système de mise à la terre tenant compte de la variation des paramètres du sol a été étudiée dans [74] et [75]. De-Conti et Visacro [14] ont utilisé le modèle électromagnétique hybride (HEM) basé sur la théorie des antennes, détaillée dans un travail antérieur [76], pour déterminer la variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence (dans la gamme [0-10 MHz]). L'électrode verticale étudiée est enterrée avec une profondeur de 0,5 m pour éviter l'impact de la variation saisonnière de la résistivité du sol.

Dans cette partie, nous analysons la variation du module de l'impédance de la même configuration étudiée par De-Conti et Visacro [14] en utilisant la théorie des lignes de transmission.

Nous nous sommes intéressés à évaluer l'impédance d'entrée d'une électrode de terre de 2,4 m de longueur et 7,5 mm de rayon. La profondeur d'enfouissement est de 0,5 m. L'injection du courant se fait à cette profondeur via un câble isolé. L'électrode verticale en question est montrée sur la figure 2.6.

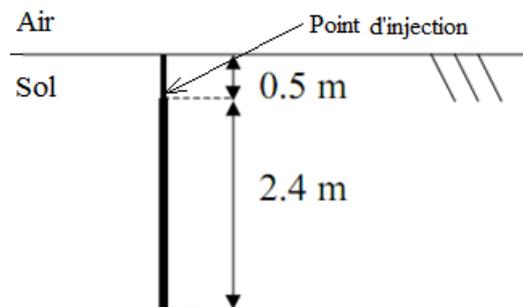


FIGURE 2.6: Configuration de l'électrode étudiée [14]

La conductance G [$\Omega.m^{-1}$] pour cette électrode a été calculée à l'aide de la formule suivante [77] :

$$G = \frac{2\pi}{\rho_s} \frac{\Delta\ell}{\ln\left(\frac{r}{\ell}\right) - \frac{1}{2}\ln\left(\frac{2h + \frac{3\ell}{2} + \sqrt{(2h + \frac{3\ell}{2})^2 + r^2}}{2h + \frac{\ell}{2} + \sqrt{(2h + \frac{\ell}{2})^2 + r^2}}\right)} \quad (2.7)$$

La capacitance C a été déterminée en utilisant l'expression suivante [14] :

$$C = \rho_s \varepsilon_s G \quad (2.8)$$

Le paramètre L ne dépend pas de la profondeur, car cette dernière n'a aucun effet sur la propagation du champ magnétique dans le milieu [3, 71, 72]. Ce paramètre a été calculé conformément au paramètre de l'inductance présenté dans le tableau 2.1.

Les résultats (consistant en le module de l'impédance) obtenus ont été comparés avec ceux trouvés par De-Conti et Visacro [14].

Dans un premier lieu, quatre valeurs relatives à la résistivité du sol ont été adoptées à savoir 2000, 1000, 500 et 100 Ωm . Le sol homogène considéré est caractérisé par une permittivité relative de 30. La même étude a été refaite pour une seule résistivité du sol de 1000 Ωm , et trois valeurs de permittivités relatives 5, 15 et 30. Les figures 2.7 (a) et (b) présentent les résultats quant à l'effet de la résistivité et de la permittivité relative du sol respectivement.

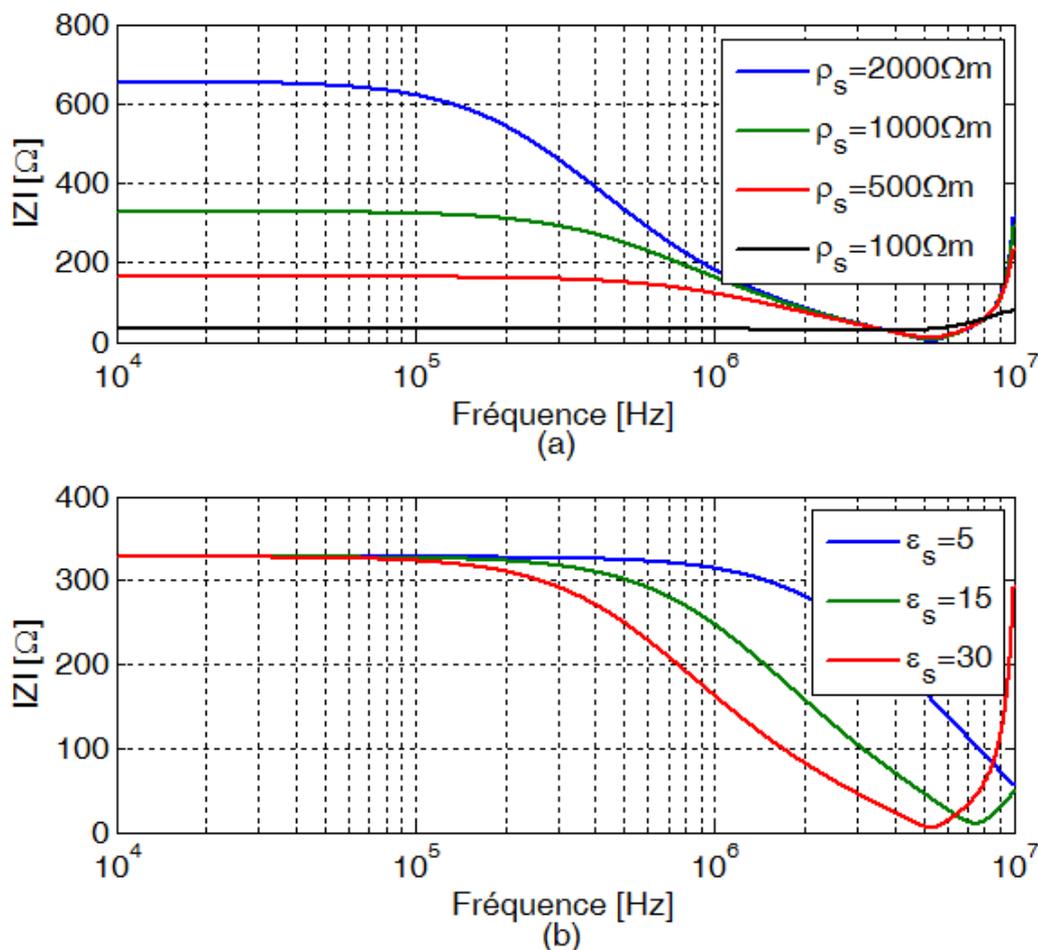


FIGURE 2.7: Variation du module de l'impédance d'une électrode verticale enterrée avec profondeur dans un sol homogène, (a) pour différentes résistivités du sol, (b) pour différentes permittivités du sol

Avec l'augmentation de la fréquence, trois comportements de l'électrode sont mis en évidence :

- La première phase correspond au comportement résistive dont lequel l'impédance (purement résistive) du système de mise à la terre reste constante. L'intervalle de fréquence correspondant augmente avec la diminution de la permittivité et/ou la résistivité du sol.
- La deuxième phase caractérise le comportement capacitif du système de mise à la terre lorsque l'impédance d'entrée diminue avec l'augmentation de la fréquence.
- La troisième phase reflète le comportement inductif dont lequel l'impédance augmente lorsque la fréquence atteint ou dépasse une fréquence critique dépendant uniquement de la permittivité du sol.

2.4 Etude du module de l'impédance d'une longue électrode horizontale en fonction de la fréquence

2.4.1 Analyse des composantes de l'impédance

Dans la présente partie, nous analysons la variation du module de l'impédance d'une électrode horizontale de longueur 100 m, enfouie avec une profondeur de 0,6 m. Divers types de sol ont été considérés dont la résistivité/permittivité relative est de $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$, $1000 \Omega m/20$ et $10000 \Omega m/5$.

La figure 2.8 présente la variation du module de l'impédance $|Z|$ en fonction de la fréquence.

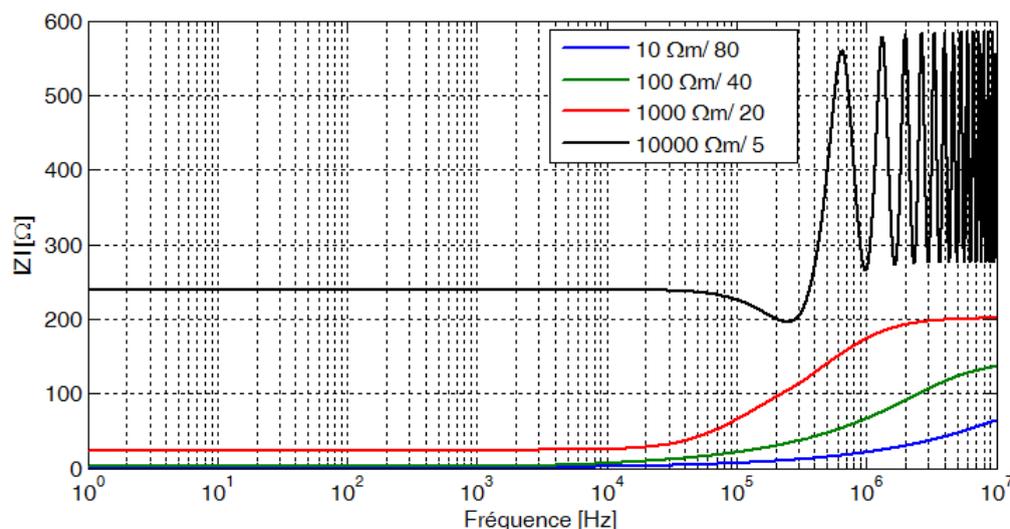


FIGURE 2.8: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents types de sol

Pour tous les types de sol, le module de l'impédance reste constant jusqu'à la fréquence 10^4 Hz. Au-delà de cette valeur, pour les sols $[10-1000 \Omega m/80-20]$, le module de l'impédance augmente avec l'augmentation de la fréquence. Cette augmentation montre le comportement inductif des longues électrodes de mise à la terre enfouies dans un sol caractérisé par $\rho_s < 1000 \Omega m / \epsilon_s > 20$.

Pour l'électrode enterrée dans un sol de $10000 \Omega m/5$, la variation du module de l'impédance possède une variation complètement différente. Au départ, le module de l'impédance diminue à cause du comportement capacitif. Ensuite, il augmente indiquant le changement du comportement de l'impédance au type inductif. Au-delà de la fréquence $0,8 \text{ MHz}$, des oscillations de même amplitude apparaissent.

Pour une meilleure explication, nous présentons sur la figure suivante les variations des parties réelle ($Re(Z)$) et imaginaire ($Im(Z)$) de l'impédance de l'électrode étudiée précédemment.

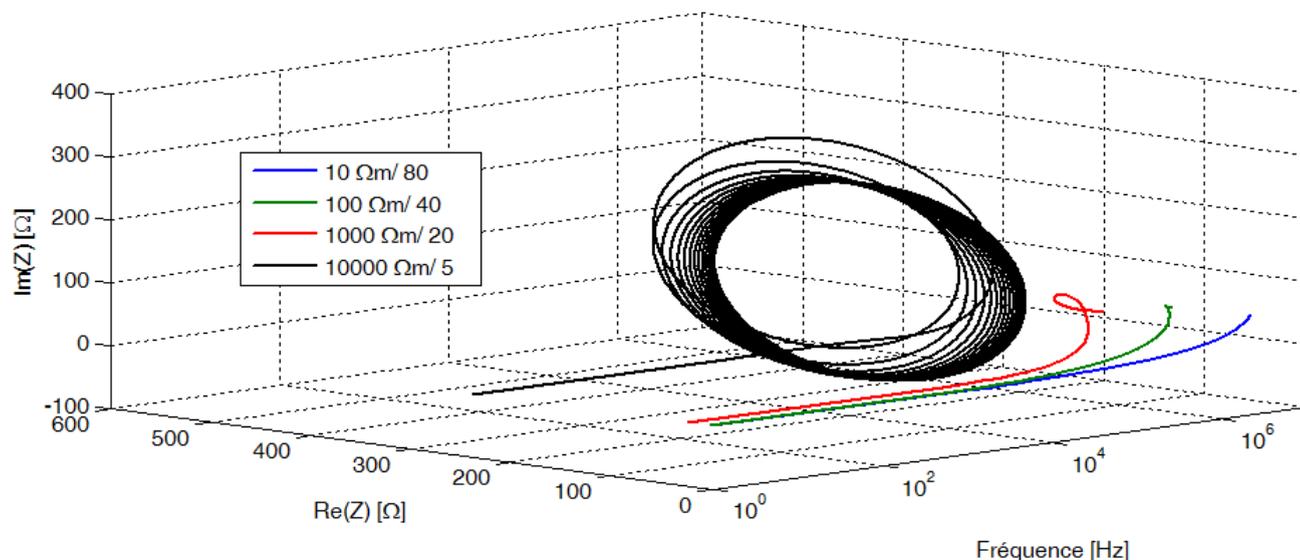


FIGURE 2.9: Variation des parties réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence pour les différents types du sol

Lorsque l'électrode est enterrée dans un sol de $10 \Omega m/80$, la partie réelle de l'impédance reste constante, au moment où la partie imaginaire augmente avec la fréquence. Lorsque l'électrode est enterrée dans un sol de $100 \Omega m/40$ et $1000 \Omega m/20$, les deux composantes de l'impédance (réelle et imaginaire) augmentent avec la fréquence. Cependant, l'augmentation de la partie réelle de l'impédance de l'électrode enfouie dans le sol de $1000 \Omega m/20$ est plus accentuée.

L'électrode enterrée dans un sol de $10000 \Omega m/5$ possède un comportement différent de celui des trois précédents cas ; en hautes fréquences nous observons une allure spirale à la fois de la composante réelle et de la composante imaginaire de l'impédance. Il est à noter que la composante imaginaire possède des valeurs négatives, ce qui montre l'importance du comportement capacitif de l'électrode de mise à la terre.

Il ressort de cette étude que :

- Lors de l'utilisation du sol de $10 \Omega m/80$, la partie réelle n'a pas été changée. Cependant, la partie imaginaire a augmenté, ce qui montre le comportement inductif de l'électrode de mise à la terre.
- Pour le cas des sols de $100 \Omega m/40$ et $1000 \Omega m/20$, les parties réelle et imaginaire ont augmenté avec la fréquence. La valeur maximale de la partie imaginaire est presque la même pour les deux résistivités. Cependant, la partie réelle de

l'impédance de l'électrode enterrée dans le sol de $1000 \Omega m/20$ augmente significativement par rapport à celle enregistrée pour le sol de $100 \Omega m/40$. L'allure partie réelle de l'impédance-partie imaginaire de l'impédance-fréquence devient spiralée en hautes fréquences, lorsque l'électrode horizontale est installée dans le sol de $1000 \Omega m/20$.

- Le phénomène de réflexion de l'onde électromagnétique apparaissant dans le cas du sol de $10000 \Omega m/5$ [15, 73] induit des fluctuations dans l'ensemble des parties réelles et imaginaires de l'impédance de mise à la terre. Cette fluctuation apparaît sous forme de variation spiralée.

2.4.2 Module de l'impédance le long du conducteur

Après avoir présenté la variation de l'impédance ainsi que les parties réelles et imaginaires de ces impédances en fonction de la fréquence, nous étudions dans cette partie la variation de l'impédance le long de l'électrode. L'objectif est de montrer l'impact de la longueur de l'électrode sur le comportement de l'impédance.

Nous présentons sur les figures 2.10, 2.11, 2.12 et 2.13, la variation de l'impédance en fonction de la fréquence le long de l'électrode pour les quatre types de sol considérés précédemment.

D'après les résultats présentés sur les figures 2.10 et 2.11, nous constatons que le comportement de l'électrode enfouie dans un sols de $10 \Omega m/80$ et $100 \Omega m/40$ est entièrement inductif. Une légère augmentation du module de l'impédance a été enregistrée à proximité de l'autre extrémité de l'électrode.

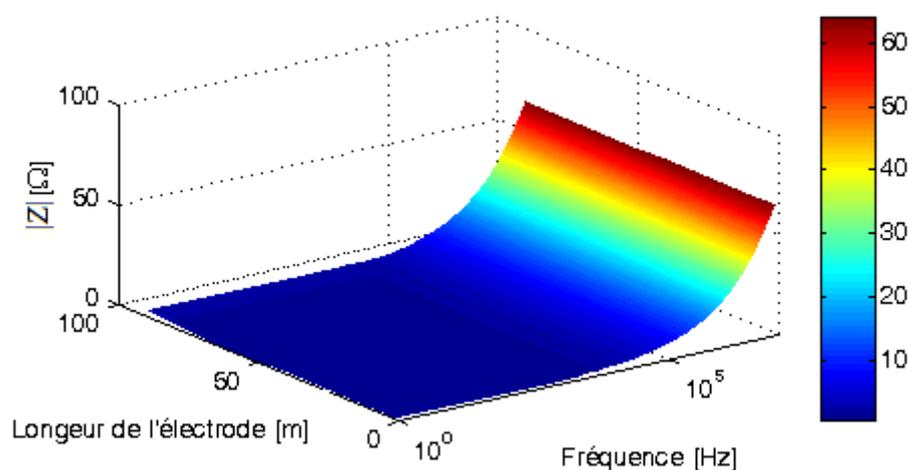


FIGURE 2.10: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité de $10 \Omega m$ et de permittivité de 80

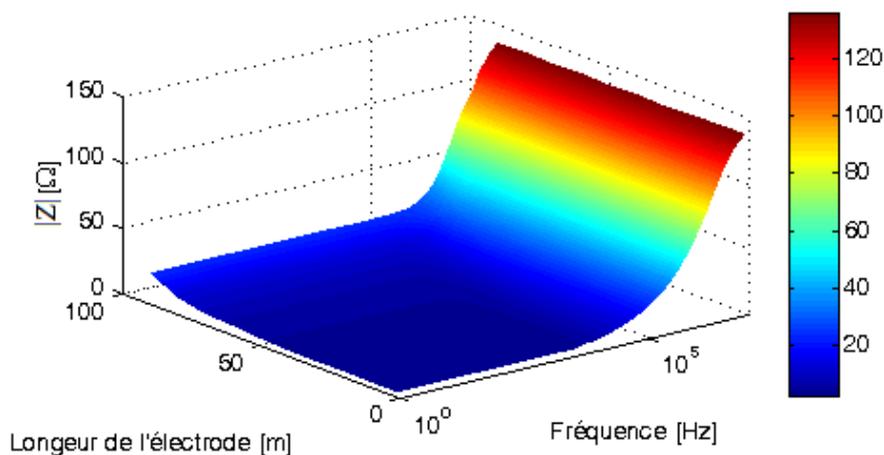


FIGURE 2.11: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité $100 \Omega m$ et de permittivité 40

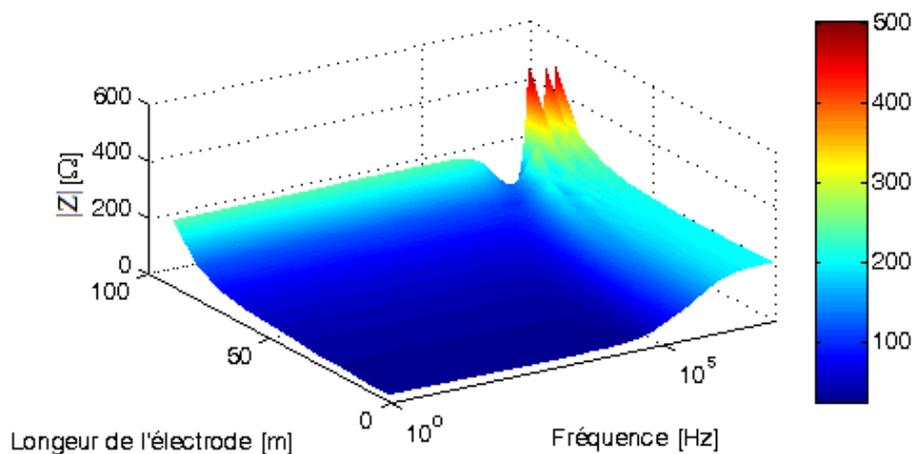


FIGURE 2.12: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité $1000 \Omega m$ et de permittivité 20

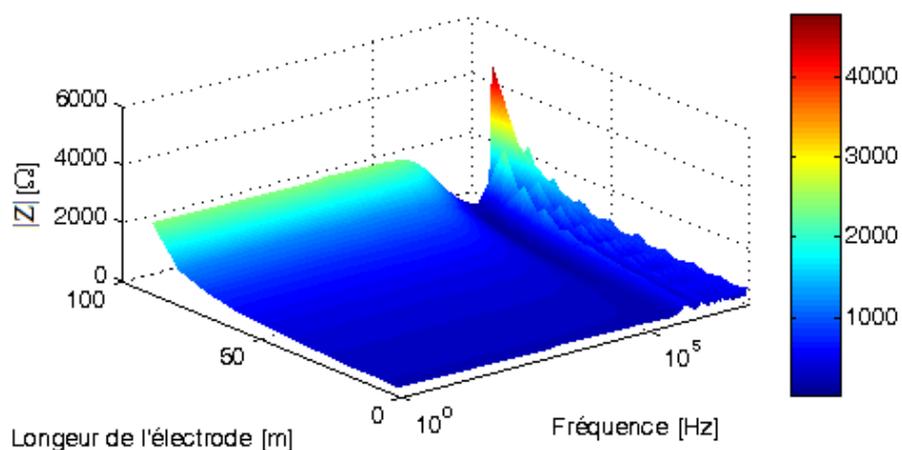


FIGURE 2.13: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence le long du conducteur enterré dans un sol de résistivité $10000 \Omega m$ et de permittivité 5

L'impédance au point d'injection de l'électrode enterrée dans le sol de $1000 \Omega m/20$ est caractérisée par un comportement inductif. Cependant, en éloignant de point d'injection, des pics de résonance apparaissent avec une amplitude supérieure à la valeur de l'impédance (module) au point d'injection.

L'impédance du conducteur enfouie dans un sol de $10000 \Omega m/5$ présente quatre comportements différents au niveau du point d'injection. Le premier est résistif observé pour les bases fréquences (impédance constante), puis capacitif (diminution de l'impédance), puis inductif (augmentation de l'impédance), avant qu'il ne devienne résonant. En éloignant du point d'injection, la valeur de l'impédance en module et celles des pics de résonance augmentent.

Il est à noter que la diminution de la résistivité du sol et/ou l'augmentation de la longueur de l'électrode favorisent l'apparition du comportement inductif. En outre, l'amplitude des pics résonants dans l'impédance d'entrée apparaissant dans les hautes résistivités.

2.4.3 Impact de l'injection au point milieu de l'électrode horizontale

Nous analysons dans la présente section, la variation du module de l'impédance de l'électrode de mise à la terre précédemment étudiée, en injectant le courant à l'extrémité de l'électrode ou au point milieu (50 m de l'extrémité). Ceci nous permet d'étudier l'impact de point d'injection sur la variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

Les valeurs de la résistivité/premittivité sont le mêmes considérées pour le cas précédant ($10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$, $1000 \Omega m/20$ et $10000 \Omega m/5$). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 2.14.

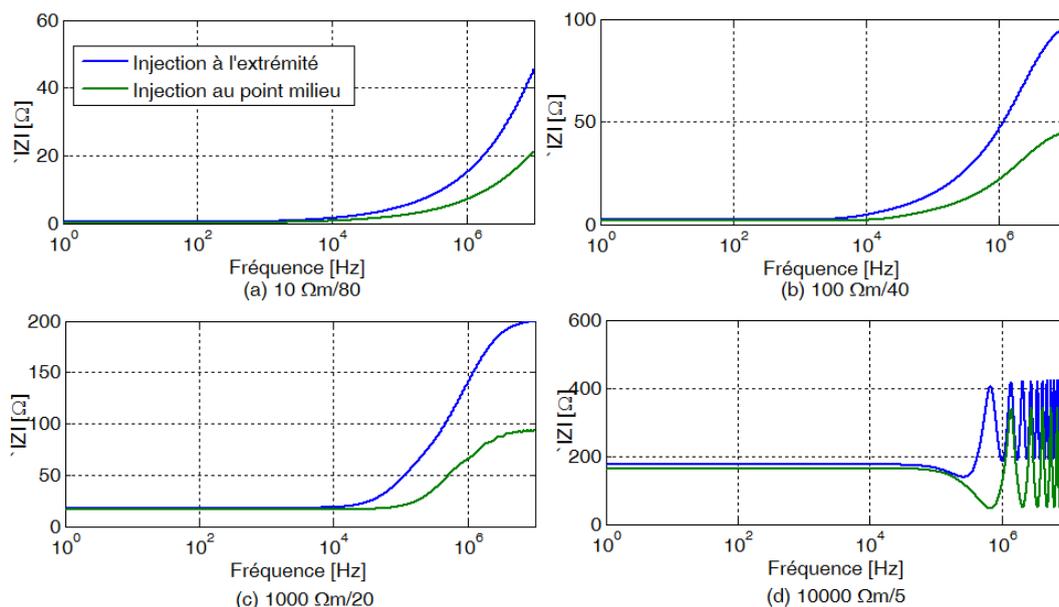


FIGURE 2.14: Variation du module de l'impédance en fonction de la fréquence en injectant à l'extrémité et au point milieu d'une électrode horizontale

Nous notons que l'injection du courant au point milieu de l'électrode diminue la longueur de l'électrode, ce qui reporte l'apparition du comportement inductif à des fréquences plus élevés. Nous notons aussi que tous les électrodes les mêmes comportements (résistif puis inductif pour les électrodes enfouies dans un sol de $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$ et $1000 \Omega m/20$, ou résistif puis capacitif puis inductif et tourne résonant pour l'électrode installée dans un sol de $10000 \Omega m/5$).

D'après les résultats montrés sur la figure 2.14, il est recommandé d'injecter le courant au point milieu des électrodes enterrés dans un sol de résistivité/permittivité $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$, $1000 \Omega m/20$, du fait que la valeur maximale de l'impédance a été réduite de 51,11, 52,63 et 55 % respectivement. Au moment où la réduction de cette valeur maximale est de 18,8% uniquement lorsque l'électrode est enfouie dans un sol de résistivité $10000 \Omega m/5$.

2.5 Etude d'une électrode horizontale enfouie dans un sol stratifié

Nous considérons une électrode horizontale de mise à la terre de longueur $\ell = 20$ m et de rayon 2,5 mm enterrée avec une profondeur $h = 0,6$ m dans un sol amagnétique stratifié verticalement en deux couches distinctes caractérisées par ρ_{s1}/ϵ_{s1} et ρ_{s2}/ϵ_{s2} respectivement. La longueur pénétrante dans le sol de résistivité/permittivité relative ρ_{s2}/ϵ_{s2} est H . De ce fait, la longueur de l'électrode enterrée dans le sol caractérisé par ρ_{s1}/ϵ_{s1} est $\ell - H$, comme présenté sur la figure 2.15.

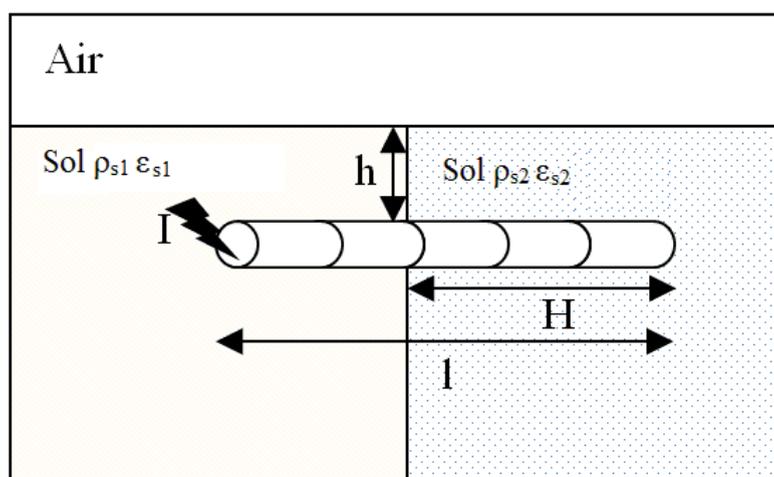


FIGURE 2.15: Electrode horizontale de mise à la terre enterrée dans un sol stratifié verticalement

2.5.1 Mise en équations

La segmentation de l'électrode est liée à la longueur d'onde du courant injecté. Cette longueur, dépend principalement des paramètres électriques du sol. De ce fait, la segmentation de la partie de l'électrode enfouie dans le sol 1 est différente de celle de la partie restante de l'électrode (enterrée donc dans le sol 2). La première (respectivement la deuxième) partie de l'électrode est caractérisée par une impédance caractéristique Z_{c1} (respectivement Z_{c2}), et une constante de propagation γ_1 (respectivement γ_2). Pour la couche i ($i=1, 2$), l'impédance caractéristique et la constante de propagation sont données par :

$$Z_{ci} = \sqrt{\frac{Z_{0i}}{Y_{0i}}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L_i}{G_i + j\omega C_i}} \quad (2.9)$$

$$\gamma_i = \sqrt{Z_{0i}Y_{0i}} = \sqrt{(R + j\omega L_i)(G_i + j\omega C_i)} \quad (2.10)$$

Les paramètres R , L_i , G_i et C_i sont déterminés en utilisant les formules présentées dans le tableau 2.1.

Nous considérons, dans ce qui suit, que le point d'injection se situe sur l'extrémité de la portion de l'électrode enterrée dans la couche 1. Nous attribuons Z_{e2} à l'impédance de la partie de l'électrode enfouie dans la couche 2. A cet effet, la ligne de transmission modélisant la partie de l'électrode enterrée dans la couche 1 est fermée sur l'impédance Z_{e2} . Dans ces conditions, l'impédance d'entrée de l'électrode est définie par la relation suivante [68] :

$$Z = \frac{ch(\gamma_1(\ell - H))Z_{e2} + Z_{c1}sh(\gamma_1(\ell - H))}{\frac{1}{Z_{c1}}sh(\gamma_1(\ell - H))Z_{e2} + ch(\gamma_1(\ell - H))} \quad (2.11)$$

avec

$$Z_{e2} = Z_{c2}coth(\gamma_2 H) \quad (2.12)$$

Nous désignons par k (en %) la partie de l'électrode enterrée dans la couche 2. Cet indice de pénétration k est défini comme suit :

$$k = \frac{H}{\ell} 100\% \quad (2.13)$$

avec H est la longueur d'électrode enterrée dans la couche 2 et ℓ la longueur totale de l'électrode.

Dans notre étude, l'indice k a été varié de 0 (l'électrode dans la couche 1) à 100% (l'électrode dans la couche 2) par un pas de 20%.

2.5.2 Variation du module de l'impédance

Deux cas ont été étudiés, le premier consiste en l'injection du courant à l'extrémité de l'électrode se situant dans le sol de faible résistivité caractérisé par $\rho_{s1}=100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1}=40$. Les paramètres électriques de la deuxième couche du sol sont $\rho_{s2}=500 \Omega m$ et ε_{s2} . Dans le deuxième cas, le courant est injecté à l'extrémité de l'électrode se situant dans le sol de forte résistivité ayant $\rho_{s1}=500 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1}=25$. Les paramètres électriques de la deuxième couche du sol sont $\rho_{s2}=100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s2}=40$. Nous avons analysé la variation de l'impédance pour les différentes positions considérées de k de 0% (électrode complètement enterrée dans la couche caractérisée par ρ_{s1} et ε_{s1}) jusqu'à 100% (électrode entièrement enfouie dans la couche caractérisée par ρ_{s2} et ε_{s2}) a été étudiée. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 2.16.

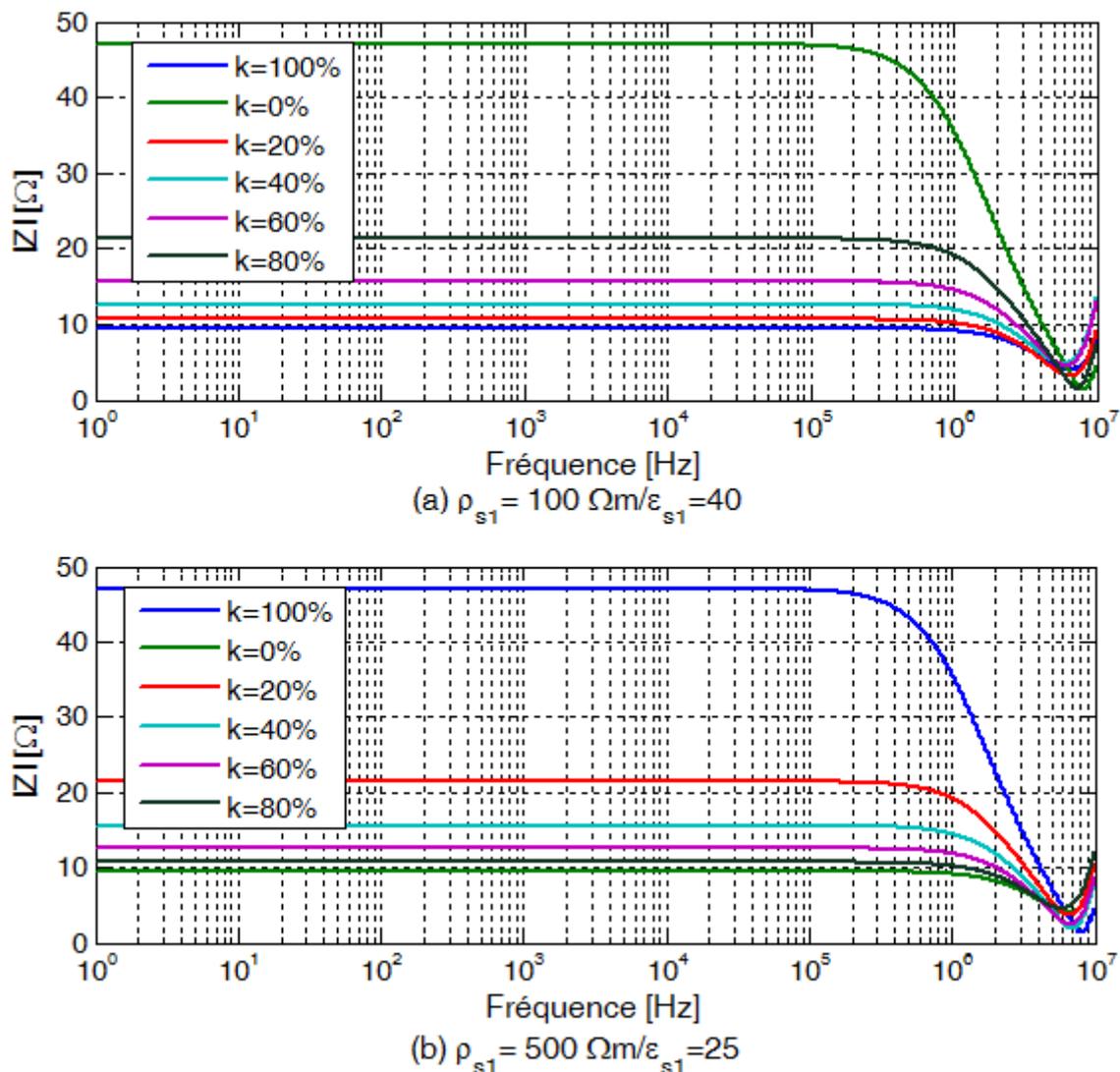


FIGURE 2.16: Module de l'impédance de l'électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié verticalement

Pour une même valeur de k , les résultats de la figure précédente mettent en évidence trois comportements distincts de l'électrode. L'impédance de l'électrode présente, au début, un comportement résistif (impédance constante), puis capacitif (correspondant à

TABLE 2.2: Impédances en module et plages de variation de la fréquence obtenues dans le cas 1

k (%)	Valeur de résistance [Ω]	Fréquence d'apparition du comportement capacitif [MHz]	Valeur minimale de l'impédance indiquant le comportement capacitif [Ω]	Fréquence d'apparition du comportement inductif [MHz]	Valeur maximale de l'impédance indiquant le comportement inductif [Ω]
00	9,475	0,7	3,94	6,4	8,93
20	10,46	0,66	3,27	6,8	8,26
40	12,6	0,4	4,9	5,99	12,9
60	15,67	0,3	4,89	6,6	12,23
80	21,19	0,29	1,7	8,01	5,3
100	47,04	0,1	1,7	9,04	3,01

TABLE 2.3: Impédances en module et plages de variation de la fréquence obtenues dans le cas 2

k (%)	Valeur de résistance [Ω]	Fréquence d'apparition du comportement capacitif [MHz]	Valeur minimale de l'impédance indiquant le comportement capacitif [Ω]	Fréquence d'apparition du comportement inductif [MHz]	Valeur maximale de l'impédance indiquant le comportement inductif [Ω]
00	47,04	0,1	1,7	9,04	3,01
20	21,42	0,24	4,18	6,9	10,08
40	15,57	0,38	2,1	7,2	6,22
60	12,55	0,51	3,07	7,9	7,16
80	10,7	0,64	4,61	6,06	11,6
100	9,475	0,7	3,94	6,4	8,93

la diminution de l'impédance) et puis inductif (suite à l'augmentation de l'impédance). Les plages de variations de la fréquence de ces comportements ainsi que les valeurs des différentes impédances sont récapitulées dans les tableaux 2.2 (pour le premier cas) et 2.3 (pour le deuxième cas).

Nous constatons que la résistance de l'électrode (comportement résistif) diminue au fur et à mesure que l'électrode pénètre dans la couche du sol la plus conductrice. Par ailleurs, le comportement capacitif apparaît à des fréquences plus faibles et s'accroît au fur et à mesure que l'électrode est enfoncée dans la couche de haute résistivité.

2.6 Conclusion

Il ressort de ce chapitre les principales conclusions suivantes :

- Le comportement inductif (respectivement capacitif) est prépondérant lors de l'utilisation de longues (respectivement de courtes) électrodes enterrées dans un sol faiblement (respectivement fortement) résistif.
- Le module de l'impédance en fonction de la fréquence augmente le long de l'électrode enfouie dans un sol caractérisé par une faible résistivité. Ce module est accompagné des pics de résonance lors de l'utilisation des sols fortement résistifs.
- Lors de l'injection du courant au milieu de l'électrode horizontale, l'impédance de celle-ci est réduite de 50 % (respectivement de 20%) lors de l'utilisation d'un sol de faible (respectivement forte) résistivité.
- Une réduction de l'impédance a été enregistrée en hautes fréquences lors de l'injection du courant dans l'extrémité de l'électrode plongée dans la couche à faible résistivité (cas d'un sol stratifié).

Chapitre 3

Modélisation d'un système de mise à la terre en utilisant TLM sous sa représentation d'état

3.1 Introduction

L'étude du comportement d'un système de mise à la terre dans le domaine temporel en se basant sur la théorie des lignes de transmission a fait l'objet de plusieurs investigations soit en développement des programmes [34] ou en utilisant de code de calcul (EMTP ou GSSP) [7, 19, 21]. L'objectif est d'analyser le potentiel transitoire [7, 13, 16, 20] suite à une injection du courant de foudre ou alors les impédances transitoires au point d'injection [78].

La méthode des lignes de transmission sous sa représentation d'état a été développée dans ce chapitre, pour analyser le potentiel ainsi que les impédances des systèmes (électrodes et grilles) de mise à la terre. L'ionisation du sol et le couplage mutuel ont été incorporés. Une confrontation de nos résultats à ceux rapportés dans la littérature y sera présentée.

3.2 Mise en équations

3.2.1 Modélisation d'un système physique

La modélisation d'un système consiste à élaborer une représentation mathématique permettant de décrire et prévoir le comportement dynamique du système en question soumis à des influences externes. Les systèmes physiques linéaires sont modélisés par trois méthodes [79] :

3.2.1.1 Méthode 1 : Représentation par équations différentielles

Les équations différentielles sont définies par des équations contenant des dérivées d'une ou de plusieurs quantités par rapport à une ou plusieurs variables. Ces équations sont classées dans un ordre selon la plus haute dérivée qu'elle contient [80].

Une équation différentielle est dite linéaire si on peut l'écrire sous la forme suivante :

$$a_n y^n + \dots + a_2 y'' + a_1 y' + a_0 y = b_m g^m + \dots + b_1 g' + b_0 g \quad (3.1)$$

Avec y (ou $y(t)$) est la grandeur d'entrée et g (ou $g(t)$) la grandeur de sortie. Ces grandeurs sont définies dans des équations différentielles d'ordre n et m respectivement. Il est à noter que la condition $m \leq n$ vérifie la causalité du système étudié [81].

L'équation devient non linéaire si la forme sera différente de la forme précédente. Par exemple : $a_n(t)yy'' + ay_0 = g$.

3.2.1.2 Méthode 2 : Représentation par fonction de transfert

La fonction de transfert peut être obtenue en appliquant la transformée de Laplace aux équations différentiels du système. Puis, les variables intermédiaires sont éliminés pour atteindre la relation entre la grandeur d'entrée et celle de sortie [79].

En appliquant la transformée de Laplace à l'équation 3.1, les grandeurs $y(t)$ et $g(t)$ seront $Y(p)$ et $G(p)$ respectivement.

Dans ces conditions, l'équation 3.1 prend la forme suivante :

$$a_n p^n Y(p) + \dots + a_2 p^2 Y(p) + a_1 p Y(p) + a_0 Y(p) = b_m p^m G(p) + \dots + b_1 p G(p) + b_0 G(p) \quad (3.2)$$

L'équation pourra être simplifiée à :

$$(a_n p^n + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) Y(p) = (b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0) G(p) \quad (3.3)$$

La fonction de transfert $F(p)$, définie par le rapport entre la grandeur de sortie $Y(p)$ et celle d'entrée $G(p)$, est présentée comme suit :

$$F(p) = \frac{Y(p)}{G(p)} = \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + \dots + a_2 p^2 + a_1 p + a_0} \quad (3.4)$$

Cette équation est utilisée pour déterminer directement la grandeur de sortie en fonction de celle d'entrée.

3.2.1.3 Méthode 3 : Représentation d'état

L'état d'un système est la plus petite quantité d'information caractérisée par un ensemble de variables qu'il faut connaître à un instant t_0 pour prévoir le comportement de ce système à tout instant $t > t_0$, quel que soit l'entrée (paramètre externe de système) entre t_0 et t [79].

La représentation d'état est un outil de modélisation des systèmes physiques dont le développement d'état se représente par un ensemble d'équations différentielles [82]. Cette méthode est généralement utilisée dans les systèmes de contrôle pour décrire leurs comportements sous une excitation externe.

L'écart entre le comportement attendu du système et sa réponse réelle dépend de la fidélité du modèle choisi [79].

Les équations mathématiques des modèles sont toujours des équations différentielles linéaires à coefficients constants. Les équations différentielles non linéaires pourront être linéarisées autour d'un point de fonctionnement.

Pour un système à modéliser par une équation différentielle d'ordre n , la représentation d'état consiste à transformer cette équation en n sous-équations différentielles d'ordre 1.

Un système physique à multi-entrées (m entrées) et à multi-sorties (n sorties) est décrit par une ou plusieurs équations différentielles linéaires à coefficients constants. Le système d'équations différentielles est remplacé par deux systèmes de formes suivantes [82] :

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_{11}x_1(t) + a_{12}x_2(t) + \dots + a_{1n}x_n(t) + b_{11}u_1(t) + \dots + b_{1m}u_m(t) \\ \dot{x}_2(t) = a_{21}x_1(t) + a_{22}x_2(t) + \dots + a_{2n}x_n(t) + b_{21}u_1(t) + \dots + b_{2m}u_m(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_n(t) = a_{n1}x_1(t) + a_{n2}x_2(t) + \dots + a_{nn}x_n(t) + b_{n1}u_1(t) + \dots + b_{nm}u_m(t) \end{cases} \quad (3.5)$$

Les grandeurs de sortie sont déterminés par

$$\begin{cases} y_1(t) = c_{11}x_1(t) + c_{12}x_2(t) + \dots + c_{1n}x_n(t) + d_{11}u_1(t) + \dots + d_{1m}u_m(t) \\ y_2(t) = c_{21}x_1(t) + c_{22}x_2(t) + \dots + c_{2n}x_n(t) + d_{21}u_1(t) + \dots + d_{2m}u_m(t) \\ \vdots \\ y_n(t) = c_{n1}x_1(t) + c_{n2}x_2(t) + \dots + c_{nn}x_n(t) + d_{n1}u_1(t) + \dots + d_{nm}u_m(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

Ces systèmes d'équations peuvent être écrits sous forme matricielle suivante [82] :

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (3.7)$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (3.8)$$

Le modèle présenté sous cette forme est appelé représentation d'état du système. La première équation 3.7 s'appelle équation de commande, et la deuxième 3.8 est connue comme équation d'observation. Sachant que $\dot{X}(t)$ est le vecteur des dérivés des variables d'états, $X(t)$ est le vecteur des variables d'état, $U(t)$ est la grandeur d'entrée, $Y(t)$ est le vecteur des sorties, A est la matrice d'état, B est la matrice des entrées, C est la matrice des sorties et D est la matrice des éléments d'entrée affectant la sortie.

L'application de la représentation d'état nécessite de connaître la structure et les propriétés internes des éléments du système physique à étudier [79], car les variables d'états choisis doivent avoir un sens physique.

3.2.2 Représentation d'état d'une électrode de mise à la terre

L'électrode de mise à la terre est modélisée par un ensemble de lignes de transmission. Le comportement dynamique de ces lignes est représenté par une équation différentielle du n^{ime} ordre. Cette dernière est présentée par n équations linéaires de premier ordre appelées équations d'état de l'électrode de mise à la terre.

Chaque ligne de transmission contient des inductances et des condensateurs qui emmagasinent de l'énergie (autrement dit réservoirs d'énergie). Les variables d'état ont été choisis de telle sorte qu'elles aient un sens physique. Dans notre cas nous avons choisis les courants des inductances et les potentiels des condensateurs des lignes de transmission comme des variables d'état pour déterminer les équations d'état de chaque ligne.

Nous étudions un segment de l'électrode de mise à la terre. La figure 3.1 montre la ligne de transmission modélisant le segment ainsi que les courants et les potentiels dans le segment. Les paramètres R , L , $G/2$ et $C/2$ sont déterminés selon le tableau 2.1.

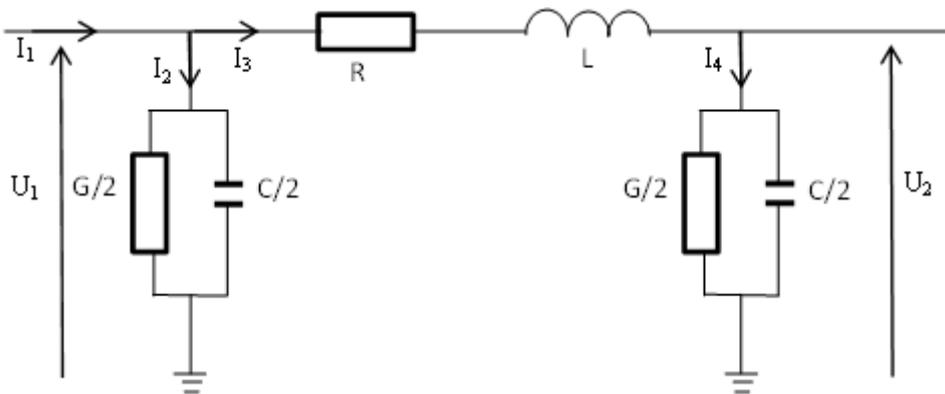


FIGURE 3.1: Courants et potentiels dans la ligne de transmission

Le courant d'entrée est I_1 et le courant dissipé dans le sol à travers la surface latérale de l'électrode est la somme de I_2 et I_4 . L'inductance est parcourue par le courant I_3 . Le potentiel à l'entrée du segment est U_1 et celui à la sortie est U_2 .

En appliquant les lois des noeuds et des mailles pour cette électrode nous obtenons :

$$I_1 = I_2 + I_3 = I_2 + I_4 \quad (3.9)$$

$$U_1 = U_2 + RI_3 + L \frac{dI_3}{dt} \quad (3.10)$$

$$I_2 = \frac{G}{2}U_1 + \frac{C}{2} \frac{dU_1}{dt} \quad (3.11)$$

$$I_3 = I_4 = \frac{G}{2}U_2 + \frac{C}{2} \frac{dU_2}{dt} \quad (3.12)$$

Dans la ligne de transmission, les trois éléments de stockage d'énergie électrique consistent en les deux condensateurs modélisant la capacitance transversale de la ligne, ainsi que l'inductance longitudinale. A cet effet, nous choisissons trois variables d'état. Il s'agit de X_1 représentant la tension du premier condensateur de la ligne U_1 , X_2 correspondant au courant de l'inductance I_3 et X_3 représentant la tension du deuxième condensateur de la ligne U_2 . En remplaçant ces paramètres dans les équations 3.10 à 3.12, nous obtenons :

$$I_1 = \frac{G}{2}X_1 + \frac{C}{2} \frac{dX_1}{dt} + X_2 \quad (3.13)$$

$$X_1 = X_3 + RX_2 + L \frac{dX_2}{dt} \quad (3.14)$$

$$X_2 = \frac{G}{2}X_3 + \frac{C}{2} \frac{dX_3}{dt} \quad (3.15)$$

ou alors :

$$\frac{dX_1}{dt} = \frac{2}{C}I_1 - \frac{G}{C}X_1 - \frac{2}{C}X_2 \quad (3.16)$$

$$\frac{dX_2}{dt} = \frac{1}{L}X_1 - \frac{R}{L}X_2 - \frac{1}{L}X_3 \quad (3.17)$$

$$\frac{dX_3}{dt} = \frac{2}{C}X_2 - \frac{G}{C}X_3 \quad (3.18)$$

Ces équations peuvent être écrites sous forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \frac{dX_1}{dt} \\ \frac{dX_2}{dt} \\ \frac{dX_3}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{G}{C} & -\frac{2}{C} & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ 0 & \frac{2}{C} & -\frac{G}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{C} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [I_1] \quad (3.19)$$

$$[Y] = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + [0] [I_1] \quad (3.20)$$

Ces équations ont la même forme que celle de 3.7 et 3.8.

Les équations suscitées sont valables pour un segment de l'électrode de terre. Les dimensions de certains paramètres changent si nous divisons celle-ci en n segments. A cet effet, $X(t)$ et $\dot{X}(t)$ seront des vecteurs d'ordre $2n$; A sera une matrice $2n \times 2n$; B un vecteur vertical de dimension $2n$; C est un vecteur horizontal de dimension $2n$. Par ailleurs, $Y(t)$ et $U(t)$ demeurent des éléments de dimensions 1×1 ($Y(t)$ est le potentiel obtenu au point d'injection et $U(t)$ le courant injecté dans l'électrode); et D reste nulle car le paramètre d'entrée (courant injecté) n'a aucune relation directe avec la grandeur de sortie (potentiel transitoire).

Dans ces conditions, les paramètres A , B , C et D sont des valeurs fixes indépendantes du temps; nous parlons donc d'une représentation d'état d'un système linéaire de paramètres indépendants du temps.

$$X = [V_1 \ I_1 \ V_2 \ I_2 \ \dots \ \dots \ V_n \ I_n]; \ Y = [V_1]; \ U = [I_e];$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-G}{C} & \frac{-2}{C} & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{2}{C} & \frac{-G}{C} & \frac{-2}{C} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{C} & \frac{-G}{C} & \frac{-2}{C} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C} \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}; \ C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ \dots \ \dots \ 0]; \ D = 0.$$

L'utilisation de la représentation d'état permet d'obtenir l'observabilité et la contrôlabilité des paramètres relatifs au système de mise à la terre pendant la simulation de celui-ci. Ceci nous a facilité l'implication des phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel entre les segments du conducteur.

La solution des équations d'état permet de calculer la valeur de chaque état à tout moment. Cela est fait en utilisant des méthodes approximatives de résolution des équations différentielles telles que les séries de Taylor, la méthode de Picard ou la méthode de Runge Kutta [81].

3.3 Phénomènes d'ionisation du sol et de couplage mutuel

Les phénomènes mis en jeu lors de l'injection du courant transitoire dans un système de mise à la terre consistent en l'ionisation du sol et le couplage mutuel entre les segments du conducteur.

3.3.1 Ionisation du sol

Le sol est constitué de solides contenant des substances organiques, de liquides représentant les solutions aqueuses en général et des particules séparées par des interfaces d'air [3] (Figure 1.13, déjà présentée dans le chapitre 1).

Lorsqu'une électrode (verticale ou horizontale) de mise à la terre est soumise à un courant I , chaque segment du conducteur de longueur $\Delta\ell$ et de rayon r dissipe, à travers sa surface latérale $S[m^2]$, une partie du courant ΔI dans le sol (de résistivité ρ_s). La densité du courant $J [A/m^2]$ dissipée au sol est déterminée par la relation suivante [49] :

$$J = \frac{I}{S} \quad (3.21)$$

Lors de cette dissipation, le segment du conducteur génère un champ électrique \vec{E} dans le sol. L'amplitude de ce champ est définie comme suit [83] :

$$E = \frac{\Delta I \rho_s}{2\pi r \Delta\ell} [kV/m] \quad (3.22)$$

Lorsque la densité du courant est forte, des petites décharges prennent naissance dans les inclusions d'air à proximité du conducteur dès que le champ électrique généré par le conducteur dépasse le seuil du champ électrique de l'ionisation de l'air. L'intensification ainsi que la propagation de telles décharges s'accroissent avec l'augmentation de la densité du courant. Ce qui engendre l'augmentation de la conductivité du sol entourant le conducteur de terre. En fait, avec l'augmentation de la densité du courant, le sol se perfore. Cette perforation remplie du vide constitue un siège pour l'arc électrique donc un canal conducteur, ce qui diminue fortement la résistivité locale du sol. Une telle résistivité est considérée nulle dans notre cas.

Dans ces conditions, le sol entourant le conducteur est classifié en quatre régions : région d'arc (arc region), région d'étincelles (spark region), région non linéaire (non linear region) et une dernière saine dite région normale (normal region) comme montré sur la figure 3.2. Les trois premières régions (d'arc, d'étincelles et non linéaire) sont appelées région de décharge ou région d'ionisation [3].

Les principaux paramètres intervenant dans le changement des caractéristiques du sol sont [3] :

- L'intensité du champ électrique E_n dans la zone où la caractéristiques $E = f(J)$ est non linéaire ;

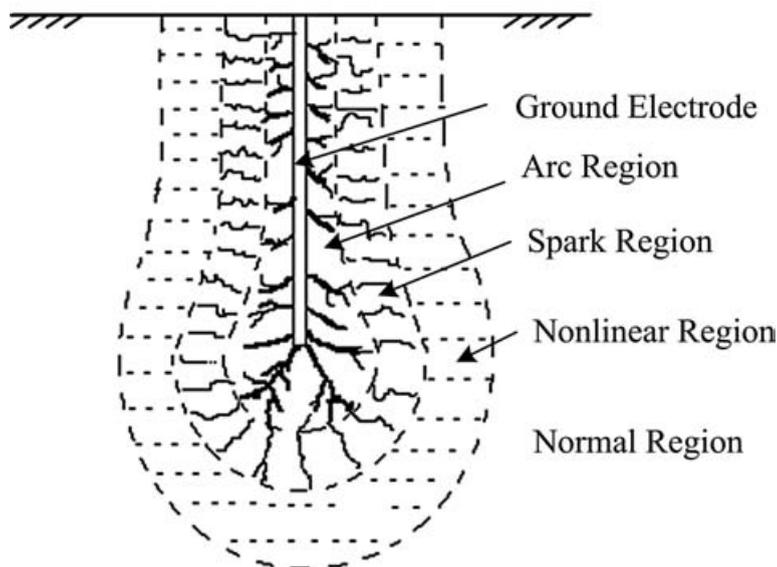


FIGURE 3.2: Ionisation du sol et régions de décharge autour l'électrode [3]

- Le champ initial E_i de la zone de claquage (d'étincelles);
- Le champ électrique critique E_c de la zone de décharge.

Avec l'augmentation du champ électrique, la région d'étincelles apparaît lorsque le champ électrique atteint E_i . En se développant, les étincelles peuvent se convertir en arcs électriques (comme montré sur la figure 3.3), si le champ électrique autour de l'électrode atteint la valeur E_c (dite valeur critique) [3].

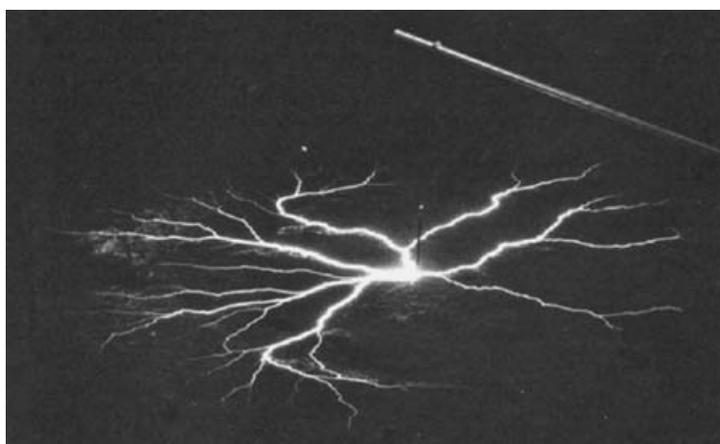


FIGURE 3.3: Arc électrique apparaissant sur la surface du sol [3]

Plusieurs travaux ont étudié le champ électrique critique E_c dans le sol caractérisé par la résistivité ρ_s . A la base des résultats expérimentaux, deux formulations ont été proposées pour définir le champ critique en fonction de la résistivité du sol :

Formule d'Oettle [84] :

$$E_c = 241\rho_s^{0,215} [kV/cm] \quad (3.23)$$

Formule de Manna et Chowdhuri [85] :

$$E_c = 843\rho_s^{0,143} [kV/cm] \quad (3.24)$$

Nous traçons sur la figure 3.4 la variation du champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol dans l'intervalle de $[0-10000] \Omega m$ en utilisant les deux formules 3.23 et 3.24.

La figure 3.4 montre que les deux expressions présentent la même allure du champ électrique en fonction de la résistivité du sol.

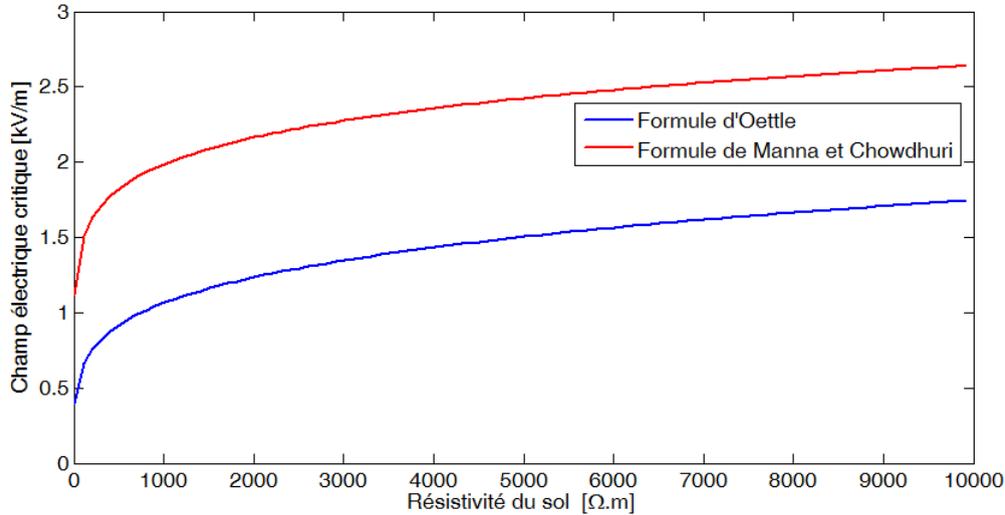


FIGURE 3.4: Champ électrique critique en fonction de la résistivité du sol selon les formules d'Oettle [84] et de Manna et Chowdhuri [85]

Nous observons que les valeurs le champ critique calculé à partir de la formule de Manna [85] sont plus importantes que celles estimées par la relation d'Oettle. Dans notre étude, nous avons adopté la relation d'Oettle représentant le cas le plus défavorable étant donné que le phénomène d'ionisation du sol est plus fréquent [84].

En effet, si l'amplitude du courant injecté dépasse un certain seuil pour lequel le champ électrique généré par l'électrode dépasse celui critique du sol, le vide entre les particules du sol commence à s'ioniser [86]. Avec l'augmentation de l'amplitude du courant, des streamers peuvent prendre naissance et se propager dans le sol en créant une zone d'ionisation [3]. Ce phénomène a été modélisé par une augmentation du rayon du conducteur de chaque segment indépendamment des autres. En générant un champ électrique E , le segment, initialement de rayon r , voit son rayon augmenter à la valeur r_i , comme montré sur la figure 3.5 [7, 20, 83]. Ce nouveau rayon est défini par [87] :

$$r_i = r \frac{E}{E_c} [m] \quad (3.25)$$

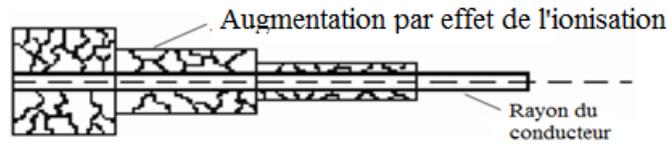


FIGURE 3.5: Augmentation du rayon par effet d'ionisation du sol [7]

3.3.2 Couplage mutuel entre les segments

En termes de compatibilité électromagnétique, les modes de propagation sont multiples en fonction de la distance séparant la victime de la source et/ou de l'existence d'une connexion électrique entre elles.

Les conducteurs parcourus par un courant de haute fréquence agissent comme des antennes. En effet chaque segment peut émettre un champ électrique et/ou magnétique dans leur environnement. Ce champ magnétique émis par un segment induit une force électromotrice sur un autre segment du même conducteur. On dit que ces deux parties sont couplées par induction et qu'une inductance mutuelle existe entre elles [26]. L'inductance mutuelle peut être déterminée par l'équation générale suivante [25] :

$$M = \int_{c_1} \int_{c_2} \frac{ds_1 ds_2}{r_{12}} \quad (3.26)$$

ds_1 et ds_2 sont les éléments de surface de l'inducteur et du conducteur induit, r_{12} est la distance entre eux et c_1 et c_2 sont des longueurs parcourues par le flux magnétique.

Pour deux électrodes disposées selon deux axes parallèles, Terman a défini l'inductance mutuelle M (en μH) comme suit [26] :

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \alpha \operatorname{asinh}\left(\frac{\alpha}{D}\right) - \beta \operatorname{asinh}\left(\frac{\beta}{D}\right) - \gamma \operatorname{asinh}\left(\frac{\gamma}{D}\right) + \delta \operatorname{asinh}\left(\frac{\delta}{D}\right) - \sqrt{\alpha^2 + D^2} + \sqrt{\beta^2 + D^2} + \sqrt{\gamma^2 + D^2} - \sqrt{\delta^2 + D^2} \right\} \quad (3.27)$$

avec : $\alpha = n + m + \delta$, $\beta = n + \delta$, $\gamma = m + \delta$.

m est la longueur du segment générant le champ magnétique, n est la longueur du segment affecté par le champ magnétique et δ et D sont les distances entre les deux segments comme montré sur la figure 3.6.

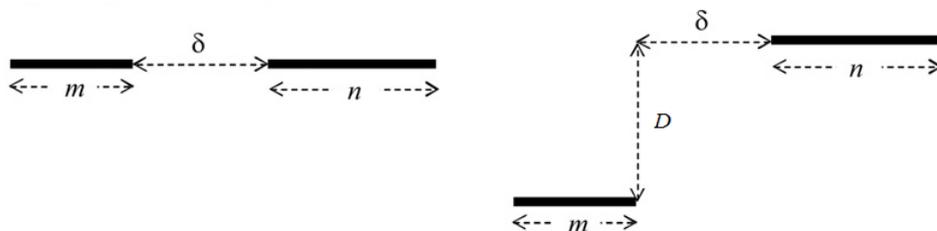


FIGURE 3.6: Paramètres affectant le couplage mutuel [25]

3.3.3 Incorporation de l'ionisation du sol et du couplage mutuel dans la représentation d'état

L'insertion simultanée des phénomènes liés à l'ionisation du sol et au couplage mutuel dans la représentation d'état nécessite quelques modifications au niveau des paramètres d'état. Pour chaque segment, le rayon change conformément à la zone ionisée qui entoure le système de terre. Par ailleurs, le couplage entre les segments doit être modélisé par l'introduction d'une inductance, capacitance et/ou résistance mutuelles dans chaque cellule de la représentation d'état. Dans ces conditions, la représentation d'état du système linéaire à paramètres invariables (LTIPS) sera remplacée par un système linéaire à paramètres variables (LTVPS). Autrement dit, les paramètres d'état A, B, C et D seront remplacés par A(t), B(t), C(t) et D(t) respectivement [82], t consiste en le temps de simulation.

En effet, les équations 3.7 et 3.8 deviennent :

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \quad (3.28)$$

$$Y(t) = C(t)X(t) + D(t)U(t) \quad (3.29)$$

Lors de l'incorporation de l'ionisation du sol et du couplage mutuel, les paramètres A, B, C et D seront des valeurs variables dépendent du temps (A(t), B(t), C(t) et D(t) respectivement). Dans ces paramètres, la variation du rayon de l'électrode modélisant l'ionisation (influant sur les paramètres G et C de la ligne de transmission) et le couplage mutuel seront inclus. Dans ce cas, nous parlons d'une représentation d'état d'un système non linéaire de paramètres dépendants du temps, donnés par :

$$A(t) = \begin{bmatrix} \frac{-G(t)}{C(t)} & \frac{-2}{C(t)} & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} & M_{12} & 0 & M_{13} & \dots & 0 \\ 0 & \frac{2}{C(t)} & \frac{-G(t)}{C(t)} & \frac{-2}{C(t)} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ M_{21} & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} & M_{23} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{C(t)} & \frac{-G(t)}{C} & \frac{-2}{C(t)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_{31} & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & M_{nn-1} & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \frac{-1}{L} \end{bmatrix}$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C(t)} \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad C(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ \dots \ \dots \ 0] \quad D(t) = 0$$

3.4 Validation

Dans la présente partie, nous validons les résultats obtenus en appliquant la représentation d'état que nous avons proposée pour modéliser une électrode de mise à la terre soumise à un courant impulsionnel. Pour cela, nous avons comparé nos potentiels transitoires et impédances à ceux simulés par la méthode des moments MoM [12] et de PEEC [18] et mesurés par EDF [8] dans le cas des électrodes verticale et horizontale enfouies dans un sol faiblement résistif. Une deuxième validation a été faite, cette fois-ci longue en confrontant nos potentiels à ceux obtenus par Lorentzou *et al.* [70] pour une électrode enfouie dans un sol faiblement résistif, ainsi que nos potentiels et courants à ceux simulés par Nekhoul *et al.* [16] lors de l'utilisation d'une électrode enfouie dans un sol fortement résistif.

3.4.1 Electrodes enterrées verticalement dans un sol de faible résistivité

Lors des essais, EDF [8] a utilisé une électrode verticale de longueur 6 m et de rayon 8 mm. Cette électrode a été enterrée dans un sol de résistivité de $50 \Omega m$ et de permittivité relative de 15. Le potentiel a été mesuré au point d'injection. Le courant injecté est impulsionnel d'amplitude 33 A. La même électrode a été déjà simulée dans les mêmes conditions par la méthode des moments MoM [12] et par celle de PEEC [18]. Dans notre modélisation, nous avons approximé la forme d'onde du courant mesuré par EDF par la relation bi-exponentielle suivante : $i(t) = 33(e^{-100000t} - e^{-3000000t})$ A.

La figure 3.7 présente le potentiel au point d'injection obtenus en utilisant la représentation d'état, (a) en négligeant le couplage mutuel et l'ionisation du sol, (b) en considérant uniquement l'ionisation du sol, (c) en considérant seulement le couplage mutuel, et (d) en tenant compte des deux phénomènes simultanément.

En ignorant le couplage mutuel et l'ionisation du sol (Figure 3.7 (a)), une différence de 16% est observée entre nos résultats et ceux mesurés par EDF. En comparant les caractéristiques (b) à (a) de la figure 3.7, nous constatons que l'ionisation du sol n'a pratiquement pas d'effet sur le potentiel obtenu. La figure 3.7 (c) montre que le couplage mutuel entre les segments engendre une différence de 8% entre nos résultats et ceux de EDF devant 7 % en considérant les deux phénomènes (Figure 3.7 (d)). Il est important de noter que nos résultats sont plus proches à ceux de EDF que ceux trouvés en utilisant MoM [12] et PEEC [18].

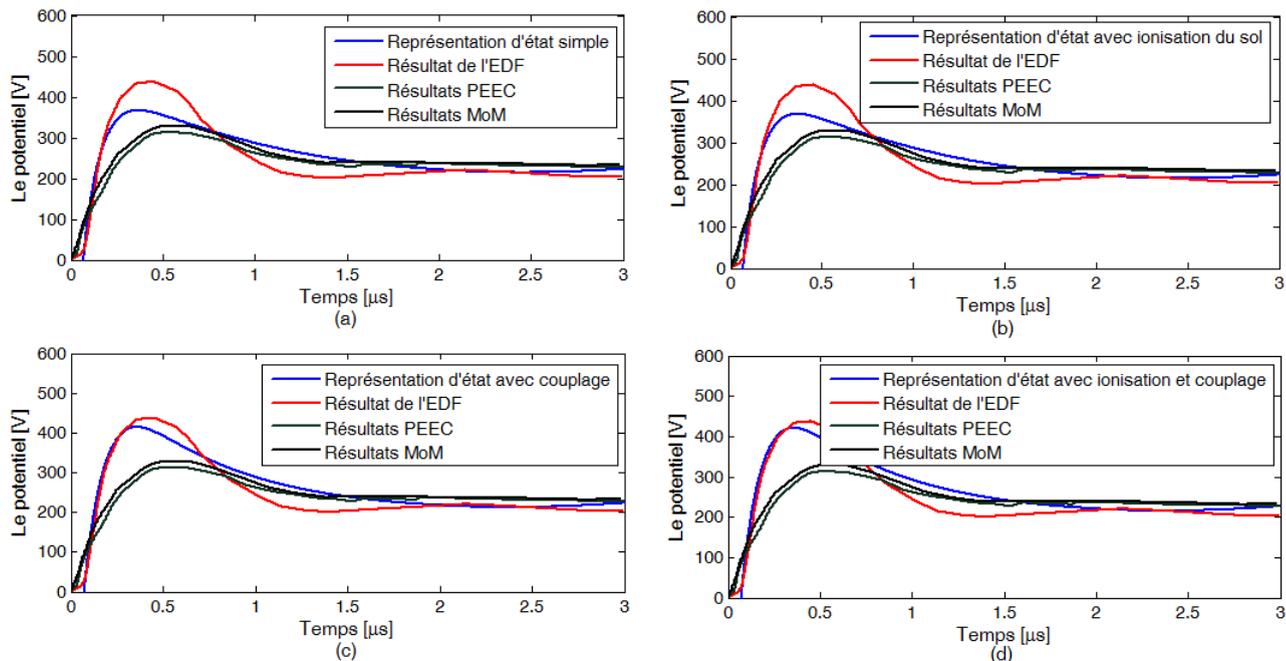


FIGURE 3.7: Potentiel au point d'injection obtenu par la représentation d'état, (a) en négligeant le couplage mutuel et l'ionisation du sol, (b) en considérant uniquement l'ionisation du sol, (c) en considérant seulement le couplage mutuel, et (d) en tenant compte les deux phénomènes simultanément

3.4.2 Electrodes enterrées horizontalement dans un sol de faible résistivité

EDF a effectué des essais sur une électrode horizontale, de longueur 15 m et de rayon $r=12$ mm, enterrée dans un sol caractérisé par une résistivité de $70 \Omega m$ et une permittivité relative de 15. Cette électrode est soumise à un courant impulsionnel d'amplitude 36 A. Les résultats expérimentaux de EDF consistent en les potentiels au point d'injection, et à 3,5 m et 7 m du point d'injection.

Nous avons simulé la même électrode dans les mêmes conditions. Dans notre investigation, nous avons simulé le courant expérimental de EDF par l'expression suivante : $i(t) = 36(e^{-60000t} - e^{-600000t})$ A.

Ainsi, nos potentiels au point d'injection et à 7 m de ce point ont été confrontés à ceux expérimentaux de EDF. Notons que Grcev [12] et Yutthagowith *et al.* [18] ont déjà simulé la même électrode en utilisant la méthode des moments MoM et celle de PEEC respectivement.

Sur la figure 3.8, nous présentons le potentiel obtenu en utilisant la représentation d'état, (a) au point d'injection et (b) à 7 m de ce point, et ce en négligeant le couplage mutuel et l'ionisation du sol, en considérant uniquement l'ionisation du sol, en considérant seulement le couplage mutuel ou en tenant compte des deux phénomènes simultanément. Les résultats obtenus par EDF, Grcev et Yutthagowith *et al.* ont été présentés sur la figure 3.8, (c) au point d'injection, et (d) à 7 m de ce point d'injection.

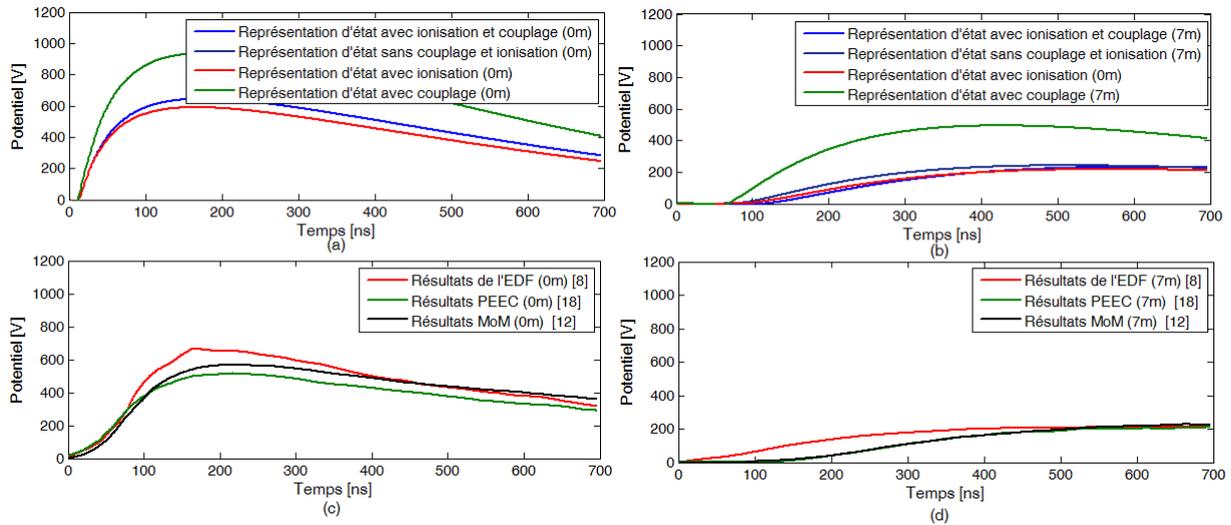


FIGURE 3.8: Potentiels au point d'injection (0 m) et à 7 m de point d'injection obtenu par la représentation d'état, (a) au point d'injection, (b) à 7 m de point d'injection, (c) résultats de [8, 12, 18] au point d'injection, et (d) résultats de [8, 12, 18] à 7 m de point d'injection

En considérant simultanément le couplage mutuel et l'ionisation du sol, les potentiels que nous avons obtenus à 0 et 7 m du point d'injection sont en bonne concordance avec ceux de EDF ; la différence ne dépassant pas 6%. Ce qui confirme la validité de notre représentation d'état pour modéliser les électrodes horizontales soumises à un courant impulsionnel.

3.4.3 Calcul des impédances

Pour analyser le comportement transitoire des électrodes de mise à la terre, certains paramètres indépendants du temps sont utilisés pour caractériser la réponse des électrodes soumises à un courant impulsionnel. Ces paramètres concernent [78] :

- 1- L'impédance impulsionnelle Z_1 consistant en le rapport de la valeur de crête du potentiel (V_c) sur celle du courant (I_c) :

$$Z_1 = \frac{V_c}{I_c} \quad (3.30)$$

- 2- Le paramètre Z_2 défini comme étant le rapport du potentiel noté $V_{t_{I_c}}$ à l'instant où le courant passe par la valeur de crête sur cette dernière valeur notée I_c :

$$Z_2 = \frac{V_{t_{I_c}}}{I_c} \quad (3.31)$$

- 3- Le paramètre Z_3 donné par le rapport entre la valeur de crête du potentiel V_c et le courant $I_{t_{V_c}}$ à l'instant où le potentiel passe par sa valeur de crête :

$$Z_3 = \frac{V_c}{I_{t_{V_c}}} \quad (3.32)$$

Nous présentons, dans le tableau 3.1 (respectivement 3.2) nos résultats quant à ces trois paramètres Z_1 , Z_2 et Z_3 ainsi que ceux mesurés par EDF [8] et simulés utilisant MoM [12] et PEEC [18] dans le cas d'une électrode verticale (respectivement horizontale) précédemment utilisée.

TABLE 3.1: Paramètres d'impédance de l'électrode verticale

Méthode de calcul	Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	Z_3 [Ω]
MoM	9,39	9,09	11,07
PEEC	9,7	9,09	11,63
Représentation d'état ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	11,16	9,93	12,76
Représentation d'état considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	12,71	10,4	14,24
Résultats expérimentales	13,33	9,09	17,98

TABLE 3.2: Paramètres d'impédance de l'électrode horizontale

Méthode de calcul	Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	Z_3 [Ω]
MoM	16	11,42	22,4
PEEC	15,71	10,85	21,53
Représentation d'état ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	17,42	10,28	26,52
Représentation d'état considérant l'ionisation du sol et le couplage mutuel	19,25	10,80	33,71
Résultats expérimentales	18,57	10,85	28

D'après les résultats présentés dans les tableaux 3.1 et 3.2, nous constatons que nos résultats que nous avons obtenus en incorporant l'ionisation du sol et le couplage mutuel sont en bonne concordance avec ceux expérimentaux de EDF [8].

3.4.4 Longue électrode enterrée horizontalement dans un sol de faible résistivité

Lorentzou *et al.* [70] ont développé les équations des télégraphistes afin d'étudier la réponse d'une longue électrode horizontale soumise à un faible courant bi-exponentiel défini comme suit : $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, avec $I_0 = 1,55227$ A ; $\alpha = 0,00364 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $\beta = 0,62251 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. L'électrode étudiée est de longueur 100 m et de rayon 1,5 mm, enterrée dans un sol de résistivité/permittivité relative $20 \Omega\text{m}/80$ avec une profondeur de 0,6 m. Les résultats obtenus consistent en le potentiel au point d'injection (0 m), à 2 et à 10 m de ce point d'injection.

Les résultats obtenus par Lorentzou *et al.* [70] et Cattaneo *et al.* [7] sont présentés sur la figure 3.9. Les points (o) présentent les résultats expérimentaux de Cattaneo *et al.* [7]. Les potentiels obtenus par Lorentzou *et al.* sont en lignes discontinues et ceux obtenus par le code EMTP [7] sont en lignes continues.

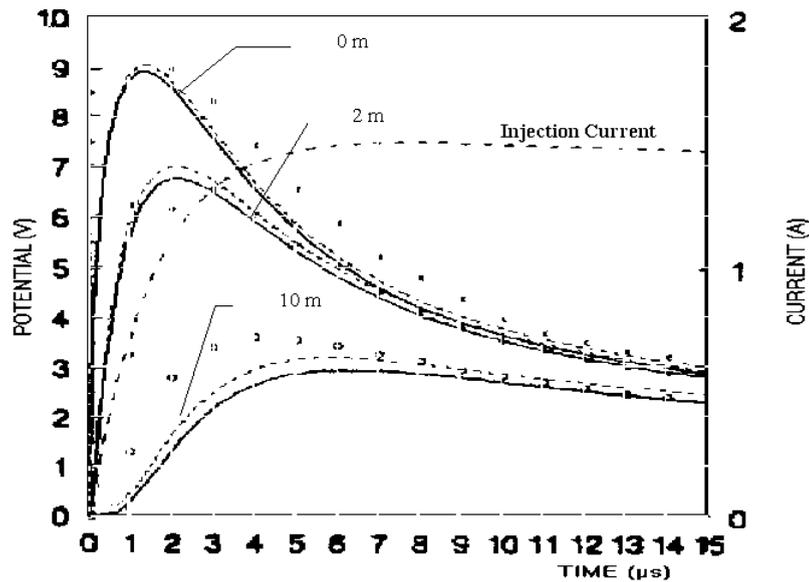


FIGURE 3.9: Résultats présentés par Lorentzou *et al.* [70] et Cattaneo *et al.* [7]

La figure 3.10 présente nos potentiels aux points 0, 2 et 10 m du point d'injection. La désignation (a) est pour les potentiels obtenus sans considération de l'ionisation et du couplage mutuel, et (b) lors de l'incorporation de ces derniers.

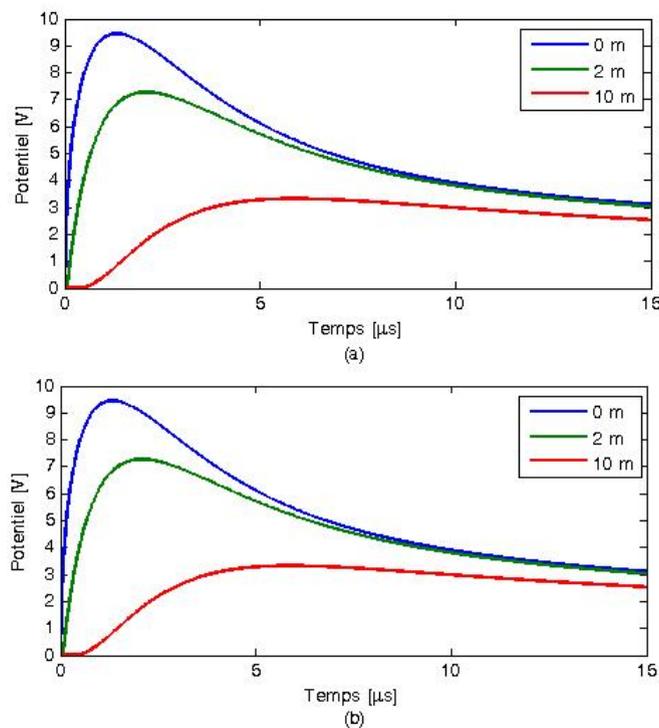


FIGURE 3.10: Potentiels obtenus par la représentation d'état (a) sans et (b) avec incorporation de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

Nous observons que nos résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenus par Lorentzou *et al.* [70] et Cattaneo *et al.* [7] présentés sur la figure 3.9. Nous notons aussi que l'incorporation de l'ionisation et du couplage mutuel n'engendre aucun impact sur les potentiels transitoires obtenus, et cela est dû à la faible amplitude du courant injecté.

3.4.5 Longue électrode enterrée horizontalement dans un sol fortement résistif

Nekhoul *et al.* [16] ont développé plusieurs méthodes utilisant la théorie des lignes de transmission (équations différentielles, équations des télégraphistes, matrice des nœuds, les lignes de transmissions résolues par les différences finies) et celles des antennes (méthode des éléments de frontières) en vue d'étudier la performance d'une longue de longueur $l=100$ m et de rayon $r=2,5$ mm enterrée horizontalement dans un sol de résistivité $10000 \Omega m$ et de permittivité relative 5. Ces chercheurs ont présenté le potentiel au point d'injection (0 m), à 10 et à 20 m (du point d'injection) ainsi que le courant à 5 et 20 m du point d'injection.

Le courant injecté $i(t)$ utilisé par ces auteurs est donné par la relation suivante : $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, avec $I_0=52$ kA ; $\alpha = 0,00184 \cdot 10^{-6} s^{-1}$; $\beta = 2,4665 \cdot 10^{-6} s^{-1}$.

Les résultats obtenus par [16] sont présentés sur la figure 3.11.

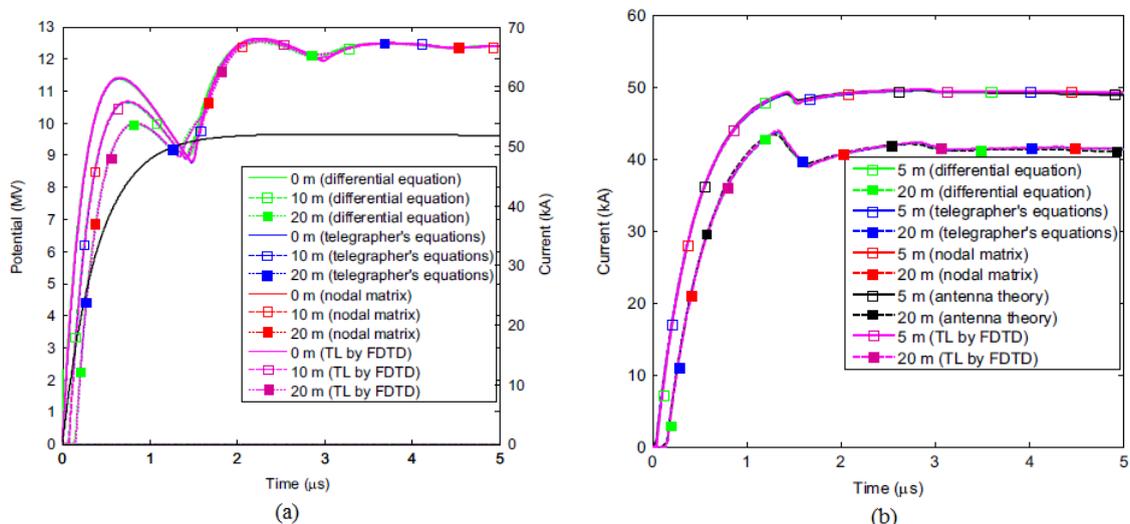


FIGURE 3.11: Potentiel et courant obtenus par [16] (a) potentiel à 0,10 et 20 m, (b) courant à 5 et 25 m

Nous avons modélisé la même électrode dans les mêmes conditions. Nos potentiels sont illustrés à la figure 3.12, sans (figure 3.12 (a)) et avec couplage et ionisation du sol (figure 3.12(b)). Outre des points considérés par Nekhoul *et al.*, nous avons aussi relevé le potentiel à l'extrémité de l'électrode soit à 100 m du point d'injection. Nos courants évalués à 5 et à 20 m du point d'injection sont présentés sur la figure 3.12, (c) sans le couplage mutuel et l'ionisation, et (d) en incorporant les deux phénomènes.

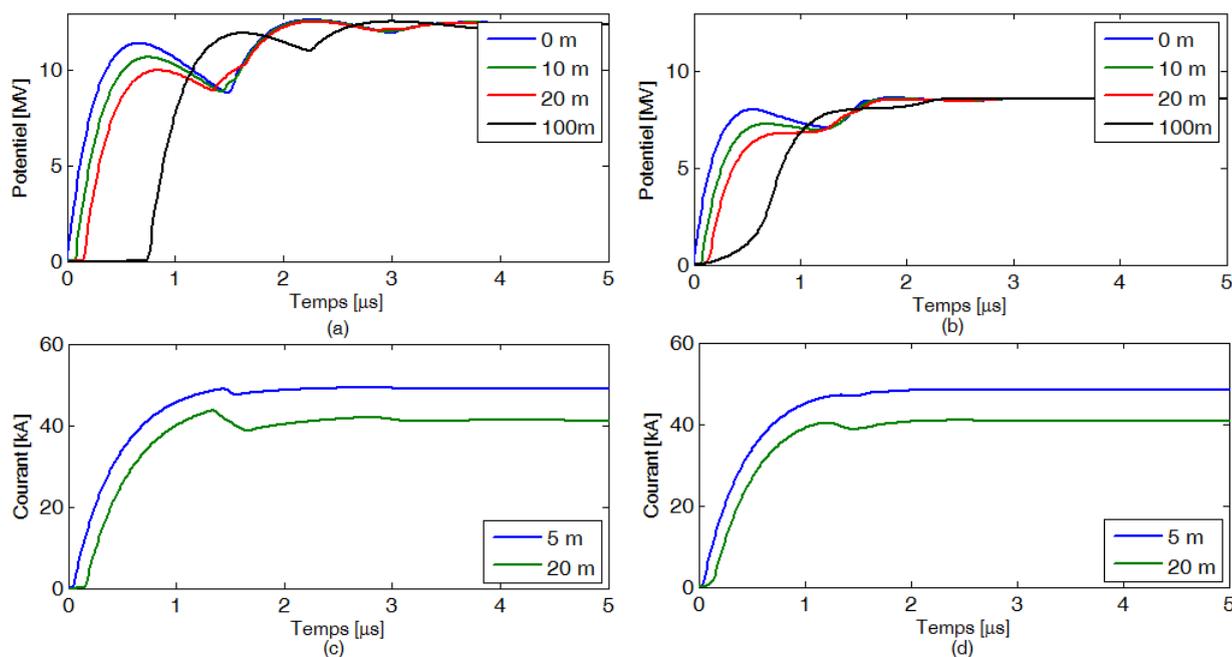


FIGURE 3.12: Nos résultats, (a) potentiel à 0, 10, 20 et 100 m sans couplage et ionisation, (b) potentiel à 0, 10, 20 et 100 m avec couplage et ionisation, (c) courant à 5 et 25 m sans couplage et ionisation, (d) courant à 5 et 25 m avec couplage et ionisation

En ignorant l'ionisation du sol et le couplage mutuel entre les segments, les potentiels et les courants que nous obtenus et présentés respectivement sur les figures 3.12 (a) et 3.12 (c) coïncident parfaitement avec ceux trouvés par Nekhoul *et al.* [16]. Les ondulations observées dans le potentiel et le courant se répètent chaque $1,5 \mu s$, donc à l'instant $t=1,5 \mu s, 3 \mu s$ et $4,5 \mu s$. Nous constatons également que l'incorporation de l'ionisation du sol et le couplage mutuel a engendré une diminution de 30 % du potentiel au point d'injection et une réduction des ondulations à la fois du potentiel et que du courant [88].

3.4.6 Réponse transitoire d'une grille de mise à la terre

Lui *et al.* [21] ont utilisé le code ATP-EMTP pour simuler deux grilles de mise à la terre. La première est une grille 1×1 et la deuxième est une grille 2×2 comme présentées sur la figure 3.13. Le courant injecté est défini par la formule : $i(t) = 1 (e^{-27000t} - e^{-5600000t})$. Les potentiels aux points d'injection obtenus par ATP-EMTP sont présentés sur la figure 3.14.

Nous avons modélisé les mêmes grilles dans les mêmes conditions. Nos potentiels sont illustrés à la figure 3.15.

D'après les résultats observés sur la figure 3.15, nous pouvons dire que nos résultats sont en bonne concordance avec ceux de Lui *et al.* [21]. l'écart maximal ne dépasse 5,5 % pour la grille 1×1 et 10 % pour 2×2 .

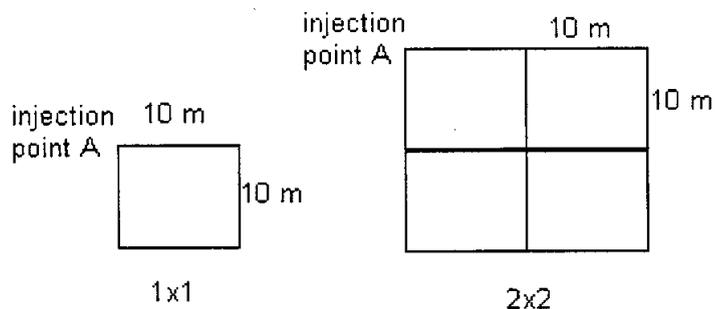


FIGURE 3.13: Configurations simulées par Lui *et al.* [21]

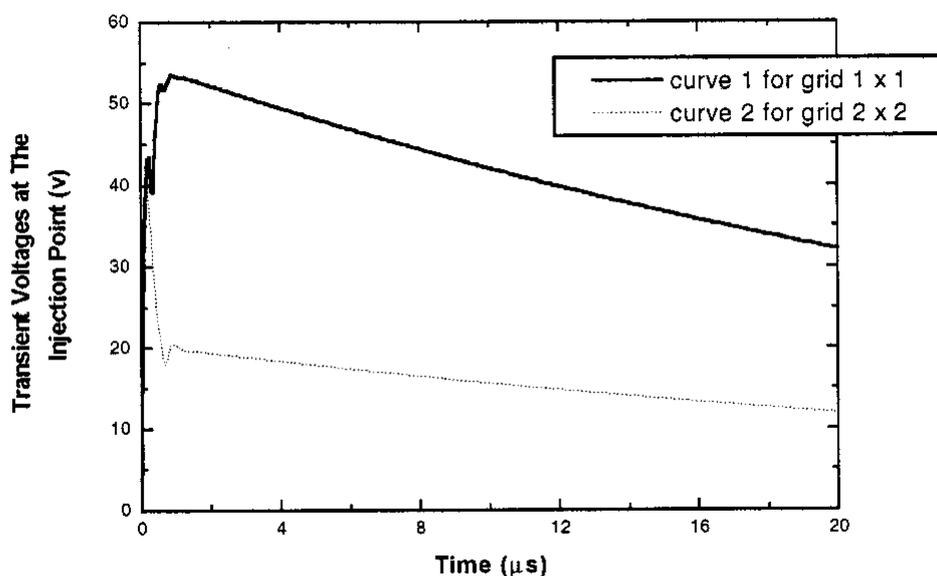


FIGURE 3.14: Potentiel au point d'injection des grilles de mise à la terre 1×1 et 2×2 obtenus par [21]

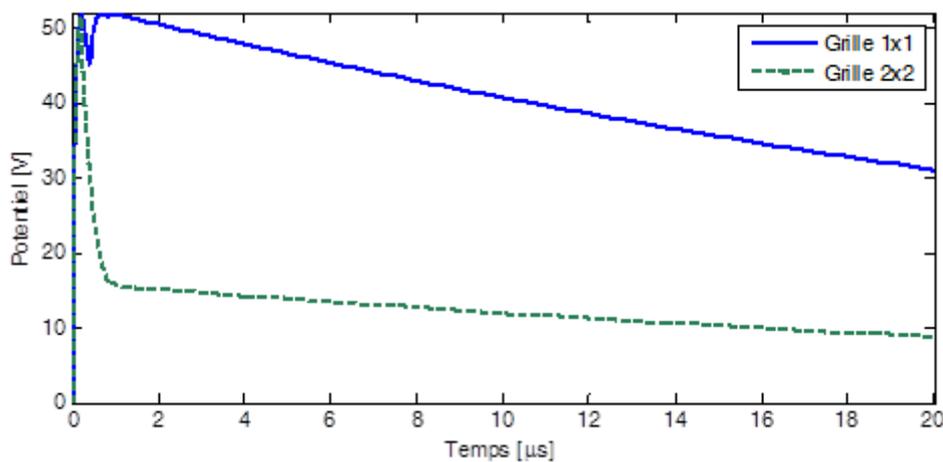


FIGURE 3.15: Potentiel au point d'injection des grilles de mise à la terre 1×1 et 2×2 obtenus par la représentation d'état

3.5 Conclusion

Ce chapitre a porté sur la modélisation des électrodes de terre par la représentation d'état en incorporant de l'ionisation du sol et du couplage mutuel. Les résultats obtenus dans le cas de l'utilisation des électrodes verticales et horizontales ont été confrontés avec succès à ceux obtenus expérimentalement par EDF ou par simulations effectuées par Nekhoul *et al.*, Lorentzou *et al.* et Lui *et al.*. Nous avons constaté également que le potentiel et le courant transitoires le long des longues électrodes enfouies dans un sol fortement résistif sont accompagnés par des ondulations, dues à la réflexion d'onde.

Chapitre 4

Réponses transitoires des électrodes de terre

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons modélisé par le biais de la représentation d'état, divers systèmes de mise à la terre suite à l'injection de courants impulsionnels. Dans le présent chapitre, nous allons exploiter la représentation d'état pour simuler des électrodes de terre soumises aux différents paramètres électro-géométriques.

Nous commençons d'abord par une étude paramétrique du potentiel transitoire en variant le courant injecté, la longueur de l'électrode et la résistivité/permittivité du sol. Pour une longue électrode horizontale, nous présentons l'impact de l'injection au point milieu sur le potentiel transitoire. Ensuite, nous présentons la potentiel et le courant transitoires lors de l'injection du courant de premier coup de foudre ainsi que du coup de foudre subséquent. Lors de cette simulation, différentes valeurs de la résistivité/permittivité du sol ont été considérées. Les réponses (potentiel et courant) transitoires le long de l'électrode sont exploitées pour déterminer le comportement longitudinal de l'électrode de terre.

Une deuxième exploitation de la représentation d'état a été faite en présentant la réponse transitoire d'une électrode de terre horizontale enterrée dans un sol verticalement stratifié ainsi que le potentiel et le courant le long de l'électrode. Nous terminons le chapitre par la présentation de la caractéristique potentiel-courant (V-I) des longues électrodes, et ce pour différentes valeurs de la résistivité/permittivité du sol.

4.2 Etude paramétrique du potentiel suite à l'utilisation d'une électrode enterrée dans un sol résistif

D'après la figure 3.12, il a été constaté l'apparition des ondulations dans les ondes du courant et potentiel enregistrés le long de l'électrode. Dans cette présente section,

nous identifions, parmi l'amplitude du courant injecté, la longueur de l'électrode et les caractéristiques électriques (résistivité et permittivité) du sol, les paramètres les plus intervenant dans l'apparition de telles ondulations.

4.2.1 Impact de l'amplitude du courant

L'électrode de mise à la terre en question possède une longueur $\ell=100$ m et un rayon $r=2,5$ mm. Elle est enfouie dans un sol de résistivité $\rho_s=10000 \Omega m$ et de permittivité relative $\varepsilon_s=5$. Le courant injecté est bi-exponentiel : $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, $\alpha = 0,00184 \cdot 10^{-6} s^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \cdot 10^{-6} s^{-1}$. Deux amplitudes du courant ont été considérées à savoir $I_0=1$ A et 50 A. A l'exception de l'amplitude du courant qui a été variée, les autres paramètres sont les mêmes considérés par Nekhoul *et al.* [16].

Les résultats obtenus consistant dans le potentiel au point d'injection ainsi qu'aux points 10, 20, 30 et 100 m de point d'injection sont présentés sur la figures 4.1 (a) et (b) pour les amplitudes 1 A et 50 A respectivement.

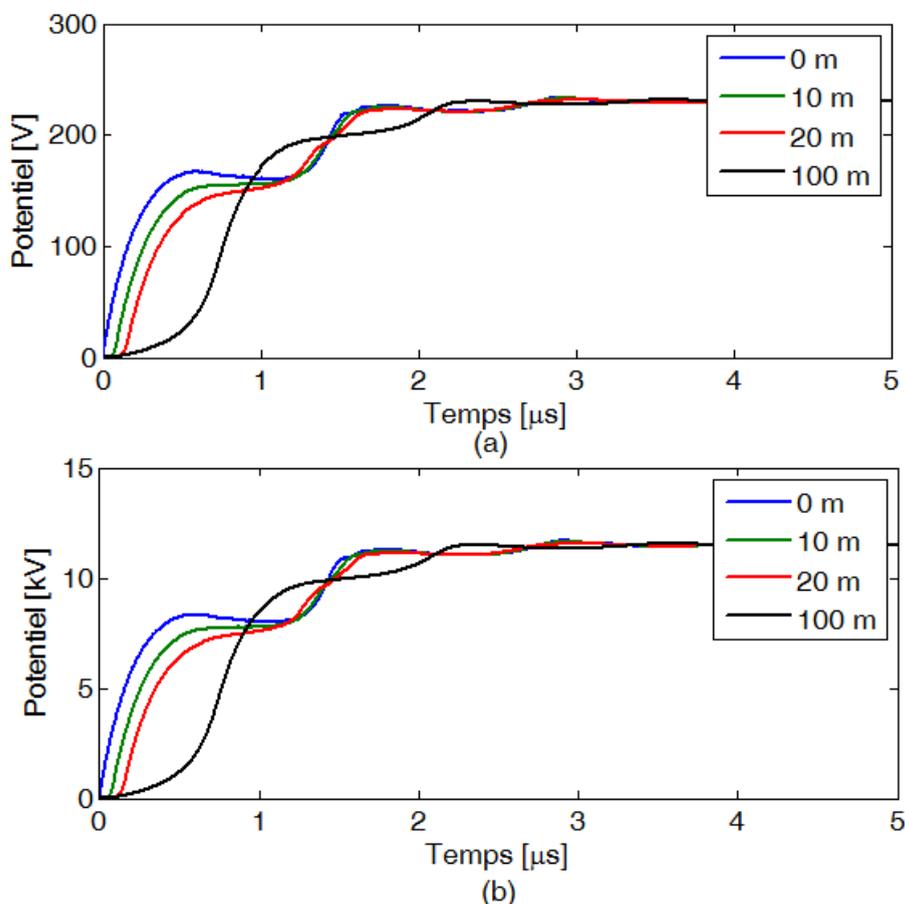


FIGURE 4.1: Potentiel obtenu en utilisant la représentation d'état pour un courant injecté d'amplitude de : (a) 1 A et (b) 50 A

Les potentiels transitoires présentés sur la figures 4.1 (a) et (b) ont la même forme que celle illustrée sur la figure 3.12 (b). En effet, l'amplitude du courant n'affecte pas les ondulations accompagnant aussi bien le potentiel que le courant transitoires.

4.2.2 Impact de la longueur de l'électrode

Trois longueurs de l'électrode ont été considérées dont les valeurs sont 10, 20 et 50 m. L'amplitude du courant est de 52 kA. Les autres paramètres ainsi que la forme du courant à injecter sont similaires à ceux présentés dans la section précédente. Le potentiel au point d'injection et à l'autre extrémité de l'électrode sont représentés sur la figure 4.2 (a) à (c) respectivement pour les longueurs de l'électrode de 10, 20 et 50 m.

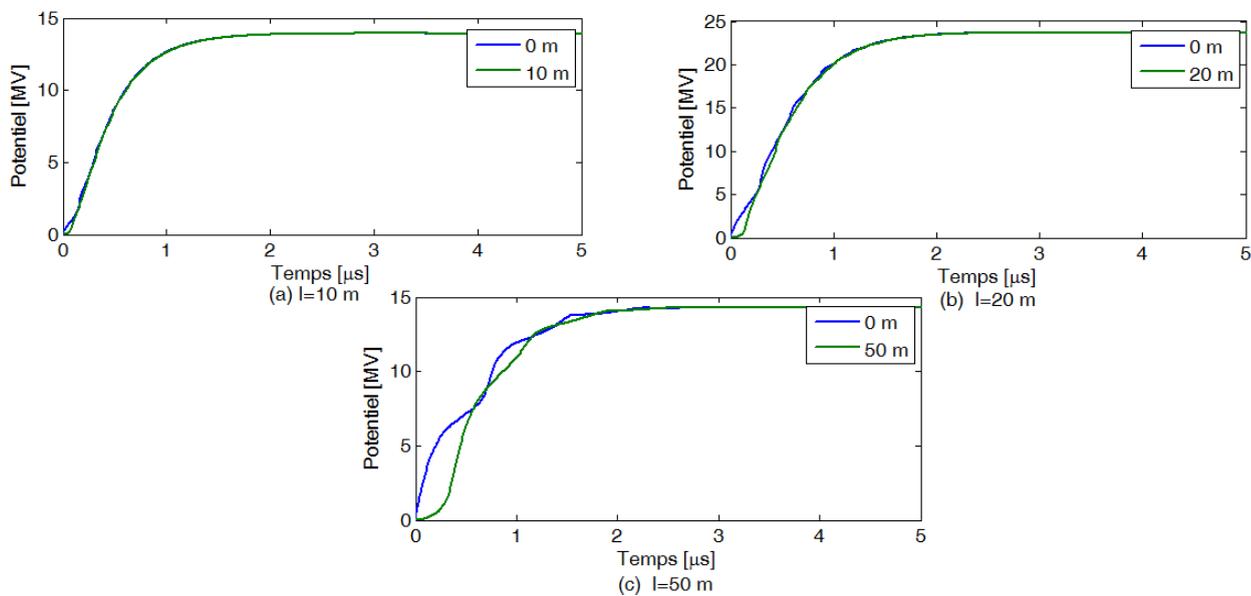


FIGURE 4.2: Potentiels au point d'injection et à l'autre extrémité de l'électrode

Lors de l'utilisation d'une électrode de 10 m, nous observons que le potentiel transitoire au point d'injection et celui à l'autre extrémité se coïncident. Par ailleurs, nous constatons l'absence d'ondulations.

Un léger écart (déphasage) a été enregistré entre le potentiel au point d'injection et celui à l'autre extrémité de l'électrode de 20 m. D'autre part, les ondulations au niveau des deux potentiels commencent à apparaître. Les ondulations prennent de l'ampleur en augmentant la longueur de l'électrode. D'ailleurs, les ondulations sont visibles et accompagnées d'un déphasage plus ou moins important entre les deux potentiels enregistrés au point d'injection et à l'extrémité de l'électrode de 50 m.

Il est à noter que les ondulations se répètent chaque $0,75 \mu\text{s}$ aussi bien pour le potentiel obtenu au point d'injection, que celui à l'autre extrémité de l'électrode. Cette durée est presque le double du temps de déphasage entre les deux potentiels. Cette constatation a été déjà faite lors de l'interprétation de la figure 3.12 (b) (obtenue pour une électrode de 100 m) où le déphasage était de $0,75 \mu\text{s}$ et la répétition des ondulations s'est déroulée chaque $1,5 \mu\text{s}$. Notons que le temps de déphasage correspond à la durée de propagation de l'onde de potentiel le long de l'électrode.

4.2.3 Impact des paramètres électriques du sol

L'électrode de mise à la terre examinée est de longueur $l=100$ m. Les valeurs considérées de la résistivité/permittivité du sol sont $50 \Omega m/60$, $500 \Omega m/25$ et $5000 \Omega m/7$. Les autres paramètres adoptés dans la section précédente ont été maintenus les mêmes.

Les potentiels au point d'injection et à l'autre extrémité de l'électrode sont représentés sur les figures 4.3 (a), (b) et (c) respectivement pour $50 \Omega m/60$, $500 \Omega m/25$ et $5000 \Omega m/7$.

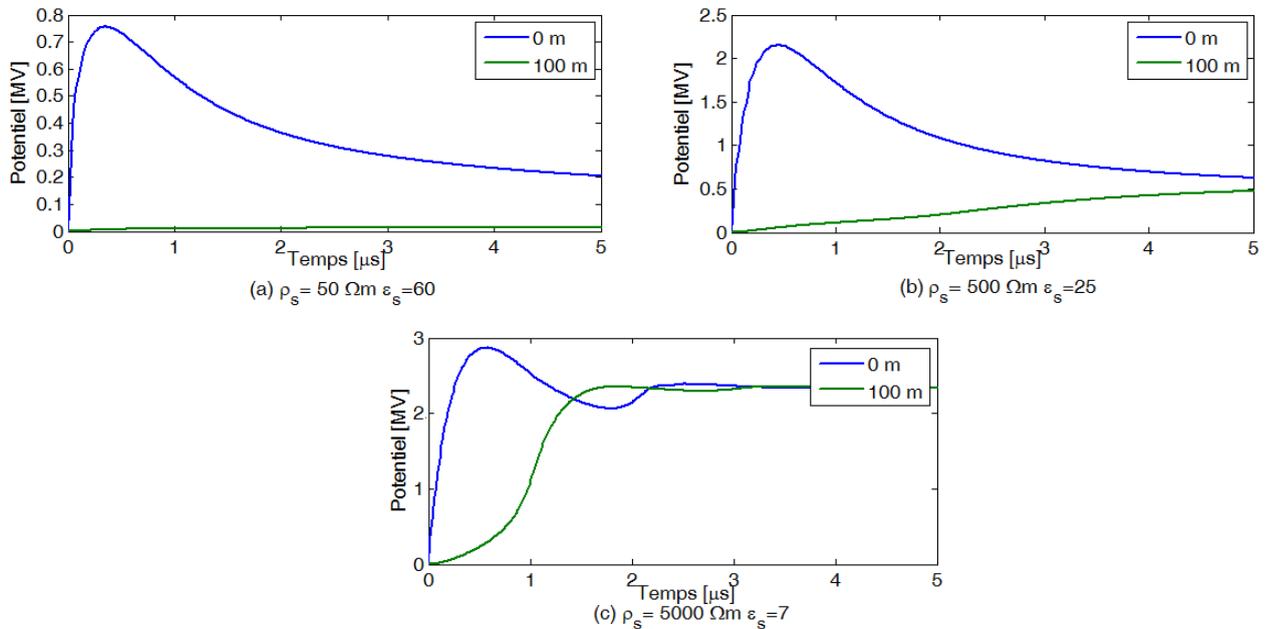


FIGURE 4.3: Potentiels au point d'injection et à l'autre extrémité de l'électrode pour différentes longueurs considérées

Pour les électrodes enfouies dans un sol de résistivité/permittivité de $50 \Omega m/60$ et $500 \Omega m/25$, un écart important est observé entre le potentiel au point d'injection et celui obtenu à l'autre extrémité de l'électrode. Par ailleurs, aucune ondulation n'apparaît dans les potentiels. Il est à remarquer que l'écart entre les deux potentiels diminue avec l'augmentation de la résistivité et donc avec la diminution de la permittivité du sol. D'ailleurs, les potentiels obtenues aux deux extrémités deviennent comparables lors de l'installation de l'électrode dans le sol de résistivité/permittivité $5000 \Omega m/7$. Ce dernier cas est caractérisé également par la présence des ondulations. En outre, le déphasage entre les potentiels est de $1 \mu s$ (ce temps correspond à la durée de propagation du potentiel de $X=0$ à $X=l$), et le temps de la répétition des ondulations est de $2 \mu s$.

Nous retenons de ces résultats que la forte résistivité du sol ainsi que la longueur excessive de l'électrode favorisent l'apparition des ondulations. Le temps de répétition de ces ondulations est le double du déphasage entre le potentiel au point d'injection et celui à l'autre extrémité de l'électrode. L'apparition de ces ondulations est due à la réflexion de l'onde de potentiel au niveau extrémité $X=l$ (l étant la longueur de l'électrode) du fait de la forte résistivité du sol [15].

La vitesse de propagation correspond au rapport longueur de l'électrode sur le temps de propagation. A titre d'exemple, la vitesse de propagation du potentiel le long d'une

l'électrode de 100 m enfouie dans un sol de résistivité $10000 \Omega m$ est de $1,33 \cdot 10^8 m/s$ [88].

4.2.4 Impact de l'injection du courant au point milieu de l'électrode

Nous nous intéressons, dans cette section, à examiner le potentiel dans le domaine temporel lors de l'injection d'un courant bi-exponentiel de très forte amplitude (52 kA) à l'extrémité de l'électrode ou au point milieu d'une longue électrode de 100 m. Cette dernière est enfouie dans un sol de différentes résistivités/permittivités de $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$, $1000 \Omega m/10$ et $10000 \Omega m/5$. Les résultats ainsi obtenus sont présentés sur la figure 4.4.

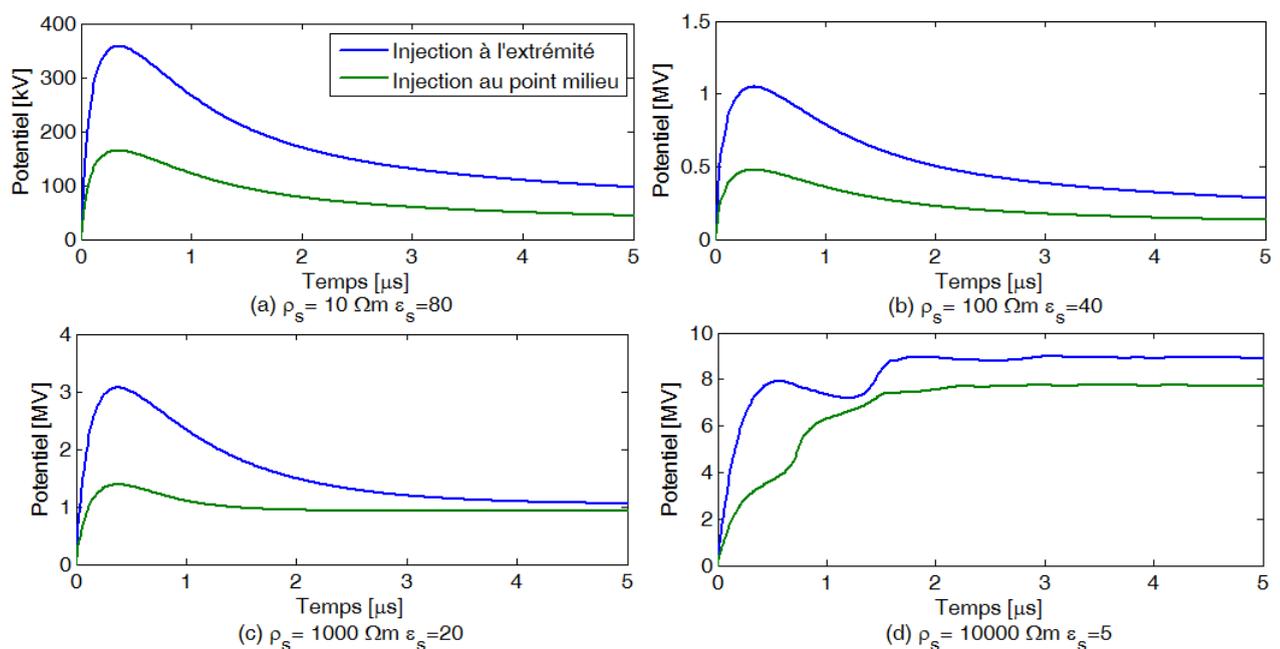


FIGURE 4.4: Potentiels obtenus lors de l'injection à l'extrémité et au point milieu de l'électrode

Les résultats montrent que le potentiel diminue au fur et à mesure d'augmenter les chemins conducteurs le long du système de terre. En effet, pour un même type de sol (donc une résistivité et permittivité données), le potentiel est plus faible lors de l'injection du courant au point milieu de l'électrode (ayant deux chemins conducteurs). Autrement dit, la ramification du courant réduit le potentiel transitoire. En outre, la valeur de crête du potentiel est réduite de 50 % pour les électrodes enfouies dans les sols de résistivité/permittivité $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$ et $1000 \Omega m/10$ respectivement et uniquement de 14 % pour le cas du sol de $10000 \Omega m/5$. Il est à noter que les ondulations qui apparaissent dans le potentiel transitoire lors de l'utilisation du sol de $10000 \Omega m/5$ sont moins accentuées. Ce qui confirme que la longueur de l'électrode influe sur l'apparition des ondulations au niveau de le potentiel transitoire.

4.3 Réponses transitoires de l'électrode soumise aux courants du premier coup ou au courant et au courant subséquent de foudre

Cette partie est consacrée à l'étude de la réponse transitoire (variations temporelles du potentiel et du courant) le long d'une électrode verticale de mise à la terre de longueur 10 m et de rayon 8 mm. Trois types de sol ont été considérés dont la résistivité est de 10, 100 et 1000 Ωm et la permittivité relative est de 80, 40 et 10 respectivement.

Nous commençons par présenter les réponses transitoires de l'électrode soumise au courant du premier coup de foudre, puis au courant de foudre subséquent. La fonction du courant de foudre adoptée est celle de Heidler donnée par l'expression 1.1. Les paramètres du premier coup et de celui subséquent que nous avons utilisés sont illustrés dans le tableau 1.2. Nous nous sommes intéressés au fait aux valeurs les plus élevées correspondant au niveau IV de protection contre la foudre.

4.3.1 Réponse transitoire de l'électrode soumise au courant de premier coup de foudre

Le potentiel et le courant ont été évalués aux différents points X de l'électrode. Il s'agit de $X=0$ (point d'injection), 2, 4, 6 et 8 m. Le courant injecté dans l'électrode est celui simulant le premier coup de foudre. Les résultats ainsi obtenus pour l'électrode enfouie dans le sol de résistivités/permittivités relatives 1000 $\Omega m/10$, 100 $\Omega m/40$ et 10 $\Omega m/80$ sont présentés sur la figure 4.5 pour le potentiel transitoire et 4.6 pour le courant transitoire.

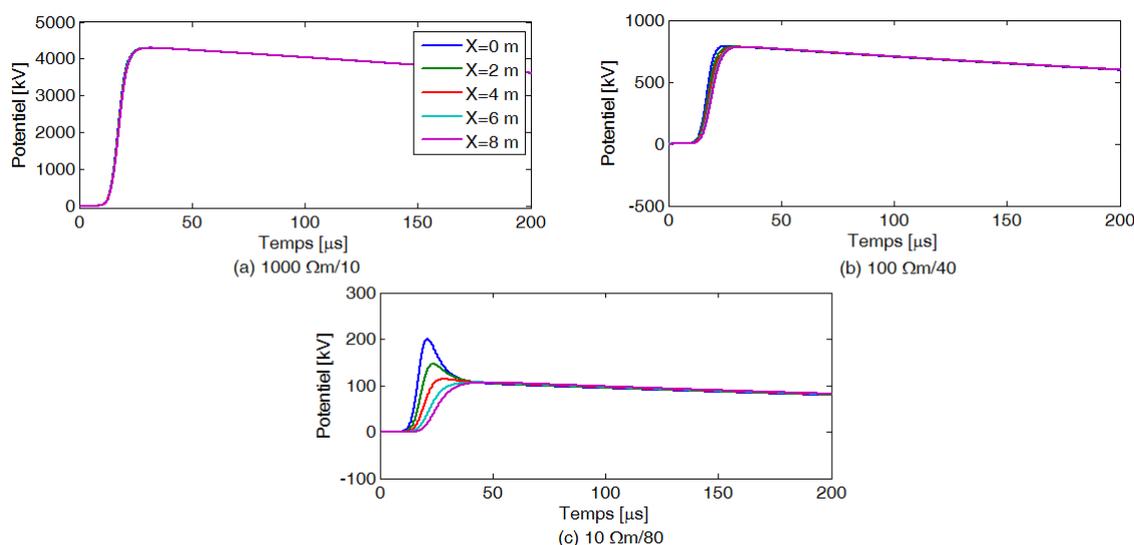


FIGURE 4.5: Potentiel transitoire le long de l'électrode soumise au courant du premier coup de foudre pour différentes résistivités/permittivités du sol

D'après la figure 4.5, nous observons que pour la résistivité (respectivement la permittivité) la plus (respectivement la moins) importante, les potentiels enregistrés le long

(donc aux différents points) de l'électrode se coïncident. En augmentant la résistivité et en diminuant la permittivité du sol, l'écart entre les différents potentiels commence à avoir lieu. D'ailleurs, un faible écart a été détecté lors de l'utilisation d'un sol caractérisé par une résistivité/permittivité de $100 \Omega m/40$. Cet écart devient important lors de l'utilisation d'un sol de $10 \Omega m/80$, et ce pour les temps ne dépassant pas $40 \mu s$. La valeur de crête du courant est plus importante au point d'injection et diminue au fur et à mesure que le courant traverse l'électrode. Au-delà de $40 \mu s$, les potentiels aux différents points de l'électrode se rejoignent.

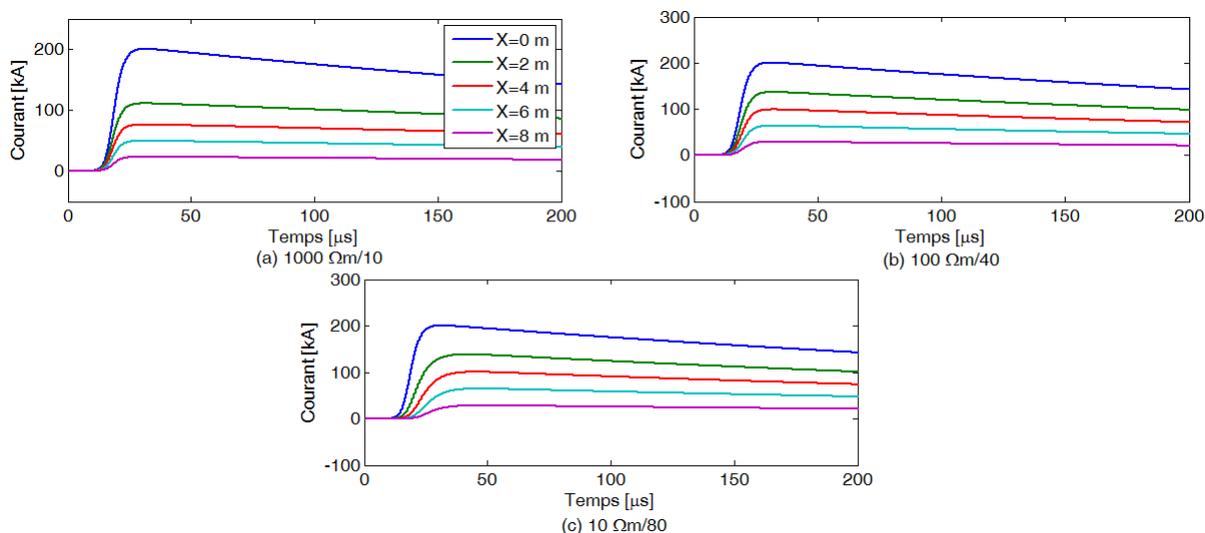


FIGURE 4.6: Evolution du courant du premier coup de foudre le long de l'électrode pour différentes résistivités/permittivités du sol

Pour les courants, nous observons que notamment pour le sol de forte résistivité (faible permittivité), près de 45%, 35% et 30% du courant sont dissipés lors de son passage à travers le premier segment (de 2 m) de l'électrode (de 10 m) enfouie respectivement dans un sol de $1000 \Omega m/10$, $100 \Omega m/40$ et $10 \Omega m/80$. Le reste du courant est répartie d'une manière quasi-équitable sur les autres segments de l'électrode.

4.3.2 Réponse transitoire de l'électrode soumise au courant du coup de foudre subséquent

Le même travail a été refait en injectant, cette fois-ci, un courant de coup de foudre subséquent. Les figures 4.7 et 4.8 représentent respectivement le potentiel et le courant le long de l'électrode (soit aux points $X= 0, 2, 4, 6$ et 8 m).

Dans le cas de l'emplacement de l'électrode dans un sol caractérisé par une résistivité/permittivité de $1000 \Omega m/10$, les potentiels obtenus aux différents points de l'électrode se coïncident. Au fur et à mesure qu'on augmente la résistivité (diminue la permittivité) du sol, un écart entre les différents potentiels commence à apparaître dans l'intervalle du temps $[0 2] \mu s$. Cet écart devient considérable dans la gamme $[0 10] \mu s$ lorsque l'électrode est enterrée dans un sol de $10 \Omega m/80$. Au-delà de $10 \mu s$, les potentiels aux différents points de l'électrode se rejoignent.

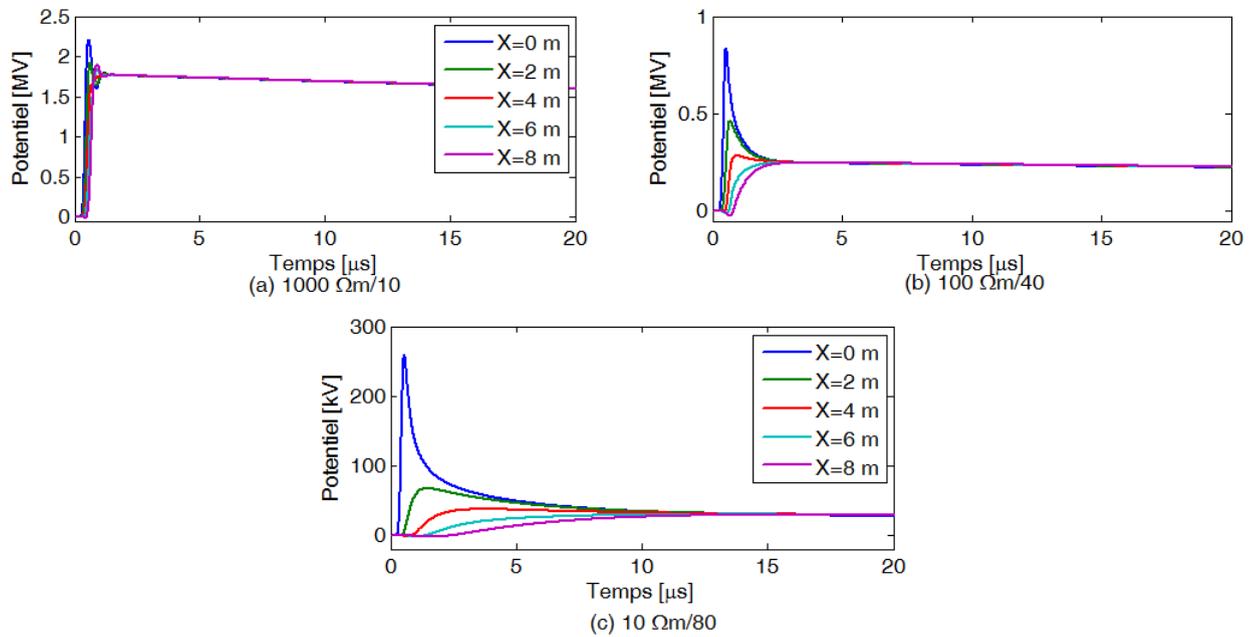


FIGURE 4.7: Potentiel transitoire le long de l'électrode soumise au courant de coup de foudre subséquent pour différentes résistivités/permittivités du sol

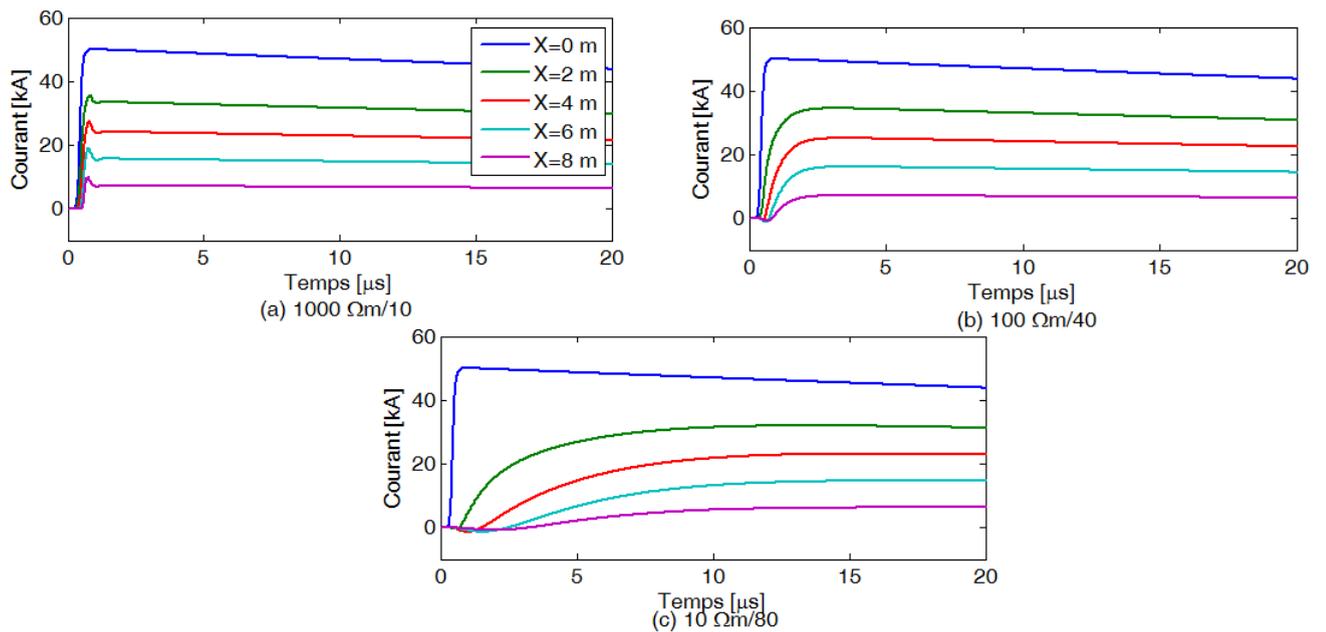


FIGURE 4.8: Evolution du courant du coup de foudre subséquent le long de l'électrode pour différentes résistivités/permittivités du sol

Pour les courants subséquents de foudre, nous observons que près de 30% du courant est dissipés à travers la l'interface surface latérale du premier segment-sol. Par ailleurs, le déphasage entre les signaux du courant enregistrés aux différents points de l'électrode augmente avec la diminution de la résistivité (donc avec l'augmentation de la permittivité) du sol.

4.3.3 Comportement longitudinal d'une électrode de mise à la terre

Nous exploitons, dans ce qui suit, les potentiels et les courants obtenus le long de l'électrode pour caractériser le comportement des électrodes soumises au courant impulsionnel. Il est évident que le potentiel et le courant obtenus au point d'injection ($X=0$) présentent le comportement de l'électrode en entière. Divisons l'électrode de longueur ℓ en N éléments de longueur $\Delta\ell$. Pour le nième segment (n varie de 0 à $N - 1$), la représentation simultanée du courant et du potentiel permet de déterminer le comportement de la partie de l'électrode dont la longueur est de $\ell - n\Delta\ell$; cette partie est située, en fait, entre le point du nième segment et la fin de l'électrode ($X= \ell$).

Basant sur les temps de crête de ces grandeurs (potentiel et courant), nous définissons un nouveau paramètre temporel F_n comme suit :

$$F_n = T_{P_n}/T_{I_n} \quad (4.1)$$

T_i est le temps de crête du courant, T_p est le temps de crête du potentiel et n est la position de l'élément par rapport au point d'injection [89].

Ce paramètre peut être utilisé comme "indicateur dynamique de la nature du comportement transitoire de l'électrode". En effet, le comportement de la partie de l'électrode située entre l'élément n et la fin de l'électrode est (i) inductif si $F_n < 1$, (ii) résistif si $F_n = 1$ et (iii) capacitif si $F_n > 1$.

Nous nous sommes intéressés à identifier la nature du comportement longitudinal de l'électrode de 10 m de mise à la terre pour deux variantes : le type de coup (premier ou subséquent) du courant impulsionnel injecté et la disposition (verticale ou horizontale) de cette électrode.

4.3.3.1 Impact du type de coup du courant de foudre

Le comportement longitudinal d'une électrode horizontale de 10 m est discuté en évaluant le paramètre F_n pour un sol caractérisé par une résistivité/permittivité de $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$ et $1000 \Omega m/10$. Les résultats obtenus pour les deux coups de foudre sont représentés sur la figure 4.9.

A partir de la figure 4.9 (a), le dernier segment ($F_9 = 1$) de l'électrode enterrée dans le sol $10 \Omega m/80$ est caractérisé par un comportement résistif. Ce comportement devient inductif en rapprochant du point d'injection du fait de la diminution de l'indicateur dynamique F_n . Le comportement en question devient plus résistif lors de l'installation de la même électrode dans un sol de $100 \Omega m/40$. Ce comportement devient pratiquement

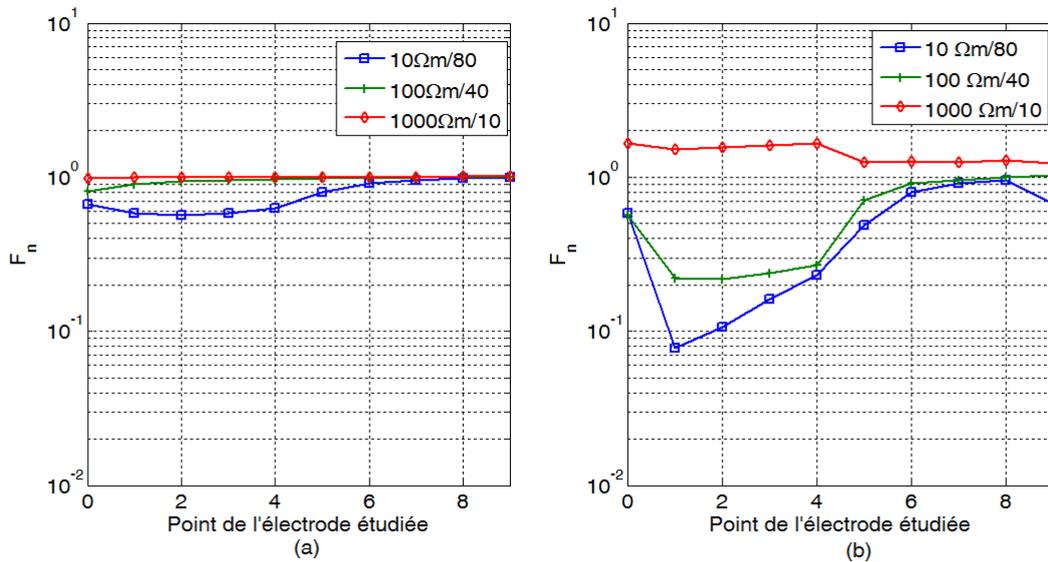


FIGURE 4.9: Evolution du paramètre F_n le long d'une électrode horizontale soumise au courant de premier coup de foudre

résistif en utilisant un sol de $1000 \Omega m/10$ du fait que les valeurs de F_n sont proches de 1.

Relatif à la figure 4.9 (b), le comportement longitudinal de l'électrode soumise au courant de foudre subséquent est entièrement inductif lorsque cette électrode est enfouie dans le sol de $10 \Omega m/80$. Avec l'utilisation d'un sol de $100 \Omega m/40$, les trois derniers segments de l'électrode possèdent un comportement résistif. Ce dernier devient de plus en plus inductif en rapprochant du point d'injection. Finalement, l'électrode possède un comportement purement capacitif lorsqu'elle installée dans le sol de $1000 \Omega m/10$, du moment que l'indicateur F_n est strictement supérieur à l'unité.

4.3.3.2 Impact de la disposition de l'électrode

Le comportement longitudinal d'une électrode de 10 m enfouie verticalement puis horizontalement et soumise au courant de foudre subséquent a été examiné. Les mêmes caractéristiques électriques du sol ont été considérées à savoir $10 \Omega m/80$, $100 \Omega m/40$ et $1000 \Omega m/10$. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 4.10 pour l'électrode (a) verticale et (b) horizontale respectivement.

D'après la figure 4.10, l'électrode enterrée dans un sol de faible résistivité ($10 \Omega m/80$ et $100 \Omega m/40$) possède un comportement inductif car les valeurs de l'indicateur sont inférieures à 1 ($F_0 = 0,17$ et $0,21$ respectivement). L'indicateur diminue pour le prochain segment avant de commencer à augmenter de nouveau jusqu'à atteindre l'unité à 9 m (dernier point) indiquant le comportement résistif du dernier segment.

Cependant, lors de l'utilisation du sol de $1000 \Omega m/10$, l'indicateur dépasse l'unité au point d'injection, ce qui montre la nature capacitive du comportement de l'électrode. Celui-ci devient de plus en plus capacitif en éloignant du point d'injection (à cause de l'augmentation de F_n). Les résultats obtenus pour l'électrode verticale sont similaires à

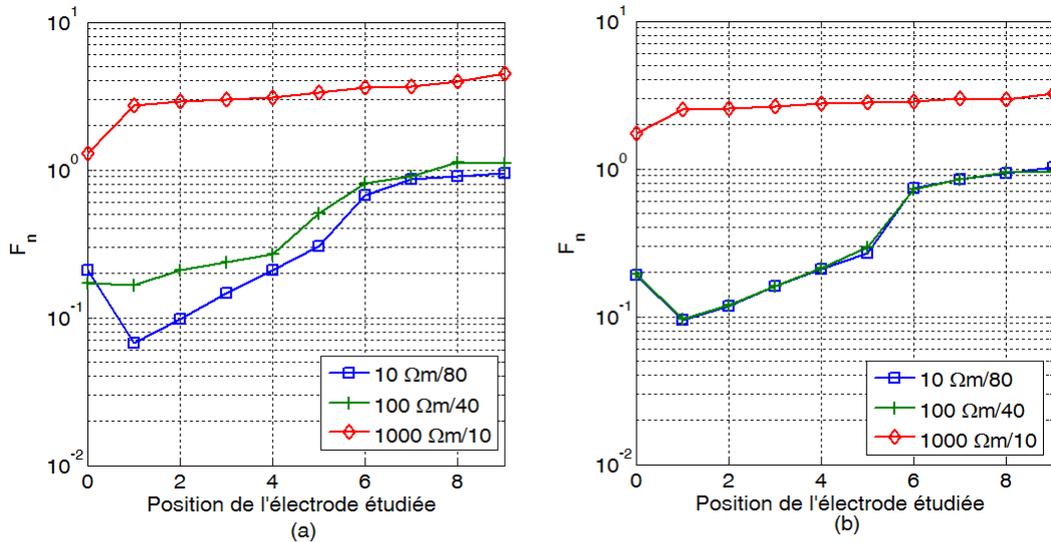


FIGURE 4.10: Comportement longitudinal lors de l'injection du courant de coup de foudre subséquent

ceux de l'électrode horizontale. Le comportement, initialement inductif au point d'injection pour les électrodes enfouies dans les sols de 10 $\Omega m/80$ et 100 $\Omega m/40$, évolue jusqu'à devenir résistif au dernier segment. Pour l'électrode enfouie dans le sol 1000 $\Omega m/10$, le comportement est capacitif.

4.4 Etude de la réponse transitoire des électrodes enfouies dans un sol verticalement stratifié

L'électrode considérée dans cette partie est celle étudiée en deuxième chapitre (section 2.5). Il s'agit d'une électrode horizontale de 20 m de longueur et 2,5 mm de rayon. Elle est enfouie à une profondeur de 0,6 m dans un sol verticalement stratifié en deux couches caractérisées par $\rho_{s1}/\varepsilon_{s1}$ et $\rho_{s2}/\varepsilon_{s2}$ respectivement. Nous désignons par H la longueur de la partie de l'électrode qui pénètre dans la couche 2 et $\ell - H$ (ℓ étant la longueur de l'électrode) est la longueur de la partie enterré dans la couche 1.

Nous nous sommes intéressés à étudier le potentiel transitoire au point d'injection, l'impédance impulsionnelle de l'électrode et le potentiel et le courant transitoires le long de l'électrode pour différentes valeurs de l'indice de pénétration défini par : $k = \frac{H}{\ell} 100$ (%). Cet indice a été varié de 0 (l'électrode installée dans la couche 1) à 100% (l'électrode enfouie dans la couche 2) par pas de 20%. Le courant impulsionnel injecté est de la forme : $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ avec $I_0=1$ kA, $\alpha = 0,00184 \cdot 10^{-6} s^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \cdot 10^{-6} s^{-1}$. L'injection du courant a été faite à l'extrémité de l'électrode situant dans la première couche. Deux cas relatifs aux caractéristiques électriques de celle-ci ont été considérés : (1) $\rho_{s1}=100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1}=40$, (2) $\rho_{s1}=500 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1}=25$.

4.4.1 Potentiel transitoire au point d'injection et impédance impulsionnelle

La figure 4.11 présente le potentiel transitoire au point d'injection pour différentes valeurs de l'indice de pénétration k et pour les deux cas précédents. Par ailleurs, les valeurs de l'impédance impulsionnelle obtenues sont présentées dans le tableau 4.1. Nous rappelons que cette impédance Z_1 , définie par la relation 3.30, consiste en le rapport de la valeur de crête du potentiel (V_c) sur celle du courant (I_c).

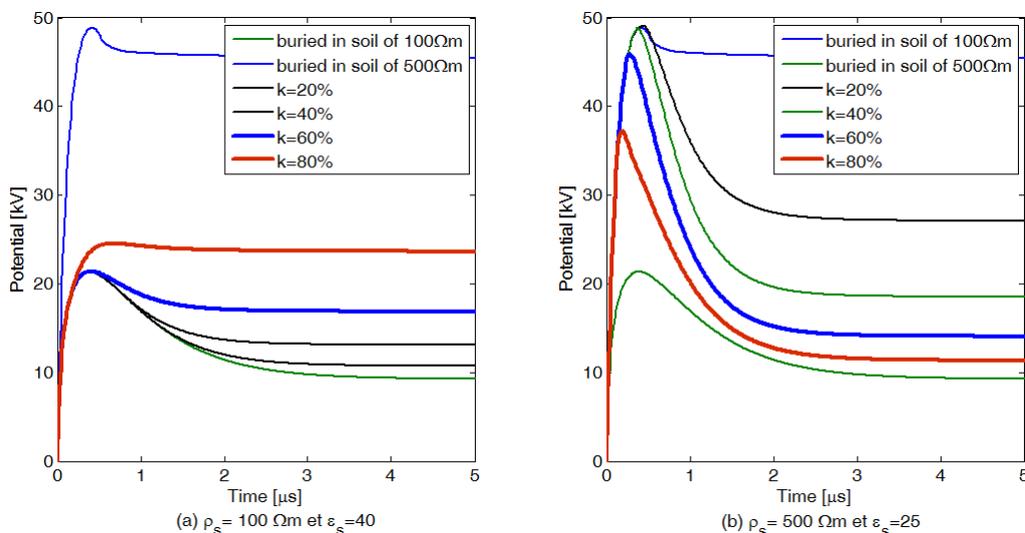


FIGURE 4.11: Potentiel transitoire d'une électrode horizontale enterrée dans un sol stratifié verticalement dans le cas de l'injection du courant dans l'extrémité se trouvant dans la couche 1

TABLE 4.1: Impédance impulsionnelle (en Ω) pour différentes valeurs de l'indice de pénétration

k (%)	Cas 1 : $\rho_{s1}=100 \Omega m$ et $\epsilon_{s1}= 40$	Cas 2 : $\rho_{s1}=500 \Omega m$ et $\epsilon_{s1}= 25$
00	21,39	48,85
20	21,39	48,85
40	21,39	48,2
60	21,39	45,85
80	24,52	37,1
100	48,85	21,39

Nous constatons que le potentiel transitoire et l'impédance impulsionnelle sont les plus faibles lors de l'injection du courant à l'extrémité de l'électrode se trouvant dans la couche du sol de faible résistivité (cas 1). Dans ce cas, la valeur de crête du potentiel transitoire et donc celle de l'impédance impulsionnelle restent inchangées dans la gamme de k variant entre 0 et 60 %, avant d'augmenter significativement dans la plage [60-100] %. Cependant, lors de l'injection du courant dans l'extrémité se trouvant dans la couche la plus résistive (cas 2), la valeur de crête du potentiel ainsi que l'impédance impulsionnelle diminuent avec l'augmentation de l'indice de pénétration k . De ce fait, il est recommandé d'injecter le courant dans l'extrémité de l'électrode se situant dans

la couche la plus conductrice pour espérer avoir un potentiel transitoire et donc une impédance impulsionnelle moins élevés.

4.4.2 Répartition du potentiel le long de l'électrode

Le potentiel transitoire le long d'une électrode enfouie dans un sol à deux couches est présenté sur la figure 4.12 et 4.13 respectivement pour les cas (1) et (2).

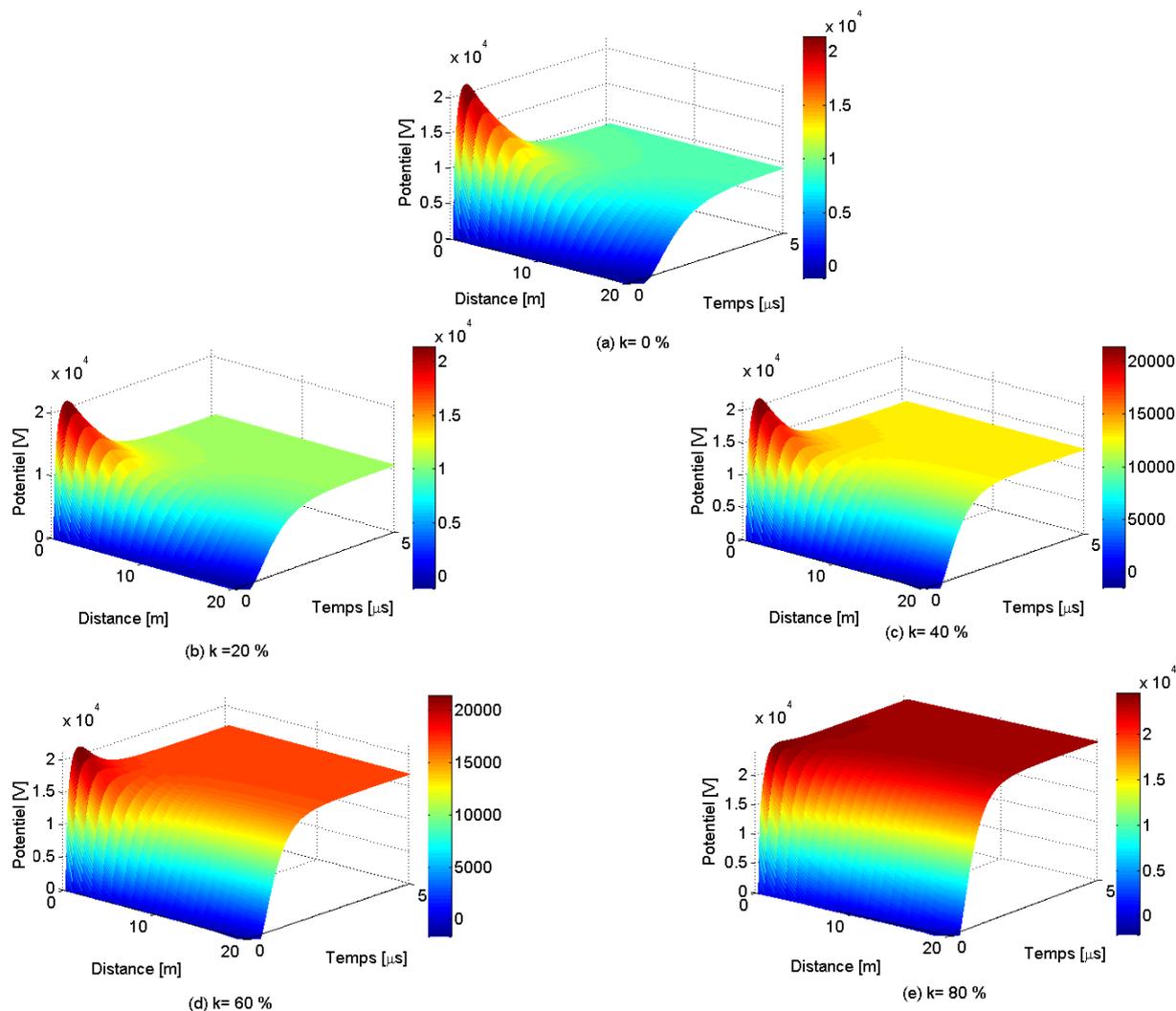


FIGURE 4.12: Répartition du potentiel le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 40$

Dans le cas (1) où l'électrode est enfouie dans la couche de faible résistivité ($\rho_s = 100 \Omega m$ et $\varepsilon_s = 40$), nous observons, pour les valeurs de l'indice de pénétration k entre 0 et 60 %, un écart entre le potentiel transitoire au point d'injection et les potentiels enregistrés aux autres points de l'électrode, et ce dans l'intervalle du temps de 0 à $2 \mu s$. Au-delà de $2 \mu s$, les potentiels aux différents points de l'électrode se rejoignent. Cet écart diminue au fur et à mesure que l'indice de pénétration augmente.

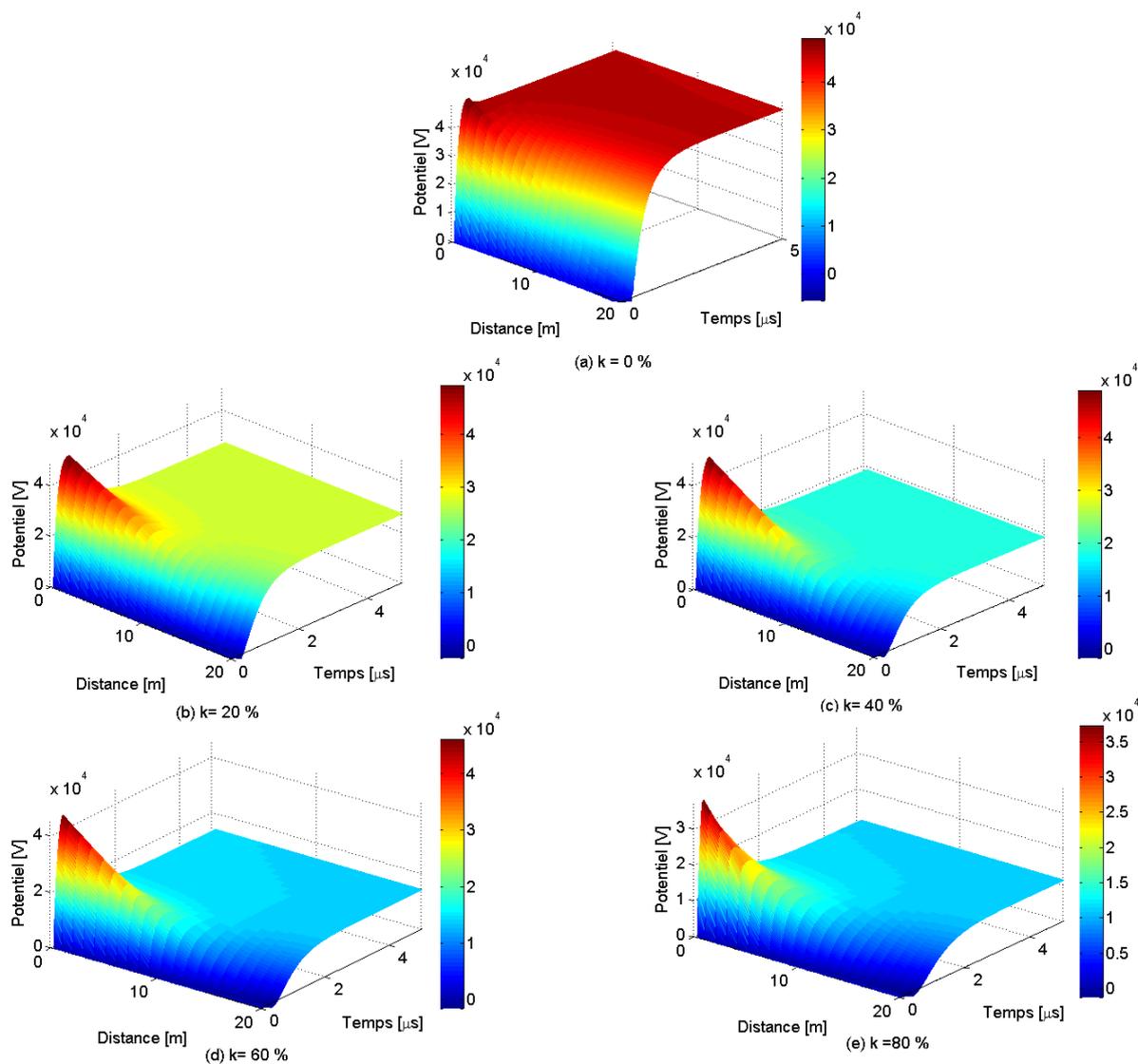


FIGURE 4.13: Répartition du potentiel le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 500 \Omega m$ et $\epsilon_{s1} = 25$

Lors de l'injection du courant dans la couche de forte résistivité caractérisée par $\rho_{s1} = 500 \Omega m$ et $\epsilon_{s1} = 25$ (cas 2), l'écart entre le potentiel au point d'injection et ceux obtenus aux autres points de l'électrode, enregistrés dans l'intervalle du temps $[0 \ 2] \mu s$, augmente avec l'indice de pénétration k .

4.4.3 Répartition du courant le long de l'électrode

Nous nous sommes intéressés dans la présente section à présenter le courant transitoire le long de l'électrode considérée. Les résultats obtenus dans les cas (1) et (2) sont présentés sur les figures 4.14 et 4.15 respectivement.

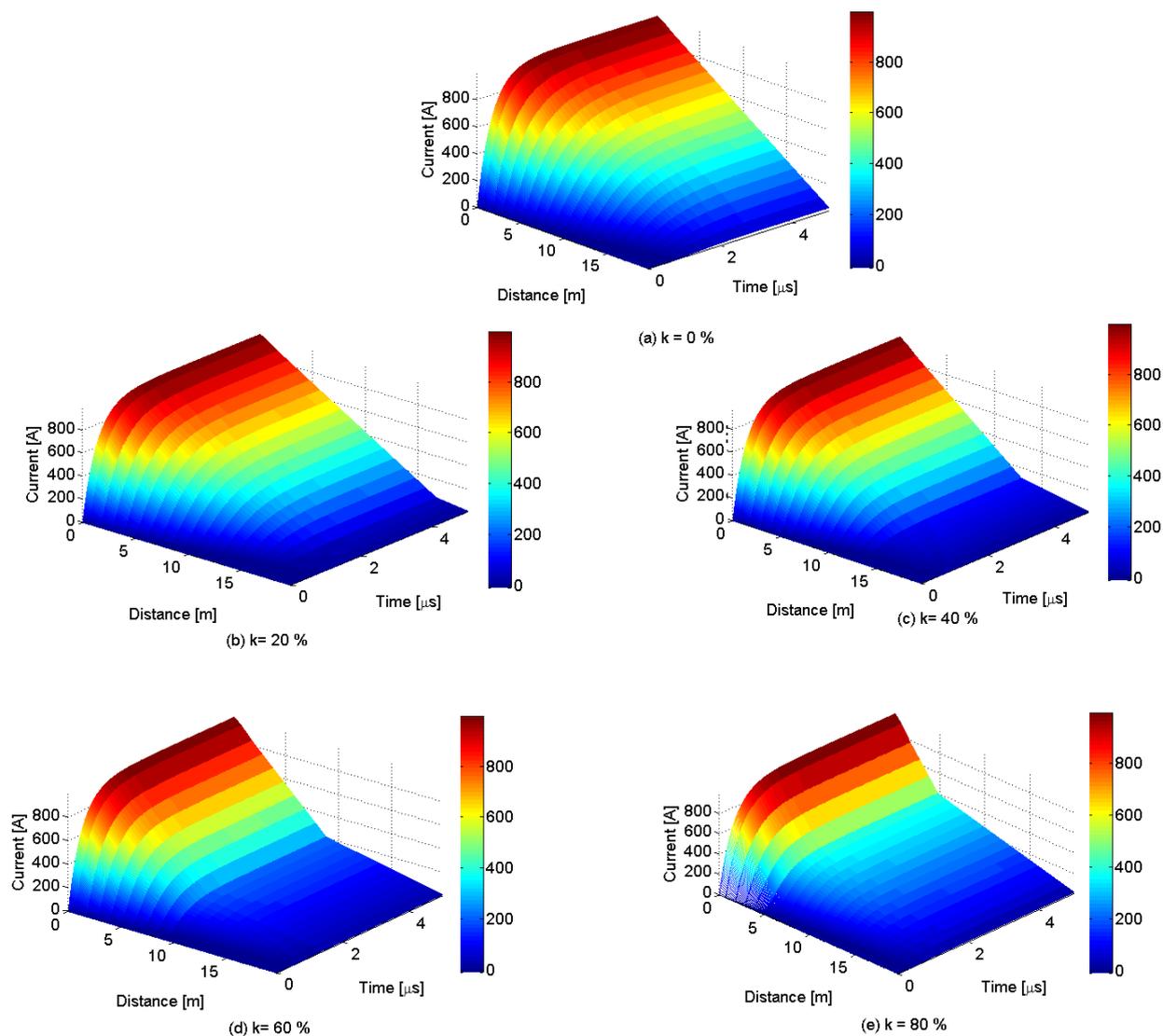


FIGURE 4.14: Courant le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 100 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 40$

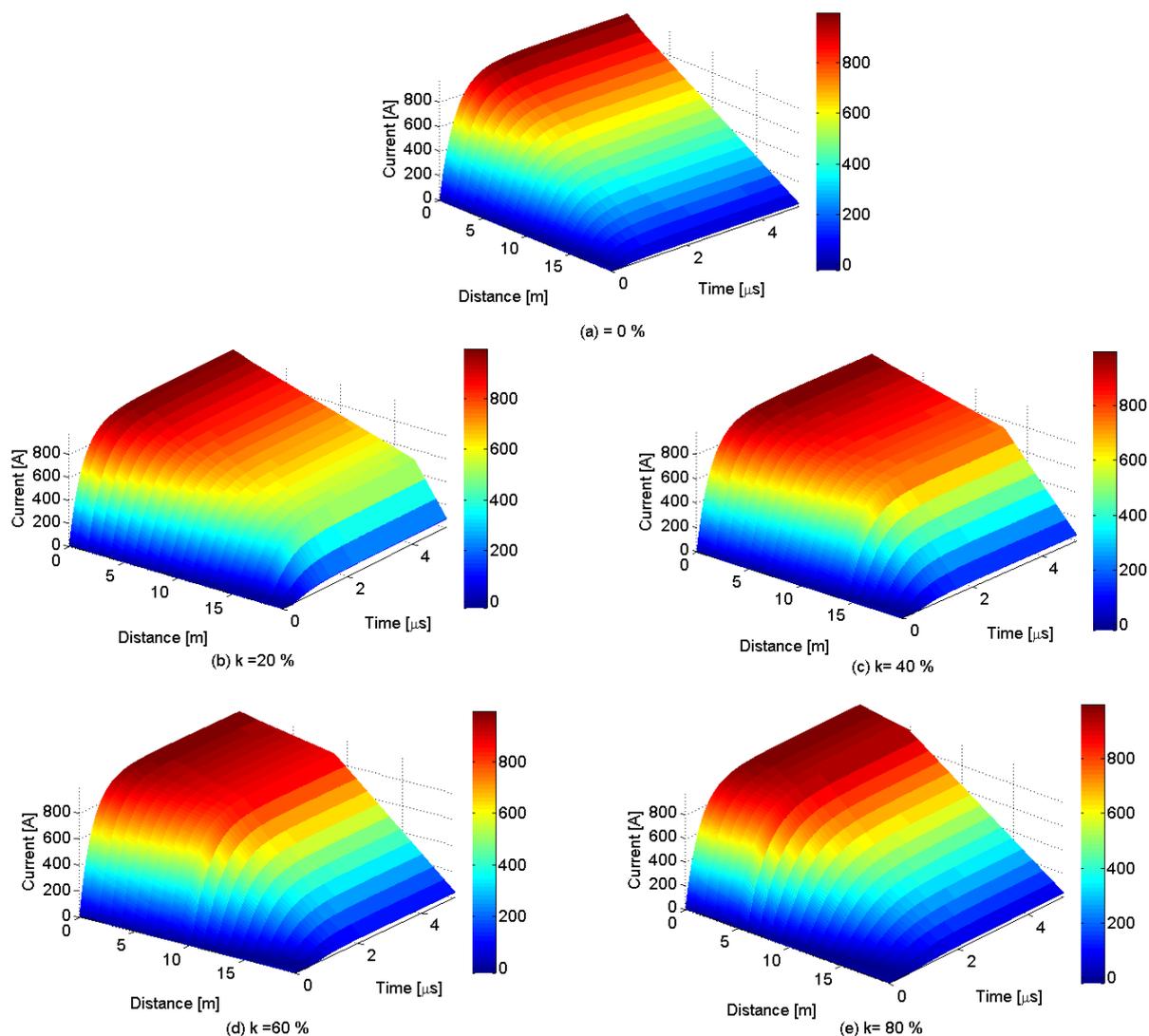


FIGURE 4.15: Courant le long de l'électrode enfouie dans un sol stratifié verticalement lors de l'injection du courant dans la couche de $\rho_{s1} = 500 \Omega m$ et $\varepsilon_{s1} = 25$

Le courant se dissipe dans le sol au fur et à mesure qu'il traverse l'électrode. Une partie importante de ce courant se dissipe dans la couche la moins résistive. Par ailleurs, les courants traversant le dernier élément de l'électrode et enregistré dans le cas (1), sont en retard par rapport à celui au point d'injection, et ce pour différentes valeurs de l'indice de pénétration.

4.5 Diagramme potentiel-courant pour une électrode horizontale

4.5.1 Principaux travaux antérieurs

Plusieurs investigations ont porté sur le comportement transitoire des systèmes de mise à la terre en analysant le diagramme potentiel-courant (V-I) [6, 90, 91]. Visacro [6] a déjà présenté la caractéristique V-I obtenue par simulation lors de l'injection d'un courant impulsionnel à l'extrémité d'une électrode (la disposition et les dimensions de cette électrode ainsi que les caractéristiques du sol et celles du courant injecté n'ont pas été données). Les courbes ainsi obtenues sont présentées sur la figure 4.16 (a) pour les faibles courants et (b) pour les forts courants. Visacro a imputé le changement en forme de huit "8" inclinée à l'apparition du phénomène d'ionisation au niveau du sol. Dans cette investigation, le sens du diagramme V-I n'a pas été discuté.

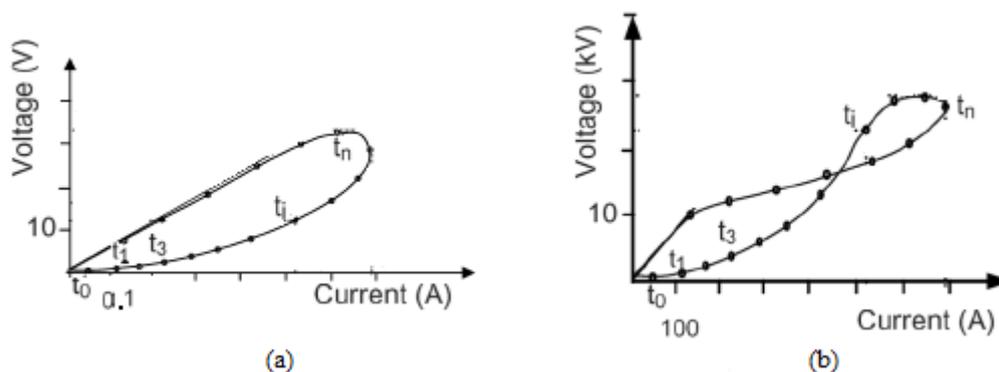
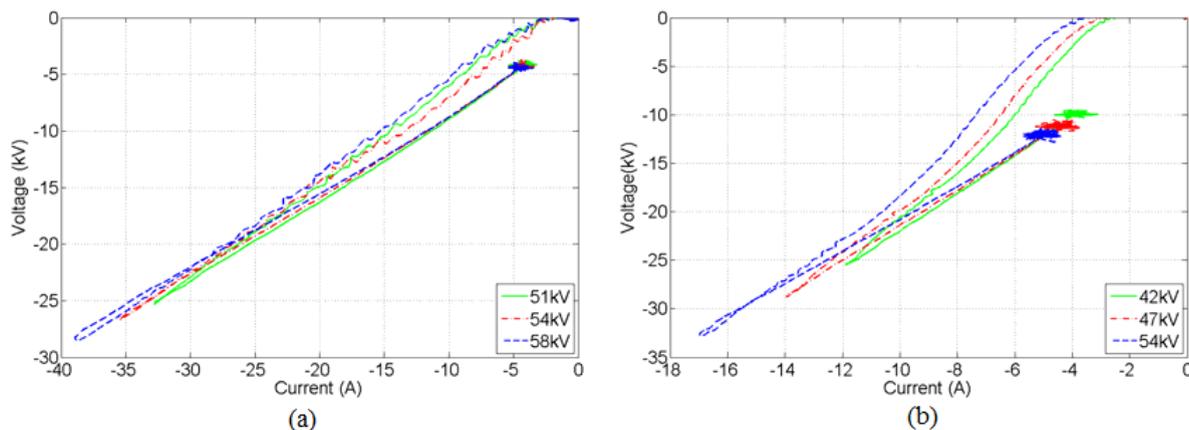


FIGURE 4.16: Formes de courbes VI présentées par Visacro [6] pour (a) faibles courants et (b) forts courants

Asimakopoulou *et al.* [90] ont effectué des essais expérimentaux sur une électrode verticale de terre soumise à un potentiel transitoire (les dimensions de cette électrode n'ont pas été données). Cette électrode a été enfouie dans un sol cylindrique de diamètre 25 cm et de longueur de 20 cm. La résistivité du sol a été variée de $400 \Omega m$ à $950 \Omega m$. Les courbes VI ont été présentées lors de l'injection d'un potentiel impulsionnel d'amplitude négative variable (la forme du potentiel n'a pas été donnée).

Nous nous sommes limités, dans cette partie, à présenter les caractéristiques V-I pour une résistivité du sol de $400 \Omega m$ et pour une amplitude du potentiel entre 42 et 54 kV (Figure 4.17(a)), et pour une résistivité du sol de $950 \Omega m$ et pour une amplitude du potentiel entre 51 et 58 kV (Figure 4.17 (b)).

Selon Asimakopoulou *et al.*, la forme en huit "8" inclinée s'accroît notamment avec l'augmentation du potentiel injecté. Cependant, aucune justification n'a été donnée quant à de telles formes.

FIGURE 4.17: Courbes V-I obtenues par Asimakopoulou *et al.* [90]

Dans un travail expérimental, Diaz et Silva [91] ont injecté un courant impulsionnel d'amplitude variable entre 154 et 1410 A. L'électrode utilisée possède un rayon de 3 mm et une longueur de 1 m. Elle a été enfouie dans un cylindre de PVC 0,75 m de rayon, rempli de sable de résistivité $350 \Omega m$. Cette enceinte contient un autre cylindre métallique, 0,63 m de rayon, considéré comme étant une électrode de retour.

Diaz et Silva [91] ont présenté, sur la figure 4.18, le diagramme potentiel-densité du courant pour les amplitudes 154 A, 246 A, 340 A, 548 A, 800 A, 1020 A et 1410 A. Notons que la densité du courant correspond au rapport courant/surface de l'électrode. Les auteurs se sont intéressés à déterminer la résistance transitoire r_t pour des amplitudes de courant susmentionnées. Des valeurs négatives ont été obtenues à l'instant t_4 , juste avant la résistance minimale R_m correspondant à l'amplitude de 1020 A. Selon ces auteurs, la surface de la boucle d'hystérésis ainsi obtenue est proportionnelle à l'énergie absorbée par la cellule de test.

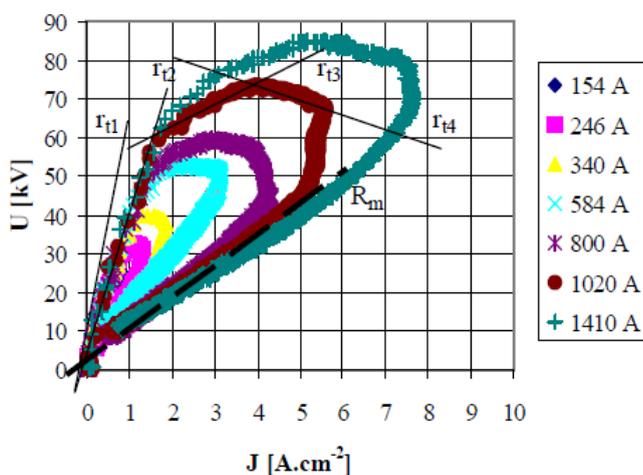


FIGURE 4.18: Diagramme potentiel-densité du courant [91]

4.5.2 Diagramme potentiel-courant (V-I) au point d'injection

A partir des évolutions temporelles du potentiel et du courant obtenus le long de l'électrode, nous avons pu tracer le diagramme V-I au point d'injection. Pour cela, nous avons considéré la même électrode étudiée dans la section 3.4.5. Elle est caractérisée par une longueur de 100 m et un rayon de 2,5 mm. L'électrode est soumise à un courant impulsionnel de la forme : $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$, avec $I_0=52$ kA ; $\alpha = 0,00184 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$; $\beta = 2,4665 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Cinq (05) résistivités/permittivités relatives du sol homogène ont été adoptées à savoir $10 \text{ } \Omega\text{m}/80$, $100 \text{ } \Omega\text{m}/40$, $1000 \text{ } \Omega\text{m}/10$, $5000 \text{ } \Omega\text{m}/7$ et $10000 \text{ } \Omega\text{m}/5$. Le diagramme V-I a été tracé pour chaque valeur de la résistivité/permittivité relative. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.19. Pour cette figure, les phénomènes d'ionisation du sol et du couplage mutuel n'ont été incorporés.

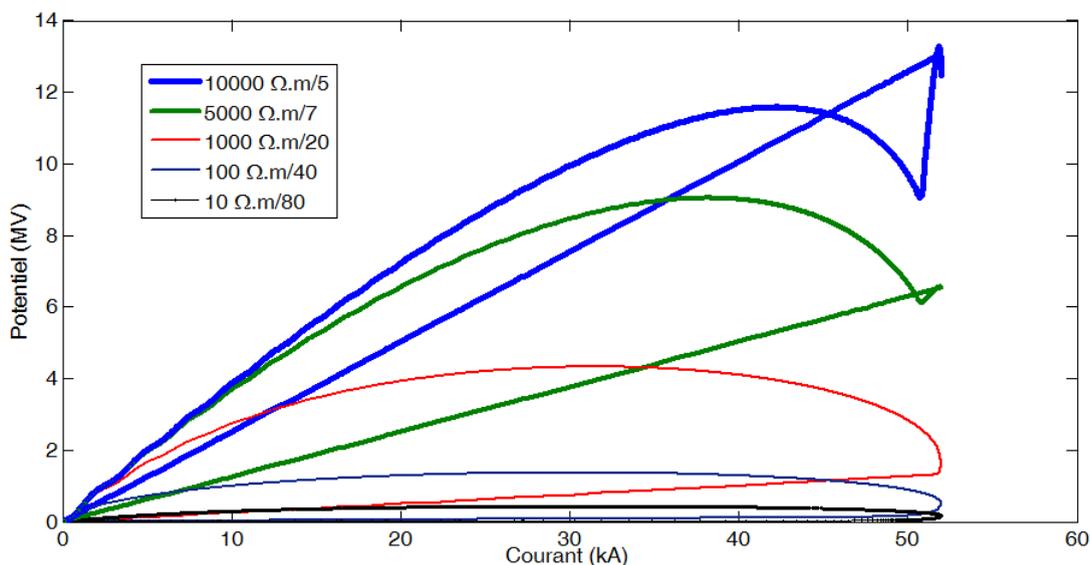


FIGURE 4.19: Diagramme V-I au point d'injection pour une électrode de 100 m enterrée dans un sol de différentes résistivités en absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

Dans le cas où la résistivité du sol varie de $10 \text{ } \Omega\text{m}$ à $1000 \text{ } \Omega\text{m}$, nous avons obtenu un diagramme V-I qui se referme sur lui-même en formant ainsi un cycle contenant une seule boucle tournant dans le sens horaire. L'aire délimitée par ce cycle augmente avec la résistivité. Cependant, et lors de l'installation de l'électrode dans le sol de $5000 \text{ } \Omega\text{m}/7$, un deuxième cycle commence à apparaître juste en dépassant la valeur de crête du potentiel. En augmentant davantage la résistivité du sol, l'aire délimitée par le cycle inférieur diminue, au moment où celle délimitée par le cycle supérieur augmente, formant ainsi une forme de huit "8" inclinée, telle que obtenue dans le cas de $5000 \text{ } \Omega\text{m}$.

Dans les mêmes conditions, nous présentons sur la figure 4.20 les diagrammes V-I obtenus, cette fois-ci, en incorporant les phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel. Les mêmes formes que celles précédentes ont été obtenues, ce qui nous mène à dire que ces phénomènes n'ont pratiquement pas d'influence sur la forme du diagramme V-I. Cependant, les valeurs du potentiel sont plus faibles du fait de la prépondérance de l'ionisation du sol.

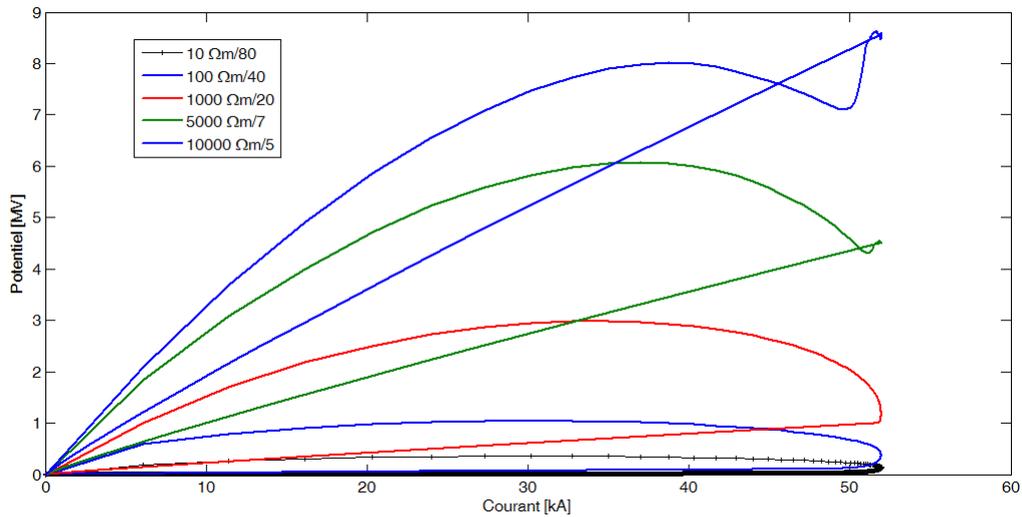


FIGURE 4.20: Diagramme V-I au point d'injection en incorporant l'ionisation du sol et le couplage mutuel

Nous nous proposons de refaire la simulation en prenant cette fois-ci une faible amplitude du courant de 10 A (les autres paramètres étant inchangés). Ceci nous permettra d'étudier l'impact de l'amplitude du courant sur le diagramme V-I. Une telle amplitude n'a pas généré l'ionisation du sol. Par ailleurs, le couplage mutuel a été incorporé dans cette étude. Les diagrammes V-I ainsi obtenus sont illustrés sur la figure 4.21.

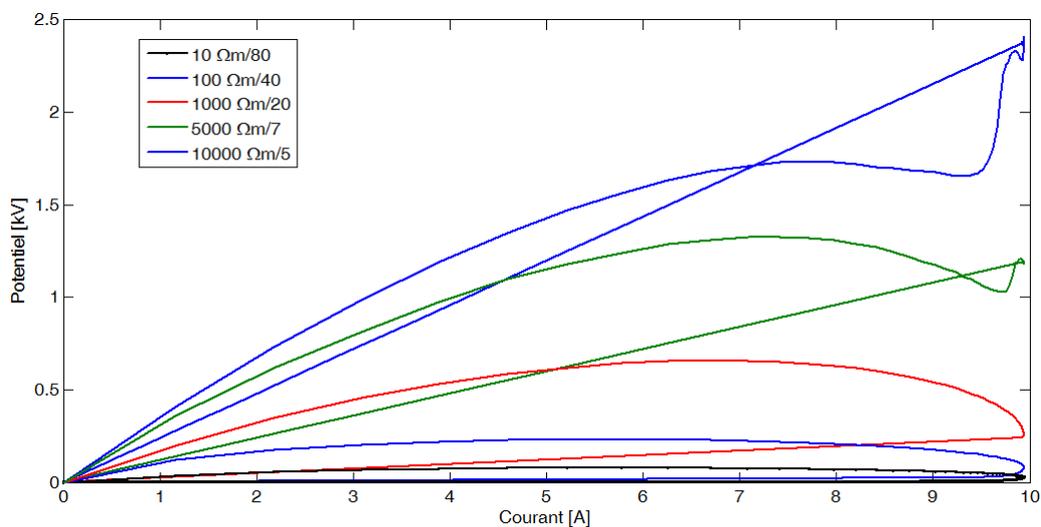


FIGURE 4.21: Diagrammes V-I au point d'injection obtenues lors de l'injection du courant d'amplitude 10 A

Etant donné que nous avons obtenu la même forme des diagrammes V-I que celle déjà trouvée dans le cas de l'application d'une amplitude de 52 kA, nous pouvons dire que l'amplitude du courant n'a pas d'impact sur la forme du diagramme V-I.

Nous présentons sur la figure 4.22 l'évolution temporelle des diagrammes déjà tracés sur la figure 4.19.

Nous observons sur cette figure que les diagrammes V-I obtenus mettent en évidence l'existence des ondulations lors de l'installation d'une électrode dans un sol de résistivité

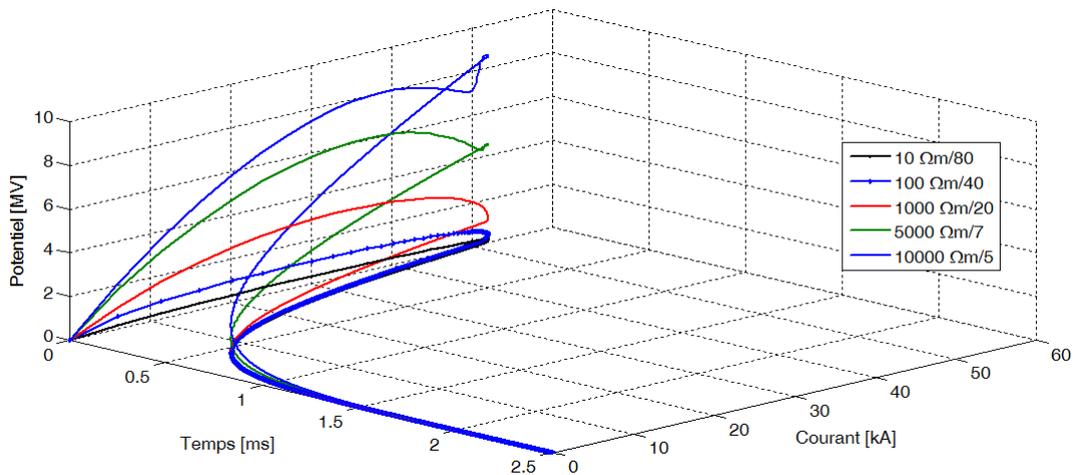


FIGURE 4.22: Evolution temporelle des diagrammes V-I obtenus pour une électrode de 100 m

supérieure ou égale à $5000 \Omega m$. Pour bien illustrer de telles ondulations, nous traçons sur la figure 4.23 le potentiel transitoire en fonction du temps. Ces ondulations sont liées, en fait, à la réflexion de l'onde au niveau du sol fortement résistif [15].

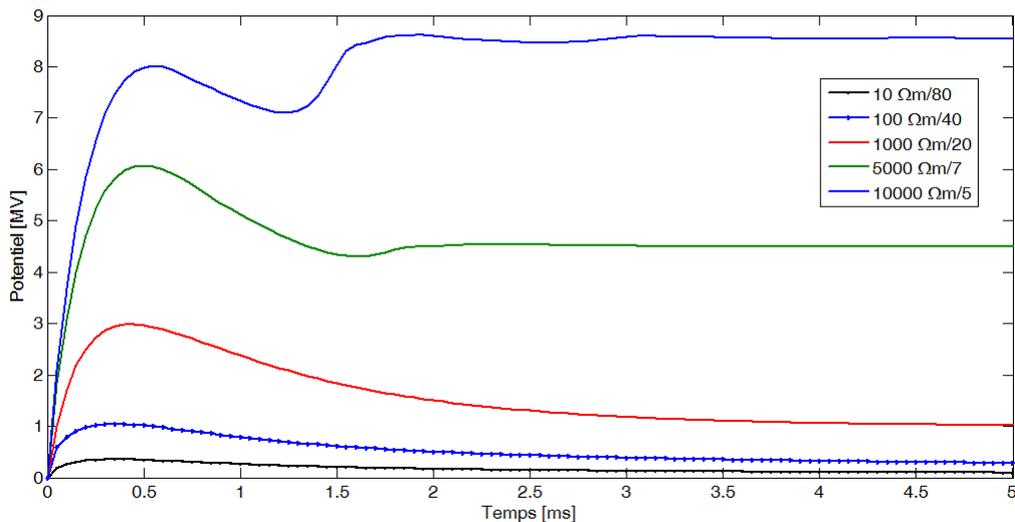


FIGURE 4.23: Potentiel transitoire obtenu au point d'injection de l'électrode pour différentes valeurs de résistivité

4.5.3 Diagramme V-I le long de l'électrode de mise à la terre

Nous étudions, dans cette section, l'évolution du diagramme V-I le long d'une électrode horizontale de 100 m enfouie dans un sol homogène. Deux résistivités/permittivités relatives ont été considérées à savoir $10 \Omega m/80$ (sol faiblement résistif) et $10000 \Omega m/5$ (sol fortement résistif). Le diagramme V-I est présenté aux points 0 (point d'injection), 10, 30, 50, 70 et 90 m du point d'injection. Les figures 4.24 et 4.25 représentent les caractéristiques V-I obtenues respectivement lors de l'utilisation d'un sol faiblement et fortement résistifs.

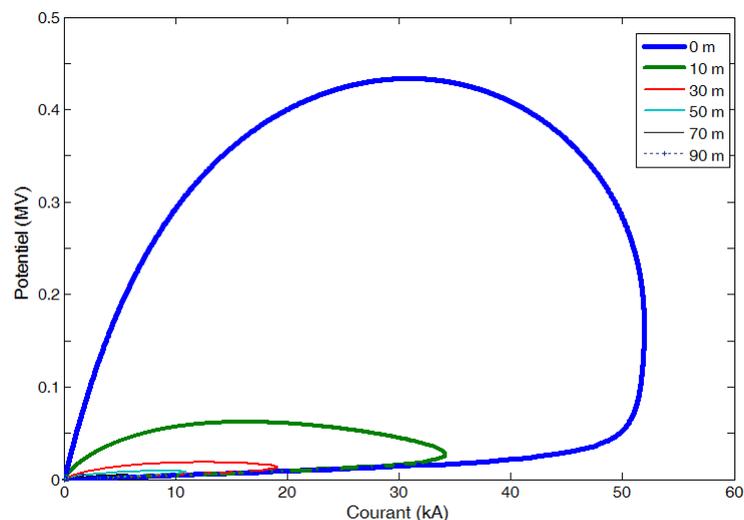


FIGURE 4.24: Diagramme V-I pour une électrode horizontale enterrée dans un sol faiblement résistif

Nous observons sur la figure 4.24 que chaque caractéristique V-I obtenue en un point donné de l'électrode se reforme sur elle-même en formant une seule boucle tournant dans le sens horaire. L'aire délimitée par la caractéristique V-I représente la puissance dissipée dans le sol. Cette puissance diminue en éloignant du point d'injection. Autrement dit, la puissance correspondante se dissipe dans le sol au fur et à mesure que l'onde traverse l'électrode.

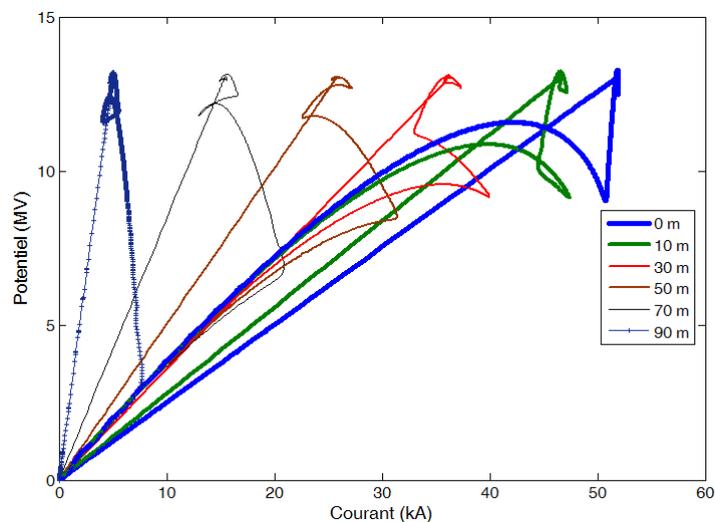


FIGURE 4.25: Diagramme V-I obtenu pour une électrode de 100 m enfouie dans un sol fortement résistif

De la figure 4.25, nous constatons que l'aire supérieure délimitée par le diagramme V-I augmente en éloignant du point d'injection, au moment où celle inférieure diminue jusqu'à ce qu'elle disparaisse en traversant 50 m de l'électrode. Il est à noter qu'en s'éloignant du point d'injection, la caractéristique V-I se rapproche vers l'axe des courants (respectivement l'axe des potentiels) lors de l'installation de l'électrode dans le sol faiblement (respectivement fortement) résistif.

4.6 Conclusion

Les principales conclusions retenues lors de cette étude sont :

- Le potentiel transitoire est réduit de 50% (respectivement de 14%) lors de l'injection du courant au point milieu de l'électrode enfouie dans un sol de faible (respectivement de forte) résistivité.
- Les électrodes enfouies dans un sol de faible (respectivement de forte) résistivité sont caractérisées par un comportement inductif (respectivement capacitif).
- Pour le cas des électrodes enfouies dans un sol stratifié, le potentiel est plus faible lors de l'injection du courant dans l'extrémité se trouvant dans la couche la moins résistive.
- Le diagramme V-I obtenu au point d'injection d'une électrode enfouie dans un sol de faible résistivité forme une seule boucle. En s'éloignant du point d'injection, la caractéristique V-I se penche vers l'axe des courants.
- Lors de l'installation de l'électrode dans un sol fortement résistif, le diagramme V-I obtenu sera constitué de deux boucles formant un « 8 » incliné. En s'éloignant du point d'injection, la caractéristique V-I se penche vers l'axe des potentiels.

Chapitre 5

Comportement des électrodes verticales de terre couvertes de bentonite et enfouies dans un sol fortement résistif

5.1 Introduction

Une alternative intéressante permettant de réduire l'impédance d'une électrode de terre enterrée dans un sol fortement résistif a été proposée [92–94]. Il s'agit d'enfouir l'électrode en question dans une fouille remplie d'un matériau de faible résistivité tel que la bentonite. Un tel travail a fait l'objet de certains auteurs se sont intéressés à évaluer la résistance de mise à la terre par simulation [94–97] ou par mesures [9, 98–103]. D'autres se sont focalisés sur la détermination de l'impédance de mise à la terre en fonction de la fréquence [9, 68], ou de la réponse transitoire [104–108].

Dans ce chapitre, nous proposons un modèle permettant d'évaluer l'impédance d'une électrode verticale de mise à la terre plongée dans une fouille cylindrique remplie de bentonite (matériau de faible résistivité). Cette dernière, quant à elle, est entourée par un sol fortement résistif. Nous confrontons nos résultats à ceux rapportés dans la littérature. Le modèle proposé pour étudier l'impédance sera exploité, par la suite, pour étudier la réponse transitoire de l'électrode en question lors de l'injection d'un courant impulsionnel. Les phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel seront incorporés. Nous examinons ensuite l'impact de la résistivité du sol ainsi que le rayon de la fouille cylindrique remplie de bentonite couvrant l'électrode sur l'impédance de mise à la terre et sur l'impédance impulsionnelle de l'électrode. Finalement, l'effet de l'amplitude et de la forme de l'onde du courant injecté sur l'impédance impulsionnelle de l'électrode a été également analysé.

5.2 Etude de l'impédance d'une électrode verticale entourée de la bentonite

En se basant sur la théorie des lignes de transmission, nous proposons un modèle permettant la détermination de l'impédance de l'électrode couverte de bentonite installée dans un sol fortement résistif. Nous nous intéressons à présenter la variation de cette impédance de l'électrode en fonction de la fréquence dans la gamme 10 Hz- 1 MHz.

5.2.1 Proposition du modèle

La configuration à étudier comporte deux milieux de propagation de résistivités et de permittivités relatives différentes (Figure 5.1). Le premier consiste en la bentonite qui couvre l'électrode. Elle est caractérisée par une résistivité ρ_b et une permittivité relative ϵ_b . Le deuxième milieu consiste en un sol homogène caractérisé par une résistivité ρ_s et une permittivité relative ϵ_s . La perméabilité magnétique relative des deux milieux est considérée égale à l'unité [9]. La même configuration a été déjà étudiée par d'autres chercheurs en utilisant la MEF [9].

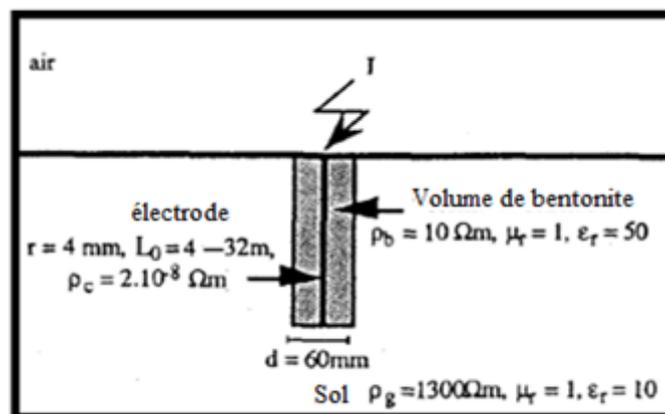


FIGURE 5.1: Configuration à étudier [9]

Pour un milieu m donné caractérisé par une résistivité ρ_m et une permittivité relative ϵ_m , la longueur d'une onde injectée de fréquence f est déterminée par la relation suivante [19] :

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{\frac{\mu \epsilon_m}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{1}{(2\pi f)^2 + \rho_m^2 \epsilon_m^2}} + 1 \right)}} \quad (5.1)$$

$m = s, b$; λ_s et λ_b sont les longueurs d'ondes propagées dans le sol et la bentonite respectivement.

Dans notre modèle, nous proposons deux lignes de transmission montées en cascades (Figure 5.2). La première est une ligne de transmission où le conducteur de terre est le canal d'acheminement d'énergie et la bentonite est le milieu de propagation d'onde

électromagnétique (milieu de dispersion). La longueur du segment de cette ligne est $\Delta\ell_1$. Par ailleurs, les paramètres longitudinaux sont R_1 et L_1 , et ceux transversaux sont G_1 et C_1 . Pour la deuxième ligne, l'énergie est acheminée à travers la bentonite pour se propager dans le sol (milieu de dispersion). Dans cette ligne, la longueur du segment est $\Delta\ell_2$, les paramètres longitudinaux sont R_2 et L_2 , et ceux transversaux sont G_2 et C_2 .

Les paramètres des deux lignes sont calculés comme suit [22, 92] :

$$R_1 = \frac{\rho_c \Delta\ell_1}{\pi r^2} \quad (5.2)$$

$$L_1 = \frac{\mu \Delta\ell_1}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{2\ell}{r}\right) - 1 \right) \quad (5.3)$$

$$G_1 = \frac{2\pi \Delta\ell_1}{\rho_b \ln\left(\frac{d}{2r}\right)} \quad (5.4)$$

$$C_1 = \frac{2\pi \Delta\ell_1 \varepsilon_0 \varepsilon_b}{\ln\left(\frac{d}{2r}\right)} \quad (5.5)$$

$$R_2 = \frac{4\rho_b \Delta\ell_2}{\pi d^2} \quad (5.6)$$

$$L_2 = \frac{\mu \Delta\ell_2}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{4\ell}{d}\right) - 1 \right) \quad (5.7)$$

$$G_2 = \frac{2\pi \Delta\ell_2}{\rho_s \left(\ln\left(\frac{8\ell}{d}\right) - 1 \right)} \quad (5.8)$$

$$C_2 = \frac{2\pi \Delta\ell_2 \varepsilon_0 \varepsilon_s}{\ln\left(\frac{8\ell}{d}\right) - 1} \quad (5.9)$$

ρ_c [Ωm] : résistivité du conducteur ; $\Delta\ell_1$ [m] : longueur du segment de la première ligne ; $\Delta\ell_2$ [m] : longueur du segment de la deuxième ligne ; r [m] : rayon du conducteur ; d [m] : diamètre du volume de la bentonite ; ℓ [m] : longueur totale du conducteur ; ρ_b [Ωm] : résistivité électrique de la bentonite ; ε_b : permittivité diélectrique relative de la bentonite ; ρ_s [Ωm] : résistivité électrique du sol ; ε_0 [F/m] : permittivité diélectrique de l'air ; ε_s : permittivité diélectrique relative du sol et μ [H/m] : perméabilité magnétique du sol et de la bentonite.

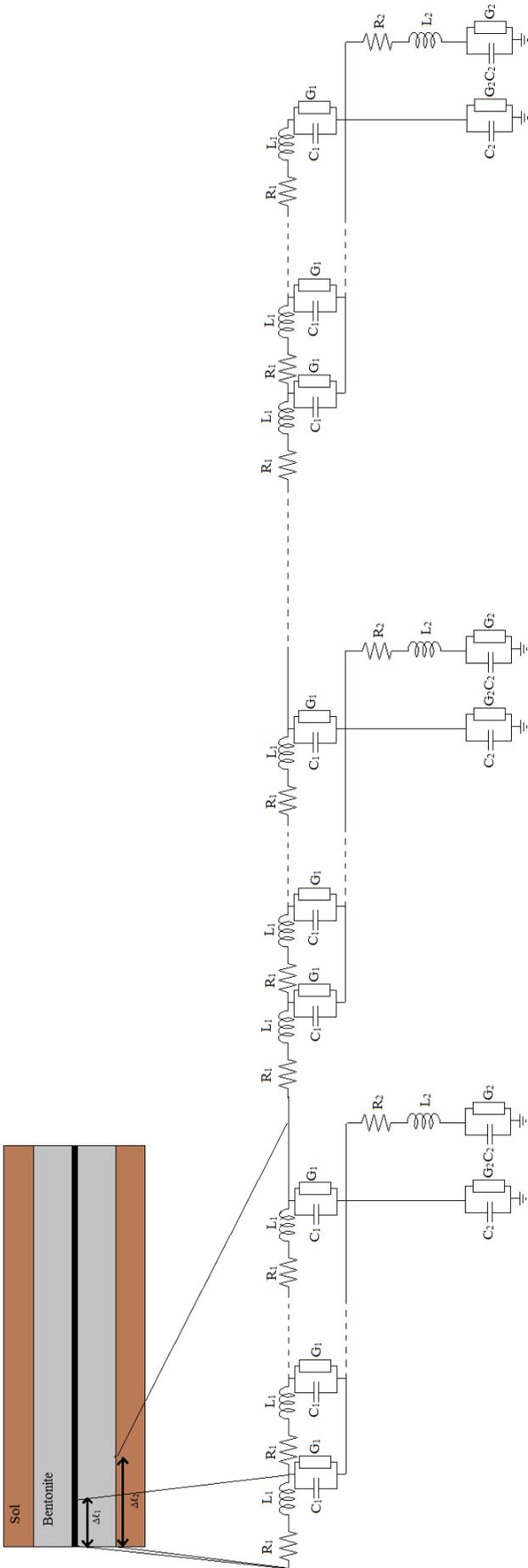


FIGURE 5.2: Modèle de ligne de transmission de l'électrode couverte par la bentonite

En se basant sur le développement présenté dans le chapitre 2, l'impédance série Z_s s'écrit comme suit citepref58 :

$$Z_s = Z_{c1} \coth(\gamma_1 \Delta \ell_2) \quad (5.10)$$

avec $Z_{c1} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}}$ et $\gamma_1 = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)}$.

L'admittance parallèle Y_p est définie par :

$$Y_p = \frac{\frac{1}{(R_2 + j\omega L_2)}(G_2 + j\omega C_2)}{\frac{1}{(R_2 + j\omega L_2)} + (G_2 + j\omega C_2)}(G_2 + j\omega C_2) \quad (5.11)$$

L'impédance caractéristique totale du système Z_c et la constante de propagation γ sont telles que :

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_s}{Y_p}} \quad (5.12)$$

$$\gamma = \sqrt{Z_s Y_p} \quad (5.13)$$

L'impédance d'entrée de l'électrode Z devient [13, 68] :

$$Z = Z_c \coth(\gamma \ell) \quad (5.14)$$

5.2.2 Validation

Pour valider notre algorithme, nous confrontons, en premier lieu, les impédances que nous avons calculées à celles mesurées par Bourg *et al.* [68]. Ces auteurs ont considéré trois électrodes de terre de longueurs 2, 4 et 16 m et de rayon 4 mm. Celles-ci sont plongées dans une fouille cylindrique remplie de bentonite de rayon 30 mm, de résistivité $10 \Omega m$ et de permittivité relative 50. Le sol entourant la bentonite est caractérisé par une résistivité de $1300 \Omega m$ et une permittivité relative de 10. Bourg *et al.* se sont intéressés à déterminer le module ($|Z|$) et l'argument ($\arg(Z)$) de chaque configuration dans la gamme de fréquence 1 kHz-2 MHz. Leurs résultats sont présentés sur la figure 5.3. Par ailleurs, les impédances que nous avons simulées sont illustrées sur la figure 5.4. De ces deux figures, il est clair que nos résultats sont en bonne concordance avec ceux expérimentaux de Bourg *et al.*.

Une deuxième confrontation a été faite, cette fois-ci, en comparant notre module de l'impédance d'une électrode de 32 m à ceux mesuré et calculé utilisant la MEF par Nekhoul *et al.* [9] dans la gamme 1 Hz-1 MHz. Les autres paramètres sont similaires à ceux utilisés lors de la première validation. Les résultats de Nekhoul *et al.* sont présentés

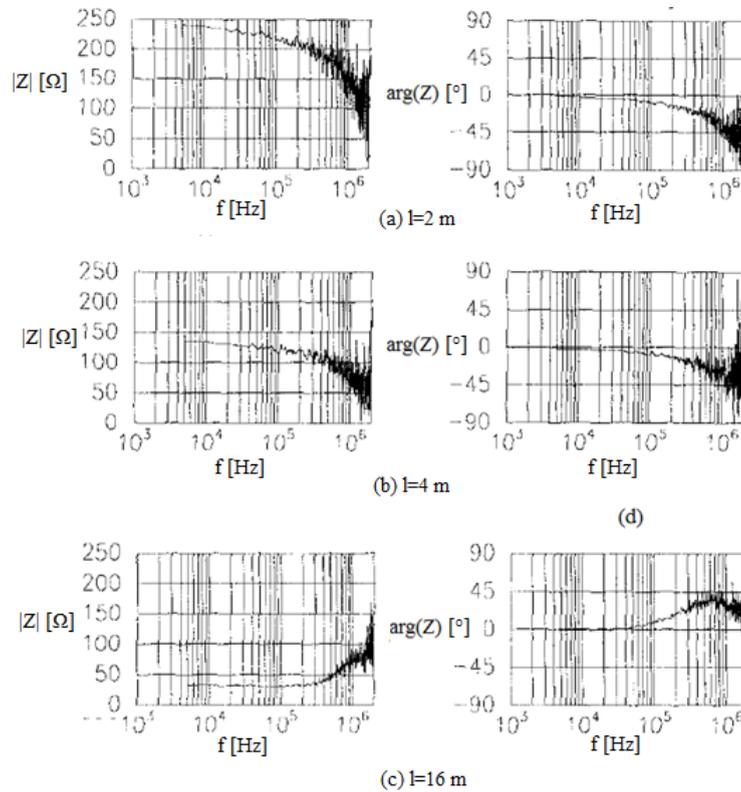


FIGURE 5.3: Modules et arguments des impédances mesurées en fonction de la fréquence par Bourg *et al.* [68]

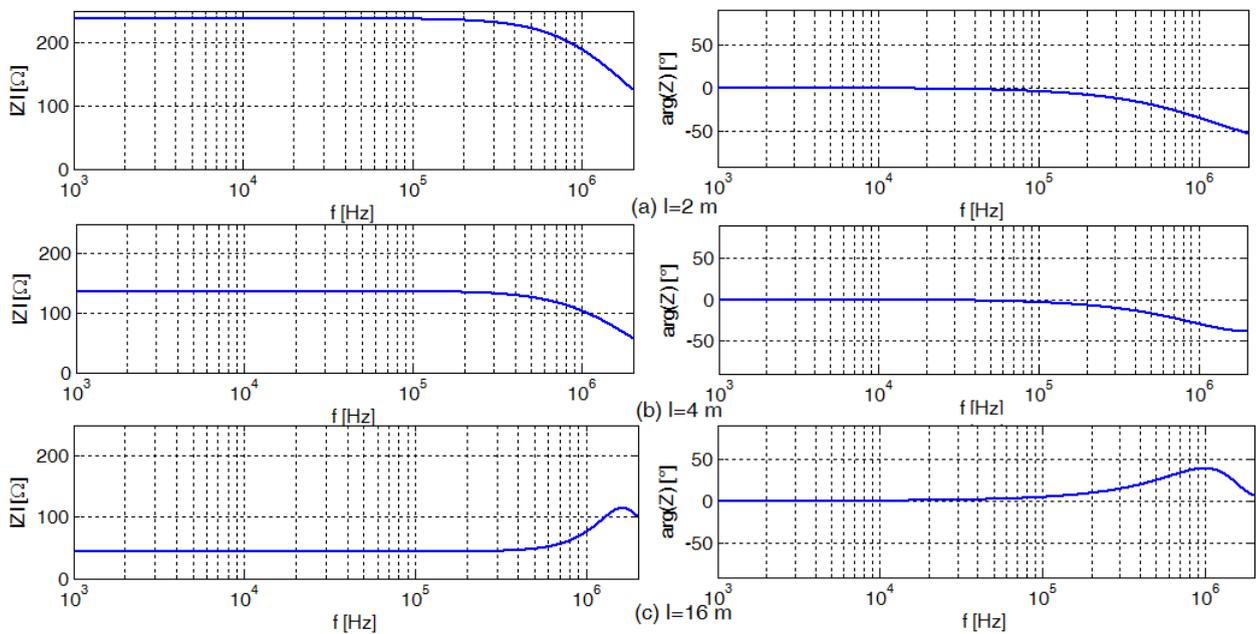


FIGURE 5.4: Nos modules et arguments des impédances en fonction de la fréquence

sur la figure 5.5. Les nôtres sont illustrés sur la figure 5.6. De même que précédemment, une bonne concordance a été obtenue.

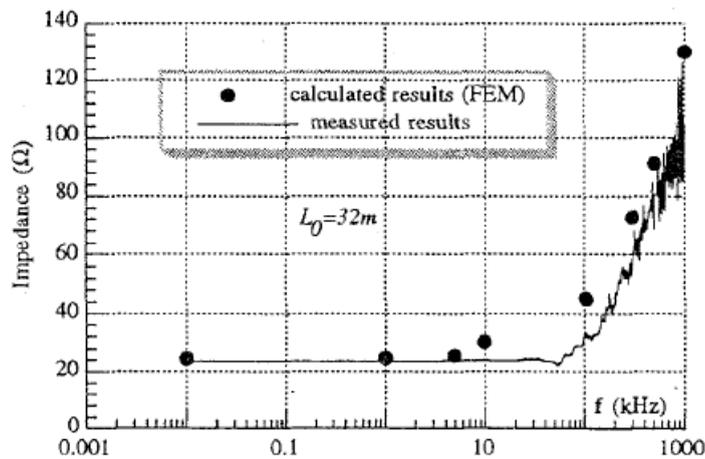


FIGURE 5.5: Module de l'impédance obtenu par Nekhoul *et al.* [9]

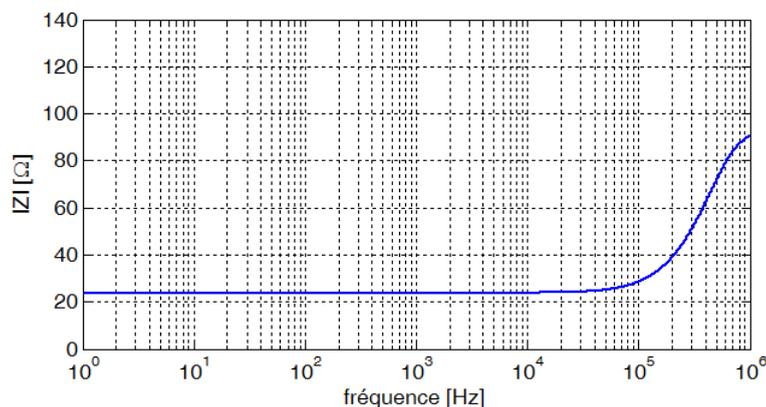


FIGURE 5.6: Module de l'impédance obtenu par notre modèle

5.3 Exploitation. Etude paramétrique

5.3.1 Réponse fréquentielle

Cette partie porte sur l'étude de la variation du module et celles des composantes réelle et imaginaire de l'impédance dans la gamme 10 Hz-1 MHz, en faisant varier séparément le rayon du volume cylindrique de la bentonite, ainsi que les paramètres électriques (résistivité et permittivité relative) du sol entourant la bentonite. Le rayon de l'électrode est de 4 mm. Sa longueur est variable. En effet, cinq longueurs ont été considérés à savoir 2, 4, 8, 16 et 32 m.

Prime abord, l'impact du rayon de la bentonite a été examiné. Pour cela, trois rayons ont été considérés à savoir 15 mm, 30 mm et 60 mm. Le sol entourant la bentonite est de résistivité 1300 Ωm et de permittivité relative 10. Les résultats sont présentés sur la figure 5.7.

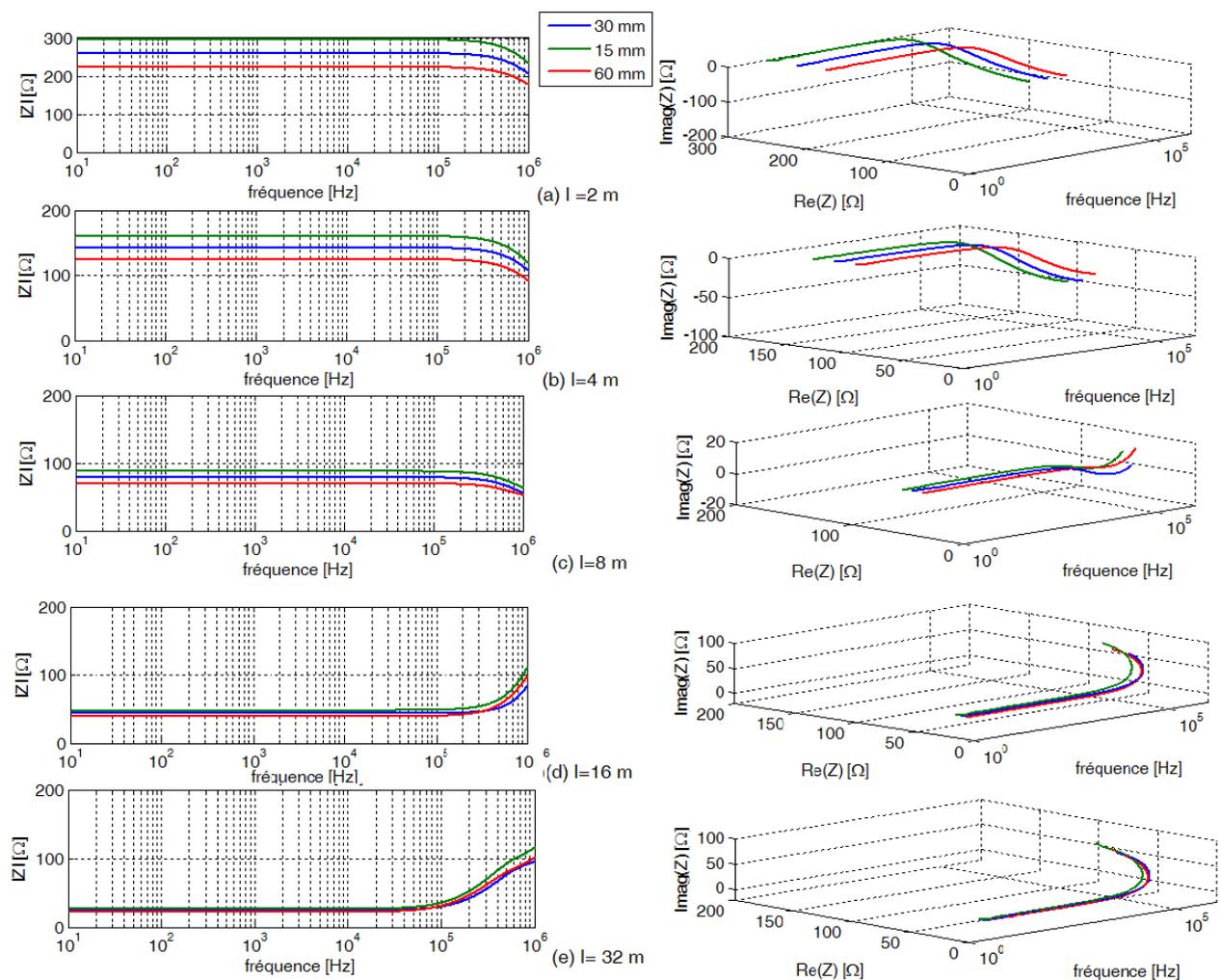


FIGURE 5.7: Module et parties réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents rayons de la bentonite

Pour une longueur de l'électrode et fréquence données, et d'une manière générale, l'augmentation du rayon du volume cylindrique de la bentonite engendre la diminution du module de l'impédance de l'électrode. En outre, l'écart entre deux modules obtenus en utilisant de rayons successifs de la bentonite diminue avec l'augmentation de la longueur de l'électrode. Pour les électrodes de longueur inférieure à 16 m, la diminution du module de l'impédance s'explique par le fait que la diminution de la partie réelle est plus accentuée que la variation (l'augmentation) de la partie imaginaire. Au moment où les deux parties diminuent avec l'augmentation du rayon du volume cylindrique de la bentonite pour l'électrode de 16 au 32 m. Il est à noter que le comportement résistif est suivi par celui capacitif pour les longueurs 2 à 8 m, et inductif ailleurs.

Afin d'étudier l'impact des paramètres électriques du sol, trois résistivités/permittivités ont été considérées à savoir $1300 \Omega m/10$, $5000 \Omega m/7$ et $10000 \Omega m/5$. Le rayon du volume cylindrique de la bentonite est maintenu à 30 mm. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur la figure 5.8.

Pour une longueur de l'électrode et fréquence données, il est évident que la résistance de terre augmente avec la résistivité du sol. L'électrode ayant une longueur entre 2 et 8

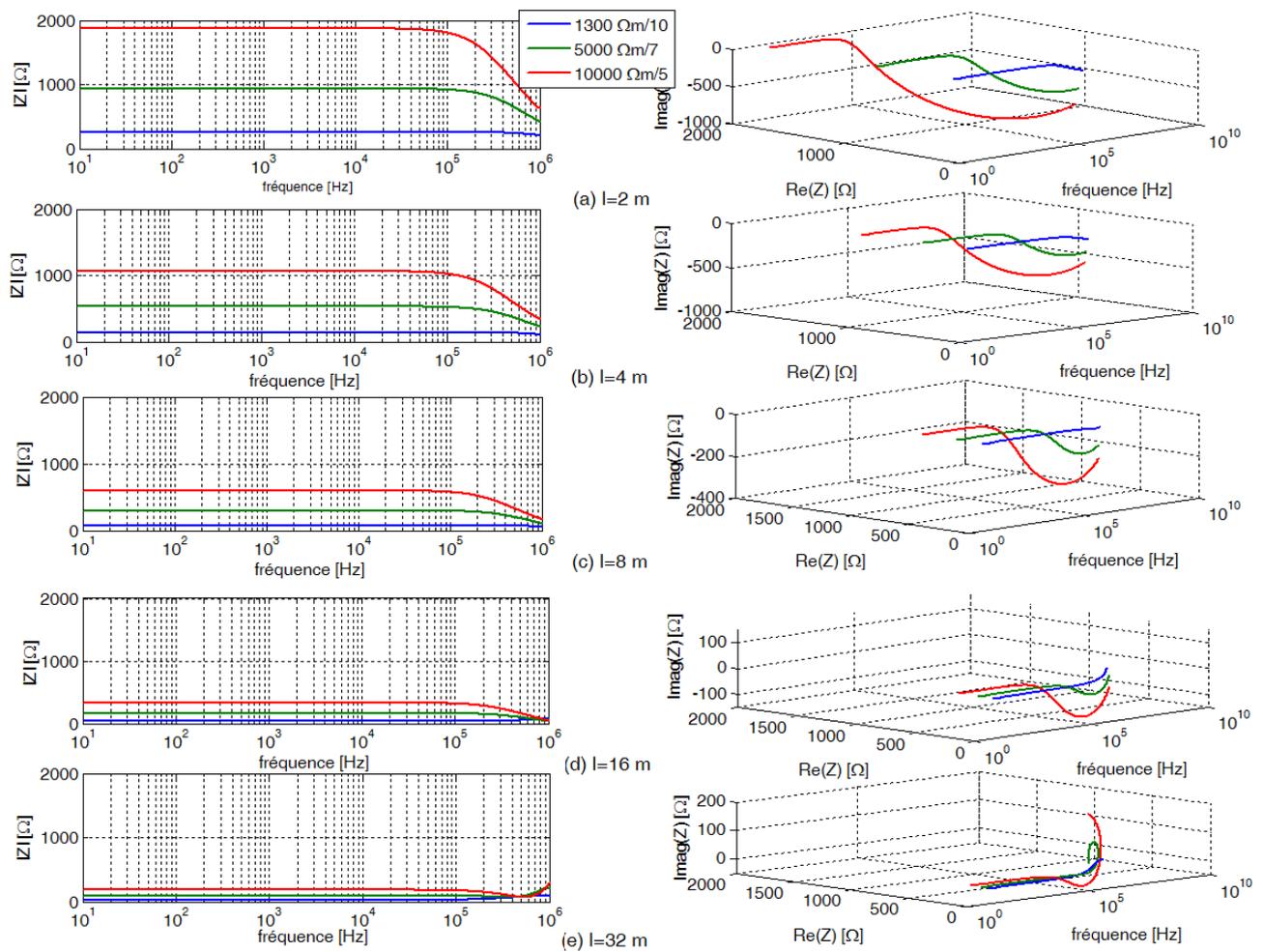


FIGURE 5.8: Module et parties réelle et imaginaire de l'impédance en fonction de la fréquence pour différents résistivités/permittivités du sol

m, possède un comportement purement capacitif. Ceci est dû au fait que l'augmentation de la composante réelle est plus significative que la diminution de la partie imaginaire. Le comportement faiblement inductif de l'électrode de 16 m enfouie dans le sol de 1300 $\Omega m/10$ est justifié par la légère augmentation des deux parties (réelle et imaginaire) de l'impédance. Par ailleurs, cette électrode possède un comportement capacitif lorsqu'elle est installée dans le sol de 5000 $\Omega m/7$ et 10000 $\Omega m/5$. Dans ces conditions, l'augmentation de la partie réelle est plus accentuée que la diminution de la celle imaginaire. Le comportement de l'électrode de 32 m est purement inductif lorsqu'elle est enterrée dans un sol 1300 $\Omega m/10$ du fait de l'augmentation des parties réelle et imaginaire de l'impédance. Pour le reste des résistivités/permittivités, ce dernier comportement (inductif) est précédé par un autre capacitif. La forme spirale des allures relatives aux composantes réelle et imaginaire est due à principalement l'apparition de la réflexion des ondes à l'extrémité du système de terre [15].

5.3.2 Réponse transitoire d'une électrode verticale couverte de bentonite

L'exploitation du modèle proposé pour évaluer l'impédance permet la détermination du potentiel transitoire ainsi que l'impédance impulsionnelle de l'électrode précédemment utilisée couverte de bentonite. Les cinq longueurs (2, 4, 8, 16 et 32 m) de l'électrode ont été également adoptées dans cette partie. Les résultats présentés dans l'absence de bentonite (électrode enfouie directement dans le sol) sont pris comme référence.

5.3.2.1 Potentiel transitoire

Le potentiel transitoire au point d'injection a été analysé. Le courant injecté est impulsionnel. Sa forme est : $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ avec $I_0=1$ A, $\alpha = 0,00184 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Le rayon de l'électrode est de 4 mm et celui de la bentonite est 30 mm. Les valeurs résistivité/permittivité de la bentonite et du sol sont $10 \Omega\text{m}/50$ et $1300 \Omega\text{m}/10$ respectivement. Le potentiel transitoire est présenté sur la figure 5.9.

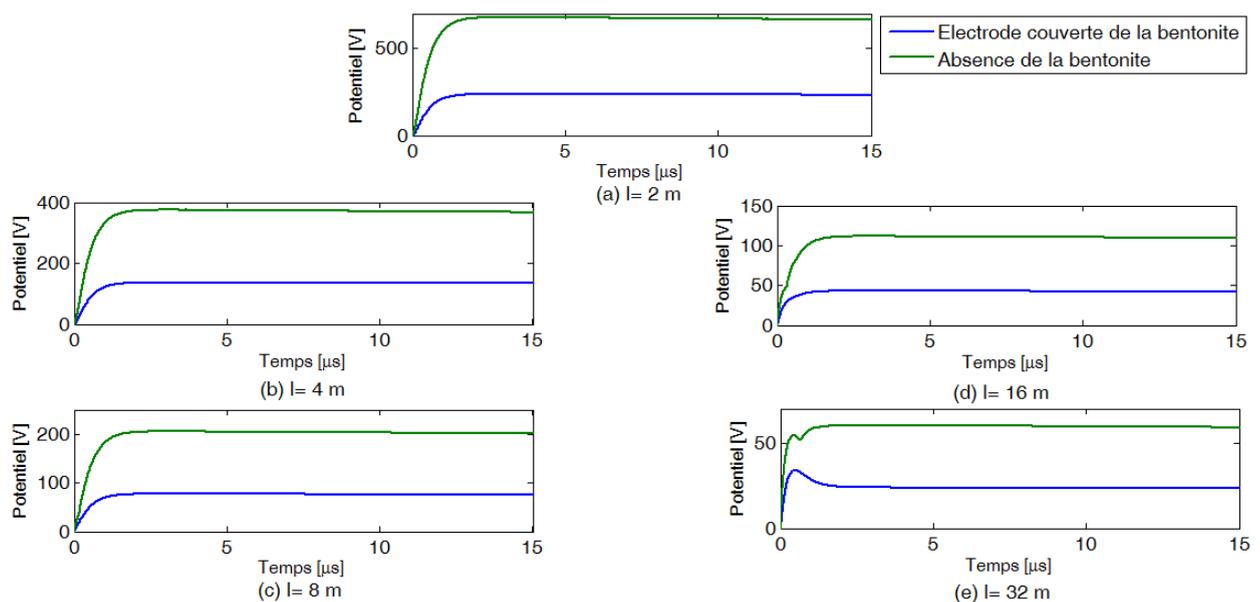


FIGURE 5.9: Variation temporelle du potentiel pour différentes longueurs de l'électrode

Le potentiel obtenu en présence de la bentonite possède la même forme impulsionnelle que celle du courant. L'utilisation de la bentonite engendre non seulement la réduction du potentiel, mais également la disparition des ondulations apparaissant lors de l'installation des électrodes de 16 et 32 m dans un sol simple dépourvu de la bentonite.

5.3.2.2 Impédance impulsionnelle

Nous rappelons que l'impédance impulsionnelle est définie par le rapport de la valeur de crête du potentiel sur celle du courant. Elle a été calculée conformément à la

relation 3.30. La figure 5.10 illustre la variation de cette impédance en fonction de la longueur de l'électrode. Nous avons gardé les mêmes conditions que celles adoptées lors de la détermination du potentiel transitoire.

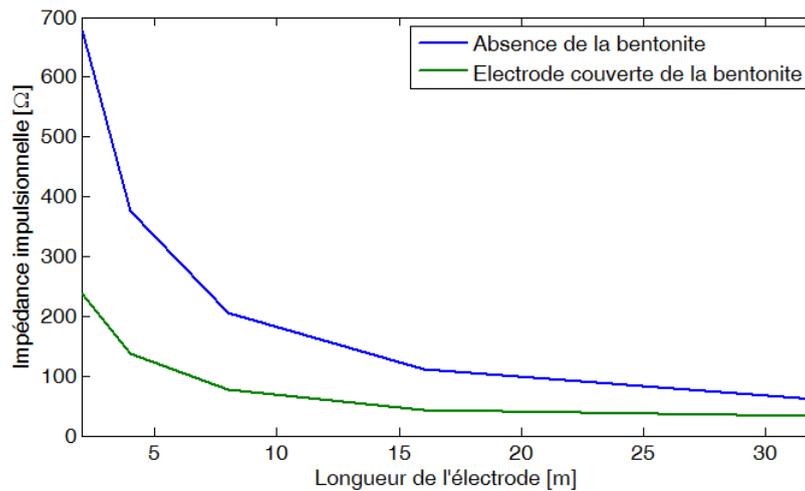


FIGURE 5.10: Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode

Avec l'augmentation de la longueur de l'électrode, l'impédance impulsionnelle diminue rapidement pour dans la gamme [2 16] m, et lentement ailleurs. L'utilisation de la bentonite est efficace, particulièrement pour les électrodes ne dépassant pas 16 m où une nette réduction de l'impédance impulsionnelle a été enregistrée. Une telle alternative améliore le comportement transitoire de l'électrode enfouie dans un sol de haute résistivité.

Nous présentons, sur la figure 5.11, la variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode enterrée dans un sol caractérisé par les valeurs de résistivités/permittivités relatives suivantes : $1300 \Omega m / 10$, $5000 \Omega m / 7$ et $10000 \Omega m / 5$.

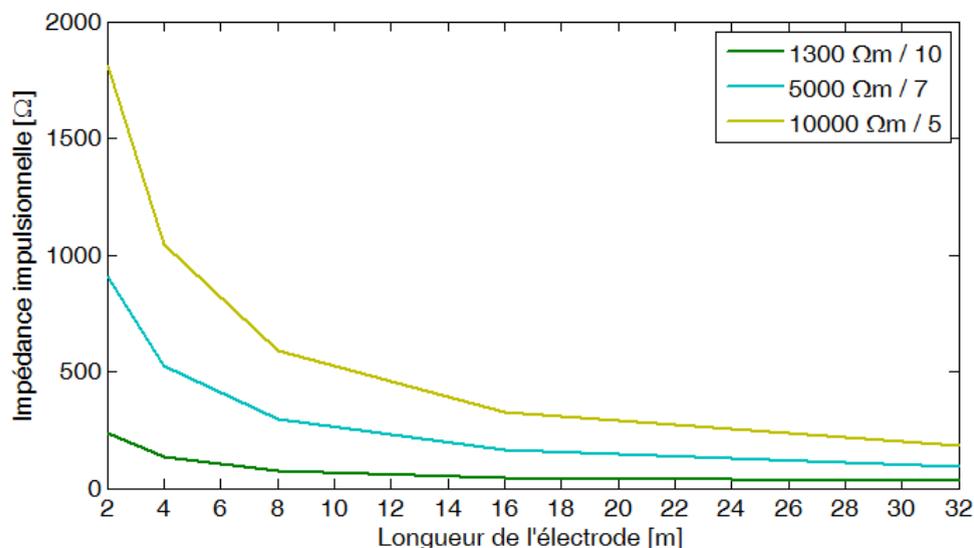


FIGURE 5.11: Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode pour différentes valeurs de résistivités/permittivités relatives

Nous observons que, plus le sol (entourant la bentonite) est résistif, plus l'impédance impulsionnelle est importante. Par ailleurs, l'écart entre les différentes impédances diminue quand la longueur de l'électrode augmente.

L'impact du rayon du volume cylindrique de la bentonite sur la valeur de l'impédance impulsionnelle a été également examiné. Pour cela, trois rayons ont été considérés à savoir 15, 30 et 60 mm. Le sol est caractérisé par une résistivité de $1300 \Omega m$ et une permittivité relative de 10. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur la figure 5.12.

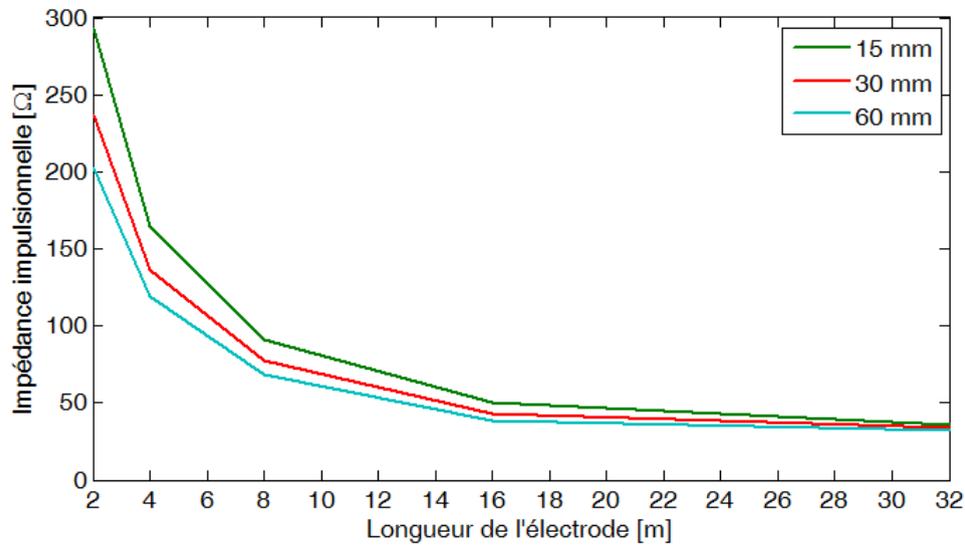


FIGURE 5.12: Variation de l'impédance en fonction de la longueur pour différents rayons de la bentonite

L'augmentation du rayon et donc du volume de la bentonite engendre une réduction de l'impédance impulsionnelle. Cette réduction est plus accentuée pour les courtes électrodes.

5.3.3 Incorporation de l'ionisation du sol et du couplage inter segments

Cette partie porte sur l'impact de l'ionisation du sol et du couplage mutuel (explicitement expliqués dans le troisième chapitre) sur les réponses (potentiel et courant) transitoires ainsi que sur l'impédance impulsionnelle de l'électrode couverte de bentonite précédemment étudiée, suite à l'injection d'un fort courant.

Dans notre cas d'étude, chaque milieu (sol et bentonite) est caractérisé par son propre champ électrique critique calculé en utilisant l'expression 3.23 d'Oettle [84]. L'ionisation du sol est modélisée non seulement par l'augmentation du rayon de l'électrode, mais également par l'accroissement du rayon du volume cylindrique de la bentonite, lorsque le courant dissipé à travers cette couche permet la génération d'un tel phénomène. Quant au couplage mutuel, les paramètres ont été calculés conformément à la relation 3.27.

5.3.3.1 Réponses transitoires

Nous nous sommes particulièrement intéressés à déterminer le potentiel au point d'injection ainsi que les réponses (potentiel et courant) transitoires le long de l'électrode. Nous mettons l'accent sur le phénomène ayant plus d'influence sur le comportement transitoire de l'électrode. Sachant qu'à l'inverse de l'effet du couplage mutuel, l'ionisation du sol provoque une diminution du potentiel transitoire. La simulation a été faite dans les conditions suivantes :

- Courant $i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ avec $I_0=10$ kA, $\alpha = 0,00184 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ et $\beta = 2,4665 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$;
- Electrode : rayon=4 mm, longueur=2, 4, 8, 16 et 32 m ;
- Sol : résistivité=1300 Ωm et permittivité relative=10 ;
- Bentonite : rayon=30 mm, résistivité=10 Ωm et permittivité relative= 50.

La figures 5.13 présente le potentiel au point d'injection avec et sans incorporation de l'ionisation et du couplage.

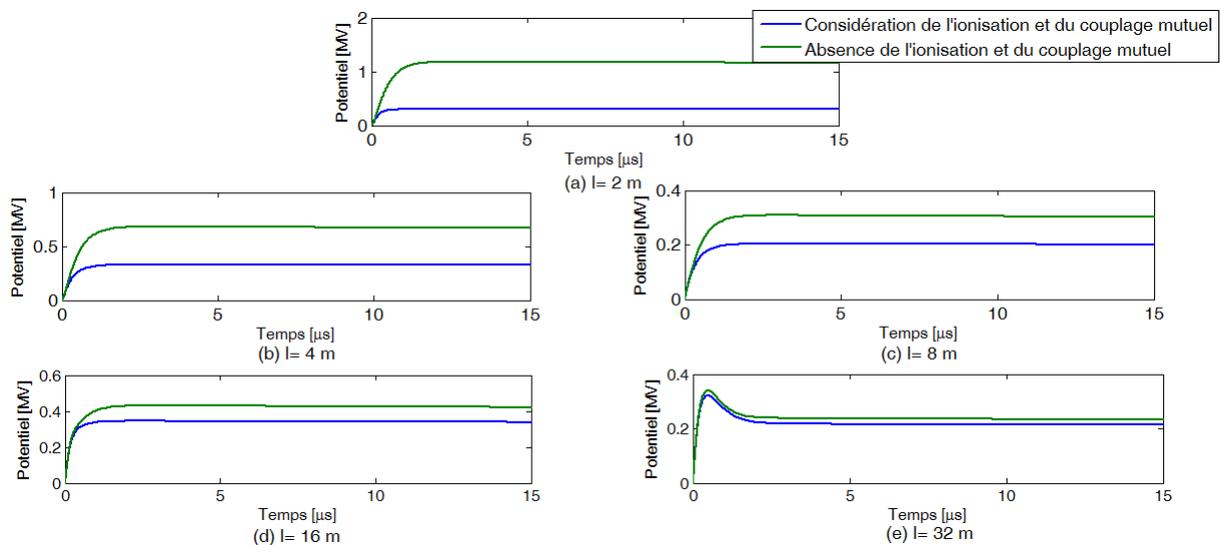


FIGURE 5.13: Variation temporelle du potentiel transitoire au point d'injection en présence et en absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

Nous constatons, des résultats présentés sur figure 5.13 relatifs à la variation du potentiel au point d'injection, que le potentiel est faible lors de l'incorporation des deux phénomènes à savoir l'ionisation du sol et le couplage entre les segments. Une telle diminution est due au fait que l'impact de l'ionisation du sol est plus significatif que celui du couplage mutuel. Par ailleurs, l'écart entre les potentiels calculés en absence et en présence des phénomènes suscités diminue au fur et à mesure que la longueur de l'électrode augmente.

Dans le but de montrer dans quel(s) milieu(x) l'ionisation a eu lieu, nous traçons sur la figure 5.14 l'évolution temporelle du rayon de l'électrode et celui du volume cylindrique de la bentonite en fonction de la longueur de l'électrode, et ce en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel.

Cette figure montre bien que l'ionisation au niveau de la bentonite n'apparaît que pour l'électrode dont la longueur ne dépasse pas 8 m. Cependant, l'ionisation du sol

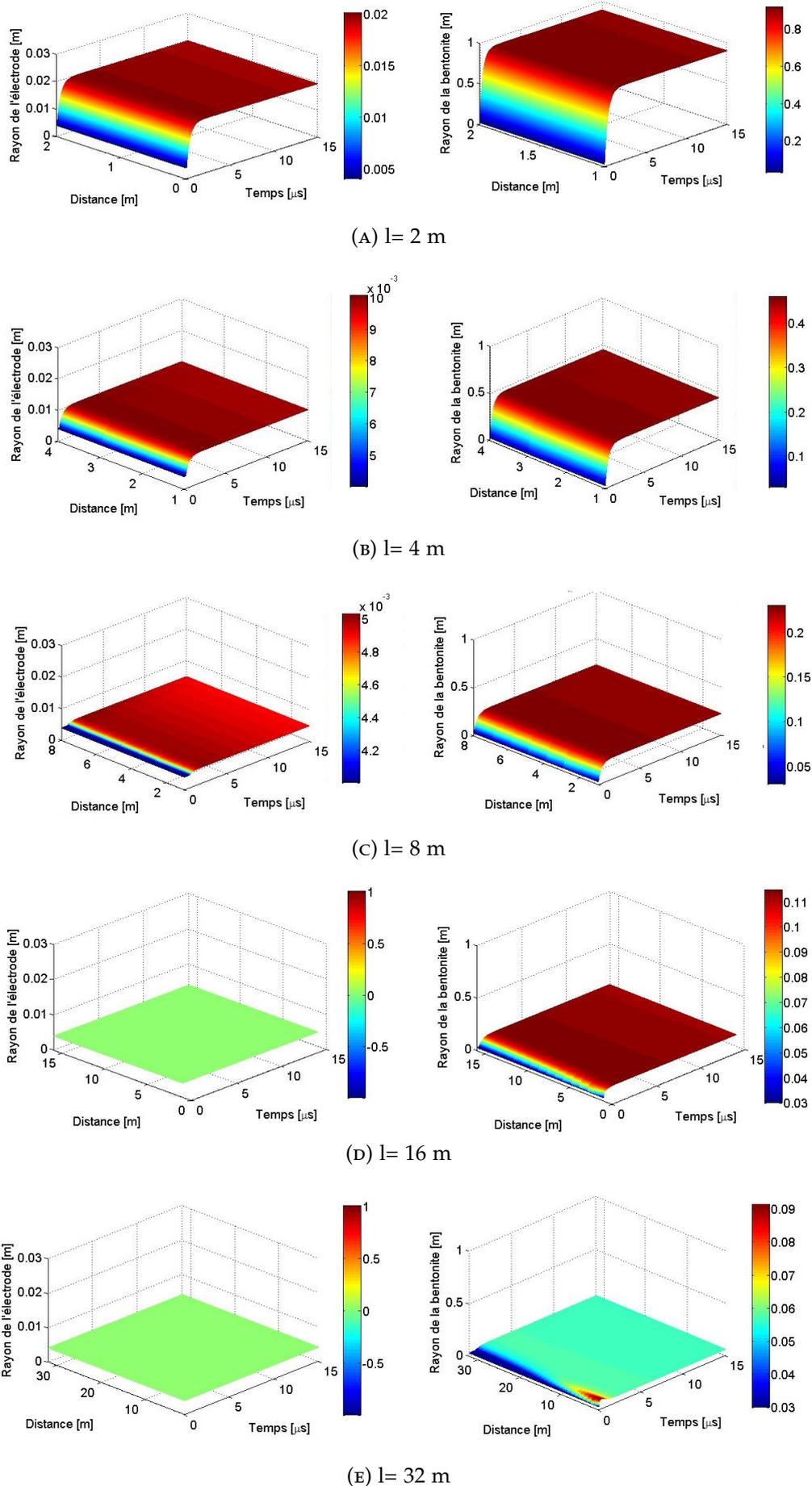


FIGURE 5.14: Evolution du rayon du conducteur et celui de la bentonite le long de l'électrode, en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

est générée pour toutes les longueurs de l'électrode. Pour un milieu donné (bentonite ou sol), le rayon du milieu ionisé diminue avec l'augmentation de la longueur de l'électrode. Pour l'électrode de longueur 2 m, presque 66 % du volume de la bentonite est ionisée (rayon du conducteur ionisé 20 mm et rayon du volume de la bentonite 30 mm), devant 33 %, et 16 % pour les longueurs de 4 et 8 m respectivement. Par ailleurs, le sol a été ionisé d'un rayon de 1 m pour l'électrode de 2 m, contre 0,45, 0,22, 0,11 et 0,09 m pour les longueurs de 4, 8, 16 et 32 m respectivement.

Les résultats précédents relatifs au potentiel concernent uniquement le point d'injection. Les figures 5.15 et 5.16 illustrent respectivement l'évolution du potentiel et celle du courant transitoires en fonction de la longueur de l'électrode couverte de bentonite. Ceci permet d'examiner leurs répartitions le long de l'électrode en question.

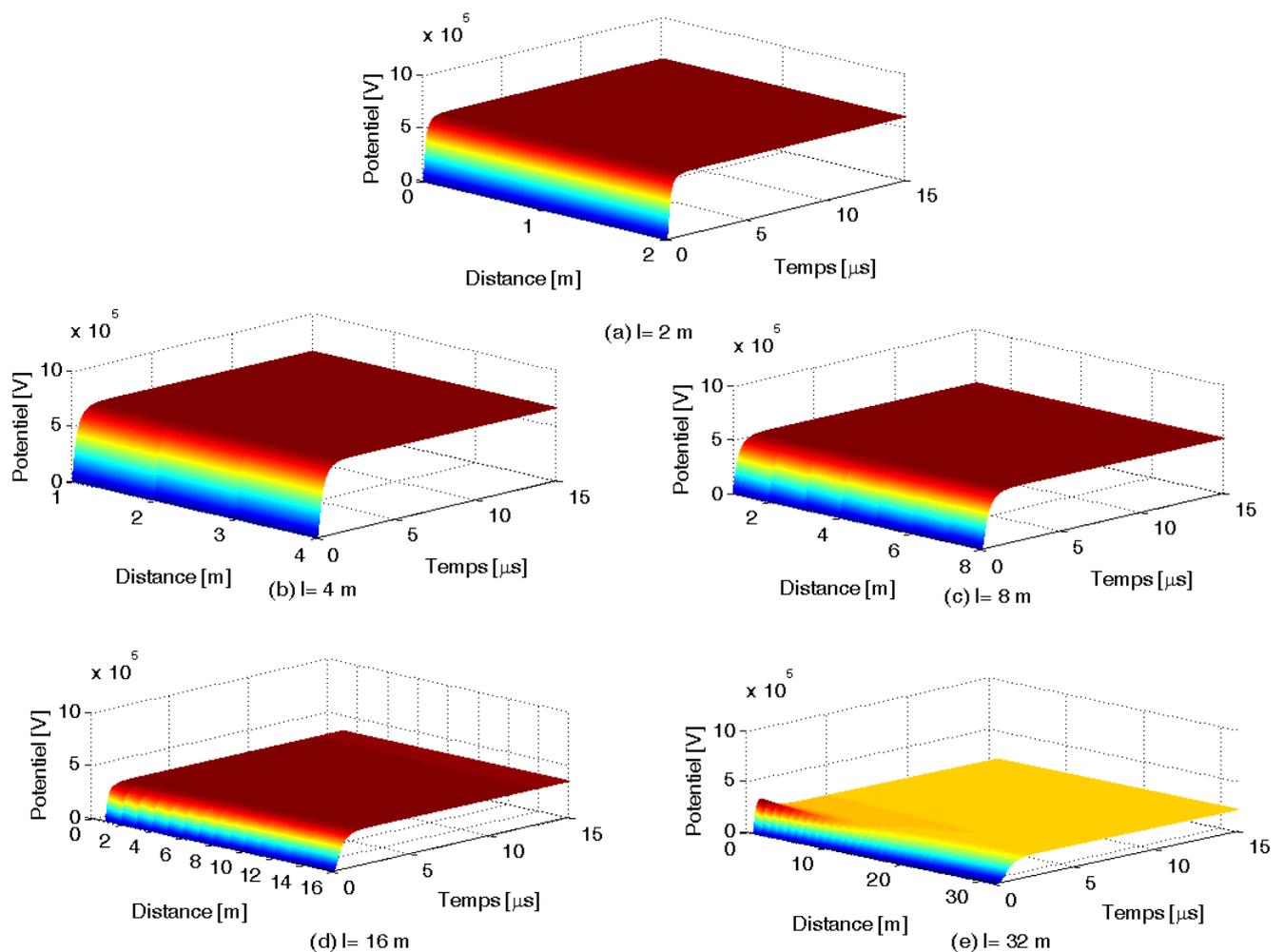


FIGURE 5.15: Evolution du potentiel transitoire le long de l'électrode de mise à la terre couverte de bentonite, en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

De la figure 5.15, une très légère diminution pratiquement (non visible) a été enregistrée le long de l'électrode de longueur inférieure ou égale à 16 m. Cette diminution devient visible pour l'électrode ayant la longueur la plus élevée (32 m). Par ailleurs, le courant transitoire diminue le long de l'électrode comme illustré sur la figure 5.16.

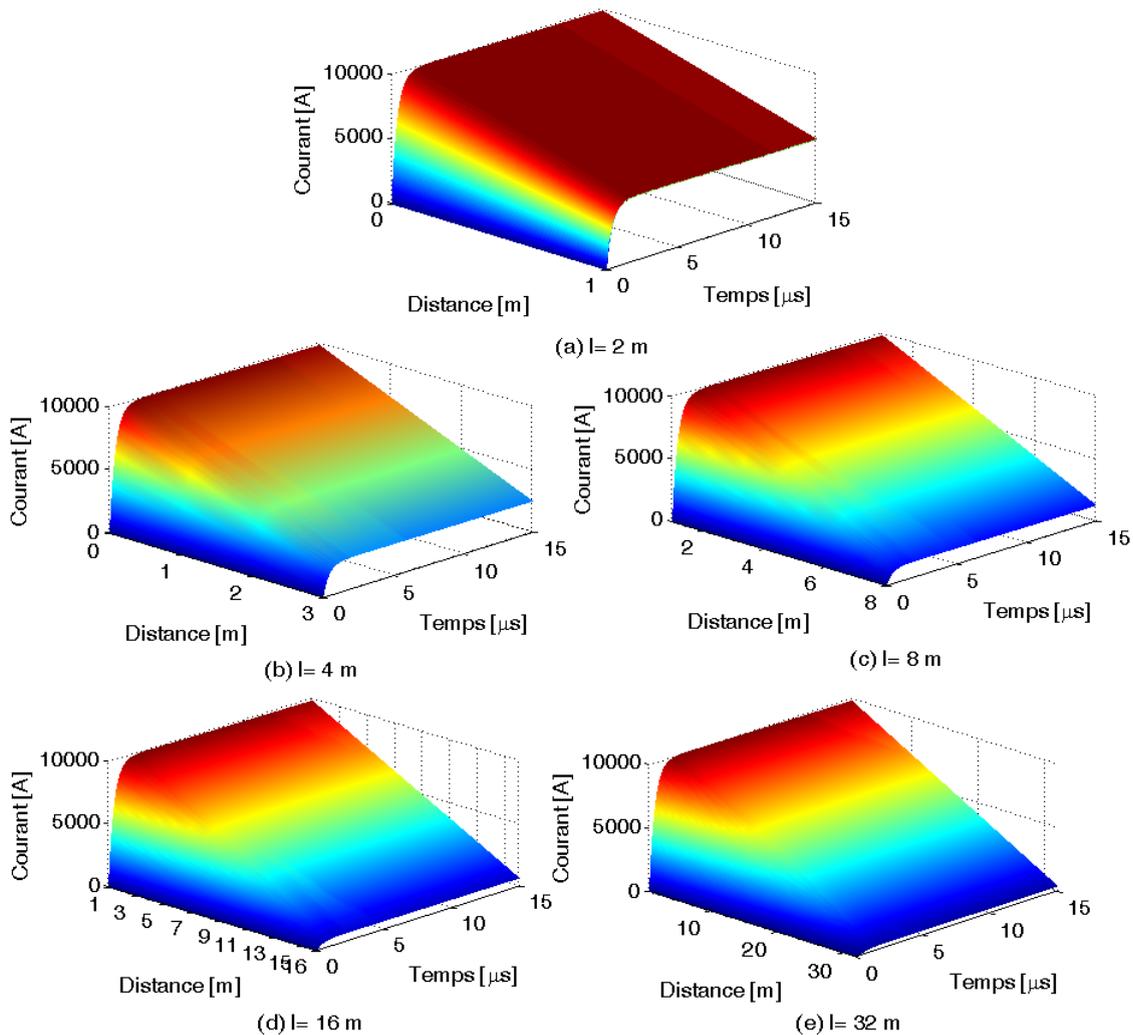


FIGURE 5.16: Evolution du courant le long de l'électrode couverte de bentonite, en présence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel

Comme recommandation, pour diminuer aussi bien le potentiel que le courant transitoires le long de l'électrode couverte de bentonite, il faut augmenter soit la longueur de l'électrode, soit le rayon du volume cylindrique de la bentonite.

5.3.3.2 Impédance impulsionnelle

Dans cette section, nous présentons la variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode qui varie dans la gamme 2 à 32 m. Une telle évolution est illustrée sur la figure 5.17, et ce en présence et en absence de l'ionisation du sol et du couplage mutuel.

Avec l'augmentation de la longueur de l'électrode, l'impédance impulsionnelle diminue rapidement pour dans la gamme [2 16] m, et lentement ailleurs. Pour une longueur donnée de l'électrode, il est évident que l'impédance impulsionnelle est plus faible lors de l'utilisation de la bentonite. Simplement, l'écart entre les impédances, initialement important pour les courtes électrodes, diminue avec l'augmentation de la longueur de l'électrode. En effet, pour les électrodes de 2 et 4 m, l'écart dépasse 100 % contre 50 % et

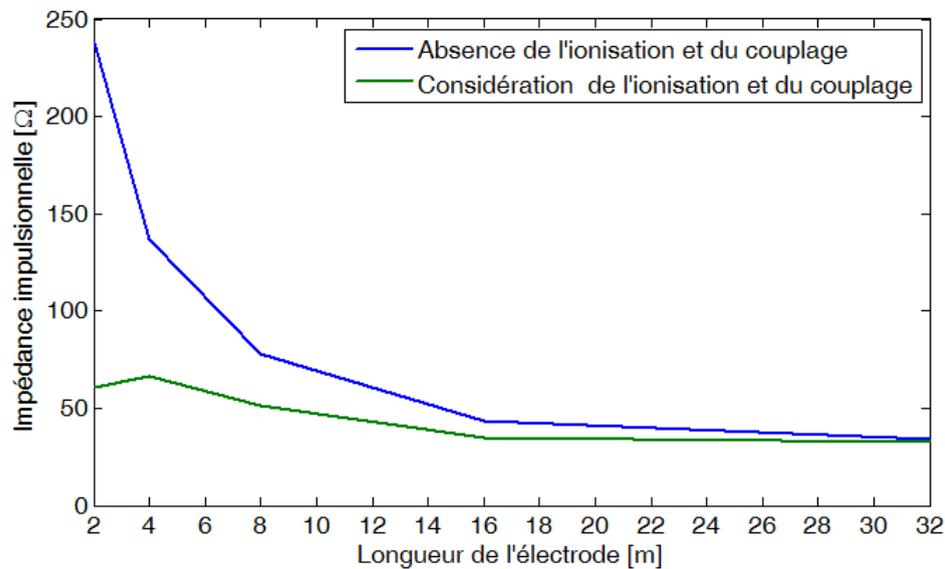


FIGURE 5.17: Impédance impulsionnelle en fonction de la longueur, en présence et en absence de l'ionisation et du couplage mutuel

20 % pour les électrodes de 8 et 16 m et uniquement 8 % pour l'électrode de 32 m. Ceci est expliqué par le fait que l'ionisation du sol et/ou de la bentonite est importante pour les électrodes de de 2 à 8 m et moins ailleurs.

La variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode a été également examinée en faisant varier l'amplitude du courant (les autres paramètres étant maintenus les mêmes). Les valeurs ainsi adoptées sont 0,1, 0,5, 1, 5 et 10 kA. Les résultats sont présentés sur la figure 5.18.

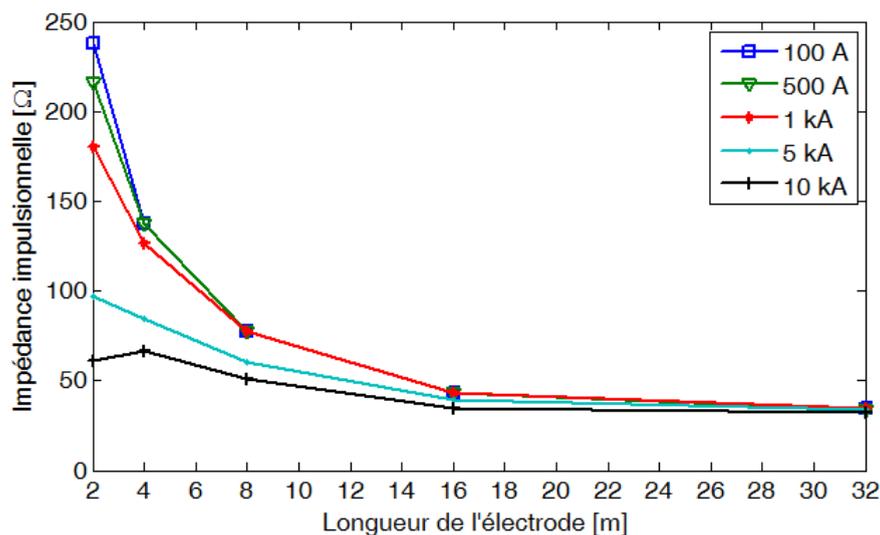


FIGURE 5.18: Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur d'électrode pour différentes amplitudes du courant injecté, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel

De cette figure, il est évident que, pour une longueur donnée de l'électrode, l'impédance impulsionnelle augmente lorsque le courant diminue, et vice versa. De même que

précédemment, l'écart entre les impédances, initialement considérable pour les faibles longueurs de l'électrode, diminue avec l'augmentation de la longueur de l'électrode.

Dans ce qui suit, la variation de l'impédance impulsionnelle est examinée en variant seulement le rayon du volume cylindrique de la bentonite, et en incorporant l'ionisation du sol et le couplage mutuel. Les rayons ainsi choisis sont 15, 30 et 60 mm. L'amplitude du courant est fixée à 10 kA. Les autres paramètres ont été maintenus inchangés. Les résultats sont représentés sur la figure 5.19.

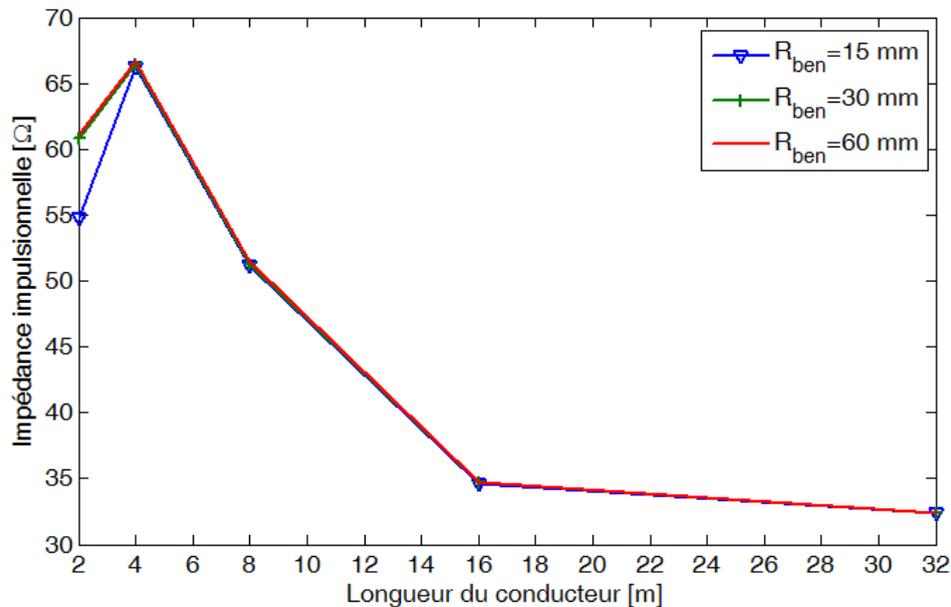


FIGURE 5.19: Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur d'électrode pour différents rayons du volume de la bentonite, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel

La figure 5.19 montre que le rayon du volume de bentonite n'a pas d'incidence sur l'impédance impulsionnelle de l'électrode de 4 m et plus. Cependant, l'électrode de 2 m possède une impédance impulsionnelle plus faible dans le cas où le rayon de la bentonite est de 15 mm. Les calculs ont montré que lors de l'ionisation, le rayon de l'électrode de 2 m atteint 15 mm. Cela veut dire que le volume de bentonite est totalement ionisé, car le rayon de l'électrode ionisé dépasse celui du volume de bentonite.

Nous nous sommes également intéressés à étudier l'influence de la résistivité/ permittivité relative du sol entourant la bentonite sur l'impédance impulsionnelle de l'électrode, et ce en présence de l'ionisation et du couplage mutuel. A l'exception des caractéristiques électriques du sol qui ont été variées ($1300 \Omega m / 10$, $5000 \Omega m / 7$ et $10000 \Omega m / 5$), les autres paramètres demeurent inchangés. Les résultats ainsi obtenus sont illustrés sur la figure 5.20.

Selon les résultats présentés sur la figure 5.20, nous constatons que, pour une longueur donnée de l'électrode, l'augmentation de la résistivité du sol (diminution de la permittivité) engendre une augmentation de la valeur de l'impédance impulsionnelle.

Finalement, l'impact de la forme du courant de foudre sur l'impédance impulsionnelle a été examiné en étudiant la variation de celle-ci le long de l'électrode, lors de

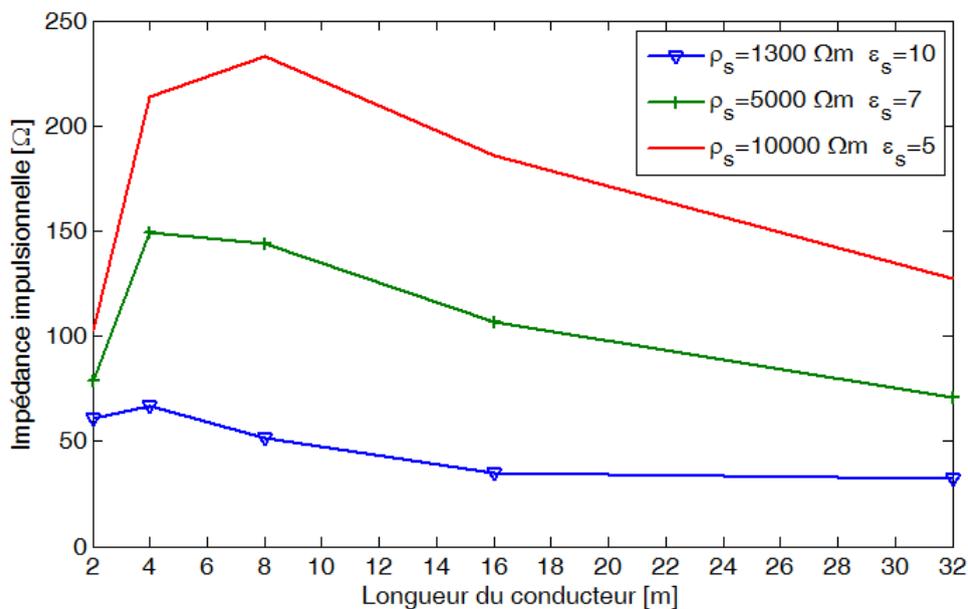


FIGURE 5.20: Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur d'électrode pour différentes résistivités/permittivités relatives du sol, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel

l'injection d'un courant de premier coup ou un courant de coup subséquent. Les phénomènes relatifs à l'ionisation et le couplage ont été pris en compte. Les autres paramètres électro-géométriques ont été maintenus inchangés. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 5.21.

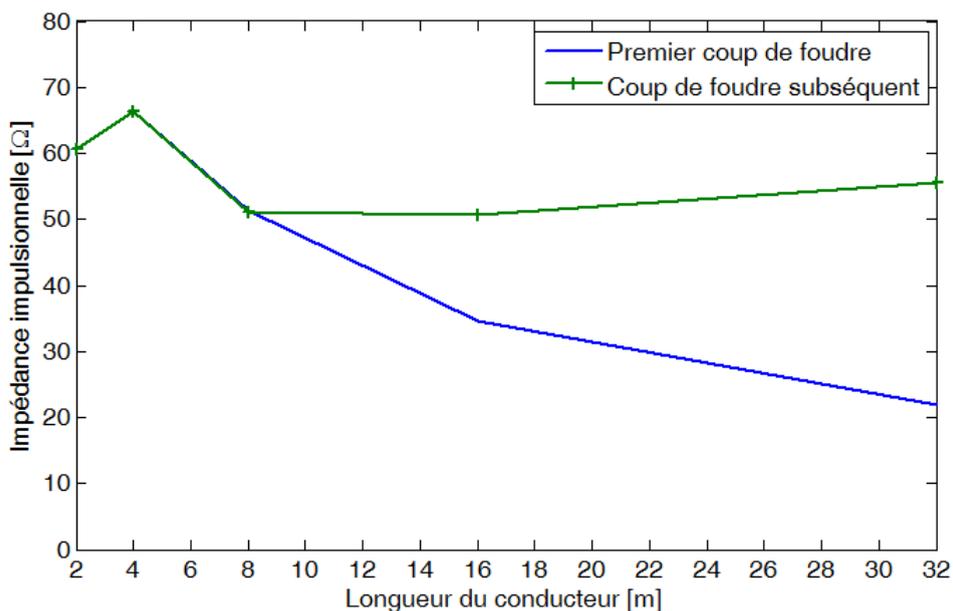


FIGURE 5.21: Variation de l'impédance impulsionnelle en fonction de la longueur de l'électrode lors de l'injection de deux types des courants de foudre, en présence de l'ionisation et du couplage mutuel

Les résultats de la figure 5.21 montrent que, pour les longueurs de l'électrode entre 2 et 8 m, la variation de l'impédance impulsionnelle obtenue lors de l'injection du premier

coup de foudre, coïncide parfaitement avec celle estimée en injectant le coup subséquent. Cependant, l'écart entre les deux impédances ne fait qu'augmenter lorsque la longueur croît dans l'intervalle]8, 32] m. Ceci est dû à l'augmentation de l'impédance impulsionnelle de l'électrode soumise au coup subséquent, contre la diminution de celle obtenue en injectant le premier coup du même courant.

5.4 Conclusion

Nous retenons du présent chapitre les principaux points suivants :

- L'augmentation du rayon de la bentonite engendre une diminution de la partie réelle de l'impédance des courtes électrodes et une réduction à la fois de la partie réelle et celle imaginaire de cette impédance pour les longues électrodes. En effet, le module de l'impédance diminue dans les deux cas.
- L'augmentation de la résistivité du sol entourant la bentonite engendre une diminution de l'impédance en hautes fréquences pour les courtes électrodes ; de telles électrodes possèdent un comportement capacitif. Ce comportement sera suivi par un autre inductif lors de l'utilisation de longues électrodes.
- Pour les courtes électrodes, l'ionisation apparaît dans la bentonite et dans le sol. Pour les longues électrodes, l'ionisation s'effectue plutôt dans le sol entourant la bentonite. Ce phénomène provoque une réduction du potentiel transitoire notamment pour les courtes électrodes.
- L'augmentation du courant injecté augmente le volume ionisé, qui a pour effet de diminuer le potentiel transitoire.
- L'augmentation du rayon de la bentonite engendre une diminution du champ électrique généré dans le sol, ce qui diminue l'impact de l'ionisation.
- L'injection du premier courant de foudre ou du courant de foudre subséquent de même amplitude dans les courtes électrodes donne la même valeur de crête de potentiel transitoire. Pour les longues électrodes, le potentiel transitoire est plus élevé lors de l'injection du courant de coup de foudre subséquent. Ceci serait dû au caractère inductif de l'électrode au vu de sa longueur importante.

Conclusion Générale

Dans cette présente étude, nous avons analysé le comportement transitoire des différents systèmes de mise à la terre par application de la méthode des lignes de transmission. Dans le domaine fréquentiel, nous avons analysé la variation de l'impédance en fonction de la fréquence pour les électrodes installées dans un sol homogène et verticalement stratifié ainsi que pour les électrodes verticales entourées de bentonite. Dans le domaine temporel, nous avons étudié le potentiel transitoire des systèmes de mise à la terre (électrodes et grilles) enfouis dans un sol homogène. Lors de cette étude, l'ionisation du sol et le couplage mutuel inter-segments ont été incorporés. Nous avons exploité les résultats obtenus pour l'étude du comportement longitudinal de l'électrode ainsi que l'analyse de la caractéristique potentiel-courant (V-I). En outre, nous avons exploité la théorie des lignes de transmission pour examiner le potentiel transitoire des électrodes horizontales enfouies dans un sol verticalement stratifié et celui des électrodes verticales couvertes de bentonite installées dans un sol fortement résistif.

Le premier travail est relatif à la variation de l'impédance des électrodes verticales et horizontales enfouies dans un sol homogène. En effet, nous nous sommes intéressés à étudier la variation de l'impédance de mise à la terre en module et en composantes réelle et imaginaire en fonction de la fréquence. Les résultats correspondant montrent que le comportement inductif est le plus prépondérant lorsqu'il s'agit d'utiliser des électrodes de plus de 10 m enterrées dans un sol de résistivité ne dépassant pas $1000 \Omega m$. En effet, avec l'accroissement de fréquence, le module de l'impédance de telles électrodes augmente suite à l'augmentation de sa composante réelle et/ou imaginaire. Des pics de résonance apparaissent sur l'impédance des électrodes installées dans un sol de résistivité dépassant $1000 \Omega m$. Pour les électrodes moins de 10 m enfouies dans un sol de résistivité supérieures ou égale à $1000 \Omega m$, le comportement capacitif est prépondérant.

Lors de l'injection du courant au milieu de l'électrode, une réduction de 50 % a été enregistrée au niveau de la valeur maximale du module de l'impédance lorsque cette électrode est installée dans un sol de résistivité ne dépassant pas $1000 \Omega m$, contre 20 % ailleurs (résistivité supérieure à $1000 \Omega m$).

Comme exploitation du modèle de ligne de transmission dans le domaine fréquentiel, nous avons étudié l'impédance des électrodes horizontales enfouies dans un sol stratifié verticalement. Une légère réduction au niveau des impédances en hautes fréquences a été enregistrée lors de l'injection du courant dans l'extrémité se trouvant dans la couche la moins résistive.

Le second travail a porté sur l'étude du comportement transitoire des systèmes de mise à la terre en utilisant la représentation d'état basée sur les lignes de transmission.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés uniquement à la présentation (mise en équations) et à la validation du modèle proposé. Les phénomènes de l'ionisation du sol et du couplage mutuel entre les segments ont été pris en compte. Plusieurs configurations (électrodes et grilles) et différents sols ont été considérés. Nos résultats ont été confrontés avec succès à ceux rapportés dans la littérature, validant ainsi les codes de calculs que nous avons développés.

Le modèle précédemment décrit et validé a été exploité. En effet, les impacts de la longueur des électrodes, de l'amplitude du courant injecté et des paramètres électriques (résistivité et permittivité) du sol ont été examinés. En outre, les réponses d'une électrode soumise au courant de premier coup de foudre et de coup de foudre subséquent ont été étudiées.

L'injection du courant au point milieu de l'électrode horizontale de 100 m offre une réduction de 50 % de la valeur de crête du potentiel transitoire lorsque l'électrode est enterrée dans un sol de résistivité ne dépassant pas $1000 \Omega m$, contre uniquement 14 % dans le cas des sols à résistivité supérieure.

Une électrode de 10 m possède un comportement inductif lorsqu'elle est enfouie dans un sol de résistivité ne dépassant pas $100 \Omega m$. En éloignant du point d'injection, ce comportement devient de plus en plus résistif. Par ailleurs, le comportement des électrodes enfouies dans un sol de $1000 \Omega m$ est purement capacitif.

Le comportement transitoire d'une électrode horizontale de 20 m enfouie dans un sol stratifié verticalement a été également étudié. Le potentiel et le courant transitoires le long de l'électrode ont été présentés pour différents emplacements de cette électrode dans les deux couches constituant le sol. Les résultats ainsi obtenus montrent que le potentiel transitoire est plus faible lors de l'injection du courant dans l'extrémité de l'électrode se trouvant dans la couche la moins résistive.

Le diagramme V-I pour une électrode horizontale de 100 m soumise aux courants impulsionnels a été également développé et interprété. La forme du diagramme dépend de la résistivité/permittivité relative du sol. En effet, ce diagramme forme une seule boucle lors de l'utilisation d'un sol de résistivité inférieure à $5000 \Omega m$. En s'éloignant du point d'injection, la caractéristique V-I se penche vers l'axe des courants. Dans le cas de l'installation de l'électrode dans le sol de résistivité supérieure ou égale à $5000 \Omega m$, le cycle de caractéristique V-I sera constitué de deux boucles formant un "8" incliné. En s'éloignant du point d'injection, la caractéristique V-I se penche vers l'axe des potentiels.

Le modèle des lignes de transmission que nous avons développé a été exploité, cette fois-ci, pour modéliser le comportement, dans le domaine fréquentiel, des électrodes verticales plongées dans la bentonite caractérisée par une faible résistivité ($10 \Omega m$). Cette dernière est entourée de sol fortement résistif (résistivité supérieure à $1000 \Omega m$). Nos résultats consistant à la variation du module de l'impédance en fonction de fréquence ont été confrontés avec succès à ceux rapportés dans la littérature. Conformément à l'étude paramétrique qui a été effectuée, nous avons constaté que l'augmentation du volume cylindrique de la bentonite engendre une diminution du module de l'impédance. Ceci est dû à la diminution de la partie réelle de l'impédance des courtes électrodes (inférieures à 8 m) (la partie imaginaire étant inchangée), et à la diminution des deux parties (réelle et imaginaire) de l'impédance des longues électrodes (de 8 m et plus). Lors de

l'augmentation de la résistivité du sol entourant la bentonite, le module de l'impédance des courtes électrodes augmente tout en gardant son comportement capacitif. Pour les longues électrodes, un comportement inductif précédé par un autre capacitif est obtenu lorsque les électrodes sont enfouies dans un sol fortement résistif.

Finalement, nous nous sommes intéressés à étudier la réponse transitoire consistant en le potentiel transitoire et l'impédance impulsionnelle des courtes et longues électrodes verticales précédemment citées. L'utilisation de la bentonite induit à une réduction du potentiel transitoire. Cette réduction est d'autant plus importante que l'électrode est courte. Pour les courants dont l'amplitude est de 10 kA, l'ionisation est générée à la fois dans la bentonite et le sol lors de l'utilisation des électrodes inférieures à 8 m, et uniquement dans le sol ailleurs (électrodes de 8 m et plus). Pour une longueur donnée de l'électrode, l'augmentation de l'amplitude du courant injecté engendre l'augmentation du volume ionisé, ce qui induit à une diminution du potentiel transitoire et donc de l'impédance impulsionnelle de l'électrode en question. Lors de l'injection du courant du premier coup de foudre ou de coup de foudre subséquent de même amplitude, la même valeur de crête du potentiel transitoire est obtenue pour les courtes électrodes. Cependant, le potentiel transitoire obtenu en injectant le courant de coup de foudre subséquent est plus élevée lors de l'utilisation de longues électrodes, dû au caractère inductif supplémentaire engendré par la longueur excessive de telles électrodes.

Bibliographie

- [1] E. B. Joffe and K. S. Lock. *Ground for grounding*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2010.
- [2] AFNOR. *Norme Française 17102 : Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage*. Juillet 1995.
- [3] J. He, R. Zeng, and B. Zhang, *Methodology and technology for power system grounding*. John Wiley and Sons Singapore Pte. Ltd, 2013.
- [4] Bernou Aissa. *Caractéristiques des systèmes de mise à la terre d'une installation HT utilisant CYM GRD et FEMM. Proposition d'un circuit électrique équivalent dans le cas des hautes fréquences*. Thèse de magistère Ecole Nationale Polytechnique. 2011.
- [5] IEEE Standards. *IEEE guide for safety in ac substation grounding*. IEEE Standard 80-2000 ,Revision of IEEE Standard 80-1986 New York 2000 .
- [6] S. Visacro. Comprehensive Approach To The Grounding Response. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol 22, No 11, pp 381-387. 2007.
- [7] S. Cattaneo, A. Geri and G. M. Veca. Transient behavior of grounding systems simulation : remarks on the EMTP's and Special Code's Use'. *21st EMTP users group meeting, 92-016*. Kolympari Crete, Greece, 5-7 June 1992.
- [8] H. Rochereau. Response of earth electrodes when fast fronted currents are flowing out. *EDF Buletin de la Direction des Etudes et Recherches*. Série B, (2). Paris, France, pp 13-22. 1988.
- [9] B. Nekhoul, P. Labie, F. X. Zgainski, G. Meunier, F. Morillon and S. Bourg. Calculating the Impedance of a Grounding System. *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 32. N 3. pp :1509–1512. 1996
- [10] B. Nekhoul, C. Guerin, P. Labie, G. Meunier, R. Feuillet, X. Brunotte . A Finite Element Method For Calculating The Electromagnetic Fields Generated by Substation Grounding Systems. *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 31. N 11. pp :2150-2153. 1995
- [11] M. Akbari, K. Sheshyekani, M. R. Alemi. The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 55 , N 4, pp. 739-746. 2013.
- [12] L. Grcev. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, N 12, pp. 815-823. 1996.

- [13] L. Grcev, M. Popov. On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, N 12, pp. 1598-1603. 2005.
- [14] A. De Conti and S. Visacro. A Simplified Model To Represent Typical Grounding Configurations Applied In Medium Voltage And Low Voltage Distribution Lines. *IX International Symposium on Lightning Protection*. November 2007.
- [15] D. Poljak, S. Sesnic, S. V. Tkachenko, K. El Khamlichi Drissi and K. Kerroum. Time Domain Analysis of the Horizontal Grounding Electrode : Antenna theory approach versus transmission line approximation. *Proceedings of the 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2014)*, Gothenburg, Sweden, pp. 181-185. September 1-4, 2014.
- [16] B. Nekhoul, D. Poljak, D. Sekki, D. Cavka, B. Harrat, K. Kerroum and K. El Khamlichi Drissi. An Efficient Transient Analysis of Realistic Grounding Systems : Transmission Line Versus Antenna Theory Approach. *Engineering Analysis with Boundary Elements* 48 (2014) pp.14-23
- [17] S. Sundberg and J. Ekman. PEEC modeling of antenna characteristics. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Portland, Oregon, USA, August 2006.
- [18] P. Yutthagowith, A. Ametani, N. Nagaoka and Y. Baba. Application of the Partial Element Equivalent Circuit Method to Analysis of Transient Potential Rises in Grounding Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 53, N 3, pp.726-736. August 2011.
- [19] L. Yang, G. N. Wu, X. B. Cao. An optimized Transmission Line Model of Grounding Electrodes Under Lightning Currents, *Science China Technological Science*. Vol. 156. pp. 335-341. 2013.
- [20] A. Geri. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents : the model and its validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, N 13, pp. 1008-1017. July 1999.
- [21] Y. Liu, M. Zitnik, R. Thottappillil. An Improved Transmission-Line Model of Grounding System. *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*. Vol. 43, N 3, pp. 348-355. August 2001.
- [22] E. D. Sunde. Earth Conducting Effects in Transmission Systems. *Dover publications Inc*. New York. 1968.
- [23] A. Geri, G. M. Veca, E. Garbagnati and G. Sartorio. Non-linear behaviour of ground electrodes under lightning surge currents : computer modelling and comparison with experimental results. *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 28, N 2, pp. 1442-1445. March 1992.
- [24] L. Grcev and M. Heimbach. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 12, N 11, pp. 172-178. January 1997.
- [25] G. Celli, E. Ghiani, F. Pilo . Behaviour of Grounding Systems : A Quasi-Static EMTP Model And Its Validation. *Electric Power Systems Research*. Vol. 85. pp. 24-29. 2012.

- [26] F. Terman. *Radio Engineers Handbook*. N.Y, *Mc Graw-Hill Book Company*. 1943.
- [27] M. Graciet and J. Pine. Protection contre les perturbations .Réf : D5172. *Techniques de l'ingénieur*. Août 1998
- [28] C. Bouquegneau. *Doit-on craindre de la foudre*. *EDP Sciences* 2006.
- [29] E. Kuffel , W.S. Zaengl and J. Kuffel. *High Voltage Engineering*. 2nd edition. *Butterworth-Heinemann*. Great Britain. 2000.
- [30] T. Horvath. *Understanding Lightning and Lightning Protection : A Multimedia Teaching Guide*. co-publication between *Research Studies Press Limited* and *John Wiley & Sons*.
- [31] M. A. Uman. *The Lightning Discharge*. *Academic Press*. 1987.
- [32] D. Dib. *L'Impact de La Foudre Sur les Réseaux Electriques Etude , Analyse et Modélisation Option*. Thèse De Doctorat D'état. *Université Badji Mokhtar Annaba*. 2007.
- [33] M. Aguet and M. Lanoz. *Haute tension.Traité d'électricité vol. 22 of 22*. 1991.
- [34] B. Harrat, *Caractérisation et Optimisation Numérique d'une Mise à la Terre*. Thèse de doctorat en sciences, Université de Jijel, Avril 2008.
- [35] Norm IEC 62305-1. *Protection Against Lightning. Part 1 : General Principles*. IEC 2006.
- [36] V. Cooray. *Lightning protection*. *Institution of Engineering and Technology*. London, United Kingdom. 2010.
- [37] Norm IEC 62305-3. *Protection Against Lightning. Part 3 : Physical Damage to Structure and Life Hazard*. IEC 2006.
- [38] L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT. *Caractéristiques Électriques du sol*. *Union Internationale des Télécommunications*. 2002.
- [39] P. H. Pretorius. *Engineering Perspectives on Soil Properties Important to the Design and Performance of Earth Electrodes at Low and High Frequency*. *International Symposium on High Voltage Engineering*. Pilsen, Czech Republic. August 2015.
- [40] Norm IEC 61024-1-2. *Protection of Structures against Lightning—Part 1-2 : General Principles — Guide B— Design, Installation, Maintenance and Inspection of Lightning Protection Systems*. IEC 1998.
- [41] L. Yaquing. *Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning : Modelling and Experiments*. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology* 1015. ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS UPPSALA 2004.
- [42] D. F. da Silva Santos. *Lightning Protection according to IEC 62305*. Thesis to obtain the Master of Science Degree in Electrical and Computer Engineering. Técnico Lisboa . November 2015.

- [43] Y. Pelenc. Interruption des circuits alimentés en courant continu. D4700. Techniques de l'ingénieur.
- [44] BS 6651, Protection of Structures against Lightning. 1992.
- [45] SS CP33. Code of Practice for Lightning Protection. 1996.
- [46] Norme Française NFC 17100. Protection des structures contre la foudre. Installation des paratonnerres. AFNOR. Décembre 1997.
- [47] G. Vijayaraghavan, M. Brown, and M. Barnes, Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection. IDC Technologies, 2004.
- [48] T. Rouibeh. Contribution à la modélisation et à la simulation des prises de terre des installations électriques. Thèse de doctorat. Université Sétif. 2015.
- [49] C. A. Balanis. Advanced Engineering Electromagnetics. 2nd edition. *John Wiley & Sons*.USA.
- [50] J. C. Sabonnadière et J. L. Coulomb. Calcul des champs électromagnétiques. Ref : D3020. *Techniques de l'Ingénieur*. traité Génie électrique.
- [51] O. Biro and K. Preis. On the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of the Three Dimensional Eddy Current. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, N 4, pp. 3145-3159. July 1989.
- [52] F. Dawalibi and D. Mukhadar, "Optimum Design of Substation in Two Layer Earth Structure, Part 1- Analytical Study , *IEEE Transactions on Power Apparatus Systems*, Vol. PAS-94, No 2. pp. 252-261, March / April 1975.
- [53] K. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Vol. 14. 1966.
- [54] R. Xiong, B. Chen, C. Gao , Y. Yi and W. Yang. FDTD calculation model for the transient analyses of grounding systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 56, NO. 5, PP : 1155-1162.OCTOBER 2014.
- [55] P. Tu Vu, N. Ben Huynh and D. Khoa Nguyen. Simulation of Lightning-Transient Responses of Grounding Systems Using the RBF-FDTD Method. IPEC 2012.
- [56] R. Xiong, B. Chen, B. Zhou, and C. Gao. Optimized Programs for Shaped Conductive Backfill Material of Grounding Systems Based on the FDTD Simulations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, NO. 4, PP : 1744-1751. AUGUST 2014.
- [57] L. Grcev and F. Dawalibi. An electromagnetic model for transients in grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, N 5. November 1990.
- [58] B. Zhang, J. He, J. Lee , X. Cui, Z. Zhao, J. ZouI, and S. Chang. Numerical Analysis of Transient Performance of Grounding Systems Considering Soil Ionization by Coupling Moment Method With Circuit Theory. *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 41, NO. 5, PP : 1440-1443,MAY 2005.

- [59] K. Sheshyekani, S. H. Sadeghi, and R. Moini. A Combined MoM-AOM Approach for Frequency Domain Analysis of Nonlinearly Loaded Antennas in the Presence of a Lossy Ground. *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, Vol. 56, NO. 6, PP : 1717-1724. JUNE 2008.
- [60] H. R. Karami, R. Moini, S.H. Sadeghi, and K. Sheshyekani. Transient Response of Nonlinearly Loaded Antennas Above a Lossy Dielectric Half-Space : A Modified MoM-AOM Approach. *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, Vol. 54, NO. 4, PP : 922 -930. AUGUST 2012
- [61] A. Allal and M. Djillali. Calcul des éléments parasites par la méthode PEEC. *CN-CEM'09 – 1ère Conférence Nationale sur la Compatibilité électromagnétique*.
- [62] N. Theethayi, Y. Baba, F. Rachidi, and R. Thottappillil. On the choice between transmission line and full-wave Maxwell's equation for transient analysis of buried wires. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. Vol. 50, N 12, pp. 347-357. 2008.
- [63] D. Grenier. *Electromagnétisme et transmission des ondes*. Université Laval, Québec. 2005.
- [64] O. Kherif, S. Chiheb ; M.Teguar, A. Mekhaldi. On the analysis of lightning response of interconnected wind turbine grounding systems. *5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B) 2017*.
- [65] O. Kherif, S. Chiheb, M. Teguar, A. Mekhaldi, N. Harid. Time-Domain Modeling of Grounding Systems' Impulse Response Incorporating Nonlinear and Frequency-Dependent Aspects. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. Vol. 60, N 4. pp. 907 – 916. 2018.
- [66] J.P. Pérez, R. Carles et R. Fleckinger. *Electromagnétisme*. 4ème édition. Dunod. Décembre 2001.
- [67] O. Kherif, S. Chiheb ; M.Teguar, A. Mekhaldi. Induced potential effect on pipelines nearby grounding systems. *5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B) 2017*.
- [68] S. Bourg, B. Sacepe, and T. Debu. Deep Earth Electrodes In Highly Resistive Ground : Frequency Behavior. *IEEE International Symposium On Electromagnetic Compatibility*. 1995.
- [69] C. R. Paul. *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*. John Wiley & Sons. 1994.
- [70] M. I. Lorentzou, N. D. Hatziargyriou, and B. C. Papadias. Time Domain Analysis of Grounding Electrodes Impulse Response. *IEEE Transactions On Power Delivery*. Vol. 18, N 2, pp.517-524. April 2003.
- [71] S. Chiheb, O. Kherif, M. Teguar, A. Mekhaldi. Transient behavior of vertical grounding electrode under impulse current. *5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B) 2017*.

- [72] S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Incorporation of soil ionization and mutual coupling in transient study of horizontal grounding electrode using TLM. *5th International Conference on Electrical Engineering - Boumerdes (ICEE-B) 2017*.
- [73] S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Impedance nature of long horizontal grounding electrode employing TLM. Papier envoyé à la *Conférence Internationale On Sciences Et Technologies Electriques Au Maghreb (CISTEM 2018)*.
- [74] R. J. Gustafson, R. Pursley and V. D. Albertson. Seasonal Grounding Resistance Variations On Distribution Systems. *IEEE Transactions On Power Delivery*. Vol. 5, N 2, pp. 1013-1018. April 1990.
- [75] J. He, Y. Gao, R. Zeng, W. Sun, J. Zou and Z. Guan. Optimal design of grounding system considering the influence of seasonal frozen soil layer. *IEEE Transactions On Power Delivery*. Vol. 20, N 1, pp. 107-115. January 2005.
- [76] S. Visacro, A. Soares. HEM – A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 20, N 2. April 2005.
- [77] Y. Q. Gao. Research on mechanism of soil breakdown and transient characteristics of grounding systems Ph.D. Dissertation *Tsinghua University*. Beijing. 2003.
- [78] 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 Application*. Vol. 51, N 16, pp. 5324-5334. November - December 2015.
- [79] N. Bennis. Représentation d'état des systèmes linéaires continus et commande dans l'espace d'état par placement des pôles . Site : www.specialautom.net.
- [80] ZHAO Zhiyan. Modélisation à l'aide de l'équation différentielle. *Université Nice*.
- [81] B. Stout. Méthodes numériques de résolution d'équations différentielles. *Université de Provence*, 2007.
- [82] K. M. Hangos, J. Bokor, G. Szederkényi. Analysis and control of nonlinear process systems. *Springer-Verlag London Limited*. 2004.
- [83] R. Velazquez and D. Mukhedkar. Analytical Modelling of Grounding Electrodes Transient Behavior. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 103, N 16, pp. 1314-1322. 1984.
- [84] E. Oettle. A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes'. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Vol. 3, N 14, pp. 2020-2029. 1988.
- [85] T. K. Manna and P. Chowdhuri. Generalized equation of soil critical electric field E_c based on impulse tests and measured soil electrical parameters. *IET Generation Transmission and Distribution*. Vol. 1, no. 5, pp. 811-817, Sept 2007.
- [86] N. M. Nor, A. Haddad and H. Griffiths. Characterization of Ionization Phenomena in Soils Under Fast Impulses. *IEEE Transaction on Power Delivery* Vol. 21, N 11, pp. 353-361. 2006.

- [87] S.Yu, J. Zou, J. He, R. Zeng, Y. Gao and J. Guo. Time domain analysis method of lightning transient characteristics of grounding electrode. *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, China*. November 2003.
- [88] S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi and N. Harid. Transient behaviour of grounding electrodes in uniform and in vertically stratified soil using State Space Representation. *IET Science, Measurement & Technology*. Vol. 12, Issue 4, pp. 427-435, July 2018.
- [89] S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Longitudinal behaviour of grounding electrodes subjected to lightning currents using SSR based TLM. Papier envoyé à la *Conférence Internationale On Sciences Et Technologies Electriques Au Maghreb (CISTEM 2018)*.
- [90] Ricardo R. Diaz and Jose N. Silva. Space Charge and Soil Ionization : An Electrokinetic Approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 18, No. 6 ; December 2011.
- [91] F. E. Asimakopoulou, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos. I-V curves for the determination of the ionization voltage in soil samples. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Germany, August 22-26, 2011.
- [92] E. J. Fagan and R. H. Lee. The use of concrete-enclosed reinforcing Rods : Grounding Electrodes. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*. Vol IGA -6 No. 4 July /august 1970. PP :337-348
- [93] J.G. Sverak, R.U. Benson, W.K. Dick, T.H. Dodds, D.L. Garret, J.E. Idzkowski, R.P. Kell, S.G. Patel, M.E. Ragan, G.E. Smith, R. Verma and L.G. Zukerman. SAFE SUB-STATION GROUNDING- PART II. Report of the Substation Committee Working Group 78. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 10 October 1982. PP : 4006-4022
- [94] Y. Khan, F.R. Pazheri, N.H. Malik, A.A. Al-Arainy and M.I. Qureshi. Novel approach of estimating grounding pit optimum dimensions in high resistivity soils. *Electric Power Systems Research* Vol. 92 (2012) pp. 145–154
- [95] E. Al-Ammar, Y. Khan, N. Malik and N. Wani. Development of Low Resistivity Material For Grounding Resistance Reduction. *IEEE International Energy Conference 2010*.
- [96] Y. Khan, N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, M. I. Qureshi, and F. R. Pazheri. Efficient Use of Low Resistivity Material For Grounding Resistance Reduction in High Soil Resistivity Areas. *IEEE Region 10 Conference TENCON 2010*.
- [97] A. A. Al-Arainy ; Y. Khan ; M. I. Qureshi ; N. H. Malik ; F. R. Pazheri. Optimized pit configuration for efficient grounding of the power system in high resistivity soils using low resistivity materials. *Fourth International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization 2011*.
- [98] M.B. Kostic, Z.R.Radakovic, N.S. Radovanovic and M.R.Tomasevic-Canovic. Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud. *IEE Proceedings on Generation, Transmission & Distribution..* Vol. 146, No. 1. January 1999.

- [99] C. Gomes, C. Lalitha and C. Priyadarshane. Improvement of earthing systems with backfill materials. *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010*.
- [100] S. C. Lim, M. Z. A. Ab Kadir, C. Gomes and S. D. Buba. Preliminary Results of the Performance of Grounding Electrodes Encased in Bentonite-Mixed Concrete. *31st International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.
- [101] V. Laverde, M. Z. A. Ab Kadir and C. Gomes. Performance of Backfill Materials Under Impulse and AC Testings. *31st International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.
- [102] S. C. Lim, C. Gomes and M. Z. A. Ab Kadir. Electrical earthing in troubled environment. *Electrical Power and Energy Systems*. Vol. 47 (2013) pp. 117–128
- [103] J. Jasni, L. K. Siow, M. Z. A. Ab Kadir and W. F. Wan Ahmad. Natural Materials As Grounding Filler For Lightning Protection System. *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010*.
- [104] Y. Tu, J. He and R. Zeng. Lightning Impulse Performances of Grounding Devices Covered With Low-Resistivity Materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, NO. 3, JULY 2006. PP :1706-1713.
- [105] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos. Transient Impedance of Grounding Rods Encased in Ground Enhancing Compounds. *31st International Conference on Lightning Protection (ICLP)*.
- [106] R. J. Cabral, D. S. Gazzana, A. B. Tronchoni, G. A. D. Dias, R. C. Leborgne, A. S. Bretas and M. Telló. Comparative Performance of Impulsive Grounding Systems Embedded in Concrete : an Experiment in Reduced Scale. *33rd International Conference on Lightning Protection - ICLP 2016*.
- [107] V. P. Androvitsaneas, I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos. Experimental study on transient impedance of grounding rods encased in ground enhancing compounds. *Electric Power Systems Research*. Vol. 139, pp. 109-115. October 2016.
- [108] V. P. Androvitsaneas ; I. F. Gonos and I. A. Stathopoulos. Research and applications of ground enhancing compounds in grounding systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*. Vol. 11, No 13, pp. 3195 – 3201, September 2017.

Principaux travaux effectués dans le cadre de cette thèse de Doctorat D/LMD

Publication internationale :

- S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi, N. Harid. "Transient behaviour of grounding electrodes in uniform and in vertically stratified soil using state space representation". IET Science, Measurement & Technology. Volume 12, Issue 4, July 2018, PP. 427-435.

Communications internationales :

- S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Incorporation of soil ionization and mutual coupling in transient study of horizontal grounding electrode using TLM. 5th International Conference on Electrical Engineering - (ICEE-B) 2017, INSPEC Accession Number : 17429791. 29-31 October 2017. Boumerdes-Algeria.
- S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Transient behavior of vertical grounding electrode under impulse current. 5th International Conference on Electrical Engineering (ICEE-B) 2017. INSPEC Accession Number : 17429798. 29-31 October 2017. Boumerdes-Algeria.
- S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Longitudinal behaviour of grounding electrodes subjected to lightning currents using SSR based TLM. Conférence Internationale On Sciences Et Technologies Electriques Au Maghreb (CISTEM 2018), 28-31 October 2018. Algiers- Algeria.
- S. Chiheb, O. Kherif, M. Tegar, A. Mekhaldi. Impedance nature of long horizontal grounding electrode employing TLM. Conférence Internationale On Sciences Et Technologies Electriques Au Maghreb (CISTEM 2018). 28-31 October 2018. Algiers- Algeria.